

UDK 551.243
UDC 551.243

Originalni znanstveni rad
Original scientific paper

Jezik/Language: Hrvatski/Croatian

INVENTAR KLIZIŠTA U SLIVU RIJEKE DUBRAČINE

SLIDE INVENTORY IN DUBRACINA RIVER BASIN

ALEKSANDAR TOŠEVSKI

Geološko kartiranje, d.o.o., Zvonimirova 117A, 21210 Solin, Hrvatska

Ključne riječi: inventar klizišta, sliv rijeke Dubračine, fliš, terensko geomorfološko kartiranje, digitalni model reljefa, kut nagiba, prekomjerna erozija

Key words title: slide inventory, Dubracina river basin, flysch, field geomorphological mapping, digital elevation model, dip angle, excessive erosion

Sažetak

Inventar klizišta u slivu rijeke Dubračine sastoji se od 39 klizišta. Otkrivena su terenskim geomorfološkim kartiranjem i vizualnom analizom digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m. Klizišta otkrivena daljinski su i terenski verificirana. Konture svih klizišta su kartirane iz digitalnog modela reljefa. Ukupna površina zahvaćena klizanjem iznosi 81873 m² što predstavlja 0,44% površine istraživanja. Za svako klizište je određena površina, volumen, ukupna duljina, širina pokrenute mase, nagib terena na mjestu klizanja i azimut smjera klizanja. Površine klizišta su u rasponu od 150 do 12956 m². Minimalna ukupna duljina klizišta od krune do dna iznosi 20 m, a maksimalna 226 m. Nagibi padina na kojima su klizišta otkrivena nalaze se u rasponu od 10,1° do 28,6° s naglaskom da se 76,7% površine od ukupne površine koja je zahvaćena klizanjem nalazi na nagibima do 20°. Litoška jedinica fliš (E_{2,3}) je označena kao najznačajniji litoški faktor klizanja na temelju izračuna težinskih faktora. Sva klizišta se nalaze u zoni trošenja fliša i to na mjestima gdje se ona nalazi na površini. Sklonost terena prekomjernoj eroziji pokazala se kao izrazito ograničavajući faktor u primjeni digitalnog modela reljefa u svrhu daljinskog kartiranja klizišta.

Abstract

The slide inventory in Dubracina river basin consists of 39 slides. They have been detected by field geomorphological mapping and visual analysis of 1 meter digital elevation model. The slides detected using elevation model are validated by the field checking as well. The outline of all slides is generated using digital elevation model. The total area affected by sliding is 81873 m² which is 0,44% of researched area. The area, volume, total length, width of displaced mass, dip angle of slope on the slide location and dip direction of sliding have been defined for each slide. Slides areas are ranging from 150 to 12956 m². Minimal total slide length from the crown to the tip is 20 m and maximal is 226 m. Angles of slope dip on slide locations are ranging from 10,1° to 28,6° focusing that 76,7% total area affected by sliding has slope dip angle on slide location up to 20°. According to weighting factor calculations lithological unit flysch (E_{2,3}) is marked as the most significant lithological factor of the sliding. All slides are located in the flysch weathering zone where zone crop out. It has been shown that terrain tendency for excessive erosion is very limitative factor in using digital elevation model for the remote slide mapping.

Uvod

Klizišta su već dugi niz godina u žarištu zanimanja mnogih stručnjaka i znanstvenika iz područja geološkog inženjerstva i geotehnike, a razlozi tome leže u činjenici da klizišta mogu uzrokovati i uzrokuju višemilijunske štete s ljudskim žrtvama. Terzaghi i Peck (1961) su klizište definirali kao slom mase tla na padini. Cruden (1991) definira klizište kao pokret stijenskog ili detritnog materijala ili mase tla niz padinu, a jednu od posljednjih definicija klizišta dali su Highland i Bobrowsky (2008) koja glasi: "Klizište je termin koji opisuje pokret tla, stijenskog i organskog materijala niz padinu pod utjecajem gravitacije, ali i krajobraz koji je nastao kao rezultat takvog pokreta". Tijekom istraživanja i u rezultatima koji će biti prikazani u ovom radu pod pojmom klizište se podrazumijevao geomorfološki proces kojeg je UNESCO-va radna grupa za izradu svjetskog inventara klizišta (WP/WLI, 1993) definirala pod pojmom "slide" (pokret mase tla ili stijena niz padinu koji se dominantno događa duž klizne

plohe ili uske zone velike smičuće deformacije) s naznakom da su istraživana samo klizišta u tlima. Osim klizanja, spomenuta radna grupa navodi još 4 tipa pokreta masa na padinama (odronjavanje, prevrtanje, razmicanje i tečenje) koje skupno označava engleskim terminom "landslides". Inventar klizišta je inventar lokacija klizišta i podataka o tipu klizišta, volumenu, aktivnosti, vremena nastanka i drugih značajki klizišta na nekom terenu (Fell i dr., 2008) te predstavlja temeljnu stavku u sklopu koncepta zonacije terena s obzirom na hazard klizanja kojeg su postavili Carrara i dr. (1992) te Carrara (1993). U ovom radu će biti prikazani rezultati izrade inventara klizišta u središnjem dijelu sliva rijeke Dubračine (dio Vinodolske doline, kontura sliva prema Ožanić i dr. (2011) i korelacije prostorne distribucije klizišta sa litoškom građom područja istraživanja. Rezultat te korelacije će biti izračunati težinski faktori koji će definirati koja litoška jedinica je najznačajnija u kontekstu faktora

klizanja. Osim navedenog, u radu će biti prezentirani i podaci o nagibima padina na lokacijama klizanja te njihova usporedba s nagibima u sklopu cijelog područja istraživanja. Iako klizišta u slivu nisu bila u fokusu njihovih istraživanja, o činjenici da postoje pisali su Mileusnić i dr. (2004), Jurak i dr. (2005), Aljinović i dr. (2010) te Benac i dr. (2011), a o mogućnosti provedbe koncepta zonacije terena s obzirom na hazard klizanja u slivu rijeke Dubračine pisali su Mihalić i Arbanas (2013). U literaturi postoje vrlo oskudni podaci o rezultatima kartiranja geomorfoloških procesa u zoni navlake karbonata i fliša u Hrvatskoj gdje pripada i sliv rijeke Dubračine. Jedno takvo istraživanje u svrhu izrade osnovne inženjerskegeološke karte mjerila 1:100.000 obavili su Pollak i dr. (2010) u zoni navlake planine Kozjak koja je u navlačnom kontaktu sa flišem na području grada Kaštela. Autori su snimili brojne tragove recentnih geomorfoloških procesa, ali ne i tragove klizanja. O stabilnosti blokovskih klizišta u zoni navlake karbonata i fliša na primjeru Župe Dubrovačke i Crnogorskog primorja pisali su Jurak i dr. (1995). O kompleksnom klizištu u dolini Riječine prvi su pisali Benac i dr. (1999), a istraživanja na istoj lokaciji aktualna su i danas (Arbanas i dr., 2012).

Područje istraživanja

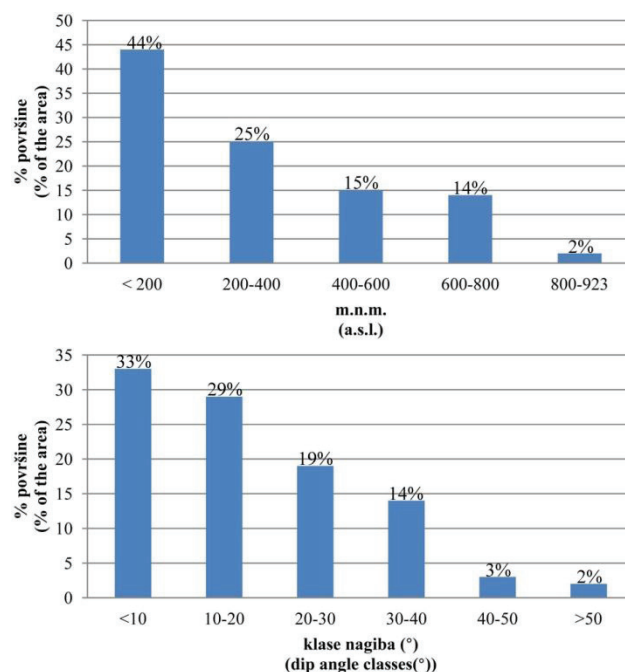
Sliv rijeke Dubračine ima površinu od 43,55 km², nalazi se u zaleđu Crikvenice i pripada Vinodolskoj dolini. Područje istraživanja u sklopu sliva prikazano je slikom 1. Sliv je omeđen strmim vapnenačkim liticama dinaridskog pružanja (SZ-JI) formiranim neogenskom (Grimani i dr., 1973; Blašković, 1999) i kvartarnom tektonikom (Blašković, 1983). Nadmorska visina u slivu kreće se u rasponu od -2 do 923 metara, a kut nagiba padina od 0 do 88°. Klase nadmorskih visina i nagiba te pripadajuće površine u slivu prikazane su slikom 2. Srednja godišnja količina oborine u slivu za tridesetogodišnje razdoblje od 1980. do 2010. je u rasponu od 1252 do 2168 mm. Prostorna distribucija izohijeta prikazana je slikom 3 (Državni hidrometeorološki zavod, 2011, neobjavljeno). Vegetacijski pokrov sliva mjerila 1:100.000 objavila je Agencija za zaštitu okoliša (2008) prema kojoj bjelogorična šuma pokriva 49% površine, a sve ostale klase 51%. Među ostalim klasama ubrajaju se vodna tijela, područja sa oskudnim biljnim pokrovom, prijelazna šumska područja, makija i garig, prirodni travnjaci, miješana šuma, crnogorična šuma, pretežno poljoprivredno zemljište sa značajnim udjelom prirodnog biljnog pokrova, pašnjaci i nepovezana gradska područja. U sklopu nabrojanih ostalih klasa, najveći postotak površine odnosi se na makiju i garig te na prijelazna šumska područja koja zajedno pokrivaju 23% sliva Dubračine. U uvodnom dijelu je naglašeno da su predmet istraživanja klizišta u tlima. U mjerilu 1:25000 izvan poligona istraživanja prikazanog slikom 1 u slivu nema tala već teren isključivo izgrađuje masa vapnenaca, izmjene vapnenaca i lapora, breča i sipara (Hrvatski geološki institut, 2007a, ljubaznošću Hrvatskih voda). Radi se o

dolini omeđenoj strmim vapnenačkim liticama koja u svojoj podlozi ima fliš. Geološku kartu područja istraživanja mjerila 1:5000 izradio je Hrvatski geološki institut (2007b, ljubaznošću Hrvatskih voda), a litološka karta napravljena iz nje je bila temelj terenskog i kabinetskog rada tijekom izrade inventara klizišta.



