

# Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem

Klemen Kregar,<sup>1</sup> Gašper Štebe<sup>1</sup> in Aleš Marjetič<sup>1</sup>

## Povzetek

V prispevku opišemo metodo zaznavanja sprememb oblike ali položaja grajenega ploskovnega objekta na podlagi meritev s terestričnim laserskim skenerjem. Postopek je izveden na primeru prelivne stene na levem bregu kanala HE Zlatoličje, pri jezcu Melje na Dravi.

Jez smo skenirali v treh terminskih izmerah s štirih stojišč s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Podatki so bili transformirani v koordinatni sistem geodetske mreže, ki je bila predhodno vzpostavljena za klasično spremljanje stabilnosti objekta. Prelivno steno smo razdelili na 10 sektorjev sledeč diskontinuitetam v betonu, nato pa s postopkom RANSAC filtrirali oblake točk. Z metodo najmanjših kvadratov smo skozi točke posameznih sektorjev izravnali ravnine v vsaki terminski izmeri ter tako določili parametre ravnin in njihove natančnosti.

Zaznava spremembe položaja ali oblike grajenega objekta pomeni malo, če je ne moremo statistično ovrednotiti. Sprememba položaja in oblike objekta se izraža skozi spremembe parametrov ravnin. Ob predpostavki o normalni porazdelitvi pogreškov meritev, je moč razlike med parametri statistično testirati glede na natančnosti teh razlik. Skupno spremembo ravnine pa računamo po zgledu iz točkovne deformacijske analize kot koren vsote kvadratov razlik parametrov. Skupna razlika se ne porazdeljuje po normalni porazdelitveni funkciji, zato s simulacijo Monte-Carlo empirično določimo porazdelitveno funkcijo. Spremembe ravnin in njihove statistične značilnosti podajamo v tabelarni in grafični obliki. Rezultati analiz se skladajo z rezultati klasičnega postopka.

**Ključne besede:** deformacijska analiza, zaznavanje premikov, terestrično lasersko skeniranje, pregradni objekti

**Key words:** deformation analysis, change detection, terrestrial laser scanning, dams

## Uvod

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) je merska metoda v geodeziji, s katero, za razliko od klasične izmere, določamo položaje veliki množici točk. Za spremljanje stabilnosti velikih grajenih objektov s klasičnimi geodetskimi pristopi določamo položaje posameznim značilnim točkam na objektu z visoko natančnostjo. S TLS pa lahko izmerimo veliko točk na celotni površini objekta s slabšo natančnostjo posamezne točke (Scaioni & Wang 2016).

Direktna primerjava položaja točke med dvema zaporednima časovnim izmerama s tehnologijo TLS ni mogoča, ker s skeniranjem ne moremo izmeriti položaja poljubne izbrane točke. Prednost te tehnologije je v zajemu velike količine točk na površini objekta. Z ustrezno obravnavo takšnega oblaka točk lahko ravno tako določamo spremembe oblike in položaja objekta (Holst & Kuhlmann 2016).

V prispevku predstavljamo postopek za zaznavo in statistično ovrednotenje sprememb ploskovnega objekta. Samo zaznavanje spremembe nima uporabne vrednosti, če ne moremo oceniti kakovosti določitve te spremembe. Tako pri različnih metodah

---

<sup>1</sup> UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

deformacijske analize v geodeziji pogosto zasledimo tudi statistično vrednotenje rezultatov. Gamse et al. (2016) uporabljajo statistično testiranje deformacij jezov določenih z meritvami nihala in geodetskimi merjenji, Lindenbergh & Pfeifer (2005) statistično testiranje opravita s pomočjo testne statistike globalnega testa modela pri izravnavi, v katero so vključene vrednosti iz dveh terminskih izmer. Primer iz TLS pa je statistično testiranje neodvisnosti parametrov diferencialnih enačb, s katerimi sta Gordon & Lichti (2007) opisovala krivljenje nosilca pod obremenitvijo.

TLS se pogosto uporablja za spremljanje stabilnosti pregradnih objektov oziroma jezov (Schafer et al. 2004). Postopek, ki ga predlagamo v prispevku pa je, glede na znano literaturo, inovativen in enostaven. Uporabili smo ga na praktični nalogi preverjanja stabilnosti prelivne stene jezov Melje v Mariboru.

V prispevku bomo opisali obravnavano delovišče, izvedbo geodetske mreže za zagotovitev koordinatnega sistema, skeniranje TLS in georeferenciranje podatkov, izravnavo ravnin skozi oblak točk ter primerjavo parametrov ravnin med posameznimi terminskimi izmerami s statističnim testiranjem.

## Meritve in izračuni

### Delovišče

Jez Melje stoji na reki Dravi, kjer ta zapušča mesto Maribor. Jez z vodo oskrbuje HE Zlatoličje, s katero ga povezuje 17 km dolg kanal. Na začetku kanala je njegov levi breg nekoliko nižji od desnega, kar bi v primeru nenadejanih težav v HE Zlatoličje zagotovilo prelitje vode iz kanala na levo stran nazaj v strugo Drave. Ker je predviden biološki minimum pretoka vode po stari strugi reke  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , so se odločili v prelivno steno vgraditi malo hidro elektrarno (MHE), ki bo izkoriščala tudi potencial vode, prelite zaradi biološkega minimuma. Gradnja MHE je povzročila napetosti v prelivni steni, zato se je upravljavec (DEM) odločil za geodetske meritve kritičnega odseka prelivne stene (Slika 1).

