

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Gabršček, T., 2015. Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Kosmatin-Fras, M., somentorja Urbančič, T., Lazar, A.): 49 str.

Datum arhiviranja: 20-07-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Gabršček, T., 2015. Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kosmatin-Fras, M., co-supervisors Urbančič, T., Lazar, A.): 49 p.

Archiving Date: 20-07-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GEODEZIJA
SMER GEODEZIJA

Kandidatka:

TJAŠA GABRŠČEK

**ANALIZA GEOMETRIJE OBJEKTA KULTURNE
DEDIŠČINE IZ PODATKOV TERESTRIČNEGA
LASERSKEGA SKENIRANJA**

Diplomska naloga št.: 979/G

**ANALYSIS OF THE GEOMETRY OF THE CULTURAL
HERITAGE OBJECT FROM THE TERRESTRIAL
LASER SCANNING DATA**

Graduation thesis No.: 979/G

Mentorica:

doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Predsednik komisije:

prof. dr. Bojan Stopar

Somentor:

asist. Tilen Urbančič

Ljubljana, 30. 06. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana TJAŠA GABRŠČEK izjavljam, da sem avtorica seminarske naloge z naslovom:
»ANALIZA GEOMETRIJE OBJEKTA KULTURNE DEDIŠČINE IZ PODATKOV
TERESTRIČNEGA LASERSKEGA SKENIRANJA«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, junij 2015

Tjaša Gabršček

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.7(497.4)(043.2)
Avtor:	Tjaša Gabršček
Mentor:	doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
Somentorja:	asist. Tilen Urbančič, univ.dipl.inž. geod., Aleš Lazar, univ.dipl.inž. geod.
Naslov:	Analiza geometrije objekta kulturne dediščine iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	49 str., 16 pregl., 45 sl.
Ključne besede:	Terestrično lasersko skeniranje, kulturna dediščina, Geomagic, nevertikalnost zvonika, Črni kal

Izvleček

Na izbranem primeru (zvonik cerkve na Črnem Kalu) smo izvedli analizo podatkov terestričnega laserskega skeniranja z namenom, da se grafično in numerično določi nevertikalnost in morebitne druge deformacije zvonika. Podatke snemanja s terestričnim laserskim skenerjem nam je posredovalo podjetje 3D ATA d.o.o. Analizo podatkov smo opravili s pomočjo programske opreme Geomagic, za izrise tlorisnih pogledov pa smo uporabili program AutoCAD. Oblak točk smo uvozili v program Geomagic Studio, ki smo ga uporabili za nadaljnje analize. Geometrijo zvonika smo analizirali na štiri načine: izračunali smo nagibe med ravninami zunanjih sten zvonika; določili smo kot nagiba od vertikale (glede na povezavo centra jabolka in središča spodnje ravnine ter kote nagiba od vertikale po višinskih nivojih); določili smo horizontalne ravnine po višinskih nivojih (skupno 14 nivojev) in primerjali tlorisne prikaze vogalnih točk; iskali smo prileganje točk zvonika različnim geometrijskim oblikam. V prvi analizi smo ugotovili, da se zvonik v različnih smereh različno nagiba. V drugi analizi smo ugotovili, da znaša kot nagiba od vertikale zvonika $2^{\circ}52'51''$ (glede na povezavo centra jabolka in središča spodnje ravnine) oziroma, da je skupni kot nagiba od vertikale (glede na višinske nivoje) $2^{\circ}53'02''$. V tretji analizi smo ugotovili, da vogalne točke zvonika izbranih horizontalnih ravnin glede na tlorisno projekcijo ne prikažejo zamika, razlog pa je v različnih dolžinah stranic zvonika. V četrti analizi smo iskali prileganja točk zvonika valju in stožcu/prisekanemu stožcu. Med sabo smo primerjali usmerjenost teles in normale ravnin z računanjem 2D razdalj. Ugotovili smo, da so odstopanja na celotni višini zvonika pri vseh telesih velika.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.7(497.4)(043.2)
Author: Tjaša Gabršček
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Kosmatin Fras, Ph.D.
Co-advisor: Assist. Tilen Urbančič, B.Sc., Aleš Lazar, B.Sc.
Title: Analysis of the geometry of the cultural heritage object from the terrestrial laser scanning data
Document Type: Graduation thesis - university studies
Notes: 49 p., 16 tab., 45 fig.
Key words: Terrestrial laser scanning, cultural heritage, Geomagic, nonverticality of belfry, Črni kal

Abstract

On the selected case (the belfry in village Črni kal, Slovenia) the analysis of data about terrestrial laser scanning with a view to graphically and numerically determined nonverticality and other possible deformations of the belfry is carried out. Data acquired with a terrestrial laser scanner has been provided by 3D ATA Ltd. Data analysis was conducted with a program Geomagic, and a program AutoCAD has been used to draw horizontal planes. The point cloud was imported into the program Geomagic Studio which was used for further analyzes. We carried out four methods of determination the geometry of the belfry: we determined the parameters of planes outer walls of the belfry; we determined the angle of inclination from the vertical (according to the line between the center of the apple and the center of the lower plane and the angle of inclination from the vertical line to elevation levels); we determined the horizontal planes at elevation levels (together 14 levels) and compare plan views of the corner points; we searched the fit of the belfry to different geometric shapes. In the first analysis we have found that the belfry inclines differently in different directions. In second analysis we have found that the angle of inclination from the vertical line of the belfry is $2^{\circ}52'51''$ (according to the line between the center of the apple and the center of the lower plane) and overall angle of inclination from the vertical line is $2^{\circ}52'51''$ (according to elevation levels). In the third analysis we have found that the corner points of the belfry of the selected horizontal planes according to plan view do not show displacement, the reason is in different lengths of the sides of the belfry. In fourth analysis we have searched the fit of the points of the belfry to cylinder and cone/truncated cone. We compared the orientation of shapes and normal of the planes with computed 2D distances. We have found that the deviations are great on the total height of the belfry on each shape.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Hvala mentorici doc.dr. Mojci Kosmatin Fras za vso pomoč in razumevanje.

Iskrena hvala somentorju Tilnu Urbančiču univ.dipl.inž. geod., ki me je usmerjal skozi nastajanje diplomske naloge. Hvala za vse nasvete in ideje.

Zahvaljujem se podjetju 3D ATA d.o.o., ki mi je zagotovilo podatke za izdelavo diplomske naloge ter somentorju Alešu Lazarju univ.dipl.inž. geod. za vso pomoč.

Velika zahvala gre moji družini za vse spodbude skozi vsa študijska leta.

Matej, hvala za podporo.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	VI
BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VIII
ZAHVALA	X
1 UVOD	1
1.1 Motiv	1
1.2 Namen in cilji	1
1.3 Pregled sorodnih del	2
1.4 Struktura naloge	3
2 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE	4
2.1 Tehnologija laserskega skeniranja	5
2.1 Vrste laserskih skenerjev	6
2.3 Uporaba laserskega skeniranja	8
3 ZAJEM PODATKOV	9
3.1 Opis obravnavanega objekta	9
3.2 Uporabljeni podatki in programska oprema	11
3.2.1 Podatki	11
3.2.2 Programska oprema	12
3.2.3 Lastnosti programskega orodja	13
3.3 Izvedba meritev	14
3.3.1 Opis instrumenta	16
4 OBDELAVA PODATKOV, REZULTATI IN NJIHOVA ANALIZA	19
4.1 Metodologija	19
4.2 Priprava podatkov v programu Geomagic	20
4.3 Določitev geometrijskih lastnosti zvonika	22
4.3.1 Določitev parametrov ravnin zunanjih sten zvonika	22
4.3.2 Določitev kota nagiba od vertikale	28
4.3.2.1 Določitev kota nagiba od vertikale s povezavo centra jabolka in središčem spodnje ravnine	28
4.3.2.2 Določitev kota nagiba od vertikale po višinskih nivojih	32
4.3.4 Določitev horizontalnih ravnin po višinskih nivojih	35
4.3.5 Iskanje prileganja zvonika različnim geometrijskim oblikam	41
5 ZAKLJUČEK	46
VIRI	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Lastnosti laserskega skenerja Leica Scanstation C10 (Leica Geosystems, 2015).....	17
Preglednica 2: Lastnosti vertikalnih ravnin posameznih sten.....	25
Preglednica 3: Splošne enačbe ravnin	26
Preglednica 4: Koti nagibov med ravninami prve vertikalne stene	27
Preglednica 5: Koti nagibov med ravninami druge vertikalne stene	27
Preglednica 6: Koti nagibov med ravninami tretje vertikalne stene	27
Preglednica 7: Koti nagibov med ravninami četrte vertikalne stene	28
Preglednica 8: Koordinate centra jabolka in spodnje ravnine	31
Preglednica 9: Razdalje med koordinatami podanih točk	31
Preglednica 10: Lastnosti ravnin	33
Preglednica 11: Koordinate središčnih točk višinskih nivojev	33
Preglednica 12: Meritve med koordinatami središčnih točk	34
Preglednica 13: Koti nagibov višinskih nivojev	34
Preglednica 14: Dolžine stranic na višinskih nivojih za prvo steno	39
Preglednica 15: Lastnosti geometrijskih teles	43
Preglednica 16: Usmerjenost teles in normale ravnin	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Terestrično lasersko skeniranje (Lasersko skeniranje, 2015)	4
Slika 2: Koordinatni sistem laserskega skenerja (Urbančič, Grigillo, 2015)	5
Slika 3: Registracija oblakov točk (Reshetyuk, 2009)	6
Slika 4: Terestrično lasersko skeniranje objekta kulturne dediščine (3D ATA d.o.o., 2015)	8
Slika 5: Izpis iz registra nepremične kulturne dediščine (RKD, 2015)	9
Slika 6: Zvonik cerkve sv. Valentina v Črnem kalu	11
Slika 7: Zgornji del zvonika v Črnem kalu	11
Slika 8: Jeklenica vpeta na zvonik	11
Slika 9: Logotip podjetja 3D ATA d.o.o.	12
Slika 10: Logotip podjetja 3D Systems Inc.	12
Slika 11: Skica stojšč na terenu	15
Slika 12: Celoten zajet oblak točk, prikazan v programu Geomagic Studio	15
Slika 13: Lokalni koordinatni sistem zvonika	16
Slika 14: Laserski skener Leica Scanstation C10 (Leica Geosystems, 2015)	16
Slika 15: Okrogla 6" tarča (levo) in kvadratna 3" x 3" tarča (Leica Geosystems, 2015)	17
Slika 16: Shematični prikaz poteka obdelave podatkov	19
Slika 17: Del izpisa podatkov iz osnovne datoteke *.txt	20
Slika 18: Traverze nad temeljem zvonika	21
Slika 19: Oblak točk obravnavanega objekta	21
Slika 20: Posamezna stena zvonika	22
Slika 21: Izbrano območje za prileganje ravnine	23
Slika 22: Vertikalne ravnine na posamezni steni	24
Slika 23: Oznake ravnin	24
Slika 24: Skica za izračun kota nagiba med ravninami	27
Slika 25: Jabolko na vrhu zvonika	29
Slika 26: Izpis parametrov jabolka iz programa RiSCAN PRO	29
Slika 27: Točka centra krogle jabolka	30
Slika 28: Središčna točka spodnje ravnine	30
Slika 29: Meritev 3D razdalje med točkama	31
Slika 30: Skica pravokotnega trikotnika	32
Slika 31: Ravnine po višinskih nivojih	33
Slika 32: Središčne točke na višinskih nivojih	33
Slika 33: Shema postavitve horizontalnih ravnin na posameznem višinskem nivoju	35
Slika 34: Horizontalne ravnine na enem nivoju	35

Slika 35: Horizontalne ravnine na objektu	36
Slika 36: Premice in vogalne točke	36
Slika 37: Stranski pogled celotnega zvonika z obarvanimi ravninami	37
Slika 38: Tlorisni pogled celotnega zvonika s horizontalnimi ravninami	38
Slika 39: Približan zgornji levi vogal	39
Slika 40: Tlorisni pogled prvega nivoja	40
Slika 41: Približana zgornja leva vogalna točka prvega nivoja.....	41
Slika 42: Območje točk za obdelavo	42
Slika 43: Izrezano območje v programu Geomagic	42
Slika 44: Valj (levo) in stožec (desno) na zgornjem delu zvonika	42
Slika 45: Valj (levo) in prisekan stožec (desno) na spodnjem delu zvonika	43

OKRAJŠAVE

UAV angl. Unmanned aerial vehicle, sl. daljinsko vodeno letalo

3D Tridimenzionalen (npr. prostor)

CPU angl. Central processing unit, sl. centralna procesna enota

FOW angl. Field of view, sl. vidno polje

CAD angl. Computer-aided design, sl. računalniško podprto načrtovanje

CAM angl. Computer-aided manufacturing, sl. računalniško podprta proizvodnja

1 UVOD

V diplomski nalogi obravnavamo primer objekta nepremične kulturne dediščine, zajetega z metodo terestričnega laserskega skeniranja. Predstavljena je analiza geometrije objekta, ki jo bomo izvedli s pomočjo programske opreme Geomagic. Osredotočili se bomo na ugotavljanje nagibov in lomov objekta po posameznih nivojih. Vse to bomo določali na osnovi primerjav različnih parametrov, ki jih bomo izračunali iz enostavnih geometrijskih oblik iz oblaka posnetih točk.

1.1 Motiv

Lasersko skeniranje je tehnologija, ki v stroki spada med novejšo metodo opazovanja. Tema diplomske naloge je za nas izziv, saj se tehnologija laserskega skeniranja, kot tudi sama obdelava zajetih podatkov še precej razvija in je še veliko stvari, ki se jih lahko naučimo.

Obravnavani objekt je bil posnet s tehnologijo terestričnega laserskega skeniranja. Podatke za obdelavo nam je priskrbelo podjetje 3D ATA d.o.o., ki je opravilo terenski zajem podatkov z instrumentom Leica Scanstation C10.

1.2 Namen in cilji

Za obravnavo je bil izbran objekt nepremične kulturne dediščine in sicer zvonik cerkve sv. Valentina v Črnem Kalu. Posebnost objekta je v tem, da se je že takoj po postavitvi začel nagibati in naj bi bil danes nagnjen že za približno en meter, kot navaja Premrl (Premrl, 2012, str. 133). Zato velja za pravo posebnost v tem kraju.

V diplomski nalogi nas je zanimalo, v katero smer in za koliko se je objekt nagnil. Na osnovi različnih načinov ugotavljanja kota nagiba od vertikale smo analizirali sedanjo geometrijo objekta.

Glavni cilji diplomske naloge so:

- določitev parametrov ravnin zunanjih sten zvonika,
- določitev kota nagiba od vertikale glede na povezavo centra jabolka in središčem spodnje ravnine,

- določitev kota nagiba od vertikale po višinskih nivojih,
- določitev horizontalnih ravnin po višinskih nivojih,
- iskanje prileganja zvonika različnim geometrijskim oblikam.

Analizo geometrije objekta smo izvajali v programski opremi Geomagic podjetja 3D Systems Inc. Za izbrano programsko opremo smo se odločili, ker med stroko velja za kvalitetno in dobro poznano ter odprto za nadaljnji razvoj. V nekaterih diplomskih nalogah je bila ta programska oprema že uporabljena in tudi podrobno opisano njeno celostno delovanje (Kastelic, 2010). Mi se bomo osredotočili na uporabo programa za namene analize geometrije obravnavanega objekta v začetni točkovni fazi. Nekatere rezultate smo vzporedno preverili tudi v programu RiSCAN PRO.

1.3 Pregled sorodnih del

O sami tehnologiji terestričnega laserskega skeniranja je bilo že veliko napisanega v literaturi, člankih, diplomskih nalogah. Predstavitev tehnologije terestričnega laserskega skeniranja, delovanje in razdelitev laserskih skenerjev ter njihova uporaba so opisani v članku Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje avtorja Mozetiča (Mozetič, 2004). Najprej se avtor osredotoči na podrobno predstavitev laserskih skenerjev, kjer opiše načine delovanja ter vrste skenerjev. V nadaljevanju predstavi osnovne elemente laserskih skenerjev, kot so natančnost, hitrost skeniranja, ločljivost. Dotakne se tudi problemov, ki se pojavljajo pri skeniranju različnih površin. Na koncu poda različna področja uporabe te tehnologije.

Uporaba tehnologije laserskega skeniranja na področju kulturne dediščine je v zadnjem času v velikem porastu, saj je na terenu veliko objektov, ki propadajo. Iščejo se vedno novi načini zajemanja podatkov, da ne bi s samim zajemom še bolj poškodovali objektov. Primer zajema podatkov s tehnologijo terestričnega laserskega skeniranja v kulturni dediščini je opisan tudi v diplomski nalogi z naslovom Uporaba laserskega skeniranja za evidentiranje kulturne dediščine na primeru gradu Kalc avtorja Tomšiča (Tomšič, 2011). Avtor opiše postopek od ogleda terena, postavitve stojišč, zajema do celotnega postopka obdelave zajetih podatkov v programski opremi.

