

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program Geodézie a kartografie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dokumentace historických objektů malými
laserovými skenery a vizualizace pomocí VR

Autor: Bc. Martin Hudeček

Vedoucí Práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Katedra: geomatiky

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: <u>Bc.Hudeček</u>	Jméno: <u>Martin</u>	Osobní číslo: <u>460384</u>
Zadávací katedra: <u>geomatiky</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geomatika</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Dokumentace historických objektů malými laserovými skenery a vizualizace pomocí VR</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Documentation of historical objects with small laser scanners and visualization using VR</u>	
Pokyny pro vypracování: Provedte rešerši na téma laserové skenovací systémy pro podzemní prostory v délce min. 10 stran; soustřeďte se na mobilní a lehce transportovatelné systémy a jejich přesnost. Popište princip a technické specifikace laserových osobních mobilních skenerů typu SLAM (zejména ZEB-REVO). Analyzujte přesnost a vhodnost zařízení ZEB-REVO pro 3D dokumentaci podzemních objektů, zaměřte se na zkoušky přesnosti inerciální jednotky a přesnosti pořizování podrobných bodů vytvářeného mračna. Definujte a znázorněte metodiku sběru a vyhodnocení dat (pomocí textu a vývojového diagramu). Z existujících nebo nově pořízených dat podzemních prostor (Jáchymovsko) vytvořte model a dále jej převedte pomocí technologie VR do vhodné vizualizace. Zhodnoťte výsledky a doporučte nejvhodnější postup dokumentace obdobných objektů.	
Seznam doporučené literatury: Capturing the Reality of Tunnel Warfare with 3D Mobile Laser Scanning. Zdroj: https://geoslam.com/blog/2019/10/21/capturing-the-reality-of-tunnel-warfare-with-3d-mobile-laser-scanning/ Pflug, R. Využití virtuální reality při dokumentaci a vizualizaci památkových objektů. Diplomová práce, Katedra geomatiky, FSv ČVUT, 2020, https://dspace.cvut.cz/handle/10467/88558 Kraus, K. Photogrammetry-Geometry from Images and Laser Scans. DeGruyter, 2007, Translated by: Ian A. Harley and Stephen Kyle, https://doi.org/10.1515/9783110892871 Zlot, Robert & Bosse, Michael. (2012). Efficient Large-Scale 3D Mobile Mapping and Surface Reconstruction of an Underground Mine. Springer Tracts in Advanced Robotics. 92. 10.1007/978-3-642-40686-7_32.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>prof. Dr. Ing.Karel Pavelka</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>17.2.2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>17.5.2021</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>17.2.2021</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1. autorského zákona

V Praze dne _____

Martin Hudeček

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi, městu Boží Dar za poskytnutí přístupu do podzemních prostor pro skenování, panu Ing. Karlu Pavelkovi za rady týkajících se virtuální reality a tvorby modelů a své rodině za finanční a psychickou podporu během celého studia.

Abstrakt

Cílem této práce je najít moderní způsob vytváření a uchovávání přesného 3D modelu podzemních objektů. Základní částí práce je vytvoření a zpracování modelu historického podzemního objektu - štoly Johannes a její následná vizualizace ve virtuální realitě (VR). Data ve formě mračen bodů byla získána pomocí mobilních laserových skenerů ZEB-Revo a ZEB-Revo Horizon. K úpravě data byl použit software Cloud Compare a Geomagic Wrap. Dále je popsána technologie přenosu dat do VR, v závěru práce je popsána vizualizace ve VR a vyhodnocení postupu.

Klíčová slova

Laserové skenování, vizualizace, Cloud Compare, Geomagic, GeoSLAM, virtuální realita, Unreal Engine, podzemní objekt, Mobilní laserové skenery

Abstract

The aim of this thesis is to find a modern way of creating and preserving an accurate 3D model of underground objects. The basic part of the work is the creation and processing of a model of a historic underground object - the Johannes Gallery and its subsequent visualization in virtual reality (VR). Data in the form of point clouds were obtained with ZEB-Revo and ZEB-Revo Horizon mobile laser scanners. Cloud Compare and GeoMagic Wrap software were used to edit the data. Furthermore, the technology of data transfer to VR is described, at the end of the work is described the visualization in VR and evaluation of the procedure.

Keywords

Laser scanning, visualization, Cloud Compare, GeoMagic, GeoSLAM, virtual reality, Unreal Engine, underground object, mobile laser scanners

Seznam použitých zkratk

VR	Virtuální realita
3D	Three-dimensional, třírozměrný
2D	Two-dimensional, dvourozměrný
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping (lokalizace a mapování zároveň)
UE	UNREAL ENGINE
CC	Cloud Compare
GNSS	Global Navigation Satellite System (Globální družicový polohový systém)
INS	Inertial Navigation System
IMU	Inertial Measurement Unit

Obsah

1	Úvod	9
2	Rešerše literatury	10
2.1	Možnosti dokumentace prostor s laserovými skenery	10
2.2	VR	14
3	Technologie sběru prostorových bodů – laserové skenery	16
3.1	Co je laserový skener?	16
3.2	Historie	16
3.3	Mobilní skenery	19
4	3D SLAM	20
4.1	Co je 3D slam?	20
4.2	Osobní mobilní laserové skenery	20
4.3	GeoSLAM	21
5	VR	23
6	UNREAL ENGINE 4	24
7	Štola Johannes	25
8	Použitý přístroj	27
9	Provedení měření	40
10	Metodika provedení prací	43
10.1	Diagram prací	43
10.2	Provedení měření	43
10.3	Výpočet a úprava mračna	43
10.4	Převod to UE	56
10.5	Problémy se zpracováním v CC	58
10.6	Zpracování modelu v GeoMagic	61
11	Vizualizace objektu	66
11.1	Vizualizace v GeoMagic Wrap	66
11.2	Vizualizace v Unreal Engine 4	69
11.3	Vizualizace ve VR	73
12	Závěr	76
13	Literatura	77

1 Úvod

Náplní této diplomové práce je najít moderní způsob vytváření a uchování přesného 3D modelu podzemních objektů. Tato práce má dvě hlavní témata. Po rešerši literatury, v první části je popis získávání dat zejména použitím ručního mobilního laserového skeneru, analýza přesnosti dat a různé možnosti jejich využití. Druhou částí je převod 3D modelu do virtuální reality (VR) z hlediska nejlepší a nejrychlejší metody.

Vlastní cíle práce:

cílem měření je otestovat použitelnost zařízení ZEB-Revo v podzemí, vytvořit moderní přesnou a ucelenou dokumentaci hlavní části štoly Johannes v katastru města Božího Daru v Krušných horách a umožnit dále její virtuální návštěvu metodami VR.

2 Rešerše literatury

Následující rešerše je zaměřena na:

- a) způsoby vytvoření 3D modelů,
- b) na využití virtuální reality (VR).

Prostorové modely lze vytvořit různými způsoby a s různou přesností. Nejstarší způsob je klasické geodetické zaměření a konstrukce objektu v určitém softwaru (AutoCAD, MicroStation atd.). Modelováním objektů se zabýval např. R. Gaidytė a A. Stanionis ve svém díle *2D and 3D Buildings Modeling by Geodetic Measurements Data* z roku 2011.

Výrazná modernizace a automatizace postupů nastala v devadesátých letech minulého století s rozvojem výpočetní techniky, laserového skenování a automatizovaných postupů fotogrammetrie, založených na obrazové korelaci (SfM – Structure from Motion nebo také IBMR – Image Based Modeling and Rendering).

2.1 Možnosti dokumentace prostor s laserovými skenery

Pod pojmem laserového skeneru je možno si představit zařízení, které v krátkém čase motorizovaným měřením definuje blízké objekty pomocí neselektivního měření (v jistém rastru) prostorových bodů. Tato zařízení se vyvíjela od devadesátých let a existuje celá řada technických řešení. Základem jsou laserové skenery ToF (Time of Flight), kdy se jedná o opakované motorizované měření laserovým dálkoměrem. Vzdálenost k jednotlivým bodům se vypočítá z doby letu laserového paprsku „tam a zpět“. Jinou možností, přesnější, ale na kratší vzdálenosti, jsou fázové laserové skenery, které využívají pro určení vzdálenosti fázového rozdílu vyslaného a přijatého paprsku. Dalšími možnostmi jsou pak triangulační skenery, pracující na principu triangulace ze známé základny s laserovým ukazovátkem nebo ryze optické systémy, sestávající z dvou a více digitálních kamer.

Do těchto technologií lze zařadit nakonec i digitální automatizovanou fotogrammetrii (SfM či IBMR), jelikož dochází k postupnému snímání objektu digitální kamerou, a tedy i jistému způsobu skenovacího procesu.

Jelikož se jedná o využití různých technologií jak s využitím laseru, tak i bez něj, je lépe hovořit od 3D skenování. Výsledkem ze všech technologií je mračno bodů. Jeho následné zpracování je již jinou záležitostí.

Literatura na téma vytváření 3D modelů pomocí 3D skenerů je velmi rozsáhlá, zde je využit stručný náhled na celou problematiku, cílený na další postupy této diplomové práce.

Popisný článek autorů M. Edla, M. Mizeráka a J. Trojana z roku 2018 (*3D Laser Scanners: History and Applications*) dává náhled do historie a prvních aplikací laserových skenerů. V roce 1960 vznikl první 3D laserový skener, který měl řadu omezení a téměř neměl využití. Po roce 1985, kdy přišly na trh osobní počítače, se technologie teprve začala rozvíjet. V roce 1996 byl společností *Cyberware Laboratories* vytvořen první, rychlý a relativně přesný skener. Pomocí mechanického ramene byl vytvořen první texturovaný model hlavy pro animační důvody. Tato technologie má využití při rozpoznávání materiálu, ve stavebním průmyslu, reverzním inženýrství (3D tisk - schopnost reprodukovat již existující objekt na základě jeho digitálního modelu), lékařství, designu, monitoringu objektů, mapování, ve forenzní analýze či policejní praxi (například sken nehody) a další [1].

Disertační práce P. Jaška z roku 2018 *Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring* předkládá odborné teoretické základy skenovacích systémů, hodnotí jejich přesnost, možné vlivy na přesnost, ukazuje současný stav skenovacích zařízení a využívané transformace získaného mračna bodů. Tato práce poskytla i určitý náhled na problematiku díky experimentům [2].

Publikace *Ground-based Laser Scanners: Operation, systems and Applications*, kterou vytvořili autoři D. Lichti, S. Gordon a M. Stewart v roce 2002, poskytuje náhled do logické funkčnosti pozemních skenerů, podrobně popisuje přesnost, rozptyl paprsku, vhodnou orientaci skeneru a možnou deformaci skenovaného objektu v závislosti na jeho náklonu a materiálu. Také mimo jiné popisuje, jak některé z těchto deformací odstranit, nebo je minimalizovat. Zajímavá část této práce je například sekce *Observables and Transformations*, kde dokonale popisují transformační rovnice [3].

Článek *From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites* zpracoval autor N.A. Haddad roku 2010. Popisuje různé laserové skenery pro dokumentaci historických objektů. Díky tomuto článku lze získat určitý náhled na použití skenerů s ohledem na různé druhy prostředí. Laserové skenery jsou vhodné na zachycení pozemních či podzemních objektů, nicméně mají i různé nevýhody. Například sklo odráží signál

jen částečné, ale od obou svých ploch, určitá část signálu sklem prochází a tím vytváří chybný model. Podobným příkladem jsou ale i velmi tmavé, černé či červené materiály, které laserový paprsek z části pohlcují [4].

Článek *Surveying and Documentation of Detailed Historical Heritage by Laser Scanning* zpracovaný pěticí autorů (C. Altuntas, F. Yildiz, H. Karabork, M. Yakar, L. Karasaka) z roku 2007 popisuje použití laserových skenerů pro historické objekty střední velikosti, které jsou velmi členité; zde pro tvorbu 3D modelu a vystižení malých detailů je potřeba dosáhnout maximální přesnosti. Použitý skener byl statický Optech I Ilris 3D. Důvodem skenování bylo vytvoření modelu pro vědce a historiky, aby mohli objekt zkoumat, aniž by se ho dotýkali; dotykem či kontaktním měřením by mohli tento artefakt poškodit. Tento článek ukazuje na další zajímavé využití skenerů [5].

Článek *Evaluation of laser scanner performance in documentation of historical and architectural ruins, a case study in Konya* sepsaný šesticí autorů (viz [6]) z roku 2010 popisuje nutnost využití laserových skenerů pro dokumentaci ruin, vzniklých zchátralostí objektů ať už časem, zvětráváním nebo válkou. Obecné tvary ruin se špatně dokumentují klasickými geodetickými postupy. Laserové skenování je zde kombinováno s fotogrammetrií, čímž se zajistí nejen mračno bodů, ale i barva jednotlivých bodů, pokud laserový skener není vybaven kamerou [6]. Jak dále popisuje D. Lichti [3], laserové skenování se dá opakovat několikrát v krátkém čase s mikroposunem stanoviska pro získání ještě větší přesnosti.

Článek *3D documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study: Byzantine Water Cistern, Istanbul* byl vypracovaný sedmi autory (viz [7]) z roku 2013. Po vytvoření mračen bodů a operaci filtrování byly pro každou sadu dat mračen filtrovaných bodů vytvořeny síťové modely, jež byly vyhlazeny na minimální, střední a maximální úroveň. Existuje několik metod pro povrchovou rekonstrukci. Jednou z nich jsou křivky B-spline (NURBS), které se běžně používají kvůli jejich přesnosti. Delaunayova triangulační metoda je další metodou, která je především oblíbená pro mnoho komerčních typů softwarů jako „Geomagic“ a „Rapidform“. Kvalita sítě ovlivňuje přesnost výsledku [7].

Publikace *Aplikace pozemního laserového skenování v geovědních disciplínách*, vypracovaná čtveřicí autorů Ústavu geoniky Akademie věd České republiky z roku 2014 poskytuje velmi podrobný náhled na technický postup práce pro podzemní dokumentaci objektů s využitím laserových skenerů. V práci byla využita „stop and go“ metoda, která je pomalejší, nicméně postup práce je velmi podobný s mobilním skenováním. Podle této publikace je třeba nejprve geodeticky

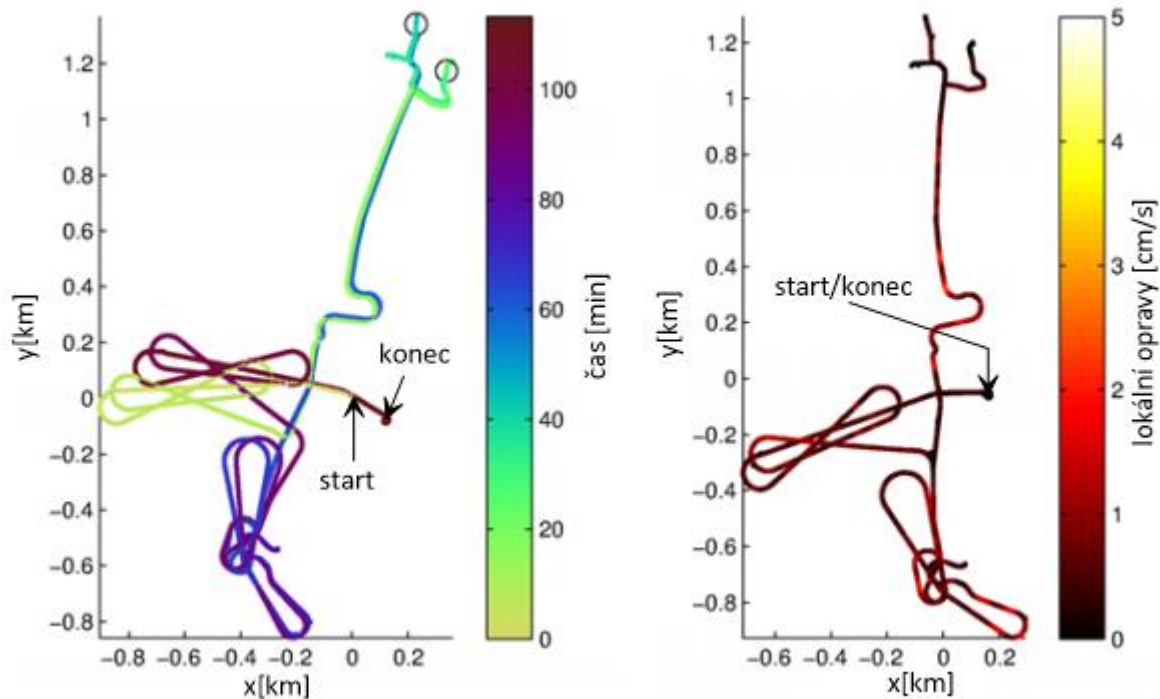
zaměřit jednotlivá stanoviška, na která pak bude laserový skener umístěn. Následně se poté do skeneru zadají souřadnice stanoviška a vzniklé mračno bodů je pak automaticky georeferencováno. Tato publikace nejen popisuje technické provedení, ale popisuje i jiné možnosti uplatnění laserových skenerů v hornických, geotechnických či geologických problémech. Tyto úkony nejsou popsány podrobně, nicméně podávají obecný náhled do problematiky [8].

Diplomová práce *Problematika 3D dokumentace s využitím mobilního prostorového laserového skenování* od autora V. Koláře z Vysoké školy Báňské (VŠB) je z roku 2020. V této práci jsou přehledně zpracovány vlivy, působící na laserové skenery, na přesnost i na funkčnost, především pak ale je zde srovnání statické a mobilní metody sběru dat. Z práce vyplývají výhody i nevýhody obou metod [9].

Dále je zde popis pulsního a fázového měření délky, který laserové skenery využívají. Tyto znalosti jsou nezbytné k pochopení fungování laserových skenerů [10].

Článek *Efficient Large-Scale 3D Mobile Mapping and Surface Reconstruction of an Underground Mine* vytvořený dvojicí autorů (R. Zlot a M. Bosse) v roce 2012 popisuje vytvoření funkční SLAM technologie, která vznikla kvůli časové náročnosti předchozích postupů měření v dolech, aneb „*stop-and-scan*“, kde skener zaměřil data na jednom stanovišku a poté o několik metrů dále znovu. 3D SLAM technologie byla vyvinuta společností *CSIRO* z Austrálie a byla vytvořena jako kombinace 2D skeneru a inerciální jednotky upevněné na rotační podložce k vozidlu. K tomu bylo pro přesné pokrytí 360° zorného pole nainstalovány dva pevné lidary LMS291, které byly k sobě otočeny zády, jelikož oba pokrývají 180° zorného pole. Tato práce nám ukazuje, že pro eliminaci chyb je toto „uzavření smyčky“ velmi důležité viz obr.1 [11].

Blog *Capturing the reality of tunnel warfare with 3D mobile laser scanning* od společnosti GEOSLAM z roku 2019 popisuje projekt, který se tematicky blíží tématu této práce, a to skenování tunelu z 1. světové války a jeho převod do virtuální reality. Tento projekt není zaměřen na vysokou přesnost, ale více na pocity uživatele. Po naskenování a převedení do VR byl vytvořen objekt, který byl podobný originálu. Pozorovatel mohl vidět tunel z Francie, který mohl procházet a získat náhled na podmínky, v kterých byli vojáci za 1. světové války. Tento blog ukazuje další možné využití SLAM technologie a VR [12].



A – OTEVŘENÁ SMYČKA

B – UZAVŘENÁ SMYČKA

Obr. 1 – 3D SLAM měření [11]

2.2 VR

Autoři J.M. Zheng, K.W. Chan a I. Gibson roku 1998 v článku *Virtual reality* popisují principy VR technologie a jak se dá s virtuálním světem komunikovat, či se ho „dotýkat“. Již v roce 1998, kdy článek vyšel, existovaly rukavice se senzory, brýle a jiné pomůcky, s jejichž pomocí člověk dokázal nabýt dojmu, že se skutečně nachází v jiném místě, než skutečně je. Využití této technologie je opravdu široké, od tréninku pilotů až po výuku v lékařství [13].

Dílo *Understanding virtual reality—Interface, application, and design* zpracované dvojicí autorů W.R. Sherman a A. B. Craig velmi podrobně rozebírá, co to VR vůbec je, jak by se dala definovat, i přes to, že názory na definici VR se různí. Podle autorů lze VR rozdělit na čtyři základní prvky: virtuální svět, ponoření, smyslová zpětná vazba a míra interaktivity. Čím lépe budou tyto prvky spojeny, tím lepší zážitek z VR bude. Na závěr díla byla definice VR shrnuta do pěti vět. VR je komunikační médium. VR vyžaduje fyzické ponoření. VR stimuluje smysly. VR je interaktivní. VR může psychicky pohltit uživatele [14].

Studie V. Jůvy *Virtuální muzeum a nové možnosti vzdělávání* se zaměřuje na význam virtuálních muzeí a jejich zpracování. Tato práce se zejména zabývá zpracováním kulturního dědictví a jeho

převodem do virtuální reality. Kvalita virtuálních muzeí závisí na kvalitě zpracování modelu, jeho detailech a přesnosti. Také je pojednáváno o hodnotě těchto muzeí pro vzdělávání a možnosti vzdáleného připojení, které pomohou nejen studentům, ale i badatelům, či běžným návštěvníkům [15].

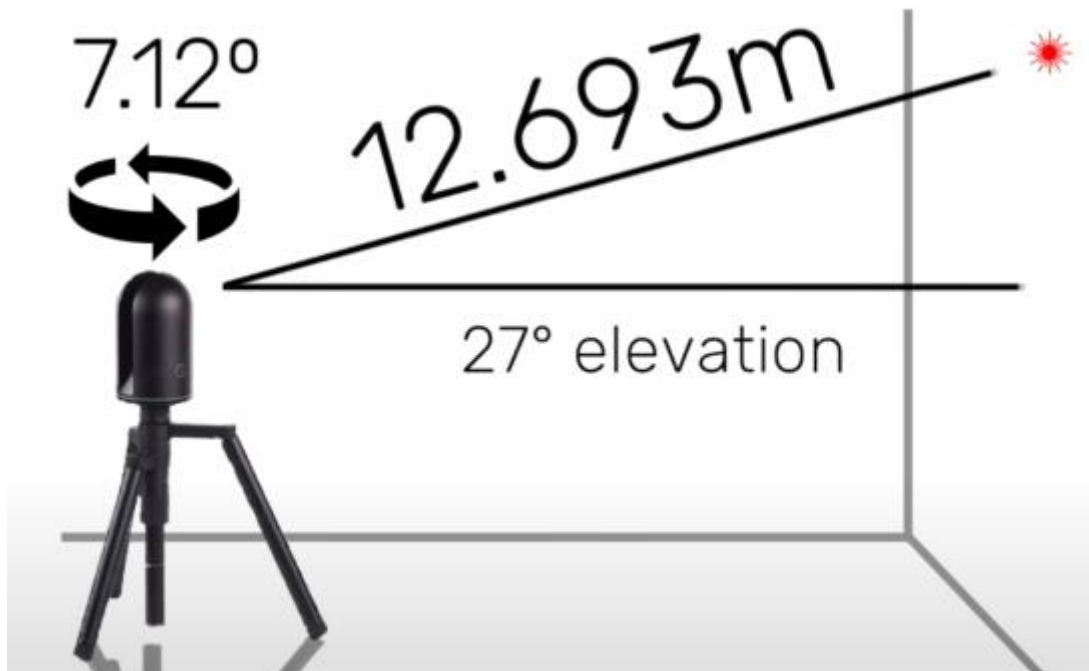
Dílo autora O. Kodyma *Využití virtuální reality pro řízení hlubinného dolu* předkládá informace o moderních technologiích a dále pojednává o tom, co všechno je schopen člověk vybavený exoskeletem, jako například rukavice nebo helma, ve VR ovlivnit. Dále je zde popsáno využití VR pro výcvik a řízení strojů, či provozu v hlubinných dolech [16].

3 Technologie sběru prostorových bodů – laserové skenery

3.1 Co je laserový skener?

Většina systémů laserových skenerů je založena na principu jedné nebo více statických detekcí odrazu vyslaného koherentního laserového paprsku od povrchu objektu. Pokud laserovou jednotku opatříme zařízením, které s ní postupně otáčí ve dvou na sebe kolmých rovinách, dostaneme skenující laserové zařízení, laserový skener [4], [17].

Pro ilustraci je možné nahlédnout na obr. 2, kde jsou pro definovaný typ zařízení jeho parametry.



Obr. 2 – laserové skenery pracují na základě prostorové polární metody [18]

3.2 Historie

3D laserové skenování bylo vyvíjené zejména v poslední třetině 20. století ve snaze přesně vytvořit model povrchů různých předmětů či prostor.

Laserové skenování je poměrně mladé odvětví, První zmínky o něm a první prototypy se objevily v padesátých letech minulého století a jako u všech moderních technologií, prudký rozvoj nastal v posledních třiceti letech díky rozvoji výpočetní techniky [19]).

Tato laserového skenování byla zprvu užitečná v oblastech výzkumu a designu. První technologie 3D skenování byla vytvořena již v 60. letech 20. století [1]. Původní skenery používaly kamery a projektory k definování povrchu. Vzhledem k omezením zařízení samotné skenování objektů často vyžadovalo mnoho času a úsilí, aby se dosáhlo modelu objektu s dostatečnou přesností.

Jednou z prvních praktických aplikací laserového skenování bylo zachycení tvaru osob pro animační potřeby filmového průmyslu. Společnost Cyberware Laboratories of Los Angeles vyvinula aplikaci v osmdesátých letech svým skenerem hlavy, jak je znázorněno na obr. 3.



Obr. 3 - skenování hlavy člověka [1]

V roce 1994 byl uveden na trh firmou *3D scanners* stroj REPLICA, který umožnil rychlé a vysoce přesné skenování velmi členitých objektů. Skener REPLICA znamenal pokrok v laserovém „strip“ snímání. Mezitím firma Cyberware vyvíjela své vlastní přesné skenery, z nichž některé dokázaly zachytit i texturu, ale i přes tento pokrok, o skutečné trojrozměrné skenování se nejednalo.

