

# Višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla na primjeru poluotoka Santiš

---

**Pelajić, Donat**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:222129>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-25**



**Sveučilište u Zadru**  
Universitas Studiorum  
Jadertina | 1396 | 2002 |

*Repository / Repozitorij:*

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij

Primijenjena geografija

**Donat Pelajić**

**VIŠEGODIŠNJE PROSTORNO-VREMENSKE  
PROMJENE UZROKOVANE EROZIJOM TLA  
NA PRIMJERU POLUOTOKA SANTIŠ**

**Diplomski rad**

Zadar, 2024.

Sveučilište u Zadru

Odjel za geografiju

Sveučilišni diplomski studij

Primijenjena geografija

Višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla na  
primjeru poluotoka Santiš

Diplomski rad

Student/ica:

Donat Pelajić

Mentor/ica:

Doc. dr. sc. Ivan Marić

Komentor/ica:

Doc. dr. sc. Fran Domazetović

Zadar, 2024.



## Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Donat Pelajić**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla na primjeru poluotoka Santiš** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 18. listopada 2024.

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zadru

Odjel za Geografiju

Diplomski rad

## VIŠEGODIŠNJE PROSTORNO-VREMENSKE PROMJENE UZROKOVANE EROZIJOM TLA NA PRIMJERU POLUOTOKA SANTIŠ

Donat Pelajić

### Izvadak

Erozija tla je jedan od najkompleksnijih geomorfoloških procesa koji znatno pridonosi oblikovanju krajolika, te je pod stalnim utjecajem različitih prirodnih i antropogenih čimbenika. Uzrokuje brojne negativne posljedice poput degradacije krajolika, smanjenja plodnosti tla i onečišćenja vode. Kako bi se uspješno ograničili negativni utjecaji erozije tla ključno je višegodišnje praćenje intenziteta i pojavnosti erozije tla. Brojne jaruge i intenzivna erozija tla jedno su od glavnih obilježja otoka Paga, što ga čini pogodnim za praćenje višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla. Područje istraživanja obuhvaća poluotok Santiš koji se nalazi na jugoistočnom dijelu otoka Paga, a karakterizira ga visoka zastupljenost i raznolikost jaruga i drugih erozijskih formi. Glavni cilj ovog diplomskog rada je detekcija i kvantifikacija višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla. Višegodišnja detekcija i kvantifikacija linearnih, arealnih i volumetrijskih promjena napravljena je na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih snimaka Državne geodetske uprave (2006. – 2018.) i terenskog UAV snimanja (srpanj 2023.). U promatranom višegodišnjem razdoblju (2006. – 2023.) zabilježena je velika varijabilnost intenziteta erozije tla među analiziranim jarugama, pri čemu je većina erozije tla bila vezana za retrogradni pomak čela jaruga.

**Ključne riječi:** erozija tla, otok Pag, prostorno-vremenske promjene, jaruge

**Voditelji:** doc. dr. sc. Ivan Marić, doc. dr. sc. Fran Domazetović (komentor)

**Povjerenstvo:** doc. dr. sc. Ivan Marić, izv. prof. dr. sc.

Ante Šiljeg, prof. dr. sc. Nina Lončar

# BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zadar

Department of Geography

Graduation thesis

## MULTI-SPATIO-TEMPORAL CHANGES CAUSED BY SOIL EROSION IN THE AREA OF THE SANTIŠ PENINSULA

Donat Pelajić

### Abstract

Soil erosion is one of the most complex geomorphological processes that significantly contributes to landscape formation and is continuously influenced by various natural and anthropogenic factors. It causes numerous negative consequences, such as landscape degradation, reduced soil fertility, and water pollution. To effectively mitigate the negative impacts of soil erosion, long-term monitoring of its intensity and occurrence is crucial. The numerous gullies and intense soil erosion are among the main features of the island of Pag, making it suitable for monitoring long-term spatio-temporal changes caused by soil erosion. The research area encompasses the Santiš peninsula, located in the southeastern part of Pag Island, characterized by a high presence and diversity of gullies and other erosion forms. The primary objective of this thesis is the detection and quantification of long-term spatial-temporal changes caused by soil erosion. The long-term detection and quantification of linear, areal, and volumetric changes were carried out based on archival aerial photogrammetric images from the State Geodetic Administration (2006–2018) and UAV survey (July 2023). Over the observed period (2006–2023), there was significant variability in the intensity of soil erosion among the analyzed gullies, with most erosion being linked to the gradual uphill retreat of gully headcuts.

**Keywords:** soil erosion, Pag Island, spatio-temporal changes, gullies

**Supervisor:** Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Assistant Professor Fran Domazetović, PhD

**Reviewers:** Assistant Professor Ivan Marić, PhD, Associate Professor Ante Šiljeg, PhD, Professor Nina Lončar, PhD

## **Predgovor**

Erozija tla je jedan od glavnih procesa koji oblikuje krajolik oko nas. Danas erozija tla za sobom ostavlja mnoge negativne posljedice. Uzroci erozije tla mogu biti prirodni, a u zadnje vrijeme sve više su bitni i antropogeni procesi. Stoga su potrebna točna i kontinuirana praćenja erozije radi što boljeg shvaćanja same pojave, te sprečavanja njezinog negativnog utjecaja na svjetsku populaciju. Korištenjem geoprostornih tehnologija, koje se ubrzano razvijaju, to je moguće. Proces kvantifikacije je meni najzanimljiviji dio primijenjene geografije, stoga kad je doc. dr. sc. Fran Domazetović predložio ovu temu za diplomski rad, nisam puno dvojio.

Što se tiče zahvala, biti ću kratak. Prvo bih se zahvalio prijateljima koji su ovo cijelo iskustvo školovanja na Sveučilištu u Zadru učinili još boljim. To su Bruno Beneti, Kristijan Radočaj, Mihaela Antičević, Zvonimir Sliepčević, Antonio Džidić i Ivan Golubičić. Također bih se zahvalio svim djelatnicima GAL-a na pruženoj pomoći tijekom školovanja i pisanja diplomskog rada, te još posebna zahvala ide izv. prof. dr. sc. Anti Šiljegu, mentoru doc. dr. sc. Ivanu Mariću i komentoru doc. dr. sc. Franu Domazetoviću.

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1.	Objekt, ciljevi i svrha istraživanja .....	2
1.2.	Hipoteze istraživanja .....	2
1.3.	Pregled prethodnih istraživanja .....	4
1.4.	Prostorni obuhvat i prirodno-geografske značajke područja istraživanja .....	5
2.	TEORIJSKA OSNOVA .....	8
2.1.	Značajke erozije tla na prostoru Sredozemlja .....	8
2.1.1.	Prostorna distribucija erozije tla unutar Sredozemlja .....	11
2.1.2.	Predisponirajući čimbenici .....	13
2.1.3.	Negativne posljedice uzrokovane erozijom tla .....	15
2.2.	Višegodišnje praćenje prostorno-vremenskih promjena .....	15
2.2.1.	Važnost višegodišnjeg praćenja erozije tla .....	15
2.2.2.	Primjena geoprostornih tehnologija u višegodišnjem praćenju erozije tla ....	16
2.2.3.	Kvantitativne mjere za praćenje intenziteta erozije tla .....	17
3.	METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA .....	18
3.1.	Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave .....	18
3.1.1.	Georeferenciranje DGU snimaka .....	19
3.1.2.	Procjena točnosti georeferenciranja DGU snimaka .....	26
3.2.	Aerofotogrametrijska UAV izmjera područja istraživanja .....	28
3.2.1.	Planiranje UAV misije i odabir postavki kamere .....	28
3.2.2.	Izrada visokorezolucijskih modela iz prikupljenih UAV snimaka .....	30
3.3.	Detekcija višegodišnjih linearnih i arealnih PVP na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih DGU snimaka .....	33
3.3.1.	Kartiranje čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš .....	34



3.3.2.	Razvoj alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga .....	36
3.4.	Detekcija višegodišnjih volumetrijskih PVP na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih DGU snimaka .....	38
3.4.1.	Osnova za izvođenje volumetrijskih analiza.....	38
4.	REZULTATI.....	43
4.1.	Točnost georeferenciranja DGU snimaka.....	43
4.2.	Izrađeni alat za automatski izračun linearnog pomaka čela jaruga .....	44
4.3.	Detektirane višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla 45	
4.3.1.	Višegodišnji linearni pomak čela jaruga.....	45
4.3.2.	Arealni pomak čela jaruge .....	56
4.3.3.	Volumetrijske prostorno-vremenske promjene .....	59
5.	RASPRAVA.....	65
5.1.	Usporedba detektiranih višegodišnjih PVP s rezultatima drugih istraživanja .....	65
5.2.	Poteškoće prilikom provođenja istraživanja .....	67
6.	ZAKLJUČAK .....	69
	Izvori .....	72
	<b>Literatura</b> .....	72
	POPIS PRILOGA.....	78

# 1. UVOD

Erozija je jedan od glavnih prirodnih procesa koji pridonosi denudaciji i geomorfološkoj evoluciji krajolika (Conforti i Buttafuoco, 2017). Erozija tla predstavlja veliku prijetnju opskrbi hranom, pitkom vodom, degradaciji plodnog tla, hidrološkim sustavima te održivosti ekosustava. Zbog toga su globalno prepoznate mjere za kontrolu erozije tla (Panagos i dr., 2015a; Conforti i Buttafuoco, 2017; Wuepper i dr., 2019; Majoro i dr., 2020). Na globalnoj razini, erozija tla uzrokovana vodom i vjetrom predstavlja najveću prijetnju degradaciji i denudaciji tla (Domazetović, 2021). Područja u Europi s prosječnom stopom gubitka tla većom od  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  čine 5,2% površine i doprinose 52% ukupnom gubitku tla u Europi. Trend porasta erozije tla najvećim je dijelom uzrokovan ljudskim djelovanjem, klimatskim promjenama i poljoprivrednim aktivnostima (Panagos i dr., 2015a; Domazetović, 2021). Prema Panagosu i sur. (2015), Hrvatska spada u srednje ugrožene zemlje Europske unije prema prosječnim stopama gubitka tla. Usprkos tome, u Hrvatskoj postoje područja s prosječnom stopom gubitka tla većom od  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  (Domazetović, 2021).

Iako je erozija tla dugotrajan proces, postoje slučajevi brzog djelovanja erozije uslijed ekstremnih vremenskih uvjeta (García-Ruiz i dr., 2013). Potrebno je pratiti proces erozije kroz duža vremenska razdoblja (Lal, 2017). Većinu promjena u sredozemnim krajolicima moguće je otkriti samo dugoročnim promatranjem. Pojava kamenitog tla i jaruga s rijetkom vegetacijom nije posljedica nekoliko ekstremnih kišnih oluja, već dugotrajnog djelovanja vodenih tokova i erozije (García-Ruiz i dr., 2013). Određivanje morfoloških promjena i stope gubitka tla moguće je postići višegodišnjim praćenjem prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom (Aucelli i dr., 2014). Dugoročno promatranje erozije tla omogućuje razumijevanje morfološke evolucije područja istraživanja, što u konačnici pomaže u određivanju mjera zaštite od daljnje erozije tla (Conforti i Buttafuoco, 2017).

Primjena geoprostornih tehnologija u praćenju erozije tla posljednjih je godina sve popularnija (Alfonso-Torreño i dr., 2021). Geoprostorne tehnologije (GST) predstavljaju skup tehnologija koji omogućuju modeliranje kompleksnih procesa i oblika s različitim razinama detaljnosti, ovisno o svrsi istraživanja (Šiljeg, 2013; Marić i dr., 2019). Sve veća primjena GST-a rezultat je ubrzanog razvoja tehnologije, što je optimalno za niskobudžetna istraživanja i

generiranje preciznih 3D podataka (Alfonso-Torreño i dr., 2021). U praćenju erozije tla najčešće se koristi aerofotogrametrijsko snimanje (Aucelli i dr., 2014; Neugirg i dr., 2016; Conforti i Buttafuoco, 2017; Fernandez i dr., 2020; Alfonso-Torreño i dr., 2021; Wang i dr., 2022). Primjenom intervalne aerofotogrametrije nastoji se kvantificirati prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla (Wang i dr., 2022).

Znanstveno-istraživački radovi o eroziji tla u Hrvatskoj nisu dovoljno zastupljeni (URL 1), što je zabrinjavajuće s obzirom na to da postoje područja koja su uvelike ugrožena erozijom tla. Iako je proučavanje erozije tla ponovno aktualizirano posljednjih godina (Domazetović, 2021; Domazetović i dr., 2024), praćenje višegodišnjih promjena i dalje je nedovoljno zastupljeno.

### 1.1. Objekt, ciljevi i svrha istraživanja

Objekt istraživanja su **višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla na području poluotoka Santiš**. Glavni cilj je **kvantifikacija višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla**. Prema definiranom glavnom cilju je izvedeno još nekoliko sekundarnih ciljeva:

- 1) Testirati primjenjivost DGU<sup>1</sup> aerofotogrametrijskih snimaka za praćenje višegodišnjih PVP
- 2) Detektirati višegodišnji intenzitet erozije tla unutar aktivnih jaruga poluotoka Santiš
- 3) Razviti alat za automatsku kvantifikaciju linearnog pomaka čela jaruga

Svrha istraživanja je unapređenje spoznaja o višegodišnjem razvoju krških jaruga, kroz proučavanje intenziteta i prostorne distribucije procesa erozije tla.

### 1.2. Hipoteze istraživanja

Iz definiranih ciljeva istraživanja proizašle su sljedeće hipoteze:

- **H1** Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave omogućiti će detekciju višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla unutar razdoblja od 1959. do 2018. godine

---

<sup>1</sup> Državna Geodetska Uprava

- **H2** Najveći detektirani višegodišnji intenzitet erozije tla biti će vezan za retrogradni pomak glavnog čela jaruge Santiš
- **H3** Maksimalni višegodišnji linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš će biti visoko varijabilan
- **H4** Razvijeni alat će omogućiti automatiziranu detekciju i kvantifikaciju višegodišnjeg linearnog pomaka čela jaruga

### 1.3. Pregled prethodnih istraživanja

**Wang i dr. (2022)** su primjenom višegodišnjih UAV podataka kvantificirali geomorfološke i volumetrijske promjene nastale erozijom tla na području jaruge na sjeveroistoku Kine. Rezultati su pokazali kako se čelo jaruge aktivno smanjuje. Daljnja analiza je pokazala da je glavni uzrok tome djelovanje oborina u kišnom dijelu godine.

**Fernandez i dr. (2020)** su korištenjem fotogrametrije i LiDAR podataka izvršili višegodišnju analizu erozije tla na području maslinika. Utvrđeno je vertikalni pad u prosjeku od 50 cm i gubitak volumena od 85 000 m<sup>3</sup>.

**Neugirg i dr. (2016)** su primjenom UAV i TLS-a pratili stanje na području pustinje Calanchi u Italiji. Kombinacijom prikupljenih kontrolnih točaka, UAV snimaka te gustog oblaka točaka prikupljenog TLS-om su pomoću metode SfM (engl. *Structure from Motion*) napravili digitalne modele reljefa. Analiza rezultata je otkrila nekoliko geomorfoloških procesa, poput erozije brežuljaka i ispiranja padina. Pažnja je također bila na usporedbi fotogrametrije i TLS-a, gdje je TLS pokazao lošije rezultate zbog manje gustoće oblaka točaka.

**Aucelli i dr. (2014)** korištenjem zračnih snimaka u razdoblju od 60 godina analiziraju erozija tla na području slijeva rijeka Landole u Italiji. Pritom koriste UAV snimke obrađene metodom fotogrametrije. Zaključuju kako je UAV fotogrametrija odlična metoda promatranja višegodišnjih promjena uzrokovanih erozijom tla. Analizom rezultata su utvrdili da su stope eroziji tla u blagom padu, zbog promjene u načinu korištenja tla.

**Alfonso-Toreno i dr. (2021)**, na temelju obnovljene brane na zapadu Španjolske, analiziraju dinamiku erozije tla, prije i nakon obnove, koristeći pritom visoko rezolucijske višegodišnje digitalne modele reljefa. Podatci za DMR su prikupljeni pomoću UAV-a te izvedbe metodom SfM-a. Rezultati pokazuju kako je obnova jaruge rezultirala smanjenjem erozije tla u jaruzi.

**Conforti i Buttafuoco (2017)** analiziraju prostorno-vremensku distribuciju denudacijskih procesa, te promjenu količine tla u razdoblju od 1955. do 2016. na području regije Kalabrije u Italiji. Pritom uz terensko istraživanje koriste i višegodišnje zračne snimke. Utvrđuju kako proces višegodišnjeg praćenja erozije tla pruža značajne informacije o evoluciji krajobraza. One mogu poslužiti za donošenje odluka kako upravljati područjima koja su pogođena intenzivnom erozijom tla.

#### 1.4. Prostorni obuhvat i prirodno-geografske značajke područja istraživanja

Otok Pag ima ukupnu površinu od 284,14 km<sup>2</sup> što ga čini petim po veličini otokom u RH. Pripada sjevernodalmatinskoj i kvarnerskoj otočnoj skupini prema uvjetno-homogenoj regionalizaciji (Slika 1. A). S indeksom razvedenosti (*Ir*) 4,50 spada u skupinu najrazvedenijih hrvatskih otoka (Magaš, 2011).

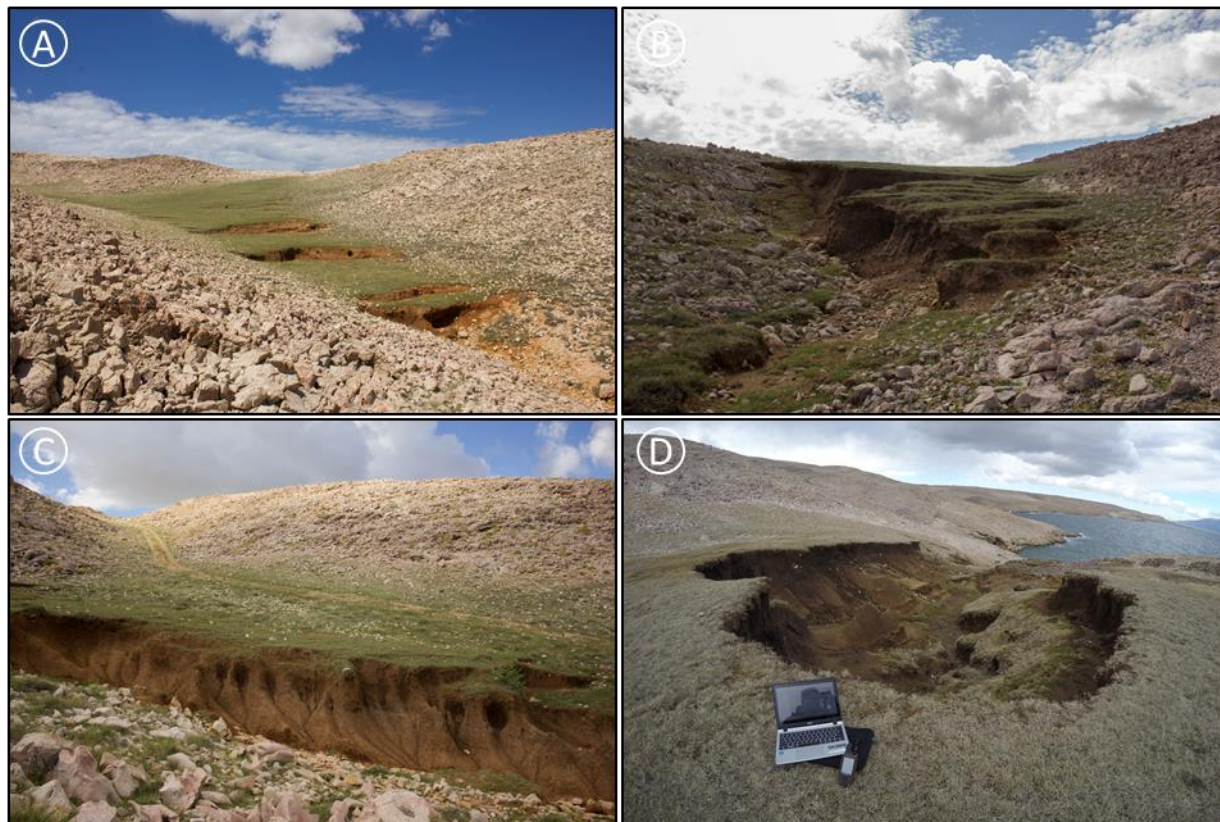
Antiklinalni i sinklinalni nizovi su obilježje otoka Paga. Antiklinalni dijelovi su prekriveni rudistnim i foraminiferskim vapnencima iz razdoblja gornje krede i eocena, dok su sinklinalni dijelovi ispunjeni eluvijalnim, aluvijalnim i flišnim naslagama (Slika 2. B). Reljefna obilježja otoka su oblikovana pod utjecajem pružanja naslaga u pravcu SZ-JI, te karbonatnom građom (Magaš, 2011).

Otok Pag je poseban po krškom krajoliku te surovim klimatskim uvjetima koji su uzrokovali da je 30% ukupne površine otoka podložno eroziji tla, dok na otoku postoji stotinjak jaruga (Domazetović i dr., 2019). Na otoku prevladavaju dvije klime: sredozemna klima s vrućim ljetima (*Csa*) i umjereno topla vlažna klima (*Cfa*). Prosječna godišnja količina oborina iznosi 1047.79 mm. Postoji izražena sezonalna raspodjela godišnjih oborina s zimskim (siječanj-veljača) i jesenskim (rujan-listopad) maksimumom (Domazetović, 2021). Na otoku je prisutna izražena vjetrovitost, gdje se ponajviše ističe utjecaj olujnog sjeveroistočnog vjetera bure. Naslage tla koje su izložene djelovanju bure postupno erodiraju i zaslanjaju se zbog posolice (Domazetović, 2021).

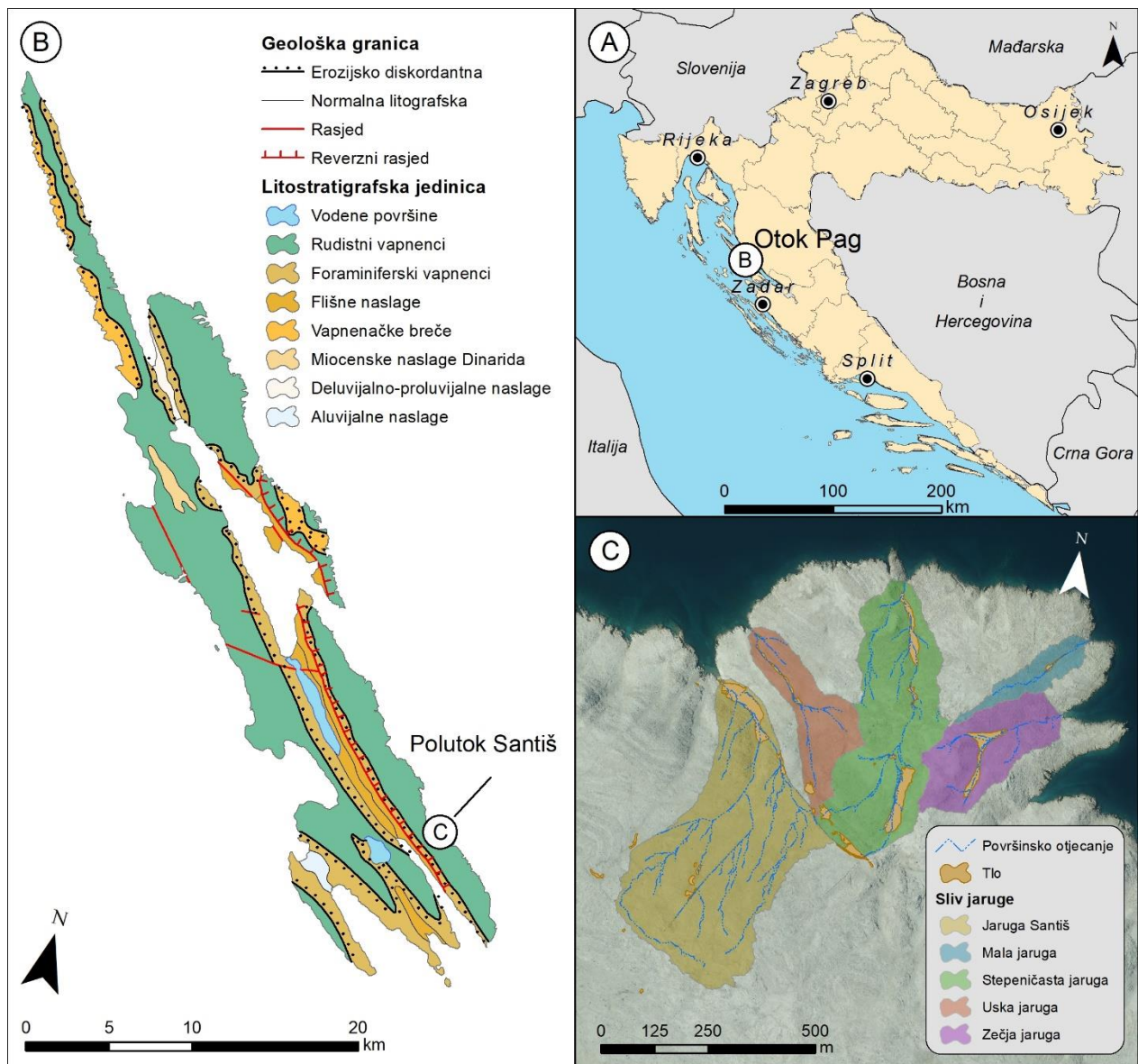
Područje istraživanja je poluotok Santiš, površine 2,1 km<sup>2</sup>, koji se nalazi na jugoistočnom dijelu otoka Paga (Slika 2. B). Područje poluotoka Santiš je karakteristično po pojavi izdvojenih naslaga smeđeg tla na vapnencu. Prema Šiljegu i dr. (2021) su zabilježeni nedavni tragovi erozije tla unutar naslaga smeđeg tla na području istraživanja. Na cijelom području otoka Paga je moguće pronaći naslage smeđeg tla s obilježjima nedavne erozije tla, ali samo na poluotoku Santiš postoji tako velika koncentracija smeđeg tla unutar relativno malog prostora. Prema Domazetoviću i dr. (2019) podložnost erozije tla na području poluotoka je visoka ili vrlo visoka. Unutar samog poluotoka se nalazi osam izoliranih naslaga smeđeg tla i pet jaruga koje su aktivne. Postoje velike razlike među jarugama, prvenstveno u njihovim morfološkim značajkama, površini i obliku slivnih područja te debljini naslaga smeđeg tla (Slika 1.). Sve navedeno ima različit utjecaj na intenzitet erozije tla u svakoj jaruzi (Domazetović, 2021).

Na području poluotoka je zabilježeno nekoliko zasebnih površina prekrivenih naslagama smeđeg tla te pet aktivnih jaruga (Slika 2. C). Intenzitet erozije unutar pojedine jaruge nije isti, što

ovisi o veličini slivnog područja i razgranatosti mreže površinskog otjecanja. Nadalje, debljina naslaga tla varira između jaruga, od nekoliko centimetara do nekoliko metara. Unutar jaruga s većim slivnim područjem (jaruga Santiš i Stepeničasta) su zabilježena značajna površinska otjecanja sposobna za erodiranje i ispiranje značajnijih količina materijala (Domazetović, 2021).



**Slika 1.** Raznolikost morfologije čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš (A – Zečja jaruga; B – Stepeničasta jaruga; C – sporedno čelo jaruge Santiš; D – glavno čelo jaruge Santiš) (Preuzeto iz Domazetović, 2021)



**Slika 2.** Geografski smještaj otoka Paga u RH (A); geološka karta otoka Paga (prema Velić i Vlahović, 2009) i geografski smještaj poluotoka Santiš unutar otoka Pag (B); prikaz postojećih naslaga smeđeg tla i slivova aktivnih jaruga unutar poluotoka Santiš (C)



## **2. TEORIJSKA OSNOVA**

Erozija tla predstavlja kombinaciju egzogenih procesa koji svojim učinkom uzrokuju postupno odvajanje i pokretanje čestica tla s jednog dijela Zemljine površine na drugu površinu gdje dolazi do taloženja materijala (SSSA, 2008). Pojava erozije može biti različitog intenziteta i prostornog obuhvata. Erozija tla se može najjednostavnije definirati kao mehaničko trošenje gdje djeluju različiti erozivni agensi, kao što su voda ili vjetar (Domazetović, 2021). Prema Šurdi i dr. (2007), erozija tla sastoji se od tri glavne faze:

1. odvajanje čestice tla
2. transport tih erodiranih čestica tla
3. taloženje erodiranih čestica tla

Navedene tri faze primjetne su u svim procesima erozije tla, nevezano za njihov prostorni obuhvat i intenzitet procesa (Domazetović, 2021). Glavni uzročnici erozije tla koja se smatra prirodnom su voda i vjetar, ali na njezin način pojave i intenziteta bitan utjecaj imaju i drugi predisponirajući i antropogeni čimbenici. Stoga se u znanstvenoj literaturi erozija tla najčešće dijeli na prirodnu i ubranu. Pod prirodnu eroziju tla se smatra sva erozija čiji je intenzitet uzrokovan prirodnim djelovanjem i čimbenicima, dok se pojam ubrane erozije tla odnosi na eroziju čiji je intenzitet ubran različitim antropogenim djelovanjem u odnosu na prirodni intenzitet (Morgan, 2005).