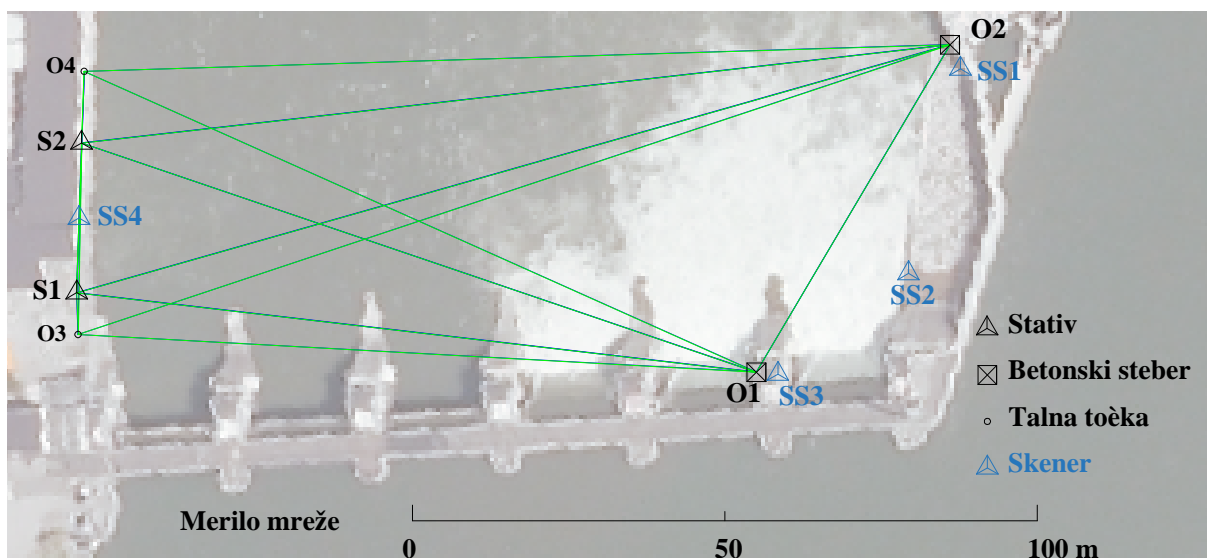


Slika 1: Situacija prelivne stene z malo hidroelektrarno

### Koordinatna osnova – Geodetska mreža

Na jezov Melje smo v vsaki terminski izmeri izmerili geodetsko mrežo visoke natančnosti. Geodetska mreža je sicer namenjena klasičnemu spremljanju stabilnosti prelivne stene, v našem primeru pa smo točke geodetske mreže uporabili za georeferenciranje skeniranih podatkov, to je transformacijo vseh skeniranih podatkov v stabilni koordinatni sistem. Mreža je prikazana na Sliki 2 in ima šest točk: O1 in O2 sta

stabilizirani kot betonska stebra; O3 in O4 sta talni točki, ki ne omogočata postavitve instrumenta; S1 in S2 sta stabilizirani s stativom. Merjenja smo izvedli v treh terminskih izmerah: 21. aprila 2015, 14. julija 2015 in 10. oktobra 2016. Merili smo s preciznim tahimetrom Leica TS30 v kombinaciji s preciznimi merskimi prizmami Leica GPH1P. Instrument in prizme so bili prisilno centrirani v podnožja na točkah O1, O2, S1 in S2, na točkah O3 in O4 pa sta bili vedno le prizmi.



Slika 2: Geodetska mreža in stojišča skenerja na jezju Melje

Smeri z vseh stojišč proti vsem vidnim točkam smo merili v 7 girusih, istočasno so bile merjene zenitne razdalje in poševne dolžine v 7 ponovitvah v obeh krožnih legah. Za meteorološko redukcijo dolžin smo merili tudi meteorološke parametre. Datum geodetske mreže določata domnevno stabilni talni točki O3 in O4. Meritve v geodetski mreži smo izravnali (Kuang 1996), rezultat izravnave so položaji točk in njihove natančnosti.

### Terestrično lasersko skeniranje

Za skeniranje smo uporabili skener Riegl VZ-400 v kombinaciji z Leica 6" okroglimi »tilt & turn« tarčami (Slika 3). Skener je stal na stojiščih, ki so označena na Sliki 2. Na vsakem stojišču smo najprej skenirali tarče, centrirane na stojišča geodetske mreže, z gostoto  $1 \times 1$  mm, nato pa še obravnavani del prelivne stene (Slika 1) z gostoto približno  $2 \times 2$  cm.



