

Je Obala res tektonsko aktivna? Tektonska geomorfologija potopljenih rečnih korit v Tržaškem zalivu

Ana Trobec^{*}, Andrej Šmuc^{*}, Sašo Poglajen^{**}, Marko Vrabc^{*}

Ključne besede: zapolnjena korita, podpovršinski sonar, pleistocen, holocen, aktivna tektonika

Keywords: buried channels, sub-bottom sonar, Pleistocene, Holocene, active tectonics

Razširjeni povzetek

Tržaški zaliv se nahaja na skrajnem severovzhodnem delu Jadranskega morja na meji med Italijo, Slovenijo in Hrvaško. Predstavlja razmeroma plitev zaliv, njegove globine se gibljejo med 20 in 30 metri. Za obdobje zadnjega glacialnega viška je značilna 120-130 metrov nižja višina morske gladine od današnje, kar se je izražalo tudi v sedimentacijskih pogojih na raziskovanem območju, ki je v tem obdobju predstavljalo aluvialno ravnino rek Ter, Soče, Nadiže in Tilmenta (Marocco, 1989, 1991; Zecchin et al., 2015a). Območje Tržaškega zaliva je morje začelo zalivati v holocenu, pri čemer je glavnino zaliva morje prekrilo pred približno 10,000 leti (Ogorelec et al., 1981, 1997; Covelli et al., 2006; Zecchin et al., 2015a). Od takrat se v zalivu odlaga plitvomorski klastični sediment, ki prekriva in domnevno izravnava pleistocensko kontinentalno paleotopografijo. Visokoločljive batimetrične raziskave pa so pokazale, da so v morskem dnu vidne zasute geomorfološke oblike, ki bi jim lahko pripisali nastanek v kontinentalnem sedimentacijskem okolju (Slavec, 2012). V naši raziskavi se osredotočamo na dve izmed teh geomorfoloških oblik, na Paleorižano in Paleoreko.

Čeprav velja Tržaški zaliv za seizmično razmeroma neaktivno območje (Di Bucci & Angeloni, 2013), je v zadnjih letih bilo objavljenih več del, ki na podlagi sedimentoloških in arheoloških indikatorjev ter geodetskih meritev ugotavljajo vertikalne premike v rangu do milimetra na leto (Rižnar et al., 2007; Antonioli et al., 2009; Furlani et al., 2011; Surić et al., 2014; Zampa et al., 2015; Biolchi et al., 2016; Trobec et al., 2016). Aktivno tektoniko dokazujejo tudi tektonske strukture, ki deformirajo kvartarni sediment Tržaškega zaliva (Romeo, 2009; Busetti et al., 2010b). Obala Tržaškega zaliva predstavlja močno industrializirano in gosto poseljeno območje, zato je dobro poznavanje aktivnosti tektonskih struktur in stopnje deformacij na podlagi geoloških in geomorfoloških podatkov izjemnega pomena za določevanje potresne nevarnosti. S holocenskimi sedimenti prekrute pleistocenske geomorfološke oblike so bile v zadnjih 10.000 letih sedimentološko razmeroma stabilne, zato predstavljajo uporabno orodje za prepoznavanje in kvalitativno določanje potencialne holocenske tektonske aktivnosti.

^{*} Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana

^{**} Harpha Sea d. o. o., Čevljarska ulica 8, 6000 Koper

Geološko podlago v Tržaškem zalivu predstavljata mezojsko-kenozojski karbonati in eocenski fliš, ki sestavljata tudi večji del obale (Placer et al., 2010; Carulli, 2011; Placer, 2015; Jurkovšek et al., 2016). Mezozojsko-eocenska sekvenca je prekrita z več sto metri plio-pleistocenskega sedimenta mešanega kontinentalno-morskega izvora, ki se je odlagal v transgresijsko-regresijskih ciklih (Buseti et al., 2010a; Carulli, 2011; Vrabc et al., 2014). Najmlajše sedimentno zaporedje predstavlja holocenski sediment, ki se odlaga zadnjih 10.000 let od pričetka holocenske transgresije (Ogorelec et al., 1981, 1997; Lambeck et al., 2004; Covelli et al., 2006; Zecchin et al., 2015b). Za vzhodne obale zaliva je značilna naluskana zgradba z glavnimi prelomnimi sistemi v smeri SZ-JV in manjšimi prečnimi strukturami (Placer et al., 2010; Carulli, 2011; Placer, 2015; Biolchi et al., 2016; Jurkovšek et al., 2016), ki je nastala kot posledica eocensko-oligocenskega narivanja proti JZ in kasnejšega miocenskega podpiranja Istre pod Zunanje Dinaride (Placer et al., 2010).