Bitno je definirati i tlo, kao dio Zemljine površine na koji erozija utječe. Prema Harteminku (2016) tlo je nekonsolidirani mineralni ili organski materijal, kojeg kopnene biljke koriste kao medij za njihov rast. Tlo je ograničen resurs koji je sporo obnovljiv te predstavlja ključnu ekonomsku, socijalnu i ekološku važnost. Zaštita tla bitna je za ljudsku vrstu i njezin opstanak (Domazetović, 2021).

### **2.1. Značajke erozije tla na prostoru Sredozemlja**

Sredozemna regija jedinstvena je na globalnoj razini, jer zauzima malo područje koje okružuje Sredozemno more, a ime je dobila po tipu umjerene klime koja dominira uz uglavnom uski obalni dio. Sredozemno more ima značajan utjecaj na ekološka obilježja sredozemne regije, ali nedovoljno da bi se objasnile osobitosti sredozemne klime. Predstavlja prijelaz između hladno-

vlažne i toplo-suhe klime, između  $\sim 25^\circ$  i  $40^\circ$  geografske širine na zapadnoj obali kontinentalnih kopnenih masa (García-Ruiz i dr., 2013).

Niske umjerene temperature su zimi, a visoke ljeti (najčešće s vrhuncem u kolovozu), dok su oborine koncentrirane tijekom hladnog razdoblja (najčešće od listopada do svibnja) (Olcina, 2007). Prosječna godišnja količina padalina obično se kreće od 400 do 600 mm, dok je srednja godišnja temperatura  $\sim 16\text{--}19^\circ\text{C}$ . (García-Ruiz i dr., 2013).

Niske vrijednosti srednjih godišnjih količina oborina skrivaju međugodišnju varijabilnost, koja je jednako važno obilježje regije, pri čemu se vlažne godine izmjenjuju s vrlo sušnim koje imaju  $<250$  mm oborina. Ovo je obilježje kritično za razvoj vegetacije, osobito kada se razdoblja sušnih godina pojavljuju u ciklusima (Vicente-Serrano i Cuadrat-Prats, 2006). Međutim, mogu se pojaviti izuzetno intenzivne kišne oluje, s oborinama od  $>200$  mm u samo nekoliko sati. Takvi događaji ponekad pokreću velike poplave koje mijenjaju morfologiju kanala i utječu na infrastrukturu i ljudske živote te imaju velike geomorfološke učinke (García-Ruiz i dr., 2013). Primijećeno je da se, u kontekstu Europe, najekstremnije bujične poplave događaju u sredozemnoj regiji (Gaume i dr., 2009). Oskudica i obilje oborina obilježava Sredozemlje, u ovom slučaju zato što se visoke temperature u Sredozemnom moru krajem ljeta poklapaju s dolaskom hladnih zračnih masa na velikim visinama (engl. *cutoff low systems*), što rezultira vrlo aktivnim i termodinamičkim nestabilnim depresijama (Nieto i dr., 2005).

Posebno je važno međudjelovanje reljefa i klime. Većina reljefa potječe izravno iz alpske orogeneze, osim malog dijela Pirinejskog poluotoka koji je nastao hercinskom orogenezom. Zbog toga Sredozemlje obiluje sa strmim padinama i izraženim visinskim razlikama između razdjelnica i dna doline ili obale. Neke su planine podignute u kasnijim fazama alpske tektonike, prije nekoliko milijuna godina i još uvijek su seizmički aktivne. Seizmička aktivnost utječe na pojavu klizišta i pojačava kratkoročne i dugoročne erozijske procese podizanjem reljefa i posljedičnim usijecanjem rijeka (Maher i Harvey, 2008). Kao što je navedeno, prisutnost visokih planina u blizini obale pojačava aktivnost sustava s niskim tlakom tijekom jeseni koji uzrokuju snažne bujice. Hrapavost reljefa i izrazito različita insolacija rezultiraju dramatičnim kontrastima između sjevernih i južnih padina na vrlo kratkim udaljenostima (desetke do stotine metara), te uzrokuju ekstremne razlike u vlažnosti tla, stopama isparavanja, gustoći i strukturi biljnog pokrova i eroziji tla (García-Ruiz i dr., 2013).

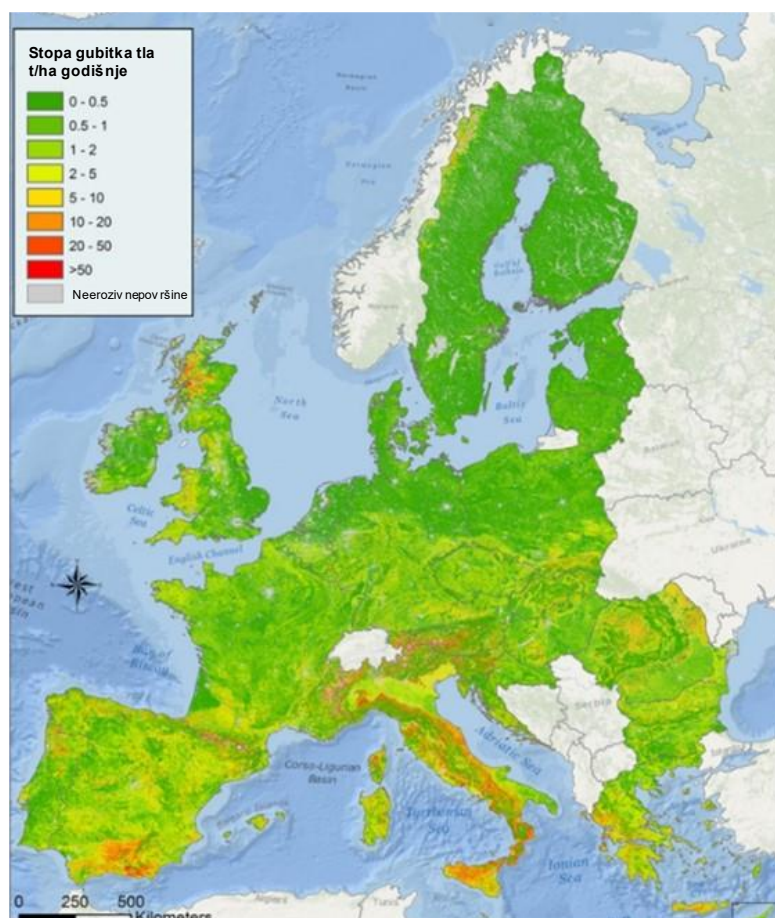
Osjetljivost sredozemnog tla na eroziju u promjenjivim uvjetima pogoršana je krčenjem šuma, čestim požarima i obrađivanjem strmih padina. Općenito, sredozemna tla smatraju se "najosjetljivijim dijelom" sustava (Salvati i Bajocco, 2011) zbog nekoliko čimbenika:

- (i) Nizak sadržaj organske tvari u tlu (često  $\leq 2\%$ ) posljedica je visoke ljetne temperature, koje potiču brzu mineralizaciju otpalog lišća. Nadalje, česti požari i dominacija otvorenog grmlja također doprinose niskom sadržaju organske tvari. Ovaj čimbenik objašnjava lošu strukturu tla i osjetljivost tla na utjecaj kišnih kapi (Cammeraat i Imeson, 1998).
- (ii) Brzina formiranja tla obično je spora, a profili su tanki i slabo razvijeni (García-Ruiz i dr., 2013). Sredozemna tla imaju nisku razinu tolerancije na eroziju tla, koja je mnogo niža nego u tlima u uvjetima umjerene i vlažne klime. Mnogi autori smatraju da je stopa formiranja tla u sredozemnom području manja od stope erozije tla gdje je biljni pokrov uništen. Stope erozije izmjerene u mnogim sredozemnim područjima ukazuju na neravnotežu između formiranja tla i erozije (Poesen i Hooke, 1997).
- (iii) Uklanjanje vegetacije ispašom i gaženjem stoke otežava oporavak biljaka i rekonstrukciju tla, a rezultira razvojem nepropusne strukturne kore na površini tla, što smanjuje sposobnost infiltracije vode i smanjuje proizvodnju organske tvari. Ipak, važno je napomenuti da su tanka tla razvijena na metamorfnim stijenama, vrlo podložna niskim godišnjim stopama erozije, što potvrđuje kontrolnu ulogu stijenskog supstrata (Sougnéz i dr., 2011).

Nekoliko je studija istraživalo hidrogeomorfološku ulogu fragmenata stijena u tlu. Obilna prisutnost šljunka je obilježje sredozemnog tla, a njihov udio je povećan zbog erozije sitnih čestica. Potvrđeno je da fragmenti stijena pogoduju infiltraciji, smanjujući otjecanje i gubitak tla. Ovo je važno opažanje koje ukazuje da je erozija tla regulirana progresivnim smanjenjem proizvodnje sedimenta kako se udio fragmenata stijena povećava (García-Ruiz i dr., 2013).

### 2.1.1. Prostorna distribucija erozije tla unutar Sredozemlja

Na 24 % površine EU stope erozije tla iznosu više od 1,4 t/ha godišnje, što je više nego stopa obnavljanja tla. Na prostoru Sredozemlja stope erozije tla su najveće na područjima gdje je intenzivna poljoprivreda, veliki broj požara, manjak vegetacije te visoki nagib terena (Ferreira i dr., 2022).



**Slika 3.** Stope gubitke tla u Europskoj uniji

Izvor: URL 2

Prema Panagos i dr. (2015a) najveće godišnje stope gubitka tla uočene su na sredozemnom području. Erozijska tla su većinom prisutna na relativno strmim padinama, pa su zbog toga područja planina koja se nalaze na Sredozemlju, kao što su Alpe, Apenini, Pirineji, Sierra Nevada te zapadna Grčka dosta podložna eroziji tla (Slika 3). Niska razina vegetacijskog pokrova najviše utječe na eroziju tla u južnoj Španjolskoj, područje Andaluzije. Najveća srednja godišnja stopa gubitka tla, na razini države, nalazi se u Italiji (8,46 t/ha) i Sloveniji (7,43 t/ha) (Tablica 1.), razlog tomu je

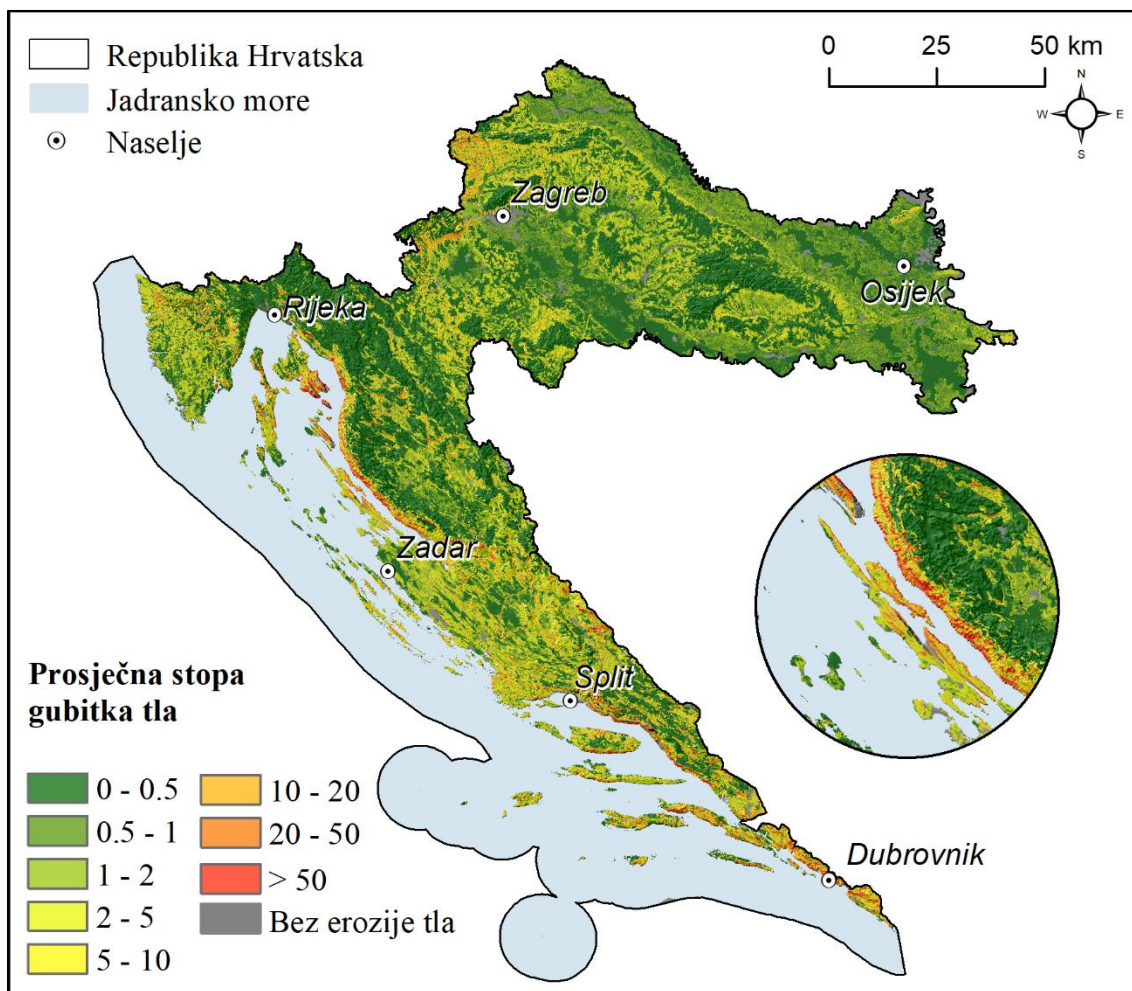
kombinacija velikih količina oborina (Panagos i dr., 2015b) te strmih i dugih padina. Stope gubitka tla veće od prosjeka EU također su zabilježene u drugim sredozemnim državama (Španjolska, Grčka, Malta i Cipar). Površinski velike države s velikim stopama gubitka tla erozijom, kao što su Italija i Španjolska, imaju najveći udio u ukupnom gubitku tla na području EU. Ukupni udio stope gubitka od svih osam sredozemnih država koje su dio EU (Italija, Španjolska, Francuska, Grčka, Portugal, Hrvatska, Slovenija i Cipar) iznosi 66 %. Područje Sredozemlja ima visoku stopu gubitka tla (4,61 t/ha) zbog velike podložnosti erozije uzrokovanom oborinama (Panagos i dr., 2015a).

**Tablica 1.** Prosječna stopa gubitka tla i njen udio u ukupnom gubitku tla EU

Država	Prosječna stopa gubitka tla [E (t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	Udio u ukupnom gubitku tla EU
Cipar	2,89	0,25%
Španjolska	3,94	19,61%
Francuska	2,25	11,85%
Grčka	4,13	5,31%
Hrvatska	3,16	1,74%
Italija	8,46	24,13%
Malta	6,02	0,01%
Portugal	2,31	2,01%
Slovenija	7,43	1,49%

Izvor: Panagos i dr., 2015

Hrvatska ima prosječnu stopu gubitka tla od 3,16 t/ha, što je više od prosjeka EU koji iznosi 2,22 t/ha. Udio gubitka tla Hrvatske u ukupnom gubitku tla EU iznosi 1,74 % (Panagos i dr., 2015). Udio površine koji je pod utjecajem niskog rizika od erozije tla iznosi 53,3 %, dok je 31,5 % površine pod utjecajem srednjeg rizika od erozije tla, a 13,4 % površine Hrvatske je pod utjecajem visokog rizika od erozije tla (Husnjak i dr., 2008).



**Slika 4.** Prosječne stope gubitka tla u Hrvatskoj

Izvor: Domazetović, 2021.

Ipak, neki dijelovi Hrvatske znatno su osjetljiviji i ugroženiji procesu erozije tla, s vrlo visokim vrijednostima prosječne stope gubitka tla (Slika 4.). Ponajviše je ugrožen prostor uz Velebitski kanal, gdje se posebno ističu pojedini dijelovi otoka Krka, Raba i Paga, te područje podno Velebita. Većina ovog prostora bilježi stopu gubitka tla iznad  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ , dok su i negdje zabilježene lokacije sa stopom gubitka tla većom od  $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  (Domazetović, 2021).

### 2.1.2. Predisponirajući čimbenici

Čimbenici koji kontroliraju eroziju tla su intenzitet različitih egzogenih čimbenika, erodibilnost tla, topografski čimbenici i količina biljnog pokrova (Morgan, 2005).

Oborine su jedan od najvažnijih egzogenih čimbenika koji utječe na erozivnost tla. Djelomično utječu kroz snagu kišnih kapi koje udaraju o površinu tla, a djelomično kroz stvaranje tokova. Ovo se posebno odnosi na eroziju kopnenim tokovima (Morgan, 2005). Na procese i intenzitet erozije utječu još i pojava vjetra te temperatura zraka. Temperatura zraka nije toliko bitan čimbenik kao vjetar i oborine, ali svojim indirektnim djelovanjem može uzrokovati slabljenje kohezije tla (Domazetović, 2021).

Erodibilnost definira otpornost tla na odvajanje i transport. Iako otpornost tla na eroziju dijelom ovisi o topografskom položaju i strmini padine, svojstva tla su najvažnije odrednice. Erodibilnost ovisi o teksturi tla, stabilnosti i čvrstoći tla, kapacitetu infiltracije te organskom i kemijskom sadržaju. Prema teksturi, tla s krupnijim česticama su otpornija na transport zbog veće sile koja je potrebna za njihovo pomicanje, dok su sitnije čestice otporne na odvajanje zbog svoje jake kohezivnosti. Najmanje otporne čestice tla bi bili mulj i sitni pijesak. Tla s visokim sadržajem minerala općenito su stabilnija jer doprinose stvaranjem boljih kemijskim vezama među njima. Vlaženje tla uzrokuje slabljenje kohezivnosti među mineralima. Čvrstoća tla podrazumijeva kombinaciju kohezije i otpornosti na sile smicanja kao što su gravitacija i djelovanje tekućica. Kapacitet infiltracije je maksimalna održiva količina vode koje tlo može apsorbirati. Kapacitet infiltracije ovisi o veličini i stabilnosti pora te obliku profila tla. Organski i kemijski sadržaj tla je važan zbog svog utjecaja na stabilnost tla (Morgan, 2005).

Vegetacija djeluje kao zaštitni sloj između atmosfere i tla. Nadzemne sastavnice vegetacije, poput lišća i stabljika, apsorbiraju dio energije kišnih kapi, tekućica i vjetra, koje su time manje usmjerene na tlo, dok podzemne sastavnice, koji čine korijenski sustav, doprinose mehaničkoj čvrstoći tla (Morgan, 2005).

Na erozivnost tla utječu različiti topografski čimbenici. Najbitniji topografski čimbenici su nagib, duljina i smjer nagiba terena. Iako postoje temeljne zakonitosti utjecaja topografskih čimbenika na procese erozije tla, važne su i specifične mikrolokacijske značajke. Nagib padine najviše utječe na brzinu površinskog otjecanja te se podrazumijeva da s povećanjem nagiba dolazi i do povećanja brzine otjecanja. Dužina padine upravlja količinom površinskog otjecanja. Kod dužih padina postoji veći potencijal za stvaranje veće količine površinskog otjecanja. Orijehtacija padine u prvom redu ponajviše utječe na varijabilnost različitih klimatskih značajki, a to su količina i intenzitet oborina, sunčeve radijacije ili temperature. Kasnije sve to utječe na količinu biljnog pokrova, a i neizravno na pojavnost i intenzitet erozije tla (Morgan, 2005).

### **2.1.3. Negativne posljedice uzrokovane erozijom tla**

Erozija svojim djelovanjem može ostaviti nepoželjne posljedice. Negativne posljedice uzrokovane erozijom tla mogu se podijeliti na izravne (engl. *on-site*) i neizravne (engl. *off-site*) (Domazetović, 2021).

Izravne posljedice erozije tla su one koje se vidljive neposredno na području samog djelovanja (URL 3). Izravne posljedice najviše djeluju na gubitak gornjih slojeva tla koji su bogati hranjivim tvarima što dovodi smanjenja kvalitete tla. Također, smanjuje se i sposobnost zadržavanja vode u tlu. Negativne posljedice se najviše osjete kod poljoprivrednih aktivnosti, kroz smanjenje prinosa. Zemlje Afrike i Azije koje su u razvoju imaju velike probleme takvim djelovanjem erozije (Cissé i dr., 2024). Negativne posljedice su čak i primjetne u visoko razvijenim dijelovima svijeta kao što su Australija, Novi Zeland, dijelovi SAD-a, te južna i istočna Europa. U bogatim područjima svijeta, učinci ubrzane izravne erozije tla na poljoprivredna tla mogu se ublažiti povećanom upotrebom umjetnih gnojiva; (URL 4).

Neizravne posljedice erozije tla se odvijaju nizvodno od izravnog djelovanja erozije tla gdje dolazi do sedimentiranja erodiranog materijala. Najveći problem stvara transport erodiranog materijala i poljoprivrednih kemikalija. Transport sedimenata može prouzročiti začepeljivanje vodotokova i brana, poremećaje ekosustava jezera te onečišćenje vode za piće. Također, može i oštetiti građevine koje se nalaze u neposrednoj blizini. Još jedna negativna posljedica je povećano otjecanje zbog smanjene sposobnosti upijanja vode tla na kojem voda otječe. Ova pojava je rjeđa nego prethodne, ali može uzrokovati velik broj nizvodnih poplava (URL 5).

## **2.2. Višegodišnje praćenje prostorno-vremenskih promjena**

### **2.2.1. Važnost višegodišnjeg praćenja erozije tla**

Trenutne promjene na tlu uzrokovane erozije je relativno lako pratiti. Navedeno se posebno odnosi na sezonske promjene nastale tijekom proljeća (Morgan, 2005). Dugotrajne promjene uzrokovane erozijom tla smanjenog intenziteta je teže pratiti u kratkom razdoblje. Kako bi se odredile razlike u odnosu na početno stanje potrebno je provoditi istraživanja tijekom dužeg razdoblja, ili koristiti arhivske (povijesne) podatke za duža razdoblja (Lal, 2017). Pomoću višegodišnjeg praćenja erozije tla cilj istraživanja je određivanje morfoloških promjena i stope gubitka tla u određenom razdoblju (Aucelli i dr., 2014).



Višegodišnji digitalni modeli reljefa (DMR) se koriste u kvantificiranju promjena nastalih erozijom tla. Korištenjem dvaju DMR-a različitog datuma moguće je stvoriti model koji prikazuje razlike između dva DMR-a. Model koji prikazuje te razlike zove se *DEM of Difference* (DoD) (Domazetović i dr., 2024). Na tom novom modelu se mogu uočiti razlike koje prikazuju područja s gubitkom i akumulacijom sedimenta. Rezultat tog procesa je dobivanje volumetrijske promjene tla određenog područja (Alfonso-Torreño i dr., 2021).

Višegodišnje praćenje erozije tla se pokazalo kao jedno važno istraživanje koje pomaže u shvaćanju morfološke evolucije određenog područja istraživanja. Korištenjem višegodišnjeg praćenja na problem erozije tla dovodi do poboljšanja znanja o krajobraznoj evoluciji, te pomaže pri određivanju prihvatljivih mjera kako bi se zaštitila područja od daljnjeg gubitka tla (Conforti i Buttafuoco, 2017).

### **2.2.2. Primjena geoprostornih tehnologija u višegodišnjem praćenju erozije tla**

Digitalna fotogrametrija može biti korisna za pružanje detaljne prostorne distribucije stopa erozije tla. Digitalna fotogrametrija je učinkovit alat u geomorfološkim studijama. Fotografije iz zraka ne samo da daju kvalitativni opis procesa i oblika reljefa, već također pružaju model iz kojeg se mogu dobiti kvantitativna mjerenja. U mnogim su studijama analizirane fotografije iz zraka kako bi se izmjerile prostorne i vremenske promjene različitih procesa denudacije kao što su erozija jaruga i padina (Aucelli i dr., 2014).

Razvoj tehnologije je znatno promijenio način prikupljanja prostornih podataka. Primjena platformi bespilotnih letjelica (UAV) i novih fotogrametrijskih tehnika, kao što je *struktura iz pokreta* (SfM) dovela je do novog shvaćanja u načinu proučavanja Zemljine površine. Jeftina fotogrametrijska tehnika SfM, pokazala se kao idealna za istraživanja s manjom ekonomskom rezolucijom, a u kojima se očekuje izvođenje preciznih 3D podataka. SfM fotogrametrija zahtijeva relativno malo obuke, jeftinija je od ostalih metoda, a učinkovita u izvođenju višegodišnjih modela. Razvoj bespilotnih letjelica olakšava prikupljanje fotografija iz zraka visoke rezolucije iz kojih se SfM tehnikom mogu dobiti gusti oblak točaka, DMR-a i DOF (digitalni ortofoto), što je osobito korisno za procjenu površinskih promjena u jarugama. Jaruge su praćene korištenjem SfM fotogrametrije kod istraživanja Xianga i Kaisera (Alfonso-Torreño i dr., 2021). Također je korištena kod istraživanja Anderson i dr. (2024), Hartwig i Ribeiro (2021), Niculita i dr. (2020) te Llena i dr. (2024)

Daljinska istraživanja su otvorila mogućnosti za analizu teško pristupačnih područja budući da ima sposobnost prikupljanja prostornih podataka visoke rezolucije. Satelitske snimke, snimke prikupljene bespilotnim letjelicama, terestričke snimke i skenovi dobiveni laserskim skeniranjem naširoko se koriste za istraživanje teško pristupačnih područja. Neugirg i dr. (2016) koriste LiDAR tehnologiju, točnije terestrički laserski skener (TLS) u višegodišnjem praćenju erozije tla. LiDAR još koriste Brecheisen i Richter (2021), Hout i dr. (2020) te Khan i dr. (2024).

### **2.2.3. Kvantitativne mjere za praćenje intenziteta erozije tla**

Osnovna kvantitativna mjera kojom se mogu utvrditi prostorno-vremenske promjene nastale erozijom tla je promjena volumena. Promjena volumena može biti rezultat erodiranja, akumuliranja i transportiranja materijala. Osim promjene volumena postoje i druge preciznije i specifičnije mjere. Osnovna obilježje svih aktivnih jaruga je kontinuirani uzmak čela jaruge (eng. *gully headcut retreat*). U njegovom izračunu također se mogu koristiti različite metrike (Domazetović, 2021). Primjerice, stopa linearnog pomaka čela jaruge prikazuje linijsku udaljenost (m) duž padine unutar koje se čelo jaruge pomaklo u određenom vremenskom razdoblju. Nadalje, stopa površinskog pomaka čela jaruge predstavlja površinski pomak ( $m^2$ ) čela jaruge u određenom vremenskom razdoblju. Stopa volumetrijskog pomaka čela jaruge se odnosi na erodirani volumen tla ( $m^3$ ) u određenom vremenskom razdoblju unutar čela jaruge, dok se stopa masenog pomaka čela jaruge odnosi na težinu (t) erodiranog materijala u određenom vremenskom razdoblju (Vanmaercke i dr., 2016).

### 3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave

S ciljem izvođenja intervalnih modela za područje poluotoka Santiš korištene su aerofotogrametrijske snimke iz arhiva Državne geodetske uprave (DGU). Teritorij Republike Hrvatske (RH) se svakih nekoliko godina periodički snima iz zraka od strane Državne geodetske uprave (DGU). Neki dijelovi su snimljeni tijekom 30-ih godina 20. stoljeća, ali prva sustavna snimanja kreću tek nakon II. Svjetskog rata. Prilikom korištenja dostupnih arhivskih aerofotogrametrijskih snimaka treba voditi računa o tehničkim specifikacijama kamera. Razlog tomu je postupni razvoj kamera s boljim tehničkim specifikacijama koje su imale kvalitetniju rezoluciju, a time i bolje fotogrametrijske proizvode.

Za potrebe ovog diplomskog rada korištene su aerofotogrametrijske snimke iz arhive DGU-a u razdoblju od 1959. do 2018. godine (Tablica 2.). Zbog slabije kvalitete i rezolucije starijih snimaka nisu sve snimke korištene za izvođenje svih vrsta prostorno-vremenskih promjena. Naime, samo su na snimkama iz 2011, 2014, i 2018, gdje su korištene moderne UltraCam aerofotogrametrijske kamere, detektirane linearne, arealne i volumetrijske promjene. Stoga će se za razdoblje od 1959. do 2007. godine detektirati samo linearne i arealne promjene. Pregled svih aerofotogrametrijskih snimaka i podataka je dan u tablici 2. Podaci za 1959. i 1973. godinu nisu dostupni jer snimanje obavljao Geografski institut, a kasnije Vojnogeografski institut iz Beograda.

