



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ

## Diplomová práce

**Zpracování a vizualizace laserových dat z expedice Maroko 2020**

**Autor:** Bc. Lukáš Fogl  
**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Karel Pavelka  
**Katedra:** geomatiky  
**Akademický rok:** 2021/2022

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc.Fogl Jméno: Lukáš Osobní číslo: 458701  
 Zadávající katedra: geomatiky  
 Studijní program: Geodézie a kartografie  
 Studijní obor: Inženýrská geodézie

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Zpracování a vizualizace laserových dat z expedice Maroko 2020  
 Název diplomové práce anglicky: Processing and visualisation of laser data from Morocco expedition 2020

#### Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce proveďte rešerši na téma laserové skenovací systémy pro památkové objekty v délce min. 10 stran; soustředte se na mobilní a lehce transportovatelné systémy a jejich přesnost. Popište malé laserové skenery z laboratoře fotogrammetrie (BLK360 a ZEB-REVO), analyzujte jejich přesnost a vhodnost pro 3D dokumentaci historických objektů. Definujte a znázorníte metodiku sběru a vyhodnocení dat (pomocí textu a vývojového diagramu). Vytvořte vhodné modely synagogy v jižním Makoku z obou typů použitých laserových skenerů a v software CloudCompare zhodnoťte přesnost a komplexnost modelů. na základě předaných dat, Vytvořte i vhodnou vizualizaci pro VR jak pro synagogu, tak i pro přilehlé prostory. Zhodnoťte výsledky a doporučte nejvhodnější postup dokumentace obdobných objektů z nepálených cihel.

#### Seznam doporučené literatury:

Matoušková, E.; Pavelka, K.; Smolík, T.; Pavelka, K., Jr. Earthen Jewish Architecture of Southern Morocco: Documentation of Unfired Brick Synagogues and Mellahs in the Drâa-Tafilet Region. Appl. Sci. 2021, 11, 1712. <https://doi.org/10.3390/app11041712>  
 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>

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing.Karel Pavelka

Datum zadání diplomové práce: 17.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022  
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

 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“.*

18.9.2021 Datum převzetí zadání  
 Podpis studenta(ky)

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá dokumentací historického objektu za pomoci malých laserových skenerů a prezentací výsledků v prostřední virtuální realitě. Zaměřena a zpracována byla synagoga v osadě Bni Sbih, oblast Drâa-Tafilalet v jižním Maroku. Měření bylo z mračen bodů převedeno v softwaru Geomagic a Revit na 3D model, který byl exportován do softwaru Unreal Engine 4 a dále přizpůsoben pro analýzu modelu ve virtuální realitě. Konečným výsledkem je model ve virtuálním prostředí a vlastní 3D model.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Laserové skenování, Geomagic, Revit, Unreal Engine 4, virtuální realita, Maroko

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with a documentation of a historical object using small laser scanners. The results are also present in virtual reality. The main documented object is a synagogue in the settlement of Bni Sbih, Drâa-Tafilalet region in southern Morocco. The measuring was brought forward from the points clouds in the Geomagic and Revit system to the 3D model, which was transferred to Unreal Engine 4 system. Consequently, it was adapted for a model analysis in the virtual reality. The result is a 3D model and its representation in VR.

## KEYWORDS

Laser scanning, Geomagic, Revit, Unreal Engine 4, virtual reality, Morocco

## **Čestné prohlášení**

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

Dále beru na vědomí, že se na mou 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 9. května 2022

.....

Bc. Fogl Lukáš

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za jeho ochotu, trpělivost a připomínky k mé diplomové práci. Také děkuji za poskytnutá data z expedice.

Děkuji fakultě za možnost využití školních licencí na potřebné softwary.

Děkuji své rodině za podporu během celého studia a trpělivost během psaní diplomové práce.

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 REŠERŠE</b> .....	<b>11</b>
2.1 Laserové skenování (LS) .....	11
2.2 Virtuální realita (VR).....	17
<b>3 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ</b> .....	<b>20</b>
3.1 Definice a princip LS .....	20
3.2 Využití LS.....	22
3.3 Historie.....	23
3.4 Software Autodesk Revit.....	24
3.5 Software Geomagic Wrap .....	25
<b>4 VIRTUÁLNÍ REALITA</b> .....	<b>27</b>
4.1 Definice VR.....	27
4.2 Využití .....	27
4.3 Historie.....	29
4.4. Unreal Engine 4 .....	31
<b>5 LOKALITA</b> .....	<b>33</b>
5.1 Maroko.....	33
5.2 Fakulta ČVUT .....	35
<b>6 DATA</b> .....	<b>37</b>
6.1 Využité vybavení.....	37
6.1.1 Leica BLK360 .....	37
6.1.2 ZEB Revo GO.....	38
6.1.3 Surphaser 25 HSX, Leica TCR 307 .....	39
6.2 Sběr dat .....	40
6.2.1 Sběr data přístrojem BLK360 .....	40
6.2.2 Sběr dat přístrojem ZEB Revo GO .....	40
<b>7 ZPRACOVÁNÍ</b> .....	<b>42</b>
7.1 Zpracování dat z přístroje ZEB Revo GO .....	42
7.2 Zpracování dat z přístroje Leica BLK-360.....	45
7.3 Porovnání přístrojů.....	47
7.4 Autodesk Revit.....	49
7.5 Unreal Engine 4 .....	51

7.5.1 Založení virtuálního prostředí .....	51
7.5.2 Import modelu do UE4.....	53
7.5.3 Tvorba prostředí modelu.....	54
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>65</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

VR	Virtuální realita
LS	Laserové skenování
TLS	Terrestrial laser scanning
TS	Totální stanice
GNSS	Globální navigační systém
VB	Vlčovací bod
BIM	Building Information Modeling
CERKAS	Centre de conservation et de Réhabilitation du patrimoine architectural Atlasique et Subatlasique (Centrum památkové péče)
HMD	Head Mounted displays
HTC	High Tech Computer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
BOOM	Binocular Omni-Orientation Monitor
AR	Augmented reality
IBMR	Image Based Modeling and Rendering
UE	Unreal Engine
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
LiDAR	Light Detection and Ranging
IMU	Inertial Measurement Units
C2C	Cloud-to-Cloud
M3C2	Multiscale-Model-to-Model-Cloud
TOF	Time of flight
AEC	The architecture, engineering and construction

# 1 ÚVOD

Laserové skenování je moderní bezkontaktní technologie, která je v dnešní době zastoupena při dokumentaci a 3D vizualizaci staveb a konstrukcí. Pozemní skenování je jednou z možností sběru dat, kterou se získává mračno bodů. Jedná se o neselektivní určování souřadnic bodů objektu. Poloha každého bodu je určena prostorovými pravoúhlými souřadnicemi X, Y, Z. Tyto souřadnice se určují transformací měřených polárních souřadnic  $d$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  (šikmá vzdálenost, vodorovný a svislý úhel).

Laserové skenování má v geodézii uplatnění zejména kvůli možnosti rychlého sběru velkého množství prostorových dat, které se mohou využít pro detailní dokumentaci složitějších objektů či vizualizací historických objektů za účelem jejich obnovy, kde by vyjádření povrchu klasickými metodami bylo nereálné. Výsledný 3D model bývá zpravidla měřen z více stanovisek, kdy se jednotlivé skeny spojí dohromady pomocí vlíčovacích bodů nebo poloautomatickou či automatickou korelací.

Měření objektu v této diplomové práci probíhalo skenerem Leica BLK 360 a mobilním laserovým skenerem ZEB Revo GO.

Virtuální realita (VR) se začala vyvíjet již v polovině 20. století. Největší expanzi tato technologie ovšem zažívá v poslední době, kdy už se virtuální realita využívá například v herním průmyslu, geodézii či vědě. Nejčastěji se k zobrazení dat používá VR headset (brýle), toto zařízení vytváří 3D scénu daného modelu, ve kterém jsme schopni se pohybovat a provádět interakce.

Cílem diplomové práce je tvorba a vizualizace 3D modelu synagogy, která se nalézá v židovsko-berberské osadě v jižním Maroku. Objekt byl zaměřen pozemním laserovým skenováním za pomoci dvou skenerů: statickým skenerem Leica BLK360 a mobilním skenerem ZEB Revo GO. Měření bylo zpracováno do podoby 3D modelů, které byly porovnány a následně vizualizovány ve VR. Ta umožňuje širší veřejnosti nahlédnout do vzdálených oblastí a zachovat tak kulturní památky v digitální podobě.

V první části práce byla provedena stručná rešerše literatury na téma laserového skenování a jejího využití pro dokumentaci historických objektů a jejich rekonstrukcí. Posuzována byla vhodnost a přesnost výše uvedených laserových skenerů. Dále byl proveden průzkum využití VR pro vizualizaci a znázornění 3D modelů, a zda je tato metoda v geodézii využívána.

Druhá část se zabývá popisem, definicí, principem měření a využitím laserového skenování. V této části se též uveden popis a historie VR, která je důležitou součástí celé práce, pomocí níž bude výsledek práce prezentován.

## 2 REŠERŠE

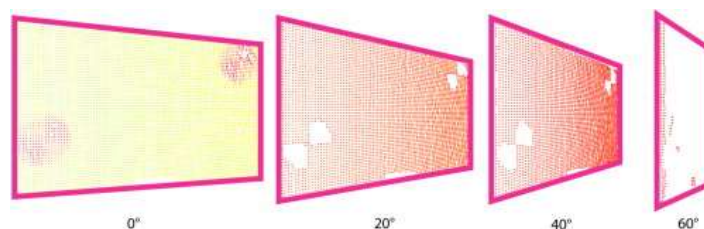
Rešeršní část se zabývá dvěma hlavními tématy:

- 1) sběr dat laserovými skenery a následným zpracováním 3D modelu s přípravou na převod do VR,
- 2) tvorba a prezentace 3D modelu v prostředí VR.

### 2.1 Laserové skenování (LS)

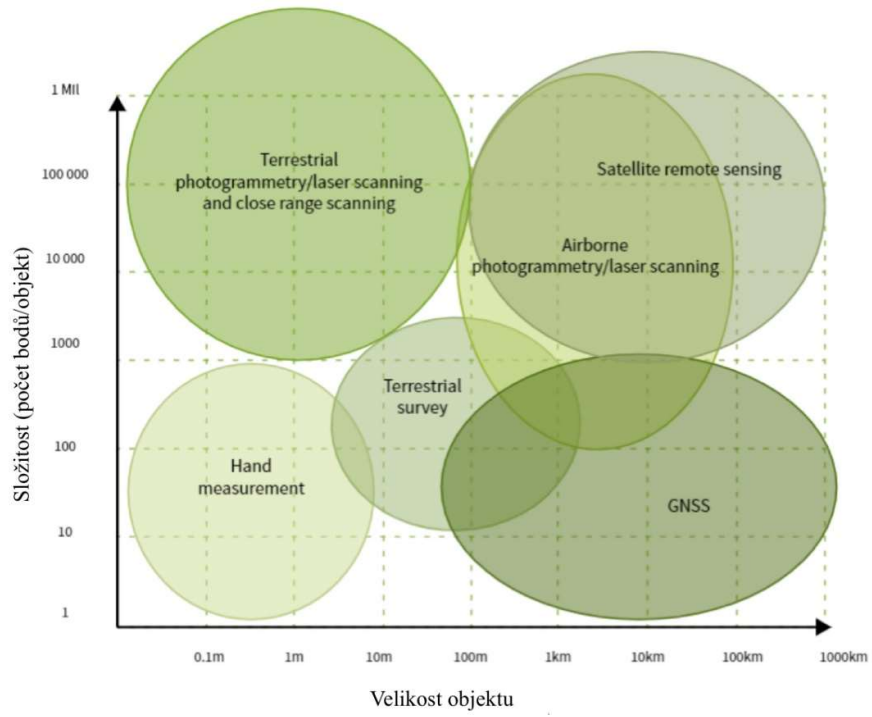
LS je v současnosti populární téma, na fakultě Geomatiky ČVUT vzniklo několik publikací na toto téma. Jedná se například o publikaci s názvem *Ověřená technologie nízkonákladové 3D fotogrammetrické dokumentace památkových objektů.*, která je součástí této kapitoly a zabývá se dokumentací objektů metodou IBMR. Pan P. Grussenmeyer definovali laserové skenování jako aktivní, rychlou a automatickou metodu využívající pro měření laserové světlo, data jsou získávána bezkontaktně a v hustém, pravidelném rozestupu, výsledkem jsou 3D souřadnice bodů [1].

V článku s názvem *Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points*, je považován vliv geometrie skenování na přesnost jednotlivých bodů nebo na šum v měření. Kvalitu bodu skenování ovlivňují čtyři hlavní faktory: přístrojový mechanismus, atmosférické podmínky, vlastnosti povrchu objektu a geometrie skenování. Geometrie lokálního skenování závisí na vzdálenosti a orientaci skenovaného povrchu vzhledem k poloze skeneru. Studie je demonstrována porovnáním dvou mračen bodů malé místnosti, které jsou získané ze dvou různých poloh skeneru: středové polohy a rohové polohy. Skener byl umístěn 50 metrů od objektu. Vliv úhlu dopadu na hladinu šumu je kvantifikován na skenech místnosti; posunutím skeneru o 2 m se šum sníží o 20 %. Je možné optimalizovat nastavení měření takovým způsobem, že šum měření v důsledku špatné geometrie skenování je minimalizován a přispívá tedy efektivnějšímu získávání mračen bodů lepší kvality. Tato práce představuje originální přístup k modelování a celkovému rozložení chyb. Každé měření TLS (pozemní laserové skenování) podléhá šumu, který lze rozložit ve směrodatné odchylce vodorovného úhlu  $\alpha$ , svislého úhlu  $\beta$  a měřené vzdálenosti  $r$ . Vliv geometrie skenování na kvalitu skenování je analyzován pomocí experimentů prováděných v laboratorních podmínkách pomocí TLS HDS6000 od společnosti Leica (2010) [2].



Obr. 1. Vliv úhlu dopadu paprsku na hladinu šumu. Prezentované sklony jsou zleva doprava 0 °, 20 °, 40 ° a 60 ° [2]

Kniha s názvem *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture* od autorů C. Boardmana, P. Bryana (2018) obsahuje rady a návody pro laserové skenování v architektuře a archeologii. Cílem této knihy je co nejvíce přiblížit a poradit, jak využívat laserovou technologii i běžným lidem, kteří nemají odborné zkušenosti. Laserové skenování je flexibilní technologie, která může být kombinována s dalšími metodami trojrozměrného (3D) záznamu dat. Z toho důvodu jsou v knize stručně popsány i alternativní metody (měření s TS: totální stanice, GNSS: Globální navigační satelitní systém, GIS: Geografický informační systém, fotogrammetrie). Volbu metody dokumentace lze vybírat podle velikosti objektu, jeho složitosti a dostupnosti a nároků na přesnost, viz obrázek č. 2. V knize je vysvětlen princip pulzního skeneru, který používá nejjednodušší technologii, vyzařuje puls laserového světla a měří se čas jeho návratu. Dosah se vypočítá z jednoduchého vzorce zahrnujícího rychlost světla. Novodobý trend jsou lehké, malé pulzní skenery (BLK360), jejich nevýhoda je stabilita, kvůli jejich nízké hmotnosti. Dále se také autoři C. Boardman a P. Bryan v knize zabývají ručními laserovými skenery (ZEB-Revo). Použití techniky SLAM pro vnitřní skenování vyžaduje pečlivé plánování, aby bylo zajištěno, že algoritmus dokáže přesně vypočítat trajektorii. To závisí na stabilním postupu a návratu do výchozího bodu. Zpracování výsledného mračna se obvyklé dělá v pořadí: čištění, filtrování, segmentace, klasifikace, dělení, síťování, texturování, vektorizace a vizualizace [3].

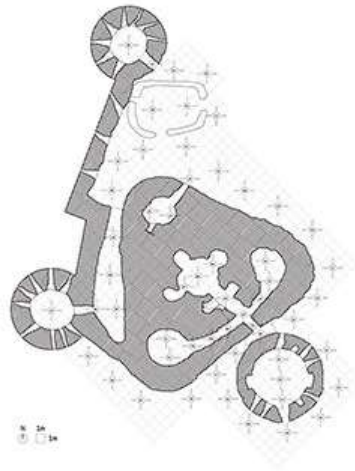


Obr. 2.: Volba metody v závislosti na velikosti a složitosti objektu [3]

Scanning System		Usage	Typical Accuracies (mm)	Typical Range (m)
Triangulation	Rotation stage	Small objects taken to scanner. Replica production	0.05	0.1 – 1
	Arm mounted	Small objects. Lab or field. Replica production	0.05	0.1 – 3
	Tripod mounted	Small objects in the field. Replica production	0.1 – 1	0.1 – 2.5
	Close range handheld	Small objects. Lab. Replica production	0.03 – 1	0.2 – 0.3
	Mobile (handheld, backpack)	Awkward locations eg building interiors, caves	0.03 – 30	0.3 – 20
Pulse (TOF)	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawings, analysis, 3D models	1 – 6	0.5 – 1000
	Mobile (vehicle)	Streetscapes, highways, railways. Drawings, analysis, 3D models	10 – 50	10 – 200
	UAS	Building roofscapes, archaeological sites. Mapping and 3D models	20 – 200	10 - 125
	Aerial	Large site prospecting and mapping	50 – 300	100 – 3500
Phase	Terrestrial	Building exteriors/interiors. Drawing, analysis, 3D models	2 – 10	1 – 300

Tab. 1: Rozdělení LS podle typu měření, jejich přesnosti a dosahu [3]

Elias Logan (architekt, designér) využívá od roku 2019 skener BLK360 k zaměření prehistorických věží, hrobek a chrámů na ostrově Sardinie. Mapoval zde například pozůstalá sídla bývalých kmenů Nuraghic. Jednalo se o zaměření věží ve tvaru kuželoseček spojené chodbami. Celé sídlo je postaveno do tvaru trojúhelníku. Logan zjistil, že pomocí 3D skenování a výsledného zobrazení 3D modelu lze snadno najít soudržnost mezi archeologií a architekturou díky jasnému vyjádření výsledků. Na práci s BLK360 se mu líbila jednoduchost, rychlost importu a kompilace skenů v softwaru Cyclone i samostatné ovládání přístroje [4].