Naša raziskava temelji na 64 profilih podpovršinskega sonarja (cca. 120 km), ki smo jih zajeli s plovilom Lyra (v lasti Harpha Sea d. o. o.). Za zajem smo uporabili podpovršinski sonar Innomar Parametric Sediment Echo Sounder SES-2000 Compact subb-bottom sonar pri oddajnih frekvencah 6 ali 8 kHz. Dodatno smo uporabili izseke iz natisnjenih sonarskih profilov, ki jih je leta 1998 v Koprskem zalivu zajela ameriška mornarica na krovu USS Littlehales (T-AGS 52). Parametri zajema te podatkovne zbirke niso znani. Batimetrični model v ločljivosti 10 m x 10 m (Slavec, 2012) je bil izdelan iz podatkov večsnopnega in enosnopnega sonarja. Podatki večsnopnega sonarja so bili zajeti na krovu Lyre z Reson SeaBat 8125 sonarjem pri frekvenci 455 kHz, podatki enosnopnega sonarja pa so bili zajeti z gumenjakom z Elac Hydrostar 4300 sonarjem pri čemer je frekvenca oddajanja znašala 50 ali 200 kHz (Slavec, 2012).

V naši raziskavi smo se osredotočili na s holocenskim sedimentom prekriti geomorfološki obliki Paleorižane in Paleoreke, pri čemer smo uporabljali digitalni model morfologije morskega dna in profile podpovršinskega sonarja. Paleorižano smo interpretirali kot meandrski pas na poplavni ravnici, pri čemer smo iz reliefa morskega dna prepoznali značilne geomorfološke oblike, kot so opuščeni rečni kanali, mrtvice in meandrski preseki. Odboji iz podpovršinskih profilov v območju poplavne ravnice nakazujejo na laminirane drobnozrnate sedimente odložene v sedimentacijskem okolju srednje energije, kar je značilno tudi za nekohezivne poplavne ravnice srednje energije (cf. Nanson and Croke, 1992; cf. Veeken, 2007). Paleoreka je v reliefu morskega dna vidna kot rahlo valovito korito z izrazitimi nasipi, ki se dvigajo nekaj metrov nad poplavno ravnico. Na batimetričnem modelu in na profilih podpovršinskega sonarja na raziskovanem območju nismo opazili opuščenih korit, zato smo Paleoreko interpretirali kot bočno stabilno rečno korito, pri katerem je prevladovala sedimentacija z vertikalnim priraščanjem. Okoliški sedimenti poplavne ravnice nakazujejo, da Paleoreka predstavlja rečni sistem enega korita znotraj nizkoenergijske poplavne ravnice (cf. Nanson and Croke, 1992). Obe rečni telesi sta prekriti z nekaj metri holocenskega morskega sedimenta, zato predpostavljamo, da nista mlajši od 10.000 let.

Paleoreka se razteza približno pravokotno na glavne prelomne sisteme, ki so bili prepoznani v slovenski Istri in se nadaljujejo v zaliv (Buseti et al., 2010b; Placer et al., 2010; Vrabc et al., 2014). Obenem je v obdobju po zadnji holocenski transgresiji sedimentološko razmeroma stabilna in tako predstavlja izvrsten potencialen geomorfološki tektonski indikator. V naši raziskavi smo uporabili globine zasute koritnice, ki smo jih določili iz profilov podpovršinskega sonarja na 31 lokacijah, kjer so prečkali korito. Višinska razlika koritnice na odseku v dolžini 15 km med prvo in zadnjo lokacijo znaša 5 metrov, pri čemer povprečen gradient med sosednjima lokacijama znaša 0.7 m/km. Prečni profil višin koritnice ne izkazuje