Diplomska naloga, ki podrobneje opisuje tudi sam prikaz poškodb na skeniranem objektu kulturne dediščine je naloga avtorja Šašić Kežulja (Šašić Kežul, 2014). Praktični del naloge je opravljen v dveh različnih programskih opremah – Revit Architecture in Geomagic Studio.

V programu Revit Architecture so opisani osnovni postopki dela z oblakom točk, v programu Geomagic Studio pa predvsem postopki obdelave oblaka točk za prikaz poškodb na fasadi objekta.

Programska oprema Geomagic, ki smo jo uporabljali za praktični del naše diplomske naloge, je podrobno predstavljena v diplomski nalogi avtorice Kastelic (Kastelic, 2010). Opisani so osnovni podatki o programu, funkcije, ki se uporabljajo pri obdelavi posnetega oblaka točk. Predstavljene so vse faze v obdelavi oblaka točk od točkovne do oblikovne faze. Na koncu avtorica primerja uporabljeno programsko opremo z drugimi programi na tržišču. Tudi ta naloga je obravnavala zajem objekta kulturne dediščine s terestričnim laserskim skeniranjem.

V Evropi je kar nekaj primerov zvonikov ali stolpov, ki so nagnjeni. Najbolj znani so poševni stolp v Pisi, poševni stolp v Suurhusnu, zvonik sv. Martina v Benetkah ter zvonik cerkve sv. Walfrida v kraju Bedum na Nizozemskem (Wikipedia, 2015). Nebotičnik 'Capital Gate' v Abu Dabiju pa velja za najbolj nagnjen objekt, ki so ga zgradili pod določenim kotom. Pri višini 160 metrov je nagnjen za 18 stopinj, kar je več kot štirikrat več kot stolp v Suurhusnu v Nemčiji, ki je pri višini 27,37 metrov nagnjen za 2,47 metra (Wikipedia, 2015).

Na primeru poševnega stolpa v Pisi so znanstveniki iz avstralske državne znanstvene agencije CSIRO izvedli meritve z ročnim laserskim skenerjem, ki so ga razvili. Premikali so se okoli in znotraj objekta, hkrati pa so se opravljale meritve oziroma skeniranje. Za celotno skeniranje so potrebovali 20 minut. Podatke so nato obdelali in ustvarili 3D model poševnega stolpa (Skeniranje poševnega stolpa v Pisi, 2013).

1.4 Struktura naloge

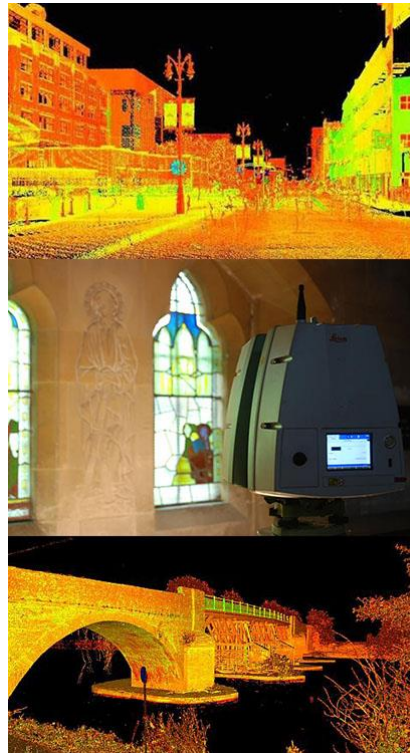
V uvodnem poglavju diplomske naloge so navedeni osnovni podatki o nalogi. Opisani so motiv, namen, glavni cilji diplomske naloge ter pregled sorodnih del. Prikazana je struktura diplomskega dela. V drugem poglavju se na kratko ustavimo pri teoretičnem delu naloge. Predstavljeno je terestrično lasersko skeniranje in laserski skenerji ter njihova uporaba. Tretje poglavje je namenjeno predstavitvi zajema podatkov. Opisan je obravnavani objekt, uporabljena oprema za zajem podatkov ter programska oprema, ki smo jo uporabljali. Poglavje končamo z opisom izvedbe meritev in kratko predstavitvijo uporabljenega instrumentarija. V četrtem poglavju predstavimo obdelavo podatkov v izbrani programski opremi Geomagic. Shematsko prikazemo postopek obdelave podatkov, opišemo uvoz oblaka točk v program, v naslednjih podpoglavjih pa opišemo posamezne obdelave oblaka točk za potrebe analize, podamo rezultate obdelave podatkov ter svoje ugotovitve. V zadnjem poglavju povzamemo vsebino diplomske naloge. Na koncu diplomskega dela dodamo še uporabljene vire ter priloge.

2 TERESTRIČNO LASERSKO SKENIRANJE

Terestrično lasersko skeniranje (krajše TLS) je ena novejših metod geodetskih opazovanj, katere glavna prednost je, da v kratkem času pridobimo ogromno meritev, iz katerih lahko natančno predstavimo površino skeniranega objekta. Tako lahko v nekaj minutah pridobimo milijone točk, ki natančno in celovito predstavljajo skenirani objekt. Kot rezultat skeniranja in obdelave podatkov dobimo oblak točk (angl. point cloud). Lasersko skeniranje je tehnološko visoko učinkovita metoda zajema prostorskih podatkov zaradi hitrega, celovitega in brez-kontaktnega načina zajema (Kastelic, 2010).

3D lasersko skeniranje ima številne prednosti:

- zajem je brez-kontaktne,
- podatki, ki so zajeti, so natančni in popolni,
- hitrost zajema,
- možna je integracija z drugimi tehnologijami (video, fotografija,...),
- niso potrebni ponovni ogledi terena,
- varnost med zajemom podatkov je večja,
- zajeti oblak točk je lahko uporabljen večkrat za različne namene in
- instrument deluje tudi v popolni temi (Kastelic, 2010).



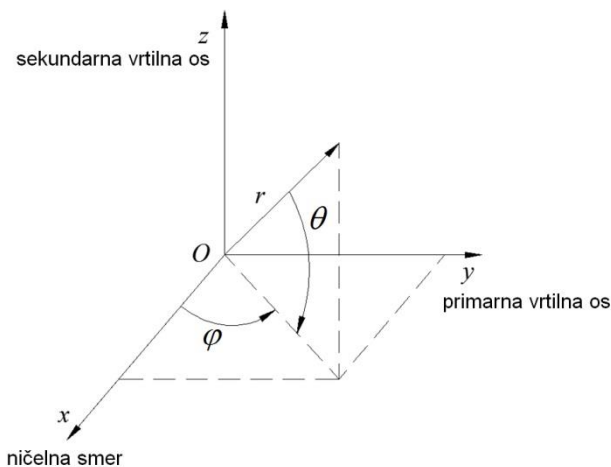
Slika 1: Terestrično lasersko skeniranje (Lasersko skeniranje, 2015)

2.1 Tehnologija laserskega skeniranja

Laserski skenerji omogočajo neposredno določitev trirazsežnega položaja posameznih točk v polarnem koordinatnem sistemu inštrumenta. Poleg dveh prostorskih kotov φ in θ se registrira še dolžina r (evklidska oziroma najkrajša razdalja) do posamezne objektne točke (Vežočanin in sod., 2008, Reshetyuk, 2009):

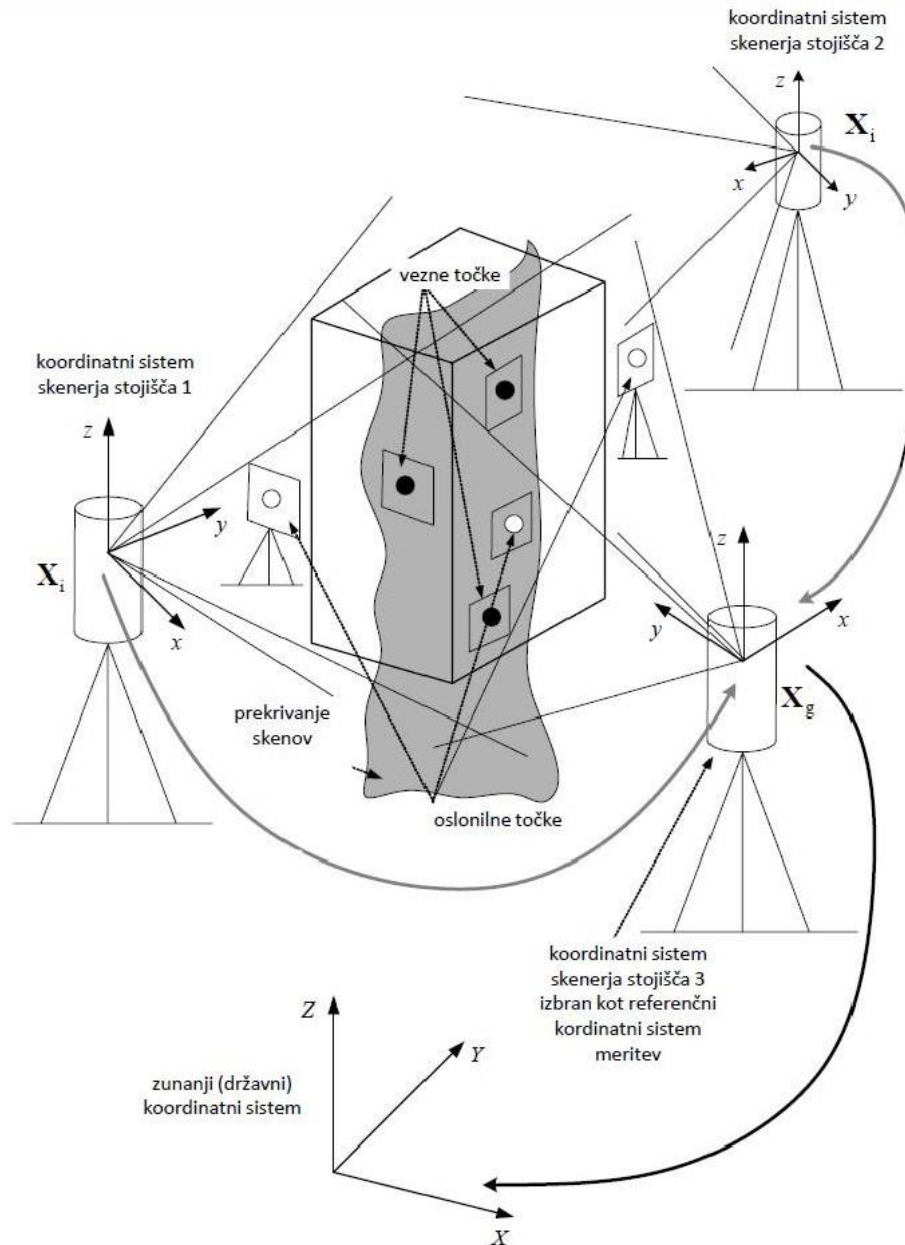
$$X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i \cdot \cos \varphi_i \cdot \sin \theta_i \\ r_i \cdot \sin \varphi_i \cdot \sin \theta_i \\ r_i \cdot \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

Osnovni pogoj za izvedbo trirazsežnega laserskega skeniranja brez posebnih odbojnih tarč je, da skenirane površine odbijajo lasersko svetlobo določene valovne dolžine. Površine iz različnih materialov različno odbijajo lasersko svetlobo (Mozetič, 2004). Če del površine ne omogoča odbijanja laserske svetlobe, nastane luknja – točke na površini niso izmerjene. Tako nastanejo območja, ki niso zajeta v oblaku točk.



Slika 2: Koordinatni sistem laserskega skenerja (Urbančič, Grigillo, 2015)

Vse točke v oblaku točk imajo pripadajoče prostorske koordinate (x, y, z) v skenerjevem koordinatnem sistemu z izhodiščem v skenerjevem centru. Večina objektov je zajeta iz različnih stojišč, zato je treba posamezne oblake točk združiti oziroma registrirati. Oblake združimo na podlagi najmanj treh identičnih veznih točk, označenih s posebnimi tarčami (Mozetič, 2004). Registracija (angl. registration) je transformacija več oblakov točk v enoten skenerjev koordinatni sistem.



Slika 3: Registracija oblakov točk (Reshetyuk, 2009)

Sledi še georeferenciranje, kar pomeni, da transformiramo oblake točk iz skenerjevega koordinatnega sistema v državni ali lokalni koordinatni sistem.

2.1 Vrste laserskih skenerjev

Poznamo različne vrste laserskih skenerjev. Ločimo jih glede na:

- merilni doseg skeniranja,
- način merjenja razdalje do posameznih točk,

- maksimalni in minimalni vertikalni/horizontalni kot,
- minimalno kotno ločljivost zajema,
- število meritev na enoto časa,
- divergenco laserskega žarka,
- valovno dolžino laserske svetlobe,
- natančnostjo izmere posamezne točke,
- dimenzije in težo laserskega skenerja
- dodatno opremo (Vezočnik in sod., 2008).

Glede na način merjenja razdalje do posameznih točk ločimo tri vrste laserskih skenerjev. Prva vrsta so impulzni laserski skenerji. Uporabljamo jih za skeniranje zunanjih objektov na razdalji 100 metrov ali več.

Osnovni princip merjenja z impulznimi razdaljemerji je od vseh načinov merjenja najenostavnejši. Temelji na direktnem merjenju časa, ki ga svetlobni impulz potrebuje, da prepotuje razdaljo od razdaljemera do reflektorja in nazaj. Svetlobni impulz zato, da dvakrat prepotuje merjeno pot, potrebuje čas Δt (Kogoj, 2005, str. 16,17.). Enačba dolžine poti je:

$$D = \frac{c\Delta t}{2}, \text{ kjer je } c - \text{ hitrost svetlobe}$$

Druga skupina so laserski skenerji, ki jih imenujemo fazni skenerji. Namenjeni so predvsem uporabi v zaprtih prostorih, saj je njihov merilni doseg maksimalno do 100 metrov.

Delovanje faznih razdaljemerov temelji na moduliranem elektromagnetnem valovanju. Modulacija je združitev dveh ali več valovanj iste vrste. Združujemo dve elektromagnetni valovanji, ki se lahko ujemata v fazi ali frekvenci ali pa imata oba elementa različna (Kogoj, 2005, str.24.). Združujemo lahko dve različni valovanji in sicer: nosilno ali mersko valovanje.

Tretja vrsta pa so triangulacijski laserski skenerji. Njihov merilni doseg je 10 metrov ali manj, zato jih uporabljamo za zajem bližnjih objektov.

Prednost teh skenerjev je v tem, da imajo veliko natančnost skeniranja. Uporabljajo jih predvsem v industriji, saj se tam zahtevajo zelo visoke natančnosti (pod milimetrom). Glavna razlika teh vrst skenerjev je, da ne uporabljata laserskega žarka za merjenje dolžine ampak za osvetljevanje snemane točke. Točko registrira CCD-kamera, dolžino pa izračunamo na podlagi pozicije laserskega žarka, kamere ter kotom pod katerim pada laserski žarek.

2.3 Uporaba laserskega skeniranja

Uporaba laserskega skeniranja je v zadnjih letih v velikem porastu, saj je metoda primerna za veliko različnih področji, kot so industrija, geodezija, kulturna dediščina, arhitektura, arheologija,... V naši diplomski nalogi se bomo osredotočili na uporabo te metode za namene snemanja objektov kulturne dediščine.

Terestrično lasersko skeniranje se na področju snemanja kulturne dediščine uporablja v primerih, ko je objekt na primer v zelo slabem stanju. Pri tem je zelo pomembna lastnost laserskega skeniranja ta, da je metoda brez-kontaktna. Metoda je zelo uporabna tudi v primerih, ko imamo opravka z različni spomeniki, arheološkimi najdišči ter velikimi objekti, ki niso enostavno dostopni.



Slika 4: Terestrično lasersko skeniranje objekta kulturne dediščine (3D ATA d.o.o., 2015)

3 ZAJEM PODATKOV

V tem poglavju je podrobno predstavljen objekt, ki smo ga v diplomski nalogi obravnavali. Predstavili smo podjetje in podatke, ki nam jih je posredovalo za izvedbo naloge ter uporabljeno programsko opremo. Na koncu poglavja je opisana izvedba meritev in uporabljen instrumentarij.

3.1 Opis obravnavanega objekta

Obravnavani objekt stoji v vasi Črni kal, ki leži ob regionalni cesti Ljubljana – Koper.

