

VODNA EROZIJA V POREČJU GRADAŠČICE

WATER EROSION IN THE GRADAŠČICA RIVER CATCHMENT

UDK 551.311.21(497.451)"2014"

Simon Rusjan

dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija, simon.rusjan@fgg.uni-lj.si

Matjaž Mikoš

dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija, matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Nejc Bezak

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija, nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

Povzetek

Za procese, ki sestavljajo erozijsko-sedimentacijski krog, sta značilni velika časovna in prostorska spremenljivost. Meritve in opazovanja erozijskih procesov, ki so posledica padavin in površinskega odtoka padavinske vode, na porečju Gradaščice izrazito potrjujejo prej omenjeni spremenljivosti. Ekstremni meteorološki dogodki, ki so se zgodili leta 2014, so povzročili sproščanje, premeščanje in odlaganje drobnozrnatih zemljin ter tudi grobozrnatega erozijskega drobirja v hudourniških pritokih in rečni strugi Gradaščice. Nanosi sedimentov lahko močno vplivajo na zmanjšanje poplavne varnosti nekega odseka vodotoka in povzročijo škodo na cestni infrastrukturi, kar se je pokazalo ob zadnjih poplavnih dogodkih leta 2014.

Abstract

The processes of erosion-sedimentation cycle are characterized by significant spatial and temporal variability. Measurements and observations of erosion processes that are a consequence of rainfall runoff formation in the Gradaščica river catchment confirm this notable variability in processes. Extreme meteorological events, which occurred in year 2014, caused erosion, transport and deposition of fine soil particles and also more coarse sediment debris downstream in the torrential tributaries and inside the channel of the Gradaščica river. Deposited sediments can strongly influence the flood safety of some stream reaches and cause damage on road infrastructure, which became apparent during flood events in year 2014.

Uvod

V povirnih delih prispevnih območij vodotokov, ki so v Sloveniji večinoma topografsko zelo razgibani, prihaja ob intenzivnejših padavinskih dogodkih do hitrega padavinskega odtoka. Ta večinoma površinski odtok je eden glavnih dejavnikov erozije tal in s koncentriranjem odtoka povzroči obilno odplavljanje erodiranega materiala v struge vodotokov. V rečnih strugah z gibanjem vodnega toka potekajo intenzivni procesi premeščanja geološkega materiala, ki ga navadno imenujemo sedimenti oziroma plavine, da bi jih razlikovali od odloženih sedimentov oziroma sedimentnih kamnin. Zaradi spremenjenih hidravličnih razmer vzdolž strug vodotokov prihaja do poglobljanja (erodiranja) in odlaganja sedimentov, kar lahko zelo poslabša hidravlično prevodnost strug vodotokov ter poveča poplavno in erozijsko nevarnost. V Sloveniji smo tako pogosto priča številnim poškodbam infrastrukture v bližini rečnih strug, in sicer cest, mostov ter prepustov, poleg tega pa tudi poškodbam stanovanjskih, industrijskih in kmetijskih objektov, kar je posledica erozijskih procesov v strugah vodotokov, predvsem globinske in bočne rečne erozije.

Erozijsko-sedimentacijski krog sestavlja več procesov, in sicer erozija, sproščanje erodibilnega materiala, spiranje