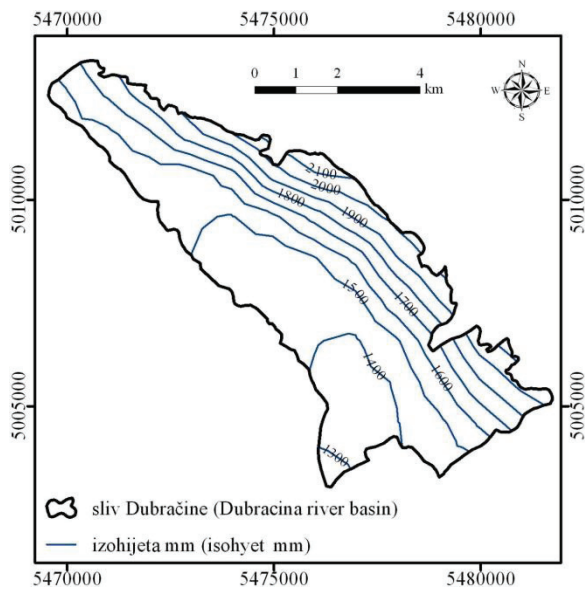
Slika 1. Lokacija sliva rijeke Dubračine i područja istraživanja u sklopu sliva na topografskoj karti originalnog mjerila 1:100000 (kontura sliva prema Ožanić i dr., 2011).

Figure 1. Location of Dubracina river basin and research area in the frame of the basin on topographic map originally scaled 1:100000 (basin boundary according to Ožanić et al., 2011).



Slika 2. Pripadajuće površine klase nadmorskih visina i nagiba padina u slivu rijeke Dubračine.

Figure 2. Corresponding areas of elevation and slope dip angle classes in Dubracina river basin.

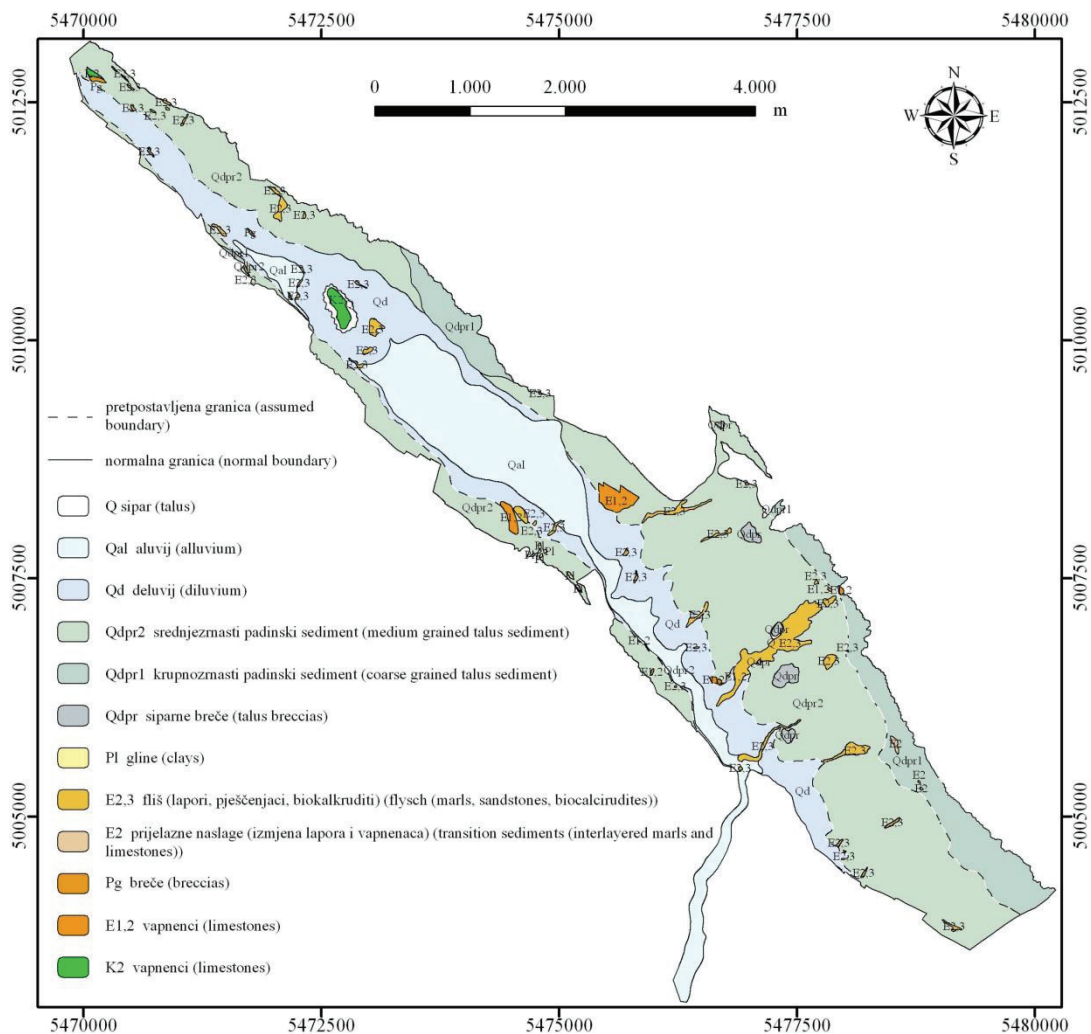


Slika 3. Prostorna distribucija izohijeta u slivu rijeke Dubračine (Državni hidrometeorološki zavod, 2011, neobjavljeno).
Figure 3. Spatial distribution of isohyets in Dubracina river basin (Meteorological and Hydrological Service, 2011, unpublished).

Litološka građa područja istraživanja

Središnji dio sliva rijeke Dubračine, odnosno područje istraživanja, izgrađuju karbonatne i klastične naslage (Hrvatski geološki institut, 2007b, ljubaznošću Hrvatskih voda). Karbonati su predstavljeni gornjo-krednim i eocenskim vapnecima. Klastiti su zastupljeni brečama paleogenske i kvartarne starosti, eocenskim flišem, pliocenskim glinama te nelitificiranim kvartarnim taložinama. Litološka jedinica izgrađena od izmjene vapnenaca i lapora predstavlja eocenske prijelazne naslage. Prostorni položaj spomenutih jedinica prikazan je slikom 4.

Vapnence gornje krede (K₂) čine vapnenci gornjoturunske starosti koji su prethodili taloženju vapnenaca donjeg i srednjeg eocena (Hrvatski geološki institut, 2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda). U svom donjem dijelu sastoje se od nepravilne izmjene madstona, vekstona i pekstona, a vrlo rijetko se mogu naći i rudistni floutstoni.



Slika 4. Litološka karta područja istraživanja originalnog mjerila 1:5000 (Hrvatski geološki institut, 2007b, ljubaznošću Hrvatskih voda).
Figure 4. Lithological map of research area originally scaled 1:5000 (Croatian Geological Survey, 2007b, with kindness of Croatian Waters).

Debljina slojeva je u rasponu od 15 do 50 cm. Gornji dio ove litološke jedinice čine rekristalizirani vapnenci debeloslojevite do masivne teksture. Vršni dio intenzivno je okršen. Ukupna debljina ovih naslaga procijenjuje se na 70 do 100 m (Hrvatski geološki institut, 2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda).

Vapnenci donjeg i srednjeg eocena ($E_{1,2}$) su foraminiferski vapnenci koji su transgresivni na vapnencima gornje krede gornjoturanske starosti. Glavna značajka ove formacije je velika vertikalna i lateralna raznolikost facijesa što je uvjetovalo nepravilnu izmjenu miliolidnih, alveolinskih, numulitnih i diskociklinskih vapnenaca u prostoru (Hrvatski geološki institut, 2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda). Miliolidni vapnenci su malo zastupljeni u sklopu foraminiferskih vapnenaca. Predstavljani su madstonima i vekstonima. Debljina miliolidnih vapnenaca iznosi do 50 m. Alveolinski vapnenci su klasificirani kao vekstoni do pekstoni, a ukupna debljina im se procjenjuje na 80 do 100 m. Numulitni vapnenci su također klasificirani kao vekstoni do pekstoni ukupne debljine 30 do 50 m. Diskociklinski vapnenci se nalaze u neposrednoj podini prijelaznih naslaga i predstavljani su pekstonima. Ukupna debljina diskociklinskih vapnenaca iznosi 20 m do 30 m.

Prijelazne naslage (E_2) izgrađuju lapori u izmjeni sa vapnencima debljine 20 do 30 cm. Ukupna debljina naslage kreće se u rasponu od 40 do 60 m. Karakterizira ih prisutnost nodula čerta i fosili rakovica.

Flišne naslage ($E_{2,3}$) ispunjavaju dolinu u slivu rijeke Dubračine. Sastoje se od lapora, pješčenjaka i biokalkrudita (Aljinović i dr., 2010). Na sjeverozapadnom dijelu primijećen je veći udio pješčenjačkih slojeva u sklopu fliša kao litološke jedinice u odnosu na jugoistočni dio područja istraživanja gdje je udio pješčenjačkih slojeva puno manji (Hrvatski geološki institut, 2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda). Biokalkruditi (uvriježeni naziv "numulitne breče") su u odnosu na pješčenjake i lapore u bitno podređenom udjelu. Kontakt s podinom je konkordantan. Lapori iz prijelaznih naslaga i fliša su identični, a granica je postavljena tamo gdje prestaju pojave slojeva vapnenaca sa nodulama čerta i rakovicama koji su karakteristični za prijelazne naslage.

Paleogenske breče (P_g) predstavljaju tipične Jelar breče sa slabosortiranim uglatim fragmentima gornjokrednih i eocenskih foraminiferskih vapnenaca.

Gline pliocenske starosti (P_l) utvrđene su na ukupno sedam izdanaka zanemarive površine, a karakterizira ih boja bijele kave.

Siparne breče (Q_{dpr}) u slivu rijeke Dubračine izgrađene su od fragmenata foraminiferskih eocenskih i krednih vapnenaca koji su varijabilnih veličina. Na terenu su mjestimično prisutne obje vrste klasta, a mjestimično samo jedna vrsta. S obzirom na starost, u slivu postoje dvije vrste siparnih breča, starije i mlađe, o čemu je pisao Blašković (1983).

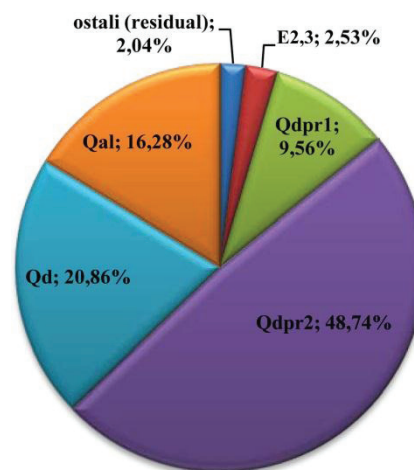
Krupnozrnasti padinski sediment (Q_{dpr1}) čine nezaobljeni do slabo zaobljeni i slabo sortirani vapnenački fragmenti (Hrvatski geološki institut, 2007c,

ljubaznošću Hrvatskih voda). Dimenzije fragmenata su vrlo varijabilne, od dimenzija pijeska do blokova metarskih dimenzija. Sediment je nevezan do slabo vezan. Udio sitnozrnaste frakcije izgrađene od praha i gline je malen i ne iznosi više od 15%. Crvenkaste je boje što ukazuje na tlo nastalo trošenjem karbonata. Ovu jedinicu nalazimo uz sjeveroistočni rub doline gdje joj mjestimična debljina prelazi i 20-tak metara. Radi se o padinskim naslagama (deluvij) koje su nastale fizičko-kemijskim trošenjem stijena, njihovom erozijom i gravitacijskim transportom (Benac, 2013).