OPIS ENOTE NEPREMIČNE KULTURNE DEDIŠČINE	
IDENTIFIKACIJA ENOTE DEDIŠČINE	
Evidenčna številka enote:	1317
Ime enote:	Črni Kal - Cerkev sv. Valentina
OPIS ENOTE DEDIŠČINE	
Zvrst dediščine:	stavbe
Tip enote:	sakralna stavbna dediščina
Obseg enote:	objekt
Tipološka gesla enote:	podružnična cerkev, zvonik, sv. Valentin
Tekstualni opis enote:	Baročno oblikovana in v začetku 20. stol. predelana cerkev. Na stranskem portalu iz 1680 je relief sv. Lovrenca, delo Anžeta Felicijana, na slavoletu letnica 1706. Samostojen zvonik z rebastim zaključkom je bil zgrajen 1802 (Gian Battista Pozzoli).
Datacija enote:	tretja četrtina 17. stol., 1680, prva četrtina 18. stol., 1706, prva četrtina 19. stol., 1802, prva četrtina 20. stol., 1912
Avtor(ji):	Anže Felicijan st. (kamnosek; 1680), Anže Felicijan ml. (kamnosek; 1709), Gian Battista Pozzoli (kamnosek; 1802)
Varstvene usmeritve:	stavbe
LOKACIJA ENOTE DEDIŠČINE	
Naselje:	ČRNI KAL
Občina:	KOPER
Lokacija:	Cerkev stoji sredi vasi Črni Kal.
PRISTOJNOSTI	
Območna enota:	ZVKD Piran
RAZGLASITEV	
Vrsta spomenika	spomenik lokalnega pomena
Akt razglasitve:	Odlok o razglasitvi posameznih nepremičnih kulturnih in zgodovinskih spomenikov v občini Koper, Uradne objave (Primorske novice), št. 1/93-4, 18/93 (popravek), Ur.l. RS, št. 57/2005-2522, 66/2010-3678
Vrsta razglasitve:	stalna razglasitev do preklica
Veljavnost razglasitve:	3.2.1993 -

Register kulturne dediščine

Slika 5: Izpis iz registra nepremične kulturne dediščine (RKD, 2015)

Cerkev sv. Valentina stoji na zravnem zemljišču v rebri nad placom, osrednjim vaškim trgom, na nadmorski višini 230 metrov. Razmeroma velika stavba s samostojnim zvonikom je izrazita dominanta vasi. Zvonik stoji v črti obzidja, na razdalji nekaj manj kot štiri metre od cerkvenega pročelja (Premrl, 2012, str.45.). Leta 1993 je bila cerkev sv. Valentina razglašena za spomenik lokalnega pomena.

Zvonik cerkve je lokalno najbolj znan po rebrasti kupoli in svoji nagnjenosti.

Stoji na robu platoja nasproti cerkvenega pročelja. V steni, ki gleda proti cerkvi, ima vhod skozi polkrožno sklenjen portal. Na njegovem sklepnem kamnu je sklesan Jezusov monogram IHS, pod njim pa letnica 1802, ki priča, kdaj so ga zidali. Bakrena letnica 1997 na novih dvokrilnih vratih pa govori o zadnji obnovi zvonika (Premrl, 2012, str.54.). Pritličje in nadstropji so enako visoki – s klesanimi zidci vred dosegajo višino 4,23 do 4,26 metra (Premrl, 2012, str.55.).

O sami gradnji zvonika ni nikjer nič zapisano, vse se je ohranilo le na podlagi ustnega izročila. Graditi so ga začeli leta 1802 in ga končali v sedmih do osmih letih. Glavni zidarski mojster je bil Gian Battista Pozzoli, ki je bil znan po tem, da je gradil zvonike z odprto kupolo.

Kmalu po zgraditvi zvonika, naj bi se že začel nagibati. Leta 1948 so menda namerili 60 centimetrov nagiba, leta 1976 je bil ugotovljen nagib za 6 stopinj, leta 1993 pa je bilo na vrhu jabolka izmerjeno, da visi za 110 centimetrov proti Trstu in 20 centimetrov proti Kopru (Premrl, 2012, str.133.). Večkrat so vaščani hoteli zvonik izravnati, vendar za to ni bilo potrebnih sredstev. Leta 1990 narejena analiza zemljišča pod zvonikom je pokazala, da zvonik stoji na rjavem prepelem flišu in glini. Sklepali so, da se je zvonik posedel zaradi izpiranja prepelega fliša. Leta 1996 so se nato lotili sanacije zvonika. Zafugirali so razpoke v stenah pritličnega dela zvonika, potem pa po posebnem postopku vbrizgali v stene cementno maso z dodatkom injektina, da je zapolnila vse vrzeli v njih (Premrl, 2012, str.134.). Napeljali so tudi jeklenico, ki je vpeta v zvonik in v betonski blok na severni strani cerkve.



Slika 6: Zvonik cerkve sv. Valentina v Črnem kalu



Slika 7: Zgornji del zvonika v Črnem kalu



Slika 8: Jeklenica vpeta na zvonik

3.2 Uporabljeni podatki in programska oprema

3.2.1 Podatki

Podatke obravnavanega objekta nam je posredovalo podjetje 3D ATA d.o.o. iz Kranja (<http://3d-ata.com>), ki se ukvarja s 3D (tridimenzionalnim) tiskanjem, UAV (angl. unmanned aerial vehicle) tehnologijo, CRS (angl. close range scanning) skeniranjem in terestričnim laserskim skeniranjem. Vse te metode uporabljajo v različnih strokah kot so arheologija, industrija, arhitektura, gradbeništvo, geodezija ter geologija.

Prednost uporabe tehnologije 3D tiska je v hitrosti ter občutnem zmanjšanju stroškov izdelave prototipa. Na tak način so skenirali podobo človeka in jo nato še 3D tiskali.

UAV tehnologija omogoča zajem različnih vrst prostorskih podatkov iz zraka s pomočjo brezpilotnega letalnika in izdelavo tehnične dokumentacije, prostorske analize in 3D vizualizacije z uporabo fotogrametrije in UAV posnetkov. To tehniko so uporabili na primeru kamnoloma za volumetrijo in kartiranje samega kamnoloma.

CRS skeniranje uporabljajo predvsem za različne predmete kot so kipci, deli okostij, kovancev, delov kamnitih stebrov.

Produkti TLS tehnologije pa so ponavadi 2D načrti, 3D modeli, CAD (angl. computer-aided design) modeli, monitoring deformacij, izračun volumnov, obratno inženirstvo. Za 3D lasersko skeniranje uporabljajo najnaprednejši in moderni laserski skener – Leica Scanstation C10.



Slika 9: Logotip podjetja 3D ATA d.o.o.

3.2.2 Programska oprema

Za obdelavo podatkov in analizo geometrije obravnavnega objekta smo uporabljali programsko orodje Geomagic podjetja 3D Systems Inc. (<http://www.3dsystems.com>). Za preverjanje rezultatov posameznih analiz smo uporabljali še program RiSCAN PRO.

Podjetje 3D Systems Inc. se ukvarja s proizvodnjo 3D tiskalnikov, materialov za 3D tiskanje ter napredno programsko opremo za 3D modeliranje. Zelo pomembno področje uporabe njihovih izdelkov je medicina, kjer s svojimi izdelki, simulacijami in 3D tiskanjem medicinske opreme rešujejo tudi življenja. Podjetje ponuja celovite rešitve v 3D modeliranju – od zajema podatkov preko programske opreme za obdelavo do tiskanja objekta, saj razvija skenerje, programsko opremo ter 3D tiskalnike.



Slika 10: Logotip podjetja 3D Systems Inc.

Uporabljali smo dve različici programa Geomagic in sicer Geomagic Studio in Geomagic Qualify. V naslednjem podpoglavju ju bomo na kratko opisali.

3.2.2.1 Geomagic Studio

Program Geomagic Studio je orodje za transformacijo 3D skeniranih podatkov v površine visokih natančnosti, poligone in naravne CAD modele. Omogoča najboljše možnosti in funkcije za urejanje oblakov točk, urejanje mrež ter napredne ploskovne funkcije v aplikaciji, ki je enostavna za uporabo. Vsebuje veliko avtomatiziranih funkcij, ki skrajšajo čas obdelave in z njimi pridobimo kakovostne modele. Med drugim omogoča pretvorbo oblaka točk iz točkovne v poligonsko ter nato v oblikovno fazo.

3.2.2.2 Geomagic Qualify Probe

Program je danes poznan tudi pod imenom Geomagic Control. Je obsežen, robusten ter ponuja natančne rešitve 3D meroslovja. Program ponuja povezavo med CAD in CAM (angl. computer-aided manufacturing). Omogoča preračunavanje med 2D in 3D dimenzijami, razne analize ter avtomatsko izdelavo poročil.

3.2.3 Lastnosti programskega orodja

Operacijski sistemi

- Windows 7 (32 bit in 64 bit)
- Windows Vista SP1 (32 bit in 64 bit)
- Windows XP SP3 (32 bit in 64 bit)

Dodatne sistemske zahteve

- Windows .NET Framework 3.5 SP1 in .NET 4.0
- Microsoft Office 2010

Zaslon

- Ločljivost: 1280 x 1024 ali boljša
- Priporočena barvna globina: 24-bitna barva ali 32-bitna barva
- skladnost z Open GL 1.1

CPU (angl. central processing unit)

- Intel compatible 2 GHz ali boljše/priporočeno Dual ali Quad core 2 GHz CPUs

Spomin

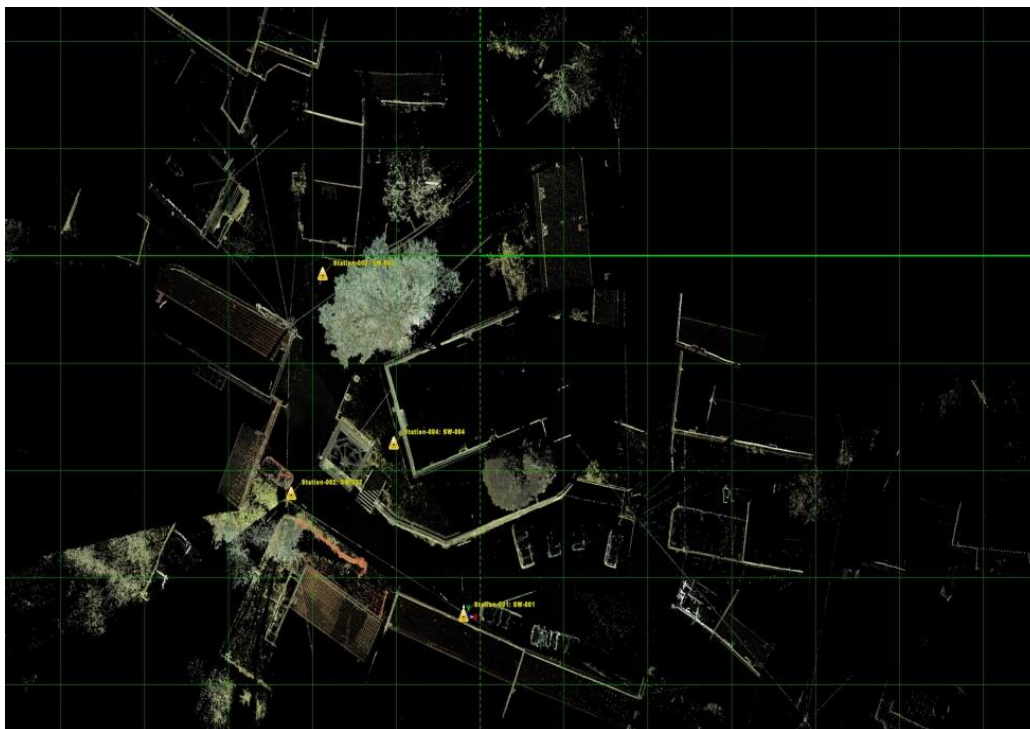
- 32-bitni sistemi: priporočeno najmanj 2 GB
- 64-bitni sistemi: priporočeno najmanj 8 GB

Prazen prostor na disku

- 10 GB ali več

3.3 Izvedba meritev

Kot smo že prej omenili, smo podatke za obdelavo pridobili od podjetja 3D ATA d.o.o. Podjetje je meritve na terenu izvajalo dne 13. 3. 2013 v vasi Črni kal. Posneto je bilo večje območje v bližnji okolici cerkve in obravnavanega zvonika. Posnetih je bilo 31.906.650 točk s štirih stojišč, ki so vidna na sliki 11. Na terenu so bile vzpostavljene tudi štiri tarče za združevanje skenogramov. Snemanje je bilo izvedeno z instrumentom Leica Scanstation C10. V nadaljevanju sledi kratek opis uporabljenega instrumenta.



Slika 11: Skica stojišč na terenu



Slika 12: Celoten zajet oblak točk, prikazan v programu Geomagic Studio

Pri zajemu oblaka točk je bil vzpostavljen lokalni koordinatni sistem viden na sliki 13. Za podlago prikaza je izbran posnetek ortofota (Geopedia, 2015) in nanj postavljen oblak točk iz programa Geomagic Studio.



Slika 13: Lokalni koordinatni sistem zvonika

3.3.1 Opis instrumenta

Uporabljen instrument Leica Scanstation C10 podjetja Leica ima v eni napravi združeno: skener, baterijo, kontrolno enoto z zaslonom na dotik, pomnilniško enoto in digitalno kamero. Laserski skener Scanstation C10 daje uporabniku prednost visoke natančnosti meritev, skeniranje visokega merilnega dosega ter skeniranje notranjosti. Novost je Smart X-Mirror™ ogledalo, ki se avtomatizirano vrti ali oscilira. S tem ogledalom pridobimo boljšo produktivnost.

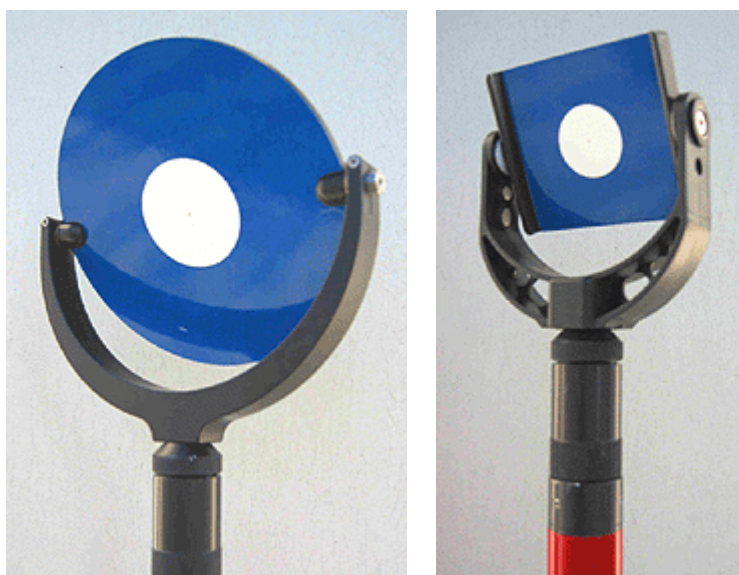


Slika 14: Laserski skener Leica Scanstation C10 (Leica Geosystems, 2015)

Preglednica 1: Lastnosti laserskega skenerja Leica Scanstation C10 (Leica Geosystems, 2015)

Vrsta skenerja	impulzni
Merilni doseg	300 m - 90% odbojnost, 134 m - 18% odbojnost, minimalni doseg 0,1 m
Hitrost skeniranja	do 50.000 točk na sekundo
Vidno polje (FOW angl. Field of view)	horizontalno 360° max, vertikalno 270° max, cilj brez paralakse, integriran zoom video
Optika skenerja	pokončno vrtljivo ogledalo na horizontalno vrtljivi bazi; Smart X-Mirror™
Pomnilniška enota	80 GB SSD trdi disk ali dodatna zunanja USB enota
Lasersko grezilo	natančnost centriranja: 1,5 mm na 1,5 m, premer laserske pike: 2,5 mm na 1,5 m, izbirno vklopljeno ali izklopljeno
Natančnost meritev	pozicija 6 mm, razdalja 4 mm, kot (horizontalni/vertikalni) 60 µrad (12")
Natančnost modelirane površine	2 mm

Pri meritvah so bile uporabljene HDS tarče in sicer Leica Geosystems HDS Tilt & Turn Targets. To so belo – modre tarče, ki obstajajo v dveh različicah: 3"x 3" kvadratna ali 6" okrogla tarča. Skenogrami med stojišči so v podjetju združevali – registrirali na podlagi skeniranja teh tarč. Registracijo so izvedli z licenčnim programom Cyclone.



Slika 15: Okrogla 6" tarča (levo) in kvadratna 3" x 3" tarča (Leica Geosystems, 2015)

Georeferenciranje v državni koordinatni sistem pri tem projektu ni bilo izvedeno, ker to ni bilo potrebno. V uporabljenem skenerju je vgrajen dvoosni kompenzator, kar pomeni, da je zagotovljena pravilna orientacija z-osi v lokalnem koordinatnem sistemu. To zagotavlja meritve v težnostnem polju Zemlje, kar bi lahko zagotovili tudi z določitvijo koordinat oslonilnih točk s kakšno drugo mersko tehniko.

4 OBDELAVA PODATKOV, REZULTATI IN NJIHOVA ANALIZA

V četrtem poglavju smo najprej predstavili metodologijo diplomske naloge, v nadaljevanju pa je predstavljena obdelava podatkov, rezultati ter njihova analiza.

4.1 Metodologija

Na sliki 16 je shematsko prikazan postopek obdelave podatkov. Prvi del sheme prikazuje postopek uvoza podatkov v program in urejanje oblaka točk, drugi del sheme pa prikazuje postopke analize oblaka točk izbranega objekta.