in premeščanje (transport) sedimentov, odlaganje (sedimentacija) premeščenega materiala ter geološki dvig površja. Procesu erozijsko-sedimentacijskega kroga se prepletajo s procesi vodnega oziroma hidrološkega kroga (na primer Brilly in Šraj, 2005). Ekstremni padavinski dogodki so namreč eden izmed glavnih vzrokov nastanka erozije tal. Tako vrsto erozije imenujemo vodna erozija, poznamo pa tudi vetrno, snežno, plazno, podorno ter ledeniško erozijo, omeniti pa velja še procese biološkega, fizikalnega in kemičnega preperevanja (Pintar in Mikoš, 1983). Površinski odtok padavinske vode je glavna gonilna sila transporta drobnozrnatih zemljin z zgornje plasti zemeljske površine (Mikoš in Zupanc, 2000). Drobnozrnat geološki material, ki lebdi v vodnem stolpcu in potuje z vodnim tokom, navadno imenujemo suspendirana snov in povzroča motnost vode. Vodni tok lahko po erozijskih jarkih in hudourniških strugah premešča tudi nekoliko bolj grobozrnat erozijski drobir, ki lahko v nekaterih primerih prispeva velik delež k celotni bilanci transportiranega materiala (Mikoš in sodelavci, 2006; Mikoš, 2012). V ravninskih delih, kjer je hitrost vodnega toka manjša, prihaja do odlaganja premeščenega materiala. Dodatno se premeščen material odlaga vzdolž strug vodotokov predvsem za hidrotehničnimi objekti, na primer pregradami.

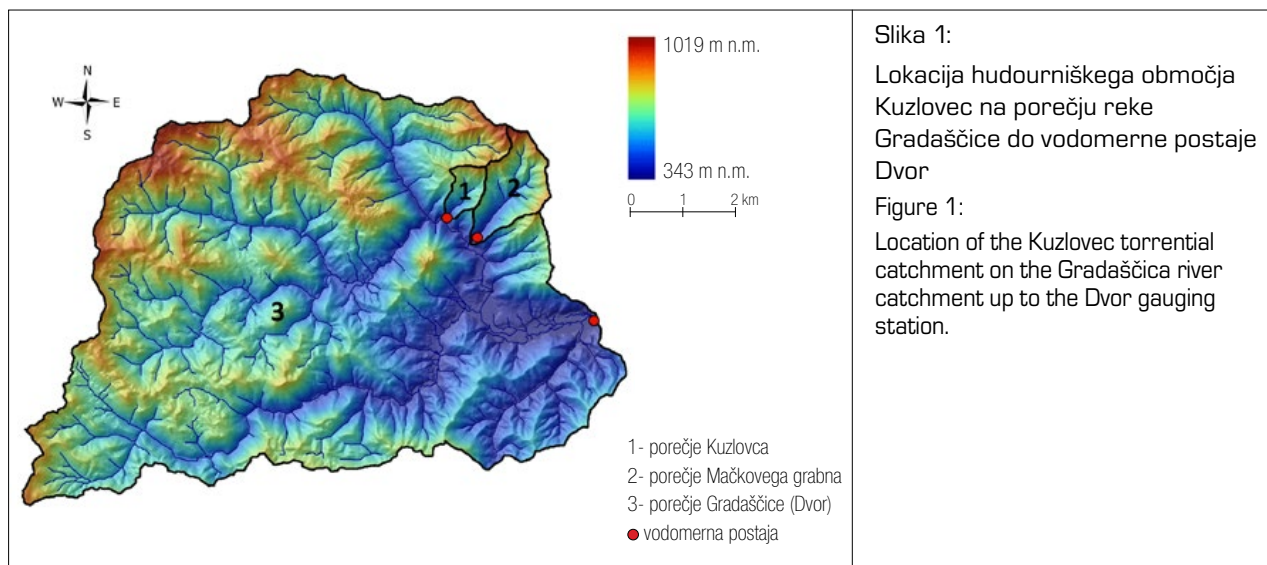
Erozijske procese v smislu količin premeščenega ali odloženega materiala je brez terenskih meritev težko ovrednotiti. V prispevku bodo prikazani rezultati meritev motnosti vode in ovrednotenih količin premeščenih suspendiranih snovi v porečju Gradaščice leta 2013 in 2014. Opisani in predstavljeni bodo nekateri erozijski procesi, ki smo jih opazili po ekstremnih dogodkih leta 2014 in so s hidrološkega vidika nekoliko podrobneje predstavljeni v prispevku v tej številki revije Ujma (Bezak in sodelavci, 2015b).

