Padinski procesi na obalnom klifu - uzroci i posljedice

Đonlić, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:963035

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Iva Đonlić

PADINSKI PROCESI NA OBALNOM KLIFU - UZROCI I POSLJEDICE

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Iva Đonlić

PADINSKI PROCESI NA OBALNOM KLIFU - UZROCI I POSLJEDICE

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistra geologije

Mentor:
doc. dr. sc. Kristina Pikelj

Zagreb, 2021.

Zahvale

Ovim putem željela bih se zahvaliti mentorici doc. dr. sc. Kristini Pikelj na ponuđenoj temi i pruženoj prilici da pod njenim vodstvom izradim diplomski rad. Također bih se htjela zahvaliti za njezin uložen trud pri savladavanju svih prepreka na koje smo naišle, za pristupačnost, razumijevanje, te niz korisnih savjeta i konstruktivnih komentara ne samo pri pisanju rada nego i tokom obrazovanja koje mu je prethodilo.

Htjela bih se zahvaliti Robertu Košćalu na izrađenoj geološkoj karti grada Splita i okolice koja je priložena u radu.

Veliko hvala mojoj obitelji i Dominiku, koji su mi svojim primjerom i podrškom bili konstantna motivacija za napredak i usavršavanje mojih znanja i sposobnosti. Posebno bih htjela zahvaliti svojim roditeljima na omogućenoj prilici za studiranje, te nepresušnim savjetima, kritikama i potpori u svim izazovima koji su bili predamnom.

Veliko hvala svim mojim kolegama i prijateljima koji su mi obogatili i uljepšali ovaj period studiranja.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

PADINSKI PROCESI NA OBALNOM KLIFU - UZROCI I POSLJEDICE

Iva Đonlić

Rad je izrađen u: Geološko-paleontološki zavod, Geološki odsjek, PMF, Horvatovac 102a, Zagreb**,** u sklopu diplomskog studija Geologija zaštite okoliša

Sažetak:

Predmet istraživanja ovog diplomskog rada je obalni klif Duilovo koji je formiran u eocenskom flišu, a nalazi se u urbanoj zoni grada Splita. U proteklih jedanaest godina (2012.-2021.), prikupljane su fotografije te je 2018. obavljeno snimanje dijela klifa nakon odrona, nakon čega su metodom SfM fotogrametrije izrađeni digitalni modeli površine, kako bi se utvrdili prisutni padinski procesi, njihovi uzroci i posljedice. Analizom slika uočeno je dominantno mehaničko trošenje lapora uzrokovano procesima vlaženja i sušenja (*slaking*), površinskog otjecanja (spiranje i brazdanje) i procjeđivanja (*sapping*). Ovi površinski procesi trošenja u kombinaciji sa periodima intenzivnih padalina dovode do masovnog kretanja materijala na padini, tj. pojave odrona i klizišta. Proces osipavanja je inicijalno uzrokovan procesom *slakinga*, a trošeni materijal premješta se gravitacijski i u bazi klifa formira konusna tijela koja su periodički erodirana valovima. Analizom modela razlike (DoD) za područje odrona i slika osipavanja zapažena je direktna ugroza infrastrukture i objekata na rubnim dijelovima vrha klifa, te potencijalna opasnost za kupače na plaži u njegovom podnožju.

Ključne riječi: obalni klif, padinski procesi, fliš, trošenje

Rad sadrži: 65+V stranica, 51 slika i 83 literaturnih navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica Geološkog odsjeka PMF-a, Horvatovac 102a, 10000 Zagreb

Mentor: Doc. dr. sc. Kristina Pikelj, PMF, Zagreb

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Marijan Kovačić, PMF, Zagreb
Doc. dr. sc. Katarina Gobo, PMF, Zagreb

Datum završnog ispita: 14. 06. 2021.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Graduate Thesis

SLOPE PROCESSES ON COASTAL CLIFF - CAUSES AND CONSEQUENCES

Iva Đonlić

Thesis completed in: Division of Geology and Paleontology, Geology Department, Faculty of Science, Horvatovac 102a, Zagreb where the work on the thesis was carried out in the context of the graduate study of Environmental geology

Abstract:

The subject of research carried out for this thesis is the coastal cliff Duilovo, which was formed in the Eocene flysch, and is located in the urban zone of the city of Split. In the past eleven years (2012-2021), photographs were collected and in 2018 a partof the cliff was surveyed after the landslide, after which digital surface models were made by SfM photogrammetry. Models were then used to determine the present slope processes, their causes and consequences. Image analysis showed that dominant weathering of marl is caused by the processes of wetting and drying (slaking), surface runoff (sheet wash and rilling) and seepage (sapping). These weathering processes, in combination with periods of intense rainfall lead to mass movement of material on the slope, ie rockfalls and landslides. Surface disintegration is initially caused by the slacking process. Weathered material which is produced moves gravitationally and forms talus cones at the base of the cliff that are periodically eroded by waves. The analysis of the difference model (DoD) for the landslide area and repeat photography images indicate that slope processes pose a direct threat to the infrastructure and facilities at the edge of the clifftop and are a potential danger for swimmers on the beach at its base.

Keywords: coastal cliff, slope processes, flysch, weathering

Thesis contains: 65+V pages, 51 figures and 83 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Library of Geology, Department of Geology, Faculty of Science

Supervisor: Kristina Pikelj, Ph.D. Assistant Professor, PMF, Zagreb

Reviewers: Marijan Kovačić, Ph.D. Full Professor, PMF, Zagreb

Katarina Gobo, Ph.D. Assistant professor, PMF, Zagreb

Date of the final exam: June 14th, 2021.

Sadržaj

1. Uvod ... 1
2. Obalni klifovi ... 3
3. Padinski procesi ... 4
3.1. Padinski procesi na obalnim klifovima ... 4
3.1.1. Kretanje masa na obalnim klifovima - klizišta i odroni ... 5
3.1.2. Utjecaj prirodnih čimbenika na povlačenje obalnih klifova ... 6
4. Pregled metoda istraživanja obalnih klifova ... 9
4.1. Terestrička i zračna fotogrametrija (TPG; APG) ... 11
4.1.1. Terestrička fotogrametrija (TPG) ... 12
4.1.2. Zračna fotogrametrija (APG) ... 12
4.2. Terestričko i zračno lasersko skeniranje (TLS; ALS) ... 13
4.2.1. Terestričko lasersko skeniranje (TLS) ... 13
4.2.2. Zračno lasersko skeniranje ... 13
4.3. Ponovljeno fotografiranje ... 14
5. Geografske, geološke i geomorfološke karakteristike istraživanog područja ... 15
5.1. Geološki razvoj istočne jadranske obale ... 15
5.2. Karakteristike istraživanog područja ... 17
5.2.1. Geografska obilježja grada Splita i okolice ... 17
5.2.2. Geološka građa i geomorfološka obilježja grada Splita i okolice ... 18
5.2.3. Geološke karakteristike klifa Duilovo ... 21
6. Metode istraživanja ... 22
6.1. Terenski rad ... 22
6.2. Agisoft Photoscan ... 23
6.3. GoldenSoftware Surfer ... 26
7. Rezultati i rasprava ... 27

7.1. Promjena morfologije i volumena klifa (SfM fotogrametrija) 27

7.2. Promjene na licu klifa na temelju metode ponovljene fotografije..... 33

7.2.1. Procesi trošenja 33

7.2.2. Procesi transporta..... 39

8. Zaključak 56

9. Literatura..... 58

1. Uvod

Obala, prema svojoj općoj definiciji, predstavlja granični dio između kopna i mora (DOLAN i sur., 1991). Prema definicijama u geologiji, obala je čvrsta podloga koja je pod morem za vrijeme plime, a na suhom za vrijeme oseke. Predstavlja vrlo dinamičan i promjenjiv okoliš koji je pod utjecajem brojnih fizičkih, kemijskih i bioloških procesa. Obalna zona je širi prostor od obale i uključuje dijelove kopna i mora koji su pod međusobnim utjecajem (CROSSLAND i sur., 2005). Obalna zona je mjesto različitih morfoloških promjena koje se najviše očituju u vidu akumulacije i erozije materijala. Obalna erozija je proces kontinuiranog odnošenja materijala s obalnog profila zbog neravnoteže u njegovom donosu i odnosu u nekom obalnom području. Rezultat je ispreplitanja niza čimbenika - prirodnih i antropogenih - koji djeluju u različitim razmjerima, s različitim intenzitetima i na različitim vremenskim skalama. U prirodne čimbenike ubrajaju se i djelovanje jakih vjetrova i visokih valova, djelovanje visoke plime i duž-obalnih struja, te padinskih procesa na različite podloge, što rezultira povlačenjem obale i gubitkom zemljišta. Stopa erozije izražava se u volumenu materijala po duljini obale u vremenskoj jedinici, npr. u m^3/m/godini, ali se često upotrebljava u korelaciji s povlačenjem obalne linije, te se tako izražava u m/godini (MARCHAND, 2010). Antropogeni čimbenici erozije obale uključuju: obalni inženjering, urbanizaciju, radove na regulaciji riječnih tokova (primjerice izgradnja brana), jaružanje, uklanjanje vegetacije, crpljenje vode, plina i sl. (EUROSION, 2004).

Obalni klifovi predstavljaju strmo nagnutu padinu gdje je povišeno kopno u kontaktu s obalnom linijom (HAMPTON i GRIGGS, 2004). Obalni klifovi važni su geomorfološki oblici, jer je njihovom erozijom omogućen donos sedimenta na plaže (abrazijske terase) koje se nalaze u njihovom dnu. Nadalje, klifovi i njima pripadajuće plaže pružaju stanište biljkama i životinjama, te su s antropogenog gledišta smatrani popularnim i atraktivnim područjima za gradnju privatnih objekata. Važnost proučavanja klifova također leži u opasnostima koje predstavljaju obalnim biljnim i životinjskim zajednicama, te infrastrukturi i građevinama. Do nedavno se smatralo da obalni klifovi čine 93% obala priznatih neovisnih obalnih država i nesamostalnih obalnih regija širom svijeta. Na temelju globalnog kartiranja visoke rezolucije i podataka iz literature u novije vrijeme objavljeno je da klifovi čine oko 52% svjetskih obala (YOUNG i CARILLI, 2019).

Obalni klifovi su po svojim morfološkim značajkama padine. Padinski procesi u obalnom području obuhvaćaju širok spektar interakcija između kopna i mora. Povlačenje ili erozija

obalnih klifova dijelom je rezultat padinskih procesa koji se prostorno i vremenski razlikuju. Utjecajem prirodnih morskih i kopnenih, kao i antropogenih procesa stvara se dinamično i složeno okruženje, što dovodi do morfoloških promjena kako se obala prilagođava i povlači (GREENWOOD i ORFORD, 2007).

Osnovni cilj ovog diplomskog rada bio je definirati dominantne padinske procese i prepoznati njihove uzroke na primjeru obalnog klifa Duilovo razvijenom u flišu na području grada Splita. Padinski procesi prepoznat će se na temelju usporedbe 3D modela dobivenih digitalnom fotogrametrijom uz pomoć programa Agisoft Photoscan i Surfer (GoldenSoftware), te povezivanjem litoloških karakteristika klifa i meteoroloških uvjeta za vrijeme perioda praćenja klifa. Osim toga, metodom ponovljene fotografije nastojat će se kroz dulji vremenski period prepoznati glavne padinske procese na proučenom klifu, oblike nastale uslijed njih, te će se nastojati definirati razlozi njihovog pojavljivanja i oblikovanja. Obzirom na specifičnost teme i odabrane metodologije korištene pri izradi ovog diplomskog rada Rezultati i Rasprava su u dogovoru s mentoricom prikazani kao jedno poglavlje.

2. Obalni klifovi

Obalni klifovi su geomorfološki oblici na obalama čije je oblikovanje povezano s geološkom strukturom i tipovima stijena od kojih su građeni, a nastaju uslijed djelovanja valova na osnovnu stijenu, podložnosti mehaničkom trošenju na zraku te uslijed kombinacije djelovanja tektonskih pokreta i promjene razine mora. Na izgled i karakteristike njihovih profila utječu: tvrdoća i otpornost stijena, prisustvo i vrste diskontinuiteta (pr. uslojenost i smjer nagiba slojeva, rasjedi, pukotine,..), vrsta i količina materijala na abrazijskoj i akumulacijskoj terasi, topografija zaleđa, izloženost valnom djelovanju i drugim obalnim procesima. Poput svih svjetskih reljefnih oblika, obalni klifovi svakodnevno prolaze kroz procese preoblikovanja zbog kojih tijekom vremena mijenjaju oblik i položaj. Kao posljedica, dolazi do njihovog povlačenja koje može biti sporo i kontinuirano, ali je često brzo i epizodno (FURLANI i sur., URL 1).

Obalni klifovi mogu se naći u stijenama vrlo različitih litologija koje variraju od vrlo tvrdih kvarcita, magmatskih i metamorfnih stijena, preko umjereno tvrdih škriljavaca i pješčenjaka do mekših vapnenaca i najmekših muljnjaka kao što su šejlovi i glinci (CLAYTON i SHAMOON, 1998). Obalne klifove je moguće podijeliti na temelju njihova nastanka. Najjednostavniji klifovi nastaju na područjima gdje djelovanjem morske vode dolazi do potkopavanja baze klifa i time postepene erozije kopna. Uklanjanjem materijala stvara se strma padina koja može biti vertikalna, pa čak i nadvisivati bazu klifa. Prosječna visina klifova je u rasponu od nekoliko metara pa sve do 500 m, te se takvi oblici nazivaju megaklifovi (BIRD, 2016). Tipični nagib padine klifa kreće se od oko 40° do 90°, ali u mekim sedimentnim stijenama poput muljnjaka on može biti puno blaži, čak i 20°. Ovisno o geološkoj/tektonskoj građi obale, klifovi mogu nastati izdizanjem kopna duž rasjeda ili monokline (BIRD, 2016). Klifovi nastali na rasjednim plohama su česta pojava (pr. na južnoj strani hrvatskih otoka, pr. Kornatsko otočje, Dugi Otok), te se nazivaju strmcima, a nastaju dislokacijom duž rasjednih ravnina bez prisustva abrazijskih i akumulacijskih terasa (PIKELJ i JURAČIĆ, 2013). Osim na rasjednim plohama obalni klifovi mogu započeti svoj razvoj kao ostatci klizišta ili ledenjačkom erozijom (KERSHAW i GUO, 2001; HAMPTON i GRIGGS, 2004). Obalni klifovi također mogu nastati kao rezultat vulkanske erupcije, poput primjera na otocima Santorini u Egejskom moru, Ustica u Tirenskom moru ili Krakatau u Indoneziji (FURLANI i sur., URL 1).

3. Padinski procesi

Padinski procesi predstavljaju skup procesa pokrenutih uslijed kombinacije nestabilne padine i nekog inicijatora. Odvijaju se pod utjecajem gravitacije, a povećanjem nagiba padine raste mogućnost kretanja objekata na njoj. Na transport i taloženje materijala te morfologiju padine utječe niz procesa koji uključuju mehaničku, kemijsku i biološku eroziju. Zajednički naziv za sve destruktivne procese koji se odvijaju na padinama je derazija (CURIĆ i CURIĆ, 1999). Padinski procesi se obzirom na tip kretanja matrijala mogu podijeliti u tri skupine: gravitacijski pokreti ili kretanje masa (eng. *mass movement*), procesi puzanja i tečenja zemljišta te procesi spiranja, brazdanja i jaružanja. Padinski procesi važan su dio erozije, jer prenose materijal od mjesta nastanka (trošenja) na topografski višem, do mjesta taloženja u topografski nižem položaju. Uzroci padinskih procesa mogu biti: deforestacija i uklanjanje vegetacije, promjena hidroloških uvjeta, potkopavanje padine (prirodno i umjetno), klimatološki faktori, opterećenje vršnog dijela padine, smanjenje čvrstoće stijena uslijed trošenja, vibracije (prirodne, npr. potresi ili umjetne, npr. promet), vulkanske erupcije te utjecaj organizama itd.

3.1. Padinski procesi na obalnim klifovima

Primarni uzrok povlačenja i degradacije obalnih klifova je erozija uzrokovana djelovanjem valova (abrazija), no uz to djeluje još niz drugih procesa. Potkopavanje baze klifa pod utjecajem valova može dovesti do odronjavanja materijala s fronte klifa, a na nestabilnost klifa također utječu i drugi čimbenici, primjerice oborine, djelovanje vjetra, morsko prskanje, periodično vlaženje i sušenje, smrzavanje te odmrzavanje, širenje i skupljanje površine stijene, otapanje topljivih stijena te učinci flore i faune (Slika 1). Neizostavan faktor je i ljudski utjecaj koji uključuje obalno rudarstvo i vađenje kamena, urbanizacija (izgradnja zgrada, cesta i drugih građevina), odlaganje otpada, eksplozije i slično.

3.1.1. Kretanje masa na obalnim klifovima - klizišta i odroni

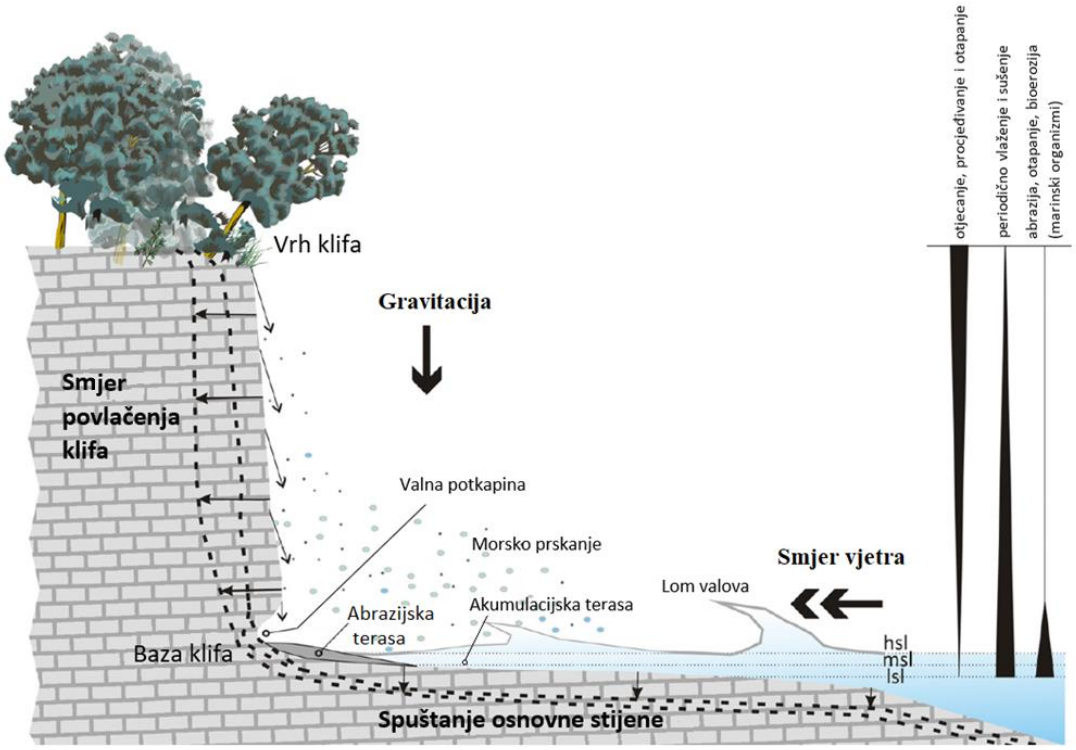
Kretanje masa je gravitacijsko kretanje stijena, kore trošenja i tla niz padinu, koje ne mora nužno biti pod utjecajem vode ili leda (SELBY, 1993). Kretanje masa može se kategorizirati na temelju materijala (blato, tlo, stijene ili stjenski detritus). Utjecaj vode ili leda može dovesti do plastičnog ili likvidnog kretanja tla (VARNES, 1978). Prema tipu kretanja materijala Brunsden i Prior (1984) u kretanje masa svrstavaju: odrone i prevrtanje, translacijska klizišta (kretanje materijala niz ravnu padinu prema moru), rotacijska klizišta (kretanje materijala niz zakrivljenu padinu), klizišta u blatu (nepravilno kretanje koherentne muljevite ili pjeskovite gline niz padinu) i muljne tokove (kretanje tečnog, sitno-zrnatog sedimenta niz padinu).