Srednjezrnasti padinski sediment (Q_{dpr2}) se u odnosu na jedinicu Q_{dpr1} razlikuje veličinom fragmenata koja ne prelaze 10 cm (Hrvatski geološki institut, 2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda) te povećanim udjelom sitnozrnaste frakcije crvenkaste boje. Prema procjenama iznosi od 15% do 70%. Svojim položajem na padini, ovi sedimenti se nadovezuju na krupnozrnasti padinski sediment.

Litološka jedinica delivij (Q_d) prema Hrvatskom geološkom institutu (2007c, ljubaznošću Hrvatskih voda) predstavlja sitnozrnasti padinski materijal koji je istaložen u najnižim dijelovima doline te resedimentirani fliški sediment. Riječ je o pijescima čiji klasti potječu od trošenja karbonata sa primjesama praha i gline. Dio ove jedinice se možda može opisati kao eluvij, odnosno zona trošenja fliša nastala "in situ" trošenjem. Debljina ove jedinice, na temelju terenske procjene, ne prelazi 10 m.

Aluvij (Q_{al}) rijeke Dubračine izgrađen je od šljunaka različite veličine fragmenata i različite zaobljenosti koji su vezani za korito. Materijal potječe iz karbonatnog zaleđa, a dijelom i iz pješčenjačkih slojeva fliša. Osim šljunaka, u aluvijalnim naslagama se nalaze i sedimenti poplavne ravnice koji su izgrađeni uglavnom od prahova i glina.



Slika 5. Postotni udjeli pojedinih litoloških jedinica u sklopu površine istraživanja ($E_{2,3}$ -flysch, Q_{dpr1} -krupnozrnasti padinski sediment, Q_{dpr2} -srednjezrnasti padinski sediment, Q_d -deluvij, Q_{al} -aluvij, za ostali vidi legendu na slici 4).

Figure 5. Percentage of some lithological units in the frame of research area ($E_{2,3}$ -flysch, Q_{dpr1} -coarse grained talus sediment, Q_{dpr2} -medium grained talus sediment, Q_d -diluvium, Q_{al} -alluvium, for residual see legend in figure 4).

U sklopu područja istraživanja registrirani su i sipari (Q), a sastavljeni su od uglatih fragmenata različitih dimenzija.

Postotni udjeli pojedinih litoloških jedinica u ukupnoj površini istraživanja od 18,55 km² prikazani su slikom 5.

Metode istraživanja

Metode izrade inventara klizišta mogu se podijeliti na konvencionalne i inovativne (Guzzetti i dr., 2012). Konvencionalne metode uključuju terensko geomorfološko kartiranje (Brunsden, 1985) i interpretaciju stereoparova (Rib i Liang, 1978; Brunsden, 1993), a inovativne metode interpretaciju površinske morfologije pomoću digitalnog modela reljefa (engl. digital elevation model ili skraćeno DEM) visoke rezolucije, interpretaciju satelitskih snimaka i upotrebu novih alata koji su unaprijedili mogućnosti terenskog kartiranja. U svrhu izrade inventara klizišta u središnjem dijelu sliva rijeke Dubračine primijenjene su sljedeće metode izrade: a) terensko geomorfološko kartiranje (konvencionalna metoda), b) interpretacija stereoparova (konvencionalna metoda) i c) analiza morfologije terena pomoću digitalnog modela reljefa rezolucije 1 metar (inovativna metoda).

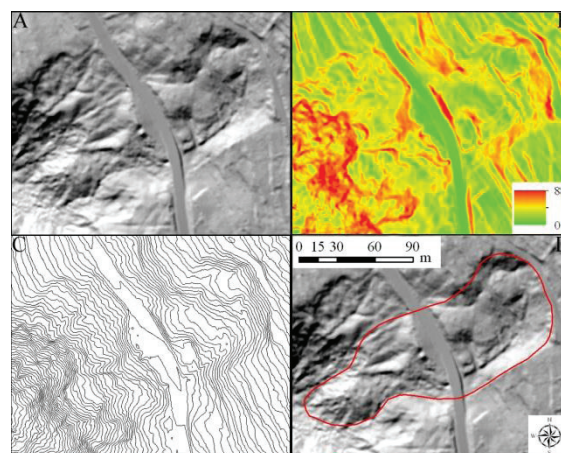
Terensko geomorfološko kartiranje uključivalo je prospekciju terena u svrhu prepoznavanja morfologije karakteristične za proces klizanja. U trenutku pronalaska klizišta, ručnim GPS uređajem snimljeno je nekoliko točaka konture, a ostatak konture precizno je napravljen daljinski uz pomoć visokorezolucijskog digitalnog modela reljefa. Snimljene točke ujedno su poslužile kao terenska verifikacija konture klizišta. Ovom metodom otkrivena su 23 od ukupno 39 kartiranih klizišta (59%).

Interpretacijom stereoparova u slivu rijeke Dubračine nije otkriveno niti jedno klizište. Za analizu su bile dostupne dvije generacije snimaka. Jedna mjerila 1:20.000 snimljena u svibnju 2006. i druga mjerila 1:32.000 snimljena 1975. (mjesec nepoznat). Prvi rad koji govori o interpretaciji klizišta pomoću stereoparova u Hrvatskoj publicirali su Podolszki i dr. (2012).

Vizualnom analizom morfologije terena pomoću digitalnog modela reljefa rezolucije 1 metar otkriveno je 16 od ukupno 39 kartiranih klizišta (41%). Model je napravljen krajem ožujka 2012. uz pomoć lasera pričvršćenog na avion koji skeniranjem mjeri udaljenost do Zemljine površine, a geografski položaj aviona se mjeri pomoću GPS tehnologije. Riječ je o "bare-earth" modelu reljefa koji podrazumijeva da su informatičkom obradom podataka nakon laserskog skeniranja uklonjeni objekti i vegetacija koji se nalaze na površini. Na ovaj način je moguće dobiti i više od 100 točaka po metru kvadratnom što omogućava submetarsku rezoluciju modela (Razak i dr., 2011). U literaturi pisanoj na engleskom jeziku se za ovakav način primjene laserske tehnologije koristi sintagma "airborne LiDAR" (*light detection and ranging*). Jaboyedoff i dr. (2012) su upotrebu digitalnih modela reljefa visoke rezolucije

dobivenih skeniranjem iz zraka u svrhu kartiranja klizišta podijelili na dvije vrste: a) vizualna analiza površine terena i b) poluautomatsko ili automatsko kartiranje pomoću morfoloških značajki klizišta. Vizualna analiza površine terena najčešće je upotrebljavana primjena modela reljefa visoke rezolucije u svrhu kartiranja klizišta, a ujedno je i najučinkovitija (Haugerud i dr., 2003; Schultz, 2004 i drugi). Metoda je u potpunosti usporediva s analizom stereoparova (Haugerud i dr., 2003; Schultz, 2004; Schultz, 2007). Stereoskopom se pomoću stereopara dobije 3D prikaz terena, a isto se može postići i upotrebom digitalnog modela reljefa u GIS programima.

Za vizualnu analizu se koriste tri topografske karte derivirane iz modela reljefa u GIS programu: karta osjenčanog terena (engl. *hillshade*), karta nagiba i karta izohipsi s ekvidistancom 1 metar. U svrhu ilustracije, slikom 6 su prikazane derivirane karte za specifičnu lokaciju u slivu, a kao rezultat vizualne interpretacije lokacije nacrtana je kontura klizišta. Točnost konture klizišta koja je dobivena na ovaj način može se provjeriti na dva načina: a) terestičkim laserom koji može generirati model reljefa s centimetarskom rezolucijom ili b) pomoću sofisticiranih GPS uređaja koji imaju mogućnost spajanja na hrvatski pozicijski sustav (CROPOS) koji omogućava pozicioniranje sa submetarskom točnošću. U svakom slučaju, točnost konture klizišta koja je interpretirana iz digitalnog modela reljefa rezolucije 1 metar je nekoliko metara. Prvi rad koji govori o interpretaciji klizišta pomoću visokorezolucijskog modela reljefa u Hrvatskoj publicirali su Mihalić i dr. (2011).



Slika 6. Topografske karte derivirane iz visokorezolucijskog modela reljefa koje omogućavaju vrlo točno daljinsko kartiranje konture klizišta: A) karta osjenčanog terena nastala simulacijom položaja sunčevih zraka s azimutom od 315° i kuta nagiba 45°, B) karta nagiba padine gdje tamnije boje predstavljaju veće kutove nagiba, C) karta izohipsi sa razmakom 1 m, D) kontura klizišta nastala kao rezultat vizualne analize karata pod A, B i C.

Figure 6. Topographic maps derivative from high resolution digital elevation model which enable remote mapping of slide outline with high accuracy: A) hillshade map generated with the sun azimuth of 315° and dip angle of 45°, B) slope dip angle map where warmer colors represent higher dips, C) contour map generated with 1 m contour spacing, D) slide outline as a result of visual interpretation using maps under A, B and C.

Nakon određene konture, za svako klizište su izračunate ili izmjerene sljedeće značajke: a) površina, b) volumen (prema Guzzetti i dr., 2008, volumen = $0,0844 \times \text{površina}^{1,4324}$), c) ukupna duljina, d) širina pokrenute mase, e) nagib padine na lokaciji klizišta i f) azimut smjera klizanja. Ostale značajke kojima se opisuju klizišta kao što su stanje aktivnosti, model klizanja, relativna starost i dubina klizne plohe će biti procjenjene nakon dodatnog terenskog rada tijekom budućih istraživanja u slivu Dubračine.

Za izračun težinskog faktora pojedine klase (w) u sklopu razmatranog faktora klizanja korišten je izraz kojeg je objavio Van Westen (1993), a koji glasi: $w = (1000 \times A) - (1000 \times B)$. Koeficijent A je definiran kao površina klizanja u sklopu klase faktora klizanja podijeljena sa površinom klase u sklopu područja istraživanja. Koeficijent B dobije se ako se ukupna površina klizanja podijeli sa ukupnom površinom klase (što je u biti površina istraživanja). Što je težinski faktor određene klase faktora klizanja veći, to je veći relativni utjecaj razmatrane klase na nastanak klizišta. U ovom radu će pomoću navedenog izraza biti procijenjen relativni utjecaj litoloških jedinica u sklopu područja istraživanja na nastanak klizišta.

Kut nagiba padine vrlo je važan faktor klizanja i u sklopu istraživanja je precizno izračunat za svaku lokaciju na kojoj se nalazi klizište. Izračun je proveden na sljedeći način: a) u GIS-u je izmjerena prividna, odnosno tlocrtna duljina klizišta, b) uz pomoć izohipsi s ekvidistancom 1 metar je izračunata visinska razlika krune i dna klizišta, c) uz pomoć podataka dobivenih pod a) i b) se mogu konstruirati katete pravokutnog trokuta čija hipotenuza predstavlja ukupnu duljinu klizišta navedenu u tablici 2, a kut što ga zatvara sa horizontalom je kut nagiba padine na lokaciji klizišta.