**Tablica 2.** Pregled aerofotogrametrijskih podataka preuzetih za istraživanje

ID	Tip podatka	Model kamere	Godina prikupljanja	Broj snimaka
1	Digitalizirani analogni aerofotogrametrijski snimak	Nema podatka	1959	4
2	Digitalizirani analogni aerofotogrametrijski snimak	Nema podatka	1973	4
3	Digitalizirani analogni aerofotogrametrijski snimak	Leica RC-20 15/4 UAGA-F	1997	4
4	Digitalizirani analogni aerofotogrametrijski snimak	Carl Zeiss RMK Top 15	2001	3
5	Digitalizirani analogni aerofotogrametrijski snimak	Leica RC-20 15/4 UAGA-F	2006	7
6	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Intergraph Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC)	2007	4
7	Digitalni	Vexcel Imaging GmbH	2011	4

	aerofotogrametrijski snimak	UltraCam X		
8	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Vexcel Imaging GmbH UltraCam Condor M1 f80	2014	4
9	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Vexcel Imaging GmbH UltraCam Eagle M3 f100	2018	5

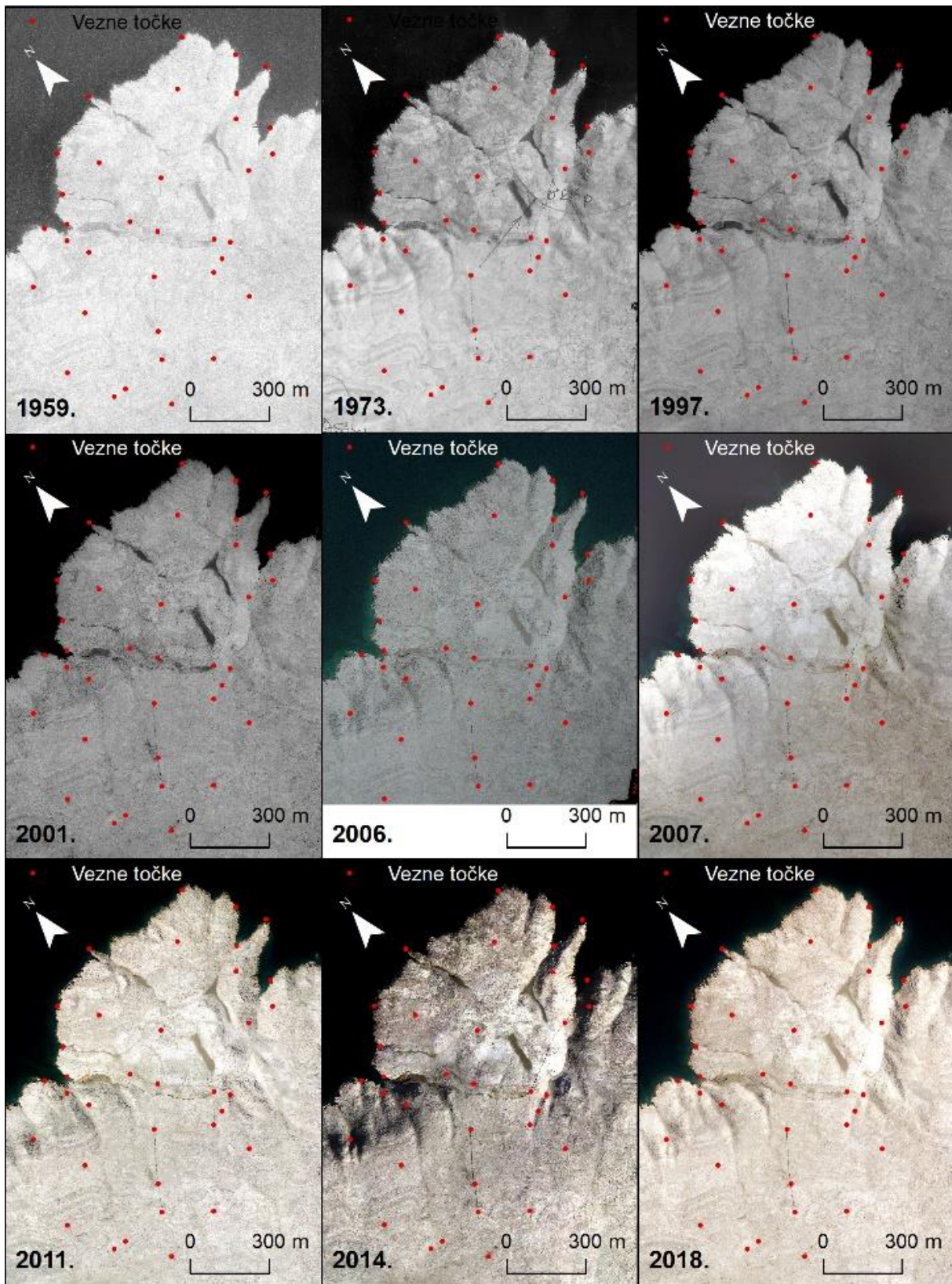
Izvor: Domazetović, 2021.

### 3.1.1. Georeferenciranje DGU snimaka

Proces georeferenciranja DGU snimaka izveden je u tri koraka.

1. Grubo georeferenciranje
2. Fino georeferenciranje
3. Validacija točnosti georeferenciranja

U prvom koraku izvedeno je *grubo* georeferenciranje. Grubo georeferenciranje označava inicijalno pozicioniranje snimaka uz pomoć desetak veznih točaka sa šireg prostora istraživanja. U drugom koraku koji označava *fino* georeferenciranje DGU snimke su pozicionirane pomoću tridesetak točaka unutar samog područja istraživanja. U zadnjem koraku izvršena je provjera točnosti *finog* georeferenciranja. Točnost georeferenciranih DGU snimaka je provjerena s dodatnih desetak kontrolnih točaka unutar područja istraživanja.



**Slika 5.** Vezne točke korištene za *grubo* georeferenciranje intervalnih DGU snimaka

Proces *grubog* georeferenciranja je izveden u softveru ArcMap 10.4.1 pomoću alata *Georeferencing*. Korištena je podloga DOF-a RH iz 2011 učitana preko WMS-a. Prvo je svaki snimak pomoću desetak veznih točaka (markera) georeferenciran na šire područje oko poluotoka Santiš. Markeri su postavljani na točke u prostoru za koje se pretpostavlja da se nisu promijenili u odnosu na prošlost, tako su korišteni rtovi, vrhovi uvala, suhozidi (križanja ili krajevi), te prepoznatljivi objekti (Slika 5.). Cilj je bio da se snimci preklapaju sa što manjom srednjom kvadratnom pogreškom (RMSE). Proces grubog georeferenciranja je napravljen samo na snimkama od 1959. do 2007. godine jer nisu imale zadan koordinatni sustav. Snimke od 2011. do 2018. su imale zadan koordinatni sustav te nije postajalo nikakvo značajno odstupanje u odnosu na podlogu. Transformacija snimaka šireg područja je napravljena pomoću geometrijske transformacije *3rd Order Polynomial*.

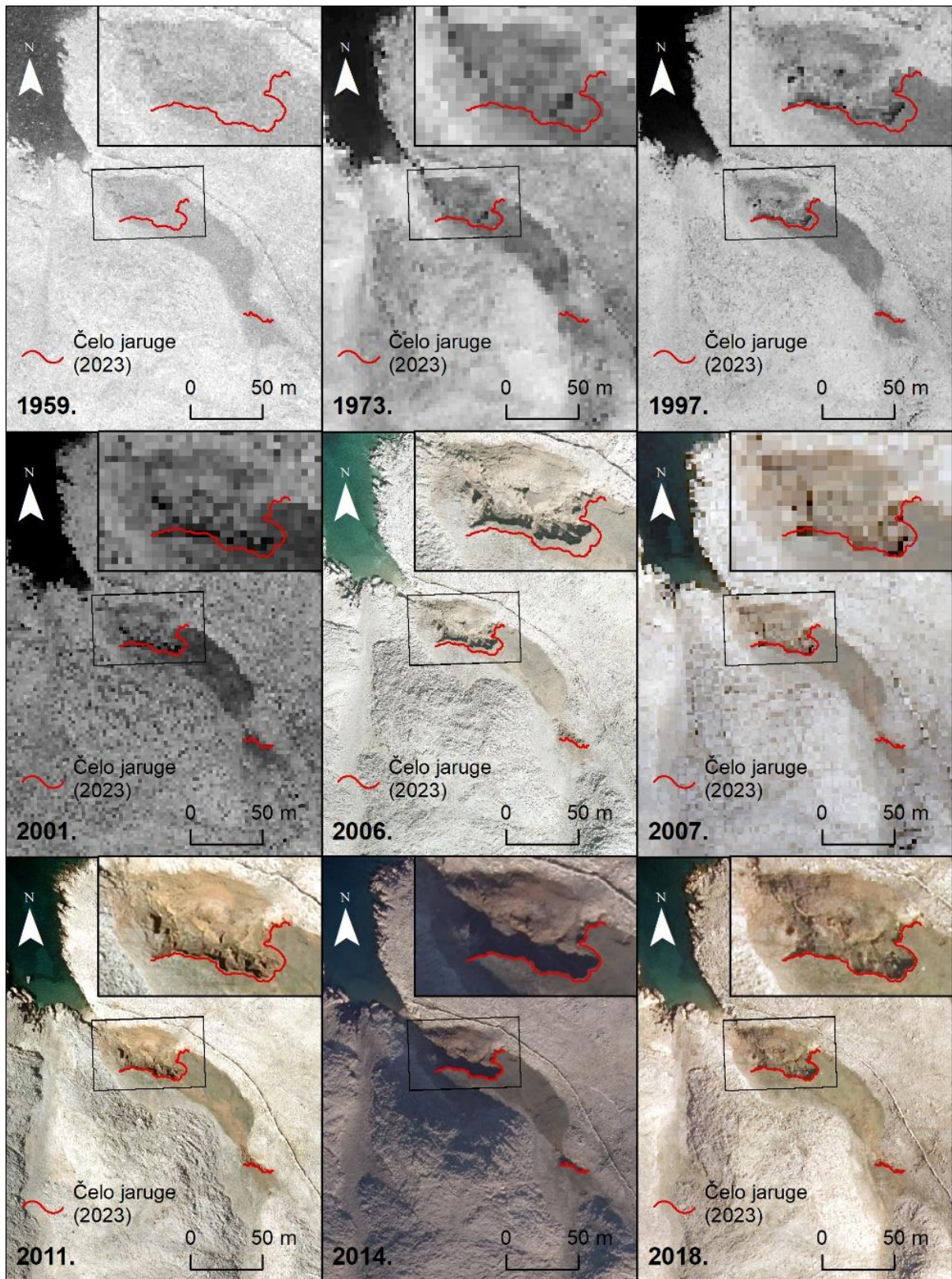
Potom je izvedeno georeferenciranje užeg područje poluotoka Santiš. Proces je bio jednak kao i kod šireg područja, s razlikom u broju veznih točaka, referentnoj podlozi te manjoj srednjoj kvadratnoj pogrešci. Dakle, svaki grubo georeferencirani snimak je s dodatnih tridesetak točaka naknadno georeferenciran kako bi rezultati preklapanja bili što bolji. Referentna podloga koja je korištena za georeferenciranje snimaka je DOF iz 2023 izveden UAV fotogrametrijom s prostornom rezolucijom od 3,84 cm. Iznos srednje kvadratne pogreške nakon finog georeferenciranja je morao biti ispod zadovoljavajućih 75 cm. Snimka iz 2018. nije georeferencirana jer vizualnom analizom nije postojalo značajno odstupanje od referentnog snimka DOF (2023). U Tablici 3. je prikazan broj veznih točaka, metoda transformacije, srednja kvadratna pogreška te prostorna rezolucija za svaku snimku. Transformacija snimaka užeg područja je napravljena pomoću geometrijske transformacije *Adjust*. Razlog primjene geometrijske transformacije *Adjust* je ta što ostvaruje zadovoljavajuće rezultate gdje je potrebno izvršiti prostorno-vremensku analizu uz pomoć satelitskih i zračnih snimaka (Kulenović, 2023). Transformacija *Adjust* se sastoji od algoritma koji kombinira polinomnu transformaciju i trijangulacijsku nepravilnu mrežu (TIN) (URL 6).

**Tablica 3.** Značajke finog georefenciranja DGU snimaka

<b>Godina</b>	<b>Broj veznih točaka</b>	<b>Metoda transformacije</b>	<b>RMSE</b>	<b>Prostorna rezolucija (m)</b>
1959	24	<i>Adjust</i>	0,24	0,73
1973	27	<i>Adjust</i>	0,47	2,71
1997	29	<i>Adjust</i>	0,48	1,13
2001	25	<i>Adjust</i>	0,52	2,36
2006	28	<i>Adjust</i>	0,44	0,19
2007	31	<i>Adjust</i>	0,48	1,76
2011	30	<i>Adjust</i>	0,42	0,31
2014	30	<i>Adjust</i>	0,11	0,34
2018	-	-	-	0,30

Zbog lošije prostorne rezolucije pojedinih aerofotogrametrijskih snimka odlučeno je da one neće biti korištene u daljnjoj analizi. Razlog tomu je nemogućnost prepoznavanja i kartiranja erozijskih formi, poput čela jaruga koja se nalaze unutar područja istraživanja (Slika 6.). Uzrok loše prostorne rezolucije pojedinih snimaka su lošiji modeli fotogrametrijskih kamera te loša digitalizacija analognih aerofotogrametrijskih snimaka. Dakle, zbog nedovoljne detaljnosti prikaza erozijskih formi u daljnjoj obradi i analizi su isključene snimke iz 1959., 1973., 1997., 2001. i 2007. godine. Snimka na kojima je detaljnost prikaza dovoljno dobra za detekciju postojećih erozijskih formi u pravilu imaju prostornu rezoluciju ispod 0.5 m. Od dostupnih DGU snimaka, samo snimci iz 2006. (0,19 m), 2011. (0,31 m), 2014. (0,34 m) i 2018. (0,30 m) imaju zadovoljavajuću detaljnost prikaza te su korištene u daljnjoj analizi.

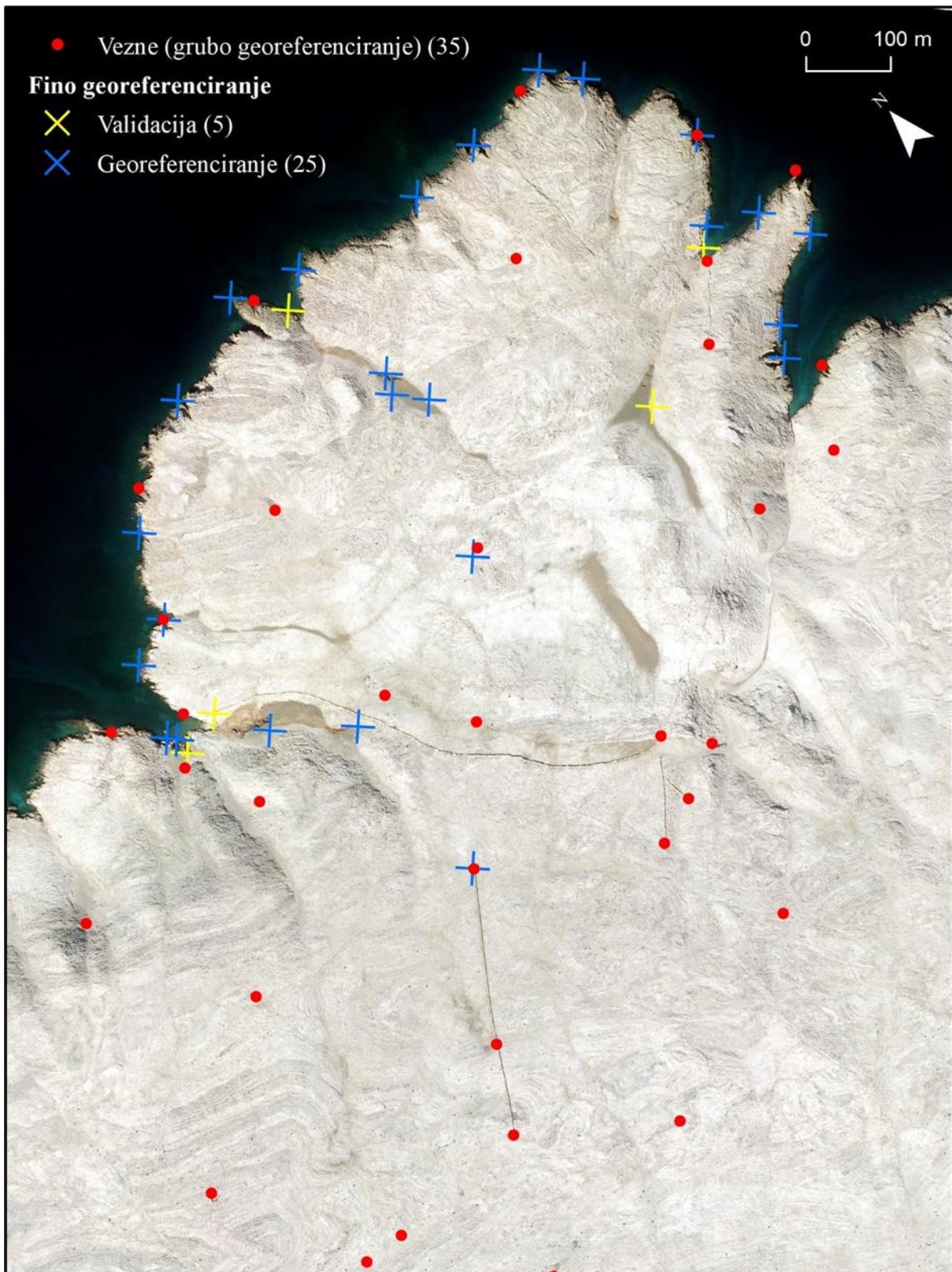




**Slika 6.** Usporedba detaljnosti prikaza jaruge Santiš na grubo georeferenciranim intervalnim snimkama DGU-a



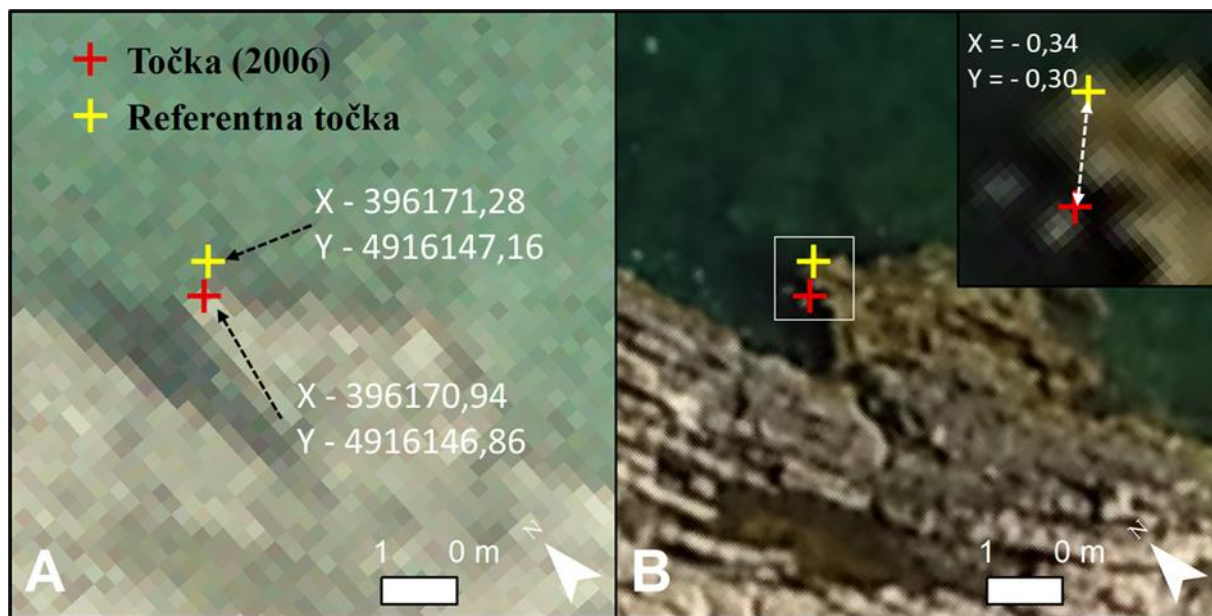
Proces *finog* georeferenciranja je također napravljen u programu ArcMap 10.4.1 pomoću alat *Georeferencing*. Za razliku od *grubog* georeferenciranja gdje je korištena *Adjust* metoda transformacije snimaka, zbog poboljšanja mikro-lokacijske točnosti pozicioniranja za *fino* georeferenciranje je odabrana *Spline* metoda georeferenciranja. *Spline* metoda transformacije se koristi kad postoje velika odstupanja na lokalnoj razini snimka. Dodavanje više kontrolnih točaka dovodi do povećanja točnosti *spline* transformacije (URL 6). *Fino* georeferenciranje napravljeno je u krupnijem mjerilo od prethodnog *grubog* georeferenciranja, koje je za sva četiri intervalna snimka iznosilo 1:500.



**Slika 7.** Prikaz prostorne distribucije veznih točaka korištenih za fino georeferenciranje i referentnih točaka korištenih za validaciju točnosti finog georeferenciranja

### 3.1.2. Procjena točnosti georeferenciranja DGU snimaka

Važnost procjene točnosti kod korištenja intervalnih aerofotogrametrijskih DGU snimaka objašnjena je u ranijim istraživanjima koja su koristila ove podatke za kvantifikaciju prostorno-vremenskih promjena (Pedić, 2023). Poslije završetka *finog* georeferenciranja na temelju pet referentnih točaka napravljena je procjena pozicijske točnosti za svaki DGU snimak korišten u analizi. S obzirom da je pozicijska točnost georeferenciranih snimaka najbitnija unutar proučavanih jaruga i naslaga tla, referentne točke raspoređene su u njihovoj neposrednoj blizini (Slika 7.). Pet referentnih točaka pozicionirano je na lako prepoznatljivim dijelovima reljefa, poput specifičnih dijelova obale, ili većih kamenih blokova. Pri tome su za referentne točke odabrane samo one lokacije za koje je bilo moguće utvrditi da nije došlo do značajnijih prostorno-vremenskih promjena, pogotovo u kontekstu promjene pozicije (X i Y) odabrane točke. Odabranih pet točaka vektorizirano je na referentnom visokorezolucijskom DOF-u (UAV) iz 2023. godine u mjerilu 1:300, nakon čega su za svaku točku izračunate referentne XY koordinate. Zatim su u identičnom mjerilu vektorizirane iste lokacije (točke) na georeferenciranim DGU snimcima te su ponovno izračunate XY koordinate (Slika 8.). Koordinate točaka prikupljenih na georeferenciranim snimcima su zatim uspoređene s referentnim koordinatama, pri čemu je izračunato njihovo odstupanje po X i Y koordinati.



**Slika 8.** Princip procjena točnosti georeferenciranja DGU snimka iz 2006. godine (A) na temelju referentne točke izdvojene iz visokorezolucijskog DOF-a (B)

Na temelju razlike u vrijednostima između georeferenciranih koordinata u odnosu na referentne koordinate izračunate su dvije standardne metrike za procjenu točnosti izrađenih modela: srednja apsolutna pogreška (engl. *Mean Absolute Deviation - MAD*) te srednja kvadratna pogreška (engl. *Root Mean Square Error - RMSE*).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X,Y)_{ref} - (X,Y)_{georef}}{n}} \quad (1)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |(X,Y)_{ref} - (X,Y)_{georef}|}{n} \quad (2)$$

gdje su:

$(X, Y)_{ref}$  – X, Y koordinate specifične točke na referentnom snimku

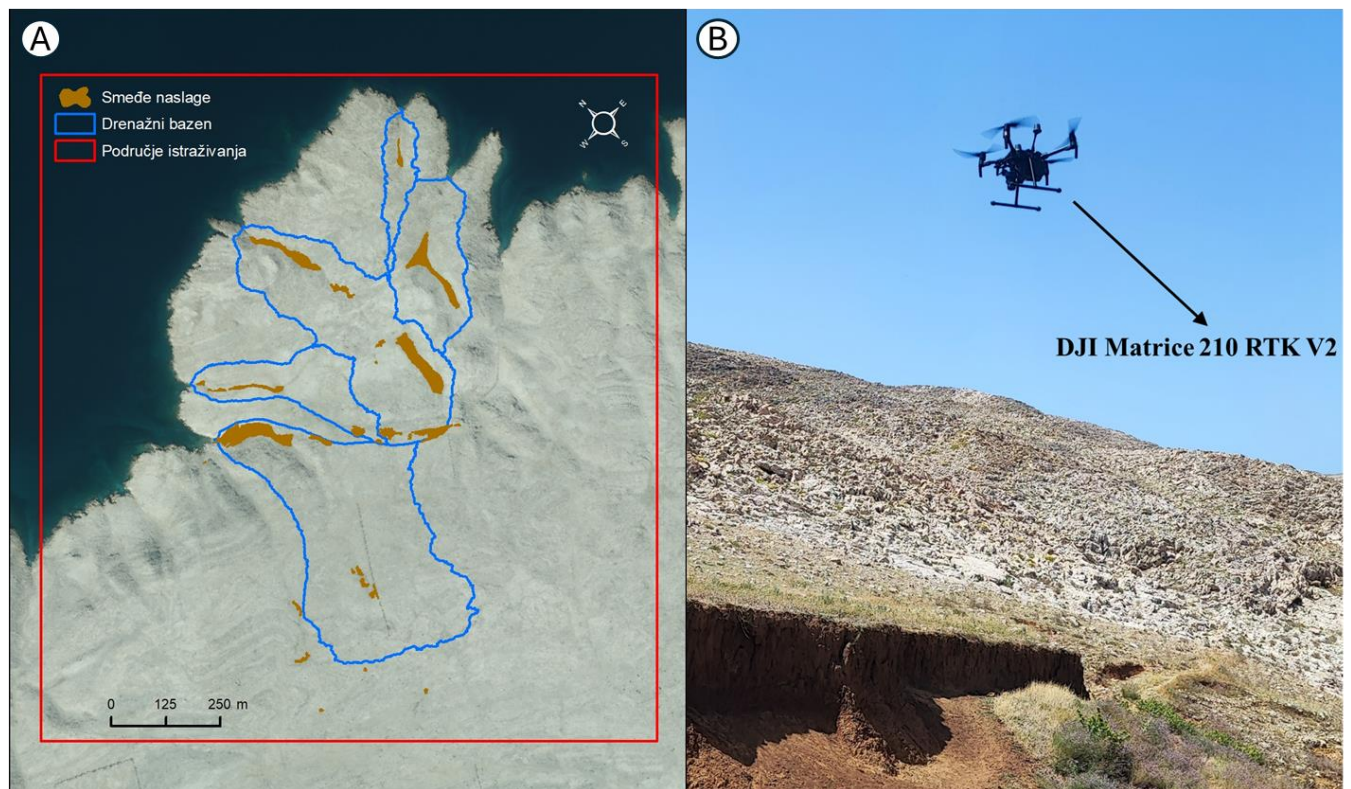
$(X, Y)_{georef}$  – koordinate specifične točke na georeferenciranom intervalnom DGU snimku

n - broj kontrolnih točaka



### 3.2. Aerofotogrametrijska UAV izmjera područja istraživanja

Tijekom terenskog istraživanja korištena je metoda UAV fotogrametrijskog snimanja šireg područja poluotoka Santiš. UAV fotogrametrijsko snimanje je izvršeno 21. srpnja 2023. godine (Slika 9. A). Pomoću prikupljenih podataka izrađen je najnoviji model (DOF 2023) koji je korišten u analizi linearnih i volumetrijskih promjena erozije tla te kao osnova za proces georeferenciranja starijih snimaka prikupljenih od strane DGU-a. Područje istraživanja snimljeno je bespilotnom letjelicom *DJI Matrice 210 RTK V2*, kineske tvrtke *DJI* i kamerom *DJI Zenmuse x7* (16 mm) (Slika 9. B).



