

Daljinsko opažanje upotrebom TLS-a za potrebe analiza geomorfoloških procesa na padinama: primjeri s područja srednje Dalmacije

Field monitoring of geomorphological processes on steep slopes by using TLS: examples from central Dalmatia

Goran Vlastelica¹, Predrag Miščević¹, Nataša Štambuk Cvitanović¹,
Tihomir Biloš¹, Mijo Nikolić¹

¹ Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu
goran.vlastelica@gradst.hr

SAŽETAK

Na području srednje Dalmacije svake godine bilježe se deseci odrona i manjih klizišta, a problemi s erozijom kosina su svakodnevna pojava. Geološke postavke tog područja su raznolike, od pretežito flišnih sedimenata na širem području grada Splita, do vapnenačkih masiva u neposrednom zaleđu, te velikog učešća kvartarnih naslaga u širokom rasponu povezanosti. Stoga je često potrebno primijeniti različite tipove sanacije kosina, čak i za objekte relativno skromnog obuhvata, za što su potrebne i detaljne geodetske podloge. U ovom istraživanju terenska opažanja vršena su upotrebom terestičkog laserskog skenera (TLS), na više lokacija na području od Splita do Omiša. Podaci prikupljeni TLS-om mogu se analizirati za cijelu plohu zasjeka kako bi se dobio 3D uvid u razvoj geomorfoloških procesa čime se, u kombinaciji s identifikacijom članova zasjeka putem fotografije i/ili intenziteta povrata laserske zrake, postavlja podloga za detaljnu analizu fenomena kao što su: odroni, klizanja, prevrtanja i sl. Kroz nekoliko primjera, prikazana je kategorizacija opaženih geomorfoloških procesa, te rezultati opažanja kao ulaz za geomehaničke proračune.

KLJUČNE RIJEČI TLS, monitoring, kosina, odron, nestabilnost

ABSTRACT

Each year dozens of rockfalls and small landslides are recorded in Central Dalmatian region, while problems with erosion of the slope surface are an everyday occurrence. In addition, the geological settings are various, from predominantly flysch sediments in wider area of the city of Split, to the limestone massif in other parts of the coastline. Also, Quaternary deposits in a wide range of connectivity are also present. Therefore, it is often necessary to apply different types of slope stabilization, even for small scale objects, for which detailed geodetic survey is always necessary. Field observations were carried using terrestrial laser scanner (TLS) on pilot locations in the area from Split to Omiš. Data collected by TLS can be analysed for the entire surface of the slope to give a 3D insight into the development of the geomorphological processes which, combined with the identification of members of the cuts through photos and laser beam intensity, is the basis for a detailed analysis of phenomena such as: rockfalls, sliding, toppling, etc. Through a series of illustrative examples, categorization of observed geomorphological processes can be made, and thus the results of observations can be used as an input to geomechanical calculations.

KEYWORDS TLS, monitoring, slope, rockfall, instability

UVOD

Pribavljanje preciznih geomorfoloških podataka i izrada detaljnih digitalnih modela reljefa postaje sve dostupnija upotrebom LiDAR tehnologije. Razvojem jeftinijih i sve preciznijih prijenosnih inačica terestičkih laserskih skenera (TLS), standardne geodetske metode se postupno zamjenjuju, posebice u područjima gdje su dosad gotovo bile neprimjenjive (za teško pristupačna područja, uspravne klive i sl.).

Upotreba instrumenata ovog tipa i razvijanje postupaka mjerenja je u žarištu mnogih znanstvenika, ponajprije kod: osmatranja pomaka kosina i odrona u stijenskim masama (Abellan et al. 2011.), razredbi stijenske mase i određivanju položaja diskontinuiteta (Sturzenegger & Stead 2009.), određivanja zapremine odrona i pronalaženja mogućih područja sklonih odronjanju (Rabatel et al. 2008.), kvantificiranja erozije klifova u obalnim područjima (Lim et al. 2009.; Dewez et al. 2009.) i promjene geomorfologije ogolina (Perroy et al. 2010.). Sve su to aktualni projekti sa začetkom u ovom desetljeću, stoga je još uvijek otvoren značajan prostor za unaprjeđenje postojećih metodologija, kroz znanstveni rad temeljen na lokalnom i regionalnom praćenju pojava, što je posebno naglašeno kod dugoročnih procesa kao što su erozija i odroni.