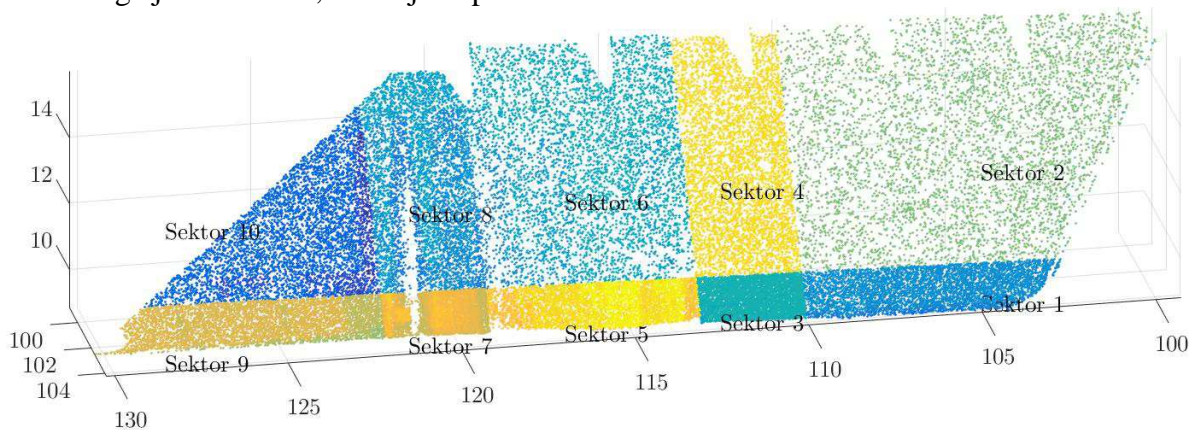
Slika 3: Uporabljena merska oprema

Skenograme z vseh stojišč smo transformirali v skupni koordinatni sistem, ki ga določajo položaji točk geodetske mreže. Centre skeniranih tarč v skenerjevem lastnem sistemu smo iz finih oblakov točk določili s posebnim postopkom, ki je opisan v (Kregar et al. 2013), njihovi položaji v referenčnem koordinatnem sistemu, pa so določeni z izravnavo geodetske mreže.

Ko so vsa stojišča georeferencirana, lahko oblake točk skeniranega dela prelivne stene združimo in nato s postopkom RANSAC (Fischler & Bolles 1981; Urbančič et al. 2016) odstranimo vse točke, ki ne ležijo na obravnavani ravnini prelivne stene.

#### Izravnava ravnin

Glavni namen raziskave je zaznati spremembe položaja ali oblike objekta preko sprememb parametrov ravnin izravnanih skozi skenirani oblak točk objekta. Majhne spremembe na zgolj majhnem odseku prelivne stene ne bi značilno vplivale na ravnino izravnano skozi celotno steno. Odločili smo se za razdelitev stene na manjše sektorje, s čimer bomo spremembe lažje opazili. Meje med sektorji sledijo diskontinuitetam v betonu, iz katerega je stena vlita, sektorji so prikazani na Sliki 4.

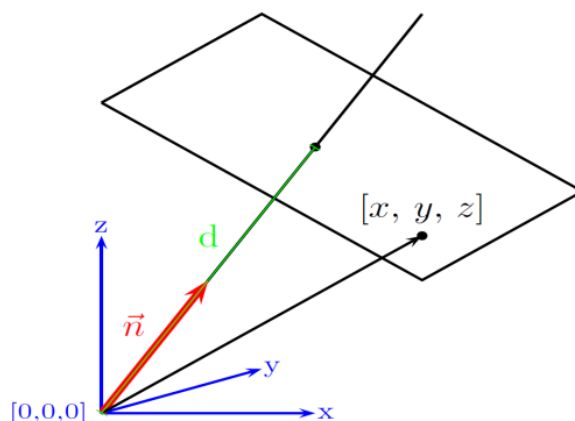


Slika 4: Razdelitev stene na sektorje

Skozi oblak točk vsakega sektorja izravnamo ravnino, ki je matematično opisana s štirimi parametri, kot kaže Slika 5. Orientacijo ravnine določa normalni vektor  $\vec{n} = [a \ b \ c]$ , položaj ravnine pa parameter  $d$ , ki predstavlja oddaljenost ravnine od koordinatnega izhodišča. Osnovna enačba ravnine je

$$\begin{aligned} ax + by + cz &= d \\ \vec{n} \cdot \vec{x} &= d \end{aligned} \quad (1)$$

Z drugimi besedami: pravokotna projekcija vsake točke ravnine na vektor normale je enaka  $d$ .



Slika 5: Parametri ravnine

Prileganje oziroma izravnavo ravnine je opisal že Pearson (1901), mi pa smo jo izvedli z geodetsko metodo najmanjših kvadratov (Ghilani 2011). Rezultat izravnave so parametri ravnine  $a, b, c$  in parameter  $d$  in njihove natančnosti, ki izhajajo iz variančno-kovariančne matrike

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab} & \sigma_{ac} & \sigma_{ad} \\ & \sigma_b^2 & \sigma_{bc} & \sigma_{bd} \\ & & \sigma_c^2 & \sigma_{cd} \\ [sym. & & & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Zaradi ogromne količine točk v skeniranem oblaku so z izravnavo določene natančnosti često precenjene. Natančnost parametrov je hkrati ključni element pri statistični obravnavi značilnosti sprememb ravnine med terminskimi izmerami, zato je nujno natančnost ovrednotiti bolj realistično.