Najčešći oblik i česti sinonom za kretanje masa su klizišta. Klizišta se najčešće javljaju u planinskim područjima, ali su moguća na bilo kojem području s dovoljno materijala za stvaranje gravitacijskog naprezanja i gibanja (GUERRA i sur., 2017). Obalna klizišta definiraju se kao područja masovnog trošenja i kretanja velike količine materijala niz padinu, a javljaju se na erodiranim ili strukturno oslabljenim izdancima stijena ili nekonsolidiranog sedimenta na strmim obalama ili klifovima. Nestabilnost padine i pojava klizišta mogu se javiti kao posljedica slabljenja stjenskih masa gdje je nestabilnost padine uzrokovana deformacijom materijala ili prisutnošću diskontinuiteta (npr. rasjedi ili prisutnost otpornije vrste stijene koja prekriva mekšu, manje otpornu vrstu stijene) (STEAD i sur., 2006; YOUSSEF i sur., 2009). Nestabilnost padine raste povećanjem posmičnog naprezanja i smanjenjem posmične čvrstoće stijene (BIRD, 2016).

Odroni se mogu definirati kao pojava otkidanja dijelova stijena, rjeđe tla, koje se zbiva gotovo trenutno. Mehaničko trošenje stijena (popraćeno širenjem pukotina i/ili ispiranjem materijala između stjenki pukotina) ubrzava ispadanje: od sitnih odlomaka stijena sve do stjenske lavine (BENAC, 2016). Na nepravilnim pukotinama na rubovima klifa zbog odronjavanja nestabilnih krhotina često dolazi do povlačenja vrha klifa. Prema Lee i sur. (2001) povezanost čimbenika koji djeluju na područje nekog klifa prije padinskih procesa i čimbenika koji ih pokreću je indikacija da uzastopna pojava klizišta na nekom području nije neovisna i pruža povratne informacije između uzorka i procesa.

3.1.2. Utjecaj prirodnih čimbenika na povlačenje obalnih klifova

Većina danas prisutnih obalnih klifova nastala je uglavnom marinskom erozijom obale tijekom holocena, a uzrok je morska transgresija krajem pleistocena, za vrijeme koje je globalna morska razina otprilike dosegla današnju razinu (BIRD, 2016). Marinska erozija je proces koji uključuje mehaničko i kemijsko razaranje sedimenata i stijena na obali hidrodinamičkim djelovanjem valova i struja (abrazija), struganjem pokrenutog materijala (korazija), kemijskim djelovanjem vode (korozija) i djelovanjem organizama (bioerozija) (Slika 1).



Slika 1. Prikaz procesa koji utječu na povlačenje i eroziju klifova (prema FURLANI i sur., URL 1)

Marinska erozija uvjetovana je visinom i učestalošću valova, vrstom i količinom transportiranog materijala kao i otpornošću stijena na obali (BENAC, 2016). Udaranjem valova u obalu i obalne klifove dolazi do stvaranja hidrauličkog pritiska, koji tjera zrak u pukotine i tako stvara izmjene tlaka koje ih šire i time rezultira abrazijom površine (BIRD, 2016). U početnom stadiju degradacije obale nastaje udubljenje ili valna potkapina. Napredovanjem razaranja erozija može prerasti u masovno trošenje (kretanje), primjerice odrone i klizišta.

Erozija obalnih klifova u mekim stijenama najčešće se očituje u vidu spiranja, brazdanja i jaružanja. Česti uzročnik pojave ovih procesa je površinsko otjecanje vode koje je posljedica nedostatka vegetacijskog pokrova, vrste stijena i režima padalina. Kada intenzitet i količina kiše premaše kapacitet infiltracije, njen višak stvara površinsko otjecanje. Erozija započinje spiranjem koje prati sitne ureze u podlozi, te pojačanjem intenziteta može formirati brazde, vododerine i jaruge (SELBY, 1993; GUERRA i sur., 2014). Spiranje je proces odnošenja tankog površinskog sloja tla ili stijene zahvaćene trošenjem. Odvija se manje-više ujednačenom brzinom po površini padine bez nastanka kanala. Brazdanje je proces odnošenja površinskog sloja tla ili stijene zahvaćene trošenjem zbog linijskog toka površinske vode niz kosinu. Proces jaružanja je nastavak zajedničkog djelovanja procesa spiranja i brazdanja. Počinje se događati kada površinski plošni i linearni tok vode međusobno djelujući dobivaju sve veću energiju koja uzrokuje produbljivanje brazdi sve do točke na slivu u kojoj se počinju stvarati jaruge (BENAC, 2016). Sediment odnesen ovim procesima nakuplja se na dnu jaruga i stvara lepeze (konuse), koje često bivaju odnesene djelovanjem valova u podnožju klifa (PIKELJ i sur., 2018).

Osim otjecanja, voda dospjela kišom ili topljenjem snijega može se kroz šupljine, pukotine ili intersticijski prostor procjeđivati u propusno tlo ili stjensku podlogu. Procjeđivanje vode može isprati sitno-zrnasti sediment, koji se potom nakuplja u obliku lepeza u podnožju klifa. Snažno procjeđivanje može biti uzrok stvaranja otjecanja, koje rezultira pojavom brazdi i jaruga. Također može doći do otapanja stijene, primjerice karbonata, kroz koju se voda procjeđuje. Prilikom procjeđivanja vode kroz propusne stijene koje su u kontaktu s nepropusnim stijenama može doći do njihovog zasićenja, što može dovesti do značajne erozije pa čak i pojave rotacijskih klizišta (BIRD, 1995; BIRD, 2016; HOBBS i sur., 2002).

Izmjena vlaženja (posljedica kiše, rose ili morskog prskanja) i sušenja na površini klifa uzrok je erozije posebice u sitno-zrnatim stijenama. Neke gline (pr. smektiti) nabubre zbog upijanja vode i ponovno se skupljaju kad se isušuju. Takvo širenje i skupljanje uzrokuje dodatnu nestabilnost padine i povećava mogućnost pojave odrona i klizišta. Promjene temperature (posebno smrzavanje i odmrzavanje) dovode do širenja i skupljanja stijena i u konačnici do erozije čije je djelovanje najizraženije zimi za vrijeme otapanja nakon jakog mraza (WILLIAMS i sur., 2004) te smrzavanja i odmrzavanja podzemnih voda (BIRD, 2016). Erozija obalnih klifova u područjima hladnijih klima javlja se duž diskontinuiteta poput rasjeda i klinastih pukotina nastalih djelovanjem leda (eng. *ice wedges*) (HOQUE i

POLLARD, 2016) ili kontakata slojeva različite litologije. Obalna flora i fauna također mogu imati negativan učinak na klifove ovisno o litologiji. Bioerozija je proces razgradnje ili otapanja stijena uzrokovan izravnim djelovanjem organizama (rastom i/ili metabolizmom biljaka te djelovanjem životinja) (NEUMANN, 1966). Korijenje biljaka svojim rastom i prodiranjem u tlo može štititi površinski dio stijena i tla od padinskih procesa, ali može i izazvati širenje pukotina, pri čemu u stijenama poput karbonata može doći i do kemijske erozije, koja je posljedica izlučivanja korozivnih spojeva iz biljaka. Životinjski utjecaj na ubrzanu eroziju očituje se na mjestima kolonizacije algi (NAYLOR i VILES, 2002), gniježđenja ptica (CASAS-CRIVILLÉ i VALERA, 2005; GENCHI i sur., 2015), ubušivanja ptica, pčela i slično.

4. Pregled metoda istraživanja obalnih klifova

Istraživanje promjena na nestabilnim i nerijetko gotovo vertikalnim padinama obalnih klifova može biti vrlo zahtjevno, a ponekad i opasno. Iz tog razloga pri istraživanju morfologije i praćenju procesa na obalnim klifovima, te prikupljanju *in situ* podataka uglavnom se koriste metode daljinskih istraživanja (Slika 2). Prikupljanje podataka s vodoravnom ili približno horizontalnom točkom mjerenja (primjerice bočno skeniranje fronte klifa) omogućuje promatranje svih promjena unutar profila klifa, jer se na licu klifa mogu opaziti i mjeriti nestabilnost padine te prisustvo padinskih procesa. Visoka prostorna razlučivost i velik broj mjerenja ključni su za otkrivanje inicijatora nestabilnosti padine te određivanje mjesta i vremena pojave degradacijskih procesa (LETORTU i sur., 2018).

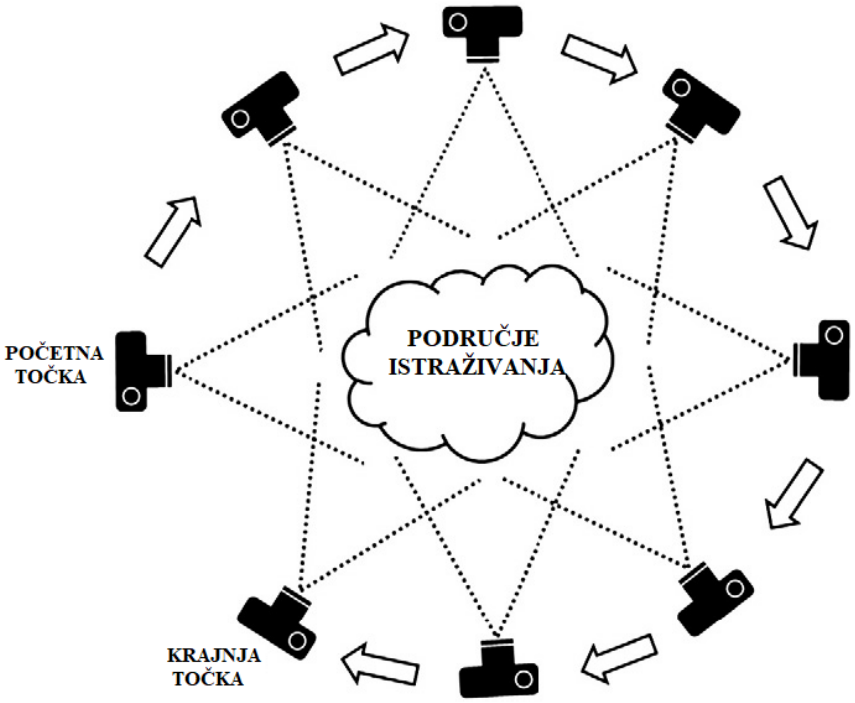
Najčešće upotrebljavane su metode zračne i terestričke fotogrametrije (APG, TPG), te zračno i terestričko lasersko skeniranje (ALS, TLS). Osim njih praćenje promjena na obalama moguće je također pomoću aerofotografije, ponovljene fotografije, snimaka optičkih satelita i globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS) (WESTOBY i sur., 2018).

Izvor podataka/ metoda	Prednosti	Mane	Reference
Zračna fotografija i fotogrametrija	Izrada detaljnih ortosnimaka visoke rezolucije (<dm).	Metoda je skupa, a time su diktirani i intervali snimanja. Zahtijeva vještinu fotogrametrijske obrade za stvaranje preciznih skupova podataka.	(Baily i Nowell, 1996; Costa i sur., 2004; Dewez, 2004; Moore, 2000; Moore i Griggs, 2002; Pierre, 2006)
Satelitske snimke	Snimke i podatci su široko dostupni. Može pokriti velika, tipično regionalna, područja.	Široko dostupne slike često su grube razlučivosti (> dm). Slike visoke razlučivosti (<dm) skupe su za većinu projekata praćenja i upravljanja obalnim područjima. Snimke zaklonjene oblacima.	(Loos i Niemann, 2002; Maiti i Bhattacharya, 2009; Pardo-Pascual i sur., 2012; White i El Asmar, 1999)
GPS/GNSS	Omogućuju snimanje topografije vrha ili baze litice. Relativno pristupačni i precizni (razlučivost obično cm-dm)	Topografske prepreke mogu utjecati na kvalitetu signala, a time i na točnost snimanja. Primjena onemogućena na područjima litica s jakim erozijskom procesima. Za prikupljanje podataka prostorne gustoće koji točno odražavaju složenu topografiju potrebno je puno vremena.	(Baptista i sur., 2011; Feagin i sur., 2014; Mills i sur., 2005; Montreuil i sur., 2013)
Zračni LiDAR	Omogućuje izravnu topografsku rekonstrukciju opsežnih priobalnih područja (> 10 km u jednom letu). Neki su podaci slobodno dostupni.	Često preskupa za izradu. Interval praćenja prvenstveno određuje trošak, ali i vremenski uvjeti. Teško dovoljno detaljno prikupljanje podataka za gotovo vertikalnu topografiju zbog točke gledišta senzora.	(Earlie i sur., 2015; Obu i sur., 2016; Palaseanu-Lovejoy i sur., 2016; Pye i Blott, 2016; Young i sur., 2011)
Terestrički LiDAR	Može generirati precizne i prostorno kontinuirane topografske podatke visoke rezolucije. Omogućuje analizu erozije u mjerilima procesa.	Visoki troškovi kupnje i održavanja. Veliki zahtjevi za napajanjem i teška prenosivost. Za izradu prostorno raspoređenih karata erozije potrebna napredna znanja o metodama topografskog razlikovanja.	(Feagin i sur., 2014; Kuhn i Prüfer, 2014; Lim i sur., 2005; Montreuil i sur., 2013; Rosser i sur., 2005; Rosser i sur., 2013)
SfM (MVS)	Povoljan, zahtijeva kupnju fotoaparata i softvera potrošačke kvalitete. Stvara prostorno kontinuirane 3D topografske podatke visoke razlučivosti. Minimalno vrijeme implementacije, pogodno za brzo i brzo mjerenje. Pristupačna, minimalna obuka potrebna za stvaranje 3D modela visoke rezolucije. Kamera montirana na UAV može se koristiti za nadzor u opasnim područjima i za proširenje površinskog pokrivanja.	Kontrolne točke na terenu potrebne za georeferenciranje i procjenu točnosti. Mora se ručno rasporediti i pregledati. Za izradu prostorno raspoređenih karata erozije potrebna napredna znanja o metodama topografskog razlikovanja.	(Brunier i sur., 2016; Gibbs i sur., 2015; Gienko i Terry, 2014; James i Robson, 2012; Mancini i sur., 2013; Lim i sur., 2015; Turner i sur., 2016; Warrick i sur., 2017; Westoby i sur., 2012)

Slika 2. Sažetak metoda istraživanja korištenih za kvantificiranje obalne erozije (prema WESTOBY i sur., 2018).

4.1. Terestrička i zračna fotogrametrija (TPG; APG)

Fotogrametrija je metoda koja omogućuje rekonstrukciju pozicije, orijentacije, oblika i veličine objekata prikazanog na snimkama. Snimke koje se koriste mogu biti konvencionalne (fotokemijske) ili digitalne (fotoelektrične). Rezultati fotogrametrijske analize mogu biti brojevi (koordinate pojedinačnih točaka u 3D sustavu), skice karata, geometrijski modeli i slike (analogne ili digitalne). Snimke za terestričku fotogrametriju snimaju se kamerama s fiksnih pozicija u prostoru (KRAUS, 2007). Digitalna fotogrametrija je metoda kojom se na temelju slika snimljenih na više mjesta generiranju 3D površinski modeli (MATTHEWS, 2008; FRASER i CRONK, 2009; MANCINI i sur., 2017, MARULLO i sur., 2018). SfM (eng: *structure from motion*) metoda koristi iste principe kao konvencionalna fotogrametrija, ali se od nje bitno razlikuje, jer se geometrija istraživanog područja, položaj i orijentacija kamere određuju automatski. SfM fotogrametrija zahtjeva snimke niza fotografija, obilazeći objekt u krug (Slika 3) te je najprikladnija za skupove slika s visokim stupnjem preklapanja za rekonstrukciju 3D modela istraživanog područja. Za dobivanje 3D oblaka točaka potrebno je pronalaženje zajedničkih 2D piksela između ulaznih fotografija pomoću programskog algoritma. Oblaci točaka (3D rekonstrukcije objekata) koji se dobivaju nakon obrade u nekom od odabranih programa nisu skalirani i nalaze se u relativnom koordinatnom sustavu kojeg je potrebno pretvoriti u poznati globalni koordinatni sustav, jer točne koordinate snimanja nisu poznate. Za georeferenciranje područja idealno je da na najmanje tri fotografije budu vidljive najmanje tri zajedničke referentne točke. Georeferenciranje za SfM fotogrametriju provodi se na način da se prvotno stvara trodimenzionalni oblak točaka u relativnom koordinatnom sustavu 'prostor-slika', koji se potom usklađuje sa stvarnim koordinatnim sustavom 'objekt-prostor'. Za transformaciju SfM koordinata u globalni koordinatni sustav mogu se koristiti kontrolne točke u vidu objekata (eng. *ground control points, GCP*) ili češće markacijske kontrolne točke u vidu znakova koje su označene jasno definiranim granicama te su jarkih boja kako bi se postigao visoki kontrast u odnosu na okolinu. Kako bi se provela transformacija nužno je znati točne prostorne koordinate kontrolnih točaka. Markacijske kontrolne točke omogućuju pouzdanu i dobro raspoređenu mrežu kontrolnih točaka na čitavom istraživanom području, omogućujući procjenu svih nelinearnih strukturnih pogrešaka pri rekonstrukciji (LOWE, 1999, 2004; WESTOBY i sur., 2012, 2018).



Slika 3. Shema procesa prikupljanja podataka SfM fotogrametrijskom metodom (prema Westoby i sur., 2012.)

4.1.1. Terestrička fotogrametrija (TPG)

Točnost terestričkih metoda primjenjivanih na istraživanje obalnih klifova temelji se na ponavljajućem snimanju fronte klifa kroz vrijeme (GULYAEV i BUCKERIDGE, 2004). Postoji nekoliko načina na koje se mogu prikupiti podatci putem TPG-a ovisno o morfologiji i pristupačnosti terena. Pri visinama do 50 m slike se mogu prikupljati sa stanica na tlu, što omogućava prikupljanje podataka sa cijelog istraživanog područja (FIRPO i sur., 2011). Terestrička digitalna fotogrametrija je metoda koja ima širok spektar primjene u geomorfologiji, a može se upotrijebiti za procjenu uvjeta na klifu i njegove stabilnosti (FIRPO i sur., 2011), te karakterizaciju diskontinuiteta slojeva na izdancima stijena (STURZNEGGER i STEAD, 2009).

4.1.2. Zračna fotogrametrija (APG)

Zračna fotogrametrija je metoda koja koristi iste principe kao i terestrička, ali ima primjenu na područjima koja obuhvaćaju veći prostor i visine. Na visinama do 300 m, uz uvjet da su područja proučavanja pristupačna i dovoljno široka, mogu se koristiti aerostatski helijevi baloni opremljeni različitim uređajima za snimanje. Za visine veće od 300 m podatci se mogu prikupiti snimanjem iz helikoptera (FIRPO, 2011). Prikupljanje fotografije pomoću UAV (eng. *unmanned aerial vehicle*) je metoda zračne fotogrametrije koja prikuplja podatke

primjerice pomoću drona. Pouzdana je, te pruža veliku prostornu pokrivenost što omogućuje nadzor većeg dijela istraživanog područja. Ipak, nedostatak ove metode je činjenica da je ovisna o vremenskim uvjetima (LETORTU i sur., 2018).