Da bi se ti procesi mogli sagledati potrebno je poznavati geološke postavke područja na kojem se vrši osmatranje. U području Dalmacije mogu se izdvojiti dvije glavne geološke sredine. U obalnom pojasu, posebice na području Trogira, Kaštela i Splita, nalaze se klasične i karbonatne naslage Eocenskog fliša – E_{2,3} (osnovna geološka karta). Prema petrološkim karakteristikama to su pretežito klasične naslage klasificirane kao vapnenačke breče, brečokonglomerati, kalciruditi, kalkareniti i biokalkareniti, kalcisiltiti i lapori. (Marinčić et al. 1967.). Sa sjeverne strane flišne naslage pretežno su u anormalnom kontaktu s vapnencima Kozjaka iz doba Krede.

Poznavanje geoloških postavki, odnosno gradiva koje sačinjava stijensku masu, od velikog je značaja i za procjenu pogodnosti korištenja TLS-a, odnosno mogućnosti opažanja

željenih procesa s obzirom na tehničke karakteristike samog instrumenta.

Stoga, prije nego se počne vršiti opažanje potrebno je sagledati da li se u zoni zahvata očekuju deformacije i/ili pomaci reda veličine:

1. nekoliko milimetara,
2. nekoliko centimetara,
3. nekoliko desetaka centimetara.

Prema tome, za primjere stijenskih masa iz područja Dalmacije, u prvu skupinu mogu se uključiti vapnenačke stijenske mase iz doba Krede, posebice ako su u pitanju manji odroni uzrokovani izvanrednim opterećenjima. U drugu skupinu svrstavaju se fliševi koji se sastoje od lapora i vapnenačkih lapora, s većim udjelom pješčenjaka i ostalih stijena veće čvrstoće. Upravo ta kombinacija mekših i čvršćih komponenti omogućava veću deformaciju koja prethodi odronu, reda veličine nekoliko centimetara. U treću skupinu svrstavaju se tla, glinoviti lapori, te slabo vezane kvartarne naslage i nasipi, čiji gubitak stabilnosti se najčešće povezuje uz pojavu različitih tipova klizišta.

Slijedom navedenog, opažanja geomorfoloških procesa na padinama ne smiju se smatrati rutinskim poslom kojeg će obaviti geodet specijaliziran za TLS, već nužno primijeniti interdisciplinarni pristup koji sagledava sve dostupne informacije iz područja geodezije, geologije i geotehnike.

TERESTIČKO LASERSKO SKENIRANJE

Terestičko lasersko skeniranje je naziv za geodetsko mjerenje kojim je moguće pribaviti značajne količine podataka (koordinata točaka), za razliku od klasičnih geodetskih metoda (npr. upotreba totalne stanice). Osim termina terestičko laserko skeniranje (eng. *Terrestrial Laser Scanning*) u upotrebi je često i pojam LiDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) koji se obično povezuje uz definiciju same tehnologije pribavljanja podataka.

U ovom istraživanju korišten je *Optech-ov* TLS ILRIS-3D-ER (*Optech Intelligent Laser Ranging and Imaging System with Enhanced Range*).

Laserskim skeniranjem se dobiva velika količina neobrađenih podataka koja se naziva

oblak točaka (slika 1). Točke mogu biti dodatno određene i bojom, tj. mogu se definirati i RGB komponentnom, u slučaju kada skeneri imaju u sebi integriranu i kalibriranu digitalnu kameru (Kordić 2014.).

TLS se u ovom radu prezentira s aspekta korisnika. Za više informacija o osnovnim principima mjerenja, tehnologiji i performansama instrumenata čitatelj se upućuje na dodatnu literaturu (Petrie & Toth 2008.; Teza et al. 2007.).

USPOREDBA OBLAKA TOČAKA IZ RAZLIČITIH EPOHA

Promjena morfologije kosine vrši se usporedbom oblaka točaka iz različitih epoha upotrebom sljedeće metodologije (Abellan et al. 2011.; Lim et al 2009.):

- pribavljanje referentnog oblaka točaka (izvršiti preklapanja u slučaju više stajališta, poželjno uraditi i georeferenciranje zbog izravnog prostornog orijentiranja elemenata zasjeka);
- kreiranje TIN (eng. *Triangle Irregular Network*) modela površine zasjeka – referentne plohe (P_0);
- pribavljanje novih oblaka točaka nakon određenog perioda (OT_1, OT_2, \dots, OT_n);
- priprema za usporedbu (eng. *alignment*) između epoha mjerenja;
- usporedba pribavljenih podataka s referentnom plohom P_0 ;
- izračun razlika za svaku usporedbu različitih epoha mjerenja;
- izrada poprečnih presjeka ili ploha usporedbe.