Ocena natančnosti mora biti neodvisna od števila točk v oblaku, zato smo izvedli postopek s povečevanjem naključnega vzorca. Iz celotnega oblaka smo po 50-krat izbrali po  $N$  naključnih točk, skozi njih izravnali ravnino, ter opazovali razpršenost parametrov ravnine v teh 50 ponovitvah. Velikost naključnega vzorca smo po korakih povečevali  $N = 20000, 40000, \dots$  Grafi v poglavju z rezultati bodo pokazali, kako se razpršenosti rezultatov iz tega testa skladajo s standardnimi odkloni parametrov iz izravnave.

### Deformacijska analiza

Sprememba položaja ali oblike dela prelivne stene se mora izraziti kot sprememba parametrov ravnine nekega sektorja med dvema terminskima izmerama. Spremembo parametrov moramo statistično ovrednotiti. Uredimo parametre ravnine nekega sektorja iz 1. terminske izmere v vektor  $\mathbf{p}_1 = [a_1 \ b_1 \ c_1 \ d_1]$ , ter parametre ravnine istega sektorja iz 2. terminske izmere v vektor  $\mathbf{p}_2 = [a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2]$ . Sprememba ravnine izražena po komponentah je preprosto razlika vektorjev

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = [a_2 - a_1 \ b_2 - b_1 \ c_2 - c_1 \ d_2 - d_1] = [\Delta a \ \Delta b \ \Delta c \ \Delta d] \quad (3)$$

Deformacijsko analizo smo izvedli po zgledu (Savšek-Safić et al. 2006), zato celotno spremembo ravnine računamo tako, kot sicer računamo skupni premik točke

$$\delta = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \Delta d^2} \quad (4)$$

Za statistično ovrednotenje sprememb  $\Delta$  in  $\delta$  moramo poznati natančnost njune določitve. Pri analizi po komponentah določimo natančnosti razlik parametrov z vsoto variančno-kovariančnih matrik ravnine v posamezni terminski izmeri

$$\sigma_{\Delta p}^2 = \text{diag}(\Sigma_1 + \Sigma_2) \quad (5)$$

Za natančnost skupne spremembe ravnine  $\delta$  pa uporabimo zakon o prenosu varianc in kovarianc

$$\mathbf{J} = [-\Delta a \quad -\Delta b \quad -\Delta c \quad -\Delta d \quad \Delta a \quad \Delta b \quad \Delta c \quad \Delta d]/\delta \quad (6)$$

$$\sigma_{\delta}^2 = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \mathbf{J}^T \quad (7)$$

Statistično testiranje izvedemo v petih korakih (Turk 2012). Spremembo ravnine med dvema terminskima izmerama testiramo s statističnim testom domneve o srednji vrednosti slučajne spremenljivke. Zanima nas ali je sprememba parametra (ali skupna sprememba ravnine) enaka nič ali ne?

1. *Nastavimo ničelno in alternativno hipotezo*  
 $H_0: \Delta = 0$  ali  $\delta = 0$  – sprememba ni značilna  
 $H_1: \Delta \neq 0$  ali  $\delta \neq 0$  – sprememba je značilna
2. *Izberemo testno statistiko, ki ustreza ničelni hipotezi ter določimo njeno porazdelitev.*  
 Testna statistika je razmerje med spremembo  $\Delta$  in njeno natančnostjo  $\sigma_{\Delta}$ .

$$T_{\Delta} = \Delta/\sigma_{\Delta} \quad (8)$$

Ker je sprememba  $\Delta$  linearna kombinacija normalno porazdeljenih slučajnih spremenljivk iz izravnave, lahko rečemo, da je normalno porazdeljena tudi testna statistika  $T_{\Delta}$ . Za skupno spremembo  $\delta$  pa je testna statistika

$$T_{\delta} = \delta/\sigma_{\delta} \quad (9)$$

Porazdelitev te testne statistike je neznana.

3. *Izberemo stopnjo značilnosti testa  $\alpha$  in glede nanjo določimo meje kritičnega območja zavrnitve ničelne hipoteze.* Za izbrano stopnjo značilnosti  $\alpha = 5\%$  so meje območja  $(-\infty, k_{\alpha/2}] \cup [k_{1-\alpha/2}, \infty)$  kar za normalno porazdelitev znaša  $(-\infty, -1.96] \cup [1.96, \infty)$ .  
 Za skupno spremembo  $\delta$  bomo uporabili enostranski test, ker  $\delta$  ne more biti negativna vrednost. Kritično območje je  $[t_{1-\alpha}, \infty)$ , konkretne vrednosti pa zaradi neznanne porazdelitve še ne moremo določiti.
4. *Izračunamo testno statistiko  $T$  in preverimo ali leži v kritičnem območju.*
5. *Testiranje zaključimo z eno od trditev:*