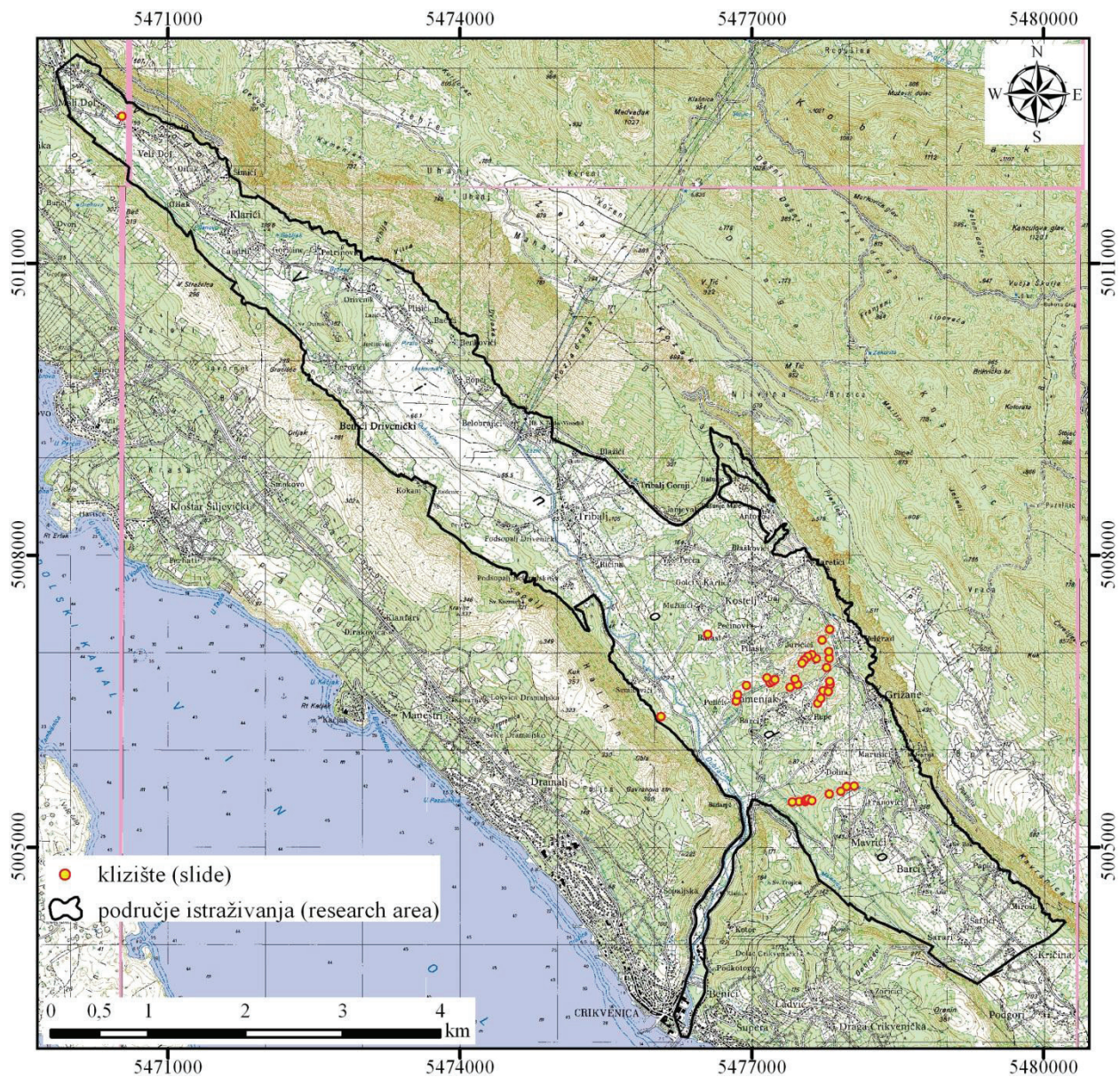
Bitno je naglasiti da su za izračun nagiba padine na lokaciji klizišta korištene izohipse koje nisu zahvaćene klizanjem, bilo da tangiraju konturu ili da se radi o prvoj izohipsi iznad krune ili dna klizišta koja ne siječe konturu. Nagib izračunat na opisani način predstavlja nagib padine kakav je bio prije procesa klizanja na mjestu nastanka klizišta jer su u izračun uključeni intaktni dijelovi padine, a ne dijelovi padine unutar konture klizišta gdje se javljaju nagibi koji su posljedica klizanja. Nagibi padina i površine koje zauzimaju na cijelom području istraživanja površine $18,55 \text{ km}^2$ izračunati su u GIS programu pomoću digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m iz ožujka 2012. godine.

Rezultati istraživanja

Primijenjene metode izrade na području istraživanja rezultirale su inventarom klizišta. Otkriveno je 39 klizišta, od kojih 23 (59%) terenskim geomorfološkim kartiranjem i 16 (41%) pomoću digitalnog modela reljefa rezolucije 1 metar. Ukupna površina zahvaćena klizanjem na području istraživanja površine $18,55 \text{ km}^2$ iznosi 81873 m^2 što predstavlja 0,44% površine. Svakom klizištu je dodijeljena brojevana oznaka u rasponu od 1 do 39, a položaj poligona u prostoru prikazan je karakterističnim točkama slikom 7. Točke su automatski generirane u GIS-u iz poligona klizišta, a koordinate svake točke nalaze se u tablici 1. Korišteni koordinatni sustav je MGI Balkans 5.

Tablica 1. Koordinate karakteristične točke svakog pojedinog poligona klizišta u koordinatnom sustavu MGI Balkans 5.
Table 1. Coordinates of typical point of each slide polygon in MGI Balkans 5 coordinate system.

oznaka klizišta (slide ID)	x	y	oznaka klizišta (slide ID)	x	y	oznaka klizišta (slide ID)	x	y
1	5470533	5012509	14	5477446	5006728	27	5477735	5006609
2	5476549	5007186	15	5477473	5006669	28	5477712	5006527
3	5476068	5006340	16	5477394	5006643	29	5477679	5006478
4	5477802	5007238	17	5477241	5006719	30	5478054	5005627
5	5477721	5007130	18	5477216	5006703	31	5477977	5005621
6	5477792	5007011	19	5477190	5006687	32	5477918	5005571
7	5477798	5006938	20	5477157	5006739	33	5477796	5005545
8	5477768	5006846	21	5476947	5006660	34	5477617	5005479
9	5477664	5006938	22	5476857	5006567	35	5477583	5005492
10	5477619	5006979	23	5476842	5006499	36	5477558	5005486
11	5477577	5006957	24	5477802	5006701	37	5477550	5005468
12	5477541	5006923	25	5477804	5006669	38	5477488	5005469
13	5477518	5006889	26	5477788	5006599	39	5477417	5005462



Slika 7. Lokacije klizišta u sklopu područja istraživanja prikazane karakterističnom točkom poligona klizišta na topografskoj karti originalnog mjerila 1:25000.

Figure 7. Slide locations in the frame of research area displayed with typical point of slide polygon on topographic map originally scaled 1:25000.

Bilo da je klizište otkriveno terenskim ili daljinskim istraživanjem, kontura svih klizišta kartirana je pomoću digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m. Takav način izrade konture daleko je jednostavniji, a istovremeno i puno točniji od terenskog kartiranja konture klizišta.

Sva klizišta koja su otkrivena daljinski su i terenski verificirana. U tablici 2 su prezentirane značajke otkrivenih klizišta te je za svako naveden i način na koji je otkriveno (terenskim radom ili pomoću digitalnog modela reljefa (DEM-a)).

Tablica 2. Osnovne geometrijske značajke, nagibi padina na mjestu nastanka i azimuti smjera klizanja kartiranih klizišta.
Table 2. Basic geometrical features, slope dip angles at the locations and dip directions of mapped slides.

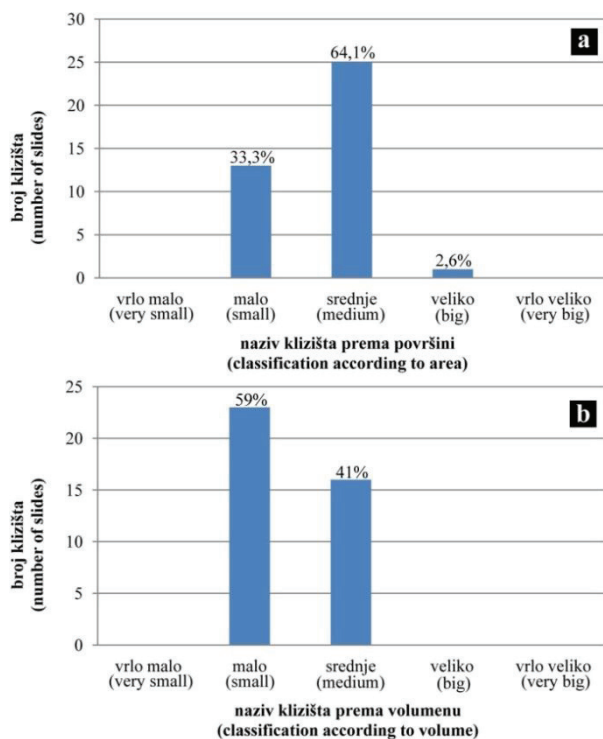
oznaka klizišta (slide ID)	površina (m ²) (area(m ²))	volumen (m ³) (volume (m ³))	ukupna duljina (m) (total length (m))	širina pokrenute mase (m) (width of displaced mass (m))	nagib padine (°) (slope dip angle (°))	detekcija (recognition)	azimut smjera klizanja (azimuth of sliding direction)
1	2384	5808	81	38	10,6	DEM	219
2	695	994	51	17	19,5	DEM	240
3	4437	1414	119	51	21,2	DEM	42
4	12956	65621	226	82	19,4	DEM	242
5	987	1642	47	27	24,9	DEM	327
6	2150	5009	93	38	18,8	terenski (field work)	211
7	1367	2618	73	30	20,9	DEM	227
8	417	478	39	14	19,4	DEM	262
9	1293	2418	60	27	13,6	terenski (field work)	180
10	548	707	38	21	18,4	terenski (field work)	312
11	923	1492	53	24	20,8	terenski (field work)	284
12	2575	6485	90	42	20,9	terenski (field work)	247
13	560	729	43	20	24,8	DEM	270
14	2800	7312	106	41	22,0	terenski (field work)	293
15	1248	2298	77	23	18,2	terenski (field work)	266
16	2668	6824	117	34	18,0	terenski (field work)	305
17	666	935	51	18	27,1	terenski (field work)	297
18	613	830	42	20	25,3	terenski (field work)	297
19	208	176	25	12	28,6	terenski (field work)	297
20	2890	7651	84	51	16,5	terenski (field work)	175
21	4144	12821	126	46	12,4	terenski (field work)	146
22	2577	6493	108	35	14,4	terenski (field work)	118
23	4081	12543	109	54	10,1	terenski (field work)	56
24	1493	2971	69	33	21,3	DEM	228
25	483	590	39	19	22,6	DEM	228
26	419	481	44	14	22,5	terenski (field work)	191
27	4143	12817	107	54	13,5	terenski (field work)	132
28	3260	9092	133	36	15,3	terenski (field work)	150
29	3750	11112	163	29	14,9	terenski (field work)	121
30	1000	1673	45	29	20,9	terenski (field work)	349
31	2428	5962	63	51	18,4	DEM	331
32	2296	5503	91	39	17,8	DEM	293
33	2397	5853	71	50	14,6	terenski (field work)	309
34	1681	3521	87	34	14,7	terenski (field work)	332
35	1318	2485	57	31	18,4	terenski (field work)	332
36	150	111	20	10	20,2	DEM	342
37	369	401	41	12	20,2	DEM	324
38	1540	3106	69	28	17,7	DEM	336
39	1959	4384	77	32	16,6	DEM	327

Šestanović (2001) je klizišta s obzirom na površinu i volumen podijelio u 5 klasa (tablica 3).

