

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.25>

Dinamika plaže u Brovinju: istraživanje erozije i stabilnosti kosina

Beach Dynamics in Brovinje: A Study of Erosion and Slope Stability

Matea Zupčić¹, Igor Ružić¹, Čedomir Benac¹

(1) Građevinski fakultet Rijeka, matea.zupicic@uniri.hr, iruzic@uniri.hr,
cbenac@gradri.uniri.hr

Sažetak

U sklopu Interreg projekta RESONANCE provode se istraživanja obalne erozije i nestabilnosti padina na obalama Jadrana. Ovi geomorfološki procesi su značajan rizik za sigurnost ljudi, infrastrukturu i gospodarske djelatnosti. Jedna od lokacija istraživanja je plaža Brovinje u Raškom zaljevu. Obala i plitki dio morskog dna na istraženoj lokaciji oblikovani su u fliškoj stijenskoj masi koja je podložna ubrzanom raspadanju. To je potvrđeno terenskim mjerjenjima. Metodologija istraživanja uključuje višekratna UAV snimanja i LiDAR skeniranja, kojima se prate promjene reljefa i kvantificira intenzitet geomorfoloških procesa. Rezultati također ukazuju na intenzivno premještanje sedimenta okomito i paralelno u odnosu na obalu i pomicanje berme tijela žala prema obalnoj liniji. Istraživanje potvrđuje važnost sustavnog praćenja obalnih procesa u svrhu procjene geoloških hazarda.

Ključne riječi: obalna erozija, morfološke promjene, stabilnost kosina, valna energija, fliš

Abstract

As part of the Interreg RESONANCE project, research is being conducted on coastal erosion and slope stability along the Adriatic coast. These geomorphological processes are a significant risk to human safety, infrastructure, and economics. One of the study sites is Brovinje Beach in Raša Bay. The coast and shallow part of sea bottom are formed in flysch rock mass, which is subject to weathering. This is confirmed by field surveying. The research methodology includes repeated UAV surveys and LiDAR scanning to monitor terrain changes and quantify the intensity of geomorphological processes. The results also indicate intense sediment redistribution in both cross-shore and longshore directions, as well as the seaward shift of the berm. The study confirms the importance of coastal monitoring for the assessment of geological hazards.

Keywords: coastal erosion, morphological changes, slope stability, wave energy, flysch