Podatki in metode

V Sloveniji so se meritve koncentracije suspendiranih (lebedčih) snovi v vodotokih začele izvajati pred več kot 50 leti (Bezak in sodelavci, 2013a; Bezak in sodelavci, 2015a; Ulaga, 2005; Ulaga, 2006). Meritve je v okviru državnega hidrološkega monitoringa opravljala Agencija RS za okolje – ARSO (Ulaga, 2005; Ulaga, 2006). V daljših obdobjih z različnimi intervali vzorčenja so potekale na več kot 40 vodotokih, med katerimi pa ni bilo reke Gradaščice, ki je eden izmed glavnih pritokov Ljubljanice. Reka Gradaščica ima predvsem v povirnem delu izrazito hudourniški značaj in veliko zmožnost premeščanja rinjenih ter lebedčih plavin. V okviru eksperimentalnega hidrološkega monitoringa, ki ga od leta 2012 izvaja Katedra za splošno hidrotehniko Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani, so meritve suspendiranih snovi ter opazovanja erozijskih procesov potekali na manjšem hudourniškem območju, imenovanem Kuzlovec, ki je del prispevnega območja reke Gradaščice (Bezak in sodelavci, 2013b),

ter na vodomerni postaji Dvor na reki Gradaščici, kjer pretoke meri Agencija RS za okolje. Bezak in sodelavci (2013b) so podali več informacij o dveh eksperimentalnih porečjih na prispevnem območju Gradaščice, in sicer Kuzlovec ter Mačkov graben, kjer potekajo številne hidrološke meritve. Slika 1 prikazuje lokacijo hudourniškega porečja hudournika Kuzlovec na digitalnem modelu višin porečja Gradaščice. Slika 2 prikazuje pokrovnost tal (evropska baza pokrovnosti tal *Corine Land Cover*) za porečje Gradaščice do vodomerne postaje Dvor. Opazimo lahko, da je prevladujoča raba tal na porečju Gradaščice do postaje Dvor gozd, ki pokriva skoraj 70 odstotkov površine, torej gre za nadpovprečno gozdnat del Slovenije. Preglednica 1 prikazuje nekatere osnovne značilnosti obeh obravnavanih porečij.