Pripremom za usporedbu (točka 4) između epoha mjerenja definira se matrica poravnanja novog oblaka točaka s referentnom plohom. U ovom radu matrice poravnanja definirane su upotrebom nepomičnih objekata u okolini (zgrade u blizini zasjeka ili geološki članovi koji nisu podložni promjenama u inženjerskom periodu vremena), u sljedeća četiri koraka:

- identifikacija nepomičnog dijela zasjeka ili objekta u okolini zasjeka;
- brisanje dijela na kojem se odvija promjena (erozija i deponiranje) te svih



Slika 1. Primjer oblaka točaka s približno 4 milijuna točaka (Pilot lokacija 'Žnjan 1')

suvišnih mjerenja (vegetacija, pokretni objekti i sl.);

- poravnanje fiksnog dijela upotrebom ICP (eng. *Iterative Closest Point*) algoritma, čime se definira matrica poravnanja;
- upotreba matrice poravnanja na izvornom oblaku točaka.

Podaci prikupljeni TLS-om mogu se analizirati za cijelu plohu zasjeka čime se dobije trodimenzionalni uvid u promjenu morfologije kosine. Dodatnom identifikacijom članova zasjeka putem fotografije i/ili intenziteta povratne zrake, postavlja se podloga za daljnju analizu drugih fenomena, kao što su: odronjavanja, klizanja, prevrtanja i sl. Osim toga, nije potrebna ugradnja kontrolnih točaka kao kod totalnih stanica te je količina i rezolucija mjerenih podataka neusporediva.

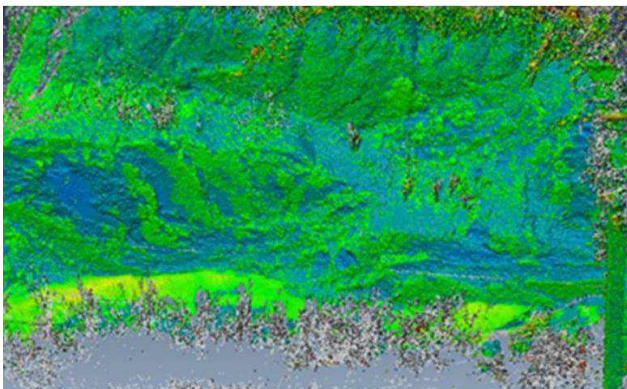
Udaljenost svake točke između P_0 i OT_i izračunata je upotrebom metodologije 'usporedbe podataka s referentnom plohom' (eng. *data vs. reference comparison*, Polyworks v12), pri čemu je smjer usporedbe određen smjerom vektora normale na referentnu plohu P_0 . Za samu usporedbu podataka nije nužno izvršiti georeferenciranje te se u tom slučaju ishodište postavlja u središte TLS-a ($O = 0,0,0$). Udaljenosti točaka D_i izračuna se prema (Abellan et al. 2010.):

$$D_i = \text{udaljenost}[OT_i, O] - \text{udaljenost}[P_0, O]$$

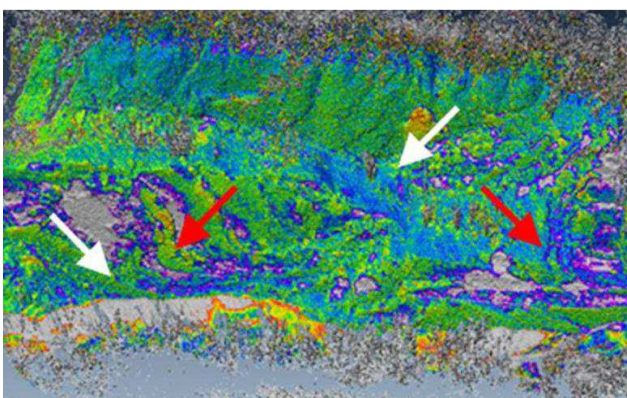
D_i je udaljenost koja se pripisuje odvajanju/nakupljanju materijala na pokosu ili deformaciji dijela pokosa koji prethode odronu ili klizanju. Pri tome se manji dio svakako odnosi i na pogreške mjerenja odnosno metodologije usporedbe (Vlastelica 2015.).