Slika 16: Shematični prikaz poteka obdelave podatkov

4.2 Priprava podatkov v programu Geomagic

Osnovna datoteka, ki smo jo pridobili od podjetja 3D ATA d.o.o., je bila v obliki *.txt. V njej so zapisane vse posnete točke in sicer ima vsaka točka zapis XYZ koordinat, RGB vrednosti ter intenziteto, kar je prikazano na sliki 17.

```
-1.5876,-0.6437,-1.719,147,133,86,-1270  
-1.587,-0.6435,-1.715,179,172,120,-1239  
-1.5892,-0.6444,-1.7139,141,144,97,-1221  
-1.5927,-0.6458,-1.7142,139,129,80,-1247  
-1.5949,-0.6467,-1.7131,165,160,105,-1193  
-1.5974,-0.6477,-1.7124,158,155,102,-1213  
-1.6012,-0.6492,-1.713,118,120,83,-1206  
-1.6096,-0.6526,-1.7186,87,75,51,-1224  
-1.613,-0.654,-1.7188,147,139,100,-1205  
-1.6131,-0.6541,-1.7154,109,105,60,-1213  
-1.6159,-0.6552,-1.715,136,121,80,-1177  
-1.6212,-0.6574,-1.7172,88,84,57,-1157  
-1.6213,-0.6574,-1.7138,74,68,34,-1268  
-1.6273,-0.6598,-1.7166,89,83,47,-1270  
-1.6341,-0.6626,-1.7205,97,91,55,-1298
```

Slika 17: Del izpisa podatkov iz osnovne datoteke *.txt

Datoteko smo uvozili v program tako, da smo iz datoteke zajeli vse podane lastnosti posnetih točk. Program ima možnost, da uvozimo toliko lastnosti točk, kot jih potrebujemo za posamezno obdelavo.

Iz celotnega oblaka posnetih točk smo odstranili točke, ki ne pripadajo obravnavanemu objektu, saj jih za nadaljnjo obdelavo ne bomo potrebovali. Brisali smo tudi moteče elemente na objektu, ki so bili zajeti - rastje, strelovodi, jeklenica. Za spodnjo izhodiščno linijo smo vzeli rob tik nad traverzami, ki so vidne na sliki 18.



Slika 18: Traverze nad temeljem zvonika

Postopek odstranjevanja točk smo v programu izvedli ročno, brez uporabe avtomatskih postopkov. Ostalo nam je 2.744.922 točk za obdelavo. Na sliki 19 je končna oblika oblaka točk, ki smo jo v nadaljnji analizi uporabljali.



Slika 19: Oblak točk obravnavanega objekta

4.3 Določitev geometrijskih lastnosti zvonika

V tem poglavju je predstavljena določitev geometrijskih lastnosti zvonika na podlagi izvedenih analiz. V podpoglavjih smo podali parametre vseh ravnin zunanjih sten zvonika, enačbe ravnin na vseh nivojih, rezultate meritev kotov nagiba od vertikale na razdalji centra jabolka in spodnje ravnine ter pregled kotov nagiba od vertikale po posameznih višinskih nivojih. Izrisali smo tlorise horizontalnih ravnin po višinskih nivojih, na koncu pa smo predstavili še iskanje prileganja zvonika različnim geometrijskim oblikam.

4.3.1 Določitev parametrov ravnin zunanjih sten zvonika

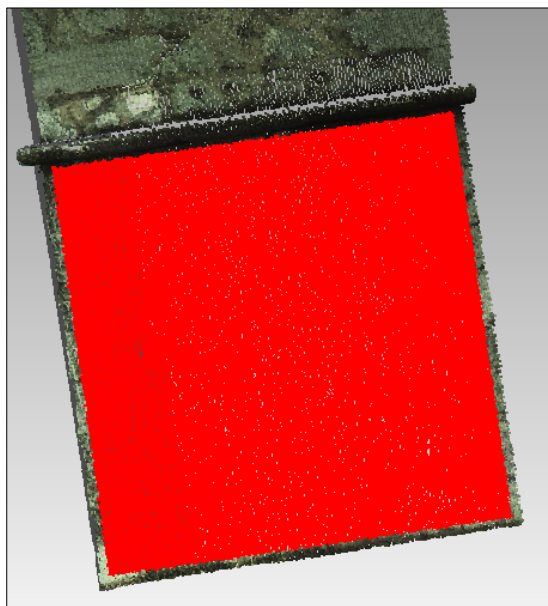
Za potrebe analize določitve parametrov zunanjih sten zvonika smo objekt razdelili na štiri vertikalne stene. Na sliki 20 je vidna ena izmed sten, ki smo jo vzeli za obravnavo. V tem poglavju smo navedli opise postopkov samo za eno steno, postopke pa smo izvedli tudi za ostale tri.



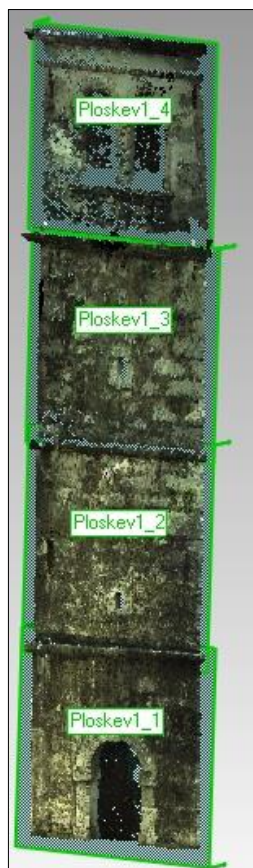
Slika 20: Posamezna stena zvonika

Posamezno steno smo razdelili na štiri višinske nivoje, ki smo jih ločili glede na zaobljene vmesne zidce.

Za vsako posamezno območje, kot je vidno na sliki 21, smo s pomočjo funkcije ('best fit plane') izdelali najbolj prilegajočo ravnino za posamezen višinski nivo. Vse ravnine na posamezni steni so vidne na sliki 22.

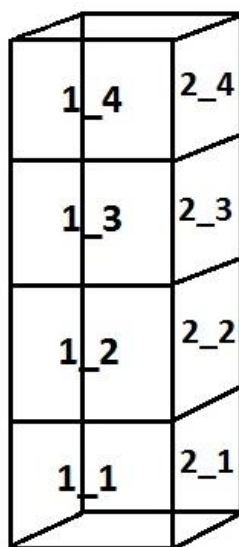


Slika 21: Izbrano območje za prileganje ravnine



Slika 22: Vertikalne ravnine na posamezni steni

Vsaka izmed 16 ravnin ima podane lastnosti, ki so prikazane v preglednici 2. Na sliki 23 so prikazane oznake posameznih ravnin.



Slika 23: Oznake ravnin

Preglednica 2: Lastnosti vertikalnih ravnin posameznih sten

RAVNINA	CENTER [m]	NORMALA	DOLŽINA [m]	ŠIRINA [m]	ŠTEVILO TOČK	STANDARDNA DEVIACIJA [m]
1_1	-3,8079 -2,4954 0,8560	0,2205 -0,9742 -0,0487	4,6502	4,6092	220920	0,1963
1_2	-3,7058 -2,7075 5,0034	-0,2211 0,9740 0,0495	4,7737	4,4427	147149	1,1582
1_3	-3,6662 -2,9273 9,2432	-0,2216 0,9739 0,0491	4,5114	4,4981	63954	0,9488
1_4	-3,5054 -3,1275 13,6225	0,2099 -0,9767 -0,0447	4,4378	4,3439	13079	1,3443
2_1	-5,3529 -4,8905 0,7731	0,9766 0,2147 -0,0143	4,8025	4,7391	85650	0,2037
2_2	-5,2273 -5,1363 4,8895	-0,9772 -0,2120 0,0087	4,8764	4,7422	65623	1,3790
2_3	-5,1278 -5,3161 9,1695	0,9765 0,2153 -0,0126	4,7869	4,7869	41562	0,8391
2_4	-5,0269 -5,5115 13,5838	-5,0269 -5,5115 13,5838	4,6330	4,4710	11483	1,0828
3_1	-2,9557 -6,4233 0,5991	-0,2177 0,9746 0,0524	4,7304	4,6044	304581	0,2357
3_2	-2,8195 -6,5992 4,7686	0,2185 -0,9745 -0,0521	4,8279	4,6730	187622	1,3126
3_3	-2,7930 -6,7721 9,0576	-0,2219 0,9737 0,0522	4,5960	4,5637	92843	0,5280
3_4	-2,6728 -6,9597 13,4200	0,2210 -0,9737 -0,0552	4,6040	4,4969	26726	6,0163
4_1	-1,4325 -4,0318 0,6657	-0,9760 -0,2174 0,0127	4,8214	4,6973	475339	0,0043
4_2	-1,3531 -4,2285 4,8108	-0,9756 -0,2191 0,0113	4,7901	4,7830	230949	1,7305
4_3	-1,2890 4,3813 9,1200	0,9775 0,2103 -0,0151	4,6672	4,6320	93830	1,5332
4_4	-1,1910 -4,5932 13,5034	0,9782 0,2069 -0,0169	4,6076	4,3770	20628	5,6895

Iz preglednice 2 lahko razberemo lastnosti vseh vertikalnih ravnin po posameznih stenah zvonika. Najdemo lahko povezavo med številom točk ravnine in vrednosti standardne deviacije. Več kot je zajetih točk, manjša je vrednost standardne deviacije in obratno. Pri ravnini z oznako 4_1 imamo zajetih 475.339 točk, vrednost standardne deviacije je 0,0043 m. Ravno nasprotno je pri ravnini z oznako 3_4, kjer je zajeti 26.726 točk, vrednost standardne deviacije pa je 6,0163 m. Vidimo lahko, da je v spodnjih dveh nivojih zvonika posnetih več točk, kot na zgornjih dveh nivojih. Na četrtem nivoju so odprtine na vseh štirih stenah, kar nam tudi zmanjša število možnih posnetih točk in posledično je gostota točk za obdelavo manjša. To tudi zmanjša kakovost obdelanih podatkov.

Vektorji v vektorski enačbi ravnine naj imajo komponente $\vec{n} = (a, b, c)$, $\vec{r} = (x, y, z)$ in $\vec{r}_A = (x_0, y_0, z_0)$. Splošna oblika enačbe ravnine z normalo \vec{n} je:

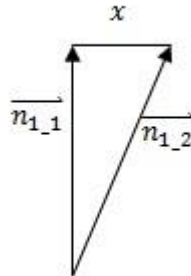
$$ax + by + cz - d = 0,$$

kjer je $d = \vec{r}_A \cdot \vec{n}$, pri čemer je A točka centra ravnine.

Preglednica 3: Splošne enačbe ravnin

RAVNINA	PARAMETRI SPLOŠNE ENAČBE RAVNINE			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1_1	0,2205	-0,9742	-0,0487	-1,5497
1_2	-0,2211	0,9740	0,0495	1,5701
1_3	-0,2216	0,9739	0,0491	1,5846
1_4	0,2099	-0,9767	-0,0447	-1,7099
2_1	0,9766	0,2147	-0,0143	6,2887
2_2	-0,9772	-0,2120	0,0087	-6,2396
2_3	0,9765	0,2153	-0,0126	6,2674
2_4	0,9763	0,2163	-0,0100	6,2357
3_1	-0,2177	0,9746	0,0524	5,5853
3_2	0,2185	-0,9745	-0,0521	-5,5664
3_3	-0,2219	0,9737	0,0522	5,5014
3_4	0,2210	-0,9737	-0,0552	-5,4452
4_1	-0,9760	-0,2174	0,0127	-2,2831
4_2	-0,9756	-0,2191	0,0113	-2,3009
4_3	0,9775	0,2103	-0,0151	2,3191
4_4	0,9782	0,2069	-0,0169	2,3436

Izračunali smo kote nagiba med posameznimi ravninami, da si bomo lažje predstavljali, za koliko in kje se zvonik nagiba. Pomagali smo si z osnovnim Pitagorovim izrekom in trigonometrično funkcijo sinus.



Slika 24: Skica za izračun kota nagiba med ravninami

Primerjali smo ravnine med sabo in tako dobili rezultate vidne v preglednicah 4-7, kjer je prva vrednost izražena v metrih, druga pa pretvorjena v stopinje. Podatki zapisani s črno barvo pomenijo, da je ravnina nagnjena navzven, rdeči podatki pa nam povedo, da je ravnina nagnjena navznoter.

Preglednica 4: Koti nagibov med ravninami prve vertikalne stene

RAVNINA	1_1	1_2	1_3	1_4	SKUPAJ
1_1		0,007 m / 0,389°	0,008 m / 0,440°	0,008 m / 0,439°	0,022 m / 1,268°
1_2			0,004 m / 0,206°	0,004 m / 0,202°	0,007 m / 0,408°
1_3				0,001 m / 0,037°	0,001 m / 0,037°
1_4					

Preglednica 5: Koti nagibov med ravninami druge vertikalne stene

RAVNINA	2_1	2_2	2_3	2_4	SKUPAJ
2_1		0,010 m / 0,597°	0,004 m / 0,236°	0,001 m / 0,050°	0,015 m / 0,883°
2_2			0,011 m / 0,642°	0,010 m / 0,595°	0,022 m / 1,237°
2_3				0,004 m / 0,241°	0,004 m / 0,241°
2_4					

Preglednica 6: Koti nagibov med ravninami tretje vertikalne stene

RAVNINA	3_1	3_2	3_3	3_4	SKUPAJ
3_1		0,011 m / 0,635°	0,009 m / 0,486°	0,002 m / 0,121°	0,022 m / 1,242°
3_2			0,007 m / 0,408°	0,011 m / 0,646°	0,018 m / 1,054°
3_3				0,009 m / 0,501°	0,009 m / 0,501°
3_4					

Preglednica 7: Koti nagibov med ravninami četrte vertikalne stene

RAVNINA	4_1	4_2	4_3	4_4	SKUPAJ
4_1		0,009 m / 0,487°	0,006 m / 0,361°	0,006 m / 0,322°	0,020 m / 1,170°
4_2			0,006 m / 0,327°	0,006 m / 0,365°	0,012 m / 0,692°
4_3				0,003 m / 0,163°	0,003 m / 0,163°
4_4					

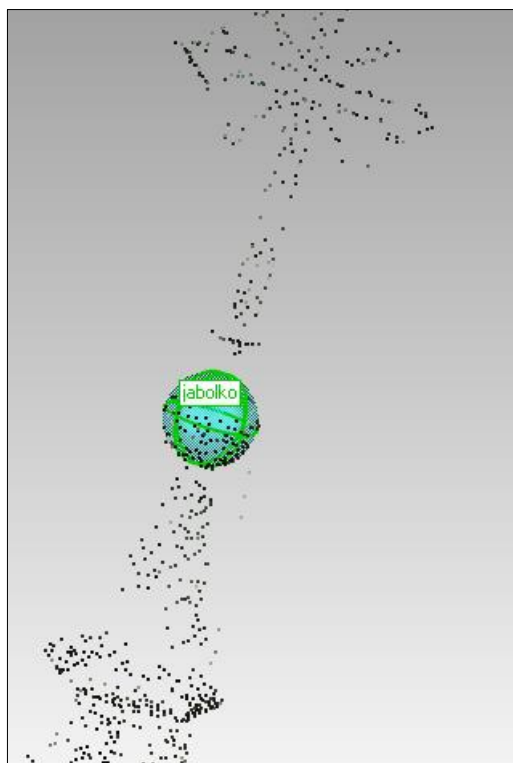
Po podatkih iz preglednic 4-7 vidimo, da se zvonik v različnih smereh različno nagiba. Prva stena se enakomerno nagiba navzven po celotni višini zvonika. Pri drugi steni je malo drugače. Najprej se spodaj nagne navzven, na tretjem nivoju pa se nagne navznoter. Tretja stena se nagiba navznoter, na vrhu pa se spet nagne navzven. Enakomerno nagibanje navzven spet opazimo pri četrti steni.

4.3.2 Določitev kota nagiba od vertikalne

Kot nagiba od vertikalne smo določili na dva načina. Pri prvem načinu smo povezali center bakrenega jabolka na vrhu zvonika in središčno točko izhodiščne ravnine na spodnjem robu zvonika. Pri drugem načinu pa smo določili središčne točke posameznih višinskih slojev in merili razdalje med njimi, da bi tako ugotovili kote nagibov od vertikalne.