Obr. 3: Dokumentovaná oblast památkové zóny, Sardinie [4]

Článek Christophera Dollarda pojednává o práci firmy Pyramidal Digital Engineering. Firma využívá skener BLK360 k dokumentaci španělských památek, jednou takovou je Castro de Santa Trega, zřícenina horského města. Majitel firmy tvrdí, že díky této technologii lze levně a rychle zdokumentovat památky, kterým hrozí zřícení či další rozsáhlé škody. Podle Chr. Dollarda skener BLK360 výrazně zjednodušuje práci a jeho výsledky jsou působivé [5].

Jacob Down (RIBA Chartered Architect) provedl testování skeneru BLK360, zaměřil výškové budovy v oblasti West Cornwall ve vnitřní i venkovní části. Autor z testování zjistil, že BLK je přesnější při měření vnitřních prostorů a nevhodnější byl střední režim skenování. Aktivoval také termovizní kameru pro vytvoření tepelných obrazů. Výsledky nebyly pro skutečnou hloubkovou analýzu dostatečné, protože rozdíly v barevných přechodech byly příliš extrémní a autor nebyl schopen určit teplotní rozsah. Díky BLK360 v kombinaci s jeho výkonem a širokým spektrem funkcí je to klíčová technologie připravená k revoluci v pracovních postupech v průmyslu AEC (The architecture, engineering and construction) [6].

Publikace od autorů K. Pavelky, J. Šediny, E. Matouškové, M. Faltýnové a J. Řezníčka, s názvem *Ověřená technologie nízkonákladové 3D fotogrammetrické dokumentace památkových objektů*. Dílo se zaměřuje na dokumentaci památkových objektů za pomoci metody IBMR (Image based modeling and rendering). V díle je navíc případová studie porovnávající metodu fotogrammetrie s metodou laserového skenování. Data byla zpracována v programu Agisoft. V jedné ze studií byla měřena barokní socha laserovým skenerem Surphaser a fotografována zrcadlovkou Pentax. Následně byly v CloudCompare vypočteny odchylky. Nevýhodou laserového skenování byly výsledné odchylky v oblasti obličejů a svatozáře kvůli mírnému sklonu šikmých paprsků a jejich chyb. Typické odchylky fotogrammetrickou metodou byly 0,5 mm. Výsledkem studie je analýza

používání fotoaparátu a vhodného softwaru pro dokumentaci objektů na vzdálenost v rádech metrů; vytvoření výsledného mračen bodů může být v některých případech i vhodnější jak laserové skenování [7].



Obr. 4: Porovnání dvou mračen v softwaru CloudCompare, distribuce odchylek na vertikální stupnice vpravo [7]

Článek *Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples* od autorů F. Remondina a A. Rizziho shrnuje důležité požadavky a specifika 3D dokumentací kulturních a přírodních památek, současné techniky a metody sběru dat, jejich zpracování a jejich omezení, či problémy (fotogrammetrii, UAV, GNSS, TLS, atd.). UNESCO v roce 2003 vytvořilo chartu o zachování digitálního dědictví kvůli zlepšení mezinárodní spolupráce a sdílení informací a podkladů. Pro vytvoření 3D modelu památek a jejich zachování jsou důležité tyto vlastnosti: přesnost, spolehlivost a přenosnost techniky (ruční a malé laserové skenery), nízké náklady, rychlá akvizice a flexibilita [8].

Článek z roku 2018 od autorů M. Edla, M. Mizeráka, J. Trojana je na téma historie 3D laserového skenování a představení laserových skenerů s názvem *3D laser scanners: history and applications*. První technologie 3D skenování byla vytvořena v 60. letech 20. století a byla užitečná zejména ve snaze obnovit povrchy různých předmětů, objektů a míst. První skenery používaly světlo, kamery a



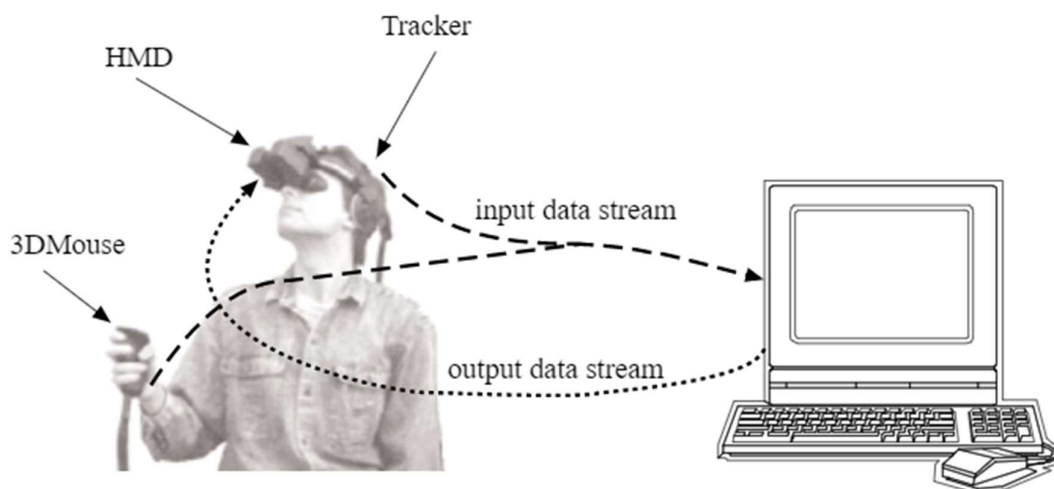
projektořy. Ty byly po roce 1985 nahrazeny skenery uřivající bíle světlo a laserový paprsek. V roce 1994 firma Cyberware spustila výrobu skeneru REPLICA, který umožňoval rychlé a přesné skenování i menřích objektů. Dva roky poté firma zdokonalila své skenery a dokázala vytvářet složité modely s texturou i barvou modelu. Tato technologie našla využití v mnoha průmyslových odvětvích (procesní výroba, inženýřské sítě, stavebnictví, archeologie, trestní právo, zábavní průmysl, lékařství, 3D fotografie aj.). TLS se v posledních dvou desetiletích zdokonalila a stala se tak jednou z nejvyuřivanějších metod získávání a prezentace dat. Přístroje jsou cenově dostupné, a proto jsou hojně vyuřivány ve všech oblastech geodézie [9].

V práci s názvem *3D modeling of underground objects with the use of SLAM technology on the example of historical mine in Ciechanovice* zpracovali poľští autoři J. Wajs, D. Kasza, P. Zagořdřon a K. Zagořdřon model vápencového dolu metodou SLAM. Tato metoda umožňuje sběr data souběžně s určováním polohy za pomoci navigačních dat. Je to kombinace technologie LiDARu a IMU. Byl vyuřit přístroj GeoSLAM ZEB-REVO. V této práci při zpracování použili metodu cloud-to-cloud (C2C) a Multiscale-Model-to-Model-Cloud (M3C2). Analýza byla provedena v lokálním i komplexním testu. Testy měly odhalit případné chyby v mraĉnu bodů. Analýza C2C potvrdila, že obě mraĉna jsou k sobě konzistentní (průměrný posun mezi mraĉny je 2 cm). V závěru autoři shrnují, že pozemní laserové skenování je v současné době jednou z nejrychlejších a nejefektivnějších metod získávání informací o topografii objektu a umožňuje rychlé a přesné zobrazení naskenovaných objektů ve VR [10].

## 2.2 Virtuální realita (VR)

Na začátku devadesátých let vývoj v oblasti VR znatelně pokročil a technologie VR se stala velmi populární. V této kapitole je nastíněn vývoj VR a její dneřní využití. VR se dnes rozvíjí především v zábavním (herním) průmyslu.

Autoři Tomasz Mazuryk and Michael Gervautz z Vídeňské univerzity z pracoviřte počítaĉové grafiky sepsali dílo s názvem *Virtual Reality: History, Applications, Technology and Future*, kde rozebírají historii VR, základní terminologii a rozdělení VR a jejich rozdělení ve vědě, práci a zábavním průmyslu. Autoři se snařili popsat význam technologie VR. VR je interaktivní zářitek v simulovaném světě v reálném ĉase. Popisují využití technologie BOOM (Binocular Omni-Oriented Monitor Technology) pro sledování a analýzu proudění vzduchu ve virtuálním tunelu (využití v NASA nebo u firmy Volkswagen). BOOM technologie je stereoskopické zařizení, které je upevněno na hlavě uživatele, který díky otvorům pro oĉi sleduje na dvou obrazovkách virtuální svět. BOOM byl vytvořen společností Fakespace Systems Inc. Dále vysvětlují, jak funguje princip zařizení a co vše je potřeba k realizaci virtuálního prostředí (vstupní a výstupní zařizení) [11].



Obr. 5: Základní součásti pro VR [11]

Článek *Virtual reality*, od autorů J. M. Zhenga, K. W. Chana a I. Gibsona z Honkongské univerzity vyjadřuje VR jako pokročilé rozhraní mezi člověkem a počítačem, které simulují realistické prostředí, kde se lidé mohou pohybovat. Hlavní myšlenkou je pro ně ponoření (člověk blokuje rušivé elementy a soustředí se na informace, které ho zajímají), interaktivita (interakce s událostmi ve virtuálním světě) a 3D grafika v reálném čase. Největším aktuálním problémem je podle autorů doba zpoždění přenosu obrazu, haptická zpětná vazba zařízení, začlenění zvuku a řeči do uživatelského rozhraní [12].

Článek s názvem *Virtual Reality: Past, Present, and Future* od autorů E. Gobbettiho a R. Scateniho z Itálie řeší technologické požadavky a aktuální dostupná řešení. Mnoho firem na trhu se snaží zdokonalovat sílu zpětné vazby, kvalitu rozlišení, sledovací systémy a citlivost senzorů. Vysvětluje také pojem AR (Rozšířená realita-augmented reality), AR se virtuální svět překrývá s tím skutečným se snahou doplnit další užitečné informace. V závěru zmiňují, že je stále velké množství nedostatků pro masové využití VR, nicméně je na trhu slušný výběr komerčních produktů pro vizuální, pohybové a uživatelské vstupní rozhraní. Z hardwarového hlediska zatím není možná úplná věrnost smyslových podnětů [13].

Článek *Virtual museums – the future of historical monuments documentation and visualization* je od autorů K. Pavelky ml. a P. Reavy z ČVUT v Praze, Fakulty stavební, Katedry geomatiky. V díle popisují tvorbu virtuálního muzea, data byla pořízena fotogrammetrií nebo kombinací s daty laserového skenování. Ukazují, jaké kroky jsou potřeba po pořízení dat k výsledné prezentaci ve VR. Zpracování 3D modelu bylo provedeno metodou IBMR v softwaru Agisoft. V poslední době se ukazuje výhoda sběru dat kombinací obou výše uvedených metod a jejich

zpracování například v softwaru Capturing Reality. Data je potřeba optimalizovat: čištění mračen, oprava textur, povrchů. Převod do VR probíhal také za pomoci programu UE (Unreal Engine). Jako hlavní výhodu VR vidí skutečnost, že lokalitu zájmové objektu stačí navštívit jednou, provést všechna měření a následné analýzy či vizualizace se dělají v laboratoři. Objekty jsou poté uchovány v digitální podobě. Muzeum obsahuje celkem 12 modelů [14].



Obr. 6: Virtuální muzeum, hrad Stafford [14]

# 3 LASEROVÉ SKENOVÁNÍ

## 3.1 Definice a princip LS

Laserové skenování je technologie, která umožňuje pořízení geodetických dat. Jedná se o metodu bezkontaktního určování prostorových souřadnice, která disponuje vysokou rychlostí sběru dat (tisíce až miliony bodů za vteřinu), vysokou přesností a podrobností.

Laserové skenování se dělí na letecké laserové skenování, pozemní laserové skenování, mobilní a osobní LS. V diplomové práci bylo využito metody pozemního a osobního mobilního laserového skenování.

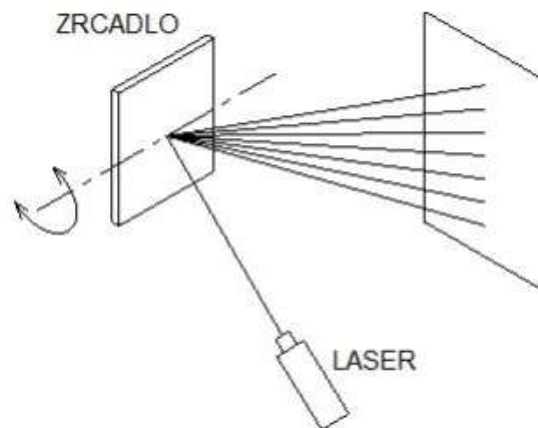
LS lze definovat těmito zásadními rysy:

- vysoká hustota bodů,
- Krátká doba sběru velkého množství dat,
- vysoká hustota bodů (může být i nevýhodou),
- vysoká automatizace zpracování,
- bezkontaktní měření.

Dělení skenerů:

- Polární skenery, které dělíme podle metody měření – metoda tranzitního času a fázového rozdílu.
- Skenery se základnou, které dále dělíme podle počtu kamer – s jednou kamerou, se dvěma kamerami.

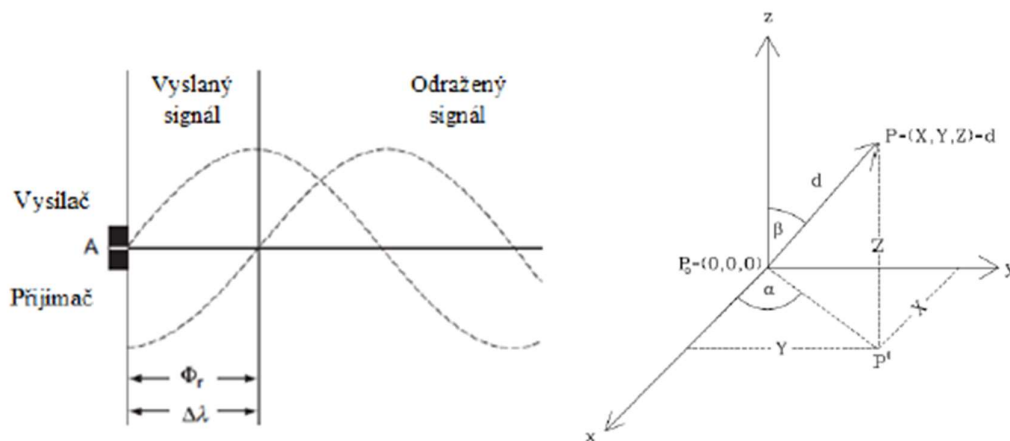
Princip měření: laserový skener pracuje na principu prostorové polární metody, jsou měřeny polární souřadnice (vodorovný úhel, výškový úhel a šikmá délka).



Obr. 7: Princip měření statickým laserovým skenerem [15]

Šikmou délku můžeme získat dvěma metodami. První metoda je měření tranzitního času (TOF – time of flight) pomocí pulzního dálkoměru. Měří se časový interval, mezi pulzem vyslaným skenerem a jeho vrácením po odrazu od objektu. Tato metoda disponuje větším dosahem, ale nižší rychlostí a přesností měření. Druhou možností získání délky je vyslání signálu modulovaného harmonickým vlněním. Vzdálenost se určí z fázového rozdílu mezi vyslanou a přijatou sinusovou vlnou. Tato technologie je přesnější, má ale obecně kratší dosah daný délkou vlny.

Pro skenování množiny bodů objektu se používá principů rozmítání laserového svazku, pomocí kterého jsou na povrchu objektu měřeny jednotlivé body. Z jednoho vyslaného impulsu je možné získat více odrazů (vegetace, terén, budova). Množina prostorově definovaných bodů tvoří tzv. mračno bodů. Mračno bodů je obecně orientováno a umístěno v souřadnicovém systému skeneru, pomocí vlíčovacích bodů (VB) je možné mračna transformovat do požadovaného souřadnicového systému [15].



Obr. 8, 9: Princip určení vzdálenosti z rozdílu fáze a princip prostorové polární metody [33]

Pravoúhlé souřadnice se poté vypočítají ze vztahů:

$$X = d \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$$

$$Y = d \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha$$

$$Z = d \cdot \cos \beta$$

Pro určení polohy bodů je nutno znát tyto veličiny:

- 1) souřadnice skeneru (3 parametry-VB, klasické geodetické metody)
- 2) rotace skeneru (3 parametry-z VB)
- 3) úhel vychýlení paprsku ve skeneru (natočení zrcátka, 1 parametr-definuje skener)

## 3.2 Využití LS

Technologie TLS se využívá především pro tvorbu 3D modelů objektů, jako například průmyslové areály, interiéry budov, fasády, podzemní prostory. Vhodné a časté využití nalezne u památkových prací, studií, vizualizací či plánování.