4.2. Terestričko i zračno lasersko skeniranje (TLS; ALS)

Lasersko skeniranje je optička metoda daljinskog istraživanja koja može izmjeriti položaj (udaljenost i kut) točke u odnosu na uređaj mjerenjem vremena putovanja laserskih impulsa koji se odražavaju u točki koja se skenira (LETORTU i sur., 2018) i time pruža precizan okvir za obuhvaćanje područja izdanaka. LiDAR (eng. *light detection and ranging*) je metoda daljinskog istraživanja koja koristi svjetlost u obliku laserskih impulsa za mjerenje udaljenosti od lasera do ciljanog područja na površini Zemlje. Ti svjetlosni impulsi, u kombinaciji s drugim podacima zabilježenim u zračnom sustavu, stvaraju precizne, trodimenzionalne informacije o obliku i površinskim karakteristikama duž snimanog područja.

4.2.1. Terestričko lasersko skeniranje (TLS)

Terestričko lasersko snimanje nekog objekta obavlja se s nekoliko mjernih stanica na terenu, pozicioniranih na način da postoji samo malo preklapanje između oblaka točaka generiranih na svakoj stanici (KRAUS, 2007). Za lociranje mjernih stanica koristi se GPS sustav koji omogućuje prikupljanje geometrijskih detalja visoke razlučivosti na područja ispitivanja, kao i integraciju ostalih podataka na terenu. TLS je metoda čija je primjena ograničena na manja područja (dometi od 10-500 metara) (JAMES i ROBSON, 2012).

Terestrička istraživanja LiDAR-om omogućila su prikupljanje skupova podataka koji se mogu koristiti za praćenje povlačenja obalne linije, ravnoteže volumena plaže, praćenje obalne erozije (npr. (GULYAEV i BUCKERIDGE, 2004.; ROSSER i sur., 2015.), te procesa erozije klifova (LIM i sur., 2010; LETORTU i sur., 2015; TEREFENKO i sur., 2019).

4.2.2. Zračno lasersko skeniranje

ALS metoda može se provoditi iz zrakoplova, a mjerni sustav sastoji se od lasera u kombinaciji s GPS prijamnikom i LINS (eng: *laser inertial navigation system*) sustavom. Laser skenira površinu terena okomito na pravac smjera s gustoćom do pet mjerenja po kvadratnom metru, gustoća koja varira s kutom skeniranja i lokaliziranom topografijom. (ADAM i CHANDLER, 2002). Lasersko skeniranje u zraku (ALS) nudi brzo, daljinsko

snimanje podataka gustog oblaka točaka, omogućujući tako automatizirano generiranje digitalnih modela terena (DTM) i digitalnih površinskih modela (DSM).

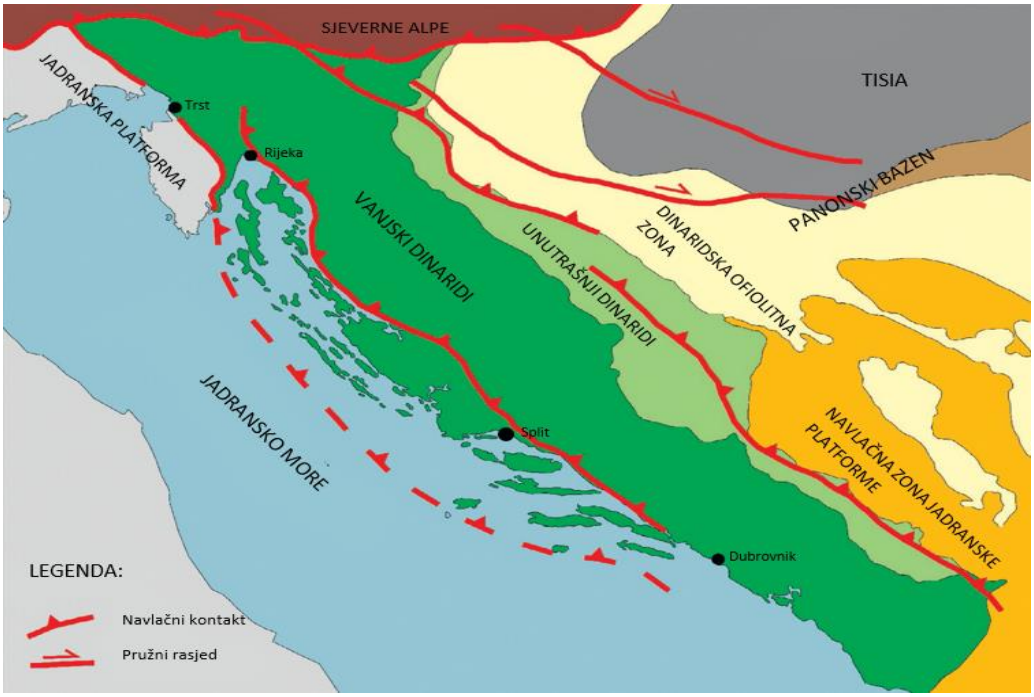
4.3. Ponovljeno fotografiranje

Metoda ponovljene fotografije bazira se na praćenju promjena u okolišu prikupljanjem podataka na kojima su očuvane fizičke karakteristike okoliša te na njima mogu biti izvršena izravna mjerenja (eng. *proxy*). Analiza *proxy* podataka vrši se na temelju uparenih uzastopnih slika određenog područja dobivenih s identičnih lokacija tijekom određenog vremenskog razdoblja (KULL, 2005). Izvorna fotografija može se snimiti ili nabaviti iz drugog izvora; sljedeće slike se fotografiraju naknadno. Pomoću ove metode moguće je rekonstruirati promjene na različitim vremenskim skalama. Duga razdoblja u kojima se kontinuirana promjena mikro ili malih razmjera očituje u uočljivim promjenama krajolika tijekom godina, desetljeća i stoljeća; tijekom redovitih događaja primjerice za dokumentiranje promjena krajolika nakon pojave klizišta. Ova metoda korištena u svrhu istraživanja u kratkom vremenskom razdoblju (često sekunde do sati) naziva se i *time-lapse* fotografija (TRIMBLE, 2008). Analizirani podatci na fotografijama dobiveni ovom metodom uključuju oblik i veličinu zapaženih promjena, teksturu i prostorne asocijacije između prirodnih obilježja i identificiranih objekata (LILLESAND i KEIFER, 2008). Geomorfološka istraživanja promjena u okolišu temeljena na ovoj metodi uključuju; fluvijalno kretanje i promjene riječnih kanala (WEBB i sur., 2002), kretanje leda, povlačenje ledenjaka i snježnog pokrivača (SELKOWITZ i sur., 2002), opasnosti od klizišta (HINCKS i CRUDEN, 2003) i mnoga druga. Glavne prednosti metode ponovljene fotografije su brzina i ekonomičnost metode, te mogućnost usporedbe fotografija područja starijih od podataka dobivenih aerofotografijom ili satelitskim snimkama.

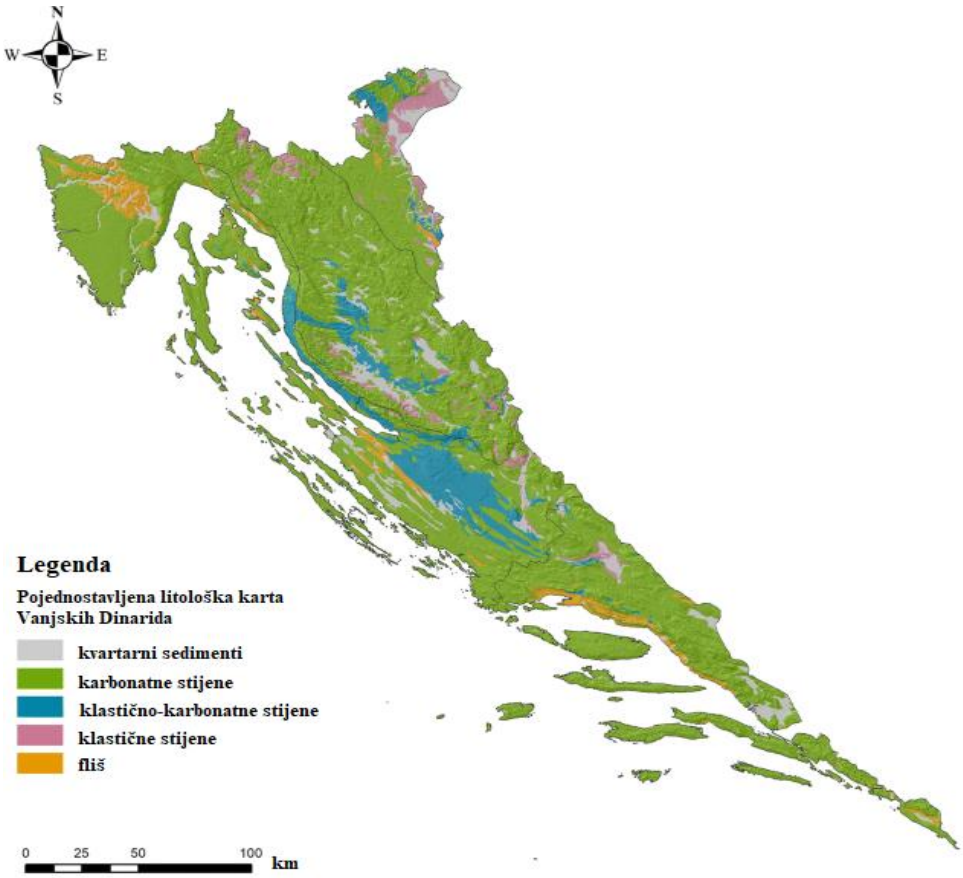
5. Geografske, geološke i geomorfološke karakteristike istraživanog područja

5.1. Geološki razvoj istočne jadranske obale

Prema Korbar (2009), Vanjski Dinaridi dio su alpskog orogenog sustava, karakterizirani generalno JZ pružanjem geoloških struktura (Slika 4). To je pojas koji je nastao procesima boranja i navlačenja, a dio je gornjeg dijela kore Jadranske platforme navučene tokom subdukcije u smjeru SI. Pojas Vanjskih Dinarida se, zajedno s pripadajućim dijelom jadranske obale, zemljopisno nalazi unutar regije Dinarskog krša. Dugotrajno taloženje na karbonatn platformi, formiranoj na izoliranoj Jadranskoj mikroploči, započelo je u gornjem trijasu, prije ~240 milijuna godina te je trajalo u isprekidanim intervalima do eocena (JELASKA, 2002). Tijekom mezozoika i ranog paleogena na jadranskoj karbonatnoj platformi dolazi do nekoliko faza taloženja debelih sukcesija plitkovodnih karbonata. Na prijelazu iz krede u rani paleogen, zbog kompresijske tektonike, prekida se plitkovodna sedimentacija i započinje izdizanje Dinarida. Kao posljedica tih događaja, tokom eocena dolazi do formiranja flišnih bazena (Slika 5). Tektonska aktivnost nastavlja se tijekom oligocena i miocena što je prouzročilo glavno uzdizanje Dinarida (VLAHOVIĆ i sur., 2005). Konačan tektonski izgled današnje istočne jadranske obale formiran je u periodu od miocena do ranog pliocena (KORBAR, 2009).



Slika 4. Pojednostavljena tektonska karta Dinarida (Preuzeto iz Hajna, 2019).



Slika 5. Pojednostavljena litološka karta Vanjskih dinarida (prema Hasan i sur., 2020)

Istočna jadranska obala klasificira se kao transgresivna obala, a krajnje je oblikovana porastom razine mora i preplavljivanjem postojeće okršene obale tijekom kasnog pleistocen-holocenskog razdoblja (SURIĆ i sur., 2005). Prema Fairbridgeu (1968) istočna jadranska obala klasificira se kao „dalmatinski tip“ obale koji je karakteriziran pojavom izduženih otoka, kanala, zaljeva i poluotoka koji se pružaju usporedno s linijom obale i većim reljefnim oblicima na njoj. Dalmatinski tip obale nastao je pri izdizanju razine mora potapanjem krajolika usporednih gorskih udolina, pri čemu udoline postaju kanali i izduženi zaljevi, a viši dijelovi postaju otoci.

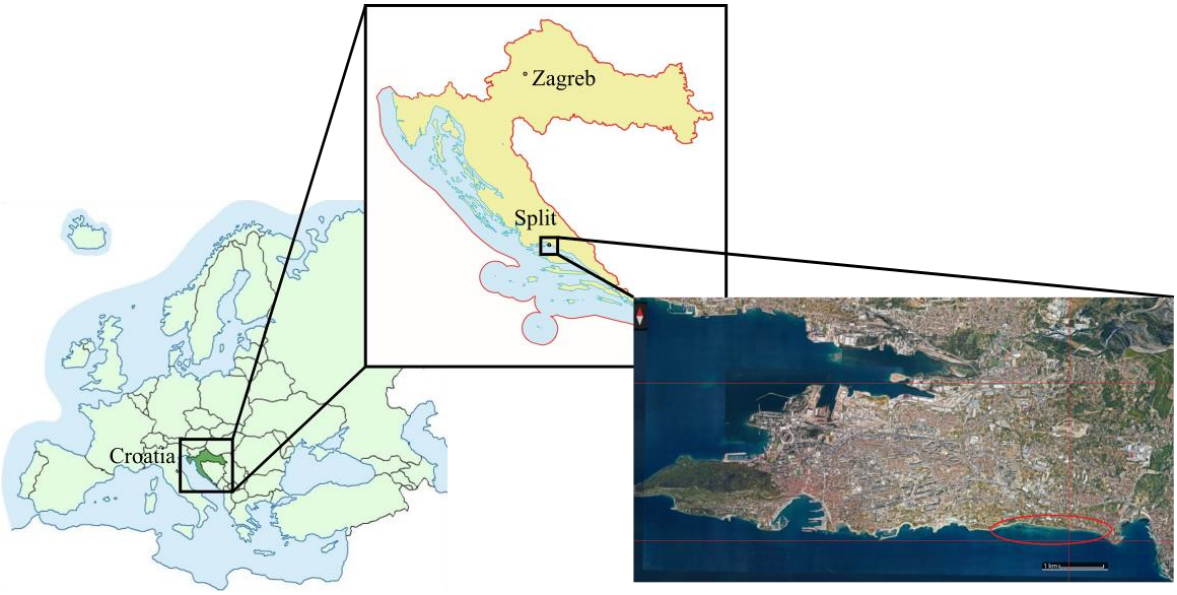
Hrvatsko obalno područje prilično je usko, što je posljedica potapanja tektonski predisponirane obale (boranje i rasjedanje), s visokim dinarskim planinskim lancem u neposrednom zaleđu. Većina otoka i obale (preko 90% duljine; PIKELJ i sur., 2013) građene su u mezozojskim karbonatima, djelomično prekrivenim boksitom i tlom *terra rossa*. Manje rasprostranjena grupa stijena duž istočne jadranske obale je eocenski fliš (izmjena lapora, muljnjaka, pješčenjaka i karbonatnih breča), s kojim su često asocirane i mlađe naslage, pr. pleistocenski pijesci (PIKELJ i sur., 2013).

5.2. Karakteristike istraživanog područja

5.2.1. Geografska obilježja grada Splita i okolice

Grad Split je smješten na jadranskoj obali u srednjoj Dalmaciji i središnjem dijelu južne Hrvatske (Slika 6). Područje grada prostire se između zemljopisnih dužina 16º38' i 16º51'. Južna obalna granica nalazi se približno na 43º49' sjeverne geografske širine, dok je sjeverna granica na 43º53' sjeverne geografske širine (Google, URL 2). Split je u svom zaleđu, sa sjevera i sjeveroistoka, okružen planinom Mosor, sa sjeverozapada brdom Kozjak, s istoka brdom Perun, a najstarija gradska jezgra se nalazi podno brda Marjan. Splitski poluotok okružuju otoci Brač, Hvar, Šolta i Čiovo. Otok Čiovo s poluotokom Marijanom i kaštelanskom obalom formira Kaštelanski zaljev.

Prema Köppenovoj klasifikaciji klime, Split ima umjereno toplu vlažnu klimu s vrućim ljetom (Cfa) i sredozemnu klimu (Csa). Split ima vruća, suha ljeta i blage, vlažne zime (DHMZ, URL 3). Oborinski režim na području Splita ima sve karakteristike maritimnog sredozemnog kišnog tipa. U ljetnim mjesecima (lipanj-kolovoz) padne manje od 15 % godišnjih količina oborine, tako da ljetna polovica godine oskudijeva kišom, što često izaziva ljetne suše kojima pridonose i slaba retencijska sposobnost tla te visoka evapotranspiracija. Padaline su tokom godine nejednako raspoređene i obilnije u hladnijem dijelu godine (listopad-siječanj) (DHMZ, URL 4). Značajno obilježje klime na ovom području su vjetrovi. Na području Splita bura i jugo su dominantni vjetrovi i mogu puhati tijekom cijele godine, a za vrijeme ljetnih mjeseci najčešće puše maestral. Olujnoj buri, koja se češće pojavljuje zimi, posebno je izloženo obalno područje, a maksimalni udari bure mogu biti i veći od 48,5 m/s. Jugo je topli i vlažni vjetar, koji se javlja uz oblačno i kišovito vrijeme, a stvara visoke valove. Iako je najčešće u hladnim dijelovima godine, može puhati i ljeti. Na južnom Jadranu najčešće se javlja od početka jeseni pa do kraja zime, a brzina puhanja mu se kreće od 10 m/s do 30 m/s. Češće i snažnije se pojavljuje na južnom Jadranu. Učestalost puhanja bure opada od sjeverozapada prema jugoistoku, a učestalost juga raste. S obzirom na valove, jugo ima puno veći utjecaj na obalni prostor hrvatske obale u vidu erozivne snage. Grad Split nalazi se na flišnim naslagama srednjeg i gornjeg eocena, koje u hidrogeološkom smislu predstavljaju kompleks u cjelini nepropusnih stijena (FRITZ i KAPELJ, 1998). Istraživano područje je obalni klif Duilovo koji se nalazi na flišnom platou između Splita i Stobreča (Slika 8).