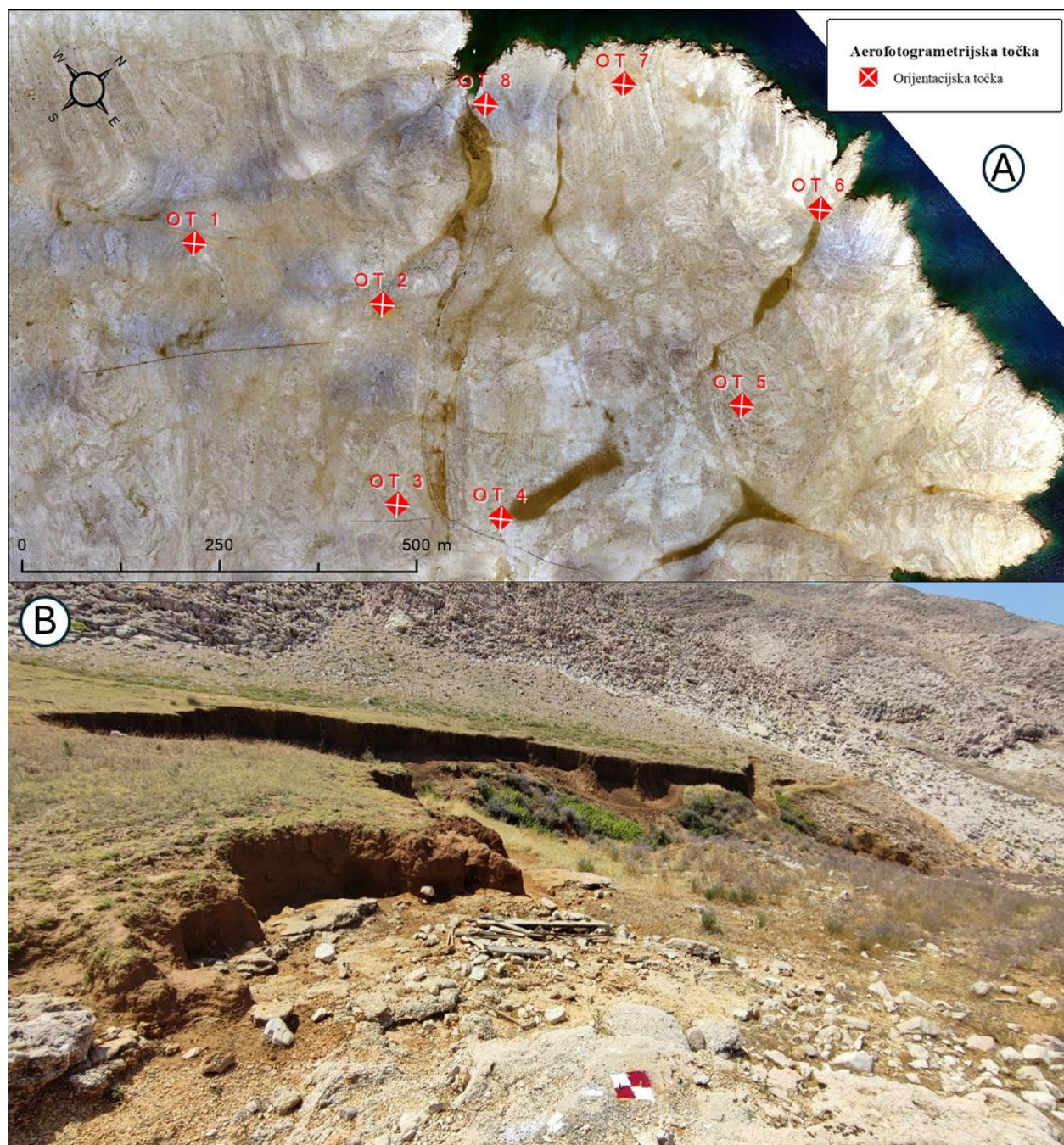
Slika 9. (A) Područje aerofotogrametrijskog UAV snimanja (B) DJI Matrice 210 RTK V2

#### 3.2.1. Planiranje UAV misije i odabir postavki kamere

Prilikom planiranja aerofotogrametrijskog snimanja korištena je aplikacija *DJI Pilot*. Zbog nemogućnosti kreiranja *double grid* misija u aplikaciji, korištene su dvije *single grid* misije. Kako bi apsolutna točnost modela bila što bolja prije UAV fotogrametrijskog snimanja je prikupljeno osam orijentacijskih točaka (Slika 10. A) Točke koje su prikupljene su korištene kao kontrolne točke (engl. *ground control point* - GCP) i točke za provjeru (engl. *check point* - CP). Kako bi se



točke što bolje isticale na svijetloj karbonatnoj podlozi označene su crvenom bojom, dok su točke na smeđim naslagama označene crvenom i bijelom bojom (Slika 10. B). Koordinate točaka su prikupljene *Trimble R12i* GNSS-om u HTRS96 koordinatnom sustavu, dok je nadmorska visina prikupljena kao geoidna visina (Tablica 4.).



**Slika 10.** (A) Prostorni raspored orijentacijskih točaka unutar područja istraživanja; (B) Prikaz orijentacijske točke

**Tablica 4.** Koordinate prikupljenih točaka u HTRS96TM koordinatnom sustavu

Naziv	X (m)	Y (m)	Z (m)
OT1	395685,65	4915458,95	130,91
OT2	395899,02	4915590,78	111,80
OT3	396106,22	4915440,00	116,64
OT4	396204,66	4915529,55	105,23
OT5	396292,58	4915854,97	86,91
OT6	396166,51	4916092,52	51,26
OT7	395884,76	4916005,05	56,55
OT8	395790,55	4915855,05	53,28

Postavke kamere su definirane prema primjerima dobre prakse UAV snimanja. Zbog odabrane brzine kretanja i visine leta UAV-a je korišten *shutter priority* (S) način snimanja. Kod odabira navedenog načina snimanja se veličina otvora blende (engl. *f-stop* ili *aperture*) i ISO se mogu automatski mijenjati kako bi vrijednost ekspozicije ostala (0,0) te se osiguralo dovoljno svjetla. Brzina zatvarača (engl. *shutter speed*) se fiksira. Zbog brzine leta i velike osvjetljenosti brzina zatvarača je postavljena na fiksnu vrijednost od 1/800. Otvor blende je automatski postavljen od maksimalne vrijednosti f/5 do minimalne vrijednosti f/2.8. ISO je automatski podešavan od minimalne vrijednosti koja je iznosila 100 do maksimalne koja je iznosila 250. Za vrijeme snimanja korišteno je ručno fokusiranje (eng. *manual focus*) koje je postavljeno na način da kad se UAV uzdigao na određenu visinu snimanja se snimanje zaustavilo. Zatim je uključeno automatsko fokusiranje pomoću upravljača nakon čega je fokus zaključan te postavljen na opciju ručnog fokusiranja. Time je fokus bio „zaključan“ za vrijeme cijelog leta. U *Agisoftu* je provjerena kvaliteta prikupljenih fotografija pomoću opcije *image quality*. U izradi modela je korišteno 637 fotografija.

### 3.2.2. Izrada visokorezolucijskih modela iz prikupljenih UAV snimaka

UAV snimke su obrađene u programu *Agisoft Metashape Professional 2.0.1*. *Agisoft Metashape* je najpopularniji program namijenjen za fotogrametrijsku obradu digitalnih snimaka i izvođenje 3D modela. Cijeli proces je automatiziran, dok proces rezultira visoko kvalitetnim digitalnim modelima površina (DMP) (engl. *digital elevation model* - DEM) i digitalnim ortofotom (DOF) (*Agisoft*, 2019). Proces obrade je izveden u osam ključnih koraka.

Prije same obrade fotografija bilo je potrebno provjeriti XMP meta podatke u *Tools/Preference/Advanced*. U XMP meta podacima se nalaze postavke koje se odnose na učitavanje podataka kamere (kalibracija, preciznost lokacije, orijentacija).

Prvi korak se odnosi na uvoz fotografija u programu Agisoft. Nakon uvoza se procjenjuje kvaliteta (engl. *image quality*) prikupljenih fotografija. Mutne i loše fokusirane fotografije loše utječu na povezivanje fotografija, stoga je procjena kvalitete ključan korak pri izvođenju fotogrametrijskog procesa (Marić, 2020). Preporuka je da se fotografije koje imaju kvalitetu manju od 0.5 uklone (Agisoft, 2019).

Drugi korak obuhvaća rješavanje problema relativne orijentacije fotografija, a pritom se misli na povezivanje fotografija (engl. *align photos*). U ovom koraku se izvodi rijetki oblak točaka koji pritom predstavlja vezne točke između preklapajućih fotografija (Marić, 2020). Slijedeći parametri se koriste pri proces povezivanja fotografija: *accuracy*, *key point limit* i *tie point limit*. Postavljena vrijednost za *accuracy* je bila *high*. Veća vrijednost predstavlja i preciznije određivanje položaja kamere u prostoru. Za parametar *key point limit* postavljena vrijednost je iznosila 80 000. *Key point limit* predstavlja gornju granicu broja veznih točaka na svakoj snimci pri rješavanju problema relativne orijentacije. Ako se želi omogućiti pronalazak maksimalnog broja veznih točaka onda se postavlja vrijednost 0, ali to može imati negativan učinak na pouzdanost točaka i vrijeme obrade. Zadnji parametar koji se postavlja je *tie point limit*. On predstavlja gornju granicu veznih točaka koje se mogu identificirati na najmanje dvije fotografije. Odabrana vrijednost za parametar *tie point limit* je iznosila 20 000. Na kraju je izvedeno oko 2 300 000 veznih točaka.

Kako bi se smanjila reprojekcijska pogreška (engl. *reprojection error*) korišten je alat gradualne selekcije (engl. *gradual selection*). Korišteni su parametri pogreške reprojekcije (engl. *reprojection error*) i nesigurnosti rekonstrukcije (engl. *reconstruction uncertainty*). Vezne točke s reprojekcijskom pogreškom većom od 0,45 i nesigurnosti rekonstrukcije većom od 80 su filtrirane i uklonjene. Nakon uklanjanja točaka ponovno je izvedena optimizacija kamere (engl. *optimize camera*).

Zatim su dodane orijentacijske točke (GCP i CP). Za apsolutnu orijentaciju modela korištene su GCP, a za provjeru točnosti modela CP. Korištenjem opcije *Filter Photos by Marker* dodani su markeri. Nakon što su dodani svi markeri položaj rijetkog oblaka točaka je ažuriran (engl. *update*). Zatim je ponovno napravljen korak uklanjanja veznih točaka s reprojekcijskom pogreškom većom od 0,45 i nesigurnosti rekonstrukcije većom od 80. Na kraju je ponovno napravljena optimizacija kamere. Potom je slijedio korak izgradnje gustog oblaka točaka (engl. *Build Dense Cloud*) i mreže poligona (engl. *arbitrary*). Parametri koji su korišteni pri stvaranju gustog oblaka točaka su slijedeći: *high quality* i *aggressive filtering* mode. Nakon izrade gustog oblaka točaka

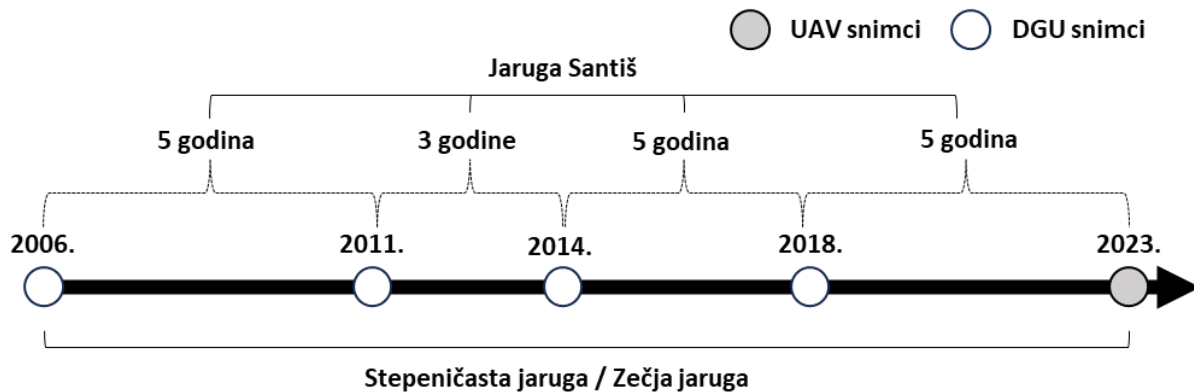


napravljena je tekstura poligonske mreže (engl. *Build texture*). Na kraju su izrađeni digitalni model površina (engl. *Build DEM*) i digitalni ortofoto snimak (engl. *Build orthomosaic*). Izrađeni modeli su zatim eksportirani u HTRS96 koordinatnom sustav s ciljem daljnje analize.

### 3.3. Detekcija višegodišnjih linearnih i arealnih PVP na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih DGU snimaka

Detekcija linearnih i arealnih višegodišnjih PVP uzrokovanih erozijom napravljena je uz pomoć razvijenog *Linear Headcut Calculator* alata (LHC), pri čemu su korišteni obrađeni DGU aerofotogrametrijski snimci (2006., 2011., 2014. i 2018. godina) te DOF izrađen UAV fotogrametrijom (2023. godina).

Prvo je za tri analizirane jaruge (jaruga Santiš, Stepeničasta jaruga, Zečja jaruga) napravljena detekcija linearnih i arealnih PVP za cijelo višegodišnje proučavano razdoblje (2006. – 2023.). Nakon toga je za glavno čelo jaruge Santiš napravljena detaljnija analiza (Slika 11.). Detaljnija analiza je uključivala detekciju PVP unutar pojedinih vremenskih perioda (2006.-2011; 2011.-2014; 2014.-2018; 2018.-2023.), radi dobivanja detaljnijeg uvida u višegodišnju varijabilnost u intenzitetu erozije tla unutar ovog čela jaruge. Ova detaljnija analiza napravljena je za glavno čelo jaruge Santiš, jer se radi o najvećem čelu unutar cijelog poluotoka Santiš, unutar kojega su u prvotnoj analizi (2006.-2023.) detektirane najveće promjene.

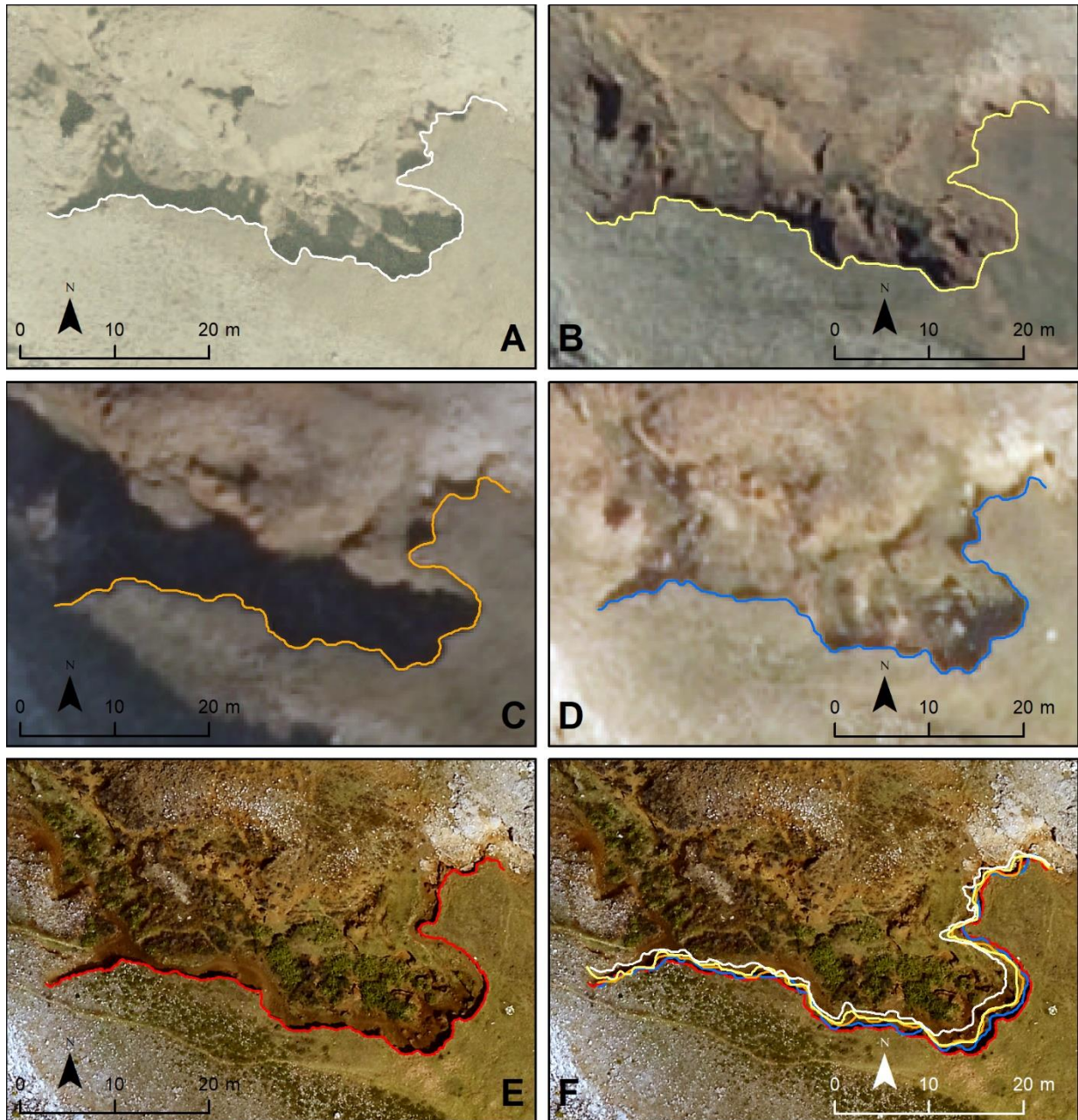


**Slika 11.** Detekcija višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla na temelju fino georeferenciranih DGU snimaka i terenski prikupljenih UAV snimaka

### 3.3.1. Kartiranje čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš

Da bi se mogao odrediti linearni i arealni pomak čela jaruga uzrokovan višegodišnjim djelovanjem erozije tla, bilo je potrebno detaljno kartirati sva postojeća čela jaruga unutar poluotoka Santiš. Kartiranje čela jaruga napravljeno je temelju fino georeferenciranih DGU snimaka za 2006., 2011., 2014. i 2018. godinu te na temelju UAV DOF snimka izrađenog 2023. godine. Pri tome je za detaljno kartiranje čela jaruga korištena metoda ručne vektorizacije u mjerilu 1:100.

Iako je mjerilo kartiranja za pojedine snimke (2006 DGU) i 2023 UAV) moglo biti i krupnije, lošija prostorna rezolucija ostalih snimaka (2011, 2014 i 2018 DGU) uvjetovala je ovakvo mjerilo kartiranja (Slika 12.). Također, radi lošije prostorne rezolucije pojedinih snimaka odlučeno je da će se kartirati samo najveća čela jaruga unutar poluotoka Santiš, koja uključuju dva čela jaruga unutar *jaruge Santiš*, jedno čelo jaruge unutar *Stepeničaste jaruge* te četiri manja čela jaruga unutar *Zečje jaruge*.



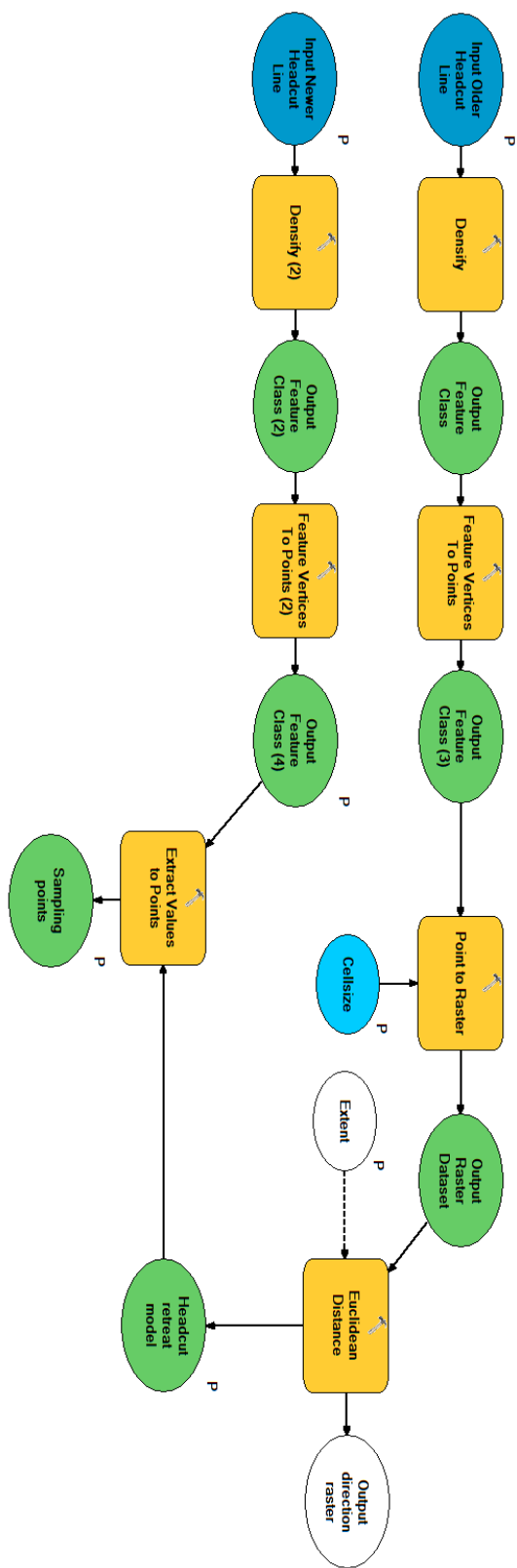
**Slika 12.** Primjer kartiranja linije koja reprezentira glavno čelo jaruge Santiš u mjerilu 1:100 na temelju različitih snimaka (A – DGU 2006; B – DGU 2011; C – DGU 2014; D – DGU 2018; E – UAV 2023; F – sve kartirane godine)

### 3.3.2. Razvoj alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga

S ciljem automatizacije i pojednostavljivanja procesa detekcije i kvantifikacije linearnog višegodišnjeg pomaka čela jaruga, napravljen je *Linear Headcut Calculator* (LHC) alat. LHC alat napravljen je u *ModelBuilder* ekstenziji za ArcGIS 10.1 softver, zahvaljujući čemu je moguće ovaj alat primijeniti za detekciju i kvantifikaciju pomaka čela jaruga i u drugim znanstvenim istraživanjima.

Da bi LHC alat mogao napraviti automatsku kvantifikaciju linearnog pomaka potrebno je definirati dva ulazna linijska vektorska sloja, koji reprezentiraju starije (engl. *older gully headcut*) i novije (engl. *newer gully headcut*) čelo određene jaruge (Slika 13.). Zatim LHC alat uz pomoć alata *Densify* proglašuje lomne točke u ova dva vektorska linijska sloja, na način da su lomne točke unutar svake linije međusobno udaljene 1 cm. U sljedećem koraku LHC alat uz pomoć *Feature vertisec to points* alata pretvara proglašene lomne točke u novi vektorski sloj (točke). Točke generirane iz lomnih točaka starijeg čela jaruge se zatim pretvaraju u raster, na temelju kojega se uz pomoć alata *Euclidean distance* alat računa euklidsku udaljenost od starijeg čela jaruge. Zatim se uz pomoć alata *Extract values to points* za sloj točaka generiranih iz lomnih točaka linije koja reprezentira novo čelo jaruge pridodaju vrijednosti euklidske udaljenosti, koje reprezentiraju linearni pomak u odnosu na starije čelo jaruge.

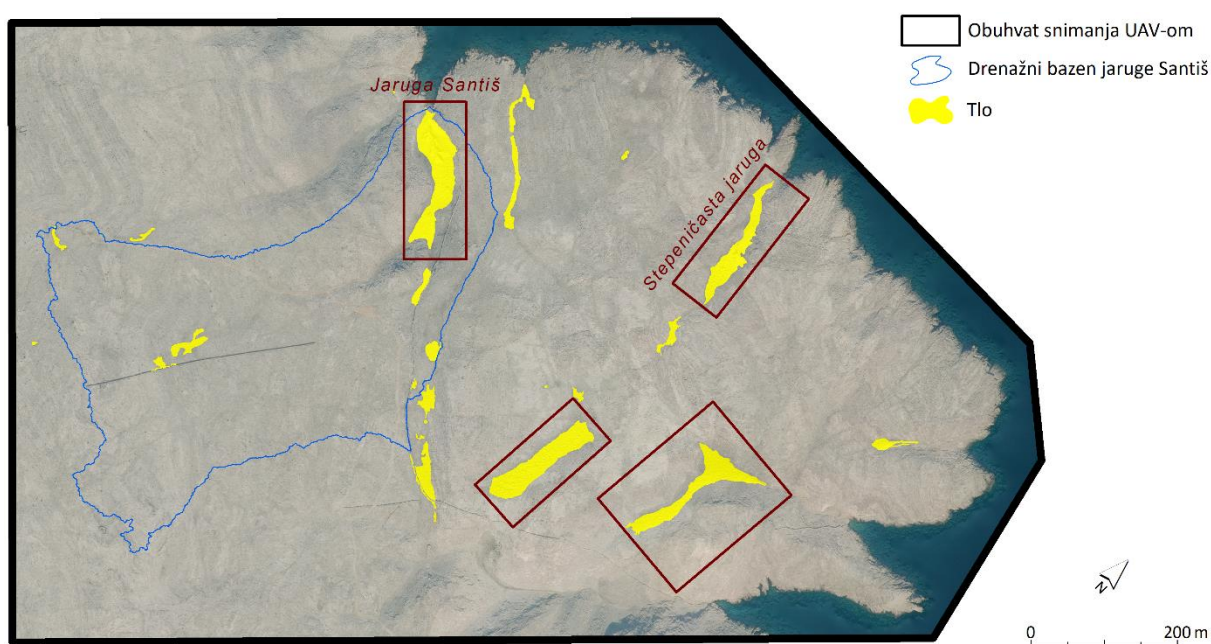
U konačnici se linije starijeg i novijeg čela jaruge spajaju i konvertiraju u poligonski sloj, a taj poligonski sloj se koristi za izrezivanje rastera euklidske udaljenosti.



Slika 13. Shematski prikaz izrađenog alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga

### 3.4. Detekcija višegodišnjih volumetrijskih PVP na temelju arhivskih aerofotogrametrijskih DGU snimaka

Volumetrijske promjene na poluotoku Santiš analizirane se unutar šireg prostora drenažnog bazena poluotoka Santiš, odnosno prostornog obuhvata UAV snimanja (2023). Planirano je analizirati volumetrijske promjene na četiri manje zasebne površine naslaga smeđeg tla (Slika 14.) unutar obuhvata UAV snimanja. Volumetrijske promjene unutar definiranih obuhvata izvedene su za razdoblje od 2011. do 2023. godine.



**Slika 14.** Prostorni obuhvat odabranih područja za analizu višegodišnjih volumetrijskih PVP

#### 3.4.1. Osnova za izvođenje volumetrijskih analiza

Kao matematička osnova za volumetrijske analize korištene su arhivske aerofotogrametrijske snimke iz Državne geodetske uprave (DGU) te snimke prikupljene bespilotnom letjelicom Matrice 210 RTK V2 u srpnju, 2023. godine (Tablica 5.).



**Tablica 5.** Ulazni podaci korišteni za analizu volumetrijskih promjena (2011. - 2024)

ID	Tip podatka	Model kamere	Godina prikupljanja	Broj fotografija
1	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Vexcel Imaging GmbH UltraCam X	2011	4
2	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Vexcel Imaging GmbH UltraCam Condor M1 f80	2014	4
3	Digitalni aerofotogrametrijski snimak	Vexcel Imaging GmbH UltraCam Eagle M3 f100	2018	5
4	UAV fotografije	Zenmuse X7 16 mm	2023	637

Izvor: prema Domazetović, 2021.

Specifikacije UAV snimanja koji uključuje odabir postavki kamere, označavanje i prikupljanje orijentacijskih i kontrolnih točaka te obradu snimki u *Agisoft Metashape-u*, za širi prostor drenažnog bazena poluotoka Santiš objašnjeno je u poglavlju 3.2. *Aerofotogrametrijska izmjera područja istraživanja*.

Proces obrade arhivskih aerofotogrametrijskih snimaka Državne geodetske uprave (DGU) za 2011., 2014. i 2018. godinu također je izveden u *Agisoft Metashape-u*. Svi modeli su obrađeni u HTRS96/Croatia TM (EPSG::3765) projekcijskom koordinatnom sustavu. Proces obrade je izveden kroz osam ključnih koraka. Prije obrade aktivirani su XMP meta podatci u Tools/Preference/Advanced. U XMP meta podacima se nalaze postavke koje se odnose na učitavanje podataka kamere (kalibracija, preciznost lokacije, orijentacija).

S obzirom na to da nakon uvoza fotografija u *Agisoft Metashape* nisu automatski očitani parametri vanjske i unutarnje orijentacije fotografija prvi korak je uključivao njihovo naknadno unošenje za svaku analiziranu godinu (Tablica 6.). Iz tablice se može uočiti da za dvije snimke iz 2011. godine nisu dostavljeni parametri vanjske orijentacije te da su aerofotogrametrijska snimanja izvođena na različitim visinama. Obe činjenice mogu utjecati na pouzdanost izvedenih izlaznih rezultata volumetrijskih promjena.