Dále můžeme TLS použít k dokumentaci skutečného provedení staveb silnic, železnic nebo vodních toků. 3D skenování nalezne uplatnění i u tvorby digitálního modelu reliéfu a terénu.

Výhodou TLS oproti klasickým geodetickým metodám (polární metoda, protínání, fotogrammetrie) je rychlé a podrobné získání 3D informací o objektu, které by se klasickou metodou sbírali velice obtížně. Další výhodou TLS je možnost využití přístrojů během plného provozu průmyslových areálů.

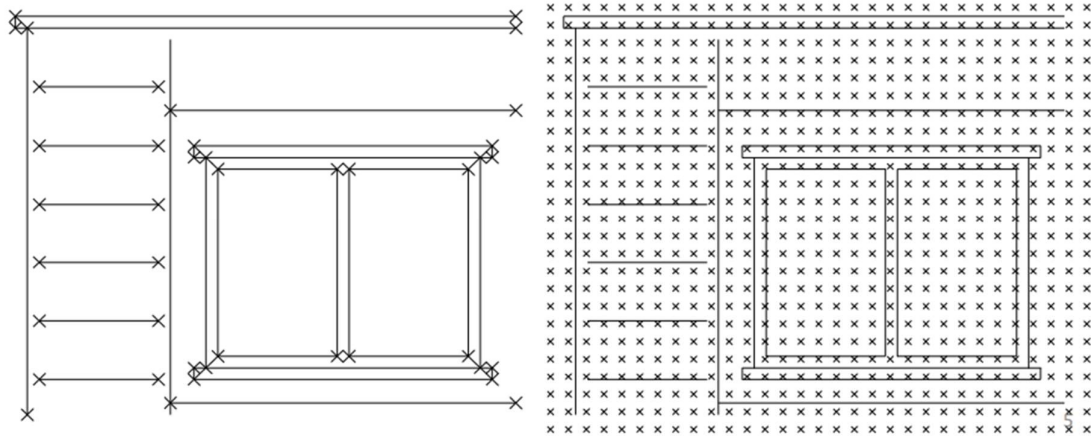


Obr. 10: Sken interiéru – jednací síň, Praha [15]



Obr. 11: Model rozvodny, RIEGL LMS Z360 [Geodis, 2004]

Při uplatnění TLS je měřený objekt pokryt pravidelnou sítí bodů ve volitelném kroku úhlového posunu ve vodorovné i svislé rovině s jednoznačnými prostorovými souřadnicemi. Jinými metodami lze jen těžce provést kompletní dokumentaci takových objektů, jako archeologické nálezy, nástěnné kresby v jeskyních, historické budovy [16].



Obr. 12: Rozdíl mezi selektivní a neselektivní metodou určování bodu [15]

### 3.3 Historie

Laserové skenery se objevují na konci 80. let 20. století a cílem bylo přesně obnovit a zachytit povrch různých objektů a míst. Jedná se o neselektivní metodu určování prostorových souřadnic.

Již v roce 1953 začala americká armáda experimentovat s optickým měřicím zařízením využívajícím světlo a vysokorychlostní clonu; tento projekt pojmenovali LIDAR. V 60. letech došlo k inovaci a začalo se pro přesné měření využívat laseru. V roce 1972 byl na univerzitě v Utahu vytvořen první drátový 3D model objektu z fyzického světa, jednalo se o automobil VW „Brouk“. Počátkem 80. let byla vyvinuta metoda proužkového optického skenování, která se osvědčila jako rychlejší a přesnější než metody bodové nebo plošné.

Prvním velkým milníkem byl rok 1984 ve kterém firma Cyberware vytvořila „head scanner“ a dále rok 1994, kdy společnost Replica začala vyrábět své 3D skenery (viz kapitola 2.1).

Společnosti Immersion a Faro Technologies později představily levné ručně ovládané digitizéry. Ty dokázaly vytvořit kompletní 3D modely, ale byly pomalé, zvláště když model byl podrobný. Opět nemohli digitalizovat barvu povrchu. V roce 1996 převzaly 3D skenery klíčové technologie a vznikl rychlý a flexibilní systém Reality Capture System. Vytváří složité modely s texturou a barvou během několika minut.



Obr. 13: Ručně ovládaný 3D skener upevněný na ramenu [17]

Se začátkem 21. století, kdy společnost zažívala rozkvět v oblasti výpočetní techniky, její rychlosti a výkonu bylo možné zdokonalit i skenovací techniku. V roce 2001 společnost MENSİ (dnes Trimble) uvedla na trh laserové skenery řady GS, které se jako první otočily 360 stupňů horizontálně. Od roku 2007 se skenery přidávají i do standardních robotických totálních stanic [17], [18].

### 3.4 Software Autodesk Revit

Autodesk Revit je architektonická aplikace založená na koordinaci změn pomocí technologie Parametric Building Modeler. Data, vztahující se k modelu budovy mohou být využívána od úvodního koncepčního návrhu, přes výstavbu až po správu budovy majitelem či nájemníkem. Tato centrální databáze je připravena pro snadnou spolupráci s dalšími aplikacemi. Tento koncept se nazývá Building Information Modeling (dále jen BIM).

Software Revit díky službě BIM Collaborate Pro, což je výkonné cloudové řešení Umožňuje architektům, konstruktérům a projektantům pracovat v jednotném modelovacím prostředí kdykoliv a kdekoliv. Zvyšuje tak efektivitu práce a snižuje náklady. BIM je světově nejrozšířenější nástroj pro projektování pozemních staveb [19].

Původní software byl vyvinut společností Charles River Software, která byla založena v roce 1997, v roce 2000 přejmenována na Revit Technology Corporation a v roce 2002 ji získala společnost Autodesk [20].



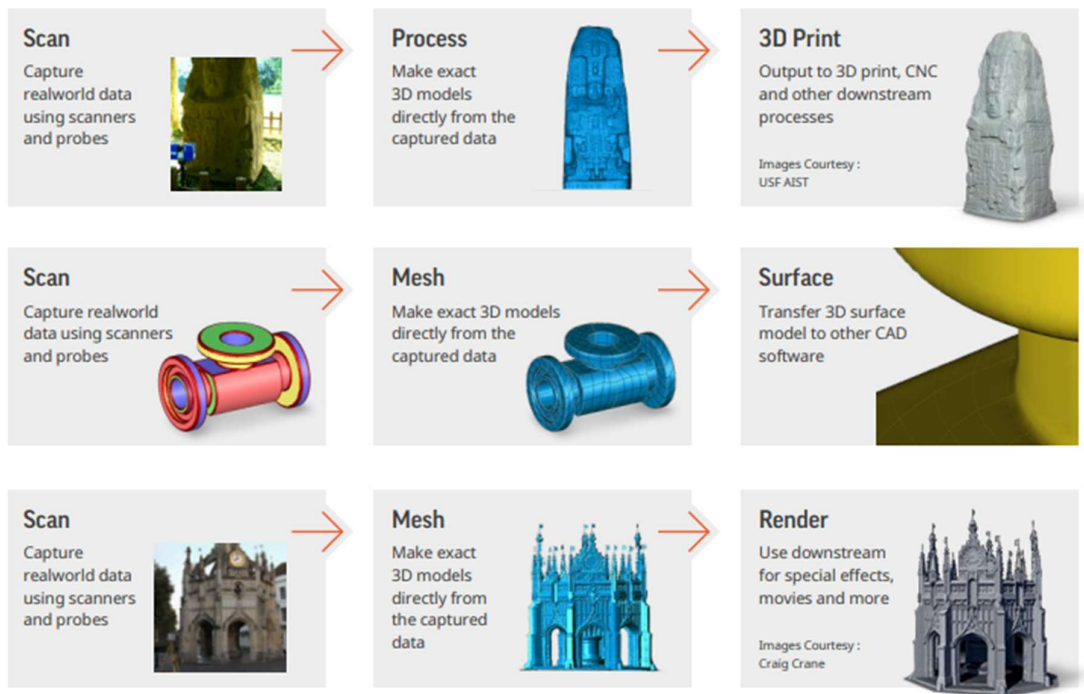


Obr. 14: Autodesk Revit [19]

### 3.5 Software Geomagic Wrap

Geomagic Wrap slouží primárně pro zpracování a úpravu dat z laserového skenování. Jde o software vyvinutý americkou společností 3D Systems, která se zaměřuje nejen na vývoje softwarů, ale i na výrobu 3D tiskáren a materiálů pro 3D tisk.

Software poskytuje nejdostupnější, nejrychlejší a nejpřesnější cestu od mračen bodů k 3D polygonálním a povrchovým modelům, které můžete okamžitě použít v navazujícím inženýrství, výrobě, umění a průmyslovém designu. Geomagic Wrap vytváří podkladová data, která lze použít přímo pro 3D tisk, frézování, archivaci a další. Systém také umožňuje 3D zobrazení pro analýzu, animaci a tvorbu filmů [21].



Obr. 15: Pracovní postupy v softwaru Geomagic Wrap [21]

# 4 VIRTUÁLNÍ REALITA

## 4.1 Definice VR

V současné době stále neexistuje jednotná definice pojmu virtuální reality. S vývojem technologie se mění. Je tedy nutné popsat VR trochu z nadhledu.

Cílem VR je prezentovat fiktivní digitální svět v pokročilé simulaci včetně snímání pohybu. Umožní tak nahlédnout do vzdálených míst naší planety, vyzkoušet si extrémní nebo fiktivní zážitky nebo si zahrát interaktivní hry. VR je kombinace počítačového hardwaru a softwaru, který působí na lidské smysly a snaží se ho co nejvíce pohltnout. Dále lze VR popsat jako technologii, která díky počítačové simulaci dokáže navodit pocit, že se osoba nachází v jiném prostředí, díky 360stupňové, trojrozměrné (stereoskopické) vizualizaci prostoru.

Celková kvalita a dojem z VR závisí na několika faktorech, které byly již zmíněny v rešerši literatury. První je kvalita ponoření (immersion), které by mělo zajistit, aby uživatel co nejméně vnímal, že se nenachází ve skutečném světě. Jedná se zejména o dokonalé textury povrchů, realistické zobrazení objektů a kvalita detailů. Je důležité vyladit jak fyzické, tak i psychické ponoření. Dále je to interakce (interactivity), neboli schopnost virtuálního prostředí, či objektů reagovat na pohyb a rozhodnutí uživatele, který je tak více zapojen a napomáhá to lepšímu ponoření. Neméně důležitý faktor je zpětná vazba (feedback), která díky rychlému snímání zajistí správné určení polohy v prostředí. Rychlost snímání závisí od možností hardwaru počítače. Kvalitní hardware zajistí plynulé pohyby a interakci systému.

## 4.2 Využití

Geodézie a stavební průmysl může využívat propojení 3D modelování a vizualizace pomocí VR, které zjednodušuje celkový proces výstavby, kontrol a dalších případných oprav. Díky VR lze například „zasadit“ budovu mezi ostatní a prohlédnout si ji, případně upravit nedostatky, velikost, barevnost aj. VR v geodézii lze například využít při rekonstrukcích staveb, jejich kontrole a zhodnocení dosavadního stavu (praskliny, trhliny).

V případě záchranných sborů a armády je VR využívána k simulaci krizových situací v bezpečném prostředí a tréninku jednotek, např. při přípravě na mise.

Lékařství – podobně jako záchranné sbory, i lékaři, chirurgové používají VR k nácvičkám složitých operací a zákroků, ale i ve vzdělávání v oblasti anatomie lidského těla.

Vzdělání – VR je dnes hojně využívaná technologie pro trénink pilotů, simulátor nabízí stejný zážitek, který je značně levnější a bezpečnější. Ve školství se může VR využívat například na vysvětlování přírodních zákonů a vědeckých pokusů.

Zábavní průmysl – VR v zábavním průmyslu je jedním z hlavních využití VR headsetů. Za dnešní rozšíření pojmu VR může především zábavní, herní a filmový průmysl. Do zábavního průmyslu bychom mohli i zařadit další využití VR, a to v oblasti kultury, kdy díky virtuální prohlídce můžeme zpřístupnit. Jedná se o dnes už neexistující kulturní památky, či muzea, která musí být i třeba vlivem pandemie zavřená. Lidé tak mají možnost z pohodlí domova tato místa navštívit.

Obchod, marketing – ve VR mohou obchodníci prezentovat své výrobky či služby. Moderní technologie může koncového zákazníka výrazně naklonit k nákupu. Tuto možnost například využívá firma Ikea, která umožní svým zákazníkům virtuální prohlídku a usnadní jim tak jejich nákupy a rozhodování bez nutnosti navštívit prodejnu osobně. Možnosti virtuálních prohlídek v posledním době využívají také realitní společnosti [22].



Obr. 16: Letecký simulátor CAE 7000 [23]



Obr. 17: Aplikace Ikea Place [24]

## 4.3 Historie

Termín virtuální realita byl poprvé zaznamenán a použit v 60. letech 20. století. Americký filmař, kameraman a vynálezce Morton Heilig sestrojil a nechal patentovat mechanické zařízení, tzv. sensorama. Šlo o tzv. „Experience theater“, neboli Zážitkové divadlo. Zařízení stimulovalo 4 smysly diváka dnes známé v podobě 4D kina. V zařízení byly promítány krátké filmy, ve kterých divák mohl vnímat obraz, zvuk, pohyb a vůni.

Jako první VR headset byl vytvořen tzv. „Damoklův meč“ v roce 1968, zobrazovací systém nasazovaný na hlavu, který využíval stereoskopický displej. Celý koncept byl však velice primitivní a ve virtuálním prostředí se zobrazovaly pouze jednoduché 3D modely.

V osmdesátých letech 20. st. byla VR popularizována Jaronem Lanierem, jedním z hlavních průkopníků VR. Lanier založil v roce 1984 společnost VPL Research. Tato společnost přišla s několika přelomovými produkty jako DataGlove (rukavice s trackováním), the EyePhone (VR headset), AudioSphere (3D zvuk) a mnoho dalších.



Obr. 18: VR headset, DataGlove [Google.com]

V roce 2007 přišel Google s novým produktem, službou Street View, servisem, který umožňuje prohlížení 360° panoramatické náhledy míst, cest a dalších oblastí. Můžeme tak v aplikaci „procházet“ místa, aniž bychom na nich byli fyzicky.

Dalším velkým milníkem pro VR se stal rok 2010, kdy student Plamer Luckey vyrobil první prototyp VR headsetu Oculus Rift. Zařízení disponovalo 90° zorným polem. V roce 2014 firmu odkoupila společnost Facebook, což tomuto odvětví opět pomohlo k širšímu uplatnění a využití.

V roce 2016 společnost HTC dodala první VR headset HTC Vive SteamVR. Toto znamenalo první komerční zařízení založené na senzorech, které umožňuje volný pohyb uživatelů v definovaném prostoru. Tento krok umožňuje využívat VR skutečně naplno a člověk tak může interagovat se svým fyzickým okolím, které je totožné ve virtuální realitě [22].



Obr. 19: VR headset HTC Vive SteamVR [18]

#### 4.4. Unreal Engine 4

Unreal Engine 4 (UE4) je herní software vyvinutý společností Epic Games. Tato americká společnost založená počátkem 90. let minulého století se zabývá tvorbou a vývojem počítačových a konzolových her. Zpočátku byl vyvinut pro počítačové střílečky z pohledu první osoby, poté se firma začala více zajímat o trojrozměrné (3D) hry a filmový průmysl. V roce 1998 společnost vyvinula revoluční technologii, na podkladě, které vytvořili hru Unreal. Jedná se o akční 3D hru, na jejímž základu později vyšlo nespočet dalších her.

Unreal Engine využívá kódovací jazyk C ++. Díky tomu nabízí vysoký stupeň přenositelnosti a podporuje širokou škálu platforem pro stolní počítače, mobilní zařízení, konzole a virtuální realitu [25].

UE4 byl uveden na trh v roce 2014 a od roku 2015 je možné jej zdarma stáhnout i se zdrojovými kódy. Společnost Epic Games vyvinula například populární hru Fortnite a podílela se na zpracování animovaného filmu Lví král [26].