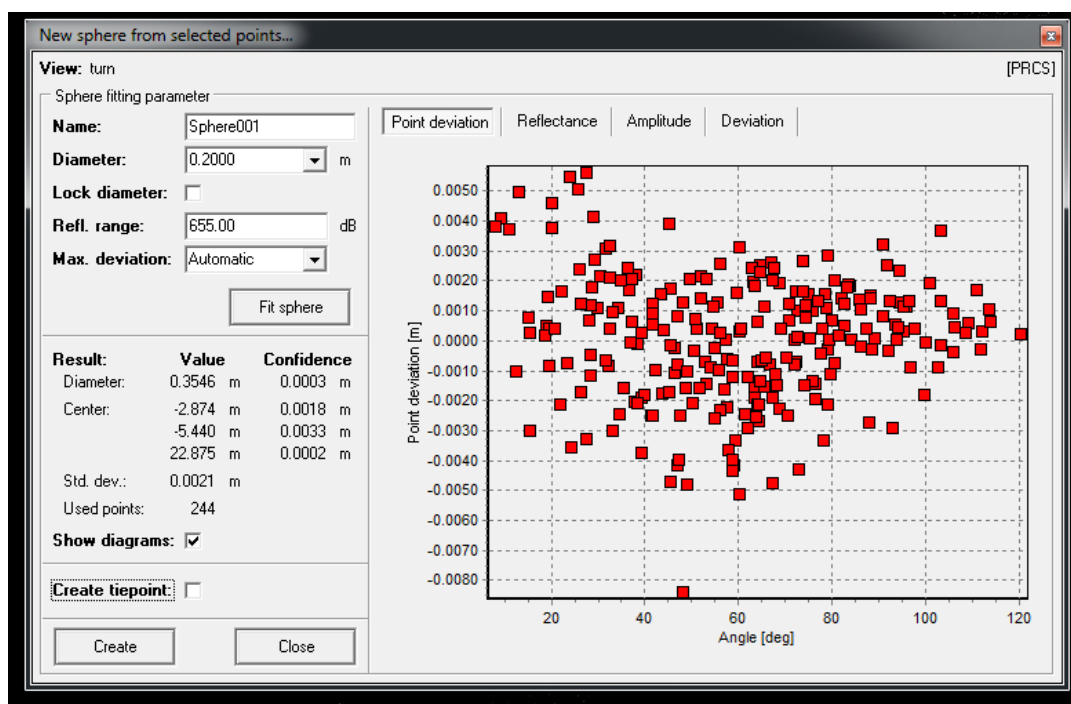
4.3.2.1 Določitev kota nagiba od vertikalne s povezavo centra jabolka in središčem spodnje ravnine

Najprej smo določili center bakrenega jabolka na vrhu zvonika. S pomočjo funkcije za izdelavo geometrijske oblike krogle in sicer z načinom najboljšega prileganja glede na izbrane točke oblaka točk ('sphere'~ 'best fit') smo izdelali kroglo, ki je vidna na sliki 25. Krogla se lepo prilaga posnetim točkam, saj je bilo točk na tem območju veliko. To nam pove podatek standardne deviacije, ki znaša 0,0021 m. Ta podatek je pomemben, saj to pomeni, da je center jabolka dobro določen.



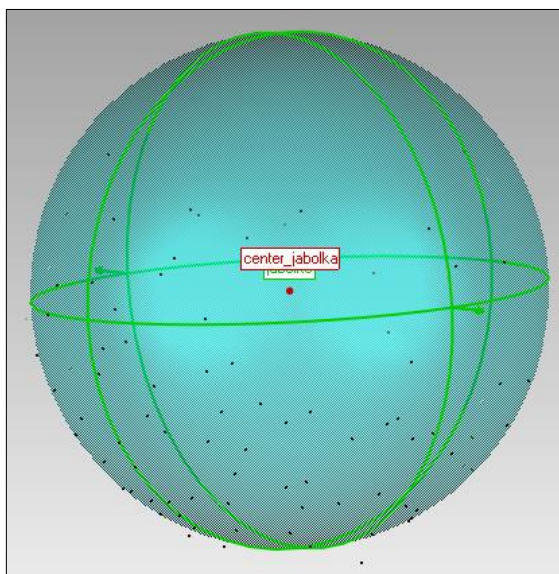
Slika 25: Jabolko na vrhu zvonika

Rezultate smo preverili v programu RiSCAN PRO. Lastnosti jabolka so vidne na sliki 26.



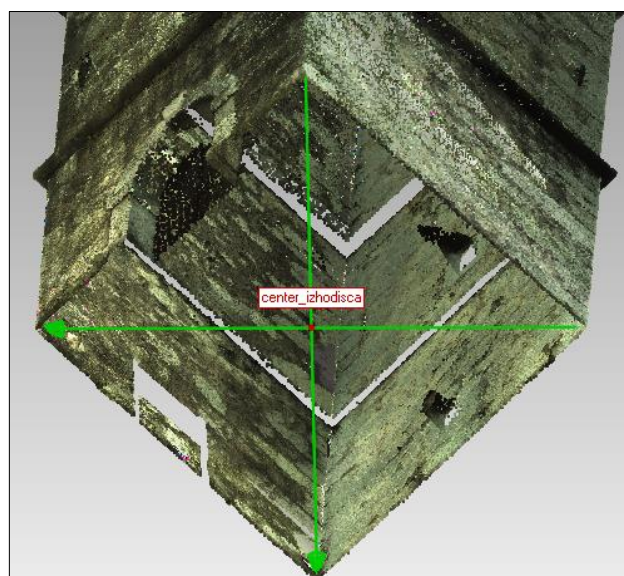
Slika 26: Izpis parametrov jabolka iz programa RiSCAN PRO

Center jabolka pa smo določili s pomočjo funkcije, ki določi središče geometrijskega telesa – v našem primeru krogle.



Slika 27: Točka centra krogle jabolka

Določili smo še središče spodnje ravnine. Iz spodnje ravnine smo najprej določili robove objekta, iz katerih smo nato določili dve diagonali. S funkcijo izrisa točke iz preseka dveh linij smo nato določili še središče spodnje ravnine, kar je vidno na sliki 28.



Slika 28: Središčna točka spodnje ravnine

Preglednica 8: Koordinate centra jabolka in spodnje ravnine

TOČKA	X [m]	Y [m]	Z [m]
JABOLKO	-2,8738	-5,4402	22,8746
SPODNJA RAVNINA	-3,4444	-4,3715	-1,1990

Za izračun oziroma meritev razdalje med centrom jabolka in spodnje ravnine smo uporabili program Geomagic Qualify Probe. Uporabili smo funkcijo za meritev razdalje med X in Y koordinatami podanih točk – preslikava na 2D ravnino. Dobili smo rezultat **1,211 metra**, kar pomeni, da je odmik na vrhu enak tej razdalji.

S funkcijo za meritev 3D razdalj smo izmerili razdaljo med podanima točkama in dobili rezultat **24,104 metra**, kar je vidno na sliki 29. Pri tem se meri vse tri koordinate podanih točk, kar je predstavljeno v preglednici 9.

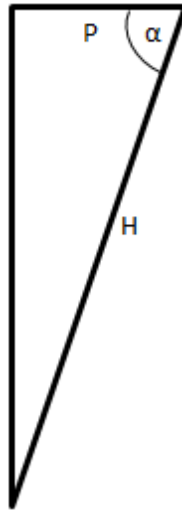
Preglednica 9: Razdalje med koordinatami podanih točk

	KOORDINATNA RAZLIKA [m]
ΔX	0,571
ΔY	1,069
ΔZ	24,074



Slika 29: Meritev 3D razdalje med točkama

Iz vseh izmerjenih podatkov smo izračunali kot nagiba od vertikale zvonika in sicer s pomočjo pravokotnega trikotnika in trigonometrične funkcije cosinus.



Slika 30: Skica pravokotnega trikotnika

Potek izračuna:

$$\cos \alpha = \frac{P}{H}$$

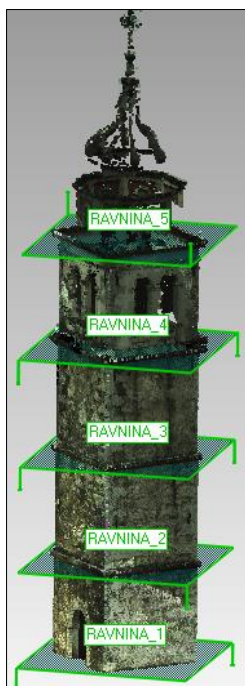
$$\alpha = \cos^{-1} \frac{P}{H}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{1,211}{24,104} = \mathbf{87^{\circ}07'09''}$$

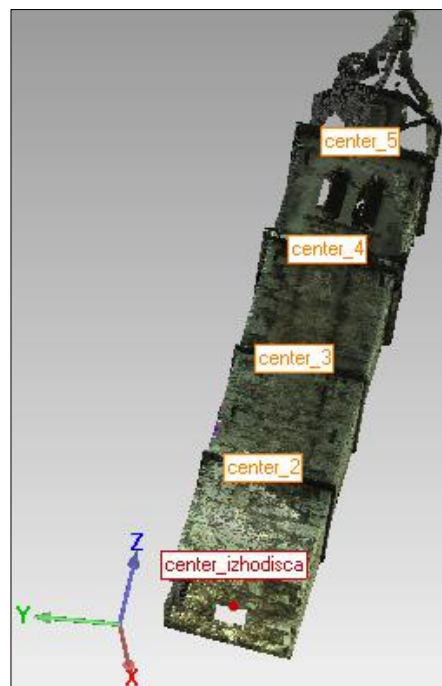
Kot nagiba je: $\beta = 90^{\circ} - \alpha = \mathbf{2^{\circ}52'51''}$

4.3.2.2 Določitev kota nagiba od vertikale po višinskih nivojih

V tem podglavju predstavimo določitev kota nagiba od vertikale zvonika glede na višinske nivoje. Ravnine po višinskih nivojih smo določili glede na vmesne klesane zidce in sicer smo jih postavili na spodnji rob zidca. Najprej smo določili ravnine za vsak posamezen višinski nivo, kot je prikazano na sliki 31. Iz teh ravnin smo izrazili robove objekta in nato s presečiščem diagonal določili središčne točke vseh ravnin na petih višinskih nivojih.



Slika 31: Ravnine po višinskih nivojih



Slika 32: Središčne točke na višinskih nivojih

Preglednica 10: Lastnosti ravnin

RAVNINA	NORMALA	DOLŽINA [m]	ŠIRINA [m]
1	-0,0275 0,0492 -0,9984	6,817	6,834
2	-0,0277 0,0488 -0,9984	6,833	6,787
3	-0,0209 0,0398 -0,9990	6,730	6,786
4	-0,0206 0,0459 -0,9987	6,910	6,940

Preglednica 11: Koordinate središčnih točk višinskih nivojev

TOČKA	X [m]	Y [m]	Z [m]
CENTER_2	-3,357	-4,562	2,620
CENTER_3	-3,265	-4,751	6,895
CENTER_4	-3,157	-4,956	11,197
CENTER_5	-3,048	-5,157	15,442

Tudi te meritve 2D ter 3D razdalj med koordinatami točk smo izvedli v programu Geomagic Qualify Probe in sicer med vsemi višinskimi nivoji. Rezultati 2D in 3D meritev so podani v preglednici 12.

Preglednica 12: Meritve med koordinatami središčnih točk

TOČKE	3D meritve			2D meritve [m]
	ΔX [m]	ΔY [m]	ΔZ [m]	
Med spodnjo ravnino in 2. nivojem	0,088	0,191	3,818	0,210
Med 2. in 3. nivojem	0,091	0,189	4,276	0,210
Med 3. in 4. nivojem	0,108	0,205	4,302	0,232
Med 4. in 5. nivojem	0,109	0,200	4,245	0,333
Med 5. nivojem in centrom jabolka	0,174	0,283	7,433	0,228

Izračun kotov nagiba od vertikale objekta po višinskih nivojih je potekal, kot pri razdalji med centrom jabolka in spodnje ravnine.

Preglednica 13: Koti nagibov višinskih nivojev

NIVO	P [m]	H [m]	α [° ' '']	KOT NAGIBA [° ' '']
spodnja ravnina – 2. nivo	0.210	3.824	86°51'18"	3°08'42"
2. nivo – 3. nivo	0.210	4.281	87°11'18"	2°48'42"
3. nivo – 4. nivo	0.232	4.308	86°54'46"	3°05'14"
4. nivo – 5. nivo	0.228	4.251	86°55'27"	3°04'33"
5. nivo – center jabolka	0.333	7.440	87°26'11"	2°33'49"
skupaj	1,213	24,104	87°06'58"	2°53'02"
spodnja ravnina - jabolko	1,211	24,104	87°07'09"	2°52'51"

Hipotenuza je višina posameznega nivoja, priležna stranica pa je odmik nivoja.

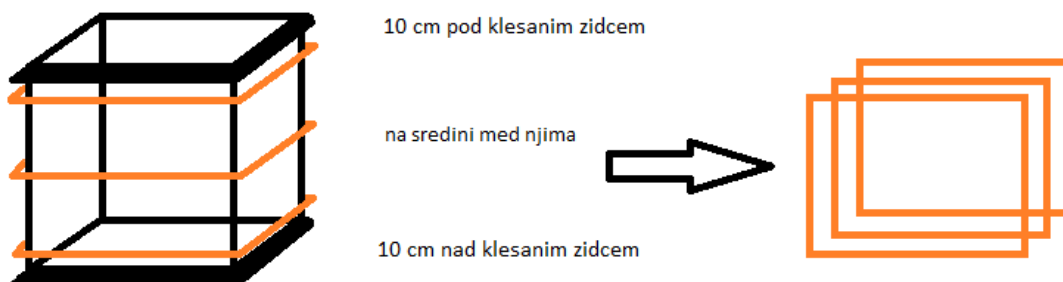
Po podatkih v preglednici 13 vidimo, da se zvonik ne nagiba enakomerno. Med drugimi in tretjim nivojem ter med petim nivojem in središčem jabolka se nagne manj kot drugje. Jeklenica je vpeta na vmesni klesani zidec med tretjim in četrtem nivojem, zato lahko mogoče sklepamo, da se zaradi vpetosti zvonik med tretjim in petim nivojem malenkostno bolj nagne navzven. Iz podatkov po posameznih nivojih se zvonik skupno nagne za 2°53'02", iz podatkov za celoten zvonik pa se nagne za 2°52'51". Izraženo v metrih je to 1,21 metra. Rezultat se malenkostno razlikuje zaradi tega, ker točke središč posameznih nivojev ne ležijo na isti premici, saj so nagibi

posameznih nivojev različni. Na podlagi različnih nagibov po višinskih nivojih lahko sklepamo o deformaciji geometrije zvonika.

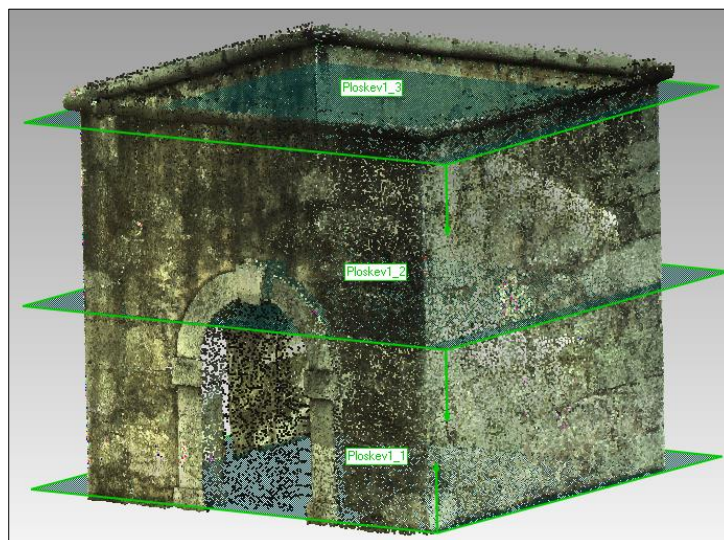
4.3.4 Določitev horizontalnih ravnin po višinskih nivojih

Za določitev geometrije zvonika s horizontalnimi ravninami po višinskih nivojih smo določili razporeditev ravnin, kakor nam prikazuje slika 33.

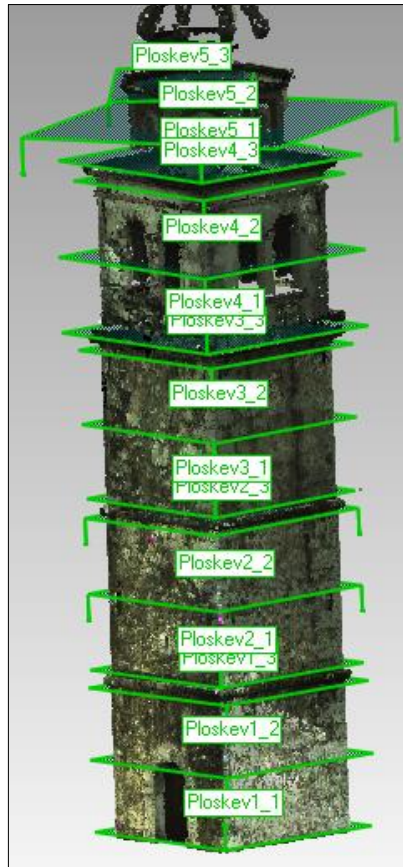
Najprej smo določili spodnjo in zgornjo ravnino s pomočjo funkcije, ki od obstoječe ravnine postavi novo ravnino na izbrani razdalji ('plane offset'). V našem primeru je bila ta razdalja 10 centimetrov. Nato pa smo še s funkcijo, ki postavi novo ravnino na podlagi povprečne vrednosti med dvema ravninama ('plane average'), izdelali tretjo, srednjo ravnino. Tako imamo za vsak višinski nivo izdelane tri horizontalne ravnine, kot je vidno na sliki 34.