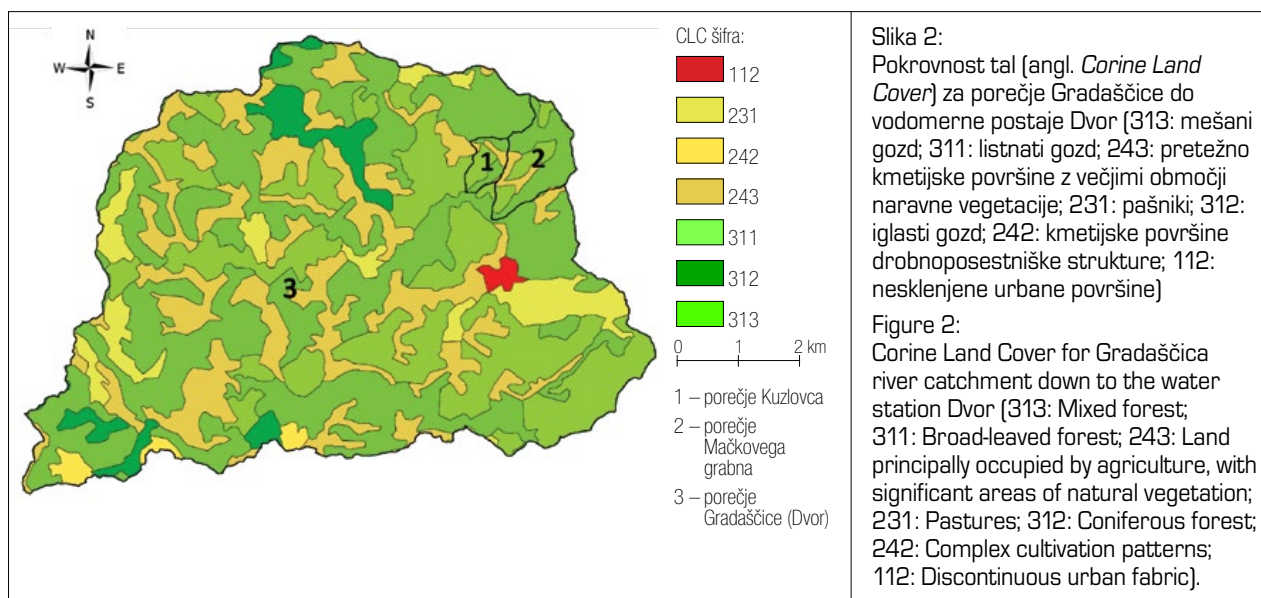
Koncentracijo suspendiranih snovi (mg/l , g/m^3) smo določili na podlagi meritev motnosti v enotah NTU (angl. *Nephelometric Turbidity Units*), potekale pa so v okviru projekta Evropske unije SedAlp (<http://www.sedalp.eu/project/>). Za meritve je bila uporabljena sonda Hydrolab MS5, ki se uporablja za meritve kakovosti vode in omogoča hkratne meritve več spremenljivk (Bezak in sodelavci, 2013b). Od spomladi 2013 do poletja 2014 so meritve motnosti potekale na hudourniškem porečju Kuzlovca, od oktobra 2014 pa se izvajajo na vodomerni postaji Dvor. V okviru meritev na eksperimentalnih porečjih v Ljubljani in na Črnem Vrhu nad Polhovim Gradcem potekajo meritve intenzitete ter količine padavin z uporabo optičnih disdrometrov. Meritve so v realnem času dostopne na spletni strani <http://ksh.fgg.uni-lj.si/avp/DisCrniVrh/>.



Porečje	Postaja	Površina (km^2)	Povprečni padec glavnega vodotoka (m/m)	Nadmorska višina vodomerne postaje (m n.m.v)
Kuzlovec	Kuzlovec	0,71	0,235	406
Gradaščica	Dvor	78,8	0,027	343

Preglednica 1: Prikaz nekaterih osnovnih značilnosti porečij Gradaščice in Kuzlovca

Table 1: Some basic characteristics of the Gradaščica and Kuzlovec catchments.



Rezultati in analiza

V nadaljevanju prispevka predstavljamo rezultate opazovanj in meritev različnih procesov, ki sestavljajo erozijsko-sedimentacijski krog in so potekali leta 2013 ter 2014. Leto 2014 je bilo z meteorološkega in hidrološkega vidika nadpovprečno (ARSO, 2014; Bezak in sodelavci, 2015).

Erozijski procesi v porečju Gradaščice

Od junija 2013 do junija 2014, ko so meritve motnosti potekale na hudourniškem območju Kuzlovca, nismo opazili ekstremnih hidroloških dogodkov. Na podlagi meritev smo ocenili, da se je v tem obdobju skozi prečni profil postaje Kuzlovec preneslo približno pet ton suspendiranega materiala. Iz tega lahko glede na površino porečja (preglednica 1) določimo specifično sproščanje v velikosti 0,1 t/ha/leto. Ob tem je treba dodati, da je bilo omenjeno obdobje z vidika dinamike erozijskih procesov precej neaktivno.

