

HRVATSKO HIDROLOŠKO DRUŠTVO

u suradnji s

Hrvatskim društvom za odvodnju i navodnjavanje

Hrvatskim društvom za zaštitu voda

Geotehničkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu

Varaždinskom županijom i Gradom Varaždinom

OKRUGLI STOL S MEĐUNARODNIM SUDJELOVANJEM

# NANOS U VODNIM SUSTAVIMA – STANJE I TRENDОВI –



## ZBORNİK RADOVA

Varaždin, 2020.

GEOTEHNIČKI FAKULTET | VARAŽDIN

**OKRUGLI STOL**  
s međunarodnim sudjelovanjem

**NANOS U VODNIM SUSTAVIMA –  
STANJE I TRENDОВI**

**THE ROUND TABLE**  
With International Participation

**SEDIMENT IN WATER SYSTEMS –  
CURRENT STATE AND TRENDS**

---

**ZBORNİK RADOVA  
PROCEEDINGS**

---

Varaždin, 2020.

***Izdavač:***

HRVATSKO HIDROLOŠKO DRUŠTVO  
Ulica grada Vukovara 220, 10000 Zagreb

***Urednici:***

dr.sc. Dijana Oskoruš, dipl.ing.geot.  
dr.sc. Josip Rubinić, dipl.ing.građ.

***Fotografija na naslovnici:***

Zdenko Kereša, Darko Vukadinović

***Priprema:***

Tomislava Bošnjak

***Lektura:***

Tatjana Jauk, prof.

***Tehnički urednik:***

Damir Ljubičić

***Grafička obrada, prijelom i tisak:***

MIODIO d.o.o. Rijeka

***Naklada:***

200 primjeraka

ISBN 978-953-96705-5-7

CIP zapis je dostupan u računalnome katalogu Nacionalne i sveučilišne  
knjižnice u Zagrebu pod brojem 001061718

---

Autori su u potpunosti odgovorni za sve iznijeto u njihovim radovima.  
Izdavač i urednik ovog Zbornika radova, te organizatori Skupa s tim u svezi ne snose  
nikakvu odgovornost.

## **ORGANIZATORI SKUPA:**

Hrvatsko hidrološko društvo

u suradnji s:

Hrvatskim društvom za odvodnju i navodnjavanje

Hrvatskim društvom za zaštitu voda

Geotehničkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu

Varaždinskom županijom i Gradom Varaždinom

## **PROGRAMSKO ORGANIZACIJSKI ODBOR:**

dr.sc. Dijana Oskoruš – Predsjednica

dr.sc. Darko Barbalić

dr.sc. Damir Bekić

dr.sc. Danko Biondić

dr.sc. Ranko Biondić

Alan Cibilić

dr.sc. Ivan Čanjevac

dr.sc. Ivana Grčić

dr.sc. Danko Holjević

dr.sc. Bojana Horvat

mr.sc. Ivana Ivanković

dr.sc. Sanja Kapelj

dr.sc. Barbara Karleuša

Zdenko Kereša

dr.sc. Janja Kramer Stajnko

dr.sc. Hrvoje Meaški

dr.sc. Nevenka Ožanić

dr.sc. Mara Pavelić

dr.sc. Krešimir Pavlić

Maja Radišić

Josip Rubeša

dr.sc. Josip Rubinić

dr.sc. Ajka Šorša

Damir Štuhec

Ivana Šarić

Renata Vidaković Šutić

mr.sc. Mirjana Švonja

Igor Tošić

dr.sc. Elvis Žic

## **RECENZENTI:**

dr.sc. Darko Barbalić

dr.sc. Damir Bekić

dr.sc. Ranko Biondić

dr.sc. Ivan Čanjevac

dr.sc. Danko Holjević

mr.sc. Ivana Ivanković

dr.sc. Sanja Kapelj

dr.sc. Barbara Karleuša

dr.sc. Janja Kramer Stajnko

dr.sc. Dijana Oskoruš

dr.sc. Nevenka Ožanić

dr.sc. Josip Rubinić

Ivana Šarić

dr.sc. Ajka Šorša

Renata Vidaković Šutić

dr.sc. Elvis Žic





OKRUGLI STOL  
**NANOS U VODNIM SUSTAVIMA –  
STANJE I TRENDovi**

THE ROUND TABLE  
**SEDIMENT IN WATER SYSTEMS –  
CURRENT STATE AND TRENDS**

Varaždin, 2020.

---

**ZBORNİK RADOVA  
PROCEEDINGS**

*Urednici / Editors:*  
**dr.sc. Dijana Oskoruš**  
**dr.sc. Josip Rubinić**

Varaždin, 2020.



# SADRŽAJ

## PREDGOVOR

### I. CJELOVITI RADOVI

1. Bruno Barnabas Batki, Enikő Anna Tamás  
**COMPARISON OF SUSPENDED SEDIMENT MEASUREMENT  
 METHODS ON THE MURA RIVER, LETENYE** ..... 15
2. Ivan Čanjevac, Ivan Martinić, Neven Bočić, Nenad Buzjak, Danijel Orešić  
**EROZIJSKO-SEDIMENTACIJSKE PROMJENE NA TEKUĆICAMA U  
 HRVATSKOJ: REZULTATI HIDROMORFOLOŠKOG MONITORINGA  
 2017.-2019.** ..... 27
3. Gorana Ćosić-Flajsig, Barbara Karleuša, Ivan Vučković  
**ANALIZA ZNAČAJA UPRAVLJANJA SEDIMENTOM  
 NA PRIMJERU RIJEKE SUTLE** ..... 37
4. Gordon Gilja, Sandor Baranya, Neven Kuspilić, Zdenko Tadić, Antonija Cikojević,  
 Dražen Brleković, Flora Pomázi  
**PRAĆENJE MORFOLOŠKIH PROMJENA U SVRHU  
 OSIGURANJA PLOVNOSTI NA UŠĆU RIJEKE DRAVE** ..... 49
5. Gordon Gilja, Antonija Cikojević, Kristina Potočki, Matej Varga, Nikola Adžaga  
**ISTRAŽIVAČKI OKVIR PROJEKTA R3PEAT - DALJINSKO  
 PRAĆENJE EROZIJE RIPRAP ZAŠTITE OD PODLOKAVANJA  
 NA VELIKIM RIJEKAMA U STVARNOM VREMENU** ..... 61
6. Goran Jeftić, Albino Gradečak  
**DJELATNOST GEOTEHNIČKOG LABORATORIJA  
 GEOTEHNIČKOG FAKULTETA** ..... 71
7. Vinod Jena, Natalija Matić, Sapana Gupta, Mirko Stanković,  
 Krešimir Maldini, Ivan Tot, Dragan Majić, Stjepan Kordić  
**EKOLOŠKI STATUS SEDIMENATA U RIBNJACIMA  
 NA PODRUČJU RAIPURA U INDIJI** ..... 79
8. Ivan Kajapi, Larsen Čebuhar, Anton Mataija  
**PERIODIČNO POTPUNO PRAŽNENJE HIDROENERGETSKIH  
 AKUMULACIJA – PROBLEMI I ISKUSTVA NA PRIMJERU  
 PRAŽNENJA AKUMULACIJE VALIĆI 2014. GODINE** ..... 87
9. Zdenko Kereša  
**RECENTNI PRONOS VUČENOG NANOSA U STAROJ DRAVI  
 UZ HIDROELEKTRANU VARAŽDIN** ..... 97

---

10.	Nenad Kovačićek, Dijana Oskoruš <b>MONITORING NANOSA U REPUBLICI HRVATSKOJ</b> .....	109
11.	Janja Kramer Stajnko, Renata Jecl, Matjaž Nekrep Perc <b>MEASUREMENT OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE DRAVA RIVER DURING HIGH WATER EVENT</b> .....	119
12.	Tanja Lubura Matković, Renata Vidaković Šutić <b>BILANCA RIJEČNOG NANOSA NA SAVI I DRAVI KAO DIO PROJEKTA DANUBE SEDIMENT</b> .....	129
13.	Matjaž Mikoš, Nejc Bezak <b>PRECIPITATION AND SOIL EROSION - SLOVENIA CASE</b> .....	143
14.	Antonia Mirčeta, Goran Zrinski <b>PRAĆENJE STANJA I SMJERNICE ZA UPRAVLJANJE NANOSOM U AKUMULACIJSKOM JEZERU HE VARAŽDIN</b> .....	155
15.	Dijana Oskoruš <b>STANJE I TREND OVI U MONITORINGU NANOSA</b> .....	165
16.	Nevenka Ožanić, Ivana Sušanč Čule, Barbara Karleuša, Bojana Horvat <b>REVITALIZACIJA VODOTOKA U URBANIM PODRUČJIMA</b> .....	173
17.	Damir Štuhec <b>ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA VUČENOG RIJEČNOG NANOSA</b> .....	185
18.	Lidija Tadić, Marija Leko-Kos, Tamara Brleković <b>PRIMJERI SEDIMENTACIJE KANALA ZA ODVODNJU I NAVODNJVANJE</b> .....	195
19.	Igor Tošić <b>KONTAMINIRAJUĆI ANORGANSKI POTENCIJAL SEDIMENTA RIJEKE DRAVE USLIJED VODNOG VALA 2012. GODINE U VARAŽDINSKOJ ŽUPANIJI</b> .....	207
20.	Alma Tudić <b>MEĐUODNOS POJAVA NANOSA I KAKVOĆE VODE NA POSTAJI BOTOVO NA RIJECI DRAVI</b> .....	219
21.	Elvis Žic, (Nenad Bićanić), Nevenka Ožanić <b>PROCESI POKRETANJA TOKOVA KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG MATERIJALA</b> .....	229
22.	Elvis Žic, (Nenad Bićanić), Tomasz Kozłara <b>PRIMJENA SOLFEC RAČUNALNOG KODA ZA ANALIZU PROPAGACIJE NEVEZANOG STIJSKOG MATERIJALA</b> .....	241

## I. PROŠIRENI SAŽETCI

23. Damir Bekić, Goran Zrinski  
**2D MODEL PRONOSA NANOSA U AKUMULACIJI  
 HIDROELEKTRANE VARAŽDIN** ..... 255
24. Čedomir Benac, Maja Radišić, Josip Rubinić, Igor Ružić  
**PROMJENE RIJEČNIH UŠĆA U ISTRI** ..... 259
25. Zsuzsanna Engi, Johanna Ficsor  
**HYDRAULIC MODELLING - SIMULATION OF THE SILTING UP  
 PROCESS OF THE INUNDATION AREA** ..... 263
26. Danko Holjević, Danko Biondić, Toni Holjević  
**ISTRAŽIVANJA EROZIJSKIH PROCESA UNUTAR VODNIH  
 SUSTAVA NA PODRUČJU ISTRE** ..... 269
27. Vedran Ivezić, Vlatko Kadić  
**HIDROMORFOLOŠKA ANALIZA PERA POLOJ NA RIJECI SAVI** ..... 273
28. Sanja Kapelj, Dragana Dogančić, Jelena Loborec, Saša Zavrtnik  
**PORIJEKLO NANOSA U HIDROGEOLOŠKIM SUSTAVIMA** ..... 277
29. Klaus Michor  
**RIVERBED DEEPENING AND SEDIMENT REGIME: MEASURES  
 FOR BED LOAD MOBILIZATION IN RIVER RESTORATION** ..... 281
30. Kazimir Miculinić, Andrijana Brozinčević  
**NANOS DRVENIH I DRUGIH BILJNIH OSTATAKA U  
 NACIONALNOM PARKU PLITVIČKA JEZERA** ..... 285
31. Kristina Potočki, Neven Kuspilić, Gordon Gilja  
**PREDVIĐANJE PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA U  
 VODOTOCIMA MODELIMA UTEMELJENIM NA PODACIMA** ..... 289
32. Maja Radišić, Bojana Horvat, Maja Oštrić, Josip Rubinić  
**VODNI REŽIM PRONOSA NANOSA U SLIVU PAZINČICE I  
 PODZEMNOM KRŠKOM VODONOSNIKU IZVORA RAKONEK** ..... 293
33. Vedrana Ričković, Renata Vidaković Šutić, Silvija Sitar  
**HIDROLOŠKA I MORFOLOŠKA DINAMIKA DUNAVA I UTJECAJ  
 NA PODRUČJE KOPAČKOG RITA (PROJEKT NATURAVITA)** ..... 297
34. Andrija Rubinić  
**MJERENJE NANOSA U AKUMULACIJSKOM JEZERU BUTONIGA** ..... 303
35. Josip Rubinić, Maja Čuže Denona, Maja Radišić  
**DONOS I SEDIMENTACIJA NANOSA U  
 VRANSKOM JEZERU U DALMACIJI** ..... 307

---

36.	Ivana Šarić, Goran Šafarek <b>VAŽNOST HIDROMORFOLOŠKIH PROCESA ZA ODRŽAVANJE POPULACIJA BREGUNICA I ČIGRI NA RIJECI DRAVI</b> .....	311
37.	Ajka Šorša, Danijel Ivanišević, Lidija Galović, Ana Čaić Janković, Ivan Mišur, Đorđa Medić, Jasmina Antolić, Neven Bujas, Aleksandra Kovačević, Jelena Vićanović <b>PROJECT SIMONA: TRANSNATIONALLY HARMONIZED SEDIMENT SAMPLING AND LABORATORY PROTOCOLS FOR HSS IN DRB'S SURFACE WATERS PROPOSAL</b> .....	315
38.	Florjana Ulaga <b>MONITORING OF SUSPENDED SEDIMENT AND WATER TURBIDITY IN SLOVENIA</b> .....	319
	<b>KAZALO AUTORA</b> .....	325

## PREDGOVOR

Dinamika pronosa i sedimentacije nanosa je vitalna komponenta prirodnog hidromorfološkog režima i sastavnica hidrološkog procesa otjecanja i protjecanja voda. Posebno se to odnosi na procese vezane uz veće površinske vodotoke, međutim procesi pronosa i sedimentacije nanosa odvijaju se i u podzemnim vodonosnicima. Kod većine europskih rijeka prirodni procesi vezani uz dinamiku pronosa i sedimentacije nanosa, poglavito njegov transport riječnim vodnim tokovima, znatno su izmijenjeni uslijed antropogenih utjecaja, ponekad uz dramatične posljedice za stabilnost rijeka i obala kao i uz njih vezane ekosustave.

Zbog različitih inženjerskih zahvata u prirodnom okolišu, od 1970.-tih godina na ovamo, u svijetu se razvija sve veći interes za znanstvene discipline koje se bave fenomenom transporta riječnog nanosa. U Hrvatskoj postoji relativno duga tradicija praćenja nanosa, uglavnom njegovih koncentracija i pronosa na većim rijekama, ali su ipak takva praćenja na neki način bila u drugom planu u usporedbi s ostalim hidrološkim parametrima. Glavni uzrok tome su skupe i relativno složene tradicionalne metode mjerenja te nedovoljni kapaciteti pojedinih institucija u proširenju hidrološkog monitoringa, ali i okolnost da je tek prihvaćanjem europskog vodnog zakonodavstva riječna morfologija dobila puno mjesto pri planiranjima i upravljanjima vodnim područjima.

Okvirna direktiva o vodama (OVD) zahtijeva obnovu dobrog hidromorfološkog statusa, a ulaskom Hrvatske u EU opseg praćenja stanja voda značajno je proširen te se planovi upravljanja vodnim područjima noveliraju svakih šest godina. Zbog toga se sve aktivnije prate i analiziraju parametri vodnog režima vezani uz nanos koji time postaje punopravna sastavnica svih ostalih hidroloških praćenja vodnog režima. Spoznaja o količini i kakvoći nanosa je ključno pitanje za razumijevanje ponašanja vodnih sustava u cjelini, budući da nema vodnog sustava koji nije manje ili više opterećen nanosom ispranim sa slivne površine. Iz tog razloga praktički nema inženjerskog zadatka u kojem se ne pojavljuje i problem nanosa.

U skladu sa zakonskom regulativom i sve većim potrebama za praćenje režima nanosa na prirodnim vodotocima ili izgrađenim hidrotehničkim sustavima, Hrvatska i druge zemlje stoje pred izazovom modernizacije ili proširenja hidrološke mreže postaja za monitoring nanosa.

Primjenom novih uređaja i metoda u hidrometriji povećale su se mogućnosti razvoja novih metoda mjerenja koje bi osigurale kvalitetne podloge za praćenje i modeliranje pronosa nanosa. Prekogranična suradnja na razmjeni iskustava u području mjere-



nja i obrade podataka od velike je važnosti s obzirom na velike rijeke koje okružuju Hrvatsku i međunarodni karakter njihovih slivova.

Cilj ovog Okruglog stola je razmjena informacija vezano za trenutno stanje u praćenju režima nanosa te razmatranje aktualnih trendova, novih znanja i primjera dobre prakse kao i novih mogućnosti u području praćenja kvalitete i kvantitete nanosa za potrebe različitih korisnika.

Dio razmatranih tema odnosi se i na prisutnost suspendiranog nanosa/mutnoća u krškim vodonosnicima te utjecaj nanosa na kakvoću voda i ekosustava vezanih uz riječnu morfologiju. Zbornik sadrži ukupno dvadeset i dva cjelovita rada, te šesnaest proširenih sažetaka.

Okrugli stol je zamišljen kao prilika za proširenje suradnje između hidrologa, znanstvenih i stručnih institucija u Hrvatskoj i susjednim zemljama. Organizator je Hrvatsko hidrološko društvo, pri čemu je bila osigurana suradnja s još dvije strukovne udruge: Hrvatskim društvom za odvodnju i navodnjavanje te Hrvatskim društvom za zaštitu voda s kojima Hrvatsko hidrološko društvo ima tradicionalno dobru suradnju u organizaciji zajedničkih skupova. Kako se skup održava u prekrasnom baroknom gradu Varaždinu, na njegovoj pripremi sudjelovali su Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Varaždinska županija i Grad Varaždin. Uz njih, velik udio u osiguranju održavanja skupa dale su i institucije koje poglavito skrbe o monitoringu voda kao i samim vodama na području Hrvatske: Državni hidrometeorološki zavod te Hrvatske vode. Svima njima, kao i samim članovima HHD-a te našim gostima iz inozemstva, Hrvatsko hidrološko društvo duuguje veliku zahvalnost jer su našli snage i načina da i u ovim trenutno teškim vremenima uvjetovanim pandemijom Covid-19, zbog kojih je samo održavanje Okruglog stola „Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi“ prolongirano, učine sve da se skup održi te da se teme obrađene u danom zborniku prodiskutiraju i približe onima kojima su i namijenjene – zainteresiranoj stručnoj i znanstvenoj javnosti.

Urednici Zbornika:  
*dr.sc. Dijana Oskoruš*  
*dr.sc. Josip Rubinić*

**I.**

**CJELOVITI  
RADOVI**



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**USPOREDBA METODA MJERENJA  
SUSPENDIRANOG NANOSA NA RIJECI MURI U  
MJESTU LETENYE**

**COMPARISON OF SUSPENDED SEDIMENT  
MEASUREMENT METHODS ON THE MURA  
RIVER, LETENYE**

**Bruno Barnabás Batki <sup>a</sup>, Enikő Anna Tamás <sup>b</sup>**

**SAŽETAK**

Studija se bavi pronosom suspendiranog nanosa i različitim metodama njegova mjerenja, prikazano na slučaju rijeke Mure u mjestu Letenye.

Kad govorimo o mjerenjima riječnog nanosa, potrebno je pojasniti da je mjerenje složen proces, naročito u ovom slučaju. I uzimanje i analiziranje uzoraka vode čini čitav proces mjerenja. Na temelju toga, studija je podijeljena u dva glavna dijela: uzorkovanje i analiza.

Prvi dio sadrži usporedbu dviju metoda uzorkovanja koje su provele dvije različite institucije, DHMZ i NYUDUVIZIG. Koristi se do 8 godina podataka kako bi se dokazala razlika između površinskog uzorkovanja i uzorkovanja pomoću pumpe. Unatoč različitim metodama, rezultati pokazuju određenu ujednačenost. Studija istražuje različite slučajeve sličnosti i razlika, što će nam pomoći pri donošenju prikladnih zaključaka i pripremi za svaku situaciju.

---

<sup>a</sup> West-Transdanubian Water Directorate, Vörösmarty u. 2, Szombathely, 9700, Hungary,  
batki.bruno@nyuduvizig.hu

<sup>b</sup> National University of Public Service; Faculty Of Water Sciences, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14, Baja, 6500, Hungary,  
tamas.eniko.anna@uni-nke.hu

Drugi se dio tiče analize uzoraka u svrhu određivanja koncentracije i granulometrijskog sastava. NYUDUVIZIG je analizirao uzorke u laboratorijima pomoću metode taloženja i sušenja, što je najraširenija praksa analiziranja uzoraka. No prije toga, analizirali su uzorke pomoću novog instrumenta (LISST Portable XR) koji radi na načelu laserske difrakcije. Na kraju, laboratorijski rezultati i rezultati dobiveni LISST-om su uspoređeni i premda nisu bili jednaki, razlike su pokazale pravilnost.

## ABSTRACT

The study deals with suspended sediment transport and the different methods of its measurement, in the case of the Mura River at Letenye.

When we talk about river sediment measurements, it is necessary to clarify that measuring is a complex process, especially in this case. Both taking and analyzing samples of water constitute the entire measurement process. Based on this, the study is divided into two main parts of sampling and analysis.

The first part contains a comparison of two sampling methods carried out by different institutions, DHMZ and NYUDUVIZIG. It uses up to 8 years of data to demonstrate the difference between surface and pump sample-taking. Despite the dissimilar methods, the results show some uniformity. The study investigates various cases of similarities and differences, which will help us to get adequate conclusions and be prepared for each situation.

The other part is about sample analysis for concentration and particle size distribution. NYUDUVIZIG analyzed the samples in laboratories with a settling-drying method, which is the most widespread practice of sample analysis. But before that, they analyzed the samples with a new instrument (called LISST Portable XR) based on laser-diffraction principles. Consequently, the laboratory and LISST results were compared and though they were never the same, the differences showed regularity.

*KLJUČNE RIJEČI: suspendirani nanos, granulometrijski sastav, analiza uzoraka, laserska difrakcija*

*KEYWORDS : suspended sediment, particle size distribution, sample analysis, laser diffraction*

## 1. INTRODUCTION

This study is about suspended sediment transport and the different methods of its measurement, in the case of the Mura River at Letenye. It is not easy to describe clearly the various types of actions that belong to suspended sediment measuring but two are definite: sample-taking and analyzing. Based on this, the study is divided into two main parts of sampling and analysis.

The Mura River is measured by two institutes on its lower section, DHMZ (HRV) and

NYUDUVIZIG (HUN). Both countries' hydrological teams made measurements for discharge and suspended sediment. The dates are pre-arranged, so there are at least 10 joint measurements in a year. Both teams used an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) for discharge measuring, but the tools and methods for taking water samples were different, just like the cross-sections, since the Hungarian team took the samples from the surface just after the bridge, while the Croatian team took samples from different depths in an upper cross-section (approximately 200 meters) (Figure 1).

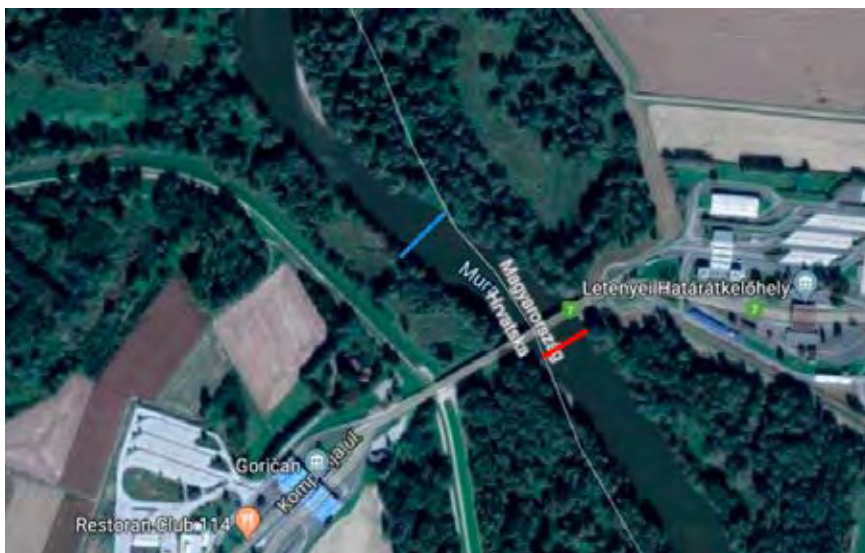


Figure 1. Cross-sections of the teams (red-Hungary, blue-Croatia) Google maps (Batki, 2019)

Sample analysis was different, too. While DHMZ used filter papers to define the weight of solid particles in the water, NYUDUVIZIG performed a settling-drying analysis, which is the general type of sediment analysis in Hungary. However, there are pursuits to renew or change the analysis method in Hungary, to make the process faster and more accurate.

For this reason, the Hungarian Water Directorates acquired a new instrument called LISST Portable XR. The instrument's operation is based on laser diffraction principles. It provides very fast analysis for the user (approximately 5-15 minutes for each sample) and it does not need more than 117 ml of water to give concentration and size distribution results. Although it promised a great future, there was no experience for its usage in Hungary. Therefore the NYUDUVIZIG's Hydrological Department operated with the instrument in a test run for half a year. This means that the samples were analyzed both with the usual settling-drying method and with the new instrument, and the results were compared. More than 25 measurements were made, giving 95 usable sample results for calibration.

## 2. RESULTS AND DISCUSSION

### 2.1. Comparison of Croatian and Hungarian suspended sediment results

As the text has mentioned above, the two institutes (HRV and HUN) made pre-arranged joint measurements in Letenye. In this part the Hungarian and the Croatian concentration and suspended sediment discharge results will be shown and compared. The data was available for the period between 2010 and 2017, meaning 2x36 comparable results. This comparison was necessary in order to find out the amount of mismatch due to different methods and cross-sections.

It is clearly seen in Figure 2 that the mean concentration results show quite good uniformity in the long term. Almost the same can be said about suspended sediment discharge, although the Croatian values were roughly 1.2 times higher than the Hungarian ones.

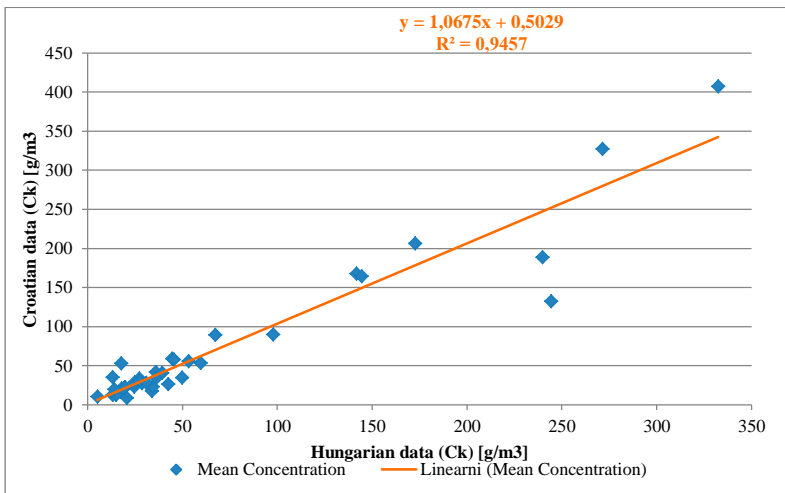


Figure 2. Comparison of mean concentration results (2010-2017) (Batki, 2019)

Since some big differences occurred, additional inquiries were needed to find out where they were mostly taking place. Figure 3 shows the differences between the suspended sediment discharge results (in kg/s). Essentially, there were not so many significant differences until 200-250 m<sup>3</sup>/s and the direction of them was random, too. But after about 250 m<sup>3</sup>/s the differences remained negative and gradually increased. One case can be seen where the Hungarian team measured 45 kg/s less, and also approximately 20 kg/s less in two instances.

Overall, the following statements can be said about the two datasets:

- there were 2x36 comparable results and big differences occurred only in 9 cases;
- the Croatian results were higher in 23 cases, lower in 13 cases and equivalent in approximately 11 cases;

- the correlation between the two datasets was strong (both in concentration and sediment discharge);
- concentration and sediment load did not have a characteristic direction at low and average discharge levels;
- Hungarian results showed big negative differences at high discharge.

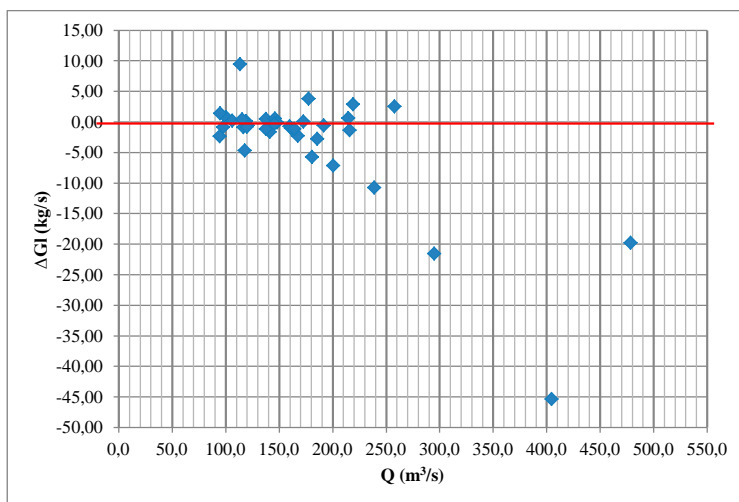


Figure 3. Amount of differences between suspended sediment discharge results (2010-2017) (Batki, 2019)

Based on the above, surface sampling is not considered to be bad, at least in this case. Basically, samples from the surface can't be acceptable for the whole calculation of the cross-section. Theoretically, the lowest suspended sediment concentration would be near the water surface and the highest by the river bed. That is why the widespread method is the depth-sampling, but this time there was data from both two sampling methods and the sediment results were similar at the low and the average discharge. Probably due to the high turbulence caused by the bridge columns, the high vertical energy is able to bring the particles to the surface. However, the Hungarian results were much lower at high discharge. In these cases the horizontal river bed erosion was bigger than the vertical flow caused by the turbulence, thus particles cannot blend to the surface, showing the main reason for lower Hungarian results. Overall, surface sampling can be acceptable, but only in this after-bridge cross-section and at low and average discharge. In the future, NYUDUVIZIG will have to change the method for depth-sampling, but for this, they will need to change the cross-section too. Unfortunately, the technical conditions are not given yet.



## 2.2. Presentation of LISST results and calibration data

As the text mentioned above, a test for the LISST Portable XR instrument was made by NYUDUVIZIG. The process was the following:

1. Sampling (from the surface) from 5 points, 10 liters from each point
2. Sample-analysis with the LISST instrument
3. Sample-analysis in laboratory

LISST's analysis method is based on laser diffraction principles (Figures 4 and 5).

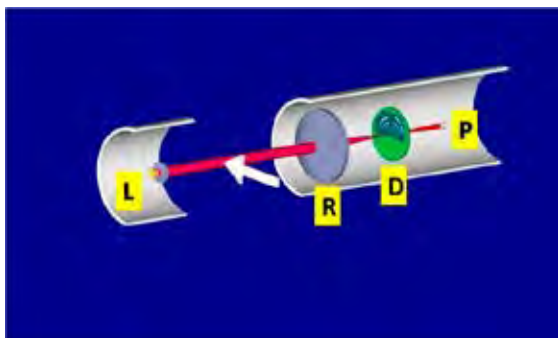


Figure 4. Basic part of laser diffraction function in LISST instrument (Sequoia, 2017)

The theoretical functioning is the following: “A laser (L) is collimated. Particles in water (at arrow) scatter light. A receiving lens (R) collects the scattered light. Behind the lens, at its focal plane is placed a special detector array (D). This array consists of 32 rings of silicon. Each ring detects scattering into a very specific small range of angles. These are the primary measurements constituting the data. Behind the ring detector is placed a photodiode (P). A hole in the center of the ring detector (D) allows the tightly focused laser beam to pass through. The photodiode P senses the power in this beam. A reduction in this power due to particles constitutes a measure of attenuation. This attenuation is used only to de-attenuate the light on rings. Following this de-attenuation, and after then subtracting a background (i.e. light on rings with filtered water), an inversion procedure produces the 32-element PSD” (Sequoia, 2017). Our instrument had 44 detector rings, therefore it divided the particle size distribution (PSD) in 44 categories.

