

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.05>

PREGLED METODA ZA PRAĆENJE LOKALNOGA PODLOKAVANJA UZ STUPOVE MOSTA

OVERVIEW OF THE TECHNIQUES FOR THE REAL-TIME SCOUR MONITORING NEXT TO BRIDGE PIERS

Robert Fliszar¹, Gordon Gilja²

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, robert.fliszar@grad.unizg.hr

(2) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, R. Hrvatska, gordon.gilja@grad.unizg.hr

Sažetak

Erozivno djelovanje toka u prirodnim vodotocima uzrokuje pojavu kaverni nastalih podlokavanjem oko građevina u koritu, od kojih je najčešće riječ o elementima mosta. Budući da podlokavanje oko mosta može bitno utjecati na promjenu opterećenja i posljedično njegovu sigurnost, važno je provoditi redovno praćenje stanja korita i evidentirati promjene u njemu. U ovome radu predstavljen je pregled opreme koja se koristi za praćenje podlokavanja, njezinih prednosti i nedostataka kao i osvrt na njezinu primjenjivost u uvjetima nailaska velikih vodnih valova.

Ključne riječi: podlokavanje, most, monitoring, kaverna, R3PEAT

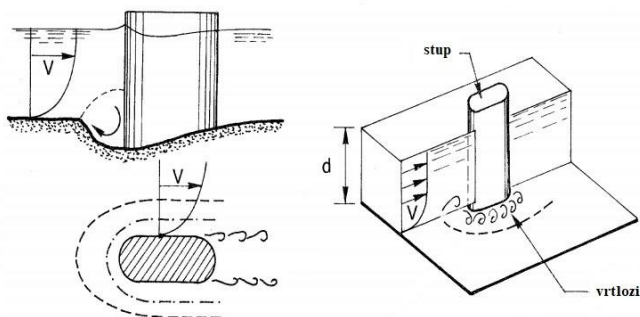
Abstract

The flow in natural watercourses over the erodible riverbed can cause the appearance of scour holes next to structures built in the river, most commonly next to bridge elements. Since scouring next to the bridge piers and abutments can significantly alter the design loading, and consequently present a risk to bridge safety, it is important to carry out the periodical monitoring and record changes of the riverbed. This paper presents an overview of the instrumentation used to monitor scour processes with discussion of advantages and disadvantages for every instrument type, as well as their applicability for deployment during the flood waves.

Keywords: local scour, bridge, monitoring, scour hole, R3PEAT

1. Uvod

Podlokavanje oko stupova mostova prirodan je fenomen uzrokovan erozivnim djelovanjem toka rijeke koji je vrlo opasan jer je to jedan od najčešćih uzroka otkazivanja mostova u svijetu [1]. Dubina kaverne nastale podlokavanjem određuje se zbrajanjem individualnih dubina podlokavanja nastalih mehanizmima erozije – globalnom erozijom, erozijom uslijed koncentracije toka i lokalnom erozijom [2]. Tijekom rastuće faze hidrograma povećavaju se dubina i brzina toka te opstrujavanjem stupa mosta nastaju dva sustava vrtloga: vrtlozi s vodoravnom osi i vrtlozi s vertikalnom osi [3].



Slika 1. Proces podlokavanja oko stupa i nastanka kaverne (prilagođeno iz [3])

Postoje mnoge zaštite stupa od podlokavanja, a u Republici Hrvatskoj najčešće je korištena riprap zaštita (kameni nabačaj). Međutim, u praksi se pokazalo kako izgradnja riprap zaštite ne sprječava eroziju u potpunosti, nego dolazi do pojave podlokavanja na nizvodnoj nožici riprapa te nastaje odbačena kaverna u koju se riprap počinje urušavati [4]. Zbog važnosti toga problema potrebno je pratiti procese podlokavanja uz mostove kako bi se moglo pravovremeno djelovati u izvanrednim situacijama. Razvoj podlokavanja može se pratiti fiksnom instrumentacijom, prijenosnom instrumentacijom ili vizualnim praćenjem [5]. Uzimajući u obzir važnost problema podlokavanja, velik broj instrumenata razvijen je za praćenje nastanka kaverne uzrokovan podlokavanjem, koji se mogu svrstati u sljedeće kategorije: uređaji za jednokratnu upotrebu, pulsni ili radarski uređaji, uređaji koji koriste zvučne valove, svjetlovodne rešetke i uređaji koji koriste električnu vodljivost [6].