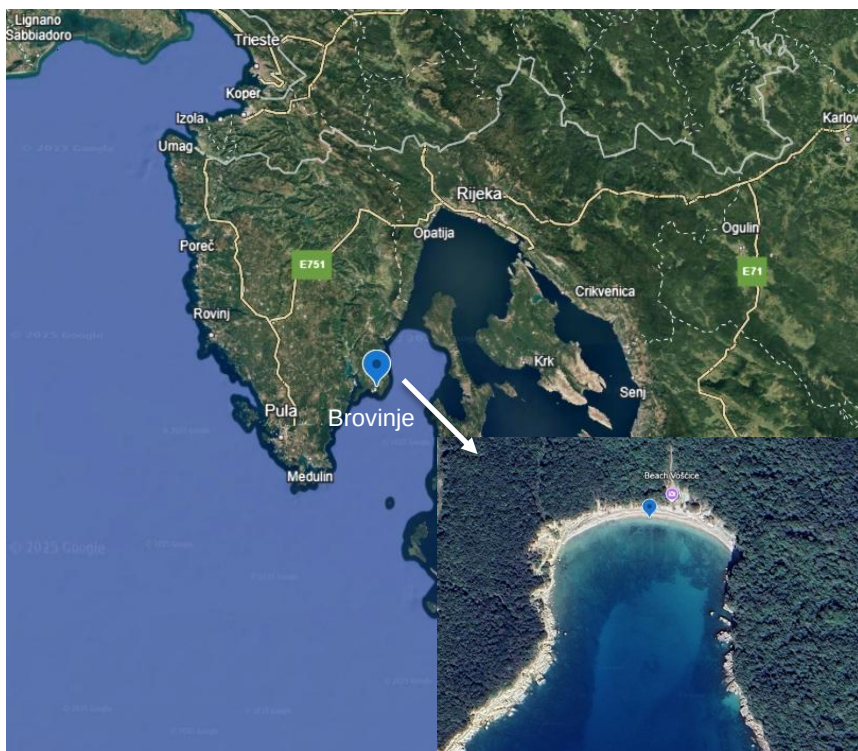
1. Uvod

Hrvatska obala Jadranskog mora sve je ranjivija na utjecaje klimatskih promjena, uključujući porast razine mora, obalnu eroziju i promjene u količini oborina koje dodatno povećavaju rizik od odrona. Predviđa se rast razine mora približno +0,53 mm godišnje u kvarnerskom području, što dugoročno predstavlja izazov za infrastrukturu, ekosustave i lokalne zajednice [1]. Uz to obalna područja duž sjevernog Jadrana pokazuju izražene desetogodišnje trendove porasta oborina, s povećanjima do 0,2 mm/dan po desetljeću što može imati ozbiljne posljedice na učestalost i prostornu raspodjelu odrona [2], [3], [4]. Erozija i obalni geološki hazardi na području Kvarnera dokumentirani su u više znanstvenih radova [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Ipak, unatoč njihovoj važnosti, postojeća istraživanja ostaju prostorno ograničena na pojedine lokacije. S obzirom na gospodarsku i ekološku važnost hrvatske jadranske obale, postoji jasna potreba za sustavnijim, regionalno obuhvatnim pristupom analizi obalne ranjivosti i geoloških hazarda [9], [12]. Cilj ovog istraživanja usmjeren je na praćenje dinamike žala i klizišta u području Brovinja koja je izložena djelovanju valova, oborina i povišenih razina mora, u skladu s projektom RESONANCE, u sklopu kojeg je ova lokacija prepoznata kao jedna od ključnih za analizu. Projekt teži smanjenju rizika za ljude i infrastrukturu kroz bolje razumijevanje čimbenika koji utječu na nestabilnost padina i marinsku eroziju u jadranskom području. Preliminarni rezultati ovog istraživanja posebno su usmjereni na utjecaj umjereno jakog juga na morfološke promjene žala, ukazujući na značajnu redistribuciju sedimenta. Time se postavljaju temelji za precizniju procjenu obalne ranjivosti i učinkovitije upravljanje obalnim prostorom u uvjetima sve izraženijih klimatskih promjena.

2. Područje i metode istraživanja

2.1. Područje istraživanja

Plaža Brovinje smještena je u uvali Vošćice, u naselju Brovinje pokraj Koromačna u Raškom zaljevu na istočnoj obali istarskog poluotoka (Slika 1). To je prirodno šljunčano žalo duljine oko 180 metara, koja se ističe svojom geomorfološkom i geološkom kompleksnošću. Osnovu podloge čine siliciklastične stijene paleogenske starosti, poznate kao fliš koji se sastoji pretežno od kalcitičnih lapora s proslojcima vapnovitih pješčenjaka (kalarenita). Zbog djelovanja marinske erozije u fliškoj stijenskoj masi oblikovan je klif, a u njegovom podnožju marinska terasa. Fliška stijena je zahvaćena trošenjem na površini zbog čega se događa stalno osipanje s kosina oko tijela žala. Međutim, u prihrani tijela žala sudjeluju samo odlomci nastali od vapnovitih pješčenjaka, dok se lapori posve raspadaju u morskoj vodi. Tijelo žala sastoji se od poluzaobljenih odlomaka veličine šljunka. Porijeklom su iz spomenutih vapnenačkih pješčenjaka vidljivih u kosini klifa. Moguće je da je dio tih sedimenata transportiran s viših predjela. Tijelo žala samo djelomično pokriva morsko dno pa je fliška stijenska masa vidljiva i na tim mjestima (Slika 17).



Slika 16. Područje istraživanja.

