



OPAŽANJE I MODELIRANJE EROZIJE ZASJEKA U MEKOJ STIJENI

¹dr.sc. **Goran Vlastelica**, dipl.ing.gra .

¹prof.dr.sc.**Predrag Mišćević**, dipl.ing.gra .

¹**Tihomir Biloš**

¹Fakultet gra evinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, Sveu ilizte u Splitu

Sažetak: U ovom radu prikazani su rezultati terenskih opa0anja promjene geometrije zasjeka u mekoj stijeni uslijed kombiniranog utjecaja rastrozbe i erozije. Terenska opa0anja vrzena su na pilot lokaciji žnjan od izrade zasjeka (2002.) te su dovrzena trogodiznjim opa0anjem teresti kim laserskim skeniranjem. Na temelju terenskih opa0anja, na navedenoj i nizu drugih lokacija sa zireg podru ja Splita, izvrzena je provjera uporabivosti prikazanih matemati kih modela kao osnova za budu e prognoze promjene geometrije zasjeka u ovom tipu stijena.

Ključne riječi: rastrozba, trajnost, lapor, meka stijena, zasjek, TLS, modeliranje

OBSERVATION AND MODELING OF THE EROSION OF CUTS IN SOFT ROCK

Abstract: This paper presents the results of field observations of changes in the geometry of cuts in soft rock due to the combined effect of weathering and erosion. Field observations were carried out at the pilot site Znjana from the construction of cuts (2002) and were completed by a three-year observation using terrestrial laser scanning. Based on field observations at the stated site and a number of other ones in the wider area of Split, usability of presented mathematical models was tested as a basis for future predictions of changes in the geometry of cuts in this type of rock.

Key words: weathering, durability, marl, soft rock, cut, TLS, modeling



1. UVOD

Meka stijena je slo0eni prirodni materijal i est uzrok mnogih potezko a u gra evinskoj praksi. Upravo zbog prirodnog porijekla materijala, te izra0ene heterogenosti sredine u kojoj se pojavljuje, esto nije mogu e opisati njena svojstva na razumljiv i primjenjiv na in za svakidaznju praksu. [1] Na podru ju Jadranske obale pojavaost mekih stijena se povezuje uz kompleks sedimentnih naslaga poznatih pod nazivom fliz. Flizni tereni predstavljaju slo0enu geotehni ku i sedimentolozku sredinu izgra enu od litolozki razli itih lanova, pri emu su samo pojedini, zahvaljuju i svom mineralozkom sastavu, izrazito skloni rastrozbi i eroziji. Upravo ta raznolikost lanova kod zasjeka u fliznim stijenskim masama u prvi red isti e problem razli ito stupnjevane rastrozbe i lokalnih odranjanja [2].

Potreba modernog ovjeka da oblikuje sve ve e zahvate u prirodi, bilo za potrebe iskopa sirovina, izgradnje zirokih prometnica, velikih vodoravnih platoa raznih namjena, najvize dolazi do izra0aja u relativno strmim obalnim podru jima Dalmacije (Slika 1.a). Nadalje, kada se navedeni zahvati spreklepe%6 geolozki slabom%podlogom kao zto je fliz, odnosno njegovim smekzim%0sastavnicama kao zto je lapor, rezultat esto mo0e biti nepovoljan, kako sa sigurnosnog tako i s estetskog stajalizta (Slika 1.b).



Slika 1. Primjeri antropogenog utjecaja: a) kamenolomi u zirem podru ju grada Splita (izvor: Google earth) i b) zasijecanje kosine na mikrolokaciji na podru ju grada Splita

Iskopi u mekim stijenama se naj ez e moraju izvoditi miniranjem ili pomo u tezkim pneumatskih eki a. Me utim, nakon iskopa zapo inje se razvijati proces razlaganja stijene . rastrozba, kako na povrzini zasjeka tako i kroz unutraznjost stijenske mase. Iako su sve stijene litosfere podlo0ne rastrozbi, njeni u inci su u slu aju mekih stijena vidljivi ve unutar razdoblja od nekoliko mjeseci do nekoliko godina te ih je mogu e zapaziti u okolizu i od strane laika. Iz tog razloga je vrlo bitno poznavati procese koji uzrokuju rastrozbu, kao i njihove mogu e posljedice. Ti procesi se vrlo esto mogu uo iti i na mnogim prirodnim kosinama i zasjecima u fliznim naslagama i na podru ju Dalmacije [1]. Na slici 2. prikazani su primjeri dviju kosina na Jadranskoj magistrali u op inama Podstrana i Dugi rat. Vidljiv je razvijeni proces degradacije lapora na povrzini kosine s nakupljanjem odlomljenih komada u dnu kosine.



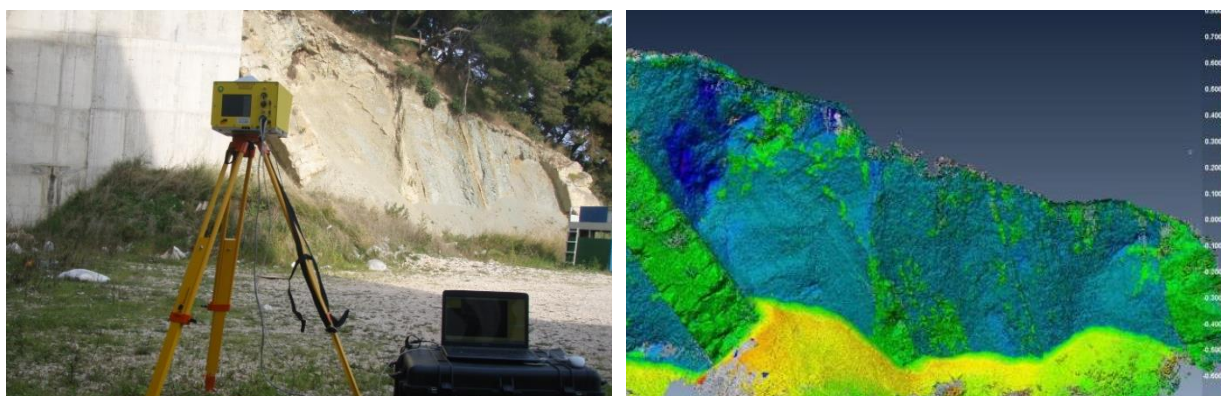
(a)

(b)

Slika 2. Primjeri ogolina na Dalmatinskoj obali: a) kosina uz Jadransku magistralu u op. ini Podstrana i b) kosina iznad mjesta Du e u op. ini Dugi rat

Svaki novi uvid u procese, koji uzrokuju nestabilnosti kosina u vremenu, mo0e pomo i u ubla0avanju posljedica istih. Razvojem novih tehnologija u podru ju geodezije, u prvom redu LiDAR (Light Detection and Ranging) tehnologije, otvaraju se novi putovi za pra enje promjena zemljine kore i materijala od kojih je sa injena. Te promjene se mogu pratiti na globalnoj razini, ali i na lokalnoj razini upotrebom teresti kih ina ica.

LiDAR tehnologija se, u kombinaciji s razli itim platformama (sateliti, zrakoplovi, helikopteri, 0) razvila u nezaobilazni alat za izradu digitalnih elevacijskih modela (engl. digital elevation model - DEM), ali i za niz primjena u agronomiji, arheologiji, geologiji, rudarstvu, meteorologiji, itd [3]. Razvojem prijenosnih varijanti steresti kih laserskih skenera% pristupa nijoj cijeni i sve ve oj preciznosti, u posljednje vrijeme pronalaze svoju upotrebu i u pra enju napredovanja erozije kosina koje nisu bile dostupne iz zra nih snimaka [4-6]. Na slici 3. prikazan je prijenosni teresti ki laserski skener ILRIS-3D-ER korizten u ovom radu, kao i primjer rezultata usporedbe dvaju snimaka zasjeka sa slike 1.b s vremenskim odmakom od jedne godine. Upotrebom ovih tehnologija mogu e je pristupiti analizama trajnosti, ne samo kroz klasi ne laboratorijske tehnike, ve i sn-situ%ona konkretnim primjerima pritom vrednuju i stvarne promjene.



(a)

(b)

Slika 3.a) Teresti ki laserski skener ILRIS-3D-ER; b) Usporedba dvaju snimaka zasjeka s vremenskim odmakom od jedne godine



2. RASTROŠBA I EROZIJA

Pod pojmom rastrozba (eng. *sweathering*) trozenje, razgradnja, dezintegracija) naj ez e se podrazumijeva promjena fizikalno mehani kih svojstava stijene kao posljedice ljuštenja, hidratacije, slabljenja kod suzenja i vla0enja (sslaking%), bubrenja, otapanja, oksidacije, abrazije, smrzavanja-odmrzavanja, te drugih procesa [7]. Franklin i Dusseault [8] koriste termin *sweathability* kao mjeru podlo0nosti stijene oslabljenju ili raspadanju za vrijeme koriztenja objekta. Pri tome je klju no razlikovati:

- sin0enjsku vremensku skalu% (nekoliko godina do nekoliko desetaka godina),
- sgeolozku vremensku skalu% (stotine tisu a do nekoliko milijuna godina).

