

Določitev sprememb geometrije kanalizacijske deformabilne cevi iz podatkov terestričnega laserskega skeniranja

Tilen Urbančič*, Uroš Sojer **, Božo Koler*

Povzetek

Pri gradnji kanalizacijske infrastrukture se predvsem pri večjih premerih cevi vse pogosteje uporabljajo deformabilne cevi, katerih prednost je v načinu prenosa obremenitve nasipa na cev. Po zasutju se oblika cevi spremeni. V članku predstavljamo rezultate obdelav oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja notranjosti cevi. Spremembo geometrije oblike cevi v prečni smeri smo iz oblaka točk določili z izravnavo parametrov elipse po metodi najmanjših kvadratov. Analizirali smo obliko nevgrajene in vgrajene cevi. Vgrajena cev je bila v prvem primeru zasuta s predpisanim materialom, v drugem pa v celoti betonirana in zasuta. Tehnologija terestričnega laserskega skeniranja se izkaže kot primerna za tovrstne naloge. Na osnovi analiz smo definirali funkcijske zveze, s katerimi lahko napovemo vrednost sprememb geometrije deformabilnih cevi za obravnavana načina vgradnje.

Ključne besede: deformabilna cev, sprememba geometrije, izravnavo elipse, terestrično lasersko skeniranje

Key words: flexible pipe, deformation, ellipse adjustment, terrestrial laser scanning

Uvod

Večja urbana območja za zbiranje in odvajanje odpadnih voda uporabljajo obsežne podzemne sisteme kanalizacijskih cevi (Romanova et al., 2013). Vgrajene kanalizacijske cevi morajo kljubovati najrazličnejšim obremenitvam. Izkušnje in slabosti starih sistemov so skupaj z razvojem tehnologije omogočili, da se za izdelavo kanalizacijskih cevi trenutno uporabljajo novi materiali, npr. GPR (angl. Glass fiber Reinforced Plastics – GRP), iz katerih so narejene tudi deformabilne cevi.

Ustrezno kakovost sistema kanalizacijskih cevi zagotavljamo s primernim nadzorom in vzdrževanjem. Najpogosteje uporabljena metoda za nadzor stanja cevi je z video nadzorno kamero oz. CCTV (ang. closed-circuit television camera). Začetki uporabe CCTV kamer segajo v leto 1960 in so še danes najpogosteje uporabljena tehnologija za tovrstne naloge. Vse analize potekajo iz video podatkov, zajetih s kamero na daljinsko vodenem vozilu (Romanova et al., 2013). Na kakovost analize imata poleg vidnosti velik vpliv tudi izkušnost operaterja in kakovost kamere (Romanova et al., 2013; Dirksen et al., 2013). Iz podatkov CCTV kamere ne moremo dobiti nobenih geometrijskih podatkov, kar je največja slabost. Za podrobne analize stanja cevi potrebujemo podatke za izračun hidravlične zmogljivosti, strukturne trdnosti in stabilnosti ter podatke o dimenzijah ali deformacijah cevi (Stanić et al., 2017; Wirahadikusumah et al., 1998). Manjkajoče podatke lahko pridobimo z uporabo radarja (Olhoeft, 2000), sonarja (Kirkham et al., 2000), laserskim profilmetrom (Duran et al., 2003) ali z združitvijo CCTV kamere in laserskega profilmetra (Duran et al., 2007).

Za nadzor geometrije cevi in zaznavanje morebitnih sprememb so se okoli leta 2000 začele uporabljati metode, ki za merjenje uporabljajo lasersko svetlobo (Stanić et al., 2017). Najbolj pogosta je uporaba laserskih profilmetrov (Stanić et al., 2013; Liu & Krys, 2012;

* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

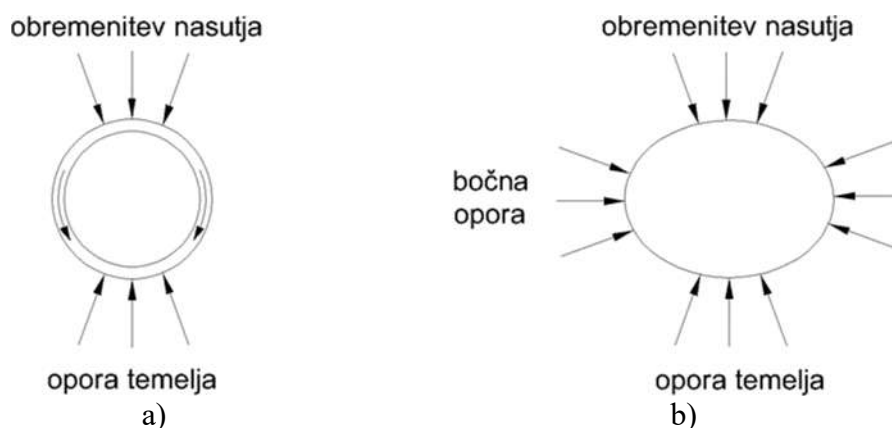
** Prenova-Gradbenik, Stanežiče 39, 1210 Ljubljana-Šentvid

Duran et al., 2003). Uporaba običajnih terestričnih laserskih skenerjev je zaradi majhnega premera cevi težavna. Stenmark (2018) je iz oblaka točk terestričnega laserskega skenerjanja za potrebe vgradnje nove cevi v obstoječo cev določil minimalni premer cevi. Merjene vrednosti omogočajo zaznavo morebitne ovalnosti cevi ali drugih pomembnih sprememb geometrije cevi. Najbolj kakovostni senzori omogočajo zaznavanje strukturnih poškodb, npr. razpok ali izgubo debeline stene zaradi različnih poškodb oz. korozije. Največja slabost uporabe laserskih instrumentov, ki jih uporabniki včasih spregledajo, je napaka v odboju laserskega žarka. Posledično se lahko tovrstna napaka odrazi kot sistematična napaka pri določevanju notranje geometrije cevi (Clemens et al., 2015).

V članku predstavljamo prvi primer uporabe terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 za določevanje morebitnih sprememb geometrije deformabilnih cevi. Testne meritve smo izvedli na nevgrajeni cevi, cevi, ki je zasuta s predpisanim materialom in na cevi, ki je v celoti betonirana ter zasuta. Pri zasutih ceveh smo iz podatkov o višini nasutja nad cevjo in velikosti spremembe oblike cevi določili funkcijsko zvezo, ki omogoča napoved sprememb geometrije vgrajenih deformabilnih cevi glede na višino nasutja.