Ekstremen padavinski dogodek, ki se je zgodil v noči s 4. na 5. avgust 2014, je povzročil ekstremne hidrološke in erozijske razmere na širšem območju Male Božne (Bezak in sodelavci, 2015c). Disdrometer, postavljen na Črnem Vrhju nad Polhovim Gradcem, je v približno desetih urah izmeril 185 mm padavin, pri čemer je največja minutna intenziteta padavin presegala 288 mm/h. Glede na statistično analizo ekstremnih padavin (ARSO, 2009) lahko povratno dobo tega padavinskega dogodka ocenimo od 100 do 250 let (Bezak in sodelavci, 2015c). Ekstremni padavinski dogodek je v povirju Gradaščice povzročil proženje več kot 50 plitvih zemeljskih plazov (slika 3). Na širšem območju Polhograjskih dolomitov je bilo poškodovano približno 50 kilometrov cest, podrti so bili štirje mostovi, poškodovanih je bilo tudi deset stanovanjskih hiš in dva industrijska objekta. Škoda je presegla 0,5 milijona evrov (Bezak in sodelavci, 2015c). Terenski ogled razmer

po ekstremnem avgustovskem dogodku je razkril številne erozijsko-sedimentacijske procese. Poleg že omenjenih plitvih zemeljskih plazov (slika 3) smo opazili manjše zdrse zemljine, manjše podore, nastanek žlebične erozije in prav tako jarkovne erozije (slika 4). Pomembno vlogo pri eroziji brežin in poškodbah številnih cestnih mostov je imelo tudi lesno plavje. Slika 5 prikazuje lesno plavje, ki se je zgodilo v profilu mostne odprtine na mostu čez strugo Male Božne, ki se je v poplavnem dogodku tudi porušil. Velika količina plavja, ki je bilo odplavljeno v struge vodotokov, je predvsem posledica žledoloma februarja 2014. Do odlaganja velike količine sedimentnega materiala, ki ga je voda premeščala v obliki rinjenih plavin in suspendiranih snovi (Mikoš, 2012; Rusjan in Mikoš, 2006), je prišlo večinoma v lokalnih depresijah ter odsekih z manjšim naklonom dna struge (slika 6). Poleg sedimentov se je na posameznih mestih odložilo tudi veliko lesnega plavja (slika 6). Slika 7 prikazuje primerjavo razmer v hudourniški strugi Kuzlovca leta 2012 in 2014 po ekstremnem dogodku, ki se je zgodil avgusta 2014. Opazimo lahko izrazito geomorfološko preoblikovanost struge, ki se kaže v spremembah mikrolokacije struge, poglobitvi in spranosti struge, količini lesnega plavja itn. Te spremembe kažejo na veliko intenziteto erozijskih procesov, ki so povzročili premeščanje in spiranje materiala vzdolž hudourniške struge. Bezak in sodelavci (2015c) so prikazali rezultate terestričnega laserskega skeniranja (angl. *Terrestrial Lidar Scanning*) struge Kuzlovca pred ekstremnim avgustovskim dogodkom leta 2014 in po njem, iz njih pa je razvidno, da se je na manjšem območju, velikem 25 m x 160 m, sprostil približno 500 m³ sedimentnega materiala. Zgoraj opisani rezultati kažejo, da sta v dinamiki procesov, ki sestavljajo erozijsko-sedimentacijski krog, velika časovna in tudi prostorska spremenljivost, kar pomeni, da lahko ekstremni padavinski dogodek povzroči premeščanje večjih količin drobnozrnatega ter grobnozrnatega materiala, ki bi se sicer na istem območju lahko sprostil šele v veliko daljšem obdobju. Do podobnih ugotovitev so na podlagi meritev prišli tudi raziskovalci iz drugih delov sveta (npr. Lenzi in sodelavci, 1999; Lenzi in Marchi, 2000).



Slika 3: Med dogodkom, ki se je zgodil avgusta 2014, se je v povirju Gradaščice sprožilo več kot 50 plitvih zemeljskih plazov. (foto: M. Kogoj)

Figure 3: During the August 2014 event more than 50 shallow landslides were triggered in the investigated area (photo: M. Kogoj).