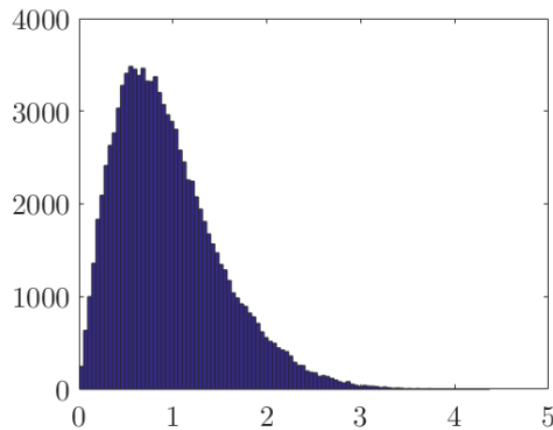
- Če  $T$  pade v kritično območje, zavrnilo ničelno hipotezo in sprejmemo alternativno ob tveganju  $\alpha$ . *Ravnina se je med terminskima izmerama statistično značilno spremenila.*
- Če  $T$  pade izven kritičnega območja, ničelne hipoteze ne moremo zavrniti ob tveganju  $\alpha$ . *Ne da se trditi, da se je ravnina med terminskima izmerama spremenila.*

Ker skupna sprememba ravnine  $\delta$  ni linearna kombinacija normalno porazdeljenih parametrov ravnin iz izravnave, smo njeno porazdelitev izračunali z znano metodo Monte-Carlo, ki je bila za deformacijsko analizo že uporabljana (Savšek-Safić et al. 2006). Za simulacijo potrebujemo veliko naključnih vektorjev  $\mathbf{y}_i$ , ki predstavljajo simulacije vektorja sprememb  $\Delta \mathbf{p}$ . Vektorji se morajo porazdeljevati skladno s kovariančno matriko prave spremembe ravnine  $\Sigma_{\Delta \mathbf{p}}$ . To dosežemo tako, da z metodo Box & Muller (1958) simuliramo normalno porazdeljene vektorje  $\mathbf{n}_i$  in jih nato množimo z  $\mathbf{U}$ , ki je rezultat Choleskyjevega razcepa matrike  $\Sigma_{\Delta \mathbf{p}}$ .

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \Sigma_{\Delta \mathbf{p}} \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{U}^T \mathbf{n}_i \quad (11)$$

Sedaj lahko za vsak simuliran vektor sprememb izračunamo skupno spremembo  $\delta$ , njeno natančnost  $\sigma_\delta$  in testno statistiko  $T_\delta$ . Na Sliki 6 je histogram testnih statistik  $T_\delta$ , za 100.000 simuliranih sprememb.



Slika 6: Histogram simuliranih testnih statistik  $T_\delta$

Mejo kritičnega območja za zavrnitev ničelne hipoteze preberemo iz histograma in sicer tako, da poiščemo vrednost  $t$ , za katero velja, da je 5 % (to je v našem primeru 5.000) simuliranih testnih statistik večjih od nje.

$$t_{1-\alpha} = T_{\delta, n(1-\alpha)} \quad (12)$$

Za vsak sektor, ki smo ga v dveh terminskih izmerah skenirali ter skozi oblak točk izravnali ravnino, lahko zdaj določimo testno statistiko  $T_\delta$  in mejo kritičnega območja  $t_{1-\alpha}$ . S primerjavo teh dveh vrednosti lahko podamo izjavo o značilnosti spremembe ravnine posameznega sektorja med izmerama.



## Rezultati

### Geodetska mreža in georeferenciranje

Merjenja smo izvedli v treh terminskih izmerah: 21. aprila 2015, 14. julija 2015 in 10. oktobra 2016. V vsakem terminu smo izmerili geodetsko mrežo. Mreža ima 6 točk, od katerih sta dve točki talni in ne omogočata postavitve instrumenta. Talni točki definirata geodetski datum mreže. V izravnavi kot opazovanja nastopajo: 20 merjenih horizontalnih smeri, 14 horizontalnih dolžin in 14 višinskih razlik ter kot neznanke: 12 koordinatnih in 4 orientacijske neznanke. Nadštevilnost modela je 32. V Preglednici 1 podajamo nekaj cenilk kakovosti geodetske mreže v vsaki od terminskih izmer.

Preglednica 1: Podatki o izravnavah geodetske mreže

	1. terminska izmera	2. terminska izmera	3. terminska izmera
A-priori natančnosti opazovanj $\sigma_a$ ; $\sigma_d$ ; $\sigma_{\Delta h}$	1"; 0,3 mm; 1,5 mm	2"; 0,2 mm; 0,8 mm	2"; 0,2 mm; 0,3 mm
Globalni test modela	1,19	1,06	1,18
Povprečna natančnost koordinat: $\sigma_x$ ; $\sigma_y$ ; $\sigma_z$	0,28; 0,13; 0,73 mm	0,38; 0,14; 0,46 mm	0,29; 0,12; 0,19 mm

V vsaki terminski izmeri smo skenirane podatke transformirali v koordinatni sistem geodetske mreže. Transformacija je izvedena s pomočjo oslonilnih točk. V Preglednici 2 podajamo statistike o kakovosti georeferenciranja stojišč skenerja.