Původní optické skenery byly drahé; firmy Immersion a Faro Technologies představily relativně levné ručně ovládané digitizéry v roce 1995. Ty by skutečně mohly produkovat kompletní modely, ale byly pomalé, zvláště když měl být model podrobný. Též nemohly zachytit barvu povrchu [1].

3D modeláři byli ve svých požadavcích sjednoceni na požadovaných vlastnostech ideálního skeneru, který by měl být:

- přesný,
- rychlý,
- skutečně 3D,

- schopný zachytit texturu povrchu (barvu),
- levný.

V roce 1996 převzaly 3D skenery klíčové technologie ručně ovládaného ramena a 3D „strip“ skeneru, jež byly zkombinovány, a byl vytvořen rychlý a flexibilní systém. Tento Reality Capture System, přeloženo jako systém zachycení reality, produkuje složité modely a textury těchto modelů s barvou [1].

V roce 1998 vytvořila Cyra Technologies první přenosný laserový skener, který byl pojmenován Cyrax2400 [20]. Tento přenosný skener vážil spolu s baterií a notebookem zhruba 51 kg. Rychlost skenování Cyrax 2400 byla v průměru 800 bodů za sekundu s maximální okamžitou rychlostí 2000 bodů za sekundu [20]. Mohl skenovat pod úhlem (či v zorném poli) $40^\circ \times 40^\circ$ a až 50 metrů proti rovnému bílému povrchu [20].

Po několika letech prodala Cyra technologii Leica Geosystems a Cyrax 2400 byl přejmenován na HDS 2400 [20].

V roce 2002 Leica Geosystems představila HDS 2500, jenž je nástupcem HDS 2400. Jeho zorné pole skenu bylo $40^\circ \times 40^\circ$ s maximální vzdáleností až 100 metrů. Rychlost skenování byla 1500 bodů za sekundu s přesností 6 milimetrů [20].

Roku 2004 uvedla na trh Leica Geosystems skener HDS 300. V přesnosti, rozsahu a rychlosti se nijak nelišil od HDS 2500, ale jeho zorné pole skenu se zvýšilo na $360^\circ \times 270^\circ$. Čímž se stal prvním 360° skenerem. Ve stejném roce přivedl Riegl na trh řadu skenerů, jejichž rychlost skenování byla 12000 bodů za minutu s maximální vzdáleností do 100 metrů. Zorné pole skenu u těchto skenerů bylo $360^\circ \times 80^\circ$ [20].

V roce 2006 byl uveden na trh HDS 6000 se zorným polem skenu $360^\circ \times 270^\circ$ a s přesností 6 milimetrů na 50 metrů. Čas skenu byl 3,5 minuty pro 500 tisíc bodů za minutu. HDS 600 byl prvním skenerem, který razantně zlepšil rozsah svislé osy z 80° na 270° , Výsledkem tohoto zlepšení bylo zjednodušení skenování stropů a objektů nad skenerem mnohem jednodušší [20].

O tři roky později, roku 2009, Leica Geosystems vytvořila laserový skener P20, který jako první překonal hranici 1 milionu bodů za sekundu. Čas skenu se snížil na 6 minut pro plné 360° skenování s přesností 5 milimetrů na 50 metrů [20].

V říjnu 2013 Faro představilo vylepšený skener Focus X330, jenž skenoval rychlostí 976 tisíc bodů za sekund s přesností 5 milimetrů a s maximálním dosahem 330 metrů. Poměrně významná byla cena tohoto skeneru, jelikož s cenou 40 tisíc liber byl o 20 tisíc liber levnější než jeho

konkurence. Levnější cena vedla k tomu, že mnoho společností kupovalo laserové skenery, aniž by byly schopny vytvářet skutečné a použitelné 3D modely z výsledných mračen bodů [20].

Roku 2019 uvedla Leica Geosystems laserový skener RTC 360, který zdvojnásobil rychlost snímání na 2 miliony bodů za sekundu, což vedlo ke snížení času skenování na 30 sekund nebo 90 sekund s barvami. Také je to první skener, jenž používá kamery a IMU, aby mohl sledovat jeho polohu a používat ji pro automatickou registraci (auto-registration) v terénu [20].

3.3 Mobilní skenery

Pod pojmem mobilní skener je nutno si představit skener, který se pohybuje při měření. Jelikož se mění jeho poloha i směr, musí být skener vybaven inerciální jednotkou (INS – inertial navigation system), která k měření přidává údaje o poloze, směru a zrychlení. INS se běžně skládá z GNSS aparatury, která měří polohu v reálném čase, a IMU (inertial measurement unit), která měří náklony a zrychlení. Takto pracují mobilní laserové skenery letecké (ALS – airborne laser scanner, česky LLS – letecký laserový skener), nebo pozemní mobilní skenery nejčastěji umístěné na automobilech (MLS – mobile laser scanner, mobilní laserový skener). Tato zařízení jsou sice mobilní, ale značně hmotná a velmi drahá. Slouží pro přesné 3D mapování, výstupem je mračno bodů.

MLS i ALS potřebují pro svou práci INS, tedy i signál z družic pro GNSS. Pokud signál není (v uzavřených prostorách, v dolech, ve stavbách apod.), je třeba najít jiný způsob určování polohy celého zařízení. Pro tyto účely byla vyvinuta technologie SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), která určuje polohu na základě okamžitého mapování okolního prostoru.

4 3D SLAM

4.1 Co je 3D slam?

SLAM je zkratka ze „*Simultaneous Localization and Mapping*“, což by v překladu znamenalo lokalizace a mapování zároveň. Technologie SLAM se začala používat v oblasti robotiky kolem roku 1990. Vznikla z důvodu, že inženýři-konstruktéři potřebovali technologii, která by umožnila robotickým zařízením pohybovat se po továrně, aniž by narážela do zdí, osob, nebo do sebe navzájem. Tím, že tato technologie byla určena pro vnitřní prostory, nelze se spoléhat na GNSS pro navigaci. Proto byl vyvinut algoritmus, který je schopen za pohybu vytvářet mapu a s její pomocí se navigovat v prostoru.

Jak pracuje SLAM? Přístroje, které SLAM technologii využívají, získávají data ze senzorů a tvoří mapu okolního prostředí, ve kterém se přístroj nachází. Sensory mohou využívat vizuální data (fotografie) nebo neviditelné záření (sonar, radar, LiDAR) v kombinaci s pohybovými daty z inerciální měřicí jednotky (IMU). Zařízení využívá tyto informace k výpočtu „nejlepšího odhadu“ toho, kde se v prostředí nachází. Přesunutím jeho polohy v prostředí se budou všechny prvky prostředí (tj. stěny, podlahy, sloupy) pohybovat ve vztahu k zařízení a algoritmus SLAM může vylepšit jeho odhad pomocí nových informací o poloze. SLAM je iterační proces – čím více iterací zařízení provede, tím přesněji se může v tomto prostoru umístit [21].

4.2 Osobní mobilní laserové skenery

Jak bylo řečeno, MLS či ALS jsou hmotné a velmi drahé, ke všemu potřebují ke své práci signál GNSS. Přibližně před patnácti léty se začaly vyvíjet tzv. osobní mobilní laserové skenery (PLS – personal laser scanner, či PMLS – personal mobile laser scanner). Podmínkou bylo, že musí být lehké, relativně levné oproti MLS a ALS, a nebudou potřebovat signál GNSS, jelikož se primárně měly používat pro dokumentaci vnitřních prostor, např. pro převod objektu do BIM. Vznikla tak unikátní zařízení, nesená člověkem, která jsou schopna mapovat blízké okolí za chůze.

Jedná se např. o zařízení Leica Pegasus nebo výrobky firmy GeoSLAM. Tato zařízení se začala v současné době dobře uplatňovat na trhu, o čemž svědčí další typy, např. Leica BLK-Go.

Mobilní ruční laserové skenery fungují na principu měření času, za který se paprsek světla vyslaný z přístroje a odražený od povrchu vrátí do přístroje. Zařízení je vybaveno otáčivou hlavou, která obvykle pomocí rotujícího zrcátka rozmítá paprsek světla z přístroje do tvaru vějíře. Podle typu zařízení lze registrovat až stovky tisíc bodů za vteřinu). Přístroj musí být vybaven inerciální měřicí jednotkou, která zaznamenává náklon přístroje při měření zrychlení. Modernější modely jsou také

vybaveny kamerou, která zaznamenává snímky během rotace přístroje a díky RGB modelu je následně možné přiřadit bodům skutečnou barvu. [18]. Kamery na mobilních skenerech jsou instalovány až v posledních 5-10 letech.

4.3 GeoSLAM

V roce 2008 společnost CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) vytvořila robustní SLAM algoritmus, který se primárně zaměřuje na přesné 3D měření a mapování spíše než na navigaci v prostoru [21].

Firma GeoSLAM během krátké doby přetvořila SLAM technologii na vysoce přesné mapování.

První verze SLAMu používala obrázky, které pomáhaly s orientací, ale pro laserové skenování je nutný častější výpočet polohy v reálném čase. S párováním škal (sweep-matching) se paprsky skenu promítají do všech stran a jsou schopny poskytnout vysoce přesnou a spolehlivou digitální mapu [21].

Postupem času se SLAM technologie zdokonalila na takovou úroveň, že měření uvnitř bylo stejně přesné jako měření venku. GeoSLAM nevyužívá jen svoje měření pro následné zdokonalení algoritmu či lepších přístrojů, používá i data naměřené zákazníky [21].

SLAM byl navržen pro zařízení, jež se pohybují prostorem. Systémy založené na SLAM technologii, pracují dobře, když jsou užívány při pohybu. S mobilním mapovacím systémem SLAM je možno jednoduše procházet prostředím a vytvářet digitální mapy za pochodu. Odstraněním pracných nastavení bylo ušetřeno velké množství času. Mobilní mapovací systémy SLAM snižují např. čas průzkumu objektu [21].

GNSS nefunguje v interiérech, jelikož potřebuje signál alespoň ze 4 družic. Ale nejsou to jen vnitřní prostory, kde není; například lesní husté porosty blokují oblohu, a tudíž i signál. Podobně jsou na tom zastavěné oblasti s vysokými budovami [21].

Technologie založené na SLAM překonaly tyto problémy úplným vyřazením GNSS. Bez závislosti na vzdálených datech jsou SLAM systémy technologií, kterou lze použít kdekoliv. Umožňuje mapovat složité a uzavřené prostory, ať už ručním skenováním, či připevněním skeneru k vozíku, tyči nebo k dronu [21].

Využití je též v zastavěných oblastech, kde SLAM technologie pomáhá stavebním profesionálům vytvářet rychlé a dostatečně přesné 3D modely, vytvořené v minimálním čase. Využívá se např. při těchto činnostech:

rychlé týdenní monitorování pokroku na staveništích,

průzkumy obytných, obchodních a průmyslových zařízení v reálném čase,

komplexní průzkumy stávajících staveb, které mají být renovovány, přestavěny nebo rozšířeny.

Ale není to jen stavební prostředí, které využívá výhody této technologie. Předchůdce moderních ručních laserových skenerů ZEB-1 byl použit pro skenování systémů jeskyní v jihovýchodní Austrálii.

Od těchto skromných začátků jsou produkty firmy GeoSLAM hojně využívány v jeskyních, dolech, lesích, i otevřených plochách po celém světě [21].

5 VR

Virtuální realita (VR) je pokročilé rozhraní mezi člověkem a počítačem, které simuluje realistické prostředí. Účastníci se mohou pohybovat ve virtuálním světě, jenž mohou vidět z různých úhlů, reagovat na jeho prostředí, či dělat v něm změny. Kyberprostor je považován za vrcholné prostředí virtuální reality. Jedná se o alternativní počítačový vesmír, kde data jsou vizualizovaná jako světlo či obraz. Informační pracovníci používají speciální systém virtuální reality pro vstup do kyberprostoru [13].

Prvním využitím VR tak, jak ji známe dnes byl letecký simulátor známý jako Super Cockpit vyvinutý T. Furnessem mezi lety 1986-1989. Tento výcvikový kokpit přenášel počítačem generované trojrozměrné modely i zvuk v reálném čase [22]. Dále se pak VR rozvíjela jako simulátor pro astronauty pro NASA, následně jako vzdálené ovládání robotických roverů na Marsu [22]. V následujících letech byl vývoj VR zpomalen a vznikali pouze drobné arkádové hry, či VR terapie.

V roce 2010 vytvořil Palmer Luckey první prototyp náhlavní soupravy Oculus Rift, která obnovila zájem veřejnosti o vývoj VR. V roce 2014 vyšel PlayStation VR a o dva roky později HTC VIVE [22].

Tyto přístroje, především HTC VIVE dokázali téměř dokonale simulovat obraz, který by člověk viděl normálně, tedy nebylo žádné omezení zorného pole. Headset měl 3D zvuk a vibrační ovladače, které hlásili kolizi. Díky těmto přístrojům je možné se téměř doslova ponořit do VR. Ačkoli hlavním cílem těchto vynálezů bylo zdokonalit dojem ze hry, kromě zábavního průmyslu z nich těžili i ostatní odvětví.

Využití VR pro prohlížení kulturních památek vzdáleně je zde již mnoho let. Existují virtuální muzea, která si člověk může stáhnout do počítače a prohlídnout si kulturní památky z opačné části planety vlastníma očima i z pohodlí domova.

Další výhodou je zachování kulturních památek. Pokud by se stala přírodní katastrofa, například zemětřesení a zavalila by komplex chodeb z druhé světové války, nebo historický důl a existoval by věrohodný 3D model, tak by stále byla možnost pro veřejnost tyto památky navštěvovat a obdivovat i přes to, že v reálném světě by již neexistovali.

6 UNREAL ENGINE 4

Abychom mohli vytvořit VR, je třeba napřed mít již kvalitní 3D model; ten je možno převést do prostředí VR. K tomuto účelu se využívá řada již existujících nástrojů – speciálních programů (enginů).

Mezi nejnámější patří Unity 3D, Unreal Engine (UE), 3DS Max&Maya, Blender, SketchUp a další. Jako nejpoužívanější je obecně považovaný Unity 3D, nicméně UE je zdaleka uživatelsky nejprívětivější. Proto byl UE využit pro zpracování části této diplomové práce.

Unreal Engine je nejotevřenější a nejpokročilejší nástroj pro tvorbu 3D v reálném čase. Neustále se vyvíjí, aby sloužil nejen svému původnímu účelu jako nejmodernější herní engine, ale dnes dává tvůrcům napříč průmyslovými odvětvími svobodu a kontrolu při poskytování špičkového obsahu, interaktivních zážitků a pohlcujících virtuálních světů [23].

Unreal Engine vznikl v roce 1996 [23]. Jádro UE je naprogramováno v jazyce C++ firmou Epic Games. UE měl původně sloužit pro vývojáře her, aby dokázali snadno tvořit prostředí, modely a světy s vysokou kvalitou, osvětlením apod. V roce 2012 byl vytvořen UNREAL ENGINE 4, který byl tak komplexní a umožňoval tvorbu modelů převzatou z různých formátů, že se začal využívat i na projekty, které neměly s hrami vůbec co dělat. Všechny přesné modely či projekty, vzniklé v programech založených na přesnosti, jako například v ArchiCADu, či Artlantisu, které umožňují vytvořit 3D modely včetně interiéru, se dají převést do UE a jen několika kliknutími myši poté převést do VR. Díky VR je pak možnost si tyto modely projít, jako už by existovaly, najít chyby, pozměnit detaily a mnoho dalšího.

7 Štola Johannes

Pro testování technologie PLS pro tvorbu 3D modelu, vhodného k vizualizaci objektu ve VR a jako případová studie, bylo vybráno historické důlní dílo – štola Johannes.

Štola Johannes se nachází v Krušných horách na česko-německé hranici u Zlatého potoku, poblíž města Boží Dar. Tato štola je součástí tzv. „Zlatého kopce“, který sloužil jako prostor pro dobývání rud po více než 800 let ze strany české i saské. Díky zachovalosti historické krajiny, dobývek, úvalů a štol byl Zlatý kopec prohlášen za chráněnou kulturní památku a tvoří významnou část česko-německé nominace „Hornické kulturní krajiny Erzgebirge/Krušnohoří“ k zápisu na seznam světového dědictví UNESCO.

Největším dolem této oblasti z české strany je právě důl Johannes, který byl v provozu od 16. století do 70. let 19. století, se znovuotevřením ve 20. letech a následně 50-60. letech 20. století. Jedná se o zchovalý komplex historických důlních děl s vyraženými podzemními komorami obrovských rozměrů. Největší z těchto komor má rozměry 60 x 20 m, s výškou 10-12 m [24].

Na dole Johannes se tavilo ročně okolo 500 kg mědi, postupně se však zájem přesouval k těžbě cínových rud. V polovině 18. století se ročně vyrábělo okolo 400 kg mědi a 1700 kg cínu. V roce 1811 byl důl Johannes největším dolem v revíru a na vrcholu svého rozvoje, neboť prorážkou odvodňovací štoly Johannes se podařilo vyřešit alespoň částečně problémy s důlní vodou. Odvodňovací štola byla vyražena za účelem odvodnění i dalších důlních děl. V té době pracovalo na dole okolo 20 horníků. Těžba však narazila na své limity v podobě vysokého přítoku důlních vod pod úroveň štoly. Také ruda byla obtížně technologicky zpracovatelná [25].

Ve 40. letech 19. století těžba prakticky ustala, doly byly jen udržovány s minimálními náklady v provozu [25].

„Ložisko Zlatý Kopec je představováno dvěma zrudněnými skarnovými horizonty uloženými ve fylitických horninách s vložkami kvarcitů, amfibolitů a skarnů. Původním substrátem nížce metamorfovaných hornin – fylitů, byly písčito jílovité sedimenty střídající se s polohami vulkanických hornin a tufů. Původním substrátem skarnů byly vápenaté polohy“ [25]. Na obr. 4 je seznam minerálů, obsahujících cín ze Zlatého kopce.

Minerál	Obsah cínu [%]	Minerál	Obsah cínu [%]	Minerál	Obsah cínu [%]
magnetit	0 – 0.02	vesuvian	0 – 0.05	ludwigit	0.09 – 1.15
amfibol - aktinolit	0 – 0.05	epidot	0 – 0.23	natanit	41
amfibol - hastingsit	0 – 0.75	titanit	0 – 7.85	wickmanit	43
pyroxen	0 – 0.15	malayait	25.6 – 30	schoenfliesit	45
granát	0 – 2.15	hulsit	5.6 – 10.3	kasiterit	78

Obr. 4 – tabulka minerálů [25]

Štola Johannes je dnes také zimním domovem netopýrů z okolí Božího Daru. Byl zde v podzimním a zimním období zjištěn výskyt celkem 9 druhů letounů [26]. Díky tomu, že je toto území zajímavé nejen historicky, ale i biologicky; proto je tato štola (jako řada jeskyní a obdobných objektů) uzavřená přes období přezimování netopýrů od 1. října do konce dubna. Je to kromě pandemie COVID-19 hlavní důvod, proč měření nemohlo proběhnout dříve před koncem dubna.

Na obr. 5 je pořízený snímek hornin přímo při měření.



Obr. 5 - horniny s obsahem mědi a dalších kovů, které se nacházejí v dole Johannes

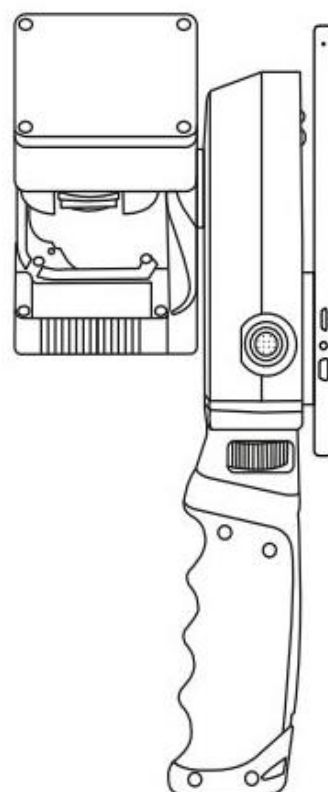
8 Použitý přístroj

V rámci plánované dokumentace objektu v diplomové práci byl použit skener ZEB-Revo Go od společnosti GeoSLAM. Jeho přesnosti a technické specifikace deklarované výrobcem jsou na Obr. 6. Použitý model ZEB-Revo Go patří k nejjednodušším, má omezený dosah, nemá kameru ani přímý vizualizační displej. Data se pořizují i uchovávají automaticky, prohlédnout se dají až po exportu do počítače v programu GeoSLAM HUB.

Technical specification	
Range	30m (features <15m)
Laser	Class 1 / λ 905nm
FOV	360° x 270°
Protection class	IP 51
Processing	Real time
Data logger carrier	Shoulder strap
Scanner weight	850g
Colourised point cloud	✓*
Referenced imagery	✓*
Scanner points per second	43,000
No. of sensors	1
Relative accuracy	1 - 3cm**
Raw data file size	100MB/min

GeoSLAM Hub	
Transform your 3D scan data into actionable information	
Automatic registration of multiple scans and geo-referencing	
Import and manipulate data from any GeoSLAM device	
Quick & easy workflows with 'drag and drop' functionality	
Optional Draw packages - Start, Plan, BIM, Mining and Pro	

Accessories	
Pole	- Elevate your device into ceiling voids
Cradle	- Lower your device into shafts
ZEB Pano	- 350° panoramic imagery
ZEB Cam	- Colourise your pointcloud

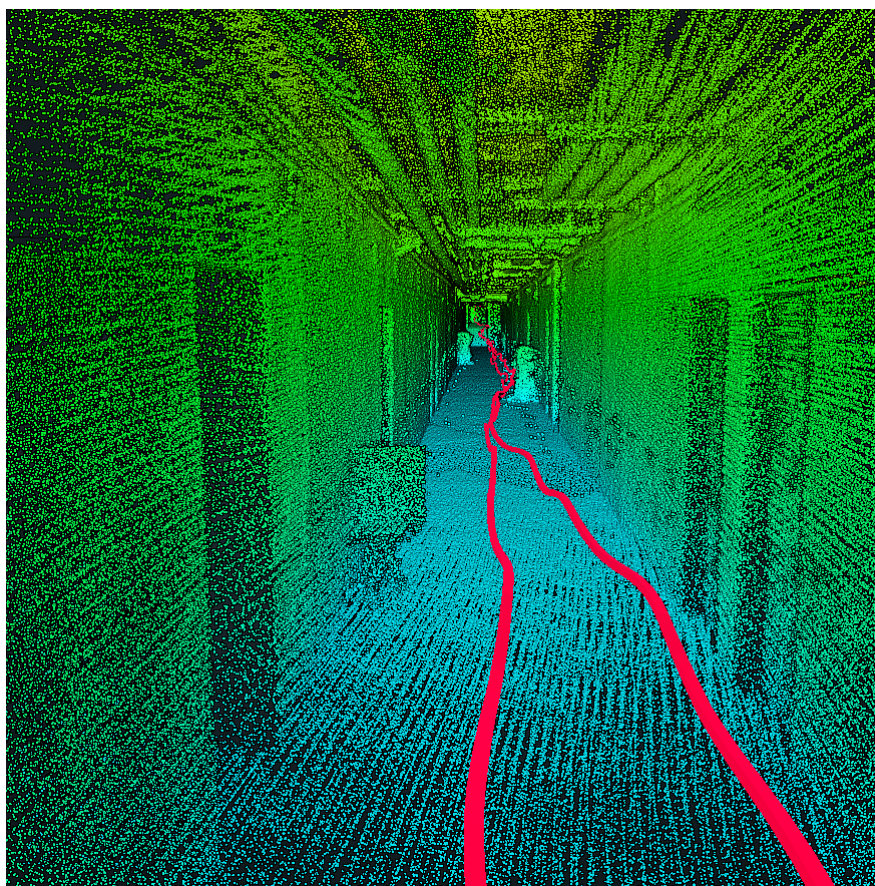


Obr. 6 - technické parametry ZEB-Revo Go [21]

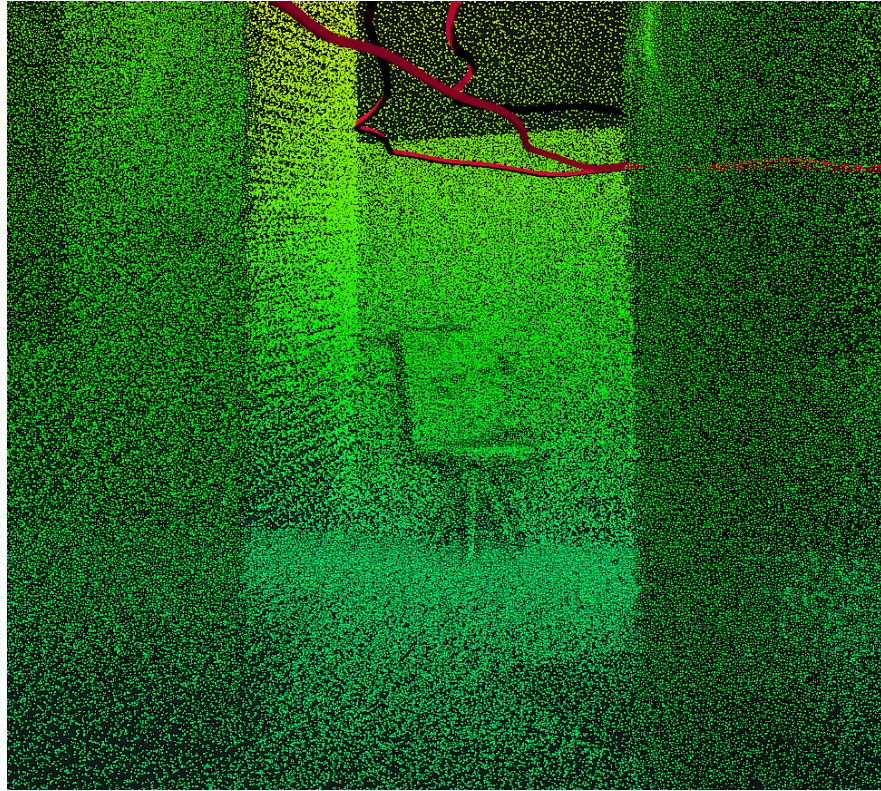
Přesnost měření byla ověřena a analyzována i vlastním měřením v suterénních prostorách budovy Fakulty stavební ČVUT, kde byl v chodbách rozmístěny velké terče (ZEB-Revo Go má relativně malou hustotu měřených bodů a jeho přesnost je ve srovnání se statickými laserovými skenery nízká, dosahuje na vzdálenost 10 m přibližně přesnosti 1-3 cm v měřené poloze bodu podle situace a typu objektu). Terče šachovnicového tvaru o rozměrech 60 x 60 cm byly zaměřeny totální stanicí Trimble – Zeiss. Celkem bylo zaměřeno v rámci polygonu 8 terčů se střední chybou 1,1 cm.