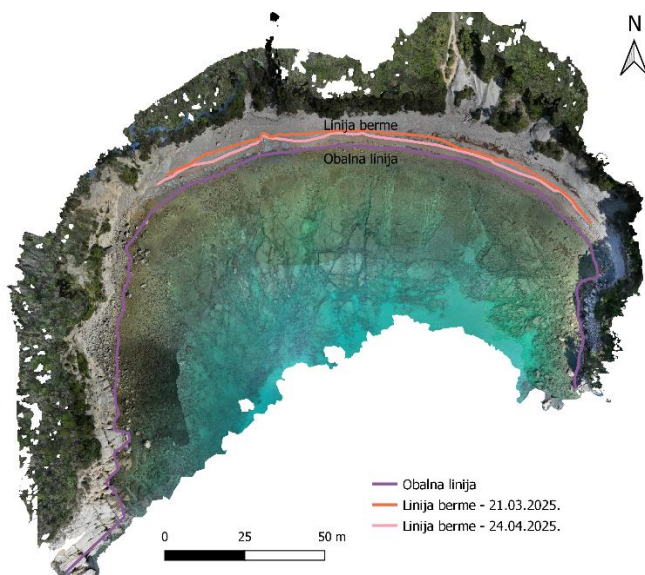
2.2. Izvor podataka i mjerna oprema

Prikupljanje podataka počelo je u studenom 2024. godine korištenjem UAV Dji Mavic 3 Pro bespilotne letjelice za snimanje visoko rezolucijskih zračnih snimki i LiGrip 01 Lite RTK skenera koji kombinira LiDAR tehnologiju s integriranom kamerom za realne korekcije lokacijskih podataka te visoko precizni LAS oblak točaka u stvarnim bojama. Do sada su provedena četiri snimanja, a u ovom radu analiziraju se dva najrelevantnija, ona iz 21. ožujka i 24. travnja 2025., koja prikazuju morfološke promjene žala nastale tijekom jednog djelovanja olujnog juga.

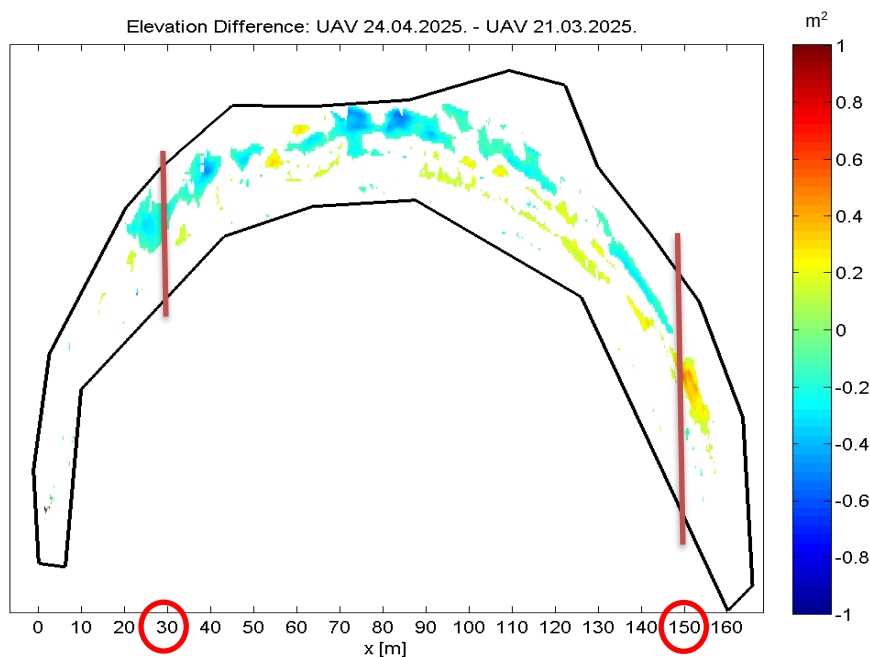
3. Rezultati

Ovaj dio istraživanja usmjeren je na praćenje promjena u morfologiji žala nakon djelovanja umjereno jakog juga (5 Beauforta, brzina vjeta oko 35 km/h). Pretpostavlja se da tijekom olujnih uvjeta, pod utjecajem valova određene energije, dolazi do dodatnog podlokavanja baze kosine oblikovane u fliškoj stijenskoj masi, čime se ubrzava proces njegove destabilizacije. Ova je hipoteza potvrđena terenskim opažanjima koja su ukazala na aktivno trošenje stijene upravo uslijed navedenih uvjeta.