**Tablica 6.** Vanjski parametri orijentacije korištenih aerofogrametrijskih snimaka

Godina	Naziv	X	Y	Z
2011	6210	nije dostavljeno	nije dostavljeno	nije dostavljeno
2011	6211	395061,44	4915947,10	4171,36



2011	6212	395875,56	4915152,82	4172,00
2011	6213	nije dostavljeno	nije dostavljeno	nije dostavljeno
2014	01149-20141122-AS.tif	394374,80	4914604,01	4664,95
2014	01151-20141122-AS.tif	395452,86	4913480,30	4666,92
2014	01146-20141122-AS.tif	392752,37	4916290,26	4664,48
2014	01153-20141122-AS.tif	396529,64	4912356,87	4665,62
2014	00876-20141120-AS.tif	399594,12	4914969,64	4664,72
2014	00879-20141120-AS.tif	397993,61	4916612,75	4664,65
2014	00881-20141120-AS.tif	396944,48	4917741,91	4664,05
2014	00884-20141120-AS.tif	395333,95	4919404,17	4665,45
2018	00364-20180909-AS.tif	399535,76	4915934,96	7302,45
2018	00365-20180909-AS.tif	398416,60	4917303,66	7278,39
2018	00366-20180909-AS.tif	397234,54	4918668,74	7272,40
2018	00415-20180909-AS.tif	392854,32	4915591,69	7281,94
2018	00416-20180909-AS.tif	394084,25	4914147,40	7274,75

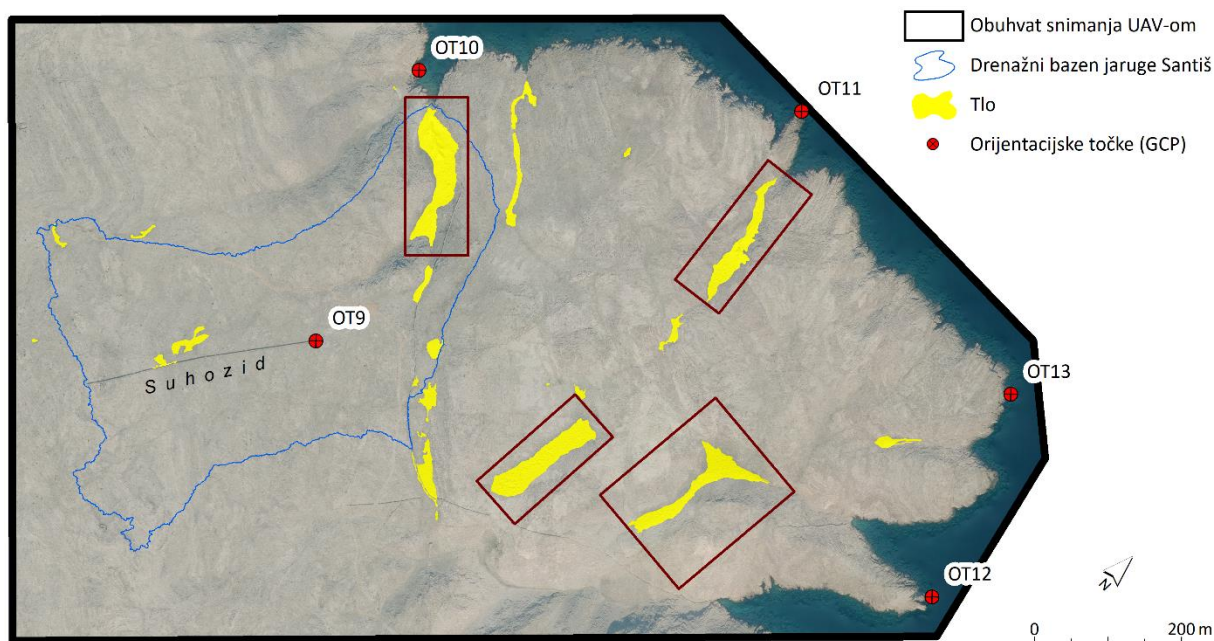
Intrizični, odnosno unutarnji kalibracijski parametri kamere su očitani iz dostavljenih kalibracijskih izvješća te za svako snimanje dodani u *Tools/CameraCalibration* prozor. Nakon dodavanja unutarnjih i vanjskih parametara izveden je drugi korak koji se odnosi na orijentaciju fotografija, odnosno njihovo povezivanje (engl. *align photos*) s ciljem rješavanja problema relativne orijentacije. U ovom koraku se fotografije orijentiraju i lociraju kako bi se stvorio rijetki oblak točaka koji pritom predstavlja vezne točke (Marić, 2020). Parametar točnosti (engl. *accuracy*) je postavljen na *highest*, a parametri ključnih točaka (engl. *key points*) te veznih točaka (engl. *tie points*) su postavljeni na 0. Veća vrijednost točnosti omogućava preciznije određivanje položaja kamere u prostoru. Vrijednost 0 za parametre ključnih i veznih točaka je postavljena zato što omogućuje pronalazak maksimalnog broja veznih točaka, odnosno detaljnijeg rijetkog oblaka točaka. U ovom slučaju je poželjno izvući maksimalni broj veznih točaka zato što je u obradi aerofotogrametrijskih snimaka DGU-a korišten manji preklapajućih snimaka. U prosjeku je unutar drenažnog bazena poluotoka Santiš izvedeno između 30 000 do 40 000 veznih točaka. S obzirom na specifikacije korištenih kamera, stabilnost zračnog snimanja te poznate vanjske i unutarnje kalibracijske parametre proces povezivanja snimaka nije izveo značajne greške u reprojekciji piksela zbog čega alati gradualne selekcije (engl. *gradual selection*), za smanjivanje reprojekcijske pogreške modela i nesigurnosti, nisu korišteni.

Nakon rješavanja problema relativne orijentacije na rekonstruirani oblak točaka i naknadno zračne snimke, dodane su orijentacijske točke (GCP) s ciljem preciznijeg smještaja modela u

globalni koordinatni sustav HTRS96/Croatia TM (EPSG::3765). Opcijom *Filter Photos by Marker* su dodani markeri koji predstavljaju orijentacijske točke. Orijentacijske točke prikupljene su u sklopu doktorske disertacije *Višerezolucijsko modeliranje erozije tla korištenjem geoprostornih tehnologija* (Domazetović, 2021). Iako je unutar užeg prostora drenažnog bazena poluotoka Santiš prikupljeno pet točaka u procesu dodavanja markera korištene su četiri točke (OT10, OT11, OT12 i OT13) (Tablica 7.). Izbačena je točka koja je bila prikupljena na rubu suhozida (OT9) (Slika 15.).

**Tablica 7.** Koordinate orijentacijskih točaka u HTRS96TM koordinatnom sustavu

Naziv	X	Y	Z
OT9	395895,54	4915508,51	77,03
OT10	395727,76	4915865,28	0,10
OT11	396130,29	4916201,83	0,14
OT12	396729,52	4915869,99	0,10
OT13	396605,6	4916139	0,10



**Slika 15.** Lokacija orijentacijskih točaka unutar poluotoka Santiš

Razlog je taj što njezino minimalno neprecizno pozicioniranje po X i Y koordinati može uvjetovati izrazito veliku grešku po Z vrijednosti (visina) koja značajno može utjecati na pouzdanost izlaznih rezultata. Nakon što su dodani svi markeri položaj rijetkog oblaka točaka je ažuriran (engl. *update*). Potom je slijedio korak izgradnje gustog oblaka točaka (engl. *Build Dense Cloud*). Parametar kvalitete, odnosno gustoće oblaka točaka postavljen je na *highest*. Navedena

vrijednost omogućuje dobivanje prostorne rezolucije DMP jednake kao i digitalnog ortofota (DOF). Prostorna rezolucija DMP-ova izvedenih na temelju aerofotogrametrijskih snimaka Državne geodetske uprave (DGU) za 2011., 2014. i 2018. godinu iznosila je 29.3 cm, 30.1 cm te 28.7 cm. Navedeni model su u Agisoft Metashape-u ujednačeni na prostornu rezoluciju od 30 cm. Prostorna rezolucija DMP izvedena na temelju UAV snimanja je također ujednačena na prostornu rezoluciju od 30 cm. Proces je izveden na način da je parametar kvalitete, odnosno gustoće oblaka točaka postavljen na *low*. To je rezultiralo dobivanjem DMP (UAV 2023) prostorne rezolucije od 30.8 cm. Potom je prilikom izvoza DMP prostorna rezolucija modificirana na 30 cm. Svi modeli prikazuju geoidnu, odnosno ortometrijsku visinu.

## 4. REZULTATI

### 4.1. Točnost georeferenciranja DGU snimaka

U tablici 8. prikazani su rezultati procjene točnosti snimaka koje su korištene za analizu PVP-a. Rezultati prikazuju vrijednost odstupanja georeferenciranih snimaka u odnosu na referentnu vrijednost za svaku validacijsku točku (VT1-VT5) i metrike (RMSE i MAD) korištene za procjenu točnosti georeferenciranja. Dobivene vrijednosti za srednju kvadratnu pogrešku se nalaze u rasponu od 0,45 m do 0,58 m, dok su kod srednje apsolutne greške u rasponu od 0,34 m do 0,5 m. Ove niske vrijednosti ukazuju da georeferencirane snimke ne odstupaju značajno od referentnog modela. Prostorna rezolucija snimaka je u rasponu od 0,19 m do 0,34 m.

**Tablica 8.** Rezultati procjene točnosti georeferenciranih DGU snimaka

Točka / Metrika	Intervalni DGU snimci							
	2006.		2011.		2014.		2018.	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
VT1	0,97	0,34	1,18	0,34	0,21	0,08	0,81	0,63
VT2	0,97	0,26	1,08	0,02	0,11	0,28	0,63	0,60
VT3	0,34	0,30	0,52	0,14	0,17	0,16	0,19	0,15
VT4	0,16	0,50	0,35	0,78	1,12	0,78	0,96	0,63
VT5	0,20	0,07	0,20	0,14	0,00	0,21	0,13	0,16
RMSE	0,64	0,33	0,77	0,39	0,52	0,39	0,64	0,49
MAD	0,55	0,30	0,68	0,30	0,36	0,32	0,56	0,44
Prosječna RMSE	<b>0,48</b>		<b>0,58</b>		<b>0,45</b>		<b>0,56</b>	
Prosječni MAD	<b>0,42</b>		<b>0,49</b>		<b>0,34</b>		<b>0,50</b>	

Mjera nepouzdanosti (Tablica 9.) kod detekcije iznosi od minimalne vrijednosti (0,34 m) do maksimalne vrijednosti (0,53 m). Vrijednost mjere nepouzdanosti se smanjuje paralelno s odmakom godina. Razlog tomu su lošije snimke iz 2011. i 2014. godine. Najmanje vrijednosti mjere nepouzdanosti su između 2006. i 2023. godine koje ujedno predstavljaju i dvije najbolje snimke.

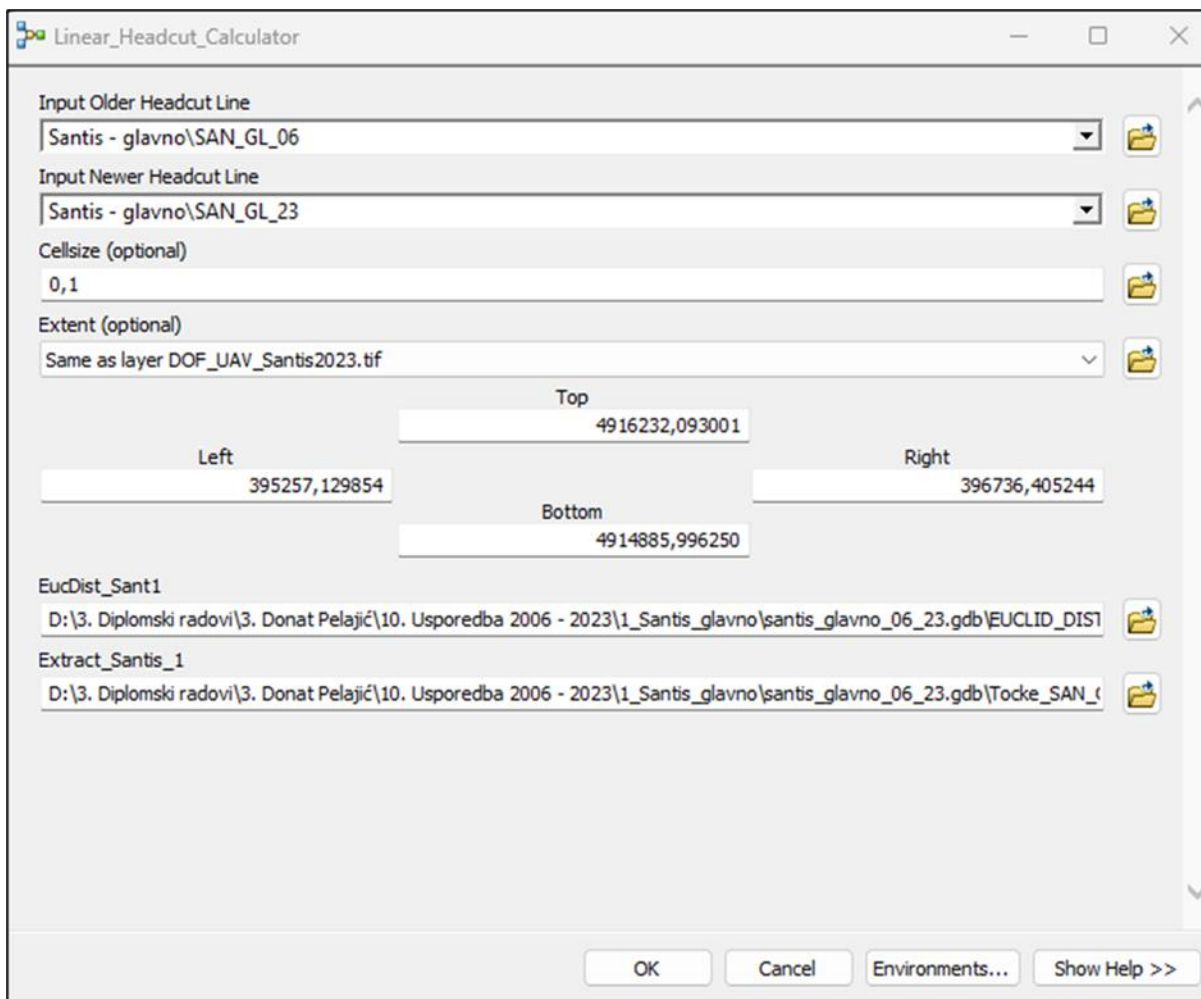
**Tablica 9.** Totalna pogreška (RMSE) kao mjera nepouzdanosti detekcije lineranog i arealnog pomaka čela jaruga

<b>Metrika</b>	<b>Razdoblje</b>				
<b>Total error</b>	<b>2006 - 2011</b>	<b>2011 - 2014</b>	<b>2014 - 2018</b>	<b>2018 - 2023</b>	<b>2006 - 2023</b>
<b>(m)</b>	0,53	0,52	0,51	0,40	0,34

#### **4.2. Izrađeni alat za automatski izračun linearnog pomaka čela jaruga**

LHC alat je primijenjen za detekciju i kvantifikaciju linearnog i arealnog pomaka čela svih analiziranih jaruga unutar poluotoka Santiš. S obzirom da je izrađen u ModelBuilder-u može se besplatno integrirati u druge verzije ArcGIS programa i koristiti za kvantifikaciju pomaka čela jaruga u drugim znanstvenim istraživanjima. Sučelje izrađenog LHC alata vidljivo je na slici 16.

Korisnik treba definirati dva ulazna sloja, koja reprezentiraju starije (engl. *Input Older Headcut line*) i novije (engl. *Input Newer Headcut line*) čelo proučavane jaruge. Također, korisnik treba definirati prostornu rezoluciju (engl. *Cellsize*) i mjesto na koje će se pohraniti generirani raster linearnog pomaka (engl. *Headcut retreat model (raster)*). Sve ostale radnje su automatizirane u sklopu alata.



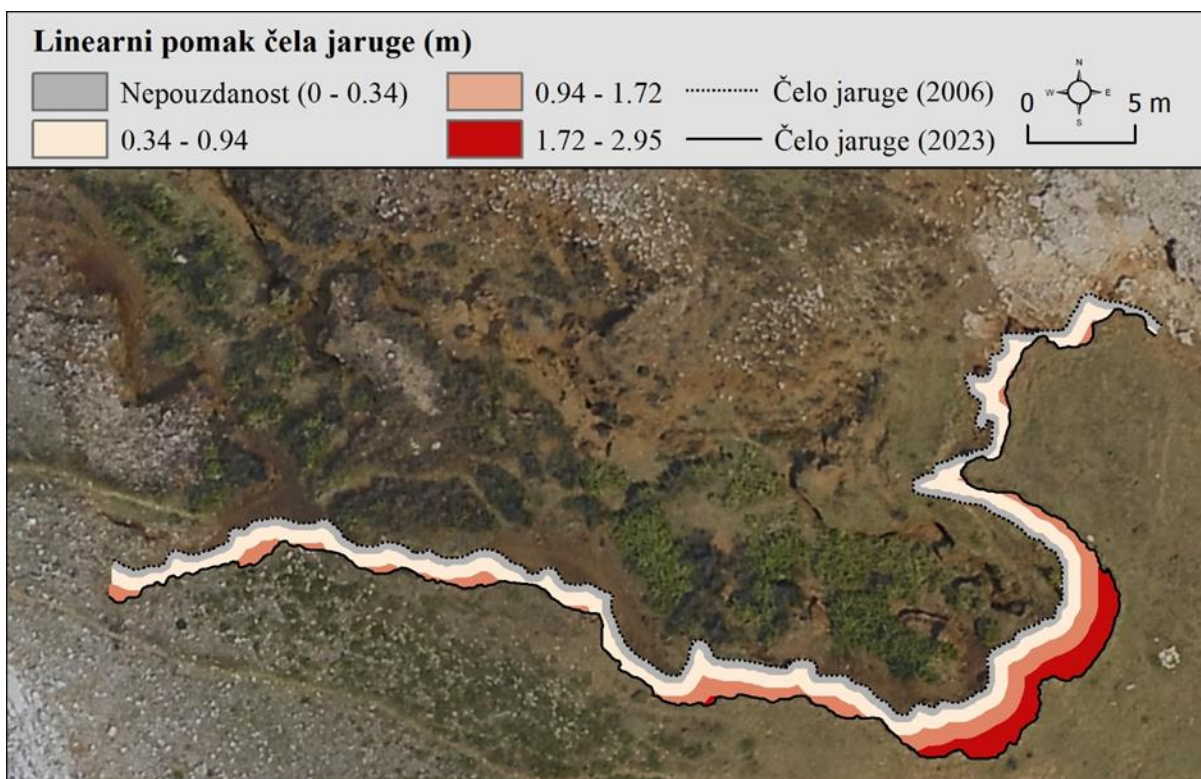
**Slika 16.** Sučelje izrađenog alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga

### **4.3. Detektirane višegodišnje prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla**

#### **4.3.1. Višegodišnji linearni pomak čela jaruga**

Na temelju dostupnih DGU snimaka napravljena je detekcija višegodišnjeg pomaka svih čela jaruga unutar poluotoka Santiš. U višegodišnjem razdoblju (2006. – 2023.) najintenzivniji linearni pomak detektiran je na glavnom čelu jaruge Santiš (Slika 17.). Najintenzivniji linearni pomak zabilježen je u središnjem dijelu čela, gdje ujedno dolazi i do najintenzivnijeg površinskog otjecanja tijekom jačih oborina. U ovom dijelu čela višegodišnji intenzitet linearnog pomaka iznosi i do 2,95 m (17,35 cm/godišnje), dok se u prosjeku čelo u ovom dijelu retrogradno pomaklo za 2,56 m (15,05 cm/godišnje). U preostalim dijelovima glavnog čela jaruge ipak prevladava slabiji intenzitet linearnog pomaka, s prosječnom vrijednosti pomaka od 1,34 m. Najslabiji intenzitet

višegodišnjeg linearnog pomaka zabilježen je na rubnim dijelovima glavnog čela, gdje je intenzitet retrogradnog pomaka u prosjeku bio ispod 1 m. S obzirom da su gotovo duž cijelog glavnog čela zabilježeni vrlo intenzivni retrogradni pomaci, utjecaj nepouzdanosti modela od 0,34 m je u slučaju ovog čela jaruge zanemariv. Prosječni višegodišnji linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš iznosi 1,38 m, odnosno oko 8,12 cm/godišnje.

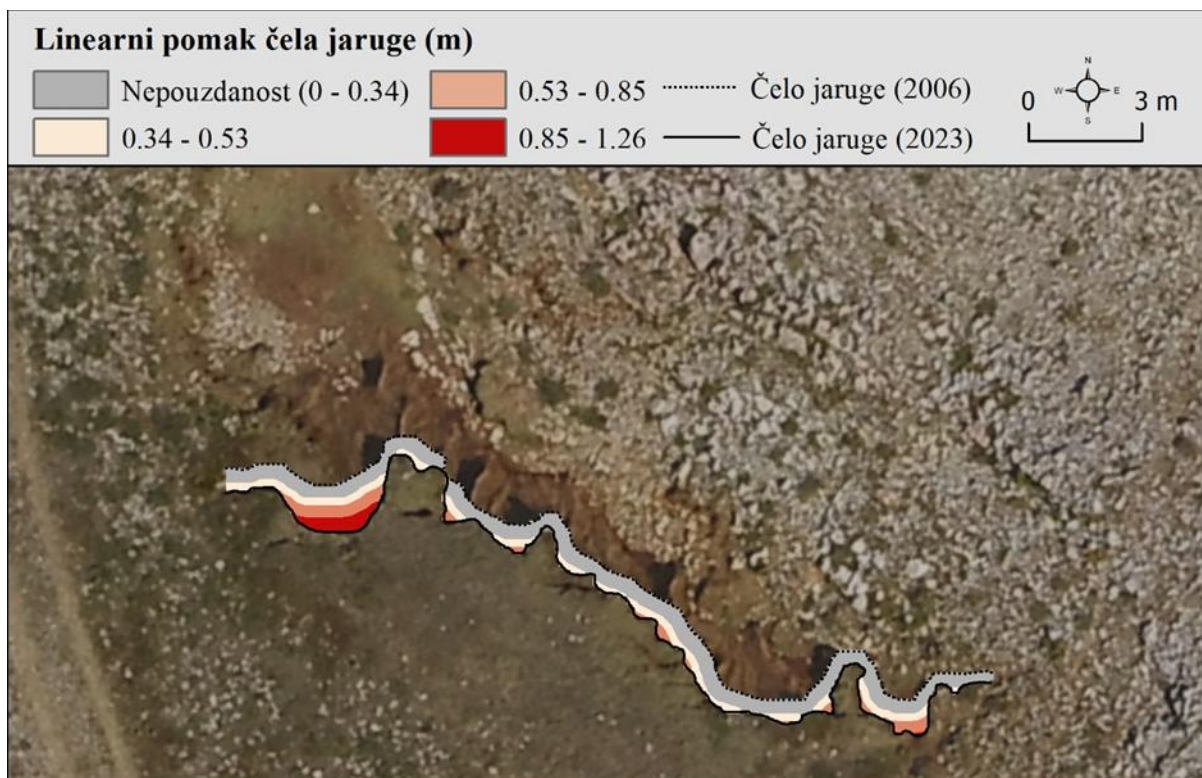


**Slika 17.** Linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš u periodu od 2006. do 2023. godine

Detektirani višegodišnji intenzitet linearnog pomaka sporednog čela jaruge Santiš je znatno manji u odnosu na glavno čelo jaruge (Slika 18.). Maksimalni zabilježeni linearni pomak ovog čela jaruge iznosi 1,26 m (7,41 cm/godišnje), dok prosječni pomak iznosi 0,54 m (3,18 cm/godišnje). Najintenzivniji pomak sporednog čela zabilježen je u zapadnom dijelu čela, gdje je prosječni višegodišnji pomak iznosio 1,11 m. Dok su u preostalim dijelovima ovog čela prilikom terenskih istraživanja zapaženi tragovi erozijskih procesa slabijeg intenziteta, poput spiranja, na ovom dijelu čela su zabilježeni intenzivniji procesi poput brazdanja i slabijeg odronjavanja materijala. Takvi intenzivniji procesi uzrokovani su izraženijim povremenim površinskim otjecanjem, koje je u ovom dijelu čela najintenzivnije. Treba napomenuti da se zbog znatno manjeg intenziteta detektiranih PVP, kod ovog čela jaruge značajni dio detektiranih promjena nalazi unutar



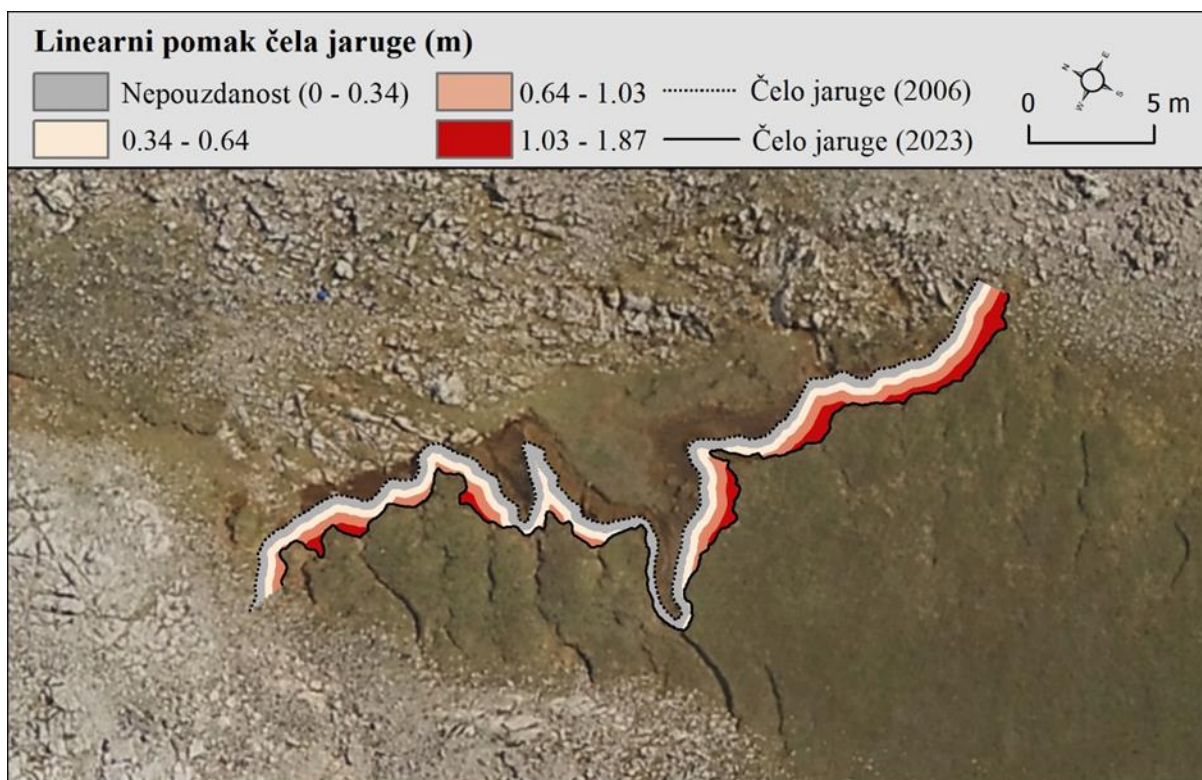
procijenjene nepouzdanosti korištenih DGU snimaka, zbog čega su te promjene morale biti isključene iz daljnje analize.



**Slika 18.** Linearni pomak sporednog čela jaruge Santiš u periodu od 2006. do 2023. godine

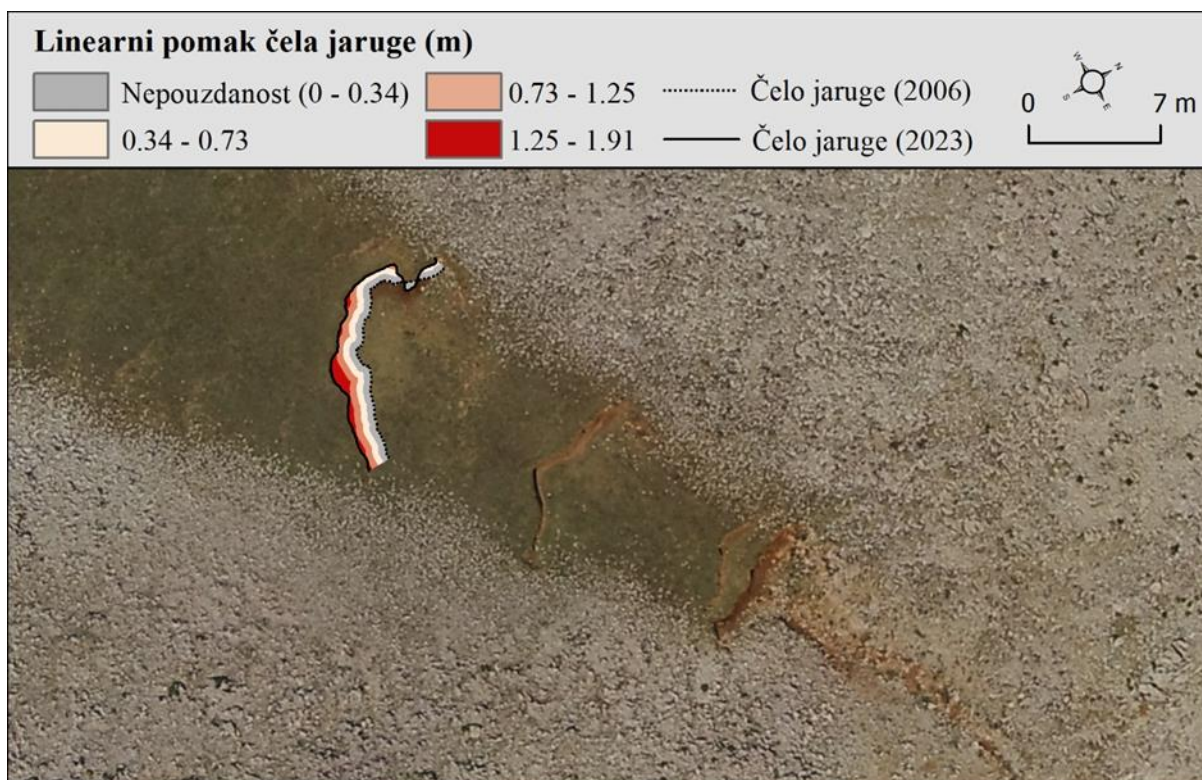
Višegodišnji intenzitet linearnog pomaka u slučaju Stepeničaste jaruge manji je nego u slučaju glavnog čela jaruge Santiš, ali je ipak veći nego u slučaju sporednog čela jaruge Santiš (Slika 19.). Maksimalni intenzitet linearnog pomaka iznosi 1,87 m (11 cm/godišnje), a prosječne vrijednosti pomaka su ipak nešto manje (1,01 m – 5,94 cm/godišnje). Intenzitet promjene je izraženiji na istočnom dijelu (1,38 m), u odnosu na zapadni (0,80 m) dio čela Stepeničaste jaruge. Na središnjem dijelu čela intenzitet je najmanji, gdje su većinom vrijednosti PVP-a ispod razine nepouzdanosti.