Z rozdílů souřadnic středů terčů, odečtených z mračna bodů a z vypočtených souřadnic středů terčů z měření totální stanicí se vypočetla střední chyba zaměření bodu ručním osobním skenerem ZEB-Revo. Měření totální stanicí je logicky přesnější (s předpokládanou střední chybou v řádu mm) a bylo považováno za referenční.

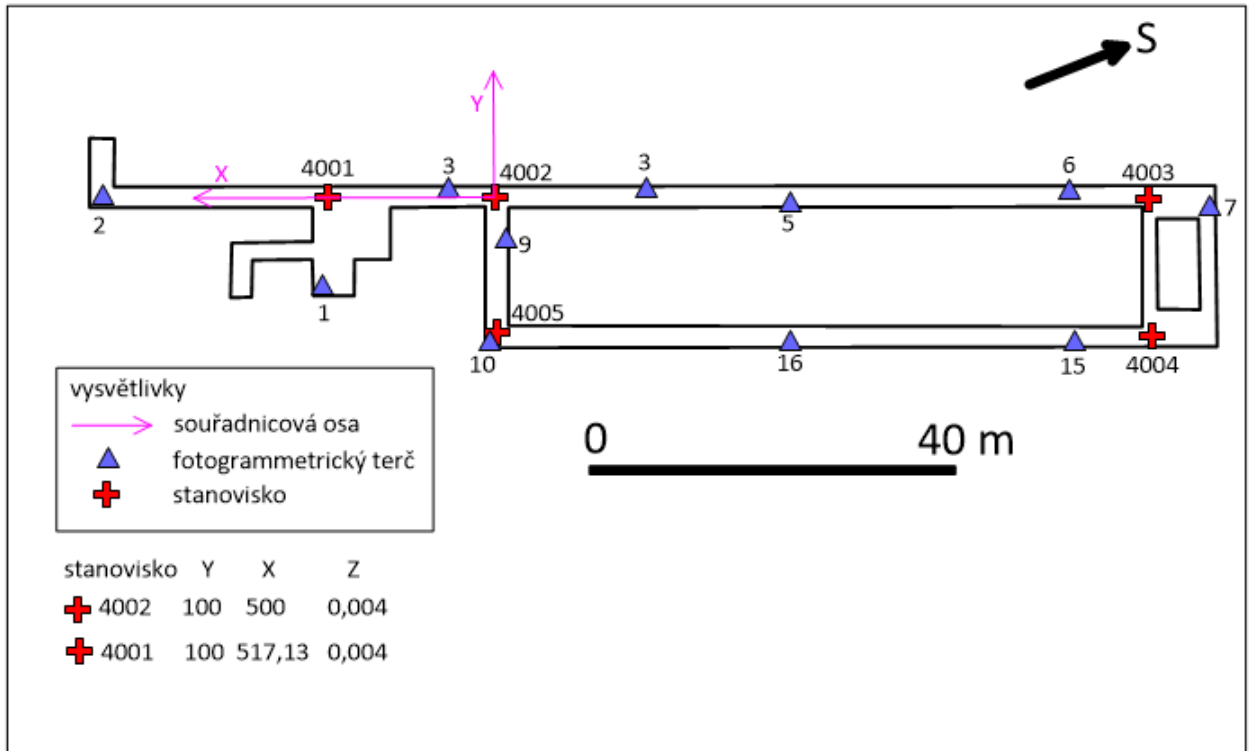
Na Obr. 7 a 8 jsou zobrazena data naměřená skenerem ZEB-Revo Go v software GeoSLAM HUB, který slouží pro zpracování měření, exportu dat a jejich vizualizaci.



Obr. 7 – prostory zaměřené ručním skenerem s trajektorií (1)



Obr. 8 – prostory zaměřené ručním skenerem s trajektorií (2)



Obr. 9 – schéma měřené oblasti

Z náčrtu na Obr. 9 jsou definovány osy místního souřadnicového systému; osa X má směr z bodu 4002 do 4001 a osa Y je na osu X kolmá. V software Groma byly souřadnice středů terčů a jednotlivých stanovisek totální stanice vypočteny s vyrovnáním v podobě uzavřeného polygonu a dvou volných stanovisek. Tím se získaly relativně přesné souřadnice všech bodů. Body označované číslem >4000 (tj. 4001, 4002, ...4005) jsou stanoviště a body začínající číslem 1 jsou podrobné body (středů fotogrammetrických terčů).

Po geodetickém zaměření bylo provedeno opakované měření ručním skenerem.

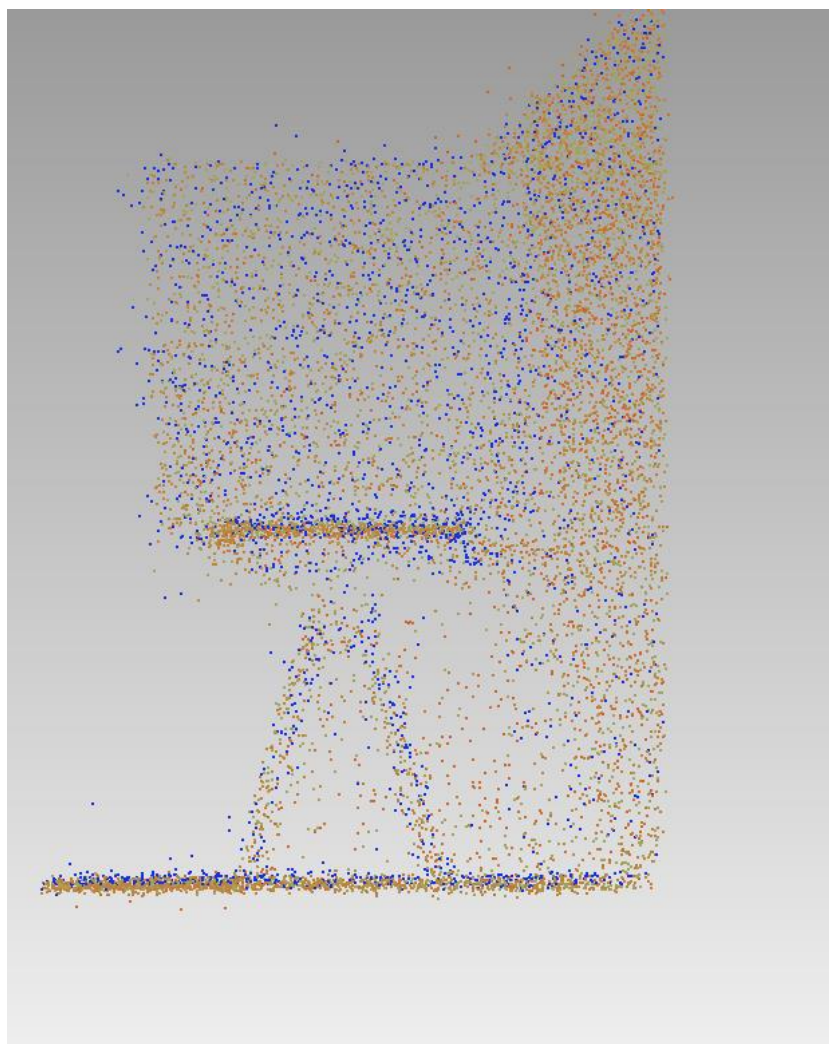
Vypočtené body ze sw Groma z geodetického měření (lokální souřadnicový systém, definovaný měřičem, x,y,z):

1	-89.239	-518.348	0.72
2	-99.808	-543.319	0.66
3	-100.557	-508.847	0.25
4	-100.877	-485.002	0.73
5	-99.305	-472.111	0.28
6	-101.076	-457.679	0.27
7	-100.520	-423.048	1.92
9	-96.622	-499.327	0.27
10	-84.308	-500.663	0.73
15	-84.540	-430.405	1.45
16	-84.523	-462.891	0.26

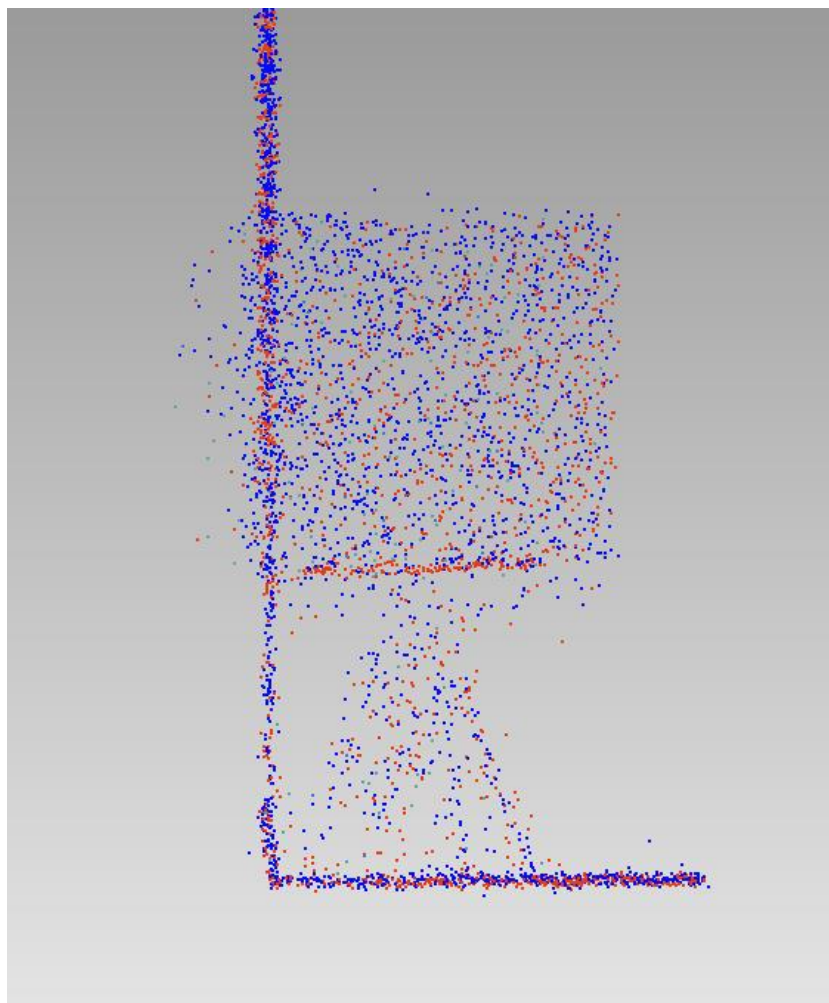
Souřadnice středů terčů, odečtené sw Geomagic Wrap z mračna bodů (lokální souřadnicový systém software Geomagic, x,y,z):

1	4091.400150	-4026.000020	679.099980
2	-18883.300780	-18365.800860	596.499980
3	290.499990	10266.099930	174.600010
4	13767.700200	29973.600390	636.600020
5	22477.300640	39579.898830	211.200000
6	29279.100420	52416.198730	165.200000
7	49677.600860	80413.200380	1816.400050
9	8975.799560	15772.899630	166.300000

10	18297.000890	7605.999950	617.500010
15	58492.099760	65211.898800	1337.200050
16	39823.699950	38630.500790	135.100010



Obr. 10 – fotogrammetrické terče zaměřené skenerem a jejich prezentace v mračnu bodů (1)



Obr. 11 – fotogrammetrické terče zaměřené skenerem a jejich prezentace v mračnu bodů (2)

Středky terčů zaměřené skenerem byly vybrány ručně (jako odhadnutý střed terče) viz Obr. 10,11. Při tomto postupu se mohla vyskytnout určitá chyba z nejistého vyhledání středu terče díky nízké hustotě mračna. Středky terčů byly též zaměřeny geodeticky totální stanicí; vznikla tak množina identických bodů. Následně byla využita prostorová transformace v programu 3dTrans (software pro podobnostní či afinní transformaci ve 3D, autoři Štroner, Pavelka, FSv ČVUT). Pro transformaci bylo využito 8 bodů, a to body 1,2,3,4,6,9,10,15. Zbylé body byly využité jako kontrolní – pomocí vypočteného transformačního klíče byly body 5, 7 a 16 ze souřadnic mračna bodů přetransformovány do místního geodetického systému a jejich souřadnice byly porovnány z geodeticky určenými. Odchyšky byly v rámci 1-3cm, což odpovídá přesně deklarované přesnosti výrobcem. Experimentálně byly vybrány dále i další body, výsledky byly obdobné.

Transformační klíč:

Matice Rotace:

0,000818569692	-0,000575004621234152	-2,17977550025714E-5
0,000576922800	0,000817225301034371	-3,87488815137838E-5
0,000001735717	-7,65941567880754E-7	0,000975157794637903

Matice Translace:

-94,896009156056
-517,399578810728
0,098759003423

Měřítka v jednotlivých osách (x,y,z):

1,000000000000
1,000000000000
1,000000000000

Střední chyba jednotková: 0,01053894

Kontrolní body:

(C.B. X Y Z)

16,0 -84,513197 -462,859791 0,270037

16 -84,523 -462,891 0,26

Rozdíl: 0,010 0,031 0,01

5,0 -99,260001 -472,094401 0,313411

5 -99,305 -472,111 0,28

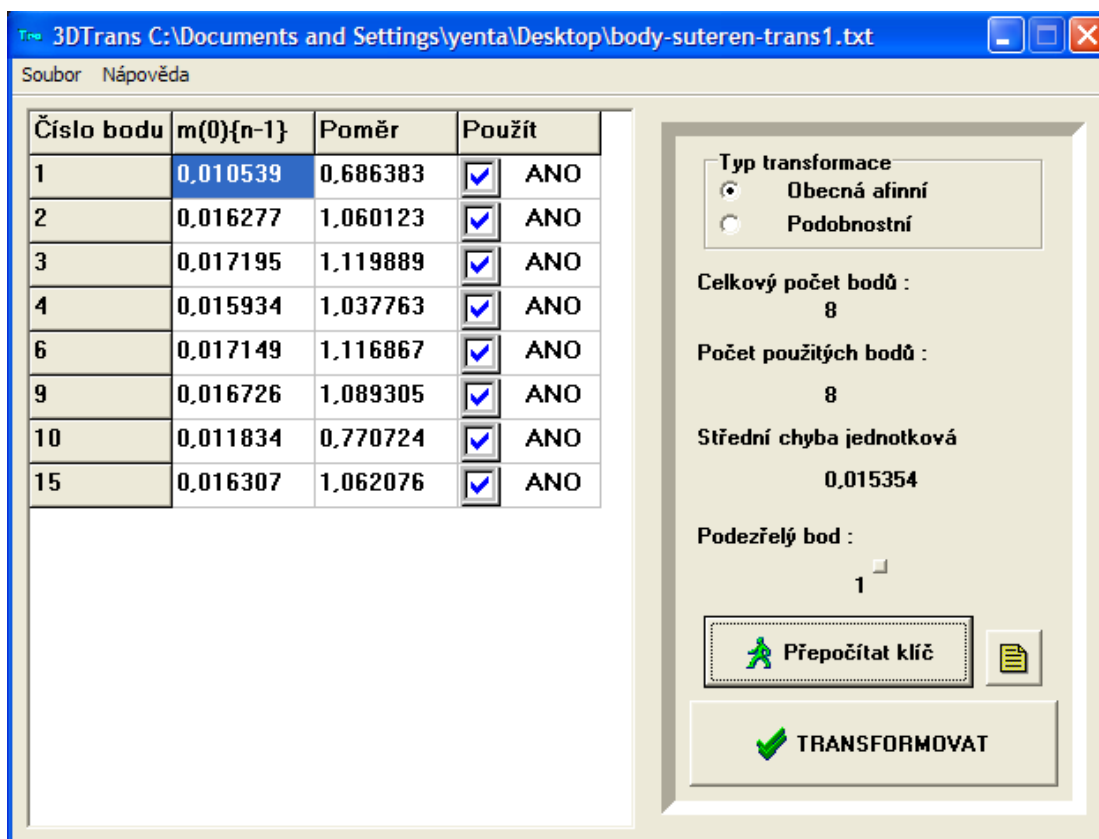
Rozdíl: 0,045 0,017 0,03

7,0 -100,508986 -423,094120 1,894670

7 -100,520 -423,048 1,92

Rozdíl: 0,011 0,046 0,03

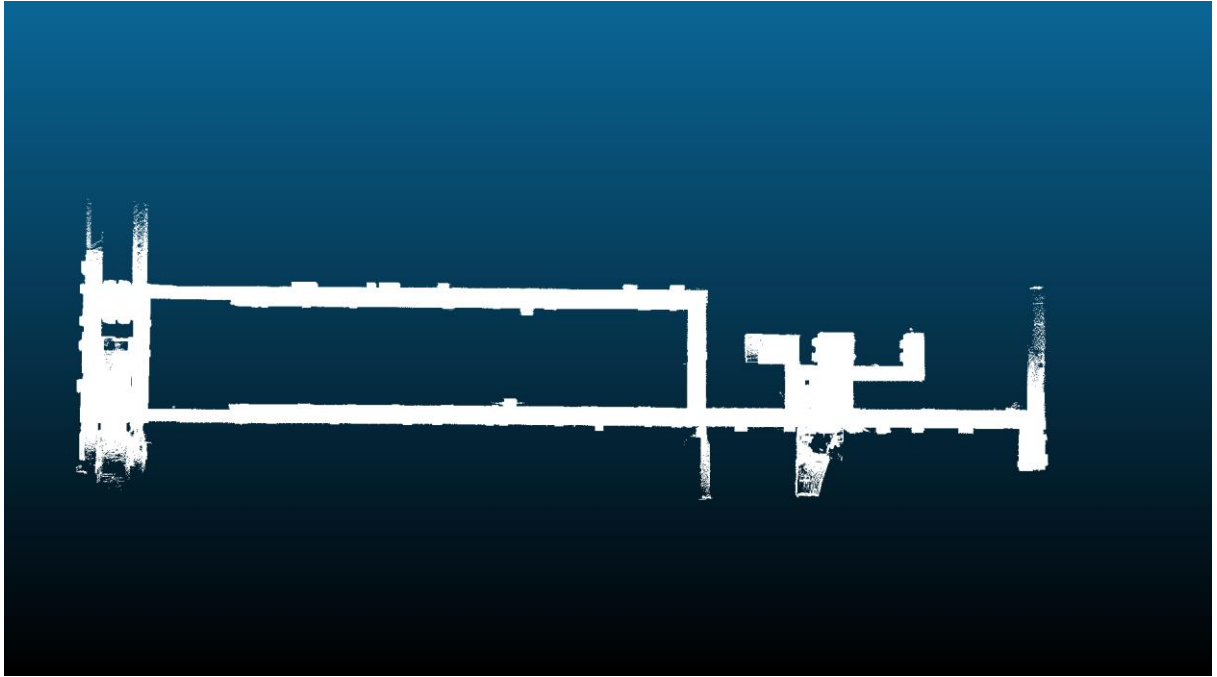
Po výpočtu transformace vyšla na 8 transformovaných bodech střední chyba jednotková 0,015354 m. Tato přesnost je více než dostačující pro předpokládanou úlohu v této práci. Obr. 12 znázorňuje poslední část výpočtu střední chyby jednotkové mobilního skeneru ZEB-Revo Go.



Obr. 12 – ukázka programu 3DTrans; využita byla obecná afinní prostorová transformace 8 bodů

Zaměření ručním skenerem bylo provedeno 2x. Poprvé proběhlo měření i s fotogrammetrickými terči, podruhé o týden později bez terčů za účelem porovnání výsledků v programu Cloud Compare (CC).

Nejprve bylo v programu otevřeno mračno bodů z prvního měření, viz Obr. 13, které bylo provedeno s účastí terčů a dalších předmětů v chodbách, které zlepšovaly algoritmus SLAM (SLAM technologie má problémy v homogenně vypadajících částech objektů – algoritmus se nemá čeho „chytit“).



Obr. 13 – první mračno bodů pro zjištění přesnosti

Při druhém zaměřování nastaly komplikace. Trasa pro zaměření objektu byla stejná, avšak čas, který byl vynaložen na skenování objektu, byl kratší a v chodbách se nevyskytovaly terče a další objekty, zlepšující využití algoritmu SLAM. U obou měření bylo skenování provedeno dvěma okruhy uvnitř objektu v suterénu fakulty U druhého měření nastala po zpracování v software GeoSLAM HUB chyba, která byla snadno rozpoznatelná pouhým okem – část objektu byla výrazně deformována a standardní nastavení software nebylo schopno tuto chybu eliminovat. Chybné části mračna se nakonec podařilo opravit v programu přímo přenastavením parametrů zpracování primárního mračna bodů. Základní nastavení pro zaměřené mračno bodů je vidět na obr. 14. a následně byly tyto parametry upraveny podle doporučení prodejce v případě výskytu deformací objektů.

Upravené parametry:

Convergence threshold (konvergenční práh) – 5

Window size (velikost okna) – 1

Voxel density (hustota) – -1

Rigidity (tuhost) – 2

Default processing override options for revo type datasets

Convergence threshold 0 5 10

Window size 0 5 10

Voxel density -1 3 1

Rigidity -5 5 0

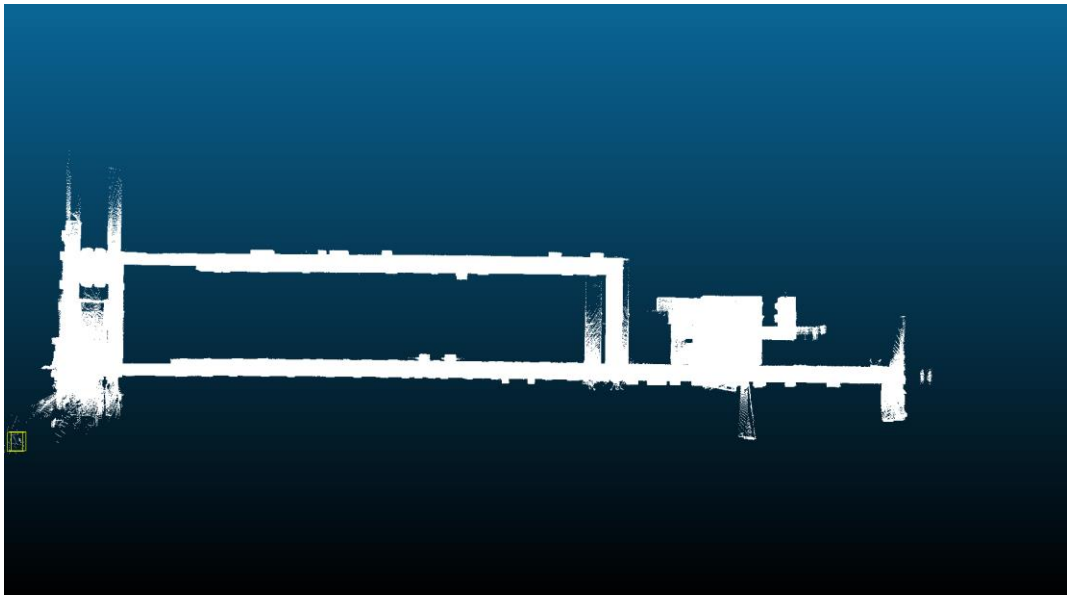
Maximum Range (Metres) 0 100 100

Modify bounding box

Large Range Filter Slope
Discards fewer points due to range discontinuities

Obr. 14 - základní nastavení mračna bodů

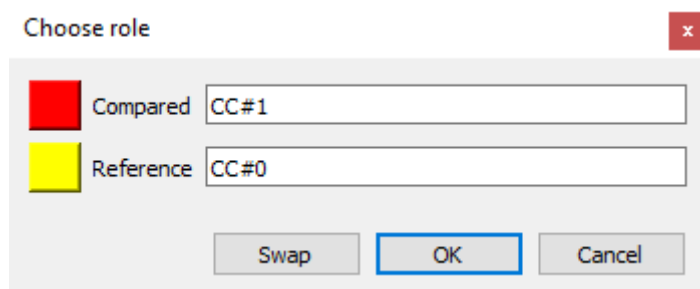
Na Obr. 15 je zobrazeno upravené mračno bodů z druhého měření, které je méně kvalitní díky rychlejší pochůzce a odstranění umělých překážek i terčů, zlepšující práci algoritmu SLAM.