Slika 33: Shema postavitve horizontalnih ravnin na posameznem višinskem nivoju

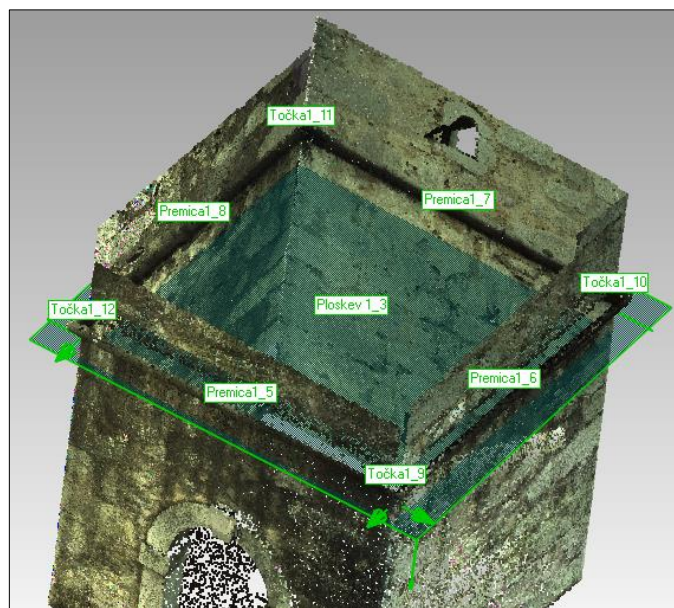


Slika 34: Horizontalne ravnine na enem nivoju



Slika 35: Horizontalne ravnine na objektu

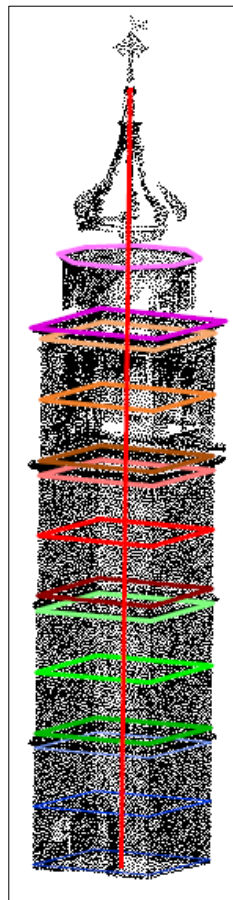
Iz preseka horizontalnih ravnin in ravnin sten zvonika smo dobili premice oboda, ki so bile osnova za določitev vogalnih točk objekta. Vogalne točke smo določili s funkcijo, ki na podlagi dveh sekajočih premic določi sekajočo točko ('2 lines').



Slika 36: Premice in vogalne točke

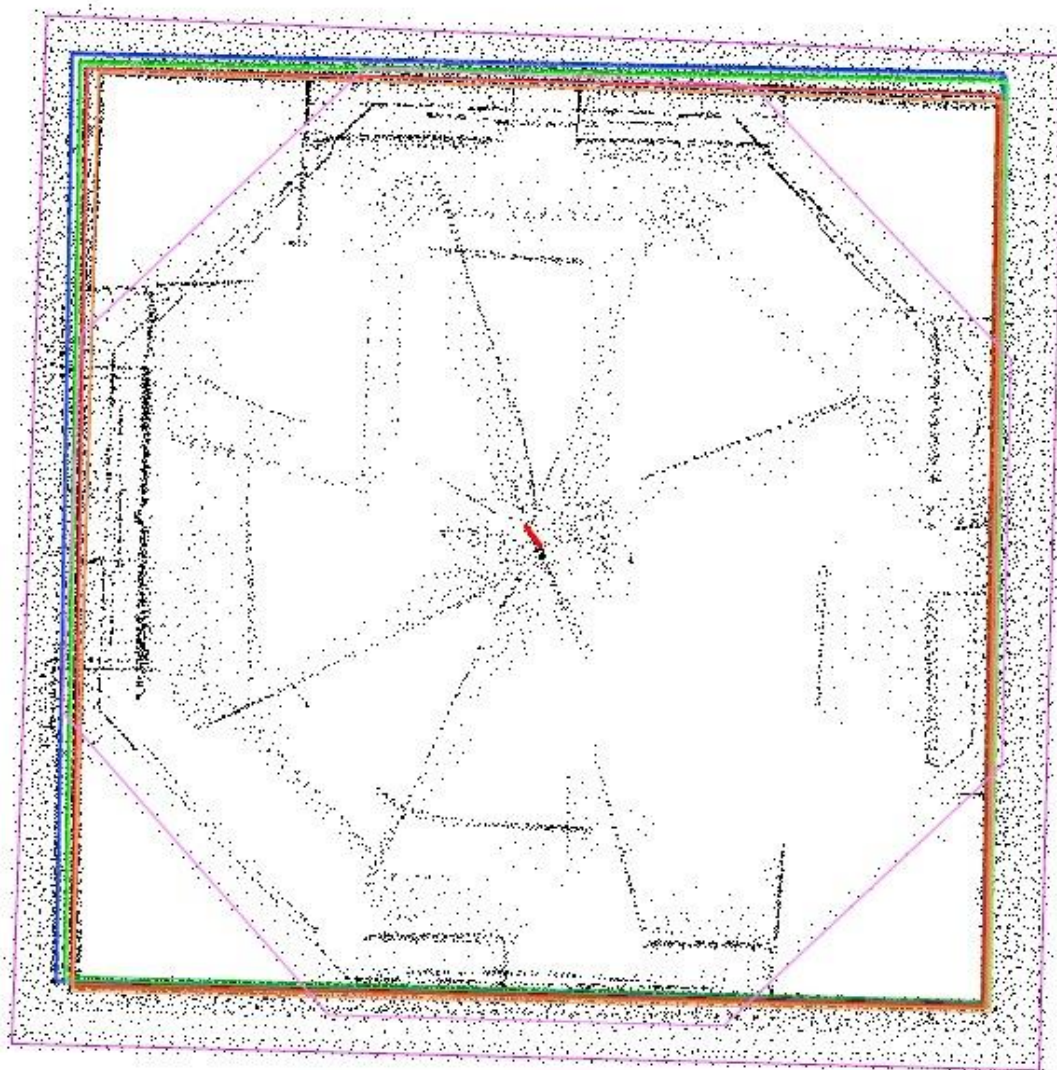
Za predstavitev horizontalnih ravnin in njihovih zamikov smo uporabili tlorisne poglede in sicer za posamezne nivoje ter skupni pogled vseh nivojev. V tem poglavju smo prikazali primer tlorisnega pogleda za en nivo in skupni pogled, v prilogah pa so prikazani še ostali nivoji.

Na sliki 37 vidimo stranski pogled na celoten zvonik z vsemi vključenimi nivoji za lažjo predstavo. Rdeča linija predstavlja povezavo med središčem spodnje ravnine in centrom jabolka. Ostale ravnine po posameznih nivojih so označene vsaka s svojo barvo. Barvni odtenki posameznega nivoja se spreminjajo od temnega proti svetlemu z naraščanjem višine.



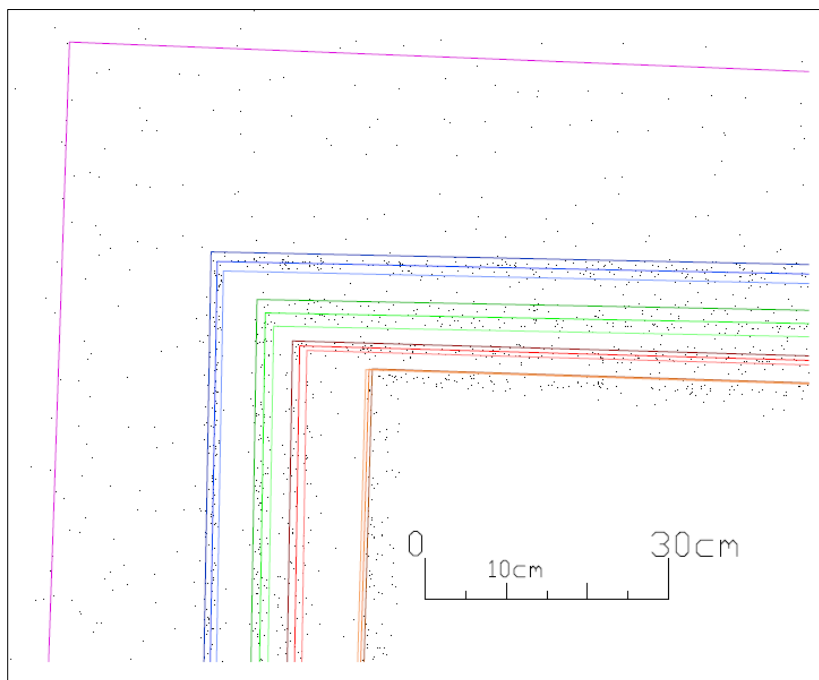
Slika 37: Stranski pogled celotnega zvonika z obarvanimi ravninami

Izrisali smo tlorisni pogled na sliki 38 za celoten zvonik z vsemi horizontalnimi ravninami, kjer lahko vidimo zamike v vogalih objekta glede na središčno povezavo rdeče barve med središčem spodnje ravnine in centrom jabolka.



Slika 38: Tlorisni pogled celotnega zvonika s horizontalnimi ravninami

Tlorisni pogled smo približali tako, da smo zaradi preglednosti ohranili samo zgornji levi vogal. Dodali smo še grafično merilo za lažjo predstavljivost dejanske velikosti zamikanja vogala zvonika.



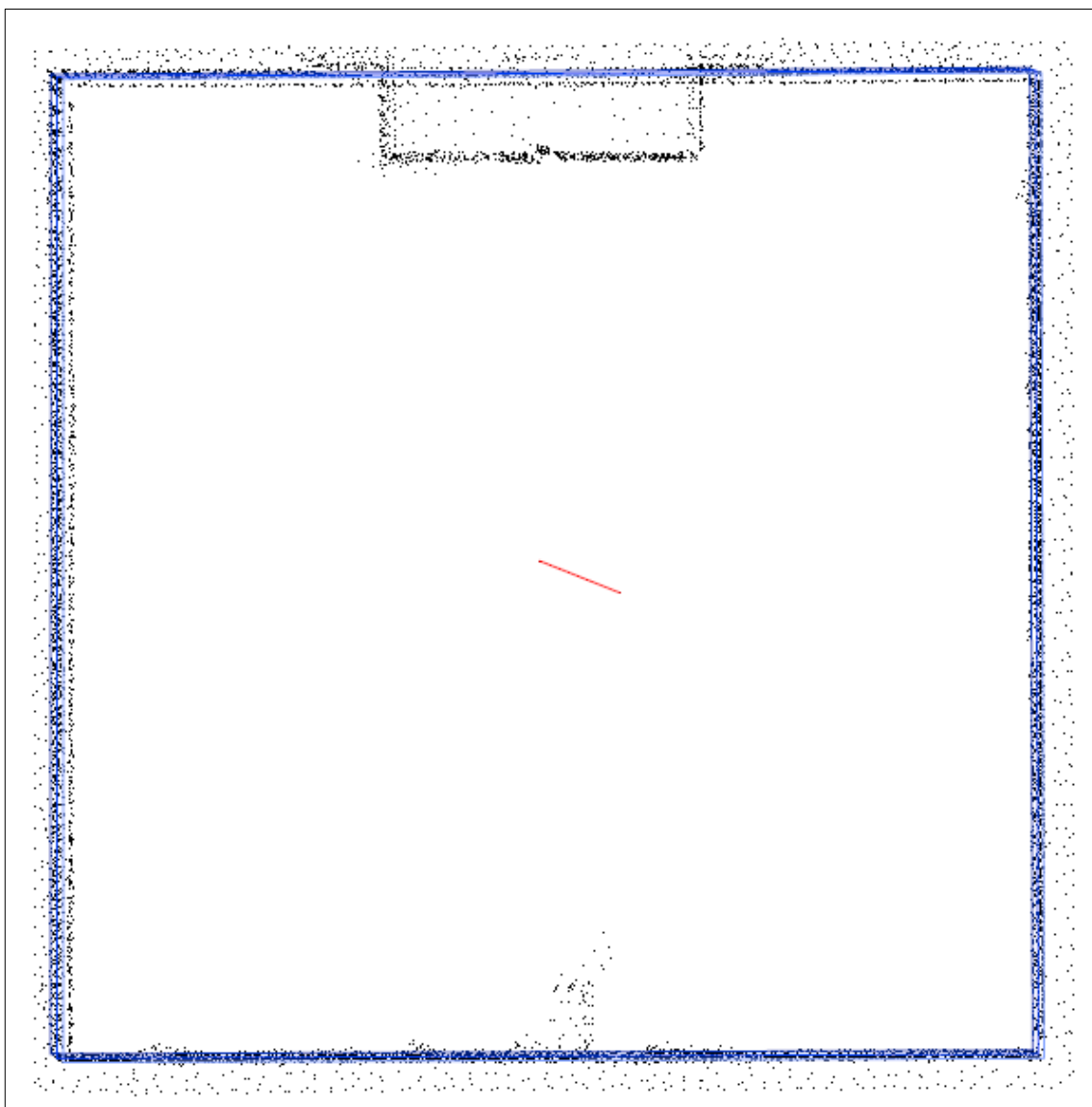
Slika 39: Približan zgornji levi vogal

V preglednici 14 so podane izmerjene dolžine stranic na prvi steni zvonika. Podatki nam pokažejo, da se dolžine stranic ene stene od spodaj navzgor zmanjšujejo. Največja razlika je med prvim in drugim nivojem, višje so razlike manjše. Pri analizi rezultatov grafičnega prikaza vogalov moramo zato pri ugotavljanju nevertikalnosti upoštevati tudi vpliv spreminjanja dolžine stranic na različnih horizontalnih prerezih.

Preglednica 14: Dolžine stranic na višinskih nivojih za prvo steno

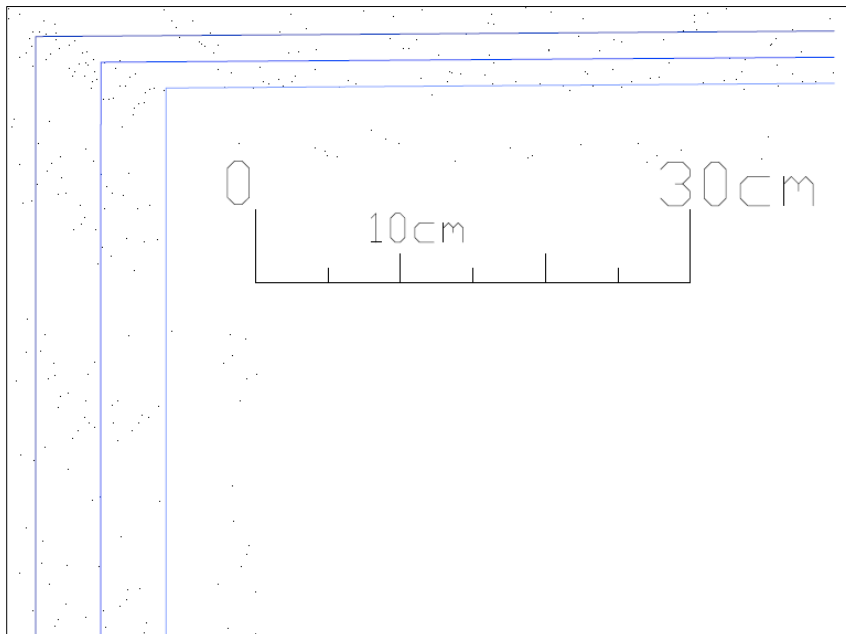
NIVO	DOLŽINA STRANICE [m]
1	4,011
	4,009
2	4,006
	3,960
	3,965
3	3,971
	3,956
	3,960
4	3,965
	3,950
	3,962
	3,975

Nato smo prikazali še tlorisni pogled (slika 40) ter približno zgornjo levo vogalno točko z merilom prvega nivoja (slika 41). Prikazi ostalih nivojev so dodani v prilogah.



Slika 40: Tlorisni pogled prvega nivoja

Slika 41 prikazuje približan zgornji levi vogal prvega nivoja, kjer lahko vidimo, da je na levi strani viden enakomeren zamik okoli 5 centimetrov. Ta zamik lahko pojasnimo z različnimi dolžinami stranic zvonika in samim zamikom tlorisnega pogleda glede na središčno povezavo med centrom jabolka in spodnje ravnine. Enako lahko komentiramo za vse ostale nivoje.