Deformabilna cev

Glede na prenos sil pri zasutju cevi delimo na toge in deformabilne. Glavna lastnost togih cevi je, da obremenitev nasipa na cev prenesejo preko sten cevi na temelj. Take cevi imajo običajno debelejšo steno, saj mora biti stena cevi dovolj močna, da prenese težo nasutja (Slika 1 a). Drugače je pri deformabilnih ceveh, ki prenese del obremenitve nasipa tudi na utrjeno zemlino ob bok cevi. Ob večji obremenitvi na cev, se zmanjša vertikalni premer, istočano pa se poveča horizontalni premer cevi. Velikost spremembe premera v horizontalni smeri je odvisna od karakteristik in zbitosti zemljine ob straneh cevi (slika 1). Glede na vrsto materiala cevi se velikost upogiba giblje med 2 % in 7,5 % (Howard, 1996).



Slika 1: Delovanje sil: a) toga cev in b) deformabilna cev (Howard, 1996).

Načrtovalci cevodovodov naj bi upoštevali pričakovano vrednost spremembe geometrije cevi v vertikalni smeri ob zasutju, in vrednost te spremembe za obdobje 50 let po vgradnji (Bellinghausen et al., 2000). Za spremljanje geometrije cevi so predpisani različni standardi in predpisi. Statičen izračun dolgotrajne spremembe geometrije po nemškem ATV-DVWK-A 127E predpisuje, da le ta ne sme preseči 6 % premera cevi (z 90 % stopnjo zaupanja). Standarda DIN EN 16109 in DIN 4033 priporočata, da kontrolo geometrije vgrajenih cevi naredimo takoj po zasutju. Kontrolna izmera cevi naj bi vključevala določitev spremembe v vertikalni smeri po celotni dolžini zgrajenega cevododa. V standardu DIN 4033 je jasno zapisan pomen te kontrole: »Sprememba premera v vertikalni smeri je merilo kvalitete izdelave, podpore zemljine ob boku cevi in nasutja zemljine nad cevjo«. Tudi ta standard

določa največjo dovoljeno kratkoročno in dolgoročno spremembo geometrije, ki znašata 4 % oz. 6 % (Bosseler & Stein, 1997).

V raziskavi smo iz oblakov točk terestričnega laserskega skeniranja analizirali spremembo geometrije deformabilne cevi HOBAS GRP DN1200 pred vgradnjo in takoj po zasutju. Cev je narejena iz armiranega poliestra oz. GRP.

Opis delovišča in uporabljenega instrumentarija

Terensko izmero smo opravili na dveh gradbiščih kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode – Sneberje. Načini vgradnje cevi so predvsem zaradi okoljevarstvenih vzrokov določeni različno za različne odseke. V analizo sprememb geometrije vgrajene cevi smo izbrali odsek, kjer je cev le zasuta s predpisanim materialom (v nadaljevanju cev 1) ter odsek, kjer je cev betonirana in kasneje zasuta s predpisanim materialom (v nadaljevanju cev 2). Za izvedbo izmere je bilo torej nujno, da je omogočen dostop v cev. V obeh primerih smo izvedli terestrično lasersko skeniranje cevi v dolžini 70 oz. 85 m. Posamezna cev meri v dolžino 6 m in ima premer 1,2 m. Za potrebe analiz vpliva višine nasutja na spremembo geometrije cevi smo skenirali tudi območje terena nad cevjo.

Uporabili smo terestrični laserski skener Leica BLK360 (slika 2). Glavni razlogi za izbiro tega skenerja so velikost instrumenta, doseg, zadovoljiva specificirana natančnost koordinat skeniranih točk in postopek obdelave tako pridobljenih podatkov. Obravnavane cevi imajo z notranje strani gladek in rahlo svetleč zaključni sloj. Glede na predhodnje izkušnje in znane lastnosti laserske svetlobe, smo za določena območja (v odvisnosti od vpadnega kota laserskega žarka) pričakovali bolj razpršene točke okoli skenirane površine. Pri skeniranju cevi 1 smo zato določili stojišče na vsake 3 m. Prostorska ločljivost skeniranih točk je bila nastavljena na 5 mm/10 m. Z obdelavo podatkov smo prišli do zaključka, da najslabše odboje laserskega žarka dobimo na razdaljah med 0,6 m in 1,5 m od skenerja. Cev 2 smo zato skenirali s stojišč na 6 m razdalji in s prostorsko ločljivostjo skeniranih točk 10 mm/10 m.

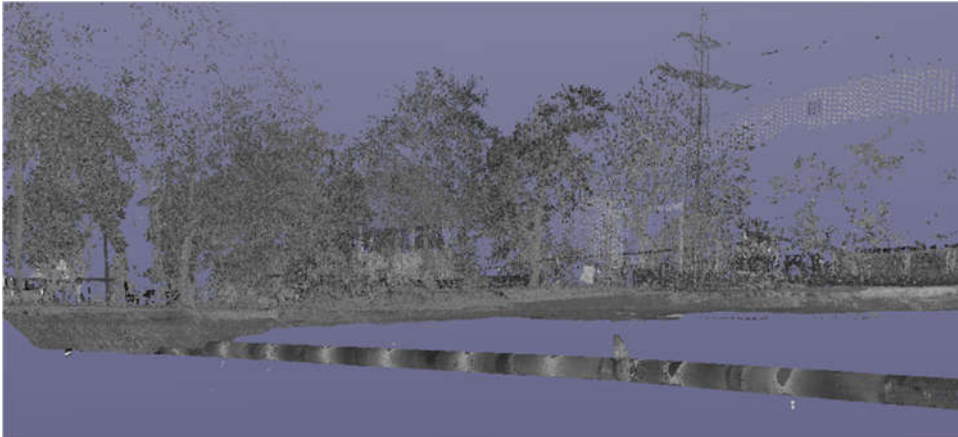


Slika 2: Terestrični laserski skener Leica BLK360 med izmero.