First, it is necessary to have distilled or deionized water to make a good background measurement. The adequate background measurement is the basic step, because the instrument compares the light-scattering in “mud” water to the light-scattering in particle-free water, and if the background measurement fails, the concentration and particle size distribution results will be fake. Sometimes the background measurement fails, mostly because of bubbles in water or dirty detectors. If the background measurement was made properly, the water sample can be filled into the instrument's chamber. The instrument has two functions for dispersing the particles in the water sample, a mixer, and an ultrasonic probe. The operator can set

both functions' power from 0 % to 150 %. It is recommended to use both functions along with the measurements, otherwise, the particles will settle down and not be measured. The measuring process will finish in 2-4 minutes (depending on settings) and a result screen will be shown up. There will be the volume concentration (ul/l) the mass concentration (mg/l) (the latter is from volume conc. multiplied with effective density which was set to 2.65 g/cm<sup>3</sup>), different "D" values (like D10, D50, etc.) and the mean size of particles will be displayed. The volume concentration and the cumulative distribution will also be visible.



Figure 5. The LISST Portable XR Instrument (Sequoia, 2017)

There were 95 usable results for calibration from 25 measured samples. The (mass) concentration results are visible on the diagram (Figure 6).

At first sight, it could be said that the results almost never matched, however, the  $R^2$  values are acceptable. The LISST instrument always gave higher values except in one case. There are 5 different trend lines on the diagram, 3 of them connect to a different setting mode of the instrument. The LISST uses two optical models: Fraunhofer and Mie scattering. The Fraunhofer is a general mode and it is recommended to use this when you do not know the most common mineral in the sample (e.g. quartz or calcite). If you do know that however, it is way better to use the Mie model. Since the results with the Fraunhofer model showed significant deviation, the usage of this general mode had been left out. In the interest of knowing the most common minerals in the Mura sediment, one water sample had been sent to the Mining and Geological Survey of Hungary for mineralogy research.

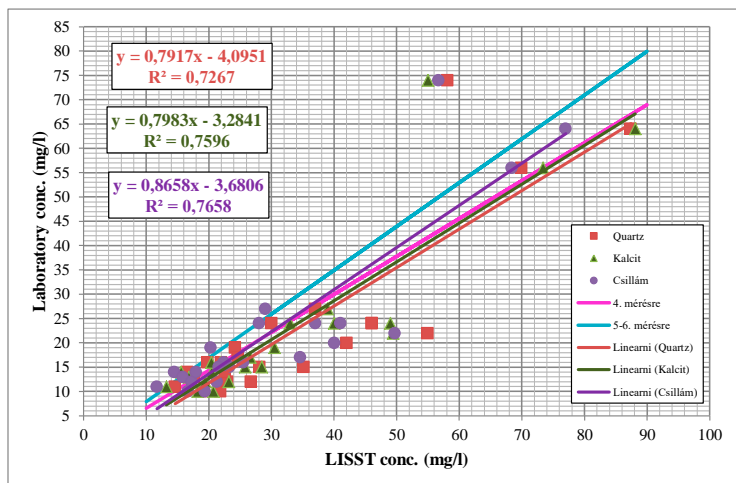


Figure 6. Concentration results (LISST-Laboratory)

The result of this research was the following: **23 % Quartz, 20 % Calcite, 16 % Mixed Aluminium Silicate**. Other minerals were on low percentage points. Based on this research, there were 3 Mie models used for measurements: Quartz (red square and red line on Figure 6), Calcite (green triangle and green line) and Mixed Aluminium Silicate (purple points and purple line) modes. Each linear trend line corresponds to one group of results measured with a specified model. It can be seen in Figure 6 that there were no significant differences in the LISST concentration results between the different models. Therefore, it seemed irrelevant which mineral was chosen in the Mie model. However, something very interesting was discovered during the analysis.

Measurements on a sample were the following: After a good background measurement, 117 ml water sample was filled into the instrument's chamber, and a measurement was done on it with a specific mode (e.g. quartz or calcite). After that, the water was not drained out, but rather, a new measurement was made on it with the other mode. While measuring the same sample multiple times with different modes, a gradual decrease was discovered in the concentration and particle size results. This means that the first measurement's results had the highest values and the second measurement's values were lower and so on. There are 4 examples in Figure 5, where the horizontal axis shows the number of the measurement. According to the experiment, this decrease in the concentration and particle size results ended by the 5<sup>th</sup> or 6<sup>th</sup> measurement, and after that, the results stayed constant.

Aware of this phenomenon, two other correlations were made. One included the concentration results only from the 4<sup>th</sup> measurement (regardless of the mode settings), and the other included only the 5<sup>th</sup>-6<sup>th</sup> measurement results. These are the pink (4<sup>th</sup>) and the light-blue (5<sup>th</sup>-6<sup>th</sup>) lines in Figure 4. These correlations showed better  $R^2$  values (0.78 for 4<sup>th</sup> and 0.85 for 5<sup>th</sup>-6<sup>th</sup>).

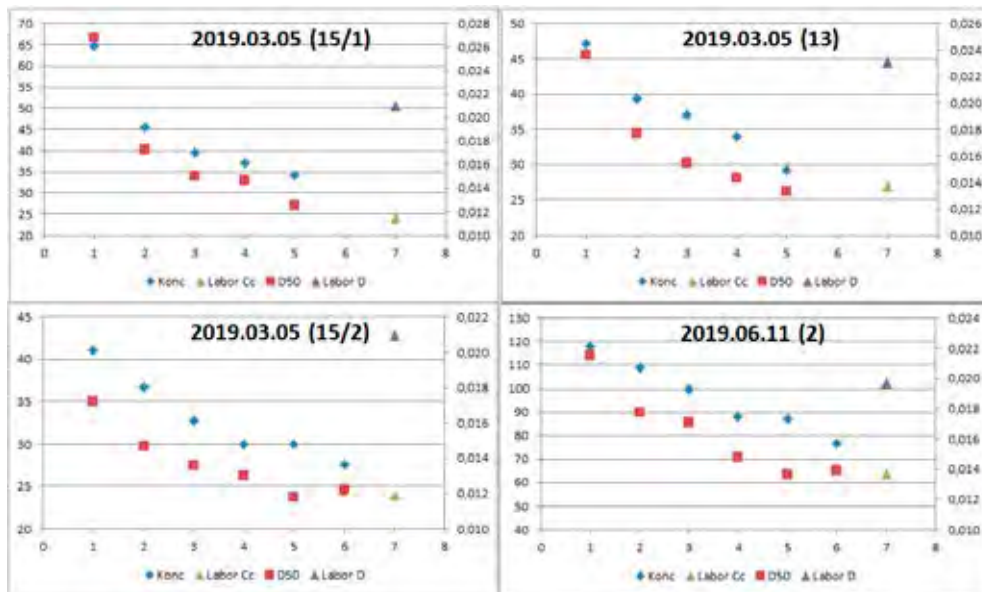


Figure 7. Decrease in concentration and D50 results

There might be three main reasons for this progressive decrease in the results. As mentioned above, an ultrasonic probe is integrated in the instrument. Its function (just like the mixer pump's) is to provide the adequate blending of all the particles in the sample (so that the laser analysis will be more appropriate). The first possible reason was that the ultrasonic made bubbles in the water. These bubbles had a very bad impact on the PSD, as the device perceived them as particles. These micro-bubbles may have disappeared by the continuous mixing. The second, more reasonable answer could be the organic material in the water. As we are dealing with natural water, the samples could contain small organisms which had an impact on the PSD for the first few measurements, but after that, they had disappeared thanks to ultrasonic. The third most obvious answer to this was the decomposition of the flocculated particles. The particles in the water sample often stick together especially when the samples were stored in cans for days. The ultrasonic could disperse these stuck particles, but probably not for the first or second measurement. All these three reasons could affect particle size distribution. (Csiti et al., 2016).

The phenomenon can be seen in Figure 8 too. There are six lines on the graph, each corresponding to one sample's measurement, but with different modes. The black line is from the laboratory, while others are from the LISST. It is a very typical diagram, where the continuous purple line is the first measurement on the sample and the dashed purple line is the 5<sup>th</sup>. Both were made with the Mie's Mixed Aluminium Silicate mode, but the difference between them is obvious. The fifth measurement with the same mode showed a higher proportion of small particles than the first one.

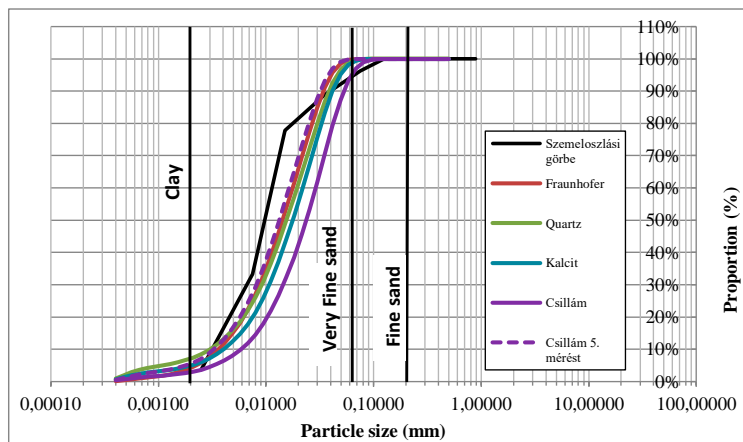


Figure 8. Cumulative Particle Size Distribution (PSD) of 2019.03.05 \_ Sample #13 (Batki, 2019)

### 3. CONCLUSION

In conclusion, the Hungarian and Croatian results showed relatively good similarity in the long term, even though there were some insignificant differences due to different cross-sections, sampling, and analysis methods. The differences were acceptable at low and average discharge, but at high flow, the Hungarian results were considerably lower. Based on this, the surface sampling can be used, but only after the bridge, where the turbulence provides adequate blending, and only until about 250 m<sup>3</sup>/s discharge. In the future, NYUDUVIZIG will have to switch to depth sampling and will require a new cross-section where the flow is more permanent.

The analysis is a more complex question. First, the settling-drying equipment is obsolete and the method is complicated and time-consuming. LISST is a good opportunity to tackle this, but as we saw above, the operation of this device was uncertain. Nevertheless, it can be used by a careful user who is aware of some really important properties of this device. First, the user has to know the minerals in the sample. Second problem is the decline in the results. The user must measure the same water sample several times, at least until the decrease stops. Third, the user needs to consider that the LISST gives higher results, so the calibration correlations should be used. Of course, these correlations need to be completed with samples from higher flows. With conscious use, the LISST Portable XR would be very useful, as it is quick, small and cheaper than other laboratory methods.

In the end, there is a bar chart that shows the sediment discharge results, computed with LISST concentrations (Figure 9). The higher charts show the sediment discharge without using the calibrating correlations, and the lower ones are with their use. The laboratory result can be found there too, which is 961 g/s. It is visible that sediment discharges computed with the LISST concentration are quite near to the laboratory result, in case of usage of the calibration lines.

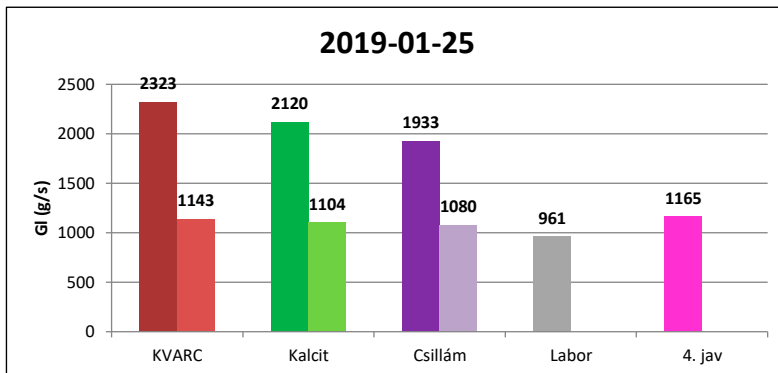


Figure 9. Sediment discharge results from LISST and laboratory, with and without calibration

## LITERATURE

- [1] Batki, B. (2019): *Lebegtetett Hordalékmérési eljárások összehasonlítása a Mura Folyó Letenyi szelvényében*, National University of Public Service – Faculty of Water Sciences.
- [2] Csiti, B., Baranya, S., Tihamér, T. (2016): *Investigation of direct and indirect suspended sediment measuring methods*, Budapest University of Technology and Economics, Budapest.
- [3] <http://www.sequoiasci.com/article/laser-diffraction-principles/>, (downloaded: 2020.02.05).



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**EROZIJSKO–SEDIMENTACIJSKE PROMJENE  
NA TEKUĆICAMA U HRVATSKOJ: REZULTATI  
HIDROMORFOLOŠKOG MONITORINGA  
2017.–2019.**

**EROSION–SEDIMENTATION CHANGES  
IN CROATIAN STREAMS: RESULTS OF  
HYDROMORPHOLOGICAL MONITORING  
2017–2019**

**Ivan Čanjevac<sup>a</sup>, Ivan Martinić<sup>a</sup>, Neven Bočić<sup>a</sup>,  
Nenad Buzjak<sup>a</sup>, Danijel Orešić<sup>a</sup>**

**SAŽETAK**

U radu se kroz prikaz i analizu dijela ocjena hidromorfološkog monitoringa raspravlja o najčešćim zabilježenim promjenama erozijsko-sedimentacijskih procesa koje su posljedica ljudskih aktivnosti na tekućicama u Hrvatskoj. Prikazan je i relativan utjecaj tih ocjena na ukupnu hidromorfološku ocjenu vodnog tijela. Naglašena je važnost erozijsko-sedimentacijskih procesa za riječni ekosustav te istaknuta potreba boljeg poznavanja te održivog upravljanja količinom i dinamikom riječnog sedimenta.

**ABSTRACT**

The paper discusses the most common changes in erosion-sedimentation processes resulting from human activities on streams in Croatia as observed and measured on

---

<sup>a</sup> Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Geografski odsjek, Marulićev trg 19/II, Zagreb, 10000, Hrvatska, canjevac@geog.pmf.hr, imartini@geog.pmf.hr, nbocic@geog.pmf.hr, nbuzjak@geog.pmf.hr, doresic@geog.pmf.hr



the field within the activities of the project on hydromorphological monitoring assessment in Croatia. The relative impact of these estimates on the overall hydromorphological assessment of the water body is also shown. The importance of erosion-sedimentation processes for the river ecosystem was emphasized together with the need for better knowledge and sustainable management of the volume and dynamics of river sediment.

*KLJUČNE RIJEČI: hidromorfologija, fluvijalna erozija, sedimentacija, geomorfologija, hidrologija*

*KEYWORDS: hydromorphology, fluvial erosion, sedimentation, geomorphology, hydrology*

## 1. UVOD

U razdoblju od 2017. do 2019. godine provedeno je nekoliko projekata hidromorfološkog monitoringa tekućica u Hrvatskoj. Hidromorfologija obuhvaća fizička obilježja oblika, granica i sadržaja vodnog tijela (ODV, 2000), odnosno hidrološka i geomorfološka obilježja vodnog tijela. Monitoringom se ocjenjuje hidromorfološko stanje vodnog tijela u odnosu na referentno stanje. Ocjena hidromorfološkog stanja vodnog tijela podržavajući je element u konačnoj ocjeni ekološkog stanja voda (ODV, 2000), a dobro hidromorfološko stanje vodnog tijela ujedno je i preduvjet za dobro ekološko stanje.

Monitoring je proveden prema prilagođenoj metodologiji u skladu s normom EN 15843:2010 EU (EN, 2010), Vodičem za razvoj kapaciteta za hidromorfološki monitoring i mjere u Hrvatskoj (Hrvatske vode, 2013) te Metodologijom za monitoring i ocjenjivanje hidromorfoloških pokazatelja (Hrvatske vode, 2016). Elementi koji utječu na hidromorfološko stanje tekućica definirani su Okvirnom direktivom o vodama (ODV, 2000), a dijele se u tri kategorije: hidrološki režim, uzdužna povezanost i morfološka obilježja. Ocjene za svaki pojedini element unutar tri nabrojane kategorije mogu biti kvalitativne ili kvantitativne. Ako se radi o kvalitativnoj ocjeni, ona može biti 1, 3 ili 5 dok u kvantitativnoj ocjeni, ona može biti u rasponu 1-5. U obje kategorije ocjena 1 odražava prirodno ili gotovo prirodno (dakle, najbolje stanje), dok ocjena 5 odražava izrazito izmijenjeno stanje, odnosno maksimalno odstupanje od prirodnog/referentnog stanja. Ukupna hidromorfološka ocjena stanja vodnog tijela daje se prema sve tri kategorije koje su aritmetička sredina svih pokazatelja unutar kategorije. Zaključno se može dati i prosječna ocjena na temelju aritmetičke sredine svih pokazatelja ili se može prilikom ocjenjivanja uzeti najslabija ocjena od tri kategorije.

Ocjene hidromorfoloških elemenata i vodnih tijela davane su nakon terenskih istraživanja i detaljne kabinetske analize. Sukladno rasponu ocjena za pojedine hidromorfološke pokazatelje, ukupna hidromorfološka ocjena za vodno tijelo kreće se od minimalnih 1 do maksimalnih 5. Ovisno o ukupnoj ocjeni, vodnom tijelu se određuje

hidromorfološko stanje koje može biti: gotovo prirodno, neznatno izmijenjeno, umjereno izmijenjeno, u velikoj mjeri izmijenjeno i izrazito izmijenjeno (Tablica 1).

Tablica 1. Kategorije ukupnog hidromorfološkog stanja za vodna tijela (Hrvatske vode, 2013)

Ocjena	Hidromorfološko stanje
1 do < 1,5	Gotovo prirodno
1,5 do < 2,5	Neznatno izmijenjeno
2,5 do < 3,5	Umjereno izmijenjeno
3,5 do < 4,5	U velikoj mjeri izmijenjeno
4,5 do 5	Izrazito izmijenjeno

Vrlo bitna hidromorfološka obilježja vodnih tijela su obilježja sedimenta i erozijsko-sedimentacijskih procesa unutar samih vodnih tijela. Sediment i fluvijalni geomorfološki oblici vrlo su važan segment u funkcioniranju ekosustava (Newson i Large, 2006; Hauer i drugi, 2018). Antropogeno remećenje ravnoteže erozijsko-sedimentacijskih procesa ima negativno djelovanje na ekosustave, bilo da je riječ o povećanju ili smanjenju količine sedimenta (Hauer i drugi, 2018).

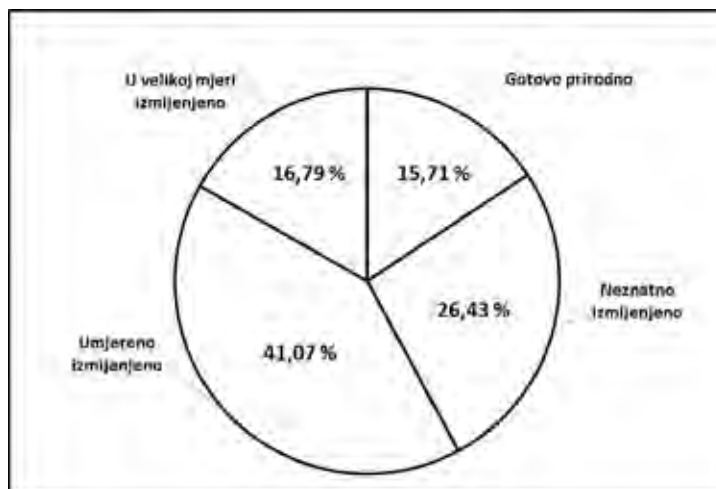
Prirodnost sedimenta i erozijsko-sedimentacijskih procesa ocjenjivani su kroz nekoliko hidromorfoloških elemenata, a najviše kroz ocjenu elementa *obilježja erozije i taloženja na vodnom tijelu*. Zbog složenosti procesa u ovoj fazi nije moguće provesti kvantitativno ocjenjivanje ovog kompleksnog elementa, pa se stoga stanje određuje kvalitativno (moguća je ocjena 1, 3 ili 5). Ocjenjivanje zahtjeva vrlo dobro poznavanje geomorfoloških procesa fluvijalne erozije i sedimentacije (geoindikatori) u kombinaciji s poznavanjem i prepoznavanjem općenitog hidromorfološkog stanja širom sljevnog područja vodnog tijela. Prepoznavanje nedostatka pojedinih geomorfoloških oblika ili uočavanje njihove prisutnosti na mjestima gdje ih u referentnom stanju ne bi trebalo biti te u kojoj mjeri je prisutno odstupanje, temeljne su vještine prilikom ocjenjivanja ovog elementa.

Tijekom provođenja prikazanih istraživanja terenski i kabinetski je obrađeno i ocijenjeno ukupno 280 vodnih tijela na teritoriju Republike Hrvatske. Vodna tijela, kao i lokacije i dionice za njihovo ocjenjivanje unaprijed su određena od strane Hrvatskih voda.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati prvih hidromorfoloških monitoringa pokazali su kako je od 280 ocijenjenih vodnih tijela njih 44 (15,71 %) u gotovo prirodnom (vrlo dobrom) hidromorfološkom stanju, a 74 (26,43 %) vodna tijela u neznatno izmijenjenom (dobrom) stanju. To znači da samo 42,14 % vodnih tijela zadovoljava ciljeve Okvirne direktive o vodama (ODV,

2000) koja zahtjeva postizanje najmanje dobrog stanja za sva vodna tijela (Hrvatske vode, 2013). Najviše, čak 115 (41,07 %) vodnih tijela je u umjereno izmijenjenom stanju, dok ih je 47 (16,79 %) u velikoj mjeri izmijenjeno (Slika 1).



Slika 1. Hidromorfološko stanje dosad istraženih vodnih tijela u Hrvatskoj

Ocjene elementa *obilježja erozije i taloženja na vodnom tijelu* za razliku od ukupne hidromorfološke ocjene imaju samo 3 kategorije, budući da se radi o kvalitativnoj ocjeni. Ocjenu 1, prema kojoj elementi erozije i taloženja odražavaju gotovo prirodno stanje, dobilo je 57 (20,28 %) vodnih tijela. Ocjenu 3, prema kojoj su prisutna umjerena odstupanja od prirodnog stanja u elementima erozije i taloženja, dobilo je 138 (49,11 %) vodnih tijela. Ocjenu 5, koja odražava veliko odstupanje od prirodnih elemenata erozije i taloženja, dobilo je 84 (29,89 %) vodnih tijela, a na jednom vodnom tijelu se ocjena nije mogla primijeniti (Slika 2).

Unatoč različitom broju kategorija ocjena između ocjene ukupnog hidromorfološkog stanja i ocjene za element *obilježja erozije i taloženja na vodnom tijelu*, provedena je analiza korelacije tih dviju ocjena. Izračunat je koeficijent korelacije u *MS Excelu*, preko funkcije *CORREL*, po principu da se za svaku točku uspoređivala ukupna ocjena hidromorfološkog stanja i pojedinačna ocjena za element *obilježja erozije i taloženja na vodnom tijelu*. Koeficijent korelacije iznosi 0,82 što predstavlja relativno snažnu korelaciju između ukupne ocjene hidromorfološkog stanja i ocjene za ovaj hidromorfološki element. Usporedimo li to s rezultatima korelacije ocjene ostalih elemenata s ukupnom ocjenom, jaču korelaciju (0,84) ima samo jedan element, a to je *mogućnost lateralnog kretanja korita*, koji se ocjenjuje kvantitativno što daje preduvjete za bolju korelaciju, u odnosu na kvalitativne ocjene.



Slika 2. Ocjene obilježja erozije i taloženja dosad istraženih vodnih tijela u Hrvatskoj

Sva vodna tijela čija su obilježja erozije i taloženja ocijenjena ocjenom 1 spadaju u prvu ili drugu kategoriju hidromorfološkog stanja (gotovo prirodno i neznatno izmijenjeno stanje). Od vodnih tijela čija su obilježja erozije i taloženja ocijenjena ocjenom 3, njih 93 % spada u drugu ili treću kategoriju ukupnog hidromorfološkog stanja (neznatno izmijenjeno i umjereno izmijenjeno stanje). Od vodnih tijela čija su obilježja erozije i taloženja ocijenjena ocjenom 5, njih 98 % spada u treću ili četvrtu kategoriju ukupnog hidromorfološkog stanja (umjereno izmijenjeno i u velikoj mjeri izmijenjeno stanje). Može se zaključiti kako obilježja erozijsko-sedimentacijskih procesa mogu biti dobar indikator ukupnog hidromorfološkog stanja vodnog tijela. Razlog tome je što su upravo ti procesi vrlo osjetljivi na promjene većine ostalih hidromorfoloških elemenata (Hauer i drugi, 2018). Promjene u hidrologiji i obliku korita, utvrđivanje obala, promjene strukture vodene i riparijske vegetacije te ostalih elemenata direktno utječu na procese taloženja i pronosa sedimenta, njegovu strukturu te na intenzitet bočne i dubinske erozije.

Procesi erozije i sedimentacije bitni su jer su jedni od ključnih faktora formiranja staništa u tekućicama i uz njih te su također vrlo značajni za dinamiku promjene tih staništa (Newson i Large, 2006; Hauer i drugi, 2018). Antropogeni utjecaji, mijenjajući hidrologiju i morfologiju vodnih tijela, mijenjaju i procese erozije i procese sedimentacije (Šafarek, 2012; Hauer i drugi, 2018; Tandarić i drugi, 2018). Time se mijenjaju staništa na tim vodnim tijelima i ugrožava opstanak postojećih ekosustava, a posljedično tome i dobro ekološko stanje voda (Europska komisija, 2016; Hauer i drugi, 2018; Vučković i drugi, 2018). Izravnavanje tlocrtnog oblika vodnih tijela, utvrđivanje obala i korita te uklanjanje vodene i riparijske vegetacije i dalje su vrlo prisutni procesi u upravljanju vodnim tijelima u Hrvatskoj. Navedenim radnjama se smanjuje raznolikost fluvijalnih oblika odnosno raznolikost elemenata staništa.

Na gotovo 80 % dosad istraženih vodnih tijela narušena je prirodnost tih procesa (Slika 2).

Izravnavanje uzdužnog profila i utvrđivanje tekućica ubrzava otjecanje vode, čime se smanjuje taloženje sedimenta, a pojačava erozija, posebno dubinska, što često dovodi do usijecanja korita (Čanjevac i drugi, 2016). Usijecanje uzrokuje povećanu nestabilnost obala (Slika 3), što povlači za sobom različite probleme te degradaciju i potrebe za daljnjom regulacijom tekućica. Osim toga treba spomenuti u nekim slučajevima izrazit pad razine podzemnih voda povezan s usijecanjem korita tekućica (primjer Save na širem zagrebačkom području i savskog vodonosnika). Terenska istraživanja su pokazala da se kanaliziranje često obavlja na način da se tekućica tlocrtno izravna, a korito produbljuje. To dovodi do ograničavanja lateralnog kretanja tekućice i nemogućnosti stvaranja fluvijalnih oblika kao što su sprudovi i ade, koji imaju iznimnu važnost za riječne ekosustave, bioraznolikost i georaznolikost (Zeng i drugi, 2015; Europska komisija, 2016; Buzjak i Butorac, 2018).



*Slika 3. Pojačana erozija uzrokovana uzvodnim utvrđivanjem korita*

Utvrdjivanje obala i korita teškim materijalima također značajno utječe na erozijsko-sedimentacijske procese. Obaloutvrde duž dugih dionica sprječavaju bočnu eroziju, a utvrđivanje korita dubinsku. To narušava ravnotežu procesa erozije i sedimentacije, onemogućava vezu površinskih i podzemnih voda, kao i formiranje već spomenutih fluvijalnih oblika važnih za zdravlje ekosustava (Europska komisija, 2016; Vučković i drugi, 2018).

Kanaliziranje i utvrđivanje obala i korita vodnih tijela često prati intenzivno uklanjanje riparijske i vodene vegetacije, što ima velik izravan utjecaj na biološko stanje vodnog tijela, ali i na hidromorfološko stanje. Uklanjanje vegetacije (u kombinaciji s građevinama koje ubrzavaju vodeni tok), koja svojim korijenjem i gustoćom učvršćuje naslage aluvijalnih sedimenata, često uzrokuje povećanu nestabilnost obala

(Prosser i drugi, 2001; Čanjevac i drugi, 2016) i pojačanu bočnu eroziju što rezultira povećavanjem nagiba obala čiji rezultat su osipanje, odlamanje i urušavanje (Slika 3). Primijećeno je da su dodatno oslabljene umjetno nasute obale, posebno ako u sedimentima ima otpada koji smanjuje kompakciju i povezivanje sedimenta.

Uz kanaliziranje, vrlo značajan utjecaj na erozijsko-sedimentacijske procese imaju brane (osobito za potrebe hidroelektrana), taložnice, ali i pragovi (Bonacci i Trninić, 1986; Lóczy, 2019). Brane i taložnice zadržavaju velike količine sedimenta, što uzrokuje njegov manjak nizvodno. Također, u pojedinim slučajevima dolazi i do naglog porasta količine i udjela sitnijeg (suspendiranog) sedimenta nizvodno od hidroelektrana, što je posljedica naglih ispuštanja akumulirane vode. I jedan i drugi slučaj imaju negativan utjecaj na nizvodne ekosustave (Hauer i drugi, 2018). Osim nizvodno, gradnja hidroelektrana ima velik utjecaj i na uzvodnu dionicu. Gradnja akumulacija usporava tok i energiju rijeke, čime je mogućnost za pronos sedimenta smanjena ili čak onemogućena.

### 3. ZAKLJUČAK

Prepoznavanje fluvijalnih geomorfoloških oblika i procesa na tekućici vrlo je bitna stavka u određivanju njenog hidromorfološkog stanja. Ujedno, prirodnost erozijsko-sedimentacijskih oblika i procesa je dobar pokazatelj ukupnog hidromorfološkog stanja tekućica (u Hrvatskoj). Zbog kompleksnosti i važnosti erozijsko-sedimentacijskih procesa potrebna su njihova daljnja znanstvena i stručna istraživanja. Bolje poznavanje riječnih sustava i funkcioniranja navedenih procesa olakšalo bi i unaprijedilo načine upravljanja vodnim tijelima. Održivost naših vodnih resursa, ali i ekosustava ovisi upravo o načinu ophođenja prema našim riječnim sustavima. Upravljanje vodnim resursima u budućnosti zahtjeva iskorake kako bi se hidromorfološko stanje tekućica u Hrvatskoj poboljšalo sukladno ciljevima Okvirne direktive o vodama Europske Unije. Kako bi se stanje popravilo, a korištenje vodnih resursa nastavilo u održivom smjeru, potrebna je snažnija suradnja upravljačkih tijela te stručnjaka i znanstvenika iz različitih područja znanosti koji, s obzirom na specijalizaciju znanja i vještina, okupljeni u ekspertne interdisciplinarnе timove, mogu donijeti kvalitetna rješenja.

### LITERATURA

- [1] Bonacci, O., Trninić, D. (1986): *Analiza uzroka i prognoza promjena vodostaja Save i nivoa podzemnih voda u okolici Zagreba*, Vodoprivreda, 18, 100-101 (1986/2-3), 95-101.
- [2] Buzjak, N., Butorac, V. (2018): *Geomorfološko istraživanje riječnih sprudova, otoka i obale rijeke Save na području dijela ekološke mreže NATURA 2000 – područje očuvanja značajno za ptice HR1000002 Sava kod Hrušćice*, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Geografski odsjek, Zagreb, 54 str.