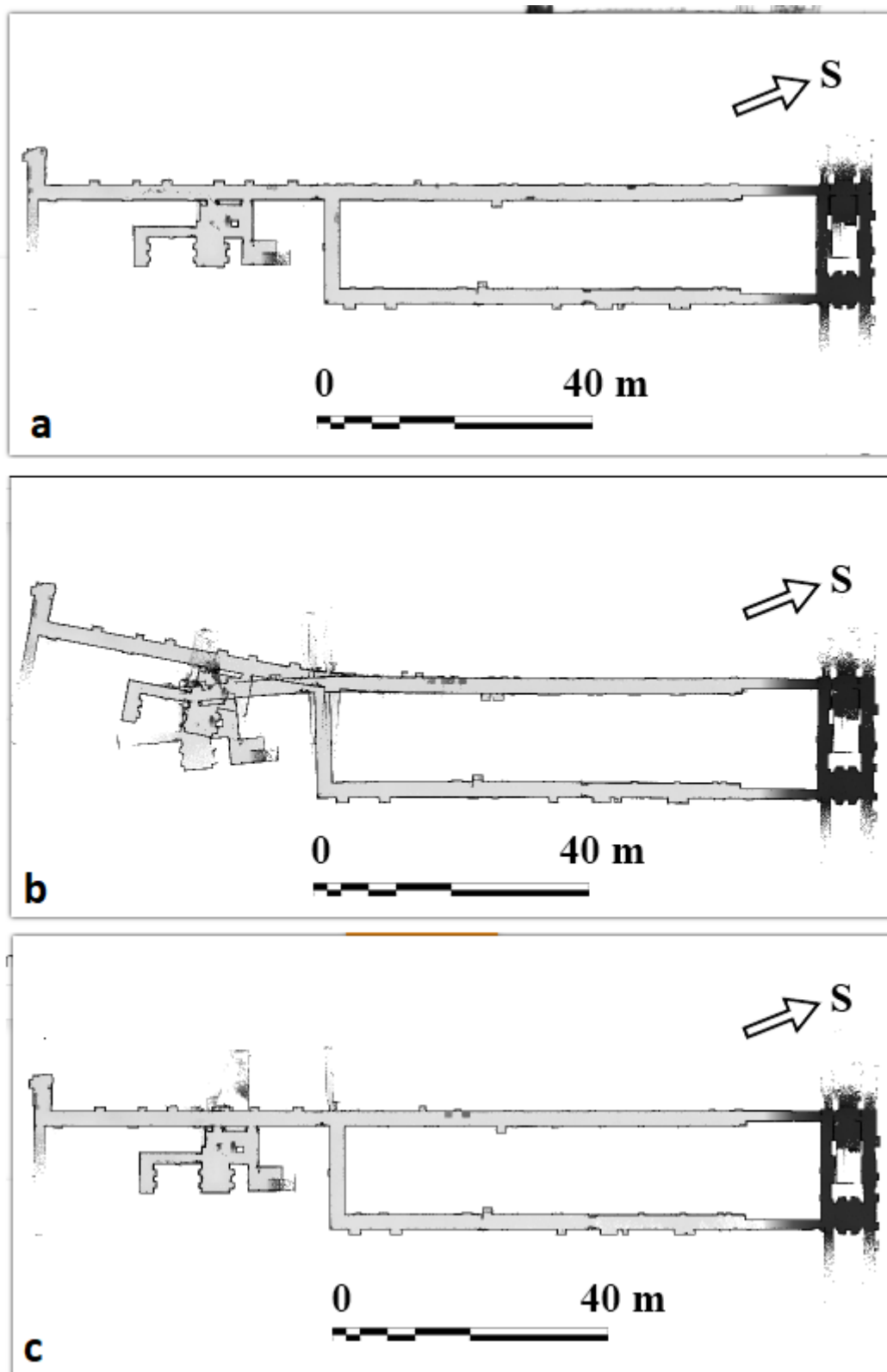
Obr. 15 - druhé mračno bodů pro zjištění přesnosti

Po načtení obou mračen do programu Cloud Compare bylo za potřeby přemístit mračna tak, aby se překrývala. Na tuto úlohu byla využita funkce Translate/Rotate. Tato funkce umožňuje posouvat a natáčet objekt, je možné otáčet objekt ve všech X, Y, Z souřadnicích najednou, ale i kolem každé osy individuálně.

Jakmile byly mračna přibližně ztotožněna, byla po označení obou objektů využita funkce `compute cloud/cloud distance`, která spočítá odchylky mezi dvěma mračny a vytvoří barevný model odchylek. Při spuštění této funkce je třeba zvolit si referenční objekt a porovnávaný objekt. Je vhodné si jako referenční objekt vybrat vrstvu, která měla při měření lepší výsledky. Na obr. 16 lze vidět tabulku pro výběr referenční vrstvy. Následně byl v tabulce před spuštěním analýzy změněn Octree level z Auto na 8 (díky recenzím z internetu, které tvrdily, že jsou tímto způsobem zaručeny lepší, přesnější výsledky). Zbytek parametrů byl ponechán ve výchozím nastavení.

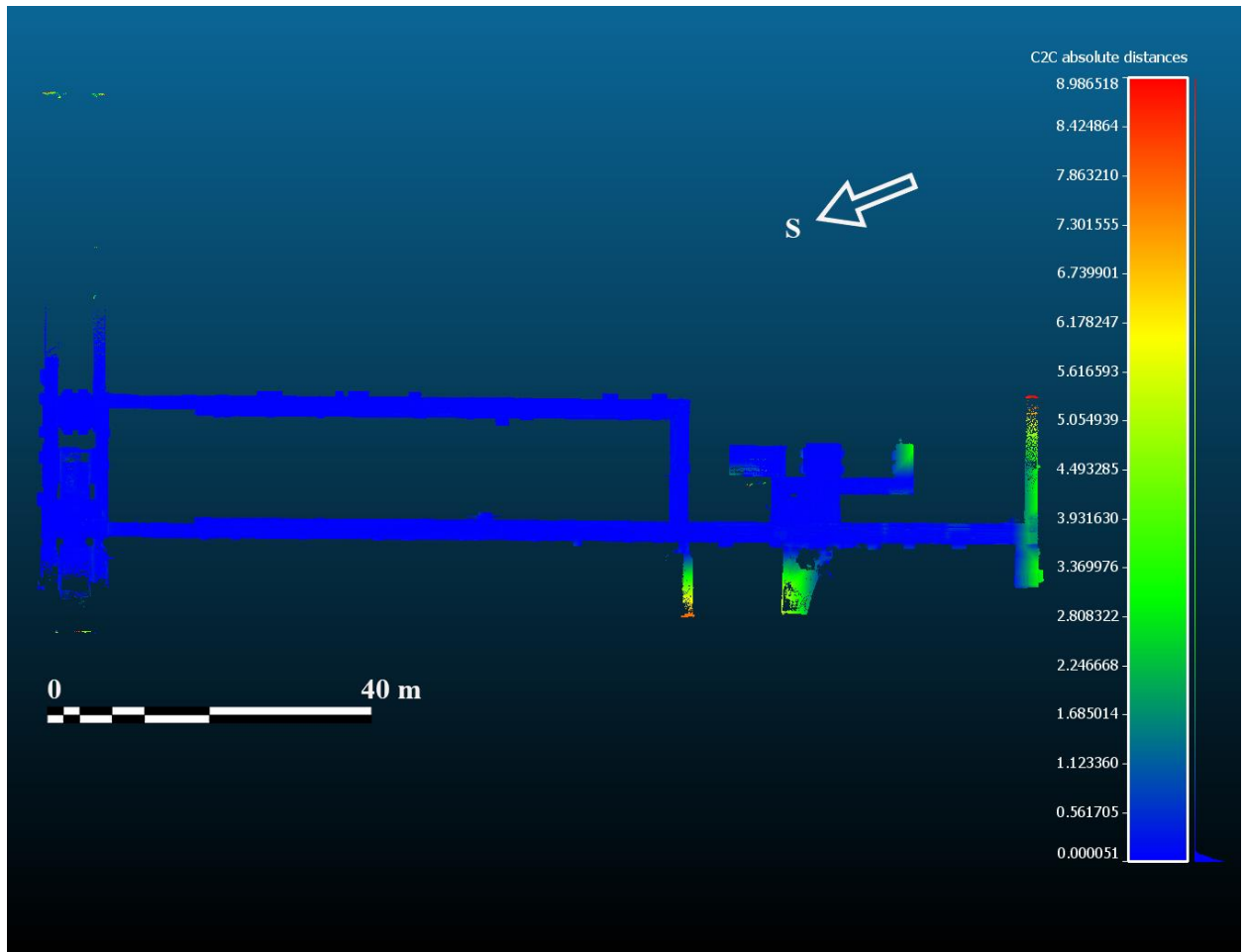


Obr. 16 – CC reference



Obr. 17 - originální mračno bodů, deformované mračno při druhém měření a opravené mračno (a, b, c)

Obr. 17 zobrazuje a) správné první měření, b) neupravené druhé měření, které je na jedné části deformované, c) upravené druhé měření. Na Obr. 18 je výsledný model odlehlosti mračen, kde se vyskytuje i stupnice, která je v metrech a barevně odlišená. Na tomto obrázku lze vidět části, které jsou odlehlé i více než 4 metry od porovnávaného modelu. Tyto odlehlosti jsou ale zapříčiněny skenem bodů, které na jednom z modelů vůbec nejsou. Jedná se např. otevřené dveře, kdy jsou naskenovány i body z místnosti, do které se při prvním skenování vůbec nešlo (dveře byly zavřené).



Obr. 18 – odlehlost porovnávaných mračen; velké odchytky jsou způsobeny tím, že data v jednom z mračen bodů chybí a také odrazem ve skleněných dveřích

9 Provedení měření

Měření ve štolě bylo provedeno začátkem května. Jednak letošní zima trvala dlouho a vstup do štol je v nadmořské výšce cca 900 m n.m., kde leželo ještě velké množství sněhu, jednak vstup do štol a jeskyní je zakázán obvykle do konce dubna z důvodu ochrany netopýrů, kteří v nich přezimují. Akce byla domluvena dlouho dopředu a byla podpořena i senátorem Parlamentu ČR panem Ing. Janem Horníkem, starostou města Božího Daru, v jehož katastru se štola nachází.

Aby byly minimalizovány možné chyby měření a možný nezdar (na opakování měření nebyl již čas), byly použity dva různé mobilní ruční skenery, oba výrobky firmy GeoSLAM. Vlastní měření bylo provedeno univerzitní mobilním laserovým skenerem ZEB-Revo Go a dále byl přizván i O. Kříž, specialista z firmy Mensuro, s.r.o, která je autorizovaným prodejcem výrobků firmy GeoSLAM. Vstup do štol umožnil zaměstnanec a průvodce Služeb Boží Dar s.r.o., M. Rojovský., který zajistil nejen vstup, ale i bezpečné provedení chodbami štol Johannes včetně informací, nezbytných k popisu objektu.

Do štol se vchází odvodňovací štolou, která byla vybudována kvůli hromadění vody v dole. Na Obr. 19 je možné vidět zmiňovaný vstup do štol. U vstupu byly vybrány tři body, které byly následně zaměřeny pomocí GNSS, bohužel pouze s přesností cca 2 metry (vstup do štol je v zalesněné oblasti se špatným příjmem signálu). Důvodem měření bylo připojení vyhodnoceného modelu štol do JTSK a jeho následné promítnutí do mapy.



Obr. 19 - vstup do štol Johannes

Vstup do odvodňovací štoly je nově upravený a suchý, nicméně již po přibližně 20 metrech dřevěná pochozí část končí, dále se pokračuje historickou štolou, kde stále odtéká voda, jejíž hloubka je od několika cm po cca 20cm až do hlavního prostoru těžby (dóm). Přístupová štola i hlavní prostor je opatřen dřevěnými výztužemi, žebříky i lavičkami pro usnadnění přístupu. Prostor je vybaven informačními tabulemi a figurínami horníků pro informovanost návštěvníků (viz obr. 20 a 21).



Obr. 20 - dřevěné podpěry dolu



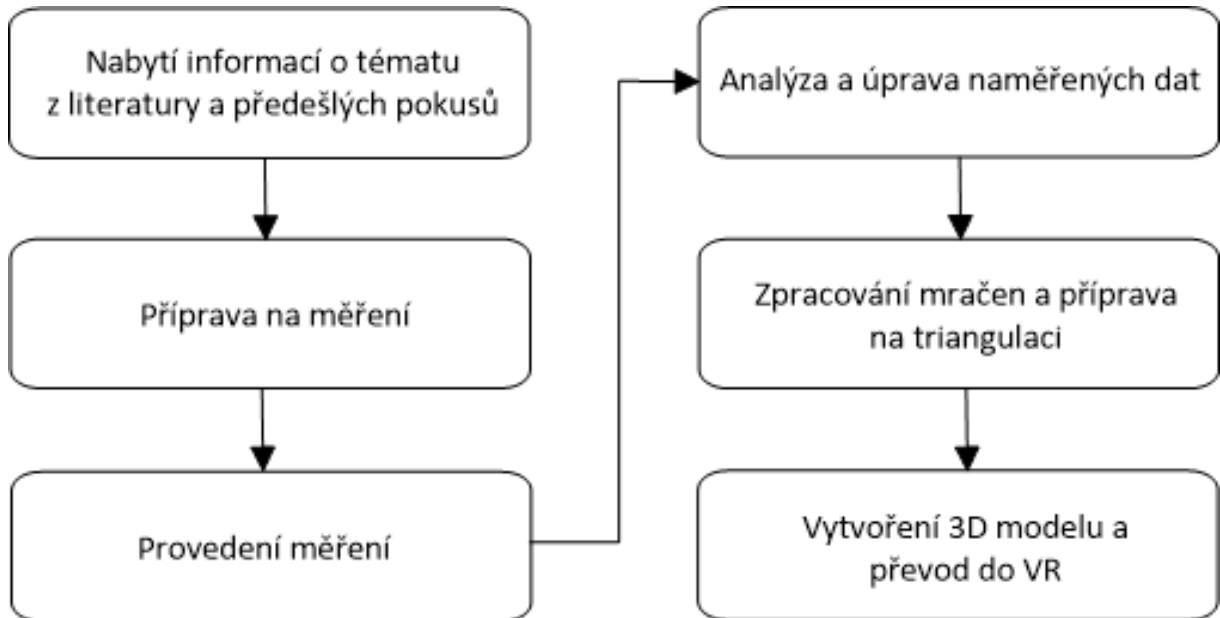
Obr. 21 - vestavěný bezpečný přístup pro návštěvníky

Po rekognoskaci se objekt rozdělil na jednotlivé pochůzkové trasy; na jediné kontinuální měření je tento objekt příliš velký a členitý. Optimální doba jednoho skenování pochůzkou je cca 20 minut. nainstalovaly Pro snazší spojení jednotlivých částí měření byly rozmístěny v hlavním prostoru polystyrenové koule o průměru 16 cm.

Doporučovaný maximální čas jednoho měření je maximálně 40 minut na jedno skenování. Pro zajištění kvalitních výsledků bylo měření rozděleno na tři okruhy pro skener ZEB-Revo Horizon a čtyři pro ZEB-Revo Go (ten má menší dosah a přesnost); každý okruh trval 10-20 minut. Měřické okruhy byly: odvodňovací štola, hlavní komora a těžební chodby. Každý z těchto okruhů byl zaměřen 2x, kvůli ověření přesnosti a z důvodu výskytu možných chyb; opakování měření v jiném termínu nebylo z časových možností možné.

10 Metodika provedení prací

10.1 Diagram prací



10.2 Provedení měření

Vlastní měření je jednoduché. Mobilní skener se aktivuje na předem vybraném místě, zvolna se zvedne a prochází se s ním celá předem vybraná trasa tak, aby nedocházelo k zastávkám (SLAM algoritmus při delším zastavení nepracuje), nevyskytovaly se „trhané“ či příliš rychlé pohyby skeneru (reakce IMU jednotky má své meze) a byly vystiženy všechny přístupné detaily objektu. Měření je nutno ukončit na stejném místě, kde se začalo měřit. Systém s tím počítá při výpočtu, měření je potřeba uzavřít (obdoba uzavřeného polygonu při geodetickém měření).

10.3 Výpočet a úprava mračna

Mobilní laserový ruční skener ZEB-Revo skenuje otáčivou hlavou okolní prostor. K naměřeným datům se přidávají údaje z jednotky IMU (směr a zrychlení) a při výpočtu mračna po vlastním měření v počítači v programu GeoSLAM HUB se tyto informace technologií SLAM zpracovávají do kompaktního mračna bodů.

Naměřená data byla z přístroje importována jako soubor s koncovkou *.LAZ, což je neřaděně mračno bodů. Problémy při skenování i zpracování dat nastávají u špatně přístupných úzkých prostor. U obou použitých mobilních laserových skenerech ZEB-Revo je základní nastavení takové, že se zobrazují po výpočtu pouze body, které splňují určitá předem daná kritéria. Jedním z těchto kritérií, pro práci v úzkých prostorech významným, je výpočet a zobrazení bodů, které se od přístroje nachází v určité vzdálenosti (standardně >1 m). Jelikož odvodňovací štola je velmi úzká a dlouhá, přístroj má problémy zaměřit dostatečný počet bodů s tímto omezením a dochází často k odchylkám od skutečné trajektorie (hromadění chyb jednotkou IMU a algoritmu SLAM).

Po prvotním zpracování se objevila jistá odchylka v části odvodňovací štoly; ta byla způsobena více faktory než jen omezením vzdálenosti. Tyto deformace modelu se dají částečně či zcela odstranit úpravou parametrů při zpracování měření. Stejně jako u zkušebního měření v suterénu Fakulty stavební, kde se testovala přesnost přístroje, i zde bylo možné a vhodné modifikovat volitelné parametry (viz kapitola 8).

- increase window size to +1
- decrease voxel density to -1
- increase rigidity to +2
- increase convergence threshold to +5

Vzdálenost zaznamenaných bodů od přístroje byla pozměněna při výpočtu z hodnoty >1 m na $>0,4$ m (voxel density). I přes všechny provedené úpravy mračna stále byly na výsledku viditelné deformace modelu zejména u odvodňovací štoly. Z tohoto důvodu byl využit další filtr, tentokrát už v programu CC. Jmenuje se Scalar Field – GPSTime a pracuje tak, že měřené body barevně rozdělí podle času od začátku měření. Tak bylo možno detekovat, že výchylka byla způsobena při zpáteční cestě štolou. Chybné body byly identifikovány a následně odstraněny. To však nevypovídá o přesnosti, a tak se měření v CC porovnávalo s druhým nezávislým měřením.

Bylo provedeno celkem 7 měření, 3 se zařízením ZEB-Revo Horizon a 4 se zařízením ZEB-Revo Go. Celá běžně průchozí část štoly Johannes byla rozdělena na okruhy v závislosti na možnostech měřiče, přístupnosti a výkonnosti zařízení.

Data byla zpracována v software GeoSlam HUB, byla spojena do jednoho mračna bodů pro každé zařízení, a dále pak porovnávána v software CC.

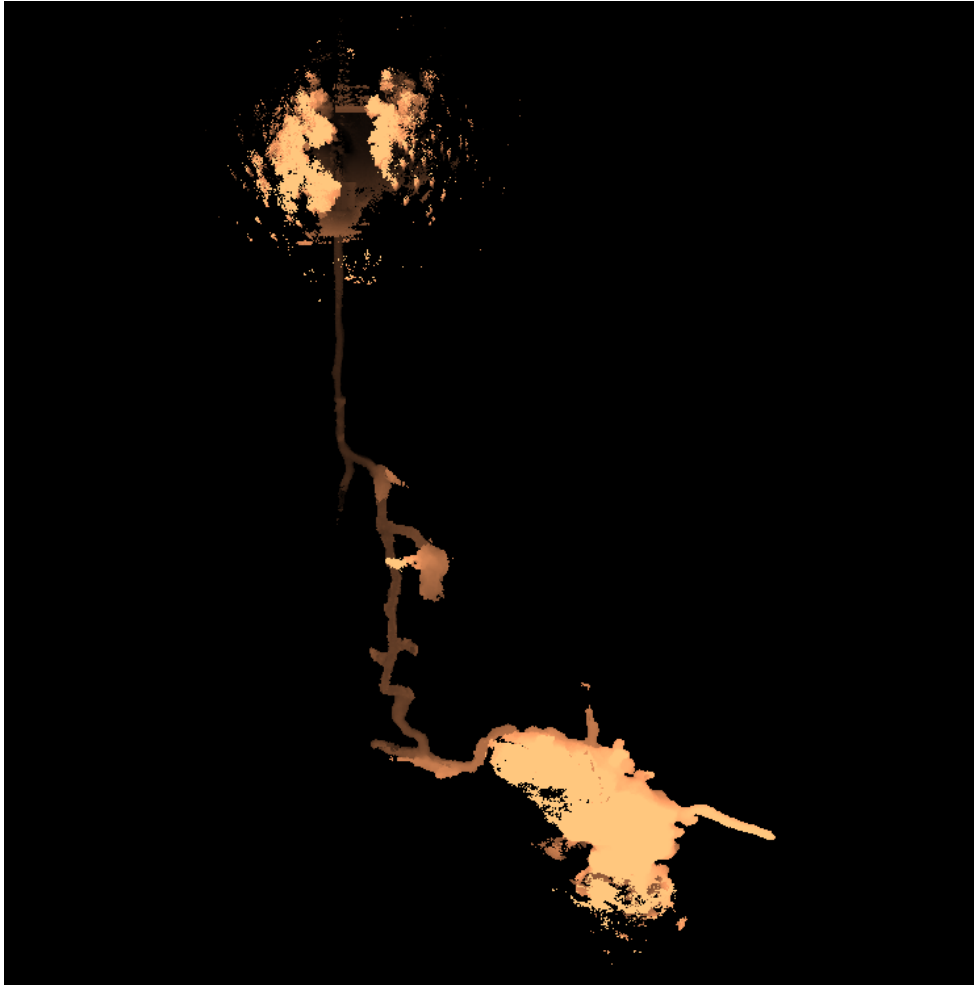
Jako první porovnávané měření byl okruh odvodňovací štoly. Toto měření bylo provedeno dvěma mobilními laserovými skenery, ZEB-Revo Go a ZEB-Revo Horizon. ZEB-Revo Horizon je

novějším modelem a dokáže zaměřit body cca 8x rychleji, než jednodušší ZEB-Revo Go. Podle webu 3dtechnologie.cz má tento stroj přesnost 1-3 cm s dosahem až 100 m. Tyto parametry byly zároveň potvrzeny i firmou Mensuro.cz, která zařízení v ČR prodává. Na obr. 22 je měření přístroje ZEB-Revo zobrazeno v software CC. Zde je vhodné upozornit na rozdíly v měřených datech, v horní části obrázku, zobrazující okolí před štolou, je změřeno mnohem více bodů v okolí. Přístroj ZEB-Revo Go zaměřuje body do maximální vzdálenosti 30 m od přístroje [21], tudíž zobrazený prostor před štolou je oproti obr. 25 výrazně méně obsáhlejší v porovnání s daty ZEB-Revo Horizon.

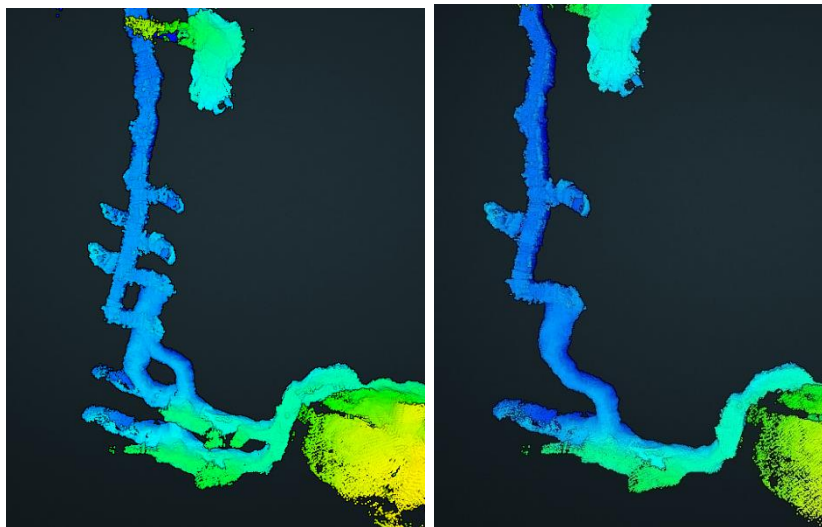


Obr. 22 - ZEB-Revo Go měření odvodňovací štolý před opravou

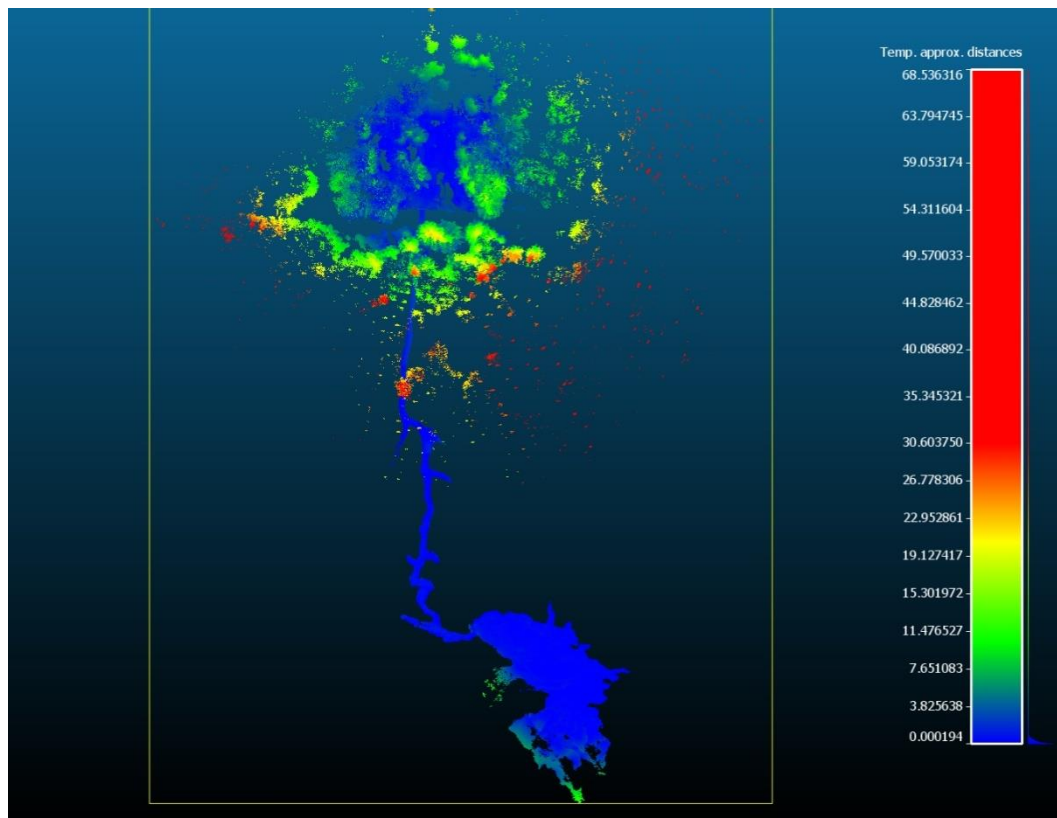
Data z měření ZEB-Revo Go byla opravena změnou parametrů (viz obr. 23, 24).