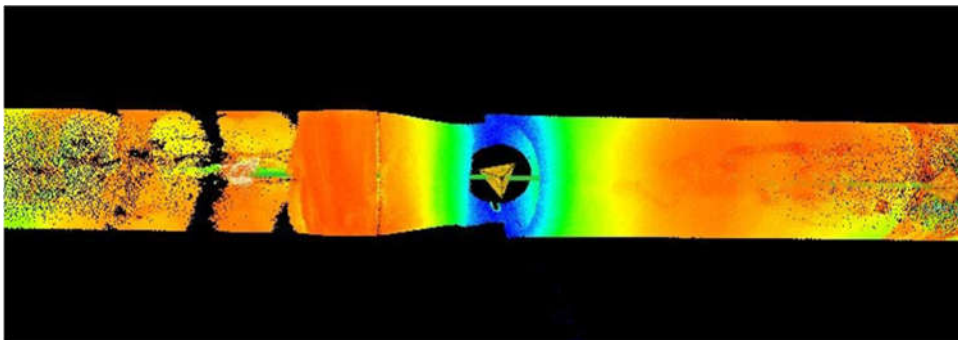
Obdelava podatkov

Osnovne korake obdelave skeniranih oblakov točk (brisanje neželenih točk in registracija oblakov točk) smo naredili v programu Leica Cyclone REGISTER 360. Oblak točk pred obdelavo za cev 2 vidimo na sliki 3. Za nadaljne izračune smo potrebovali oblak točk, ki

vsebuje le točke cevi in točke na temenom cevi. Z algoritmom RANSAC (Fischler & Bolles, 1981), ki omogoča samodejno prepoznavo točk izbrane geometrijske oblike, zaradi različno sploščene cevi, nismo bili uspešni. Odločili smo se za ročno brisanje točk, ki ne predstavljajo pravega odboja od površine cevi. Primer oblaka točk, kjer v bližini stojišča vidimo množico neželenih točk kot zožano cev, prikazujemo na sliki 4. Brisanje točk smo izvedli v oblaku točk posameznega stojišča. Poleg neželenih točk v bližini stojišča smo zaradi velikega vpadnega kota izbrisali tudi vse točke, ki so bile od stojišča oddaljene za več kot 10 m.

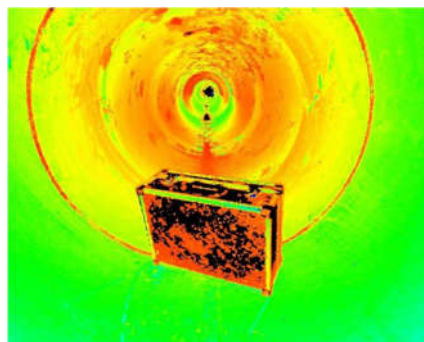


Slika 3: Registriran oblak točk za cev 1.



Slika 4: Napake v odboju laserskega žarka od notranje cevi.

Zaradi geometrije skeniranega objekta smo si za kakovostnejšo izvedbo samodejne registracije oblakov točk v cevi postavili kovčke za orodje (slika 5). Te površine so predstavljale dodatne vezne ploskve. Registracija je vključevala stojišča znotraj cevi ter tudi zunaj (teren nad cevjo).



Slika 5: Uporaba kovčkov za izboljšanje kakovosti registracije oblakov točk.

Na kakovost registracije imajo vpliv skupne površine med dvema oblakoma točk, torej njihova oblika ter odstotek prekrivanja. Kakovost registracije ocenimo kot povprečno absolutno napako (MAE). Rezultate za obe cevi navajamo v preglednici 1.

Preglednica 1: Ocene natančnosti registracij

Cev	Št. stojšč	Št. točk	Prekrivanje* [%]	MAE** [mm]	MAE*** [mm]
Cev 1	40	$31,5 \cdot 10^6$	74	4,1	4,9
Cev 2	23	$4,4 \cdot 10^6$	62	3,6	4,8

* Srednja vrednost med vsemi zaporednimi stojšči

** Samo za notranjost cevi

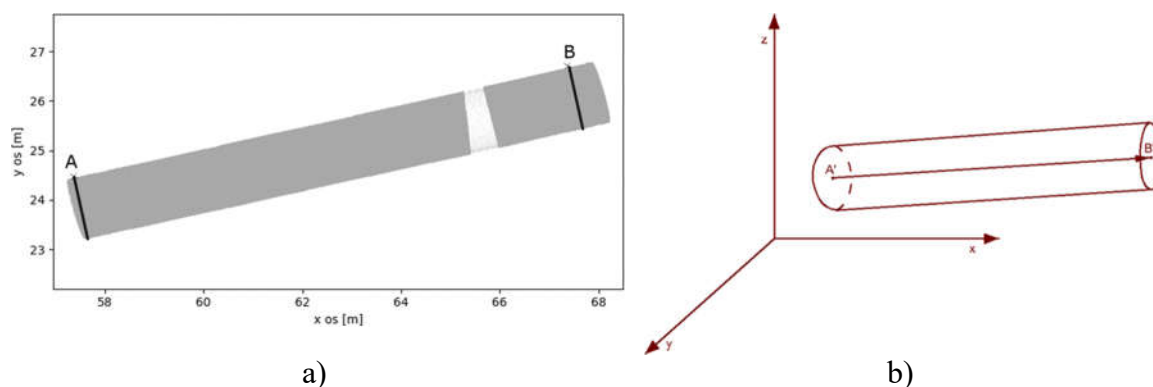
*** Vsa stojšča skupaj

Rezultat obdelave je registriran oblak točk, ki vsebuje le točke z dobrim odbojem od notranjosti cevi in točke terena nad temenom cevi.

Določitev premerov cevi – parametrov elipse

Obdelavo oblakov točk smo naredili v lastnem programu, napisanem v programskem jeziku Python, ki vključuje naslednje korake:

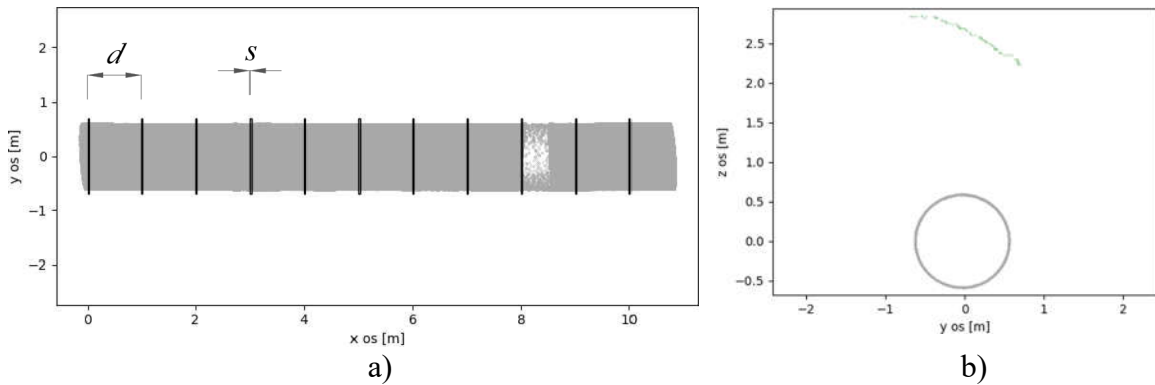
- a) *Določitev usmerjenosti cevi:* Cev želimo transformirati tako, da bo os cevi orierirana v smeri koordinate x , da jo bomo potem lažje razrezali za prečne profile. To naredimo tako, da v izdelanem grafičnem vmesniku v tlorisnem pogledu izberemo točki A in B. Iz teh dveh točk v ravnini xy izračunamo približno usmerjenost cevi in s pomočjo pravokotnega vektorja iz oblaka točk izrežemo množici točk, ki so znotraj obravnavanega odseka (slika 6a). Za izrezan prečni profil točk cevi izravnamo parametre elipse, kjer določimo tudi 3D koordinate središča cevi – točki A' in B'. Iz teh dveh točk izračunamo dejansko usmerjenost cevi (slika 6b).



Slika 6: Določitev usmerjenosti cevi: a) Določitev približne usmerjenosti cevi preko izbora točk v grafičnem vmesniku. b) Dejanska usmerjenost cevi.

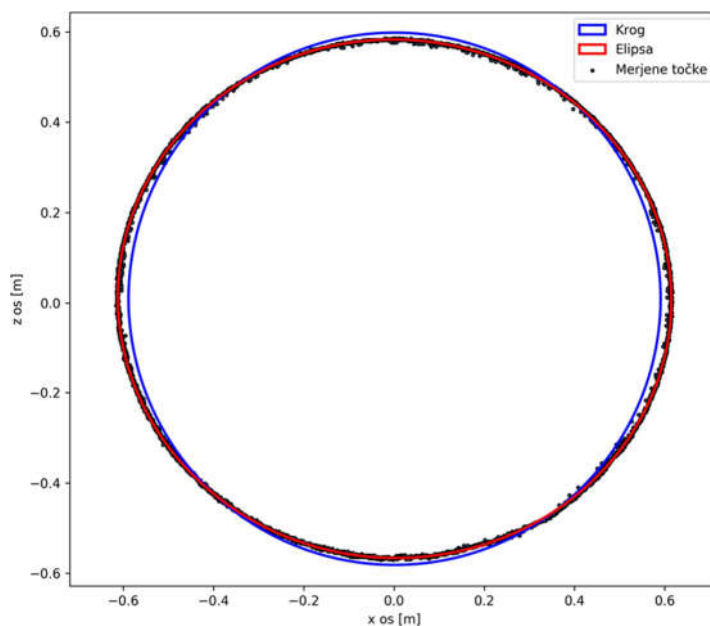
- b) *Transformacija oblaka točk:* Postopek izračuna smo poenostavili tako, da smo koordinatno izhodišče postavili v točko A' ter os x orientirali tako, da sovpada z osjo cevi. Pri rotiranju oblakov točk smo upoštevali le rotaciji okoli koordinantnih osi y in z , torej rotacijski matriki \mathbf{R}_β in \mathbf{R}_γ . Rotacija okoli osi x bi povzročila rotacijo oblaka točk okoli vzdolžne osi cevi. Rezultati izravnave premera v horizontalni in vertikalni smeri torej ne bi bili določeni za dejanski položaj cevi.

c) *Izrezovanje točk prečnega prereza cevi:* V transformiranemu oblaku točk izrežemo podmnožice točk, ki pripadajo prečnim prerezom cevi na izbranih odsekih vzdolž cevi (slika 7a). Za izbrano razdaljo d med prečnimi prerezi program izreže točke za zeleno širino s . Širino smiselno nastavimo glede na gostoto točk. Poleg točk cevi izrežemo tudi točke terena (slika 7b). Iz točk, ki pripadajo cevi, izravnamo parametre elipse, točke terena uporabimo za izračun višine terena nad temenom cevi.



Slika 7: Izrezovanje točk prečnih prerezov: a) Izrezovanje točk s korakom 1 m in širino 1 cm. b) Izrezane točke cevi (siva) in terena (zeleni)

d) *Izravnava parametrov elipse:* Oblika cevi se pri obremenitvi spremeni iz kroga v elipso. Glede na predpripravljene podatke smo izvedli izravnavo elipse v ravnini (slika 8). Uporabili smo algoritem po Halir & Flusser (1999).



Slika 8: Z rdečo je prikazana izravnana elipsa skozi merjene točke (črne pike), modri krog predstavlja obliko cevi s premerom po podatkih proizvajalca.

Elipsa velja za poseben primer splošne stožnice, ki jo lahko zapišemo kot drugo stopnjo polinoma:

$$F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

Upoštevamo splošno omejitev, ki zagotavlja elipso:

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

kjer so a, b, c, d, e in f koeficienti elipse in (x, y) koordinate točk na elipsi.

Izravnavo izvedemo z minimiziranjem odstopanj razdalje točk od stožnice. Primer izravnane elipse skozi skenirane točke in teoretične oblike prečnega prereza cevi prikazujemo na sliki 8.

Testiranje korelacij

V analizi rezultatov nastopajo spremembi premerov v vertikalni in horizontalni smeri ter višina nasutja. Morebitno podobnost porazdelitve z normalno porazdelitvijo bomo za vse tri spremenljivke ugotavljali z izračunom koeficientov asimetrije in sploščenosti.

Za spremenljivki, ki se porazdeljujeta normalno in predpostavljamo linearno povezanost, smo za določitev povezanosti uporabili Pearsonov koeficient korelacije r :

$$r = \frac{\sum x_1 x_2}{N - 1} \quad (3)$$

kjer je x_1 vrednosti prve množice spremenljivk, x_2 vrednosti druge množice spremenljivk in N število vseh statističnih enot.

V primeru ugotavljanja korelacije med spremenljivkama, kjer se ena porazdeljuje normalno, druga pa ne, smo uporabili Spearmanov koeficient korelacije ρ , ki je posebna oblika Pearsonovega koeficienta korelacije. Podatke pred izračunom koeficientov preuredimo v range. V tem primeru za izračun povezanosti uporabimo razliko med rangi različnih vrednosti:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum \delta_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (4)$$

kjer δ_i razlika med rangoma za i – to enoto in N število vseh enot (parov rangov).