- 
- [3] Čanjevac, I., Plantak, M., Vidaković, I. (2016): *Morfološko stanje tekućica u porječju Ilove*, Hrvatski geografski glasnik, 78/1, 5-24.
- [4] EN 1584 (2010): *Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology*, European standard, Water quality, 26 str.
- [5] Europska komisija (2006): *WFD and hydromorphological pressure: Good practice in managing the ecological impacts of hydropower schemes; flood protection works; and works designed to facilitate navigation under the Water Framework Directive*, Technical report, Bruxelles, 68 str.
- [6] Hauer, C., Leitner, P., Unfer, G., Pulg, U., Habersack, H., Graf, W. (2018): *The Role of Sediment and Sediment Dynamics in the Aquatic Environment*, Riverine Ecosystem Management, Aquatic Ecology Series (Schmutz S., Sendzimir J. (ur.)), Springer, Cham, 151-169.
- [7] Hrvatske vode (2016): *Metodologija za monitoring i ocjenjivanje hidromorfoloških pokazatelja*, Zagreb, 26 str.
- [8] Hrvatske vode (2013): *Vodič za hidromorfološki monitoring i ocjenu stanja rijeka u Hrvatskoj*, Zagreb, 90 str.
- [9] Lóczy, D. (ed.) (2019): *The Drava River - Environmental Problems and Solutions*, Springer, 399 str.
- [10] Newson, M.D., Large, A.R.G. (2006): 'Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1606–1624.
- [11] ODV (2000): *Okvirna direktiva o vodama Europske unije, direktiva Europskog parlamenta i vijeća 2000/60/EC*, Hrvatske Vode, Zavod za vodno gospodarstvo, Zagreb, 72 str.
- [12] Prosser, I. P., Rutherford, I. D., Olley, J. M., Young, W. J., Wallbrink, P. J., Moran, C. J. (2001): *Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia*, *Marine and Freshwater Research*, 52, 81-99.
- [13] Šafarek, G. (2012): *Recentne hidromorfološke promjene na širem području ušća Mure u Dravu*, *Ekonomika i ekohistorija*, vol. VIII, br. 1, 5-13.
- [14] Tandarić, N., Ćosić, M., Buzjak, N., Bočić, N., Dubovečak, V., Lacković, I., Zastavniković, I., Tomić, D. (2018): *Fizičkogeografska analiza i geoekološko vrednovanje potencijalno zaštićenog područja - primjer doline Kupčine*, Hrvatski geografski glasnik, 80/1, 27-59.
- [15] Vučković, I., Čanjevac, I., Bočić, N., Buzjak, N., Kvetek, F., Martinić, I., Orešić, D., Plantak, M., Srebočan, M., Vidaković, I. (2018): *Utjecaj hidromorfoloških promjena u tekućicama na biološke elemente kakvoće voda*, *Hidrologija u službi zaštite voda te smanjenja poplavnih rizika – suvremeni trendovi i pristupi* (Rubinić, J., Ivanković, I., Bušelić, G., (ur.)), Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, 317-320.

- [16] Zeng, Q., Shi, L., Wen, L., Chen, J., Duo, H., Lei, G. (2015): *Gravel Bars Can Be Critical for Biodiversity Conservation: A Case Study on Scaly-Sided Merganser in South China*, [www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov) (preuzeto 15.2.2020.).





OKRUGLI STOL

***Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi***

Varaždin, 2020.

---

**ANALIZA ZNAČAJA UPRAVLJANJA  
SEDIMENTOM NA PRIMJERU RIJEKE SUTLE**

**ANALYSIS OF THE SEDIMENT MANAGEMENT  
SIGNIFICANCE ON THE SUTLA RIVER CASE  
STUDY**

**Gorana Ćosić-Flajsig<sup>a</sup>, Barbara Karleuša<sup>b</sup>, Ivan Vučković<sup>c</sup>**

**SAŽETAK**

Prema *Okvirnoj direktivi o vodama Europskog parlamenta (2000/60/EC)* (u daljnjem tekstu: ODV), uz postizanje *ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva*, ciljevi su: postizanje najmanje dobrog stanja voda vodnih tijela, smanjenje rizika od eutrofikacije voda, smanjenje unosa sedimenta u vode, očuvanje i cjelovitost NATURA 2000 područja, te očuvanje biološke raznolikosti i funkcioniranje usluga ekosustava. Postizanje okolišnih ciljeva omogućava odgovarajući režim protoka i sedimentata za pojedine tipove vodotoka, te s njima povezana morfologija vodotoka. Sediment je povezan sa standardima kakvoće okoliša odnosno specifičnim onečišćujućim tvarima u riječnom slivu i stoga se *ODV odnosi i na upravljanje kakvoćom i količinom sedimentata*. Sediment je važan, integralni i dinamični dio riječnog sliva jer prirodna rijeka treba sediment kao podlogu za pojedine biološke elemente kakvoće voda, odnosno biološke zajednice, a predstavlja rizik radi dospijevanja različitih onečišćenja koja mogu utjecati na biološku raznolikost zajednica u koritu rijeke i mogućnost pružanja usluga ekosustava. Upravljanje sedimentom relevantno je za zakonodavstvo o okolišu EU-a. Na primjeru sliva rijeke Sutle analiziran je unos točkastog i raspršenog onečišćenja

---

<sup>a</sup> Tehničko veleučilište u Zagrebu, Graditeljski odjel, Av. V. Holjevca 15, Zagreb, 10000, Hrvatska, gcfajsig@tvz.hr

<sup>b</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 5, Rijeka, 51000, Hrvatska, barbara.karleusa@gradri.uniri.hr

<sup>c</sup> Elektroprojekt d.d., Alexandera von Humboldta 4, Zagreb, 10000, Hrvatska, ivan.vuckovic@elektroprojekt.hr

riječnog sliva putem voda i sedimenta u prirodne vode, te prostorne informacije o njegovoj količini i kakvoći temeljem matematičkog modela SWAT i rezultata nadzornog monitoringa površinskih voda. Uključivanje upravljanja sedimentom u integralno upravljanje vodama je ključni element unaprjeđenja nadzornog monitoringa. Poseban izazov predstavlja upravljanje prekograničnim slivom rijeke Sutle, čak i u slučajevima kada su Hrvatska i Slovenija obje države članice EU-a i provode zahtjeve ODV-a.

## ABSTRACT

According to the *Water Framework Directive of the European Parliament (2000/60/EC)* (hereinafter referred to as the WFD), in addition to achieving the environmental objectives of the river basin, the objectives are: achieving at least good water status of water bodies, reducing the risk of water eutrophication, reducing sediment intake into the waters, the conservation and integrity of NATURA 2000 sites, and the conservation of biodiversity and the functioning of ecosystem services. Environmental objectives can be achieved if adequate flow and sediment regimes for individual types of watercourses and the associated watercourse morphology are guaranteed. Sediment is associated with environmental quality standards or specific pollutants in the river basin and therefore the WFD also applies to the management of sediment quality and quantity. Sediment is an important, integral and dynamic part of a river basin because the natural river needs sediment as a substrate for individual biological elements of water quality and biological communities, and poses a risk of reaching various contaminants that can affect the biodiversity of riverbed communities and ecosystem service opportunities. Sediment management is relevant to EU environmental legislation. On the example of the Sutla river basin, the intake of point and diffuse pollution of the river basin by water and sediment into natural waters was analyzed, as well as spatial information on its quantity and quality based on the SWAT mathematical model and the results of surface water monitoring. Integrating sediment management into integrated water management is a key element in improving monitoring. Managing the transboundary catchment of the Sutla River is a particular challenge, even when Croatia and Slovenia are both EU Member States and are implementing the WFD requirements.

*KLJUČNE RIJEČI: ciljevi zaštite okoliša ODV EU, dobro stanje voda, upravljanje sedimentom, morfologija, usluge ekosustava*

*KEYWORDS: EU WFD environmental objectives, good water status, sediment management, morphology, ecosystem services*

## 1. UVOD

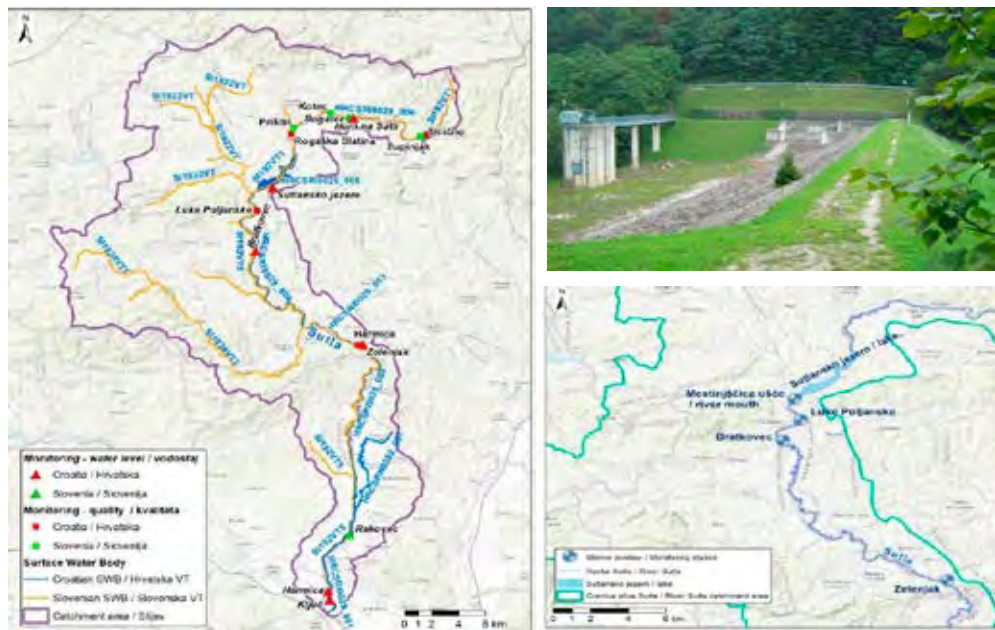
Sukladno politici upravljanja vodama EU-a, definirana su tri glavna problema kao izazovi 21. stoljeća: osiguranje vode za vodoopskrbu stanovništva, utjecaj korištenja voda na vodne ekosustave, te utjecaj na vode uslijed klimatskih promjena. *Postizanje ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva*, prema *Okvirnoj direktivi o vodama* (ODV) 2000/60/EC EU-a, ključni je zadatak integralnog upravljanja vodama riječnog sliva. Ciljevi zaštite okoliša riječnog sliva postižu se provedbom mjera za površinske i podzemne vode, te zaštićena područja koji su utvrđeni člankom 4. *Okvirne direktive o vodama* (ODV, 2000). Vodna politika EU-a kroz ODV, uz postizanje ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva, zahtijeva: najmanje dobro stanje svih vodnih tijela riječnog sliva, smanjenje rizika od eutrofikacije voda, smanjenje unosa sedimenta u vode, te očuvanje NATURA 2000 područja i biološke raznolikosti i uspostavu usluga ekosustava. Naime, okolišni ciljevi se mogu postići ukoliko su zajamčeni odgovarajući režimi protoka i sedimentata za pojedini tip vodotoka te s njima povezana morfologija vodotoka. Sediment je povezan sa standardima kakvoće okoliša i/ili specifičnim onečišćujućim tvarima u riječnom slivu i stoga se ODV odnosi na upravljanje kakvoćom i količinom sedimentata. Upravljanje sedimentom relevantno je za zakonodavstvo o okolišu EU-a, a temelji se na: *Okvirnoj direktivi o vodama 2000/60/EC, Direktivi o standardima kakvoće okoliša 2008/105/EZ, Direktivi o poplavama 2007/60/EC, Direktivama o zaštiti prirode: Direktivi o staništima 92/43/EEC i Direktivi o pticama 2009/147/EC, Direktivi o procjeni utjecaja na okoliš 2011/92/EU*, te *Vodiču o kemijskom praćenju sedimenta i biote u okviru ODV EU-a, N° 25, 2010.*

Dobro stanje površinskih voda/potencijal uključuje *dobro ekološko stanje/potencijal*: izraz uključuje kvalitetu strukture te funkcioniranja vodenih ekosustava koji uključuju: *biološke, hidromorfološke i osnovne fizikalno-kemijske elemente koji prate biološke elemente kakvoće voda*, te *dobro kemijsko stanje* koje zadovoljavaju sve standarde zaštite okoliša za kemikalije utvrđene na razini EU u Direktivi 2008/105/EZ (prioritetne tvari). ODV razvija koncepciju stanja ekološke kakvoće voda koja se temelji na stanju bioloških, hidromorfoloških i osnovnih fizikalno-kemijskih elemenata kakvoće. Biološki elementi su posebno važni i uključuju: fitoplankton, perifiton, makrofitsku vegetaciju, bentičke makrobekralješnjake i ribe, a podržavajući elementi su hidromorfološki i osnovni fizikalno-kemijski pokazatelji. Hidromorfološki elementi uključuju: hidrološki režim, kontinuitet toka i morfologiju, a osnovni fizikalno-kemijski elementi uključuju opće pokazatelje (temperaturu, pH vrijednost, režim kisika, hranjive soli) i specifične onečišćujuće tvari (arsen, bakar, cink, krom i njihove spojeve, fluoride, organski vezane halogene i poliklorirane bifenile) koji se mjere u vodnom stupcu i u sedimentu (Borja i drugi, 2004). Sve izraženije klimatske promjene i varijacije količine voda u hidrološkoj godini, mogu dodatno izmijeniti prirodu hidrološkog režima u riječnom slivu, pronos nutrijenata i sedimenta, te na taj način utjecati na upravljanje kakvoćom voda riječnog sliva unutar integralnog upravljanja riječnim slivom. Riječni sustavi pružaju široki spektar usluga ekosustava

radi dobrobiti ljudi i napredovanja ljudskog društva, a povezani su s odgovarajućom razinom funkcionalnosti riječnih procesa i postizanja okolišnih ciljeva riječnog sliva. Vodna tijela prirodnih stajaćica, odnosno znatno promijenjena i umjetna vodna tijela stajaćica (akumulacije i retencije uslijed izgradnje pregrada/brana na vodotoku) predstavljaju poseban izazov za upravljanje vodama i postizanja okolišnih ciljeva na vodnim tijelima sukladno ODV-u, a što će se pokazati na primjeru riječnog sliva Sutle.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Rijeka Sutla formira granicu između Republike Slovenije i Republike Hrvatske (Slika 1). Veličina sliva rijeke Sutle je gotovo 600 km<sup>2</sup>. Nakon izgradnje brane Vonarje 80-tih godina 20. stoljeća, stvorena je akumulacija Sutlansko jezero, volumena 12,4 milijuna m<sup>3</sup>. Cilj izgradnje akumulacije bio je osigurati vodu za javni vodoopskrbni sustav za hrvatska i slovenska naselja, navodnjavanje poljoprivrednih površina, uz istovremeno retenciranje vode u svrhu zaštite od poplava nizvodnih područja. Ubrzo nakon punjenja, akumulacija je eutrofizirala uslijed unosa nutrijenata i organskog onečišćenja iz točkastih i raspršenih izvora pa je ispražnjena 1988. godine i sada funkcionira kao retencija (www.frisco-project.hr, 2020; Čosić-Flajsig i Karleuša, 2014). Provedena su istraživanja na slivu rijeke Sutle radi rješavanja problema učinkovitog upravljanja kakvoćom ruralnog prekograničnog riječnog sliva (Čosić-Flajsig i Karleuša, 2015). Podaci dobiveni nadzornim monitoringom voda rijeke Sutle ukazuju na opterećenje organskim tvarima i nutrijentima vodnih tijela rijeke Sutle (Slika 1, Tablica 1), usprkos implementiranim mjerama vezanim uz kakvoću voda, posebno izgradnju uređaja za pročišćavanje otpadnih voda naselja Rogaška Slatina i Hum na Sutli. To ukazuje na rizik eutrofikacije rijeke Sutle, kao i rizik ne postizanja dobrog stanja voda i ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva, posebno nakon rekonstrukcije brane Vonarje 2019. godine i planova za njezino ponovno ojezeravanje (www.frisco-project.hr, 2020). Na Slici 1 vidi se brana Vonarje koja je rekonstruirana 2019. godine, te njezin položaj u slivu i u odnosu na mjerne postaje i utok rijeke Mestinjščice. U Tablici 1, daje se prikaz lokacija i vrsta mjernih postaja: hidrologije, kakvoće voda, hidromorfologije i sedimenta, te vodnih tijela i ocjena stanja i vodnog režima za hrvatske mjerne postaje. Izgradnjom brane Vonarje i uslijed antropogenih utjecaja dolazi do narušavanja prirodnog hidrološkog režima, te do promjena pronosa suspendiranog nanosa, odnosno značajnog smanjenja pronosa u odnosu na razdoblje prije izgradnje objekata. Obzirom da je nizvodno od brane Vonarje smanjen donos novog materijala, voda svojom erozijskom aktivnošću produbljuje korito. Stoga, nizvodno od brane dolazi do značajnih morfoloških promjena u koritu, odnosno velike erozije dna i spuštanja dna korita Sutle, uz istovremeno taloženje finog pijeska i mulja na obalama nizvodno. Sve to ima za posljedicu sve jače „ukopavanje“ rijeke u svoje korito uz sniženje vodostaja, uz istovremeno povećanje brzine toka u gornjem toku.



Slika 1. Prekogranični sliv rijeke Sute, vodna tijela površinskih voda i monitoring postaje (lijevo), brana Vonarje (desno gore) i lokacije mjernih postaja Luke Poljanske i Bratkovac ispod brane Vonarje u odnosu na ušće vodotoka Mestinjščica u rijeku Sutlu (desno dolje)

Lokalni erozijski procesi i produbljivanje dna može dovesti do narušavanja stabilnosti konstrukcija hidrotehničkih građevina. Značajna količina nanosa se zaustavlja na pregradi Prišlin, koja je izgrađena radi smanjenja unosa nanosa u Sutlansko jezero i smanjenja njezinog „radnog“ volumena. Sutlansko jezero trenutno funkcionira kao retencija, a planira se ponovo ojezeriti.

Zbog značajnih hidromorfoloških promjena, tekućica je postala stajaćica, odnosno došlo je do promjene kategorije voda. Navedeno vodno tijelo je postalo kandidat za jako promijenjeno vodno tijelo na kojem je potrebno odrediti granice klasa ekološkog potencijala. Rijeka Suta je pogranični vodotok Republike Hrvatske i Republike Slovenije pa je svaka država definirala svoj monitoring voda, mjerne postaje i vodna tijela. Republika Hrvatska proglasila je šest vodnih tijela na rijeci Sutli.

Ovim radom želi se pokazati važnost razumijevanja antropogenih pritisaka u slivu rijeke Sute, onečišćenja voda - točkastih i raspršenih izvora onečišćenja, korištenja voda - zahvaćanja vode s povratom u vodotok i hidromorfoloških pritisaka - izgradnjom brane Vonarje i pregrade Prišlin. Naime, pritisci rezultiraju: narušavanjem prirodnog vodnog režima i njegove promjene; promjenama pronosa vučenog i suspendiranog nanosa, odnosno značajnog smanjenja pronosa u odnosu na razdoblje prije izgradnje brane; narušavanjem stanja osnovnih fizikalno-kemijskih pokazatelja i stanja bioloških elementa kakvoće voda i hidromorfoloških elementa koji opisuju ekološko stanje površinskih voda.

Tablica 1. Rezultati procjene značaja nanosa temeljem istraživanja i nadzornog monitoring programa Hrvatskih voda na rijeci Sutli

Mjerna postaja	Lokacija	Vrsta praćenja	Vodno tijelo	Ocjena stanja
Lupinjak	uzvodno od brane	kakvoća vode	CSRI0029_006	više nije u funkciji
Hum na Sutli	uzvodno od brane	hidrologija	CSRI0029_006	nema utjecaja brane, prirodni hidrološki režim
Prišlin	uzvodno od brane	sediment	CSRI0029_006	antropogeni utjecaj
Prišlin	uzvodno od brane	kakvoća vode	CSRI0029_006	vrlo loše, loše do dobro stanje voda
brana Vonarje i Sutlansko jezero			CSRI0029_005	nema ocjene
Luke Poljanske	nizvodno od brane	hidromorfologija	CSRI0029_004	neznatno promijenjeno stanje
Luke Poljanske	nizvodno od brane	kakvoća vode	CSRI0029_004	vrlo loše, loše do dobro stanje voda
Bratkovac	nizvodno od brane	hidrologija	CSRI0029_004	utjecaj brane, neznatno promijenjen hidrološki režim
Zelenjak	nizvodno od brane	hidromorfologija	CSRI0029_003	promjena uslijed antropogenog utjecaja
Zelenjak	nizvodno od brane	hidrologija	CSRI0029_003	mali utjecaj brane, prirodni hidrološki režim
Zelenjak	nizvodno od brane	kakvoća vode	CSRI0029_003	dobro stanje voda
Harmica	nizvodno od brane	hidromorfologija	CSRI0029_001	promjena uslijed antropogenog utjecaja
Harmica	nizvodno od brane	kakvoća vode	CSRI0029_001	dobro do loše stanje voda
Ključ	nizvodno od brane	hidrologija	CSRI0029_001	mali utjecaj brane, prirodni hidrološki režim

Izvor: službeni podaci i informacije Hrvatskih voda

Sve navedeno utječe na rizik nepostizanja dobrog stanja voda, kao i na rizik nepostizanja ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva. Potrebno je istaknuti da su za ocjenu stanja voda i postizanja ciljeva zaštite okoliša potrebni podaci iz redovitog programa monitoringa, no obzirom na položaj mjernih postaja i razdoblja njihova rada, teško ih je interpretirati. Neosporna je uloga nanosa i značaja upravljanja nanosom koje je nedovoljno zastupljeno. Za praćenje kakvoće voda i sedimenta na rijeci Sutli ustanovljena je mjerna postaja nadzornog monitoringa Prišlin koja se nalazi neposredno prije pregrade za zadržavanje nanosa. Obzirom na lokaciju Prišlin u odnosu na topografiju riječnog sliva i ulogu pregrade za smanjenje unosa nanosa u akumulaciju Sutlansko jezero, mjereni podaci pokazuju umjereno do loše stanje voda i kakvoću sedimenta koji označava antropogeni utjecaj. To je potvrdila i procjena pronosa nutrijenata i nanosa u slivu koji nastaje uslijed korištenja zemljišta, te točkastih i raspršenih izvora onečišćenja, korištenjem matematičkog modela SWAT (engl.: Soil and Water Assessment Tool). Upravo na lokaciji mjerne postaje Prišlin utvrđene su najveće količine nutrijenata i nanosa (T/god) (Ćosić-Flajsig i drugi, 2017). Upravljanjem

kakvoće voda riječnog sliva provođenjem odgovarajućih mjera moguće je smanjiti unos nanosa i onečišćenja na lokaciji Prišlin.

Procjena općeg hidromorfološkog stanja temeljila se na dostupnim podacima za niz hidromorfoloških elemenata vezanih uz kakvoću voda prema europskoj normi EN15843, kao i na propisanoj *Metodologiji monitoringa i ocjenjivanja hidromorfoloških pokazatelja* (Hrvatske vode, 2016). Režim protoka obuhvaćaju obilježja utjecaja umjetnih građevina u koritu unutar doseg, utjecaj promjena na širem slivnom području na karakter prirodnog protoka i utjecaj dnevnih promjena u dnevnom protoku. Uzdužnu povezanost obuhvaćaju obilježja uzdužnog (longitudinalnog) toka pojedinog vodotoka. Morfologiju obuhvaćaju elementi: tlocrt vodnoga tijela, presjek korita (uzdužni i poprečni), količina umjetnog materijala, količina prirodnog materijala, struktura obale i promjene na obali, tip/sastav vegetacije na obali i na okolnom zemljištu, korištenje okolnog zemljišta i s tim povezana obilježja, stupanj bočne povezanosti rijeke i naplavne nizine, stupanj bočnog kretanja riječnog korita. Pronos riječnog nanosa je vitalna komponenta prirodnog hidromorfološkog režima svakog otvorenog vodotoka pa tako i rijeke Sutle. Međutim, uslijed antropogenih utjecaja i regulacijskih radova na rijeci Sutli i njezinom zaobalju prirodni procesi u transportu nanosa su znatno izmijenjeni. Na mjernoj postaji Sutla-Prišlin na kojoj se provodi redoviti monitoring površinskih voda i određuje stanje voda u podlozi dominiraju veće valutice (6-20 cm), dok su manje valutice (2-6 cm), šljunak (0,2-2 cm) i pijesak (6  $\mu\text{m}$  - 0,2 cm) bile manje zastupljene. Na mjernoj postaji Sutla-Zelenjak i Sutla-Prišlin uz gore navedene supstrate, pojavljivali su se i blokovi (20-40 cm), što ukazuje na antropogeni utjecaj na spomenutoj dionici jer u donjim dijelovima toka na kojoj se nalazi mjerna postaja Sutla-Zelenjak i Sutla-Harmica u prirodnim uvjetima bi dominirao pijesak i mulj. Što je čestica manja, to je veća relativna površina, što znači da je veći dio mnogih opasnih tvari sadržan u sitnijim frakcijama sedimenata, koje mogu biti i glavni izvor hrane za biotu. Spomenute veličine pojedinog tipa supstrata preuzete su iz *Priručnika za AQEM metodologiju* (AQEM, 2002). Podloga ili supstrat od iznimnog je značenja za bentičke makrobekralješnjake koji na tom staništu nalaze hranu (organski detritus), zaklon od grabežljivaca, polažu jaja, pričvršćuju se za podlogu ili pužu po njoj. Ona je sastavljena od anorganskih i organskih elemenata (Horne & Goldmann, 1994; Giller & Malmquist, 1998). Takve izmjene u ravnoteži pronosa nanosa uzrokuju produbljivanje riječnog korita i urušavanje obala, stvaranje uspora uslijed začepjenja protočnog profila i povećanje brzina tečenja u vodotoku pod čijim se djelovanjem javljaju lokalne erozije. Posljedice izmjena u režimu pronosa nanosa u riječnom toku najčešće nisu odmah vidljive, ali s vremenom postaju sve veće, utječući na razine srednjih i malih voda rijeke. U nastavku, Tablica 2, prikazani su elementi koji opisuju stanje voda za 2016. godinu prema *Uredbi o standardu kakvoće voda* (NN 66/2019). Navedena godina je izdvojena jer su po planu monitoring programa u toj godini obavljena praćenja po svim pokazateljima.



Tablica 2. Stanje voda prema sveukupnim podacima nadzornog monitoringa Hrvatskih voda iz 2016. godine

Mjerna postaja	Ekološko stanje									Kemijsko stanje	Stanje voda
	fizikalno-kemijski elementi	biološki elementi				hidromorfološki elementi					
		fitobentos	makrofiti	makrozoobentos	ribe	hidrološki režim	kontinuitet rijeke	morfološki uvjeti	specif. onečiš. tvari		
<i>Prišlin</i>	dobro	umjereno	vrlo loše	umjereno	nema	Nema	nema	nema	dobro	dobro	vrlo loše
<i>Luke Poljanske</i>	umjereno	umjereno	vrlo loše	umjereno	dobro	neznatno promijenj.	neprekinut	neznatno promijenj.	dobro	dobro	vrlo loše
<i>Zelenjak</i>	dobro	nema	nema	nema	nema	gotovo prirodno	neprekinut	neznatno promijenj.	dobro	dobro	dobro
<i>Harmica</i>	dobro	nema	nema	nema	nema	gotovo prirodno	gotovo prirodno	u velikoj mjeri promijenj.	dobro	dobro	dobro

Izvor: službeni podaci i informacije Hrvatskih voda

Promjene longitudinalnog kontinuiteta na rijeci Sutli uzrokovane su izvedbom hidrotehničkih građevina u koritu vodotoka (brane, preljevni pragovi, ustave). Utjecaj izgrađenosti sliva u najvećoj se mjeri odnosi na zadržavanje nanosa uzvodno, što izravno utječe na morfologiju poprečnih presjeka vodotoka nizvodnog dijela. Ukupna hidromorfološka ocjena za odsječak na mjernoj postaji Luke Poljanske koja se nalazi nizvodno od brane Vonarje, kao i za cijelo vodno tijelo, odražava neznatno promijenjeno stanje. Hidrološko stanje je neznatno promijenjeno, a uzdužna povezanost je neprekinuta. Morfološko stanje je dobro, odnosno neznatno promijenjeno. Obale tekućice su prirodne, s neznatno izmijenjenom priobalnom vegetacijom. Erozijsko sedimentacijski procesi odražavaju umjereno odstupanje od prirodnog stanja. Lateralna povezanost rijeke s poplavnim područjem i mogućnost lateralnog kretanja korita su prirodni (Studija, 2018). Iako populacije NATURA 2000 vrsta ne čine veliki udio u populacijama na državnoj razini, rijeka je Sutla iznimno važno područje za njihovo očuvanje jer u relativno maloj rijeci nalazimo čak 12 NATURA 2000 vrsta. Sutla kao dio ekološke mreže Natura 2000 važna je za očuvanje 8 vrsta riba (Šemički, 2014). Uzimajući u obzir istraženost biološke zajednice koje žive u vodi rijeke Sutle, kao pogodni bioindikatori odabrane su karakteristične vrste riba, kao i vrijednosti indeksa za pojedine biološke elemente. Određene vrste riba, naseljavaju određene tipove vodotoka i kao krajnji članovi u lancima ishrane pouzdan su pokazatelj bio-ekološke ravnoteže vodotoka. Potočna mrena je karakteristična indikatorska vrsta s pratećim vrstama za srednji tok rijeke. Zbog velike povezanosti riba i hidroloških uvjeta čija su variranja uvjetovana brzinom vode, odnosno nagibom i hrapavošću korita, ribe su pogodni indikatori nizvodno od brane za održanje biološke ravnoteže matičnih vodotoka. Najveći utjecaj na ihtiofaunu rijeke Sutle, uz strane i invazivne vrste, vje-

rojatno ima upravo onečišćenje vode tj. stalni antropogeni pritisak, te najveća pažnja mora se posvetiti upravo smanjivanju unosa organske tvari i nutrijenata. Uslijed nepročišćenih otpadnih voda i ispiranja velikih količina hranjivih tvari s poljoprivrednih i šumskih zemljišta (Čosić-Flajsig i drugi, 2017) podiže se stupanj trofije. Također, pregrađivanje vodotoka predstavlja značajan pritisak, a promjena stanja voda se očituje u promijenjenim hidrološkim karakteristikama vodotoka nizvodno od brane, kao i količini i kakvoći nanosa neophodnog za očuvanje ihtiofaune. Metode biološkog odgovora zasnivaju se na povezanosti između staništa i protoka, te određenih bioindikatora - karakterističnih vrsta riba. Vodotoke ili dijelove vodotoka s padom dna između 1,5 i 3,2 %, karakteristično naseljava mrena s pratećim vrstama riba (FAO, 1998), odnosno *potočna mrena* za srednji tok rijeka. Odabrani osnovni ekološki uvjeti za ribe su dubina i brzina vode, te pokrivenost staništa vodom (European Commission, 2010). Na očuvanje vodenih ekosustava i usluga ekosustava radi dobrobiti čovjeka značajno utječe riječna morfologija koja uključuje procese pronosa i taloženja nanosa. Preporuča se unaprjeđenje nadzornog monitoringa na način da se praćenje sedimenta i/ili biote može koristiti zajedno s praćenjem vodnog stupca kako bi se dobila koherentna i sveobuhvatna slika stanja vodnih tijela unutar svakog sliva, kao i isplativ pristup za početni pregled područja onečišćenja, za usporedbu koncentracija onečišćenja u različitim područjima i identificiranje mogućih izvora onečišćenja (European Commission, 2010). *Direktiva o standardima kakvoće okoliša 2008/105/EZ*, zajedno s ODV-om, definira dobro kemijsko stanje vodnih tijela i obvezu njegovog postizanja, te daje pravnu osnovu za nadzor prioritetnih tvari u sedimentu i bioti. Za većinu tvari s popisa prioritetnih tvari (45) i 7 specifičnih onečišćujućih tvari (NN 96/19) uključenih u Direktivu, uspostava standarda kvalitete okoliša ograničena je na koncentracije u vodenom stupcu, a trebala bi biti i za nanos i biotu. To ukazuje na potrebu unaprjeđenja nadzornog monitoringa rijeke Sutle uključivanjem sedimenta i biote, koji su pod manjim utjecajem brzih promjena u kvaliteti vode, a podložni nasumičnim ili sustavnim/sezonskim promjenama. Preporučena strategija monitoringa nanosa ima dva pristupa, probni model kod kojeg se mjesta uzorkovanja odabiru nasumično unutar mjesta uzorkovanja, te ciljani model kod kojeg se mjesta uzorkovanja odabiru na temelju analize pritisaka i prethodnog znanja o drugim čimbenicima (dubina vode, topografija dna, priroda sedimenta, pritisak onečišćenja). Uzorci sedimenta trebaju se prikupljati učestalošću koja odgovara očekivanim promjenama sedimenta, uzimajući u obzir hidrološki režim i brzinu taloženja ispitivanog vodnog tijela.

### 3. ZAKLJUČAK

Temeljem prikazanih rezultata na primjeru sliva rijeke Sutle može se zaključiti da upravljanje sedimentom mora biti sastavni dio integralnog upravljanja vodama, što zahtijeva specifična znanja o riječnom slivu i dinamici sedimenta. U svrhu uspješnog upravljanja kakvoćom voda unutar integralnog upravljanja vodama riječnog sliva

potrebno je provoditi procjene utjecaja i modeliranja utjecaja na vode kako bi se provele odgovarajuće osnovne i dopunske mjere, kao i pripadajući monitoring koji uključuje odgovarajući monitoring režima nanosa (taloženog i vučenog nanosa) i odgovarajući hidromorfološki monitoring. Potrebno je naglasiti da zdravi ekosustavi, koji su u mogućnosti pružiti usluge ekosustava, trebaju uz odgovarajuću kakvoću voda za odgovarajući tip vodotoka imati i odgovarajući pronos sedimenta i morfodinamiku. Uspostavljanje i održavanje režima protoka i definiranje okolišno prihvatljivog protoka (OPP-a) je važan element u očuvanju riječnih ekosustava i usluga koje pružaju te bi ih trebalo uključiti kao ograničenje u procjenu vodnih resursa i u nacionalne zakonodavne okvire.