Sukladno tome je napravljena analiza klizišta koja se nalaze u prezentiranom inventaru (slika 8).

Tablica 3. Klasifikacija klizišta prema površini i volumenu (Šestanović, 2001).
Table 3. Classification of slides according to area and volume (Šestanović, 2001).

naziv klizišta (slide description)	površina (m ²) (area (m ²))	volumen (m ³) (volume (m ³))
vrlo malo (very small)	< 100	< 100
malo (small)	100 – 1000	100 – 5000
srednje (medium)	1000 – 10000	5000 – 100000
veliko (big)	10000 – 50000	100000 – 1000000
vrlo veliko (very big)	> 50000	> 1000000

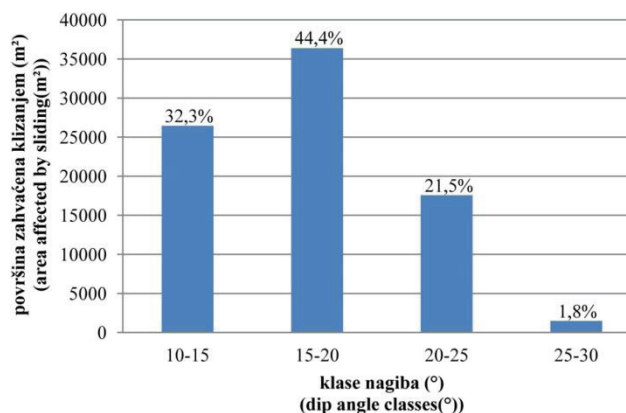


Slika 8. Klasifikacija klizišta u slivu rijeke Dubračine prema površini (a) i volumenu (b).
Figure 8. Classification of slides in Dubracina river basin according to area (a) and volume (b).

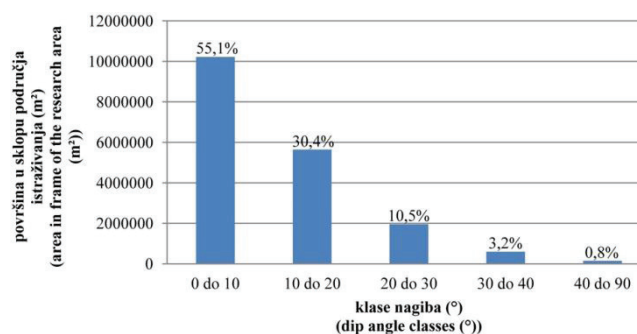
Izračunom nagiba padina na lokacijama klizišta otkriveno je da se nagibi kreću u rasponu od 10,1° do 28,6° što se može generalizirati na raspon od 10 do 30°. Ako se taj interval podijeli na četiri klase dolazi se do podatka da se 76,7% površine od ukupne površine zahvaćene klizanjem nalazi na nagibima od 10° do 20° (slika 9). Vrlo slični podaci o nagibima padina na kojima se nalaze klizišta mogu se pronaći i u literaturi. Miller i dr. (2007) su u sklopu svojih istraživanja utvrdili da se najveća površina klizanja nalazi u klasi nagiba 10° do 30°, a Guzzetti i dr. (2008) navode da se najveći broj klizišta u sklopu istraživanja koja su proveli nalazi u klasi nagiba 5° do 20°. Rezultati istraživanja koje su publicirali Cevik i Topal (2003) su pokazali da se 98,1% površine od ukupne površine zahvaćene klizanjem nalazi u klasi nagiba 0° do 30°. Yalcin (2008) u svojim istraživanjima dolazi do podatka od 60,47% površine od ukupne površine zahvaćene klizanjem u sklopu klase nagiba 10° do 30°. Navedeno dokazuje da se klizišta u slivu rijeke Dubračine ne razlikuju bitno od ostalih klizišta za koja se u literaturi mogu naći podaci s obzirom na nagib padine na kojima su otkrivena. Očito je da se velika većina klizišta pojavljuje u klasi nagiba 10° do 30° što je i klasa nagiba koju Šestanović (2001) označava kao najkritičniju u kontekstu nastanka klizišta.

Prostornom analizom dostupnog digitalnog modela reljefa u GIS programu možemo doznati kakva je distribucija klasi nagiba u sklopu cijelog područja istraživanja površine 18,55 km². Rezultati takve analize prikazani su slikom 10. Usporedimo li slike 9 i 10 vidjet

ćemo da na nagibe do 30° u sklopu kojih se nalazi 100% površine zahvaćene klizanjem otpada 96% površine istraživanja. To znači da se klizišta, osim što se dominantno javljaju na nagibima od 10° do 20°, nalaze na nagibima padina koji ionako izrazito dominiraju u sklopu područja istraživanja.



Slika 9. Raspodjela površine zahvaćene klizanjem po klasama nagiba padina.
Figure 9. Distribution of sliding area over slope dip angle classes.

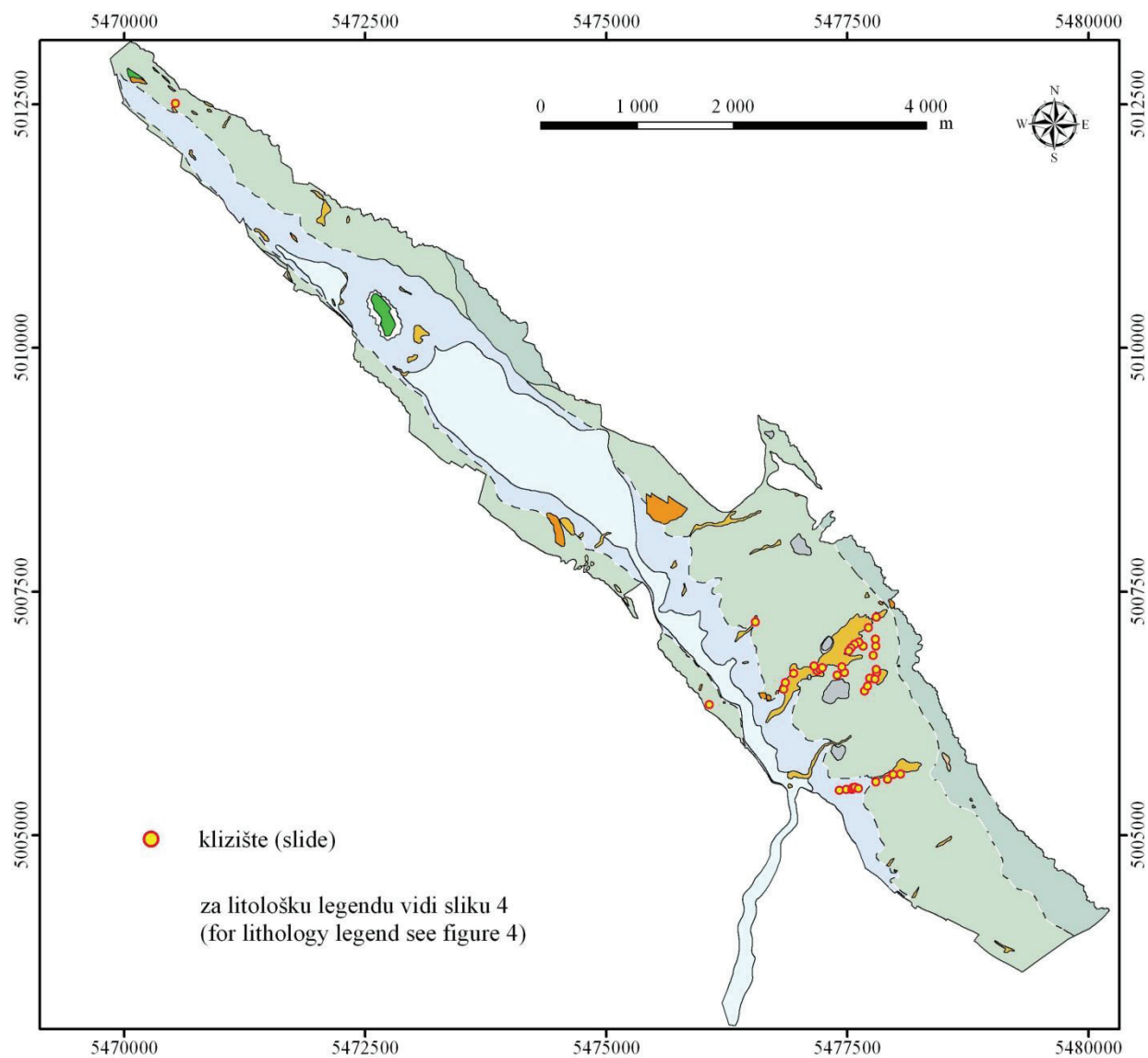


Slika 10. Raspodjela površine istraživanja po klasama nagiba padina.
Figure 10. Distribution of research area over slope dip angle classes.

Preklapanje litološke karte i poligona klizišta (slika 11) omogućava izračun težinskog faktora klizanja za svaku litološku jedinicu, odnosno procjenu koja jedinica se može okarakterizirati kao najznačajniji litološki faktor klizanja. Rezultati su prikazani u tablici 4, a izraz prema kojem su izračunati faktori je naveden u poglavlju "Metode istraživanja". Iz tablice je vidljivo da se klizišta nalaze u tri litološke jedinice i to u jedinici deluvij (Q_d), srednjeznasti padinski sediment (Q_{dpr2}) i fliš ($E_{2,3}$) koji ujedno ima i daleko najveći težinski faktor klizanja. Ostale litološke jedinice u sklopu kojih klizišta nisu otkrivena imaju isti težinski faktor koji iznosi -4,41.