Obr. 20: Hra Fortnite, UE4 [26]



# 5 LOKALITA

## 5.1 Maroko

Hlavním tématem diplomové práce je vybraná část osady v severní Africe, v jižním Maroku, oblast Drâa-Tafilalet, u města Zagora. Osada Bni Sbih se nachází 470 kilometrů jižně od hlavního města Maroka (Rabat). Od města Zagora je Bni Sbih vzdálené jihovýchodně 48 kilometrů. V blízkosti vesnice protéká řeka Draa, jejíž údolí je napojené na transsaharské obchodní cesty, podél které vznikaly jedny z nejstarších oblastí židovského osídlení. Od roku 2019 spolupracuje Karlova univerzita (filozofická fakulta) a České vysoké učení technické (Fakulta stavební, Katedra geomatiky a Fakulta architektury, Ústav památkové péče) na projektu za účelem dokumentace zanikajícího kulturního dědictví vybraných oblastí a památek. V roce 2020 se ČVUT účastnila třetí expedice do Maroka. Z důvodu přepravy letadlem a nízkého rozpočtu bylo nutné zvolit vhodné přístrojové vybavení místo klasických geodetických přístrojů a skenerů, proto byly využity přenosné miniaturizované měřicí přístroje (Leica BLK360, ZEB REVO). Hlavními cíli expedice byly:

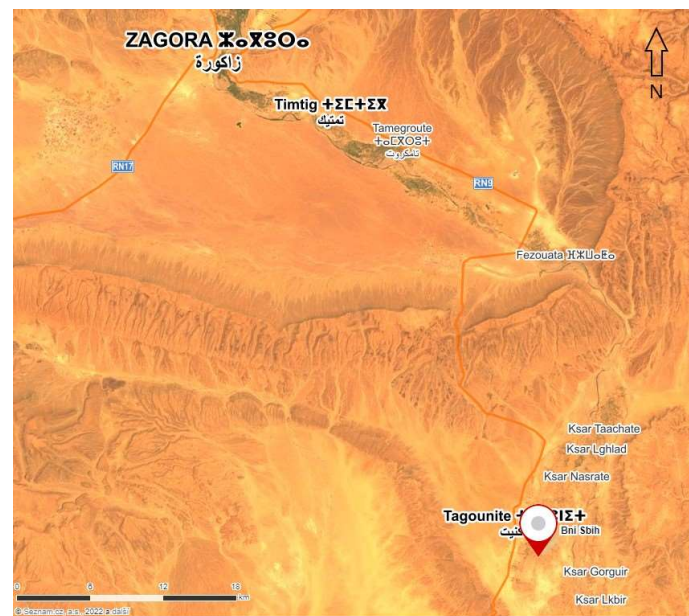
1. definovat využitelnost moderních přenosných laserových skenerů,
2. určit ekonomickou stránku dokumentace s co největší efektivitou ve spolupráci s Karlovou univerzitou a Marockou státní památkovou institucí (CERKAS),
3. zjistit využitelnost pozemního laserového skenování a blízké fotogrammetrie,
4. ukázat rychlost a přesnost výsledků u některých objektů, kde by bylo velmi obtížné mapovat tradičními postupy,
5. poskytnout doporučení pro následné práce v těchto oblastech.

Hlavním cílem práce bylo dokumentovat zanikající židovské památky v jižním Maroku, které byly stavěny z nepálených cihel (tzv. hliněná architektura). Židovské části osídlení jsou zde známy pod jménem mellah. Termín mellah představuje ohraničenou a často obezděnou židovskou čtvrť s vlastními branami. Současná dokumentace těchto oblastí prakticky neexistuje, v rámci projektu Diarna: Geo-Museum vzniklo několik fotografií židovského života na území severní Afriky a Blízkého východu. V rámci univerzitní expedice byla nasbírána data celých židovských čtvrtí v různých městech a vesnicích, v této práci je vybráno jen několik ukázkových míst (synagoga). Celkem bylo získáno 48 GB dat za 5 měřických dní (66 skenů pomocí skeneru BLK360 a 21 skenů skenerem ZEB Revo.) [27], [33]

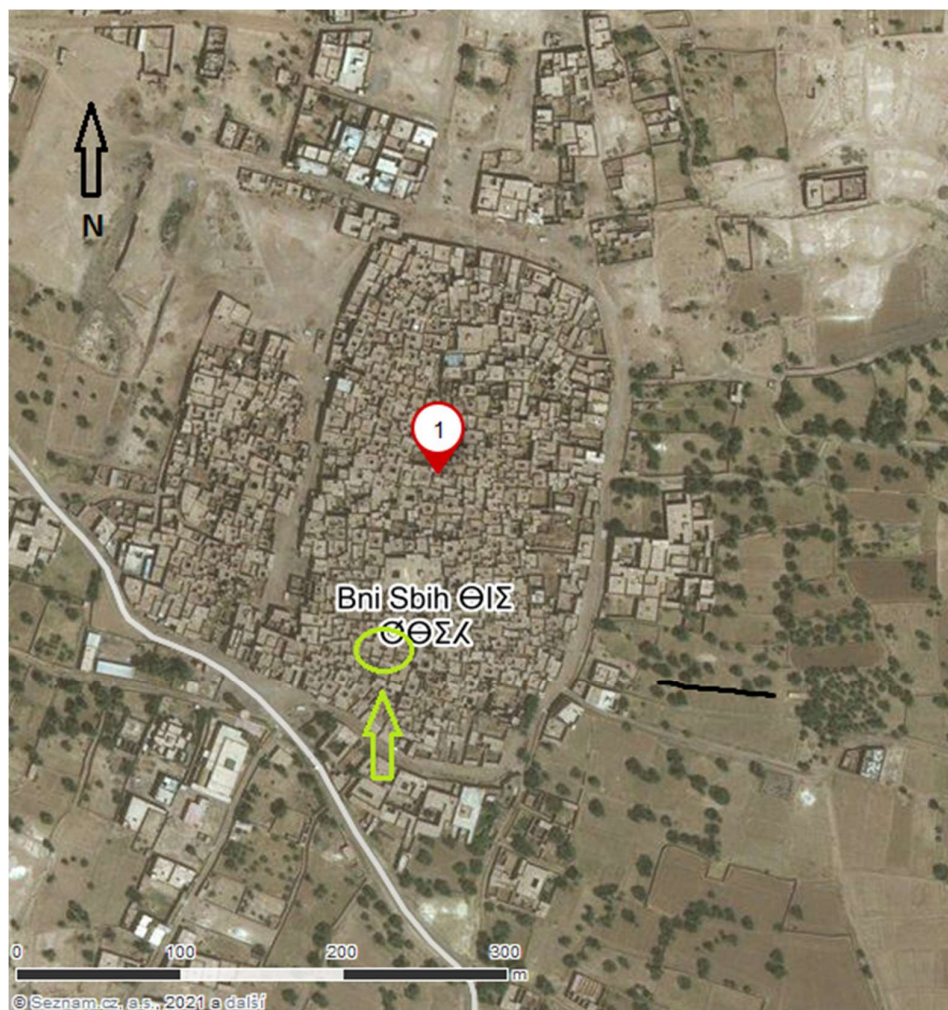
Některé objekty již byly zpracovány do podoby 3D modelů a prezentovány v odborném tisku [27].



Obr. 21: Lokalizace vesnice Bni Sbih [Mapy.cz]



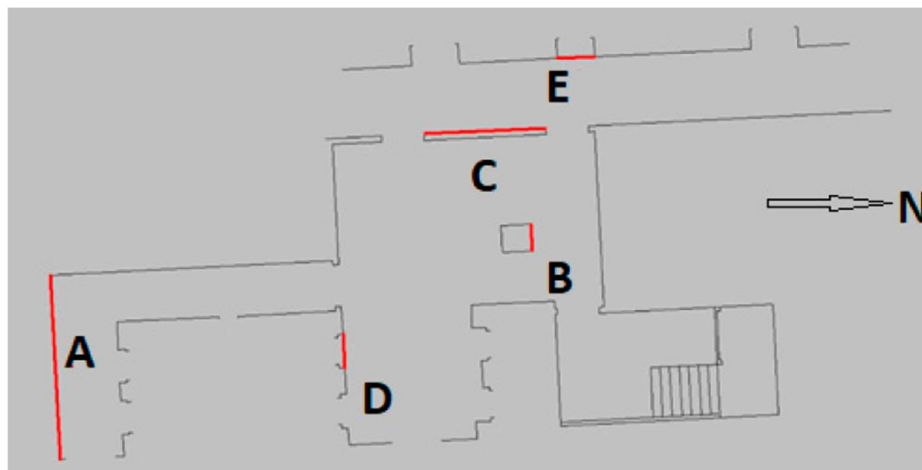
Obr. 22: Lokalizace vesnice Bni Sbih [Mapy.cz]



Obr. 23: Lokalizace vesnice Bni Sbih a synagogy [Mapy.cz]

## 5.2 Fakulta ČVUT

V suterénu stavební fakulty ČVUT v Praze proběhlo testování použitých přístrojů za účelem zjištění vhodnosti využití přístrojů. Prostor suterénu byl zmapován pomocí třech typů laserových skenerů a totální stanicí Leica TCR3. Referenčním modelem byl zvolen nejpřesnější laserový fázový skener Surphaser s přesností 0,6 mm/ 10 m. Tato data byla porovnána s výsledky ze skeneru BLK360 a ZEB Revo.



Obr. 24: Plán suterénu fakulty FSv ČVUT [29]

V tabulce byly porovnány vybrané vzdálenosti vyznačených písmeny A–E (viz. obr.24). Mračna bodů byla vzájemně porovnána v softwaru CloudCompare, k výpočtu byla využita funkce *Compute cloud/cloud distances*. Aritmetický průměr rozdílů vzdáleností mezi body v porovnání mezi skenery Surphaser 25 HSX a Leica BLK 360 byly 6,35 mm se standardní odchylkou 10,38 mm. Aritmetický průměr rozdílů ve vzdálenostech mezi body měřenými pomocí skeneru Surphaser 25 HSX a ZEB-REVO byl 10,12 mm se standardní odchylkou 12,76 mm Tento test prokázal použitelnost obou typů laserových skenerů pro dokumentaci historických budov během expedice.

Přístroj	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]	E [m]
Surphaser 25 HSX	5.761	0.836	3.781	1.049	1.169
Leica BLK 360	5.767	0.833	3.775	1.043	1.164
ZEB Revo	5.785	0.850	3.779	1.028	1.174
Leica TCR 307	5.758	0.835	3.758	1.056	1.174

Tab. 2: Výsledky měření suterénu zvolenými přístroji

## 6 DATA

### 6.1 Využité vybavení

#### 6.1.1 Leica BLK360

Jedná se o laserový skener malých rozměrů. Hmotností 1 kg a velikostí 10x16 cm se stal nejmenším a nejlehčím laserovým skenerem svého druhu. Kvůli svým rozměrům a váze byl vybrán jako ideální volba na expedici. Skener využívá laser (vlnová délka paprsku je 830 nm). V přístroji je zabudovaný systém sloužící k zachycení panoramatické fotografie a obarvení mračna. Dále je zabudována termální kamera a integrovaná inerciální měřicí jednotka (IMU – inertial measurement unit).

Přístroj lze ovládat jediným tlačítkem a při použití aplikace Leica Cyclone FIELD 360 pro mobilní zařízení lze obrazová a cloudová data zobrazit na Ipadu. Lze také použít software Autodesk Recap Pro.

Skener disponuje 15 Mpix tří kamerovým systémem (150 Mpix na celé panorama) a termovizní kamerou. [30]



Obr. 25,26: Leica BLK360 [30]

Parametry:

Export: LGS, RCP

Přesnost 3D bodu\*: 6 mm / 10m, 8 mm/ 20 m

Přesnost délek\*: 4 mm/10 m, 7 mm/20 m

Rozlišení 5-20 mm/10 m

Rozsah skenování: 360°x 300°

Dosah: 0,6-60 m

Rychlost: až 360 000 bodů za vteřinu, 3 minuty na plné zorné pole

\*přesnosti při odrazivosti 78 % [30]

### **6.1.2 ZEB Revo GO**

3D mobilní osobní laserový skener od firmy GeoSLAM pracuje na technologii end-to-end, což je vhodné pro jakékoliv prostředí, zejména v uzavřených prostorech, kde nelze použít GNSS. Určení pozice přístroje totiž není vypočteno technologií GNSS, nýbrž metodou SLAM (Simultaneous localization and mapping). Metoda SLAM určuje polohu přístroje z měřených dat. Algoritmus SLAM je založen na rozložení skenovaného prostoru na několik částí a každému z nich je přiřazen určitý počet orientačních bodů; díky pohybu zařízení, které je nesené operátorem, se určuje trajektorie zařízení. Následně je pak z trajektorie a vlastního měření laserovou otáčivou hlavou vytvořeno výsledné mračno bodů postprocesingem. Mračno bodů lze snadno zpracovat v softwaru GeoSLAM Hub. Skener dokáže naskenovat třípatrový dům do 30 minut. Hmotnost skenovací hlavy 850 g, velikost 60x120x150 mm. Pomocí kamery ZEB-CAM lze měřené mračno bodů obarvit.

Celý proces měření a vyhodnocení probíhá v reálném čase pomocí SLAM algoritmů, kde systém postupně spojuje jednotlivé skeny (100skenů za sekundu) a propojí jednotlivé skeny s údaji z inerciální jednotky (IMU), která zaznamenává polohu pro každý jednotlivý sken, tím jsou přesně určeny souřadnice 3D bodů v reálném čase [31].



Obr. 27: ZEB Revo GO [32]

Parametry:

Dosah: 30 m

Přesnost bodů: 1-3 cm

Rychlost: 43 000 bodů za vteřinu

Rozsah skenování: 360°x 270°

Velikost dat: 100 MB za minutu

Vnitřní paměť: 128 GB [32]

### 6.1.3 Surphaser 25 HSX, Leica TCR 307

Laserové skenery Surphaser 25 a Leica TCR byly použity pro porovnání přesnosti s výše uvedenými skenery, které byly využity pro dokumentaci památek v Maroku. Měření proběhlo v suterénu fakulty ČVUT (viz kapitola 5.2).

Totální stanice Leica TCR 307 disponuje přesností 2 mm + 2 ppm. Přesnost skeneru Surphaser 25 HSX je 0,6 mm/ 10 m.



Obr. 28, 29: Surphaser 25 HSX, Leica TCR 307 [Google.com]

## 6.2 Sběr dat

### 6.2.1 Sběr data přístrojem BLK360

Po rekognoskaci terénu se skener postaví na požadovaná místa a provede se hrubé ustanovení. Přístroj se poté dorovná sám díky kompenzátoru. Ovládání přístroje je možné dvěma způsoby. Za pomoci tlačítka přímo na skeneru nebo přes Ipad. Jelikož se na přístroji kromě jediného tlačítka a notifikačního prstence nenachází displej, pokročilejší úkony je nutno provádět dálkově přes tablet, a to konkrétně přes iPad.

Tablet je propojen s přístrojem pomocí WLAN. Ovládat přístroj lze buďto přes aplikaci Leica, nebo Autodesk ReCap Pro. V těchto aplikacích lze založit zakázku, určit stanovisko, zvolit parametry skenu. Data se ukládají do vnitřního úložiště, a poté se přes WLAN importují rovnou do softwaru Cyclone na PC. Při použití Ipadu se naskenovaná data po dokončení měření odešlou přímo do zařízení, kde je možné si je prohlédnout. Použijeme-li aplikaci Autodesk ReCap Pro, vytvoří se projekt ReCap, který lze následně využít v programech AutoCad, Revit nebo ReCap.

Synagoga byla změřena během 30 minut a bylo použito celkem 6 stanovisek. V software Cyclone Register 360 se jednotlivé skeny spojí pomocí korelace automaticky, pokud jsou správně rozložena stanoviska. V opačném případě je nutný zásah operátora a ruční spojení skenů pomocí několika bodů. Celkový počet bodů konečného spojeného mračna bodů je 352 milionů. Výsledná přesnost 4-5 mm.

### 6.2.2 Sběr dat přístrojem ZEB Revo GO

Před samotným sběrem dat je nutné provést rekognoskaci prostředí a odhadnout potenciálně nevhodná místa, kde by mohl mít algoritmus SLAM problémy. Dlouhé tunely nebo chodby, se stejným profilem a hladkými stěnami mohou způsobit, že algoritmus nedokáže správně identifikovat orientační body, a tudíž by pohyb přístroje nebyl zaznamenán. To by mohlo způsobit například špatné umístění nebo překrývání nesprávných částí měřeného objektu. Z tohoto důvodu se do těchto prostorů uměle umísťují předměty, díky nimž jsou pozice a směr pohybu jasně určeny. Při rekognoskaci je také vhodné si přibližně naplánovat trasu skenování z hlediska dalších kritérií zvyšujících přesnost a relevanci dat.

ZEB-REVO se položí na rovný povrch a stiskne se tlačítko start/stop na skenovací hlavici. Jakmile ZEB kontrolka začne blikat červeně, uživatel otočí skenovací hlavou alespoň o 90°, čímž se spustí inicializační mód. V inicializačním módu se nesmí s přístrojem nijak manipulovat. Po 15 sekundách začne ZEB kontrolka svítit zeleně, což značí, že je přístroj připraven ke skenování. Uživatel



uchopí přístroj, velmi pomalu ho otočí do vertikální skenovací polohy a začne skenovat prostředí.

Pohyb se skenerem by měl být pomalý, plynulý a přístroj by měl být udržován ve vertikální poloze. Pozor by si měřič měl dávat při přechodu z vnitřních prostor do venkovních a vyhýbat pohyblivým a lesklým předmětům.

Pro správnou funkci SLAM algoritmu se musí skenování začínat a končit na stejném místě. Opakovaným naskenováním již známých ploch je měření vyrovnáno a výsledky jsou zpřesněny. Je doporučeno dělat více smyček v rámci jednoho měření. Pro získání vyšší přesnosti by se měl uživatel několikrát vracet na již známá místa, pokud možno jinými cestami. Takto je vytvořeno více menších tras, které jsou vyrovnávány.