izrazitih skokov in ni skladen s predvidenim relativnim spustom v Koprskem zalivu v velikosti približno 10 m, ki bi na podlagi hitrosti vertikalnih premikov (Rižnar et al., 2007) nastal v 10.000 letih. Ker geodetsko določeni premiki niso izraženi v dolgoročnem sedimentnem zapisu, predpostavljamo, da izražajo kratkoročno seizmično deformacijo. Oblika krivulje vertikalnih premikov (Rižnar et al., 2007) spominja na obliko deformiranega površja nad zataknenim narivom, kot jo predvideva elastična dislokacijska teorija (Okada, 1985; Matsu'ura & Sato, 1989). Iz lokacij prevojev na krivulji vertikalnih premikov predvidevamo, da premike povzročata Svetokriški ali Buzetski nariv.

Zahvale

Raziskava je bila financirana iz raziskovalnega projekta L1-5452 "Uporaba sonarja v raziskavah aktivne tektonike in paleoseizmologije na ozemljih z nizko intenzivnostjo deformacij", ki sta ga sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in podjetje Harpha Sea d.o.o. Za gostoljubje se zahvaljujemo posadki Lyre. Zahvaljujemo tudi Ameriški mornarici in Geodetskemu Inštitutu Slovenije, ki sta nam omogočila dostop do natisnjenih sonarskih profilov iz snemanja iz leta 1998.

Literatura

- Antonioli, F., Ferranti, L., Fontana, A., Amorosi, A., Bondesan, A., Braitenberg, C., Dutton, A., Fontolan, G., Furlani, S., Lambeck, K., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Spada, G., Stocchi, P., 2009. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines. *Quat. Int.* 206, 102–133. doi:10.1016/j.quaint.2008.11.008
- Biolchi, S., Furlani, S., Covelli, S., Busetti, M., Cucchi, F., 2016. Morphotectonics and lithology of the eastern sector of the Gulf of Trieste (NE Italy). *J. Maps* 12, 936–946. doi:10.1080/17445647.2015.1099572
- Busetti, M., Volpi, V., Barison, E., Giustiniani, M., Marchi, M., Ramella, R., Wardell, N., Zanolla, C., 2010a. Meso-Cenozoic seismic stratigraphy and the tectonic setting of the Gulf of Trieste (northern Adriatic). *GeoActa SP 3* 1–14.
- Busetti, M., Volpi, V., Nicolich, R., Barison, E., Romeo, R., Baradello, L., Brancatelli, G., Giustiniani, M., Marchi, M., Zanolla, C., Wardell, N., Nieto, D., Ramella, R., 2010b. Dinaric tectonic features in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). *Boll. di Geofis. Teor. ed Appl.* 51, 117–128.
- Carulli, G.B., 2011. Structural model of the Trieste Gulf: A proposal. *J. Geodyn.* 51, 156–165. doi:10.1016/j.jog.2010.05.004
- Covelli, S., Fontolan, G., Faganeli, J., Ogrinc, N., 2006. Anthropogenic markers in the Holocene stratigraphic sequence of the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Mar. Geol.* 230, 29–51. doi:10.1016/j.margeo.2006.03.013
- Di Bucci, D., Angeloni, P., 2013. Adria seismicity and seismotectonics: Review and critical discussion. *Mar. Pet. Geol.* 42, 182–190. doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.09.005
- Furlani, S., Biolchi, S., Cucchi, F., Busetti, M., Melis, R., 2011. Tectonic effects on Late Holocene sea level changes in the Gulf of Trieste (NE Adriatic Sea, Italy). *Quat. Int.* 232, 144–157. doi:10.1016/j.quaint.2010.06.012
- Jurkovšek, B., Biolchi, S., Furlani, S., Kolar-Jurkovšek, T., Zini, L., Jež, J., Tunis, G., Bavec, M., Cucchi, F., 2016. Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia–NE Italy). *J. Maps* 1–12. doi:10.1080/17445647.2016.1215941
- Lambeck, K., Antonioli, F., Purcell, A., Silenzi, S., 2004. Sea-level change along the Italian coast for