Tablica 4. Težinski faktori klizanja litoloških jedinica u sklopu kojih su otkrivena klizišta na površini istraživanja od 18555523 m².
Table 4. Sliding weighting factors of lithological units in which slides are mapped within research area of 18555523 m².

litološka jedinica (lithological unit)	površina litološke jedinice (m ²) (lithological unit area (m ²))	površina klizanja u sklopu litološke jedinice (sliding area in lithological unit (m ²))	udio u ukupnoj površini klizanja (%) (share in total sliding area (%))	težinski faktor (weighting factor)
deluvij (Q _d) (diluvium (Q _d))	3870173	9321	11,4	-2
srednjezrnasti padinski sediment (Q _{dpr2}) (medium grained talus sediment (Q _{dpr2}))	9040605	46675	57	0,75
fliš (E _{2,3}) (flysch (E _{2,3}))	469386	25877	31,6	50,72



Slika 11. Lokacije klizišta na litološkoj karti originalnog mjerila 1:5000.
Figure 11. Slide locations on lithological map originally scaled 1:5000.

Diskusija

Klizišta u slivu rijeke Dubračine su kartirana terenskim geomorfološkim kartiranjem i vizualnom analizom digitalnog modela reljefa rezolucije 1 metar. Primjena stereoparova u tu svrhu nije dala rezultat. Ukupno je detektirano 39 klizišta, a rezultirajući inventar se može okarakterizirati kao povijesni (Guzzetti i dr., 2012). Povijesni inventari prikazuju klizišta koja su inicirana tijekom prošlosti, bez obzira na inicijatore i uvjete koji su uzrokovali pojavu klizanja i bez obzira da li su nastala prije deset, sto ili više godina.

Kontura svakog klizišta kartirana je iz digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m. Točnost konture kartirane terenskim metodama istraživanja mnogo je manja od one određene pomoću digitalnog modela reljefa visoke rezolucije jer se na terenu istraživač susreće s nekim objektivnim problemima kao što ih navode Guzzetti i dr. (2012): a) veličina klizišta često ne dopušta da klizište bude sagledano u potpunosti, b) točka s koje istraživač na terenu promatra klizište često je neodgovarajuća jer se ne mogu vidjeti svi dijelovi klizišta istom preciznošću (glavna pukotina, bočne granice, stopa itd.), c) stara klizišta su često prekrivena šumom, poremećena mlađim klizanjima, erozijom ili ljudskom aktivnošću. Osim navedenih, terensko kartiranje konture klizišta limitirano je i sljedećim mogućim ograničenjima: a) gusta vegetacija i nagib terena mogu onemogućiti pristup konturi klizišta, b) ručni GPS uređaji koji se na terenu najčešće koriste, u najboljem slučaju, daju poziciju istraživača sa točnošću od 5 do 7 metara, c) mogućnosti visoko sofisticiranih GPS uređaja koji se mogu spajati na hrvatski pozicionirani sustav (CROPOS), što omogućava pozicioniranje sa 1 metarskom točnošću, ne mogu se realizirati u šumi, već isključivo na čistini (Bernat i Mihalić, 2012, usmeno priopćenje).

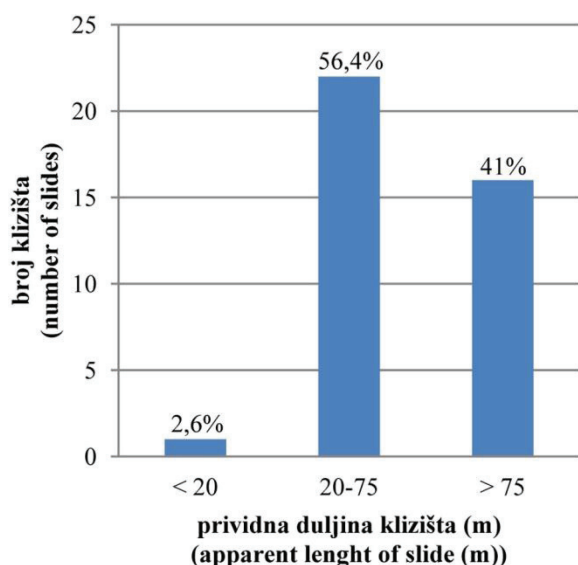
Analiza stereoparova s ciljem kartiranja klizišta na istraživanom području nije dala rezultat. Korišteni su snimci iz 2006. godine mjerila 1:20000 te iz 1975. mjerila 1:32000. Stereoparovi istraživanog područja mjerila 1:5000 iz 1971. godine tijekom ovog istraživanja nisu bili dostupni. Neučinkovitost upotrebe stereoparova može se objasniti sljedećim razlozima: a) snimci su napravljeni za vrijeme vegetacijskog perioda, a ne tijekom zimskih mjeseci kada je vegetacija prorijeđena, a koncentracija lišća na granama najmanja, b) neadekvatno mjerilo snimaka s obzirom na dimenzije klizišta na terenu. Guzzetti i dr. (2012) diskutiraju o ograničenjima upotrebe stereoparova gdje citiraju rezultate koje su publicirali Brardinoni i dr. (2003) te Korup (2005), a koji jasno navode da je na terenima prekrivenim šumom kartiranje klizišta vrlo teško, pogotovo ako je riječ o plitkim klizištima kao što je slučaj sa klizištima u slivu rijeke Dubračine. Kada govorimo o mjerilima stereoparova i dimenzijama klizišta na terenu koja se ovisno o tome na njima

prepoznaju odnosno ne prepoznaju, treba istaknuti korelaciju (tablica 5) koju su publicirali Sissakian i dr. (1983), a modificirali Soeters i van Westen (1996). S obzirom na mjerila koja su korištena u ovom istraživanju, iz tablice 5 referentnim se može smatrati stupac koji se odnosi na mjerilo stereopara 1:20000.

Tablica 5. Relativna primjenjivost stereoparova različitih mjerila za različite elemente u kartiranju nestabilnosti na padinama (Sissakian i dr., 1983), modificirano prema Soeters and van Westen (1996), 0-manje odgovarajuće, 1-ograničena upotreba, 2-korisno, 3-vrlo korisno.
Table 5. Relative suitability of different scales of aerial photographs for different elements in slope instability mapping (Sissakian et al., 1983), modified after Soeters and van Westen (1996), 0-less adequate, 1-limited use, 2-useful, 3-very useful.

predmet opažanja (subject)	veličina (m) (size (m))	mjerilo snimaka (photoscale)		
		1:20000	1:10000	1:5000
prepoznavanje pojave nestabilnosti (recognition of instability phenomena)	< 20	0	0	2
	20-75	0→1	1→2	3
	> 75	1→2	2	3
prepoznavanje stanja aktivnosti nestabilnog područja (recognition of activity of unstable areas)	< 20	0	0	1
	20-75	0	0→1	2
	> 75	1	1→2	3
prepoznavanje elemenata nestabilnosti (pukotine, stepeničasti oblici, depresije, itd.) (recognition of instability elements (cracks, steps, depressions, etc))	< 10	0	0	0
	10-75	0	0→1	1→2
	> 75	1	2	3

Na slici 12 su prikazane klase prividne duljine klizišta prema granicama iz tablice 5 i broj klizišta u svakoj klasi. Vidljivo je da za 59% klizišta koja imaju prividnu duljinu manju od 75 m autori navode kako je mjerilo 1:20000 manje odgovarajuće u kontekstu prepoznavanja elemenata nestabilnosti (s obzirom na tablicu 5, kontura se može smatrati elementom nestabilnosti), a za preostalih 41% koja imaju prividnu duljinu veću od 75 m isto mjerilo ima ograničenu upotrebu. Uzmemo li u obzir navedeno te vrlo bujnu vegetaciju u vrijeme snimanja terena, jasno je zašto primjena dostupnih stereoparova u svrhu kartiranja klizišta nije dala rezultat.

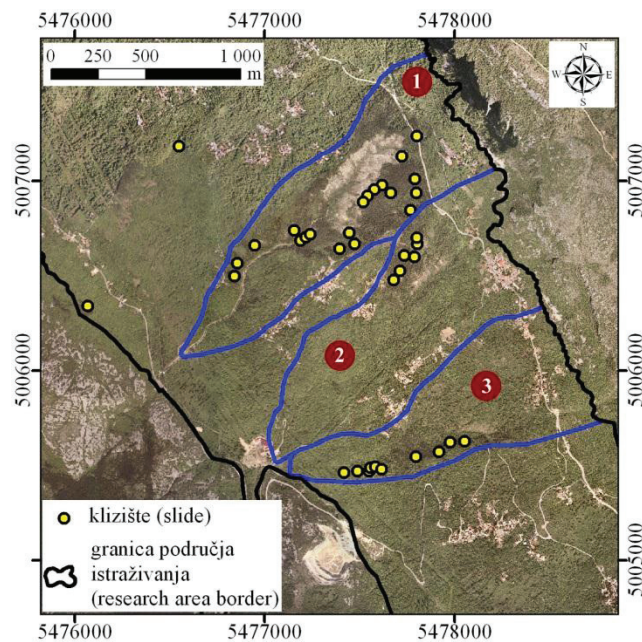


Slika 12. Broj klizišta u klasama prividne duljine klizišta prema tablici 5.

Figure 12. Number of slides over classes of apparent slide length according to table 5.

Kabinetskim radom uz pomoć digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m ukupno je određeno 19 poligona za koje se pretpostavljalo da se radi o klizištima. Terenskom verifikacijom potvrđeno je 16 poligona, a preostala 3 nisu bila određena kao klizišta. Radilo se o morfologiji terena vrlo sličnoj morfologiji klizišta, ali je ona bila uzrokovana erozijom u dva slučaja te ljudskom aktivnošću u trećem. Iz navedenog slijedi da je učinkovitost ove metode otkrivanja klizišta u ovom istraživanju bila 84%. Međutim, učinkovitost od 84% zahtjeva dodatnu diskusiju. Naime, prije nego što je model reljefa postao dostupan, terenskim radom otkriveno je 7 klizišta za koja više ne možemo znati da li bi bila prepoznata i na modelu reljefa jer je nakon spoznaje o lokaciji klizišta kabinetski rad pod velikom dozom sugestije. Kao što je rečeno, uz pomoć modela reljefa kartirano je 16 klizišta, a razlika od 16 klizišta do ukupno 39 koja se nalaze u inventaru je ponovno locirana terenskim geomorfološkim kartiranjem. Pitanje je zbog čega spomenuta klizišta nisu bila prepoznata na modelu reljefa? Na slici 13 se jasno vidi kako su klizišta grupirana na vrlo malom području u odnosu na ukupnu površinu istraživanja od 18,55 km². U sklopu slivova Slani Potok, Malenica i Kučina (podslivovi Dubračine, konture prema Rubinić i Ožanić, 2010) koji unutar područja istraživanja pokrivaju površinu od 2,57 km² nalazi se 36 od ukupno 39 otkrivenih klizišta. Terenskim radom je utvrđeno da se sva registrirana klizišta nalaze u tlu koje je primarno nastalo trošenjem fliša, a ne karbonata na što jasno upućuju žućkasta boja tla i izdanci, a zona trošenja fliša u slivu Slanog Potoka mineraloški je vrlo specifična. Mileusić i dr. (2004) su u njoj detektirali mineral tenardit (za sada jedini nalaz u sklopu Vanjskih Dinarida) koji je glavni faktor prekomjerne erozije u tom slivu (Aljinović i dr., 2010). Istraživanja o mogućoj prisutnosti tenardita i na drugim

područjima u sklopu sliva Dubračine su u tijeku, a pojave prekomjerne erozije i "cvjetanja soli" na izdancima u slivovima Malenice i Kučine nedvojbeno na to ukazuju, što znači da se područja sa pojavama klizanja i prekomjerne erozije u prostoru preklapaju. Sklonost prekomjernoj eroziji uzrok je što se analizom digitalnog modela reljefa mogu otkriti mnoge zone depresija, zone akumulacija i ožiljci na vrhovima padina što predstavlja identične elemente uz pomoć kojih se na modelu reljefa detektiraju i klizišta. Zbog toga nije bilo moguće jasno locirati sva klizišta na modelu reljefa bez terenskog rada. Kartirane su samo lokacije za koje se nedvojbeno moglo pretpostaviti da se radi o klizištima što je i potvrđeno učinkovitošću od 84%. Istraživanja su pokazala da se sva otkrivena klizišta nalaze u zoni trošenja fliša što može implicirati da su sva do sada utvrđena i publicirana svojstva fliša u sklopu istraživanog područja ili svojstva koja će biti utvrđena nekim budućim istraživanjima mogući faktori klizanja.