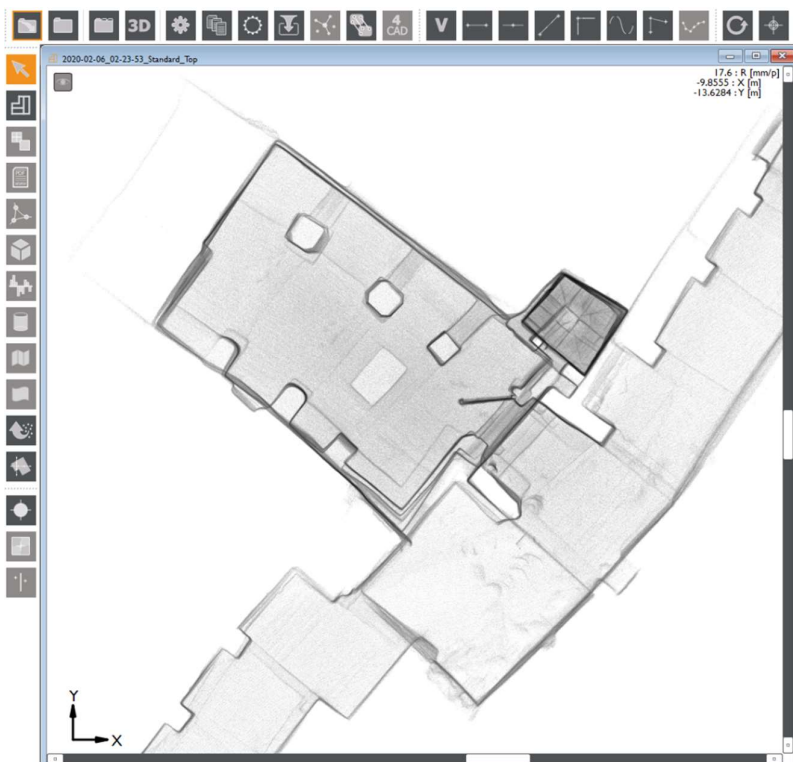
Na konci skenování se přístroj opět položí na rovnou plochu přibližně na to samé místo, kde byl v inicializačním módu na začátku měření. Po stisku tlačítka start/stop je opět třeba nechat přístroj 15 sekund ve stejné pozici, dokud ZEB kontrolka nepřestane blikat červeně. V tento okamžik začne kontrolka AUX svítit oranžově, což značí zpracování naměřených dat. Pro stažení dat je nutné připojit kabel s USB flash diskem. Kontrolka AUX se rozsvítí zeleně, což značí, že jsou data stahována na USB flash disk. Po ukončení stahování dat kontrolka zhasne a je možné USB flash disk odpojit.

Synagoga byla změřena pochůzkou uvnitř za pouhé 3 minuty a celkový počet bodů je necelých 10 miliónů. Výsledná přesnost 10-20 mm.

# 7 ZPRACOVÁNÍ

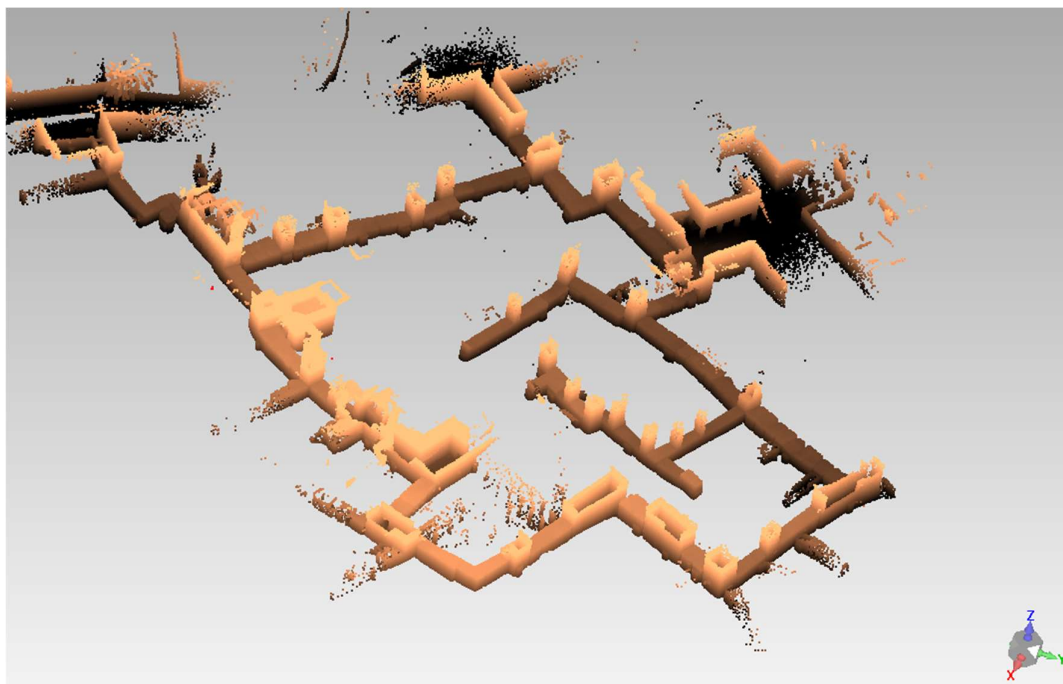
## 7.1 Zpracování dat z přístroje ZEB Revo GO

Data ze skeneru ZEB Revo byla prvně zpracována v softwaru GEO Slam Hub a GEO Slam Draw, kde proběhlo automatické vygenerování vektorové kresby a mračna bodů.



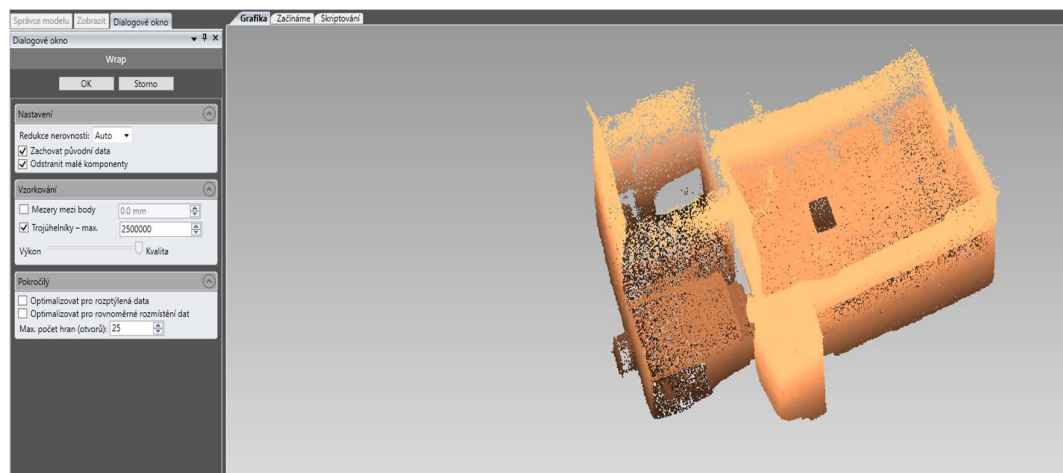
Obr. 30: Mračno bodů [software GEO Slam]

Mračno bodů bylo poté nahráno do softwaru Geomagic Wrap, který byl fakultou zpřístupněn přes vzdálenou plochu. Mračno bodů z GEO Slam Hub nebylo příliš kvalitní a bylo nutné provést mnoho úprav. Z důvodu zaměření kompletní židovské čtvrti bylo nutné data zredukovat na požadovanou oblast synagogy. Celkem bylo zredukováno mračno z 10 miliónů bodů na 882 tisíc bodů.



Obr. 31: Mračno bodů Mellahu [software Geomagic Wrap]

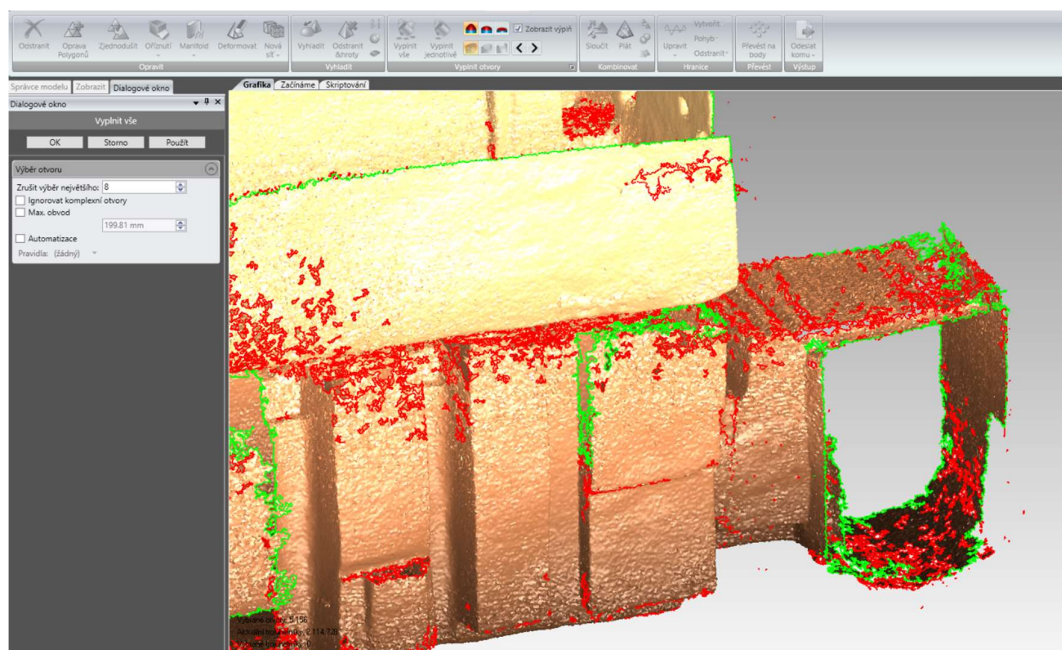
Po vymezení naší oblasti, byla využita funkce *Wrap*, která převodem bodů na polygony vytvořila základní model.



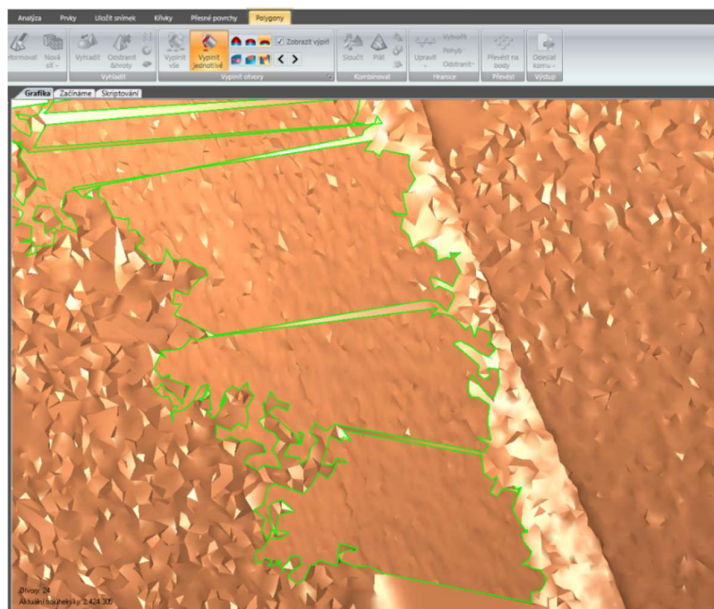
Obr. 32: Vytvoření modelu funkcí *Wrap* [software Geomagic Wrap]

V modelu se nacházelo mnoho chyb, především v podobě otvorů, které bylo nutné vyplnit. Největší nedostatky modelu se nacházely v horních rozích synagogy. Software umožňuje zacelit otvory dvěma funkcemi: *Vyplnit vše* a *Vyplnit jednotlivě*. Z důvodu značné četnosti a rozsahu děr nebylo vhodné funkci *Vyplnit vše* použít. Tato funkce také zaceluje veškeré nevyplněné otvory včetně hranic oříznutého modelu (komín, vchod do synagogy). Pro kvalitnější zacelení větších otvorů byla

využita funkce *Most*, která funguje na principu vytvoření nového polygonu mezi dvěma vybranými body a interpolací vyhledá nevhodnější bod a vytvoří nový trojúhelník.

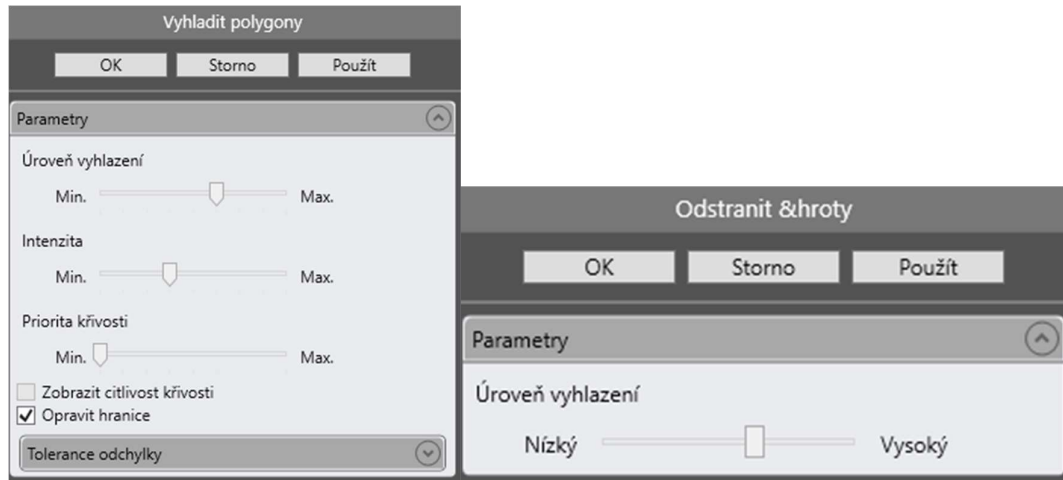


Obr. 33: Model před opravou chyb [software Geomagic Wrap]

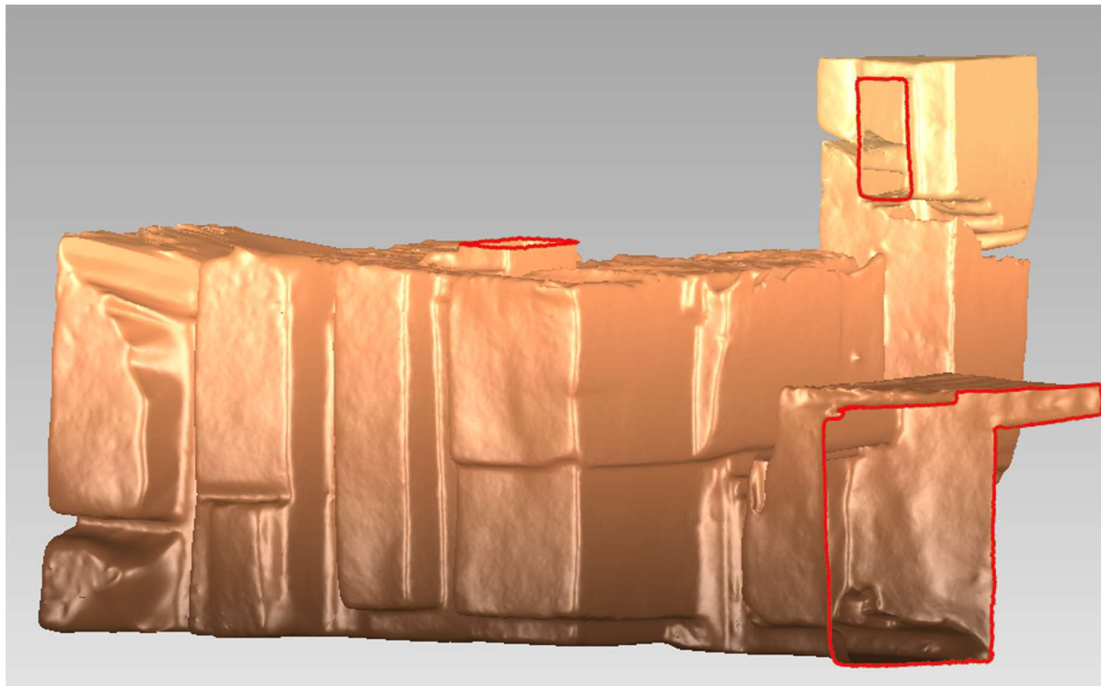


Obr. 34: Ukázka využití funkce *Most* [software Geomagic Wrap]

Funkcí *Vyplnit jednotlivě* pak byly upravené otvory ručně zaceleny. Následně byl model vyhlazen funkcí *Vyhladit* a *Ruční vyhlazení*. Poslední úpravou bylo odstranění zbylých nerovností a hrotů funkcí *Odstranit hroty*.



