

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA

Ljubljana, 2019

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

«Ta stran je namenoma prazna.»

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.5+528.7(497.4)(043.3)
Avtor:	Uroš Sojer, dipl. inž. geod.
Mentor:	doc. dr. Božo Koler
Somentor:	asist. dr. Tilen Urbančič
Naslov:	Določitev spremembe geometrije deformabilne cevi iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	44 str., 30 sl., 14 pregl., 21 en.
Ključne besede:	Terestrični laserski skener, oblak točk, izravnavna elipse, sprememba geometrije cevi

Izvleček

V magistrskem delu smo preverjali spremembo geometrije deformabilne cevi iz oblaka točk terestričnega laserskega skeniranja. Sprva smo s terestričnim laserskim skenerjem opravili meritve v cevi ter nasutja zemljine nad cevjo. Opravljene meritve so predstavljale osnovo za izdelavo registriranega oblaka točk. Z namenom preverjanja spremembe geometrije cevi iz oblaka točk smo izdelali programsko opremo. Dimenzijo cevi smo določali na način, da smo oblaku točk cevi izravnavali elipso po metodi najmanjših kvadratov. Izravnavana elipsa je predstavljala parametre premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri. Rezultate premera cevi smo nato analizirali na primeru cevi, ki ni vgrajena in prosto leži na terenu, ter na dveh primerih vgrajene cevi. Prvi primer vgrajene cevi je cev, ki je zasuta s predpisanim materialom, drugi primer pa je cev, ki je v celoti betonirana ter nato zasuta s predpisanim materialom. Iz oblaka točk, ki predstavlja nasutje zemljine nad cevjo, smo dobili podatke o višini nasutja. Le-ti so nam omogočali analizo vpliva višine nasutja na spremembo geometrije cevi. Poleg meritev s terestričnim laserskim skenerjem smo meritve premera v horizontalni in vertikalni smeri na začetku, sredini in koncu vsakega sklopa cevi opravili z ročnim laserskim razdaljemerom. Različna metoda izmere nam je služila za ugotavljanje razlik med obema metodama izmere premera cevi. Magistrsko delo predstavlja poglobljen pregled in ovrednotenje uporabe terestričnega laserskega skenerja za potrebe določanja spremembe geometrije cevi.

«Ta stran je namenoma prazna.»

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.5+528.7(497.4)(043.3)
Author: Uroš Sojer, B.Sc.
Supervisor: Asist. Prof. Božo Koler, PhD
Cosupervisor: Asist. Tilen Urbančič, PhD
Title: Determining the change in the geometry of a flexible pipe using terrestrial laser scanning point cloud data
Document type: Master Thesis
Notes: 44 p., 30 fig., 14 tab., 21 eq.
Key words: Terrestrial laser scanner, point cloud data, fitting of ellipse, pipe deformation

Abstract

In this master's thesis we examined the change in the geometry of a flexible pipe using terrestrial laser scanning point cloud data. Firstly, we carried out measurements in the pipe and the backfill above the pipe using the terrestrial laser scanner. Those measurements were the basis for making the registered point cloud. We made the software for the purpose of verifying the change in the geometry of the pipe from the point cloud data. The dimension of the pipe was determined by fitting an ellipse to the point cloud data using the method of least-squares. The fitted ellipse represented the parameters of the diameter of the pipe in the vertical and horizontal directions. The results of the diameter of the pipe were then analysed on the examples of a pipe that is not installed and is placed freely on the ground and two built-in pipes. The first example of a built-in pipe is a pipe that is backfilled with soil and the second one is a pipe that is sealed under concrete and then backfilled with soil. From the point cloud data representing the backfill soil above the pipe we obtained the data about the height of the backfill. This enabled us to analyse the impact the height of the backfill has on the deformation the pipe geometry. In addition to measuring with a terrestrial laser scanner, we measured the diameter in the horizontal and vertical directions at the beginning, middle and end of each section of the pipes using a handheld laser meter. Different measuring methods were used to determine the differences between pipe diameter measuring methods. This master's thesis is a detailed examination and evaluation of the use of a terrestrial laser scanner for the purpose of determining the change in pipe geometry.

«Ta stran je namenoma prazna.»

ZAHVALA

Želel bi se zahvaliti somentorju asist. dr. Tilnu Urbaniču. Iskreno vam hvala za vso pomoč, nasvete, ideje, vloženi trud in usmeritve pri nastajanju magistrskega dela. Prav tako gre zahvala mentorju doc. dr. Božu Kolerju za mentorstvo in vse usmeritve.

Zahvalil bi se tudi družini, ki mi je stala ob strani v času študija. Posebna zahvala tudi tebi Sabina, ki si me tekom študija spodbujala ter mi stala ob strani.

Hvala tudi podjetju, ki mi je dovolilo izvedbo meritev ter objavo rezultatov.

«Ta stran je namenoma prazna.»

KAZALO VSEBINE

Kazalo slik	XI
Kazalo preglednic	XIII
Uporabljene kratice in okrajšave	XV
1 UVOD	1
1.1 Cilji in hipoteze	2
1.2 Deformabilne cevi	3
2 METODOLOGIJA	5
2.1 Priprava delovišča za izvedbo meritev	5
2.2 Meritve	6
2.2.1 Uporabljen instrumentarij	6
2.3 Registracija oblakov točk	7
2.4 Brisanje točk v oblaku TLS	8
2.5 Program za določitev spremembe geometrije cevi iz oblaka točk TLS	8
2.5.1 Določitev vektorja usmerjenosti	10
2.5.2 Translacija in rotacija oblaka točk	11
2.5.3 Rez oblaka točk cevi in terena po profilih	11
2.5.4 Izravnavo elipse po MNK	12
2.5.5 Izračun višine nasutja nad temenom cevi	15
2.6 Ocena natančnosti oblaka točk	15
2.7 Izračun padca cevi	15
3 TERENSKÉ MERITVE IN OBDELAVA PODATKOV	17
3.1 Terenske meritve	17
3.2 Obdelava podatkov	17
3.3 Rezultati obdelave podatkov	20
4 REZULTATI	21
4.1 Analiza ne vgrajene cevi	21
4.2 Analiza spremembe geometrije za cev - 1	24
4.2.1 Primerjava meritev laserskega skeniranja z ročnimi laserskim razdaljeme-rom - cev - 1	28
4.3 Analiza spremembe geometrije za cev - 2	31
4.3.1 Primerjava meritev laserskega skeniranja z ročnimi laserskim razdaljeme-rom - cev - 2	34
4.4 Analiza nagnjenosti elipse	36
4.5 Primerjava modela spremembe geometrije cevi, dobljenega na osnovi meritev s predpisom ATV-DVWK-A 127E	37
4.6 Določitev padca cevi	39
5 ZAKLJUČEK	41
VIRI	43

«Ta stran je namenoma prazna.»

KAZALO SLIK

1	Prikaz delovanja sil pri togih (levo) in deformabilnih ceveh (desno) (Howard, 1996).	4
2	Prikaz spremembe geometrije premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri. . . .	4
3	Kovček v oblaku točk cevi, ki predstavlja dodatno vezno ploskev za registracijo oblaka točk.	5
4	Uporabljen TLS Leica BLK 360 v času izmere v cevi.	6
5	Primer napake v odboju laserskega žarka v cevi.	8
6	Diagram poteka delovanja programa.	9
7	Grafični prikaz določitve vektorja usmerjenosti.	10
8	Prikaz dejanskega vektorja usmerjenosti cevi v prostoru.	10
9	Primer oblaka točk cevi s pravokotniki koraka 1 m in širine 1 cm, ki služijo za izrez točk.	12
10	Primer prečnega izreza točk cevi v sivi barvi in terena v zeleni barvi.	12
11	Primer izravnane elipse po MNK (rdeča barva), izrezane točke (črna barva) in krog s premerom po podatkih proizvajalca (modra barva).	14
12	Primer oblaka točk cev - 1.	20
13	Rezultat izravnane elipse, ki prikazuje premer cevi v vertikalni in horizontalni smeri pri nevgrajeni cevi.	22
14	Rezultat premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri iz oblaka točk, kjer je stojišče skenerja na začetku cevi.	23
15	Rezultat premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri iz oblaka točk, kjer je stojišče skenerja na koncu cevi.	23
16	Premer cev - 1 v vertikalni in horizontalni smeri.	24
17	Višina terena, cev - 1.	25
18	Razsevni grafikon premer cevi v odvisnosti od višine nasutja.	26
19	Razsevni grafikon premera cevi v vertikalni smeri v odvisnosti od premera v horizontalni smeri.	27
20	Primerjava računanih premerov (rdeča barva) iz enačb (18) in (19) z rezultati meritev (črna barva).	28
21	Histogram razlik med meritvami za premer horizontalno pri cevi - 1.	29
22	Histogram razlik med meritvami za premer vertikalno pri cevi - 1.	29
23	Premer cev - 2 v vertikalni in horizontalni smeri.	31
24	Višina terena, cev - 2.	32
25	Razsevni grafikon, ki prikazuje spremenljivki premera cevi v odvisnosti od višine nasutja.	33
26	Razsevni grafikon premer cevi v vertikalni smeri v odvisnosti od premera v horizontalni smeri, cev - 2.	33
27	Histogram razlik med meritvami za premer horizontalno pri cevi - 2.	34
28	Histogram razlik med meritvama za premer vertikalno pri cevi - 2.	35
29	Razsevni grafikon kota nagnjenosti elipse θ v odvisnosti od razlike premera horizontalno in premera vertikalno za cev - 1.	36
30	Razsevni grafikon kota nagnjenosti elipse θ v odvisnosti od razlike premera horizontalno in premera vertikalno za cev - 2.	36

«Ta stran je namenoma prazna.»

KAZALO PREGLEDNIC

1	Tehnični podatki terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 (Leica, 2018).	7
2	Tehnični podatki ročnega laserskega razdaljemera Leica Disto pro (G. Leica, 2008).	7
3	Določitev natančnosti merjenja iz oblaka točk TLS.	15
4	Število stojšč ter obravnavana dolžina cevi.	17
5	Ocena natančnosti registracije za cev - 1.	18
6	Ocena natančnosti registracije za cev - 2.	19
7	Število točk v oblaku točk cevi in terena za delovišči cev -1 in cev -2.	20
8	Opisna statistika spremenljivk za cev - 1.	25
9	Opisne statistike spremenljivk merjenj metode laserskega skeniranja in metode ročnega laserskega razdaljemera.	30
10	Opisne statistike spremenljivk za cev - 2.	32
11	Opisna statistika spremenljivk merjenj metode laserskega skeniranja ter ročni laserski razdaljemer.	35
12	Vhodne vrednosti za statični izračun po standardu ATV-DVWK-A 127E	37
13	Prikaz vrednosti, dobljenih iz statičnega izračuna ter lastnega modela.	38
14	Prikaz rezultatov naključne analize padca cevi po odsekih.	39

«Ta stran je namenoma prazna.»

UPORABLJENE KRATICE IN OKRAJŠAVE

CCTV	Video nadzorna kamera
GRP	Cev iz armiranega poliestra
MAE	Povprečna absolutna napaka
MNK	Metoda najmanjših kvadratov
TLS	Terestrični laserski skener

1 UVOD

V mnogih državah se zbiranje in odvajanje odpadnih voda v mestnih območjih izvaja z obsežnim sistemom podzemnih kanalizacijskih cevi (Romanova in sod., 2013). Sistemi kanalizacijskih cevi, ki so vgrajeni v tla, so nenehno podvrženi fizičnim, kemičnim, biokemičnim ali biološkim obremenitvam. Tovrstne obremenitve vodijo do zmanjšanja varnostnega faktorja, ki je predviden v projektu izgradnje (Bosseler in sod., 1997). Sistemi kanalizacijskih cevi morajo biti zato nadzorovani in vzdrževani na način, da je dosežena pričakovana kakovost sistema. V kolikor to ni doseženo, lahko nastanejo okvare, kot so porušitev ali zamašitev cevi, le-te pa privedejo do problema v delovanju sistema (Romanova in sod., 2013). Zaradi preteklih slabih sistemov cevi imamo danes strožje zahteve na tem področju. Obenem pa se je povečal inšpekcijski nadzor nad pregledom trenutnega stanja in ocenitvijo nastale škode za odločitev o nadaljnjih ukrepih (Bosseler in sod., 1997).

Trenutno najbolj pogosto uporabljena metoda za preverjanje stanja cevi je video nadzorna kamera (CCTV). Tehnologija CCTV kamere je bila prvič predstavljena leta 1960 in je do danes še vedno najpogostejše uporabljena. To je kamera, ki je nameščena na daljinsko vodenem vozilu, ki se premika vzdolž cevi ter snema trenutno stanje v cevi. Pri tem je naloga operaterja, da na podlagi video vsebine oceni stanje cevi (Romanova in sod., 2013). Pri oceni stanja cevi igra ključno vlogo predvsem izkušnost operaterja in kakovost kamere (Dirksen in sod., 2013), ter vidnost v cevi (Romanova in sod., 2013). Pomanjkljivost CCTV kamere je, da iz posnetkov ne pridobimo merljivih podatkov, kot sta dimenzija ali sprememba geometrije cevi in podatkov, ki bi omogočali izračun hidravlične zmogljivosti ter strukturne trdnosti in stabilnosti (Stanic in sod., 2017; Wirahadikusumah in sod., 1998). Poleg CCTV kamere so za preverjanje stanja cevi v uporabi še: radar (Olhoeft, 2000), sonar (Kirkham in sod., 2000), laserski profilometer (*Angl.* laser profiler) (Duran in sod., 2003). Poleg naštetega je v uporabi tudi združena raba CCTV kamere in laserskega profilmetra, kar omogoča združevanje prednosti obeh tehnologij (Duran in sod., 2007). Omenjene naprave so v večini primerov zasnovane na način, da so vgrajene v daljinsko vodenem vozilu, ki ga operater pomika po cevi in tako pridobiva želene podatke.

V praksi so se za potrebe nadzora cevi okoli leta 2000 pričele uporabljati metode merjenja cevi, ki delujejo na osnovi odboja laserskega žarka (Stanic in sod., 2017). Avtorji v delih, ki govorijo o zaznavanju notranje geometrije cevi s tehnologijo laserskih senzorjev v večini primerov uporabljajo laserske profilmetre (Stanić in sod., 2013; Liu in sod., 2012; Duran in sod., 2003). Običajno laserski profilometer deluje na dva načina. Prvi način je, da se laserski žarek projicira na cev v obliki kroga, medtem pa kamera posname žarek, ki se odbije od površine cevi. Z obdelavo posnetka izrežemo odbiti žarek in tako dobimo podatek o stanju cevi. Pri drugem načinu se neposredno izvaja meritev razdalje na podlagi časa potovanja laserskega žarka in omogoča določitev geometrijske ter površinske anomalije (Liu in sod., 2012). Iz meritev torej lahko prepoznamo ovalnost cevi ali druge pomembne spremembe geometrije cevi. Prav tako lahko prepoznamo strukturne poškodbe, kot so razpoke ali izguba debeline stene zaradi raznih poškodb oziroma korozij (Kirkham in sod., 2000). Pri uporabi rezultatov, ki jih dobimo z uporabo laserskih senzorjev, pogosto pozabimo, da lahko napake v odboju laserskega žarka povzročijo pomembno sistematično napako pri merjenju notranje geometrije cevi (Clemens in sod., 2015).

V magistrskem delu smo se v fazi izgradnje kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode - Sneberje odločili preverjati stanje dimenzije cevi HOBAS GRP DN1200 po zasutju. Odločili smo se za zajem 3D oblaka točk cevi s pomočjo terestričnega laserskega skeniranja (TLS) Leica BLK360. TLS se od laserskega profilmetra, ki je večinoma v uporabi za preverjanje stanja cevi, razlikuje na način, da laserskemu senzorju dodamo rotirajočo prizmo. Z rotirajočo prizmo laserski

profilometer nadgradimo, da postane laserski skener. Tako nam TLS nudi možnost zaznavanja značilnosti celotne okolice, medtem ko laserski profilometer zajema le vrednosti vzdolž linije (Petric in sod., 2010). Slabost uporabljenega instrumenta je, da mora operater vstopiti v cev ter biti v cevi prisoten v času izvedbe meritev. Tako je delo mogoče le pri ceveh večjih dimenzij. Preverjanja dimenzij vodovodne cevi s tehnologijo TLS so se na podoben način kot v našem primeru lotili v severni Kaliforniji, kjer so za zajem oblaka točk uporabili TLS Trimble SX10. Iz oblaka točk TLS so nato iskali minimalni premer cevi, v namen načrtovanja vgradnje nove cevi v obstoječo cev (Stenmark, 2018).

Spremembo geometrije cevi smo v našem primeru preverjali v dveh primerih. Prvi primer je na območju, kjer je cev zasuta le s predpisanim materialom in jo imenujemo cev - 1. Drugi primer, imenovan cev - 2, pa je na območju, kjer je cev v celoti betonirana ter nato zasuta s predpisanim materialom. Poleg spremembe geometrije cevi smo preverjali tudi višino nasutja nad temenom cevi, saj nas zanima, kako višina nasutja vpliva na spremembo geometrije cevi.

1.1 Cilji in hipoteze

Namen dela je izdelava metodologije za spremljanje spremembe geometrije deformabilne cevi s TLS ter izdelava programa, s pomočjo katerega bomo na enostaven način iz oblaka točk TLS izračunali podatke o geometrijskih lastnostih na želenem odseku cevi. Poleg tega nam bo program omogočal določitev višine nasutja nad temenom cevi. Ker želimo preveriti, ali je izbrana metoda preverjanj spremembe geometrije cevi primerna, smo si zastavili sledeče cilje:

- TLS ima široko možnost uporabe, vendar je v določenih primerih nezanesljiv zaradi napake v odboju laserskega žarka. Poleg možnih napak v odboju prihaja tudi do napak pri registraciji oblakov točk. Naš cilj bo preveriti možnosti uporabe TLS v cevi ter opisati prednosti in slabosti, ki jih bomo ugotovili.
- Iz oblaka točk, ki predstavlja cev ter teren nad cevjo, želimo pridobiti podatke o premeru cevi v horizontalni in vertikalni smeri ter višino nasutja nad temenom cevi. V tem primeru bomo potrebovali specifično programsko opremo, saj želimo do rezultatov priti na čim bolj avtomatiziran način. Tako bomo za potrebe naloge izdelali program, ki nam bo omogočal iz oblaka točk pridobiti želeno rezultate.
- Poleg meritev s TLS bomo meritve premera cevi opravili z ročnim laserskim razdaljemerom. V tem primeru bo cilj preveriti skladnost rezultatov premera cevi, ki jih dobimo z različno metodo merjenja.
- Statični izračun po predpisu ATV-DVWK-A 127E nam omogoča izračun predvidene spremembe geometrije cevi v vertikalni smeri. Izračunano vrednost spremembe geometrije cevi bomo iz statičnega izračuna primerjali z vrednostjo, ki jo dobimo iz lastnega modela. Cilj bo ugotoviti, kako dobro se naš model napovedi ujema s statičnim izračunom.
- Zadnji cilj magistrskega dela bo izračun padca cevi iz oblaka točk.

Pri pripravi naloge smo si zastavili naslednje hipoteze:

1. *Z večanjem višine nasutja se bo premer v vertikalni smeri manjšal, medtem ko se bo premer v horizontalni smeri večal.*

Iz izrezov oblaka točk bomo z izravnavo elipse pridobili rezultate vrednosti premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri. Prav tako nam bo program izračunal vrednost višine nasutja. Na osnovi dobljenih rezultatov bomo definirali funkcijske zveze, ki napovedujejo spremembo geometrije cevi in jih statistično ovrednotili.