Kod mekih stijena proces rastrozbe se odvija u vrlo kratkom vremenskom razdoblju te se mo0e govoriti o trajnosti materijala unutar sin0enjske vremenske skale%. vrijeme koriztenja gra evine [7].

Prema Fookesu [8a] rastrozba se op enito dijeli u dvije dominantne grupe: fizi ku (mehani ku) rastrozbu i kemijska rastrozbu.

Fizi ka rastrozba podrazumijeva razaranje stijene u manje komade bez promjene mineralozkog sastava, dok kemijska rastrozba rezultira razlaganjem strukture minerala, odnozenjem nekih od oslobo enih elemenata i/ili stvaranjem novih elemenata od ostataka koji reagiraju sa sastojcima iz okoline. U praksi se esto definira i biolozka rastrozba, me utim budu i biolozki procesi mogu uzrokovati i fizi ke i kemijske promjene, naj ez e se u literaturi svrstava kao podgrupa fizi kog i kemijskog trozenja [9].

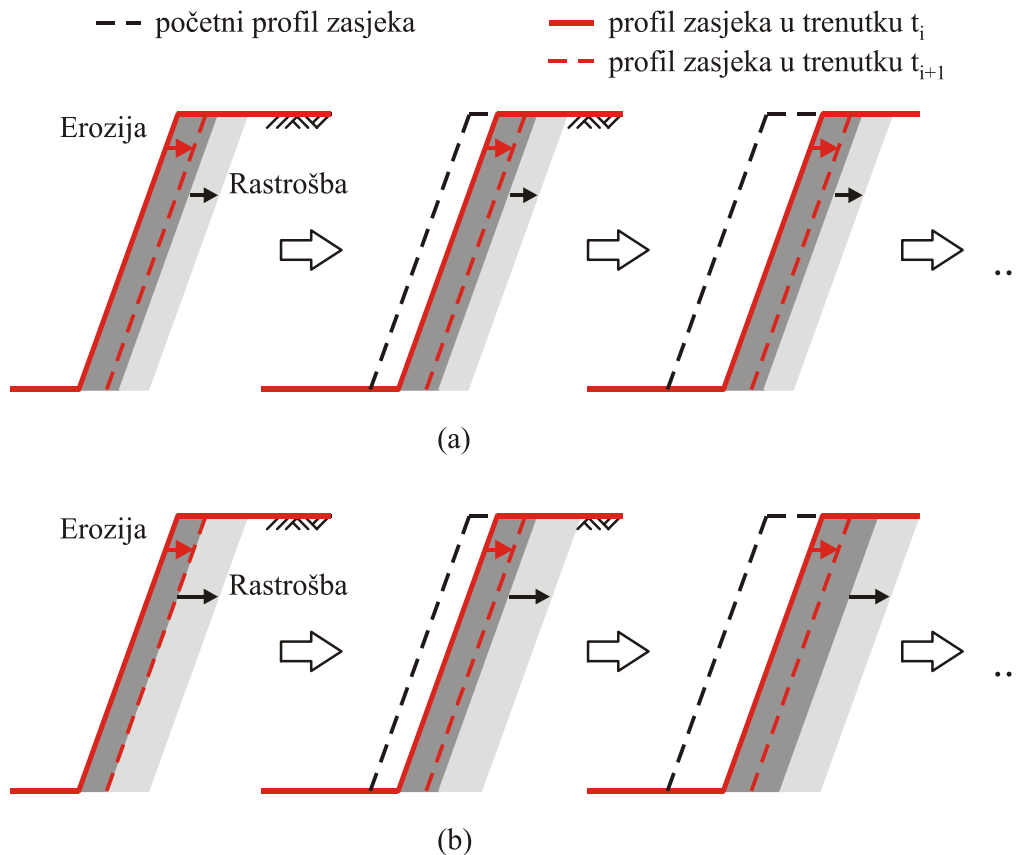
Dominantni proces koji uzrokuje raspadanje lapora (razaranje strukturnih veza unutar materijala) na podru ju Dalmacije je ponavljani proces suzenja i vla0enja, kao glavni uzrok fizi ke rastrozbe, kombiniran sa kemijskom rastrozbu na povrzini materijala i zidovima pukotina, tj. svim povrzinama koje su u izravnom dodiru s vodom. Iako se formalno razdvajaju, oba procesa se u pravilu doga aju istovremeno i me usobno se nadopunjuju. Nastajanje pukotina procesima fizi ke rastrozbe pove ava se povrzina na kojoj se mogu razvijati kemijski procesi. S druge strane kemijska rastrozba zamjenjuje vrste minerale sa slabim glinama ili porama, pri emu ine materijal podlo0nijim fizi koj rastrozbi.

Da bi se uistinu razumio pojam rastrozbe, potrebno je joz odrediti i pojam erozije, budu i se ta dva pojma esto mijezaju. Razlika izme u rastrozbe i erozije je suptilna, stoga ju je najjednostavnije opisati na sljede i na in: *rastrošba je proces raspadanja stijene, dok je erozija proces odnošenja usitnjenih komada stijene, s mjesta gdje su nastali na mjesto gdje se nakupljaju.* [2] Naravno, rastrozba i erozija se mogu odvijati i istovremeno, stoga se esto pojmovno mijezaju ili ih se pogrešno smatra istozna nicama.

Iako se eroziju naj ez e povezuje s oslabljenim i rastrozenim tlom ili stijenom, ona djeluje i na vrstnim nerastrozenim povrzinama tla, naravno s manjim intenzitetom. Uspore uju i intenzitet djelovanja erozije i rastrozbe na zasjeka u stijenskoj masi mogu e je primijetiti tri osnovna odnosa navedenih procesa:

- Neravnote0a odnosa u korist erozije.
- Ravnote0a izme u erozije i rastrozbe.
- Neravnote0a odnosa u korist rastrozbe.

Na slici 4. prikazan je slu aj ravnote0e erozije i rastrozbe, koji osigurava ravnomjeran vremenski tok promjene profila zasjeka.



Slika 4. Primjer razgradnje zasjeka za slu aj: a) ravnote0e erozije i rastrozbe; b) neravnote0e u korist rastrozbe (svijetlo sivo - rastrozeni materijal, tamno sivo - ostatak iz prethodnog intervala).[10]

S obzirom na tip materijala i klimatske zna ajke podru ja istra0ivanja razumno je pretpostaviti da u podru ju Dalmacije odnos procesa varira u rasponu od ravnote0e erozije i rastrozbe do neravnote0e u korist rastrozbe, tj. da se erozija uvijek odvija na rastrozenom materijalu koje sa injava zasjek.

3. METODOLOGIJA

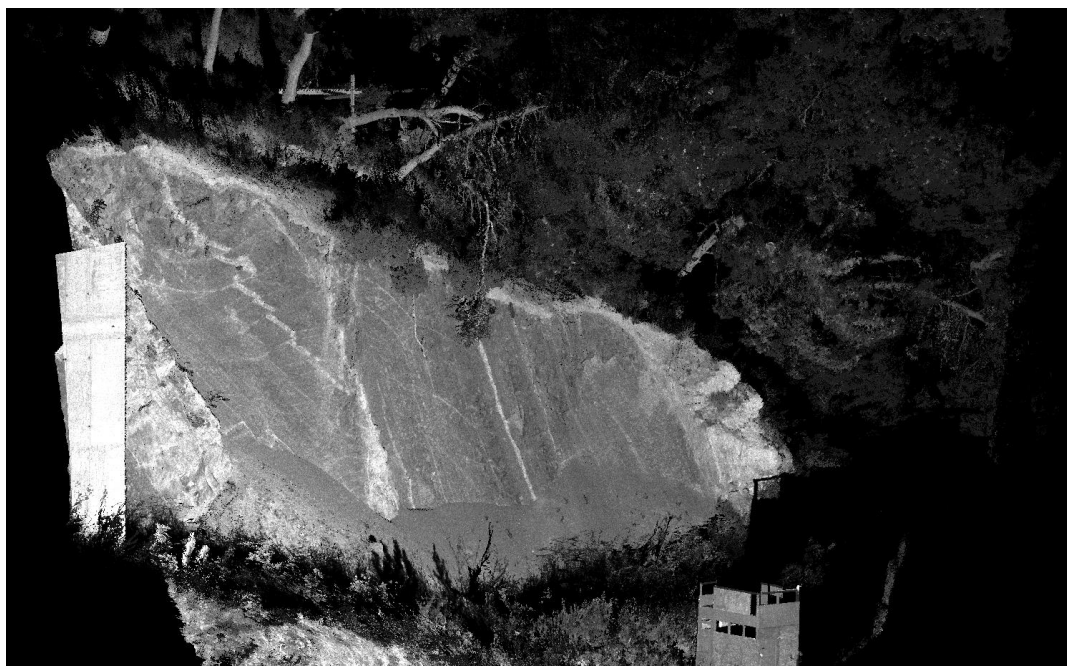
3.1. Teresti0ko lasersko skeniranje - TLS