Obr. 35, 36: Nastavení funkcí *Vyhladit* a *Odstranit hroty* [software Geomagic Wrap]



Obr. 37: Opravený a vyhlazený model, [software Geomagic Wrap]

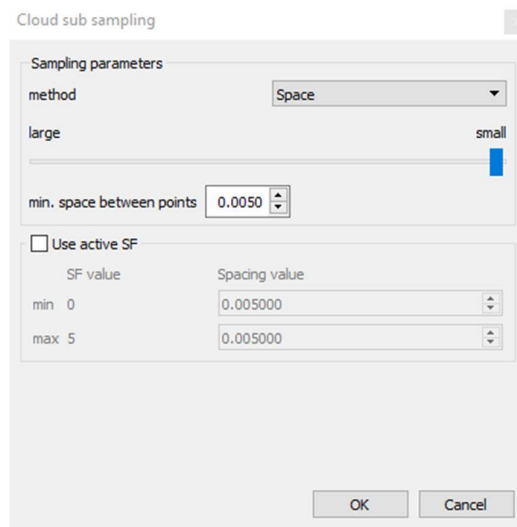
## 7.2 Zpracování dat z přístroje Leica BLK-360

Data ze skeneru BLK 360 byla spojena korelací do jednoho mračna bodů v softwaru Cyclone Register 360. Následně bylo mračno bodů otevřeno v programu

CloudCompare, kde byly provedeny základní úpravy. Data z přístroje BLK 360 obsahovala velké množství dat (352 miliónu bodů) a práce s nimi tak byla obtížná a softwarově náročná. Bylo tedy nutno data zredukovat. K tomu byla využita funkce *Subsample a point cloud*. Tato funkce převzorkuje určená data. Ze tří možností, které funkce nabízí (*Random, Space, Octree*) byla vybrána možnost *Space*. *Space* redukuje body s určením minimálního rozestupu mezi jednotlivými body. Vhodný rozestup pro práce s mračnem byl dosažen při gridu 5 mm. Mračno bylo zredukováno na výsledných 13 981 283 bodů. Výsledné mračno bodů bylo uloženo do formátu XYZ.

Properties		Properties	
Property	State/Value	Property	State/Value
<b>CC Object</b>		<b>CC Object</b>	
Name	BLK360_3503293_Setup61	Name	BLK360_3503293_Setup61.subsamp
Visible	<input checked="" type="checkbox"/>	Visible	<input checked="" type="checkbox"/>
Show name (in 3D)	<input type="checkbox"/>	Show name (in 3D)	<input type="checkbox"/>
Colors	SF Scalar field	Colors	RGB
Box dimensions	X: 10.1492 Y: 17.2317 Z: 8.5783	Box dimensions	X: 10.149 Y: 17.2317 Z: 8.5783
Shifted box center	X: 14.4435 Y: 10.0441 Z: 2.17285	Shifted box center	X: 14.4436 Y: 10.0441 Z: 2.17285
Global box center	X: 14.443518 Y: 10.044112 Z: 2.172851	Global box center	X: 14.443578 Y: 10.044112 Z: 2.172851
Info	Object ID: 260 - Children: 27	Info	Object ID: 319 - Children: 0
Current Display	3D View 1	Current Display	3D View 1
<b>Cloud</b>		<b>Cloud</b>	
Points	352,608,569	Points	13,981,283

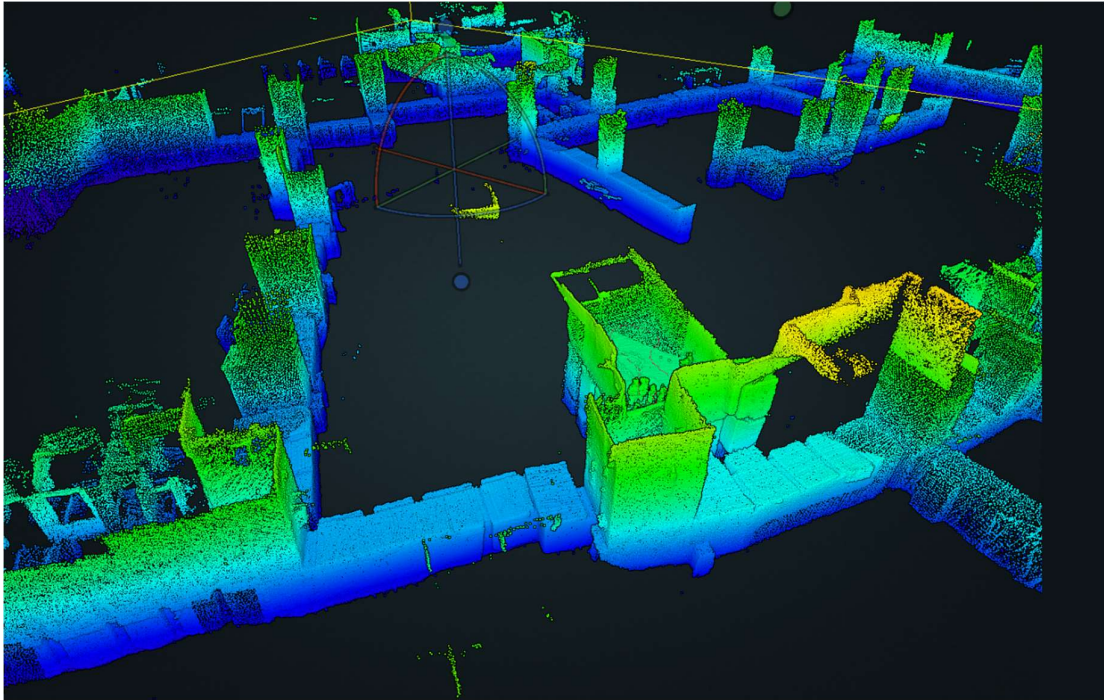
Obr. 38, 39: Vlastnosti modelu před a po redukcí rozestupu bodů [software CloudCompare]



Obr. 40: Funkce *Subsample a point cloud* [software CloudCompare]

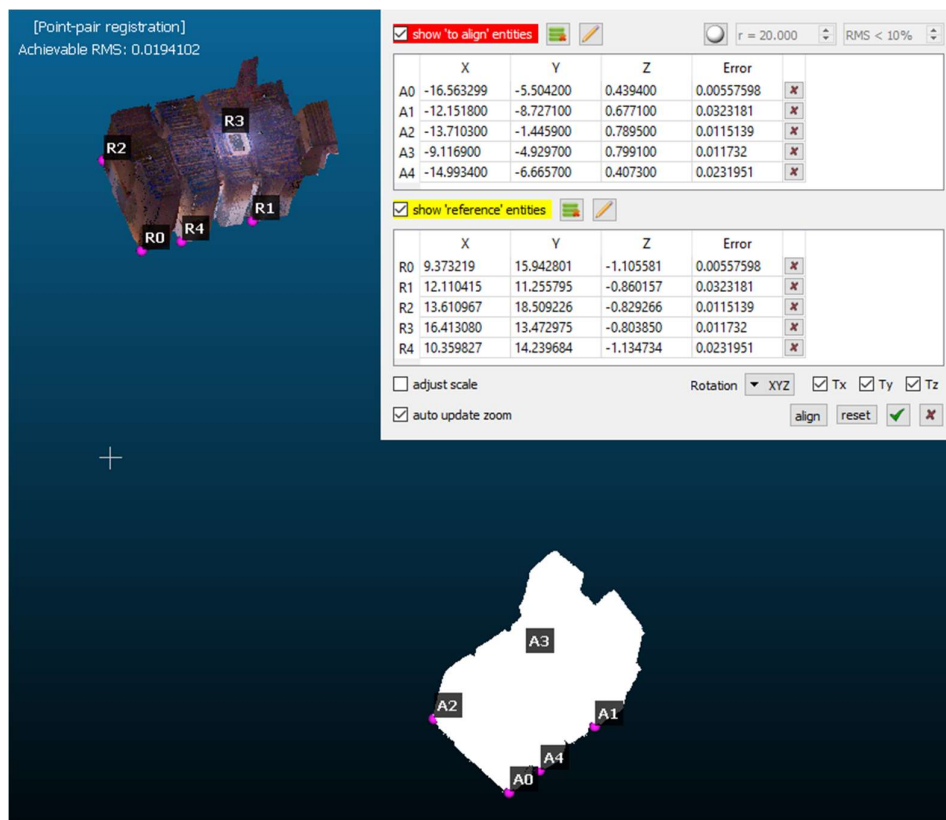
### 7.3 Porovnání přístrojů

Do softwaru CloudCompare byla importována zredukováná mračna bodů pro zjištění vzájemné přesnosti. Mračno bodů ze skeneru Leica BLK360 kvůli lepším parametrům skenování bylo využito jako referenční. Jelikož se při měření ručním laserovým skenerem ZEB Revo nepoužívaly žádné kontrolní či geodeticky zaměřené vlíčovací body, bylo nutno zjistit možnou deformaci mračna bodů. Získané mračno bodů bylo proto porovnané s mračnem bodů ze skeneru Leica BLK360. Při měření BLK360 bylo dosaženo průměrně 80 % překrytí a díky poměrně malému rozsahu synagogy se větší deformace nepředpokládaly.

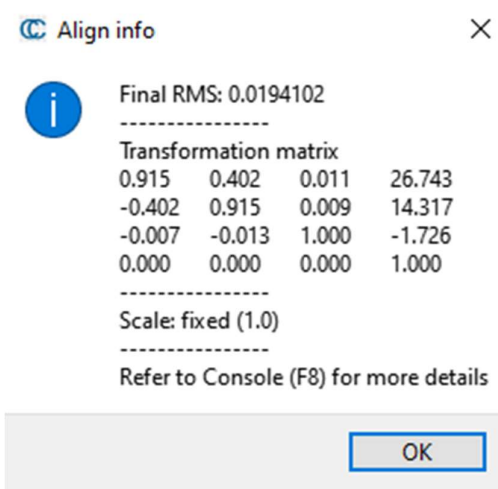


Obr. 41: Porovnání mračen v softwaru CloudCompare [software CloudCompare]

Transformace mračen byla provedena funkcí *Align two cloud by pickig equivalent point pairs*. Absolutní hodnoty rozdílů mezi mračny jsou méně jak 3 cm, zpravidla 2 cm.



Obr. 42: Funkce *Align two clouds* a rozdíly [software CloudCompare]



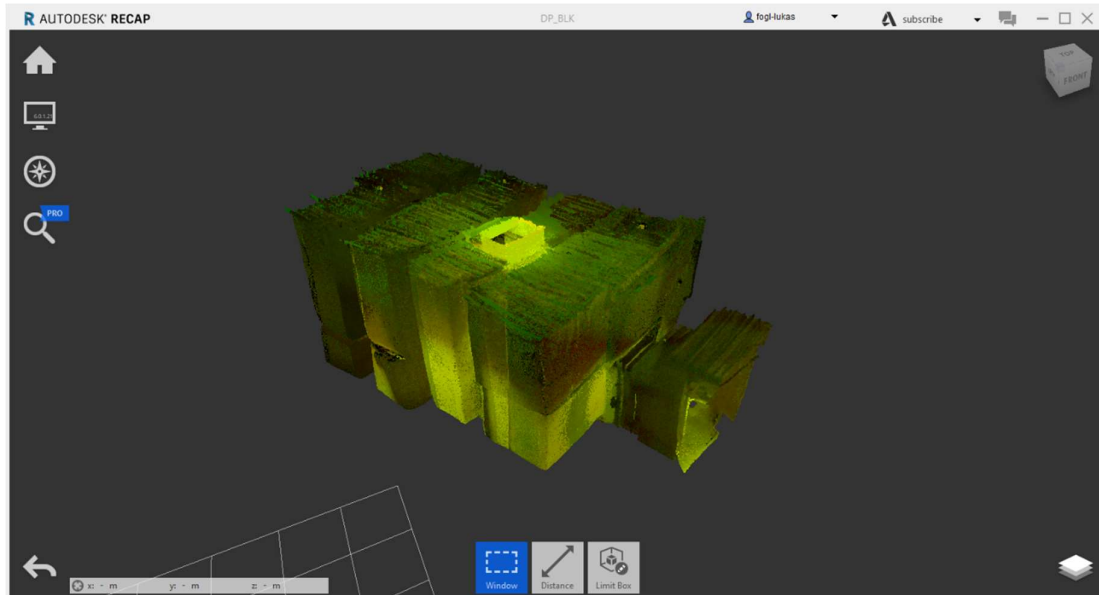
Obr. 43: Střední kvadratická odchylka výsledku [software CloudCompare]

Mračno bodů z Leica BLK360 je kvalitní a obsahuje pouze malé šумы v rozmezí 3-5 mm. Sken z přístroje ZEB Revo obsahuje méně bodů. Mračno není tedy tolik podrobné a kvalitní. Rozptyl bodů je 1-2 cm.



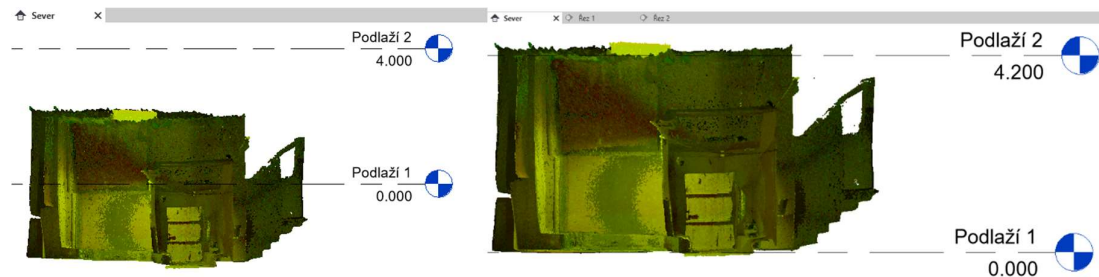
## 7.4 Autodesk Revit

Vyexportovaný soubor formátu XYZ byl otevřen v softwaru Autodesk ReCap. Byl založen nový projekt, do kterého bylo mračno importováno. Funkcí *Index scans* a *Launch project* byl vytvořen soubor s příponou RCP, který je nutný pro další práci v softwaru Autodesk Revit.



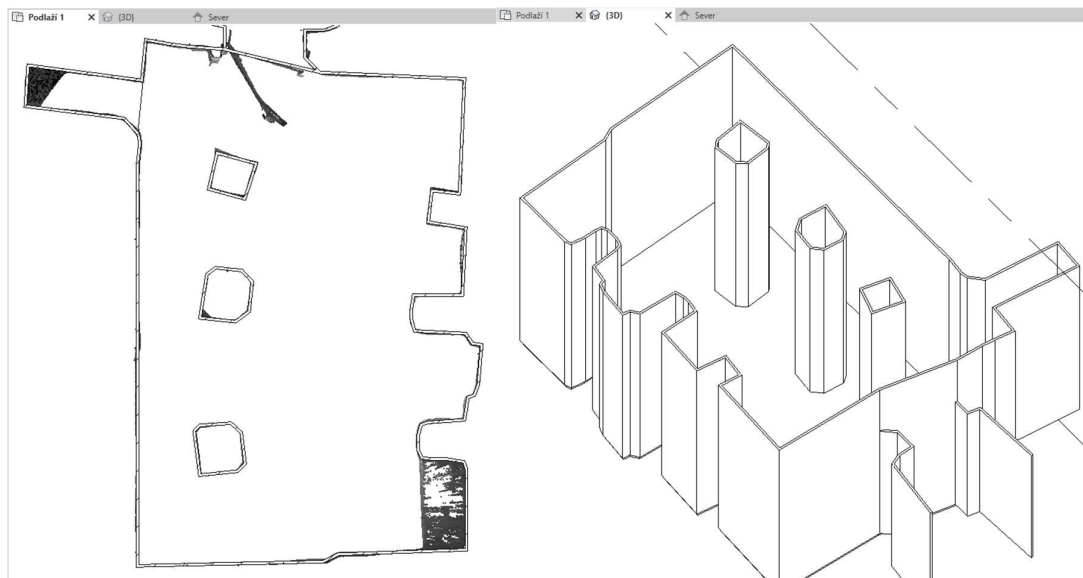
Obr. 44: Mračno bodů v softwaru ReCap [software Autodesk ReCap]

Model se po importu nezobrazoval správně, proto bylo nutno nastavit výškové hladiny (podlaží). Za pomoci dvou řezů modelem byly nastaveny dvě hladiny, vystihující podlahu a strop synagogy.



Obr. 45, 46: Hladiny před a po úpravě [software Autodesk Revit]

V zobrazení Podlaží 1 byly nastaveny řezy podle kterých bylo možné modelovat stěny a podlahu. Typ hliněných stěn i podlah musel být nově vytvořen. Pro stěny byla nastavena šířka 0,04 m s výškou 4,2 m.



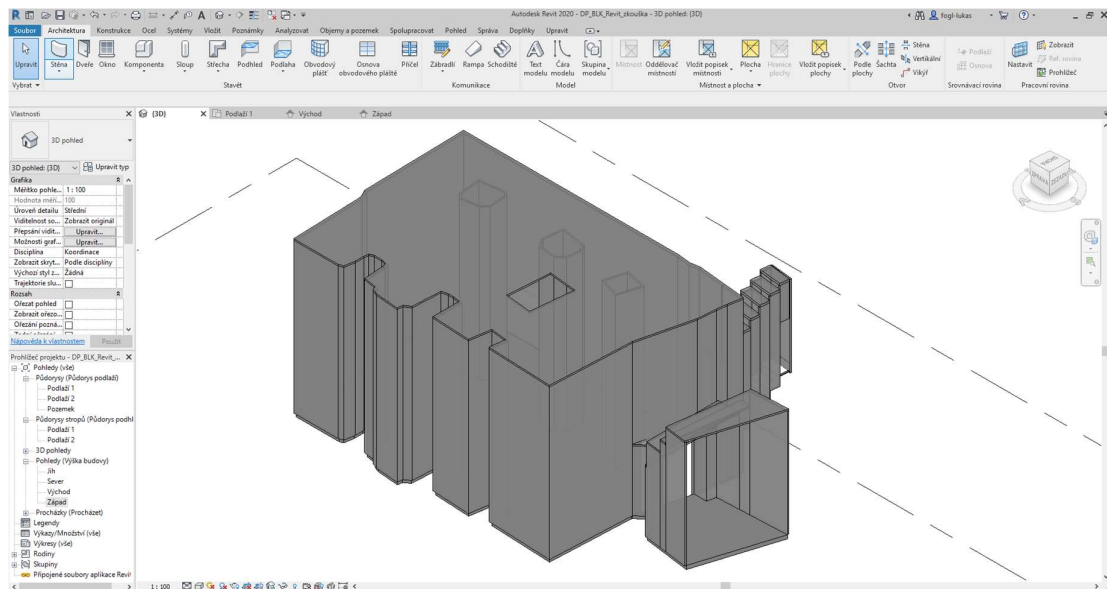
Obr. 47, 48: Vykreslení stěn a podlahy [software Autodesk Revit]

V dalším kroku do modelu byly přidány dveře a strop. Rozměr dveří byl zjištěn v softwaru ReCap funkcí *Distance*.