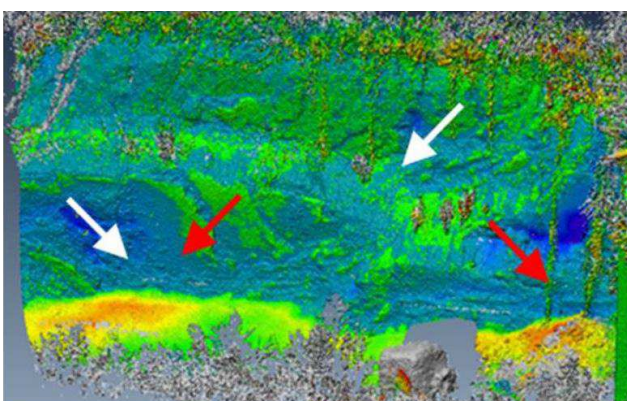
a. Pilot lokacija 'Trštenik 1'



b. Usporedba 31.3.2014. – 23.6.2014.
[skala usporedbe od -0,4 do 0,4 m]



c. Usporedba 31.3.2014. – 23.6.2014.
[skala usporedbe od -0,03 do 0,03 m]



d. Usporedba 31.3.2014. – 4.10.2014.
[skala usporedbe od -0,4 do 0,4 m]

REZULTATI

U nastavku su za odabrane epohe mjerenja prikazani rezultati usporedbe oblaka točaka za dvije odabrane pilot lokacije. Usporedbe su prikazane trodimenzionalno putem polja vrijednosti prikazanih na licu zaszjeka.

Negativne vrijednosti ukazuju na nedostatak materijala u određenoj epohi (eroziju), odnosno odvajanje ili odron većih fragmenata stijene.

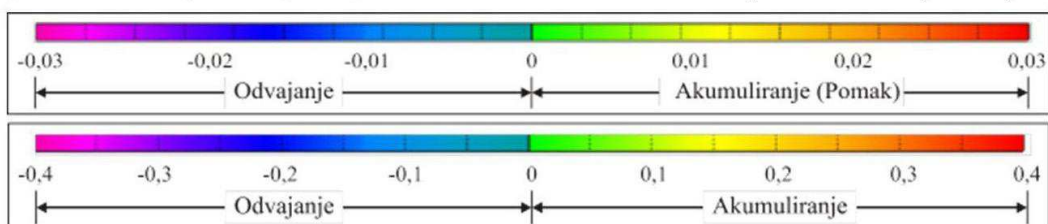
Pozitivne vrijednosti ukazuju na akumuliranje erodiranog materijala u vidu sipara u podnožju zaszjeka, većih blokova uslijed odronjavanja ili rasta vegetacije. Pozitivni pomak prema instrumentu, ukoliko se nalazi na slobodnom licu zaszjeka, može ukazivati i na pomak stijene koji prethodi odronu ili klizanju.

Trštenik 1

Pilot lokacija 'Trštenik 1' nalazi se u naslazi eocenskog fliša koji se sastoji uglavnom od tankoslojenih lapora, te se prema očekivanom pomaku može svrstati u drugu skupinu. U ovom slučaju izostaju deblji slojevi pješčenjaka karakteristični za ovo područje, a ravni na pokosa je sa smjerom nagiba prema jugu. Za početni nagib se može pretpostaviti da je izveden vertikalno.

Na slici 2. prikazana je promjena morfologije zaszjeka za period opažanja od 6 mjeseci. U ovom slučaju nije riječ samo o eroziji zaszjeka, koja je karakteristična za ovaj tip stijene, već je moguće uočiti promjene reda veličine 6–8 cm koji prethode prelaganju. Navedeno se podudara s debljinom slojeva, uvećanom za mogući pomak sloja (zijek) reda veličine 1 cm koji je bio prisutan prije prelaganja.

Slika 2. Pilot lokacija 'Trštenik 1':
Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji 'Trštenik 1' za navedene epohe mjerenja i skale usporedbe.