Teresti ko lasersko skeniranje je naziv za geodetsko mjerenje kojim je mogu e pribaviti zna ajne koli ine podataka (koordinata to aka), za razliku od klasi nih geodetskih metoda (npr. upotreba totalne stanice). Osim termina teresti ko lasersko skeniranje - TLS (eng. sTerrestrial Laser Scanning%u u upotrebi je esto i pojam LiDAR (eng. Light Detection and Ranging) koji se obi no povezuje uz pribavljanje podataka iz zraka (npr. spomo u aviona kao platforme%u ili definiciju same tehnologije pribavljanja podataka. U ovom radu korizten je Optech-ov TLS ILRIS-3D-ER (sOptech Intelligent Laser Ranging and Imaging System with Enhanced Range%u

Laserskim skeniranjem se dobiva velika koli ina neobra enih podataka koja se naziva oblak to aka (Slika 5.). Kad su kontrolne to ke georeferencirane u poznatom koordinatnom sustavu, tad se itavi oblak to aka mo0e orijentirati u istom sustavu. To ke mogu biti



dotatno odre ene i bojom, tj. mogu se definirati i RGB komponentnom, u slu aju kada skeneri imaju u sebi integriranu i kalibriranu digitalnu kameru [11].



Slika 5. Primjer oblaka to 0aka s pribli0no 4 milijuna to 0aka (Pilot lokacija s0znjan 1‰)

Primjena TLS-a u ovom radu je isklju ivo s aspekta korisnika, vize o osnovnim principima mjerenja, tehnologiji i performansama instrumenata itatelj se upu uje na dodatnu literaturu [12 i 13].

3.2. Usporedba oblaka to 0aka iz razli0itih epoha

Promjena morfologije zasjeka vrzi se usporedbom oblaka to 0aka iz razli itih epoha upotrebom sljede e metodologije [14, 15]:

- Pribavljanje referentnog oblaka to 0aka (izvrziti preklapanja u slu aju vize stajalizta, po0eljno uraditi i georeferenciranje zbog izravnog prostornog orijentiranja elemenata zasjeka).
- Kreiranje TIN (eng. "Triangle Irregular Network") modela povrzine zasjeka - referentne plohe (P_0).
- Pribavljanje novih oblaka to 0aka nakon odre enog perioda (OT_1, OT_2, \dots, OT_n)
- Priprema za usporedbu (eng. alignment) izme u epoha mjerenja.
- Usporedba pribavljenih podataka s referentnom plohom P_0 .
- Izra un razlika za svaku usporedbu razli itih epoha mjerenja.
- Izrada popre nih presjeka ili ploha usporedbe.

Pripremom za usporedbu izme u epoha mjerenja (to ka 4) definira se matrica poravnanja novog oblaka to 0aka s referentnom plohom. U ovom radu matrice poravnanja definirane su upotrebom nepomi nih objekata u okolini (zgrade u blizini zasjeka ili geolozki



lanovi koji nisu podložni rastrozbi u inženjerskom periodu vremena), u sljedeća četiri koraka:

- Identifikacija nepomi nog dijela zasjeka ili objekta u okolini zasjeka.
- Brisanje dijela na kojem se odvija promjena (erozija i deponiranje) te svih suviznih mjerenja (vegetacija, pokretni objekti i sl.).
- Poravnanje fiksnog dijela upotrebom ICP(eng. "Iterative Closest Point") algoritma, ime se definira matrica poravnanja.
- Upotreba matrice poravnanja na izvornom oblaku to aka.

Podaci prikupljeni TLS-om mogu se analizirati za cijelu plohu zasjeka ime se dobije trodimenzionalni uvid u ponazanje procesa erozije. Dodatnom identifikacijom lanova zasjeka putem fotografije i/ili intenziteta, postavlja se podloga za daljnju analizu drugih fenomena, kao zto su: odronjavanja, klizanja, prevrtanja i sl. Osim toga, nije potrebna ugradnja kontrolnih to aka kao kod totalnih stanica te je koli ina i rezolucija mjerenih podataka neusporediva.

Udaljenost svake to ke izme u P_0 i OT_i izra unata je upotrebom metodologije usporedbe podataka s referentnom plohom (eng. *data vs. reference comparison* Polyworks v12), pri emu je smjer usporedbe odre en smjerom vektora okomice na referentnu plohu P_0 . Za samu usporedbu podataka nije nužno izvrziti georeferenciranje te se u tom slu aju ishodizite postavlja u sredizite TLS-a ($O=0,0,0$). Udaljenosti to aka D_i izra una se prema [16]:

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

D_i je udaljenost koja se pripisuje odvajanju/nakupljanju materijala na pokosu ili deformaciji dijela pokosa u vidu odrona. Pri tome se manji dio svakako odnosi i na pogrezke mjerenja odnosno metodologije usporedbe [17].

3.3. Fisher–Lehmannov matematički model erozije uspravnog zasjeka

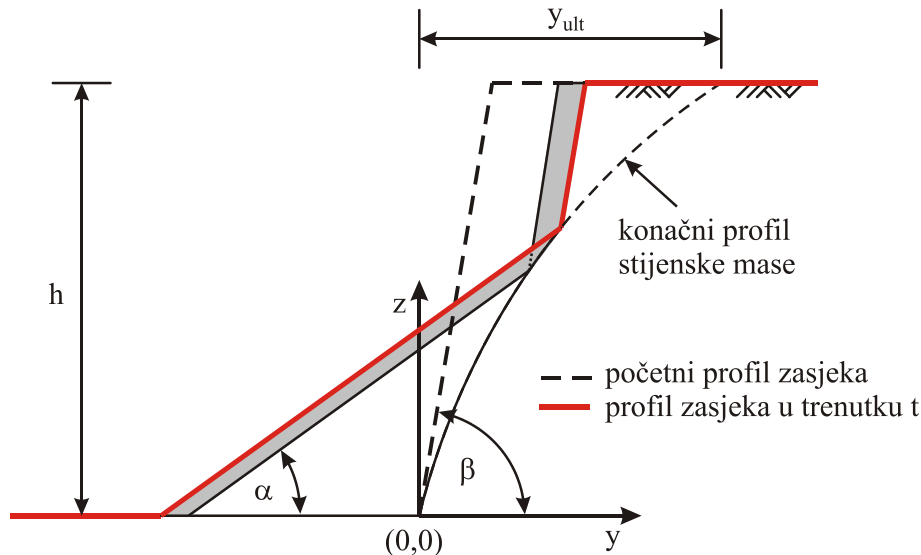
Ovaj model je kombinacija Fisherovog [18] matemati kog opisa degradacije napuztenog, inicijalno vertikalnog (uspravnog), zasjeka u naslagama krede bez nakupljanja erodiranog materijala u podnođu zasjeka, te Lehmannovog generaliziranog modela [19] koji uvodi mogu nost po etnog nagiba pokosa i nakupljanje erodiranog materijala u podnođu zasjeka. Osnovne pretpostavke ovog modela (Slika 6.) su:

- Kosina je homogena, pokos je ravan, nagiba β , koji je dovoljno strm da omogu ava transport rastrozenog materijala.
- Teren u podnođu i iza pokosa je vodoravan i prote0e se dovoljno daleko.
- U podnođu pokosa nema staja e vode.
- U svakom vremenskom koraku proizvodi rastrozbe se ravnomjerno erodiraju sa slobodnog lica pokosa. Ve i odroni i odvajanja po diskontinutetima nisu razmotrena.
- Proizvodi rastrozbe se nakupljaju u podnođu u obliku sipara konstantnog nagiba α ($\alpha < \beta$)
- Ispod akumuliranog sipara stijena je zazti ena od daljnje rastrozbe. Istovremeno u dijelu slobodnog lica pokosa stijena se nastavlja troziti i erodirati.



Iz navedenog slijedi da se u kona nici oblikuje konveksna granica izme u nastalog sipara i intaktne stijenske mase.

- U kona nici zasjek nagiba β se preoblikovao u kosinu nagiba α koja tangira konveksnu jezgru intaktne stijenske mase.