Značajne promjene u morfologiji žala zabilježene su neposredno nakon udara juga. Te promjene uključuju premještanje šljunka kako u smjeru okomitom na obalu (cross-shore), tako i duž obalne linije (longshore). Na Slika 17 prikazana je plaža Brovinje s ucrtanim položajem obalne linije, gdje je vidljivo pomicanje pozicije berme između dvaju snimanja gotovo duž cijelog žala (21.03.2025. i 24.04.2025.). Prije juga, berma je bila smještena na višoj koti, osobito na srednjem i zapadnom dijelu žala. Međutim, uslijed djelovanja valova i premještanja sedimenta prema moru, došlo je do njenog pomaka. Analiza visinskih promjena žala dodatno potvrđuje ovu dinamiku jer su uočene mjerljive promjene koje ukazuju na aktivno premještanje ru sedimenta uzrokovano valnom energijom. Na Slika 18 prikazana je razlika visina između dva snimanja terena gdje je jasno vidljiva erozija gornjeg dijela žala duž većine plaže osim na istoku gdje se zapaža akumulacija šljunka. Povučeni šljunak nakuplja se bliže obalnoj liniji te dolazi do formiranja nove berme.

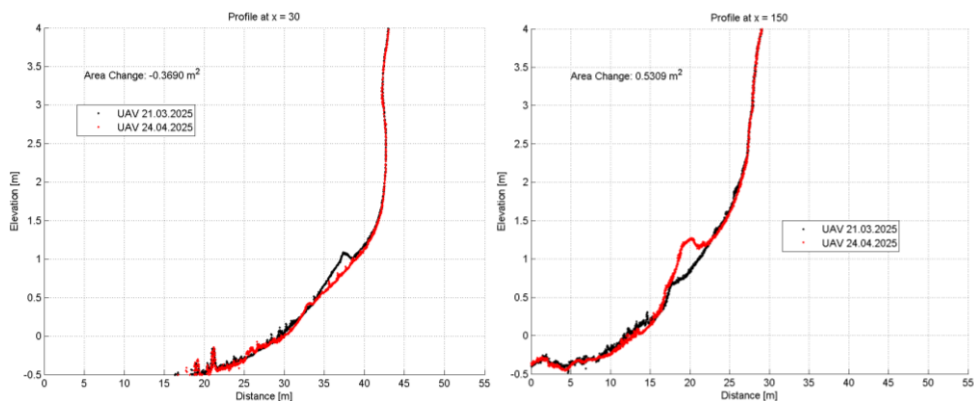


Slika 17. UAV ortofoto prikaz plaže Brovinje (21.03.2025.) s ucrtanim linijama položaja obalne berme snimljenima u različitim vremenskim razdobljima koje jasno prikazuju promjenu položaja berme uslijed djelovanja juga.



Slika 18. Visinska razlika površine žala Brovinje između dvaju snimanja (21.03.2025. i 24.04.2025.).

Na Sliku 19 prikazane su promjene u morfološkim profilima, između dvaju snimanja, zapadnog i istočnog dijela plaže Brovinje. Lijeva slika prikazuje profil žala na zapadnom dijelu ($x = 30$), gdje je evidentan negativna bilanca promjene površine, točnije smanjenje od $-0,37 \text{ m}^2$. Ova razlika između profila ukazuje na sveukupnu eroziju duž profila, odnosno povlačenje materijala s viših dijelova žala prema obalnoj liniji. Nasuprot tome, desni graf prikazuje profil na istočnom dijelu žala ($x = 150$), gdje je zabilježena pozitivna promjena površine od $0,50 \text{ m}^2$. Ovdje se vidi nakupljanje materijala i kreiranje berme na višoj koti. Usporedba ovih dvaju profila potvrđuje intenzivnu cross-shore i longshore redistribuciju sedimenta.



Slika 19. Usporedba morfoloških profila plaže Brovinje između dvaju razdoblja snimanja (21.03.2025. i 24.04.2025.). Lijevi graf prikazuje promjene na zapadnom dijelu plaže (profil x = 30), dok desni graf prikazuje istočni dio plaže (profil x = 150).