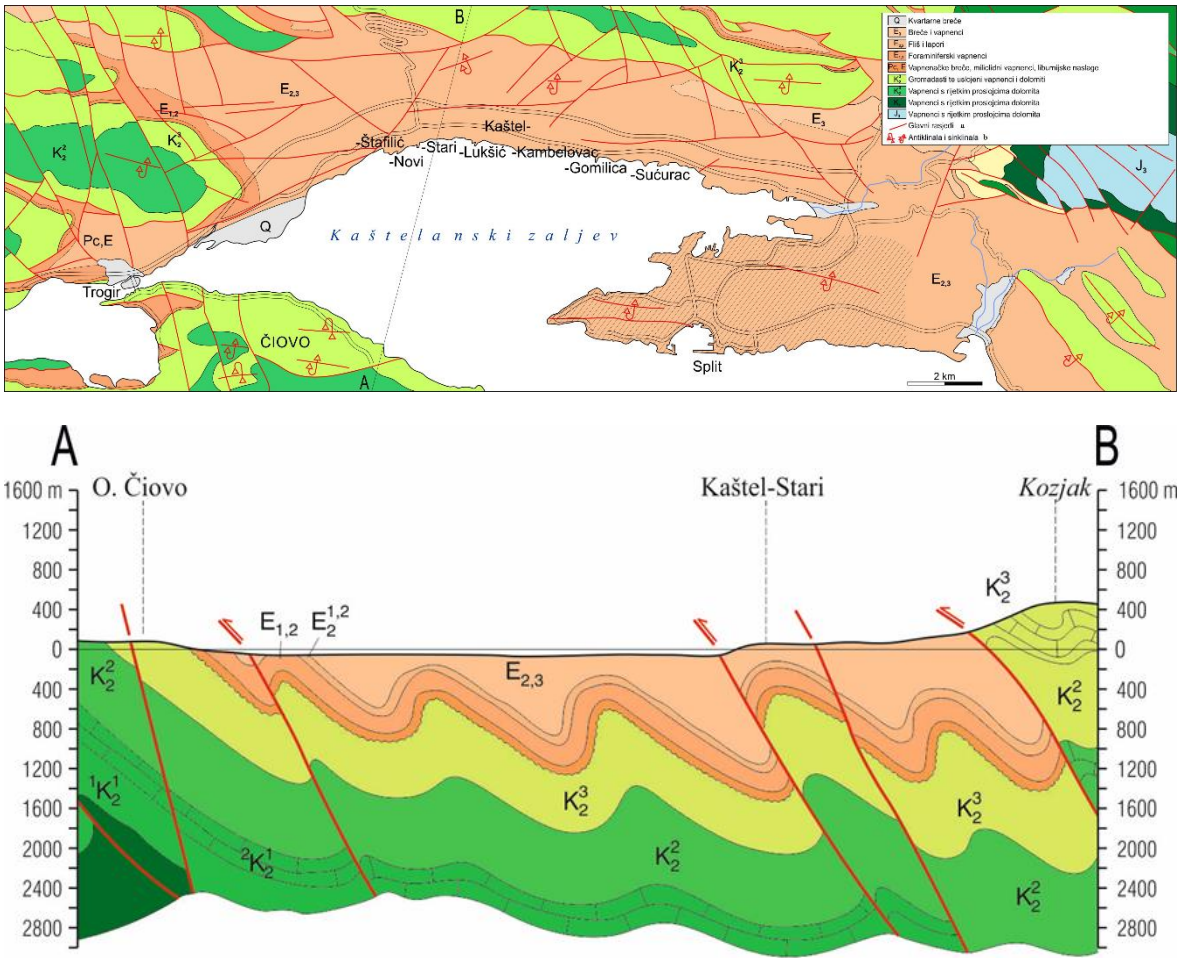


Slika 6. Geografski smještaj grada Splita, Hrvatska

5.2.2. Geološka građa i geomorfološka obilježja grada Splita i okolice

Split i njegova okolica, s geološkog aspekta, predstavljaju dio kredno-paleogenskog bazena Vanjskih Dinarida. Najstarije naslage cenomanske starosti taložene su u relativno plitkom i toplom moru te su u njima pretežito zastupljeni dijagenetski dolomiti ($^{1}K_2^1$), a krovni dio naslaga izgrađuju pločasti vapnenci ($^{2}K_2^1$). Kontinuirano na cenomanske naslage taloženi su turonski vapnenci s rijetkim proslojcima dijagenetskih dolomita (K_2^2). Oplićavanjem sedimentacijskog bazena za vijeme senona dolazi do facijesnih diferencijacija i taloženja gromadastih i uslojenih vapnenaca i dolomita (K_2^3). Krajem krede započinju značajni tektonski procesi koji su karakterizirani kompresijskim režimom kretanja, a kao posljedica započinje boranje naslaga. Za vrijeme ranog paleogena dolazi do transgresije i na erodiranim krednim naslagama započinje taloženje vapnenačkih breča, miliolidnih vapnenaca i liburnijskih naslaga (Pc,E). Produbljavanjem taložnog prostora talože se foraminiferski vapnenci u vremenu od ranog eocena do ranog luteta ($E_{1,2}$). U relativno dubokoj i nemirnoj marinskoj sredini talože se klastične naslage fliša ($E_{2,3}$) koje su karakterizirane sedimentacijskim slijedom breča i brečokonglomerata u bazi, zatim pjeskovitim kalkarenitima u sredini te laporima u vrhu taložnog slijeda. Ove naslage nalaze se na širokom području Trogira, Kaštela i Splita. Taloženje ovih naslaga odvijalo se za vrijeme srednjeg eocena (kasni lutet) u dubokim sredinama bazena okruženog mezozojskim karbonatima. Tektonske kretnje krajem eocena dodatno mijenjaju geološku građu terena formiranjem izoklinalnih bora, a njihovim pucanjem i reversnih rasjeda. Oplićavanjem

bazena taložе se breče, brečokonglomerati i vapnenci gornjoeocenske starosti (E_3) koji se danas mogu naći na nekoliko odvojenih lokaliteta. Kvartarni sedimenti (Q) javljaju se u vidu pleistocenskih pećinskih sedimenata te čvrsto vezanih breča građenih od krednih i paleogenskih karbonata (Slika 7) (MARINČIĆ i sur., 1973).



Slika 7. Geološka karta litoloških kompleksa i pripadajućih geoloških struktura, s geološkim profilom duž Kaštelanskog zaljeva (prema OGK Split i Primošten (prema MARINČIĆ, i sur., 1973):

1 kvartarne breče (Q); 2 breče i vapnenci (E_3); 3 fliš i lapori ($E_{2,3}$); 4 foraminiferski vapnenci ($E_{1,2}$); 5 vapnenačke breče, miliolidni vapnenci i liburnijske naslage (Pc,E); 6 gromadasti te uslojeni vapnenci i dolomiti (K_2^3); 7 vapnenci s rijetkim proslojcima dolomita (K_2^2), (K_1) i (J_3); Geološke strukture: a glavni rasjedi; b antiklinala i sinklinala

Obzirom na kompresijsku tektoniku duž cijele Jadranske obale, područje Splita i okolice izrazito je borano (Slika 7), a smjer tonjenja premetnutih bora u eocenskom flišu je u smjeru istoka. Pružanje osi bora u području grada Splita i njegove okolice generalno je u smjeru sjeverozapad-jugoistok, s nagibom (azimutom) od ~40º prema sjeveru-sjeveroistoku (MARINČIĆ i sur., 1971). Jedno od obilježja flišnih stijena na području Kaštela i Splita je međusobna vertikalna i horizontalna izmjena nepropusnih i slabo do osrednje propusnih

litoloških članova. Geomorfološki procesi unutar nepropusnih flišnih stijena na području Kaštela i Splita su isključivo površinski. Većinom se svode na površinsko spiranje i jaružanje te povremeno usijecanje kratkih dolina kojima teku bujice. Izvori i „pištevine“ nalaze se najčešće na kontaktu nepropusnih i propusnih litoloških članova, dok se male količine procjedne vode nalaze u kontaktu kvartarnog tla nastalog trošenjem lapora i flišne stjenske podloge. Posljedice djelovanja površinskih geomorfoloških procesa izražene su u pretežito propusnim karbonatnim stijenama splitske i trogirske zagore (FRITZ i KAPELJ, 1998).

5.2.3. Geološke karakteristike klifa Duilovo

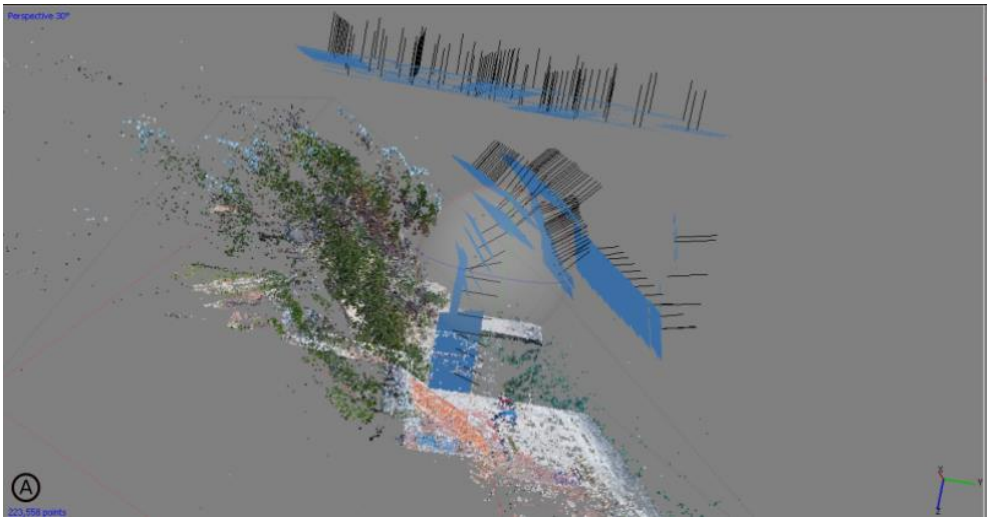
Na regionalnoj skali, stijene klifa pripadaju flišnom kompleksu karakteriziranom proslojcima lapora i pješčenjaka (MARINČIĆ, 1981). Obalni klif Duilovo smješten je u urbanoj zoni grada Splita (Slika 8), a vrh klifa naseljeno je područje i dio splitske urbane zone. Južna obala grada Splita prirodno je klifovita, ali je zbog urbanizacije većina materijala na klifovima s vremenom uklonjena te je razina kopna u obalnoj zoni znatno snižena. Istraživano područje obuhvaća zapadni dio ~30 m visokog i ~2 km dugog obalnog klifa razvijenog u eocenskoj flišnoj formaciji (izgrađenoj od lapora, pješčenjaka i muljnjaka) koji se nalazi na južnoj strani visoravni Duilovo (VLASTELICA i sur., 2017). Učestalost slojeva lapora na istraživanom klifu puno je veća u odnosu na slojeve pješčenjaka, što stvara dojam da je klif pretežito građen od lapora. Obalna platforma u podnožju klifa djelomično je potopljena. Najplići dio platforme građen je od otpornijih slojeva lapora ili pješčenjaka. Plaža je prekrivena šljunkom koji je uglavnom biokalkarenitnog sastava koji većinom potječe od eocenskih foraminiferskih vapnenaca dok manji dio šljunka potječe od flišnih pješčenjaka. Pijesak je također prisutan, ali u manjoj mjeri i to većinom na zapadnom dijelu abrazijske terase, što ukazuje na smjer duž-obalnog transporta prema zapadu (PIKELJ i sur., 2014).

Slika 8. Grad Split i klif Duilovo (crvena elipsa) (Google, URL 2)

6. Metode istraživanja

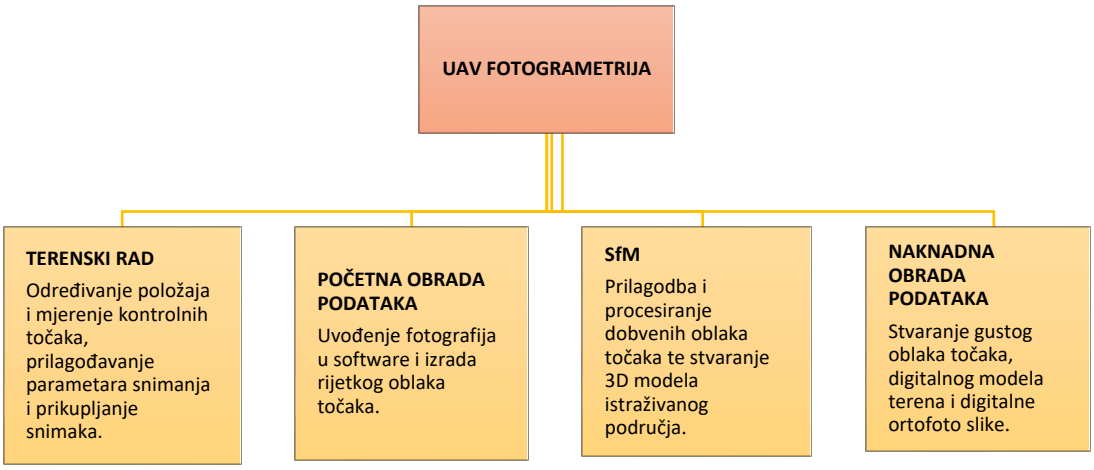
6.1. Terenski rad

Područje istraživanja veličine je 0,37 ha, te obuhvaća snimljenu vertikalnu površinu, frontu klifa i dio akumulacijske terase. Snimke zračne fotogrametrije prikupljene su za sunčana vremena, s vjetrom brzine <3 m/s (podaci preuzeti s meteorološke postaje Instituta za oceanografiju i ribarstvo u Splitu). Slikanje klifa provođeno je u dva navrata (29. 04. 2018. i 27. 05. 2018.) pomoću DJI Phantom 4 Advanced drona, teškog 1836 g i opremljenog s 20 MPX DJI FC6310 fotoaparatom. Fokalna duljina leće bila je fiksirana na 24 mm. GDS (eng. *ground sample distance*) je bio 0,0004 m za vertikalne snimke i 0,0002 za bočne snimke. Za potrebe prikupljanja podataka za izradu digitalnih 3D modela ovog diplomskog rada korištena je SfM fotogrametrija. Snimanje je obavljeno na način da se susjedne fotografije međusobno preklapaju na 80% fotografiranog prostora. Slikanje je oba puta provedeno na način da su prikupljena dva seta slika na mjestu odrona: automatski, vertikalni položaj slike, te u ručnom modu za bočne slike (longitudinalne u automatskom načinu i poprečne u ručnom načinu) (Slika 9). Za vrijeme prvog snimanja prikupljene su 202 slike, a za vrijeme drugog 328 slika (Slika 10).



Slika 9. Položaji kamere za vrijeme snimanja klifa

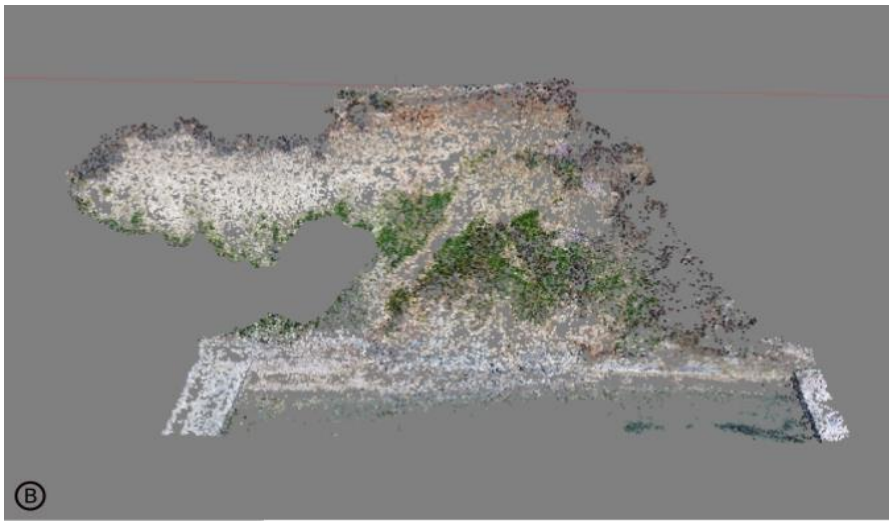
Područje plaže ispod klifa i samog klifa pregledano je u više navrata tijekom različitih godišnjih doba unutar perioda od 10-ak godina (2012.-2021.), kako bi se prikupile ponovljene fotografije, te kako bi se prikupile informacije o površinskim padinskim procesima. Za ovaj diplomski rad korištene su i arhivske fotografije prethodnih godina (u vlasništvu doc. dr. sc. K. Pikelj).



Slika 10. Generalizirani tijek postupaka pri korištenju metode UAV fotogrametrije

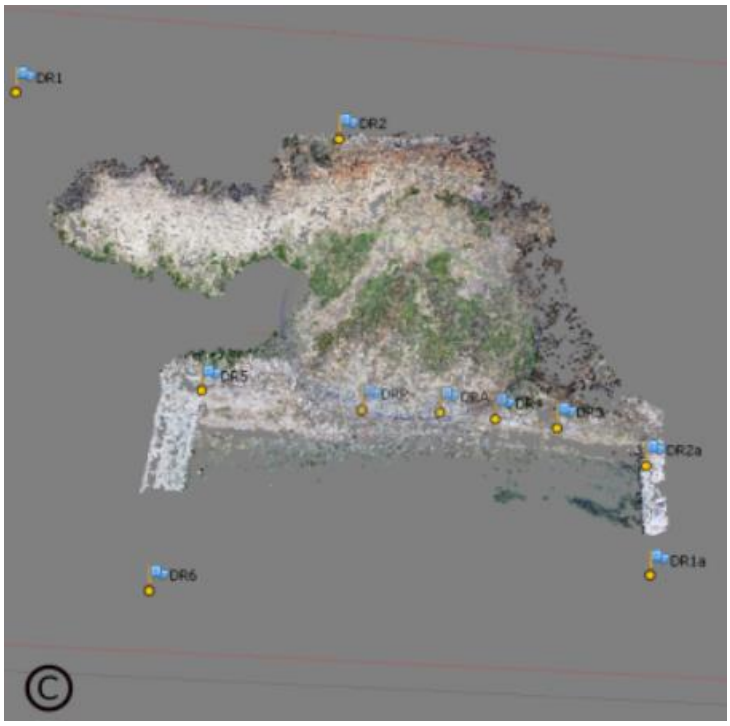
6.2. Agisoft Photoscan

Uporabom računalnih programa specijaliziranih za obradu snimaka prikupljenih SfM-MVS fotogrametrijom dobiva se 3D oblak točaka (Slika 10). Za potrebe ovog diplomskog rada algoritam je obrađen pomoću programa AgiSoft® PhotoScan. Prije obrade podataka nužno je provesti procjenu kvalitete slika kako bi se izvršila selekcija te uklonile slike koje nisu zadovoljavajuće kvalitete (>0.5, pri čemu je 1 maksimalna kvaliteta slike). Postupak obrade podataka provodi se u nekoliko koraka. Tijekom prvog koraka fotografije se međusobno poravnavaju, za što je ključno snimanje fotografija pri oblačnom vremenu s minimalnim stvaranjem sjena ili dugih promjena u osvjetljenju. Potom, uz prethodno definirane postavke, započinje spajanje slika u cjelinu kojim se dobiva rijetki oblak točaka (eng. *sparse point cloud*) (Slika 11).



Slika 11. Rijetki oblak točaka (SPC)

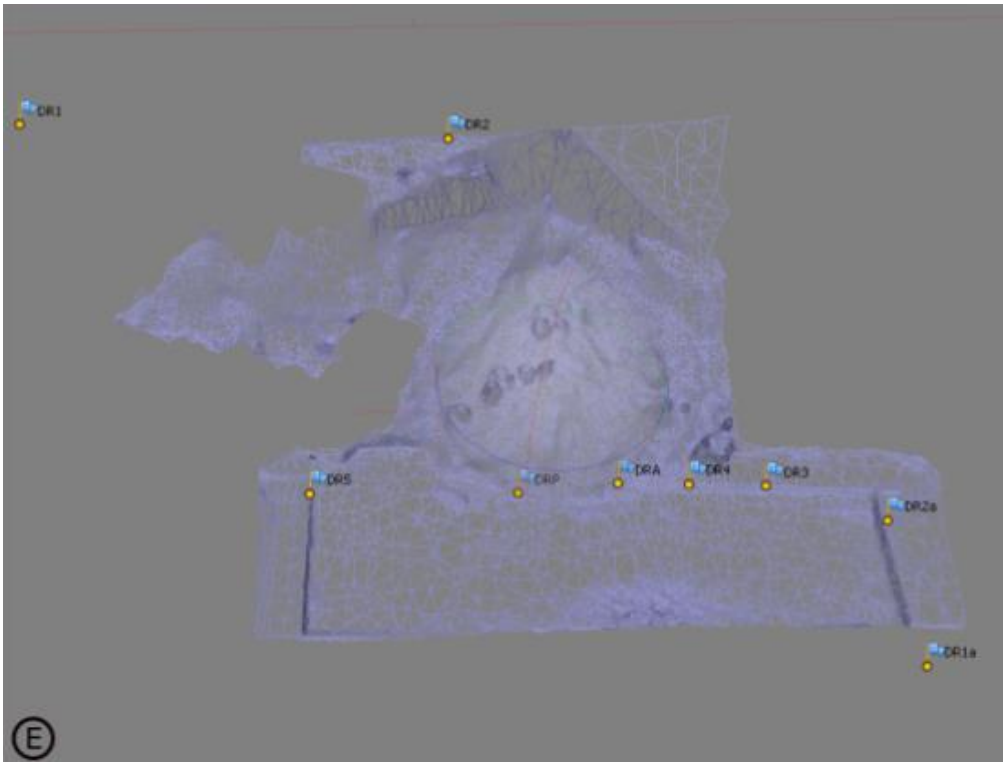
Dobiveni rijetki oblak točaka prikazuje konture klifa koje uključuju okolnu vegetaciju i druge objekte. Za dobivanje modela klifa potrebno je postupno uklanjati sve skupove točaka koje predstavljaju višak ili prepreku. Drugi korak je označavanje markacijskih kontrolnih točaka koje se dodaju iz tekstualne datoteke (Slika 12).