2. *Bolj kot je elipsa podobna krogu, večja bo verjetnost, da bo kot nagnjenosti elipse velik.*

Odgovor na hipotezo bomo dobili iz rezultatov kota nagnjenosti elipse, ki ga bomo dobili z izravnavo elipse skozi točke, ki predstavljajo cev.

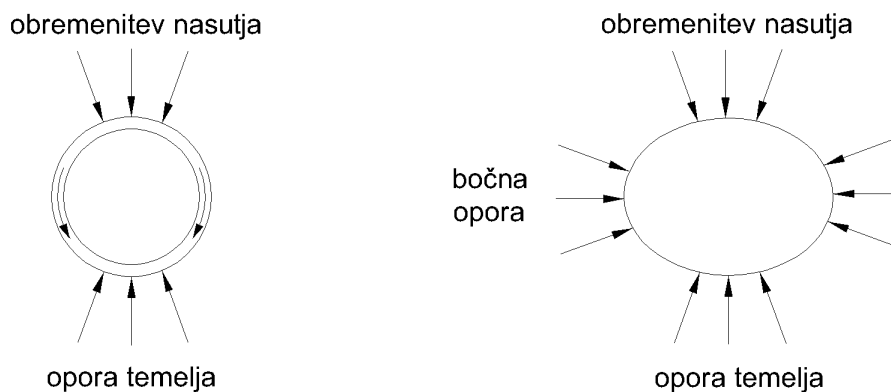
3. *Metoda terestričnega laserskega skeniranja je primerna za zaznavanje sprememb oblike deformabilnih cevi.*

Odgovor na hipotezo bomo poiskali z obdelavo oblakov točk laserskega skeniranja deformabilnih cevi po vgradnji. Izmero bomo izvedli na dveh deloviščih.

1.2 Deformabilne cevi

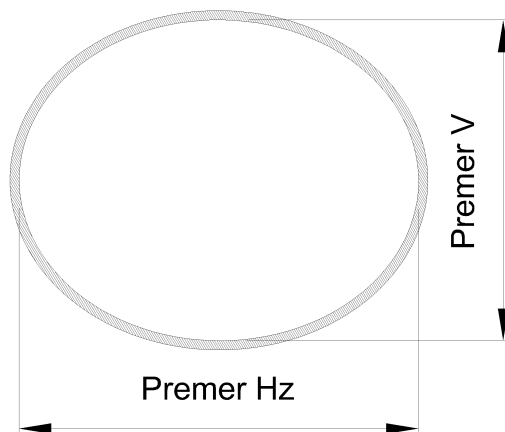
Cevi delimo na toge in deformabilne (fleksibilne) cevi. Toge cevi so zasnovane tako, da prenesejo obremenitev nasipa na cev preko sten cevi na temelj, kjer cev leži. Stena cevi mora biti zato dovolj močna, da prenese težo nasutja. Deformabilna cev je zasnovana na način, da prenese obremenitev nasipa na zemljino ob bok cevi. Ko se obremenitev na cev poveča, se vertikalni premer cevi zmanjšuje, pri tem pa se horizontalni premer cevi povečuje. Večanje premera v horizontalni smeri je omejeno glede na karakteristiko in zbitost zemljine ob straneh cevi (Slika 1). Zemljina mora biti torej dovolj trdna, da se cev občutno ne deformira. Dovoljena količina upogiba cevi je različna glede na vrsto cevi in se giblje med 2 % in 7.5 % (Howard, 1996).

Nemški predpis ATV-DVWK-A 127E za statični izračun določa, da dolgotrajna sprememba geometrije cevi ne sme preseči 6 % premera cevi. Vrednost je definirana z 90 % fraktilo, kar pomeni, da 10 % cevi lahko preseže to vrednost. Pri načrtovanju cevovodov imamo podano pričakovano vrednost vertikalne spremembe geometrije cevi, ki se zgodi takoj ob zasutju, in vrednost, ki se bo zgodila v obdobju 50 let (Bellinghausen in sod., 2000). Nekateri standardi priporočajo, da se sprememba geometrije deformabilne cevi izmeri takoj ob zasutju cevi. Na primer standarda DIN 4033 in DIN EN 16109 priporočata, da preverimo vertikalno spremembo geometrije cevi po celotni dolžini zakopanega cevovoda. Razlog, zakaj bi bilo to smiselno izvesti, je naveden v standardu DIN 4033 kot "*Sprememba premera v vertikalni smeri je merilo kvalitete izdelave, podpore zemljine ob boku cevi in nasutja zemljine nad cevjo*". Kratkoročna dovoljena vrednost spremembe geometrije cevi, ki ne sme preseči 4 %, upošteva tako ustrezne pogoje namestitve cevi kot tudi kritično vrednost dolgoročne spremembe geometrije cevi, ki je 6 % za obdobje 50 let (Bosseler in sod., 1997).



Slika 1: Prikaz delovanja sil pri togih (levo) in deformabilnih ceveh (desno) (Howard, 1996).

V delu bomo pogosto omenjali spremembo geometrije cevi v vertikalni in horizontalni smeri oziroma merjen premer cevi v vertikalni in horizontalni smeri. Ob zasutju cevi teža zemljine povzroči, da se premer cevi v vertikalni smeri zmanjša, medtem ko se v horizontalni smeri premer cevi poveča. Definicijo premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri prikazujemo na sliki 2.



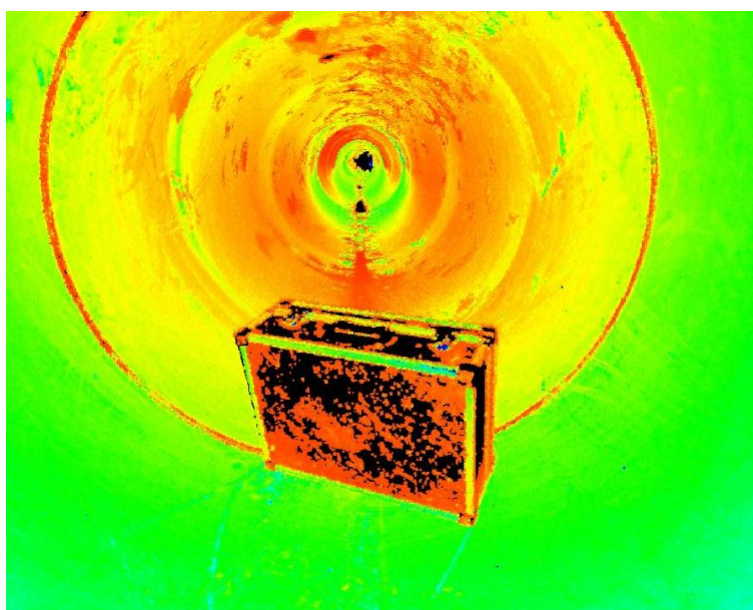
Slika 2: Prikaz spremembe geometrije premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri.

2 METODOLOGIJA

Raziskavo smo pričeli s terenskimi meritvami, ki smo jih opravili s TLS Leica BLK360. Po terenskih meritvah je bilo potrebno podatke, pridobljene s TLS, pripraviti za želeno nadaljnjo analizo. Sprva je bilo potrebno oblake točk registrirati, v lokalnem koordinatnem sistemu enega od stojišč TLS. Za točke, ki bi vplivale na kakovost analize, smo se odločili, da jih ročno izbrišemo. To so bile točke, ki so predstavljale napako v odboju laserskega žarka ter predmete, ki niso bili predmet obravnave. Registracijo oblakov točk, odstranitev točk ter izvoz oblaka točk smo izvedli v programu Cyclone Register 360. Za nadaljnjo obdelavo podatkov oblaka točk smo izdelali program v programskem jeziku Python. S pomočjo lastnega programa smo izračunali vrednosti premerov cevi na želenem mestu ter višine nasutja nad temenom cevi. Pridobljeni podatki so nam omogočili nadaljnje analize, ki smo jih izvedli s statističnim programom SPSS. V nadaljevanju bomo postopke nekoliko podrobneje opisali.

2.1 Priprava delovišča za izvedbo meritev

Pred začetkom meritev je bilo na delovišču potrebno načrtovati potek izvedbe meritve tako znotraj cevi kot nasutja zemljine nad cevjo (v nadaljevanju: teren). Odločili smo se, da bo oblak točk v lokalnem koordinatnem sistemu prvega stojišča skenerja. Program Cyclone Register 360 nam omogoča registracijo oblaka točk z metodo ujemanja ploskev. To v našem primeru pomeni, da na delovišču za registracijo oblakov točk potrebujemo vezne ploskve, ki jih predstavljajo objekti ali nepremični predmeti, ki so vidni med dvema stojiščema. Ker cev v vzdolžni smeri predstavlja linijski objekt z enako geometrijo, potrebujemo za registracijo oblakov dodatni detajl, ki bi nam omogočil registracijo oblakov točk. Zato smo vzdolž cevi postavili kovčke za orodje (Slika 3), ki so nam predstavljali dodatne vezne ploskve. Pri postavitvi kovčkov je bilo pomembno, da so postavljeni dovolj blizu na način, da je med dvema stojiščema vidna enaka vezna ploskev. Prav tako pa je bilo pomembno, da so med seboj različno rotirani z namenom ločevanja različnih veznih ploskev pri registraciji oblakov točk. Pri posnetku terena pa smo za vezne ploskve uporabili objekte in gradbene stroje v okolici. Pomemben pogoj za izbiro je bil ta, da se objekti med izvedbo meritev niso premikali.



Slika 3: Kovček v oblaku točk cevi, ki predstavlja dodatno vezno ploskev za registracijo oblaka točk.

2.2 Meritve

Meritve so bile opravljene v času gradnje kanalizacijskega kolektorja C0, saj je bil takrat omogočen neposreden vstop v cev preko gradbene jame. Izmero smo opravili na dveh odsekih cevi. Prve meritve so bile opravljene na cevi, ki ni betonirana (cev - 1), druge meritve pa na cevi, ki je betonirana (cev - 2). Zajem oblaka točk cevi in terena nad cevjo smo opravili s TLS Leica BLK 360. Poleg zajema oblaka točk smo opravili še meritve premera v vertikalni in horizontalni smeri z ročnim laserskim razdaljemerom Leica Disto pro.

2.2.1 Uporabljen instrumentarij

Pri terenski izmeri smo za zajem oblaka točk uporabili TLS Leica BLK360 (Slika 4). Izmed nabora instrumentov smo se odločili za TLS Leica BLK360 na podlagi njegove preproste uporabe in relativno majhne velikosti, ki je zelo pomembna v okolju z malo prostora. Poleg tega nam instrument na podlagi tehničnih podatkov zagotavlja natančnost, ki zadošča potrebam raziskave. V preglednici 1 so opisani tehnični podatki TLS Leica BLK 360.



Slika 4: Uporabljen TLS Leica BLK 360 v času izmere v cevi.

Preglednica 1: Tehnični podatki terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 (Leica, 2018).

Razred laser	Razred 1
Valovna dolžina laserskega žarka	830 nm
Divergenca laserskega žarka	0.4 mrad
Vidno polje	360° - horizontalno in 300° - vertikalno
Merili doseg	od 0.6 m do 60 m
Hitrost meritev	360 točk/sekundo
Ločljivost	5 mm, 10 mm ali 20 mm na 10 m
Natančnost merjenja dolžin	4 mm pri 10 m in 7 mm pri 20 m
Natančnost 3D	6 mm pri 10 m in 8 mm pri 20 m
Temperaturno delovno območje	+5°C do +40°C

Kot omenjeno je lahko pomanjkljivost laserskega skeniranja napaka v odboju laserskega žarka. Tako nismo bili popolnoma prepričani, kakšno natančnost rezultatov lahko pričakujemo iz oblaka točk TLS. Naj omenimo, da gre za skeniranje v cevi, ki je iz armiranega poliestra (Glassfiber Reinforced Plastics - GRP) in predstavlja gladko ter nekoliko bleščečo površino, ki lahko predstavlja težavo pri odboju laserskega žarka. Zaradi predvidenih težav v odboju laserskega žarka, smo se odločili, da bomo premer v horizontalni in vertikalni smeri izmerili z ročnim laserskim razdaljmerom Leica Disto pro. Tehnični podatki Laice Disto pro so opisani v preglednici 2.

Preglednica 2: Tehnični podatki ročnega laserskega razdaljemera Leica Disto pro (G. Leica, 2008).

Valovna dolžina laserskega žarka	635 nm
Divergenca laserskega žarka	0.4 mrad
Merili doseg	od 0.3 m do 100 m
Natančnost merjenja dolžin	± 3 mm
Temperaturno delovno območje	-10°C do +50°C

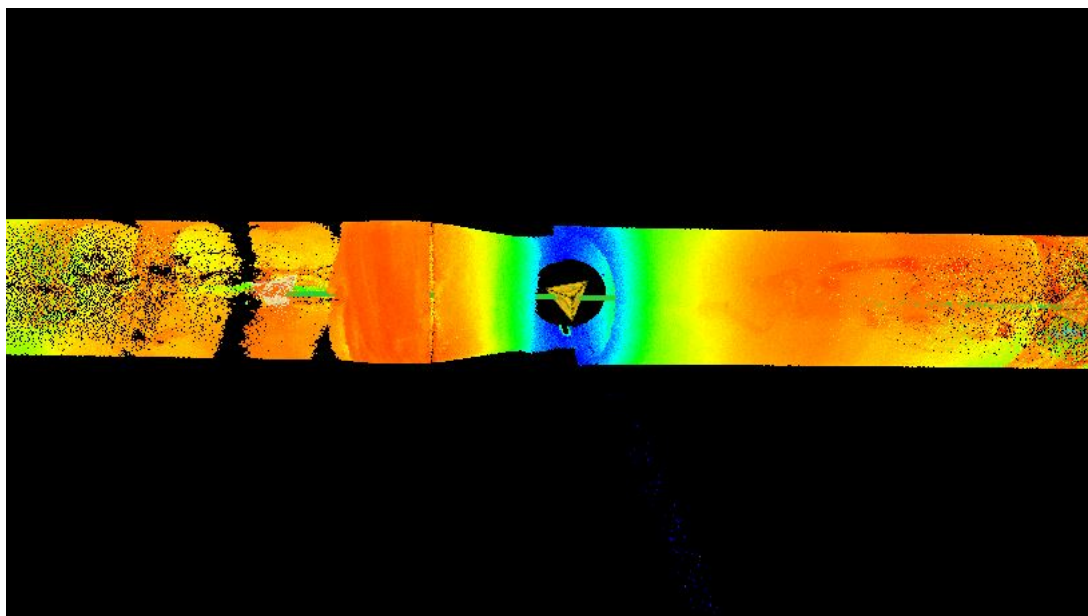
2.3 Registracija oblakov točk

Po izvedbi meritev na terenu smo oblake točk iz TLS prenesli v programsko okolje Cyclone REGISTER 360. Programsko okolje nam omogoča registracijo oblakov točk z metodo ujemanja ploskev. Registracija v programu Cyclone REGISTER 360 je dokaj enostavna. Po uvozu oblakov točk v program sledi registracija oblakov točk po enakem zaporedju, kot je potekalo skeniranje. Torej vsak naslednji oblak točk se registrira glede na prejšnji oblak točk, pri tem pa je pomembno, da imata oblaka točk zadosten odstotek veznih ploskev.

Pri uvozu oblakov točk vsak oblak točk leži poljubno rotiran in zamaknjen v koordinatnem sistemu TLS. Na podlagi vizualne ocene iz oblakov točk prepoznamo vezne ploskve ter nato oblak točk z rotacijo in translacijo premaknemo tako, da se vezne ploskve približno ujemajo v tlorisu in narisu. Zatem program sam izvede postopek prepoznavne veznih ploskev in izvede registracijo oblaka točk. Rezultat je registriran oblak točk ter podana povprečna absolutna napaka (MAE) registracije. Ker smo se odločili, da bo oblak točk v lokalnem koordinatnem sistemu TLS začetnega stojišča, smo vse oblake točk transformirali v koordinatni sistem prvega stojišča.

2.4 Brisanje točk v oblaku TLS

Pri skeniranju v cevi je prišlo do napake v odboju laserskega žarka v območju približno 0.6 m do 1.5 m merjeno od stojišča TLS. Prav tako so bile v oblaku zajete točke, ki predstavljajo vezne ploskve ter osebe, ki izvajajo meritve. Omenjeno bi imelo velik vpliv na rezultat izravnave elipse. Uporaba avtomatskih postopkov iskanja geometrijske oblike (npr. RANSAC, Houghova transformacija) oz. segmentacija, niso uporabni, ker ima cev obliko elipse z ne-konstantnim premerom ter veliko šuma okoli skenirane površine. Zato smo se odločili, da bo najlažje, če točke, ki bi vplivale na rezultat, ročno izbrisemo. Za brisanje točk smo uporabili program Cyclone REGISTER 360, ki nam v registriranem oblaku točk omogoča brisanje točk na vsakem stojišču posebej. Če pogledamo sliko 5, ki nam prikazuje primer napake v odboju laserskega žarka v okolici stojišča, opazimo, da je potrebno za vsako stojišče izbrisati točke v okolici stojišča. Nato na mestih, kjer smo izbrisali točke, prevzamemo točke sosednjih stojišč, kjer ni napake v odboju oziroma napaka v odboju ni opazna. Izbrisali pa smo tudi točke, ki so bile od stojišča oddaljene več kot 10 m, saj niso zanesljive zaradi velikega vpadnega kota laserskega žarka.

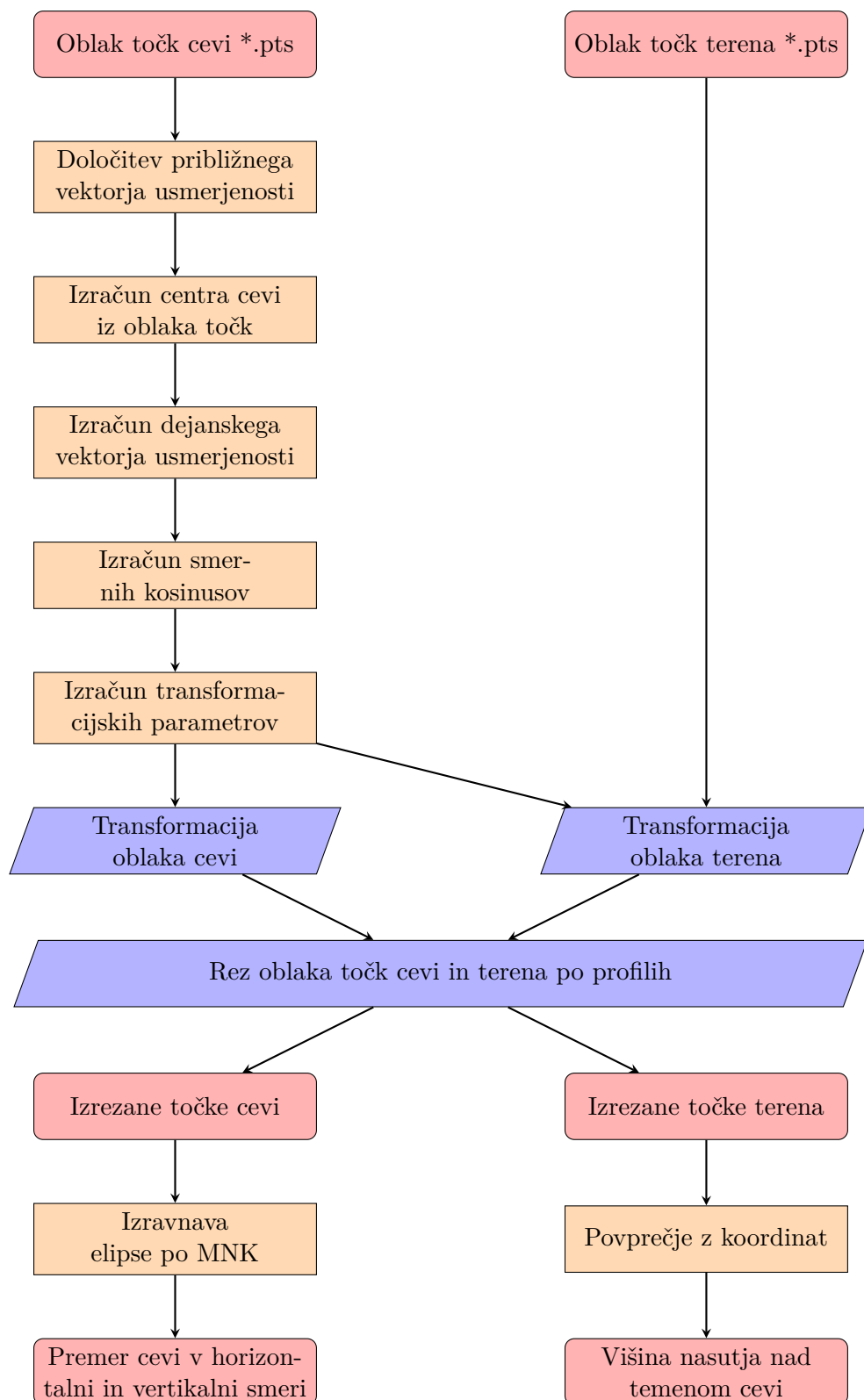


Slika 5: Primer napake v odboju laserskega žarka v cevi.