- the past 10,000 yr. *Quat. Sci. Rev.* 23, 1567–1598. doi:10.1016/j.quascirev.2004.02.009
- Marocco, R., 1991. Evoluzione tardopleistocenica-olocenica del delta del F. Tagliamento e delle Lagune di Marano e Grado (Golfo di Trieste). *Quat.* 1b, 223–232.
- Marocco, R., 1989. Evoluzione quaternaria della Laguna di Marano (Friuli-Venezia Giulia). *Quat.* 2, 125–137.
- Matsu'ura, M., Sato, T., 1989. A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries. *Geophys. J. Int.* 96, 23–32. doi:10.1111/j.1365-246X.1989.tb05247.x
- Nanson, G.C., Croke, J.C., 1992. A genetic classification of floodplains. *Geomorphology* 4, 459–486. doi:10.1016/0169-555X(92)90039-Q
- Ogorelec, B., Faganeli, J., Mišič, M., Čermelj, B., 1997. Reconstruction of paleoenvironment in the Bay of Koper (Gulf of Trieste, Northern Adriatic). *Annales* 11, 187–200.
- Ogorelec, B., Mišič, M., Šercelj, A., Cimerman, F., Faganeli, J., Stegnar, P., 1981. Sediment of the salt marsh of Sečovlje. *Geologija* 24, 180–216.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 1135–1154.
- Placer, L., 2015. Simplified structural map of Kras Kras (Slovene), Carso (Italian) = Geographical unit. *Geologija* 58, 89–93. doi:10.5474/geologija.2015.008
- Placer, L., Vrabec, M., Celarc, B., 2010. The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija* 53, 55–86. doi:10.5474/geologija.2010.005
- Rižnar, I., Koler, B., Bavec, M., 2007. Recent activity of the regional geologic structures in western Slovenia. *Geologija* 50, 111–120. doi:10.5474/geologija.2007.009
- Romeo, R., 2009. Studio geofisico integrato ad alta risoluzione dei depositi marini e della struttura del substrato della Riviera di Miramare (Golfo di Trieste). University of Trieste.
- Slavec, P., 2012. Analiza morfologije morskega dna slovenskega morja. University of Ljubljana.
- Surić, M., Korbar, T., Juračić, M., 2014. Tectonic constraints on the late Pleistocene-Holocene relative sea-level change along the north-eastern Adriatic coast (Croatia). *Geomorphology* 220, 93–103. doi:10.1016/j.geomorph.2014.06.001
- Trobec, A., Šmuc, A., Poglajen, S., Vrabec, M., 2016. Buried MIS 5 abrasion platforms in the Bay of Koper (Gulf of Trieste, Northern Adriatic) confirm long-term subsidence of the Northern Adriatic region, in: European Geosciences Union, General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April 2016 : Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union, München, p. 11963.
- Veeken, P.C.H., 2007. Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation. Elsevier.
- Vrabec, M., Buseti, M., Zgur, F., Facchin, L., Pelos, C., Romeo, R., Sormani, L., Slavec, P., Tomini, I., Visnovic, G., Žerjal, A., 2014. Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju SLOMARTEC 2013, in: Kuhar, M., Čop, R., Gosar, A., Kobold, M., Kralj, P., Malačič, V., Rakovec, J., Skok, G., Stopar, B., Vreča, P. (Eds.), Raziskave S Področja Geodezije in Geofizike 2013. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, pp. 97–101.
- Zampa, L.S., Buseti, M., Furlani, S., Baradello, L., Romeo, R., 2015. Evidence of neo-tectonic tilting in the Gulf of Trieste, in: Furlani, S., Antonioli, F., Anzidei, M., Buseti, M., Ferranti, L., Mastronuzzi, G., Orrù, P. (Eds.), Proceedings : GeoSUB - Underwater Geology, Trieste, 13-14 October 2015. Trieste, pp. 72–73.
- Zecchin, M., Ceramicola, S., Lodolo, E., Casalbore, D., Chiocci, F.L., 2015a. Episodic, rapid sea-level rises on the central Mediterranean shelves after the Last Glacial Maximum: A review. *Mar. Geol.* 369, 212–223. doi:10.1016/j.margeo.2015.09.002
- Zecchin, M., Gordini, E., Ramella, R., 2015b. Recognition of a drowned delta in the northern Adriatic Sea, Italy: Stratigraphic characteristics and its significance in the frame of the early Holocene sea-level rise. *The Holocene* 25, 1027–1038. doi:10.1177/0959683615575358