Preglednica 2: Kakovost georeferenciranja: 1. vrstica – natančnosti parametrov rotacije (kot in vektor); 2. vrstica – natančnosti parametrov translacije; 3. vrstica – skupni pogrešek

Stojišče skenerja	1. terminska izmera	2. terminska izmera	3. terminska izmera
SS1		37" [0,11 0,16 0,38] mm [2,78 1,46 0,85] mm 5,21 mm	2" [0,01 0,02 0,01] mm [0,24 0,24 1,64] mm 0,81 mm
SS2	24" [0,10 0,07 0,11] mm [1,86 1,33 2,70] mm 2,97 mm	15" [0,13 0,10 0,10] mm [3,90 3,14 4,87] mm 6,11 mm	10" [0,23 0,25 1,18] mm [2,39 2,09 2,66] mm 4,24 mm
SS3	18" [0,05 0,07 0,12] mm [1,02 1,03 1,36] mm 3,42 mm	2" [0,30 0,21 4,56] mm [0,46 0,84 0,42] mm 3,20 mm	4" [0,23 0,16 1,50] mm [0,67 1,55 0,36] mm 6,29 mm
SS4	6" [0,04 0,04 0,02] mm [1,52 1,16 1,32] mm 4,09 mm	47" [0,12 0,15 0,43] mm [2,43 1,39 0,95] mm 3,99 mm	21" [0,04 0,04 0,11] mm [1,45 1,28 0,41] mm 5,80 mm

Kakovost georeferenciranja se spreminja glede na stojišča in tudi glede na izmere. Bistveno je, da se (ne)natčnost parametrov pravilno upošteva pri določanju natančnosti parametrov ravnin, ki jih primerjamo v deformacijski analizi.

### Izravnavo ravnine

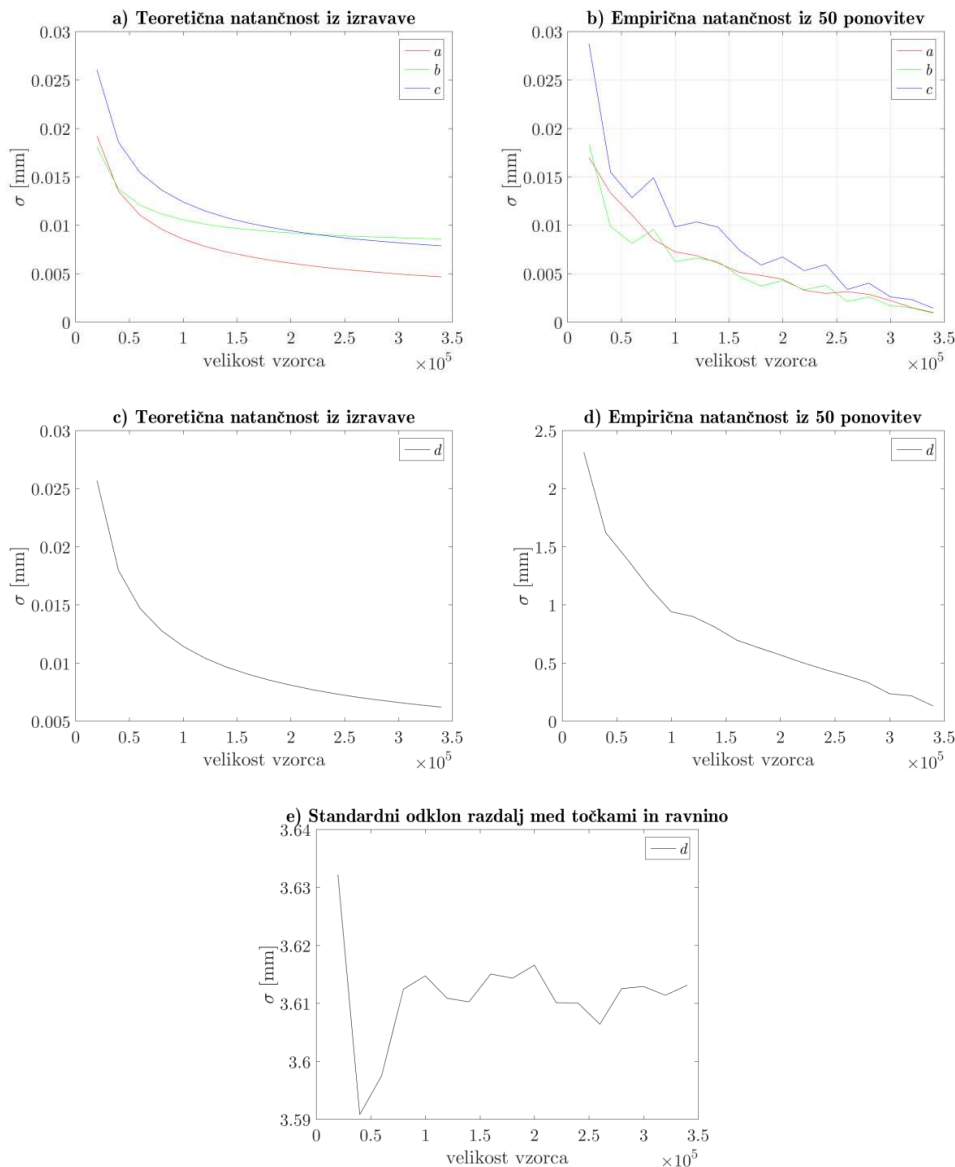
Skozi oblake točk vsakega sektorja v vsaki terminski izmeri smo izravnali ravnino. Rezultati so parametri ravnin in njihove natančnosti. A-priori natančnost točk, ki vstopajo v izravnavo kot opazovanja, je določena iz natančnosti skenerja (Kregar 2016), upoštevana