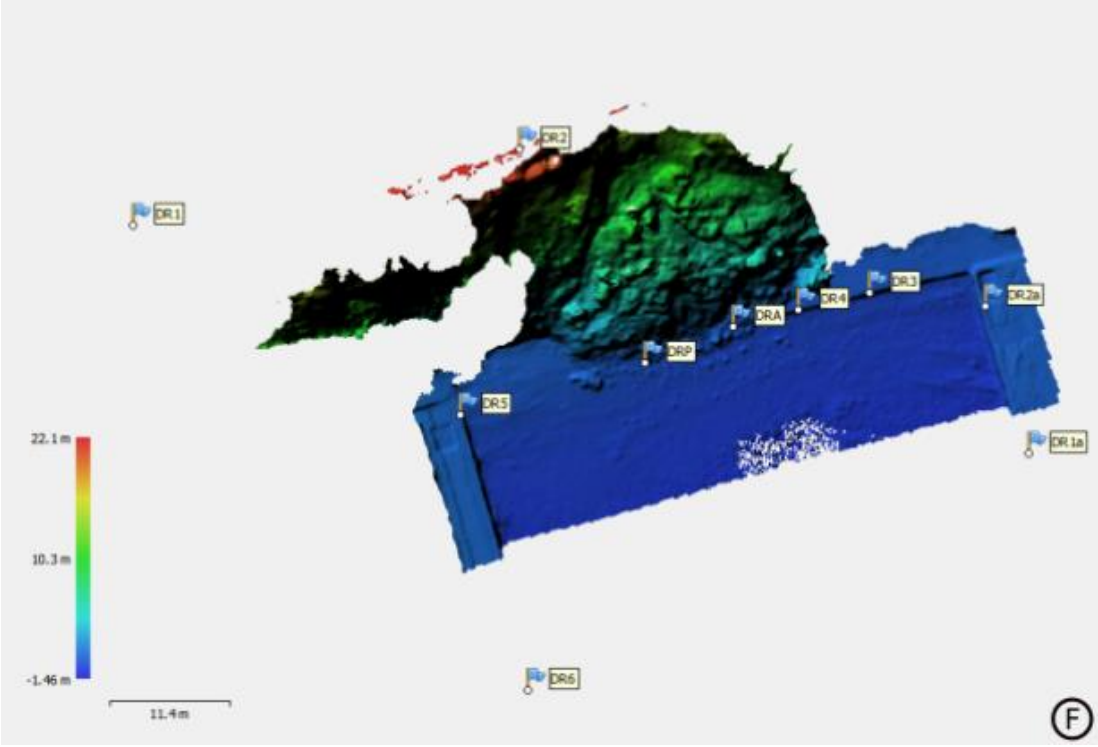
Slika 12. Označene markacijske točke na rijetkom oblaku točaka (29. 04. 2018.)

Prije samog uvođenja točaka izabire se referentni koordinatni sustav. Prethodno prikupljanju snimaka na istraživanom području uvedeno je 10 točaka za georeferenciranje modela. Točke su definirane kao fiksne kružnice crvene boje promjera oko 5 cm, pri čemu je lokacija njihovog centra bila izmjerena uz pomoć Trimble R8 GNSS prijemnika i CROPOS VPPS servisa za korekciju. Horizontalna i vertikalna točnost bila je 2, odnosno 4 cm. Koordinatni sustav u kojem je model napravljen je HTRS96. Svaki marker bio je ručno unesen na slike koje su korištene za izradu modela. Ukupna greška (eng. *root means square error (RMSE)*) markera i modela snimanog 29. 04. 2018. bila je 0,003 m, a za model sniman 27. 05. 2018. bila je 0,006 m. Sljedeći korak je stvaranje gustog oblaka točaka (eng. *dense point cloud*) (Slika 13). Dobiveni gusti oblak točaka koristi se za izradu mreže trokutastih elemenata (eng. *mesh*) (Slika 14). Za dobivanje konačnog rezultata nakon uklanjanja viška trokuta dobivene mreže izrađuje se digitalni površinski model (DSM) koji je izvezen u obliku .ascii datoteke i dalje obrađen u Surferu (Slika 15). Postupak obrade podataka proveden je na isti način i sa istim postavkama za oba seta fotografija.

Slika 13. Gusti oblak točaka (DPC) (29. 04. 2018.)



Slika 14. Mreža trokutastih elemenata (*mesh*) dobivena iz gustog oblaka točaka (29. 04. 2018.)



Slika 15. Digitalni površinski model (DSM) snimanog klifa (29. 04. 2018.)

6.3. GoldenSoftware Surfer

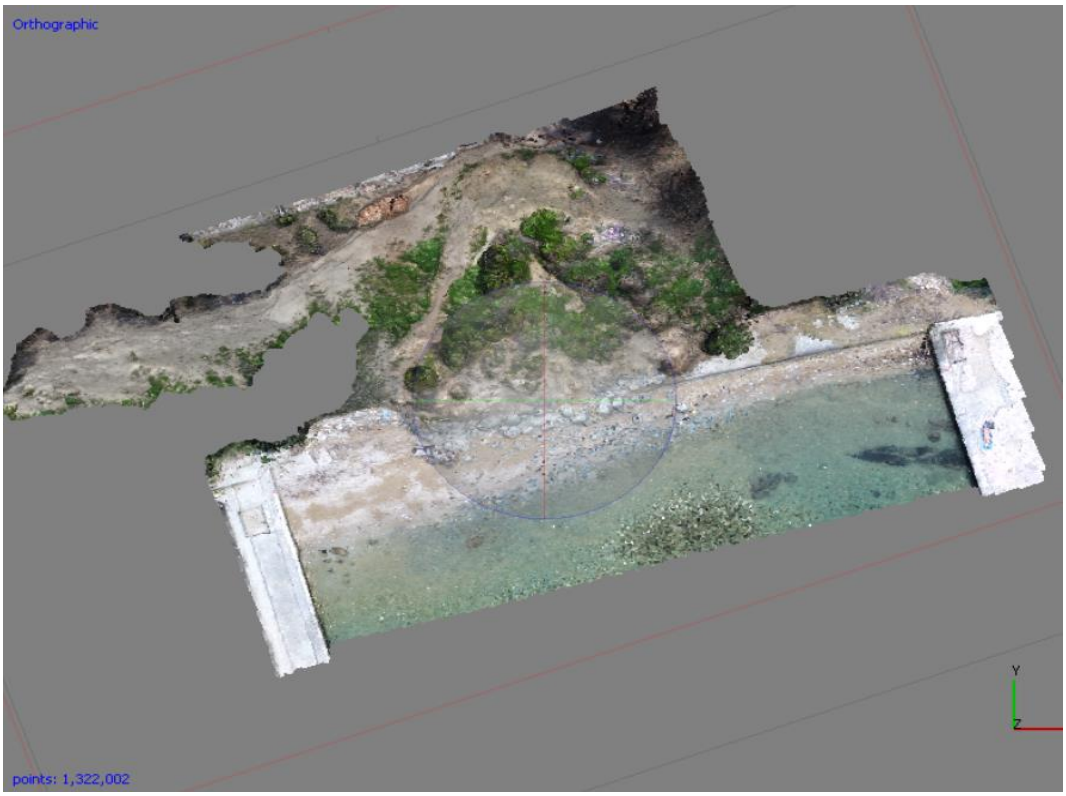
Za daljnju obradu podataka u programu Surfer dobiveni digitalni površinski modeli koji će se uspoređivati izrezani su na jednaku veličinu. Oduzimanjem dvaju modela dobiveni su modeli razlike (eng. *DSMs of difference; DoDs*), a na njima je moguće interpretirati promjenu u visini i volumenu materijala na istraživanom području.

7. Rezultati i rasprava

7.1. Promjena morfologije i volumena klifa (SfM fotogrametrija)

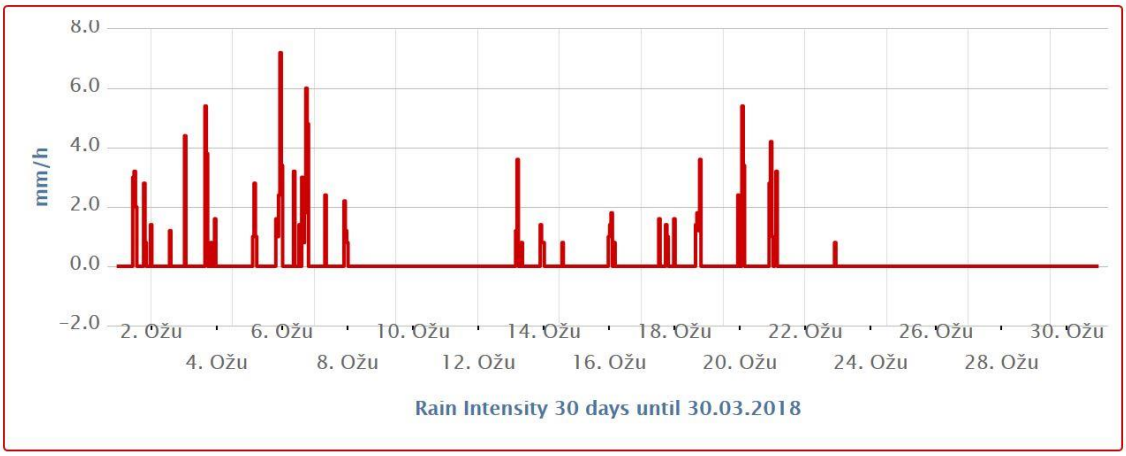
Obradom podataka u programu Agisoft izrađena su dva gusta oblaka točaka za istraživano područje klifa Duilovo (Slika 16 i 17). Na dobivenim DPC prikazima vidljive su razlike u količini i položaju vegetacije i stjenskog materijala na padini. Količina padalina početkom i sredinom ožujka i početkom travnja 2018. bila je vrlo obilna (Slika 18), a naleti juga u ožujku dosezali su brzinu veću od 36 km/h (Slika 19). Iz dobivenih DPC-a izrađeni su digitalni površinski modeli (Slika 20 i 21). Na DSM-ovima iz 29. 04. i 27. 05. prikazana je promjena u visini klifa nastala u periodu između dva snimanja. Za detaljniju analizu podataka i praćenje promjena na klifu izrađen je model razlika na kojem je uočena značajna promjena u volumenu materijala u vršnom dijelu klifa gdje je uočen gubitak, te u bočnom dijelu klifa i krajnjim dijelovima abrazijske terase na kojima je vidljiv porast u količini materijala (Slika 22) i time je definirana pojava odrona.

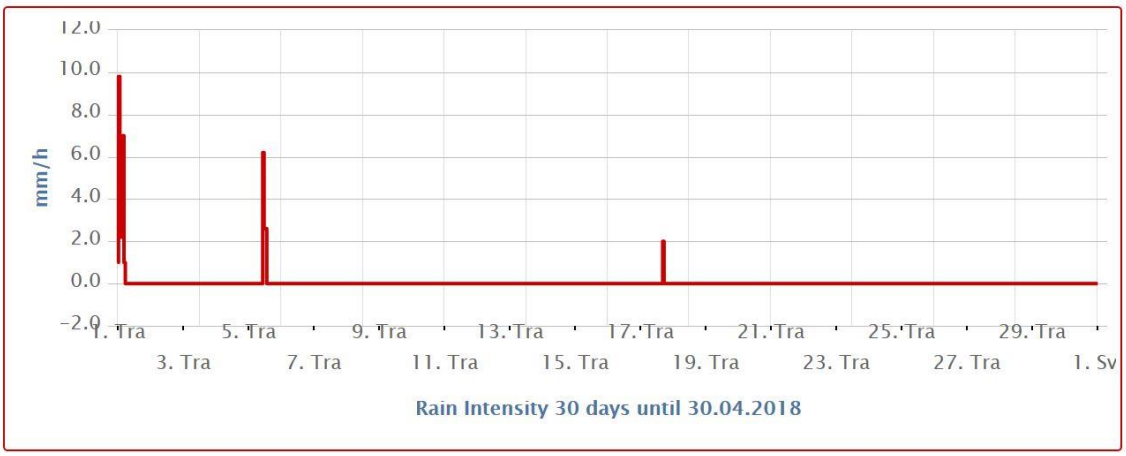
Usporedbom dvaju gustih oblaka točaka (Slika 16 i 17) mogu se uočiti promjene i gubitak materijala na samom vrhu lica klifa (crvena strelica), te prividan gubitak vegetacije na lijevom dijelu padine (crna strelica). Obzirom na doba godine i količinu padalina dolazi do bujanja vegetacije što se vidi na desnoj strani padine (crvena elipsa). Usporedbom DSM modela iz travnja i svibnja najuočljivija razlika u visinama je u vrhu klifa u čijem je dijelu došlo do gubitka materijala (crvena strelica), te u bazi klifa na abrazijskoj terasi (crne strelice) (Slika 21). Potpuna interpretacija podataka dobiva se analizom modela razlike DoD (Slika 23). Unutar izdvojenog pravokutnika A prikazano je snižavanje padine za 2 do 4 metra i time predstavlja područje sa kojega je materijal odronjen. Pravokutnici B (crvena elipsa) i C prikazuju porast visine padine do 2 metra, što bi upućivalo na akumulaciju materijala, ali usporedbom slike s DPC-om za svibanj može se vidjeti da je to posljedica rasta biljaka, a ne nakupljanja odronjenog materijala. Neznatno snižavanje terena primjetno je u pravokutnicima B (crna elipsa) i D. Iako je na tom prostoru vegetacija do svibnja također nabujala, ona je prilikom odrona zasuta materijalom koji se odronio, a težina materijala je spustila razinu površine vegetacije, te se na DSM ovakva promjena očituje kao područe „erozije“. Usporedbom pravokutnika B i DPC-a za svibanj može se vidjeti da je snižavanje visine padine uzrokovano taloženjem dijela odronjenog materijala na biljke, što se dodatno treba potvrditi na slikama iz metode ponovljene fotografije. U pravokutniku D visina abrazijske terase također je snižena što se može pripisati djelovanju valova.

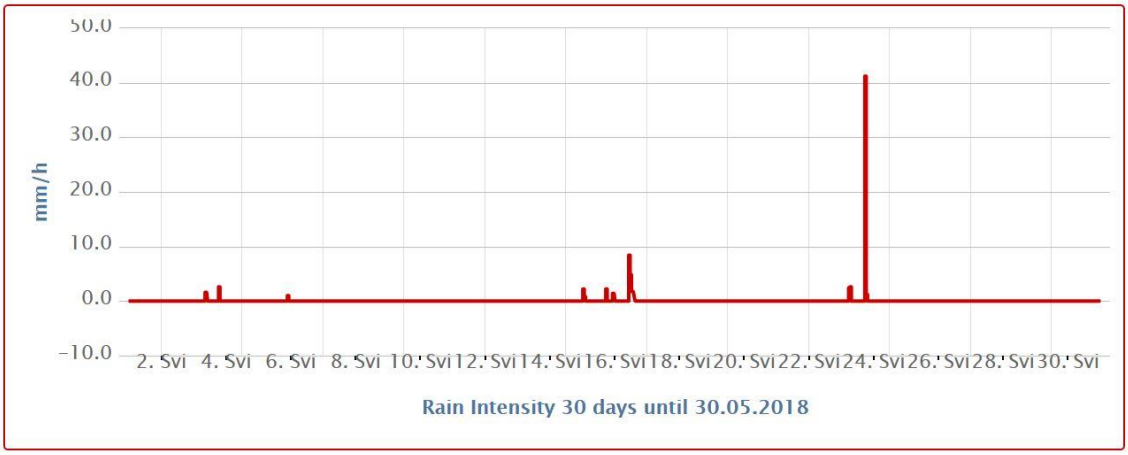


Slika 16. Gusti oblak točaka (DPC) (29. 04. 2018.)

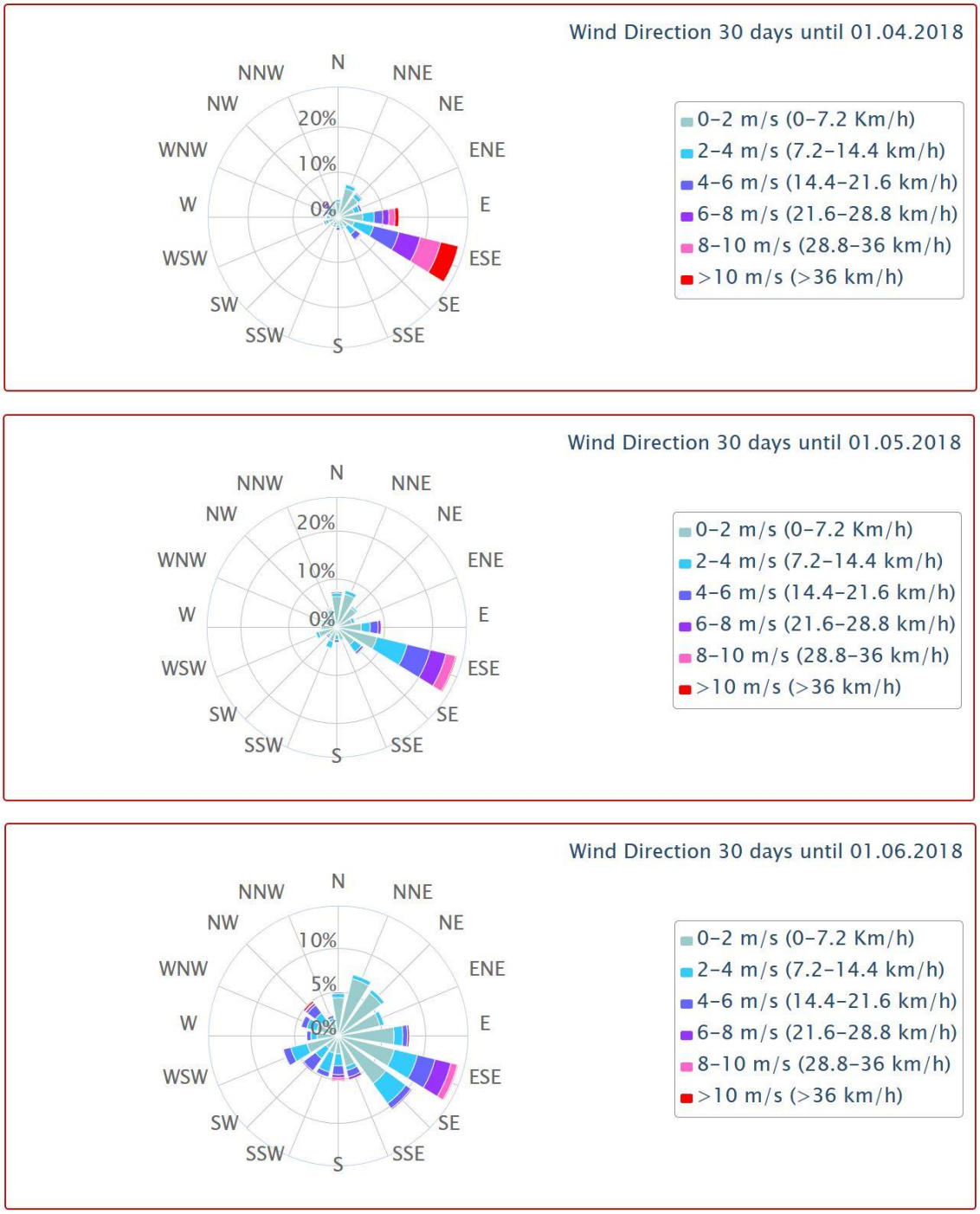
Slika 17. Gusti oblak točaka (DPC) (27. 05. 2018.)