Vrednost koeficienta korelacije se nahaja med -1 in 1 . Kadar je izračunan koeficient blizu -1 ali 1 govorimo o močni negativni oz. pozitivni povezanosti. Med premenljivkama ni povezanosti, kadar je koeficient korelacije blizu 0 .

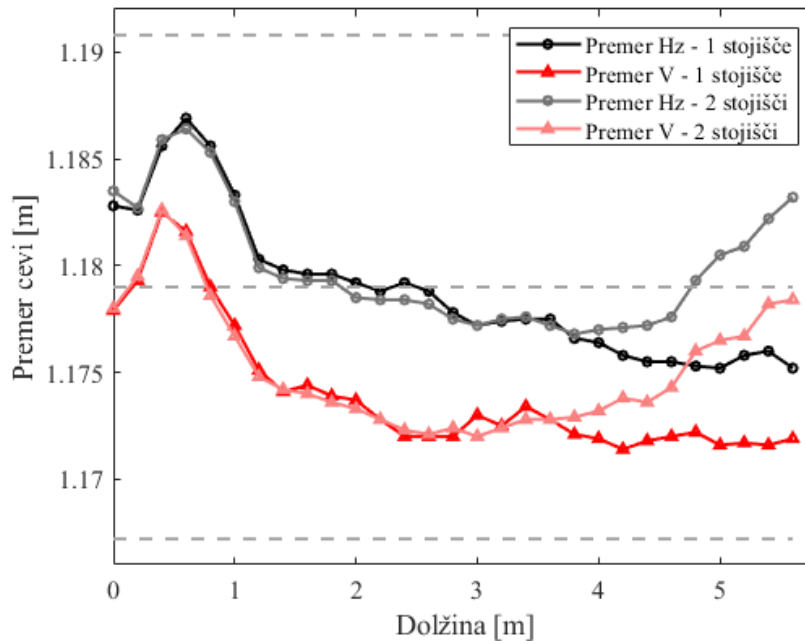
Rezultati

Analiza ne vgrajene cevi

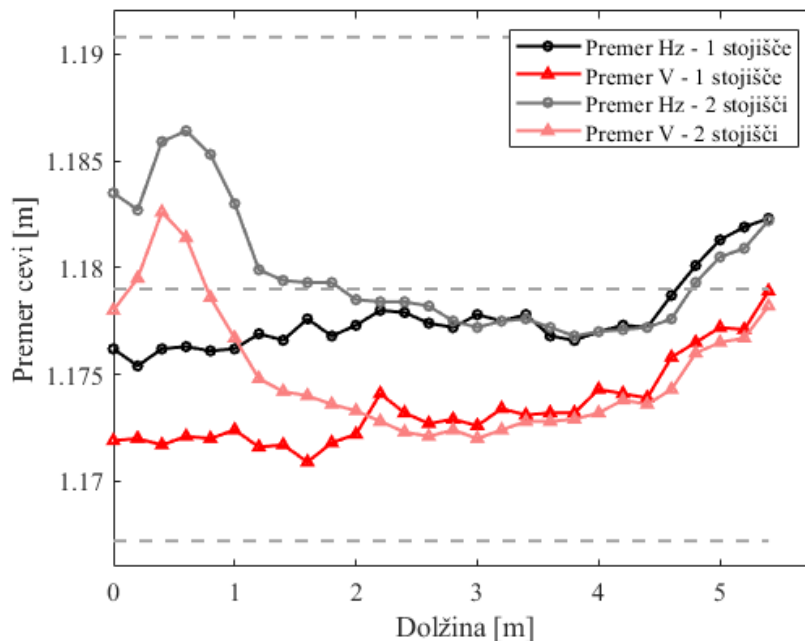
Analizo geometrije ne vgrajene cevi smo naredili zato, da bi ugotovili kakovost odboja laserskega žarka od notranje površine cevi. Cev je ležala na terenu brez dodatne obremenitve. Skenirali smo jo z obeh strani cevi in oblaka točk registrirali. Parametre elipse smo izravnali skozi točke na vsakih 20 cm za širino 2 cm iz točk vsakega stojišča posebej ter iz združenega oblaka točk (sliki 9 in 10).

Na slikah 9 in 10 smo s črtkano črto izrisali projektiran premer cevi, ki znaša 1,179 m (srednja črta) ter črti, kjer odstopanje od projektiranega premera cevi znaša $\pm 1\%$. V vseh

primerih je tako v horizontalnem kot v vertikalnem smislu odstopanje premera manjše od 1 %. Lastna teža in ostali vplivi (osončenost, temperatura,...) cevi povročijo spremembo geometrije tako, da je vertikalni premer manjši od horizontalnega in sicer za do 7 mm. Največje vrednosti so v srednjem delu cevi, kar je pričakovano. Vidimo, da se premeri v obeh smereh za izračune iz posameznega stojišča z oddaljevanjem od skenerja zmanjšujejo. V tem primeru lahko govorimo o sistematičnem vplivu zaradi odboja laserskega žarka. Z registracijo dveh oblakov točk se napaka v odboju deloma odstrani, saj je gostota točk v bližini skenerja večja, kar vpliva na rezultate izravnave elipse oz. na določitev premerov cevi.



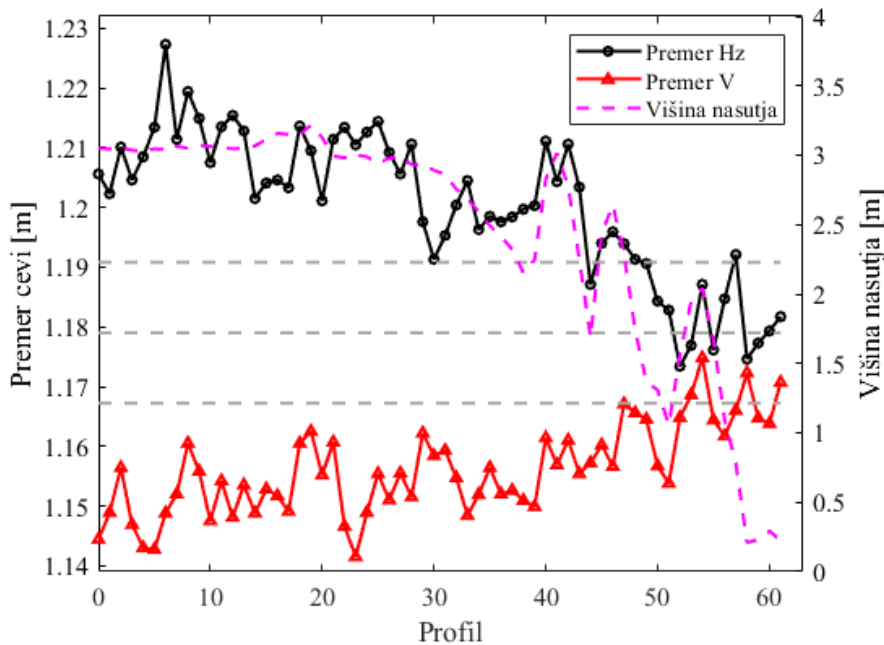
Slika 9: Izravnani premeri ne vgrajene cevi v Hz in V smeri iz oblaka točk skeniranja s stojišča na začetku cevi in iz registriranega oblaka točk dveh stojišč.