Obr. 23 - ZEB-Revo Go měření odvodňovací štolý po opravě – odstraněno zdvojení části před hlavním dómem, způsobené nepřesnostmi algoritmu SLAM při cestě úzkou štolou tam a zpět

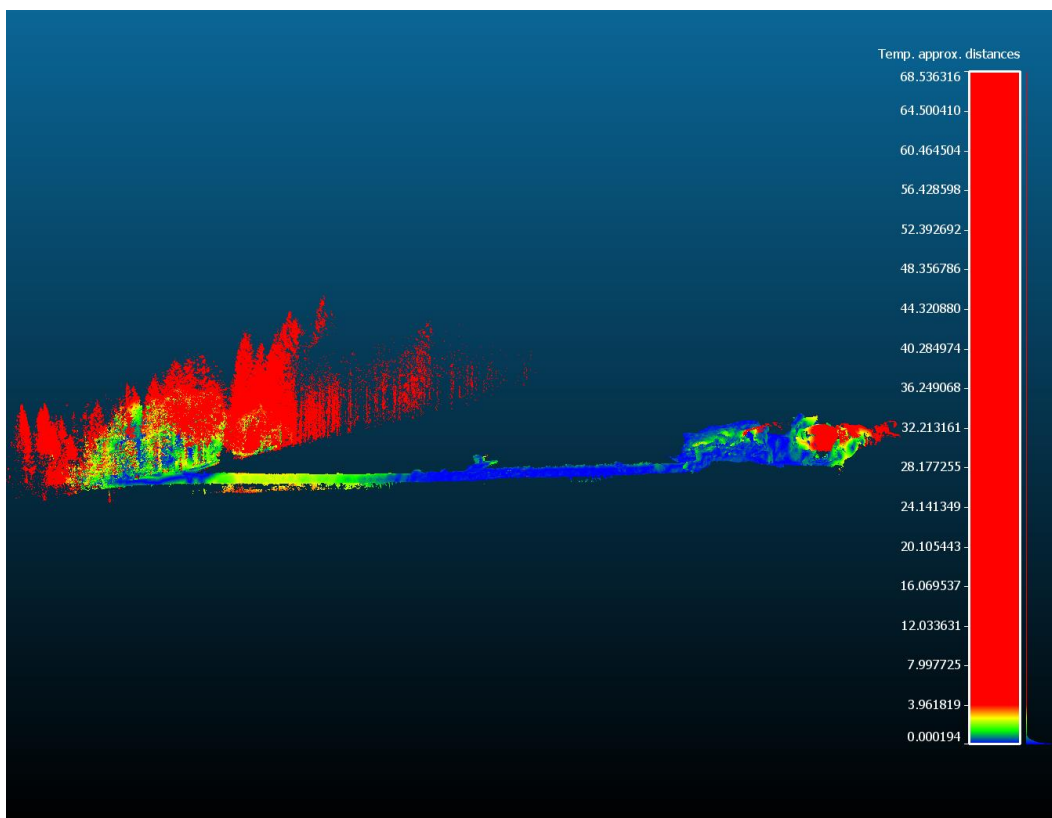


Obr. 24 - rozdíl před opravou – vlevo (změnou parametrů) a po opravě – vpravo



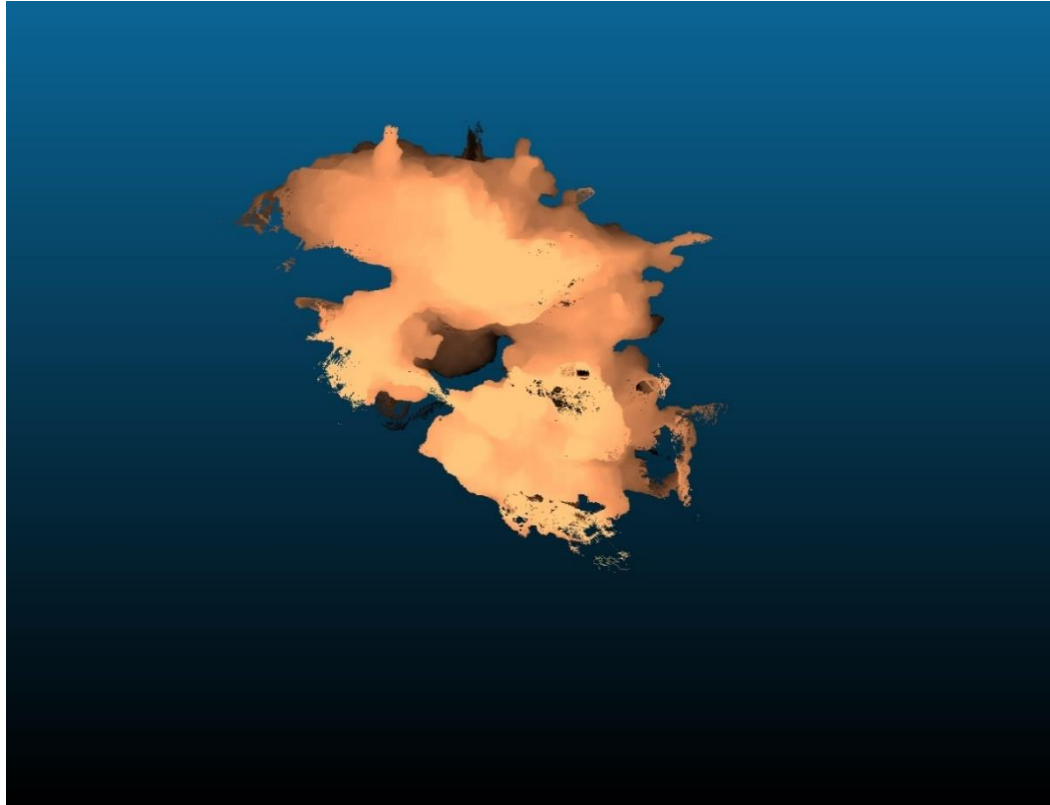
Obr. 25 - ZEB-Revo Horizon: měření odvodňovací štoly porovnané s předchozím měřením v software CC

K tomuto okruhu je nutné poznamenat, že přestože měření obou přístrojů vypadají kvalitně, přesto se liší. Rozdíly jsou znázorněny barevně, viz stupnice vpravo. Při použité standardní stupnice modrá barva v různé sytosti představuje vzdálenostní rozdíl cca 0-3 m, což je nevhodné. Proto po úpravě této barevné stupnice (na obr. 26) jsou viditelné rozdíly měření nejen v lesní části před štolou, ale i v samotné štole. Při bližší prohlídce dat bylo zjištěno, že měření z přístroje ZEB-Revo Go se v některých částech odlišuje až o několik metrů. Z tohoto důvodu bylo měření prozatím ponecháno k další úpravě a pro další zpracování bylo použito jen měření z přístroje ZEB-Revo Horizon.

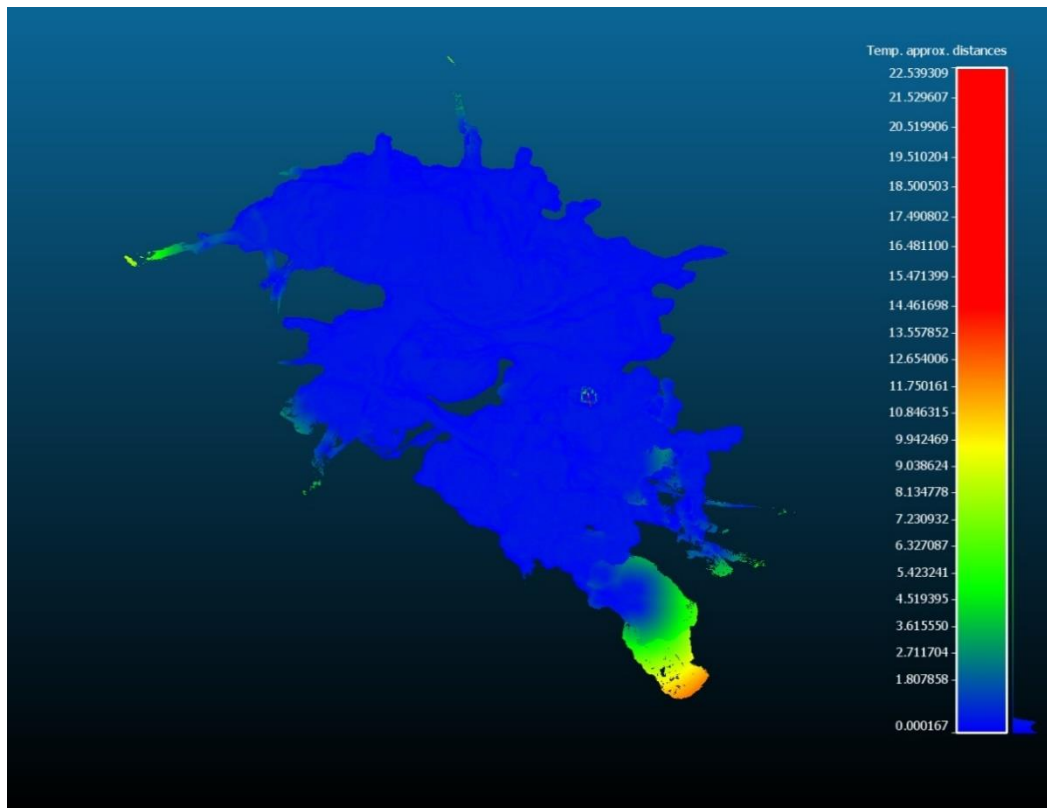


Obr. 26 - porovnání měření odvodňovací štolý s upravenou vzdálenostní stupnicí

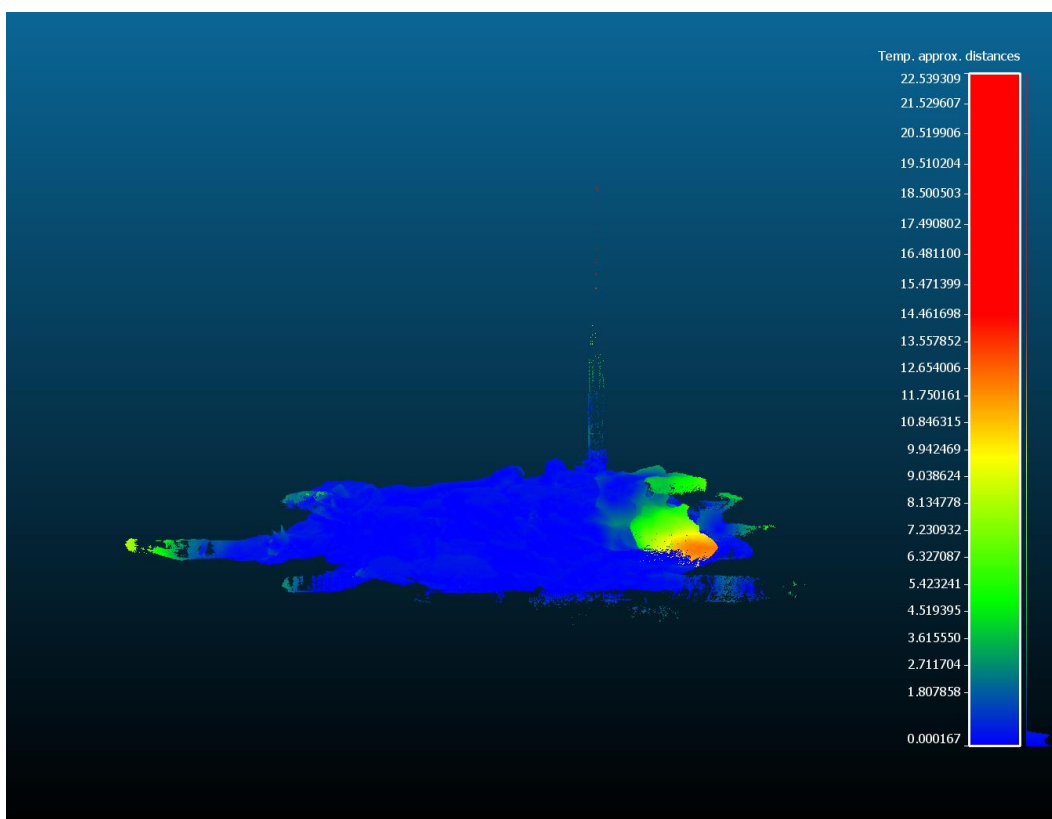
Druhým porovnávaným okruhem byl hlavní sál. Měření proběhlo rovněž strojem ZEB-Revo Go i ZEB-Revo Horizon. Na obr. 27 jsou vyobrazena data z přístroje ZEB Revo Go. Prostor hlavního sálu byl rozsáhlý s velikou členitostí a minimem úzkých chodeb, které zapříčiňují obyčejně chyby algoritmu SLAM. Na obr. 28 je zobrazeno druhé měření s přístrojem ZEB Revo Horizon, které bylo porovnáno s měřením ZEB Revo Go. Z obr. 28 je na první pohled vidět, že obě měření mají téměř 100% shodu ve všech bodech. Rozdíl nastal jen pro vzdálené body v méně přístupných částech, kde přístroj ZEB-Revo Go body nezaměřil z důvodu dosahu zařízení. Největší odchylky (v červené barvě) se vyskytují přibližně ve středu obr. 28, lépe jsou však vidět na obr. 29. Jedná se o původní šachtu, kudy se v historii horníci původně do dolu dostávali. Původní vstup je proveden pomocí věže ze dřeva s žebříky, ale díky povětrnostním podmínkám a faktu, že štola v době měření nebyla otevřena pro veřejnost, byly poklopy v originální přístupové šachtě uzavřeny a nemohlo být provedeno měření až na venkovní terén, též fotodokumentace z důvodu osvětlení chybí.



Obr. 27 - ZEB-Revo Go měření hlavního sálu



Obr. 28 - ZEB-Revo Horizon měření hlavního sálu porovnané s předchozím měřením se ZEB-Revo Go

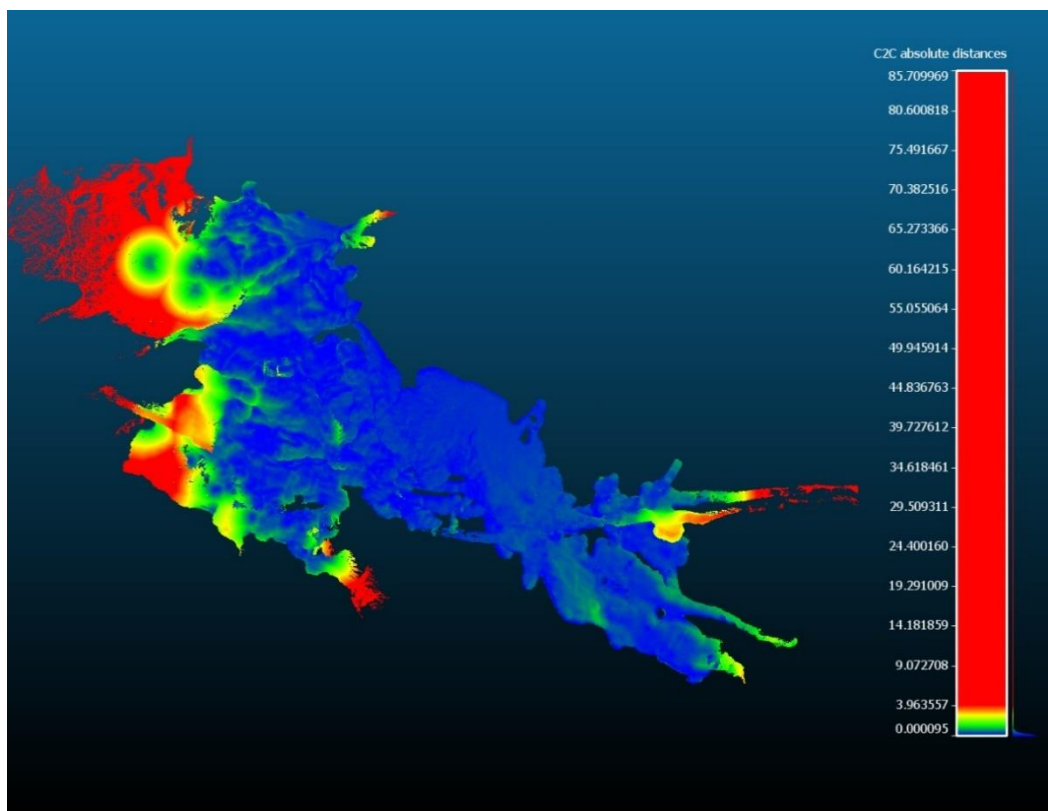


Obr. 29 - porovnané měření hlavního sálu z boku (s viditelnou svislou šachtou)

Posledním měřeným okruhem ve štole byly hornické rozrážky, do kterých se vstupuje z hlavního sálu. Opět, jako v předchozích případech, bylo provedeno měření dvěma přístroji pro porovnání přesnosti měření. Na obr. 30 je viditelné mračno bodů zaměřené přístrojem ZEB-Revo Go. Na dalším obr. 31 je opět měření z přístroje ZEB-Revo Horizon po porovnání s daty se ZEB- Revo Go. I zde jsou výrazné odchylky, dané dosahem přístroje a nestejnou trasou, po které šel měřič. Dalším důvodem rozdílů je vynechání menší chodby při průchodu s přístrojem ZEB-Revo Go.

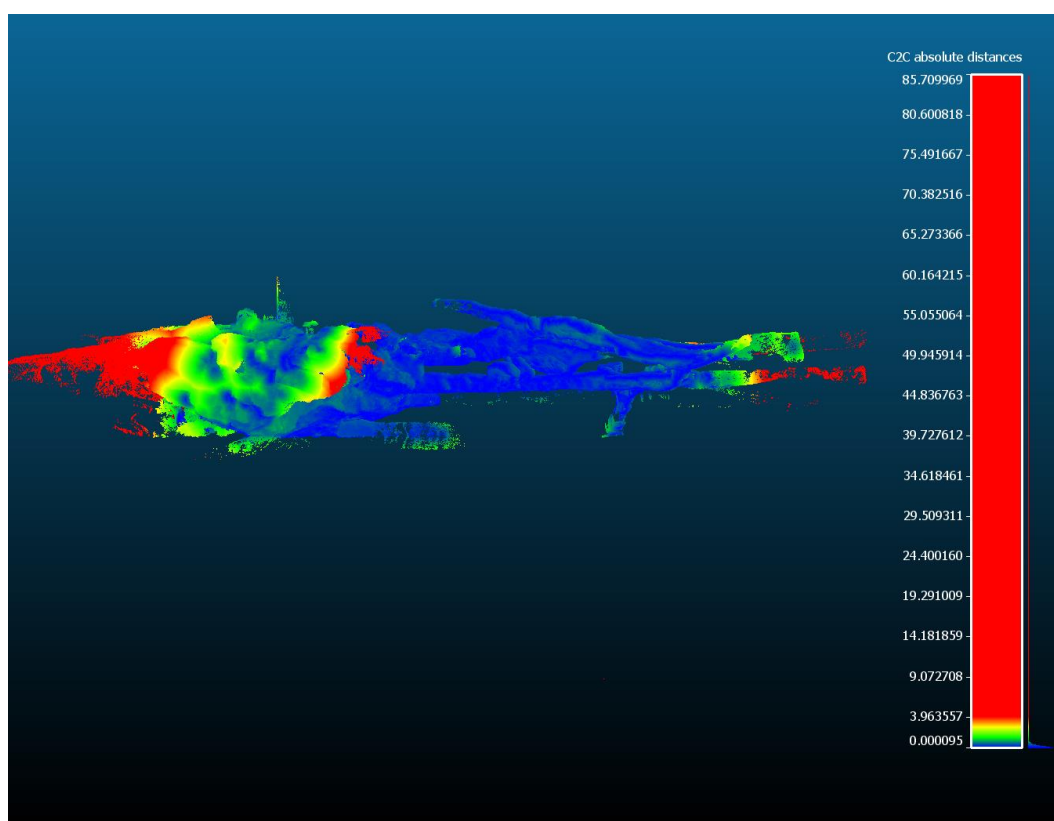


Obr. 30 - ZEB-Revo Go měření hornických chodeb



Obr. 31 - ZEB-Revo Horizon měření hornických chodeb porovnané s předchozím měřením s přístrojem ZEB-Revo Go

Na obr. 32 je opět pohled z boku na mračno bodů. Při měření tohoto okruhu nastaly nejen komplikace s přístrojem ZEB-Revo Go (samovolné vypnutí zařízení při měření, nejspíš z důvodu vlhka), ale i potíže s terénem. Mobilní laserové skenery jsou založeny na algoritmu SLAM, který předpokládá plynulý pohyb měřiče. Problém nastává, pokud je měřič donucen zastavit, či nerovnoměrně pohybovat přístrojem. Na spodní části obr. – je možné si povšimnout chodby, která je téměř vertikální, a dále v levé spodní části je navazující chodba, která jde horizontálně. Tyto dvě části ve skutečnosti tvoří jednu chodbu, ze které na konci vede vertikálně žebřík do vyššího patra. Horizontální část chodby byla částečně zaplavená vodou do výšky cca 40 cm. Vyskytly se proto dva problémy. Vodou neprochází infračervené světlo, které je v přístroji (laseru) využíváno, a dále strmý žebřík bránil měřiči v plynulém pohybu a data nebyla kompletní.

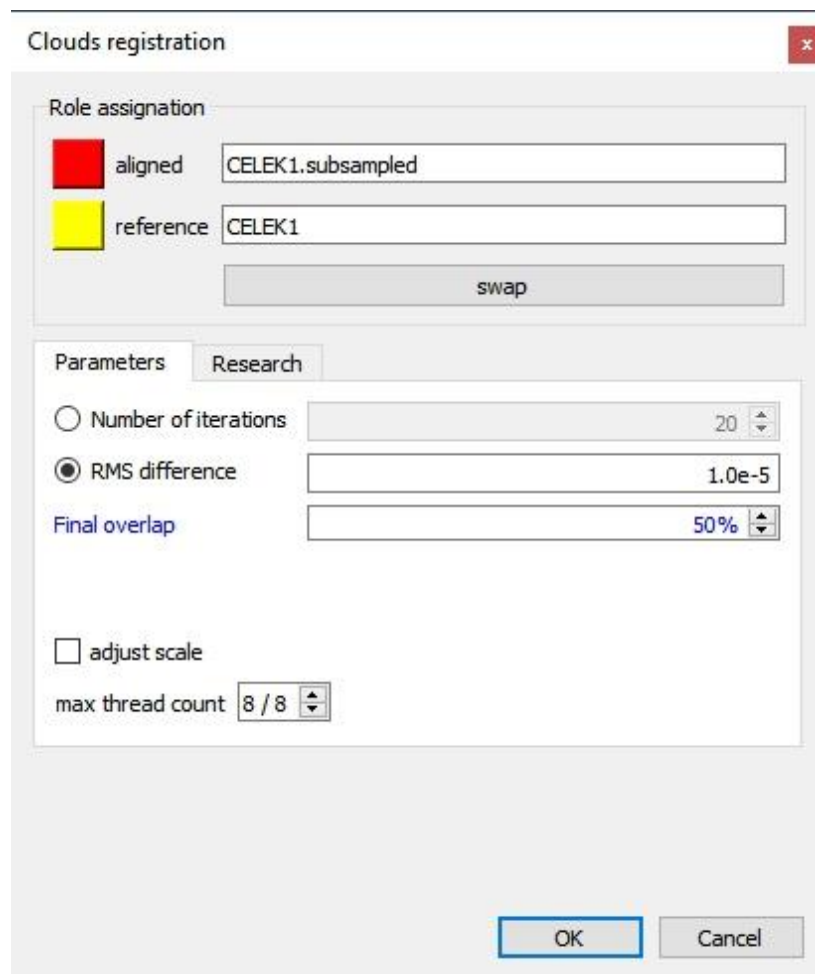


Obr. 32 - porovnané měření hlavního dómu z boku (nenaskenovaná chodba v pravé části)

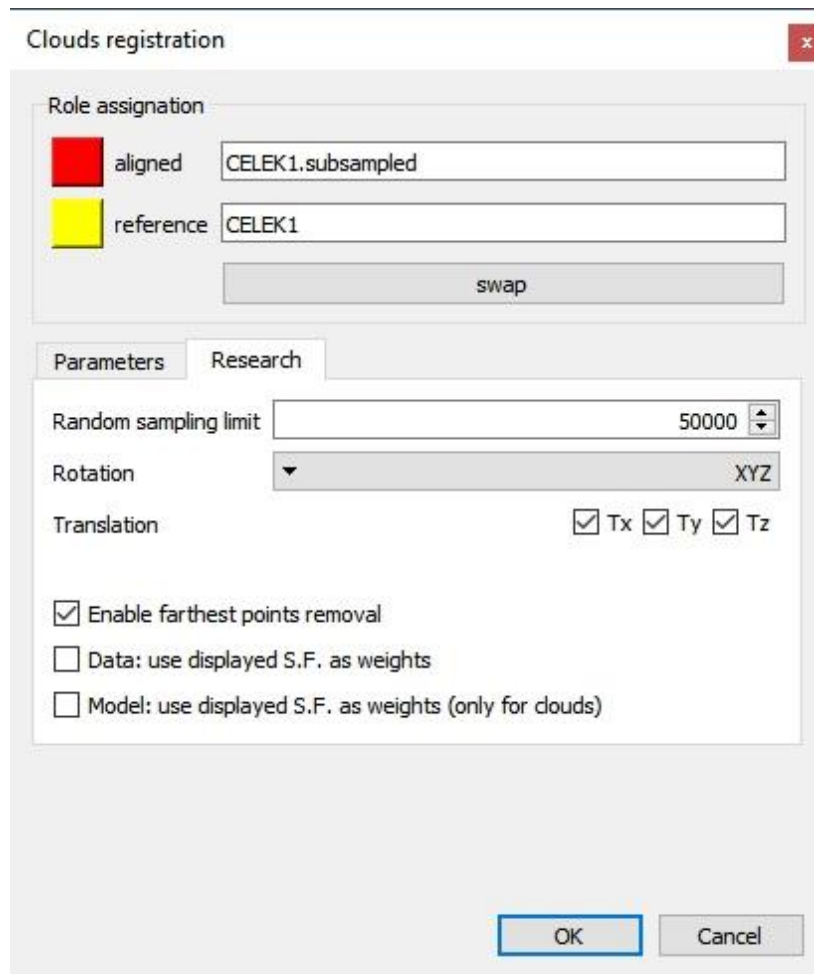
Dalším krokem při zpracování je spojení dat ze tří měřených okruhů v jedno mračno bodů. Pro tento úkon se nabízí v software CC dvě možná řešení. Jedno řešení je spojování mračen ručně přes funkci Translate/Rotate. Tato funkce dovoluje s mračnem jakkoli hýbat, či otáčet. Problémem v tomto případě bylo, že se zde nevyskytují pravidelné, jasně odlišitelné tvary, jako například rohy budov. Druhé řešení je využití funkce Tools → Registration → Fine Registration (ICP).