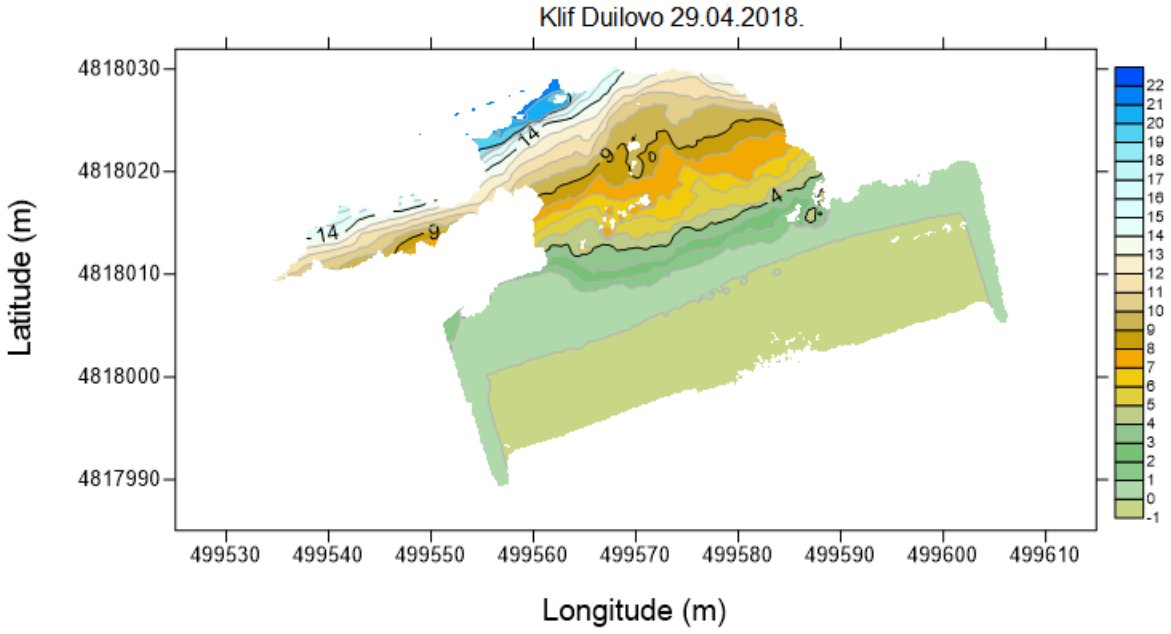




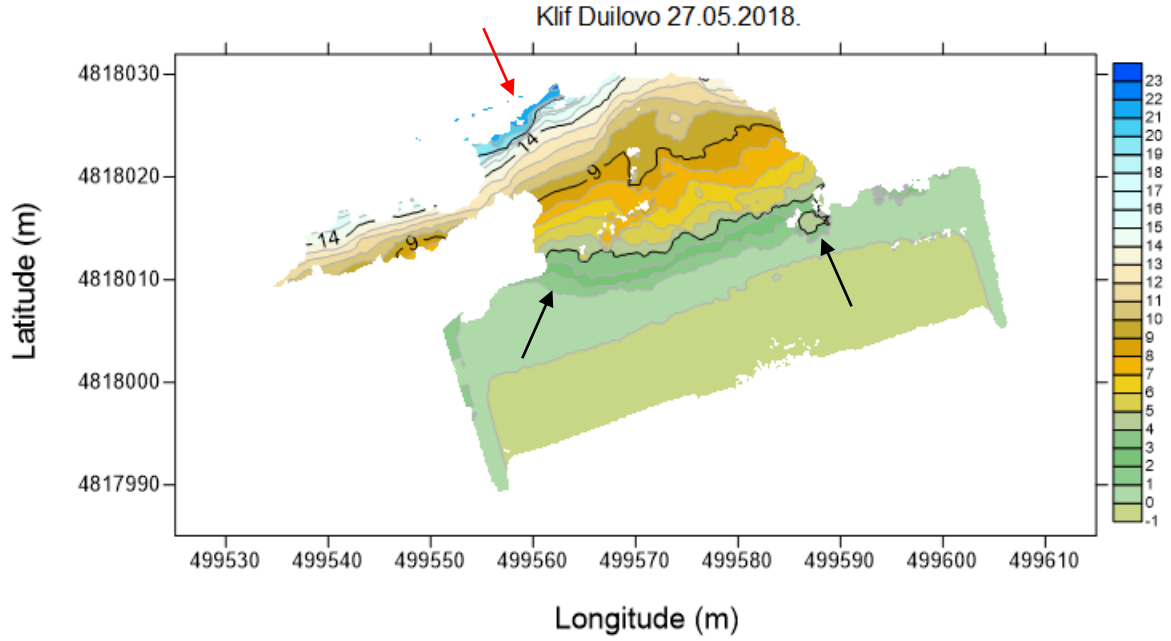
Slika 18. Dnevni intenzitet padalina za ožujak (gore), travanj (sredina) i svibanj (dolje) 2018. (Institut za oceanografiju i ribarstvo, URL 5)



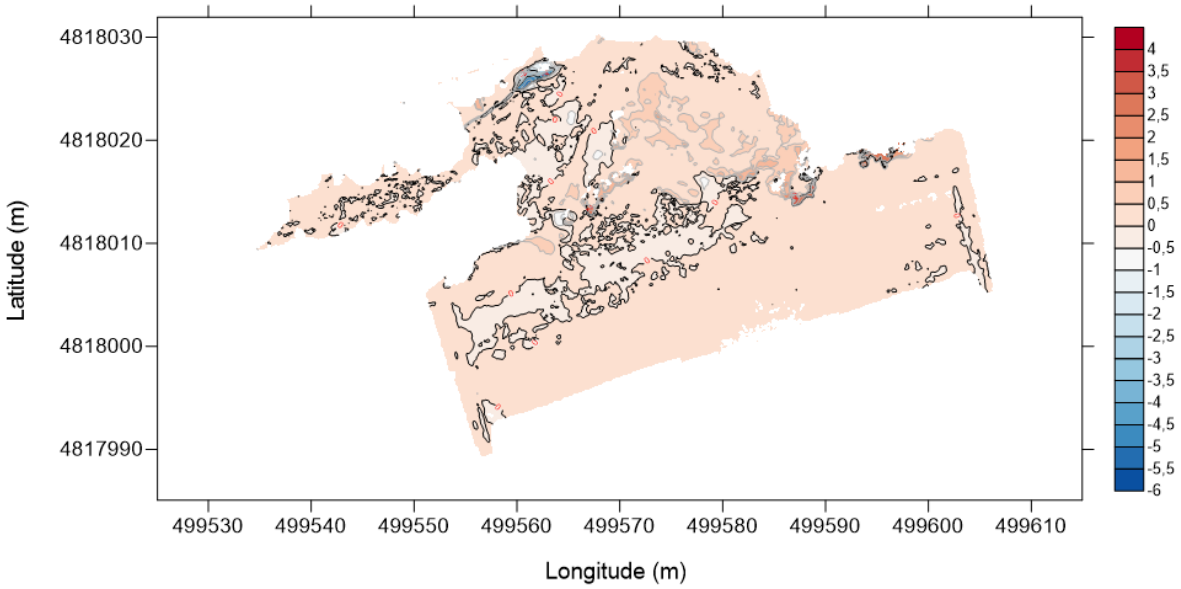
Slika 19. Smjer puhanja vjetra za ožujak (gore), travanj (sredina) i svibanj (dolje) 2018. (Institut za oceanografiju i ribarstvo, URL 5)



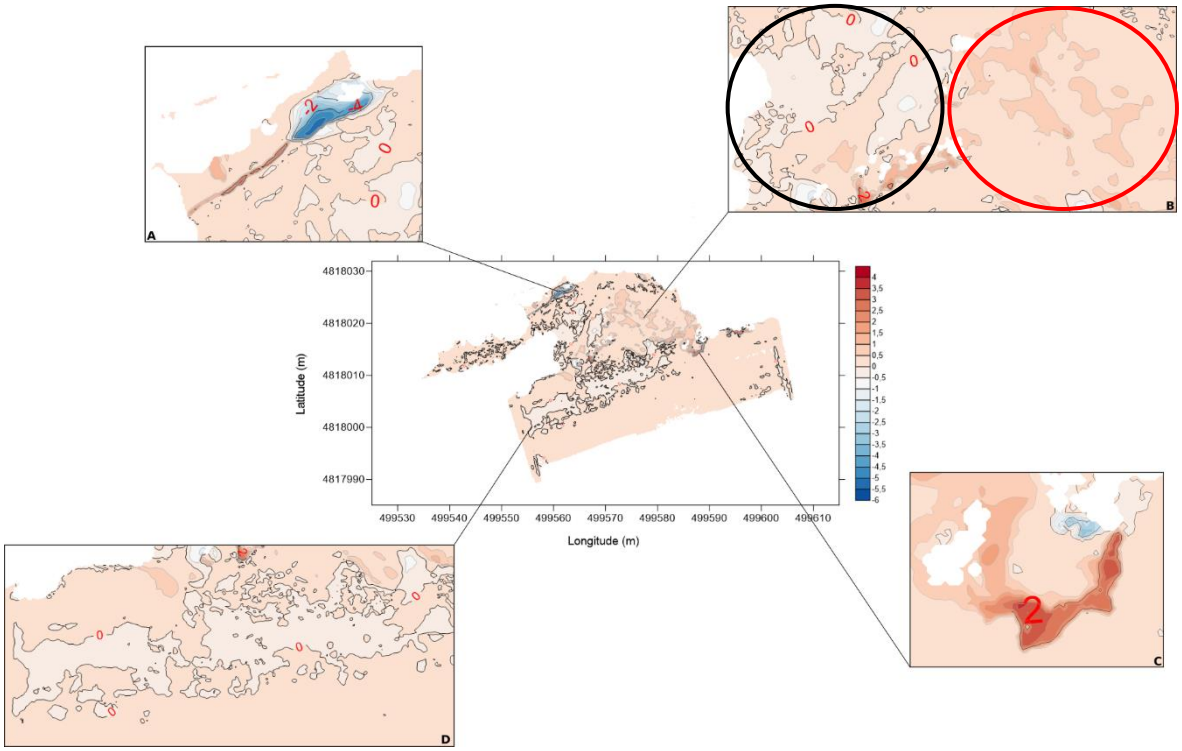
Slika 20. Digitalni površinski model klifa Duilovo (29. 04. 2018.)



Slika 21. Digitalni površinski model klifa Duilovo (27. 05. 2018.)



Slika 22. Rezultat razlike volumena na području odrona između 29. 04. 2018. i 27. 05. 2018.



Slika 23. Rezultat razlike volumena na području odrona između 29. 04. 2018. i 27. 05. 2018. – uvećana mjesta gubitka i akumulacije materijala

7.2. Promjene na licu klifa na temelju metode ponovljene fotografije

Za potrebe izrade ovog diplomskog rada klif Duilovo slikan je s nekoliko različitih točaka gledišta. Skupa sa dijelom slika iz arhive izdvojena su četiri seta slika. Setovi slika formirani su na način da su iz razdoblja promatranja u trajanju od 11 godina izabrane slike na kojima je najjasnije vidljiva i dokumentirana pojedina promjena ili proces. Slike su prikupljane cijelom dužinom klifa. Na dva seta slika prikazani su uočljivi procesi trošenja na različitim dijelovima lica klifa, dok su na druga dva seta primjenom metode ponovljene fotografije uočeni i definirani procesi transporta (padinskih procesa).

7.2.1. Procesi trošenja

Prvi i drugi set fotografija objedinjuje glavne procese trošenja zabilježene cijelom dužinom klifa. Prema Miščević i Vlastelica (2014) interakcijom laporovite podloge i vode dolazi do glavnine promjena u svojstvima ovih, glinama bogatih, stjenskih masa. Slike 23, 24 i 25 prikazuju pojavu brazdi duž cijele padine klifa. Procesi površinskog trošenja te odrona i klizišta često se javljaju na padinama izgrađenim od mekih stijena (šejlovi, glinci, lapori), a u slučaju istraživanog područja radi se o klifu građenom dominantno od lapora (TOŠEVSKI i sur., 2012; GULAM i sur., 2014; MIŠČEVIĆ i VLASTELICA, 2014; VLASTELICA i sur., 2017; PIKELJ i sur., 2018). Obzirom na litologiju šireg područja i nepropusnost flišnih naslaga, procesi trošenja uzrokovani djelovanjem vode na istraživanom području uočavaju se u vidu brazdanja najčešće tankog sloja tla (regolita) ili slabokonsolidiranog vršnog dijela stjenske mase bogate glinama. Pojava brazdi i njihovo produbljivanje nije trenutni proces već se događa kroz dulje vrijeme, što se može uočiti na slikama 24 i 25 slikanih u vremenskom razmaku od godine dana. Obzirom da se radi o laporu, procesi erozije su brzi, jer je za lapor karakteristična visoka stopa denudacije, što je u slučaju flišnih naslaga posljedica površinskog otjecanja vode koje uzrokuje spiranje i pojavu brazdi (GULAM i sur., 2014). Nedostatak ili manjak vegetacije na licu klifa pospješuje neometan kontinuitet trošenja na padini. Na slikama 23 i 25 primjetno je odnošenje eluvija i taložnih konusa erodiranog lapora iz podnožja padine, dok na plaži (abrazijskoj terasi) zaostaju samo krupnije valutice i pijesak. Prema Pikelj i sur. (2014) oblutci i valutice su trošeni do veličine pijeska, a erodirani lapor koji se taloži u podnožju klifa troši se do sitnozrnatih dimenzija te je valnim djelovanjem transportiran u duboko more.

Slika 23. Osipavanje, trošenje i odnošenje materijala valovima, prosinac 2017.

Slika 24. Brazanje na licu klifa, veljača 2020.

Slika 25. Brazdanje na licu klifa, ožujak 2021.

Na slikama 26, 27, 28 i 31 na mjestu proslojka pješčenjaka može se uočiti linija pojave podzemne vode. Ispod nje je primijećeno pojačano trošenje laporovitog materijala, a takav proces poznat je pod engleskim nazivom *sapping* (HAGERTY, 1991). Trošenje lapora događa se uslijed kontinuiranog vlaženja lapora, kao i mehaničkog djelovanja vode koja curi niz padinu ispod linije pojavljivanja podzemne vode. Obzirom na litologiju šireg područja, procjedne vode mogu se u maloj količini naći na kontaktu tla i flišne stjenske mase ili na površinu mogu izvirati u obliku pištevina (FRITZ i KAPELJ, 1998). Pojava *sappinga* u kontaktu različitih litologija mogla bi se pripisati ovim uzrocima.

Slika 29 prikazuje veće područje padine na kojem se osim brazda površinskog otjecanja može uočiti i mrvljenje lapora. Prema Miščević (1998), laporovita komponenta flišnih naslaga pokazuje izrazitu sklonost trošenju nakon što biva izložena procesima vlaženja i sušenja, koji su uglavnom uvjetovani količinom padalina, površinskim otjecanjem i valnim prskanjem. Procesi dezintegracije mogu biti ubrzani prisustvom bubrećih glina (smektita). Osim prisustva smektita na proces trošenja također ima utjecaj stvaranje gipsa koji može nastati na stjenkama pukotina trošenjem lapora. Obzirom da je volumen kristaliziranog gipsa mnogo veći od volumena lapora iz kojega je nastao dolazi do povećanja pritiska i širenja pukotina koji olakšavaju daljnje trošenje. Proširivanje pukotina može biti uzrokovano i procesom naglog upijanja vode u pukotine suhog lapora i zarobljavanja zraka što dovodi do porasta tlaka i širenja pora. Ovaj proces je poznat i pod engleskim nazivom *airbreakage* (MIŠČEVIĆ, 2004). Ovi procesi koji uzrokuju širenje pora unutar laporovitih naslaga omogućavaju dublju infiltraciju i daljnje djelovanje vode. Za mehaničko trošenje (mrvljenje) lapora uzrokovano ovim procesima koristi se engleski termin *slaking*, te je pretpostavljeno dominantni proces degradacije lapora na istraženom klifu. Proces vlaženja i sušenja dovodi do slabljenja dijagenetskih veza u laporu i time uzrokuje ljuštenje od površine prema unutrašnjosti, te se taj trošeni materijal osipava u podnožje klifa (TOŠEVSKI i sur., 2012). Taj se proces može uočiti na slikama 26 i 27. Slika 30 prikazuje drugi glavni oblik trošenja lapora, a to je raspadanje uzorka na manje dijelove po pukotinama, što je također oblik *slakinga*, a događa se u intertajdalu nakon pada materijala s padine na bazu klifa.

Slika 26. *Sapping* u bazi klifa, svibanj 2018.

Slika 27. *Sapping* u bazi klifa, ožujak 2019.

Slika 28. *Sapping* u bazi klifa, veljača 2020a

Slika 29. *Sapping* i *slaking* na licu klifa, veljača 2020b

Slika 30. Trošenje komada lapora (*slaking*) u intertajdalu pod utjecajem valova, veljača 2020.

Slika 31. *Sapping* u bazi klifa, ožujak 2021.

7.2.2. Procesi transporta

Treći set slika slikan je s pozicije betonskog dijela plaže koja se nalazi jugozapadno od šume i parka na vrhu klifa, odnosno na mjestu odrona detektiranog SfM fotogrametrijeom, a obuhvaća dio lica klifa Duilovo s pripadajućim dijelom abrazijske terase. Usporedbom odabranih slika (Slika 32 do 51) zabilježene su promjene u količini i poziciji vegetacije na padini, promjene u ponašanju sedimenta u bazi klifa (na području abrazijske terase), te količina i kretanje materijala na padini.

Na slici 32 pokrivenost klifa vegetacijom je značajna. Vršni dio klifa je strm i u potpunosti ogoljen, dok na većini površine lica klifa raste trava i nisko raslinje. Abrazijska terasa u podnožju klifa vrlo je uska te se uz nju nalazi više raslinje (pretežito borovi). S obzirom na pokrivenost klifa vegetacijom, padinski procesi nisu prisutni ili, ako su prisutni, nisu dobro vidljivi, osim na donjem djelu klifa gdje je prisutno osipavanje (crvena elipsa). Vegetacija je obilna radi doba godine (travanj): ima još dovoljno kiše, a temperatura je u porastu. Gotovo potpuno suhi dijelovi višeg raslinja u zoni zapljuskivanja i intertajdala na slici ukazuju na vjerojatan odron i/ili klizište koji su vjerojatno prethodili datumu slikanja. Osim u svom vršnom dijelu, klif u slikanom području pokazuje konveksan oblik.

Slika 32. Dio istraživanog područja na klifu Duilovo uz betoniranu plažu, travanj 2012.

Na slici 33 je na licu klifa primjetno manje vegetacije u odnosu na prijašnju godinu. Jedan od mogućih razloga je vrijeme slikanja (veljača) prije početka bujanja vegetacije. Slojevi

fliša od kojih je klif izgrađen izloženiji su površinskim procesima erozije, što se očituje u akumulaciji materijala u podnožju klifa. U ovom slučaju radi se o odlomljenim fragmentima stijene većih dimenzija, a njihova akumulacija rezultat je odronjavanja materijala niz padinu. Abrazijska terasa u podnožju klifa primjetno je šira u odnosu na prethodnu fotografiju, što može biti i odraz trenutne oseke ili niske vode (u trenutku snimanja bila je oseka s razinom vode od +0,05 m, URL 5). Na kontaktu s morem vidljivo je djelovanje valova na akumulirani materijal. Suha vegetacija iz godine prije je odnesena ili uklonjena.