Slika 6. Fisher. Lehmannov model erozije uspravnog zasjeka

Uz prethodno navedene pretpostavke, izraz za odre ivanje konveksne jezgre intaktne stijenske mase poprima sljede i oblik [20]:

$$y = k \cdot (l + m) \cdot \ln \left[\frac{m}{(m - z)} \right] - k \cdot z \quad (1)$$

gdje su: $m = h/c$; $k = (a - ac - b)/c$; $l = b \cdot h / (a - ac - b)$; $a = ctg\alpha$; $b = ctg\beta$; te h - visina zasjeka, α - nagib stabilnog pokosa sipara i β - po etni nagib zasjeka, odre eni na slici 6. Parametar c je konstanta potrebna za egzaktnu derivaciju [21], koja u suztini predstavlja mjeru stalne rastresitosti rastroženog materijala:

$$\frac{\text{zapremina stijene}}{\text{zapremina sipara}} = \frac{1 - c}{1} \quad (2)$$

Za potrebe projektiranja, uz ukupno potrebno vrijeme za postizanje istog, zanimljiv je podatak o kona nom obliku zasjeka, kako polo0aja vrha pokosa tako i no0ice sipara. Kona ni polo0aj vrha pokosa mo0e se odrediti uvrztavanjem $z=h$ u izraz (1) koji tada poprima sljede i oblik:

$$y_{ult} = (ctg\alpha - ctg\beta) \cdot (1 - c) \cdot \frac{h}{c} \cdot \left[\frac{1}{c} \cdot \ln(1 - c)^{-1} - 1 \right] + h \cdot ctg\beta \quad (3)$$

Odnosno, za pomak no0ice sipara koji se mo0e odrediti pomo u izraza:

$$y_s = h \cdot ctg\alpha - y_{ult} \quad (4)$$

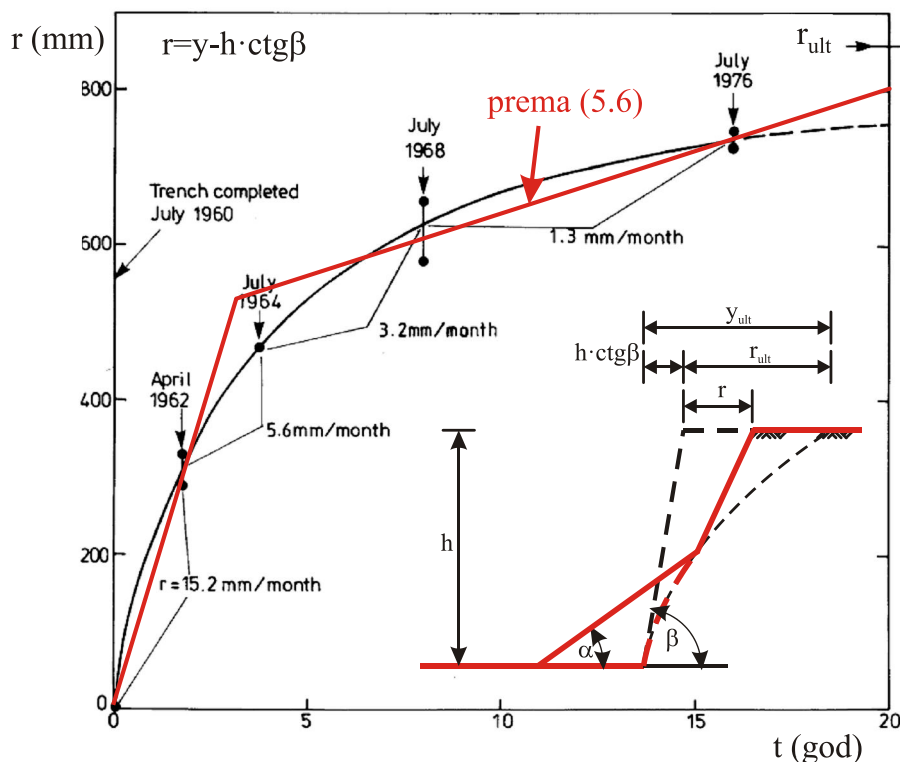
Uvidom u izraz (3) mo0e se primijetiti da, osim po etne geometrije zasjeka, utjecaj na oblikovanje kona ne geometrije zasjeka ima i nepoznati parametar rastresitosti rastroženog materijala, za ije odre ivanje e se izme u ostalog provesti terensko opa0anje.



Promjena oblika zasjeka u vremenu mo0e se opisati uvo enjem sljede e funkcije:

$$y(t) = \begin{cases} h \cdot ctg\beta & \text{za } t = 0 \\ h \cdot ctg\beta + R_{y,s} \cdot t & \text{ako je } 0 < t < (y_{ult} - h \cdot ctg\beta) / R_{y,s} \\ y_{ult} & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (y_{ult} - h \cdot ctg\beta) / R_{y,s} \end{cases} \quad (5)$$

gdje je $R_{y,s}$ prosje na godiznja erozija. Prema Hutchinsonu [20] erozija zasjeka nije nu0no linearan proces u vremenu. On je na primjeru zasjeka u kredi visine 1,75 m, na temelju povremenih opa0anja u periodu od 15 godina, zaklju io da je proces nelinearan (Slika 7.).



Slika 7. Godiznja erozija zasjeka sOverton Down% dJK (izmijenjeno prema [20])

Prema zapa0anjima autora, na terenu je mogu e primijetiti vrlo brzi po etni razvoj erozije zasjeka (Slika 8.), me utim njega se jednako tako mo0e pripisati po etnom rastere enju stijenske mase i lokalnim nestabilnostima koje ovise od uslojenosti i kakvo i izvedbe zasjeka.



(a)

(b)

Slika 8. Primjer brze po etne izmjene profila na zasjeku izvedenom za potrebe privremene prometnice, lokacija Brnik, Split: a) neposredno nakon iskopa (srpanj 2013.); b) stanje nakon 7 mjeseci (velja a 2014.)

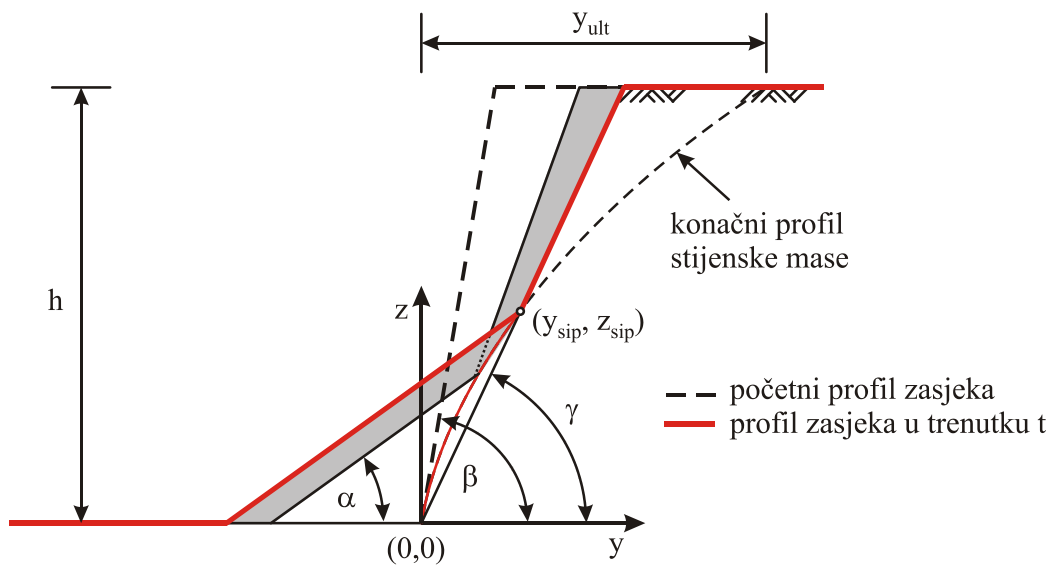
Uzimaju i u obzir prethodno zapa0anje, umjesto parametra $R_{y,s}$ se mo0e uvesti bilo koja nelinearna funkcija $R_{y,s}=R_{y,s}(t)$ ili se linearni kriterij opisan izrazom (5) mo0e zamijeniti bi-linearnim kriterijem:

$$y(t) = \begin{cases} h \cdot ctg\beta & \text{za } t = 0 \\ h \cdot ctg\beta + n \cdot R_{y,s} & \text{ako je } 0 < t < t_1 \\ h \cdot ctg\beta + R_{y,s} & \text{ako je } t_1 < t < (y_{ult} - h \cdot ctg\beta) / R_{y,s} \\ y_{ult} & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (y_{ult} - h \cdot ctg\beta) / R_{y,s} \end{cases} \quad (6)$$

gdje su: n - koeficijent utjecaja po etne relaksacije zasjeka; t_1 - vrijeme unutar kojeg se manifestiraju u inci po etne relaksacije zasjeka. Npr. na Hutchinsonovom modelu (Slika 7.) navedeni parametri bi iznosili $n \approx 10$ i $t_1 \approx 3$ godine, ali bi i t_{ult} bilo podcijenjeno cca 5 godina (cca 15%).