Slika 10: Izravnani premeri ne vgrajene cevi v Hz in V smeri iz oblaka točk skeniranja s stojišča na koncu cevi in iz registriranega oblaka točk dveh stojišč.

Rezultati spremembe geometrije zasute cevi

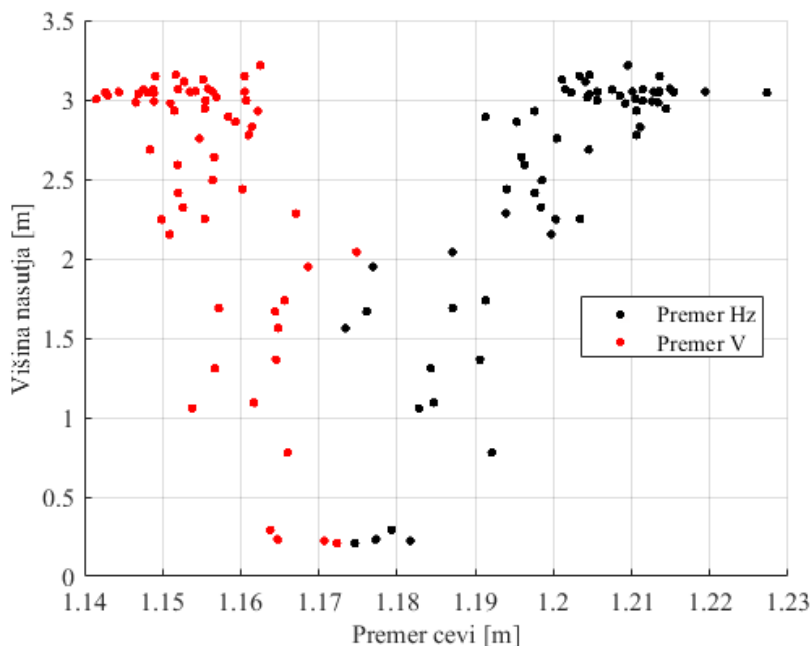
Kadar obravnavamo spremembe geometrije cevi, ki je zasuta s predpisanim materialom – cev 1, ima poleg kakovosti vgradnje zasutega materiala največji vpliv višina nasutja nad temenom cevi. Po pregledu prvih rezultatov izravnave elips za vsak meter 74 m odseka cevi, smo dodatno pregledali oblak točk in izbrisali točke, ki ne predstavljajo pravih odbojev od površja cevi. Pomagali smo si tudi z izrisi, kot ga vidimo na sliki 8. Iz vseh rezultatov smo za nadaljno analizo lahko uporabili 62 profilov oz. prečnih prerezov cevi. Rezultate izračunov premerov prikazujemo na sliki 11. Za interpretacijo rezultatov moramo poznati višine nasutja nad cevjo (slika 11). Višina nasutja je med 0,2 m in 3,2 m. Največje odstopanje horizontalnih premerov je na profilu 6 in sicer za 48 mm oz. 4,1 %. Največje odstopanje vertikalnega premera je na profilu 23, ki znaša 38 mm oz. 3,2 %.



Slika 11: Rezultati za cev 1 - horizontalni in vertikalni premeri cevi ter višina nasutja.

Iz slike 11 vidimo, da se premera približujeta projektirani vrednosti z manjšanjem višine nasutja nad cevjo. Poleg tega pa smo pričakovali, da bodo na mestih največjih horizontalnih premerov, najmanjši vertikalni premeri. Verjetno lahko razlog za ne povsem konsistentne rezultate iščemo v kakovosti odboja laserskega žarka.

Z izračunom koeficientov asimetrije in sploščenosti smo za spremenljivki premerov v vertikalni in horizontalni smeri ugotovili, da se približujeta normalni porazdelitvi. Za spremenljivko višina nasutja smo na enak način ugotovili, da se ne porazdeljuje normalno. Spremenljivko višino nasutja smo zaradi ugotovitve normalne porazdelitve spremenljivk obeh premerov kombinirali z uporabo Spearmanovega koeficienta korelacije. Za spremenljivki horizontalni premer in višina nasutja lahko trdimo, da sta močno in pomembno pozitivno povezani ($\rho = 0,78$). Za spremenljivki vertikalni premer in višina nasutja smo ugotovili, da sta statistično pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,54$) (slika 12). Za določitev povezanosti spremenljivk premerov v horizontalni in vertikalni smeri smo uporabili Pearsonov koeficient korelacije. Sledi, da sta obravnavani spremenljivki pomembno in zmerno negativno povezani ($r = -0,62$). O linearni povezanosti obeh premerov lahko sklepamo tudi iz slike 11.



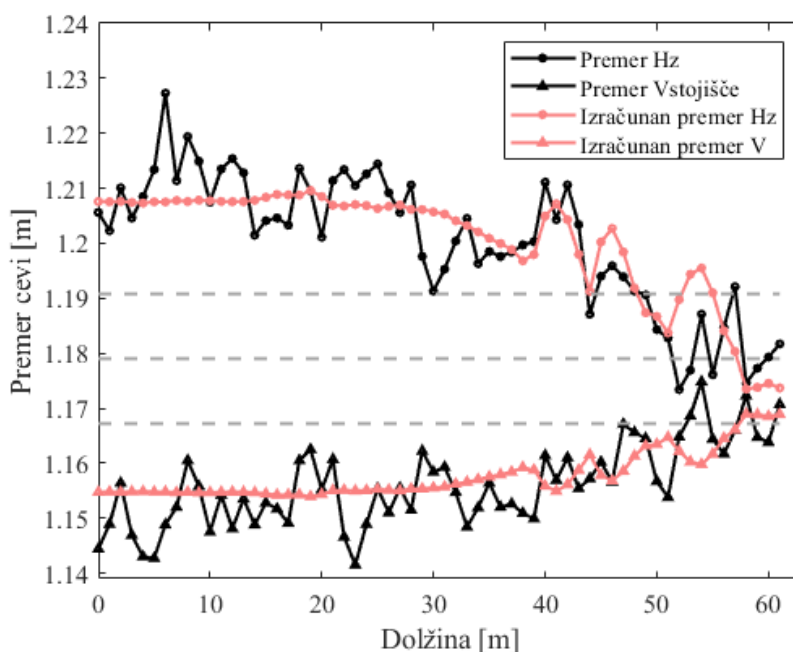
Slika 12: Razsevna grafa premerov cevi v odvisnosti od višine nasutja – cev 1.