Slika 4: Poleg pljuskovne in žlebične erozije smo na opazovanem območju opazili tudi nastanek jarkovne erozije. (foto: N. Bezak)

Figure 4: Besides rainfall splash and rill erosion, also gully erosion was noticed in the investigated area (photo: N. Bezak).



Slika 5: Erozijska brežina je hitrejša zaradi premeščanja in velike količine lesnega plavja. (foto: M. Kogoj)

Figure 5: Bank erosion accelerated by woody debris and large amounts of woody debris (photo: M. Kogoj).



Slika 6: Do odlaganja sedimentov je prišlo predvsem v lokalnih depresijah in na poplavnih ravninah. (foto: N. Bezak)

Figure 6: Sediment deposition mostly occurred in the local ponds (depressions) and on flood plains (photo: N. Bezak).

Meritve koncentracij suspendiranih snovi

Oktober 2014 smo optično sondo za meritve motnosti premaknili na lokacijo vodomerne postaje Dvor, ki je na iztoku s prispevnega območja Gradaščice, prikazana na sliki 1. Slika 8 prikazuje meritve koncentracij suspendiranih snovi in pretokov na vodomerni postaji Dvor med poplavnim dogodkom oktobra 2014, ki je prav tako obravnavan v tej številki revije Ujma (Bezak in sodelavci, 2015b). Časovni interval zajema podatkov je bil 30 minut. Opazimo lahko, da je do konice koncentracije suspendiranih snovi prišlo pred konico pretoka, kar je bilo tudi sicer značilno za odvisnost med tema spremenljivkama na porečju Kuzlovca (Bezak in sodelavci, 2013b). Takšna dinamika je značilna za porečja, kjer je večina potencialnih virov sedimentov (erozijska žarišča) blizu rečne mreže oziroma celo v rečni mreži. Po avgustovskem ekstremnem dogodku, ko je bilo v povirnem



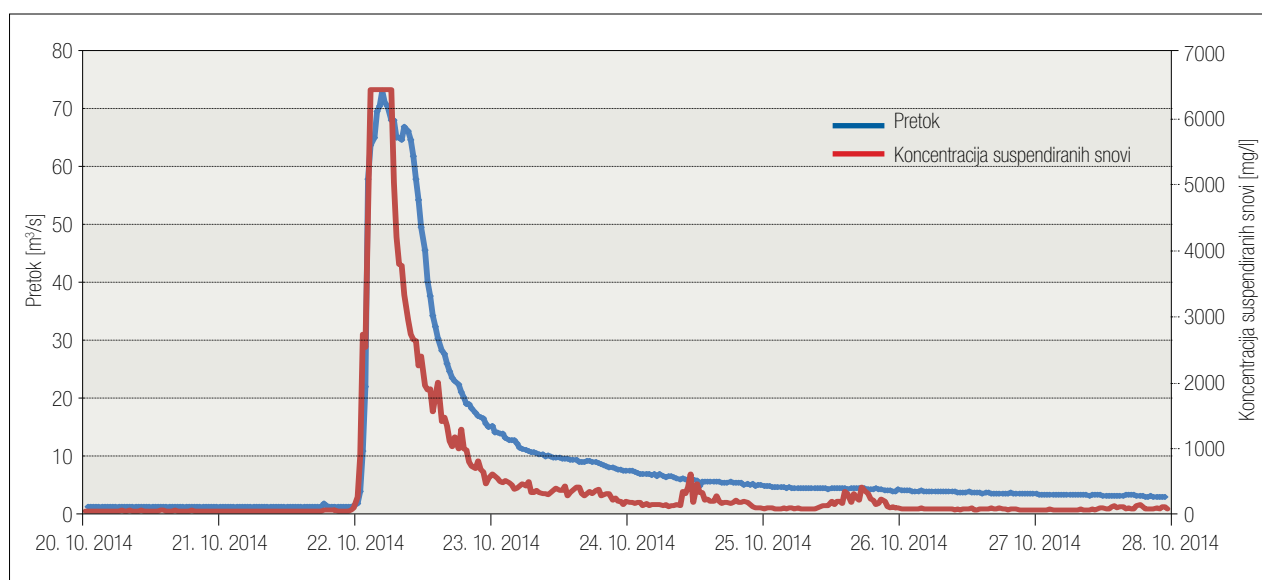
Slika 7: Primerjava med stanjem v porečju Kuzlovca leta 2012 in 2014 po ekstremnem avgustovskem dogodku (foto: M. Kogoj)