**Slika 19.** Linearni pomak čela Stepeničaste jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

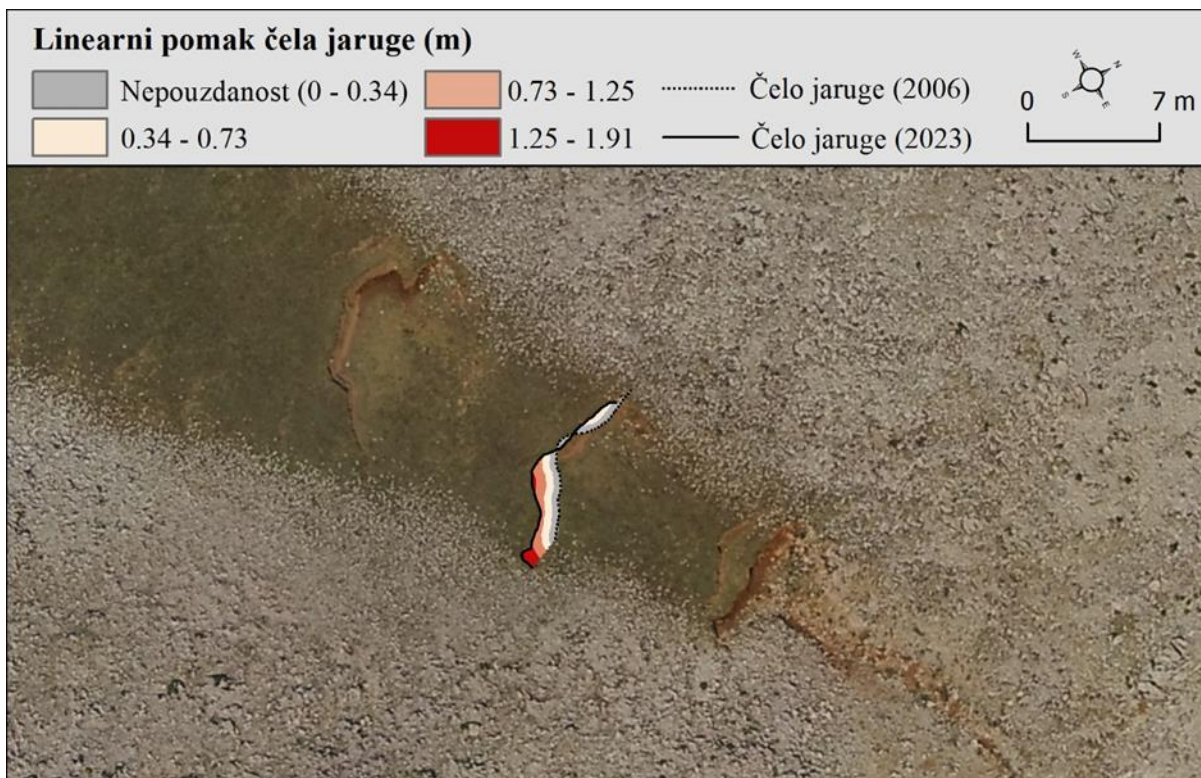
Posljednja jaruga unutar koje je detektiran višegodišnji linearni pomak je Zečja jaruga (Slike 20; 21). U slučaju prvog (višeg) čela Zečje jaruge najviša detektirana vrijednost linearnog pomaka iznosi 1,91 m, odnosno 11,23 cm/godišnje (Slika 20.). Prosječni pomak za ovo čelo iznosi 1,04 m, odnosno 6,11 cm/godišnje. Unatoč tome, treba napomenuti da je vidljiva velika varijabilnost između S i SZ dijela čela, gdje su zabilježene minimalne vrijednosti pomaka, mjestimice i ispod razine nepouzdanosti te JI dijela u kojemu su zabilježeni najintenzivniji pomaci.



**Slika 20.** Linearni pomak prvog čela Zečje jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

Značajke detektiranog linearnog pomaka unutar drugog (nižeg) čela Zečje jaruge su slične u odnosu na prvo čelo, gdje je maksimalna vrijednost detektiranog pomaka također 1,91 m (11,23 cm/godišnje) (Slika 21.). Prosječni detektirani pomak unutar nižeg čela iznosi 1,11 m (6,53 cm/godišnje), što je neznatno viša vrijednost nego u slučaju prvog čela Zečje jaruge. Prostorna distribucija detektiranih linearnih pomaka gotovo je identična kao što je u slučaju prvog čela Zečje jaruge. Podudarnost višegodišnjeg intenziteta i prostorne distribucije linearnog pomaka kod ova dva čela jaruge posljedica je njihove morfološke sličnosti, ali i sličnosti erozijskih procesa koji utječu na njihovo oblikovanje. S obzirom da su ova dva čela udaljena međusobno udaljena manje od 10 metara te da imaju gotovo identičnu širinu i visinu, višegodišnja evolucija ova dva čela je gotovo u potpunosti identična.



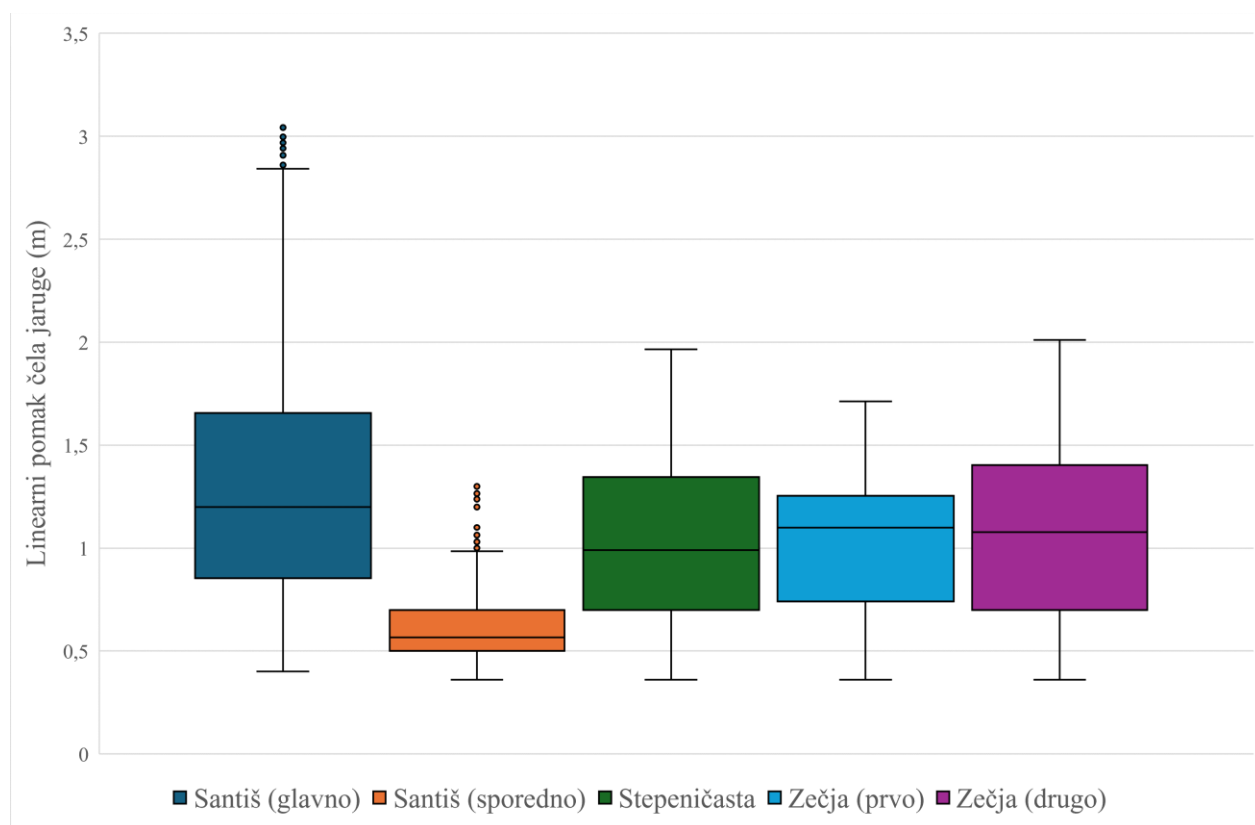


**Slika 21.** Linearni pomak drugog čela Zečje jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

Najveće i najrazličitije promjene su zabilježene na glavnom čelu jaruge Santiš, što ukazuje da postoje velike razlike u pomaku između različitih dijelova čela jaruge. Raznolikošću promjena najviše pridonosi veliki pomak na središnjem dijelu jaruge Santiš. Za sporedno čelo jaruge Santiš zabilježen je najmanji intenzitet PVP promjene, ali i najmanja raznolikost erozijskih procesa u odnosu na druga analizirana čela jaruga. Većim dijelom ovog čela jaruge zabilježene su manje promjene, osim na krajnjim rubovima gdje su zabilježene veće promjene koje znatno odstupaju od prosjeka. Kod čela Stepeničaste jaruge promjene nisu raznolike kao kod glavnog čela jaruge Santiš, ali su mnogo više varijabilnije nego kod sporednog čela jaruge Santiš. Manje promjene su zastupljenije od većih. Prvo čelo Zečje jaruge ima drugu najmanju promjenu i varijabilnost promjena među proučavanim čelima jaruga. Veće promjene su više zastupljene u odnosu na manje. Drugo čelo Zečje jaruge ima veće promjene i varijabilnost u odnosu na prvo čelo. Raznolikost promjena je mala s gotovo jednakim udjelom većih i manjih promjena.

Iz navedenog je očito da na prostoru poluotoka Santiš između analiziranih jaruga i njihovih čela postoji velika varijabilnost u višegodišnjem intenzitetu linearnog pomaka,. Ta varijabilnost je

najbolje vidljiva ako se intenzitet linearnog pomaka među analiziranim čelima jaruga grafički uspoređi (Slika 22.).



**Slika 22.** Detektirana varijabilnost u višegodišnjem linearnom pomaku među analiziranim čelima jaruga

Varijabilnost intenziteta promjena je najveća na glavnom čelu jaruge Santiš. Raspon vrijednosti interkvartila je od 0,85 m do 1,65 m, što ukazuje na najveće vrijednosti u odnosu na interkvartile drugih čela jaruga. Iako ima najveće vrijednosti, ne odstupa mnogo od drugih čela jaruga s obzirom na visok maksimum promjene te šest gornjih unutarnjih međa. Varijabilnost intenziteta bila je najmanja na sporednom čelu jaruge Santiš. Raspon vrijednosti interkvartila je od 0,5 m do 0,7 m, što ga čini najmanjim. Vrijednost trećeg kvartila ( $Q_3$ ) od 0,7 m je ista kao i vrijednost prvog kvartila ( $Q_1$ ) kod Stepeničaste jaruge i drugog čela Zečje jaruge, što ukazuje na znatno manji intenzitet promjene u odnosu na ostale jaruge. Zbog male varijabilnosti promjene postoji šest unutarnjih gornjih međa koje imaju vrijednost iznad jednog metra. Čelo Stepeničaste jaruge i drugo čelo Zečje jaruge imaju sličnu varijabilnost intenziteta promjene. Raspon interkvartila im je gotovo sličan, obje imaju istu vrijednost  $Q_1$  od 0,7 m, dok vrijednost  $Q_3$  kod

Stepeničaste jaruge iznosi 1,35 m, a kod drugog čela Zečje jaruge iznosi 1,4 m. Razlika je u vrijednosti medijana. Naime, vrijednost medijana kod Stepeničaste jaruge iznosi 1 m, dok kod drugog čela Zečje jaruge iznosi 1,1 m. Ove vrijednosti ukazuju da kod Stepeničaste jaruge prevladavaju manje promjene u odnosu na drugo čelo Zečje jaruge, gdje prevladavaju veće promjene. Prvo čelo Zečje jaruge ima manji raspon interkvartila u odnosu na prethodna dva čela jaruga. Položaj medijana (1,1 m) ukazuje da prevladavaju veće promjene.

S obzirom na to da se po višegodišnjem intenzitetu linearnog pomaka u odnosu na ostala analizirana čela jaruga znatno ističe glavno čelo jaruge Santiš, u nastavku su dani rezultati detaljnije analize linearnog pomaka. Provedena detaljna analiza uključuje detekciju linearnog pomaka unutar pojedinih analiziranih vremenskih perioda (2006.-2011; 2011.-2014; 2014.-2018; 2018.-2023.), pri čemu je za svako analizirano razdoblje primijenjena odgovarajuća razina nepouzdanosti, prema vrijednostima danima u tablici 9.

U prvom analiziranom razdoblju (2006.-2011.) zabilježen je najintenzivniji linearni pomak glavnog čela jaruge Santiše (Slika 23.), od svih pojedinačnih analiziranih razdoblja. Prosječna vrijednost detektiranog pomaka iznosila je 0,96 m (19,2 cm/godišnje), a maksimalna 1,7 m (34 cm/godišnje). Kao i za proučavani višegodišnji period (2006.-2023.) i za ovo pojedinačno analizirano razdoblje su najintenzivnije promjene detektirane unutar središnjeg dijela glavnog čela, dok su prema rubovima promjene znatno manjeg intenziteta.

Drugo analizirano razdoblje (2011.-2014.) obilježava linearni pomak znatno slabijeg intenziteta, koji je manji od ostalih analiziranih razdoblja (Slika 23.). Linearni pomaci detektirani u ovom razdoblju pretežito su ispod razine nepouzdanosti modela korištenih za detekciju pomaka, zbog čega je većina promjena morala biti isključena iz daljnje analize. Maksimalni linearni pomak od 85 cm (28.3 cm/godišnje) je zabilježen na zapadnom dijelu čela jaruge, gdje je došlo do odronjavanja materijala i retrogradnog pomaka čela. Osim toga, većina drugih promjena je ispod razine nepouzdanosti, osim nekoliko manjih zona unutar središnjeg dijela čela jaruge. Unatoč tome, treba napomenuti da je ovo proučavano razdoblje ipak kraće, zbog čega je prosječni godišnji pomak veći nego u prethodno analiziranom periodu. Prosječni linearni retrogradni pomak čela u drugom analiziranom razdoblju iznosio je 0,69 m, odnosno oko 23 cm/godišnje. Unutar trećeg analiziranog razdoblja (2014..2018.) također su zabilježeni retrogradni linearni pomaci slabijeg intenziteta (Slika 23.), ali ipak nešto većeg intenziteta nego što je to bilo u prethodnom analiziranom periodu. Pri tome je kao i u ranijem razdoblju ponovno većina detektiranih pomaka unutar razine

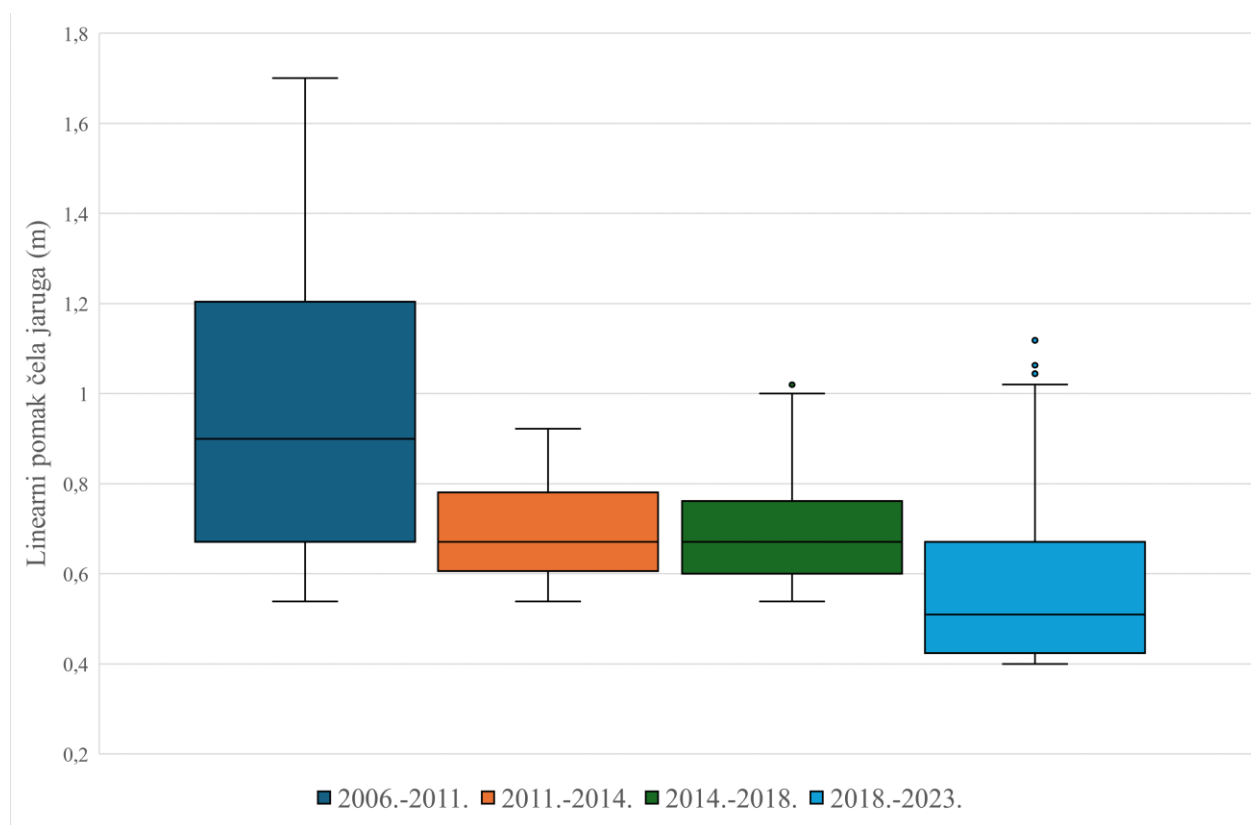
nepouzdanosti korištenih modela, zbog čega su morale biti isključene iz daljnje analize. Najintenzivniji linearni pomaci čela zabilježeni su na nekoliko izdvojenih lokacija, na kojima je došlo do postupnog odronjavanja materijala i retrogradnog pomaka linije čela jaruge. Maksimalni linearni višegodišnji pomak za ovo razdoblje iznosi 1,01 m, odnosno oko 25,25 cm/godišnje, dok je prosječni pomak 0,69 m, odnosno oko 17,25 cm/godišnje. Posljednje analizirano razdoblje (2018.-2023.) bilježi malo veće promjene za razliku od prethodna dva razdoblja (Slika 23.). U ovom razdoblju ponovno su najveće promjene zabilježene u središnjem dijelu glavnog čela jaruge, pri čemu maksimalni linearni pomak za ovo razdoblje iznosi 1,06 m, odnosno 21,2 cm/godišnje. Prosječni linearni pomak u ovom analiziranom razdoblju iznosi 0,57 m, odnosno oko 11,4 cm/godišnje, prema čemu je ovo razdoblje sa najmanjim prosječnim godišnjim intenzitetom linearnog pomaka.





**Slika 23.** Varijabilitet intenziteta višegodišnjeg pomaka glavnog čela jaruge Santiš

Najveća varijabilnost intenziteta promjene je u prvom razdoblju (2006. – 2011.), gdje interkvartilni raspon iznosi od 0,65 m do 1,2 m. Vrijednost medijana od 0,9 m ukazuje da prevladavaju manje promjene u odnosu na veće. Drugo (2011. – 2014.) i treće (2014. – 2018.) razdoblje imaju slične interkvartilne raspone, gdje za oba razdoblja vrijednost  $Q_1$  iznosi 0,6 m, dok vrijednost  $Q_3$  iznosi 0,8 m za drugo razdoblje te 0,7 m za treće razdoblje. Identična vrijednost medijana od 0,65 m ukazuje da prevladavaju manje promjene. Treće razdoblje, u odnosu na drugo razdoblje, ima veću maksimalnu vrijednost te jednu unutarnju gornju među. Četrto razdoblje (2018. – 2023.) ima znatno manju vrijednost interkvartilnog raspona. Vrijednost  $Q_1$  iznosi 0,45 m, dok vrijednost  $Q_3$  iznosi 0,7 m. Razlog tomu je manja vrijednost nepouzdanosti u odnosu na druga razdoblja. Vrijednost medijana od 0,5 m ukazuje da prevladavaju manje promjene. Maksimum promjene je veći u odnosu na prethodna dva razdoblja, te su također zabilježene tri unutarnje gornje međe (Slika 24.).

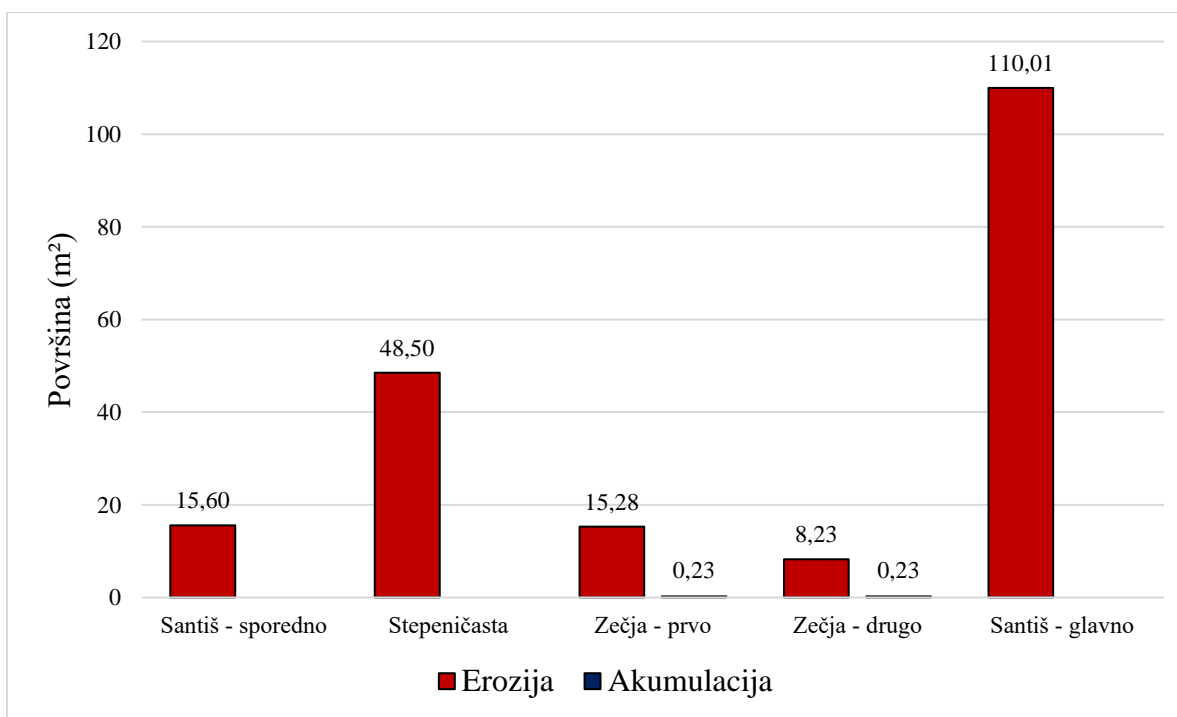


**Slika 24.** Detektirane varijabilnost u višegodišnjem intenzitetu linearnog pomaka glavnog čela jaruge Santiš

### 4.3.2. Arealni pomak čela jaruge

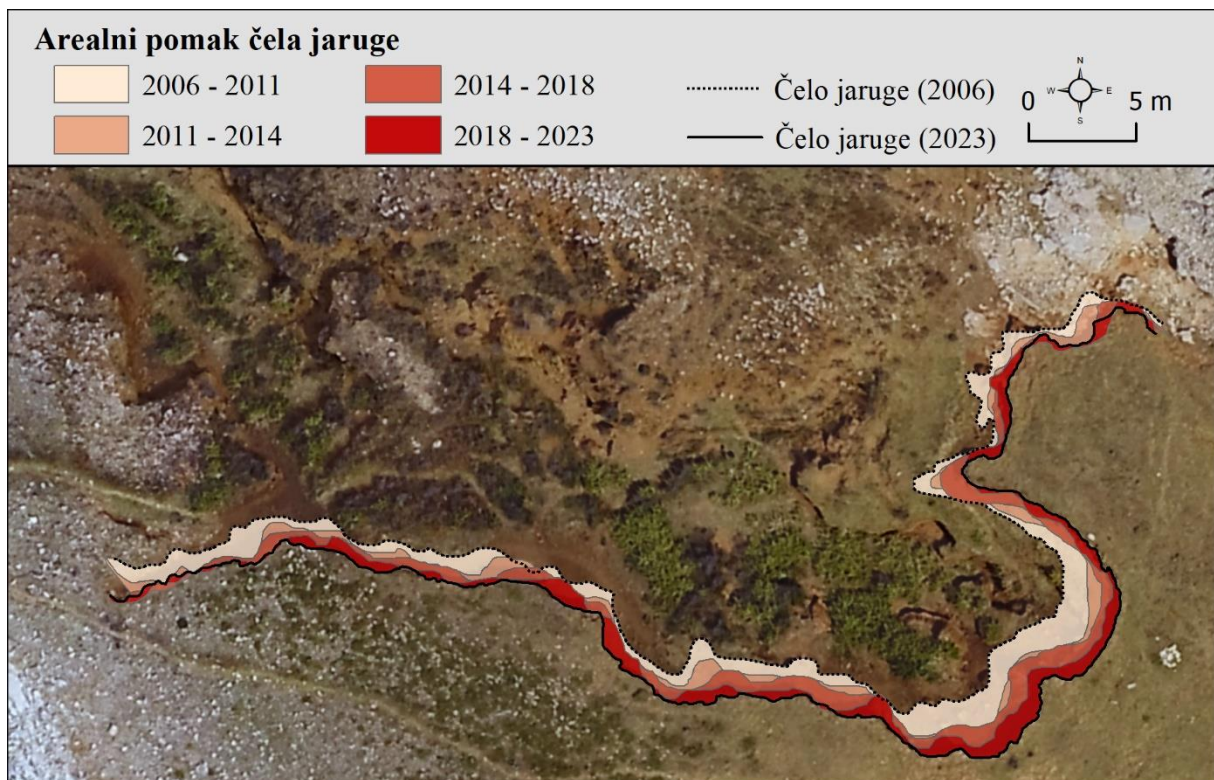
Osim detektiranog višegodišnjeg linearnog pomaka, DGU snimci su iskorišteni za detekciju i kvantifikaciju višegodišnjeg arealnog pomaka svih čela jaruga unutar poluotoka Santiš. Kao i ranije u slučaju linearnog pomaka, unutar proučavanog višegodišnjeg razdoblja (2006.-2023.) je zabilježena velika varijabilnost u intenzitetu arealnog pomaka čela proučavanih jaruga (Slika 25.). Većina detektiranih arealnih pomaka čela jaruga vezana je za eroziju materijala, odnosno za postupni retrogradni pomak čela jaruga, dok je akumulacija materijala u minimalnim vrijednostima ( $0,23 \text{ m}^2$ ) zabilježena samo u Zečjoj jaruzi.

Najveći višegodišnji intenzitet arealnog pomaka zabilježen je za glavno čelo jaruge Santiš, gdje je u proučavanom razdoblju ukupno erozijom zahvaćena površina od  $110,01 \text{ m}^2$ , odnosno od oko  $6,47 \text{ m}^2/\text{godisnje}$ . Zatim po intenzitetu slijedi Stepeničasta jaruga, unutar koje je u analiziranom višegodišnjem razdoblju erozijom zahvaćena površina od  $48,5 \text{ m}^2$ , odnosno oko  $2,85 \text{ m}^2/\text{godisnje}$ . Najmanji intenzitet arealnog pomaka čela zabilježen je unutar sporednog čela jaruge Santiš ( $15,6 \text{ m}^2 - 0,92 \text{ m}^2/\text{godisnje}$ ) te unutar prvog ( $15,51 \text{ m}^2 - 0,91 \text{ m}^2/\text{godisnje}$ ) i drugog ( $8,46 \text{ m}^2 - 0,50 \text{ m}^2/\text{godisnje}$ ) čela Zečje jaruge.