2. Pregled najčešće korištenih uređaja za praćenje podlokavanja

2.1. Uređaji za jednokratnu upotrebu

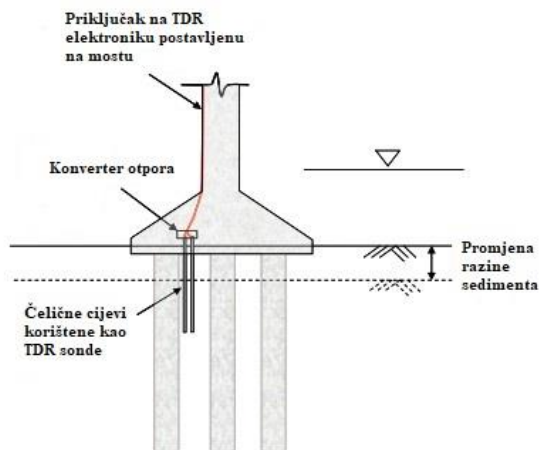
Briaud i dr. [5] opisali su isplivavajući uređaj (engl. *float-out device*), cilindrični uređaj za praćenje koji se zakopa vertikalno u korito. Uređaj ispliva kada dubina podlokavanja dođe do razine na kojoj je zakopan te šalje signal vrijednosti 1 prema prijammiku, a dok je zakopan, šalje vrijednost 0. Kompaktan je i jednostavan za korištenje, ali ima ograničeno vrijeme rada jer se napaja preko baterije. Nedostatak mu je to što pokazuje lokalno podlokavanje samo na mjestu na kojem je postavljen. Također, proces njegova postavljanja na terenu zahtijeva bušenje, zbog čega je skup i zahtjevan za postavljanje. Briaud i dr. [5] također su opisali privezanu zakopanu sklopku TBS (engl. *Tethered buried switch*), tip uređaja za isplivavanje koji je vertikalno zakopan u tlo kako bi informirao o razvoju kaverne oko temelja mosta. Električna sklopka aktivira se kada se

šipka okrene iz vertikalnoga položaja u horizontalni, što se dogodi kada dubina podlokavanja dosegne dubinu ukopavanja uređaja i tako daje izravnu i jednostavnu indicaciju dubine podlokavanja. Ovaj je uređaj jeftin i jednostavan za postavljanje, nema ograničeno vrijeme rada jer je izravno kabelom spojen na sustav za prikupljanje podataka. Nedostaci su mu to što može izmjeriti dubinu podlokavanja samo do dubine na koju je ukopan, daje samo informacije o lokalnome podlokavanju i zahtijeva konstantan spoj na izvor napajanja.

Sustavi zakopanih ili utisnutih šipki uključuju sustave kao što su magnetski klizni prsten, tzv. *Scubamouse* i Wallingdordov *Tell-Tail* uređaj. Ovi instrumenti rade na principu ručne ili automatske gravitacijske sonde koja je oslonjena na korito i pomiče se prema dolje kada se razvija kaverna nastala podlokavanjem [6]. *Tell-Tail* temelji se na upotrebi senzora postavljenih na fleksibilan gumeni rep i ugrađuju se ispod korita. Ako dubina podlokavanja dosegne dubinu senzora, isti počinje oscilirati i slati signal [3].

2.2. Pulsni ili radarski uređaji

Pulsni ili radarski uređaji koriste radarske signale i elektromagnetske valove kako bi odredili promjene u svojstvima materijala koje se javljaju kada se signal propagira kroz promjenjivi fizički medij [7]. Metoda reflektometra vremenske domene TDR (engl. *Time Domain Reflectometry*) originalno je korištena u elektrotehnici za lociranje diskontinuiteta u dalekovodima električne i komunikacijske mreže, a također može mjeriti dielektrična i električna svojstva materijala [8]. U građevinarstvu je primjenjivana za mjerenje sadržaja vode u tlu, mjerenja gustoće, procjenu čvrstoće betona i monitoring podlokavanja na mjestima mostova [9]. TDR radi tako da na mjerni senzor šalje brzorastući impuls i mjeri refleksije zbog promjene geometrije sustava ili dielektrične propusnosti materijala te rezultate mjerenja temelji na velikoj razlici između dielektrične konstante vode i zraka ili nanosa [10].



Slika 2. Shema integriranoga TDR sustava za monitoring podlokavanja (prilagođeno iz [10])

Anderson i dr. [11] predstavili su GPR (engl. *Ground Penetrating Radar*), radar za promatranje ispod površine zemlje, uređaj koji obično koristi kombinaciju antene odašiljača i prijarnika koji je postavljen na površinu vode ili neposredno iznad površine vode. Odašiljač proizvodi kratkotrajan (raspon frekvencija u MHz) impulsi

elektromagnetski signal u jednakim vremenskim ili prostornim razmacima dok se pomiče iznad ili ispod površine vode. Daje precizan strukturalni model nanosa na dnu korita te pruža kontinuiranu sliku korita na odabranoj trasi, a nedostatak mu je što podatci mogu sadržavati šumove zbog više različitih refleksija signala.