Figure 7: Comparison between geomorphological condition in year 2012 and year 2014 after the August extreme event (photo: M. Kogoj).

delu Gradaščice odloženo veliko sedimentov (slika 6), taki rezultati niso presenetljivi. Meritve koncentracij suspendiranih snovi so pokazale tudi, da se je med poplavami oktobra 2014 skozi prečni profil vodomerne postaje Dvor premestilo približno 12.000 ton suspendiranega materiala (slika 8). Pri tem lahko vidimo, da so maksimalne koncentracije suspendiranih snovi v kratkem času konice pretoka presegle zgornjo mejo merilnega območja (slika 8). To ustreza specifičnemu sproščanju v velikosti 1,5 t/ha/leto, kar je precej večja vrednost, kot smo jo izračunali na podlagi meritev motnosti v obdobju od junija 2013 do junija 2014 za porečje Kuzlovca. Glede na rezultate meritev pretokov lahko ocenimo, da je bila prostornina poplavnega vala od 4,5 do 5 milijonov m³. Iz tega sledi, da je bila povprečna koncentracija suspendiranih snovi med tem dogodkom približno 2,5 g/l.

Sklepne misli

Prispevek predstavlja nekatere značilnosti erozijskih procesov na širšem območju porečja Gradaščice. Na podlagi meritev in terenskih opazovanj lahko ugotovimo, da sta za opazovane procese značilni velika prostorska in časovna spremenljivost. Za pridobitev verodostojnih ocen količin premeščenega suspendiranega materiala je bistvena izvedba meritev v času visokih voda, saj se večina procesov premeščenja suspendiranega materiala po rečnih strugah zgodi prav v razmeroma kratkih obdobjih visokovodnih konic. Analiziranje vzrokov in posledic erozijskih procesov zahteva hkratno zvezno spremljanje hidroloških spremenljivk. Podatki o količinah sproščenega in premeščenega materiala lahko omogočajo učinko-



Slika 8: Meritve koncentracij suspendiranih snovi in pretokov na vodometri postaji Dvor med ekstremnim dogodkom, ki se je zgodil oktobra 2014

Figure 8: Suspended sediment concentration and discharge measurements on the Dvor gauging station during the October 2014 extreme event.

vito načrtovanje ukrepov za zmanjševanje poplavne in erozijske nevarnosti.

V okviru Državnega prostorskega načrta (DPN) za zagotavljanje poplavne varnosti jugozahodnega dela Ljubljane in naselij v občini Dobrova - Polhov Gradec, ki je bil sprejet 29. avgusta 2013 (Uredba, 2013), so predvideni številni protipoplavni ukrepi, nekateri izmed njih pa se nanašajo tudi na procese erozijsko-sedimentacijskega kroga, in sicer zmanjšanje erozijskega potenciala hudournikov, kot sta na primer Kuzlovec in Mačkov graben, ter povečanje varnosti pred nanosi naplavin in plavja. V okviru DPN so tako predvideni tudi konkretni ukrepi, kot so čiščenje zaplavnih prostorov za hudourniški pregradami, obnova pragov, ureditve struge, sanacija kaštrnih pregrad ter jezov itn. Rezultati, kakršni so predstavljeni v prispevku, prispevajo najpomembnejše vhodne podatke

za dimenzioniranje vodarskih objektov, namenjenih nadzoru in obvladovanju erozijskih procesov v povirnih delih porečja, in za nadzirano zadrževanje premeščenega materiala vzdolž rečnih strug.