Iz oblaka točk terena smo za določitev višine nasuja nad temenom cevi uporabili pas terena, ki je bil nad cevjo. S postopkom brisanja točk smo dobili registriran oblak točk, ki je primeren za nadaljnjo obdelavo. Tako smo oblak točk cevi in oblak točk terena posebej izvozili v dve ločeni datoteki *.pts, iz katerih smo v nadaljevanju določili koordinate x, y, z oblaka točk.

2.5 Program za določitev spremembe geometrije cevi iz oblaka točk TLS

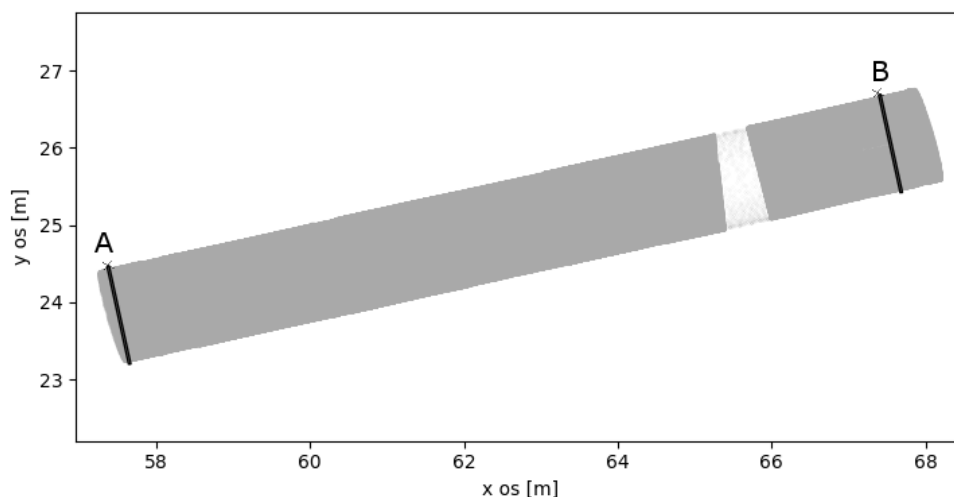
Z namenom pridobivanja podatkov premera cevi v horizontalni in vertikalni smeri ter višine nasutja nad temenom cevi iz oblaka točk TLS smo izdelali lastni program v programskem jeziku Python. Pri razvoju programa smo želeli, da iz oblaka točk na enostaven način pridobimo želene rezultate, ki nam bodo v nadaljevanju služili pri analizah. Način delovanja programa je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Diagram poteka delovanja programa.

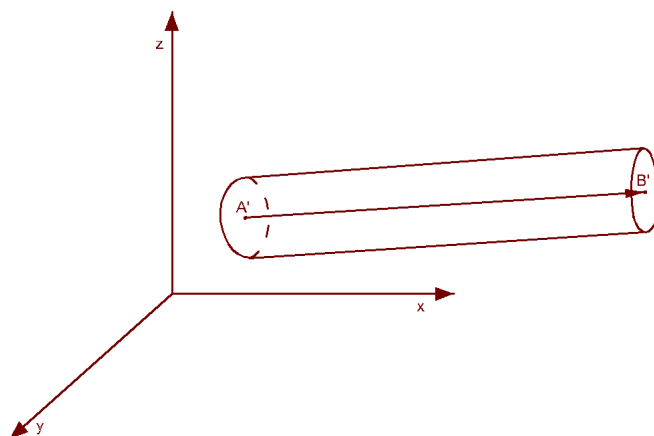
2.5.1 Določitev vektorja usmerjenosti

Po uvozu oblaka točk cevi v lastni program se nam v grafičnem oknu prikaže cev v 2D tlorisnem pogledu. Za lažjo predstavo je grafični prikaz prikazan na sliki 7. Za določitev približnega vektorja usmerjenosti je potrebno na grafičnem prikazovalniku določiti točki A in B, ki predstavljata grobo oceno smeri cevi, vendar le v x, y ravnini. Z določitvijo točk A in B pridobimo koordinati x in y , iz katerih izračunamo približni vektor usmerjenosti v x, y ravnini. Program nato glede na približni vektor usmerjenosti v točkah A in B izračuna pravokotna vektorja. Izračunana vektorja sta nato osnova, na podlagi katere določimo območje izrezovanja točk. Le-tega smo določili kot pravokotnik poljubne širine in dolžine, ki mora biti nekoliko večji od premera cevi. Pravokotnika sta prikazana na sliki 7 s črno črto, vendar sta vidna le kot črti, saj širina pravokotnika v našem primeru meri le 1 cm in ni razločna zaradi izbrane velikosti merila.



Slika 7: Grafični prikaz določitve vektorja usmerjenosti.

Na podlagi točk, ki so znotraj pravokotnika v ravnini x, z smo izravnali parametre elipse z uporabo MNK. Rezultat izravnave elipse je center elipse označen z A', B' (Slika 8). S pomočjo točk A' in B' izračunamo dejanski vektor usmerjenosti $\overrightarrow{A'B'}$, ki sovpada s centrom osi oblaka točk cevi.



Slika 8: Prikaz dejanskega vektorja usmerjenosti cevi v prostoru.

2.5.2 Translacija in rotacija oblaka točk

Zaradi lažje obdelave oblaka točk cevi smo se odločili, da bo os cevi sovpada z x koordinatno osjo ter, da bo začetek osi v koordinatnem izhodišču. Da to dosežemo, je potrebno oblak točk translirati in rotirati. Sprva smo oblaka točk cevi in terena translatorno premaknili na način, da vsem koordinatam točk, ki predstavljajo oblak točk cevi in terena, odštejemo koordinato A' , ki predstavlja center na začetku cevi (Slika 8). Nato sledi izračun smernih kosinusov, ki jih predstavljajo koti vektorja usmerjenosti $\overrightarrow{A'B'} = (A'B'_1, A'B'_2, A'B'_3)$, glede na vektorje standardne baze. Smerne kosinuse smo izračunali po enačbi (1) (Orel, 2019).

$$\cos \alpha = \frac{A'B'_1}{\|A'B'\|}, \quad \cos \beta = \frac{A'B'_2}{\|A'B'\|}, \quad \cos \gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{A'B'_3}{\|A'B'\|} \quad (1)$$

Nato smo zapisali rotacijsko matriko.

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Za naš primer rotacije smo prevzeli, da je kot $\alpha = 0$, saj ne želimo, da se cev rotira okoli x osi. Rotacija okoli x osi bi povzročila, da bi se cev zavrtela okoli svoje vzdolžne osi, kar bi privedlo do rezultatov, ki jih ne želimo (premera vertikalno in horizontalno ne bi bila določena za dejanski položaj cevi).

V prostoru skupna rotacijska matrika predstavlja produkt vseh treh Eulerjevih rotacij.

$$\mathbf{R}_{3D} = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

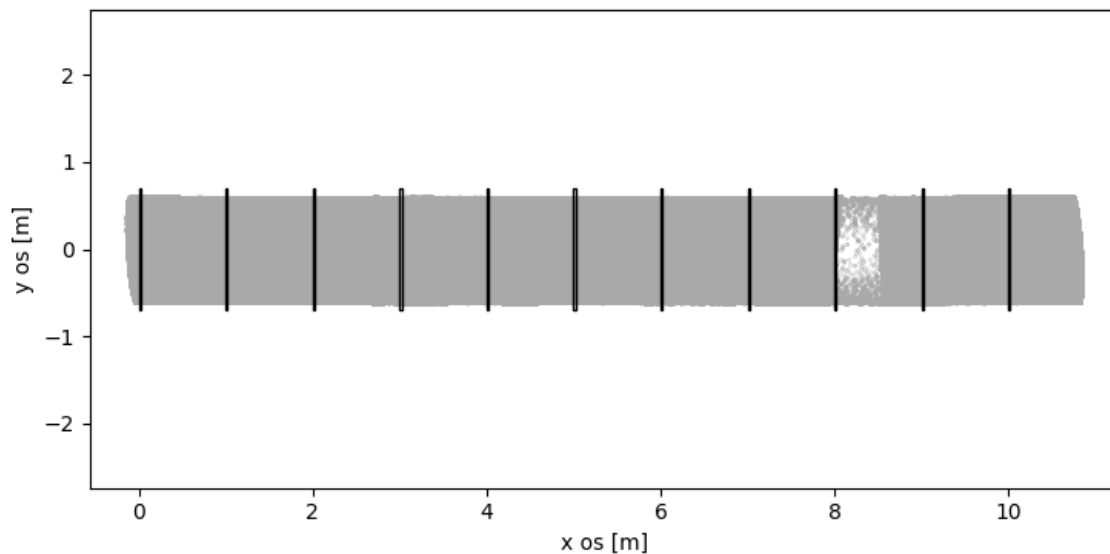
Oblaka točk cevi in terena z rotacijsko matriko dobljeno v enačbi (3) rotiramo tako, da os cevi sovpada z x osjo.

$$\begin{bmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

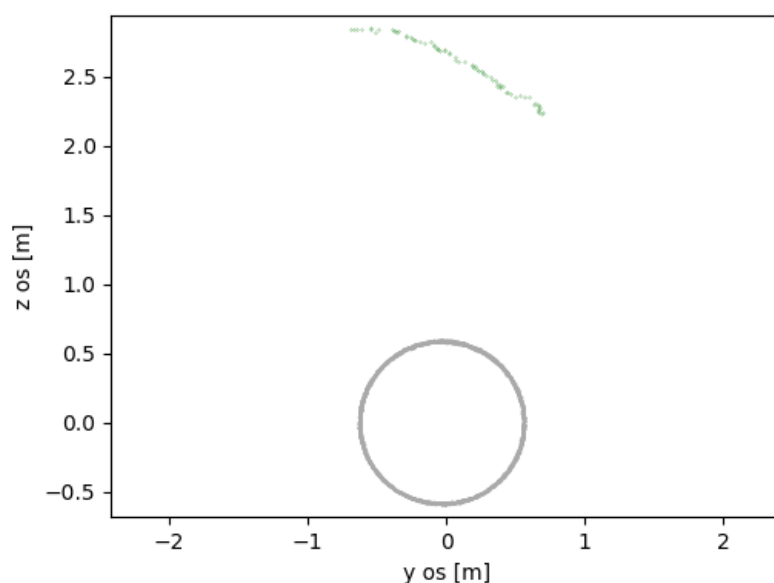
2.5.3 Rez oblaka točk cevi in terena po profilih

Ko oblaka točk cevi in terena ustrezno rotiramo in transliramo, je potrebno iz oblaka točk izrezati manjše izseke točk po profilih vzdolž cevi. Program deluje na način, da koraku, ki ga poljubno določimo, priredi pravokotnik. Širino pravokotnikov poljubno nastavimo in je odvisna od gostote oblaka točk. Torej večja kot je gostota, manjšo širino pravokotnika lahko izberemo in s tem vplivamo na število izbranih točk. Na sliki 9 je prikazan primer oblaka točk cevi v x, y ravnini s pravokotniki, ki služijo za izrez točk.

Točke cevi in terena, ki so znotraj pravokotnika, se izločijo. Primer izločenih točk v y, z ravnini je prikazan na sliki 10, kjer točke sive barve pripadajo cevi, točke zelene barve pa pripadajo terenu. Izbranim točkam, ki pripadajo cevi, nato izravnamo elipse po MNK. Točke, ki pripadajo terenu, pa uporabimo za izračun povprečne višine terena. Algoritem za izravnavo elipse je predstavljen v poglavju 2.5.4, način določitve višine terena pa v poglavju 2.5.5.



Slika 9: Primer oblaka točk cevi s pravokotniki koraka 1 m in širine 1 cm, ki služijo za izrez točk.



Slika 10: Primer prečnega izreza točk cevi v sivi barvi in terena v zeleni barvi.

2.5.4 Izravnava elipse po MNK

V nadaljevanju tega poglavja bomo podrobneje opisali delovanje algoritma za izravnavo elipse po MNK. Elipso smo izravnali iz točk, ki jih predhodno izrežemo iz oblaka točk cevi.

Na osnovi literature smo se odločili opisati spremembo geometrije cevi z elipso. Avtorji Saaddin in sod. (2015) predstavijo, da so bile deformabilne cevi zasnovane na način, da se manjšanje premera v vertikalni smeri kompenzira z večanjem premera v horizontalni smeri. Torej lahko govorimo, da se cev deformira v obliki elipse. Algoritem izravnave elipse je povzet po članku Hal in sod. (1999).

Elipsa je poseben primer splošne stožnice, ki je lahko opisana kot druga stopnja polinoma.

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (5)$$

Mejimo jo s splošno omejitvijo, ki zagotavlja elipso

$$b^2 - 4ac = 0, \quad (6)$$

kjer so a, b, c, d, e in f koeficienti elipse in (x, y) koordinate točk, ki ležijo na območju elipse. Polinom $F(x, y)$ se imenuje algebraična razdalja točke (x, y) do dane krivulje. Z uvedbo vektorja

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= [a, b, c, d, e, f]^T \\ \mathbf{x} &= [x^2, xy, y^2, x, y, 1] \end{aligned} \quad (7)$$

lahko enačbo (7) zapišemo v vektorski obliki

$$F_a(X) = x \cdot a = 0 \quad (8)$$

Izravnava splošne stožnice skupine točk $(x_i, y_i), i = 1 \dots N$ lahko izvedemo z minimiziranjem vsote kvadratov algebraične razdalje od točke do stožnice, ki je predstavljena s koeficientom a :

$$\begin{aligned} \min_a \sum_{i=1}^N F(x_i, y_i)^2 &= \min_a \sum_{i=1}^N F(x_i)^2 \\ &= \min_a \sum_{i=1}^N F(x_i \cdot a)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Problem enačbe (9) je lahko rešljiv direktno z metodo najmanjših kvadratov, vendar rezultat takšne izravnave vodi v to, da splošna stožnica ni nujno elipsa.

Za zagotovitev natančne rešitve elipse, je potrebno omejiti enačbo (6). Ker $a \cdot a$ predstavlja enako stožnico, kot a za vsak $a \neq 0$, je potrebno enačbo (6) omejiti, na način, ki prisili rešitev, da opiše elipso.

$$4ac - b^2 = 1 \quad (10)$$

Problem izravnave parametrov elipse lahko zapišemo kot

$$\min_a \|\mathbf{D}\mathbf{a}\|^2 \quad \text{spremenimo v} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} = 1 \quad (11)$$

Pri tem je oblika matrike $\mathbf{D}$ velikosti $N \times 6$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^2 & x_N y_N & y_N^2 & x_N & y_N & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

in predstavlja minimiziranje najmanjših kvadratov enačbe (9) in omejeno matriko $\mathbf{C}$ velikosti 6×6 ,

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

iz izraza omejitve enačba (10). Problem minimiziranja v enačbi (11) lahko rešimo z minimiziranjem omejitev po metodi najmanjših kvadratov. Z uporabo Lagrangejevih multiplikatorjev dobimo naslednje pogoje za optimalno rešitev $\mathbf{a}$

$$\mathbf{S}\mathbf{a} = \lambda\mathbf{C}\mathbf{a} \quad (14)$$

kjer je $\mathbf{S}$ razpršena matrika velikosti 6 x 6

$$\mathbf{S} = \mathbf{D}^T\mathbf{D} \quad (15)$$

in operator $\mathbf{S}$ pomeni vsoto

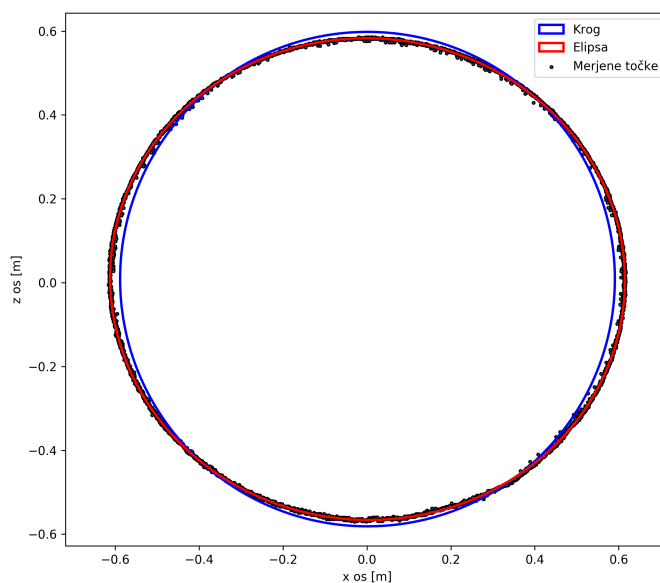
$$S_{x^a y^b} = \sum_{i=1}^N x_i^a y_i^b \quad (16)$$

Sistem enačbe (14) je rešljiv z uporabo posplošenih lastnih vektorjev. Pri tem obstaja od 6 pravih rešitev $(\lambda_j, \mathbf{a}_j)$, vendar zaradi

$$\|\mathbf{D}\mathbf{a}\|^2 = \mathbf{a}^T\mathbf{D}^T\mathbf{D}\mathbf{a} = \mathbf{a}^T\mathbf{S}\mathbf{a} = \lambda\mathbf{a}^T\mathbf{C}\mathbf{a} = \lambda \quad (17)$$

iščemo lastni vektor $\mathbf{a}_k$, ki ustreza minimalni pozitivni lastni vrednosti λ_k . Na koncu zagotovimo $\mathbf{a}_k^T\mathbf{C}\mathbf{a}_k$ in dobimo rešitev problema minimizacije enačbe (11). To nam predstavlja najboljšo rešitev izravnave parametrov elipse za dane točke.

Na spodnji sliki 11 imamo prikazan grafični primer izravnane elipse, kjer nam črne pike predstavljajo merjene točke, s pomočjo katerih določimo elipso, ki je prikazana z rdečo barvo. Krog v modri barvi pa predstavlja referenčni premer cevi, ki znaša 1.1794 m.



Slika 11: Primer izravnane elipse po MNK (rdeča barva), izrezane točke (črna barva) in krog s premerom po podatkih proizvajalca (modra barva).