ICP podle doporučení na stránce cloudcompare.org/forum funguje dvěma způsoby. Ideálně, pokud jsou dvě mračna s velkým překrytem, se zaregistrují a spojí v jedno automaticky. Reálně tato funkce kontroluje hustotu dat, nastavenou velikost vzorku mračen, nastavené maximální překrytí, a z toho spočítá matici rotace. Bohužel tato funkce není popsána, ale pravděpodobně funguje na některé variantě metody nejmenších čtverců a postupných iteracích. Výsledná transformační matice se následně dá z konzole zkopírovat, archivovat a použít pro jiné mračno.

Obr. 33 a 34 zobrazuje nastavení parametrů funkce pro sloučení mračen



Obr. 33 - parametry pro sloučení mračen (1)



Obr. 34 - parametry pro sloučení mračen (2)

Finální RMS: 0.150095 (počítáno z 49999 bodů) $RMS = \sqrt{\frac{\sum (D_i^2)}{N}}$
 D_i - vzdálenost mezi body
 N - celkový počet porovnávaných bodů

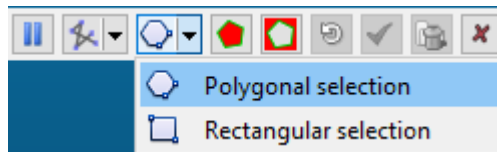
Aplikovaná transformační matice:

0.999995946884	0.002515248721	-0.001379981171	0.081376075745
-0.002517328132	0.999995768070	-0.001507563749	0.002780868905
0.001376183238	0.001511031413	0.999998152256	0.017196835950
0.000000000000	0.000000000000	0.000000000000	1.000000000000

měřítko: fixed (1.0)

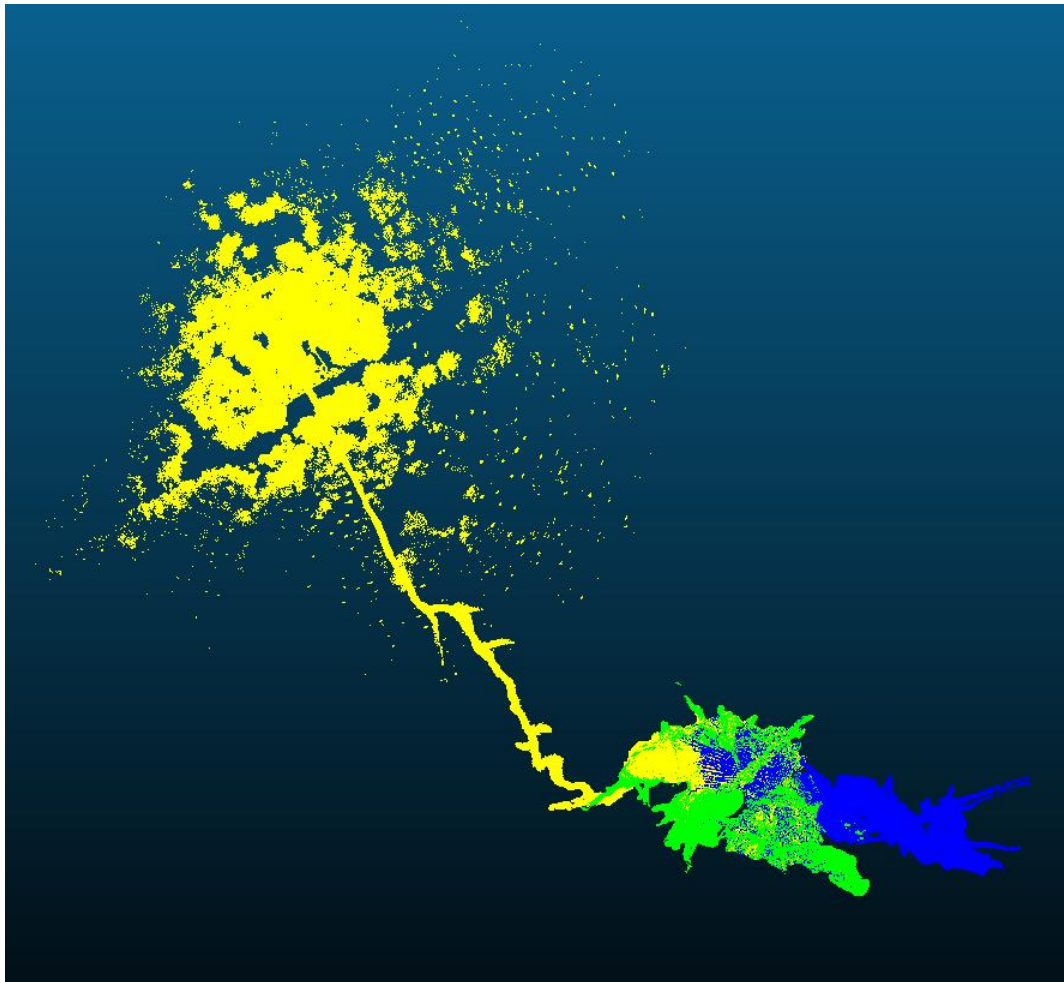
teoretické překrytí: 50%

Dalším krokem je odstranění bodů, které jsou přebytečné, v tomto případě třeba vzdálené stromy, které nejsou potřeba, či šum bodů uvnitř dolu. V CC existuje funkce Edit → Segment, která umožňuje odstranění bodů skrz polygonální selekci viz obr. 35.

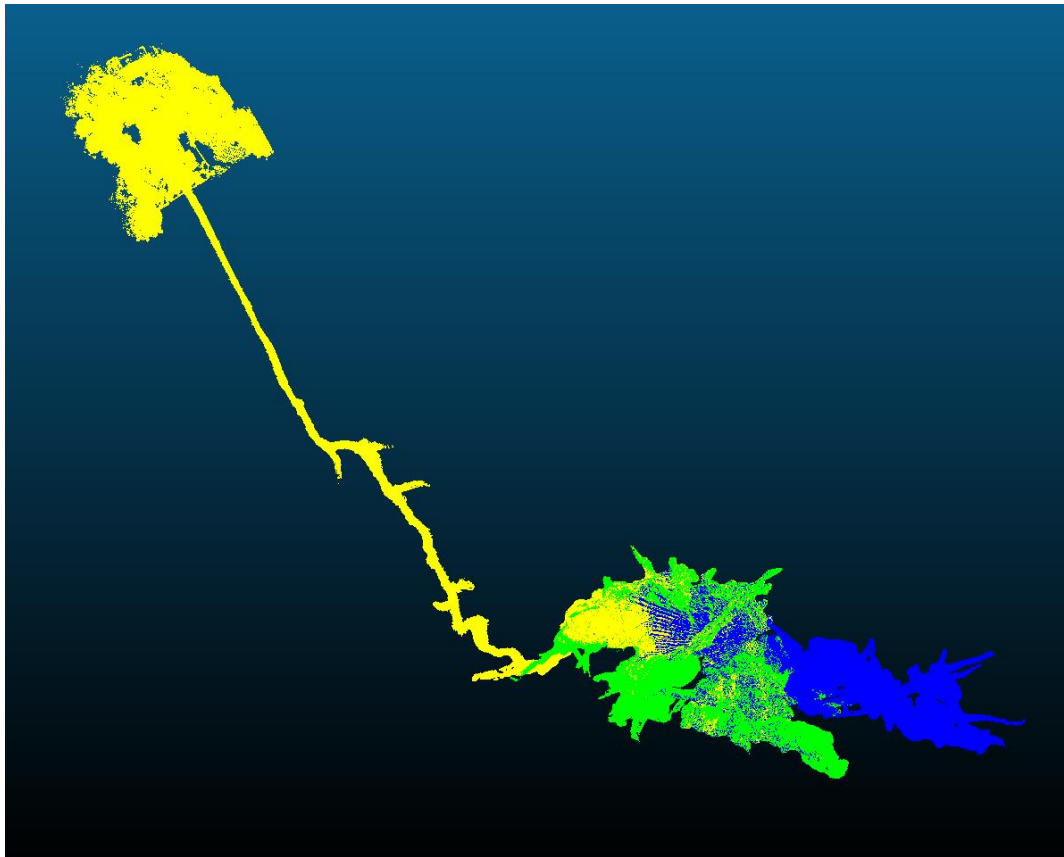


Obr. 35 - funkce Segment

Na obr. 36 se nachází sjednocená mračna bodů ze tří provedených okruhů. Na následujícím obrázku obr. 37 jsou již napojená mračna upravena.



Obr. 36 - napojená neoříznutá mračna



Obr. 37 - napojená oříznutá mračna

Následně s využitím funkce Merge multiple clouds se podařilo vytvořit jedno komplexní mračno bodů se kterým se dále pracovalo.

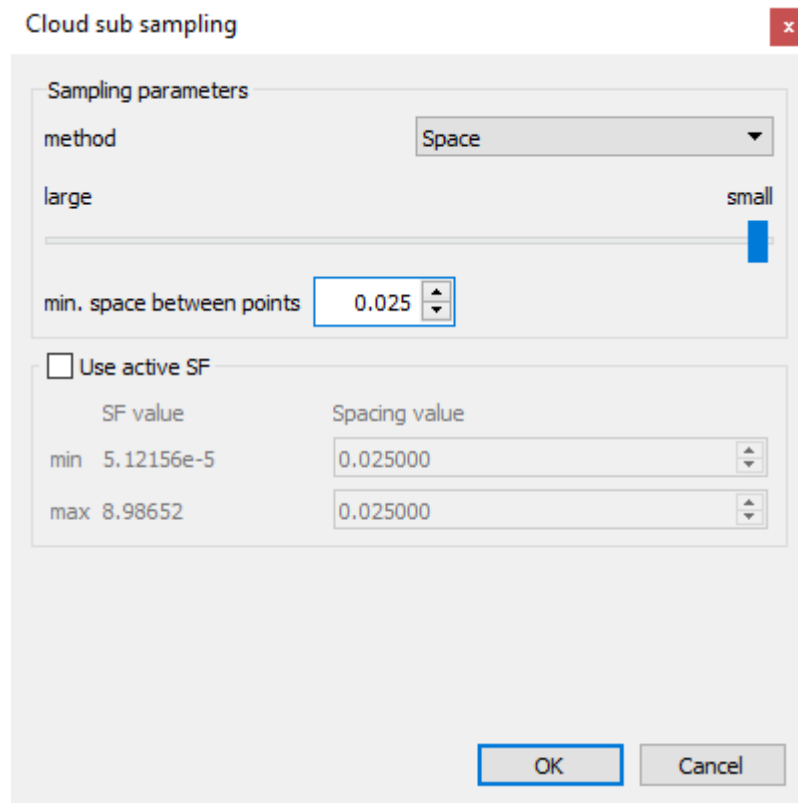
10.4 Převod to UE

Po otestování přesnosti a následném napojení jednotlivých mračen bodů je nutné vytvořit nepravidelnou trojúhelníkovou síť (TIN). V první řadě je ale nutné mírně redukovat počet bodů. Každá část má přibližně 80 miliónů bodů a s takovým množstvím se velmi těžko operuje. Problémové jsou operace uvnitř CC. Už jen pohyb mračna a snaha o napojení je časově náročnější, nicméně program sám při posunu redukuje množství zobrazených bodů, které se zobrazí následně po ukončení pohybu. Největším problémem je však triangulace, která bez redukce bodů trvá až několik hodin.

Pro redukci bodů je třeba využít funkci „Subsample“, která nařadí body formou minimální vzdálenosti na dva a půl centimetru. Tímto způsobem body v řídké pokrytých místech nemizí, a naopak redukuje se tam, kde je jich zbytečný nadbytek. Mračno bude mít stejnou vypovídací hodnotu (tvar skály není potřeba zachycovat v jemnějších než dvoucentimetrových

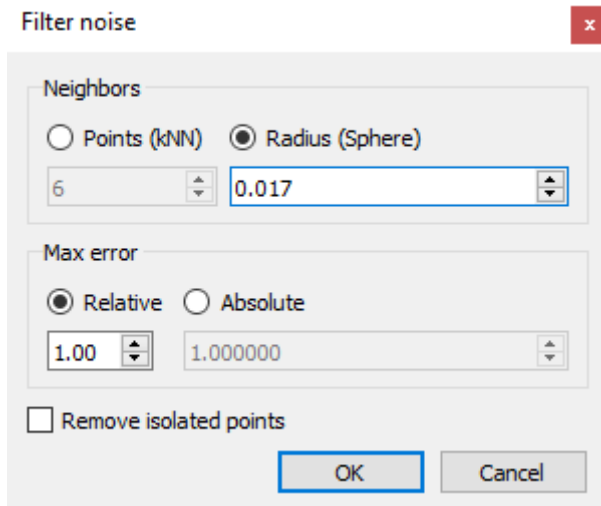
detailech, navíc pod dva centimetry se již odchylka dostává na rozlišovací schopnosti skeneru, respektive šumu), ale bude s ním lepší manipulace a bude možná i homogennější pro další akce, jako například pro triangulaci.

Jako nastavení výpočtu „Subsample“ viz obr. 38 se zadá metoda „space“ jakožto vzdálenost mezi jednotlivými body a minimální vzdálenost bude pro účely dolu postačovat již zmíněných 2,5 cm.



Obr. 38 - nastavení subsample

Dále je vhodné zmenšit šum. Šum v mračnu bodů se dá představit jako oba konce Gaussovy křivky. Body, které jsou vzdálené od aproximační křivky z okolních bodů o určitou hodnotu. Pro odstranění šumu slouží funkce Tools → Clean → Noise Filter, kde se jako rádius pro náš použitý přístroj nejvíce vyplatí hodnota 0.017 m viz Obr. 39. Hodnota pro rádius záleží na použitém přístroji. Pan O. Kříž poskytl profesionální názor o rádiu o použitého přístroje v této práci.



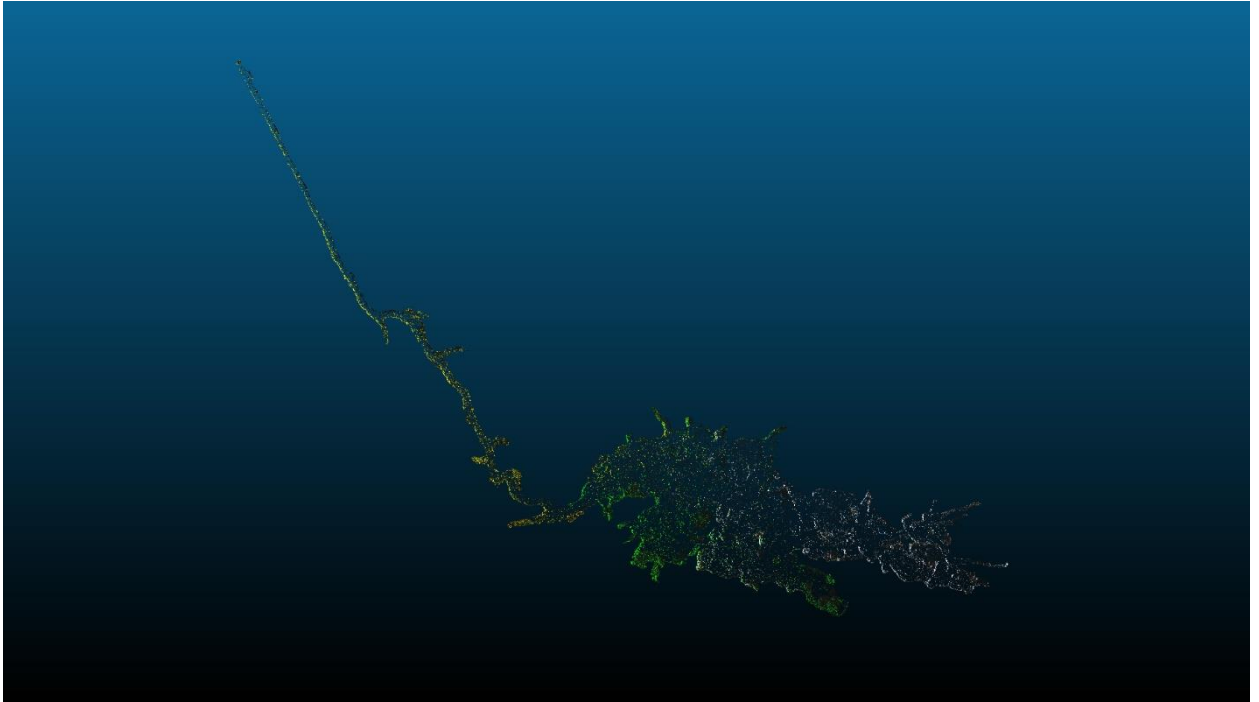
Obr. 39 - Noise Filter

Po všech provedených úpravách na mračnu se podařilo redukovat počet bodů na cca 14,5 milionů.

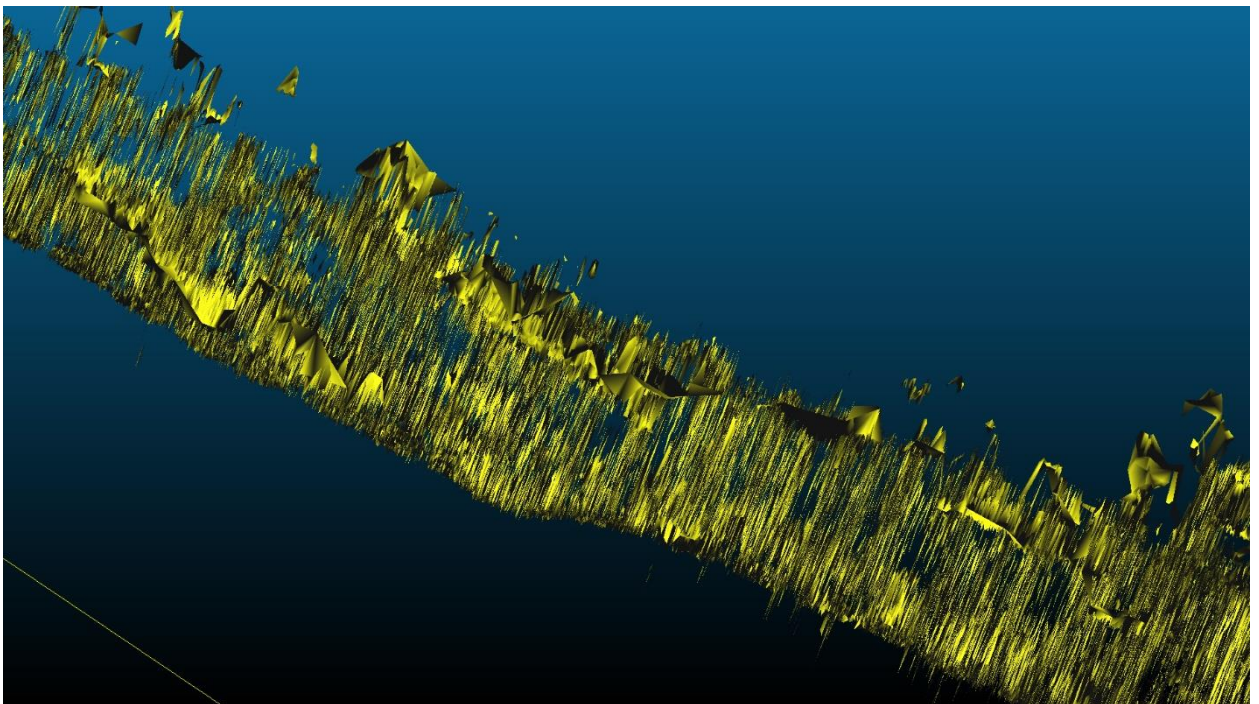
10.5 Problémy se zpracováním v CC

Program Cloud Compare je komplexní software pro práci s mračny bodů. Jeho největší výhodou je cena. CC je zdarma a s tím přichází i určité nedokonalosti.

Největším problémem pro tuto práci je vytváření modelu. CC má dvě funkce pro “meshování“, aneb vytváření sítě. Jedna z funkcí se jmenuje delaunay 2.5D (X/Y / best fitting), která spočítá Delaunayovu triangulaci pro vybrané mračno bodů. Jinými slovy vytvoří trojúhelníkovou síť, která z nejbližší trojice bodů vytvoří trojúhelník, přejde na další bod a zase vytvoří trojúhelník. Tímto způsobem pokračuje do doby, než všechny body jsou součástí jednoho, nebo více trojúhelníků. Při použití této funkce je možné omezit maximální možnou délku hrany trojúhelníku. Tento typ triangulace je vhodné využít pro vykreslení terénu. Při modelování 3D objektu jako je důl Johannes se algoritmus setkává s problémem, že není schopný identifikovat body, které má spojovat. Na obr. 40 a 41 je výsledný model při využití Delaunayovy triangulace. Přes všechny úpravy mračna i algoritmu je výsledný model nepoužitelný.



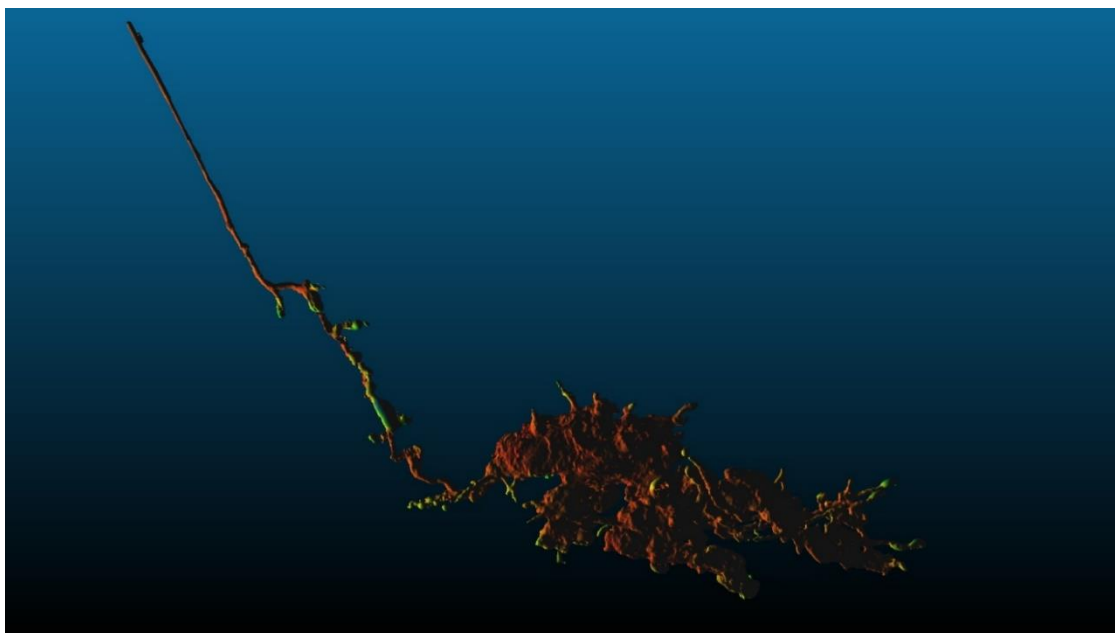
Obr. 40 - Delaunayova triangulace



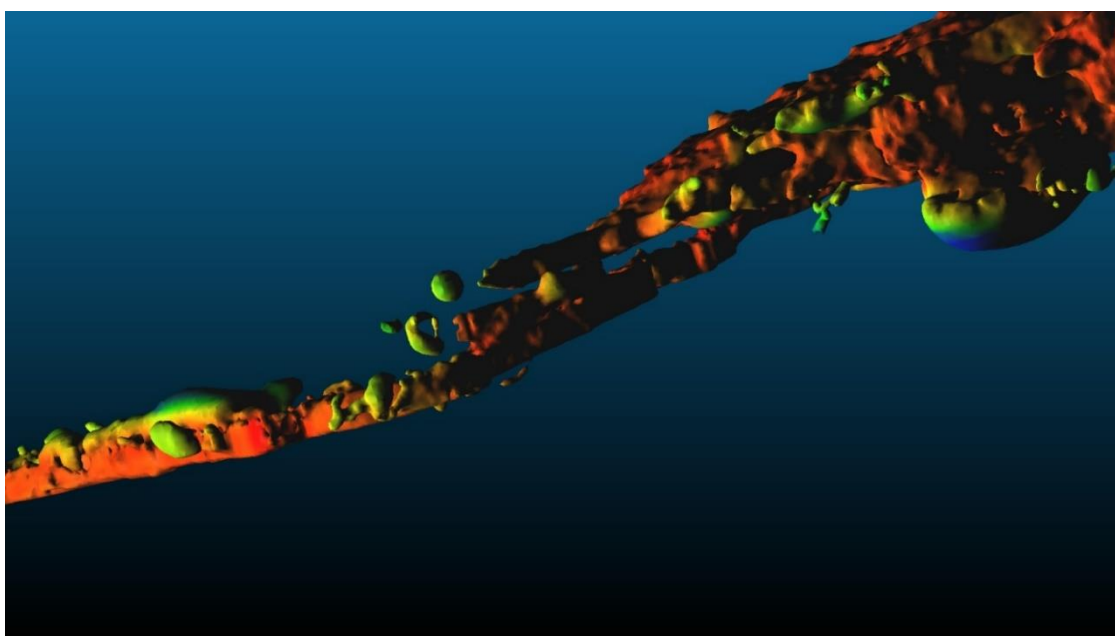
Obr. 41 - Delaunayova triangulace, detail

Druhá z funkcí se jmenuje “PoissonRecon“, dříve “ Poisson Surface Reconstruction“, aneb Poissonova rekonstrukce povrchu. Tato funkce se zprvu zdála vhodná, nicméně výsledný model měl v určitých místech problémy. Podle cloudcompare.org/doc/wiki je autorem M. Kazhdan z univerzity Johns Hopkins ve Spojených státech. Do funkce vstupuje normalizované mračno

bodů, které by mělo být očištěné o šum. Další podmínkou je uzavřenost objektu. Tím je myšleno, že pokud jsou v objektu části, které nejsou uzavřeny, například vstup do nezměřené chodby, nebo otevřené dveře ven z objektu, tak budou uzavřeny automaticky algoritmem s větší chybou. Pro ukázkou na obr. 42 je vytvořený model z poměrně očištěného mračna bodů, kde tmavě hnědé části jsou přesné, a zelené-modré části jsou otevřené chodby s nedostatkem dat pro uzavření objektu. Takto vygenerovaný model vypadá vcelku dobře, nicméně se zde nacházejí části, díky kterým je model nepoužitelný, viz obr. 43.