2.3. Svjetlovodna rešetka

Hill i Meltz [12] eksperimentalnim putem dokazali su kako FBG (engl. *fiber-Bragg grating*), senzor svjetlovodne rešetke, ima izvrsnu pouzdanost za mjerenje deformacije i temperature, pri čemu je utvrđeno da pomak Braggove valne duljine ima linearan odnos s osnom deformacijom. Senzorski sustavi zasnovani na svjetlovodnoj rešetci temeljeni su na mjerenju osnih deformacija ugrađenih konzolnih šipki za generiranje električnih signala koje ukazuju na pojavu podlokavanja duž šipke [13]. Nedostatak ovih senzora jest osjetljivost na vibracije konstrukcije mosta uzrokovane tokom vode ili prometom koji se odvija na mostu, zbog čega neke recenzije učinkovitosti pokazuju malu razliku između ukopanih i ovoga tipa senzora [14].

2.4. Uređaji na bazi zvučnih valova

Nassif i dr. [15] predstavili su jeftin sonički sustav (engl. *Fathometer*), sonarni sustav praćenja podlokavanja koji se sastoji od sonarnoga instrumenta povezana s uređajem za pohranu podataka i napajanjem koji može davati neprekidan zapis dubine podlokavanja. Mjeri dubinu na temelju vremena putovanja zvučnoga vala kroz vodu. Može se programirati kako bi mjerio dubinu u određenim vremenskim koracima (primjerice svakih 60 min) te može pratiti procese podlokavanja kao i zapunjavanja kaverne nanosom.

Fisher i dr. [16] pokazali su kako promjena temperature kod sonarnih uređaja može rezultirati greškom do 6 % kada je riječ o procjeni dubine korita. Ovisnost o temperaturi može se izračunati na terenu mjerenjem temperature i računanjem promjene brzine zvuka. Koncentracija suspendiranih čestica minimalno utječe na rezultate mjerenja u mirnome toku, dok za turbulentne tokove može uzrokovati bitnu pogrešku, ali se također može utvrditi pouzdanost srednjih mjernih rezultata izračunom standardne devijacije.

Akustični dubinomjeri (engl. *Echo sounders*) koriste izvor akustičnoga signala i prijamnik, a postavljeni su neposredno ispod površine vode. Akustični dubinomjeri emitiraju zvučni impuls frekvencije u rasponu od oko 100 kHz-a od kojih se neki reflektiraju na dnu kanala i vraćaju u prijamnik gdje se digitalno pohranjuju [11]. S obzirom na to da su unutar jednoga uređaja smješteni izvor signala i prijamnik, omogućeno je neometano praćenje podlokavanja pomoću takva uređaja. Glavna prednost takvih dubinomjera je ta što uređaj daje točan model batimetrije korita, a glavni je nedostatak šumovitost zapisa zbog višestruke refleksije impulsa od dna korita, obale i/ili stupova mosta [11].

2.5. Uređaji na bazi električne vodljivosti

Anderson i dr. [11] za praćenje podlokavanja primijenili su sonde za mjerenje električne vodljivosti između dviju elektroda uronjenih u vodu. Upotreba takvih sonda za mjerenje dubine dna rijeke temelji se na načelu da se vodljivost korita i vode razlikuju zbog svojstava suspendiranih čestica nanosa, otopljenih iona i vode, koji utječu na vodljivost. Višestruki senzori postavljaju se na sondu koja se okomito utiskuje u korito na željenome mjestu i ostavlja radi periodičnoga praćenja podlokavanja. Ova metoda daje dobre rezultate samo ako se električna vodljivost korita i vode bitno razlikuju [17].

Glavna je prednost mjerenja podlokavanja sondama za mjerenje električne vodljivosti mogućnost dugotrajna praćenja, dok su glavni nedostaci mogućnost prikupljanja podataka samo na mjestu sonde i potencijalan utjecaj na navigacijske sustave prolazećih brodova [11].

3. Rasprava

Brojni su mostovi u Republici Hrvatskoj specifični po postavljenoj zaštiti stupa od podlokavanja, odnosno riprapi oblozi zbog koje se kaverna ne formira neposredno uz stup mosta, nego je propagirana nizvodno. Zbog toga se većina prethodno opisanih instrumenata za praćenje podlokavanja ne može upotrijebiti na takvim mostovima jer su fiksno vezani za most ili izvor napajanja postavljen na samome mostu. S druge strane neki od navedenih instrumenata mogu biti postavljeni na proizvoljnome mjestu u vodotoku, pri čemu je potrebno poznavati točno mjesto nastanka kaverne, što nije moguće unaprijed odrediti. Kako bi se mogli pratiti procesi razvoja kaverne nastale podlokavanjem, mjerni instrument trebao bi biti postavljan iznad same kaverne, te su u skladu s tim prikladni akustični dubinomjeri s vlastitim napajanjem postavljeni na plutaču. U sklopu projekta R3PEAT (*Daljinsko praćenje erozije riprapi zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu*) razvija se sustav praćenja podlokavanja koji će se moći postaviti iznad kaverne i prikupljati podatke o dubini u stvarnome vremenu za vrijeme nailaska vodnoga vala [18, 19].