2.5.5 Izračun višine nasutja nad temenom cevi

Za izračun višine nasutja nad temenom cevi smo uporabili oblak točk terena, iz katerega smo izrezali točke, ki predstavljajo teren. Te točke ležijo v istem prečnem prerezu kot točke, ki jih uporabimo za določanje elipse. Primer je prikazan na sliki 10.

Višino nasutja nad temenom cevi smo izračunali iz povprečja izrezanih točk terena, kjer smo uporabili koordinate z , ki v našem primeru predstavljajo višino. Pri tem je bilo pomembno, da smo pri ročni odstranitvi točk odstranili točke, ki ne predstavljajo terena oziroma občutno odstopajo iz površine terena. Naj omenimo, da metoda določitve višine ni najbolj natančna, vendar je za naše potrebe zadovoljiva.

2.6 Ocena natančnosti oblaka točk

Ključnega pomena pri odločitvi, kdaj sprememba parametra predstavlja značilni premik, je kakovostna ocena natančnosti izravnanih parametrov (Kregar, 2016). Premik mora biti statistično značilno večji od ocenjene natančnosti premikov, da ga lahko potrdimo (Savšek-Safić in sod., 2007). V splošnem velja, če je premik večji oziroma enak trikratniku natančnosti določitve premika, lahko potrdimo značilni premik (Koler in sod., 2010; Savšek-Safić in sod., 2006).

V našem delu smo natančnost ocenili na način, da smo iz registriranega oblaka točk uporabili tri pravokotne izseke, skozi katere smo po MNK izravnali ravnino. Oblak točk, ki ga uporabimo v izravnavi, je registriran na osnovi treh stojišč in predstavlja fasado objekta, za katero lahko predpostavimo, da predstavlja relativno ravno ploskev. Iz oblaka točk smo določili tri poljubne pravokotnike, katerih velikost in število točk, ki jih izbran pravokotnik vsebuje, prikazujemo v preglednici 3. Izbranim točkam smo nato v programu RISCAN PRO izravnali ravnino po MNK. S pomočjo izravnave smo dobili ocenjeno natančnost izravnane ravnine, kjer je povprečna vrednost standardnega odklona treh izravnanih ravnin znašala 2 mm.

Preglednica 3: Določitev natančnosti merjenja iz oblaka točk TLS.

	Velikost pravokotnika [m]	Število točk	σ [mm]
Pravokotnik 1	3.35×0.27	9263	2.3
Pravokotnik 2	1×1.3	9391	2
Pravokotnik 3	1.31×0.9	21100	1.7
Povprečje $\bar{\sigma}$			2

2.7 Izračun padca cevi

Za izračun padca cevi na določenem odseku smo uporabili dejanski vektor usmerjenosti. Način kako priti do dejanskega vektorja usmerjenosti smo opisali v podpoglavju 2.5.1. Izračunani dejanski vektor nam ponazarja, kako os cevi na izbranem mestu leži v prostoru. Z uporabo lastnih kosinusov, katerih izračun je razložen v podpoglavju 2.5.2, smo izračunali kote, ki jih dejanski vektor usmerjenosti oklepa s koordinatnimi osmi. V tem primeru nas je zanimal le kot γ (enačba 1), ki ga dejanski vektor usmerjenosti oklepa z xy ravnino. Padec cevi je torej izračunan glede na center izravnane elipse in ne glede na najnižjo točko v cevi. Pri tem nastane problem, če se med dvema zaporednima točkama premer cevi zelo spremeni, se bo spremenil tudi padec.

«Ta stran je namenoma prazna.»

3 TERENSKE MERITVE IN OBDELAVA PODATKOV

3.1 Terenske meritve

Terenske meritve so bile opravljene na območju gradnje kanalizacijskega kolektoja C0 Medvode - Sneberje. Ker nas je zanimalo, kako se spremeni geometrija cevi v odvisnosti od načina vgradnje, smo meritve opravili na dveh območjih. Tam, kjer cev ni betonirana smo meritev opravili dne 2. 10. 2018, na območju, kjer je cev betonirana pa dne 25. 10. 2018.

Ker nas je zanimala sprememba geometrije cevi ob zasutju, je bilo potrebno skozi gradbeno jamo vstopiti v cev. Meritve smo v obeh primerih opravili od položaja, kjer smo ocenili, da je nasutje nad cevjo največje ter do trenutnega konca položene cevi. V cevi 1 in 2 smo tako obravnavali približno 70 - 80 metrov cevi. Meritve smo nato nadaljevali skozi gradbeno jamo po terenu nad cevjo in s tem dobili posnetek terena, ki nam bo služil za določitev višine nasutja nad temenom cevi.

Pri izvedbi meritev s TLS v cevi, ki predstavlja gladko in nekoliko svetlečo površino, smo predvidevali, da je možna velika verjetnost napake v odboju laserskega žarka. Odločili smo se, da bo v prvi izmeri v cevi - 1 razdalja med posameznimi stojišči vzdolž cevi na približno vsake 3 m. Pri tem smo gostoto rastra skeniranja nastavili na 5 mm na 10 m.

Z rezultati prve terminske izmere smo ugotovili, da je v oddaljenosti od 0,6 m do 1,5 m od stojišča skenerja prišlo do napake v odboju laserskega žarka ter, da je bila gostota skeniranega oblaka točk za naše potrebe prevelika. Odločili smo se, da v drugi terminski izmeri razdaljo med stojišči povečamo na 6 m ter zmanjšamo gostoto skeniranja na 10 mm na 10 m. Z zmanjšanjem gostote skeniranja in večjo razdaljo med stojišči dobimo pri registraciji oblaka redkejši oblak točk ter posledično manjšo količino podatkov v primerjavi s prvo izmero. V preglednici 4 je prikazano število stojišč ter dolžina izmerjene cevi.

Preglednica 4: Število stojišč ter obravnavana dolžina cevi.

	Stojišč v cevi	Stojišča skupaj	Dolžina merjene cevi [m]
Prva izmera - cev 1	32	40	85
Druga izmera - cev 2	14	23	70

Poleg TLS smo meritve premera cevi v horizontalni in vertikalni smeri opravili še z ročnim laserskim razdaljemerom Leica Disto pro. Meritev premera cevi smo opravili vzdolž obravnavanega sklopa cevi na način, da smo na začetku, sredini in koncu šest metrov dolge cevi pomerili premer cevi v horizontalni in vertikalni smeri. Namen ročnih meritev je, da lahko primerjamo rezultate premera cevi določenih iz oblaka točk TLS, z meritvami, ki smo jih opravili z ročnim laserskim razdaljemerom.

3.2 Obdelava podatkov

Obdelavo merjenih podatkov TLS smo opravili v programu Cyclone REGISTER 360, kjer smo oblake točk registrirali ter registriranemu oblaku odstranili odvečne točke. Podrobnejši opis, kako smo se lotili registracije oblakov in brisanja točk je razložen v poglavju 2.3 in 2.4. Pri registraciji točk nam program za vsako povezavo med dvema oblakoma točk, ki smo jih registrirali, poda povprečno absolutno napako (MAE) registracije ter vrednost prekrivanja oblaka točk. Podatki o registraciji za cev - 1 so prikazani v preglednici 5. Prvih 26 povezav nam predstavlja

podatke o natančnosti registraciji v cevi. Iz pregleda MAE opazimo, da le pri povezavi 14 dosežemo nekoliko visoko vrednost 15,3 mm (kljub 85 % prekrivanju oblakov točk), v splošnem pa srednja vrednost MAE v cevi znaša 4,09 mm. Povezave od 27 do 35 predstavljajo registrirane oblake točk zunaj cevi. Pri registraciji oblaka točk zunaj cevi ni potrebna tako visoka natančnost registracije kot v cevi, zato so dobljene vrednosti MAE več kot zadovoljive.

Preglednica 5: Ocena natančnosti registracije za cev - 1.

Povezava	Stojišče 1	Stojišče 2	Prekrivanje [%]	MAE [mm]
1	1	2	86	4.64
2	2	3	95	3.85
3	3	4	100	1.57
4	4	5	89	2.20
5	5	6	96	4.68
6	6	7	93	4.23
7	7	8	95	2.04
8	8	9	80	3.55
9	9	10	94	2.20
10	10	11	94	1.77
11	11	12	96	4.73
12	12	13	91	3.27
13	13	14	73	8.54
14	14	15	86	15.34
15	15	16	81	7.31
16	16	17	89	3.66
17	17	18	86	1.42
18	20	21	49	1.90
19	18	19	86	1.45
20	19	20	77	1.42
21	21	23	76	4.77
22	23	25	70	5.17
23	25	26	73	3.91
24	26	27	46	4.81
25	27	28	62	3.52
26	28	30	65	3.77
Skupna ocena*			66	4.09
27	30	31	99	3.09
28	34-1	35-1	39	8.20
29	31	32-1	70	3.54
30	32-1	34-1	54	5.06
31	38	39	47	5.51
32	36	38	54	5.48
33	36	37	37	7.94
34	34-1	36	35	5.76
35	39	40	27	5.01
Skupna ocena**			74	4.89

Opombe: * -Registrirana stojišča, ki so v cevi. ** - Registrirana stojišča, ki so zunaj cevi. MAE = povprečna absolutna napaka

Za cev - 2 prikazujemo podatke o registraciji v preglednici 6. Opazimo, da je v tem primeru nekoliko manj stojišč kot v primeru cev - 1, saj je bila razdalja med stojišči večja. Pri pregledu MAE za povezave od 1 do 16, ki predstavljajo povezave med stojišči v cevi, ni opaziti, da bi katera povezava posebno izstopala od povprečja. Povprečna vrednost MAE je tako 4,25 mm in je znotraj pričakovanih vrednosti. Povezave od 20 do 28 predstavljajo stojišča zunaj cevi.

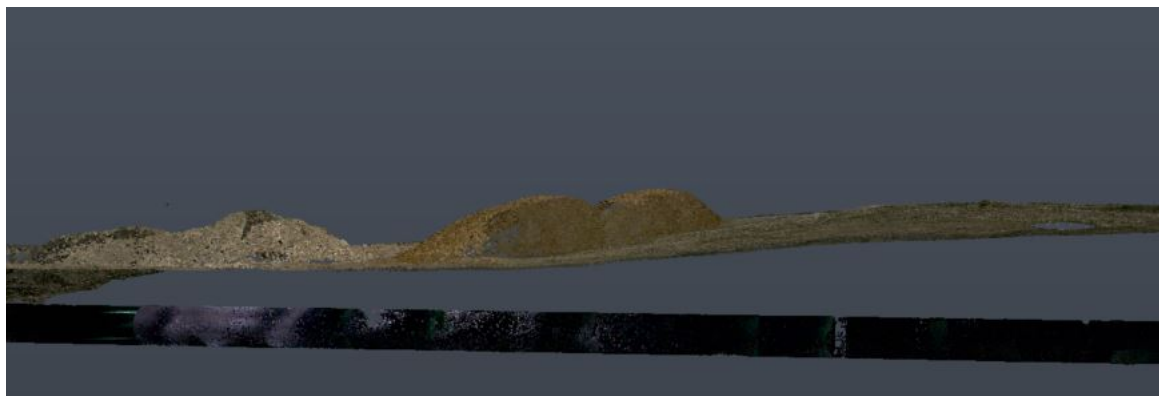
Preglednica 6: Ocena natančnosti registracije za cev - 2.

Povezava	Stojišče 1	Stojišče 2	Prekrivanje [%]	MAE [mm]
1	1	2	82	4.16
2	2	3	73	3.30
3	3	4	88	3.88
4	4	5	74	4.07
5	5	6	53	4.43
7	6	7	76	4.40
8	7	8	73	4.35
9	8	9	82	4.20
10	9	10	65	4.39
11	9	11	18	3.39
14	11	12	44	5.25
15	12	13	24	4.76
16	13	14	53	5.61
Skupna ocena*			62	4.25
20	15	16	78	4.84
21	16	17	58	6.63
22	14	15	79	5.07
23	17	18	29	8.96
24	18	19	38	8.57
25	19	20	22	8.83
26	20	21	7	8.89
27	21	22	25	0.00
28	22	23	8	8.47
Skupna ocena**			52	5.81

Opombe: * -Registrirana stojišča, ki so v cevi. ** - Registrirana stojišča, ki so zunaj cevi. MAE = povprečna absolutna napaka

3.3 Rezultati obdelave podatkov

S postopkom registracije oblakov točk in odstranitvijo točk, ki bi vplivale na rezultate, dobimo oblak točk cevi in terena. Primer oblaka točk za cev - 1 je prikazan na sliki 12. Obdelan oblak nato ločeno za cev in teren izvozimo iz programa Cyclone REGISTER 360 v datoteko s končnico **pts*. Zapisana datoteka vsebuje podatke o koordinatah x, y, z oblaka točk.



Slika 12: Primer oblaka točk cev - 1.

Obdelan oblak točk na posameznem delovišču vsebuje različno število točk. V preglednici 7 je prikazano število točk za posamezen oblak točk na delovišču cev - 1 in cev - 2. Kot že omenjeno smo v cevi - 2 skenirali z manjšo gostoto, med stojišči pa je bila večja razdalja. To pa se občutno pozna na številu točk. Pri približno enaki razdalji obravnavane cevi je število točk v cevi - 2 za skoraj osem krat manjše od točk v cevi - 1. Ker je bila gostota oblaka točk pri cevi - 2 manjša, je bilo pri izrezu točk iz oblaka točk potrebno upoštevati manjšo gostoto oblaka točk. Če smo pri cevi - 1 uporabili rezino širine 1 cm, je bila ta širina pri cevi - 2 premajhna, saj smo posledično dobili zelo malo točk, s pomočjo katerih izravnamo elipso. Želeli smo, da je vzorec točk večji od 200, zato smo v primeru cev - 2 uporabili pravokotnik širine 2 cm in s tem zagotovili, da je vzorec izrezanih točk večji od 200.

Preglednica 7: Število točk v oblaku točk cevi in terena za delovišči cev -1 in cev -2.

Delovišče	Število točk - cev	Število točk - teren
Cev - 1	30,047,955	1,444,169
Cev - 2	4,260,249	1,119,734

4 REZULTATI

V nadaljevanju tega poglavja predstavljamo rezultate meritev spremembe geometrije cevi. V prvem podpoglavju 4.1 bodo prikazani rezultati analize cevi, ki ni vgrajena in prosto leži na terenu. Analiza nevgrajene cevi nam je predstavljala referenco za nadaljnje analize na vgrajenih ceveh. V podpoglavju 4.2 sledi prikaz rezultatov analize spremembe geometrije ne betonirane cevi (cev - 1) ter v podpoglavju 4.3 spremembo geometrije betonirane cevi (cev - 2). V posameznem podpoglavju so dodatno predstavljeni naslednji rezultati:

- premer elipse v vertikalni in horizontalni smeri, ter višina nasutja nad temenom cevi,
- ugotovitve, ali se premer cevi spreminja z višino nasutja ter kako se spreminja,
- primerjava rezultatov dobljenih iz oblaka točk ter rezultatov pridobljenih z ročnim laserskim razdaljemerom.

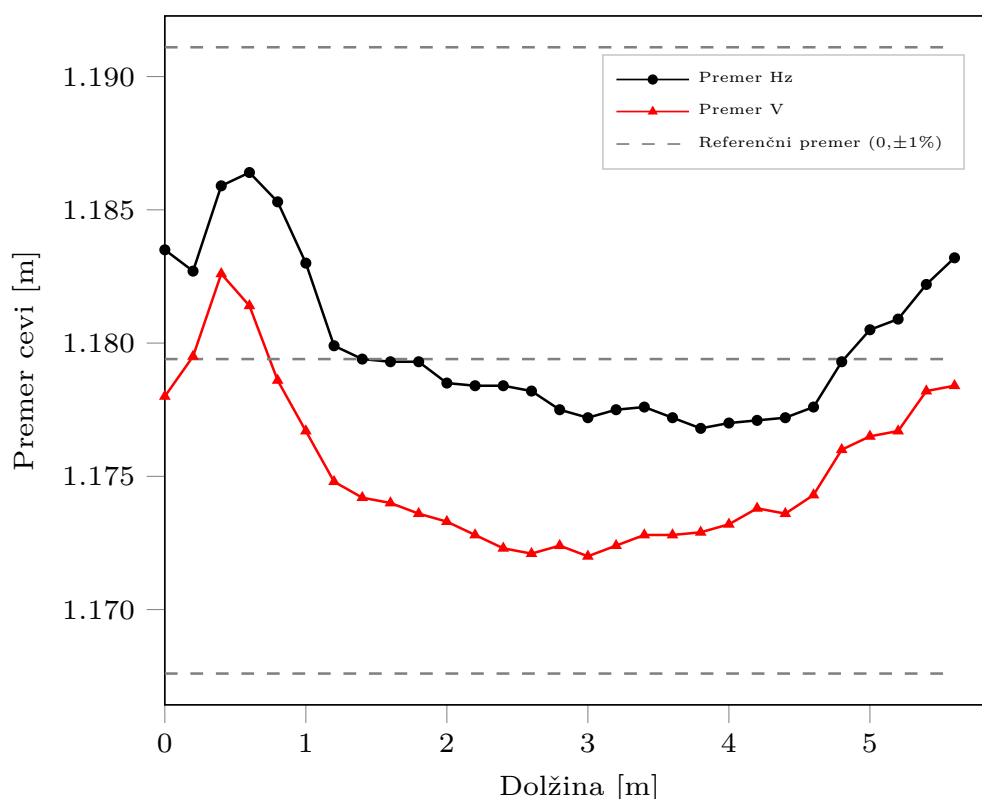
V podpoglavju 4.5 nas je zanimalo, kako dobro se naš lastni model napovedi spremembe geometrije cevi iz podpoglavja 4.1 ujema s statičnim izračunom po predpisu ATV-DVWK-A 127E. V ta namen smo za območje višine nasutja od 1 m do 7 m pripravili statične izračune po predpisu ter jih primerjali z vrednostmi iz lastnega modela.

Ker imamo z lastnim programom tudi možnost preveriti kolikšen je padec cevi, smo v poglavju 4.6 na izbranem odseku cevi iz oblaka točk cevi preverjali, kolikšen padec ima cev na poljubno izbranem odseku.

4.1 Analiza ne vgrajene cevi

V namen nekoliko boljšega vpogleda v kakovost skeniranja obravnavanih cevi in rezultatov, ki jih bomo analizirali v primeru vgrajenih cevi, smo najprej analizirali cev, ki še ni vgrajena. To je 6 m dolga GRP DN1200 cev, ki prosto leži na terenu ter nanjo ne deluje nobena obremenitev. Oblak točk cevi smo zajeli na način, da smo TLS postavili na začetku in koncu cevi ter nato dobljena oblaka točk registrirali. Registriran oblak točk cevi, smo analizirali na način, da smo na vsakih 20 cm izravnali elipso. Elipso smo izravnali iz izbranih točk, ki so padle v pravokotnik s širino 2 cm.