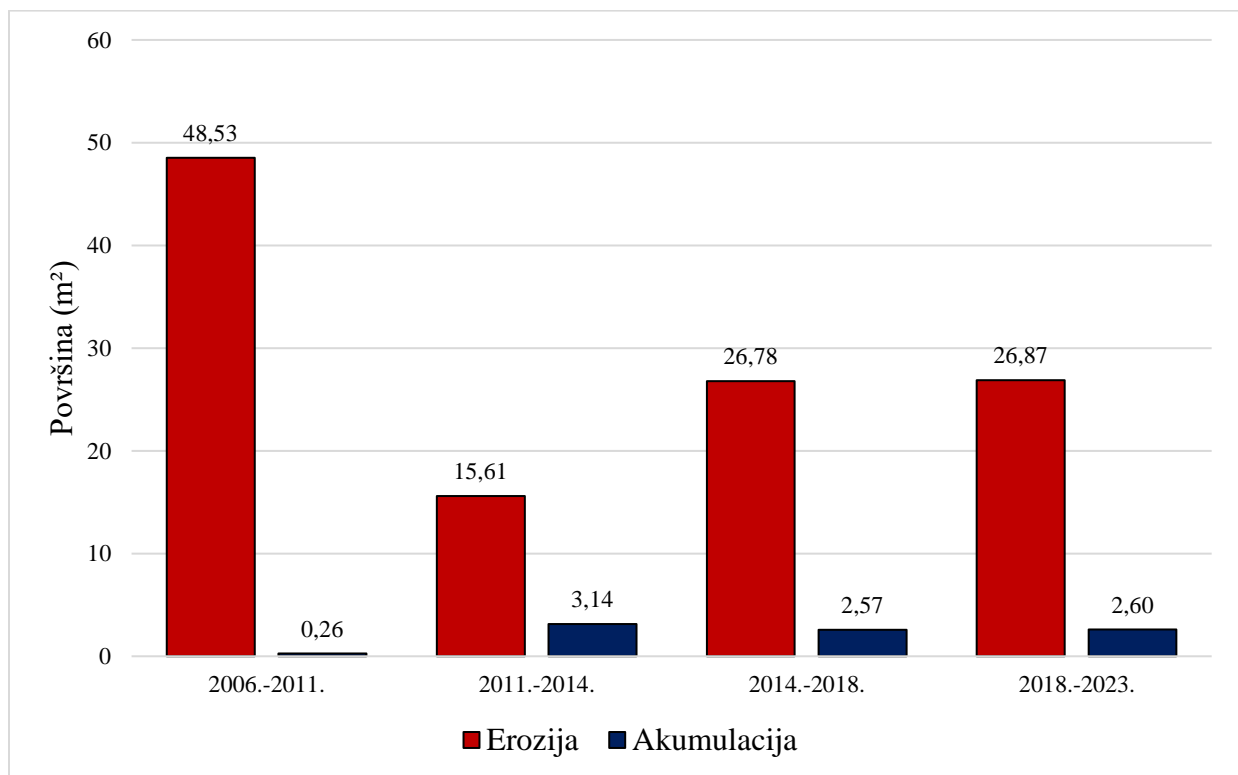


**Slika 25.** Arealni pomak čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš u razdoblju od 2006. do 2023. godine

S obzirom na to da se i u slučaju arealnog pomaka glavno čelo jaruge Santiš istaklo po najvećem intenzitetu erozije tla, u nastavku su dani rezultati detaljnije analize varijabilnosti arealnog pomaka za ovo čelo jaruge. Analiza provedena po razdobljima ukazala je da postoji znatna varijabilnost među pojedinim razdobljima (Slika 26.), ali i da su unutar pojedinih analiziranih razdoblja postojali pozitivni arealni pomaci, povezani s napredovanjem čela jaruge. Iako su intenzitetom ovi pozitivni pomaci gotovo zanemarivi, posebice u odnosu na negativne, retrogradne arealne pomake, ipak su vrlo važni za tumačenje evolucije ovog čela jaruge. Naime, takvi pozitivni pomaci, najvjerojatnije su povezani s odronjavanjem materijala s čela jaruge, odnosno neposredno prije samog odronjavanja, kada zbog klizanja i pucanja naslaga tla dolazi do blagog pomicanja materijala prema naprijed. U prvom analiziranom razdoblju (2006.-2011.) su zabilježene najveće arealne promjene čela jaruge, gdje je erozija bila prisutna na površini od 48,53 m<sup>2</sup> (9,71 m<sup>2</sup>/godišnje), dok je akumulacija obuhvaćala tek 0,26 m<sup>2</sup> površine čela. Sljedeće proučavano razdoblje (2011.-2014.) bilježi najmanji intenzitet arealnih promjena, gdje erozija obuhvaća 15,61 m<sup>2</sup> (5,20 m<sup>2</sup>/godišnje), a akumulacija 3,14 m<sup>2</sup> (1,05 m<sup>2</sup>/godišnje) površine glavnog čela. U ovom razdoblju detektirane su najintenzivnije pozitivne arealne promjene glavnog čela. Treće (2014.-2018.) i četvrto (2018.-2023.) razdoblje imaju gotovo identične vrijednosti arealnog pomaka. U trećem razdoblju erozija obuhvaćala 26,78 m<sup>2</sup>, a akumulacija 2,57 m<sup>2</sup> površine glavnog čela jaruge Santiš. Slično tome, u četvrtom analiziranom razdoblju erozija je obuhvaćala 26,87 m<sup>2</sup>, a akumulacija 2,6 m<sup>2</sup> površine glavnog čela jaruge (Slika 27.).



**Slika 26.** Arealni pomak glavnog čela jaruge Santiš u razdoblju od 2006. do 2023. godine

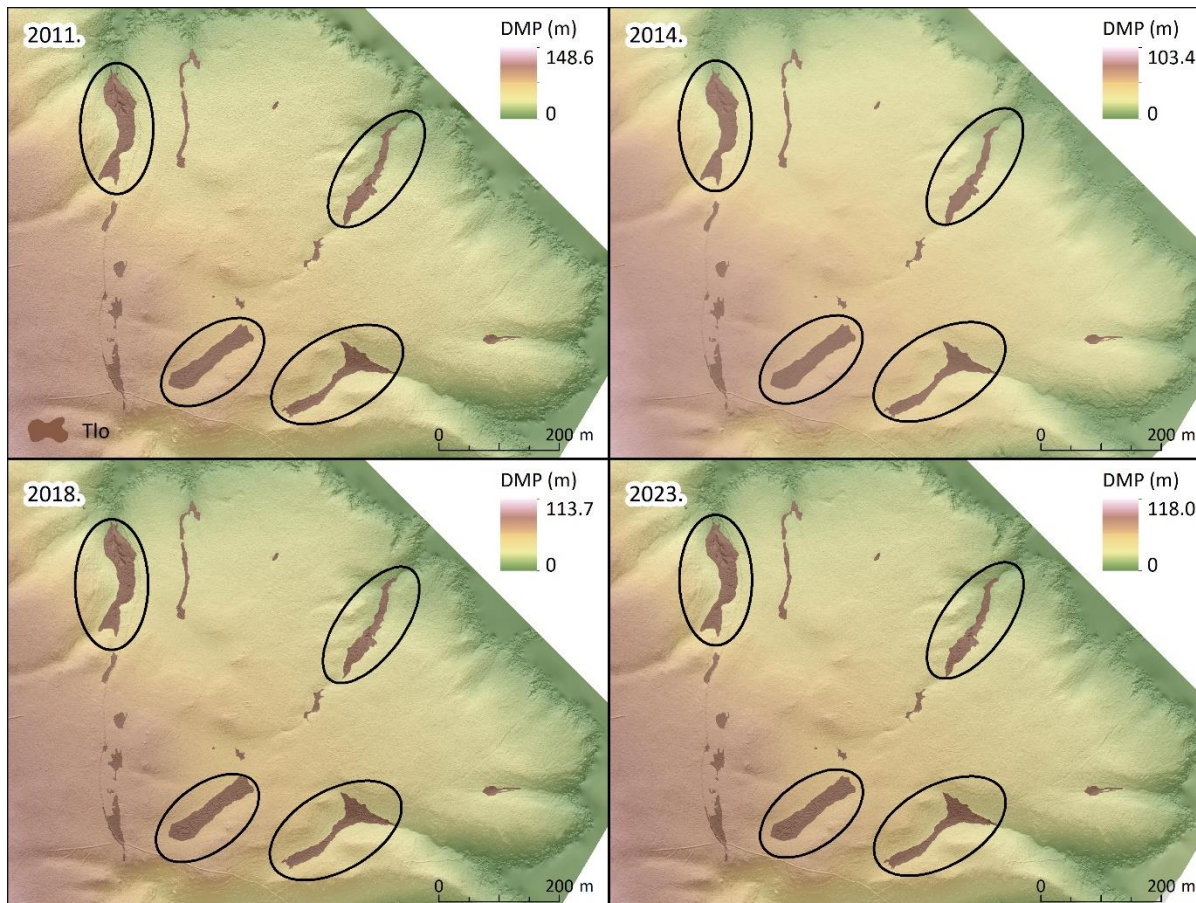


**Slika 27.** Arealni pomak glavnog čela jaruge Santiš u četiri promatrana međurazdoblja



### 4.3.3. Volumetrijske prostorno-vremenske promjene

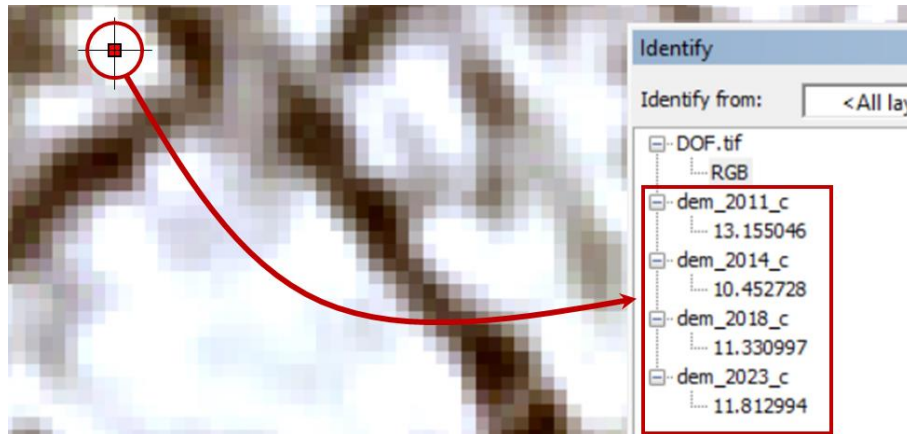
Na slici 28. su prikazani ulazni DMP-ovi korišteni u analizi volumetrijskih PVP. Vizualnom analizom uočeno je da se maksimalne visine u izvedenim DMP-ovima značajno razlikuju.



**Slika 28.** Izrađen intervalni DMP-ovi potrebni za volumetrijsku analizu

Navedeno je uočeno i alatom *Identify* u *ArcMap-u*, gdje je očitana visina na nekoliko lokacija klikom na podlogu (tvrdu karbonatnu osnovu) za koju je pretpostavljeno da u navedenom razdoblju nije doživjela volumetrijske promjene, odnosno da je bila fiksna (Slika 29.).





**Slika 29.** Primjer razlika u visini na tvrdoj karbonatnoj podlozi na odabranoj lokaciji

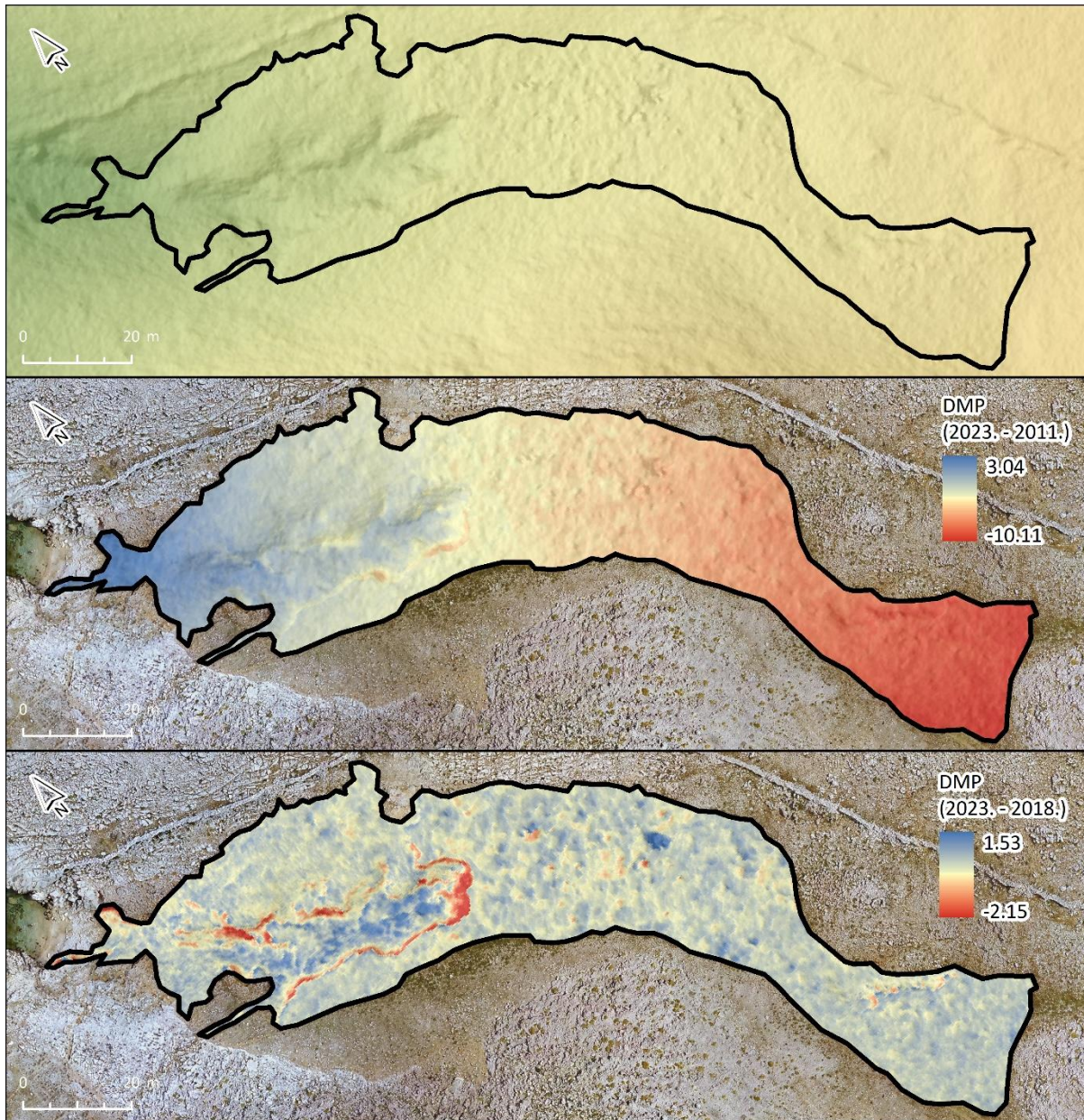
Međutim, značajnije razlike u visini (do nekoliko decimetara) su detektirane (Slika 29.). Navedeno inicijalno ukazuje na nemogućnost korištenja ovakve vrste podataka u detekciji volumetrijskih promjena na prostorima tla koje obilježava slab erozivni intenzitet. Primjerice, na slici 29., može se uočiti da razlika u visini na tvrdoj karbonatnoj podlozi za odabrani piksel maksimalno iznosi čak 2.7 m. U modelu iz 2011 na tom modelu je visina 13.16 m, a u modelu iz 2014. je 10.45 m. Razlika u visina između modela iz 2018. i 2023 iznosi 48.8 cm. Značajno manje, ali opet previše s obzirom na to da se radi o tvrdoj karbonatnoj podlozi na kojoj nije moglo doći do takvih promjena.

Razlog ovome problemu uz specifičnosti ulaznih podataka (različita visina snimanja, rezolucija, različite vrste kamera, manjak orijentacijskih točaka, slabo preklapanje između snimaka, neoznačenost orijentacijskih točaka) je nemogućnost uključivanja ukupno ili prostorno varijativne pogreške modela koja bi na DoD modelu ostavila stvarne geomorfoloških promjene, a isključila one promjene koje su uzrokovane nesigurnostima i šumom. Naime, kvantifikacija prostorno-vremenskih volumetrijskih promjena temelji se na primjeni različitih tehnika, softvera i alata (Ding i dr. 2020). Među najčešće korištenim softverom je *Geomorphic Change Detection* (GCD) čija je metodologija rada opisana u Wheaton (2010). GCD se temelji na razlikama u nadmorskoj visini dva DEM-a, "starog" i "novog", a rezultat se prikazuje kao DEM razlike (DoD). Jedan od glavnih izazova pri korištenju sličnih programa je kvantitativno razlikovanje stvarnih geomorfoloških promjena od onih uzrokovanih nesigurnostima i šumom, svojstvenim svakom DEM-u. Ako se u izračunu ne uzmu u obzir nesigurnosti modela, kvantifikacija stvarnih promjena je vrlo teška. U ovoj analizi **nije bilo moguće integrirati** ukupnu pogrešku modela s obzirom na to da u procesu izvođenja modela nije moglo biti korišteno više točaka za provjeru točnosti modela

(engl. *check point*) iz kojih bi se potom mogla izračunati ukupna pogreška. Dakle, polazna pretpostavka je morala biti da su sve promjene koje su detektirane na DoD-u stvarne geomorfološke promjene.

S obzirom na izvedene rezultate DoD-a moralo se pristupiti kritičkom vrednovanju primjenjivosti ovakve metodologije u procesu analize volumetrijskih promjena s obzirom na intenzitet volumetrijskih promjena na ovom prostoru.

Primjerice, na slici 30. prikazani su izvedeni digitalni modeli razlike (DoD) za razdoblje od 2023. do 2011. te 2023. do 2018. godine. Na DoD za razdoblje 2023.-2011. uočene su značajne visinske razlike unutar prostora proučavanja. Vrijednosti se kreću u rasponu od -10.11 metara do 3.04 m. Naravno, ovakve promjene su rezultat pogrešaka u modelu, a ne stvarnih geomorfoloških promjena koje su se dogodile unutar navedene jaruge.



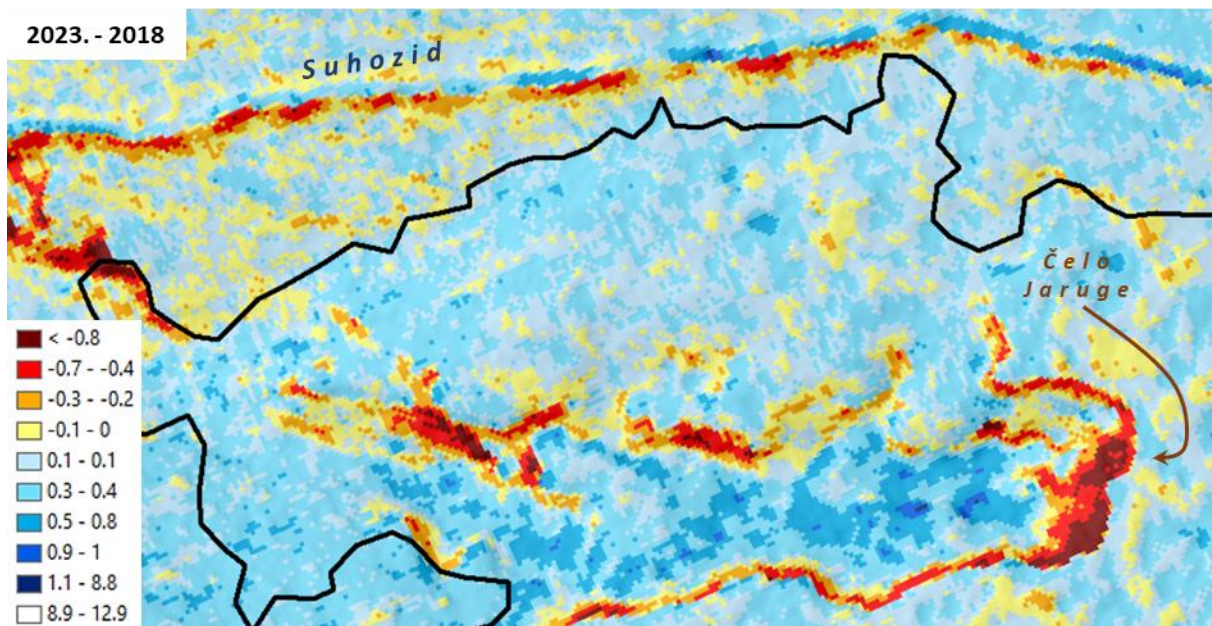
**Slika 30.** DoD za razdoblje 2023. - 2011. (smeđe tlo - Jaruga Santiš)

Na DoD za razdoblje 2023.-2018. uočen je znatno manji raspon promjena u visinama smeđeg tla u rasponu od - 2.15 m do 1.53 m. Iako su u DoD-u (2023-2018) izračunate znatno manje visinske promjene u odnosu na DoD (2023-2011) te prostorna distribucija promjena u visini izgleda „prirodnija“ u odnosu na DoD (2023-2011) i dalje je teško govoriti o stvarnim geomorfološkim promjena na modelu DoD (2023-2018). Vjerojatnije je da se radi o pogreškama u modelu koje su uvjetovane različitim ulaznim podacima, specifičnostima procesa obrade, itd. Naime, teško je



zamisliti erozivni i akumulacijski događaj na smeđem tlo unutar ove jaruge koji bi mogao biti zabilježen s takvim vrijednostima (preko 1 m).

Međutim, erozivni događaju u vrijednostima oko 1 m na ovom modelu promjena (DoD 2023 -2018) su detektirani na isključivo na lokaciji čela jaruge i bočnim padinama jaruge (Domazetović, 2021) (Slika 31.). Takav intenzitet detektirane promjene je ipak moguć uslijed naglog urušavanja čela ili bočnih padina jaruge. Stoga takva detektirana promjena ostaje u sferi moguće stvarne geomorfološke promjene. Nadalje, unutar DoD (2023-2018) dominira akumulacija u iznosu od nekoliko decimetara. Takav intenzitet promjene ne mora biti posljedica pogrešaka u modelu, već isključivo vegetacije koja čiji rast i prisutnost na modelu može lažno povećati volumena akumuliranog materijala i prosječnu visinu izdizanja površine. Vegetacija generirane lažno pozitivne vrijednosti lažne akumulacije tla. Veliki broj istraživanja upozoravaju da to jedan od glavnih problema u tumačenju volumetrijskih prostorno-vremenskih promjena erozije. Preporuča se izdvajanje vegetacije LiDAR-a, naprednih algoritama i indeksa, vektorizacije temeljene na GIS-u itd. (Tamene i dr., 2017, Goes i Oliviera, 2023).



**Slika 31.** Visinske promjene digitalnih modela površina za razdoblje (2023-2018)

Na slici 31. prikazano je kako mala horizontalna pogreška, odnosno nepoklapanje u X i Y koordinatama između izvedenih DMP-ova (2023. i 2018.) može značajno utjecati na izvedene modele promjena. Navedeno je najbolje uočljivo na primjeru suhozida (Slika 31.) gdje je s jedne strane suhozida detektirana akumulacija od nekoliko decimetara do metra dok je s druge strane

detektirana erozija u jednakim vrijednostima. Naravno da se u ovom slučaju ne radi o „pomicanju“ suhozida uslijed djelovanja vjetra ili antropogenog utjecaja već je riječ o pogrešci nastaloj uslijed nepodudaranja X i Y osi što je uzrokovalo smicanje suhozida između dva modela. Navedeni primjeri ukazuje na potrebu opreza prilikom korištenja arhivskih zračnih snimaka u detekciji prostorno-vremenskih volumetrijskih promjena na jarugama koje obilježava relativno slabi visinski intenzitet promjena ( $< \text{desetak cm a}^{-1}$ ). Naime, za potrebe preciznijeg praćenje volumetrijskih promjena potrebno je postaviti stalan, fiksni i centimetarski precizan lokalni koordinatni sustav te provoditi standardiziran proces snimanja (ista visina, kamera, itd.) te proces obrade podataka.

## 5. RASPRAVA

Detekcija promjena na starijim aerofotogrametrijskim DGU snimkama (1959. do 2006.) od samog početka je predstavljala problem. Naime, vizualnom analizom utvrđeno je kako će detekcija promjena biti gotovo nemoguća na starijim snimkama zbog njihove lošije prostorne rezolucije. Ovaj problem je uvelike smanjio opseg rada gdje je prvotni cilj bio napraviti detekciju promjena u razdoblju od 64 godine (1959. – 2023.). Zbog navedenog problema proučavano razdoblje skraćeno je za 47 godina, te je detekcija višegodišnjih PVP napravljena samo za razdoblje od 2006. do 2018., uz dodatno korištenje UAV snimka iz 2023. godine.

Rezultati linearnih pomaka čela jaruga u razdoblju od 17 godina ukazuju na pomak od 1 do 3 metra. Godišnji prosjek linearnog pomaka za jarugu s najmanjim intenzitetom višegodišnjeg linearnog pomaka iznosi 3,12 cm godišnje, dok za jarugu s najvećim intenzitetom prosječni linearni pomak iznosi 8,12 cm godišnje. Prosjek linearnog pomaka svih analiziranih jaruga iznosi 5,98 cm godišnje. Nadalje, izražena varijabilnost u višegodišnjem intenzitetu erozije tla primijećena je unutar pojedinih analiziranih jaruga. Primjerice, maksimalni detektirani višegodišnji pomak glavnog čela jaruge Santiš iznosi 2,95 m, dok kod sporednog čela jaruge Santiš iznosi samo 1,26 m. Također je zabilježena velika razlika između najveće i najmanje arealne promjene. Naime, najmanja arealna promjena iznosi 8,23 m<sup>2</sup> i zabilježena je na sporednom čelu jaruge Santiš, dok najveća arealna promjena iznosi 110,1 m<sup>2</sup> i zabilježena je na glavnom čelu jaruge. Najintenzivnije višegodišnje PVP unutar poluotoka Santiš detektirane su unutar glavnog čela jaruge Santiš, zbog čega je napravljena detaljnija detekcija promjena za navedeno čelo, podijeljena u četiri podrazdoblja (2006.-2011; 2011.-2014; 2014.-2018; 2018.-2023.). Izrada LHC alata, koji je uspješno automatizirao proces izračuna linearnog pomaka, značajno je olakšala i ubrzala detekciju višegodišnjih PVP tijekom rada. Sam alat će se stoga moći koristiti u drugim istraživanjima koja će se baviti detekcijom višegodišnjih linearnih promjene na čelu jaruga.

### 5.1. Usporedba detektiranih višegodišnjih PVP s rezultatima drugih istraživanja

Prema Vanmaercke i dr. (2016) prosječna vrijednost linearnog pomaka čela jaruga u svijetu iznosi 5 m godišnje, dok medijan iznosi 89 cm godišnje. U tom istraživanju su korišteni podaci od 933 jaruge iz 25 različitih država, sa šest kontinenata. Među odabranim jarugama postojala je velika varijabilnost u intenzitetu erozije tla, ovisno o različitim klimatskim uvjetima, sastavu tla, vegetacijskom pokrovu i drugim čimbenicima. Ukoliko se rezultati ovog diplomskog rada



usporede s rezultatima drugih istraživanja provedenih unutar Sredozemlja, mogu se uočiti važne sličnosti u detektiranom intenzitetu višegodišnjih promjena. Naime, prema Marzoff i dr. (2011) na sjeveru i jugoistoku Španjolske na osam proučavanih različitih jaruga zabilježen je znatno manji prosječni linearni pomak, od samo 2,78 cm godišnje. Uzrok takvom manjem višegodišnjem intenzitetu erozije tla može se povezati s klimatskim značajkama tog područja, u prvom redu s manjom količinom oborina. Prosječna godišnje količina oborina za to područje iznosi od 300 do 350 mm, što je za oko tri puta manje u odnosu na poluotok Santiš.

Rezultati istraživanja koje su proveli Alfonso-Torreño i dr. (2021) pokazuju slične rezultate onima zabilježenima na poluotoku Santiš. Područje istraživanja nalazi se u slijevu Parapuños, u sjeverozapadnom dijelu Pirinejskog poluotoka. Na tom području prevladava sredozemna klima s prosječnom godišnjom količinom oborina od 513 mm, no treba napomenuti da postoji velika godišnja varijabilnost. Vegetaciju čini nisko zeljasto bilje kojim se hrani stoka. Istraživanje je provedeno u razdoblju od ožujka 2016. do siječnja 2019. godine, korištenjem SfM fotogrametrije. Rezultati su pokazali da vrijednosti arealne promjene za tri jaruge iznose 0,11 m<sup>2</sup>, 0,43 m<sup>2</sup> i 0,87 m<sup>2</sup>.

Utvrđeni višegodišnji linearni pomak je također usporediv s rezultatima istraživanja provedenih u drugim dijelovima svijeta. Primjerice, prema Nazari i dr. (2009) godišnje stope pomaka čela jaruga u Iranu iznose 21 cm u razdoblju od 1967. do 2000. godine te 15 cm u razdoblju od 2000. do 2005. U ovom radu su također korištene aerofotogrametrijske snimke za detekciju višegodišnjih PVP povezanih s erozijom tla. Područje istraživanja ima slične vegetacijske karakteristike kao i poluotok Santiš gdje većinom prevladava vegetacija niskih trava. Klima nije sredozemna, već je aridna (273 (mm), ali je raspodjela oborina slična kao i kod sredozemne klime.