Koncepcija integralnog upravljanja riječnim slivom uključuje holistički pristup koji uključuje nanos u sve aspekte procjene vodnog režima i stanja voda i postizanja ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva, stoga je u daljnjem istraživanju potrebno: izučavati i modelirati procese stvaranja, pronosa i taloženja nanosa u riječnom slivu, riječnu morfologiju, provoditi monitoring mutnoće vode, suspendiranog i vučenog nanosa, kakvoće nanosa i kakvoće vode; intenzivnije uključiti hidrološki režim i režim nanosa, te hidromorfologiju u analizu rizika ne postizanja dobrog stanja voda, ciljeva zaštite okoliša riječnog sliva, te ostvarenja usluga ekosustava u sklopu integralnog upravljanja vodama. Poseban izazov predstavlja upravljanje prekograničnim slivovima, kao što je sliv rijeke Sutle, čak i u slučajevima kada su obje države (Hrvatska i Slovenija) članice EU-a i provode zahtjeve ODV-a.

## LITERATURA

- [1] AQEM Consortium (2002): *Manual for the application of the AQEM system a comprehensive method to assess European streams using benthic macroinvertebrates, developed for the purpose of the Water Framework Directive*, Version 1.0.
- [2] Borja, A., Valencia, V., Franco, J., Muxika, I., Bald, J., Belzunce, M.J., Solaun, O. (2004): *The Water Framework Directive: water alone, or in association with sediment and biota, in determining quality standards?*, Marine Pollution Bulletin, 49(1-2): 8-11.
- [3] Ćosić-Flajsig, G., Karleuša, B. (2014): *An Approach to Water Quality Management in Rural Areas*, International Conference People, Building and Environment (PBE 2014), Kromeriž, Češka, <http://www.fce.vutbr.cz/ekr/pbe/>.
- [4] Ćosić-Flajsig, G., Karleuša, B. (2015): *Inovativni pristup upravljanja kakvoćom voda ruralnih slivova*, Konferencija o vodama, 6. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, Hrvatske vode, 2015, 259-268.
- [5] Ćosić-Flajsig, G., Karleuša, B., Vučković, I., Glavan, M. (2017): *Analysis of the eutrophication factors in the Sutla river basin*, Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 18, č.2, 2017, 290-300.

- 
- [6] *Direktiva o poplavama*, 2007/60/EC, [www.eur-lex.europa.eu/legalcontent/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=HR](http://www.eur-lex.europa.eu/legalcontent/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0060&from=HR) (preuzeto: 16.02.2020.).
- [7] *Direktiva o pticama*, 2009/147/EC, [www.https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0147&from=HR](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0147&from=HR), (preuzeto: 16.02.2020.).
- [8] *Direktiva o procjeni utjecaja na okoliš*, 2011/92/EU, [www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0092&from=EN](http://www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0092&from=EN), (preuzeto: 16.02.2020.).
- [9] *Direktiva o standardima kakvoće okoliša* 2008/105/ EZ, [www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105&from=EN](http://www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105&from=EN), (preuzeto: 16.02.2020.).
- [10] *Direktiva o staništima*, 92/43/EEC, [www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992L0043&from=EN](http://www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31992L0043&from=EN), (preuzeto: 16.02.2020.).
- [11] Elektroprojekt i Prirodoslovno-matematički fakultet, Geografski odsjek Sveučilišta u Zagrebu (2018): *Sustavno ispitivanje hidromorfoloških elementa kakvoće u rijekama u 2016. i 2017. godini*, Zagreb, 474 str.
- [12] European Comission (2010): *Vodič o kemijskom praćenju sedimenta i biote* (engl.: *Chemical Monitoring of Sediment and Biota*, N° 25), [www.ec.europa.eu/environment/water/water-framework/facts\\_figures/guidance\\_docs\\_en.htm](http://www.ec.europa.eu/environment/water/water-framework/facts_figures/guidance_docs_en.htm) (preuzeto: 16.02.2020.).
- [13] FAO (1998): *Rehabilitation of rivers for fish*, *European Inland Fisheries Advisory Commission*, Published by arrangement with the Food and Agriculture Organization of United Nations by Fishing News Books, (Cowx, I.G., Welcomme, R.L.), UK in Alden Press, Oxford and Northhampton, 260 str.
- [14] *FRISCO PROJECT*, [www.frisco-project.eu/hr/](http://www.frisco-project.eu/hr/) (preuzeto: 16.02.2020.).
- [15] Giller, P.S., Malmquist, B. (1998): *The Biology of Streams and Rivers*, Oxford University Press, 296 str.
- [16] Horne, A.J., Goldman, C.R., (1994): *Limnology*, McGraw-Hill, New York, 576 str.
- [17] Hrvatske vode (2016): *Metodologija monitoringa i ocjenjivanja hidromorfoloških pokazatelja, koja je propisana od strane Hrvatskih voda*, (klasa: 325-04/15-03/6 Urbroj: 374-1-2-16-4 od 12. travnja 2016.).
- [18] *Okvirna direktiva o vodama*, 2000/60/EC, [www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=EN](http://www.eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=EN) (preuzeto: 16.02.2020.).
- [19] Šemnički, P. (2014): *Rijeka Sutla – Natura 2000 područje*, Javna ustanova za upravljanje zaštićenim dijelovima prirode Krapinsko-zagorske županije.
- [20] *Uredba o kakvoći voda*, Narodne novine broj 96/19.
- [21] *Uredba o standardu kakvoće voda*, Narodne novine broj 73/13, 151/14, 78/15, 61/16.

**ZAHVALA**

Ovaj rad je sufinanciralo Sveučilište u Rijeci projektom: *Održivo upravljanje riječnim slivom implementacijom inovativnih metodologija, pristupa i alata* (UNIRI-TEHNIC-18-129).

**PRAĆENJE MORFOLOŠKIH PROMJENA U  
SVRHU OSIGURANJA PLOVNOСТИ NA UŠĆU  
RIJEKE DRAVE**

**MONITORING OF MORPHOLOGICAL CHANGES  
FOR ENSURING SAFE NAVIGABILITY AT THE  
DRAVA RIVER CONFLUENCE**

**Gordon Gilja <sup>a</sup>, Sándor Baranya <sup>b</sup>, Neven Kuspilić <sup>a</sup>, Zdenko Tadić <sup>c</sup>,  
Antonija Cikojević <sup>a</sup>, Dražen Brleković <sup>c</sup>, Flóra Pomázi <sup>b</sup>**

**SAŽETAK**

Ušće rijeke Drave u Dunav karakteriziraju specifični morfodinamički procesi znatne sedimentacije nanosa i posljedično problema vezanih uz osiguravanje gabarita plovnog puta. Analiza morfodinamičkih promjena zahtijeva dugoročno praćenje režima voda i nanosa kako bi se odredilo ravnotežno stanje u odnosu na referentne uvjete (nulto stanje utvrđeno mjerenjem) obje rijeke. U ovom radu prikazani su rezultati detaljnog praćenja morfodinamičkih promjena ušća rijeke Drave u dvogodišnjem razdoblju, čija je kvantifikacija izvedena posredno, interpretacijom mapiranja polja brzine šireg područja snimljenog pomoću ADCP-a, njegovu kalibraciju za izračun suspendiranog nanosa, procjenu intenziteta kretanja vučenog nanosa preko brzine pokretnog dna i snimanje batimetrije korita. Ciljevi provedene analize su utvrđivanje: prostornog rasporeda brzine toka na ušću, lokalnog rasporeda polja brzine na mjernim profilima te prostornog rasporeda intenziteta kretanja nanosa za raspon hidroloških događaja.

---

<sup>a</sup> Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb, 10000, Hrvatska, gordon.gilja@grad.unizg.hr, neven.kuspilic@grad.unizg.hr, antonija.cikojevic@grad.unizg.hr

<sup>b</sup> Sveučilište za tehnologiju i ekonomiju u Budimpešti, Műegyetem rkp. 3, Budimpešta, 1111, Mađarska, baranya.sandor@epito.bme.hu, pomazi.flora@epito.bme.hu

<sup>c</sup> Hidroing d.o.o., Tadije Smičiklase 1, Osijek, 31000, Hrvatska, drazen.brlekovic@hidroing-os.hr, zdenko.tadic@hidroing-os.hr

## ABSTRACT

The confluence of the Drava River is characterized by specific morphodynamic processes of considerable deposition and its consequences on fairway conditions. An analysis of morphodynamic changes requires long-term monitoring of the flow and sediment regime to determine the equilibrium state with respect to the reference conditions of both rivers. This paper presents the results of detailed monitoring of morphodynamic changes at the Drava River confluence during a two-year period. The objective of the analysis is to define: the spatial distribution of flow velocity field at the confluence; velocity distribution on defined cross-sections and the spatial distribution of sediment transport for a span of hydrological events.

*KLJUČNE RIJEČI: ADCP, LISST-ABS, Drava, Dunav, ušće, suspendirani nanos, vučeni nanos*

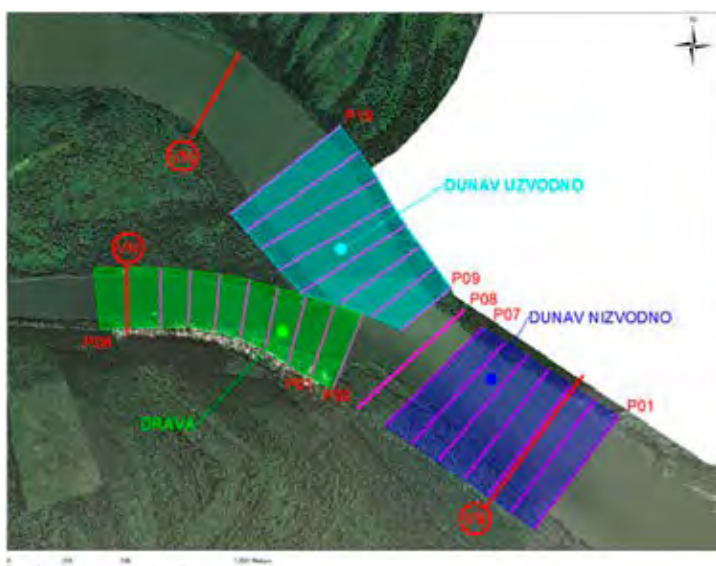
*KEYWORDS: ADCP, LISST-ABS, Drava, Danube, confluence, suspended load, bed load*

## 1. UVOD

Trenutno stanje na ušću rijeke Drave u Dunav karakterizirano je procesima znatne sedimentacije nanosa koja zbog smanjenja dubine predstavlja ograničenje osiguravanja gabarita plovnog puta rijeke Drave. Iako je plovnost rijeke Drave vrlo važna za razvoj gradova uz nju (Milas, 2012; Petrić, 2011; Živaković-Kerže, 2004; Živaković-Kerže, 2010), istraživanja vezana uz režim nanosa rijeke Drave su rijetka (Bekić i drugi, 2008; Bonacci i Oskoruš, 2010; Bonacci i drugi, 1992; Gilja i drugi, 2009; Gilja i Kuspilić, 2015; Kuspilić i Gilja, 2015; Zhu i drugi, 2019). Uzroci intenzivnih morfodinamičkih procesa u rijeci Dravi su: znatno veći protoci rijeke Dunav (i do 5 puta) u odnosu na rijeku Dravu koja je zbog toga pod usporom (Tadić i drugi, 2016) i antropološki utjecaj uslijed presijecanja i regulacije riječnih korita (Šadek, 2013; Živaković-Kerže, 2013).

Temeljem prethodnih mjerenja utvrđeno je da dolazi do produbljivanja lijeve obale Dunava te do zasipavanja desne obale (sprud duljine 700 m). Kod malih protoka rijeke Drave, kada rijeka Dunav ima dovoljno snage za pronos nanosa, na samoj lokaciji ušća stvara se sprud duljine 400 m koji je orijentiran uzdužno s Dunavom i poprečno na smjer tečenja rijeke Drave, ulazi u osnovno korito i uzrokuje izdizanje njenog dna. Temeljem prikupljenih podataka s terena uspostavljen je numerički model koji je pokazao kako za vrijeme malih voda dolazi do taloženja nanosa u sjeni pera i erozije dna korita u zoni plovnog puta, čime se održavaju poželjne dubine (Gilja i drugi, 2019). U istom radu utvrđeno je kako se izvedbom pera nije promijenila maksimalna brzina u profilu jer su izvedena na plitkoj obali s unutarnje strane zavoja, što za sobom povlači nepromijenjena hidraulička opterećenja suprotne obale. Analizom utjecaja izgradnje pojedinačnih regulacijskih građevina na ušću, kao što su pera, pokazano je da je moguće utjecati na lokalno polje brzine i posljedično morfodinamički razvoj korita

(Gilja i drugi, 2019). Čišćenje nanosa koje podrazumijeva produbljivanje korita predmetne dionice Drave unutar plovnog gabarita u duljini 1,5 km od ušća uzvodno i širine 50 m, iako učinkovito, ne predstavlja dugoročno održivo rješenje za održavanje gabarita plovnog puta jer je vremenski zahtjevno i ometa plovidbu (Hidroing d.o.o. i Građevinski fakultet Zagreb, 2015). Stoga je neophodno kontinuirano pratiti kretanje nanosa na ušću, njegov sastav i brzinu toka u vrijeme mjerenja nanosa u cijelom rasponu hidroloških događaja kako bi se u potpunosti razumjeli morfodinamički procesi na predmetnoj lokaciji (Hidroing d.o.o. i Građevinski fakultet Zagreb, 2016; Hidroing d.o.o. i Građevinski fakultet Zagreb, 2017). U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja protoka, brzina i oblika korita na 16 kontrolnih profila Dunava i 8 kontrolnih profila Drave (Slika 1).



Slika 1. Situacija mjernih profila za polje brzine i pronos nanosa

Cilj ovog rada je prikazati metodologiju prikupljanja podataka o relevantnim karakteristikama režima voda i nanosa te morfologiji korita na ušću rijeke Drave. Bazu prikupljenih podataka sačinjava detaljno polje brzine, batimetrija korita, kretanje vučenog nanosa i koncentracija suspendiranog nanosa. Podaci prikupljeni za raspon protoka (od malih do velikih voda) na lokaciji ušća rijeke Drave omogućit će definiranje rubnih uvjeta vezanih uz režim voda i nanosa kako bi se mogli upotrijebiti za izradu združenog numeričkog modela tečenja i pronosa nanosa. Kalibriranim numeričkim modelom može se provesti proračun deformacije korita u svrhu procjene morfodinamičkog razvoja te proračun funkcionalnosti u svrhu valorizacije učinkovitosti pojedinih varijantnih rješenja tehničkog uređenja plovnog puta rijeke Drave pomoću zadanih kriterija, a u svrhu minimiziranja troškova održavanja plovnosti na ušću Drave.



## 2. METODOLOGIJA

Program praćenja morfodinamičkih promjena na ušću Drave sastojao se od snimanja geometrije poprečnih profila, brzina i protoka za vrijeme različitih vodostaja kako bi se dobila cjelovita informacija o režimu voda i nanosa. Praćenja predmetne dionice provedena su kroz nulto mjerenje (m00) u listopadu 2018. godine (Hidroing d.o.o. i Građevinski fakultet Zagreb, 2018) te četiri mjerenja 2019. godine, u srpnju (m01), kolovozu (m02), rujnu (m03) i listopadu (m04) (Hidroing d.o.o. i Građevinski fakultet Zagreb, 2019).

Mjerenja su provedena na kontrolnim profilima definiranim nultim mjerenjem koje je služilo kao podloga za provedbu dugoročnog plana i programa praćenja. 24 kontrolna profila, od kojih je 8 na rijeci Dravi i 16 na rijeci Dunav, razmaknuti su u prosjeku 125 m i obuhvaćaju područje u duljini od 1 km uzvodno i nizvodno od ušća. Hidrografska snimanja obuhvaćala su snimanje batimetrija korita jednosnopnim dubinomjerom, snimanje polja brzine akustičkim strujomjerom (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP), mjerenje pronosa vučenog nanosa fizičkim hvatačem nanosa tipa Helley-Smith, mjerenje koncentracije suspendiranog nanosa pomoću izokinetskog hvatača nanosa US-P-61-A i neinvazivnog akustičkog senzora LISST-ABS.

Temeljem snimljenih podataka izrađen je trodimenzionalni teren iz kojeg je onda provedeno izdvajanje poprečnih profila, njihova usporedba i preklapanje s povijesnim podacima. Za prikaz polja brzine koristi se usrednjavanje vektora po prostoru na način da je nekoliko vertikalnih cjelina usrednjeno u jedan vertikalni profil (Mueller i Rehmel, 2005). Mjerenje suspendiranog i vučenog nanosa je izvedeno u dva navrata tijekom jeseni 2019. godine na tri kontrolna profila (Slika 1, oznaka "VN"): profil rijeke Drave koji se nalazi u njenom osnovnom koritu, profil Dunava na mjestu najvećeg suženja toka zbog spruđenja te na zajedničkom profilu Drave i Dunava. Prvo je izvršeno simultano fizičko i akustičko uzorkovanje za potrebe kalibracije LISST-ABS uređaja. Na temelju kalibracije uređaja moguće je njime pouzdano izmjeriti koncentraciju suspendiranog nanosa na svim profilima na kojima se mjeri i profil brzine. Koncentracija suspendiranog nanosa određena je u laboratorijskim uvjetima i korištena u post-procesnoj obradi podataka. Višetočkasto uzorkovanje vučenog nanosa izvedeno je u istim vertikalama kao i simultano mjerenje suspendiranog nanosa. Direktno mjerenje vučenog nanosa je nemoguće izvesti metodama udaljenog mjerenja te su obrađeni podaci dostupni samo na profilima na kojima je izvedeno mjerenje. Metoda mjerenja brzine pokretnog dna koja je već primijenjena na dionici rijeke Drave (Gilja i drugi, 2017) predstavlja mjeru kretanja vučenog nanosa koja može dati detaljan uvid u intenzitet morfoloških promjena i predstavlja inovativan alat za primjenu u morfodinamičkim analizama.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Brzina toka rijeke Drave izmjerena je u rasponu od 0,60 m/s do 0,80 m/s, a opada približavanjem ušću što je indicacija utjecaja uspora Dunava. Najveća brzina toka rijeke Drave javlja se na profilima P07 i P08 na kojima dolazi do suženja toka kao posljedice taloženja nanosa u sjeni pera izvedenih uz desnu obalu. Brzina toka Dunava je relativno jednolika na dionici uzvodno od ušća, u rasponu od 0,65 m/s do 0,90 m/s. Na ušću (profili P09 i P10) dolazi do ubrzavanja toka uz sprud koji rijeka Drava djelomično unosi u korito Dunava, a nizvodno dolazi do ponovne stabilizacije brzine toka.

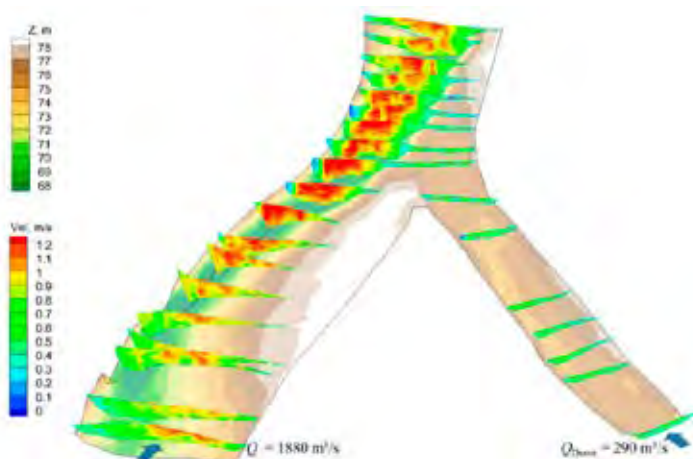


Slika 2. Raspored srednje brzine toka  $U$  (lijevo) i talvega (desno) za sva mjerenja duž dionice

Uz hidrauličke podatke obrađeni su i podaci o promjenama oblika korita. Formiranjem spruda uz desnu obalu Dunava uzvodno od ušća i na samom ušću Drave očekuje se izdizanje dna korita u uvjetima malih protoka rijeke Drave, kada rijeka Dunav ima dovoljnu snagu toka za pronos nanosa preko ušća Drave. Nailaskom sljedeće velike

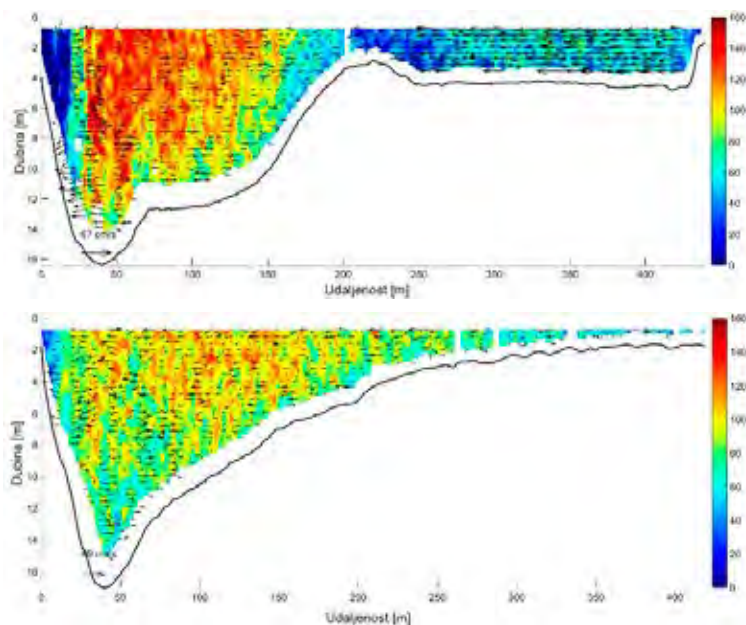
vode rijeke Drave dolazi do razmještanja pijeska na ušću, pri čemu se formira veliko plitko područje s lutajućom maticom toka i talvegom. Talveg korita rijeke Drave postupno raste od najuzvodnijeg profila P08 do profila P03 koji se nalazi neposredno na mjestu početka uzdužne građevine izvedene duž desne obale Drave po cijeloj duljini ušća. Od profila P03 prema nizvodno talveg opada, dok na samom ušću (na profilima P01 i P00) dolazi do njegove stabilizacije. Širina korita Drave ima ujednačen trend za sva mjerenja: usko korito na lokaciji izgrađenih pera (P07 i P08), širenje do paralelne građevine na ušću (P03-P06) te naglo suženje i postupno širenje do spoja s Dunavom (P00-P02). Talveg Dunava najstabilniji je na prirodnoj dionici korita Dunava uzvodno od ušća zbog približavanja matice toka lijevoj obali i naglog produbljenja korita uz nju. Približavanjem ušću talveg Dunava postepeno opada i širina korita se sužava. Do naglog produbljenja dolazi na samom spoju s rijekom Dravom (P10), gdje tok Dunava ubrzava uz sprud koji rijeka Drava djelomično unosi u korito Dunava i zatim se nastavlja polagani trend povećanja dubine (P05-P09). Nizvodno od ušća (P01-P05), zbog nailaska na širu dionicu u krivini, opaža se trend smanjenja maksimalne dubine korita i postupno se povećava širina vodnog lica.

Višedimenzionalna strujna slika (Slika 3) prikazuje polje brzine toka na poprečnom profilu, paletom boja u smjeru toka te vektorski u smjeru okomitom na smjer toka. Ovakav prikaz omogućuje definiranje vrtloga i lokalnih nestabilnosti u polju strujanja. Smjer poprečnog strujanja po profilu, naročito u pridnenom sloju, određuje smjer kretanja čestica nanosa i njihovog taloženja prelaskom iz zone velikih brzina u zonu manjih brzina. U Dunavu je komponenta strujanja ( $v$ ) poprečno na dominantan smjer toka usmjerena prema desnoj obali za profile od P04 do P09 gdje dolazi do pojave spruda uz desnu obalu.



Slika 3. Trodimenzionalno polje brzine snimljeno ADCP-jem po poprečnim profilima pri mjerjenju m01 (pogled nizvodno)

Na profilu Dunava neposredno na ušću Drave (P10) vidljivo je lokalno produbljenje korita uz lijevu obalu, kao i sedlo na spoju Drave i Dunava koje je posljedica nanosa rijeke Drave koji se taloži kada se brzina toka spusti ispod granične za pokretanje nanosa. Taj nanos se spušta niz pokos spruda prema talvegu Dunava gdje zapunjava korito što rezultira njegovim suženjem u odnosu na profile uzvodno te lokalnim produbljenjem u matici. Niz pokos je vidljivo polje malih brzina usmjerenih od spruda što ukazuje na neposredno miješanje Drave na ovom mjestu s Dunavom. Na profilima Dunava uzvodno od ušća (P11 - P16) vidljiva je pojava helikoidalnog strujanja koje erodira korito u donjem sloju i erodirani nanos pokreće na desnu obalu gdje dolazi do formiranja spruda.



Slika 4. Profilska raspodjela brzine na profilu Dunava P10 (gore) i P15 (dolje)

Na profilima Drave u samom ušću, (P00 do P02) vidljivo je da nema izražene matice toka, kao ni komponente strujanja ( $v$ ) poprečno na dominantan smjer toka. Navedene profile karakterizira jednolika dubina po cijelom profilu koja se smanjuje s prilaskom ušću. Najveći intenzitet pronosa nanosa izmjeren je na profilima Dunava od P08 do P10. Ovim profilima je zajednička izražena komponenta strujanja poprečno na tok koja mijenja smjer u odnosu na površinski sloj i najveće promjene oblika korita. Na toj lokaciji rijeka Drava donosi suspendirani nanos koji se razmješta po cijelom profilu Dunava nizvodno do kraja predmetne dionice. Aluvijalna korita prilagođavaju svoju širinu, dubinu i nagib, brzinu i hrapavost kako bi postigla stabilno stanje za pronos mješavine vode i nanosa. Izraz „hidraulička geometrija“ opisuje odnos morfologije korita i protoka na potezu hidrološki homogene riječne dionice. Profilski usrednjene vrijednosti navedenih parametara prate uvjet najmanje disipacije energije (Langbein

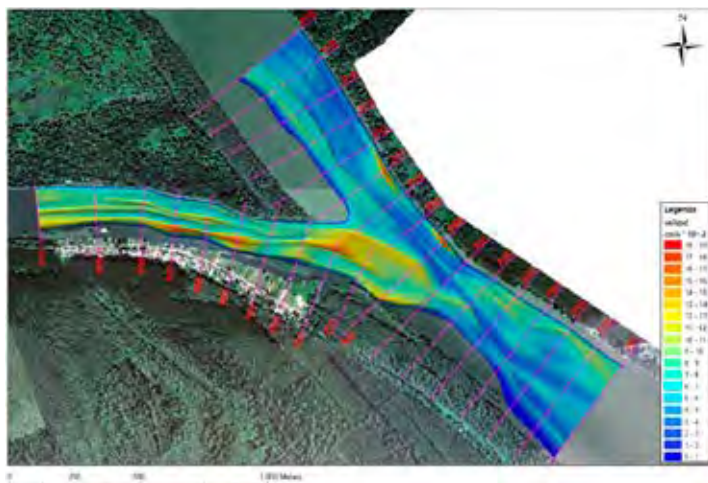
i Leopold, 1964). Posljedično, njihove srednje vrijednosti su zavisne i odgovaraju ravnotežnom stanju korita - onom pri kojem je kapacitet za pronos nanosa najveći. Analiza hidrauličke geometrije provedena je na temelju višedimenzionalne strujne slike prikupljene tijekom terenskih mjerenja i morfoloških promjena korita između sukcesivnih mjerenja. Analizom izmjerenih vrijednosti hidrauličke geometrije može se zaključiti da se uslijed uspora na ušću može očekivati posljedično smanjenje dubine korita Drave nizvodno od profila P02 te da srednja brzina toka nije relevantan pokazatelj morfodinamičkih promjena na ušću Drave, već se mora analizirati zajedno s drugim utjecajnim parametrima.

Tablica 1. Zbirni prikaz srednjih vrijednosti protoka, brzina, suspendiranog i vučenog nanosa

	Mjerenje	Datum	DUNAV NIZVODNO			DRAVA			DUNAV UZVODNO		
		2019. godina	vodostaj [m n.m.]	brzina [m/s]/nanos [kg/s]		protok [m <sup>3</sup> /s]	brzina [m/s]/nanos [kg/s]		protok [m <sup>3</sup> /s]	brzina [m/s]/nanos [kg/s]	
				susp.	vuč.		susp.	vuč.		susp.	vuč.
mjerenje hidrauličkih parametara	m01	12.07.	79,85	0,82		514	0,70		2188	0,81	
	m02	29.08.	79,42	0,80		395	0,62		1867	0,76	
	m03	16.09.	79,98	0,78		459	0,60		2237	0,80	
	m04	01.10.	79,35	0,63		313	0,68		1344	0,67	
mjerenje nanosa	m01	12.10.	79,28	75,1	6,81	272	3,9	0,17	1785	72,9	1,84
	m02	26.10.	78,36	43,6	0,22	268	6,3	0,12	1280	31,3	0,87

Prvo mjerenje pronosa suspendiranog nanosa izvedeno je u uvjetima srednje vode. Najviše vrijednosti koncentracije u Dunavu uzvodno javljaju se uz sprud na desnoj obali zbog resuspendacije nanosa s pokosa spruda, dok se te vrijednosti smanjuju prema lijevoj obali gdje su najdublje zone. Izražena trodimenzionalnost polja brzine nizvodno od ušća izaziva izdizanje sitnog nanosa uz lijevu obalu, dok je na dodirnoj zoni između dviju rijeka područje niskih koncentracija. U drugom mjerenju, za vrijeme male vode, zbroj vrijednosti pronosa nanosa obje rijeke uzvodno od ušća se ne poklapa s vrijednošću izmjerenom nizvodno od ušća. Višak nanosa koji se javlja nizvodno je posljedica premještanja nanosa na samom ušću Drave. Osim toga, zbog manjih brzina na Dunavu i koncentracija nanosa bila je 50 % manja. Zanimljivo je primijetiti da su i brzine toka i vrijednosti koncentracije suspendiranog nanosa u Dravi veće u odnosu na prvo mjerenje iako se protok zanemarivo promijenio, što može biti utjecaj nižih vodostaja Dunava i posljedično većeg nagiba energetske linije Drave. Fizičko uzorkovanje vučenog nanosa pokazuje da je njegov udio u ukupnom nanosu manji od 10 %, te da ga karakterizira nejednolikost pronosa kao i suspendirani nanos. Rijeka Drava donosi na ušće oko 5 % ukupnog profilskog pronosa nanosa (zbroj suspendiranog i vučenog). Za Dunav su pri mjerenju m01 najveće vrijednosti izmjerene u zoni talvega, dok to nije slučaj za mjerenje m02. Vidljiva je djelomična povezanost pronosa nanosa s morfologijom riječnog korita, npr. intenzivniji pronos nanosa odvija se duž talvega Dunava. Uzimajući u obzir potencijalne izvore nepouzdanosti i ograničenja fizičkih metoda uzorkovanja nanosa kao i pojavu velikih formi dna (Muste i drugi, 2016), važno je napomenuti da ovdje procijenjene vrijednosti pronosa nanosa po-

kazuju veliki rasap podataka. Stoga se predlaže da se prilikom mjerenja nanosa koristi kombinacija tradicionalnih metoda pronosa nanosa i npr. neizravnih metoda praćenja kretanja formi dna upotrebom brzine pokretnog dna (Gilja i drugi, 2017).