Obr. 42 - Poissonova rekonstrukce



Obr. 43 - Poissonova rekonstrukce výřez

Vzhledem k podstatě fungování této funkce je nemožné vytvořit vhodný model. V určitých částech dolu se nacházela voda, viz modrá část na obr. 43. Hlavním cílem Poissonovy rekonstrukce je vytvořit věrohodný model z uzavřeného objektu, jako je například socha. Není možné vytvořit z dolu uzavřený objekt, když na některých místech data chybí. Tento způsob tvorby modelu má i jiný problém. Při převodu do UE bylo zjištěno, že většina vnitřních objektů je zdeformovaná. Na obr. 44 je zobrazeno zábradlí v sw. UE za využití modelu z Poissonovy rekonstrukce.

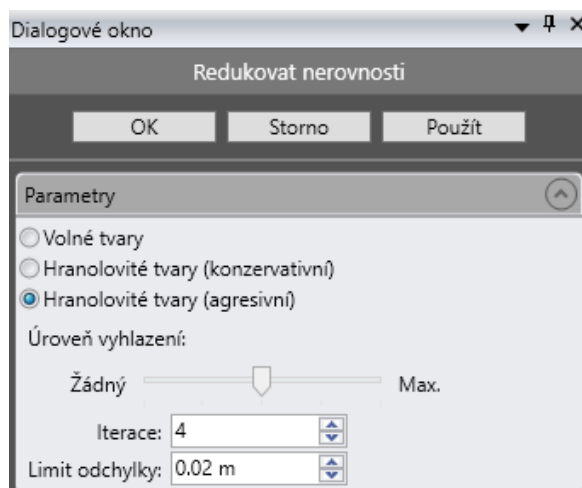


Obr. 44 - nezdařené zábradlí v programu UE

10.6 Zpracování modelu v GeoMagic

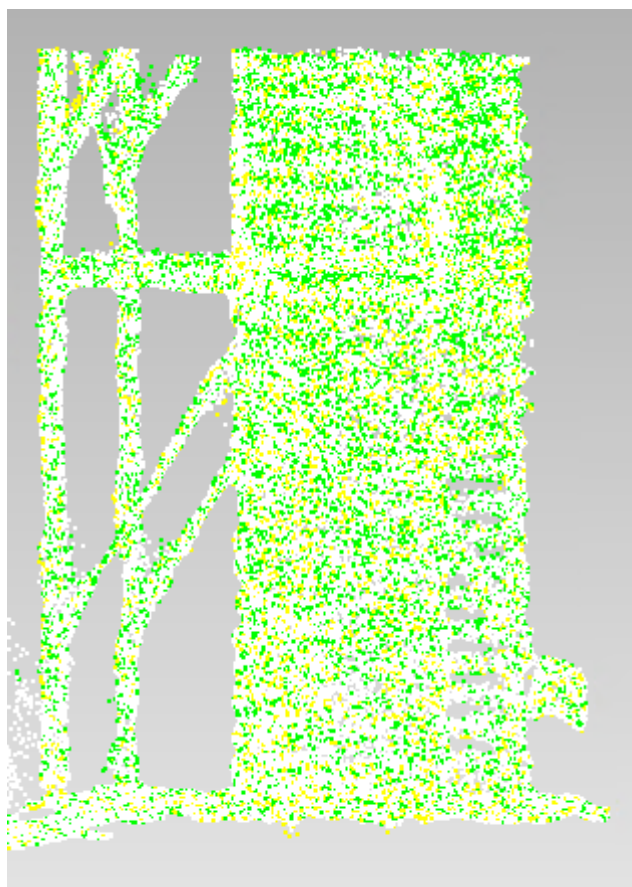
Po neúspěchu tvorby modelu v CC byla ČVUT v Praze poskytnuta možnost vzdáleného připojení na počítač, který měl licenci na program GeoMagic Wrap. Tento placený program je špičkou pro práci s mračny bodů. Již očištěné mračno bodů z programu CC bylo exportováno do souboru *.pts, který byl nahrán do sw. GeoMagic Wrap.

Prvním krokem bylo redukování nerovnosti. Tato funkce upravila mračno bodů pro vykreslení méně “rozbitého“ modelu. Proveďte vyhlazení a iteračním procesem zpřesnění mračna. Využité nastavení je na obr. 45. Čím větší úroveň vyhlazení, tím menší přesnost, nicméně při menší úrovni vyhlazení, než byla využita (úroveň 2) docházelo k poškození objektů.

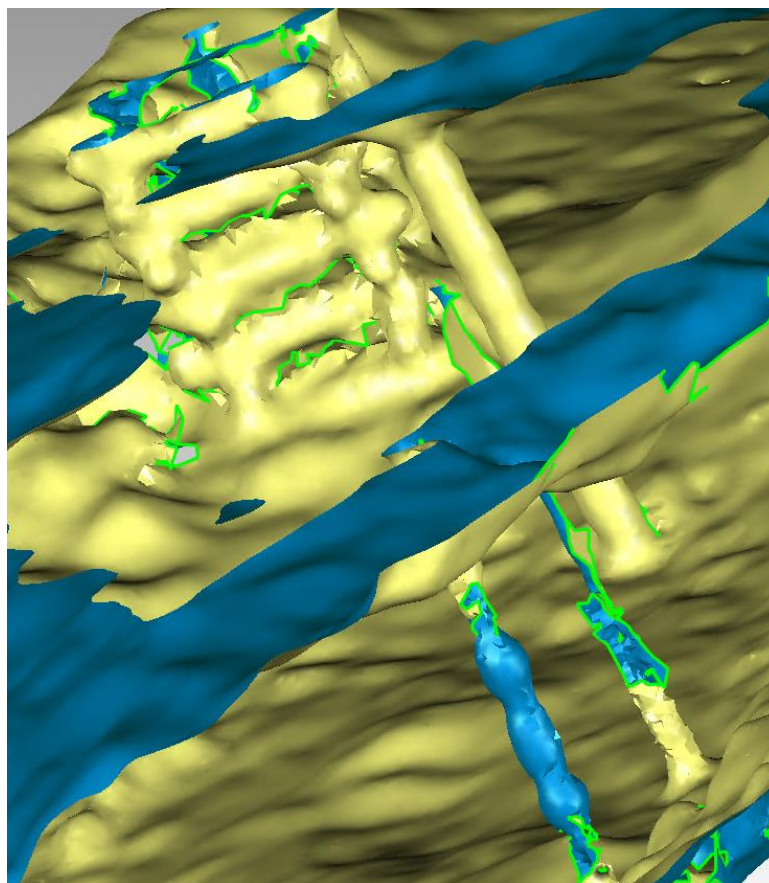


Obr. 45 - nastavení redukce nerovnosti

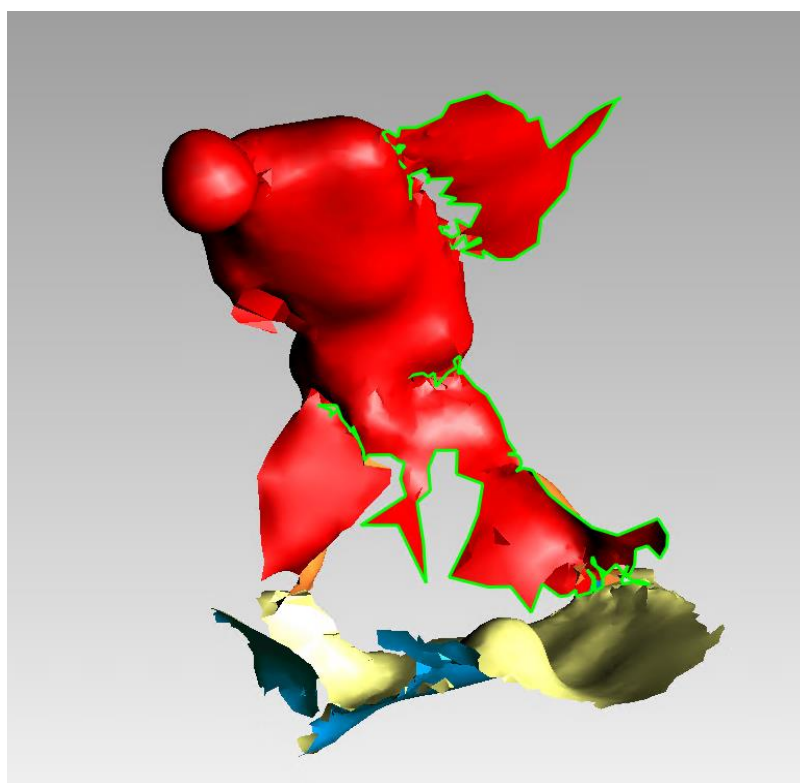
Dalším krokem byla ruční úprava mračna, kde se odstranil šum, který nebyl odstraněn automaticky a těžko vykreslitelné objekty (šachta viz obr. 46, podpůrné klády viz obr. 47, nanošené dřevo viz obr. 47, figuríny viz obr. 48, dveře a zábradlí).



Obr. 46 - dřevěná šachta



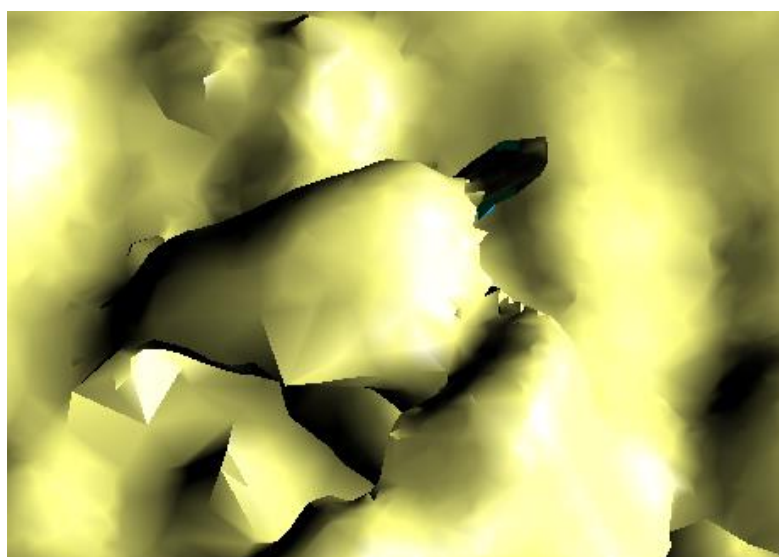
Obr. 47 – nanošené dřevo a podpůrné klády



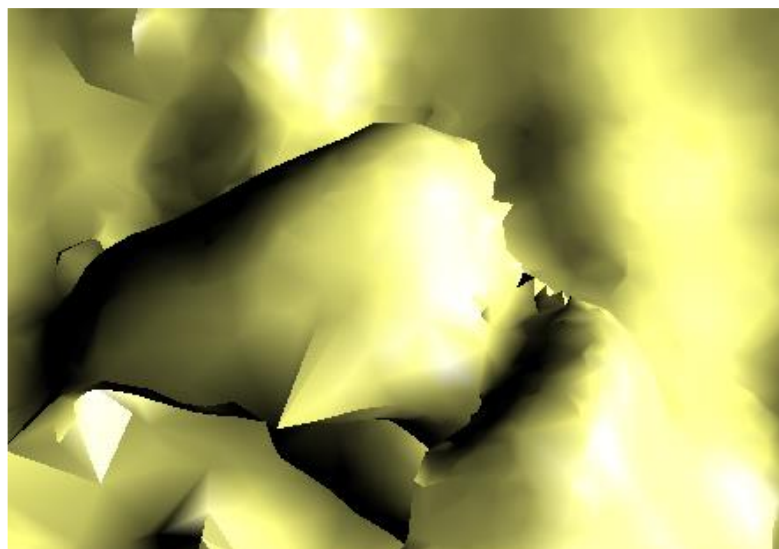
Obr. 48 – figurína

Tento proces odstraňování bodů byl časově náročný. Šum byl vymazán funkcí v CC, nicméně stále zůstaly body, které program neidentifikoval jako šum. Nejprve se vytvořil prvotní model, který sloužil pro lepší orientaci v prostoru, a následně se za pomoci lasového výběru označovaly a následně mazaly body, které tvořily šum kolem povrchu celého objektu. Již při prvním pohledu na model byly identifikovány velké chyby, například díry skrz celý model. Tyto “díry“ byly podpůrné klády (výdřeva), viz obr. 47. Body tvořící tento objekt byly vybrány a v záložce “zobrazit“ bylo třeba vybrat “pouze vybrané“, tím se zobrazilo jen malé množství bodů, se kterým se dalo lépe pracovat. Postačilo využít funkci rotace, označit body, které tvořili nechtěný objekt a následně odstranit. Jakmile byly odstraněny všechny chyby, které vyčnívaly na povrch, pak se ve správci modelu vybral již vytvořený model (lze pracovat pouze s bodovou vrstvou) a přešlo se do záložky “zobrazit“, kde je možnost řezu objektu. Řez posloužil k nahlédnutí dovnitř objektu, kde se již zmíněným způsobem odstranily všechny viditelné vady v mračně bodů.

Jakmile je mračno pročištěno, je za potřeby s využitím funkce wrap vytvořit finální model a následně upravit. Úpravou mračna bodů bylo docíleno určitého stupně pročištění, ale některé chyby v modelu zůstávají. Postup je podobný jako u čištění mračna bodů, díky řezu se se pohledem nalezne chyba, následně se poškozená oblast označí a zobrazí se pouze upravovaná část. Poškození se vyřízne a následně je potřeba zahladit vzniklou díru. Na to existuje funkce “vyplnit jednotlivě“, kde se nastaví vyplnění “plochý“, které bere okolí v potaz, ale zároveň terén co nejpříměji. Obr. 49 a obr. 50 ukazuje deformaci před a po úpravě. Těchto drobných deformací se v modelu vyskytuje více a díky tomu, že je třeba provádět změny jednotlivě vzniká velká časová náročnost zpracování.



Obr. 49 – chyba v modelu



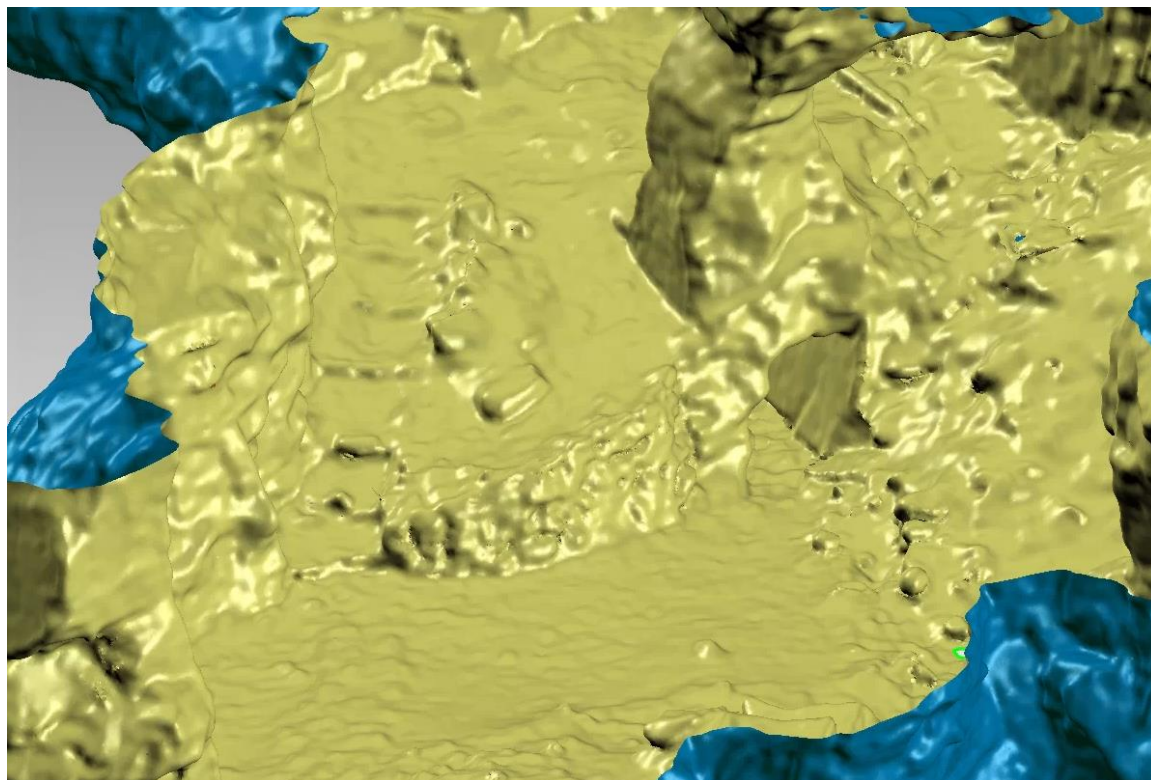
Obr. 50 – opravená chyba v modelu

11 Vizualizace objektu

11.1 Vizualizace v GeoMagic Wrap

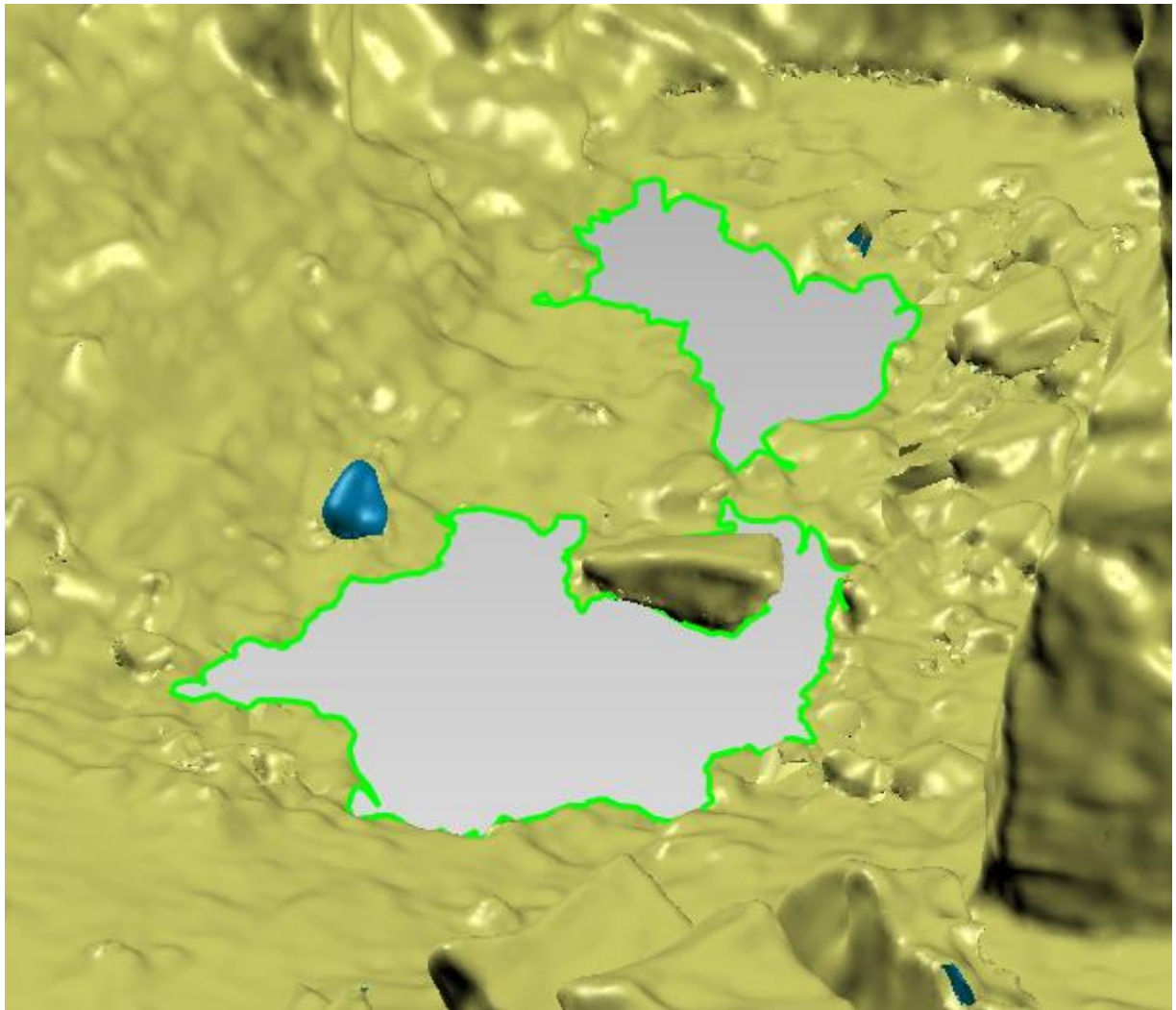
Z časových důvodů byl upraven a vizualizován pouze hlavní dóm štoly Johannes, což je cca 60-65 % celého objektu.

Na obr. 51 se nachází část dómu, kde bylo zábradlí, které bylo ručně odstraněno, a kde se nachází vstup do zpola zatopené chodby, viz kapitola 10.3, obr. 32.



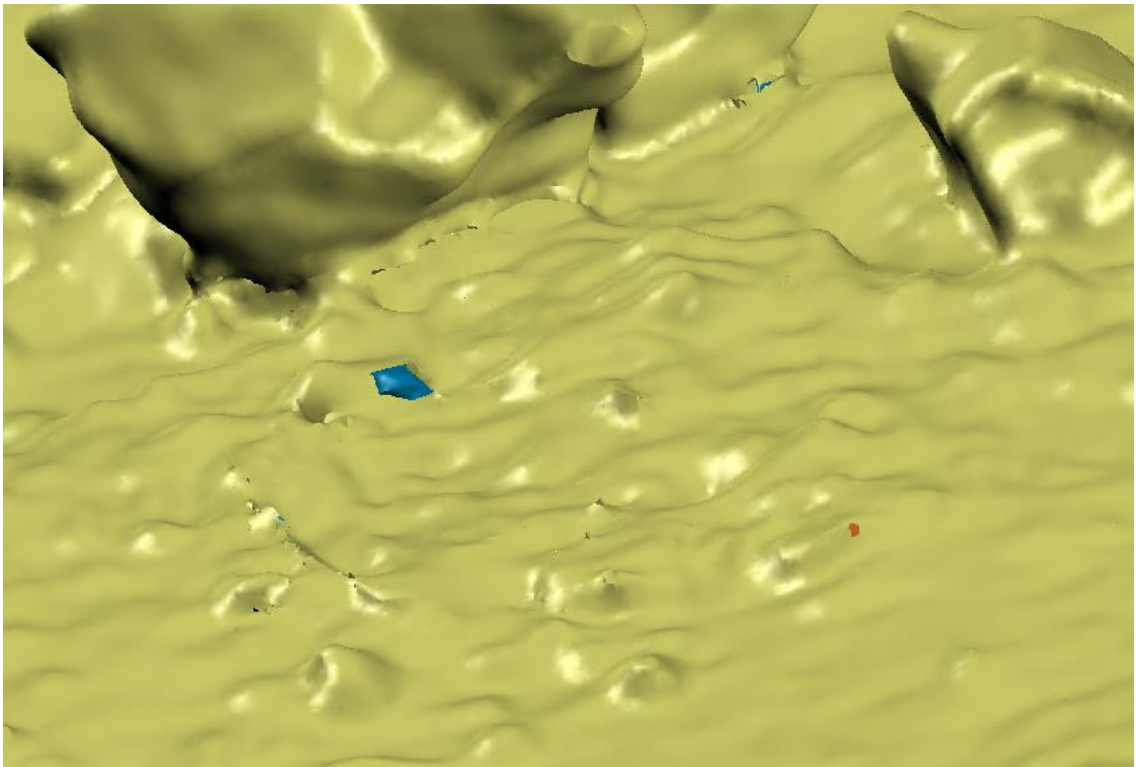
obr. 51 – vizualizace v GeoMagic – část 1

Obr. 52 obsahuje detail důlního jezírka, jež nebylo laserovým skenerem zachyceno, proto oblast není vyplněna. V UE se následně může vytvořit neviditelná stěna a naplnit jezírko neprůhlednou vodou.