pa je tudi natančnost georeferenciranja. Za vse točke posameznega sektorja je privzeta enaka a-priori natančnost, izračunana za središčno točko sektorja.

Rezultati testa postopnega povečevanja vzorca, s katerim želimo realistično oceniti natančnost parametrov izravnanih ravnih, so prikazani na Sliki 7. Pri oceni parametrov normale ravnine  $a$ ,  $b$  in  $c$ , z večanjem števila točk razpršenosti padajo tako za natančnosti iz izravnave, kot za razpršenosti 50 ponovitev (Sliki 7a in 7b). Sklepamo, da so natančnosti normale realistično ocenjene v izravnavi.

Pri oceni parametra  $d$  (Sliki 7c in 7d) pa moramo upoštevati spremembo merila v izrisih. Vrednosti natančnosti parametra  $d$  iz izravnave so približno stokrat manjše od empiričnih. Boljša izbira za opis natančnosti parametra  $d$  zna biti razpršenost točk okoli ravnine, ki jo prikazuje Slika 7e in ni odvisna od velikosti vzorca.



Slika 7: Teoretične – iz izravnave (a in c) in empirične – iz 50 ponovitev (b in d) razpršenosti parametrov ravnin.

## Rezultati deformacijske analize

Rezultate izravnjav ravnin in realistične ocene natančnosti smo uporabili v predlaganem postopku deformacijske analize. Najprej smo primerjali ravnine izravnane skozi oblake točk skenirane v istem terminu z različnih stojišč in tako preverili kakovost georeferenciranja, šele nato smo med seboj primerjali terminske izmere z vseh stojišč.

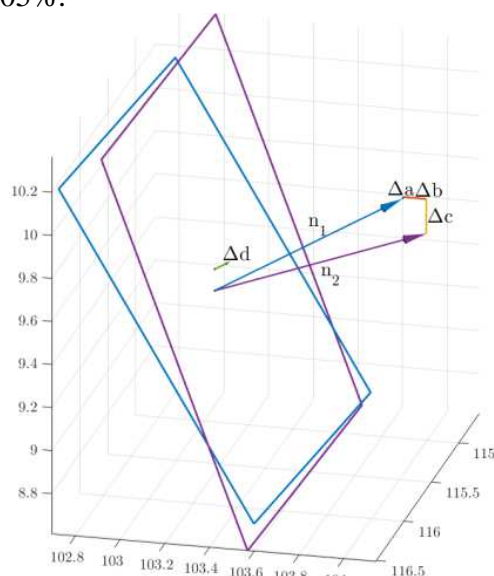
Rezultate predstavljamo v tabelarni in grafični obliki, pri čemer se v tem prispevku omejimo le na enega od sektorjev. V Preglednici 3 so v prvih dveh vrsticah podani parametri ravnine sektorja 5 v 1. in 2. terminski izmeri. Razlike med parametri so izračunane v 3. vrstici, natančnosti teh razlik pa v 4. vrstici. Testne statistike, ki so razmerje med spremembo parametra in natančnostjo spremembe, so podane v 5. vrstici.

Na desni strani preglednice je izračunana skupna sprememba ravnine  $\delta$ , njena natančnost  $\sigma_\delta$  in testna statistika  $T_\delta$ , povsem na desni pa še meja kritičnega območja za skupno spremembo.

Preglednica 3: Sprememba ravnine v sektorju 5 med 1. in 2. terminsko izmero

Sektor 5	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
$p_1$ [m]	0.0514	0.8520	0.5210	2.0744		
$p_2$ [m]	0.0539	0.8418	0.5371	2.0653		
$\Delta p$ [m]	0.0025	-0.0102	0.0161	-0.0091	$\delta = 0.0213$	
$\sigma_{\Delta p}$ [m]	0.0002	0.0038	0.0023	0.0126	$\sigma_\delta = 0.0054$	
$T_\Delta$	10.9	2.7	6.9	0.7	$T_\delta = 4.0$	$t_{1-\alpha} = 2.1$

Iz Preglednice 3 vidimo, da so se parametri normale ravnine *a*, *b* in *c* značilno spremenili, saj so testne statistike absolutno večje od meje kritičnega območja  $k_{\alpha/2} = 1.96$ . Celotna testna statistika skupne spremembe leži v kritičnem območju zavrnitve ničelne hipoteze, zato ob tveganju  $\alpha = 5\%$  trdimo, da se je ravnina sektorja 5 med 1. in 2. terminsko izmero statistično značilno spremenila. Ob danih vrednostih je dejansko tveganje za to trditev le 0.005%.