Slika 5. Raspored polja brzine pokretnog dna za m00 (17.10.2018.) MJ 1:7000

Iz rasporeda apsolutnih brzina pokretnog dna (Slika 5) uočava se relativno nejednolik raspored brzina na cijeloj dionici ušća. Brzina pokretnog dna rijeke Drave nalazi se u rasponu od 5 cm/s do 10 cm/s. Najveće brzine pokretnog dna javljaju se na profilima P00 i P05. Profil P00 nalazi se neposredno na spoju dviju rijeka, te se na ovom mjestu uočava najveće ubrzanje čestica u koritu. Na profilu P05 nalazi se izraženo suženje profila uz lijevu obalu gdje lijeva obala Drave zadire naglo u korito, uzrokujući suženje i lokalno ubrzanje toka te posljedično produbljenje uz lijevu obalu i intenzivno pokretanje nanosa. Brzinu pokretnog dna karakterizira ponavljajući trend: nakon velike brzine pokretnog dna dolazi do njenog naglog sniženja na jednom profilu i zatim rast na duljem potezu dionice što ukazuje na pojavu velikih formi dna (Gilja i drugi, 2017). Brzina pokretnog dna Dunava opada s najuzvodnijeg profila sve do profila P12 nakon čega dolazi do njenog naglog porasta na profilima P11 i P10. Ova dva profila nalaze se u ravni profila P02 i P03 rijeke Drave, tj. neposredno uzvodno od spajanja korita dviju rijeka i predstavljaju maksimalno suženje korita Dunava zbog stvaranja sprudova.

#### 4. ZAKLJUČAK

Iz rasporeda apsolutnih brzina toka uočava se jednolik raspored brzina rijeke Drave i nejednolik raspored brzina rijeke Dunava na dionici ušća. Brzina toka rijeke Drave opada s približavanjem ušću, što je indicacija utjecaja uspora Dunava. Na profilima Drave u samom ušću vidljivo je da nema izražene matice toka, kao ni komponente strujanja poprečno na dominantan smjer toka. Analiza hidrauličke geometrije poka-

zuje da se uslijed uspora na ušću može očekivati posljedično smanjenje dubine korita Drave nizvodno od profila P02 i da uspor Dunava nije u korelaciji s režimom voda rijeke Drave. Formiranjem spruda uz desnu obalu Dunava uzvodno od ušća, na samom ušću Drave se može očekivati izdizanje dna korita u uvjetima malih protoka rijeke Drave, kada Dunav premješta svoj sprud u korito Drave poprečno na njen smjer tečenja. Smjer poprečnog strujanja po profilu, naročito u pridnenom sloju, određuje smjer kretanja čestica nanosa i njihovog taloženja prelaskom iz zone velikih brzina u zonu manjih brzina gdje dolazi do pojave spruda uz desnu obalu Dunava. Prikupljanje i obrada podataka na predmetnoj lokaciji ušća rijeke Drave omogućit će buduće analize i valorizacije potencijalnih scenarija tehničkog uređenja plovnog puta rijeke Drave pomoću zadanih kriterija, a u svrhu minimiziranja troškova održavanja.

## LITERATURA

- [1] Agencija za vodne putove (2015): *Koncepcijsko rješenje poboljšanja uvjeta plovnosti rijeke Drave od ušća (rkm 0) do luke Osijek (rkm 12)*, Hidroing d.o.o., Građevinski fakultet Zagreb, Vukovar.
- [2] Agencija za vodne putove (2016): *Elaborat praćenja morfoloških promjena i tehničkog rješenja osiguranja plovnosti na ušću rijeke Drave u rijeku Dunav*, Hidroing d.o.o., Građevinski fakultet Zagreb, Vukovar.
- [3] Agencija za vodne putove (2017): *Procjene donosa nanosa na kritičnim dionicama na rijeci Dravi u vrijeme trajanja koncesije*, Hidroing d.o.o., Građevinski fakultet Zagreb, Vukovar.
- [4] Agencija za vodne putove (2018): *Elaborat praćenja morfoloških promjena na rijeci Dravi (dionica ušća rijeke Drave u rijeku Dunav)*, Hidroing d.o.o., Građevinski fakultet Zagreb, Vukovar.
- [5] Agencija za vodne putove (2019): *Elaborat praćenja morfoloških promjena na rijeci Dravi u 2019. godini (dionica ušća rijeke Drave u rijeku Dunav)*, Hidroing d.o.o., Građevinski fakultet Zagreb, Vukovar.
- [6] Bekić, D., Kuspilić, N., Gilja, G. (2008): *Stability Assessment of the River Channel Bedform*, 8th international Conference on Hydro-Science and Engineering, (ur. Tsujimoto, T.), str. 347-348.
- [7] Bonacci, O., Oskoruš, D. (2010): *The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime*, Environmental Earth Sciences, 59 str. 1661-1670.
- [8] Bonacci, O., Tadić, Z., Trninić, D. (1992): *Effects of dams and reservoirs on the hydrological characteristics of the Lower Drava River*, Regulated Rivers Research & Management, 7/4, str. 349-357.
- [9] Gilja, G., Bekić, D., Oskoruš, D. (2009): *Processing of Suspended Sediment Con-*

- centration Measurements on Drava River*, 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, (ur. Popovska, C.& Jovanovski, M.), Faculty of Civil Engineering, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, Macedonia, str. 181-191.
- [10] Gilja, G., Jelić, D., Kuspilić, N. (2019): *Morfodinamičke analize varijantnih rješenja uređenja ušća rijeke Drave*, 7. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode, (ur. Biondić, D. i dr.), Hrvatske vode, Zagreb, str. 701-711.
- [11] Gilja, G., Kuspilić, N. (2015): *Modeling of long-term sedimentation in the Osijek port basin*, 14th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, (ur. Říha, J. i dr.), Institute of Water Structures, FCE, BUT, str. 590-600.
- [12] Gilja, G., Kuspilić, N., Golubović, N. (2019): *Impact of river training works on the Drava River flow regime*, 16th International symposium Water management & hydraulic engineering WMHE 2019, (ur. Pelivanovski, P. i dr.), Ss Cyril and Methodius University, Civil Engineering Faculty, Skopje, North Macedonia, str. 89-99.
- [13] Gilja, G., Kuspilić, N., Potočki, K. (2017): *Analiza primjenjivosti empirijskih modela za opis karakteristika polja dina*, Građevinar, 69/6, str. 427-436.
- [14] Kuspilić, N., Gilja, G. (2015): *Utjecaj regulacijske pregrade na taloženje suspendiranog nanosa*, 6. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode na investicijskom valu, (ur. Biondić, D. i dr.), Hrvatske vode, str. 839-848.
- [15] Langbein, W.B., Leopold, L.B. (1964): *Quasi-equilibrium states in channel morphology*, American Journal of Sciences, 262/6, str. 782-794.
- [16] Milas, D. (2012): *Izrada hidrografskog atlasa rijeke Drave od rkm 0 do rkm 70*, Hrvatske vode, 81, str. 131-138.
- [17] Mueller, D.S., Rehmel, M. (2005): *Determining Mean Velocity for Stationary Profiles using WinRiver*, Office of Surface Water and Indiana WSC.
- [18] Muste, M., Baranya, S., Tsubaki, R., Kim, D., Ho, H., Tsai, H., Law, D. (2016): *Acoustic mapping velocimetry*, Water Resources Research, 52/5, str. 4132-4150.
- [19] Petrić, H. (2011): *Rijeka Drava od štajersko-hrvatske granice do ušća u Dunav početkom 1780-ih godina*, Ekonomska i ekohistorija - Časopis za gospodarsku povijest i povijest okoliša, 7, str. 49-63.
- [20] Šadek, V. (2013): *Prilozi o utjecaju rijeke Drave na život stanovnika koprivničke i đurđevačke Podravine od 1918. do 1941. - poplave, regulacije, prometni i komunikacijski problemi*, Podravina, 12/24, str. 141-149.
- [21] Tadić, L., Dadić, T., Bonacci, O. (2016): *Analysis of the Drava and Danube rivers floods in Osijek (Croatia) and possibility of their coincidence*, Environmental Earth Sciences, 75, str. 1238.



- 
- [22] Zhu, S., Bonacci, O., Oskoruš, D. (2019): *Assessing sediment regime alteration of the lower Drava River*, Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek, 10/19, str. 1-12.
- [23] Živaković-Kerže, Z. (2004): *Riječni putovi u hrvatskom Podunavlju u 19. stoljeću (potrebe, ograničenja, ostvarenja)*, Scrinia Slavonica, 4, str. 199-211.
- [24] Živaković-Kerže, Z. (2010): *Značenje plovnosti Drave u razvoju grada Osijeka (Osvrt na 19. stoljeće)*, Anali Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Osijeku, 26, str. 75-88.
- [25] Živaković-Kerže, Z. (2013): *Tržište i njegov utjecaj na regulaciju Drave i odvodnju slavonsko-dravske nizine (Osvrt na 19. stoljeće)*, Podravina, 12/24, str. 97-111.

**ISTRAŽIVAČKI OKVIR PROJEKTA R3PEAT  
– DALJINSKO PRAĆENJE EROZIJE RIPRAP  
ZAŠTITE OD PODLOKAVANJA NA VELIKIM  
RIJEKAMA U STVARNOM VREMENU**

**RESEARCH FRAMEWORK OF THE R3PEAT  
PROJECT – REMOTE REAL-TIME RIPRAP  
PROTECTION EROSION ASSESSMENT ON  
LARGE RIVERS**

**Gordon Gilja <sup>a</sup>, Antonija Cikojević <sup>a</sup>, Kristina Potočki <sup>a</sup>, Matej Varga <sup>b</sup>,  
Nikola Adžaga <sup>a</sup>**

**SAŽETAK**

U ovom radu predstavljen je znanstveni projekt R3PEAT čijom implementacijom se planira razviti sustav za daljinsko praćenje erozije riprap zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu. Najčešći uzrok urušavanja riprap zaštite od podlokavanja uz stupove mosta je erozija njene nožice uslijed koje se kamenje iz obloge počne urušavati u kavernu nastalu podlokavanjem, što u konačnici rezultira pojavom odbačene kaverne. Pri tome je položaj odbačene kaverne nepoznanica jer se formira u interakciji toka i građevine u uvjetima specifičnim za svaku lokaciju. Projektom su predviđena terenska mjerenja te istraživanje hibridnim modeliranjem – kombinacijom eksperimenata na fizičkom modelu i numeričkih simulacija. Istraživački

---

<sup>a</sup> Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb, 10000, Hrvatska, gordon.gilja@grad.unizg.hr, antonija.cikojevic@grad.unizg.hr, kristina.potocki@grad.unizg.hr, nikola.adzaga@grad.unizg.hr

<sup>b</sup> Sveučilište u Zagrebu Geodetski fakultet, Fra Andrije Kačića Miošića 26, Zagreb, 10000, Hrvatska, mvarga@geof.hr

ciljevi projekta su: (1) razviti prototip ScourBuoy plutače; (2) kalibrirati fizički model s terenskim mjerenjima; (3) unaprijediti empirijske zavisnosti za određivanje ravnotežnih karakteristika kaverne; (4) istražiti zavisnost turbulentnih karakteristika toka i vremenskog razvoja kaverne i (5) istražiti zavisnost turbulentnih karakteristika toka i početnog pomaka čestica u kaverni. Cjelokupnim istraživanjem razvit će se sustav za praktično daljinsko praćenje erozije oko riprap zaštite na velikim rijekama u stvarnom vremenu koji može pružati ulazne podatke sustavima odlučivanja u sklopu gospodarenja mostovima.

## ABSTRACT

This paper presents an outline of the R3PEAT project, under which a remote sensing system for real-time riprap protection erosion assessment on large rivers is being developed. The most frequent cause of degradation of riprap protection next to the bridge piers is undermining of its toe, which causes washing away of individual stones from the riprap, in turn leading to the displacement of scour hole. Analyses for the achievement of the project goals are based on a hybrid modelling approach – combination of physical model investigations and 3D numerical model simulations. The research objectives of the project are: (1) develop ScourBuoy prototype (2); calibrate the physical model with field surveys; (3) improve existing empirical equations for equilibrium scour hole development using the hybrid modelling approach; (4) investigate the dependence between turbulent flow characteristics and temporal scour hole development and (5) investigate the dependence between turbulent conditions and incipient motion of sediment particles. The impact of the proposed project on the bridge management systems is expected through the development of a practical remote real-time system for erosion estimation around the riprap protection on large rivers that can be the basis for the real-time decision support system.

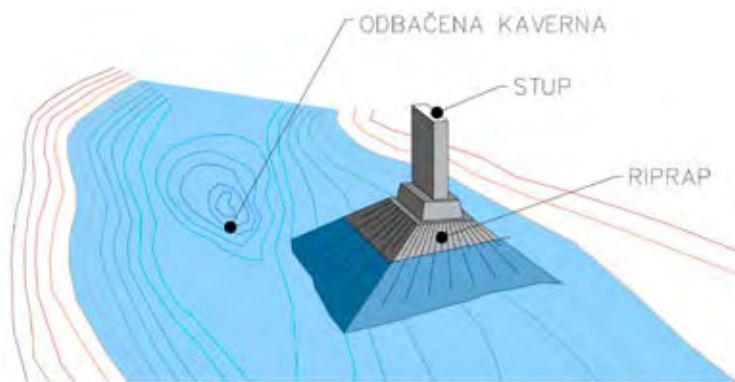
*KLJUČNE RIJEČI: most, podlokavanje, riprap, ScourBuoy, R3PEAT*

*KEYWORDS: bridge, scour, riprap, ScourBuoy, R3PEAT*

## 1. UVOD

U Hrvatskoj i u Europi veliki broj mostova je pri kraju svog uporabnog vijeka, dok je istovremeno pojava ekstremnih klimatskih događaja (kao što su poplave) pod utjecajem klimatskih promjena sve češća. Neizravno djelovanje vodotoka tijekom poplava utječe na hidromorfološke promjene u koritu rijeke i uzrokuje podlokavanje dijelova konstrukcije koje može narušiti stabilnost mosta. Dostupni podaci iz studija koje su obrađivale otkazivanja stabilnosti mostova diljem svijeta pokazuju da su događaji uvjetovani režimom voda i nanosa najviše utjecali na oštećenja mostova: do otkazivanja stabilnosti u 18,8 % je došlo uslijed podlokavanja i u 28,3 % kao posljedice poplavnih djelovanja na konstrukciju, što objedinjeno čini 47,1 % otkazivanja (Cook, 2014).

Istraživanje podlokavanja pokrenuto je sredinom 20. stoljeća (Wardhana i Hadipriyono, 2003), od kada potječu i prve metode za izračun podlokavanja i s njim povezanih opasnosti za mostove. Mostovi su velike infrastrukturne građevine čija oštećenja mogu uzrokovati nesagledive ekonomske i socijalne posljedice (Zhang, 2016), a što je vidljivo i na primjeru gubitka stabilnosti mostova u Hrvatskoj (Gilja i drugi, 2011; Kuspilić i Gilja, 2018). U dosadašnjem radu analizirani su deseci velikih mostova u Hrvatskoj i Europi koji su procijenjeni kao podložni podlokavanju, a pokazalo se da je korito u okolici mnogih mostova znatno izmijenjeno u odnosu na projektno stanje, najčešće kao posljedica podlokavanja (Gilja i drugi, 2012). Fokus većine dosadašnjih istraživanja bio je na određivanju dubine podlokavanja oko stupova mosta i izvedbi adekvatne riprapp zaštite - pristup za koji se u praksi pokazalo da ne rješava problem podlokavanja, već samo odbacuje kavernu nastalu podlokavanjem te često uzrokuje kontraefekt i još veće podlokavanje. Najčešći uzrok urušavanja riprappa je pojava erozije uz njegovu nožicu kada se kamenje iz obloge počne urušavati u odbačenu kavernu nastalu podlokavanjem, pri čemu je njen položaj nepoznanica jer se formira u interakciji toka i građevine u uvjetima specifičnim za svaku lokaciju (Slika 1).



Slika 1. Shema stupa s izvedenom riprapp zaštitom i odbačenom kavernom

Podloga za procjenu opasnosti od podlokavanja za most i ocjenu stabilnosti korita je morfo-dinamička analiza erozivnog kapaciteta toka u profilu mosta i pripadnoj dionici vodotoka. Tradicionalna mjerenja podlokavanja su samo djelomično učinkovita – ako se ne provode u uvjetima nailaska vodnog vala postoji mogućnost da se kaverna zapuni nanosom nakon poplave i da izmjereni podaci podcijene stvarnu opasnost. Trenutno ne postoji jednostavan način utvrđivanja razvoja kaverne u stvarnom vremenu tijekom poplave koji bi mogao ukazati na potencijalnu opasnost od rušenja mosta i omogućiti pravovremeno djelovanje (Prendergast i Gavin, 2014). Iz tog razloga većina istraživanja je provedena u laboratorijskim uvjetima i umanjenom mjerilu pri čemu se pokazalo da se rezultati ne mogu vjerno preslikati u prirodu. Značajniji napredak istraživanja podlokavanja ostvaren je krajem 20. stoljeća kada dolazi do naglog razvoja hidroakustičke opreme i numeričkih modela. Građevinski fakultet u Zagre-

bu bio je partner u provedbi međunarodnog projekta BRIDGE SMS kojem je jedan od ciljeva bio standardizirati proces kvantitativne ocjene stanja mostova u odnosu na erozivno djelovanje toka (Bekić i drugi, 2018). U sklopu projekta je razvijen sustav ranog upozoravanja (Bekić i drugi, 2018) kojim se pomoću računalne aplikacije prate hidrološki parametri na lokaciji mosta i susjednim postajama. Na temelju tih podataka numeričkim modelom se simulira otjecanje sa sliva i tečenje u vodotoku do lokacije mosta te predviđa izdizanje vodnog vala. U slučaju prelaska postavljene granice, sustav upozorava korisnika da mora poduzeti određene mjere i radnje u skladu s protokom vodnog vala, veličinom mosta, važnosti prometnice i sl. Vlasnici mostova su prepoznali potrebu uspostavljanja ovakvog tipa sustava kojim je moguće pratiti relevantne hidrauličke parametre na lokaciji mosta u stvarnom vremenu kako bi se moglo pravovremeno reagirati i osigurati stabilnost konstrukcije (Apel i drugi, 2012; Prendergast i Gavin, 2014; Selvakumaran i drugi, 2018; Tubaldi i drugi, 2017).

Začetak provedbe morfodinamičkih analiza stanja korita kojima je identificirana opasnost od podlokavanja kod mostova koji premošćuju najveće hrvatske rijeke bio je gubitak stabilnosti željezničkog mosta Sava-Jakuševac 2009. godine (Gilja i drugi, 2010; Kuspilić i drugi, 2010). Nakon tog događaja provedena su istraživanja na mostovima za koje je empirijski bilo procijenjeno da bi mogli biti u značajnoj opasnosti od podlokavanja: kako željezničkim (Kuspilić i drugi, 2010; Kuspilić i Gilja, 2016; Kuspilić i drugi, 2013) tako i cestovnim (Gilja i drugi, 2017; Kuspilić i Gilja, 2018). Specifičnost mostova u Hrvatskoj u odnosu na europsku praksu je izgradnja masivnih stupova s relativno plitkim temeljima koji su izloženi znatnom hidrodinamičkom opterećenju jer su najveće hrvatske rijeke regulirane no ne i pretvorene u akumulacije koje bi usporile tok i smanjile turbulenciju oko stupova. Kombinacija navedenih parametara stvara izrazito nepovoljan hidrodinamički okoliš u kojem dolazi do intenzivnog pokretanja nanosa, ne samo lokalno u zoni mosta već i na širim dionicama vodotoka.

## 2. TRENUTNO STANJE U PODRUČJU

Osnovni cilj istraživanja Zaida i drugih bio je analizirati karakteristike turbulentnog polja brzine oko kružnog stupa i prijenosa količine gibanja prema koritu te procijeniti povećanje posmičnog naprezanja na dno korita oko stupa mosta. Pokazali su da se rezultati numeričkog modela razvijenog u istraživanju dobro slažu s rezultatima iz dostupnih eksperimentalnih podataka (Zaid i drugi, 2019) što potvrđuje upotrebljivost numeričkih modela pri istraživanju podlokavanja. Rezultati ove studije mogu se upotrijebiti kao smjernica za razvoj odgovarajućeg numeričkog modela za simulaciju 2D i 3D turbulentnog opstrujavanja stupa kvadratnog i kružnog poprečnog presjeka. Guven i Gunal su razvili hibridni matematičko-numerički model za simulaciju vremenskog razvoja kaverne i pripadnog polja tečenja nad njim, koji su kalibrirali eksperimentalnim podacima preuzetim iz literature. Vremenski razvoj kaverne simuliran hibridnim modelom pokazao je dobro poklapanje s eksperimental-

nim podacima u uvjetima izražene turbulencije (Guven i Gunal, 2010). Empirijske zavisnosti proizašle iz ovakvih istraživanja imaju najveću upotrebu pri procjeni dubine podlokavanja oko nezaštićenih stupova i na temelju rezultata se izvodila zaštita od podlokavanja, od kojih je jedna od najraširenijih metoda zaštite riprapom (Melville i Coleman, 2000). Međutim, pokazalo se da izvedba riprapa ne sprječava nastajanje kaverne uslijed podlokavanja, već samo uzrokuje njeno odbacivanje dalje od mosta gdje uzrokuje morfološke promjene u koritu i predstavlja opasnost po infrastrukturu i hidrotehničke građevine. Istraživanje urušavanja riprapa zaštite u kavernu i povezane opasnosti po stabilnost i sigurnost mosta su rijetko istraživane (Ji i drugi, 2013), a pogotovo ne za riprapi u obliku kakav se tradicionalno primjenjuje u Hrvatskoj. U literaturi postoje brojne jednadžbe za izračun podlokavanja, no njihova primjena na mostove u Hrvatskoj se pokazala nepouzdanom, kao što je pokazano prethodnim istraživanjima (Cikojević i Gilja, 2019; Cikojević i drugi, 2019). Ne postoji jednadžba kojom bi se moglo sa sigurnošću tvrditi da daje točnu procjenu dubine kaverne na temelju ulaznih hidrauličkih parametara. Pojedine jednadžbe su dale točne rezultate dubine kaverne, no nije moguće apriori sa sigurnošću reći da je neka jednadžba prikladna za primjenu na mostovima u Hrvatskoj (Gilja i drugi, 2019). Nedavna istraživanja preporučaju upotrebu daljinskog mjerenja za praćenje podlokavanja uz pomoć raznih tipova senzora no uglavnom se temelje na sensorima koji su pričvršćeni na most i zahtijevaju poznavanje točne lokacije na kojoj će se pojaviti kaverna te u protivnom nisu upotrebljiva (Briaud i drugi, 2011; Topczewski i drugi, 2016).

Ovim projektom planira se razviti ScourBuoy sustav za daljinsko praćenje erozije riprapa zaštite od podlokavanja na velikim rijekama u stvarnom vremenu za vrijeme velikih voda kojim bi se omogućilo mjerenje u uvjetima koji ograničavaju primjenu tradicionalnih metoda. Istraživanje utjecaja velikovodnih događaja na razvoj kaverni temelji se na pristupu hibridnog modeliranja – združenog eksperimentalnog ispitivanja na fizičkom modelu umanjenog mjerila i numeričkih simulacija u mjerilu prototipa. Oba modela će biti verificirana podacima prikupljenim ScourBuoy sustavom za dokazivanje pouzdanosti zaključaka izvedenih na temelju modelskih podataka.

### 3. METODOLOGIJA

Istraživački ciljevi projekta su (1) razviti prototip plutače za mjerenje podlokavanja u stvarnom vremenu - ScourBuoy; (2) kalibrirati fizički model korištenjem terenskih mjerenja; (3) unaprijediti empirijske zavisnosti za određivanje ravnotežnih karakteristika kaverne laboratorijskim ispitivanjima na fizičkom modelu i numeričkim simulacijama, (4) istražiti zavisnost turbulentnih karakteristika toka i vremenskog razvoja kaverne laboratorijskim ispitivanjima na fizičkom modelu i numeričkim simulacijama i (5) istražiti zavisnost turbulentnih karakteristika toka i početnog pomaka čestica u kaverni. Cjelokupnim istraživanjem razvit će se znanje i mjerna oprema za praktično daljinsko praćenje erozije oko riprapa zaštite na velikim rijekama u stvarnom

vremenu. Relevantni hidraulički i geometrijski parametri bit će prikupljeni mjerenjem na terenu i hibridnim modeliranjem. U svrhu provedbe terenskih mjerenja planira se razviti prototip plutače ScourBuoy opremljene sensorima za daljinsko mjerenje dubine korita i vlastitog prostornog kretanja. Tehnologija razvijena u sklopu projekta omogućava upotrebu ovih uređaja u sinkroniziranom sustavu namijenjene daljinskom mjerenju promjena batimetrije korita u uvjetima poplave. Opsežno testiranje ScourBuoy prototipa u terenskim uvjetima bit će provedeno usporednim snimanjem s brodice korištenjem akustičkog strujomjera ADCP i višesnopnog dubinomjera ODOM ES3 (Kuspilić i drugi, 2013).

Pojava poplava je relativno česta pojava u prirodi, no intervali njezinog pojavljivanja nadilaze uobičajeno vremensko razdoblje potrebno za provođenje znanstvenog istraživanja. Stoga je za opis pojave podlokavanja pod utjecajem riječnog toka u prirodi potrebno uvjete replicirati u manjem mjerilu koje omogućava simuliranje željenih hidrauličkih uvjeta u modelu. U tu svrhu koristit će se eksperimentalna metoda laboratorijskog ispitivanja u hidrauličkom kanalu (Gilja i drugi, 2018). Na temelju podataka snimljenih terenskim mjerenjima verificirat će se fizički model, na način da se odredi prikladno mjerilo modela, protok crpke koja simulira tečenje te hrapavost korita i pripadna krupnoća materijala nanosa riječnog korita koji vjerno repliciraju stvarne uvjete u prirodi (Gilja i drugi, 2017). Hibridno modeliranje podrazumijeva komplementarno prikupljanje podataka eksperimentalnim fizičkim modelom (I. faza) i numeričkim simulacijama (II. faza), pri čemu svaki od modela svojim prednostima nadopunjava mane drugog. Upotrebom numeričkog modeliranja planira se napraviti model u mjerilu prototipa kojim se ispitivanje karakteristika polja brzine i morfodinamičkog razvoja korita može ubrzati u odnosu na fizički model, promatrati veća dionica vodotoka te preuzeti trenutne vrijednosti polja brzine i batimetrije korita u svakoj točki u svakom vremenskom koraku. Fizičkim modelom u umanjenom mjerilu pratit će se razvoj kaverne pod utjecajem lokalnog polja turbulencije, a numeričkim modelom u mjerilu prototipa simulirati hidraulički okoliš na potezu šire dionice. Numerički model će biti verificiran korištenjem podataka s terenskih mjerenja korištenjem statističkih metoda na isti način kao i fizički model. Na temelju baze podataka analizirat će se uzročno-posljedična veza između karakteristika toka i razvoja kaverne uslijed podlokavanja upotrebom dimenzionalne analize, valične analize (Potočki i drugi, 2017) i kvadrantne analize (Gilja i drugi, 2017).

Temeljnu istraživačku grupu čini četvero zaposlenika Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta i jedan zaposlenik Sveučilišta u Zagrebu Geodetskog fakulteta te doktoranda i poslijedoktoranda koji su zaposleni na projektu uz suradnike s inozemnih institucija. Tijekom provedbe projekta predviđen je razvoj karijere dvoje mladih istraživača/doktoranada te pet studenata diplomskog studija koji će svoju akademsku karijeru upotpuniti znanstveno-istraživačkim radom. Diseminacija rezultata projekta odvijat će se objavom znanstvenih radova, prezentacijama na konferencijama, javnim radionicama organiziranim na Građevinskom fakultetu, a napredak projekta se može pratiti na službenim web stranicama ([www.grad.hr/r3peat](http://www.grad.hr/r3peat)) i društvenim mrežama.

#### 4. ZAKLJUČAK

Doprinos prikazanog istraživanja u odnosu na aktualno stanje područja ogleda se u premještanju težišta istraživanja na mostove oko kojih je već izvedena riprap zaštita od podlokavanja – postojećih građevina čija je stabilnost i s njom povezana sigurnost nepoznanica u hidrauličkom okolišu pod utjecajem klimatskih promjena i s njima povezanih velikovodnih događaja. Implementacija rezultata istraživanja u sustave gospodarstva mostovima omogućava istraživačima, projektantima i agencijama koje gospodare mostovima brzo i pravovremeno prikupljanje relevantnih podataka, pravovremeno donošenje odluka o mjerama i radnjama potrebnim za osiguranje stabilnosti mosta tijekom nailaska velikih voda. Učinak dobivaju pravovremenih informacija je u omogućavanju preventivnog djelovanja, sprječavanje potencijalnog oštećenja mostova i sprječavanje nastanka šteta čime se ostvaruju preduvjeti za ekonomski i društveni razvoj.

#### LITERATURA

- [1] Apel, H., Hung, N.G., Thoss, H., Schöne, T. (2012): *GPS buoys for stage monitoring of large rivers*, Journal of Hydrology, 412-413, str. 182-192.
- [2] Bekić, D., Kerin, I., Cahill, P., Michalis, P., Laphorne, J., Šolman, H., Gilja, G., Potočki, K., Pakrashi, V., McKeogh, E. (2018): *BRIDGE SMS - Innovative Solution for Management of Bridges Over Water*, 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure CETRA 2018, (ur. Lakušić, S.), University of Zagreb Faculty of Civil Engineering, str. 57-63.
- [3] Bekić, D., Kerin, I., Verkade, J., Gilja, G., Pakrashi, V., McKeogh, E. (2018): *Flood early warning system for supporting decision processes on roads and bridges*, TUD COST Action TU1406 - Quality specifications for roadway bridges, standardization at a European level, (ur. Matos, J.C. i dr.), Faculty of Civil Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland, str. 465-470.
- [4] Cikojević, A., Gilja, G. (2019): *Pregled postojećeg stanja znanja u istraživanju razvoja odbačene kaverne uz riprap zaštitu*, Sedmi skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti (ur. Bogdanić, A. i dr.), Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, str. 71-76.
- [5] Cikojević, A., Gilja, G., Kuspilić, N. (2019): *Sensitivity analysis of empirical equations applicable on bridge piers in sand-bed rivers*, 16th International symposium Water management & hydraulic engineering WMHE 2019, (ur. Pelivanovski, P. i dr.), Ss Cyril and Methodius University, Civil Engineering Faculty, Skopje, North Macedonia, str. 100-108.
- [6] Cook, W. (2014): *Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends*, Utah State University, Logan, Utah.



- 
- [7] FHWA (2011): *Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology*, Briaud, J.L., Hurlbauss, S., Chang, K.A., Yao, C., Sharma, H., Yu, O.Y., Darby, C., Hunt, B.E., Price, G.R., Austin, Texas.
- [8] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D. (2011): *Impact of morphodynamical changes on the bridge stability: Case study of Jakuševac bridge in Zagreb*, Current events in hydraulic engineering, (ur. Sawicki, J.M.& Zima, P.), Gdansk University of Technology, Gdansk.
- [9] Gilja, G., Kuspilić, N., Bekić, D. (2012): *Utjecaj degradacije korita na sigurnost mostova*, Sabor hrvatskih graditelja 2012: Graditeljstvo - poluga razvoja, (ur. Lakušić, S.), Hrvatski savez građevinskih inženjera Zagreb, str. 795-806.
- [10] Gilja, G., Kuspilić, N., Potočki, K. (2017): *Analiza primjenjivosti empirijskih modela za opis karakteristika polja dina*, Građevinar, 69/6, str. 427-436.
- [11] Gilja, G., Kuspilić, N., Tečić, D. (2017): *Morphodynamic impact of scour countermeasures on riverbed topography*, 15<sup>th</sup> International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, (ur. Bekić, D. i dr.), Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb, str. 176-183.
- [12] Gilja, G., Marić, M., Kuspilić, N. (2019): *Calculation of local scour at bridges over large Croatian rivers*, Geophysical Research Abstracts - EGU General Assembly 2019, 21, str. EGU2019-1917.
- [13] Gilja, G., Oskoruš, D., Kuspilić, N. (2010): *Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences*, BALWOIS Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, (ur. Morell, M. i dr.), ffp-1826(p9).
- [14] Gilja, G., Valyrakis, M., Michalis, P., Bekić, D., Kuspilić, N., McKeogh, E. (2017): *Investigation of flow pattern at scoured abutment in non-uniform gravel bed*, 15<sup>th</sup> International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, (ur. Bekić, D. i dr.), Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb, str. 80-81.
- [15] Gilja, G., Valyrakis, M., Michalis, P., Bekić, D., Kuspilić, N., McKeogh, E. (2018): *Physical modelling of flow and geomorphological conditions along an arched bridge with a scoured abutment*, 5<sup>th</sup> IAHR Europe Congress — New Challenges in Hydraulic Research and Engineering, (ur. Armanini, A.& Nucci, E.), The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), str. 265-266.
- [16] Guven, A., Gunal, M. (2010): *Hybrid modelling for simulation of scour and flow patterns in laboratory flumes*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 62/3, str. 291-312.
- [17] Ji, U., Yeo, W., Kang, J. (2013): *Subsidence of riprap protection without filters for different installation types of riprap around a pier in sands*, Journal of Hydro-environment Research, 7/1, str. 41-49.