Z upoštevanjem višine nasutja (h) lahko zapišemo funkcijsko zvezo, ki omogoča napovedovanje spremembe premera tega tipa cevi v horizontalni (H_p) in vertikalni (V_p) smeri. Pričakovana premera za zasuto cev izračunamo z enačbama:

$$H_p = 1,171 + 0,012 * h \quad (5)$$

$$V_p = 1,170 - 0,005 * h \quad (6)$$

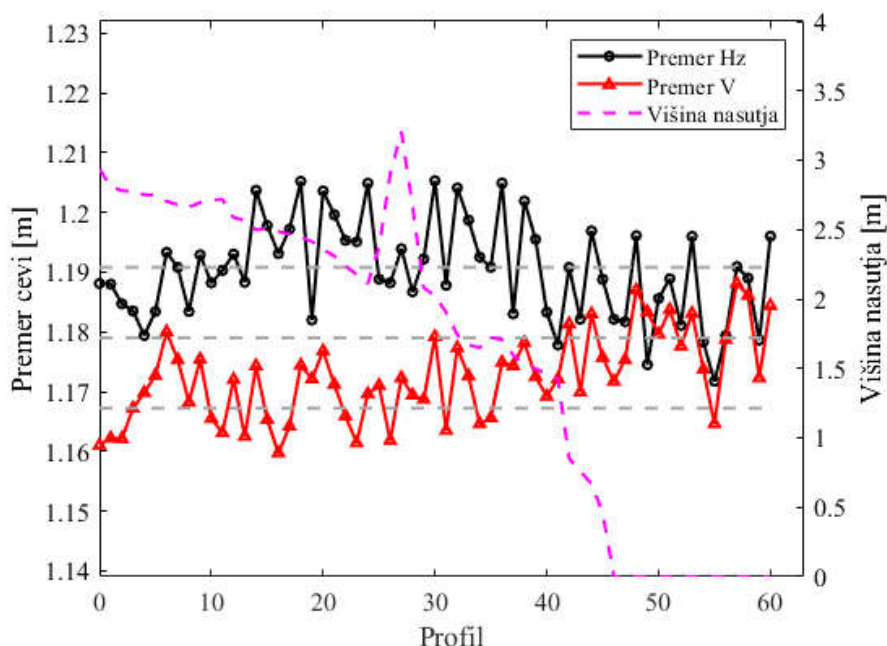
Dejanske premere cevi smo primerjali z izračunanimi iz enačb (5) in (6) (slika 13).



Slika 13: Primerjava izračunanih premerov iz enačb (5) in (6) (rdeča) in izračunanih iz oblaka točk TLS – cev 1.

Rezultati spremembe geometrije betonirane cevi

Drugi način vgradnje deformabilnih cevi, ki ga obravnavamo, je betonirana in zasuta cev – cev 2. V tem primeru obravnavamo del sistema kanalizacijskih cevi v dolžini 64 m. Po pregledu rezultatov izravnava elips za vsak meter, smo morali zaradi preslabih podatkov izločiti 3 profile. Pričakovano so zaradi betoniranja cevi razlike med premeroma manjše (slika 14). Horizontalni premer od projektiranega premera na več profilih odstopa največ za 27 mm oz. 2,3 %. Vertikalni premer najbolj odstopa na profilu 16 za 19 mm oz. 2,2 %. Več kot polovica vseh premerov se od projektirane razlikuje za manj kot 1 %.

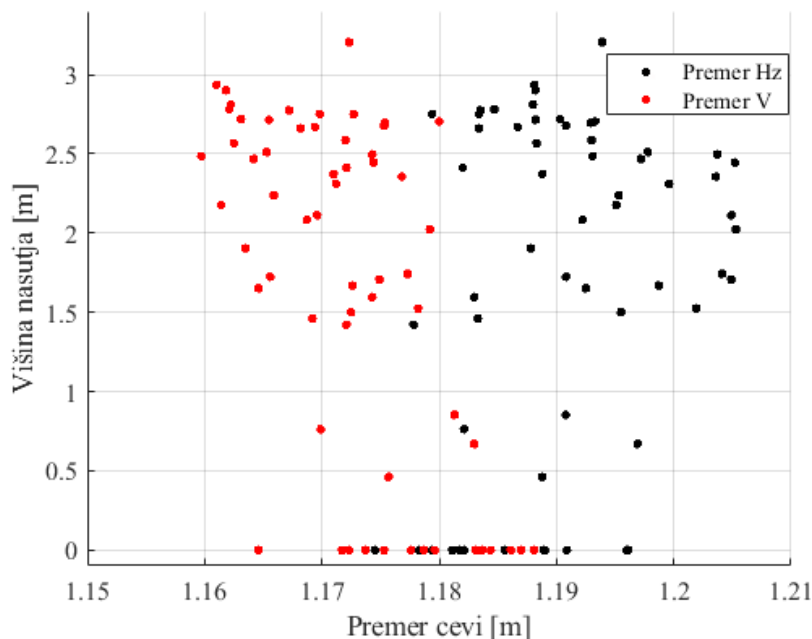


Slika 14: Rezultati za cev 1 - horizontalni in vertikalni premeri cevi.

Na sliki 14 vidimo, da je od profila 46 dalje višina nasutja enaka 0. Cev je bila v času skeniranja le betonirana, ne pa tudi zasuta. Višina nasutja se sicer giblje med 0,4 m (profil 45) in 3,2 m (profil 27). Odstopanja premerov so večja za območje, kjer je poleg betoniranja bila cev že zasuta, vendar ne tako očitno, kot v primeru rezultatov za cev 1, ki je samo zasuta (slika 11).