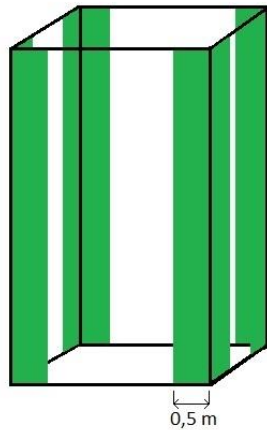
Slika 41: Približana zgornja leva vogalna točka prvega nivoja

4.3.5 Iskanje prileganja zvonika različnim geometrijskim oblikam

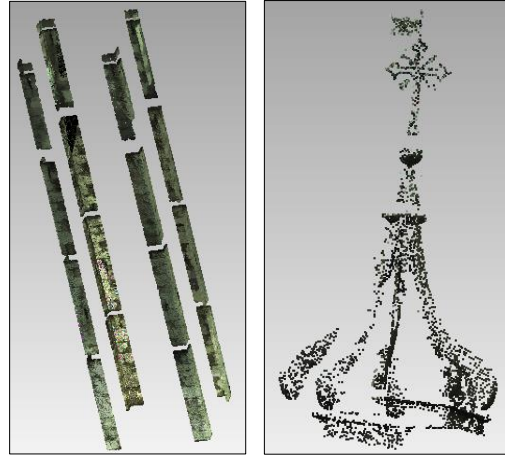
Eden izmed načinov določevanja geometrije zvonika je bil tudi z iskanjem prileganja različnih geometrijskih oblik celotnemu objektu. Ta način je predstavljen v tem poglavju.

Najprej smo zvoniku odstranili vse točke, ki pripadajo vratom, linam, odprtina na vrhu zvonika, vmesnim klesanim zidcem. Na koncu so ostali samo še zidovi zvonika.

Zvonik smo razdelili na spodnja štiri nadstropja in zgornji del s kovinskim jabolkom. Za boljše rezultate smo oblak filtrirali in na spodnjih nivojih ohranili le točke, ki so 0,5 m oddaljene od vogalov zvonika. Na sliki 42 je z zeleno barvo prikazano območje, ki je na koncu ostalo za obdelavo.

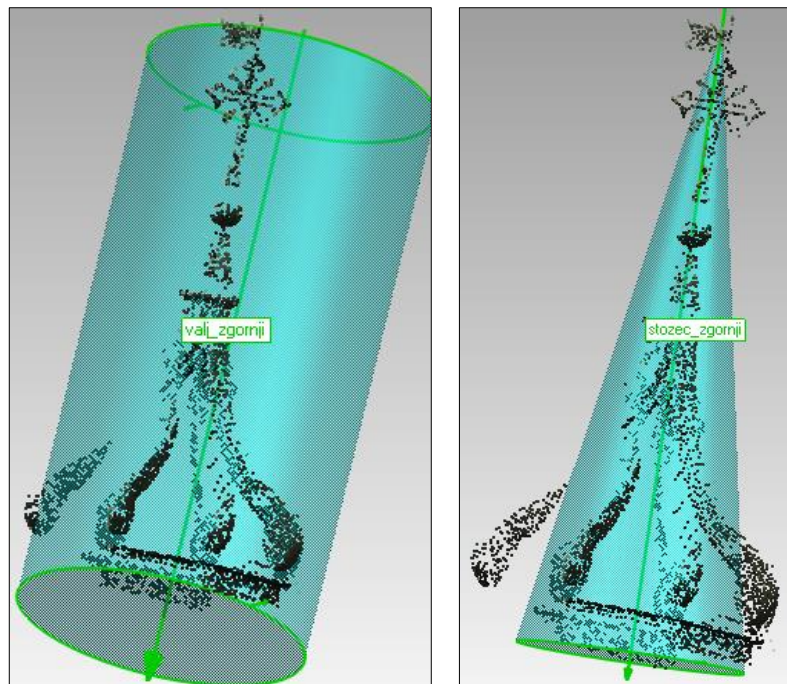


Slika 42: Območje točk za obdelavo

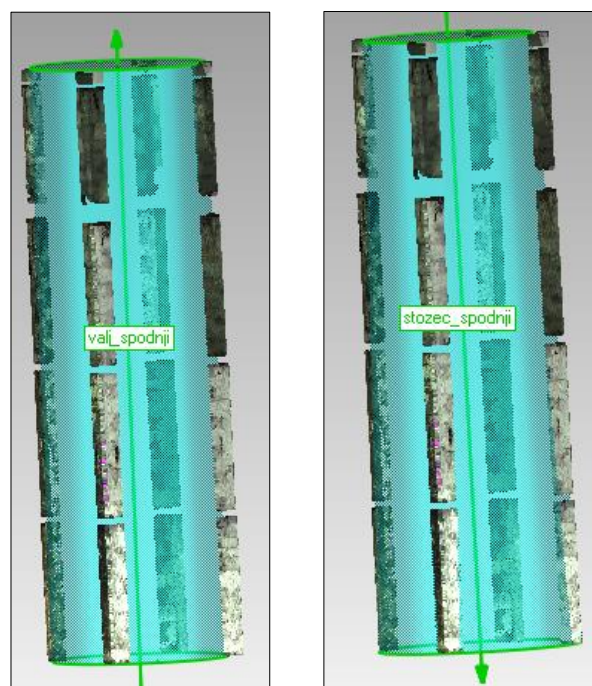


Slika 43: Izrezano območje v programu Geomagic

S funkcijami za izdelovanje geometrijskih oblik na podlagi najboljšega prileganja ('best fit') smo izdelali stožce/prisekane stožce in valje za spodnji in zgornji del zvonika. Za uporabo funkcije moramo le izbrati oblak točk, ki ga želimo uporabiti za prileganje.



Slika 44: Valj (levo) in stožec (desno) na zgornjem delu zvonika



Slika 45: Valj (levo) in prisekan stožec (desno) na spodnjem delu zvonika

Preglednica 15: Lastnosti geometrijskih teles

GEOMETRIJSKO TELO	ŠTEVILO TOČK	STANDARDNA DEVIACIJA [m]	ZUNANJA TOČKA [m]	NOTRANJA TOČKA [m]	SPODNJI/ZGORNJI PREMER [m]
PRISEKAN STOŽEC_SPODAJ	881625	0,142	0,315	-0,519	5,516 4,596
VALJ_SPODAJ	881625	0,135	0,168	-0,563	4,944
STOŽEC_ZGORAJ	7319	0,336	0,842	-0,706	0,000 2,424
VALJ_ZGORAJ	7319	0,380	0,459	-1,640	3,412

Na sliki 45 ni vidne razlike med prisekanim stožcem in valjem, zato smo v preglednici 15 prikazali premere vseh teles. Vidimo, da ima prisekan stožec na spodnjem delu zvonika manjši premer na vrhu, kot je spodnji premer. Valj na spodnjem delu zvonika ima enakomeren premer.

Preglednica 16: Usmerjenost teles in normale ravnin

	USMERJENOST TELESA	NORMALA RAVNINE	2D RAZDALJA [cm]
PRISEKAN STOŽEC SPODAJ	-0,0178 0,0415 -0,9990	-0,0275 0,0492 -0,9984	1,24
VALJ SPODAJ	-0,0099 0,0563 -0,9984	-0,0275 0,0492 -0,9984	1,90
STOŽEC ZGORAJ	-0,0092 0,0826 -0,9965	-0,0202 0,0383 -0,9991	4,57
VALJ ZGORAJ	0,1856 -0,1511 -0,9709	-0,0202 0,0383 -0,9991	28,11

V preglednici 16 vidimo primerjavo usmerjenosti teles in normal ravnin. Za spodnji del zvonika smo vzeli normalo spodnje ravnine, za zgornji del zvonika pa normalo najvišje ravnine na najvišjem nivoju zvonika. Izračunali smo 2D razdaljo med usmerjenostjo teles in normalami ravnin. Vidimo, da je najmanjša 2D razdalja pri prisekanemu stožcu na spodnjem delu zvonika 1,24 centimetrov, največja razdalja pa pri valju na zgornjem delu zvonika 28,11 centimetrov. V primeru, da izračunane 2D razdalje prenesemo na celotno višino zvonika (24,104 metra) dobimo velika odstopanja. Pri prisekanemu stožcu na spodnjem delu zvonika dobimo 29,90 centimetrov odstopanja. Pri ostalih telesih so odstopanja še večja.

Vrednost standardne deviacije σ je izračunana kot kvadratni koren kvocienta vsote kvadratov popravkov in številom točk zmanjšano za ena:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \text{ kjer je } N \text{ število točk, } x_i \text{ popravki, } \bar{x} \text{ pa povprečje popravkov}$$

Popravki predstavljajo pravokotne oziroma najkrajše razdalje od ploskve geometrijskega telesa, ki ga iščemo. Podatki o zunanji in notranji točki nam povedo, koliko je oddaljena najbolj zunanja oziroma notranja točka v oblaku točk, ki smo ga zajeli za prileganje geometrijske oblike.

Na spodnjem delu zvonika so rezultati pričakovani, saj imamo veliko število točk, ki so lepo razporejene po oblaku točk, vendar pa je njihova gostota neenakomerno razporejena. Podatek standardne deviacije nam pokaže, da je največje odstopanje okoli 15 centimetrov. Podatki zunanjih in notranjih točk nam pokažejo, da so točke oddaljene tudi čez 0,5 metra. Ti statistični podatki nam pokažejo, da se oblak točk ne prilega najbolj izbrani geometrijski obliki.

Na zgornjem delu zvonika imamo manj posnetih točk, kar pomeni majhno gostoto točk. Standardna deviacija nam pove, da je odstopanje okoli 30 centimetrov za obe geometrijski telesi. Pri valju je notranja točka oddaljena za 1,6 metra, zunanja točka pa za 0,46 metra. Za stožec nam rezultati pokažejo, da je zunanja točka oddaljena 0,8 metra, notranja pa 0,7 metra.

Statistični podatki nam povedo, da analiza s prileganjem geometrijskih oblik oblaku točk ni najboljši način za pridobivanje podatkov o geometriji obravnavanega objekta. Določitev geometrije zvonika s prileganjem različnih geometrijskih oblik oblaku točk nam ni ponudila pričakovanih rezultatov.

5 ZAKLJUČEK

Pridobljene podatke terestričnega laserskega skeniranja smo obdelovali v programski opremi Geomagic kot oblak točk. Teme nismo obravnavali kot nalogo iz inženirske geodezije, temveč nas je zanimalo, kakšne geometrične podatke, s katerimi bi lahko opisali sedanje stanje objekta, lahko dobimo iz skeniranega oblak točk.

Opravili smo štiri različne načine določanja geometrije obravnavanega objekta.

Prvi način, kjer smo določali parametre ravnin zunanjih sten zvonika na podlagi vertikalnih sten in posameznih ravnin na nivojih, je pokazal, da se objekt nagiba v različnih smereh (navznoter ali navzven) ter za različne vrednosti. Primerjali smo ravnine na različnih nivojih med seboj na posameznih vertikalnih stenah. Možnost bi bila tudi, da bi primerjali ravnine med različnimi vertikalnimi stenami, ampak se za to v naši nalogi nismo odločili.

Drugi način, določitev kota nagiba od vertikale s povezavo središča spodnje ravnine in centrom jabolka na vrhu, nam je podala celoten kot nagiba oziroma odmik od vertikale izražen v dolžinskih enotah. Izvedli smo še analizo kotov nagiba od vertikale po posameznih višinskih nivojih – s središči posameznih ravnin na nivojih. Videli smo, da se zvonik ne nagiba enakomerno, vendar so razlike zelo majhne. O pravilnosti izračunanih kotov nagiba smo se prepričali, ko smo oba načina primerjali med sabo. Kot nagiba od vertikale celotnega objekta se je razlikoval za $0^{\circ}00'11''$, kar na višini zvonika 24,104 metra znaša 2 milimetra. Predvidevamo, da je ta razlika posledica tega, da središčne točke ravnin posameznih višinskih nivojev niso na isti premici. V tej analizi nismo ugotavljali smeri nagiba, vendar samo velikost celotnega nagiba.

Tretji način ugotavljanja geometrije objekta smo izvedli na podlagi horizontalnih ravnin po posameznih višinskih nivojih. Skupno smo izdelali 14 horizontalnih ravnin, ki smo jih s stranskim pogledom celotnega objekta tudi prikazali. Glavna ideja tega načina je bila prikaz zamika vogalnih točk objekta s pomočjo tlorisnih pogledov. Dolžine stranic po nivojih so različnih dimenzij, zato sklepamo, da je to razlog, da se vogali na tlorisnih pogledih ne zamikajo enakomerno. Za izdelavo tlorisnih pogledov smo uporabili program Autodesk AutoCAD. Izdelali smo tlorisne poglede posameznih nivojev in celotnega objekta za boljšo predstavljivost. Zraven smo dodali še grafično merilo in tako prikaze še izboljšali. Z dodajanjem barv in odtenkov smo naredili prikaze še bolj pregledne.

Četrty način je bilo iskanje prileganja zvonika različnim geometrijskim oblikam. Uporabili smo geometrijski obliki valja in stožca/prisekanega stožca za dva dela zvonika. Parametri usmerjenosti teles in normal ravnin so nam povedali, kako so telesa usmerjena glede na ravnine. Ugotovili smo, da smo imeli pri temu načinu analize probleme zaradi neenakomerne gostote točk.

Kot smo že omenili, smo analize izvajali v programu Geomagic Studio oziroma Qualify Probe. Pri izdelavi naloge smo naleteli tudi na pomanjkljivosti programa. Pri izdelavi tlorisnih prikazov smo morali uporabiti program AutoCAD, saj program Geomagic ne omogoča barvanja ravnin, točk, linij, kar bi pripomoglo k bolj preglednemu prikazu. Tudi sami prikazi tlorisov niso tako pregledni, kot je to mogoče izvesti v programu AutoCAD. Druga pomanjkljivost, ki smo jo zaznali, je ta, da ne vemo, kako delujejo uporabljene funkcije v ozadju. Problem se je pokazal v primeru prileganja geometrijskih teles izbranemu oblaku točk. Tako nismo vedeli, na kakšen način funkcija izdelava najbolj prilegajoče geometrijsko telo. Rezultate te analize zato nismo mogli dobro komentirati oziroma potrditi njihove pravilnosti.

Problem, ki smo ga zaznali že v začetni fazi izdelave diplomske naloge, je bila majhna gostota točk in razgibanost površine na zgornjem delu objekta. Analizo je motila tudi rebrasta kupola, saj je bilo težko izdelati dobro prilegajočo ravnino na tem nivoju, ker ni bilo zadostne gostote točk. Zelo dobro pa je bilo zajeto kovinsko jabolko na vrhu objekta, ki nam je omogočilo izdelavo dobrih analiz na podlagi uporabe teh točk.

Menimo, da so bili glavni cilji diplomske naloge doseženi, saj so rezultati analiz podali dobre prikaze geometrije obravnavanega objekta kulturne dediščine. Podobne analize bi lahko nadalje izvajali za druge objekte, ki se posedajo oziroma nagibajo, da bi pomagale pri sanaciji le teh. Uporabljene analize so primerne tudi za samo spremljanje posedanja ali nagibanja podobnih objektov, saj bi lahko v analize vključili še časovno komponento.

VIRI

3D ATA d.o.o. 2015.

<http://3d-ata.com> (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Skeniranje poševnega stolpa v Pisi. 2013.

<http://www.3ders.org/articles/20130919-aussie-scientists-create-first-detailed-3d-scan-of-the-tower-of-pisa.html> (Pridobljeno 20. 5. 2015.)

3DSYSTEMS, Inc.2015.

<http://www.3dsystems.com> (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Geomagic, Inc. 2015.

<http://www.geomagic.com> (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Geomagic Qualify.2015.

<http://www.geomagic.com/en/products/qualify/overview> (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Geopedia, 2015. Posnetek ortofota.

http://www.geopedia.si/#T105_x412806.203_y45804.324_s19_b2 (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Kastelic, M. 2010. Obdelava podatkov laserskega skeniranja v programu Geomagic na primeru Mislejevega portala. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kastelic): 88 str.

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljemerji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: str.16-17, 24.

Lasersko skeniranje. 2015.

http://geo-f.si/lasersko_skeniranje.html (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Leica Geosystems. 2015. Leica ScanStation C10

http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation%20C10/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C10_DS_en.pdf (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Leica Geosystems. 2015. Leica Geosystems HDS Tilt & Turn Targets

http://hds.leica-geosystems.com/en/Targets_19143.htm (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Močnik, B. 2004. Terestrično 3D (trirazsežno) lasersko skeniranje. Geodetski vestnik 48, 3: 351-362.

Osebni arhiv fotografij. Gabršček Tjaša (16.5.2014)

Premrl, B. 2012. Cerkev sv. Valentina v Črnem Kalu: ob stoletnici njene dograditve. Predloka, Župnija Predloka: str. 45,54,55,133,134.

Reshetyuk, Y. 2009. Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Doktorska disertacija. Stockholm, Royal Institute of Technology, Department of Transport and Economics, Division of Geodesy: 158 str.

Register kulturne dediščine (RKD). 2015. Črni Kal - Cerkev sv. Valentina.