Rezultati istraživanja koje su proveli Yibeltal i dr. (2021) znatno se razlikuju od rezultata istraživanja provedenih na poluotoku Santiš. Istraživanje je provedeno na području dva mala sliva koja utječu u Gornji Plavi Nil u Etiopiji. Klima se može opisati kao suptropska, s većom količinom oborina tijekom razdoblja od svibnja do listopada. Godišnje količine oborina variraju od 1950 mm do 3420 mm, što je znatno više od godišnje količine oborina na poluotoku Santiš. Na tom području najviše prevladavaju luvisoli i vertisoli, koji sadrže velike količine gline. Vegetacija je većinom niska zbog intenzivne ispaše, što pridonosi eroziji tla. Područje je proučavano tijekom razdoblja od

dvije godine (2017. - 2019.). Rezultati su pokazali da je prosječni godišnji pomak u 16 proučavanih jaruga iznosio 1,49 m. Iako u istraživanju nisu korištene geoprostorne tehnologije, rezultati pokazuju koliko velik utjecaj na intenzitet erozije tla imaju sastav tla i količina oborina.

Rezultati istraživanja provedenog na poluotoku Santiš znatno su manji u odnosu na istraživanje koje su izveli Ioniță i dr. (2021) na području istočne Rumunjske. Područje istraživanja ima drugačiju klimu u odnosu na poluotok Santiš, s prosječnom godišnjom količinom oborina od oko 500 mm, pri čemu je veća količina zabilježena tijekom ljetnih mjeseci. Većinom prevladava šumska vegetacija uz manji udio stepa i poljoprivrednih površina. Područje je proučavano tijekom razdoblja od 17 do 30 godina, a korištene su aerofotogrametrijske snimke i druge sastavnice geoprostornih tehnologija. Prosječna godišnja stopa pomaka čela jaruga iznosi 91 cm, što je i do osam puta više od prosjeka na poluotoku Santiš.

## 5.2. Poteškoće prilikom provođenja istraživanja

Višegodišnji intenzitet erozije tla na poluotoku Santiš je vrlo nizak, zbog čega nastale PVP nije jednostavno detektirati. Naime, nastale PVP su toliko male da većinu promjena nije moguće detektirati korištenjem aerofotogrametrijskih snimki s prostornom rezolucijom iznad 30 cm. Intenzitet tih promjena iznosi nekoliko decimetara godišnje, zbog čega ih je teško detektirati na DOF-ovima veće prostorne rezolucije. Prema Neugirgu i dr. (2016), postoji značajan utjecaj minimalnog praga detekcije, koji je uvjetovan prostornom rezolucijom, na detekciju i kvantifikaciju nastalih PVP-a. To se potvrdilo i u istraživanjima provedenim u sklopu ovog diplomskog rada, gdje pojedine PVP uzrokovane erozijom tla nisu mogle biti detektirane zbog previsokog minimalnog praga detekcije.

Nadalje, vrlo važan problem prilikom provođenja istraživanja u sklopu ovog diplomskog rada bila je činjenica da **arhivske snimke prikupljene od strane DGU-a nisu standardizirane**. Dostupni arhivski snimci prikupljeni su s različitim aerofotogrametrijskim kamerama i s različite visine snimanja što dovodi do različitih prostornih rezolucija, ali i do brojnih poteškoća kod obrade ovih snimaka i izrade različitih modela. Sve navedene razlike u prikupljanju podataka mogu utjecati na samu točnost DMP-ova iz kojih se kasnije izvode volumetrijske analize. Slični podaci korišteni su u drugim istraživanjima iz različitih država. Primjerice, Fernandez i dr. (2020) iz Španjolske, te Aucelli i dr. (2014) iz Italije koristili su slične podatke pri čemu nisu naveli slična

ograničenja kod snimaka koje su koristili. **Izostanak orijentacijskih i kontrolnih točaka** na starijim arhivskim snimkama uvelike je otežao proces izravnog georeferenciranja tih snimka. Zbog izostanka orijentacijskih i kontrolnih točaka, georeferenciranje arhivskih snimaka je moralo biti napravljeno prema referentnom DOF-u (2023.).

Za unaprijeđenje budućih istraživanja na poluotoku Santiš izneseni su sljedeći prijedlozi. Prema Wangu i dr. (2022) potrebno je **godišnje mjerenje područja UAV tehnologijom** radi dobivanja boljeg uvida za sezonske i godišnje promjene uzrokovane erozijom tla. Također, korištenjem UAV-a smanjila bi se potreba korištenja arhivskih snimaka upitne kvalitete i procesa standardizacije koje onemogućuju izradu DMP. Potrebno je **postavljanje meteorološke postaje** kako bi se u realnom vremenu prikupljali parametri koju su bitni za analizu (temperatura, količina oborina i brzina vjetra). Domazetović (2021), Barnes i dr. (2016), te Luffman i Nandi (2019) su provodili *in-situ* prikupljanje meteoroloških podataka kako bi dobili što točnije podatke za uspostavu odnosa vremenskih uvjeta s intenzitetom erozije tla. Problem utjecaja vegetacije se može riješiti **snimanjem područja istraživanja LiDAR tehnologijom**. Ovu metodu u istraživanju kod detekcije promjena erozije tla u jarugama su koristili Niculita i dr. (2020). Oni su korištenjem LiDAR tehnologije filtracijom uklonili nisku vegetaciju koja bi mogla smetati u daljnjoj detekciji. Sličnu metodu su koristili Brecheisen i Richter (2021) u svom radu. Također je potrebno izvršiti **analizu tla** kako bi se odredile karakterističnosti upijanja i granulacije na svakoj jaruzi. Omran i dr. (2023) u svom radu ističu važnost sastava tla u procesu analize i detekcije promjena uzrokovanim erozijom tla.

## 6. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog diplomskog rada napravljena je detekcija i kvantifikacija višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla na poluotoku Santiš. Na temelju intervalnih aerofotogrametrijskih snimaka DGU-a (1959. – 2018.) provedena je detekcija i kvantifikacija višegodišnja linearnog pomaka, kao i arealnih i volumetrijskih promjena naslaga tla na području poluotoka Santiš. Iako je prvotni plan bio koristiti sve snimke prikupljene od DGU-a, zbog lošije kvalitete starijih snimaka (1959. – 2001. i 2007.) korištene su samo novije snimke (2006. i 2011. – 2018.) koje su imale zadovoljavajuću kvalitetu. Također, u srpnju 2023. godine provedeno je terensko istraživanje na poluotoku Santiš, gdje je uz pomoć DJI Matrice 210 RTK V2 bespilotne letjelice opremljene s Zenmuse X7 kamerom odrađeno UAV fotogrametrijsko snimanje cijelog poluotoka.

Detekcija i kvantifikacija lineranih pomaka čela jaruga napravljena je na temelju usporedbe izrađenih intervalnih DOF-ova poluotoka Santiš (2006. – 2023.), prema kojima su postojeća čela jaruga ručno vektorizirana i uspoređena uz pomoć razvijenog LHC alata. Analiza linearnih pomaka je pokazala da je došlo do pomaka na svim čelima jaruga. Najveći pomaci su zabilježeni u jarugama koje imaju najveće sljevove, gdje ujedno dolazi i do većeg površinskog otjecanja. Površinsko otjecanje također je utjecalo na neravnomjerno raspoređenost pomaka na čelima jaruga, pa tako postoje dijelovi čela jaruge koji nisu zabilježili značajnu promjenu. Na glavnom čelu jaruge Santiš je provedena i detaljna analiza linearnog pomaka koja je pokazala da je prvo promatrano razdoblje (2006. – 2011.) imalo najveći zabilježeni linearni pomak. U preostala tri analizirana razdoblja (2011.–2014., 2014.–2018. i 2018.–2023.) detektirani su manji linearni pomaci ovog čela, uz već navedenu izraženu višegodišnju varijabilnost erozije tla.

Na temelju izrađenih intervalnih modela uspješno su detektirane i arealne PVP uzrokovane erozijom tla, među kojima prevladava erozija tla, dok akumulacija materijala skoro pa i nije zabilježena. Najveće arealne PVP zabilježene su kod jaruga s najvećim slivnim područjima, čime je potvrđen utjecaj površinskog otjecanja na intenzitet i pojavnost erozije tla.

Analiza volumetrijskih promjena nije dala željene rezultate. Naime, iako su slični arhivski aerofotogrametrijski snimci uspješno korišteni u nekoliko ranijih istraživanja, ustupljeni DGU snimci bili su previše neujednačeni za detekciju višegodišnjih PVP.

Utvrđene prostorno-vremenske promjene uzrokovane erozijom tla na poluotoku Santiš omogućavaju bolje razumijevanje osnovnih značajki ovog važnog geomorfološkog procesa. Uvid u intenzitet i prostornu zastupljenost višegodišnjih PVP uzrokovanih erozijom tla ključan je za planiranje mjera za smanjenje negativnih utjecaja ovo procesa i za očuvanje preostalih naslaga tla na otoku Pagu. Nadalje, detektirane višegodišnje linearne i arealne PVP važne su i radi usporedbe s rezultatima sličnih istraživanja iz drugih dijelova Mediterana i svijeta. Razvijeni alat za automatsku detekciju linearnog pomaka čela jaruga znatno olakšava i pojednostavljuje proces praćenja i kvantifikacije višegodišnjeg linearnog pomaka čela jaruga. Zbog toga ovaj alat može imati veliku primjenjivost u svim drugim istraživanjima koja će se baviti proučavanjem erozije tla i linearnog pomaka čela jaruga. U nastavku je dan pregled hipoteza ovog istraživanja.

### **H1 Aerofotogrametrijski snimci Državne geodetske uprave omogućiti će detekciju višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla unutar razdoblja od 1959. do 2018. godine**

Navedena hipoteza je **odbačena**. Iako su slični arhivski aerofotogrametrijski snimci bili uspješno primijenjeni u sličnim istraživanjima u drugim zemljama, stariji arhivski snimci ustupljeni od DGU-a su bili previše neujednačeni za detekciju višegodišnjih PVP uzrokovanih erozijom tla. Stariji arhivski snimci (1959. – 2001. i 2007.) nisu mogli biti korišteni za detekciju promjena zbog njihove lošije prostorne rezolucije i neujednačenosti korištenih aerofotogrametrijskih kamera. Zbog toga su u konačnici korištene samo snimke iz 2006., 2011., 2014. i 2018. godine, na temelju kojih je bilo moguće detektirati samo višegodišnji linearni i arealni pomak čela jaruga

### **H2 Najveći detektirani višegodišnji intenzitet erozije tla biti će vezan za retrogradni pomak glavnog čela jaruge Santiš**

Navedena hipoteza je **potvrđena**. U odnosu na ostala čela jaruga, glavno čelo jaruge Santiš je zabilježilo najveći linearni pomak (2,95 m), prosječni linearni godišnji pomak (8,12 cm), arealni pomak (110,1 m<sup>2</sup>) i prosječni arealni godišnji pomak (6,47 m<sup>2</sup>). Linearni i arealni pomak ostalih čela jaruga unutar poluotoka Santiš je unutar proučavanog razdoblja bio značajno manji.

### **H3 Maksimalni višegodišnji linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš će biti visoko varijabilan**

Navedena hipoteza je **potvrđena**. Ranija istraživanja pokazala su da je erozija tla vrlo varijabilan proces, čiji višegodišnji intenzitet često značajno varira. Zbog toga je pretpostavljeno i da će maksimalni intenzitet erozije tla unutar poluotoka Santiš značajnije varirati unutar analiziranih višegodišnjih razdoblja. Maksimalni višegodišnji linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš je varirao od 34 cm/godišnje za prvo analizirano razdoblje (2006. – 2011.), sve do 21,2 cm/godišnje za posljednje razdoblje (2018.-2023.).

#### **H4 Razvijeni alat će omogućiti automatiziranu detekciju i kvantifikaciju višegodišnjeg linearnog pomaka čela jaruga**

Navedena hipoteza je **potvrđena**. Razvijeni alat LHC omogućio je automatsku detekciju i kvantifikaciju linearnog pomaka čela jaruge, značajno pojednostavljujući i optimizirajući cjelokupni proces praćenja višegodišnjih pomaka.



## Izvori

URL 1 <https://www.agr.unizg.hr/en/project/654/Erozija+i+degradacija+tala+Hrvatske> 15.01.2024

URL 2 <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-erosion-water-rusle2015> 17.03.2023.

URL 3 [http://soilerosion.net/impacts\\_of\\_erosion.html](http://soilerosion.net/impacts_of_erosion.html) 23.03.2023.

URL 4 [http://soilerosion.net/on-site\\_impacts.html](http://soilerosion.net/on-site_impacts.html) 23.03.2023.

URL 5 [http://soilerosion.net/off-site\\_impacts.html](http://soilerosion.net/off-site_impacts.html) 23.03.2023.

URL 6 <https://pro.arcgis.com/en/proapp/latest/help/data/imagery/overviewofgeoreferencing.html>  
(22.10.2023.)

## Literatura

1. Agisoft Metashape (2019). User Manual. Professional Edition, Version 1.5.
2. Alfonso-Torreño, A., Gómez-Gutiérrez, Á., & Schnabel, S. (2021). Dynamics of erosion and deposition in a partially restored valley-bottom gully. *Land*, 10(1), 62. <https://doi.org/10.3390/land10010062>
3. Anderson, R. L., le Roux, J., van der Waal, B., Rowntree, K., & Hedding, D. W. (2024). Assessing the short-term inter-annual growth of the largest documented gully network in South Africa using UAV and SfM methodology. *Physical Geography*, 45(3), 284-306.
4. Aucelli, P. P., Conforti, M., Della Seta, M., Del Monte, M., D'uva, L., Roskopf, C. M., & Vergari, F. (2014). Multi-temporal Digital Photogrammetric Analysis for quantitative assessment of soil erosion rates in the Landola catchment of the Upper Orcia Valley (Tuscany, Italy). *Land Degradation & Development*, 27(4), 1075–1092. <https://doi.org/10.1002/ldr.2324>
5. Barnes, N., Luffman, I., & Nandi, A. (2016). Gully erosion and freeze-thaw processes in clay-rich soils, northeast Tennessee, USA. *GeoResJ*, 9, 67-76.
6. Brecheisen, Z. S., & Richter, D. D. (2021). Gully-erosion estimation and terrain reconstruction using analyses of microtopographic roughness and LiDAR. *Catena*, 202, 105264.
7. Cammeraat, L. H., & Imeson, A. C. (1998). Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology*, 23(2–4), 307–321. [https://doi.org/10.1016/s0169-555x\(98\)00012-9](https://doi.org/10.1016/s0169-555x(98)00012-9)

8. Cissé, C. O. T., Marić, I., Domazetović, F., Glavačević, K., Almar, R. (2024). Derivation of Coastal Erosion Susceptibility and Socio-Economic Vulnerability Models for Sustainable Coastal Management in Senegal. *Sustainability*, 16(17), 7422. <https://doi.org/10.3390/su16177422>
9. Conforti, M., & Buttafuoco, G. (2017). Assessing space–time variations of denudation processes and related soil loss from 1955 to 2016 in Southern Italy (Calabria region). *Environmental Earth Sciences*, 76(13). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6786-3>
10. Ding C, Zhang L, Liao M, Feng G, Dong J, Ao M, Yu Y (2020) Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migration near Minqin Oasis in northwestern China with time series of Landsat-8 and Sentinel-2 observations. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111498. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111498>
11. Domazetović, F. (2021). Višerezolucijsko modeliranje erozije tla korištenjem geoprostornih tehnologija, Doktorska disertacija, Jadran - poveznica među kontinentima, Sveučilište u Zadru.
12. Domazetović, F., Šiljeg, A., Lončar, N., Marić, I. (2019). Development of automated multicriteria GIS analysis of gully erosion susceptibility. *Applied Geography*, 112, 102083.
13. Domazetović, F., Šiljeg, A., Marić, I., Cukrov, N., Lončar, N., Panđa, L., & Quesada-Román, A. (2024). Assessing the impacts of lithology on short-term gully evolution within the karst Mediterranean area. *Catena*, 244, 108238.
14. Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Calero, J., Sánchez-Gómez, M., ... & Tovar-Pescador, J. (2020). Multitemporal analysis of gully erosion in olive groves by means of digital elevation models obtained with aerial photogrammetric and LiDAR data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 260.
15. Ferreira, C. S. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of The Total Environment*, 805, 150106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>
16. García-Ruiz, J. M., Nadal-Romero, E., Lana-Renault, N., i Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20–36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>

17. Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbus, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European Flash Floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
18. Goes JC, Oliveira ES (2022) Relationship between soil management and rainfall erosion: A case study in the Guajará-Mirim River watershed, Vigia-Pará. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 9(5). <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.95.16>
19. Hartemink, A. E. (2016). The definition of soil since the early 1800s. In *Advances in Agronomy* (Vol. 137, pp. 73-126). Academic Press.
20. Hartwig, M. E., & Ribeiro, L. P. (2021). Gully evolution assessment from structure-from-motion, southeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 548.
21. Hout, R., Maleval, V., Mahe, G., Rouvellac, E., Crouzevialle, R., & Cerbelaud, F. (2020). UAV and LiDAR data in the service of bank gully erosion measurement in Rambla de Algeciras lakeshore. *Water*, 12(10), 2748.
22. Husnjak, S., Šimunić, I., & Tursić, I. (2008). 7th ALPS-ADRIA Scientific Workshop Volume: 36. In *Cereal Research Communications*.
23. Ionita, I., Niacsu, L., Poesen, J., & Fullen, M. A. (2021). Controls on the development of continuous gullies: A 60 year monitoring study in the Moldavian Plateau of Romania. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(13), 2746-2763.
24. Khan, S., Bartley, R., Kinsey-Henderson, A., & Hawdon, A. (2024). Assessing gully erosion and rehabilitation using multi temporal LiDAR DEMs: Case study from the Great Barrier Reef catchments, Australia. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(1), 184-199.
25. Kulenović, N. (2023). Povijesna karakterizacija krajolika Općine Poveljana primjenom geoprostornih tehnologija, Doktorska disertacija, Jadran - poveznica među kontinentima, Sveučilište u Zadru, Zadar.
26. Lal, R. (2017). *Soil Erosion Research Methods*. CRC Press.
27. Llana, M., Carreras, S., Bernatek-Jakiel, A., Ollero, A., & Nadal-Romero, E. (2024). Agricultural land abandonment linked to pipe collapse and gully development: Reconstruction from archival SfM and LiDAR datasets. *Geoderma*, 449, 116995.

28. Luffman, I., & Nandi, A. (2019). Freeze-thaw induced gully erosion: A long-term high-resolution analysis. *Agronomy*, 9(9), 549.
29. Magaš, D. (2011). Zemljopisna obilježja otoka Paga u funkciji upoznavanja njegove toponimije. *Toponimija otoka Paga*, Biblioteka Onomastica Adriatica, knj, 5, 5-49.
30. Maher, E., i Harvey, A. M. (2008). Fluvial system response to tectonically induced base-level change during the late-quaternary: The rio alias Southeast Spain. *Geomorphology*, 100(1–2), 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.04.038>
31. Majoro, F., Wali, U. G., Munyaneza, O., Naramabuye, F.-X., i Mukamwambali, C. (2020). On-site and off-site effects of soil erosion: Causal analysis and remedial measures in agricultural land - A Review. *Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment*, 3(2). <https://doi.org/10.4314/rjeste.v3i2.1>
32. Marić, I. (2020). Razvoj višekriterijskog modela održivog upravljanja na području sedrotvornih vodotokova-primjer Skradinskog buka, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zadru, Hrvatska.
33. Marić, I., Šiljeg, A., Domazetović, F. (2019). Geoprostorne tehnologije u 3D dokumentaciji i promociji kulturne baštine-primjer utvrde Fortica na otoku Pagu. *Geodetski glasnik*, 50, 19-44.
34. Marzloff, I., Ries, J. B., i Poesen, J. (2011). Short-term versus medium-term monitoring for detecting gully-erosion variability in a Mediterranean environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(12), 1604–1623. <https://doi.org/10.1002/esp.2172>
35. Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Wiley-Blackwell.
36. Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Mohammadi, A., Ghoddousi, J., Salajegheh, A., Boggs, G., i Pishyar, R. (2009). Factors controlling gully advancement and models evaluation (Hableh Rood Basin, Iran). *Water Resources Management*, 24(8), 1531–1549. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9512-4>
37. Neugirg, F., Stark, M., Kaiser, A., Vlacilova, M., Della Seta, M., Vergari, F., Schmidt, J., Becht, M., & Haas, F. (2016). Erosion Processes in Calanchi in the Upper Orcia Valley, southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial lidar and UAV surveys. *Geomorphology*, 269, 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.027>

38. Niculiță, M., Mărgărint, M. C., & Tarolli, P. (2020). Using UAV and LiDAR data for gully geomorphic changes monitoring. In *Developments in earth surface processes* (Vol. 23, pp. 271-315). Elsevier.
39. Nieto, R., Gimeno, L., de la Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., García, J. A., Nuñez, M., Redaño, A., i Lorente, J. (2005). Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 18(16), 3085–3103. <https://doi.org/10.1175/jcli3386.1>
40. Olcina, A. G. (2007). Mediterranean and subtropical climatic elements. *Boletín de la AGEN* °, 44, 351-354.
41. Omran, E. S. E., Hamzawy, M., & Hammad, M. A. (2023). Soil–Water Properties for Reduce Land Degradation Along the High Dam Lake, Egypt. In *Egypt's Strategy to Meet the Sustainable Development Goals and Agenda 2030: Researchers' Contributions: SDGs Viewed Through the Lens of Egypt's Strategy and Researchers' Views* (pp. 261-293). Cham: Springer International Publishing.
42. Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rouseva, S., Tadić, M. P., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., i Alewell, C. (2015b). Rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 511, 801–814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>
43. Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., i Alewell, C. (2015a). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
44. Pedić, G. (2023). Prostorno-vremenske promjene morfologije žala na prostoru poluotoka Metajna (Diplomski rad). Zadar: Sveučilište u Zadru. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:162:534630>
45. Poesen, J. W. A., i Hooke, J. M. (1997). Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of Southern Europe. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 21(2), 157–199. <https://doi.org/10.1177/030913339702100201>
46. Salvati, L., i Bajocco, S. (2011). Land sensitivity to desertification across Italy: Past, present, and future. *Applied Geography*, 31(1), 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.04.006>
47. Soil Science Society of America (2008). Glossary of soil science terms 2008. Soil Science Glossary Terms Committee i Soil Science Society of America, ASA-CSSASSSA.

48. Sougnez, N., van Wesemael, B., i Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep, sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *CATENA*, 84(1–2), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.010>
49. Šiljeg, A. (2013). Digitalni model reljefa u analizi geomorfometrijskih parametara– primjer PP Vransko jezero (Doctoral dissertation, Doktorski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu).
50. Šiljeg, A., Domazetović, F., Marić, I., Lončar, N., i Panđa, L. (2021). New Method for Automated Quantification of Vertical Spatio-Temporal Changes within Gully CrossSections Based on Very-High-Resolution Models. *Remote Sensing*, 13(2), 321.
51. Šurda, P., Šimonides, I., i Antal, J. (2007). A determination of area of potential erosion by geographic information systems. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 15(3), 144-152.
52. Tamene L, Adimassu Z, Aynekulu E, Yaekob T (2017) Estimating landscape susceptibility to soil erosion using a GIS-based approach in Northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(3), 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.05.002>
53. Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, J. F., Bolysov, S., Dvinskih, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, A. J., Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons, J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., ... Yermolaev, O. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth-Science Reviews*, 154, 336–355. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>
54. Velić, I., i Vlahović, I. (2009). Geološka karta Republike Hrvatske 1: 300 000. Hrvatski geološki institut, Zagreb
55. Vicente-Serrano, S. M., i Cuadrat-Prats, J. M. (2006). Trends in drought intensity and variability in the Middle Ebro Valley (NE of the Iberian Peninsula) during the second half of the Twentieth Century. *Theoretical and Applied Climatology*, 88(3–4), 247–258. <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0236-6>
56. Wang, Q., Liu, Y., Guo, Y., Wang, S., Zhang, Z., Cui, X., & Zhang, H. (2022). A Robust and Effective Identification Method for Point-Distributed Coded Targets in Digital Close-Range Photogrammetry. *Remote Sensing*, 14(21), 5377.
57. Wheaton JM, Brasington J, Darby SE, Merz J, Pasternack GB, Sear D, Vericat D (2010) Linking geomorphic changes to salmonid habitat at a scale relevant to fish. *River research and applications*, 26(4), 469-486. <https://doi.org/10.1002/rra.1305>



58. Wuepper, D., Borrelli, P., i Finger, R. (2019). Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 3(1), 51–55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>
59. Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Masunaga, T., ... & Liyew Berihun, M. (2021). Effect of subsurface water level on gully headcut retreat in tropical highlands of Ethiopia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(6), 1209-1222.

## POPIS PRILOGA

**Slika 1.** Raznolikost morfologije čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš (A – Zečja jaruga; B – Stepeničasta jaruga; C – sporedno čelo jaruge Santiš; D – glavno čelo jaruge Santiš) (Preuzeto iz Domazetović, 2021)

**Slika 2.** Geografski smještaj otoka Paga u RH (A); geološka karta otoka Paga (prema Velić i Vlahović, 2009) i geografski smještaj poluotoka Santiš unutar otoka Pag (B); prikaz postojećih naslaga smeđeg tla i slivova aktivnih jaruga unutar poluotoka Santiš (C)

**Slika 3.** Stope gubitke tla u Europskoj uniji

**Slika 4.** Prosječne stope gubitka tla u Hrvatskoj

**Slika 5.** Vezne točke korištene za *grubo* georeferenciranje intervalnih DGU snimaka

**Slika 6.** Usporedba detaljnosti prikaza jaruge Santiš na grubo georeferenciranim intervalnim snimkama DGU-a

**Slika 7.** Prikaz prostorne distribucije veznih točaka korištenih za fino georeferenciranje i referentnih točaka korištenih za validaciju točnosti finog georeferenciranja

**Slika 8.** Princip procjena točnosti georeferenciranja DGU snimka iz 2006. godine (A) na temelju referentne točke izdvojene iz visokorezolucijskog DOF-a (B)

**Slika 9.** (A) Područje aerofotogrametrijskog UAV snimanja (B) DJI Matrice 210 RTK V2

**Slika 10.** (A) Prostorni raspored orijentacijskih točaka unutar područja istraživanja; (B) Prikaz orijentacijske točke

**Slika 11.** Detekcija višegodišnjih prostorno-vremenskih promjena uzrokovanih erozijom tla na temelju fino georeferenciranih DGU snimaka i terenski prikupljenih UAV snimaka

**Slika 12.** Primjer kartiranja linije koja reprezentira glavno čelo jaruge Santiš u mjerilu 1:100 na temelju različitih snimaka (A – DGU 2006; B – DGU 2011; C – DGU 2014; D – DGU 2018; E – UAV 2023; F – sve kartirane godine)

**Slika 13.** Shematski prikaz izrađenog alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga

**Slika 14.** Prostorni obuhvat odabranih područja za analizu višegodišnjih volumetrijskih PVP

**Slika 15.** Lokacija orijentacijskih točaka unutar poluotoka Santiš

**Slika 16.** Sučelje izrađenog alata za automatizirani izračun linearnog pomaka čela jaruga

**Slika 17.** Linearni pomak glavnog čela jaruge Santiš u periodu od 2006. do 2023. godine

**Slika 18.** Linearni pomak sporednog čela jaruge Santiš u periodu od 2006. do 2023. godine

**Slika 19.** Linearni pomak čela Stepeničaste jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

**Slika 20.** Linearni pomak prvog čela Zečje jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

**Slika 21.** Linearni pomak drugog čela Zečje jaruge u periodu od 2006. do 2023. godine

**Slika 22.** Detektirana varijabilnost u višegodišnjem linearnom pomaku među analiziranim čelima jaruga

**Slika 23.** Varijabilitet intenziteta višegodišnjeg pomaka glavnog čela jaruge Santiš

**Slika 24.** Detektirane varijabilnost u višegodišnjem intenzitetu linearnog pomaka glavnog čela jaruge Santiš

**Slika 25.** Arealni pomak čela jaruga na prostoru poluotoka Santiš u razdoblju od 2006. do 2023. godine

**Slika 26.** Arealni pomak glavnog čela jaruge Santiš u razdoblju od 2006. do 2023. godine

**Slika 27.** Arealni pomak glavnog čela jaruge Santiš u četiri promatrana međurazdoblja

**Slika 28.** Izrađen intervalni DMP-ovi potrebni za volumetrijsku analizu

**Slika 29.** Primjer razlika u visini na tvrdoj karbonatnoj podlozi na odabranoj lokaciji

**Slika 30.** DoD za razdoblje 2023. - 2011. (smeđe tlo - Jaruga Santiš)

**Slika 31.** Visinske promjene digitalnih modela površina za razdoblje (2023-2018)

**Tablica 1.** Prosječna stopa gubitka tla i njen udio u ukupnom gubitku tla EU

**Tablica 2.** Pregled aerofotogrametrijskih podataka preuzetih za istraživanje

**Tablica 3.** Značajke finog georeferenciranja DGU snimaka

**Tablica 4.** Koordinate prikupljenih točaka u HTRS96TM koordinatnom sustavu

**Tablica 5.** Ulazni podaci korišteni za analizu volumetrijskih promjena (2011. - 2024)

**Tablica 6.** Vanjski parametri orijentacije korištenih aerofogrametrijskih snimaka

**Tablica 7.** Koordinate orijentacijskih točaka u HTRS96TM koordinatnom sustavu

**Tablica 8.** Rezultati procjene točnosti georeferenciranih DGU snimaka

**Tablica 9.** Totalna pogreška (RMSE) kao mjera nepouzdanosti detekcije lineranog i arealnog pomaka čela jaruga