Slika 13. Prostorna distribucija klizišta u slivovima Slani Potok (1), Malenica (2) i Kučina (3) u sklopu kojih je otkriveno 36 od ukupno 39 klizišta. Navedeni slivovi su podslivovi Dubračine čije konture su odredili Rubinić i Ožanić (2010).

Figure 13. Spatial distribution of slides in the frame of Slani Potok, Malenica and Kučina basins where 36 of total 39 slides are mapped. These basins are subbasins of Dubračina basin which boundaries are published by Rubinić and Ožanić (2010).

Iz tablice 2 je vidljivo da se klizišta nalaze na nagibima padina u rasponu od 10,1° do 28,6°, a dijagram prikazan slikom 9 zorno prikazuje da se 76,7% površine od ukupne površine koja je zahvaćena klizanjem nalazi na nagibima do 20°. Budući da je smičuća komponenta gravitacije na padini veća što je padina strmija, bilo bi logično očekivati da se klizišta pojavljuju na većim nagibima terena, međutim istraživanja su pokazala suprotno. Navedeno se može objasniti na sljedeći način: a) padine s većim kutom nagiba imaju bolju prirodnu drenažu od padina s

manjim nagibom što u kombinaciji s većim površinskim otjecanjem padina s većim nagibom u odnosu na one s manjim znači manje perkolirajuće vode u potencijalnom kliznom tijelu, b) smičuća komponenta gravitacije i voda su dovoljni da u većini slučajeva na nagibima do 20° uzrokuju prekoračenje smičuće čvrstoće materijala u kojem se nalazi klizna ploha.

Iz rezultata u tablici 4 je očito da je u sklopu istraživanog područja fliš označen kao najznačajniji litološki faktor klizanja. Da li je tomu baš tako? Terenska istraživanja su pokazala da se sva klizišta nalaze tamo gdje se zona trošenja fliša nalazi na površini što znači da se nalaze u litološkoj jedinici koju bi mogli označiti kao eluvij kvartarne starosti, a koje na karti prikazanoj na slici 4 nema. Razlog izostanka eluvija je taj što je karta na slici 4 temeljna geološka karta, a one najčešće predstavljaju kartu "bedrock"-a. Navedeno zapravo svjedoči o nedostacima temeljnih geoloških karata kada se one koriste u inženjerske svrhe.

Zaključak

U sklopu sliva rijeke Dubračine određeno je područje istraživanja površine 18,55 km² izvan kojeg nema tala već teren izgrađuje isključivo stijenska masa i sipari, a sve u svrhu izrade prvog povijesnog inventara klizišta. Kartiranje klizišta obavljeno je terenskim radom i vizualnom analizom digitalnog modela reljefa rezolucije 1 m. Primjena dostupnih stereoparova u tu svrhu nije dala odgovarajuće rezultate zbog snimanja u vrijeme vrlo bujne vegetacije te neadekvatnog mjerila snimaka s obzirom na dimenzije klizišta. Ukupno je otkriveno 39 klizišta, 23 terenskim geomorfološkim kartiranjem i 16 analizom digitalnog modela reljefa koja su ujedno i terenski verificirana. Lokacije su predstavljene koordinatama karakteristične točke konture klizišta. Pokazalo se da je sklonost terena prekomjernoj eroziji izrazito ograničavajući faktor u primjeni digitalnog modela reljefa u svrhu daljinskog kartiranja klizišta. Ukupna površina zahvaćena klizanjem iznosi 81873 m² što predstavlja 0,44% površine istraživanja. Kontura klizišta, bez obzira na način na koji je klizište otkriveno, kartirana je iz digitalnog modela reljefa koji omogućava neusporedivo jednostavniju i mnogo točniju izradu konture u odnosu na izradu konture terenskim radom. Za svako klizište su izračunate ili izmjerene sljedeće značajke: a) površina, b) volumen, c) ukupna duljina, d) širina pokrenute mase, e) nagib terena na mjestu klizanja i f) azimut smjera klizanja. Površina klizišta u slivu je u rasponu od 150 m² do 12956 m², a volumen od 111 m³ do 65621 m³. Minimalna ukupna duljina klizišta od krune do dna iznosi 20, a maksimalna 226 m. Maksimalna širina pokrenute mase svih klizišta je u intervalu od 10 m do 82 m. Nagibi padina na kojima su klizišta otkrivena su u rasponu od 10,1° do 28,6° s naglaskom da se 76,7% površine od ukupne površine koja je zahvaćena klizanjem nalazi na nagibima do 20°, dok 62% klizišta

ima azimut smjera klizanja u rasponu 240° do 360°. Izračun težinskih faktora je litološku jedinicu fliš (E_{2,3}) označio kao najznačajniji litološki faktor klizanja. S obzirom da je svega 0,44% površine istraživanja zahvaćeno klizanjem, može se reći da materijali koji se nalaze na površini u slivu rijeke Dubračine nisu skloni klizanju. Ipak, ovo istraživanje jasno je pokazalo koji se dijelovi sliva povećanim brojem klizišta bitno razlikuju od ostatka sliva. Riječ je o slivovima potoka Slani Potok, Malenica i Kučina koji predstavljaju podslivove Dubračine. U sklopu navedenih podslivova koji unutar područja istraživanja pokrivaju 13,85% površine nalazi se 92,31% kartiranih klizišta.

Nakon izrade inventara, smjernice za buduća istraživanja u kontekstu zonacije terena s obzirom na hazard klizanja mogu se definirati kako slijedi: a) izrada karte gustoće klizišta, b) definiranje najznačajnijih faktora klizanja u slivu i izrada faktorskih karata, c) do-djeljivanje težinskih faktora svakom od selektiranih faktora klizanja, d) izrada karte osjetljivosti na klizanje sliva rijeke Dubračine.

Spomenuta karta osjetljivosti koja će biti napravljena u praksi je vrlo primijenjiva i trebala bi poslužiti kao podloga budućim prostornim planiranjima u svrhu izbjegavanja urbanizacije terena koji je izrazito sklon klizanju.

Zahvale

Istraživanja i rezultati prezentirani u radu izrađeni su u sklopu sljedećih znanstvenih projekata:

- bilateralni hrvatsko-japanski projekt "Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj" koji je financiran od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta te SATREPS programa japanske vlade,
- "CROTEC", projekt Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta (šifra projekta: 195-1951293-3155)
- "Dinarski krš: geološka evolucija, mineralne sirovine, paleotla i tla", projekt Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta (šifra projekta: 195-1953068-2704)

U financiranju istraživanja sudjelovali su i Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Institut IGH d.d. te Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu na čemu se autor najsrdačnije zahvaljuje.

Znanstveni suradnik Hrvatskog geološkog instituta Davor Pollak svojim primjedbama i sugestijama bitno je utjecao na poboljšanje kvalitete rada na čemu se autor ovim putem najsrdačnije zahvaljuje.

Literatura

- Agencija za zaštitu okoliša (2008): CORINE land cover Hrvatska. Karta pokrova zemljišta mjerila 1:100000 za 2006. godinu.
- Aljinović, D., Jurak, V., Mileusnić, M., Slovenec, D., Presečki, F. (2010): The origin and composition of flysch deposits as an