3.4. Bakker–Le Heuxov model erozije uspravnog zasjeka

Osnovne pretpostavke ovog modela Bakker. Le Heuxovog modela [21] podudaraju se s Fisher. Lehmannovim modelom, osim u etvrtoj to ki koja odre uje na in erozije slobodnog lica pokosa. Ovim modelom pretpostavlja se neravnomjerno trozenje lica pokosa (Slika 9.), prema kojem se fronta trozenja materijala rotira oko no0ice zasjeka.



Slika 9. Bakker. Le Heuxov model erozije uspravnog zasjeka

Uz prethodno usvojene pretpostavke, izraz za odre ivanje konveksne jezgre intaktne stijenske mase poprima sljede i oblik [20]:

$$y = a \cdot z - (a - b) \cdot z \cdot \left[\frac{(h^2 + (1 - 2c) \cdot z^2)}{h^2} \right]^{\frac{c-1}{1-2c}} \quad (7)$$

gdje su: $a = \text{ctg} \alpha$; $b = \text{ctg} \beta$; te h - visina zasjeka, α - nagib stabilnog pokosa sipara i β - po etni nagib zasjeka, odre eni na slici 9. Parametar c je definiran izrazom (2).

Kona ni polo0aj vrha pokosa mo0e se odrediti uvrztavanjem $z=h$ u izraz (7) koji tada poprima sljede i oblik:

$$y_{ult} = (\text{ctg} \alpha - \text{ctg} \beta) \cdot h \cdot \left[1 - (2 - 2c)^{(c-1)/(1-2c)} \right] + h \cdot \text{ctg} \beta \quad (8)$$

Odnosno, za pomak no0ice sipara koji mo0emo definirati putem izraza:

$$y_s = h \cdot \text{ctg} \alpha - y_{ult} \quad (9)$$

Promjena oblika zasjeka u vremenu mo0e se opisati uvo enjem sljede e funkcije:

$$\gamma(t) = \begin{cases} \beta & \text{za } t = 0 \\ \beta - R_{\gamma,s} \cdot t & \text{ako je } 0 < t < (\beta - \alpha)/R_{\gamma,s} \\ \alpha & \text{ako je } t \geq t_{ult} = (\beta - \alpha)/R_{\gamma,s} \end{cases} \quad (10)$$

gdje su: γ - nagib slobodnog lica zasjeka; $R_{\gamma,s}$ - prosje na godiznja promjena nagiba zasjeka uslijed erozije slobodnog lica zasjeka. Uvo enjem vremenske ovisnosti γ , mogu e je odrediti izraze za polo0aj vrha sipara u danom trenutku [10 i 22]:



$$\begin{pmatrix} y_{sip} \\ z_{sip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{z_{sip}}{\operatorname{tg}(\gamma(t))} \\ h \cdot \sqrt{\frac{1}{1-2c} \cdot \left(e^{\frac{1-2c}{c-1} \ln \left(\frac{a \cdot \operatorname{tg}(\gamma(t)) - 1}{(a-b) \operatorname{tg}(\gamma(t))} \right)} - 1 \right)} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Odnosno oblik profila:

$$y(t) = \begin{cases} y_{sip} - a \cdot (z_{sip} - z) & \text{za } 0 \leq z \leq z_{sip} \\ z \cdot \operatorname{ctg}(\gamma(t)) & \text{za } z_{sip} \leq z \leq h \end{cases} \quad (12)$$

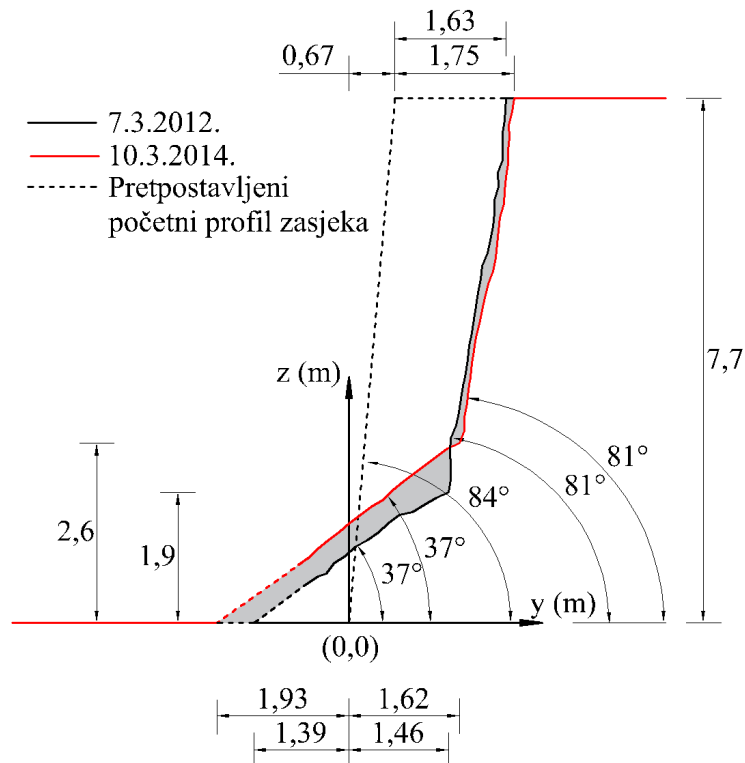
Pri tome oblik intaktne stijenske mase ispod sipara i dalje je odre en prema izrazu (7).

4. REZULTATI

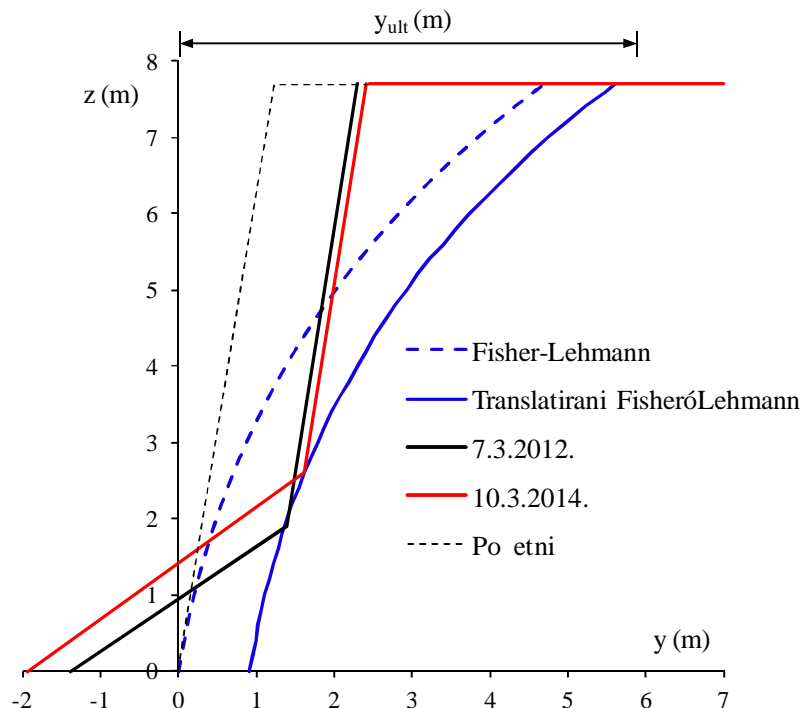
U nastavku su za odabrane epohe mjerenja prikazani rezultati usporedbe oblaka to aka za jednu odabranu pilot lokaciju (Pilot lokacija "žnjan 1"). Usporedbe su prikazane trodimenzionalno putem razlika prikazanih na licu zasjeka ili dvodimenzionalno putem odabranih reprezentativnih popre nih presjeka.

U trodimenzionalnom prikazu udaljenosti su prikazane putem polja vrijednosti. Negativne vrijednosti ukazuju na nedostatak materijala u odre enoj epohi (eroziju), odnosno odvajanje ili odron ve ih fragmenata stijene. Pozitivne vrijednosti ukazuju na akumuliranje erodiranog materijala u vidu sipara u podno0ju zasjeka, ve ih blokova uslijed odranjanja ili rasta vegetacije. Pozitivni pomak prema instrumentu, ukoliko se nalazi na slobodnom licu zasjeka, mo0e ukazivati i na pomak stijene koji prethodi odronu.

Na slici 10. prikazani su popre ni presjeci kao rezultat opa0anja za period od 2 godine (7.3.2012. - 10.3.2014.), dok je na slici 11. prikazan rezultat numeriki kog prora una baziranog na Fisher-Lehmannovom modelu erozije zasjeka.



Slika 10. Interpretacija Fisher-Lehmannovog modela na temelju rezultata opa0anja izvršenih na Pilot lokaciji sžnjan 1% Karakteristi ni popre ni presjek za epohe OT_0 i OT_4 (7.3.2012. i 10.3.2014.).