- [18] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G. (2010): *Praćenje morfodinamičkih promjena korita vodotoka u zoni stupova mostova*, Prometnice - nove tehnologije i materijali, (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, Zagreb.
- [19] Kuspilić, N., Bekić, D., Gilja, G., McKeogh, E. (2010): *Monitoring of river channel morphodynamical changes in the zone of bridge piers*, First International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA 2010), str. 107, p8.
- [20] Kuspilić, N., Gilja, G. (2016): *Podvodni pregled mostova*, Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo, (ur. Lakušić, S.), Hrvatski savez građevinskih inženjera Zagreb, str. 287-300.
- [21] Kuspilić, N., Gilja, G. (2018): *Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova*, E-zbornik: elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta, 8/16, str. 24-38.
- [22] Kuspilić, N., Gilja, G., Bekić, D., Zubčić, K. (2013): *Podvodni pregled stupova mostova i korita vodotoka*, Mjerenja, ispitivanja i monitoring na prometnicama, (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [23] Melville, B.W., Coleman, S.E. (2000): *Bridge scour*, Highlands Ranch, Colo. : Water Resources Publications, LLC, str. 550.
- [24] Potočki, K., Gilja, G., Sović Kržić, A., Kuspilić, N. (2017): *Multiscale analysis of riverbed topography*, 15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering, (ur. Bekić, D. i dr.), Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia, University of Zagreb, str. 33.
- [25] Prendergast, L.J., Gavin, K. (2014): *A review of bridge scour monitoring techniques*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6/2, str. 138-149.
- [26] Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C., Middleton, C. (2018): *Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 73, str. 463-470.
- [27] Topczewski, Ł., Cieśla, J., Mikołajewski, P., Adamski, P., Markowski, Z. (2016): *Monitoring of Scour Around Bridge Piers and Abutments*, Transportation Research Procedia, 14, str. 3963-3971.
- [28] Tubaldi, E., Macorini, L., Izzuddin, B.A., Manes, C., Laio, F. (2017): *A framework for probabilistic assessment of clear-water scour around bridge piers*, Structural Safety, 69, str. 11-22.
- [29] Wardhana, K., Hadipriono, F.C. (2003): *Analysis of Recent Bridge Failures in the United States*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 17/3, str. 144-150.
- [30] Zaid, M., Yazdanfar, Z., Chowdhury, H., Alam, F. (2019): *Numerical modeling of flow around a pier mounted in a flat and fixed bed*, Energy Procedia, 160, str. 51-59.

[31] Zhang, Y. (2016): *Economic Impact of Bridge Damage in A Flood Event*, RMIT University, Melbourne, Australia.

## **ZAHVALA**

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

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**DJELATNOST GEOTEHNIČKOG LABORATORIJA  
GEOTEHNIČKOG FAKULTETA**

**ACTIVITIES OF GEOTECHNICAL LABORATORY  
OF GEOTECHNICAL FACULTY**

**Goran Jeftić<sup>a</sup>, Albino Gradečak<sup>a</sup>**

**SAŽETAK**

Razvojem geotehničkog inženjerstva nametnula se potreba za određivanjem sve većeg broja parametara tla, neophodnih za projektiranje i izvođenje raznih geotehničkih zahvata. Zahtjevi za pouzdanim rezultatima ispitivanja potaknuli su usavršavanje postojećih, ali i razvoj novih metoda mjerenja, kako u laboratorijskim uvjetima tako i ispitivanjima „in situ“. Za njihovu primjenu dizajniran je cijeli niz novih uređaja i opreme koji omogućuju registriranje velikog broja parametara tla i stijena, što doprinosi pouzdanijoj procjeni njihovih fizikalno-mehaničkih svojstava.

Dobro organiziran i opremljen geotehnički laboratorij može zadovoljiti sve tražene zahtjeve u pogledu mjernih mogućnosti i pouzdanosti rezultata ispitivanja u okviru normi koje koristi u svom radu. Osim standardnih metoda ispitivanja u laboratoriju se prema potrebi izvode i specijalna, nestandardna, posebno osmišljena ispitivanja, na opremi koja je rezultat znanja i dizajna djelatnika Geotehničkog fakulteta u znanstvenim i znanstveno-nastavnim zvanjima.

**ABSTRACT**

Advanced geotechnical engineering has imposed the need to determine the increasing number of soil parameters necessary for the design and execution of various geotechnical interventions. Requirements for reliable test results have encouraged the

---

<sup>a</sup> Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, 42000, Hrvatska, goran.jeftic@gfv.unizg.hr, albino.gradecak@gfv.unizg.hr

use of existing but also the development of new measurement methods, both in laboratory and in situ testing. For their application, a whole range of new devices and equipment was designed that enabled the registration of a large number of soil and rock parameters, which contribute to a more reliable estimation of their physical and mechanical properties.

A well-organized and equipped geotechnical laboratory can meet all the requirements in terms of measurement capabilities and reliability of test results within the standards used in their work. In addition to standard testing methods, non-standard, specially designed tests can be carried out on the laboratory equipment as a result of the knowledge and design of the Geotechnical Faculty employees in scientific and scientific-teaching occupations.

*KLJUČNE RIJEČI: geotehnički laboratorij, geotehnički fakultet, parametri tla, akreditacija*

*KEYWORDS: geotechnical laboratory, geotechnical faculty, soil parameters, accreditation*

## 1. UVOD

Od malog podruma stare zgrade u Hallerovoj aleji 1 u Varaždinu do današnjih šest prostorija, od ukupno 182 m<sup>2</sup> u novoj zgradi, prošlo je više od 50 godina. Razvoj Geotehničkog laboratorija pratio je vrijeme, potrebu za obrazovanjem geotehničkog i rudarskog kadra, inženjera inženjerstva okoliša te potrebe gospodarstva. Laboratorij je ustrojbeno jedinica unutar Zavoda za geotehniku Geotehničkog fakulteta i kao takav daje važan doprinos znanstvenom razumijevanju fundamentalnih ponašanja tla. Laboratorij sudjeluje u nastavi na preddiplomskom, diplomskom i doktorskom studiju Inženjerstvo okoliša te u znanstvenim, stručnim i gospodarskim projektima iz područja graditeljstva, eksploatacije mineralnih sirovina, inženjerstva i zaštite okoliša. Od samih početaka rada laboratorija težilo se napredovanju kako u kvaliteti samih ispitivanja tako i u svim segmentima rada laboratorija. Potvrda kontinuirane primjene „dobre laboratorijske prakse“ stigla je 2014. godine kada je uspostavljen Sustav za upravljanje kvalitetom prema normi HRN EN ISO/IEC 17025 te je laboratorij akreditiran od strane Hrvatske akreditacijske agencije.

## 2. METODE ISPITIVANJA I PARAMETRI

Koncept eksperimentalnog istraživanja svojstava tla Karl Terzaghi je zapisao na jednom listu papira, u jednome danu, a onda mu je trebalo više od 7 godina da ga uspostavi. Oprema koju je koristio uključivala je tabakeru, metalnu kutiju za cigare kao i druge za laboratorij „neophodne“ predmete koje je pokupio s fakultetskog (sada Istanbul Technical University) deponija (Petroski, 1996). Tako je i nesvjesno uspostavljena jaka veza geotehlike i inženjerstva okoliša.

U sklopu Visoke geotehničke škole 1973. godine Geotehnički laboratorij je opremljen neophodnom opremom i već 1974. godine započinje s geomehaničkim i geokemijskim ispitivanjima tla i stijena.

Preseljenjem u novu zgradu 1976. godine dobiveni su adekvatniji prostori (Meštrić, 1981). Nastavljeno je opremanje Geotehničkog laboratorija koji od začetka sudjeluje u izvođenju nastave, a od akademske godine 1990./1991. je trajno integriran u nastavni proces Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Veliki preokret u radu laboratorija se dogodio 2006. godine kada su dobivena bespovratna namjenska sredstva Ministarstva znanosti i visokog obrazovanja (danas Ministarstvo znanosti i obrazovanja). Tada je omogućena kompletna adaptacija laboratorijskih prostorija i kupovina nove, digitalizirane opreme (Slika 1). U rujnu iste godine svečano su ga otvorili tadašnji dekan prof. dr. sc. dr. h. c. Mladen Kranjčec i rektorica prof. dr. sc. Helena Jasna Mencer (Zavrtnik, 2018). Digitalizacijom opreme te kompjuterskim nadziranjem oslobođen je i dio vremena koje je omogućilo da laboratorij pod vodstvom dipl. ing. geoteh. Damira Štuheca pokrene postupak akreditacije prema normi HRN EN ISO/IEC 17025. Potvrda kvalitete i upravljanja kvalitetom stigla je 2014. godine od strane Hrvatske akreditacijske agencije kojom laboratorij postaje akreditiran za određivanje 13 parametara tla prema važećim priznatim svjetskim, europskim i hrvatskim normama. Uvođenjem studijskog programa Inženjerstvo okoliša na Geotehničkom fakultetu laboratorij je uključen u projekte vezane uz inženjerstvo i zaštitu okoliša. Geotehnički laboratorij je podijeljen u 6 zasebnih prostorija. Pri razmještanju opreme između i unutar prostorija vodilo se računa da se smanji međusobni utjecaj efekata raznih vrsta ispitivanja. Uz prostorije za obavljanje ispitivanja, laboratorij raspolaže arhivom i vlažnom komorom u kojoj se čuvaju uzorci tla. Zasebno je i Geotehnički praktikum (Slika 2) koji se koristi za izvođenje nastave i održavanje studentskih vježbi.



*Slika 1. Laboratorij za geomehanička ispitivanja*



*Slika 2. Geotehnički praktikum*

Laboratorij je opremljen, a zaposlenici educirani za određivanja raznih parametara tla pomoću 60 ispitnih metoda (Tablica 1). One se mogu podijeliti u nekoliko cjelina, kao što je određivanje fizikalnih svojstava tla i stijena, klasifikacijska ispitivanja koja sadrže određivanje granulometrijskog sastava i Atterbergovih granica, zatim određivanje deformacijskih svojstava tla, posmične čvrstoće i određivanje posebnih svojstava tla. Svaka od nabrojanih cjelina sadrži u sebi više različitih metoda ispitivanja koje se izvode prema jednoj ili više međunarodno prihvaćenih ili nacionalnih normi (EN, BS, ASTM, HRN EN...). Većina ispitivanja se radi na modernoj opremi renomiranih proizvođača: uređaj za izravni posmik, troosni uređaj (Slika 4), edometri, konusni penetrometar, Proctorov uređaj, uređaj za određivanje CBR-a. Starija oprema je održavana i nadograđivana te je ona i danas u upotrebi. Svi mjerni instrumenti se uz periodičku internu provjeru redovito umjeravaju u akreditiranim umjernim laboratorijima. Laboratorij je sudjelovao u znanstvenom projektu pri osmišljavanju i izgradnji hidrauličkog edometra velikih dimenzija - promjera 500 mm i visine 200 mm (Slika 3). Koristi se za ispitivanja mehaničkih svojstava mehaničko biološki obrađenog otpada (MBO). U sklopu znanstvenog i istraživačkog rada, osim standardnih metoda ispitivanja laboratorij provodi i razvija ispitivanja koja izlaze iz normiranih okvira.



Slika 3. „Veliki“ edometar



Slika 4. Troosni uređaj

Tablica 1. Ispitivanja koja provodi Geotehnički laboratorij

br.	PARAMETRI TLA I STIJENE	METODE ISPITIVANJA		
1	*Određivanje vlažnosti materijala	*sušenje do stalne mase u sušioniku		1
		sušenje do stalne mase u mikrovalnoj pećnici		2
		terenska metoda SPEEDY MOISTURE TEST		3
2	*Određivanje obujamske gustoće tla	*mjerenjem dimenzija uzorka:	- *trimanjem	4
			- *tankostijenim cilindrom	5
			- Core Cutter terenska metoda	6
		potapanjem u vodu		7
		pomoću volumetra:	- s tankostijenim balonom	8
			- pomoću kalibriranog pijeska	9
		maksimalna gustoća		10
		minimalna gustoća		11
3	*Određivanje gustoće čvrstih čestica tla	*pomoću piknometra kuhanjem		12
4	*Određivanje granica konzistencije	*granica tečenja	- *pomoću jedne točke - šiljak	13
			- pomoću više točaka - šiljak	14
			- pomoću jedne točke - Casagrande	15
			- pomoću više točaka - Casagrande	16
		*granica plastičnosti i indeks plastičnosti		17
		granica linearnog stezanja		18
5	*Određivanje granulometrijskog sastava tla	*sijanje		19
		*areometriranje		20
		*kombinirano		21
6	Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće tla	sa slobodnim bočnim širenjem		22
		džepnim penetrometrom		23
7	*Određivanje drenirane posmične čvrstoće tla izravnim posmikom u maloj ćeliji	*vršna posmična čvrstoća		24
		rezidualna posmična čvrstoća		25
		Krey - Tiedemann metoda		26
8	Određivanje posmične čvrstoće troosnim ispitivanjem	UU test		27
		CIU test		28
		CID test		29
9	Određivanje nedrenirane kohezije u laboratoriju i na terenu	padajući šiljak		30
		laboratorijska krilna sonda:	- vršna	31
			- rezidualna	32
			- određivanje senzitivnosti tla	33
		terenska krilna sonda:	- vršna	34



10	*Jednodimenzionalna konsolidacija tla (stišljivost)	*mehanički edometar		35	
		hidraulički edometar s mjerenjem pornog tlaka		36	
11	*Određivanje propusnosti tla	*FH metoda:	- *kompresijski permeametar	37	
			- kompaktirani prema Proctoru	38	
		CH metoda		39	
		kontrolirani protok		40	
12	*Određivanje optimalne vlažnosti i najveće suhe gustoće tla	*standardni Proctor:	u laboratoriju:	- *metoda A	41
				- *metoda B	42
			na terenu		43
		*modificirani Proctor:	u laboratoriju:	- *metoda A	44
				- *metoda B	45
13	Određivanje vrijednosti CBR-a	posredni CBR		46	
		neposredni CBR:	- s potapanjem	47	
			- bez potapanja	48	
14	Sadržaj organskih tvari	pomoću vodik peroksida		49	
		žarenjem na 440 °C		50	
15	Sadržaj organskih i gorivih tvari	žarenjem na 700 °C		51	
16	Određivanje minimalnog kuta pokosa	nasipavanjem suhog materijala		52	
17	Određivanje pH vrijednosti tla	pH metar		53	
18	Određivanje reoloških svojstava tla	edometar		54	
19	Određivanje modula stišljivosti tla kružnom pločom	statička:	- DIN	55	
			- HRN	56	
		dinamička		57	
20	Određivanje jednoosne tlačne čvrstoće stijene	posredno:	- Schmidt-ov čekić	58	
			- PLT	59	
		neposredno pomoću hidrauličke preše		60	

\* akreditirane metode ispitivanja

Od osnutka do danas laboratorij je sudjelovao u izradi više od 2.500 geotehničkih elaborata, studija ili projekata, koji sadrže geotehnička laboratorijska ispitivanja. Od većih projekata na razini Republike Hrvatske ili u suradnji s gospodarstvom mogu se izdvojiti:

- Izgradnja AC Zagreb-Goričan od 1990. do 1998.
- Izgradnja tunela Vrtlinovec na AC Zagreb-Goričan, 1999.

- Geotehnički elaborat za potrebe Jadranskog naftovoda i proširenja rezervoarskog prostora na terminalu Sisak i Virje, 2004.
- Terenska i laboratorijska geotehnička ispitivanja za potrebe ocjene pogodnosti materijala za ugradnju u brtveni sloj odlagališta otpada Piškornica kod Koprivnice i provedba kontrole kvalitete materijala kod i nakon ugradnje u tijelo odlagališta otpada u periodu od 2005. do 2010.
- Projekti sanacije brojnih klizišta u Republici Hrvatskoj, posebno na području Bednje od 2005. do 2019.
- Laboratorijska ispitivanja uzoraka s dna rijeka u suradnji s DHMZ-om od 2007.
- Izvođenje laboratorijskih ispitivanja za potrebe izrade projekata zaštite građevinske jame podzemnih garaža na Kapucinskom trgu u Varaždinu od 2008. do 2011.
- Laboratorijska ispitivanja za saniranje nasipa na desnoj i lijevoj obali rijeke Save nizvodno od Zagreba, 2010.
- Kontrolna ispitivanja zbijenosti i ugrađenog materijala na dunavsko-dravskim nasipima u Kopačkom ritu, 2011.
- Laboratorijska ispitivanja zbijenosti i ugrađenog materijala na nasutoj brani u Opatovcu, 2011.
- Laboratorijska ispitivanja u svrhu obnove sustava piezometara na nasipima HE Varaždin, 2015.
- Ispitivanja pogodnosti otpadnog stakla od neonskih svjetiljki i CRT monitora za ugradnju u donji ustroj cestovne konstrukcije, 2015.
- Kontrolna ispitivanja zbijenosti i ugrađenog materijala na dunavskim nasipima na potezu Batina-Gomboš, 2017.
- Izvođenje laboratorijskih ispitivanja za potrebe izrade projekta akumulacije Bršljanica, 2017.
- Izvođenje laboratorijskih ispitivanja za potrebe izrade projekta LNG terminala Rijeka, 2018.
- Izvođenje laboratorijskih i kontrolnih ispitivanja za potrebe izrade projekta proizvodno-skladišne hale površine 22475 m<sup>2</sup> u Ludbregu, 2018. i 2019.
- Izvođenje laboratorijskih ispitivanja za potrebe sanacije nasipa akumulacijskog jezera Dubrava kod Preloga, 2019.
- Laboratorijska ispitivanja projekta Hrvatskih voda u svrhu istraživačkog monitoringa sedimenta dna vodotoka i jezera u Republici Hrvatskoj od 2018.

Trenutni znanstveni projekti u kojima sudjeluje Geotehnički laboratorij:

- Znanstveno-istraživački projekt HRZZ-a naziva „Ispitivanje i modeliranje mehaničkog ponašanja bioosušenog otpada kao preduvjet energetske uporabe“ (<http://wte.gfv.hr/>), voditelj projekta izv.prof.dr.sc. Igor Petrović, 2018.

- Institucijski projekt Geotehničkog fakulteta pod nazivom „Primjena recikliranog građevinskog otpada u građevinarstvu“, kategorija 1 (primijenjena istraživanja), voditelj projekta izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić, 2019.
- Projekt Europskog fonda za regionalni razvoj u okviru poziva „Ulaganje u znanost i inovacije - prvi poziv“ naziva „Otpad & Sunce u službi fotokatalitičke razgradnje Mikroonečišćivala u vodama (Os-Mi)“, voditeljica projekta doc.dr.sc. Ivana Grčić, 2019.

### 3. ZAKLJUČAK

Sve češći vremenski ekstremi ponekad imaju katastrofalne posljedice (prelijevanje ili pucanje riječnih nasipa, pojava klizišta, odroni). Sve više rijeka, tla i vode u tlu su izloženi onečišćenjima prouzrokovanim neadekvatnim zbrinjavanjem otpada. Kao dio visokoobrazovne i znanstvene institucije koja provodi studijski program „Inženjerstvo okoliša“ može se reći da je obaveza laboratorija stalni uspon u razvoju i prilagodba potrebama današnjeg vremena. To je razlog zašto laboratorij između ostalog sudjeluje u izgradnji nepropusnih odlagališta otpada, stabilnih riječnih i akumulacijskih nasipa, sanaciji klizišta uz zaštitu okoliša, njihovoj kontroli tijekom i nakon izvedbe, ispitivanjima raznih vrsta otpada u svrhu prenamjene u građevne materijale, ali prije svega sudjeluje u obrazovanju budućih generacija mladih stručnjaka i znanstvenika te znanstvenom napredovanju svojih djelatnika. Dobar laboratorij ne čini samo primjereno opremljen i adekvatan prostor, provjerena i umjerena oprema i dobro održavani pribor, već i stručni, educirani i motivirani ispitivači, koji su glavna karika pouzdanosti rezultata ispitivanja i uspješnosti njegovog rada.

### LITERATURA

- [1] Geotehnički fakultet (2018): *Monografija Laboratorij za geokemiju okoliša – povijesni pregled prvih 10 godina postojanja i djelovanja*, Zavrtnik, S. [autor], Varaždin.
- [2] Petroski, H. (1996): *Soil Mechanics*, American Scientist, 1996, vol. 84, str. 428-432.
- [3] Viša geotehnička škola Varaždin (1981): *Monografija*, Meštrić, M. [glavni i odgovorni urednik], Varaždin.

## **EKOLOŠKI STATUS SEDIMENATA U RIBNJACIMA NA PODRUČJU RAIPURA U INDIJI**

## **ECOLOGICAL STATUS OF POND SEDIMENTS IN RAIPUR, INDIA**

**Vinod Jena<sup>a</sup>, Natalija Matić<sup>b</sup>, Sapana Gupta<sup>c</sup>, Mirko Stanković<sup>d</sup>,  
Krešimir Maldini<sup>b</sup>, Ivan Tot<sup>b</sup>, Dragan Majić<sup>b</sup>, Stjepan Kordić<sup>e</sup>**

### **SAŽETAK**

Sedimenti ribnjaka imaju važnu ulogu u ekosustavu. Cilj ovoga rada je procijeniti kvalitetu sedimenata deset ribnjaka grada Raipura, glavnog grada Chhattisgarha u Indiji, odnosno njihov ekološki status. U sedimentima su istraživani ekotoksični elementi u tragovima. Analize elemenata u tragovima Cd, Cu, Pb, As i Cr izvedene su uz pomoć ICP-AES prema europskim normama. Nedostatak monitoringa ekotoksičnih elemenata u sedimentima može imati za posljedicu njihov negativan učinak na ekosustav. Poznat je učinak sedimenata na kvalitetu vode u ribnjacima te su dobivene informacije korisne za donošenje odluka mjerodavnih institucija za potrebe upravljanja vodnim površinama. Prema izračunu Geo-akumulacijskog indeksa, Faktora zagađenja, Stupnja zagađenja i Indeksa opterećenja zagađenja sedimenti istraživanih ribnjaka su nezagađeni do blago zagađeni. Prema navedenome radi se o sedimentima koji još uvijek nisu štetni za ekosustav ribnjaka iako je prisutan blagi trend porasta vrijednosti zagađenja.

---

<sup>a</sup> Govt Nagarjuna P G College of Science, Department of Chemistry, G E Road, Raipur, 492010, India, jenavinod@gmail.com

<sup>b</sup> Hrvatske vode, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, 10000, Hrvatska, nmatić@voda.hr, kmaldini@voda.hr, itot@voda.hr, dmajic@voda.hr

<sup>c</sup> Department of Veterinary Services, G E Road, Raipur, 492010, India, sapana.gupta02@gmail.com

<sup>d</sup> Vodoprojekt, Gen. Mihajla Nedeljkovića, 85, Beograd, 11070, Srbija, mirsta@eunet.rs

<sup>e</sup> Rudar d.o.o., Katunarićeva 11, Split, 21000, Hrvatska, skordic@t-com.hr

## ABSTRACT

Pond sediments have an important role in the ecosystem. The aim of this paper is to estimate the quality or the ecological status of sediments of ten ponds of the city of Raipur, the capital of Chhattisgarh, India. In sediments, ecotoxic trace elements were investigated. Analyses of trace elements Cd, Cu, Pb, As and Cr were made with the help of ICP-AES according to the European standards. The lack of monitoring of ecotoxic elements in sediments may result in their negative effects on the ecosystem. The effect of sediments on the quality of water in ponds is known and information is useful for decision-making by the relevant institutions for the purpose of surface water management. According to the calculation of the geo-accumulation index, the contamination factor, the contamination degree and the pollution load index, the sediments of the investigated ponds are uncontaminated to slightly contaminated. In this respect, these are sediments that are still not harmful to the pond ecosystem, although there is a slightly increasing trend in the value of contamination.

*KLJUČNE RIJEČI: Geo-akumulacijski indeks, Faktor zagađenja, Stupanj zagađenja, Indeks opterećenja zagađenja, sediment ribnjaka*

*KEYWORDS: Geo-Accumulation Index, Contamination Factor, Contamination Degree, Pollution Load Index, Pond sediment*

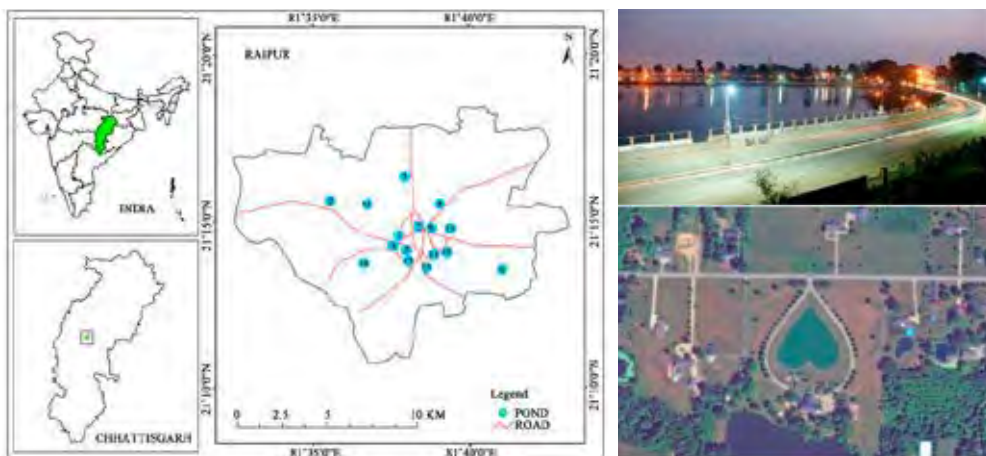
## 1. UVOD

Chhattisgarh je poznat po svojim ribnjacima. Lokalno su poznati pod nazivom Talab i sastavni su dio Chhattisgarh baštine. Postoje brojni ribnjaci koji se nalaze oko područja glavnog grada Raipura. U odnosu na rijeke, ribnjaci su skloniji zagađenju zbog nemogućnosti brze izmjene vode i sedimenata. Različiti su izvori zagađenja postojećih ribnjaka, a oni mogu biti otpadne vode domaćinstava i industrije, odlagališta otpada, ribolovni objekti, poljoprivredne površine itd. Svako zagađenje utječe na floru i faunu te na zdravlje čovjeka ako se koristi za potrebe kućanstva. Ribnjaci su važni za ekosustav te imaju svoju višestruku ulogu koja se odnosi na staništa divlje flore i faune, izvor su hrane za mnoge organizme, prihranjuju površinska i podzemna vodna tijela, prijamnici su oborinskih voda i uspostavljaju kontrolu kada se radi o poplavama, smanjuju negativne efekte urbanih toplinskih otoka itd. Sedimenti imaju sposobnost akumulirati elemente u tragovima, a za potrebe određivanja stanja ekosustava bilo je potrebno odrediti njihovu prostornu raspodjelu. Na deset ribnjaka uzorkovani su sedimenti, a potom su analizirani ekotoksični elementi u tragovima kao što su Cr, Cd, Cu, As i Pb. Dobiveni podaci ključni su za pružanje osnovnih informacija za definiranje "hot spot" područja (Li i drugi, 2012; Shafie i drugi, 2013; Hossaina i drugi, 2019; Zhang i drugi, 2019). Ekotoksični elementi u tragovima su bitni zagađivači u vodenim okolišima što može biti posljedica prirodne aktivnosti i/ili aktivnosti čovjeka. Procjena onečišćenja elementima u tragovima u sedimentima ribnjaka moguća je uz korištenje ekoloških pristupa procjene rizika te je važna za upra-

vljanje vodenim površinama zbog njihove toksičnosti, bioraspoloživosti, postojanosti i potencijalnog ekološkog rizika. Određivanje porijekla elemenata u tragovima u sedimentu je važna zbog mogućnosti određivanja stupnja onečišćenja, zaštite i zdravstvenog statusa ribnjaka kao i za njegovo učinkovito upravljanje (Shafie i drugi, 2013).

## 2. METODE I MATERIJALI

Istraživanja su usmjerena na ribnjake grada Raipura u državi Chhattisgarh u Indiji. Grad Raipur smješten je u jednoj od plodnih ravnica rijeke Mahanadi u državi Chhattisgarh (Slika 1). Problemi vezani za prihvat otpadne vode u postojeću neadekvatnu sanitarnu mrežu i povećanje broja stanovnika koji migriraju iz ruralnih naselja u urbano središte uzrokuju zagađenja koja su relativno brzo vidljiva u osjetljivim ekosustavima kao što je ovaj. U istraživanim ribnjacima unazad nekoliko godina opaženo je cvjetanje algi.



Slika 1. Prostorni smještaj istraživanog područja s prikazom ribnjaka

Deset uzoraka sedimenata promatranih ribnjaka obrađeno je ekstrakcijom metodom, a analize su izvedene uz pomoć instrumenta Varian Liberty AX Sequential ICP-AES. Standard koji je pri tome korišten je ICP multi-element standard (E. Merck) i Europska norma 13346:2000 EN 13346:46 za kontrolu kvalitete podataka (Jena i drugi, 2019). Uzorci sedimenata izgrađeni su od muljevitog pijeska i pjeskovitog mulja. Za potrebe procjene ekološkog stanja ribnjaka korištene su jednadžbe koje upravo definiraju stanje istraživanog ekosustava. Dobivene vrijednosti odnose se na Geoakumulacijski indeks ( $I_{geo}$ ), Faktor zagađenja (CF) i Stupanj zagađenja (CD), te Indeks opterećenja onečišćenja (PLI).

**Geo-akumulacijski indeks (eng. geo-accumulation indeks) ( $I_{geo}$ )**

Za razumijevanje trenutnog stanja okoliša i zagađenja elementima u tragovima u odnosu na prirodno okruženje primjenjuje se Geo-akumulacijski indeks ( $I_{geo}$ ) koristeći sljedeću jednadžbu:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / (1,5 \times C_{bn})) \quad (1)$$

gdje je:  $C_n$  - koncentracija analiziranog elementa u tragovima u uzorku sedimenta;  $C_{bn}$  - geokemijska pozadinska koncentracija datog elementa u tragovima; faktor 1,5 - faktor korekcije matriksa pozadinske koncentracije zbog litogenih učinaka.

Vrijednosti Geo-akumulacijskog indeksa grupiraju se u sedam klasa zagađenja (Tablica 1).

Indeks kao što je Geo-akumulacijski indeks ( $I_{geo}$ ) koristi se za određivanje stupnja zagađenja elementima u tragovima. Također, koristi se za procjenu intenziteta antropogenog zagađenja akumuliranog u sedimentu (Barbieri, 2016). Indeks Geo-akumulacije moguće je dobiti i pomoću sljedeće jednadžbe:

$$I_{geo} = \ln (C_n / 1,5 \times C_{bn}) \quad (2)$$

gdje je:  $I_{geo}$  - Geo-akumulacijski indeks koji određuje stupanj antropogenog zagađenja i uspoređuje različite elemente u tragovima koji se pojavljuju u različitim rasponima koncentracija u sedimentu;  $C_n$  - izmjerena koncentracija „n“ ( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $C_{bn}$  - geokemijska pozadinska vrijednost ( $\text{mg kg}^{-1}$ ); faktor 1,5 se uvodi radi uključivanja mogućih varijacija pozadinskih vrijednosti zbog litogenih utjecaja.

Za potrebe izračuna korištene su geokemijske pozadinske vrijednosti za sedimente,  $C_{bn}$  prema Tablici 2.