Slika 33. Područje odrona na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, veljača 2013.

Slike 34 a i b slikane su gotovo 5 godina nakon slike 33 i odmah se može primijetiti da na klifu nije bilo značajnijih događaja u proteklom vremenu. Ono što se također može primijetiti jest to da je doseg materijala u dnu klifa u smjeru mora nešto manji, te da materijal koji se nakuplja u podnožju gotovo prati liniju potpornog zida, što kod prethodne fotografije nije bio slučaj. Takva situacija ukazuje na djelovanje valova na podnožje klifa, te je nagib padine lica klifa u donjem dijelu strmiji u odnosu na sliku iz 2013. godine. Na slici je očita bujnija vegetacija višeg raslinja i to pretežito na središnjem dijelu lica klifa, a u neposrednoj blizini betoniranog dijela plaže i pri dnu klifa. Postoji mogućnost da je rast stabla bora u sredini klifa (crvena elipsa) u proteklih pet godina djelomično stabilizirao njegovu padinu, te tako spriječio značajnije procese trošenja i erozije. Akumulirano kršje vidljivo na slici 33 u potpunosti je uklonjeno s abrazijske terase, na kojoj dominira sitniji sediment, što također potvrđuje kontinuirano djelovanje valova na nožicu klifa. Kad je visoka vegetacija u pitanju,

slikama 34 i 35 pokazuje se da su borovi na desnoj strani klifa i na njegovom vrhu u potpunosti suhi. Ovakva situacija posljedica je nekoliko divljih požara koji su zahvatili klif tijekom listopada i studenog 2017. (odnosno svega mjesec dana prije slikanja fotografije). Moguće je da takav događaj destabilizira klif u narednom razdoblju, jer je vegetacija značajno izgubila svoju funkciju. Također, posljedice požara pospješuju i dezintegraciju same stijene, jer zbog porasta temperature dolazi do naglog zagrijavanja i stvaranja pukotina.

Slika 34. Područje odrona na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, prosinac 2017.

Slika 35. Opožareno područje lica klifa na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, prosinac 2017.

Na slici 36, na dijelu lica klifa u čijem je podnožju potporni zid i dio plaže, vegetacija prelazi u visoke biljke koje djelomično zaklanjaju lice klifa od površinskih erozijskih procesa te stabiliziraju padinu. U središnjem djelu klifa podno kojeg je prirodna abrazijska terasa i dalje je prisutno nisko raslinje, te je u tom dijelu klifa došlo do ponovnog gravitacijskog spuštanja velike količine stijena, tla i vegetacije niz padinu. Može se vrlo lako zaključiti da je riječ o klizanju, jer su mladi borovi na prethodnoj slici bili na sredini padine, a na slici 36 su spušteni u niži predio (crvena elipsa), pri čemu su zadržali svoj međusobni razmještaj. Najveći fragmenti skliznule stjenske mase nalaze se najdalje od lica klifa i pomaknuti su sve do kontakta s morem, dok su manji fragmenti zaostali najbliže klifu i pri vrhu akumuliranog materijala. Pojava klizanja materijala može se povezati i sa velikom količinom padalina u mjesecima koji su prethodili (Slika 18).

Slika 36. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, travanj 2018.

Na slici 37 je u odnosu na prethodnu sliku (tj. prethodni mjesec) evidentiran značajan nedostatak materijala pri samom vrhu klifa (narančasta elipsa), dok je značajna količina materijala primijećena na središnjem i dijelu klifa ispred potpornog zida i u kontaktu s morem (crvene elipse). Prekrivenost lica klifa vegetacijom je više/manje jednolika u razdoblju proteklih mjesec dana, što ukazuje na to da je bila riječ o odronu materijala s vršnog dijela klifa, pri čemu je središnji dio padine ostao manje-više na mjestu, ali je prekriven odronjenim materijalom. Pojava odrona u vremenu između travnja i svibnja 2018. godine rekonstruirana je fotogrametrijski (prethodno poglavlje), pri čemu su pojave odlamanja stijena, zasipavanja te rasta vegetacije i kvantificirane (Slika 23).

Slika 37. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, svibanj 2018.

U periodu od svibnja do studenog 2018. godine nisu zabilježeni daljnji odroni vršnog dijela klifa, a prethodno odronjeni materijal indiciran dvjema elipsama na slici 37 djelomično je i postepeno tijekom šest mjeseci uklonjen s padine, nakon čega su od stjenskog materijala „očišćeni“ dijelovi prethodno zasutih mladih borova (Slika 38). U odnosu na sliku 37, šest mjeseci kasnije može se primijetiti da je u podnožju klifa na abrazijskoj terasi značajna količina materijala odnesena, te je zaostalo pretežito kršje većih dimenzija. Ovakva razlika može se opet pripisati djelovanju valova u zoni intertajdala i zoni zapljuskivanja.

Slika 38. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, studeni 2018.

Slika 39 prikazuje daljnje povlačenje lica klifa u naredna četiri mjeseca i to prvenstveno ustrmljivanjem njegovog donjeg dijela valnom abrazijom, iako značajnije razlike u morfologiji padine nisu primijećene. Dio vegetacije sa središnjeg dijela klifa iznad abrazijske terase uklonjen je skupa s površinskim rastresitim materijalom. Manja zastupljenost vegetacije je vrlo vjerojatno i odraz vremena fotografiranja nakon zime, odnosno vremena mirovanja vegetacije. Ono što je moguće primijetiti nakon požara 2017. godine (Slika 35) jest značajno prorjeđenje izgorjelog raslinja. Na dijelu baze klifa nastavlja se valno djelovanje i uklanjanje velikih fragmenata kršja. Većina abrazijske terase prekrivena je sedimentom koji je sitnije granulacije od komada stijena koje se nalaze uz potporni zid. Ovakva situacija ukazuje na kontinuirano trošenje fragmenata fliša u zoni intertajdala i zoni zapljuskivanja.

Slika 39. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, ožujak 2019.

Na slici 40 vrlo je dobro vidljivo da je dio mladih borova koji je sedam mjeseci ranije rastao na središnjem dijelu padine klifa u potpunosti prenesen u njegovo podnožje. Ukoliko se usporede sve slike od prosinca 2017., može se primijetiti da se spomenuti borovi vremenom nalaze sve niže i niže, što prikazuje pojavu postepenog klizanja u ovom dijelu klifa. Da je riječ o tipu rotacijskog klizanja dokazuju sve prethodne slike (Slika 34 do 40), na kojima se vidi da je stvorena zakrivljena ploha klizanja (označena na slici 40 crvenom linijom), te da se donji dio kretao prema van, stvarajući stopalo (eng. *landslide toe*). Materijal pokrenut klizanjem uključuje stjensku masu, površinski sloj (tlo) i vegetaciju. Kako je prethodno navedeno, kontinuirano djelovanje valova postepeno uklanja materijal s vrha stopala klizišta, ostavljajući manje-više ustrmljenu padinu, te otvarajući mogućnost time za dalje padinske procese (osipavanje, odrone i sl.). Akumulirani materijal u podnožju klifa ne pokazuje dominaciju krupnog kršja kao na prijašnjim slikama, što ukazuje na postepeno usitnjavanje većih fragmenata valovima i konačno odnošenje usitnjenog materijala. Ono što svakako treba spomenuti kad je u pitanju slika 40 je primjetno prorijeđena visoka vegetacija desno od tijela klizišta, kao i na vrhu klifa.

Slika 40. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, studeni 2019.

Situacija iz svibnja 2020. u odnosu na studeni 2019. ukazuje na daljnje promjene na promatranom dijelu klifa. Mladi borovi koji su šest mjeseci ranije došli u kontakt s morem mehanički su uništeni i požutjelih iglica. Jedinom većem boru među njima na donjoj sredini stopala klizišta (crvena elipsa) korijenje je djelomično na zraku, a sam bor je dodatno spušten, što ukazuje na daljnje klizanje, ali i odnošenje materijala površinskim spiranjem. Kako se radi o vremenu zimskog perioda pojačanih oborina (URL 4, DHMZ), posebice u studenom u kojem je zabilježena pojava klizišta, površinsko spiranje na flišnim padinama također je očekivan način trošenja osnovne stijene. Materijal koji je transportiran daljnjim klizanjem u vremenu studenog 2019. do svibnja 2020. dospio je do razine djelovanja valova te je kroz vrijeme do snimanja slike 41 većina materijala s abrazijske terase uklonjena. Visoko raslinje i vegetacija na licu klifa, desno od nastanka klizišta dodatno je prorijeđena i s vremenom uklonjena s lica klifa.

Slika 41. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, svibanj 2020.

Najrecentnija slika 42 iz ožujka 2021. godine prikazuje izraženiji i daljnji gubitak vegetacijskog pokrova, prorjeđivanje niskog raslinja i odumiranje visokog, kako na padini klifa, tako i na njegovom vrhu. Stopalo klizišta koje je bilo vidljivo 2013. i 2018. (Slike 33, 36, 37 i 38) je djelovanjem valova gotovo u potpunosti potrošeno, a materijal rastrošen i uklonjen s područja abrazijske terase, pri čemu je kao sediment plaže preostao samo sitniji sediment.

Slika 42. Područje gravitacijskog kretanja materijala na dijelu klifa Duilovo uz betoniranu plažu, ožujak 2021.

Analizom trećeg seta slika, prikupljanog u periodu od jedanaest godina, na istraživanom dijelu padine zabilježena su kretanja masa u vidu odrona i klizišta. O povezanosti razdoblja velike količine oborina i nastanka klizišta u flišu pisali su mnogi autori (BENAC i sur., 2011; ZORN, 2012; GULAM i sur., 2014; MIŠČEVIĆ I VLASTELICA, 2014; PRODAN i sur., 2017), a ta se poveznica može uočiti na primjeru padine istraživanog klifa. Do pojave klizanja dolazi u vrijeme zimskih i prelaskom u proljetne mjesece kada je količina padalina na istraživanom području visoka. Osim masovnog kretanja tla, kršja i stjenske mase, na opisanim fotografijama zabilježen je kontinuirani proces površinskog trošenja lapora što dodatno destabilizira padinu i time pospješuje inicijaciju kretanja veće mase materijala. Rezultati ispitivanja tla i trošnog stjenskog materijala u flišu na području Istre pokazuju da se kontinuiranim trošenjem sitno-zrnastog materijala na padini povećava plastičnost sloja, smanjuje se kohezija i stvaraju uvjeti za klizanje materijala (PRODAN i sur, 2017). Prema Prodan i sur. (2017) podložnost klizanju flišnih stjenskih masa ovisi o sadržaju sitno-zrnaste komponente (lapora), prisustvu diskontinuiteta i pukotina, maloj jednoosnoj tlačnoj čvrstoći lapora, prisustvu bubrećih minerala glina te procesima vlaženja i sušenja, a svi od navedenih faktora ključnih za pojavu klizišta prisutni su na istraživanoj padini klifa Duilovo. Prema Miščević i Vlastelica (2014), proces klizanja na padinama u flišu ostaje kontinuiran, ukoliko nisu poduzete mjere stabilizacije, što je na istraživanom području, te generalno području grada Splita česta pojava. Ponavljanje procesa klizanja uvelike je uzrokovano odnošenjem materijala iz baze klifa i stopala klizišta, što omogućava stvaranje prostora za novu kliznu fazu. Prisustvo vegetacije na licu klifa varira ovisno o dobu godine, a njena količina znatno je smanjena nakon požara 2017. godine. Utjecaj vegetacije na stabilnost padine nije u potpunosti jasan. Generalno, veća pokrivenost vegetacijom štiti padinu (i površinski sloj tla i stijenu ispod) od površinskih procesa trošenja, dok, s druge strane, rast korijenja u podlozi koja je sama po sebi podložna mrvljenju i mehaničkom trošenju dugoročno može imati i negativan utjecaj na stabilnost padine.

Četvrti set slika uzet je sa šireg područja klifa u čijem je zaleđu urbanizirano područje, a lice klifa i plaža (abrazijska terasa) su prirodni (nema potpornih zidova). Usporedbom slika 43 do 51 uočene su promjene u količini vegetacije na padini klifa, količini materijala na abrazijskoj terasi te promjene u nagibu padine i količini materijala na njoj. Pojave koje su zabilježene cijelom dužinom klifa posebno će biti opisane u podnožju kuće koja se nalazi na samom rubu vrha klifa.

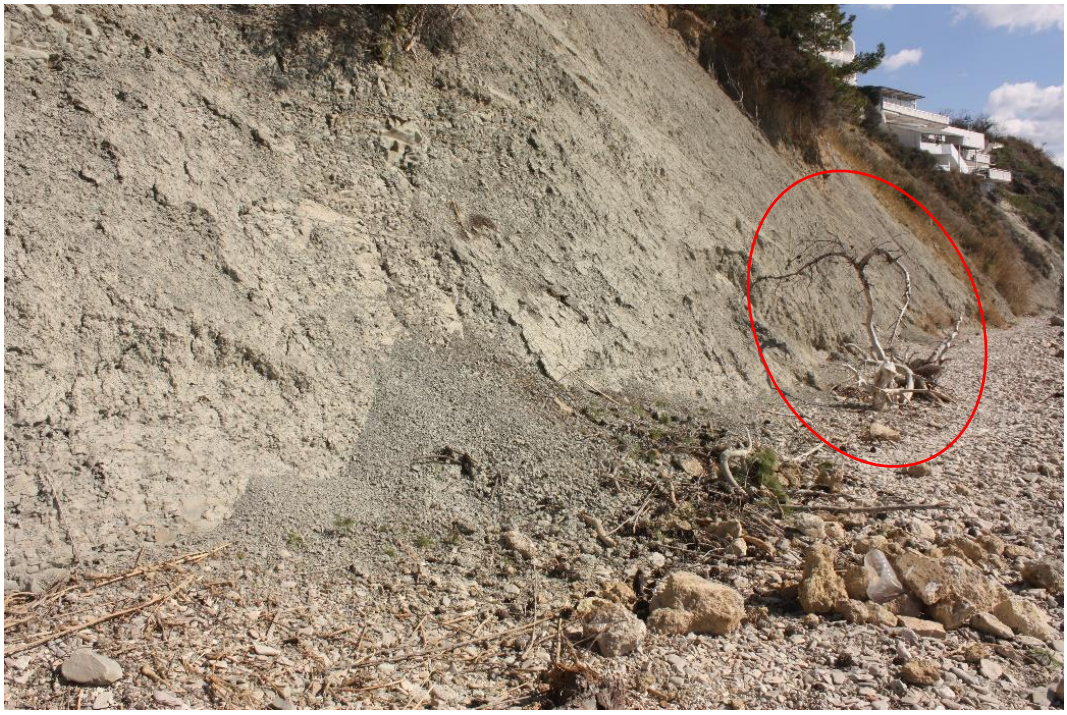
Slika 43 prikazuje taložne konuse malih dimenzija (do 2 m) koji se protežu cijelom dužinom baze klifa. U periodu prelaska iz zimskih u proljetne mjesece na slici 44 vidljivo je da su konusi uklonjeni sa baze klifa, što ukazuje na doseg valova sve do njegove padine. Najprimjetnija razlika vidljiva je u položaju vegetacije u odnosu na klif (pr. crvena elipsa): osušeno drvo je na slici 43 bilo „zarobljeno“ u jednom od konusa, a na slici 44 je evidentno da je materijal oko suhog drveta u potpunosti uklonjen.

Slika 43. Dno klifa sa zabilježenim procesom osipavanja, prosinac 2017.

Na slici 45 ponovno je prisutna pojava taložnih konusa, a prema smanjenoj i osušenoj vegetaciji je primjetno daljnje povlačenje lica klifa. Usporedbom slike 44 i slike 46 uočena je značajna erozija na području kontakta različitih litologija (crna elipsa). Na slikama u razdoblju od 2017. do 2020. godine opaženo je kontinuirano stvaranje konusa koji potom bivaju odneseni djelovanjem valova. Djelovanje valova na abrazijskoj terasi u podnožju istraživanog klifa je relativno blago, a razlike u razini visokih i niskih voda su male (Institut

za oceanografiju i ribarstvo, URL 5), do otprilike 45 cm. Ovaj ciklički proces stvaranja i odnošenja konusa omogućuje očuvanje baze klifa od klasične erozije u bazi klifa u kojoj nastaju valne potkapine i nadvisivanje baze klifa, te paradoksalno time do neke mjere doprinosi stabilnosti padine i smanjivanju rizika od pojave odrona i klizišta.

Slika 44. Dno klifa, travanj 2018.



Slika 45. Dno klifa sa zabilježenim procesom osipavanja, ožujak 2019.

Slika 46. Dno klifa , veljača 2020.

Promjene na padini klifa u podnožju kuće prikazane su slikama iz razdoblja od 2017. do 2021. godine. Objekt se nalazi na rubu vrha klifa te je degradacijom i povlačenjem lica klifa vremenom sve više ugrožen. Na slici 47 može se uočiti osipavanje ne samo trošenog stjenskog materijala već i tla, što se očituje u različitoj boji materijala konusa. Također je vidljivo da iako se dio konusa odnosi valovima (crvena elipsa), osipavanje je konstantno prisutno i formira nove taložne konuse. Na slici 48 taložni konusi su odneseni sa baze klifa djelovanjem valova, a primjetan je i manjak vegetacije koji je osušen i time stvara veću podložnost lica klifa daljnjoj eroziji. Valno djelovanje najuočljivije je na slici 49, a uzrokuje eroziju baze klifa u kojoj se talože konusi osipavanog materijala. Na slici 49 uočena je i pojava *sappinga* (crvena elipsa), koju je bilo moguće naći na više mjesta duž baze klifa. Valna abrazija, osipavanje i *sapping* koji se mogu uočiti na slikama čimbenici su koji dodatno smanjuju njegovu stabilnost. Kao posljedica toga, na slici 50 vidljivo je značajno osipavanje s viših dijelova klifa, neposredno ispod sagrađenog objekta. Osipani materijal uzrokuje povlačenje klifa unatrag i time direktno ugrožava objekt na vrhu klifa (crvena elipsa). Osim stjenskog materijala i tla s padine, osipavanje za posljedicu često ima uklanjanje i velikog dijela niske vegetacije, koja uslijed prouzročene nestabilnosti s vremenom padne na bazu klifa. Usporedbom slike 47 i slike 51 može se uočiti značajan gubitak niskog raslinja na licu klifa te je padina klifa na 51 vidno strmija. Proces osipavanja

i prisutnost konusa i dalje su vidljivi, a u lijevom kutu slike (crvena elipsa) vidljiv je i proces *sappinga* na kontaktu tankog sloja pješčenjaka ispod kojega je erodiran lapor.

Slika 47. Dno klifa ispod kuće, prosinac 2017.

Slika 48. Dno klifa ispod kuće, travanj 2018.

Slika 49. Dno klifa ispod kuće, ožujak 2019.

Slika 50. Dno klifa ispod kuće, veljača 2020.

Slika 51. Dno klifa ispod kuće, ožujak 2021.

Na širem području klifa na kojem je vidno manje vegetacije vrlo se dobro očituje proces osipavanja. Taj se proces generalno može pripisati mehaničkom trošenju lapora uzrokovanog procesom *slakinga*. Proces osipavanja, iako konstantan, intenzivniji je u zimskim mjesecima (Slika 47). Proces trošenja i povlačenja klifa na ovom dijelu u odnosu na dio na kojem dolazi do odrona i klizišta puno je sporiji. Valno se djelovanje očituje u odnosu taložnih konusa iz baze klifa, a zbog nedostatnog intenziteta djelovanja valova nisu zapažene pojave valnih potkapina. Prema Miščević i Vlastelica (2014) trošenje fliša građenog od izmjeničnih slojeva pješčenjaka i lapora može uzrokovati odlamanje dijelova slojeva pješčenjaka i pojavu odrona. Na ovom dijelu padine, obzirom da je klif pretežito građen od lapora s rijetkim slojevima pješčenjaka, diferencijalno trošenje može se zabilježiti pojavom *sappinga*.