Na spodnji sliki 13 imamo prikazane rezultate izravnane elipse, ki nam ponazarja premer cevi v vertikalni smeri (rdeča barva) in horizontalni smeri (črna barva). S sredinsko sivo črtkano črto je prikazan referenčni premer 1.179 m, medtem ko zgornja in spodnja črtkana črta prikazujeta $\pm 1 \%$ dopustne spremembe geometrije, ki jo ima proizvajalec pri izdelavi cevi. Iz slike 13 lahko vidimo, da se izračunane vrednosti gibljejo znotraj dovoljenega odstopanja. Tako maksimalna vrednost za vertikalni premer znaša 1.183 m ter minimalna 1.172 m. V primeru horizontale pa je maksimalna vrednost 1.186 m in minimalna 1.178 m. Če pogledamo razlike med horizontalnimi in vertikalnimi vrednostmi, se le-te gibljejo med 3 mm in 7 mm. Opazimo, da kljub temu, da cev ni obremenjena, se cevi spremeni geometrija na način, da je premer v vertikalni smeri manjši od premera v horizontalni smeri. Naj omenimo, da je takšna sprememba geometrije cevi pričakovana ob obremenitvi cevi. Tako lahko predvidevamo, da se cevi nekoliko spremeni geometrija že pod vplivom lastne teže in različne temperature cevi, ki je posledica različnega osončenja. Poleg tega lahko iz slike 13 opazimo, da so najmanjše vrednosti nekje na sredini cevi, medtem ko se vrednosti večajo na začetku in koncu cevi. Kot smo že omenili je oblak točk v tem primeru registriran iz stojišč, ki sta bili na začetku in koncu cevi. Dobljene vrednosti bi tako lahko pripisali težavam z odbojem laserskega žarka. V ta namen smo izvedli dodatno analizo, ki bi to lahko potrdila.



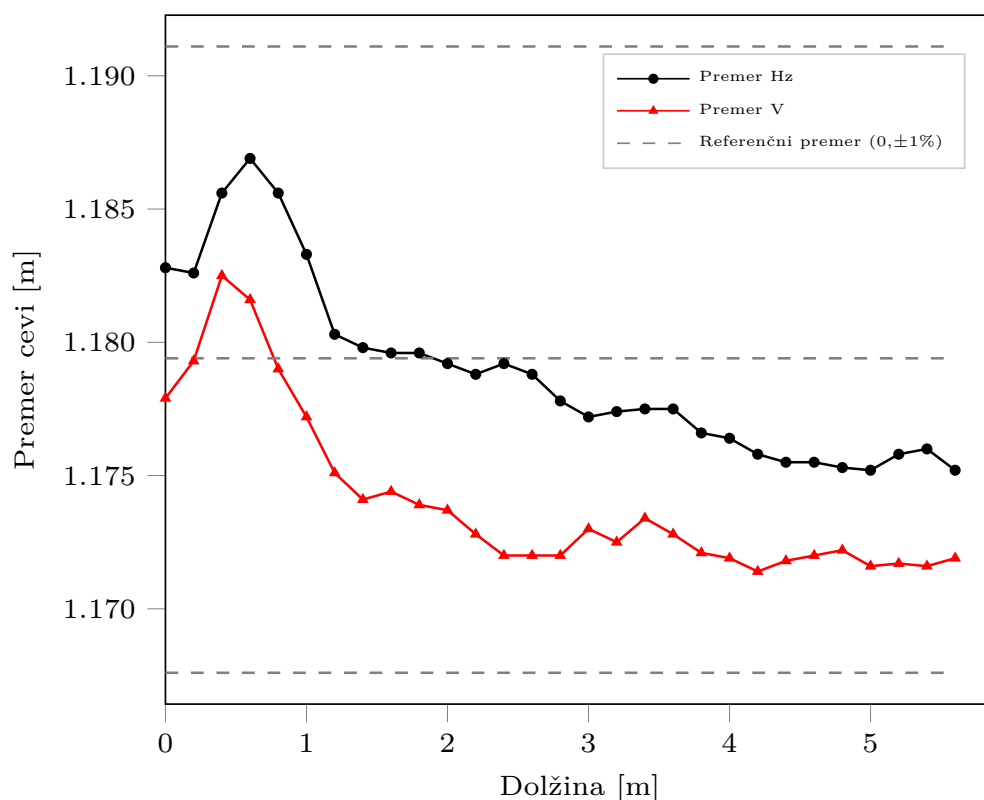
Slika 13: Rezultat izravnane elipse, ki prikazuje premer cevi v vertikalni in horizontalni smeri pri nevgrajeni cevi.

Dodatna analiza, ki bi potrdila ali ima stojišče skenerja vpliv na rezultate premera cevi, smo opravili na način, da oblak točk ne vgrajene cevi analiziramo za vsako stojišče posebej. Torej imamo dva oblaka točk, ki predstavljata isto cev, pri tem ima prvi oblak točk stojišče skenerja na začetku cevi drugi pa na koncu cevi.

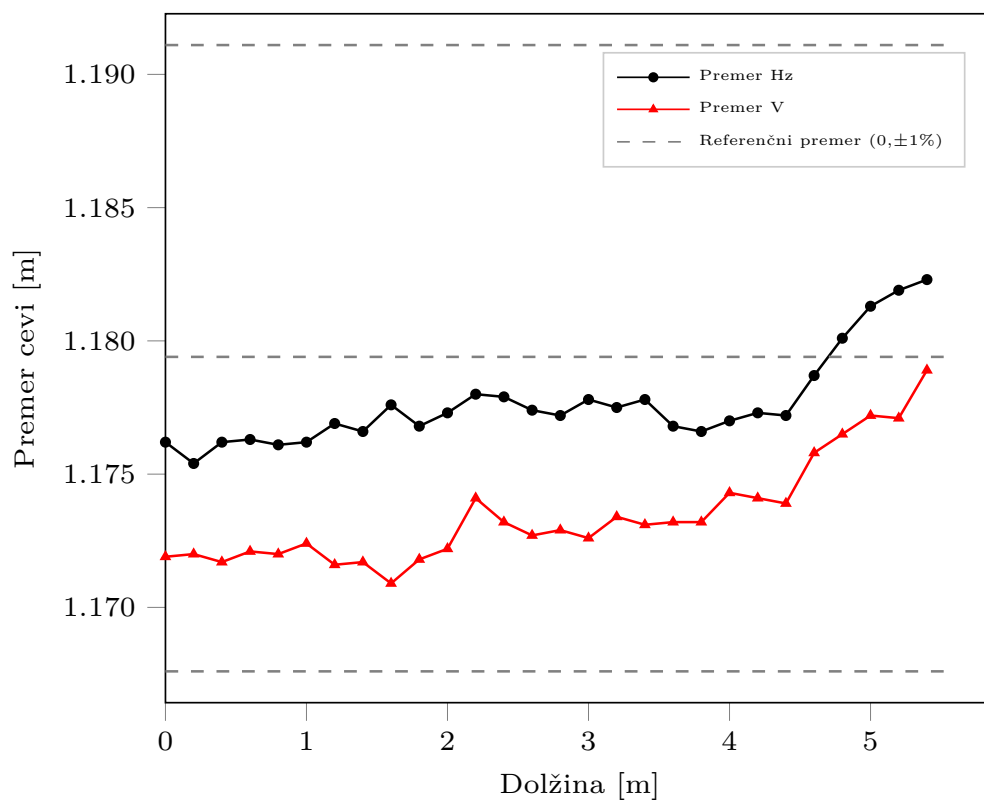
Rezultate premera cevi za prvi oblak točk cevi, kjer je stojišče skenerja na začetku cevi prikazujemo na sliki 14. Iz slike lahko opazimo, da se z oddaljenostjo od stojišča skenerja, vrednost premera manjša.

Na sliki 15 prikazujemo rezultate premera cevi za oblak točk cevi, kjer je stojišče skenerja na koncu cevi. Enako tudi v tem primeru lahko opazimo trend, da se vrednosti premera cevi z oddaljenostjo od stojišča skenerja manjšajo.

Tako smo z grafi na sliki 14 in 15 dokazali, da položaj stojišča skenerja vpliva na dobljene rezultate premera cevi. Če primerjamo z rezultati na sliki 13 vidimo, da registracija oblaka točk vpliva na dobljene rezultate. Problem nastane, ker gostota oblaka točk z oddaljenostjo od skenerja pada. Z registracijo oblakov točk, pa oblak z večjo gostoto prispeva večjo utež v izravnavi in tako vpliva na dobljene rezultate premera cevi.



Slika 14: Rezultat premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri iz oblaka točk, kjer je stojišče skenerja na začetku cevi.

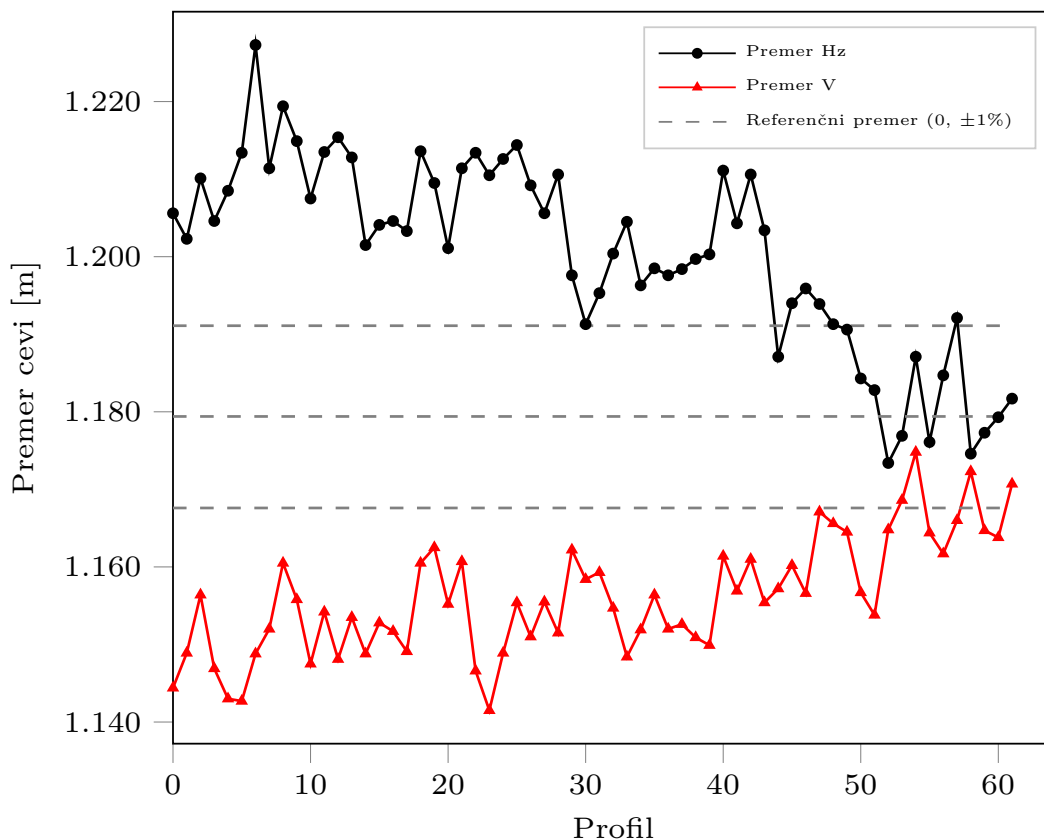


Slika 15: Rezultat premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri iz oblaka točk, kjer je stojišče skenerja na koncu cevi.

4.2 Analiza spremembe geometrije za cev - 1

V tem poglavju bomo predstavili, kolikšna je sprememba geometrije cevi na posameznih delih in kako je le-ta odvisna od višine nasutja nad temenom cevi.

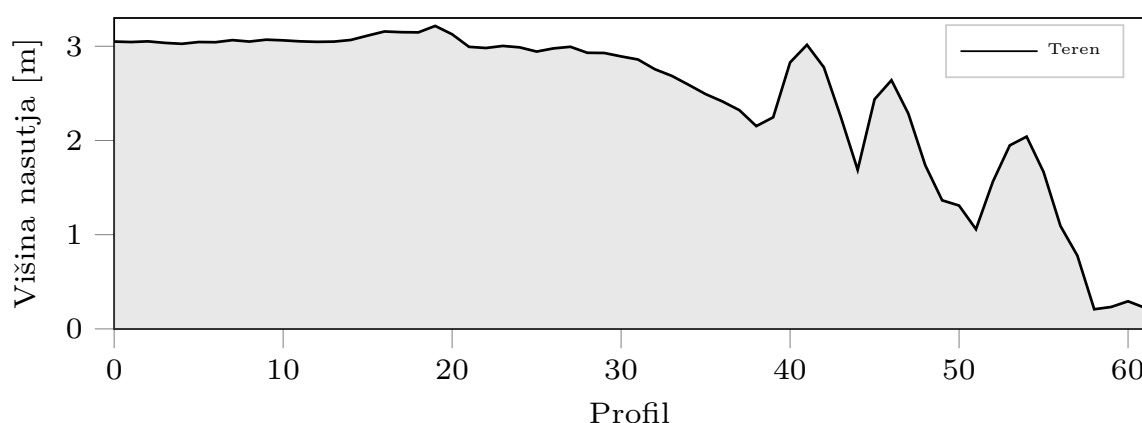
Slika 16 prikazuje graf, kjer so prikazani rezultati premera cevi v vertikalni (rdeča barva) in horizontalni (črna barva) smeri. Tako smo vzdolž 74 m dolgega oblaka točk, ki predstavlja cev, izravnali elipso na vsak meter. Ker je kljub ročni odstranitvi točk, ki bi lahko vplivale na rezultate, še vedno možna prisotnost le-teh, smo dodatno pregledali tudi grafične rezultate (Slika 11). Ob njihovem pregledu smo zaradi slabih podatkov izločili 12 rezultatov. Na koncu smo iz oblaka točk cevi pridobili 62 rezultatov premera cevi v vertikalni in horizontalni smeri. Kot smo omenili v poglavju 1.2, je značilnost deformabilne cevi, da se v vertikalni smeri njen premer manjša, medtem ko se v horizontalni smeri premer povečuje z večanjem sile, ki deluje na cev.



Slika 16: Premer cev - 1 v vertikalni in horizontalni smeri.

Slika 17 nam prikazuje višino nasutja nad temenom cevi za vsak profil. Če pogledamo sliki 16 in 17, vidimo, da manjša kot je višina nasutja nad temenom cevi, bolj se premer cevi v horizontalni in vertikalni smeri približuje referenčnemu premeru. Največji izračunan premer v horizontalni smeri je na profilu 6, in sicer znaša 1.227 m, najmanjši pa na profilu 52 s premerom 1.173 m. Če pogledamo v vertikalni smeri, je največji premer na profilu 54 s premerom 1.175 m, najmanjši pa na profilu 23 s premerom 1.141 m. Največjo višino nasutja nad temenom cevi imamo na profilu 19 s 3.2 m ter najmanjšo na profilu 58 z 0.2 m.

Na podlagi pridobljenih rezultatov lahko opazimo, da so rezultati nekonsistentni. Pričakovali smo, da na mestu, kjer bo največji premer v horizontalni smeri, bo najmanjši premer v vertikalni smeri, in obratno. Problem nekonsistentnih rezultatov lahko pripišemo slabšemu odboju



Slika 17: Višina terena, cev - 1.

laserskega žarka v cevi. Prav tak smo pričakovali, da se bo največja sprememba geometrije cevi zgodila na mestu, kjer je višina nasutja najvišja. Tega ne moremo povsem trditi, saj na spremembo geometrije cevi ne vpliva le višina nasutja, temveč tudi vrsta drugih dejavnikov, ki so nekoliko podrobneje razloženi v poglavju 1.2.

V nadaljevanju smo želeli s pomočjo korelacijskih analiz preveriti, kako močno sta dve spremenljivki povezani. Zanimala nas je povezanost med sledečimi spremenljivkami:

- premer v horizontalni smeri in višina nasutja,
- premer v vertikalni smeri in višina nasutja ter,
- premer v horizontalni smeri in premer v vertikalni smeri.

Poleg moči povezanosti smo preverjali tudi jakost povezanosti.

Sprva smo preverili opisne statistike za obravnavane spremenljivke, ki so predstavljene v preglednici 8. Na osnovi koeficientov asimetrije in sploščenosti lahko vidimo, da se spremenljivki premer vertikalno in premer horizontalno približujeta normalni porazdelitvi, saj sta vrednosti koeficienta manjši od ± 1 . Spremenljivka višina nasutja pa ima koeficienta asimetrije in sploščenosti večji od ± 1 , zato se ne porazdeljuje normalno.

Preglednica 8: Opisna statistika spremenljivk za cev - 1.

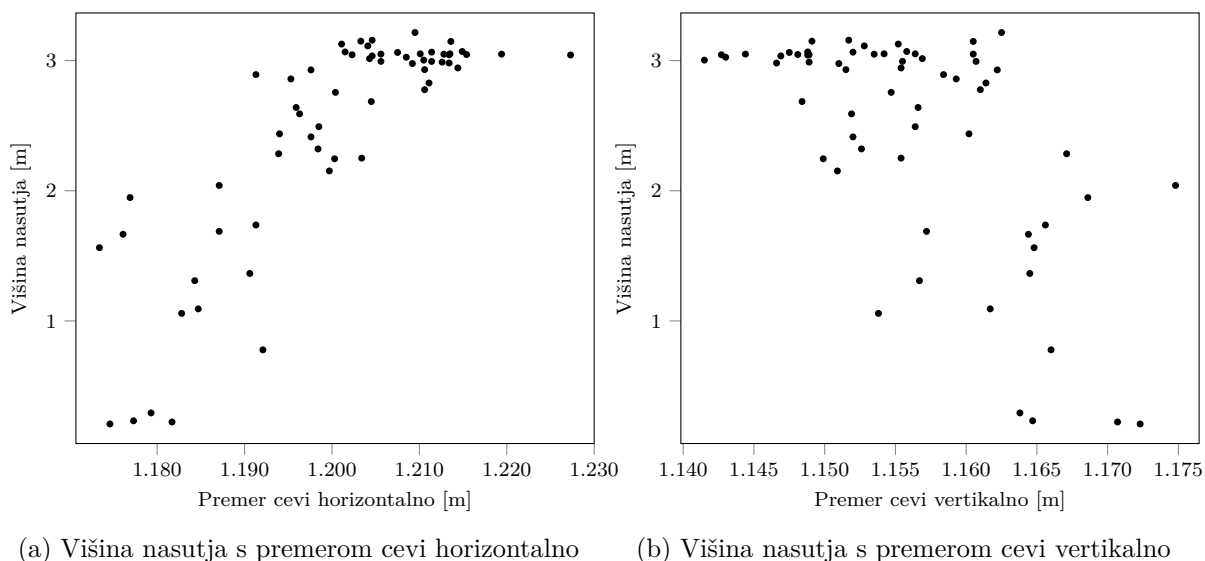
Spremenljivka	N	Min	Max	M	SD	Asim ¹ .	Spl ² .
Premjer Hz	62	1.173	1.227	1.2	0.01	0.49	0.42
Premjer V	62	1.141	1.175	1.55	0.01	0.30	0.35
Višina nasutja	62	0.21	3.22	2.91	0.85	-1.45	1.12

Opombe: N = velikost vzorca. M = povprečje. SD = standardna deviacija. Asim. = asimetričnost. Spl. = sploščenost. ¹Standardna napaka koeficienta asimetrije = 0.30,

²Standardna napaka koeficienta sploščenosti = 0.60.