Duilovo 1

Pilot lokacija 'Duilovo 1' je u naravi prirodni klif duljine 2,0 km na južnoj obali grada Splita. Sadrži područja koja se prema mogućim pomacima svrstavaju u drugu i treću skupinu.

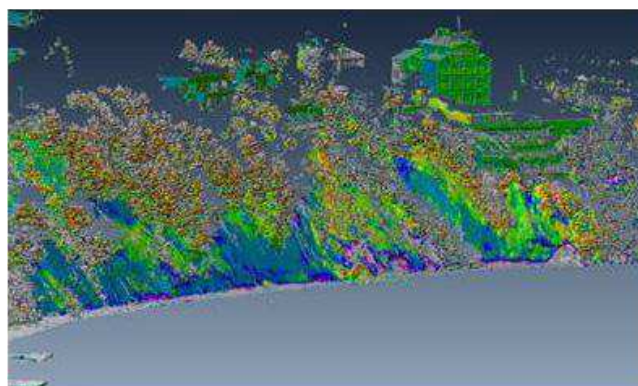
Na slici 3. prikazana je promjena morfologije zasljeva za cjelokupno razdoblje opažanja (7.3.2012. – 3.10.2014.). Prosječna erozija u dvije i pol godine iznosi oko 20 centimetara, od reda veličine desetak u gornjem dijelu kosine do 40–50 cm u nožici klifa.

Dok u gornjem djelu klifa prosječna godišnja erozija odgovara vrijednostima zabilježenim na

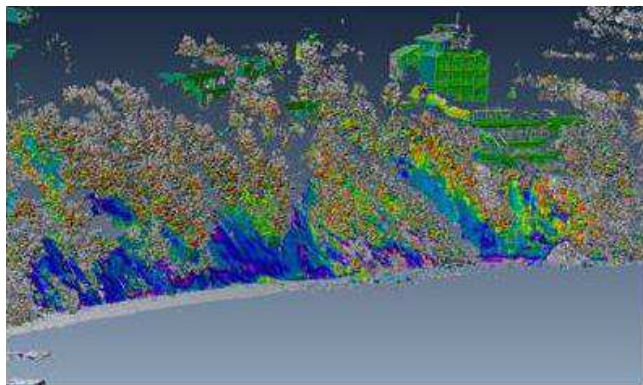
drugim pilot lokacijama (red veličine 5 cm/god), djelovanje erozije valovima (u ovom slučaju pri dominantnom vjetru Jugu) uzrokuje pojave niza lokalnih klizanja rastrošenog materijala po površini pokosa (ljubičasta područja na slici 3.c) te povećanje nagiba pokosa koje u konačnici može uzrokovati pojavu većih nestabilnih zona u vidu odrona ili klizišta. Npr. na slici 3.d – lijevo vidljiv je obris odloženog materijala u obliku stošca visine 4,3 m. Isti materijal je do sljedeće epohe opažanja u potpunosti uklonilo more (3.d–desno), otvarajući pritom put daljnjem progresivnom odranjanju.



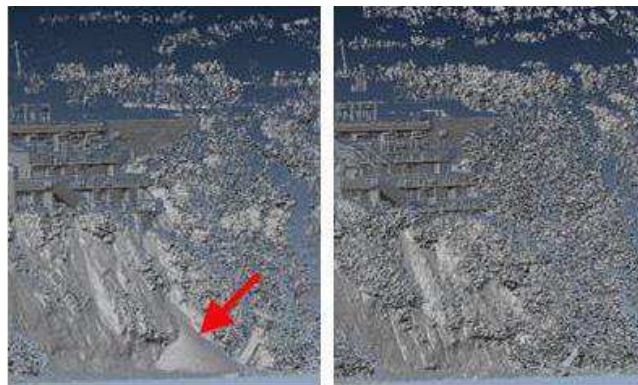
a. Pilot lokacija 'Duilovo 1'



b. Usporedba 7.3.2012. – 1.4.2014.



c. Usporedba 7.3.2012. – 3.10.2014.