8. Zaključak

Na istraživanom području klifa Duilovo dominantna je erozija vodom, uzrokovana procesima vlaženja i sušenja, te spiranjem i procjeđivanjem vode. Unutar razdoblja od 11 godina, na padini klifa zabilježena su periodička kretanja masa u vidu odrona i klizišta, te kontinuirano osipavanje u podnožju klifa.

Dio padine u čijem je podnožju potporni zid snimljen je metodom SfM fotogrametrije što je u kombinaciji s metodom ponovljene fotografije omogućilo ne samo utvrđivanje pojave odrona, već i kvantifikaciju promjene visine materijala na padini. Na tom dijelu padine, zbog kontinuirane površinske erozije, stabilnost vršnog dijela klifa dodatno je oslabljena. Na razlikovnom modelu napravljenom za odron 2018. godine vidi se da je materijal odronjen upravo na tom dijelu klifa, a osim oslabljivanja vršnog dijela klifa procesi površinskog trošenja na padini omogućavaju i kontinuirano klizanje materijala prema bazi klifa. Potporni zid dijelom je stabilizirao klif, jer je omogućen rast višeg bilja što je privremeno ojačalo površinski sloj i spriječilo ekstenzivnu površinsku eroziju. U zaleđu dijela klifa na kojem je došlo do odrona nalazi se hotelski kompleks, a uz sam rub klifa i šetnica čiji je dio uništen povlačenjem klifa i prije prve zabilježene slike iz 2012. godine. Posljedica pojave odrona na ovoj obalnoj padini je povlačenje lica klifa, koje je mjerljivo u razdoblju manjem od analiziranih promjena proteklih 11 godina. Pojava masovnog kretanja na padini klifa direktno ugrožava infrastrukturu u vrhu, a potencijalno i kupače na plaži u podnožju klifa.

Na širem području dijela klifa koji nije strukturno ojačavan potpornim zidovim erozija lica klifa je konstantna, ali sporija. Padinski proces koji dominira je osipavanje trošenog materijala uzrokovanom procesima vlaženja i sušenja. Stabilnost padine u podnožju kuće na vrhu klifa oslabljena je, a za posljedicu ima intenzivniji proces osipavanja, a valno djelovanje i gubitak materijala je izraženiji. Iz slika korištenih za metodu ponovljene fotografije uočeno je da čak i proces osipavanja kojim se uklanja manja količina materijala, u periodu od 11 godina može značajno ugroziti sigurnost objekata i infrastrukture u vršnom dijelu klifa.

Stabilizacija padine može se postići smanjenjem nagiba padine kako bi se omogućilo zadržavanje trošenog materijala na padini i rast biljaka. Druga mogućnost je pokrivanje cijele površine lica klifa uporabom geosintetike ili raspršenog betona (MIŠČEVIĆ I VLASTELICA, 2014). Trajna sanacija padina u flišnim područjima s dominantnom laporovitom komponentom moguća je jedino ako se minimalizira ili potpuno ukloni utjecaj

površinskog trošenja i utjecaja vode (i površinske i podzemne), što u pravilu nije u potpunosti moguće.

9. Literatura

ADAM, J.C. i CHANDLER, J.H. (2002): Evaluation of Lidar and Medium Scale Photogrammetry for Detecting Soft-Cliff Coastal Change. Photogrammetric Record, 17, 405–418.

BENAC, Č. (2016): Rječnik pojmova u općoj i primijenjenoj geologiji. Građevinski fakultet u Rijeci, Hrvatska.

BENAC, Č., DUGONJIĆ, S., VIVODA, M., OŠTRIĆ, M., ARBANAS, Ž. (2011): A complex landslide in the Rječina Valley: results of monitoring 1998-2010. Geologia Croatica, 64, 239–249.

BIRD, E.C.F. (1995): Geology and scenery of Dorset. Ex Libris Press, Bradford, UK.

BIRD, E.C.F. (2016): Coastal cliffs: morphology and management. Springer, Švicarska. 92 str.

BRUNSDEN, D. i PRIOR, D.B. (1984): Slope Instability. Wiley & Sons, New York. 320 str.

CASAS-CRIVILLÉ, A. i VALERA, F. (2005): The European bee-eater (Meropsapiaster) as an ecosystem engineer in arid environments. Journal of Arid Environments, 60, 227–238.

CLAYTON, K. M. i SHAMOON, N. (1998): A new approach to the relief of Great Britain, II. A classification of rocks based on relative resistance. Geomorphology, 25, 155–171.

CROSSLAND, J.C., BAIRD, D., DUCROTOY, J. P., LINDEBOOM, H. (2005): The Coastal Zone – a Domain of Global Interactions. U: Crossland, J.C., Kremer, H. H., Lindeboom, H.J., Crossland, J. I. M. i Le Tissier, M. D. A. (Ur.): Coastal Fluxes in the Anthropocene. Springer, 231 str.

CURIĆ, B. i CURIĆ, Z. (1999): Školski geografski leksikon: temeljni pojmovi opće geografije za osnovne i srednje škole. Hrvatsko geografsko društvo, Zagreb, Hrvatska.

DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J. (1991): Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of Coastal Research, 7, 723–744.

EUROSION (2004): Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. IV dio - A Guide to Coastal Erosion Management Practices in Europe: Lessons Learned. Hague, The Netherlands: Eurosion, Directorate General Environment European Commission. (http://www.eurosion.org/reports-online/part4.pdf).

FAIRBRIDGE, R.W. (1968): The Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold Book Corporation, New York. 1295 str.

FIRPO, G., SALVINI, R., FRANCIONI, M., RANJITH P.G. (2011): Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48, 1045–1054.

FRASER, C.S. i CRONK, S. (2009): A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 328–333.

FRITZ, F. i KAPELJ, J. (1998): Osnovna hidrogeološka karta Hrvatske 1:100.000, Tumač za listove Split i Primošten, Institut za geološka istraživanja Zagreb, 41. str

GENCHI, S.A., VITALE, A.J., PERILLO, G.M.E., DELRIEUX, C.A. (2015): Structure-from-Motion Approach for Characterization of Bioerosion Patterns Using UAV Imagery. Sensors, 15, 3593–3609.

GREENWOOD, R.O. i ORFORD, J.D. (2007): Factors controlling the retreat of Drumlin coastal cliffs in a low energy marine environment–Strangford Lough, Northern Ireland. Journal of Coastal Research, 23, 285–297.

GUERRA A.J.T. i JORGE M.C.O. (2014): Hazard risk assessment - A case study from Brazil. Geographical Review, 27, 12–15.

GUERRA, A.J.T., FULLEN, M., OLIVEIRA JORGE, M.C.O., RODRIGUES BEZERRA, J.F., SHOKR, M. (2017): Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. Pedosphere, 27, 27–41.

GULAM, V., POLLAK, D. i PODOLSZKI, L. (2014): The analysis of the flysch badlands inventory in central Istria, Croatia. Geologia Croatica, 67, 1-15.

GULYAEV, S.A. i BUCKERIDGE, J.S. (2004): Terrestrial Methods for Monitoring Cliff Erosion in an Urban Environment. Journal of Coastal Research, 203, 871–878.

HAGERTY, D.J. (1991): Piping/sapping erosion. I: Basic considerations. Journal of Hydraulic Engineering, 117, 991–1008.

HAJNA, N.Z. (2019): Dinaric karst - Geography and geology. U: White, B. W., Culver, C. D. i Pipan, T. (Ur.): Encyclopedia of caves. 3. izdanje. Academic Press. s353–362

HAMPTON, M.A. i GRIGGS, G.B. (2004): Formation, Evolution, and Stability of Coastal Cliffs–Status and Trends. USGS Professional Paper 1693, 1–4.

HASAN, O., MIKO, S., ILIJANIĆ, N., BRUNOVIĆ, D., DEDIĆ, Ž., ŠPARICA MIKO, M., PEH, Z. (2020): Discrimination of topsoil environments in a karst landscape: an outcome of a geochemical mapping campaign. Geochemical Transactions, 21:1, 4.

HINCKS, K.D. i CRUDEN, D.M. (2003): The use of repeat terrestrial photography in the study of landslide hazards, 3. kanadska konferencija geohazarda, Edmonton, Alberta, 185–192.

HOBBS, P.R.N., HUMPHREYS, B., REES, J.G., TRAGHEIM, D.G., JONES, L.D., GIBSON, A., ROWLANDS, K., HUNTER, G., AIREY, R. (2002): Monitoring the role of landslides in 'soft cliff' coastal recession. U: McInnes, R.G. i Jakeways, J. (Ur.): Instability Planning and Management. Thomas Telford, London. 589–600.

HOQUE, M.A i POLLARD, W.H. (2016): Stability of permafrost dominated coastal cliffs in the Arctic. Polar Science, 10, 79–88.

JAMES, M.R. i ROBSON, S. (2012): Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 117, F03017.

JELASKA, V. (2002): Carbonate platforms of the External Dinarides. U: Vlahović, I. i Tišljar, J. (Ur.): Evolution of Depositional Environments from the Palaeozoic to the Quaternary in the Karst Dinarides and Pannonian Basin, IAS-ov 22. susret sedimentologa, Opatija, Hrvatska, Vodič ekskurzija, 67–71.

KERSHAW, S. i GUO, L. (2001): Marine notches in coastal cliffs: indicators of relative sea-level change, Perachora Peninsula, central Greece. Marine Geology, 179, 213–228.

KORBAR, T. (2009): Orogenic evolution of the External Dinarides in the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates. Earth Science Reviews, 96, 296–312.

KRAUS, K. (2007): Photogrammetry Geometry from Images and Laser Scans, 2. izdanje, Berlin, 459 str.

KULL, C.A. (2005): Historical landscape repeat photography as a tool for land use change research. Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography, 59, 253–268.

LEE, E.M., HALL, J.W., MEADOWCROFT, I.C. (2001): Coastal cliff recession: the use of probabilistic prediction methods. Geomorphology, 40, 253–269.

LETORTU, P., COSTA, S., MAQUAIRE, O., DELACOURT, C., AUGEREAU, E., DAVIDSON, R., SUANEZ, S., NABUCET, J.: (2015): Retreat rates, modalities and agents responsible for erosion along the coastal chalk cliffs of Upper Normandy: The contribution of terrestrial laser scanning. Geomorphology, 245, 3–14.

LETORTU, P., JAUD, M., GRANDJEAN, P., AMMANN, J., COSTA, S., MAQUAIRE, O., DAVIDSON, R., LE DANTEC, N., DELACOURT C. (2018): Examining high-resolution survey methods for monitoring cliff erosion at an operational scale. GIScience & Remote Sensing, 55, 457–476.

LILLESAND, T.M. i KEIFER, R.W. (2008): Remote sensing and data interpretation. Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, 750 str.

LIM, M., ROSSER, N.J., ALLISON, R.J., PETLEY, D.N. (2010): Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. Geomorphology, 114, 12–21.

LOWE, D. (1999): Object Recognition from Local Scale-invariant Features. International Conference on Computer Vision, Corfu, Grčka, s1150–1157.

LOWE, D. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60, 91–110.

MANCINI, F., CASTAGNETTI, C., ROSSI, P., DUBBINI, M., FAZIO, N.L., PERROTTI, M., LOLLINO, P. (2017): An Integrated Procedure to Assess the Stability of Coastal Rocky Cliffs: From UAV Close-Range Photogrammetry to Geomechanical Finite Element Modeling. Remote Sensing, 9, s1235.

MARCHAND, M. (Ur.) (2010): Concepts and Science for Coastal Erosion Management. Concise Report for Policy Makers. Deltares, Delft., 30 str.

MARINČIĆ, S., MAGAŠ, N., BOROVIĆ, I. (1971): Osnovna geološka karta 1:100.000, list Split, K 33-21, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd.

MARINČIĆ, S., MAGAŠ, N., BOROVIĆ, I. (1973): Osnovna geološka karta 1:100.000, Tumač za listove Split i Primošten, K 33-21, K 33-20, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki institut, Beograd, 43 str.

MARINČIĆ, S. (1981): Eocenski fliš Jadranskog pojasa. Geološki Vjesnik, 34, 27–38.

MARULLO S., PATSAEVA, S., FIORANI, L. (2018): Remote sensing of the coastal zone of the European seas. International Journal of Remote Sensing, 39, 9313–9316.

MATTHEWS, N.A. (2008): Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. Technical Note 428, Bureau of Land Management, Denver, Colorado

MIŠČEVIĆ, P. (1998): The investigation of weathering process in Eocene flysch. U: Evangelista, A. & Picarelli, L. (Ur.): The geotechnics of hard soils-soft rocks., str. 267-272

MIŠČEVIĆ, P. (2004): Uvod u inženjersku mehaniku stijena, Građevinsko – arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet ; IGH d.d., Hrvatska, 232 str.

MIŠČEVIĆ, P. i VLASTELICA, G. (2014): Impact of weathering on slope stability in soft rock mass. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6, 240-250.

NAYLOR, L.A. i VILES, H.A. (2002): A new technique for evaluating short-term rates of coastal bioerosion and bioprotection, Geomorphology, 47, 31–44.

NEUMANN, A.C. (1966): Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rate of the sponge. Limnology and Oceanography, 11, 92–108.

PIKELJ, K., DRAGNIĆ, V., MALOVRAZIĆ, N. (2013): Eastern Adriatic. U: Pranzini, E. i Williams, A.T. (Ur.): Coastal Erosion and Protection in Europe. Oxford, UK, s324–344.

PIKELJ, K. i JURAČIĆ, J. (2013): Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast. Journal of Coastal Research, 29, 944–957.

PIKELJ, K., KOVAČIĆ, M., CVETKO TEŠOVIĆ, B. (2014): Geological control of beach sediment in the Kaštela-Ploče flysch zone (Adriatic Sea, Croatia). 5. International Symposium Monitoring of Mediterranean coastal areas: problems and measurement techniques-Abstracts, Livorno, Italy, 17-19 June, 177.

PIKELJ, K., VLASTELICA, G., KORDIĆ, B. (2018): Evaluation of erosional processes of the eroding flysch cliff in the Split urban zone (Croatia). U: Benincasa, F. (Ur.): Proceedings and Report of the Seventh International Symposium: Monitoring of Mediterranean Coastal Areas: Problems and Measurement Techniques, 607 str.

PRODAN, M.V., MILEUSNIĆ, M., ARBANAS, S.M. i ARBANAS, Ž. (2017): Influence of weathering processes on the shear strength of siltstones from a flysch rock mass along the northern Adriatic coast of Croatia. Bulletin of engineering geology and the environment, 76, 695-711.

ROSSER, N.J, PETLEY, D.N., LIM, M., DUNNING, S.A., ALLISON, R.J. (2015): Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 38, 363–375.

SELBY, M J. (1993): Hillslope Materials and Processes. 2. izdanje, Oxford University Press, Oxford, 451 str.

SELKOWITZ, D.J., FAGRE, D.B., REARDON, B.A. (2002): Interannual variations in snowpack in the Crown of the Continent Ecosystem. Hydrological Processes, 16, 3651–3665.

STEAD, D., EBERHARDT, E., COGGAN, J. (2006): Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. Engineering Geology, 83, 217–235.

STURZNEGGER, M. i STEAD, D. (2009): Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. Engineering Geology, 106, 163–182.

SURIĆ, M., JURAČIĆ, M., HORVATINČIĆ, N., KRAJCAR BRONIĆ, I., (2005): Late Pleistocene-Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems along the eastern Adriatic coast (Croatia). Marine Geology, 214, 163–175.

TEREFENKO, P., PAPROTNY, D., GIZA, A., MORALES-NÁPOLES, O., KUBICKI, A., WALCZAKIEWICZ, S. (2019): Monitoring cliff erosion with LiDAR surveys and bayesian network-based data analysis. Remote Sensing, 11, 843.

TOŠEVSKI, A., GRGEC, D. i PADOVAN, B. (2012): Osnovno o genezi, sastavu i trošenju eocenskog fliša hrvatskog obalnog pojasa. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 25, 47-62.

TRIMBLE, S.W. (2008): The use of historical data and artifacts in geomorphology. Progress in Physical Geography, 32, 3–29.

VARNES, D.J. (1978): Slope movement types and processes. U: Schuster, R .L. i Krizek, R. J. (Ur.): Landslide Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, National Academy of Sciences, Washington D.C., 176, 11–33.

VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I., MATIČEC, D. (2005): Evolution of the Adriatic carbonate platform: palaeogeography, main events and depositional dynamics. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 220, 333–360.

VLASTELICA, G., PIKELJ, K., KORDIĆ, B. (2017): Erosional processes acting on coastal cliffs in the Split urban zone, Croatia. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Split, Hrvatska, 79–84.

WEBB, R.H., MELIS, T.S., VALDEZ, R.A. (2002): Observations of environmental change in the Grand Canyon, Arizona. Reston, VA, USA: U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report, 2, 4080.

WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J., REYNOLDS, J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300–314.

WESTOBY, M.J., LIM, M., HOGG M., POUND, M.J., DUNLOP L., WOODWARD, J. (2018): Cost-effective erosion monitoring of coastal cliffs. Coastal Engineering, 138, 152–164.

WILLIAMS, R.B.G., ROBINSON, D.A., DORNBUSCH, U., FOOTE, Y.M., MOSES, C.A., SADDLETON, P.R. (2004): A sturzstrom-like cliff fall on the chalk coast of Sussex. U: Mortimore, R. N;, Duperret, A. (Ur.): Coastal chalk cliff instability. Engineering Geology Special Publication, 20, 89–97.

YOUNG, A.P. i CARILLI, J.E. (2019): Global distribution of coastal cliffs. Earth Surface Processes and Landforms, 44, 1309–1316.

YOUSSEF, A.M., MAERZ, N.H., MOHAMED HASSAN, A. (2009): Remote sensing applications to geological problems in Egypt: case study, slope instability investigation, Sharm El-Sheikh/Ras-Nasrani Area, Southern Sinai. Landslides, 6, 353–360.

ZORN, M. (2012): Geomorphic activity in flysch badlands of the Istria peninsula (SW Slovenia). Zeitschrift fűr Geomorphologie-Supplementband, 56, 53–79.

Internetski izvori:

URL 1: FURLANI, S., BIOLCHI, S., DEVOTO, S.: Coastal cliffs. Rates and processes of coastal cliff retreat. Natural and human-induced hazard. preuzeto 16.03.2021. s https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/GEOL312/Coastal%20cliffs%20hazard/Furlani_Coastal_cliffs.pdf

URL 2: Google: geografski smještaj grada Splita prema Google Maps. preuzeto 16.03. 2021. s https://www.google.com/maps/@43.5128271,16.4433672,7495m/data=!3m1!1e3

URL 3: DHMZ: Praćenje klime – Split-Marijan. preuzeto 16.03.2021. s http://meteo.hr/klima.php?section=klima_pracenje&param=srednja_temperatura&Grad=st_sred&Godina=2021

URL 4: DHMZ: Srednje mjesečne vrijednosti i ekstremi – Split-Marijan u razdoblju 1948–2019. preuzeto 27.04.2021. s https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci&param=k1&Grad=split_marjan

URL 5: Institut za oceanografiju i ribarstvo (Split): Visoke i niske vode za grad Split. Preuzeto 26. 05. 2021. s https://acta.izor.hr/wp/mjerni-sustavi-u-stvarnom-vremenu/visoke-i-niske-vode/