Postopki statističnih analiz glede porazdelitve in povezanosti posameznih spremenljivk so enaki kot pri obravnavi rezultatov za cev 1. Iz rezultatov o asimetriji in sploščenosti smo prišli do zaključka, da se horizontalni in vertikalni premer porazdelujeta normalno, spremenljivka višina nasutja pa ne. S Spearmanovim koeficientom korelacije smo ugotovili, da je povezava med spremenljivkama premer horizontalno in višina nasutja statistično nepomembna ($\rho = 0,16$). Drugače je pri korelaciji med spremenljivkama premer vertikalno in višina nasutja, kjer ugotovimo, da sta spremenljivki pomembno in zmerno negativno povezani ($\rho = -0,59$). S pomočjo izrisanih razsevnih grafov na sliki 15 lahko vidimo nekoreliranost oz. koreliranost posameznih spremenljivk. Iz dobljenih rezultatov za obravnavan tip cevi lahko trdimo, da se v primeru betoniranja premer horizontalno ne spreminja glede na višino nasutja predpisanega materiala nad temenom cevi.

Spremenljivki premer horizontalno in premer vertikalno se porazdelujeta normalno, zato smo lahko s Pearsonovim koeficientom korelacije preverili povezanost med obema spremenljivkama, ki nista statistično pomembno povezani ($r = -0,13$).



Slika 15: Razsevna grafa premerov cevi v odvisnosti od višine nasutja – cev 2.

Za napovedovanje spremembe geometrije cevi v odvisnosti od višine nasutja lahko v primeru betonirane cevi enačbo zapišemo le za premer vertikalno.

$$V_p = 1,170 - 0,005 * h \quad (5)$$

Zaključek

Na primeru dveh odsekov kanalizacijskih cevi v sklopu gradnje kanalizacijskega kolektorja C0 Medvode – Sneberje, smo preverili uporabo terestričnega laserskega skenerja Leica BLK360 za potrebe ugotavljanja sprememb geometrije vgrajenih cevi. Vgrajene cevi so deformabilne, saj so narejene iz armiranega poliestra oz. GRP. Ugotovili in potrdili smo nekatere prednosti in slabosti uporabljenega skenerja za tovrstne naloge. Glavne prednosti uporabe tega skenerja so v velikosti instrumenta, hitrosti izmere in možnosti registracije oblakov točk v cevi in na terenu nad cevmi. Med slabostmi velja omeniti, da je instrument uporaben le v ceveh z večjimi premeri (obvezna prisotnost operaterja) in da je za kakovostno registracijo oblakov točk, zaradi nerazgibane geometrije notranjosti cevi, potrebno zagotoviti dodatne vezne ploskve. Velika slabost je tudi to, da za določeno območje skeniranja pridobimo točke, ki imajo zaradi slabe obdojne površine (gladka, rahlo sijaj) in uporabljene valovne dolžine laserske svetlobe napačno izmerjeno dolžino. Te točke je potrebno odstraniti, saj imajo lahko velik vpliv na končne rezultate.

Dobljeni rezultati kljub omenjenim težavam omogočajo sprejetje nekaterih zaključkov. Iz rezultatov skeniranja prosto ležeče ne vgrajene cevi smo dokazali, da je izbira stojišča skeniranja pomembna in vpliva na izračunan premer cevi. Dokazali smo tudi, da je sprememba tako premera horizontalno kot vertikalno manjša pri cevi, ki je betonirana. Smiselno si sledijo tudi odstopanja izračunanih premerov glede na višino nasutja, predvsem za cev 1. Za spremenljivke premera horizontalno in vertikalno ter višine nasutja smo v primeru koreliranosti lahko določili približen model za napovedovanje spremembe premera vgrajene cevi.

Literatura in viri

- Bellinghausen, G. et al. (2000). ATV-DVWK-A 127E, 66 p.
- Bosseler, B., Stein, D. (1997). Requirements for recording and analysing deflection measurements in buried flexible pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 12, 98: 27–38.
- Clemens, F., Stanić, N., Van der Schoot, W., Langeveld, J., Lepot, M. (2015). Uncertainties associated with laser profiling of concrete sewer pipes for the quantification of the interior geometry. *Structure and Infrastructure Engineering* 11, 9: 1218–1239.
- Dirksen, J., Clemens, F.H.L.R., Korving, H., Cherqui F., Le Gauffre, P., Ertl, T., Plihal, H., Müller, K., Snaterse, C.T.M. (2013). The consistency of visual sewer inspection data. *Structure and Infrastructure Engineering* 9, 3: 214–228.
- Duran, O., Althoefer, K., Seneviratne, L. (2003). Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 8, 3: 401–409.
- Duran, O., Althoefer, K., Seneviratne, L. D. (2007). Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 4, 1: 118–126.
- Fischler, A. M., Bolles, C. R. (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography. *Communication of the ACM*, 24, 6: 381–395.
- Halir, R., Flusser, J. (1999). Numerically stable direct least squares fitting of ellipses: 8 p.
- Howard, A.K. (1996). Pipe Bedding and Backfill. *Geotechnical Training Manual No.7*, Second edition. 77 p.
- Kirkham, R., Kearney, P.D., 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.
- Liu, Z., Krys, D. (2012). The use of laser range finder on a robotic platform for pipe inspection. *Mechanical Systems and Signal Processing* 31: 246–257
- Olhoeft, G. (2000). Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics* 43, 2–4: 175–187.
- Romanova, A., Horoshenkov, K.V., Tait, S.J., Ertl, T. (2013). Sewer inspection and comparison of acoustic and CCTV methods. *Proceedings of the ICE - Water Management* 166, 2: 70–80.
- Stanić, N., Lepot, M., Catieau, M., Langeveld, J., Clemens, F.H.L.R. (2017). A technology for sewer pipe inspection (part 1): Design, calibration, corrections and potential application of a laser profiler. *Automation in Construction* 75: 91–107.
- Stanić, N., Van der Schoot, W., Kuijter, B., Langeveld, J., Clemens, F. (2013). Potential of laser scanning for assessing structural condition and physical roughness of concrete sewer pipes. 7th International Conference on Sewer Processes & Networks, SPN7, August 28-30, Sheffield, UK.
- Stenmark, J. (2018). Pipeline Survey Meets Challenges and Deadline.
- Wirahadikusumah, R., Abraham, D.M., Iseley, T., Prasanth, R.K. (1998). Assessment technologies for sewer system rehab. *Automation in Construction*, 7, 4: 259–270.