Slika 8: Nazoren grafični prikaz spremembe ravnine

Slika 8 je poskus nazornega grafičnega prikaza spremembe ravnine sektorja 5 med 1. in 2. terminsko izmero. Modri in vijoličasti vektor  $\vec{n}_1$  in  $\vec{n}_2$  predstavljata normali ravnine v 1. in 2. terminski izmeri. Razlika med njima je označena z  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  in  $\Delta c$ , pri čemer je prva

komponenta komaj vidna. Sprememba parametra  $d$  je označena z zeleno puščico in oznako  $\Delta d$ . Sprememba seveda ni izrisana v merilu, ampak je zaradi nazornosti povečana.

## Zaključek

V prispevku predlagamo postopek za zaznavanje sprememb oblike ali položaja grajenega objekta. Postopek je primeren za spremljanje sprememb ploskovnih objektov z metodo izmere, katere rezultat je oblak točk.

Glavna vrednost predlaganega postopka je celovito statistično ovrednotenje sprememb objekta. Poleg tega v prispevku predstavljamo celoten potek dela od terenske izmere, zagotovitve koordinatnega sistema in izravnave ravnin s posebnim poudarkom na realističnem ocenjevanju parametrov, ki jih primerjamo v deformacijski analizi.

Rezultati postopka so predstavljeni za konkreten primer v tabelarni in grafični obliki. V tabelarni obliki so podani parametri ravnin v dveh terminskih izmerah, razlike med njimi, statistične cenilke spremembe ter njihova statistična značilnost. Grafični prikaz skuša nazorno predstaviti zaznana sprememba.

Predlagani postopek je dovolj občutljiv, da lahko zazna najmanjše še zaznavne spremembe objekta, ob dani natančnosti merske metode. Zaradi občutljivosti metode je izjemnega pomena zagotovitev ustreznih podatkov za analizo. Posebno pozornost je potrebno nameniti kakovostni oceni natančnosti vseh količin v postopku. Poleg tega je zelo pomembno, da v podatkih ni točk, ki v resnici ne ležijo na objektu. To smo zagotovili s postopkom RANSAC, ki pa na mejah obravnavane ravnine vedno obdrži tudi nekatere točke, ki ne ležijo na njej. Obravnavano območje bi bilo zato potrebno predhodno ročno točno obrezati, česar pa v našem delu zaradi demonstrativne narave prispevka nismo naredili.

Predlagana statistična analiza se sicer lahko uporabi na skeniranih objektih poljubnih oblik, dokler je to obliko mogoče matematično opisati s parametri in določiti natančnosti teh parametrov.

## Literatura in viri

- Box, G.E.P. & Muller, M.E., 1958. A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *Ann. Math. Statist.*, 29(2), 610–611.
- Fischler, M.A. & Bolles, R.C., 1981. Paradigm for Model model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Graphics and Image Processing*, 24(6), 381–395.
- Gamse, S., Henriques, M.J. & Oberguggenberger, M., 2016. Assessment of long term pendulum and geodetic observations on a concrete arch dam. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.
- Ghilani, C.D., 2011. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*, Wiley.
- Gordon, S.J. & Lichti, D.D., 2007. Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement. *Journal of Surveying Engineering*, 133(2), pp.72–80.
- Holst, C. & Kuhlmann, H., 2016. Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.

- Kregar, K., 2016. *Optimizacija postopkov terestričnega laserskega skeniranja za meritve visoke natančnosti*. Doktorska disertacija, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana
- Kregar, K., Grigillo, D. & Kogoj, D., 2013. High precision target determination from a point cloud. V: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. II-5/W2, pp. 11–13.
- Kuang, S., 1996. *Geodetic Network Analysis and Optimal design*, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan
- Lindenbergh, R. & Pfeifer, N., 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. V: *Proc. 7th Conf. Optical-3D Measurement Techniques, 3-5 Oct., Vienna*, 61–70.
- Pearson, K., 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 2(6), 559–572.
- Savšek-Safić, S. et al., 2006. Determination of point displacements in the geodetic network. *Journal of Surveying Engineering-Asce*, 132(2), 58–63.
- Scaioni, M. & Wang, J., 2016. Technologies for Dam Deformation Measurement : Recent Trends and Future Challenges. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.
- Schafer, T. et al., 2004. Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo. In *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia*, 1–10.
- Turk, G., 2012. *Verjetnostni račun in statistika*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Urbančič, T., Vrečko, A. & Kregar, K., 2016. Zanesljivost metode RANSAC pri oceni parametrov geometrijskih oblik. *Geodetski vestnik*, 60(1), 69–97.