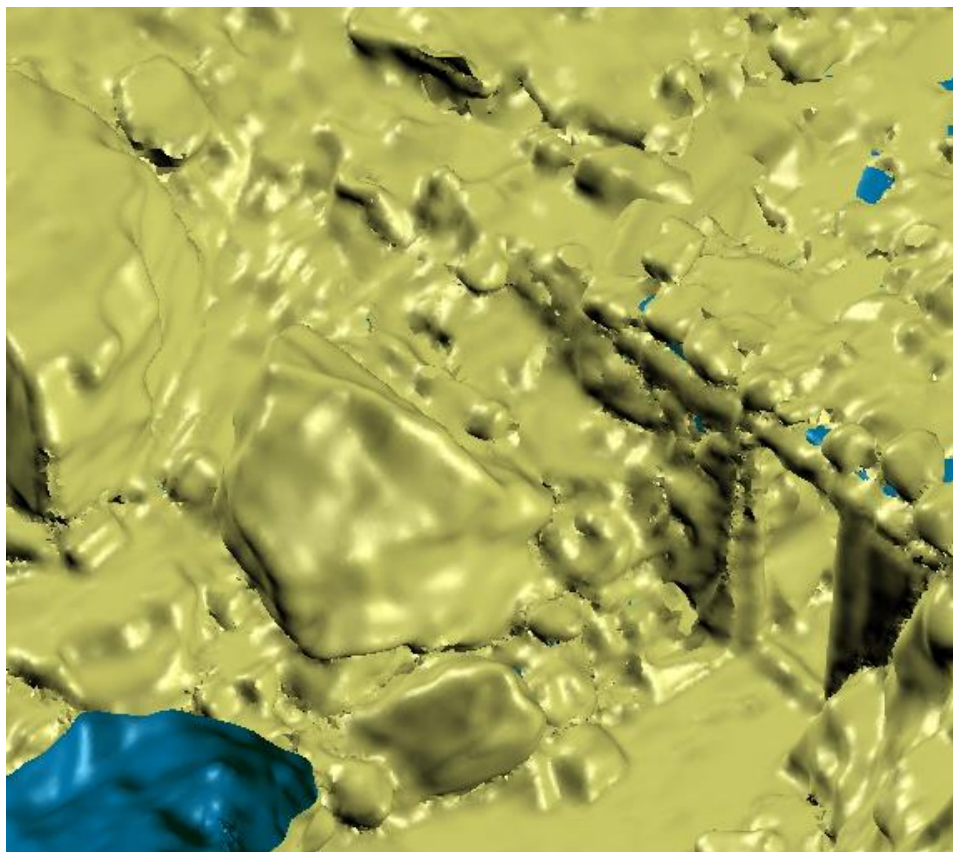
obr. 52 - vizualizace v GeoMagic – část 2

Na obr. 53 je vizualizované místo, kde se až do stropu tyčí dřevěná konstrukce, navazující na vstupní šachtu, viz kapitola 10.6 obr. 46. Šachta nebyla vymodelována vypovídajícím způsobem. Jednotlivé hrany byly propojeny, ačkoli propojeny být neměly a vzhledem k tomu, že není pořízená fotodokumentace objektu, nemohl být ani model šachty řádně vymodelován. Z těchto důvodů byla celá dřevěná konstrukce z výsledného modelu odstraněna a výsledný prostor byl zahlazen dopočítaným terénem.



obr. 53 - vizualizace v GeoMagic Wrap – část 3

Obr. 54 znázorňuje vstup do hlavního domu z odvodňovací štoly.



obr. 54 - vizualizace v GeoMagic – část 4

11.2 Vizualizace v Unreal Engine 4

Model byl zdecimován na cca 14,500,000 trojúhelníků v Geomagic Wrap a následně rozřezán na 3 části kvůli efektivnějšímu importu a práci v UE. Rozřezáním modelu a vytvořením separátního modelu z každého řezu, zde ve formátu *.obj je možné efektivněji importovat a pracovat s velkými objekty v UE. Velké polygonové sítě není možné nahrát. UE není stavěný na takové množství polygonů. Původní model měl cca 28,000,000 polygonů, zatím co UE dokáže nahrát modely, které mají maximálně 10,000,000 polygonů.

Po vytvoření řezů už není v žádném případě možné otáčet s modelem nebo ho jinak upravovat, části by potom nenavazovaly na sebe v UE. V situaci, kdy se s jedním z řezů pohne, není možné pak přesně identifikovat spoj mezi objekty. Po nahrání do UE je dále třeba všechny části spojit do skupiny (funkce Group), která zabrání možnému posunu jen jednoho z modelů.

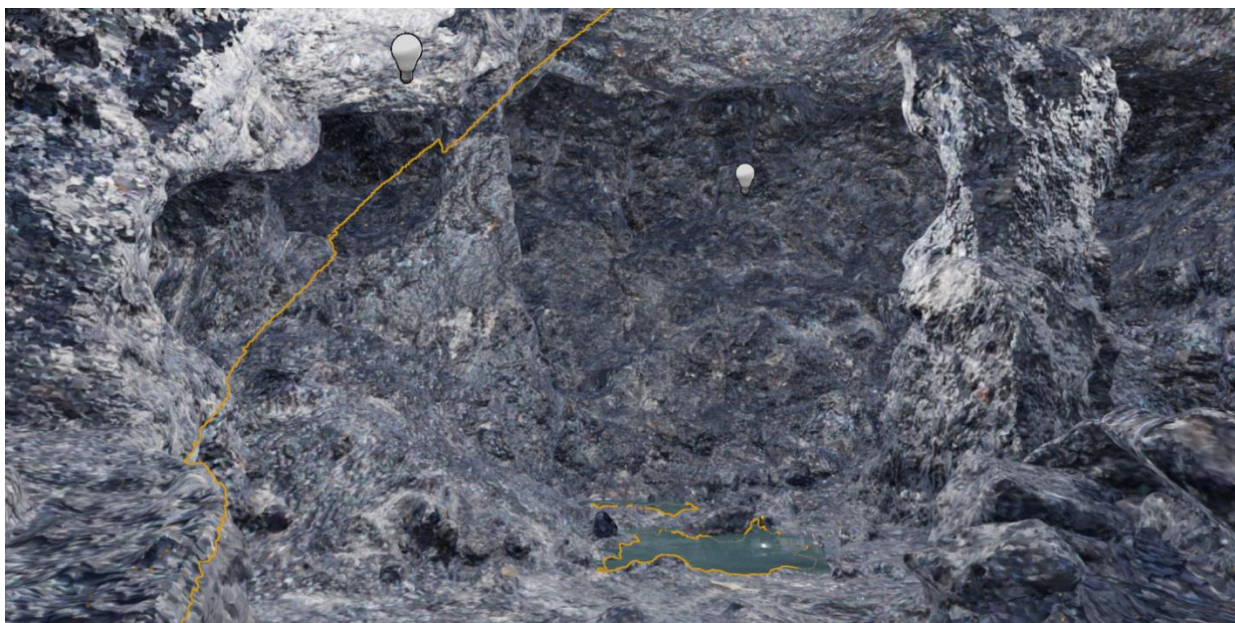
Získané modely jsou:

Chodba → cca 2,000,000 polygonů

Dóm (1) → cca 7,500,000 polygonů

Dóm (2) → cca 4,600,000 polygonů

Model nemá texturu, protože mobilní laserový skener nemá kameru, která by přidala bodům barvu, proto musel být aplikován materiál (set texture → diffuse texture, normal texture, atd.). Pro UE je zapotřebí nechat vypočítat základní texturu v Geomagicu. Tento výpočet vypočte i souřadnice U, V (textura se řídí podle souřadnic U,V, jedná se o předem definované osy X a Y pro texturu. Aby se nepletly souřadnice textury s prostorovými souřadnicemi, používá se proto U,V) a díky tomu je možné aplikovat v UE materiál.



Obr. 55 – spojnice a umělé osvětlení v Unreal Engine

Na obr. 55 je zobrazena spojnice dvou modelů, díky správnému postupu na sebe perfektně doléhají a výsledný model tak není znehodnocený.

Je zde vidět i místo na zemi, které v modelu chybí, jedná se o vodu, která v dole je přítomná. Vodu není možné naskenovat pomocí laserového skeneru, protože pohlcuje světlo a data jsou v těchto oblastech extrémně nepřesná nebo chybí. V modelu byla doplněna voda pro reálnější simulaci prostředí.

V objektu byla také rozmístěna světla, která jsou nastavena jako statická (v tomto režimu se smějí překrývat a není problém se stíny). Pozice světla je znázorněna žárovkou. Jako materiál byl zvolen kámen, který se nachází v základním obsahu VR template, do které je model zakomponován.

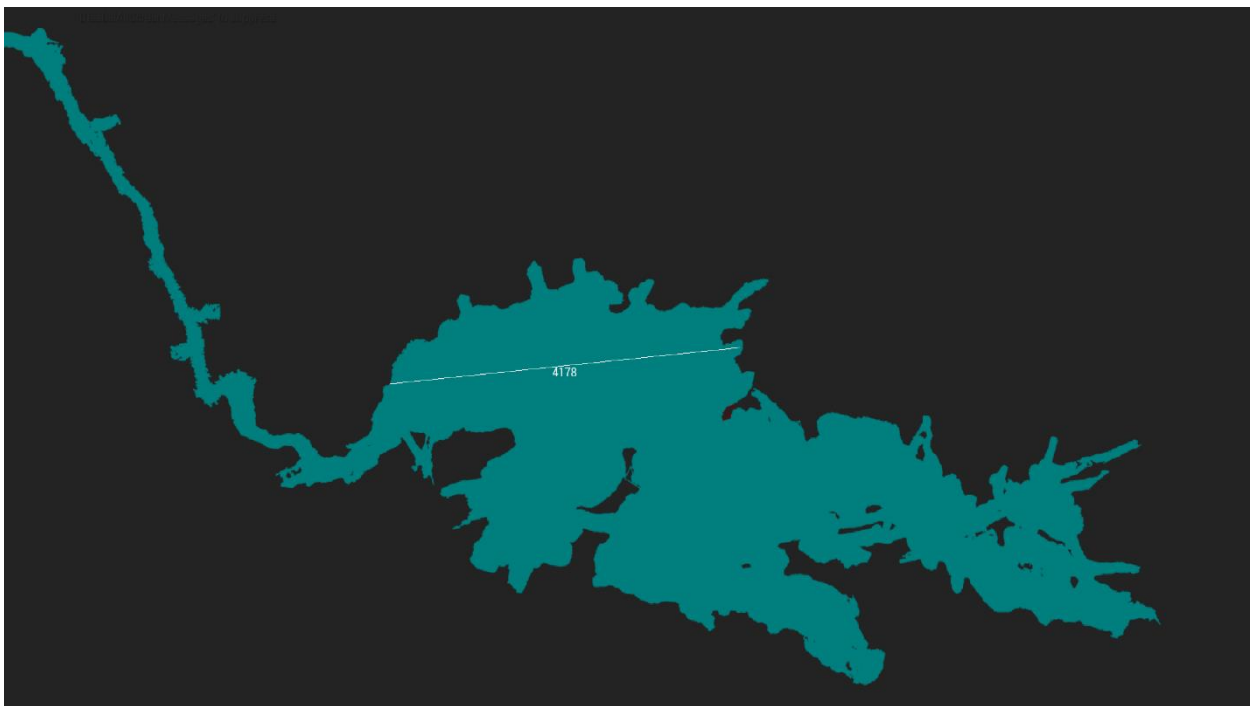
Na obr. 56 je vizualizována odvodňovací štola, kterou se vstupuje do hlavního dómu.



Obr. 56 – odvodňovací štola v Unreal Engine

Při přepnutí do modu Brush Wireframe v Unreal Engine je možné si model i oměřit.

Ukázky možnosti měření v modu Brush Wireframe jsou zobrazeny na obr. 57 a obr. 58.



Obr. 57 – ukázka měření vzdálenosti v Unreal Engine (1)



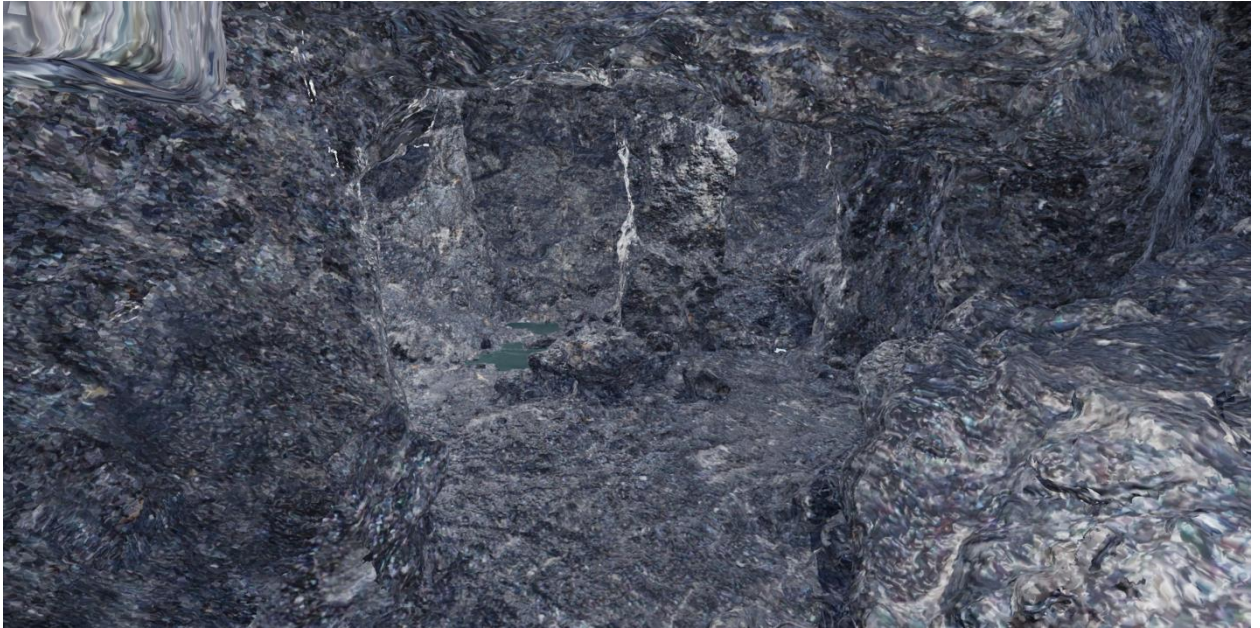
Obr. 58 - ukázka měření vzdálenosti v Unreal Engine (2)

Pro tvorbu VR prostředí byla použita šablona Template VR, zde byl model nahrán a bylo tak využito předdefinovaných nastavení pro VR jako je teleport atd.

Model byl po nahrání do UE otevřen v editoru a byl mu nastaven kolizní systém, to znamená, že se vytvoří tzv. neviditelná stěna, která způsobí, že nelze procházet zdmi. Byly také rozšířeny hranice pro možnost teleportování po celém objektu.

S texturou objektu by se dalo pracovat lépe, z časových důvodů je však použita standardní, kterou základní mapa nabízí, proto není úplně nejostřejší. Zde by bylo možné vytvořit i vlastní materiál, který by texturou vystihoval reálnou situaci. Bohužel pro nedostatek umělého osvětlení při měření se nepodařilo pořídit dostatečně kvalitní fotografie, ze kterých by se následně materiál dal vytvořit.

Na obr. 59 a obr. 60 jsou pohledy do hlavního dómu z Unreal Engine.



Obr. 59 – pohled do hlavního dómu v Unreal Engine (1)



Obr. 60 – pohled do hlavního dómu v Unreal Engine (2)

11.3 Vizualizace ve VR

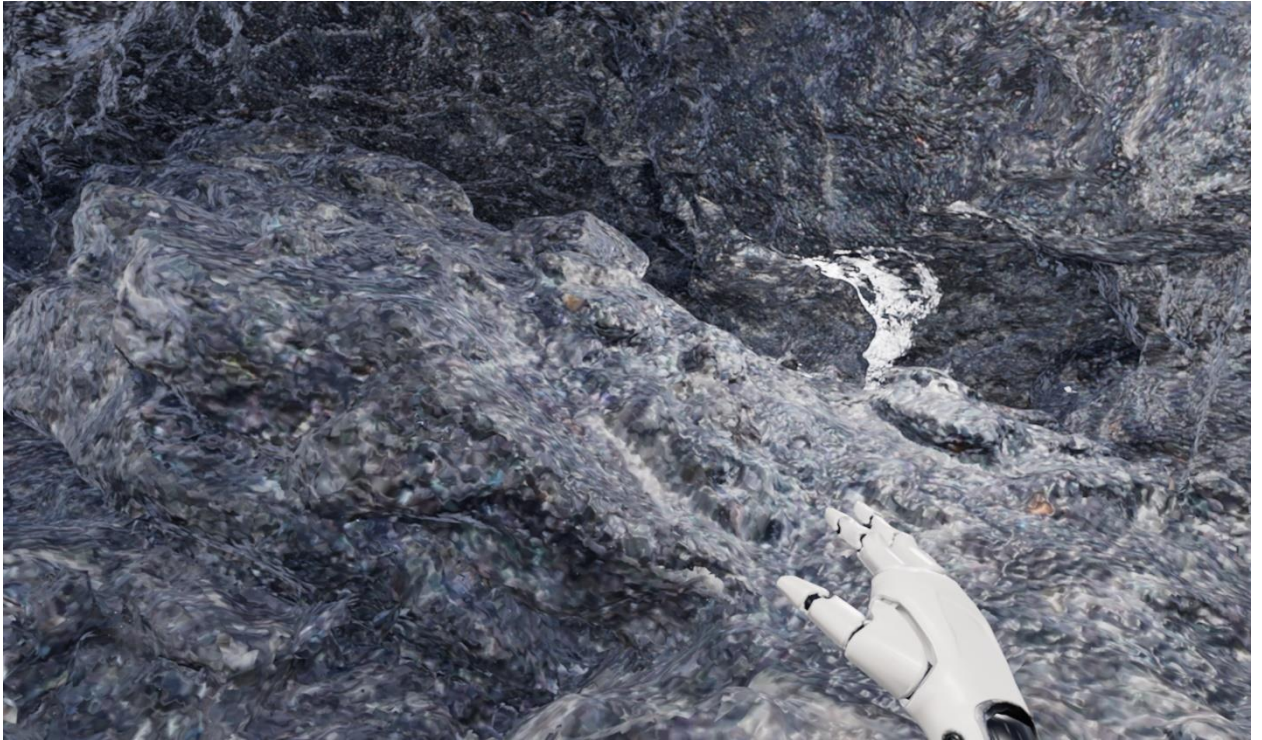
Obr. 61, 62, 63, 64 jsou pořízeny přímo v prostředí virtuální reality a znázorňují skutečný pohled člověka, když si prochází model. Na obr. 61 je vidět možnost teleportace, která je ve VR nejjednodušším způsobem implementace pohybu.



Obr. 61 – vizualizace štoly Johannes ve VR (1)



Obr. 62 – vizualizace štoly Johannes ve VR (2)



Obr. 63 – vizualizace štoly Johannes ve VR (3)



Obr. 64 – vizualizace štoly Johannes ve VR (4)

12 Závěr

Cílem této práce bylo zajištění dokumentace a vizualizace štoly Johannes za pomoci laserových skenerů, zhodnocení postupu zpracování, časové náročnosti a přesnosti.

Měření s ručním laserovým skenerem je rychlé, přesné a jednoduché. Ve štole, kde není přístup k GNSS signálu, je SLAM technologie kvalitním řešením při mapování. Přes překážky, jako je omezený a těsný prostor, či vodu, ZEB-Revo Go i ZEB-Revo Horizon s menšími problémy dokázaly přesně (střední odchylka $<0.02\text{m}$) získat informace o terénu ve 3D. Při prohlížení mračen pořízených těmito přístroji je možné získat přesné souřadnice jednotlivých bodů, nacházejících se uvnitř štoly (pokud bylo provedeno napojení do souřadnicového systému).

S vizualizací jsou však problémy. Ačkoli jsou naměřená mračna hustá a objekty se jednoduše dají identifikovat pouhým okem, využití programy v tomto případě měly velký problém. Práce s velkým množstvím bodů je náročná na mezipaměť a procesor. Po provedení úprav mračen, propojení a vytvoření finálního mračna nebyl schopen program GeoMagic Wrap vytvořit věrný model. Algoritmus v GeoMagic Wrap, využitý pro tvorbu modelu, je momentálně jedním z nejlepších na trhu, a přesto nedokázal vypočítat vzhled objektů, jako jsou například klády, sloupy, zábradlí. Příčinou však není chyba v algoritmu, ale nedostatek bodů. Objekty jako kameny, stěny a “strop“ byly vykresleny dobře, avšak bylo třeba některé části vyhladit.

Vizualizace ve VR se přes nedostatek času (uzavření štoly kvůli přezimování netopýrů) nepodařila dotáhnout do finální podoby pro celý důl. Tím, že se z modelu musely odstranit téměř všechny objekty vytvořené člověkem (zábradlí, figuríny, ...), práce v Unreal Engine se zkomplikovala. Všechny tyto objekty by se musely přidat odděleně (díky souřadnicím by se muselo zjistit, kde se v prostoru nachází, a následně by se přidaly modely těchto objektů již vytvořené jinými autory, nebo by se provedl nový sken těchto objektů zvlášť, a to přesnějšími skenery). Posledním krokem bylo přidání umělého osvětlení (jinak by nebylo nic vidět), vody a textury objektu (byla využita jedna textura pro celý objekt pro nedostatek času). V ideálním případě by bylo vytvořeno několik druhů materiálů, které by lépe odpovídaly realitě, nicméně to je nemožné z důvodu chybějící fotodokumentace s dostatečným rozlišením.

13 Literatura

- [1] Edl, M., Mizerák, M. and Trojan, J. "3D Laser Scanners: History and Applications." *Acta Simulatio* 4.4 (2018): 1-5.
- [2] Jašek, P. *Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring*. Diss. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2018.
- [3] Lichti, D., Gordon, S., and Stewart, M. "Ground-based Laser Scanners: Operation, systems and Applications." *Geomatica* 56.1 (2002): 21-33.
- [4] Haddad, Naif Adel. "From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites." *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 23.2 (2011): 109-118.
- [5] Altuntas, C., et al. "Surveying and documentation of detailed historical heritage by laser scanning." *XXI International CIPA Symposium*. Vol. 1. No. 06. 2007.
- [6] Korumaza, A. G., et al. "Evaluation of laser scanner performance in documentation of historical and architectural ruins, a case study in Konya." *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38.5 (2010): 361-366.
- [7] Temizer, T., et al. "3D documentation of a historical monument using terrestrial laser scanning case study: Byzantine Water Cistern, Istanbul." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 5 (2013): W2.
- [8] Kuda, F., et al. *Aplikace pozemního laserového skenování v geovědních disciplínách*. Ústav geoniky Akademie věd České republiky, 2014.
- [9] Smisitel, M. "Využití 3D skenování v geotechnice." Bakalářská práce, VŠB-TUO,(2020).
- [10] Štroner, M. a Pospíšil, J. *Terestrické skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04141-3.
- [11] Zlot, R. and Bosse, M.. "Efficient Large-Scale 3D Mobile Mapping and Surface Reconstruction of an Underground Mine."

- [12] Capturing the reality of tunnel warfare with 3D mobile laser scanning. GeoSLAM [online]. 23. 10. 2019, 3 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://geoslam.com/blog/2019/10/21/capturing-the-reality-of-tunnel-warfare-with-3d-mobile-laser-scanning/>
- [13] Zheng, J. M., K. W. Chan, and Ian Gibson. "Virtual reality." *Ieee Potentials* 17.2 (1998): 20-23.
- [14] Sherman, W., Craig, A. *Understanding Virtual Reality : Interface, Application, and Design*. 1. vyd. Morgan Kaufman, 2002. ISBN: 9781558603530
- [15] Jůva, V. "Virtuální muzeum a nové možnosti vzdělávání." *Pedagogická orientace* 18.4 (2008): 3-19.
- [16] Kodým, O. "Využití virtuální reality pro řízení hlubinného dolu." *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava Řada hornicko-geologická Volume XLIX (2003) 2* (2003): 23-34.
- [17] Jecić, S. and Drvar, N.. "The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements." *Proceedings of the 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*. 2003.
- [18] Osobní mobilní laserové skenery. Leica-Geosystems [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://shop.leica-geosystems.com/blog/video/intro-blk2go>
- [19] Large, A. and Heritage, G.L.. "Laser scanning—evolution of the discipline." *Laser scanning for the environmental sciences* (2009): 1-20. DOI:[10.1002/9781444311952.ch1](https://doi.org/10.1002/9781444311952.ch1)
- [20] Scantech International. Tileline of 3d laser scanners [online]. 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://scantech-international.com/blog/timeline-of-3d-laser-scanners/>
- [21] What is SLAM?. GeoSLAM [online]. 23. 10. 2019, 3 [cit. 2021-03-12]. Dostupné z: <https://geoslam.com/what-is-slam/>
- [22] Barnard, D. History of VR - Timeline of Events and Tech Development. [online]. 2019-8-6 [cit. 2020-1-17]. Dostupné z: <https://virtualspeech.com/blog/history-of-vr>
- [23] Unreal Engine 4. Unrealengine [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US/>
- [24] Obecné informace. Štola Johannes [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.stolajohannes.cz/cs/stola-johannes.html>

- [25] Geologie a mineralogie. Štola Johannes [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z:
<http://www.stolajohannes.cz/cs/stola-johannes/geologie-a-mineralogie.html>
- [26] Netopýři. Štola Johannes [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z:
<https://napude.sousednetopyr.cz/stola-johannes-zimni-domov-netopyru-na-bozim-daru/>