Slika 11. Interpretacija Fisher-Lehmannovog modela na temelju rezultata opa0anja izvršenih na Pilot lokaciji sžnjan 1% Fisher-Lehmannov model na temelju epoaha OT_0 i OT_4 .



Naime, terenskim opa0anjem na ovom te na nekim od sljede ih primjera uo eno je da, nakon po etne relaksacije zasjeka (Slika 8.), Fisher-Lehmannov model bolje opisuje promjenu profila zasjeka u vremenu u mekim stijenama koje se javljaju samostalno ili u fliznom slijedu na podru ju Dalmacije.

Parametri korizteni u prora unu prikazani su u tablici 1. Kutevi pokosa i visina zasjeka odre eni su upotrebom rezultata TLS-a na reprezentativnom popre nom presjeku.

Tablica 1. Parametri korizteni za prora un Fisher-Lehmannovim modelom

Parametar	Simbol	Iznos	Mjerna jedinica
Nagib sipara	α	37	($^{\circ}$)
Nagib pokosa	β	81	($^{\circ}$)
Visina zasjeka	h	7,7	(m)
$1 - \frac{\text{zapremina stijene}}{\text{zapremina sipara}}$	c	0,4	(-)
Prosje na godiznja erozija	$R_{y,s}$	5,0	(cm/god)

Rezultati prora una prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati prora una prema Fisher-Lehmannu i Bakker. Le Heuxu za sžnjan 1%

Parametar	Simbol	Iznos		Mjerna jedinica
		prema F.-L.	prema B.-Le H.	
Polo0aj vrha pokosa	y_{ult}	4,96	5,01	(m)
Pomak no0ice sipara	y_s	5,26	5,21	(m)
Kona na zirina pokosa	$y_s + y_{ult}$	10,22	10,22	(m)
Potrebno vrijeme za dovrzetak erozije - od trenutnog stanja	$t_{ult} - t$	58	-	(god)
Ukupno potrebno vrijeme za dovrzetak erozije	t_{ult}	93	-	(god)

Izrazom (1) definirana linija konveksne jezgre intaktne stijenske mase, translaticirana je za 0,9 m u unutraznost zasjeka (Slika 11.). Razlog translaticije le0i u uklanjanju deponiranog materijala u nekoliko navrata tokom koriztenja platoa za potrebe obli0njeg gradilizta.

Zanimljivo je primijetiti, upotrebom povratne analize, da je proteklo vrijeme od zasijecanja iznosilo $\Delta t = 35$ godina, zto ne odgovara zabilje0enom vremenu proteklom od zasijecanja ($\Delta t_{siv} = 12$ god; 2002. - 2014.), koje je zbog uklanjanja deponiranog materijala realno i joz kra e. S druge strane, navedeno zapa0anje u potpunosti odgovara Hutchinsonovom opa0anju [20] (Slika 7.) te se upotrebom prema autoru predlo0enog bilinearnog kriterija i na ovoj pilot lokaciji dobivaju zadovoljavaju i rezultati. Za $n=10$ i $t_1=3$



godine, Δt iznosi osam godina, zto s obzirom na po etno uklanjanje deponiranog materijala odgovara provedenom opa0anju.

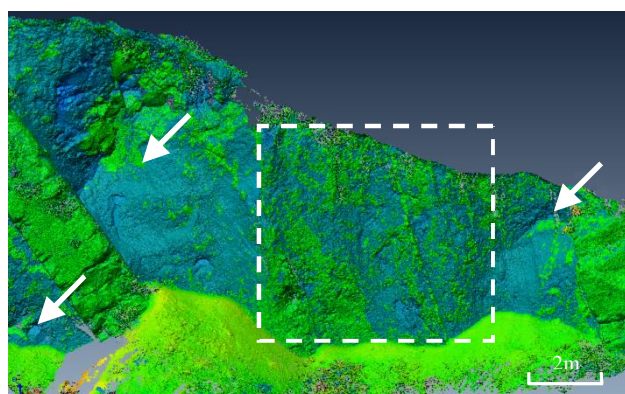
U tablici 3. prikazani su prosje ni opa0eni iznosi erozije za srediznji dio promatranog zasjeka, iskazani prema epohama opa0anja. Mogu e je primijetiti trend porasta iznosa erodiranog materijala, uz kolebanje izme u „zimskog% i „ljetnog% zestomjese nog razdoblja. Budu i je zasjek zapadne orijentacije, na mikrolokaciji koja je zasti ena od vjetra dominantnih smjerova (bura i jugo), za pretpostaviti da dominantni utjecaj u ovom slu aju ima koli ina i u estalost oborina. Uistinu, uvidom u dokumentaciju DHMZ-a mogu e je zapaziti trend pove anja oborina za podru je Splita (mjerna postaja Marjan) u razdoblju opa0anja TLS-om. Tako je u ljeto 2012. (po etak opa0anja) zabilje0eno dugo suzno razdoblje (bez zabilje0enih oborina), dok je u ljeto 2014. (dovrzetak opa0anja) zabilje0eno kao vrlo kizno (s dvostruko ve im iznosom oborina od prosje ne, >300 mm).

Tablica 3. Prosje ni iznosi erodiranog sloja u karakteristi nom popre nom presjeku na pilot lokaciji Źnjan 1%

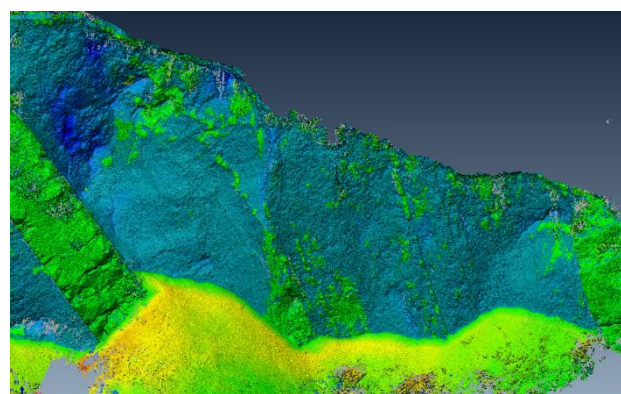
Period opa0anja	7.3.2012. - 28.9.2012.	28.9.2012. - 21.3.2013.	21.3.2013. - 27.9.2013.	27.9.2013. - 10.3.2014.	10.3.2014. - 3.10.2014.	3.10.2014. - 31.3.2015.
Iznos erodiranog sloja u promatranom periodu (cm)	2,3	1,9	2,6	2,4	2,8	2,7
Godiznja erozija R_y (cm/god)	4,2		5,0		5,5	

Na slici 12. prikazana je promjena morfologije zasjeka za vrijeme opa0anja 7.3.2012. - 3.10.2014., budu i je glavna prednost TLS-a u prikupljanju velikog broja prostornih podataka. Zone odranjanja po sekundarnim pukotinama ozna ene strelicama na slici 12., dok je podru je koje je isklju ivo pod utjecajem erozije ozna eno isprekidanom linijom.

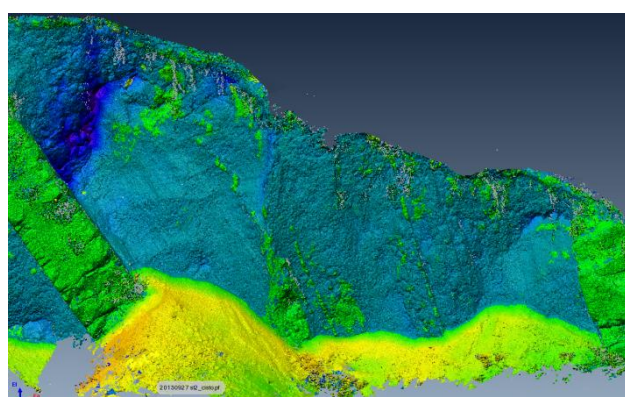
Promjena je prikazana u rasponu vrijednosti od -1,0 do 1,0 m, stoga zbog skale na kojoj je prikazana u srediznjem dijelu zasjeka nije mogu e razlu iti promjenu nakon druge epohe opa0anja (Slika 12.b). Na slici 13. srediznje podru je zasjeka prikazano na uve anoj skali (-0,4 do 0 m).



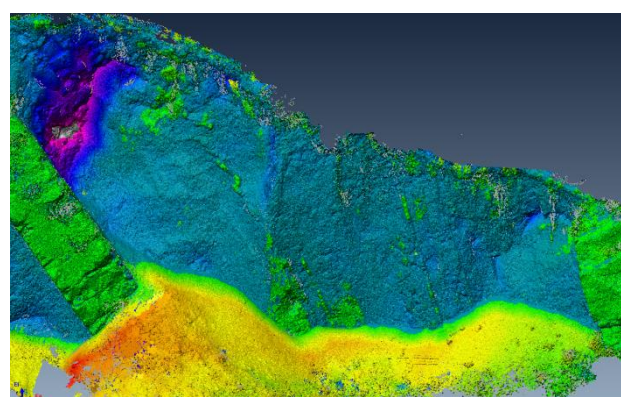
(a) Usporedba 7.3.2012. - 28.9.2012.