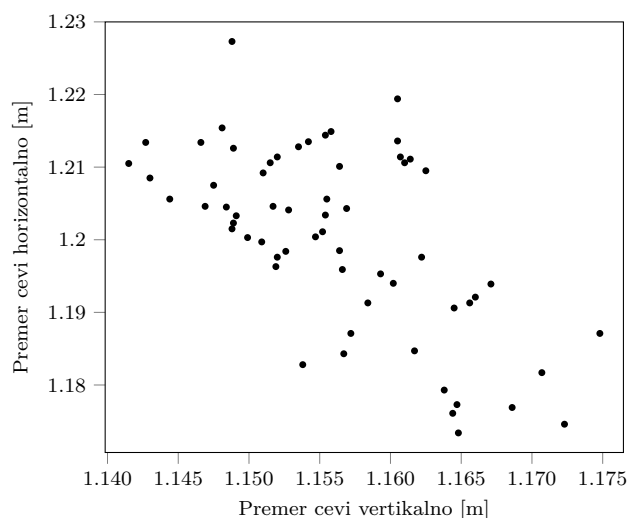
Na podlagi ugotovitve o normalnosti porazdelitve smo se odločili, da za spremenljivke, ki jih kombiniramo s spremenljivko višina nasutja uporabimo Spearmanov koeficient korelacije. Ugotovili smo, da sta spremenljivki premer horizontalno in višina nasutja pomembno pozitivno in močno povezani ($\rho = 0,78$, $p = 0,00$). Slika 18a nam prikazuje razsevni grafikon vrednosti spremenljivk premer horizontalno in višina nasutja, ki kaže na pozitivno povezanost podatkov.

Za spremenljivki premer vertikalno in višina nasutja smo prav tako ugotovili, da sta statistično pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,54$, $p = 0,00$). Slika 18b nam prikazuje razsevni grafikon vrednosti spremenljivk premer vertikalno in višina nasutja, ki prikazuje negativno linearno povezanost. Opazimo lahko tudi, da so podatki bolj razpršeni v primerjavi s sliko 18a, kar nam govori o slabši povezanosti spremenljivk oziroma večji razpršenosti vrednosti.



Slika 18: Razsevni grafikon premer cevi v odvisnosti od višine nasutja.

Za primerjanje povezanosti spremenljivk premer horizontalno in premera vertikalno, smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije. Ugotovili smo, da sta spremenljivki statistično pomembno in zmerno negativno povezani ($r = -0,62$, $p = 0,00$). Slika 19 nam prikazuje razsevni grafikon spremenljivk, kjer opazimo negativno linearno povezanost spremenljivk. Na podlagi rezultatov lahko vidimo, da se s spreminjanjem premera horizontalno, spreminja tudi premer vertikalno.



Slika 19: Razsewni grafikon premera cevi v vertikalni smeri v odvisnosti od premera v horizontalni smeri.

Poleg povezanosti spremenljivk nas je zanimalo, ali višina nasutja napoveduje premer horizontalno in premer vertikalno. Preverili smo predpostavke za linearno regresijo, ki so bile zadovoljene. Ugotovili smo, da višina nasutja statistično pomembno napoveduje tako premer horizontalno ($R^2 = 0,68$, $p=0,00$) kot tudi premer vertikalno ($R^2 = 0,37$, $p=0,00$). Rezultati ANOVE prikazujejo, da model pomembno prispeva k napovedovanju kriterija za premer horizontalno ($F(1,60)=128,84$, $p = 0,00$) in premer vertikalno ($F(1,60)=36,70$, $p = 0,00$). Na osnovi rezultatov linearne regresije lahko zapišemo enačbo napovedi spremembe geometrije cevi, ki je odvisna od višine nasutja. Pričakovan premer v horizontalni smeri zapišemo z enačbo (18), pričakovan premer v vertikalni smeri pa z enačbo (19).

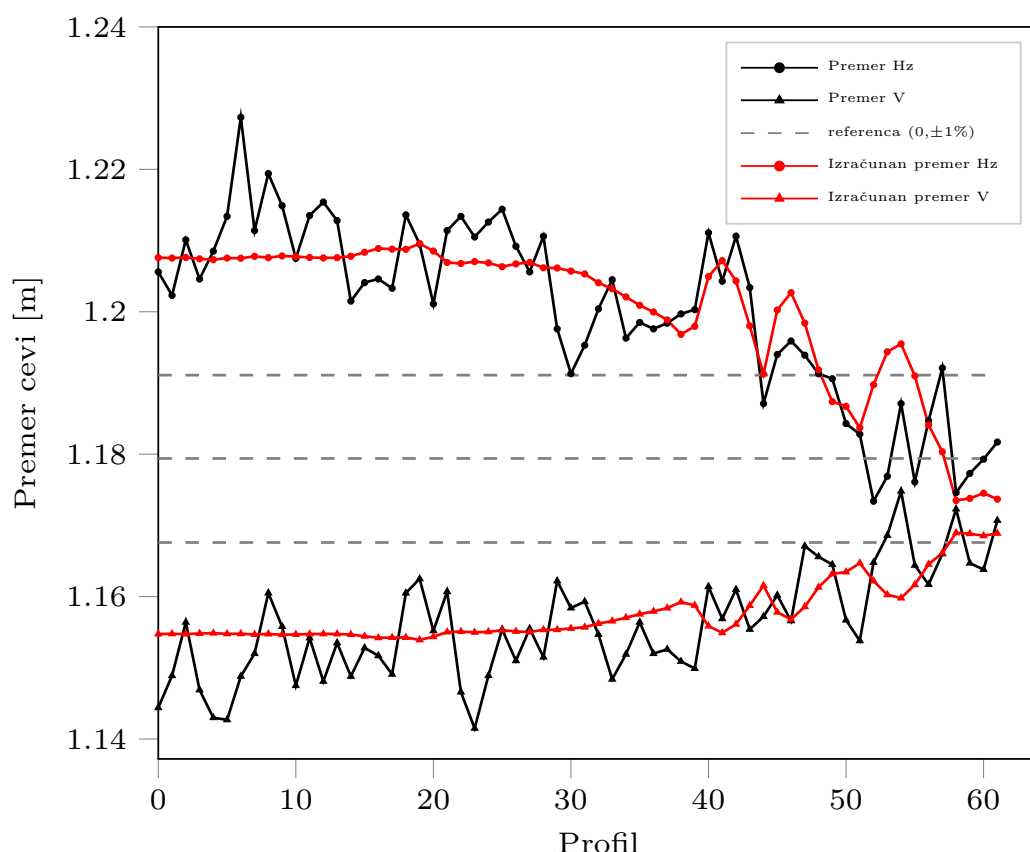
$$Hz = 1.171 + 0.012 \cdot h \quad (18)$$

$$V = 1.170 - 0.005 \cdot h \quad (19)$$

Kjer je:

Hz ... premer cevi v horizontalni smeri,
 V ... premer cevi v vertikalni smeri,
 h ... višina nasutja nad temenom cevi.

Na osnovi enačbe (18) in (19) smo na podlagi višine nasutja po profilih izračunali predviden premer v vertikalni in horizontalni smeri. Na sliki 20 jih prikazujemo z rezultati merjenj. Opazimo lahko, da smo s pomočjo regresije dobili enačbo, ki bi se najbolj prilegala dobljenim podatkom meritev. Na podlagi tega smo dobili svoj model napovedovanja spremembe geometrije cevi, ki pa je vezan le na opazovani tip cevi.

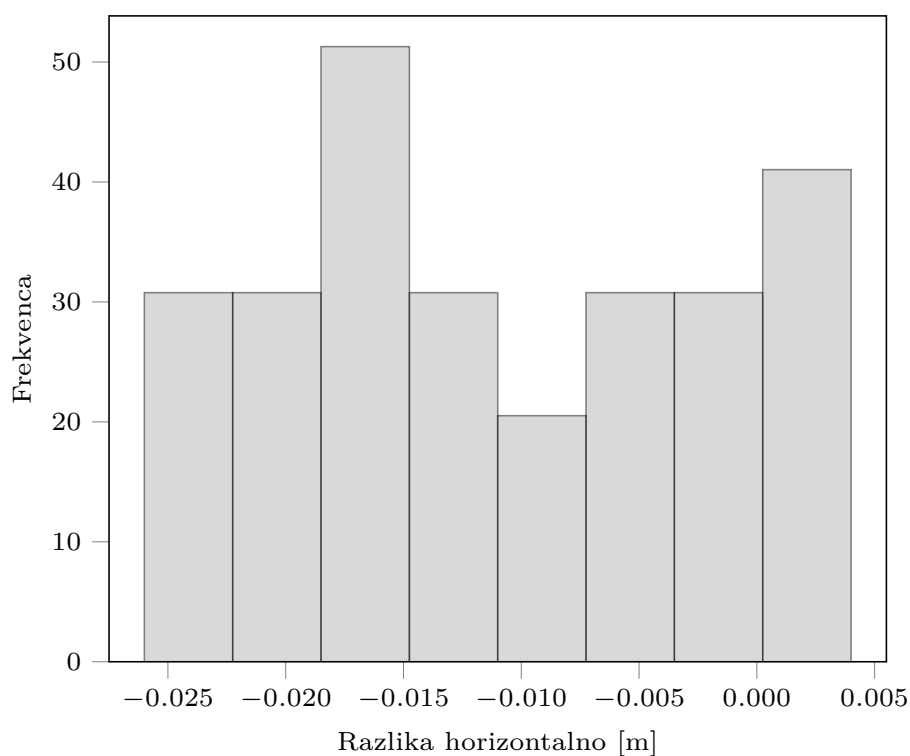


Slika 20: Primerjava računanih premerov (rdeča barva) iz enačb (18) in (19) z rezultati meritev (črna barva).

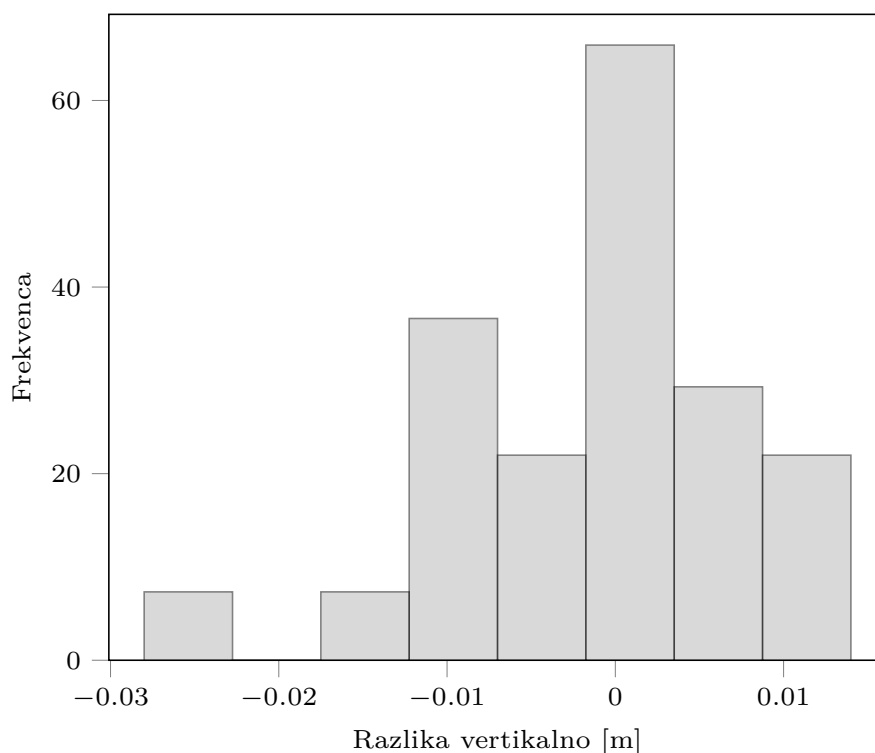
4.2.1 Primerjava meritev laserskega skeniranja z ročnimi laserskim razdaljemerom - cev - 1

Poleg meritev TLS smo opravili tudi meritve z ročnim laserskim razdaljemerom. Meritve z ročnim laserskim razdaljemerom so bile opravljene na vsake tri metre vzdolž obravnavanega sklopa cevi. Ker je vsaka cev dolga 6 m, smo premer izmerili na začetku, sredini in koncu vsakega sklopa cevi. Zanimalo nas je, kolikšna so odstopanja med rezultati premera, ki smo jih pridobili z ročnim laserskim razdaljemerom ter rezultati, dobljenimi na osnovi TLS. V namen primerjanja rezultatov smo izračunali razlike med vrednostmi, ki so izmerjene z ročnim laserskim razdaljemerom ter vrednostmi, ki jih dobimo iz podatkov TLS. Razlike metod merjenj premera v horizontalni smeri prikazujemo s histogramom na sliki 21. Vidimo lahko, da vrednosti niso normalno porazdeljene in so večinoma negativne, kar pomeni da smo v večini primerov z ročnim laserskim razdaljemerom izmerili manjši premer kot z metodo TLS. Razpon razlik se giblje med minimalno vrednostjo - 0,026 m in maksimalno vrednostjo 0,004 m. Srednja vrednost razlik znaša - 0,011 m, standardni odklon pa 0,009 m.

Enak postopek smo naredili za premer v vertikalni smeri, kjer rezultate razlik med metodama merjenja prikazujemo s histogramom na sliki 22. Razpon razlik se v tem primeru giblje od minimalne vrednosti - 0,028 m do maksimalne vrednosti 0,014 m. Vzorec razlik ima srednjo vrednost - 0,002 m in standardni odklon 0,009 m.



Slika 21: Histogram razlik med meritvami za premer horizontalno pri cevi - 1.



Slika 22: Histogram razlik med meritvami za premer vertikalno pri cevi - 1.

Poleg razlik nas je zanimalo, ali se rezultati pridobljeni z različnima metodama izmere statistično pomembno razlikujejo. Na podlagi opisnih statistik (Preglednica 9) smo se odločili uporabiti neparametrični test pomembnosti razlik med dvema neodvisnima spremenljivkama.

Preglednica 9: Opisne statistike spremenljivk merjenj metode laserskega skeniranja in metode ročnega laserskega razdaljemera.

Spremenljivka	N	Min	Max	M	SD	¹ Asim.	² Spl.
Premier Hz	27	1,174	1,227	1,20	0,01	-0,37	-0,50
Premier Hz**	27	1,157	1,209	1,19	0,02	-0,51	-0,97
Premier V	27	1,142	1,167	1,17	0,01	-0,20	-1,06
Premier V* *	27	1,133	1,173	1,16	0,01	-0,25	-0,25

Opombe: N = velikost vzorca. Mdn = mediana. SD = standardna deviacija. Asim. = asimetričnost. Spl. = sploščenost. ¹Standardna napaka koeficienta asimetrije = 0,47.

² Standardna napaka koeficienta sploščenosti = 0,92. ** = meritve opravljene z ročnim laserskim razdaljemerom.

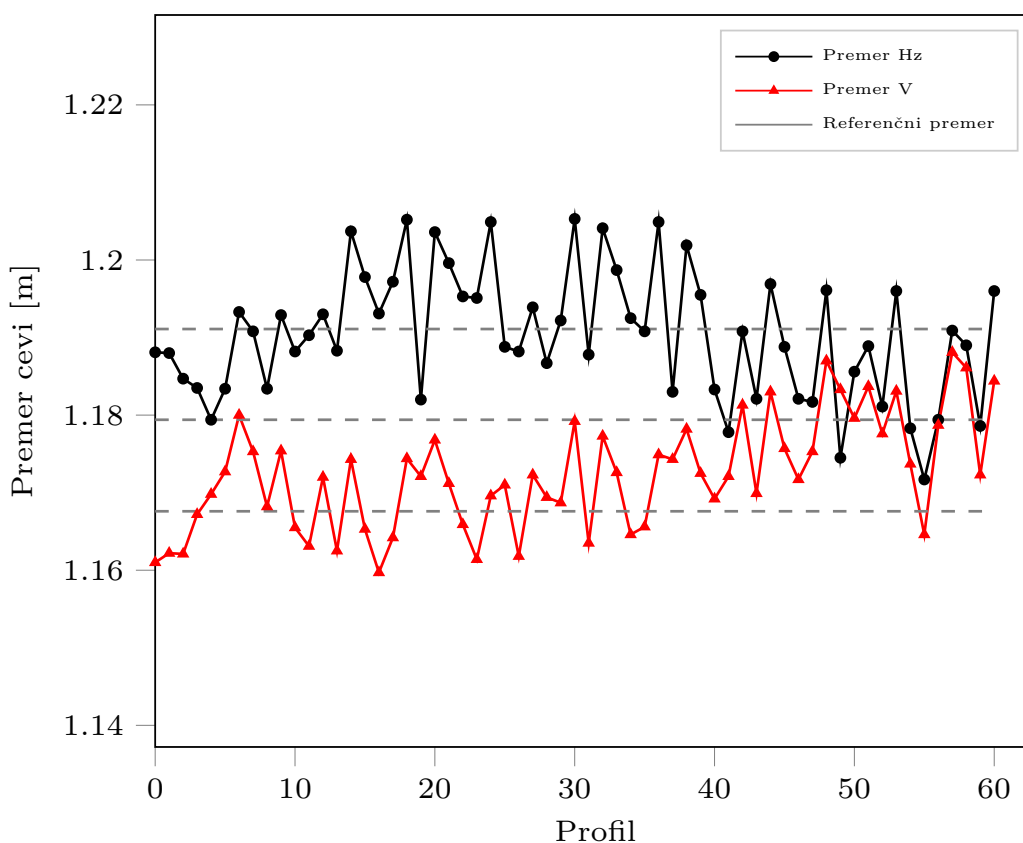
Z uporabo Wilcoxonovega testa predznačenih rangov smo ugotovili, da sta premera horizontalno, merjena z metodo laserskega skeniranja in metodo ročnega laserskega razdaljemera, statistično pomembno različna ($z = 4,04$, $p = 0,00$). V primeru iskanja pomembnih razlik med meritvami premera vertikalno smo ugotovili, da razlike niso statistično pomembne ($z = -0,37$, $p = 0,71$). Iz tega lahko izhajamo, da med meritvami prihaja do prevelikih razlik, na podlagi tega pa ne moremo določiti katera metoda boljša.

4.3 Analiza spremembe geometrije za cev - 2

Rezultati za cev - 2 se nanašajo na merjene cevi, ki so pred zasutjem betonirane in nato zasute s predpisanim materialom.

Slika 23 nam prikazuje premer cevi v horizontalni (črna črta) in vertikalni smeri (rdeča črta). Sredinska črtkana črta nam prikazuje premer po podatkih proizvajalca ter zgornja in spodnja črtkana črta $\pm 1\%$ dopustne spremembe geometrije cevi s strani proizvajalca. Premer cevi smo izračunali na vsak meter vzdolž 64 m cevi. Pri tem smo na podlagi pregleda grafičnih rezultatov (Slika 11) izločili 3 rezultate, ki so temeljili na slabih podatkih. Skupno imamo torej 62 rezultatov, primernih za nadaljnjo obdelavo. Za namen lažje primerjave smo velikost razpona lestvice po y osi na sliki 23 pustili enako kot na sliki 16.

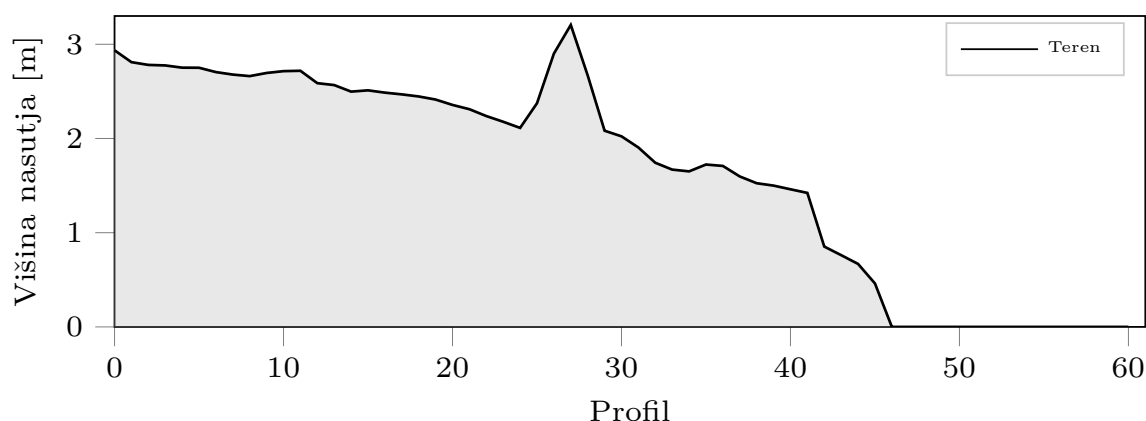
Rezultati nam prikazujejo največji premer v horizontalni smeri na profilu 30 s premerom 1.205 m, najmanjši premer pa je na profilu 55 s premerom 1.172 m. V vertikalni smeri je največji premer na profilu 57 s premerom 1.188 m in najmanjši premer na profilu 16 s premerom 1.160 m.