Zahvala

Zahvaljujemo se Agenciji RS za okolje za posredovane podatke o pretokih z vodomerne postaje Dvor na reki Gradaščici. Terenske raziskave so potekale v okviru raziskovalnega projekta Evropske unije SedAlp, ki je financiran prek programa Alpine Space in iz raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Za laboratorijsko analizo vzorcev vode se zahvaljujemo Renatu Babiču.

Viri in literatura

1. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), 2009. Povratne dobe ekstremnih padavin po Gumbelovi metodi.
2. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), 2014. Rekordno toplo in izjemno namočeno leto 2014. <http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/033050-leto-2014.pdf> (10. 3. 2015).
3. Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), 2014. Hidrološki podatki. http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php?p_vodotok=Grada%C5%A1%C4%8Dica&p_postaja=5500 (5. 3. 2015).
4. Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., 2013a. Pregled meritev vsebnosti suspendiranega materiala v Sloveniji in primer analize podatkov. *Gradbeni vestnik*, 62(12), 274–280.
5. Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Kogoj, M., Vidmar, A., Sečnik, M., Brilly, M., Mikoš, M., 2013b. Primerjava dveh sosednjih eksperimentalnih hudourniških porečij: Kuzlovec in Mačkov graben. *Acta hydrotechnica*, 26(45), 85–97.
6. Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., 2015a. Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. *Hydrological Sciences Journal* doi:10.1080/02626667.2015.1006230.
7. Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M., 2015b. Ali je visoka voda, ki se pojavi vsaka 4 leta, res 100-letna poplava? V tej številki revije Ujma.
8. Bezak, N., Grigillo, D., Rusjan, S., Šraj, M., Urbančič, T., Kozmus Trajkovski, K., Petrovič, D., Mikoš, M., 2015c. Sediment budget estimation in a small catchment using DEM of difference approach. EGU 2015. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-400-1.pdf>.
9. Brilly, M., Šraj, M., 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 309.
10. Lenzi, M. A., D'Agostino, V., Billi, P., 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon: Part I: Analysis of bedload records, conditions and threshold of bedload entrainment. *Catena*, 36(3), 171–190. doi:10.1016/S0341-8162(99)00016-8.
11. Lenzi, M. A., Marchi, L., 2000. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*, 39(4), 267–282.
12. Mikoš, M., 2012. Kalnost v rekah kot del erozijsko-sedimentacijskega kroga. *Gradbeni vestnik*, 61(6), 129–142.
13. Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M., 2006. Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soca River Valley, Slovenia. *Engineering Geology* 86(2-3), 198–210. doi:10.1016/j.enggeo.2006.02.015.
14. Mikoš, M., Zupanc, V., 2000. Erozijska tal na kmetijskih površinah. *Sodobno kmetijstvo* 33(1), 419–423.
15. Pintar, J., Mikoš, M., 1983. Izdelava smernic in normativov z globalno usmeritvijo urejanja po ekosistemih, pojavnostih in ekološki primernosti ter načinov gospodarjenja s povirji voda. Poročilo VGI, Ljubljana, 133.
16. Rusjan, S., Mikoš, M., 2006. Dinamika premeščanja lebdečih plavin v porečjih. *Acta hydrotechnica*, 24(40), 1–20.
17. Ulaga, F., 2005. Monitoring suspendiranega materiala v slovenskih rekah, *Acta hydrotechnica*, letnik 23, št. 39, 117–127.
18. Ulaga, F., 2006. Transport suspendiranega materiala v slovenskih rekah. *Ujma* 20 (1), 144–150.
19. Uredba, 2013: Uredba o državnem prostorskem načrtu za zagotavljanje poplavne varnosti jugozahodnega dela Ljubljane in naselij v občini Dobrova - Polhov Gradec. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6453> (10. 3. 2015).