Tablica 1. Klasifikacija Geo-akumulacijskog indeksa (Müller, 1969)

$I_{geo}$ vrijednost	$I_{geo}$ intenzitet	Klasa zagađenja prema Geo-akumulacijskom indeksu $I_{geo}$
> 5	6	Vrlo jako zagađeno
4-5	5	Jako do vrlo jako zagađeno
3-4	4	Jako zagađeno
2-3	3	Umjereno do jako zagađeno
1-2	2	Umjereno zagađeno
0-1	1	Nezagađeno do umjereno zagađeno
0	0	Nezagađeno

Tablica 2. Geokemijske pozadinske vrijednosti za sedimente,  $C_{bn}$  u  $\text{mg kg}^{-1}$

Elementi	Cu	Pb	Cr	As	Cd
Vrijednost $C_{bn}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	27-32	12-13	63-75	15-20	0,5 - 1

**Faktor zagađenja** (eng. *contamination factor*) (**CF**) i **Stupanj zagađenja** (eng. *contamination degree*) (**CD**)

Faktor zagađenja (CF) i Stupanj zagađenja (CD) su široko korišteni pokazatelji koji se koriste za procjenu antropogenog utjecaja na sedimente, a odnose se na stupanj obogaćivanja koncentracija metala u analiziranim sedimentima u odnosu na nezagađene pozadinske vrijednosti (početna vrijednost). Dok se CF izračunava za pojedinačne elemente, CD daje opće informacije o zagađenju sedimenata na mjestima istraživanja (Tomlinson i drugi, 1980; Priju i Narayana, 2007).

Faktor zagađenja i Stupanj zagađenja su izraženi kao:

$$CF = C_m / C_{bn} \quad (3)$$

$$CD = \sum_{i=1}^n (CF) \quad (4)$$

gdje je:  $C_m$  - sadržaj analiziranog specifičnog teškog metala;  $C_{bn}$  - lokalna nezagađena pozadinska razina istog metala.

Općenito, vrijednosti CF-a i CD-a kategorizirane su u četiri klase (Tablica 3).

Tablica 3. Faktor zagađenja (CF) i Stupanj zagađenja (CD)

Faktor zagađenja (CF)		Stupanj zagađenja (CD)
$CF < 1$	Slabo zagađeno	$CD < 6$
$1 \leq CF < 3$	Umjereno zagađeno	$6 \leq CD < 12$
$3 \leq CF < 6$	Znatno zagađeno	$12 \leq CD < 24$
$CF \geq 6$	Vrlo visoko zagađeno	$CD \geq 24$

**Indeks opterećenja zagađenja** (eng. *pollution load indeks*) (**PLI**)

Ukupno zagađenje sedimenata sadržajem elemenata u tragovima računa se pomoću jednadžbe (Taylor i McLennan, 1985):

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (5)$$

gdje je:  $n$  - broj metala i  $CF$  - faktor onečišćenja analiziranih metala.

Dobivene vrijednosti PLI bliske su 0 ili 1 te ukazuju na nezagađene ili početnu razinu prisutnih zagađivača, dok vrijednosti  $PLI > 1$  ukazuju na progresivno propadanje ekosustava (Tomlinson i drugi, 1980; Taylor i McLennan, 1985). Kategorizacija korištenih PLI vrijednosti prikazana je u Tablici 4.



Tablica 4. Kategorizacija indeksa opterećenja zagađenja (PLI)

PLI vrijednosti	Kvaliteta sedimenta
8–10	Izuzetno zagađeno
6–8	Jako zagađeno
4–6	Znatno zagađeno
2–4	Umjereno zagađeno
0–2	Nezagađeno do blago zagađeno

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Prema dobivenim vrijednostima Geo-akumulacijskog indeksa prema jednadžbi (1), elementi u tragovima nalaze se u sljedećem rastućem redoslijedu: Cu (0,85)  $\approx$  Cr (0,87) < Pb (0,92) < As (0,98) odnosno najviše ima Cd (1,08) (Tablica 5). Utvrđeno je da su prema Geo-akumulacijskom indeksu sedimenti ribnjaka nezagađeni do umjerenog zagađeni (Jena i drugi, 2019). Ako se nastavi trend porasta koncentracija toksičnih elemenata u tragovima oni mogu predstavljati potencijalni zdravstveni rizik za populaciju ljudi koja boravi u blizini istraživanog područja.

Tablica 5. Vrijednosti Geo-akumulacijskog indeksa za Cr, Cu, Pb, Cd i As u mg kg<sup>-1</sup>

	$I_{geo}$ Cr	$I_{geo}$ Cu	$I_{geo}$ Pb	$I_{geo}$ Cd	$I_{geo}$ As
Mean	0,540	0,618	0,724	0,863	0,865
Max	0,87	0,85	0,92	1,08	0,98
Min	0,16	0,37	0,02	0,65	0,67
Index $I_{geo}$	-4,72 - 0,102      nezagađeno do umjereno zagađeno				

Prema jednadžbi (2) dobiven je Geo-akumulacijski indeks i iznosi  $I_{geo} = -4,72 - 0,102$  odnosno radi se o nezagađenom do umjerenog zagađenom sedimentu ribnjaka.

Nadalje, prema jednadžbi (3) za izračun Faktora zagađenja sedimenta ribnjaka dobivene vrijednosti ukazuju da se radi o sedimentu slabo do umjerenog zagađenja (Tablica 3).

Tablica 6. Faktor zagađenja istraživanih sedimenta ribnjaka

Elementi u tragovima	CF	Zagađenje
Cd	1,66	Umjereno zagađeno
As	0,065	Slabo zagađeno
Cr	0,0134	Slabo zagađeno
Pb	0,0669	Slabo zagađeno
Cu	0,028	Slabo zagađeno

Stupanj zagađenja prema jednadžbi (4) iznosi **1,833** te prema Tablici 3 ukazuje na slabo zagađenje sedimenata ribnjaka. Nadalje, izračunata je vrijednost PLI i iznosi **0,077**, te prema Tablici 4 ukazuje da se radi o nezagađenom do blago zagađenom sedimentu.

Za istraživanja zaštite okoliša preporučuje se nastavak istraživanja primjenom procjene okoliša i utvrđivanje toksičnosti sedimenta. Potrebno je koristiti smjernice za razvrstavanje vode u jezerima i vodotocima primjerice prema Švedskoj agenciji za zaštitu okoliša (SEPA, 2000), prema kojoj je moguće klasificirati utjecaje na okoliš na skali od 1 do 5, gdje klasa 1 predstavlja situacije u kojima zagađujuće tvari ne stvaraju ili stvaraju vrlo mali rizik od bioloških učinaka, a klasa 5 je reprezentativna za razine na kojima postoji visoki rizik od bioloških učinaka nakon kratke izloženosti. Prema Smjernici za otopljene metale koju je propisala američka Agencija za zaštitu okoliša (US EPA, 2006), moguće je procijeniti najveće koncentracije zagađujućih tvari u površinskoj vodi kojoj vodena zajednica može biti izložena kratko/neodređeno bez posljedica neprihvatljivog učinka.

#### 4. ZAKLJUČAK

Sedimenti vodenog okoliša su glavni spremnik metala i izvor zagađenja. Industrijskim razvojem te urbanizacijom uočeno je obogaćivanje sedimenata ekotoksičnim elementima u tragovima. Praćenje ekotoksičnih sadržaja kao posljedica antropogenih aktivnosti posebno je važno za procjenu kvalitete i zaštitu okoliša. Problem kvalitete sedimenata ribnjaka na području grada Raipura se povećava zbog ubrzanog razvoja i širenja urbanih sredina koji su infrastrukturno potkapacitirani. Prema Geo-akumulacijskom indeksu radi se o nezagađenom sedimentu, prema Faktoru zagađenja (CF) i Stupnju zagađenja (CD) sediment je slabo do umjereno zagađen dok je prema Indeksu opterećenja zagađenja (PLI) sediment nezagađen do blago zagađen. Navedeno vodi do zaključka da se radi o sedimentima koji još uvijek nisu štetni za ekosustav ribnjaka.

#### LITERATURA

- [1] Barbieri, M. (2016): *The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (I<sub>geo</sub>) to evaluate the soil contamination*, Geology & Geophysics, Vol 5(1), 1-4.
- [2] Hossaina, M.B., Shantaa, T.B., Ahmeda, A.S.S., Hossainb, M.K., Semme, S.A. (2019): *Baseline study of heavy metal contamination in the Sangu River estuary, Chattogram, Bangladesh*, Marine Pollution Bulletin, Vol 140, 255-261.
- [3] Jena, V., Ghosh, S., Pande, A., Maldini, K., Matic, N. (2019): *Geo-Accumulation Index of Heavy Metals in Pond Water Sediment of Raipur*, Biosci. Biotech. Res. Comm., 12(3), 585-588.

- 
- [4] Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Xand, C., Yang, X. (2012): *Integrated assessment of heavy metal contamination in sediments from a coastal industrial basin, NE China*, PLOS ONE, Vol 7(6), 1-10.
- [5] Müller, G. (1969): *Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River*, GeoJournal, Vol 2 (3), 108-118.
- [6] Priju, C.P., Narayana, A.C. (2007): *Heavy and tracemetals in Vembanad Lake sediments*, International Journal of Environmental Research.
- [7] Shafie, N.A., Aris, A.Z., Zakaria, M.P., Haris, H., Lim, W.Y., Isa, N.M. (2013): *Application of geoaccumulation index and enrichment factors on the assessment of heavy metal pollution in the sediments*, Journal of Environmental Science and Health, Vol 48, 182-190.
- [8] Swedish Environmental Protection Agency (2000): *Environmental quality criteria – Lakes and Watercourses*, Report 5050.
- [9] Taylor, S.R., McLennan, S. (1985): *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Geoscience Text, Blackwell Scientific Publication.
- [10] Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffrey, D.W (1980): *Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index*, Helgoländer Meeresuntersuchungen, Vol. 33, 1–4, 566–575.
- [11] US Environmental Protection Agency (USEPA) (2006): *National recommended water quality criteria*, Office of Science and Technology (4304T), Wasington D.C.
- [12] Zhang, H., Walker Davis, E., Ma, G. (2019): *Ecological risk assessment of metals in small craft harbour sediments in Nova Scotia, Canada*, Marine Pollution Bulletin, Vol 146, 466-475.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**PERIODIČNO POTPUNO PRAŽNJENJE  
HIDROENERGETSKIH AKUMULACIJA –  
PROBLEMI I ISKUSTVA NA PRIMJERU  
PRAŽNJENJA AKUMULACIJE VALIĆI  
2014. GODINE**

**PERIODIC COMPLETE DISCHARGE OF  
HYDROPOWER RESERVOIRS – PROBLEMS  
AND EXPERIENCE ON THE EXAMPLE OF THE  
COMPLETE DISCHARGE OF  
RESERVOIR VALIĆI IN 2014**

Ivan Kajapi <sup>a</sup>, Larsen Čebuhar <sup>b</sup>, Anton Mataija <sup>c</sup>

**SAŽETAK**

U radu je opisana problematika potpunog pražnjenja akumulacije hidroelektrane Rijeka na primjeru zadnjeg pražnjenja jezera Valići koje je obavljeno 2014. godine. Pražnjenja se obavljaju radi remonta dijelova hidromehaničke opreme brane koja je inače potopljena i time nedostupna. Dana je procjena nanosa sakupljenog između dva pražnjenja u zaplavnom prostoru akumulacije. Opisani su problemi koje su tom prilikom prouzrokovali neuobičajeno veliki dotoci Rječine za inače sušnog srpnja i kolovoza.

---

<sup>a</sup> HEP-PROIZVODNJA d.o.o. HE Rijeka, elektrana u grupi HE Vinodol, Vodovodna 26, Rijeka, 51000, Hrvatska, ivan.kajapi@hep.hr

<sup>b</sup> HEP-PROIZVODNJA d.o.o. PP HE ZAPAD Rijeka, Kumičićeva 13, Rijeka, 51000, Hrvatska, larsen.cebuhar@hep.hr

<sup>c</sup> HEP-PROIZVODNJA d.o.o. Pogon GHE Vinodol, Sušik 15, Tribalj, 51243, Hrvatska, anton.mataija@hep.hr

## ABSTRACT

The paper describes the problem of the complete discharge of the reservoir of the Rijeka hydroelectric power plant on the example of the last discharge of Lake Valici, which was carried out in 2014. Discharges are performed to repair parts of hydromechanical equipment of the dam that are otherwise submerged and inaccessible. An estimate of the sediment deposited between the two discharges on the flanks of the reservoir is given. The problems caused by unusually large inflows of the Rječina during usually arid July and August are described.

*KLJUČNE RIJEČI: periodično pražnjenje akumulacije hidroelektrane*

*KEYWORDS: periodic discharge of hydro power plant reservoir*

## 1. UVOD

Na režim sedimentacije u akumulacijama utječu kako erozijski procesi u slivu, tako i sama njihova geometrija te režim korištenja voda i prelijevanja. Za potrebe revizije hidromehaničke opreme objekata hidroenergetskog sustava vezanih uz akumulaciju, provode se periodična pražnjenja akumulacija. Obično se planiraju svakih 10 godina u skladu s Pravilnikom o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja. Takve se aktivnosti planiraju i provode tijekom malovodnih razdoblja, kada su gubici voda uslijed njihove nemogućnosti zadržavanja i naknadnog hidroenergetskog korištenja najmanji. U radu će biti analizirani procesi koji uvjetuju sedimentaciju nanosa u akumulaciji, kao i utjecaji i iskustva vezana uz planiranje i provedbu pražnjenja akumulacija. Kao primjer je odabrano zadnje potpuno pražnjenje akumulacije Valići koje je obavljeno 2014. godine.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

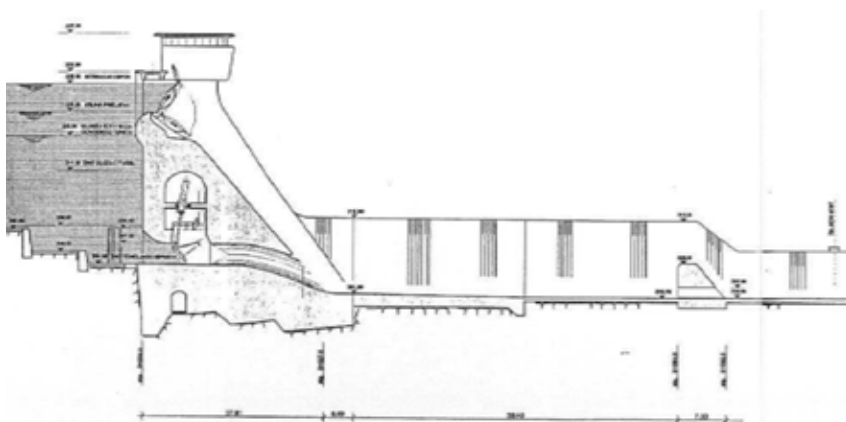
Izgradnjom betonske gravitacijske brane na vodotoku Rječini kod sela Grohovo (Slika 1 i 2), ostvaren je zahvat vode za hidroelektranu Rijeka i formirano je akumulacijsko jezero Valići. Brana je smještena u srednjem toku Rječine oko 7 km uzvodno od ušća relativno kratkog vodotoka ukupne duljine 18 km. HE Rijeka je klasično visokotlačno derivacijsko postrojenje s dvije jednake Francis turbine smještene u podzemnoj strojarnici u gradu Rijeci s ukupnom snagom od 36,8 MW i instaliranim protokom od 21 m<sup>3</sup>/s.

Duljina akumulacijskog jezera iznosi oko 1.300 metara, a širina doseže i do 150 m. Pri maksimalnoj koti uspora (229,50 m n.m.) površina akumulacije iznosi oko 78.000 m<sup>2</sup> s ukupnom zapreminom od 698.000 m<sup>3</sup>, od čega do najniže radne kote koja se koristi u radu HE Rijeka (224,00 m n.m.), korisna zapremina iznosi 390.000 m<sup>3</sup>.



Slika 1. Brana i akumulacija Valići

Brana i akumulacija izgrađeni su u vodonepropusnim klasičnim naslagama fliša eocenske starosti s pokrovnim naslagama kvartara. Površinske naslage glinenih materijala čine padine akumulacije vrlo nestabilnima, s mjestimičnim zonama odrona i klizišta. Bujični vodotoci uslijed erozijskog djelovanja donose znatne količine materijala koji se taloži u jezero. Osim toga, uslijed nepovoljne geološke strukture tla i ogoljelih obala, naročito u nižim dijelovima, prisutna su i klizišta. Jedan dio tih bujičnih vodotoka je reguliran te je na tim mjestima dobar dio erozijskih procesa donekle stavljen pod kontrolu, dok, naročito na uzvodnom dijelu, nekoliko manjih bujičnih vodotoka i dalje nekontrolirano nanosi isprani materijal i aktivira klizišta.



Slika 2. Uzdužni presjek brane Valići

Rijeka Rječina je krški vodotok izraženog bujičnog karaktera. U Tablici 1 dani su srednji mjesečni protoci na vodomjernom profilu Drastin koji se nalazi uzvodno od akumulacije Valići, praktički na njezinu početku.

Tablica 1. Srednji protoci Rječine na profilu Drastin

Razdoblje	Srednji mjesečni protok $Q_{sr-mj}$ ( $m^3/s$ )												Srednji godišnji protok ( $m^3/s$ )
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1951.-1980.	9,9	10,4	9,9	14,2	11,5	5,4	2,6	1,8	5,5	9,7	15,1	13,3	9,11
1981.-1992.	7,3	4,7	7,1	15,0	10,9	5,3	0,8	0,9	2,7	11,0	13,4	12,2	7,61
1993.-2018.	13,8	20,0	11,8	10,8	7,3	3,5	0,5	0,5	4,2	6,9	22,2	9,5	9,26

U prethodnih 40 godina, nakon što je riječki vodovod 1981. godine počeo s uzimanjem većih količina vode sa samog izvora Rječine, vodotok Rječine ima vrlo male protoke na mjernom profilu Drastin u ljetnim mjesecima (srpanj-kolovoz) kada u pravilu vodotok u potpunosti presuši u trajanju 10 do 15 dana. Budući da se potpuno pražnjenje akumulacije Valići obavlja prvenstveno zbog revizije temeljnih zatvarača brane koji su smješteni na razini korita vodotoka, planira se potpuno pražnjenje akumulacije u ljetnim mjesecima kada su dotoci minimalni. Posljednja potpuna pražnjenja akumulacije Valići obavljena su 1990., 2002. i 2014. godine.

Potpuno pražnjenje koje je obavljeno 2014. godine pripremljeno je i izvršeno prema tehničkom dokumentu Pražnjenje akumulacije Valići (Elektroprojekt Zagreb, 2002) prema kojem su pripremljene specifikacije za ugovaranje popratnih građevinskih radova prilikom pražnjenja, za vrijeme potpuno prazne akumulacije te nakon njenog ponovnog punjenja. Radovi na hidromehaničkoj opremi brane koji su obavljani za vrijeme prazne akumulacije specificirani su prema internom pravilniku o održavanju opreme hidroelektrane te prema stanju predmetne opreme.

Prije početka pražnjenja akumulacije obavljene su slijedeće pripremne radnje:

- obavješćivanje institucija i subjekata: Hrvatske vode, Ministarstvo unutarnjih poslova, Općina Jelenje, Grad Rijeka, Općina Čavle, Ministarstvo zdravlja (Sektor sanitarne inspekcije), komunalno društvo Vodovod i kanalizacija d.o.o. Rijeka, državni vodopravni inspektor te ribolovno društvo ŠRD Rječina,
- angažiranje zaštitarske tvrtke za dežurstva na brani i obilaske obala prazne akumulacije,
- postavljanje tabli s upozorenjima o gradilištu i praznoj akumulaciji na obalama akumulacije te nizvodno od brane na mjestima privremenih zagata,
- montaža čelične rešetkaste konstrukcije na otvoru prvog praga bazena slapišta brane, montaža drvenog zagata na izlazu prvog praga slapišta te na drugom pragu slapišta brane, izgradnja nasutog zagata u koritu Rječine oko 400 m nizvodno od brane, montaža čelične konstrukcije–rampe za izvlačenje nanosa iz bazena slapišta

Prvobitno je bilo planirano pražnjenje sa svim aktivnostima u praznoj akumulaciji obaviti u razdoblju od 30.06. do 12.09.2014. Međutim, dana 30.06.2014. godine u podne, dotok na profilu Drastin je iznosio 2,90 m<sup>3</sup>/s s trendom porasta, da bi u ponoć dosegao čak 9,85 m<sup>3</sup>/s, što je odgodilo početak pražnjenja za 04.07.2014. kada je dotok u 6 sati iznosio 2 m<sup>3</sup>/s i prognozom pada dotoka. S pražnjenjem se započelo 04.07.2014. u 8 sati provjerom rada temeljnih zatvarača te se povremenim radom pojedinog temeljnog zatvarača ispustio mulj iz prostora uzvodno od temeljnih zatvarača u bazen slapišta gdje je 05.07.2014. u jutarnjim satima uočeno samo oko 50 m<sup>3</sup> muljevitog nanosa. Nakon pražnjenja vode iz akumulacije kroz turbine HE Rijeka do kote 223,50 m n.m. zatvoren je tablasti zatvarač ulaznog uređaja dovodnog tunela prema turbinama te je pražnjenje tzv. mrtve vode akumulacije nastavljeno kroz lijevi temeljni zatvarač što je završeno dana 06.07.2014. oko 17 sati. Neposredno pred kraj pražnjenja zadnje količine vode isto je zaustavljeno na oko 4 sata kako bi ribolovci ŠRD Rječina prikupili živu ribu iz bazena slapišta što su s boljom organizacijom relativno uspješno učinili prikupivši oko 500 kg raznih vrsta ribe koja je transportirana u akumulacije Tribalj i Bajer.

Tijekom pražnjenja akumulacije nije bilo većih problema; samo u jednom trenutku je uočeno odronjavanje zemljanog nanosa s bokova akumulacije neposredno uz branu (gdje su obale i najstrmije) i to po nekoliko m<sup>3</sup> sa svake strane. Najveći problem je nastao uslijed neadekvatno konstruirane rešetke na ulazu u otvor prvog praga slapišta, koja se uslijed pritiska otpada (panjeva i većih dijelova grana) deformirala što je uzrokovalo začepljenje predmetnog otvora i potapanje bazena slapišta do kote 206 m n.m.



Slika 3. Prazna akumulacija Valići – 07.07.2014.

Za vrijeme dok je akumulacijsko jezero prazno (Slika 3) bilo je planirano obavljanje slijedećih građevinskih radova:

- čišćenje nanosa iz prostora uzvodno od temeljnih zatvarača,
- čišćenje nanosa iz bazena slapišta brane,



- uklanjanje drveća i starih panjeva iz prazne akumulacije,
- sanacija betona brane na uzvodnoj desnoj strani.

Također su bili planirani slijedeći radovi na hidromehaničkoj opremi brane:

- remont ulaznog uređaja dovodnog tunela s tablastim zatvaračem,
- remont obje preljevne klapne na brani,
- remont oba temeljna zatvarača brane,
- zamjena plivajuće i fiksne mreže ispred ulaznog uređaja,
- AKZ radovi na rešetki i vodilicama čistilice ulaznog uređaja.

Svi gore navedeni radovi su uspješno obavljeni, ali uz velike poteškoće, naročito pri uklanjanju nanosa iz prostora temeljnih zatvarača, što je otežalo ugradnju pomoćnih grednih zapornica te obavljanje AKZ radova bočnih ubetoniranih čeličnih štitova kao i uklanjanje nanosa iz prostora bazena slapišta i na nizvodnim pomoćnim zagatima. Također je bilo problematično izvesti suhe probe brtvi zatvarača.

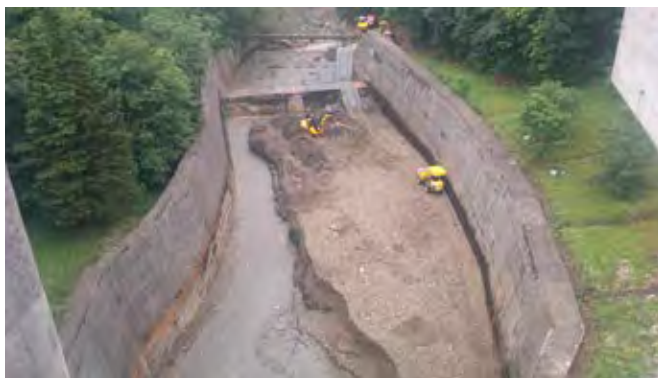
Naime, iako vodotok Rječine ima od sredine srpnja do sredine kolovoza u pravilu minimalne dotoke uz potpuno presušivanje samog izvora Rječine, iznadprosječne obo-rine na širem riječkom području u navedenim mjesecima 2014. godine uzrokovali su pojavu nekoliko vodnih valova (Slika 4) koji su prouzrokovali znatan donos vučenog nanosa iz korita uzvodno od brane te podlokavanje nanosa s obala prazne akumulacije i njegovo deponiranje u prostoru bazena slapišta i na nizvodnim pomoćnim zagatima. Protoci na mjernom profilu Drastin iznad  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  bili su problematični, a zabilježeni su:

- od 08.07. do 18.07.2014. (deset dana!) s maksimalnim dotokom  $11 \text{ m}^3/\text{s}$  (09.07.2014.),
- od 30.07. do 01.08.2014. s maksimalnim dotokom  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$  (31.07.2014.),
- od 16.08. do 17.08.2014. s maksimalnim dotokom  $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$  (17.08.2014.),
- od 21.08. do 10.09.2014. s maksimalnim dotokom  $13,8 \text{ m}^3/\text{s}$  (03.09.2014.)



Slika 4. Protok od  $9,14 \text{ m}^3/\text{s}$  kroz praznu akumulaciju – 11.07.2014.

Tijekom pražnjenja 2002. i 2014. godine organizirano je snimanje prazne akumulacije (prvenstveno njenih obala) klasičnom geodetskom metodom što se pokazalo nepraktično u području od oko 100 metara uzvodno od same brane gdje su bokovi akumulacije dosta strmi i opasni za pristup radnicima. Usporedbom izmjerenih visina na pojedinim uzvodnim profilima u akumulaciji procijenjen je nanos u ukupnoj količini od oko 2.500 m<sup>3</sup> za gore navedeni period (12 godina). Iz prostora slapišta brane (Slika 5) odvezeno je oko 6.000 m<sup>3</sup> vučenog nanosa te oko 400 m<sup>3</sup> nanosa na nizvodnom privremenom zagatu u koritu Rječine. Uzorak iz slapišta je analiziran u Nastavnom Zavodu za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije. Taj je nanos deponiran na prostoru Breza-Klana. Treba napomenuti da inače pri aktiviranju bujica voda bude izrazito mutna te da dobar dio suspendiranog nanosa prođe kroz privodne organe HE Rijeka i dalje u more, a isto tako i preko preljeva. Pri budućem pražnjenju akumulacije Valići (planira se za 2024. godinu) obaviti će se snimanje bokova prazne akumulacije pomoću bespilotne letjelice kako je obavljeno pri pražnjenju akumulacije Bajer 2019. godine.



Slika 5. Uklanjanje nanosa iz bazena slapišta brane

Kako se 13.02.2014. godine aktiviralo veće klizište koje je uništilo lokalnu cestu Grohovo-Lopača (na desnoj obali oko 400 metara uzvodno od brane), a Hrvatske vode, VGO Rijeka su ograničile gornju radnu kotu akumulacije Valići na 226,5 m n.m., što je čak 3 metra niže od projektirane maksimalne radne kote akumulacije, HEP-PROIZVODNJA d.o.o. je od vanjskog izvoditelja naručila uslugu izrade dvije istražne bušotine na nožici predmetnog klizišta. Prema preporuci Građevinskog fakulteta u Rijeci određene su pozicije za dvije bušotine koje su geodetski označene te je do njih probijen put za pristup bušećih garnitura te za uzimanje uzoraka što je uspješno završeno prije početka punjenja akumulacije.

Po završetku planiranih radova na brani i akumulaciji započelo se punjenje akumulacije Valići prirodnim dotokom Rječine nakon zatvaranja oba temeljna zatvarača dana 10.09.2014. oko 8:45 sati. Punjenje je završeno 11.09.2014. u 3:45 sati do kote 225,50 m n.m. (to je kota betonskog praga preljevnih zapornica brane koje su posta-

vljene u otvorenom položaju kako ne bi došlo do naglog porasta vodostaja u akumulaciji, a uslijed porasta dotoka koji je 11.09.2014. u 3 sata iznosio 6 m<sup>3</sup>/s). Punjenje akumulacije Valići je tehnološki mnogo jednostavniji postupak od pražnjenja, a ovom prilikom nije bilo nikakvih posebnih događaja niti problema.

Nakon obavljenog punjenja izvršene su slijedeće radnje:

- uklanjanje tabli s upozorenjem na obalama akumulacije,
- uklanjanje preostalog nanosa iz bazena slapišta i na nizvodnim zagatima,
- uklanjanje čelične konstrukcije-rampe iz prostora slapišta,
- uklanjanje drvenih i nasutog zagata iz korita Rječine,
- nabava mlađi ribe i poribljavanje akumulacije u više navrata (završeno 2015. godine).

### 3. ZAKLJUČAK

Periodično kontrolirano potpuno pražnjenje akumulacija koje služe za provedbu mjera kontrole i održavanja hidrotehničkih objekata i hidromehaničke opreme nužna je aktivnost pri upravljanju hidroenergetskim akumulacijama. U okviru te aktivnosti provode se i praćenja prirasta nanosa u zaplavnom prostoru akumulacije i slapištu. Iako se u novije vrijeme, posebno na većim akumulacijama, nastojalo produžiti razdoblje između pojedinih potpunih pražnjenja angažiranjem, npr. ronioca za podvodni pregled nedostupnih dijelova hidromehaničke opreme, ove skupe i relativno dugotrajne radove obavlja se u skladu s važećom zakonskom regulativom. Potpuno pražnjenje akumulacije uzrokuje cjelokupno uništenje faune te potpunu obustavu rada pripadajućeg hidroenergetskog objekta. Na primjeru zadnjeg potpunog pražnjenja akumulacije Valići 2014. godine opisani su problemi koji su se pojavili uslijed neuobičajeno velikih dotoka Rječine tijekom inače sušnog srpnja i kolovoza. Zbog neizgrađenosti planirane uzvodne veće akumulacije praktički je nemoguće planirati potpuno suhe periode na bujičnom vodotoku za sigurno izvođenje radova koji traju najmanje dva mjeseca. Prilikom spomenutoga pražnjenja utvrđeno je da je u razdoblju od 12 godina u akumulaciji zadržano blizu 3.000 m<sup>3</sup> nanosa. Oko 6.000 m<sup>3</sup> nekonsolidiranog nanosa nakon samoga pražnjenja, uslijed iznadprosječno obilnih oborina za taj dio godine, završilo je u slapištu brane te je stoga bilo nužno osigurati njegovo uklanjanje.

---

## LITERATURA

- [1] Elektroprojekt d.d. (2002): *Program pražnjenja akumulacijskog jezera Valići*, Sever, Z., Zagreb.
- [2] HEP-PROIZVODNJA d.o.o. (2004): *Pravilnik za rukovanje hidrosustavom HE Rijeka*, Rijeka.
- [3] HEP-PROIZVODNJA d.o.o. (2014): *Izvješće o pražnjenju akumulacijskog jezera Valići*, Rijeka.
- [4] HEP-PROIZVODNJA d.o.o. (2014): *Izveštaj nadzorne službe za provođenje nadzora nad pražnjenjem akumulacije Valići*, Rijeka.
- [5] *Pravilnik o tehničkim mjerama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja*, Službeni list SFRJ, br. 19/68, članak 53. Zakona o normizaciji, Narodne novine, br. 55/96.



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**RECENTNI PRONOS VUČENOG NANOSA  
U STAROJ DRAVI UZ HIDROELEKTRANU  
VARAŽDIN**

**RECENT BEDLOAD SEDIMENT TRANSPORT  
IN THE OLD DRAVA NEAR VARAŽDIN HYDRO  
POWER PLANT**

Zdenko Kereša <sup>a</sup>

**SAŽETAK**

Sliv rijeke Drave uzvodno od Varaždina, površine veće od 15.000 km<sup>2</sup>, je pod utjecajem velikog broja izgrađenih brana i pregrada (>100) na gornjem dijelu sliva rijeke Drave. Kako je to glavni uzrok deficita vučenog nanosa, ključnog za nizvodnu morfologiju rijeke, za ublažavanje deficita vučenog nanosa preostaje jedino erozija postojećih slojeva nanosa, tj. proces lokalnog odnošenja i lokalnog taloženja šljunka i pijeska. Staro korito i inundacijski prostor uz HE Varaždin u duljini od 20,1 km je primjer postojanja tih procesa. Na primjeru jednog segmenta starog korita rijeke Drave uz HE Varaždin kvantificirani su i opisani procesi na dionici od rudine Beli Kipi do Zelenih Pruda, na temelju „IN–OUT“ analize. U analizi je dan osvrt na utjecaj devetogodišnje eksploatacije šljunka zajedno s izgradnjom vodnih građevina radi smanjenja poplavnih rizika, te obnovu korita i rukavaca kao pokretača procesa koji unapređuju bioraznolikost kroz DRAVA LIFE projekt.