Obr. 49: Rozměr dveří [software Autodesk ReCap]

Panel Architektura nabízí také funkci *Schody*, který byla využita na vytvoření průchodu do druhého patra.



Obr. 50: Model synagogy [software Autodesk Revit]

Pro další práci bylo nutno model exportovat. V panelu *Soubor* byl zvolen *Export* formátu *FBX*. S formátem *FBX* dokáže pracovat software *UE4*.

## 7.5 Unreal Engine 4

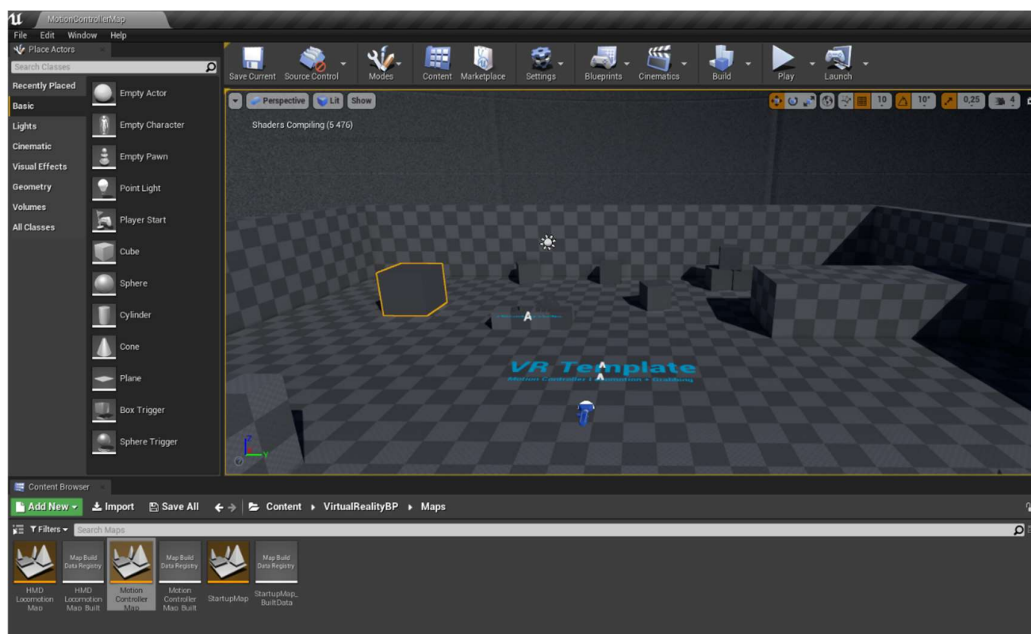
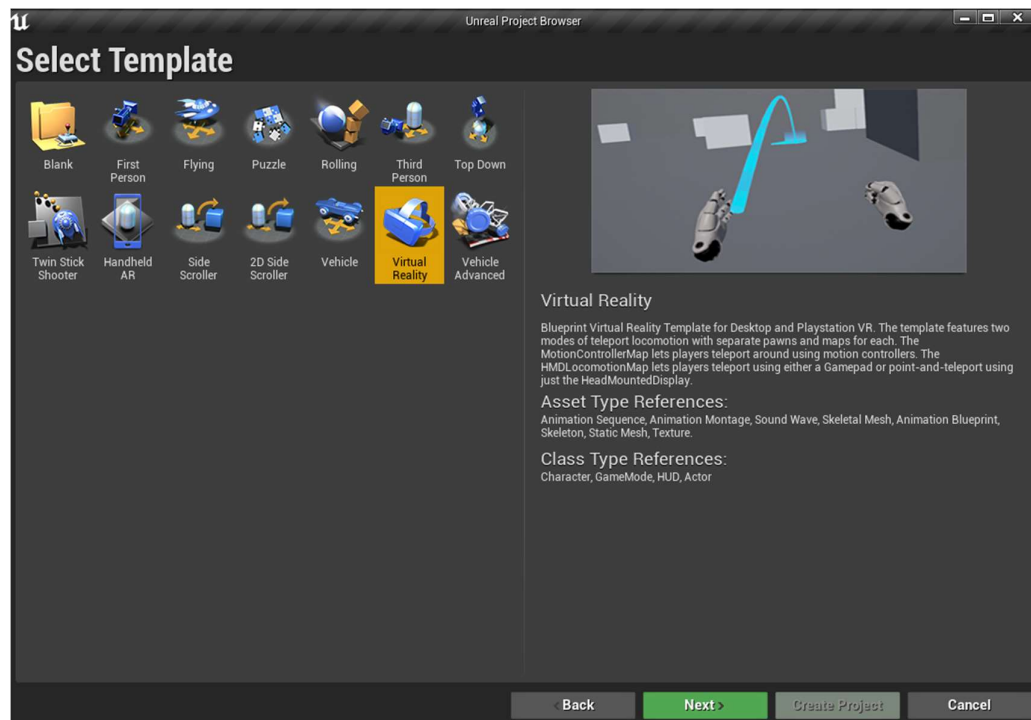
Virtuální prostředí modelu bylo vytvořeno v prostředí softwaru *UE4* od společnosti *Epic Games*. Společnost se zabývá tvorbou a vývojem počítačových a konzolových her.

### 7.5.1 Založení virtuálního prostředí

Prvním krokem po spuštění aplikace *Epic Games Launcher* bylo vytvoření nového projektu. *UE4* nabízí čtyři kategorie pro vytvoření nového projektu: *Games*; *Film, Television and Live Events*; *Architecture, Engineering and Construction*; *Automotive, Product Design and Manufacturing*. Vzhledem k povaze práce byla zvolena možnost *Games*, která obsahuje čtrnáct šablon pro tvorbu herního prostředí. Ze čtrnácti šablon byla vybrána šablona *Virtual Reality*, která je ideální pro vizualizaci 3D modelu ve *VR*. Zmíněná šablona obsahuje naprogramované funkce, které značně usnadňují práci při tvorbě virtuálního prostředí.

Před importem modelu, bylo nutné zvolit správnou výchozí mapu prostředí. V záložce *Content – VirtualRealityBP – Maps* byla vybrána *Motion Controller Map* o rozměrech 40 x 40 metrů. V herním poli se nachází objekty, které bylo potřeba před importem modelu odstranit (viz. obr. 49). Byla ponechána pouze podlaha a stěny

pole. Zbytek předmětů byl po výběru v poli odstraněn klávesou Delete nebo označením požadovaných předmětů v pravém okně se záložkou World Outliner a následným hromadným odstraněním.



Obr. 51, 52: Prostředí UE4 [software UE4]

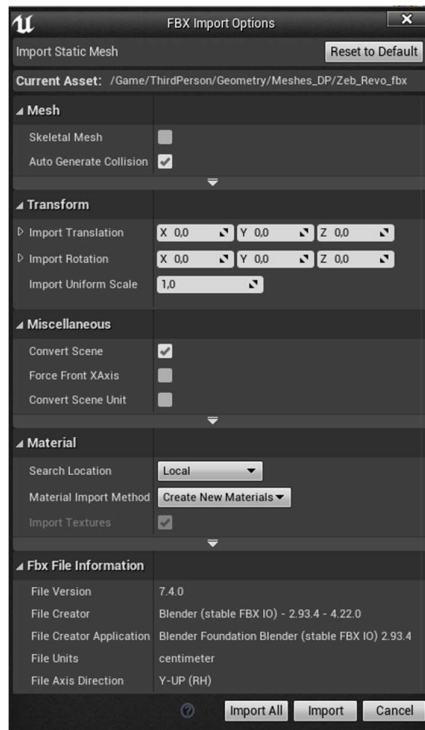
## 7.5.2 Import modelu do UE4

Software UE4 pracuje s formátem FBX, bylo nutné model ve formátu OBJ konvertovat do správného formátu. K převodu byl využit software Blender, který umí pracovat s formátem OBJ i FBX.

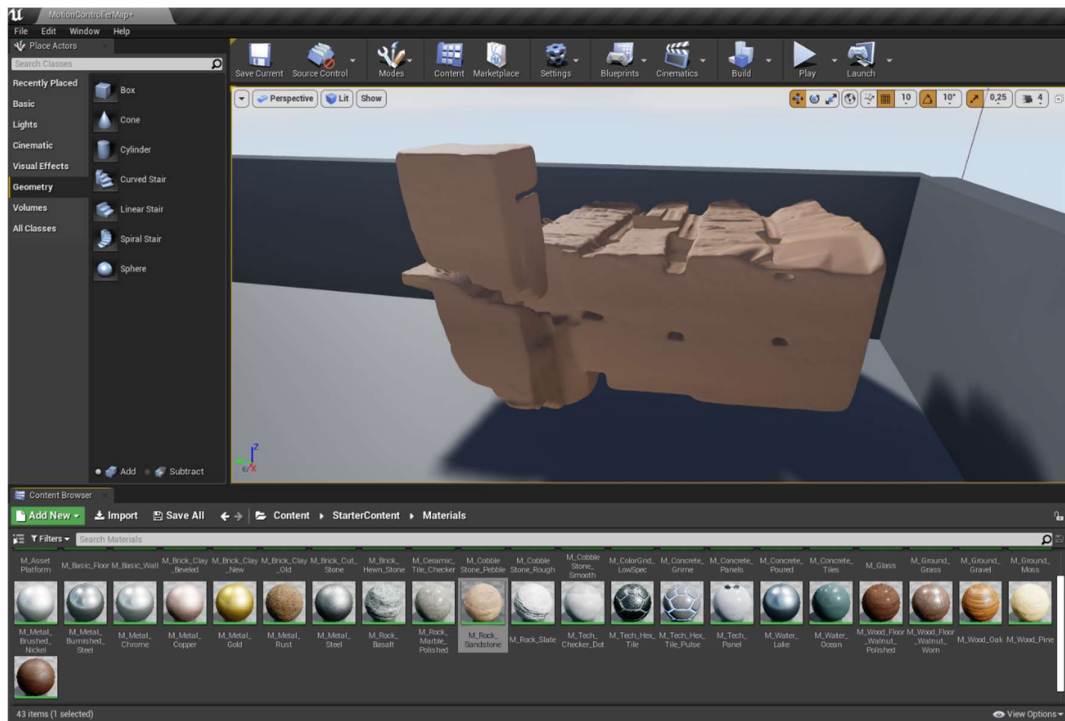
Ve složce Geometry byla vytvořena nová podsložka *Meshes\_DP* do které se model importoval. Jednou možností importu modelu je přes *Content – Import*. Druhou možností je jednoduché přetažení modelu z disku do vytvořené podsložky.

Po přetažení modelu do softwaru se otevřelo okno s nastavením importu, kde byla zaškrtnuta funkce *Auto Generate Collision*, aby importovaný model nebyl po spuštění programu průchozí a jeho hranice fungovaly jako stěny. Model byl exportován v požadovaném měřítku a jednotkách, proto nebylo nutné měnit žádná jiná nastavení a mohl být spuštěn proces kliknutím na *Import All*.

Importovanému modelu byla přiřazena textura *Rock\_Sandstone*, která je součástí základního balíčku materiálů.



Obr. 53: Konfigurace importu [software UE4]

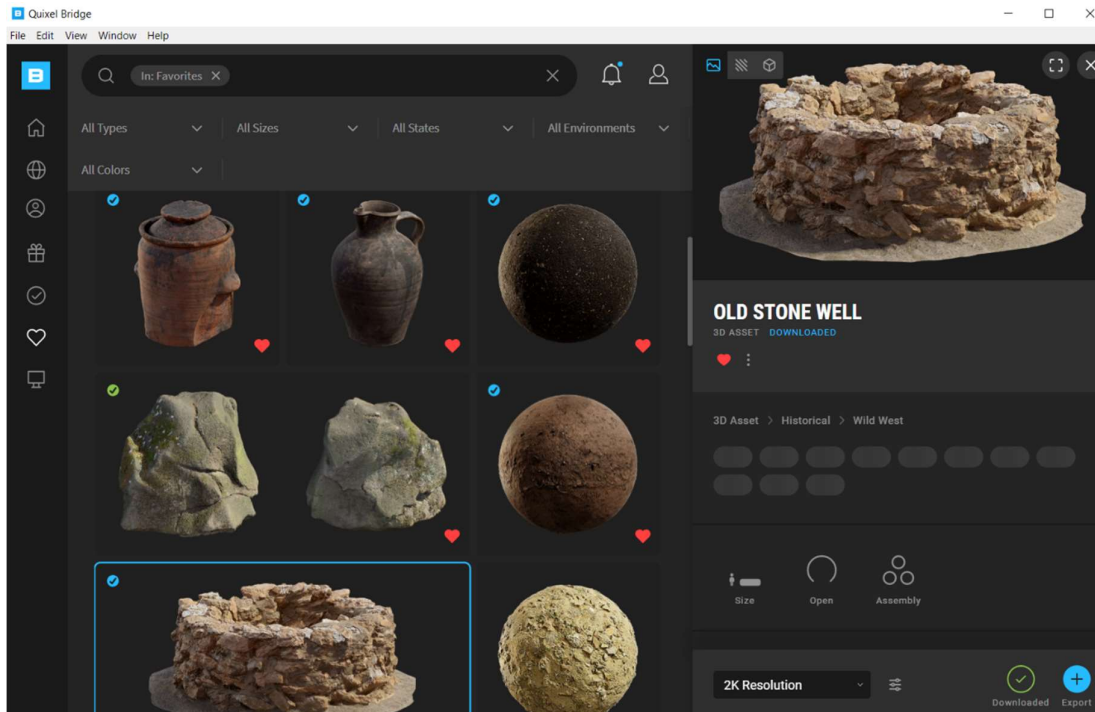


Obr. 54: Importovaný model s texturou [software UE4]

### 7.5.3 Tvorba prostředí modelu

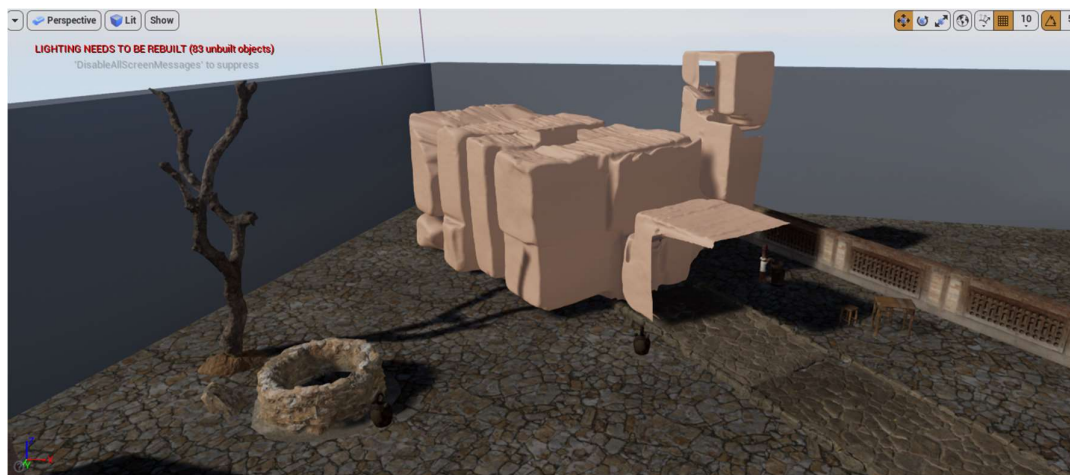
Prostřednictvím volně dostupného softwaru Quixel Bridge byly do prostředí UE4 staženy materiály, povrchy a předměty tvořící okolí synagogy. Například hlína, kamenivo, kašna, chodník, vázy, stromy apod.

Pomocí klávesových zkratk W – posun, E – rotace, R – měřítko byl model a předměty umístěny na správné místo, směr a byl jim určen správný rozměr.



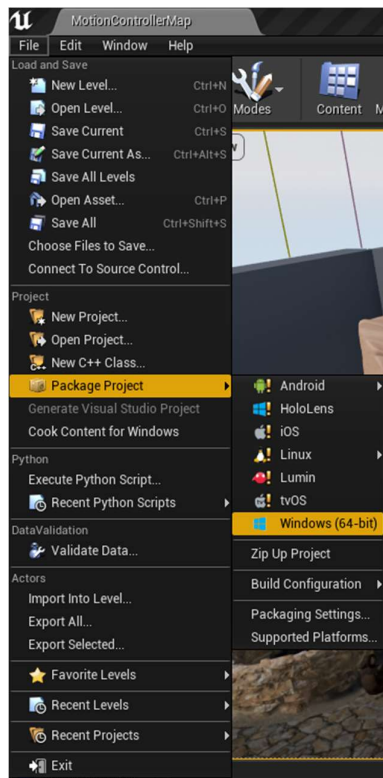
Obr. 55: Stažené položky [software Quixel Bridge]

Software je možné propojit přímo s účtem Epic Games. Veškeré stažené položky se podle nastaveného adresáře uloží přímo do rozhraní UE4 a je možné s nimi v modelu pracovat.