Slika 23: Premer cev - 2 v vertikalni in horizontalni smeri.

Slika 24 nam prikazuje višino nasutja nad temenom cevi za vsak računan profil. Vidimo, da ima višina terena do profila 45 neko vrednost, nato pa od profila 46 dalje nimamo več vrednosti, kar pomeni, da cev v času merjenja še ni bila zasuta.

Največjo višino nasutja nad temenom cevi imamo v tem primeru na profilu 27 s 3.2 m ter najmanjšo na profilu 45 s 0,4 m. Če primerjamo sliki 23 in 24, lahko opazimo, da se premer spreminja glede na nasutje, vendar v primerjavi z rezultati v poglavju 4.2 to ni tako očitno. Povezavo spremembe geometrije cevi glede na višino nasutja smo v nadaljevanju preverjali s statističnimi testi.



Slika 24: Višina terena, cev - 2.

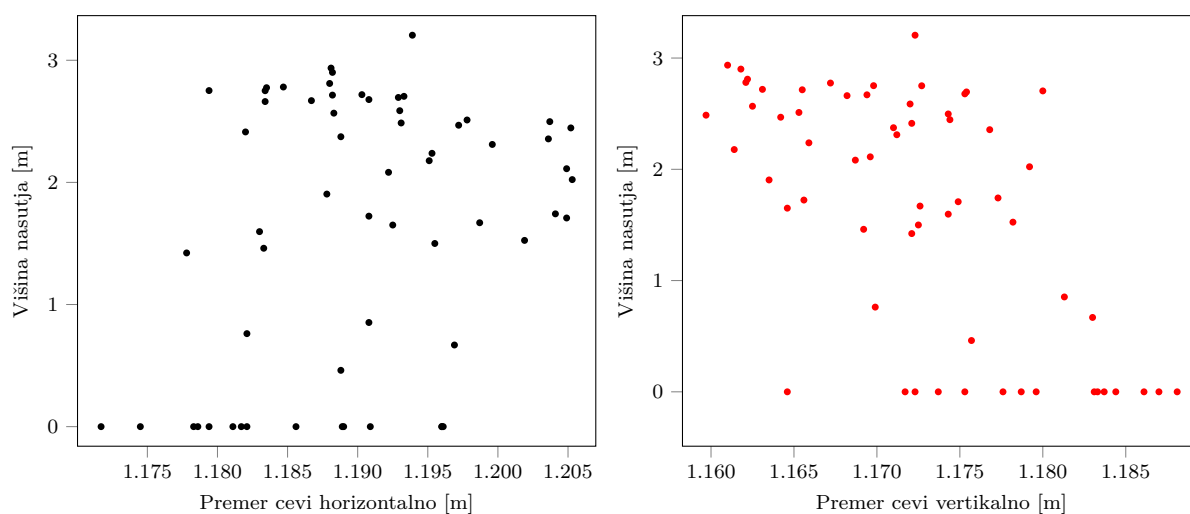
Statistično analizo smo opravili na podoben način kot v poglavju 4.2. Sprva smo preverili opisne statistike za spremenljivke premera vertikalno, premera horizontalno ter višino nasutja in jih prikazujemo v preglednici 10. Na osnovi rezultatov asimetrije in sploščenosti vidimo, da se spremenljivki premera horizontalno in premera vertikalno porazdelujeta normalno, saj sta njuni vrednosti znotraj ± 1 . To pa ne velja za spremenljivko višina nasutja, saj je koeficient sploščenosti večji od ± 1 , zaradi česar se ne porazdeljuje normalno.

Preglednica 10: Opisne statistike spremenljivk za cev - 2.

Spremenljivka	<i>N</i>	Min	Max	Mdn	<i>SD</i>	¹ Asim.	² Spl.
Premjer Hz	62	1,172	1,205	1,19	0,01	0,06	-0,52
Premjer V	62	1,160	1,188	1,17	0,01	0,23	-0,69
Višina nasutja	62	0,00	3,21	1,64	1,10	-0,51	-1,31

Opombe: *N* = velikost vzorca. Mdn = mediana. *SD* = standardna deviacija. Asim. = asimetričnost. Spl. = sploščenost.¹ Standardna napaka koeficienta asimetrije = 0,31. ² Standardna napaka koeficienta sploščenosti = 0,60.

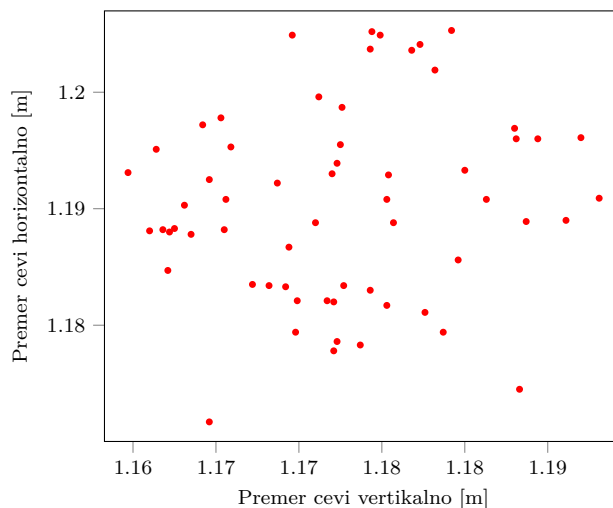
Na podlagi ugotovitev o normalnosti porazdelitve smo za ugotavljanje povezanosti spremenljivk premer horizontalno in višina nasutja uporabili Spearmanov koeficient korelacije. Ugotovili smo, da je povezava med spremenljivkama statistično nepomembna ($\rho = 0,16$, $p = 0,22$). To, da so spremenljivke med seboj nepovezane, lahko vidimo tudi s pomočjo razsevnega grafikona na sliki 25a. Na podlagi rezultatov korelacije lahko trdimo, da se premer horizontalno ne spreminja glede na višino nasutja nad temenom cevi. Spremenljivki premer vertikalno in višina nasutja smo prav tako analizirali s Spearmanovim koeficientom korelacije. Ugotovili smo, da sta spremenljivki statistično pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,59$, $p = 0,00$). Slika 25b prikazuje razsewni grafikon spremenljivk premera vertikalno in višine nasutja.



(a) Premier cevi v horizontalni smeri v odvisnosti od višine nasutja cev - 2. (b) Premier cevi v vertikalni smeri v odvisnosti od višine nasutja cev - 2.

Slika 25: Razsevni grafikon, ki prikazuje spremenljivki premera cevi v odvisnosti od višine nasutja.

Preverili smo tudi, kako se povezujeta spremenljivki premer horizontalno in premer vertikalno. Ker sta obe spremenljivki normalno porazdeljeni, smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije. Ugotovili smo, da povezanost med spremenljivkama ni statistično pomembna ($r = -0,13$, $p = 0,3$). Slika 26 prikazuje razsevni graf spremenljivk premera horizontalno in vertikalno, kjer vidimo, da je razpršenost spremenljivk velika.



Slika 26: Razsevni grafikon premer cevi v vertikalni smeri v odvisnosti od premera v horizontalni smeri, cev - 2.

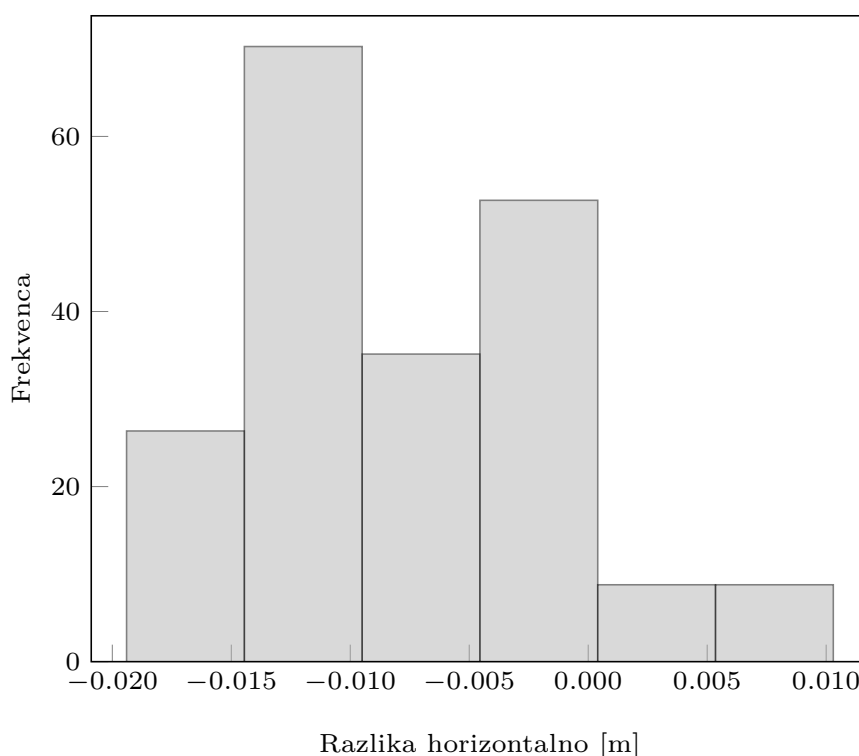
S koeficienti korelacije smo ugotovili, da se pomembno povezujeta le višina nasutja s premerom vertikalno. V nadaljevanju nas je zanimalo, ali višina nasutja tudi napoveduje premer vertikalno. Preverili smo predpostavke za multiplo regresijo, ki so bile zadoščene. Višina nasutja statistično pomembno napoveduje premer vertikalno ($R^2=0,38$, $p=0,00$). Rezultati ANOVE prikazujejo, da model pomembno prispeva k napovedovanju kriterija ($F(1,59)=37.95$, $p=0.00$). Na osnovi pridobljenih rezultatov predstavljamo enačbo napovedi premera vertikalno na osnovi

višine nasutja.

$$V = 1.179 - 0.004 \cdot h \quad (20)$$

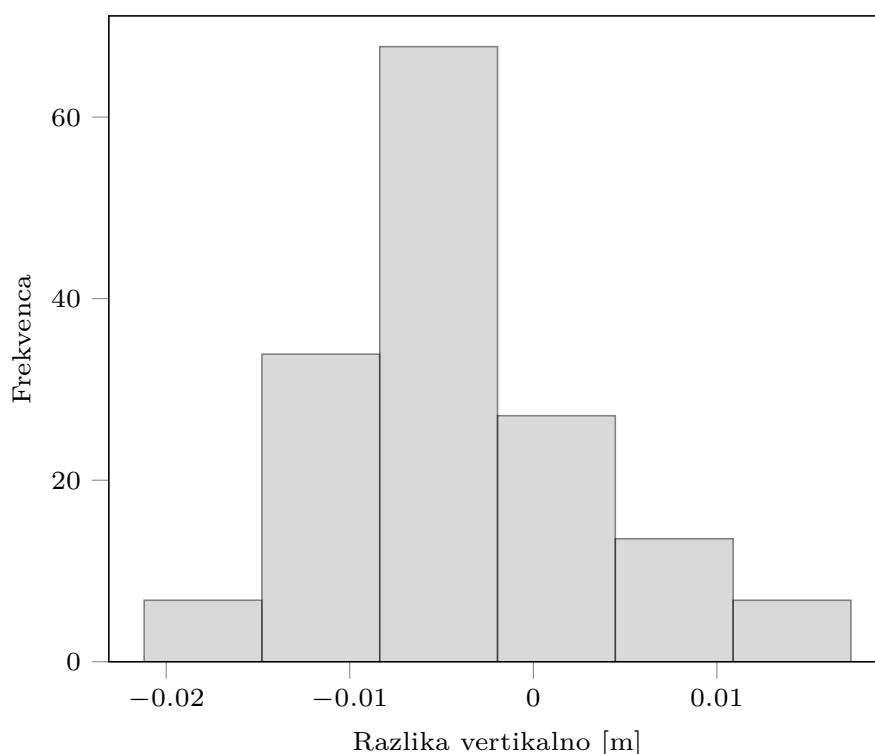
4.3.1 Primerjava meritev laserskega skeniranja z ročnimi laserskim razdaljemerom - cev - 2

Na območju betonirane cevi smo prav tako opravili dodatne meritve z ročnim laserskim razdaljemerom. Zanimalo nas je, koliko se meritve, pridobljene z ročnim laserskim razdaljemerom, razlikujejo od rezultatov, pridobljenih s pomočjo TLS. Izračunali smo razlike med rezultati meritev in jih prikazali s histogramom. Slika 27 nam prikazuje histogram razlik premera v horizontalni smeri, iz katerega vidimo, da se razlike porazdeljujejo normalno. Razpon razlik se giblje med minimalno vrednostjo - 0,019 m do maksimalne vrednosti 0,01 m. Srednja vrednost odstopanja znaša - 0,008 m in standardni odklon 0,007 m. Iz histograma na sliki 27 je prav tako razvidno, da so vrednosti večinoma na negativni strani. To pomeni, da smo z ročnim laserskim razdaljemerom v večini primerov dobili manjše vrednosti premera v primerjavi z metodo TLS.



Slika 27: Histogram razlik med meritvami za premer horizontalno pri cevi - 2.

Prav tako smo izračunali razlike za primer premera cevi v vertikalni smeri. Rezultate razlik prikazujemo s histogramom na sliki 28. Razpon razlik se v tem primeru giblje med minimalno vrednostjo - 0,021 m in maksimalno vrednostjo 0,017 m. Srednja vrednost odstopanja znaša - 0,006 m in standardni odklon 0,008 m. Podobno kot v zgornjem primeru razlik za horizontalno tudi tukaj iz histograma vidimo, da so razlike bolj na negativni strani, iz česar izhajamo, da v večini primerov z ročnim laserskim razdaljemerom izmerimo manjši premer v primerjavi z metodo TLS.



Slika 28: Histogram razlik med meritvama za premer vertikalno pri cevi - 2.

Kot v poglavju 4.2.1 smo po enakem postopku ugotavljali ali se razlike statistično pomembno razlikujejo. Na podlagi opisnih statistik (Preglednica 11), smo se odločili uporabiti neparametrični test pomembnosti razlik med dvema neodvisnima spremenljivkama.

Preglednica 11: Opisna statistika spremenljivk merjenj metode laserskega skeniranja ter ročni laserski razdaljemer.

Spremenljivka	<i>N</i>	Min	Max	Mdn	<i>SD</i>	¹ Asim.	² Spl.
Premjer Hz	24	1,162	1,175	1,17	0,00	0,12	-0,14
Premjer Hz**	24	1,162	1,197	1,18	0,01	-0,40	-0,82
Premjer V	24	1,162	1,188	1,17	0,00	0,18	-0,75
Premjer V**	24	1,178	1,205	1,19	0,00	-0,02	-0,70

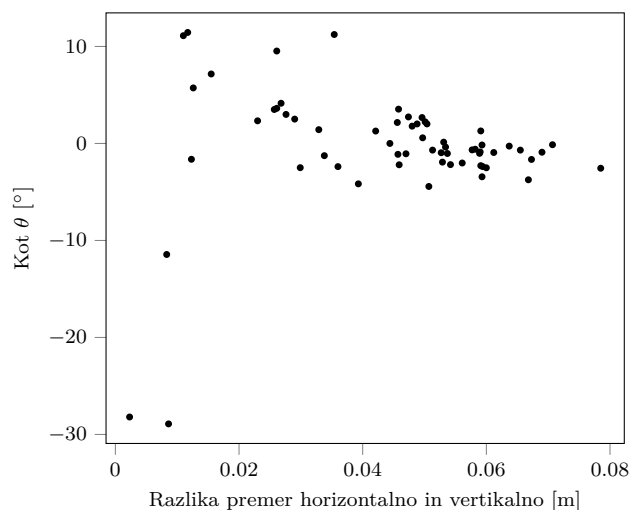
Opombe: *N* = velikost vzorca. Mdn = mediana. *SD* = standardna deviacija. Asim. = asimetričnost. Spl. = sploščenost. ¹Standardna napaka koeficienta asimetrije = 0,45. ² Standardna napaka koeficienta sploščenosti = 0,87. ** = meritve opravljene z ročnim laserskim razdaljemerom.

Z Wilcoxonovim testom predznačenih rang smo ugotovili, da se rezultati, pridobljeni s TLS in ročnim laserskim razdaljemerom za premer horizontalno ($z = -3,71$, $p = 0,00$) in premer vertikalno ($z = -3,40$, $p = 0,01$), med seboj statistično pomembno razlikujejo. Opazimo lahko, da ena izmed metod merjenja ne zagotavlja zadostne natančnosti meritev.

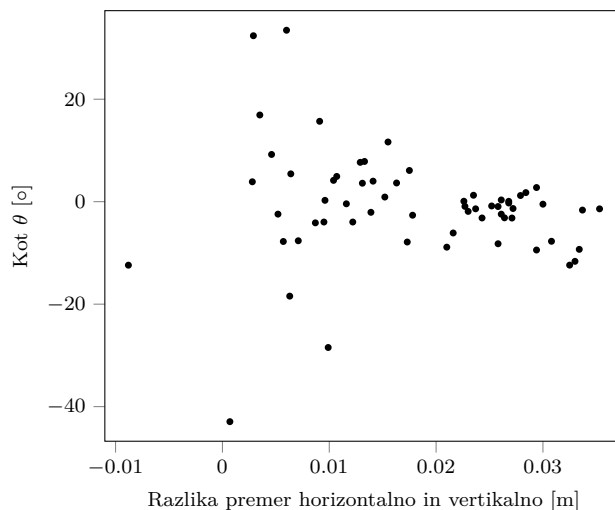
4.4 Analiza nagnjenosti elipse

Z izravnavo elips smo poleg rezultatov premera horizontalno, premera vertikalno in centra elipse dobili rezultat za kolikšen kot θ se elipsa nagne okoli središča. V hipotezi smo predvideli, da bolj kot bo elipsa podobna krogu, večja bo verjetnost, da bo kot θ večji. Torej kot θ bo odvisen od spremembe geometrije cevi.

Analizo nagnjenosti elipse smo izvedli v obeh primerih, torej za cev - 1 in cev - 2. Na sliki 29 je prikazan razsevni grafikon kota nagnjenosti elipse v odvisnosti od razlike med premeroma horizontalno in vertikalno. Na sliki 30 pa razsevni grafikon za cev - 2. Iz razsevnega grafikona lahko opazimo, da lahko tako za cev - 1 kot za cev - 2 potrdimo naša predvidevanja. Z manjšanjem vrednosti v x osi so vrednosti v smeri y osi vedno bolj razpršene. To pomeni, da bolj kot je elipsa podobna krogu, večja je verjetnost, da bo kot θ velik.



Slika 29: Razsevni grafikon kota nagnjenosti elipse θ v odvisnosti od razlike premera horizontalno in premera vertikalno za cev - 1.



Slika 30: Razsevni grafikon kota nagnjenosti elipse θ v odvisnosti od razlike premera horizontalno in premera vertikalno za cev - 2.