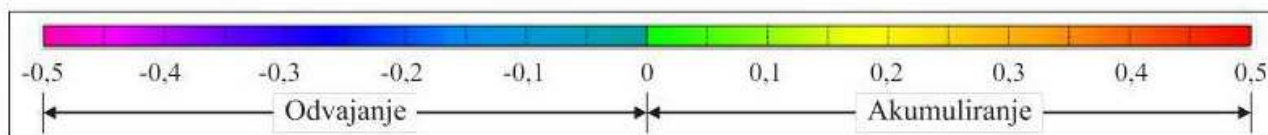


d. Detalj usporedbe 7.3.2012. – 1.4.2014.



e. Područje opažanja

Slika 3. Pilot lokacija 'Duilovo 1': Usporedba oblaka točaka na pilot lokaciji 'Duilovo 1' za navedene epohe mjerenja i skalu usporedbe.



ZAKLJUČCI

U odnosu na klasične metode opažanja, pribavljanje geomorfoloških podataka putem TLS-a je brzo i detaljno, te omogućava kreiranje detaljnih modela zaszeka bez potrebe pristupanja istim, što često kod strmih zaszeka nije moguće ili je opasno za provoditelja.

U opažanim područjima su detektirani pomaci koji prethode odronu (ukoliko je riječ o stijenskoj masi u 2. i 3. skupini, kao na lokaciji 'Trstenik 1'), odnosno izvršena je analiza razvoja erozije u stijenskoj masi koja sadrži meke stijene (Vlastelica 2015.), kao i praćenje pomaka prilikom klizanja većih volumena, odnosno analiza klizišta (Kordić 2014.).

Mogućnost detekcije pomaka uvelike ovisi o vremenskom intervalu između dva opažanja, iznosu pomaka i skali promatranog problema, stoga je intervale opažanja potrebno uskladiti s očekivanim vremenskim tokom razvoja promatranog fenomena.

U odgovarajućim uvjetima (npr. organizirano i 'kontinuirano' opažanje uz sustavni pristup), opisanu metodologiju opažanja može se koristiti za rano detektiranje pomaka unutar potencijalno opasnih područja, čime se omogućuje pravovremena intervencija na uočenom odronu ili klizištu, s ciljem sprečavanja materijalnih šteta i ljudskih žrtava.

ZAHVALE

Dio istraživanja urađen je u okviru japansko-hrvatskog projekta *Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje rizika klizanja i bujica u Hrvatskoj*. Zahvaljujemo agencijama JICA i JST na donaciji potrebne opreme. Posebna zahvala kolegi dr. sc. Branku Kordiću, dipl. ing. geod., na pomoći i savjetima pri obradi podataka.

REFERENCE

Abellan, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., Blanchard, J., 2010. *Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring*. *Geomorphology*, 119 (3–4), 162–171.

Abellan, A., Vilaplana, J. M., Calvet, J., Garcia-Selles, D., Asensio, E., 2011. *Rockfall monitoring by TLS – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 829–841.

Dewez, T., Gebrayel, D., Lhomme, D., Robin, Y., 2009. *Quantifying morphological changes of sandy coasts by photogrammetry and cliff coasts by laser-grammetry*. *La Houille Blanche*, 1, 32–37.

Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., Petley, D. N., 2009. *Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire*. *Geomorphology*, 114 (1–2), 12–21.

Kordić, B., 2014. *Razvoj metode trodimenzionalnoga terestričkoga laserskoga skeniranja kod određivanja i analize pomaka površine klizišta*. Sveučilište u Zagrebu, Geodetski Fakultet. Doktorski rad

Marinčić, S., Magaš, N., Borović, I., 1967. *Osnovna geološka karta – Tumač za listove Split i Primošten*. Institut za geol. istr., Zagreb.

Perroy, R.L., Bookhagen, B., Asner, G.P., Chadwick, O.A., 2010. *Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California*. *Geomorphology* 118, 288–300.

Petrie, G., Toth, C.K., 2008. *Introduction to laser ranging, profiling and scanning*. In: Shan, J., Toth, C.K. (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press / Taylor & Francis, London, pp. 1–28.

Rabatel, A., Deline, P., Jaillet, S., Ravel, L., 2008. *Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial LiDAR measurements: A case study in the Mont Blanc area*. *Geophys. Res. Lett.*, 35.

Sturzenegger, M., Stead, D., 2009. *Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 267–287.

Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N., Genevois, R., 2007. *Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach*. *Int. J. Remote Sens.* 28, 3425–3446.

Vlastelica, G., 2015. *Utjecaj rastrošbe na trajnost zaszeka u mekoj stijeni*. Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split. Doktorski rad.