- attribute to the excessive erosion of the "Slani Potok" Valley ("Salty Creek"), Croatia. *Geologia Croatica*, 63/3, 313-322, Zagreb.
- Arbanas, Ž., Kyoji, S., Hideaki, M., Mihalić, S. (2012): Comprehensive monitoring system on the Grohovo Landslide, Croatia. In Eberhardt, E. et al. (editors): *Landslides and engineered slopes: Protecting society through improved understanding*. Proceedings of the 11th international and 2nd North American Symposium on landslides. Vancouver, CRC Press, pp. 1441-1447.
- Benac, Č. (2013): Rječnik pojmova u primijenjenoj geologiji i geološkom inženjerstvu. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 112 p.
- Blašković, I. (1983): O rasprostranjenosti i položaju pliocenskih i kvartarnih taložina u Vinodolu. *Geološki vjesnik*, 36, 27-35, Zagreb
- Blašković, I. (1999): Tectonics of part of the Vinodol walley within the model of the continental crust subduction. *Geologia Croatica*, 52/2, 153 – 189, Zagreb.
- Benac, Č., Mihalić, S., Vivoda, M. (2011): Geological and geomorphological conditions in the area of Rjecina and Dubracina river catchments (Primorsko-goranska county, Croatia). Arbanas et al. (editors): *Abstract proceedings of 1st project workshop on Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods in Croatia*, JICA, pp 22-24.
- Brardinoni, F., Slaymaker, O., Hassan, M.A. (2003): Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphology*, 54 (3–4), pp. 179–196.
- Brunsdon, D. (1985): Landslide types, mechanisms, recognition, identification. In: Morgan, C.S. (Ed.), *Landslides in the South Wales Coalfield*, Proceedings Symposium. The Polytechnic of Wales, pp. 19-28.
- Brunsdon, D.(1993): Mass movements; the research frontier and beyond: a geomorphological approach. *Geomorphology* 7, 85–128, Amsterdam.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. (1992): Uncertainty in assessing landslide hazard risk, *ITC Journal*, 2, 172-183, Twente.
- Carrara, A. (1993): Uncertainty in evaluating landslide hazard and risk. In Nemeč et al. (eds): *Prediction and Perception of Natural Hazards*, 101-109. Kluwer Academic Publishers. Printed in Netherlands.
- Cevik, E., Topal, T. (2003): GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek, (Turkey). *Environmental geology*, 44, 949-962, New York.
- Cruden, D.M. (1991): A simple definition of landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering geology*, 43, 27-29, Heidelberg.
- Državni hidrometeorološki zavod (2011): Karta srednje godišnje količine oborine za razdoblje 1981-2010 za područje sliva Dubračine, neobjavljeno.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. (2008): Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use and planning. *Engineering Geology*, 102, 85-98, Amsterdam.
- Grimani, I., Šušnjar, M., Bukovac, J., Milan, A., Nikler, L., Crnolatac, I., Šikić, D., Blašković, I. (1973): Tumač Osnovne geološke karte, M 1: 100 000, list Crikvenica (L 33-102), Savezni geološki zavod, 42 str., Beograd.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Reichenbach, P., Rossi, M. (2008): Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 96, 105-122, Amsterdam.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T. (2012): Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112, 42-66, Amsterdam
- Haugerud, R., Harding, D.J., Johnson, S.Y., Harless, J.L., Weaver, C.S., Sherrod, B.L. (2003): High-resolution topography of the Puget Lowland, Washington-A bonanza for earth science. *GSA Today*, 13, 4-10, Boulder.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008): *The landslide handbook – A guide to understanding landslides*: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Hrvatski geološki institut (2007a): Geološka karta sliva rijeke Dubračine mjerila 1:25000, ljubaznošću Hrvatskih voda.
- Hrvatski geološki institut (2007b): Geološka karta središnjeg dijela sliva rijeke Dubračine mjerila 1:5000, ljubaznošću Hrvatskih voda.
- Hrvatski geološki institut (2007c): Geološko-tektonska osnova za studij pojačane erozije u slivu Dubračine, ljubaznošću Hrvatskih voda.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R. Pedrazzini, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61, 5-28, New York
- Jurak, V., Kovačić, D., Garašić, M. (1995): Procjena seizmičke stabilnosti nekih blokovskih paleoklizišta. U Vlahović i dr. (urednici). 1. Hrvatski geološki kongres, Zbornik radova, Opatija, pp. 269-274.
- Jurak, V., Slovenec, D., Mileusnić, M. (2005): Pretjerana erozija fliša – Slani Potok – Vodič ekskurzija, 3. Hrvatski geološki kongres, Zagreb, pp. 51-55.
- Korup, O. (2005): Geomorphic imprint of landslides on alpine river systems, southwest New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 783–800, Hoboken.
- Mihalić, S., Hideaki, M., Osamu, N. (2011): Landslide inventory in the area of the City of Zagreb: Evaluation of effectiveness of using topographic derivative maps. In Catani et al. (editors): *The second world landslide forum*, abstract book, 3-9 October, FAO, Rome, Italy, ISPRA, pp. 124-125.
- Mihalić, S., Arbanas, Ž. (2013): The Croatian–Japanese Joint Research Project on Landslides: Activities and Public Benefits, In Sassa et al. (editors): *Landslides: Global Risk Preparedness*, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 335-352.
- Miller, S., Harris, N., Williams, L., Bhalai, S. (2007): Landslide susceptibility assessment for St. Thomas, Jamaica using Geographical information system and remote sensing methods. In Teeuw, R., M. (editor): *Mapping hazardous terrain using remote sensing*. Geological society, London, Special publications, 283, 77-91.
- Mileusnić, M., Slovenec, D., Jurak, V. (2004): Thenardite-effluorescence indicating cause of the excessive flysch erosion, Slani Potok, Croatia. *Acta Mineralogica-petrographica*, Abstract Series, Szeged, pp. 75-75.
- Ožanić, N., Šušanj, I., Ružić, I., Žic, E., Dragičević, N. (2011): Monitoring and analyses for the working group II (WG2) in Rijeka area in Croatian-Japanese project. Ožanić et al. (editors): *Book of proceedings of 2nd project workshop on Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods*, University of Rijeka, pp. 86-91.
- Podolszki, L., Ferić, P., Miyagi, T., Yagi, H., Eisaku, H., Mihalić, S. (2012): Aerial photo interpretation of landslides for the purpose of landslide inventory mapping in the area of the City of Zagreb. In Ožanić et al. (editors): *Book of proceedings of 2nd project workshop on Risk identification and land-use planning for disaster mitigation of landslides and floods*, University of Rijeka, pp. 126-130.
- Pollak, D., Buljan, R., Toševski, A. (2010): Inženjerskogeološke i geotehničke značajke naslaga fliša u području Kaštela. *Gravevinar*, 62/8, 707-715, Zagreb.
- Razak, K.A., Straatsma, M.W., van Westen, C.J. Malet, J.P., de Jong, S.M. (2011): Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. *Geomorphology*, 126, 186-200, Amsterdam.
- Rib, H.T., Liang, T. (1978): Recognition and identification. In: R.L. Schuster, R.J. Krizek (eds). *Landslides Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Science, Washington, pp. 34-80.
- Rubinić, A., Ožanić, N. (2010): Hidrologija sliva Dubračine. Zbornik radova Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, XIII, 33-68.
- Shultz, W.H. (2004): *Landslides Mapped using LiDAR Imagery*, Seattle, Washington. US Geological Survey Open-File Report 2004-1396.
- Shultz, W.H. (2007): Landslide susceptibility revealed by LiDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89, 67-87, Amsterdam.

- Sissakian, V., Soeters, R., Rengers, N. (1983): Engineering geological mapping from aerial photographs: The influence of photoscale on map quality and the use of stereo-orthophotographs. *ITC journal*, 2, 109-118, Twente.
- Soeters, R., van Westen, C.J. (1996): Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds) *Landslides – investigation and mitigation. Special report 247*. Transportation Research Board, Washington, pp 129-177.
- Šestanović, S. (2001): *Osnove geologije i petrografije*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 234 str.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. (1961): *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Springer, Heidelberg, 431 p.
- Van Westen, C.J. (1993): Application of geographic information systems to landslide hazard zonation, volume 1: Theory. International institute for aerospace survey and earth science (ITC). Enschede, Netherlands, 245 p.
- WP/WLI (1993): *Multilingual landslide glossary*. Bitech Publishers Ltd, Richmond, British Columbia, Canada, 59 p.
- Yalcin, A. (2008): GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1-12, Amsterdam.

SLIDE INVENTORY IN DUBRACINA RIVER BASIN

In this paper are presented results of slide inventory preparation in Dubračina river basin. Research area in the frame of the basin is shown in figure 1. According to geological map scaled 1:25000 (Croatian geological survey, 2007a, with kindness of Croatian Waters) outside of the research area there are no soils. Terrain is built of limestone rock mass, intercalations of limestones and marls, breccias and talus material.

According to lithological map scaled 1:5000 (Croatian geological survey, 2007b, with kindness of Croatian Waters) research area is built of carbonate and clastic sediments. Carbonate sediments are represented with upper Cretaceous and Eocene limestones. Clastic sediments are represented with breccias of Paleogene and Quaternary age, Eocene flysch, Pliocene clays and unlithified quaternary sediments. Lithological unit made of limestones and marls intercalations is represented as transitional sediments. Spatial distribution of mentioned lithological units can be seen in figure 4.

Slide inventory maps are produced using conventional methods and new innovative techniques (Guzzetti et al., 2012). Conventional methods used to prepare slide maps include geomorphological field mapping (Brunsden, 1985) and visual interpretation of stereoscopic aerial photographs (Rib and Liang, 1978; Brunsden, 1993). New innovative techniques can be grouped in three main categories (Guzzetti et al., 2012): a) analysis of surface morphology using high resolution digital elevation models, b) interpretation and analysis of satellite images and c) use of new tools to facilitate field mapping. In Dubračina river basin for slide inventory preparation are used geomorphological field mapping, interpretation of stereoscopic aerial photographs and analysis of surface morphology using 1 m digital elevation model from end of March 2012.

Prepared inventory consist of 39 slides. With geomorphological field mapping 23 slides are discovered and 16 more using digital elevation model

which are also verified on the field. For this research two generation of aerial photographs were available. One scaled 1:20000 is from year 2006 and another one scaled 1:32000 is from year 1975. Both generations were useless for slide mapping, none slide was discovered using stereoscopic analysis.

In the frame of research area of 18,55 km² total sliding area is 81873 m² which gives density of 0,44%. To every slide its ID is assigned in the range from 1 to 39. Spatial distribution of slides represented with polygons centroid points can be seen in figure 7 and coordinates of points in MGI Balkans 5 coordinate system in table 1. Regardless is it discovered with field work or remote sensing, outline of every slide is mapped from digital elevation model. The following characteristics are calculated for every slide: a) area, b) volume, c) total length, d) width of displaced mass, e) dip angle of slope on sliding location and f) azimuth of sliding direction (table 2).

Dip angle of slope on sliding location can be calculated as follows: a) apparent length of slide is measured in GIS (length on ground plan), b) from 1 m spaced contours can be measured elevation difference between crown and tip of slide, c) with data obtained from a) and b) two legs can be designed and hypotenuse is total length of slide from table 2. Angle between hypotenuse and horizontal is actually dip angle of slope on sliding location. Result of this calculation for all slides in the basin can be seen in figure 9.

Inefficiency of using aerial photographs can be explained as follows: a) photographs are not prepared during winter time when vegetation is rarefied and concentration of leaves is on its minimum and b) inadequately photo scale according to slide dimension on the field. Guzzetti et al. (2012) discussed about limitations of using aerial photographs where they cited results published by Brardinoni et al. (2003) and Korup (2005). They have clearly pointed that forested terrain makes it difficult to map slides, specifically shallow slides like those in Dubračina river basin.

According to results shown in figure 9, 76,7% of total sliding area can be found on slope dips up to 20°. Since shear component of gravity force is bigger on slopes with bigger dips, it was logically to expect sliding processes on slopes with bigger dips than 20° but the research work did not confirmed that. It can be explained as follows: A) slopes with bigger dips have more efficient natural drainage than slopes with smaller dips. Slopes with bigger dips also have bigger surface runoff comparing to slopes with smaller dips. Both will reduce amount of percolating water in potential sliding bodies on slopes with bigger dips comparing to potential sliding bodies on slopes with smaller dips; B) in most cases on slopes with dips up to 20° shear component of gravity force and porewater content are enough to exceed soil strength parameters where sliding take place.

Before digital elevation model has became available, 7 slides are mapped using geomorphological field

mapping. Analysis of surface morphology using 1 m digital elevation model yielded 16 slides more. Difference of 16 slides up to total 39 slides in the research area is mapped using geomorphological field mapping again. The question is why those slides are not recognized on digital elevation model? Answer is as follows. Most of slides in Dubračina river basin can be found on parts of research area which are prone to excessive erosion caused by thenardite crystallization (Aljinović et al., 2010). Excessive erosion is main cause why researcher can recognize many zones of depletion, many zones of accumulation and scarps on digital elevation model which are the same elements for slides recognition. Because of that it was not possible to clearly map all slides without field work.

According to results presented in table 4, the most important lithological factor of sliding is unit named as

flysch ($E_{2,3}$), but is it so? Field work discovered that all slides can be found where flysch weathering zone crop out which means that slides are mapped in the unit which can be described as eluvium of quaternary age but this unit cannot be found in figure 4. Because map presented in figure 4 is fundamental geological map which means in the most cases that only bedrock is mapped. This is actually pointing on problems when fundamental geological maps are applied in engineering case studies.

After inventory is finished, following research work can be defined: a) production of slide density map, b) defining most significant sliding factors in the basin and production of factors map, c) calculation of weighting factors for each selected sliding factor and d) production of slide susceptibility map.