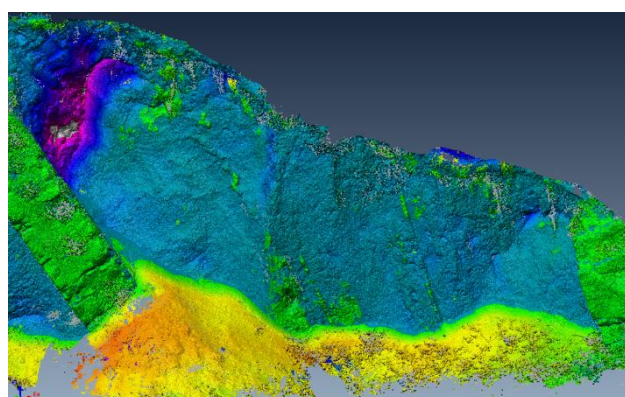
(b) Usporedba 7.3.2012. - 21.3.2013.



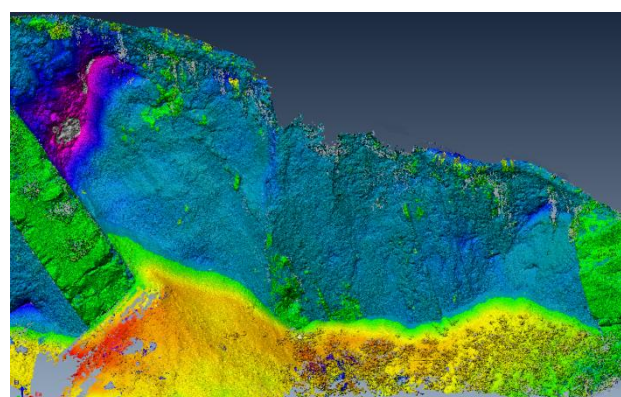
(c) Usporedba 7.3.2012. - 27.9.2013.



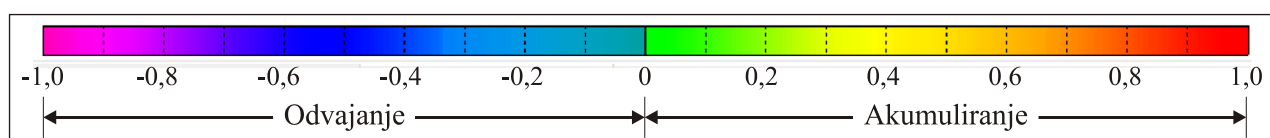
(d) Usporedba 7.3.2012. - 10.3.2014.



(e) Usporedba 7.3.2012. - 23.6.2014.



(f) Usporedba 7.3.2012. - 3.10.2014.

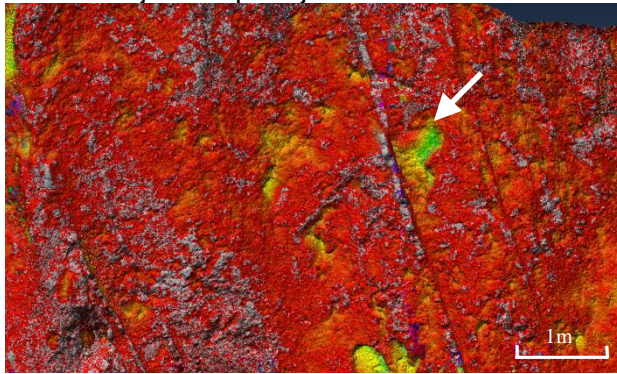


Slika 12. Usporedba oblaka to aka na pilot lokaciji šž njan 1%za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom

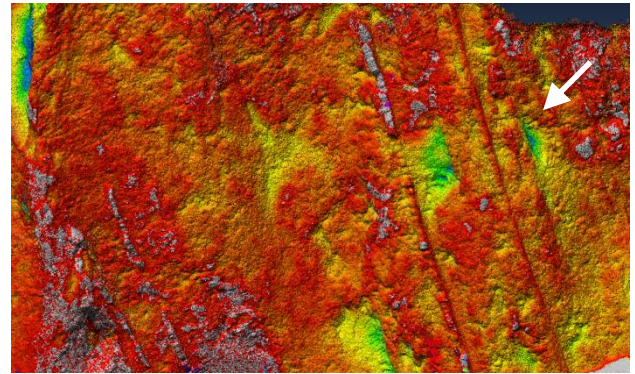


Na slikama 13.a-f, u područjima označenim strelicama, moguće je primijetiti da erozija površine nije jednolika, iako bi se to moglo pretpostaviti isključivo vizualnim opažanjem.

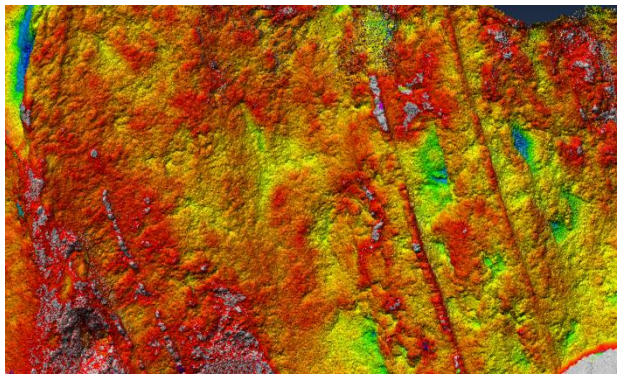
Prema tome se može pretpostaviti da na eroziju zasjeka u fliznom slijedu značajno utječe metodologija izvedbe zasjeka, podložnost materijala fragmentaciji (prema tipu trajnosti materijala iskazanih laboratorijskim testovima), prisutnost sekundarnih pukotina te pojavnost tanko-uslojenih otpornijih slojeva.



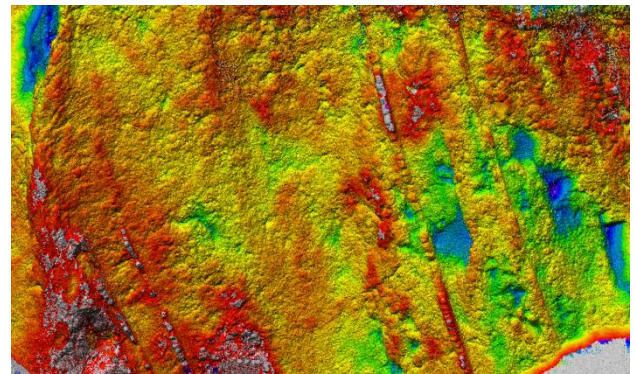
(a) Usporedba 7.3.2012. - 28.9.2012.



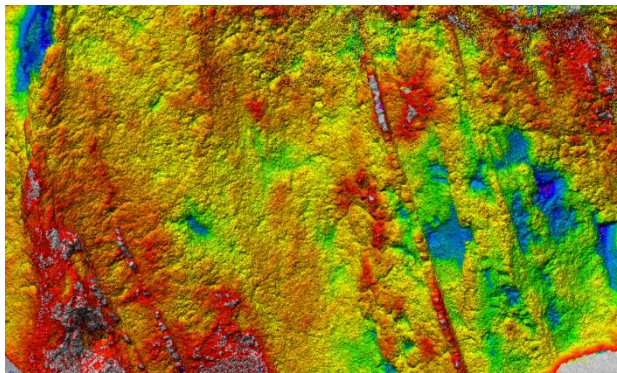
(b) Usporedba 7.3.2012. - 21.3.2013.



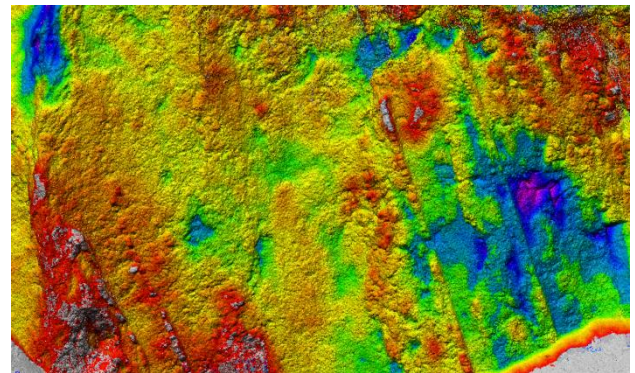
(c) Usporedba 7.3.2012. - 27.9.2013.