<http://rkd.situla.org/> (Pridobljeno 6. 4. 2015.)

Šašić Kežul, A. 2014. Kartiranje poškodb fasade objekta iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Šašić Kežul): 33 str.

Tomšič, M. 2011. Uporaba laserskega skeniranja za evidentiranje kulturne dediščine na primeru gradu Kalc. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Tomšič): 54 str.

Urbančič, T., Grigillo, D. 2015. Lidar in uporaba podatkov laserskega skeniranja v geodeziji.

http://www.izs.si/uploads/tx_izsizobgeo/Lidar_in_uporaba_podatkov_laserskega_skeniranja_v_geodeziji_2015_.pdf (Pridobljeno 20. 5. 2015.)

Vežočanik, R., Gvozdanović, T., Smole, D. 2008. Terestrično lasersko skeniranje in njegova uporaba pri spremljanju plazov. V: Razprave petega posvetovanja slovenskih geotehnikov, Nova Gorica, 12.-14. junij 2008, Str. 301-308.

Wikipedia. 2015. Poševni stolp v Suurhusnu.

http://en.wikipedia.org/wiki/Leaning_Tower_of_Suurhusen (Pridobljeno 20. 5. 2015.)

Wikipedia. 2015. Seznam poševnih stolpov.

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_leaning_towers (Pridobljeno 20. 5. 2015.)

SEZNAM PRILOG

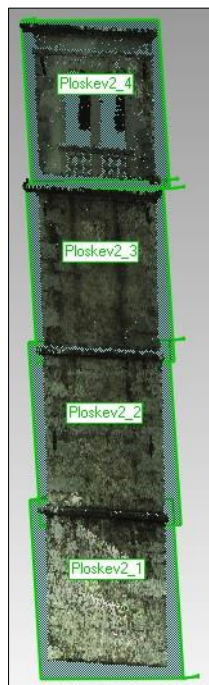
PRILOGA A: VERTIKALNE RAVNINE

Slika 1.A: Vertikalne ravnine druge stene.....	A
Slika 2.A: Vertikalne ravnine tretje stene.....	A
Slika 3.A: Vertikalne ravnine četrte stene.....	A

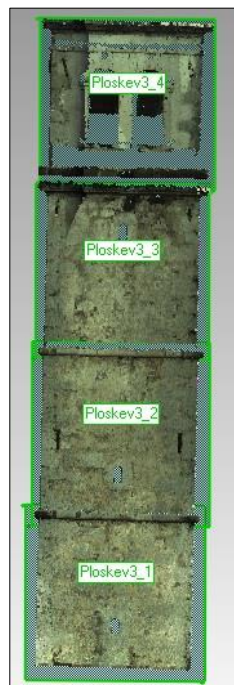
PRILOGA B: IZRISI TLOORISOV HORIZONTALNIH RAVNIN PO VIŠINSKIH NIVOJIH

Slika 1.B: Tlorisni pogled drugega nivoja.....	B
Slika 2.B: Približana zgornja leva vogalna točka drugega nivoja.....	B
Slika 3.B: Tlorisni pogled tretjega nivoja.....	C
Slika 4.B: Približana zgornja leva vogalna točka tretjega nivoja.....	C
Slika 5.B: Tlorisni pogled četrtega nivoja.....	D
Slika 6.B: Približana zgornja leva vogalna točka četrtega nivoja.....	D
Slika 7.B: Tlorisni pogled petega nivoja.....	E

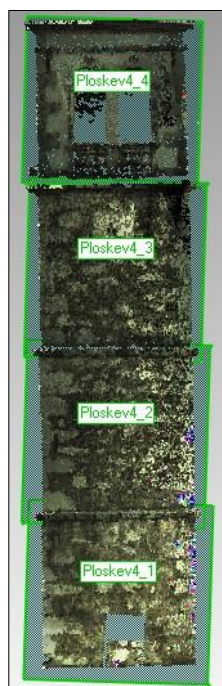
PRILOGA A: VERTIKALNE RAVNINE



Slika 1.A: Vertikalne ravnine druge stene

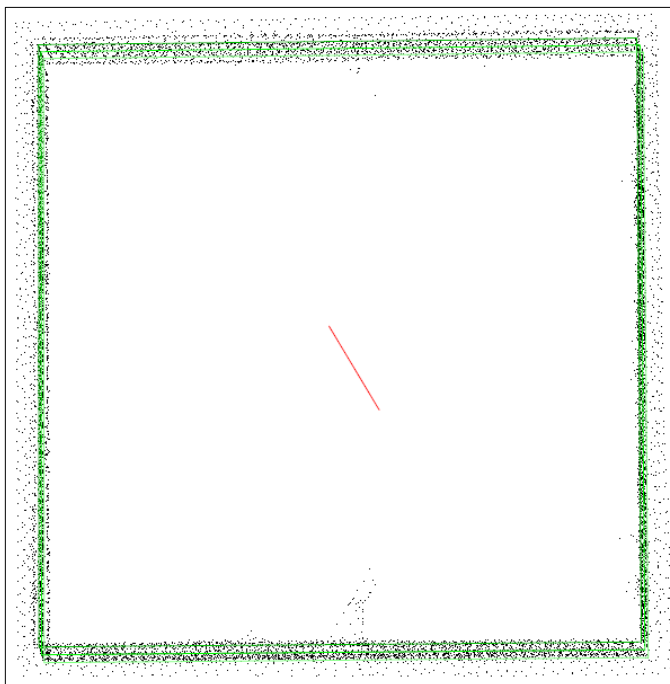


Slika 2.A: Vertikalne ravnine tretje stene

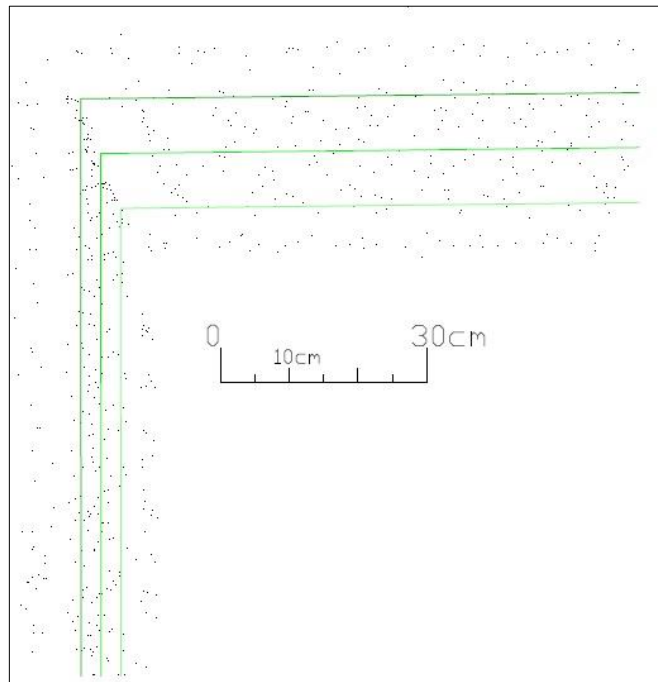


Slika 3.A: Vertikalne ravnine četrte stene

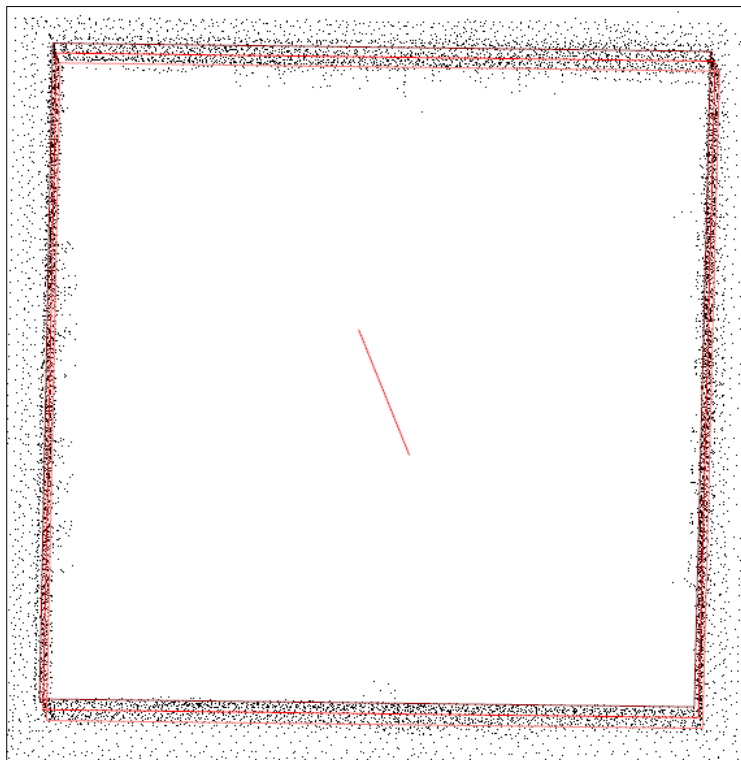
PRILOGA B: IZRISI TLOORISOV HORIZONTALNIH RAVNIN PO VIŠINSKIH NIVOJIH



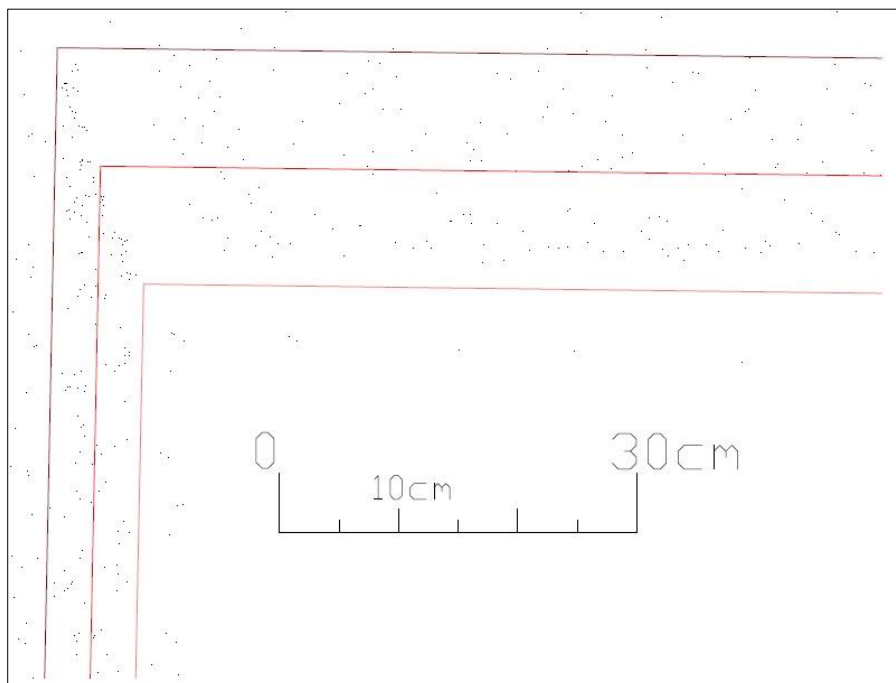
Slika 1.B: Tlorisni pogled drugega nivoja



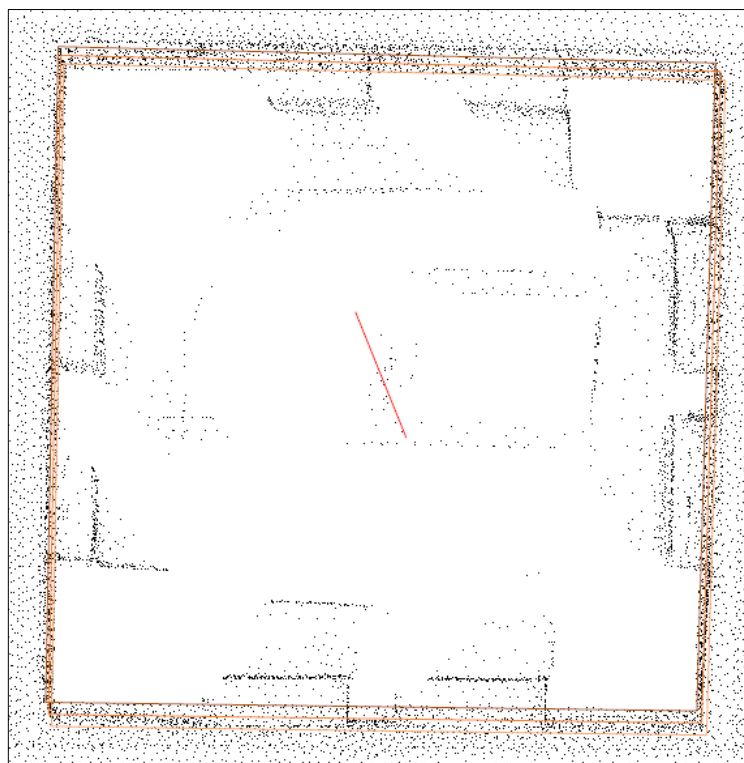
Slika 2.B: Približna zgornja leva vogalna točka drugega nivoja



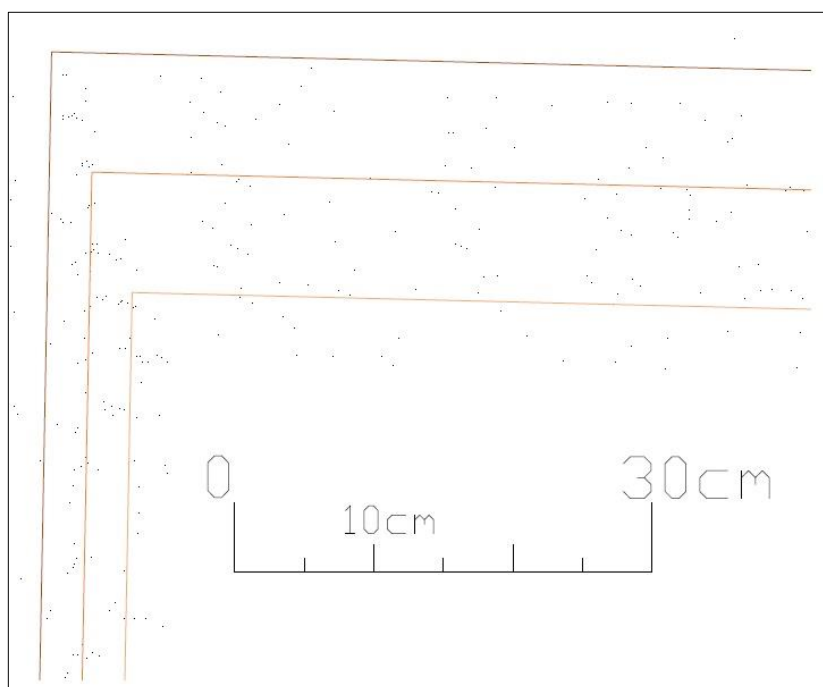
Slika 3.B: Tlorisni pogled tretjega nivoja



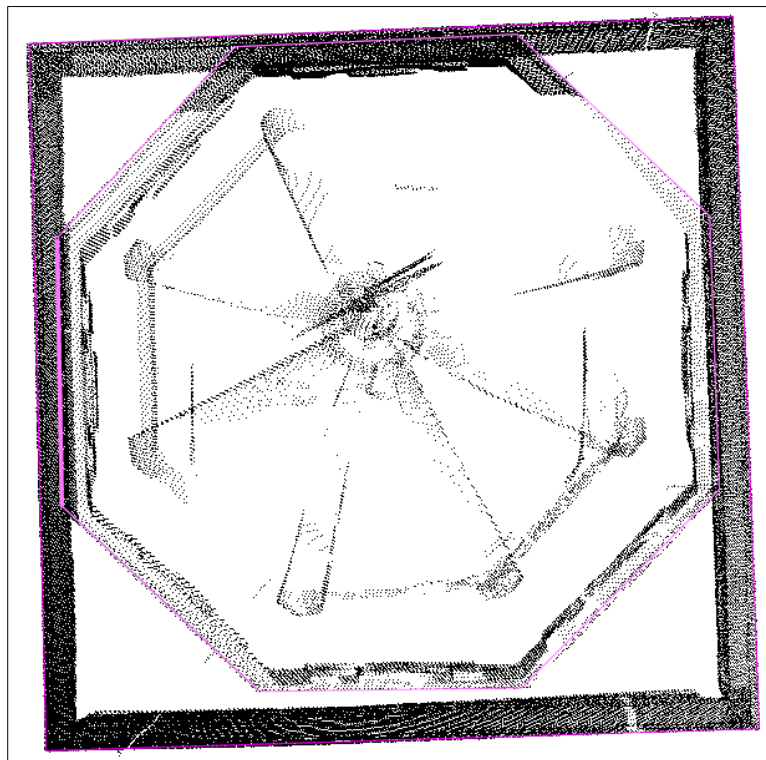
Slika 4.B: Približana zgornja leva vogalna točka tretjega nivoja



Slika 5.B: Tlorisni pogled četrtega nivoja



Slika 6.B: Približana zgornja leva vogalna točka četrtega nivoja



Slika 7.B: Tlorisni pogled petega nivoja