4. Zaključak

ovom radu prikazana su početne rezultate Istraživanja na plaži Brovinje unutar okvira Interreg RESONANCE projekta. Rezultati ukazuju na izraženu osjetljivost obalnog sustava na kratkotrajne, ali intenzivne atmosferske pojave poput juga. Kombinacijom UAV snimanja i LiDAR tehnologije dobiveni su podaci koji omogućuju kvantitativnu analizu promjena u morfologiji žala. Rezultati jasno potvrđuju značajno premještanje sedimenta tijela žala u cross-shore i longshore smjerovima, pomicanje berme žala prema obalnoj liniji te eroziju viših dijelova žala tijekom jednog analiziranog olujnog utjecaja. Terenska opažanja također su potvrdila ubrzano trošenje stijenske mase na kosini klifa zbog dodatnog podlokavanja, čime raste rizik od pojave nestabilnosti. Rezultati ovih istraživanja naglašavaju važnost sustavnog praćenja dinamike obalnih procesa radi bolje procjene geoloških hazarda i planiranja prilagodbe klimatskim promjenama. Primijenjena metodologija pokazala se učinkovitom u detekciji promjena na mikro lokaciji te predstavlja vrijednu osnovu za buduće regionalne analize obalne ranjivosti.

Zahvale

Ovo istraživanje provedeno je u sklopu projekta Interreg RESONANCE, kojem zahvaljujemo na financijskoj i organizacijskoj podršci. Također zahvaljujemo Laboratoriju za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci na ustupljenoj opremi i tehničkoj podršci tijekom provođenja terenskih aktivnosti.

Literatura

- [1] A. Barić, B. Grbec, and D. Bogner, "Potential implications of sea-level rise for Croatia," *J. Coast. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 299–305, 2008, doi: 10.2112/07A-0004.1.
- [2] I. Tojčić, C. Denamiel, and I. Vilibić, "Kilometer-scale trends, variability, and extremes of the Adriatic far-future climate (RCP 8.5, 2070– 2100)," *Front. Mar. Sci.*, vol. 11, p. 1329020, 2024, doi: 10.3389/fmars.2024.1329020.
- [3] IPCC, "Climate change 2014 synthesis report," *IPCC Geneva, Switzerland.*, pp. 1059–1072, 2014.
- [4] S. Seneviratne *et al.*, "Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment," 2012, doi: 10.1017/CBO9781139177245.006.
- [5] Č. Benac, "Recentni geomorfološki procesi i oblici u području Riječkog zaljeva," *Hrvat. Geogr. Glas.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–17, 1992.
- [6] Č. Benac, I. Ružić, and E. Žic, "Ranjivost obala u području Kvarnera," *Pomor. Zb.*, vol. 44, no. 1, pp. 201–214, 2006.
- [7] Č. Benac, M. Oštrić, and S. Dugonjić Jovančević, "Geotechnical properties in relation to grain-size and mineral composition: case study landslide in the Rječina Valley (Croatia)," *Geol. Croat.*, vol. 67, no. 2, pp. 127–136, 2014, doi: 10.4154/gc.2014.09.
- [8] M. Juračić, Č. Benac, K. Pikelj, and S. Ilić, "Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia)," *Geomorphology*, vol. 107, no. 1–2, pp. 90–99, 2009, doi: 10.1016/j.geomorph.2007.05.020.
- [9] K. Pikelj, I. Ružić, S. Ilić, M. R. James, and B. Kordić, "Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia," *Ocean & Coast. Manag.*, vol. 156, pp. 223–238, 2018, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.11.019.
- [10] I. Ružić, I. Marović, Č. Benac, and S. Ilić, "Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia," *Geo-marine Lett.*, vol. 34, pp. 555–565, 2014, doi: 10.1007/s00367-014-0380-4.
- [11] I. Ružić and Č. Benac, "Ranjivost obala otoka Raba zbog rasta razine mora," *Hrvat. vode*, vol. 24, no. 97, pp. 203–214, 2016.
- [12] I. Ružić, S. Dugonjić Jovančević, Č. Benac, and N. Krvavica, "Assessment of the coastal vulnerability index in an area of complex geological conditions on the Krk Island, Northeast Adriatic Sea," *Geosciences*, vol. 9, no. 5, p. 219, 2019, doi: 10.3390/geosciences9050219.