Obr. 56: Modelace okolí [software UE4]

Finálním produktem této diplomové práce je EXE aplikace vygenerovaná softwarem Unreal Engine 4, ve kterém byl celý projekt budovaný. Aplikaci je možné procházet s VR headsetem (HTC Vive, Oculus apod.).



Obr. 57: Export souboru EXE pro VR aplikaci [software UE4]



## 8 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce a expedice uskutečněné v roce 2020 je ukázka využití malých, kompaktních a přenosných zařízení, které dokážou plnohodnotně zdokumentovat i rozsáhlé a špatně přístupné území za krátký čas. Expedice v jižním Maroku dokázala za 5 dní nasbírat 48 GB dat na různých místech země. Využito bylo měření blízkou fotogrammetrií a laserové skenování. Výsledky dokumentace byly zpracovány ve formě 3D modelů, které slouží zejména pro analýzu obytných zón židovského obyvatelstva.

Židovské osady vlivem času, nedostatku financí, válek, rozvoje civilizace a cestovního ruchu postupně upadají. Proto je důležité zachovat je alespoň v podobě 3D modelů a fotografií, aby neupadly v zapomnění. Jediný systematický výzkum marockých synagog obsahujících několik hliněných architektur provedl Joel Zack v 80. letech 20. století. Většina zdokumentovaných míst však byly městské synagogy v severním Maroku a studie nebyla zveřejněna. Proto lze považovat univerzitní expedici za poslední rozsáhlou dokumentaci židovské architektury. Za pomoci technologického rozkvětu už není potřeba sídla zakreslovat ručně, měřit mechanickými teodolity či totálními stanicemi. Technologie ručního laserového skenování dokáže během pár hodin zdokumentovat celou vesnici a následným zpracováním za několik hodin vytvořit kompletní 3D model s texturou.

Existuje více možností, jak zájmové oblasti zdokumentovat. Jedná se například o letecké snímkování a skenování, blízká fotogrammetrie, satelitní snímky, mobilní laserové skenování a jiné. Osady jsou tvořeny bloky z nepálených cihel. Cílem bylo zmapovat především vnitřní prostory, které byly rozsáhlé, tmavé a úzké. Takové prostředí není vhodné pro použití blízké fotogrammetrie. Avšak pro výsledný produkt je možné kombinovat více technologií a postupů měření pro dosažení lepší přesnosti a celkových detailů. Pro mellahy je technologie SLAM ideální, neboť kvůli povaze projektu nebyla nutná vysoká přesnost bodů v milimetrech. Nejdůležitější byla rychlost dokumentace a ekonomická stránka. Výhody ručních skenerů jsou následující: jednoduchá a levná doprava, snadná obsluha, skladování a částečně automatické zpracování měření. Lze tedy prohlásit, že hlavní cíle expedice byly naplněny, bylo dosaženo vyhovující přesnosti modelů za přijatelný čas. Ruční skenery se ukázaly jako zcela vhodné pro účely rychlého zaměření.

Teoretická část práce obsahuje rešerši literatury k příslušným tématům, tedy využití laserového skenování v památkové péči. Dále se rešerše zabývá oblastí virtuální reality. Z dostupné literatury byly zpracovány obecné definice obou oborů, historické milníky, jejich využití při dokumentaci památek a také popis použitého přístrojového vybavení.

Praktická část obsahuje sběr dat, testování přesnosti použitého vybavení v prostorách fakulty ČVUT a zpracování 3D modelu, který byl vizualizován ve VR v prostředí Unreal Engine 4. Z důvodu monotónního a tmavého prostoru se při automatickém vyhodnocení prostor osady Bni Sbih, vyskytly problémy s orientací části modelu, které se nepodařilo vyřešit změnou parametrů výpočtů přímo v softwaru Geo Slam. Data byla odeslána technické podpoře firmy, která model upravila a zaslala zpět.

Finálním úkolem bylo vytvoření virtuálního prostředí pro import modelu. Okolí modelu synagogy bylo doplněno předměty, které dodávají prostředí na autenticitě. Výsledné virtuální prostředí bylo zabaleno do EXE aplikace. Aplikace umožňuje si prostředí za pomoci VR headsetů a výkonných počítačů prohlédnout. Prostředí bylo prohlíženo headsety HTC Vive Pro a HTC Vive Pro 2, které byly propůjčeny Ing. Martinem Kýhosem.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GRUSSENMEYER, Pierre, Tania LANDES, Thomas VOEGTLE a Konrad RINGLE. Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. *International Archives of Photogrammetry* [online]. 2008, (37) [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=qICoHlcAAAAJ&citation\\_for\\_view=qICoHlcAAAAJ:Y0pCki6q\\_DkC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qICoHlcAAAAJ&citation_for_view=qICoHlcAAAAJ:Y0pCki6q_DkC)
- [2] SOUDARISSANANE, Sylvie a Roderik LINDENBERGH. Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online]. 2011, **66**(4) [cit. 2021-9-16]. ISSN 0924-2716. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005>
- [3] BOARDMAN, Clive, Paul BRYAN a Lee MCDUGALL. 3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture. *3D Laser Scanning for Heritage: Advice and Guidance on the Use of Laser Scanning in Archaeology and Architecture* [online]. 2018. 3rd ed. England: Historic England, 2018 [cit. 2021-9-16]. ISBN 1848025211. Dostupné z: <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage/>
- [4] LOGAN, Elias. Scanning Prehistoric Towers, Tombs, and Temples on Mediterranean Islands: Elias Logan and the BLK360. *Shop.leica-geosystems.com* [online]. Boston, 2020 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://shop.leica-geosystems.com/global/blog/scanning-ancient-architecture-elias-logan-and-blk360>
- [5] CHRISTOPHER, Dollard. Galician Castros, Wind Farms, and the BLK360: Case Study with Pyramidal Digital Engineering. *Shop.leica-geosystems.com/* [online]. Spain, 2020 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://shop.leica-geosystems.com/global/blog/galician-castros-wind-farms-and-blk360-case-study-pyramidal-digital-engineering>
- [6] DOWN, Jacob. BLK to the future. *AEC Magazine* [online]. London, 2018 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://aecmag.com/news/blk-to-the-future/>
- [7] PAVELKA, Karel, Jaroslav ŠEDINA, Eva MATOUŠKOVÁ, Martina FALTÝNOVÁ a Jan ŘEZNÍČEK. *Ověřená technologie nízkonákladové 3D fotogrammetrické dokumentace památkových objektů* [online]. ČVUT, Praha, 2015 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/23740954-Overena-technologie-nizkonakladove-3d-fotogrammetricke-dokumentace-pamatkovych-objektu.html>

- [8] REMONDINO, Fabio a Alessandro RIZZI. Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites—techniques, problems, and examples. *Appl Geomat* [online]. Italy, 2010 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12518-010-0025-x.pdf>
- [9] EDL, Milan, Marek MIZERÁK a Jozef TROJAN. 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. *Acta Simulatio: International Scientific Journal about Simulation*. 2018, (4), 1-5. ISSN 1339-9640.
- [10] WAJS, Jaroslaw. 3D modeling of underground objects with the use of SLAM technology on the example of historical mine in Ciechanovice. *Web of Conferences* [online]. 2018, (29), 1-7 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/04/e3sconf\\_cpsys2018\\_00024/e3sconf\\_cpsys2018\\_00024.html](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/04/e3sconf_cpsys2018_00024/e3sconf_cpsys2018_00024.html)
- [11] MAZURYK, Tomasz a Michael GERVAUTZ. Virtual Reality: History, Applications, Technology and Future. *Institute of Computer Graphics* [online]. 1999 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/2617390\\_Virtual\\_Reality\\_-\\_History\\_Applications\\_Technology\\_and\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/2617390_Virtual_Reality_-_History_Applications_Technology_and_Future)
- [12] ZHENG, J.M., K.W. CHAN a Ian GIBSON. Virtual reality. *IEEE Potentials* [online]. 1998, (2) [cit. 2021-9-17]. ISSN 1558-1772. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/666641/metrics#metrics>
- [13] GOBBETTI, Enrico a Riccardo SCATENI. Virtual reality: past, present, and future. *Center for Advanced Studies* [online]. Italy, 1998 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <http://www.p-arch.it/bitstream/handle/11050/682/vr-report98.pdf?sequence=1>
- [14] PAVELKA JR., Karel a Paulina RAEVA. VIRTUAL MUSEUMS – THE FUTURE OF HISTORICAL MONUMENTS DOCUMENTATION AND VISUALIZATION. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. ČVUT, Praha, 2019 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W15/903/2019/>
- [15] ŠTRONER, Martin. *Laserové skenování*. ČVUT, Praha: Katedra speciální geodézie, 2009.
- [16] FIALA, Radek. Laserové skenování: principy. *ANZDOC* [online]. 2011 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://adoc.pub/laserove-skenovani-principy.html>
- [17] EBRAHIM, Mostafa A-B. 3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE. *Civil Engineering Department: Faculty of Engineering* [online]. Assiut University, 2011 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/267037683\\_3D\\_LASER\\_SCANNERS\\_HISTORY\\_APPLICATIONS\\_AND\\_FUTURE](https://www.researchgate.net/publication/267037683_3D_LASER_SCANNERS_HISTORY_APPLICATIONS_AND_FUTURE)

[18] TRIMBLE. The Evolution of 3D Laser Scanning in Construction: Past, Present, and Predictions. *Constructible* [online]. Trimble [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://constructible.trimble.com/flipbooks/the-evolution-of-3d-laser-scanning-past-present-and-predictions>

[19] Autodesk Revit. *Arkance systems* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.arkance-systems.cz/produkty/stavebnictvi-a-architektura/autodesk-revit>

[20] The History of Revit - The Future of Design. *Bimboom blogspot* [online]. 2007 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: [http://bimboom.blogspot.com/2007/02/revit-history\\_11.html](http://bimboom.blogspot.com/2007/02/revit-history_11.html)

[21] Geomagic Wrap: 3D SCANNING SOFTWARE. *3D Systems* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-wrap>

[22] PAVLAS, Pavel, Pavel PŘECECHTĚL a Petr SANETRŇÍK. Virtuální realita – historie a současnost. *VR Education* [online]. Olomouc, 2020 [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://vreducation.cz/virtualni-realita-historie-a-soucasnost/>

[23] *Google.cz* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.google.cz/>

[24] *Appstore* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.apple.com/app-store/>

[25] Unreal Engine: Documentation. *Unreal Engine* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/ProgrammingAndScripting/ProgrammingWithCPP/>

[26] *Unreal Engine* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal>

[27] PAVELKA, Karel, Tobiáš SMOLÍK, Karel PAVELKA, JR. a Eva MATOUŠKOVÁ. Earthen Jewish Architecture of Southern Morocco. *Applied Sciences* [online]. 2021, 11(4) [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/4/1712>

[28] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2021-9-17]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>

[29] ŠATNER, Jan. *Analýza využití GEOSLAM v praxi*. ČVUT, Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra geomatiky.

[30] Leica Geosystems. Leica Geosystems [online]. Switzerland: Leica Geosystems, 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/blk360>

[33] SHAN, Jie a Charles K TOTH. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. Boca Raton: CRC Press, 2009, ISBN 1420051423. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/230642410\\_Topographic\\_Laser\\_Ranging\\_and\\_Scanning\\_Principles\\_and\\_Processing](https://www.researchgate.net/publication/230642410_Topographic_Laser_Ranging_and_Scanning_Principles_and_Processing)

[31] *GEOSLAM* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://geoslam.com/solutions/zeb-go/>

[32] Zeb Revo sheet. In: *GeoSLAM* [online]. Ruddington: GeoSLAM, 2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: [https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/03/ZEB\\_Go\\_Spec\\_Sheet.pdf](https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/03/ZEB_Go_Spec_Sheet.pdf)

[33] *Diarna* [online]. Newton Highlands: Digital Heritage Mapping, 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://diarna.org/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1. Vliv úhlu dopadu paprsku na hladinu šumu. Prezentované sklony jsou zleva doprava 0 °, 20 °, 40 ° a 60 ° [2].....	12
Obr. 2.: Volba metody v závislosti na velikosti a složitosti objektu [3].....	13
Obr. 3: Dokumentovaná oblast památkové zóny, Sardinie [4].....	15
Obr. 4: Porovnání dvou mračen v softwaru CloudCompare, distribuce odchylek na vertikální stupnice vpravo [7].....	16
Obr. 5: Základní součásti pro VR [11].....	18
Obr. 6: Virtuální muzeum, hrad Stafford [14].....	19
Obr. 7: Princip měření statickým laserovým skenerem [15].....	20
Obr. 8: Princip určení vzdálenosti z rozdílu fáze [33].....	21
Obr. 9: Princip prostorové polární metody [33].....	21
Obr. 10: Sken interiéru – jednací síň, Praha [15].....	22
Obr. 11: Model rozvodny, RIEGL LMS Z360 [Geodis, 2004].....	22
Obr. 12: Rozdíl mezi selektivní a neselektivní metodou určování bodu [15].....	23
Obr. 13: Ručně ovládaný 3D skener upevněný na ramenu [17].....	24
Obr. 14: Autodesk Revit [19].....	25
Obr. 15: Pracovní postupy v softwaru Geomagic Wrap [21].....	26
Obr. 16: Letecký simulátor CAE 7000 [23].....	28
Obr. 17: Aplikace Ikea Place [24].....	29
Obr. 18: VR headset, DataGlove [Google.com].....	30
Obr. 19: VR headset HTC Vive SteamVR [18].....	31
Obr. 20: Hra Fortnite, UE4 [26].....	32
Obr. 21: Lokalizace vesnice Bni Sbih [Mapy.cz].....	34
Obr. 22: Lokalizace vesnice Bni Sbih [Mapy.cz].....	34
Obr. 23: Lokalizace vesnice Bni Sbih a synagogy [Mapy.cz].....	35
Obr. 24: Plán suterénu fakulty FSv ČVUT [29].....	36
Obr. 25: Leica BLK360 [30].....	37
Obr. 26: Leica BLK360 [30].....	37
Obr. 27: ZEB Revo GO [32].....	39
Obr. 28: Surphaser 25 HSX [Google.com].....	39
Obr. 29: Leica TCR 307 [Google.com].....	39
Obr. 30: Mračno bodů [software GEO Slam].....	42

Obr. 31: Mračno bodů Mellahu [software Geomagic Wrap].....	43
Obr. 32: Vytvoření modelu funkcí Wrap [software Geomagic Wrap].....	43
Obr. 33: Model před opravou chyb [software Geomagic Wrap].....	44
Obr. 34: Ukázka využití funkce Most [software Geomagic Wrap].....	44
Obr. 35: Nastavení funkce Vyhladit [software Geomagic Wrap].....	45
Obr. 36: Nastavení funkce Odstranit hroty [software Geomagic Wrap].....	45
Obr. 37: Opravený a vyhlazený model, [software Geomagic Wrap].....	45
Obr. 38: Vlastnosti modelu před redukcí rozestupu bodů [software CloudCompare].....	46
Obr. 39: Vlastnosti modelu po redukcí rozestupu bodů [software CloudCompare].....	46
Obr. 40: Funkce Subsample a point cloud [software CloudCompare].....	46
Obr. 41: Porovnání mračen v softwaru CloudCompare [software CloudCompare].....	47
Obr. 42: Funkce Align two clouds a rozdíly [software CloudCompare].....	48
Obr. 43: Střední kvadratická odchylka výsledku [software CloudCompare].....	48
Obr. 44: Mračno bodů v softwaru ReCap [software Autodesk ReCap].....	49
Obr. 45: Hladiny před úpravou [software Autodesk Revit].....	49
Obr. 46: Hladiny po úpravě [software Autodesk Revit].....	49
Obr. 47: Vykreslení stěn a podlahy [software Autodesk Revit].....	50
Obr. 48: Vykreslení stěn a podlahy [software Autodesk Revit].....	50
Obr. 49: Rozměr dveří [software Autodesk ReCap].....	50
Obr. 50: Model synagogy [software Autodesk Revit].....	51
Obr. 51: Prostředí UE4 [software UE4].....	52
Obr. 52: Prostředí UE4 [software UE4].....	52
Obr. 53: Konfigurace importu [software UE4].....	53
Obr. 54: Importovaný model s texturou [software UE4].....	54
Obr. 55: Stažené položky [software Quixel Bridge].....	55
Obr. 56: Modelace okolí [software UE4].....	55
Obr. 57: Export souboru EXE pro VR aplikaci [software UE4].....	56
Tab. 1: Rozdělení LS podle typu měření, jejich přesnosti a dosahu [3].....	14
Tab. 2: Výsledky měření suterénu zvolenými přístroji.....	36



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Přiložený USB flash disk obsahuje elektronické přílohy:

DP\_Fogl.pdf - text diplomové práce

VR\_BniSbih\_DP – složka obsahující aplikaci UE4