4.5 Primerjava modela spremembe geometrije cevi, dobljenega na osnovi meritev s predpisom ATV-DVWK-A 127E

Večina statičnih izračunov, ki smo jih zasledili, temeljijo na standardu ATV-DVWK-A 127E. Odločili smo se, da naredimo primerjavo rezultatov, ki jih dobimo iz modela meritev z rezultati na osnovi predpisa ATV-DVWK-A 127E. Statični izračun smo naredili s pomočjo programa AMITECH, ki je dostopen na spletni strani: <https://www.ami-tools.net>. Primerjavo smo naredili le za primer cev - 1, saj je tam sprememba geometrije cevi najbolj očitne. V izračunu smo uporabili vhodne vrednosti, ki so prikazane v preglednici 12:

Preglednica 12: Vhodne vrednosti za statični izračun po standardu ATV-DVWK-A 127E

Varnosti

Varnostni razred:	A (običajni premer)
Dopustna oblika geometrije cevi:	6 % (običajni premer)
Predhodna oblika geometrije cevi, tipa A:	δ_v 1 %

Cev

Notranji tlak:	PN 1
Nazivna togost:	SN 10,000
Nazivni premer:	DN 1.2 m
Zunanji premer:	1.1229 m
Debelina stene:	24.8 mm
Spec. teža mat. cevi:	17.50 kN/m ³

Zemljina

E1: Zasip cevi	Vrsta zemljine: G2
Vrednost iz tabele 8 (ATV A 127)	D_{PR1} 95 %
E20: Območje ob cevi	Vrsta zemljine: G1
Vrednost iz tabele 8 (ATV A 127)	D_{PR2} 95 %
E3: Raščena zemljina	Vrsta zemljine: G2
Gostota-Proctor	D_{PR2} 90 %
E4: Zemljina pod cevjo	E4=10*E1

Vgradnja

Širina jarka:	b 3 m
Nagib brežine:	β 60°
Pogoji zasipa jarka:	A1
Pogoji vgradnje cevi:	B1
Kot naleganja	2 α 180°

Obremenitev

Višina prekritja:	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 [m]
Spec. teža zemlje:	20,00 kN/m ³
Vrsta postelce:	Toga, gibljiva

Na začetku smo želeli ugotoviti, kako velik vpliv ima na spremembo geometrije cevi različna vrsta podlage posteljic. Tako smo naredili izračun za višine od 1 m do 7 m, in sicer ločeno za toge (betonirane) in gibljive (pesek) podlage. Poleg tega, bi želeli omeniti, da imajo na spremembo geometrije cevi, vpliv tudi naslednje značilnosti: tip zemljine, način vgradnje cevi, vrsta zemljine, nagib brežine, širina jarka, kot naleganja, zbitost zemljine itd. Tako je namen primerjave, da ugotovimo, kako dobro se naš model prilega statičnemu izračunu, v katerem želimo uporabiti čim bolj realne predpostavke vrednosti, ki so bile na območju meritev.

Program za statični izračun nam kot rezultat spremembe geometrije poda le vrednost spremembe geometrije v vertikalni smeri. Vrednost spremembe geometrije cevi je podana z odstotkom, zato smo vrednosti iz našega modela pretvorili v odstotke.

V preglednici 13 prikazujemo rezultate izračuna. Drugi in tretji stolpec prikazujeta rezultate, ki smo jih dobili s statičnim izračunom. Pri tem drugi stolpec prikazuje rezultate ob pogoju, da je posteljica gibljiva, tretji stolpec pa rezultate ob pogoju toge posteljice. Četrty in peti stolpec, zajema rezultate, ki smo jih dobili s pomočjo regresije. Četrty stolpec temelji na enačbi (19) linearne regresije, peti stolpec pa na enačbi regresije s polinomom druge stopnje. Za regresijo s polinomom druge stopnje, smo se odločili zaradi možnosti medsebojne primerjave rezultatov regresije s statičnim modelom. Da so predpostavke za regresijo zadoščene smo opisali že v poglavju 4.2. Izračun polinomske regresijske krivulje ($R^2 = 0,38$, $p=0,00$) nam poda enačbo napovedi (21), vpliva višine nasutja na spremembo geometrije cevi.

$$V = -0.0008 \cdot h^2 - 0.0025 \cdot h + 1.1676 \quad (21)$$

Preglednica 13: Prikaz vrednosti, dobljenih iz statičnega izračuna ter lastnega modela.

Višina [m]	Statični model		Lastni model	
	Gibljiva [%]	Toga [%]	Linearna [%]	Polinom [%]
1	1.16	1.27	1.22	1.28
2	1.44	1.94	1.64	1.70
3	1.71	2.59	2.07	2.25
4	1.97	3.24	2.49	2.93
5	2.24	3.89	2.92	3.76
6	2.50	4.54	3.34	4.71
7	2.76	5.19	3.76	5.81

V našem primeru cev leži na togi betonirani posteljici. Iz preglednice 13 vidimo, da se z rezultati statičnega izračuna najbolj ujema model regresije s polinomom druge stopnje. Razlike med vrednostjo, ki jo dobimo iz enačbe regresije ter rezultatom statičnega izračuna za območje od 1 m do 7 m, se gibljejo od minimalne vrednosti - 0.34 % pa do maksimalne vrednosti 0.62 %. Če primerjamo razlike med vrednostmi, ki jih dobimo iz enačbe (19) linearne regresije z vrednostmi, ki jih dobimo s statičnim izračunom, se razlike gibljejo od minimalne vrednosti - 1.43 % do maksimalne vrednosti - 0.05 %.

S primerjavo rezultatov smo ugotovili kateri model, linearni ali polinom druge stopnje, se bolje ujema s statičnim izračunom. Iz rezultatov primerjave lahko ugotovimo, da se regresija s polinomom druge stopnje bolje ujema s statičnim izračunom kot linearni model. Potrebno pa se je zavedati, da je napovedovanje vrednosti spremembe geometrije cevi na osnovi modela regresije zelo tvegano. Pri tem mislimo na napovedovanje vrednosti, ki so zunaj vrednosti, ki smo jih uporabili v modelu. V našem primeru imamo opazovanja do višine nasutja približno 3 m. To

pomeni, da je z regresijskim modelom tvegano napovedovati vrednost spremembe geometrije cevi z vhodnim podatkom višine, ki je večja od 3 m.

4.6 Določitev padca cevi

Najpomembnejši dejavnik pri polaganju gravitacijskih cevi je zadosten padec. Z metodo terestričnega laserskega skeniranja cevi smo pridobili podatke, iz katerih smo lahko izračunali, kolikšen je padec cevi na določenem odseku. Način, preko katerega smo prišli do rezultatov, je podrobneje razložen v poglavju 2.7. Želimo pa izpostaviti, da je padec cevi izračunan glede na center izravnane elipse in ne glede na najnižjo točko. To pomeni, da ima na izračunan padec cevi lahko vpliv tudi sprememba premera cevi med dvema zaporednima točkama.

Naklon cevi smo preverjali na določenem odseku cevi, ki ima po projektu naklon 1.5 ‰. V praksi naklon ni vedno konstanten in lahko relativno odstopa za vsako cev, saj so pri polaganju cevi prisotni različni dejavniki, ki jih težko predvidevamo.

Analiza naklona cevi je potekala tako, da smo vzdolž izbrane cevi, ki je dolžine 30 m, izbrali po dve naključni mesti in med njima izračunali naklon. Pri tem smo pazili, da je razdalja med izbranimi mesti vedno različna. Analizirali smo 10 naključno izbranih odsekov z različnimi dolžinami ter rezultate prikazali v preglednici 14. Opazimo, da največja izračunana vrednost padca znaša 3,3 ‰ najmanjša pa 1,6 ‰. Povprečna vrednost znaša 2,6 ‰ in je za 0,9 ‰ večja od projektirane.

Preglednica 14: Prikaz rezultatov naključne analize padca cevi po odsekih.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Padec cevi [‰]	2.4	2.4	2.6	2.9	3.4	2.7	2.2	3.1	2.4	1.6
Dolžina odseka [m]	28.6	23.3	18	12	8.3	7.3	6	5.9	4.5	3.6

Z izbrano metodo določanja padca cevi smo želeli prikazati, da je na predstavljen način dokaj enostavno priti do rezultatov. V prihodnjih analizah bi bilo smiselno rezultate primerjati z neodvisnimi metodami, kar bi lahko potrdilo zanesljivost rezultatov.

«Ta stran je namenoma prazna.»

5 ZAKLJUČEK

Zamisel teme magistrskega dela je nastala ob izgradnji kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode - Sneberje. Ob opazovanju izgradnje nas je zanimalo, kaj se dogaja s cevjo ob zasutju ter na kakšen način bi to lahko preverjali. Odločili smo se uporabiti TLS Leica BLK360, ki nam omogoča zajem 3D oblaka točk. Ker je metoda izmere dokaj nova in za potrebe nadzora cevi še nekoliko neuveljavljena, smo se odločili izdelati programsko opremo, s pomočjo katere smo lahko opravljali analize.

Eden izmed namenov našega magistrskega dela je bil spoznati uporabnost TLS Leica BLK360 za namen preverjanja geometrije cevi. Tekom raziskovanja smo odkrili tako prednosti kot slabosti uporabe omenjenega instrumenta. Prednost uporabljene metode vidimo v možnosti registracije oblaka točk v cevi in na površju. Z možnostjo registracije oblaka točk smo namreč na enostaven način prišli do podatka o višini nasutja nad cevjo. Poleg tega gre za hiter in enostaven zajem velike količine podatkov, kar nam omogoča različne analize. Prva slabost instrumenta pa je ta, da ga je mogoče uporabiti le za cevi večjih premerov, saj mora biti operater v času izmere prisoten v cevi. Poleg tega izbrana metoda izmere zahteva predhodno postavitve predmetov v cevi, ki nam služijo za vezne ploskve pri registraciji oblaka točk. Tekom obdelave podatkov smo ugotovili, da prihaja do napak pri odboju laserskega žarka v cevi, kar zahteva, da je razdalja med stojšči v cevi relativno kratka, in sicer nekje od 3 m do 6 m. Ker je prihajalo do napak v odboju laserskega žarka ter napak v registraciji, je bilo neželene točke potrebno ročno odstraniti. Pri tem smo odstranili le napake, ki so bile očitne. Tovrstno delo zahteva veliko časa, poleg tega pa dobljeni rezultati niso zanesljivi. To pomeni, da napake, ki jih nismo odstranili, lahko vplivajo na natančnost določitve geometrije cevi. Tako smo ugotovili, da uporabljen instrument ni najbolj primeren za meritve v ceveh iz GRP materiala, saj napaka v odboju močno vpliva na dobljene rezultate, poleg tega pa sta zajem in obdelava podatkov zamudni. Kljub temu v našem primeru ocenjujemo, da lahko potrdimo spremembo geometrije cevi šele, ko je sprememba geometrije večja od 1 cm v primerjavi z referenčnim premerom. Dobljeni podatki terestričnega laserskega skeniranja so zato zadovoljivi ob zavedanju, da bi bili podatki nezanesljivi v primeru iskanja napak ali razpok v cevi.

Rezultati premera cevi, ki jih dobimo iz oblaka točk z lastnim programom so predvsem odvisni od kvalitete oblaka točk. Na rezultat premera cevi imajo torej lahko velik vpliv izven ležeče točke. Da bi se temu izognili smo rezultate izravnave elipse preverili še na osnovi grafičnih rezultatov ter slabe rezultate izločili iz nadaljnje obdelave. Možnost razvoja lastnega programa vidimo predvsem v dopolnitvi z algoritmom, ki bi prepoznal izven ležeče točke ter jih odstranil. V primeru, ko imamo oblak točk z velikim številom točk, program deluje nekoliko počasneje. V ta namen bi bilo potrebno programsko kodo nekoliko optimizirati, s čimer bi program deloval hitreje.

V rezultatih smo ugotovili, da je metodologija dela kljub slabim meritvam primerna. Dokazali smo, da se sprememba geometrije cevi z večanjem višine nasutja veča ter, da betoniranje cevi zmanjša vpliv spremembe geometrije cevi.

Pri primerjavi rezultatov premera cevi, ki jih dobimo z ročnim laserskim razdaljemerom z rezultati iz oblaka točk TLS, smo ugotovili, da smo nekoliko pogosteje izmerili manjši premer z ročnim laserskim razdaljemerom. Ta rezultat je lahko posledica tega, da z ročnim laserskim razdaljemerom nismo vedno merili povsem vertikalno ali horizontalno, poleg tega pa je s prostim očesom nemogoče določiti mesta, kjer imamo največji oziroma najmanjši premer.

Iz podatkov nagnjenosti izravnane elipse smo ugotovili, da bolj kot je elipsa podobna krogu,

večja je verjetnost da bo kot Θ velik. To pomeni, da na podlagi kota težko določamo kot sploščenosti cevi.

S primerjavo spremembe geometrije cevi iz modela, ki ga dobimo na osnovi meritev s predpisom ATV-DVWK-A 127E, smo ugotovi, da se v primerjavi z linearno regresijo bolje prilega model, ki ga dobimo s pomočjo polinomske regresije. Razlika med napovedjo s statičnim modelom in polinomsko regresijo na osnovi meritev se giblje med - 0,34 % do 0,62 %. Po našem mnenju nam rezultat predstavlja majhno razliko. Ocenjujemo, da sta tako statični model kot lastni model s polinomsko regresijo zanesljiva napovedovalca spremembe geometrije.cevi

V magistrskem delu smo podrobneje opisali in ovrednotili uporabnost terestričnega laserskega skenerja za potrebe določanja spremembe geometrije cevi. Po naši vednosti v Sloveniji in v svetu ne obstaja še nobena raziskava, kjer bi za določitev spremembe geometrije cevi uporabili TLS. Poleg tega smo na podlagi podatkov, ki smo jih izmerili s TLS, prišli do funkcijske zveze, kjer na osnovi višine nasutja napovedujemo vrednost spremembe geometrije cevi.

VIRI

Bellinghausen, G. in sod. 2000. ATV-DVWK-A 127E: 90. (Pridobljeno 10. 2. 2019.) https://docuri.com/download/atv-dvwk-a-127e-statical-calculation-of-drains-and-sewers__59c1e192f581710b286a0860__pdf.

Bosseler, B. in Stein, D. 1997. Requirements for recording and analysing deflection measurements in buried flexible pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 12 (98): 27–38. ISSN: 0886-7798. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00052-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00052-2).

Clemens, F. in sod. 2015. Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry. *Structure and Infrastructure Engineering* 11, št. 9 (): 1218–1239. ISSN: 17448980. doi:[10.1080/15732479.2014.945466](https://doi.org/10.1080/15732479.2014.945466).

Dirksen, J. in sod. 2013. The consistency of visual sewer inspection data. *Structure and Infrastructure Engineering* 9 (3): 214–228. ISSN: 15732479. doi:[10.1080/15732479.2010.541265](https://doi.org/10.1080/15732479.2010.541265).

Duran, O., Althoefer, K. in Seneviratne, L. D. 2007. Automated pipe defect detection and categorization using caniera/laser-based profiler and artificial neural network. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4, št. 1 (): 118–126. ISSN: 15455955. doi:[10.1109/TASE.2006.873225](https://doi.org/10.1109/TASE.2006.873225).

Duran, O., Althoefer, K. in Seneviratne, L. 2003. Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 8 (3): 401–409. ISSN: 10834435. doi:[10.1109/TMECH.2003.816809](https://doi.org/10.1109/TMECH.2003.816809).

Hal, R. in Flusser, J. 1999. Numerically stable direct least squares fitting of ellipses: 1–8. (Pridobljeno 10. 12. 2018.) papers://90b07e07-903c-45d4-a899-2629f88b6b69/Paper/p2456.

Howard, A. K. 1996. Pipe Bedding and Backfill. *Geotechnical Training Manual No.7* 88 (7). (Pridobljeno 20. 2. 2019.) <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/pipebed.pdf>.

Kirkham, R., Kearney, P. D. in Rogers, K. J. 2000. PIRAT - A System for Quantitative Sewer Assessment 1 Introduction 2 PIRAT Instrument System. *The International Journal of Robotics Research* 19 (11): 1033–1053. ISSN: 1476-7058. doi:[10.3109/14767058.2012.663827](https://doi.org/10.3109/14767058.2012.663827).

Koler, B. in sod. 2010. Realizacija geodezije v geotehniki. *Geodetski Vestnik* 54 (3): 450–468. ISSN: 03510271. doi:[10.15292/geodetski-vestnik.2010.03.450-468](https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2010.03.450-468).

Kregar, K. 2016. Optimizacija postopkov terestričnega laserskega skeniranja za meritve visoke natančnosti. Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Kregar): 306 str. (Pridobljeno 20. 4. 2019.) <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=87070&lang=slv>.

Leica. 2018. *Leica BLK360 User Manual*. Teh. poročilo. (Pridobljeno 4. 5. 2019.) <http://leica-geosystems.com/contact-us/sales/support>.

Leica, G. 2008. *User manual Leica DISTO pro*. Teh. poročilo. (Pridobljeno 20. 4. 2019.) <https://lib.store.yahoo.net/lib/distoshop/DistoPro4manual.pdf>.

Liu, Z. in Kryš, D. 2012. The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection. *Mechanical Systems and Signal Processing* 31:246–257. ISSN: 08883270. doi:10.1016/j.ymssp.2012.03.006.

Olhoeft, G. 2000. Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43 (2-4): 175–187. ISSN: 09269851. doi:10.1016/S0926-9851(99)00057-9.

Orel, B. 2019. *Linearna Algebra*. (Pridobljeno 5. 4. 2019.) <https://web.math.pmf.unizg.hr/~fran/predavanja-LA2.pdf>.

Petrie, G. in Toth, C. 2010. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. *Topographic Laser Ranging and Scanning*, št. November 2008: 1–28. doi:10.1201/9781420051438.ch1.

Romanova, A. in sod. 2013. Sewer inspection and comparison of acoustic and CCTV methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 166, št. 2 (): 70–80. ISSN: 1741-7589. doi:10.1680/wama.11.00039.

Saadeldin, R., Hu, Y. in Henni, A. 2015. Numerical analysis of buried pipes under field geo-environmental conditions. *International Journal of Geo-Engineering* 6 (1). ISSN: 2092-9196. doi:10.1186/s40703-015-0005-4.

Savšek-Safić, S., Kogoj, D. in Ambrožič, T. 2007. Terestrična izmera mikromreže pri vzpostavitvi mareografske postaje koper. *Geodetski Vestnik* 51 (1): 48–58. ISSN: 03510271.

Savšek-Safic, S. in sod. 2006. Determination of Point Displacements in the Geodetic Network. *Journal of Surveying Engineering* 132, št. 2 (): 58–63. ISSN: 0733-9453. doi:10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:2(58).

Stanic, N. in sod. 2017. A technology for sewer pipe inspection (part 1): Design, calibration, corrections and potential application of a laser profiler. *Automation in Construction* 75 (March): 91–107. ISSN: 09265805. doi:10.1016/j.autcon.2016.12.005.

Stanić, N. in sod. 2013. Potential of laser scanning for assessing structural condition and physical roughness of concrete sewer pipes. *Proceedings of SPN7*, št. 2013. (Pridobljeno 26. 3. 2019.) https://www.researchgate.net/publication/265271339_Potential_of_laser_scanning_for_assessing_structural_condition_and_physical_roughness_of_concrete_sewer_pipes.

Stenmark, J. 2018. *Pipeline Survey Meets Challenges and Deadline*. (Pridobljeno 16. 12. 2018.) <https://www.pobonline.com/articles/101421-pipeline-survey-meets-challenges-and-deadline>.

Wirahadikusumah, R. in sod. 1998. Assessment technologies for sewer system rehab. doi:[https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(97\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(97)00071-X).