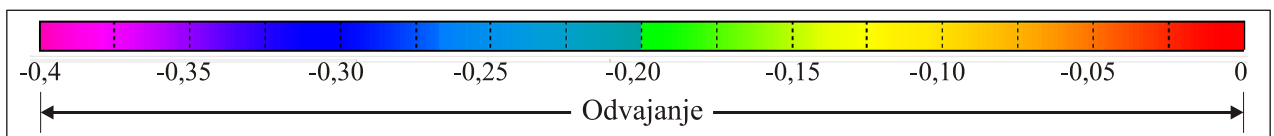
(d) Usporedba 7.3.2012. - 10.3.2014.



(e) Usporedba 7.3.2012. - 23.6.2014.



(f) Usporedba 7.3.2012. - 3.10.2014.



Slika 13. Usporedba oblaka točaka za srednji dio zasjeka na pilot lokaciji s nagnutim 1% za navedene epohe mjerenja (a - f) s referentnom plohom



5. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Opa0anje zasjeka u mekim stijenama upotrebom TLS-a osnova je za razumijevanje procesa erozije u ovom tipu stijena. Iako je dostupna du0e vrijeme, zbog relativno visoke nabavne cijene ovaj tip ure aja joz uvijek ne nalazi ziroku primjenu u geologiji i srodnim disciplinama. Prema dostupnoj literaturi nema zabilje0enih sli njih studija u ovom tipu materijala, osim nekoliko primjera opa0anja erozije obalnog pojasa [4, 6, 15], koji su atraktivniji zbog skale problema, utjecaja djelovanja valova i morskih struja te generalno br0eg odvijanja procesa.

Koli inu erodiranog i odlo0enog materijala na zasjecima i strmim pokosima dosad nije bilo mogu e jednostavno niti precizno odrediti. Upotrebom TLS-a omogu ena je naknadna detaljna analiza opa0anih zasjeka te odabiranje jednog ili vize reprezentativnih profila za geotehni ku analizu. Na temelju izvrzenih opa0anja, provjerena dva naju estalija matemati ka modela erozije zasjeka: Bakker. Le Heuxov i Fisher. Lehmannov. Usporednom analizom utvr eno je da, nakon po etne relaksacije zasjeka, Fisher. Lehmannov model najbolje opisuje eroziju na odabranim pilot lokacijama u podru ju Dalmacije. Pri tome Bakker. Le Heuxov model je po0eljno kombinirati s Fisher. Lehmannov modelom za simulaciju po etnog rastere enja kod izvedbe strmijih zasjeka ili koristiti bilinerarni kriterij prema autoru.

Zabilje0eni nagibi slobodnog pokosa zasjeka na ovom podru ju kre u se u rasponu od oko 70° do 80°, osim u slu ajevima kada pri izvedbi odabran bla0i pokos. Nagib sipara u rasponu od 35° do 38°, bez obzira na tip materijala ili odnos udjela mekzih i vrz ih slojeva, ukoliko je rije o fliznom slijedu. Prosje na godiznja erozija zabilje0ena na svim pilot lokacijama kre e se u rasponu od 3 do 7 cm/god (prosje no 5 cm/god) za zasjeka na kopnu, do 10 cm/god za obalne klifove. Navedene vrijednosti su isklju ivo orijentacijske, utvr ene na vize profila za svaku odabranu lokaciju kao prosje na vrijednost za kratko razdoblje opa0anja te je lokalno mogu a pojava i ve ih vrijednosti.

Za potpunu analizu stabilnosti zasjeka u vremenu, potrebno uvijek sagledati mogu nost pojave lokalnih nestabilnosti kao zto su: klizanja po primarnim i sekundarnim pukotinskim sustavima, prelaganje, odron uzrokovan diferencijalnom rastrozbo i erozijom ili pojavu klizizta.

U kona nici potrebno je naglasiti nekoliko prednosti TLS-a uo enih u ovom radu u odnosu na klasi ne metode opa0anja. U prvom redu pribavljanje podataka je brzo i detaljno, za razliku od drugih metoda opa0anja omogu ava kreiranje detaljnih modela zasjeka bez potrebe pristupanja istim, zto naj ez e kod strmih zasjeka nije ni mogu e ili je opasno za provoditelja (npr. jedan od zasjek na lokaciji kamenoloma s10. kolovoz%je visine 22,5 m i nagiba 78°).

Kroz ra unalne alate koji koriste ICP algoritam (npr. Polyworks IMAlign), ili sli ne algoritme koji se temelje na metodi najmanjih kvadrata i minimiziranju sume Euklidske udaljenosti referentnog i pomi nog oblaka to aka, mogu e je nakon georeferenciranja referentnog modela zna ajno pojednostavniti postupak daljnjeg prikupljanja podataka. Naime, utvr ivanjem fiksnih objekata i/ili geolozkih lanova koji nisu podlo0ni eroziji u in0enjerskom razdoblju vremena te koriztenjem istih za preklapanje s referentnim modelom, posrednim putem se vrzi georeferenciranje pribavljenog oblaka to aka u promatranoj epohi. S time se izbjegava anga0iranje dodatne opreme za svaku narednu epohu mjerenja te se opa0anje mo0e vrziti samo uz upotrebu TLS-a.



Uspostavom dugoro nih monitoringa (s trajanjem od pet, deset, pa i vize godina) i pokrivanjem cijelog vremenskog toka promjene morfologije zasjeka, po prvi put imamo mogu nost detaljno razotkriti procese koji ih uzrokuju i na in na koji se manifestiraju. Jedan od smjerova je svakako, uz dugoro ni monitoring, popratiti i atmosferske utjecaje: vjetra, oborina, osun anosti zasjeka, ali i orijentacije zasjeka, uslojenosti, udjela pojedinih geoloških lanova i sl.

LITERATURA

- [1] Miz evi , P., Vlastelica, G. (2012.): Stabilnostuvremenukosineiskopaneulaporu. Gra evinar 64/6, 451-461.
- [2] Vlastelica, G. (2015.): Utjecaj rastrozbe na trajnost zasjeka u mekoj stijeni, Doktorski rad, Sveu ilizte u Splitu, Fakultet gra evinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- [3] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center (2012.): Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications. Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- [4] 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.
- [5] Dewez, T., Gebrayel, D., Lhomme, D., Robin, Y. (2009.): Quantifying morphological changes of sandy coasts by photogrammetry and cliff coasts by lasergrammetry. *La Houille Blanche*, 1, 32. 37.
- [6] 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.
- [7] Miz evi , P. (2004.): Uvod u in0enjersku mehaniku stijena. Gra evinski fakultet Sveu ilizta u Splitu.
- [8] Franklin, J.A., Dusseault, M.B. (1989.): *Rock Engineering*. McGraw-Hill, New York, 600 pp.
- [8a] Fookes, P.G., Gourley, C.S., Ohikere, C. (1988.): Rock weathering in engineering time. *Quar. J. of Engin. Geology* 21: 33-57.
- [9] Gulam, V. (2012.): Erozijska ogolina u flizu srediznje Istre, Doktorski rad, Sveu ilizte u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- [10] Huisman, M. (2006.): Assessment of rock mass decay in artificial slopes. Technische Universiteit Delft . Phd thesis.
- [11] Kordi , B. (2014.): Razvoj metode trodimenzionalnoga terestri koga laserskoga skeniranja kod odre ivanja i analize pomaka povrzine klizizta. Sveu ilizte u Zagrebu, Geodetski Fakultet. Doktorski rad
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Abellan, A., Vilaplana, J. M., Calvet, J., Garcia-Selles, D., Asensio, E. (2011.): Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning . case study of the basaltic rock



- face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 829-841.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Vlastelica, G., Miz evi , P., Fukuoka, H., Smailbegovi , A. (2011.): First Experience with Ground Based LiDAR in Omiz and Du e Areas. Proc. of the 2nd Project Workshop on Risk Identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods. Rijeka (Croatia), 15-17 November 2011, pp. 37-41.
- [18] Fisher, O. (1866.): On the disintegration of a chalk cliff, *Geological Magazine*, 3, 354-356.
- [19] Lehmann, O. (1933.): Morphologische Theorie der Verwitterung von Steinschlagwänden. *Vierteljahrsschrift der Naturforschende Gesellschaft in Zurich*, 78, 83-126.
- [20] Hutchinson, J.N. (1998.): A small-scale field check on the Fisher. Lehmann and Bakker. Le Heux cliff degradation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 913-926.
- [21] Bakker, J.P., Le Heux J.W.N. (1946.): Projective-geometric treatment of O. Lehmann's theory of the transformation of steep mountain slopes. *Proceedings Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW)* 49(5): 533-547.
- [22] Huisman, M., Nieuwenhuis, J.D., Hack, H.R.G.K. (2011.): Numerical modelling of combined erosion and weathering of slopes in weak rock. *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 1705-1714.