4. Zaključak

U ovome radu dan je pregled uređaja koji se koriste za praćenje podlokavanja oko stupa mosta. Prikazani su nedostaci i glavne prednosti pojedinih uređaja iz kojih se može razaznati prikladnost uređaja u odnosu na specifičnosti pojedinih lokacija na terenu. Valja napomenuti kako se uređaji koji su fiksno vezani za most ne mogu koristiti na mostovima koji su zaštićeni riprapi zaštitom od podlokavanja, kakvi su česti u Hrvatskoj, zbog pojave odbačene kaverne dalje od mosta. Zakopani ili utisnuti uređaji također nisu pogodni za takve mostove jer mjere dubinu samo na mjestu na kojem su postavljeni, a pozicija odbačene kaverne prije nastanka nije poznata.

Zahvala

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom R3PEAT (UIP-2019-04-4046).

Literatura

- [1] Lee, G., Mohan, S.B., Huang, C., Fard, B.N.: A Study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, 2013
- [2] Briaud, J.L., Chen, H.C., Li, Y., Nurtjahyo, P., *et al.*: SRICOS-EFA Method for Contraction Scour in Fine-Grained Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131** (2005) 10, pp. 1283-1294
- [3] De Falco, F., Mele, R.: The monitoring of bridges for scour by sonar and sediment, *NDT & E International*, **35** (2002) 2, pp. 117-123
- [4] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D.: *Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography*, 2017
- [5] Briaud, J., Hurlbaus, S., Chang, K.-A., Yao, C., *et al.*: Realtime Monitoring of Bridge Scour Using Remote Monitoring Technology, 2011

- [6] Prendergast, L.J., Gavin, K.: A review of bridge scour monitoring techniques, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6** (2014) 2, pp. 138-149
- [7] Forde, M.C., McCann, D.M., Clark, M.R., Broughton, K.J., *et al.*: Radar measurement of bridge scour, *NDT & E International*, **32** (1999) 8, pp. 481-492
- [8] Ramo, S., Whinnery, J.R., Van Duzer, T.: *Fields and Waves in Communication Electronics*, Wiley, 1994
- [9] Yankielun, N.E., Zabilansky, L.: Laboratory Investigation of Time-Domain Reflectometry System for Monitoring Bridge Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, **125** (1999) 12, pp. 1279-1284
- [10] Yu, X., Yu, X.: Time Domain Reflectometry Automatic Bridge Scour Measurement System: Principles and Potentials, *Structural Health Monitoring*, **8** (2009) 6, pp. 463-476
- [11] Anderson, N.L., Ismael, A.M., Thitimakorn, T.: Ground-Penetrating Radar: A Tool for Monitoring Bridge Scour, *Environmental and Engineering Geoscience*, **13** (2007) 1, pp. 1-10
- [12] Hill, K.O., Meltz, G.: Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview, *Journal of Lightwave Technology*, **15** (1997) 8, pp. 1263-1276
- [13] Lin, Y.B., Lai, J.S., Chang, K.C., Li, L.S.: Flood scour monitoring system using fiber Bragg grating sensors, *Smart Materials and Structures*, **15** (2006) 6, 1950-1959
- [14] May, R.W.P., Ackers, J.C., Kirby, A.M., Research, C.I., *et al.*: *Manual on Scour at Bridges and Other Hydraulic Structures*, CIRIA, 2002
- [15] Nassif, H., Ertekin, A.O., Davis, J.: Evaluation of bridge scour monitoring methods, Trenton, USA, pp. 1-89, 2002
- [16] Fisher, M., Chowdhury, M.N., Khan, A.A., Atamturktur, S.: An evaluation of scour measurement devices, *Flow Measurement and Instrumentation*, **33** (2013) pp. 55-67
- [17] Hayes, D.C., Drummond, F.E.: Use of fathometers and electrical-conductivity probes to monitor riverbed scour at bridge piers, 1995
- [18] Gilja, G., Harasti, A., Potočki, K., Varga, M., *et al.*: Istraživački okvir projekta R3PEAT - daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu, *OKRUGLI STOL: Nanos u vodnim sustavima - stanje i trendovi*, Varaždin, 2020
- [19] Harasti, A., Gilja, G., Varga, M., Fliszar, R.: ScourBuoy – concept for scour monitoring system, *EGU General Assembly 2021*, Beč, Austrija, 2021