---

<sup>a</sup> Hrvatske vode, VGO za Muru i gornju Dravu, Međimurska 26b, Varaždin, 42000, Hrvatska, zkeresa@voda.hr

## ABSTRACT

The Drava basin upstream of Varaždin, with a catchment area above 15,000 km<sup>2</sup>, is under the influence of a large number of dams and obstacles (>100) built in the upper part of the Drava basin. As this is the main reason of the bedload sediment deficit, crucial for downstream river morphology, the only thing left to mitigate the bedload sediment transport deficit is the erosion of the existing layers of sediment, i.e. the process of local erosion and local deposition of gravel and sand. The old riverbed and inundation area along the HPP Varaždin, 20.1 km long, is an example of the existence of these processes. As an example of one segment of the old riverbed along the HPP Varaždin, the processes on the section from Beli Kipi to Zeleni Prudi were quantified and described, based on an "IN - OUT" analysis. The analysis gives an overview of the impact of nine-year gravel exploitation along with the construction of hydraulic structures to reduce flood risks and the restoration of the riverbed and the sidearms, as the drivers of processes that enhance biodiversity through the DRAVA LIFE project.

*KLJUČNE RIJEČI: vučeni nanos, erozija, obnova korita, eksploatacija šljunka, poplavni rizici*

*KEYWORDS: bedload sediment, erosion, riverbed restoration, gravel exploitation, flood risks*

## 1. UVOD

Sliv rijeke Drave hidrološka je cjelina koja se mijenja ljudskim utjecajem intenzivnije posljednjih osam desetljeća. Sagledavanje pronosa nanosa od samih izvorišta do ušća u Dunav praćeno je i analizirano posljednjih desetljeća kroz mnoge studije. Veći broj studija obrađuje lebdeći nanos na segmentima rijeke i na pritocima, a manje ih se odnosi na vučeni nanos i sliv u cjelini. U nizinskom (akumulacijskom) dijelu rijeke Drave postoje mjerenja samo za vrijeme kratkih razdoblja pronosa vučenog nanosa na hidrološkim stanicama Donja Dubrava, Botovo, Novo Virje, Terezino Polje i Donji Miholjac (Institut za elektroprivredu, 2019). S obzirom na pronos vučenog nanosa, topografiju te brojne izgrađene brane na rijeci i pritocima, možemo podijeliti sliv na dva dijela. Prvi je uzvodni, za vučeni nanos proizvodni brdsko-alpski dio sliva, gdje se u erozijskim procesima formiraju različita vodno-nanosna tijela u mirovanju i pokretu. To je dio sliva koji u klimatološkim uvjetima sabire padaline i stvara vodne tokove čijom se energijom stvara i pokreće ukupni nanos na svom putu do Dunava. Drugi, nizvodni dio rijeke je nizinski dio sliva, gdje je nanosnim materijalom u debelim slojevima formirana dolina s cijelom lepezom promjera zrna nanosa od krupnih šljunaka, pijesaka do sitnih prašina. Obzirom na činjenicu da je izgrađeno više od 100 brana i pregrada u središnjem i gornjem dijelu sliva rijeke Drave, teško se može zamisliti kontinuitet pronosa vučenog nanosa blizak prirodnom, koji se odvijao prije samo osamdesetak godina (Slika 1). Prostrana aluvijalna dionica počinje od Ptuja, a vučeni

nanos se zaustavlja uzvodno, na repovima akumulacija hidroelektrana ili se uklanja iz ušća, vučenim nanosom bogatih pritoka na uzvodnoj brdsko-alpskoj dionici. Tako je kroz proteklo vrijeme formiran trajni deficit vučenog nanosa iz brdsko-alpskog dijela sliva rijeke Drave.



Slika 1. Sliv Drave s pozicijama brana na toku Drave i Mure i starog korita uz HE Varaždin

Zbroj svih količina erozijom pokrenutog materijala (pijeska, šljunka i kamena) nošenog bujičnim pritocima predstavlja ulaz („input“) vučenog nanosa (oznaka:  $I_{gnv}$ ) u sustav rijeke Drave za brdsko-alpski dio. Budući da kroz brane praktično ne prolazi vučeni nanos, zaključuje se da se nanos zadržava uzvodno u blizini mjesta nastanka, odnosno da se vadi na pritokama (Slika 3a) prije nego dospije u Dravu ili da se taloži na repovima akumulacija. Navedeno znači da izlazna („output“) količina nanosa ( $O_{gnv}$ ) postiže vrijednost ulaza ( $I_{gnv}$ ) vučenog nanosa već na uzvodnom dijelu sliva. Ulaz u sustav može se prikazati po segmentima, ali i integrirano za cijeli uzvodni, brdsko-alpski dio sliva Drave. Pokretanje nanosa događa se stalno kroz erozijske procese u slivovima i podslivovima pritoka. Ulazna količina vučenog nanosa kod brane Strmec u staro korito uz HE Varaždin ( $I_{dgv}$ ) ukupan je zbroj svih ulaza i svih izlaza uzvodno po vremenu i iznosi:

$$\sum I_{gnv} - \sum O_{gnv} = dS_{nv} \rightarrow I_{dgv} \approx 0 \text{ m}^3/\text{god}$$

Ukupna produkcija nanosa, prema analizi erozije za brdski dio sliva Drave površine 15.000 km<sup>2</sup> iznosi  $G_{ug}=2,63 \times 10^6$  t/god ili  $W_{ug}=1,46 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/god (Kereša i Tošić, 2018). Udio vučenog nanosa u ukupnom nanosu iznosi 5-15 % (Žugaj, 2015). Iz navedenog proizlazi da je volumen produciranog vučenog nanosa  $W_{nv}=219.420$  m<sup>3</sup>/god. (Tablica 1). Taj iznos predstavlja zbroj svih erozijskih procesa vučenog nanosa u podslivovima pritoka ( $\sum I_{gnv}$ ). Svako uklanjanje vučenog nanosa iz sliva, pritoka kao i zadržavanje nanosa u akumulacijama predstavlja izlaz iz sustava pronosa vučenog nanosa ( $\sum O_{gnv}$ ). Te dvije veličine su iste i predstavljaju trajni godišnji nedosatatak vučenog nanosa na ulazu u nizinski dio Drave koji okvirno iznosi 220.000 m<sup>3</sup>/god.



Tablica 1. *Produkcija nanosa u slivu Drave do HE Varaždin*

Nanos / Sliv	Površina sliva (km <sup>2</sup> )	Produkcija nanosa	
		G (t/god)	W (m <sup>3</sup> /god)
suspendirani i vučeni / sliv Drave	41.238	4.608.750	2.560.417
suspendirani i vučeni / brdski dio	27.200	3.816.000	2.120.000
suspendirani i vučeni / brdski do HEV	15.000	2.633.040	1.462.800
vučeni / brdski dio do HEV - 15%	15.000	394.956	219.420

Za nizinsku Dravu, kao izvorišni resurs za pokretanje, premještanje i pronos vučenog nanosa preostaje jedino erozija u vlastitim slojevima nanosnih taložina kamena, šljunka, pijeska i sitnijih frakcija. Staro korito i inundacijski prostor uz HE Varaždin, dužine 20,1 km, dobar je primjer postojanja takvih erozijskih procesa odnošenja i taloženja materijala šljunka i pijeska iz **postojećih nanosnih slojeva**.

## 2. STANJE VUČENOG NANOSA

Na nizinskom dijelu rijeke Drave od Ptuja izgrađene su četiri derivacijske hidroelektrane (HE Formin, HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava) s različitim veličinama akumulacijskih jezera, derivacijskih kanala i starih korita koja služe za evakuaciju velikih voda koje strojarnice ne mogu propustiti. U starim koritima došlo je do izmjena u vodnom režimu, morfologiji i vegetacijskom pokrovu uslijed sukcesije, gubitka vode i nanosa u nekad „mrežastoj“ strukturi vodnih tijela s jednim, dva i više paralelnih tokova - rukavaca. Staro korito uz HE Varaždin odnosi se na stari tok rijeke Drave od čvora zahvata - brane (rkm 308,6) do restitucije kod varaždinskih mostova (rkm 288,5) i nalazi se unutar širokog inundacijskog prostora površine 31,4 km<sup>2</sup> okruženog nasipima (Slika 2).

Od puštanja u pogon HE Varaždin 1975. godine, staro korito pokazuje izrazite morfološke promjene uzrokovane promjenom vodnog režima. Od početka rada hidroelektrane u starom koritu teče minimalan protok od  $Q_{\min} \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$  s godišnjim trajanjem od 95 %. Taj protok je 30 puta manji od srednjeg protoka Drave. Pri tom malom protoku niti najveće brzine vode ne pokreću nanos. Sukcesija, zaraštavanje korita, višestruko suženje glavnog korita, nestanak vode u rukavcima posljedice su trajanja minimalnog protoka. U prostoru stare Drave kod voda većih od  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$  dolazi do prelijevanja na brani u Strmcu i one pokreću u kratkom vremenu značajne količine nanosa erozijom obala, dna i premještanjem sprudova. Budući da se u starom koritu ne provode mjerenja pronosa nanosa, promjene na obalama i sprudovima pro-

cijenjene su prema digitalnim ortofoto (DOF) kartama. Uz podatke iz vremena eksploatacije šljunka i pijeska, dostupni su i podaci snimljenih poprečnih profila starog korita u sklopu redovnih geodetskih snimanja objekata hidroelektrane Varaždin.



Slika 2. Objekti hidroelektrane Varaždin i staro korito HE Varaždin

Kad bi se spomenuti deficit vučenog nanosa od  $220.000 \text{ m}^3/\text{god}$  nadoknađivao erozijom iz vlastitih nanosnih slojeva, za 47 godina trećina inundacijskog poplavnog prostora starog korita bi se snizila za jedan metar. Kakve bi to posljedice imalo na vodonosnik (crpilište Vinokovščak), biljni pokrov, zaštitnu i gospodarsku funkciju šuma, sigurnost objekata hidroelektrane - prvenstveno brane u Strmcu, može se samo pretpostavljati. S jedne strane ti su procesi usporeni jer pijesak i prah (lebdeći, odnosno suspendirani nanos) s velikim vodnim valovima rijeke dolazi iz uzvodnog dijela sliva i dijelom se taloži u poplavnom prostoru izvan glavnog korita rijeke te pridonosi većoj obraslosti inundacije. Veći dio suspendiranog nanosa prolazi starim tokom i taloži se u druge dvije nizvodne akumulacije HE Čakovec i HE Dubrava, kao i stara korita uz njih (Grđan i Kereša, 2004). S druge strane značajna je redukcija volumena velikih vodnih valova jer dio prolazi kroz strojarnicu i derivacijske kanale hidroelektrane ( $Q \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a samo tzv. „pikovi“ prelijevanja preko brane pokreću erozijsko-morfološke procese u starom koritu što čini svega 5 % godišnjeg trajanja tih povećanih protoka.

### 3. ANTROPOGENI UTJECAJ

Na dionici rijeke Drave od Ormoža do Varaždina, na 25 km toka, regulacijski radovi su se u povijesti obavljali samo u okolici Ormoža i Varaždina. Kod Varaždina sve regulacije, uključujući i prvi prokop u 18. stoljeću, bile su u funkciji što stabilnijeg prijelaza rijeke Drave kod Varaždina s brojnim mostovima (prvi most izgrađen je 1786. godine). Regulacijske gradnje na Dravi kod Ormoža izvođene su prvenstveno zbog brojnih vodenica, skelskog prijelaza, zaštite željezničke pruge i drvenog mosta na početku 20. stoljeća. Kako je rijeka u to doba pronosila gotovo sav uzvodni šljunak i pijesak nizvodno od Ormoža, nanos je ispunjavao korito i prostran, plitki i rukavcima isprepleten riječni prostor. Takav suficit nanosa stvarao je nove slojeve šljunčanih nanosa te je utjecao na uspor rijeke i plavljenje naselja Svibovec, Petrijanec, Varaždin, Trnovec, Pušćine i druga za vrijeme visokih vodnih valova (1926., 1939., 1940., 1946., 1951., 1964., 1965., 1966., 1972.). S druge strane, kroz stalne promjene obala, šljunčanih sprudova, matice, te meandriranje korita, osigurana je velika širina otvorenog protočnog profila manje obraslosti što je bilo povoljnije za propusnost kod velikih voda.

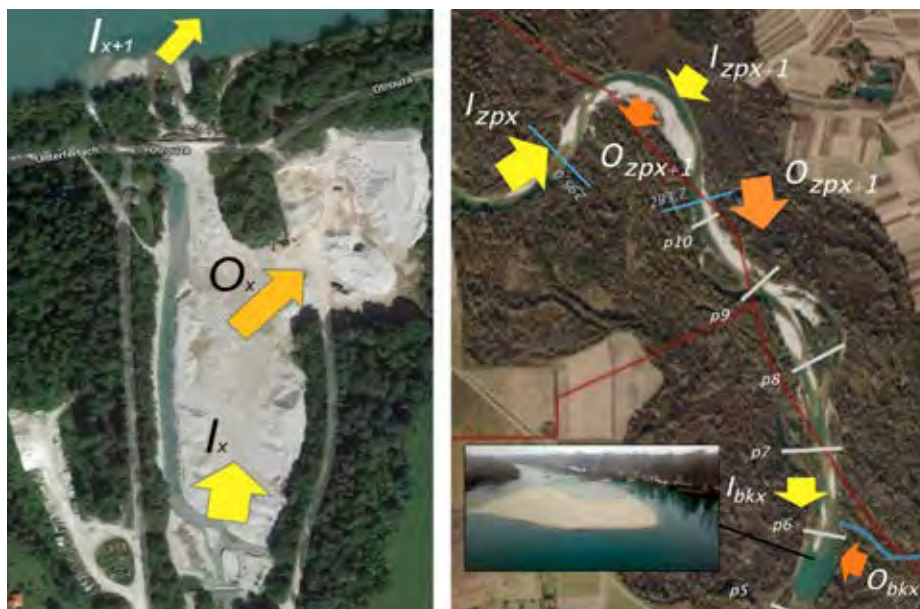
HE Varaždin građena je od 1972. do 1975. godine i u sklopu nje su izgrađeni obodni nasipi akumulacije, brana, derivacijski kanal i strojarnica, a vodne građevine, pera, obaloutvrde kod Ormoža uklopljene su u objekte hidroelektrane. Kod Varaždina, uzvodno od željezničkog i cestovnog mosta, izvedeno je spajanje starog korita i odvodnog kanala HE Varaždin, formiranjem restitucije u kojoj se krajem sedamdesetih godina 20-tog stoljeća dodatno zaštitila obala od erozije urbanom zaštitnom oblogom od betonskih blokova, ribičkom stazom širine 2 m, nožicom i podvodnim pokosom od lomljenog kamena (JVP Varaždin, 1983). Izgradnjom HE Varaždin, 21 km toka rijeke Drave postalo je, u hidrotehničkom smislu odušni kanal za velike vode, s nazivom „staro korito rijeke Drave“.

Kako je uzvodno, od 1942. do 1975. godine, na Dravi sagrađen velik broj brana hidroelektrana, uklanjan je vučeni nanos iz brojnih bujičnih pritoka rijeke Drave kako bi se smanjilo zapunjavanje akumulacija nanosom. Tako su procesi donosa vučenog nanosa do brane Strmec postepeno sasvim minimalizirani. Staro korito Drave nizvodno od brane Strmec nalazi se u širokoj inundaciji i više od 75 % duljine je bez vodnih zaštitnih struktura u koritu. Za razliku od ostalih starih korita uz derivacijske elektrane s puno više starih vodnih gradnji, procesi bočne erozije i taloženja sedimenta za vrijeme vodnih valova, ovdje se slobodno odvijaju.

Drugi značajniji utjecaj na staro korito rijeke Drave događao se između 1996. i 2005. godine za vrijeme izgradnje autoceste Zagreb-Goričan, zaobilaznice Varaždina, uređenjem obala Drave ispred Gradske sportske dvorane te nužnom potrebom za izgradnjom nasipa za zaštitu od poplava (nasipi Varaždin-Svibovec-Družbinac i Trnovec nakon poplava 1993. i 1998.). Područje utjecaja vodnih razina od rada strojarnice HE Varaždin doseže do 4 km uzvodno od restitucije. S ciljem ublažavanja utjecaja rada hidroelektrane te kako bi se zadovoljila potražnja za šljunčanim materi-

jalom, za područje Beli Kipi napravljeni su projekti uređenja starog korita u skladu s konceptom efikasnije propusnosti velikih voda, odnosno smanjenja poplavnih rizika i zadržavanja vodne razine malih voda 95 % trajanja na način da se izvedu proširenja starog korita, vodne gradnje poprečne na tok (pragovi) te jezera za korištenje šljunka za javne potrebe. Tako je nepunih devet godina trajalo razdoblje provođenja projekta i korištenja nanosa rijeke kao mineralne sirovine. Zahvati iskopa nanosa imali su ekonomsko opravdani javni interes, a koncept načina izvođenja radova na koritu rijeke u svrhu korištenja šljunka rezultirali su s nekoliko pozitivnih efekata u zaštiti okoliša i u smanjenju poplavnih rizika.

Šljunčani nanos se kod Belih Kipa eksploatirao u razdoblju od kraja 1996. do 2005. godine (u prva dva jezera), premještao za formiranje pragova i koristio kao zaštita od produbljivanja zajedno s oblogom od lomljenog kamena. Izvedeno je sedam pragova (od P4 do P10) između kojih je iskopano, izvezeno van rijeke i premješteno unutar korita  $819.181 \text{ m}^3$  šljunčanog materijala (Slika 3b). Nakon više od 15 godina od završetka projekta vidljivi su pozitivni efekti za obranu od poplava, podzemne vode i bioraznolikost.

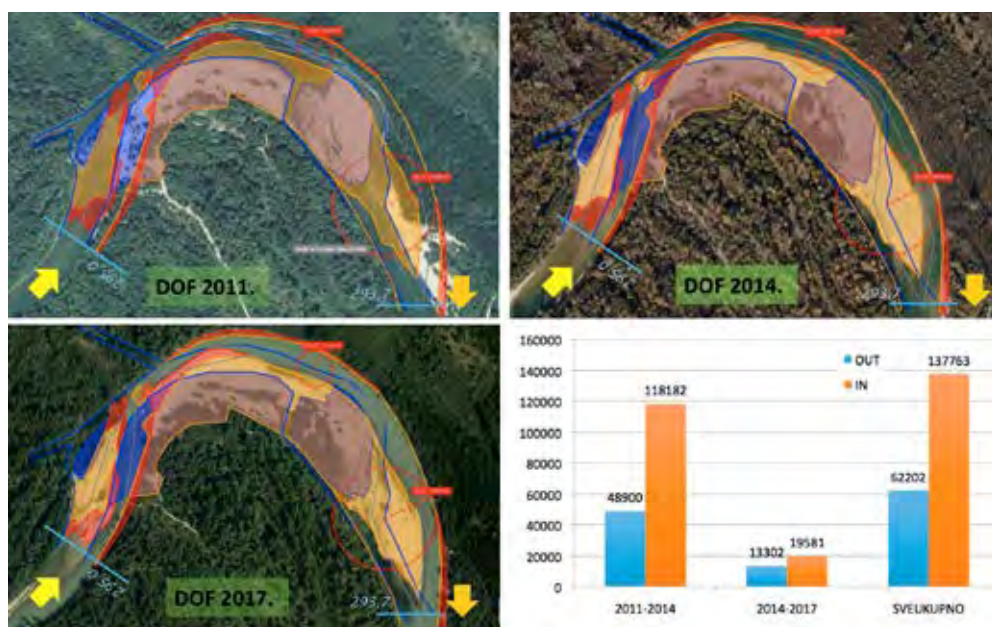


Slika 3. Shema pronosa nanosa a) kroz pritok (Austrija) b) u starom koritu uz HE Varaždin

#### 4. ANALIZA LOKACIJE ZELENII PRUDI

Promatrana dionica stare Drave kod Zelenih pruda nalazi se 5,4 km uzvodno od restitucije odvodnog kanala HE Varaždin na rkm 293,7. Odabrani segment započinje od kraja preljevnog poprečnog kamenog praga P-10, širine 100 m, a završava na početku uzvodnog meandra u duljini od 1.300 m.

Ovaj segment odabran je kao zanimljiv dugogodišnji meandar izložen silama taloženja i erozije rijeke Drave za vrijeme prelijevanja velikih voda preko brane HE Varaždin. Odabran je jednostavan primjer, ali kompleksnog pomicanja vučenog nanosa dijela rijeke (Slika 3b) za koji se može primijeniti odnos proporcije, gdje se odnos manjeg prema većem odnosi kao veće prema ukupnom. Vrijedi i reciprocitet. U procjeni odnosa ukupnog prema manjem je rečeno da je ukupan pronos vučenog nanosa minimiziran kod brane HE Varaždin. Ta veličina vučenog nanosa je izlaz („output“ -  $O_{g\text{vn}}$ ) iz cijelog uzvodnog sliva, odnosno ulaz („input“ -  $I_{\text{dvn}}$ ) u staro korito rijeke. Kolika su to pomicanja i od kuda dolazi vučeni nanos kad je izlaz na brani HEV ( $I_{\text{vn}}$ ) jako mala veličina? HEP prema evidencijskim profilima svake dvije godine provodi snimanja na starom koritu, ali su ti profili relativno rijetki i ne mogu opisati „In-Out“ proces na odabranoj dionici. Da bi se dobio zadovoljavajući odgovor, analizirana su pomicanja obala i otoka na DOF kartama iz 2011., 2014. i 2017. (Slika 4).



Slika 4. Pronos vučenog nanosa na Zelenim prudima starog korita Drave uz HE Varaždin u tri kartografska prikaza (DOF 2011., 2014. i 2017., <https://geoportal.dgu.hr/>)

Promatrane su razlike u površini formiranja sprudova i otoka te erozije obala i sprudova u razdobljima od 2011. do 2014. i od 2014. do 2017. godine. Površine koje su dobivene pomnožene su prosječnom debljinom novonastale taložine i predstavljaju zaustavljanje procijenjene količine vučenog nanosa na dionici Zeleni Prudi u određenom vremenu ( $O_{z\text{px}+1}$ ) što ukupno za oba razdoblja iznosi više od 60.000 m<sup>3</sup> šljunčanog sedimenta. Isti postupak je napravljen za pokrenute procese erozije na Zelenim Prudima s ulaznom ukupnom količinom pokrenutog vučenog nanosa ( $I_{z\text{px}+1}$ )



što za šest godina promatranog razdoblja iznosi 138.000 m<sup>3</sup>. Ukupni izlaz iz promatrane dionice je pokrenuti nanos u toj dionici zbrojen s nanosom koji je erozijom s uzvodnih dionica došao i nije se zadržao u dionici. Taj nanos je nepoznat i može se samo procijeniti. Proces erozije i taloženja na Zelenim Prudima opisan je formulom:

$$I_{zpx+2} = I_{zpx} + (\sum I_{zpx+1} - O_{zpx+1})$$

Ulaz ( $I_{zpx+2}$ ) je veličina vučenog nanosa prenesena iz dionice Zeleni Prudi nizvodno. To je vučeni nanos koji je rezultat erozije i odlaganja obala, dna i sprudova tijekom prelijevanja na brani za vrijeme vodnih valova u promatranom razdoblju 2011.-2017. Zbroj svih učinaka erozije/količine nanosa na dionici Zeleni Prudi ( $\sum I_{zpx+1}$ ) je 138.000 m<sup>3</sup> i ta količina je izašla iz dionice Zeleni Prudi. Dio ulaznog vučenog nanosa s uzvodnih dionica ( $I_{zpx}$ ) na Zelenim Prudima je zadržan ( $O_{zpx+1} \approx 62.200$  m<sup>3</sup>) u formiranju otoka i proširenju sprudova, a dio je samo prošao kroz Zelene Prude. Tako znamo da je  $I_{zpx} > 62.200$  m<sup>3</sup> i ako pretpostavimo da uzvodna dionica erozijom donosi isto kao i promatrana, onda je ulaz u slijedeću dionicu 213.800 m<sup>3</sup> u periodu od 6 godina ili prosječno 35.600 m<sup>3</sup>/god. Taj pronos možemo usporediti s opažanjem zapunjavanja jezera između pragova P-5 i P-6 na Belim Kipima iz kojeg je tijekom eksploatacije iskapano oko 300.000 m<sup>3</sup> šljunka. Danas je jezero više od 50 % zatrpano šljunkom.

## 5. REZULTATI I RASPRAVA

Na starom koritu rijeke Drave uz HE Varaždin evidentno je premještanje nanosa. Odabrana analizirana dionica pokazuje aktivno pomicanje nanosa erozijom postojećih šljunkovitih slojeva inundacije rijeke. Analizirano prvo razdoblje 2011.-2014. uključuje epizodu velikih voda početkom studenog 2012. godine, te pokazuje veću aktivnost premještanja nanosa. Pojava spruda u koritu nizvodno od praga P-6 pokazuje da se jezero iz kojeg se eksploatirao šljunak zatrpano šljunkom i ne pronosi se dalje prema restituciji i akumulacijskom jezeru HE Čakovec. Zapunjavanjem preostalog dijela jezera i nastavak zatrpanja jezera između pragova P-4 i P-5 sprječava dodatno zapunjavanje akumulacije HE Čakovec vučenim nanosom. Procesi pokretanja i taloženja nanosa su izvjesni i u sljedećim desetljećima. Smanjenje erozijskih procesa, nedostatak vučenog nanosa, nepovoljni vodni režim, zaraštanje poplavnog prostora povećavaju rizik od poplava, smanjuju bioraznolikost i utječu na gubitak šljunčanih staništa novonastalih sprudova, kojih od Belih Kipa do Zelenih Pruda sada ima više nego prije regulacijskih radova. Talozenje nanosa u uzvodnim akumulacijama kao i pronos nanosa u starom koritu uz HE Varaždin, najdinamičniji su u uvjetima velikih voda. Negativne utjecaje pronosa nanosa kao što su uzdizanje inundacijskih površina, odvajanje rukavaca od toka i produbljivanje glavnog korita, moguće je ublažiti omogućavanjem bočnih erozijskih procesa postojećih nanosnih šljunčanih slojeva dravskog aluvija uz odgovarajuće mjere. To su tehnički zahvati, obnove korita i rukavaca, koji mogu ublažavati posljedice nedostatka nanosa na vodna tijela, okoliš i bioraznolikost. U tu svrhu provodi se EU projekt Drava LIFE kojim su predviđene

mjere dovođenja vode u lijevi rukavac u duljini od 2,3 km u kojem, u postojećem stanju, nema vode te obnove nekadašnjih sprudova sada obraslih vegetacijom. Projekt se provodi i sufinancira putem EU LIFE programa i ima vrlo slične metode koje su primijenjene u opisanoj regulaciji za vrijeme eksploatacije šljunka.

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon premještanja velikih količina nanosa rijeke za vrijeme izgradnje HE Varaždin te eksploatacije šljunka uz mjere osiguranja ciljeva za smanjenje rizika od poplava i očuvanje razina podzemnih voda, procesi pronosa vučenog nanosa nastavljeni su u smanjenom obimu u skladu s hidrološkim uvjetima u starom koritu Drave. Vučeni nanos u uzvodnom dijelu predstavlja problem državama uzvodno jer zatrpava akumulacije, dok nizvodno, u Hrvatskoj, nedostatak vučenog nanosa uzrokuje erodiranje dna i obala, spuštanje razina podzemnih voda, ukopavanje u tlo i potkapanje brane.

Temeljem provedene analize dobiven je podatak da u šest godina pronos vučenog nanosa iznosi 138.000 m<sup>3</sup>, odnosno prosječno 23.000 m<sup>3</sup>/god što je 6,3 puta manje nego što je godišnji deficit nanosa s uzvodnih dionica. Sadašnji vučeni nanos (šljunka i pijeska) pokreće se erozijskim procesima iz postojećih slojeva na poplavnom području između brane i restitucije HE Varaždin. Poduzetim mjerama na dijelu stare Drave, erozija korita i premještanje sprudova je prisutno u tolikoj mjeri da odgovara očuvanju bioraznolikosti, zaštiti podzemnih voda i smanjenju poplavnih rizika. Za daljnja poboljšanja dinamike rijeke bit će potrebne mjere revitalizacije u koritu i rukavcima poput onih koje se provode kroz Drava LIFE projekt s ciljem pružanja još kvalitetnijih usluga rijeke za sve dionike u prostoru rijeke.

## LITERATURA

- [1] Grđan, L., Kereša Z. (2004): *Restoration of Old Drava Riverbed at the Čakovec Hydropower Plant*, 3rd European Conference on River Restoration, Zagreb, str. 140-147.
- [2] <https://geoportals.dgu.hr>, (preuzeto: ožujak 2020.).
- [3] Institut za elektroprivredu (2019): *Okvirna procjena sedimenta rijeke Dunav i većih pritoka*, Projekt Denube Sediment, Vidaković Šutić, R., Jergović, M., Vrcelj, B., Sabolić, Đ., Matković, T., Zagreb.
- [4] JVP Hrvatska Vodoprivreda, Ispostava Varaždin (1992): *Idejni projekt regulacije rijeke Drave s mogućnošću eksploatacije šljunka od rkm 289+700 do 305+800 (staro korito uz HE Varaždin)*, Grđjan, L., Varaždin.
- [5] JVP Varaždin, Projektni odjel (1983): *Stanje korita rijeke Drave od Varaždina do brane HE Varaždin*, Grđjan, L., Varaždin.

- [6] Kereša, Z., Tošić, I. (2018): *Doprinos definiranju utjecaja pronosa nanosa u slivu rijeke Drave*, Zbornik radova, Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda, te smanjivanje poplavnih rizika-Suvremeni trendovi i pristupi, Brela, str. 63-72.
- [7] Žugaj, R. (2015): *Hidrologija*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, str. 436.





OKRUGLI STOL

## *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# MONITORING NANOSA U REPUBLICI HRVATSKOJ

## THE SEDIMENT MONITORING IN CROATIA

Nenad Kovačićek <sup>a</sup>, Dijana Oskoruš <sup>a</sup>

### SAŽETAK

U radu je prikazano trenutno stanje monitoringa nanosa u Republici Hrvatskoj (u daljnjem tekstu RH) koje provodi Državni hidrometeorološki zavod (u daljnjem tekstu DHMZ). Svakodnevno uzimanje uzoraka suspendiranog nanosa provodi se na 22 hidrološke postaje širom RH te se, na osnovi koncentracije nanosa u jednoj točki, proračunavaju dnevne, mjesečne i godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa na tim lokacijama. Profilska mjerenja suspendiranog nanosa provode se na 10 lokacija na 4 rijeke (Mura, Drava, Sava i Dunav). Redovno uzimanje uzoraka s dna i određivanje granulometrijskog sastava istog provodi se na 8 lokacija. U sklopu ovog rada predstavljena je i aktivnost: "Istraživački monitoring sedimenta dna vodotoka i jezera u Republici Hrvatskoj" koju provodi DHMZ u suradnji s Geotehničkim fakultetom iz Varaždina za Hrvatske vode kao naručitelja. Tijekom 2 godine uzimani su uzorci nanosa s dna vodotoka i jezera širom RH. Radi se o 55 lokacija i sveukupno 215 uzoraka nad kojima će se provesti granulometrijska analiza. Cilj ove aktivnosti je izrada prve baze podataka o stanju nanosa s dna vodotoka i jezera u RH.

### ABSTRACT

The current state of sediment monitoring in Croatia, carried out by the Meteorological and Hydrological Service, is shown in this paper. Daily sampling of suspended sediment is carried out on 22 hydrological stations across Croatia. On the basis of the suspended sediment concentration in one point, daily, monthly and yearly amounts

---

<sup>a</sup> Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb, 10000, Hrvatska, kovacickek@cirus.dhz.hr, oskorus@cirus.dhz.hr

of suspended sediment transport are being calculated in those locations. Profile measurements of suspended sediment are taken in 10 locations, 4 rivers (Mura, Drava, Sava and Danube). Regular bed load sampling and assessment of granulometric composition is carried out in 8 locations. As part of this paper the following activity was also presented: "Research monitoring of bed load sediment from rivers and lakes in the Republic of Croatia". This activity is conducted by the Meteorological and Hydrological Service in cooperation with the Faculty of Geotechnical Engineering from Varaždin for Croatian Waters, as a client. During 2 years, bed load sediment samples were taken from rivers and lakes throughout Croatia, more specifically in 55 locations with a total amount of 215 samples. These samples will undergo granulometric analysis and the purpose of this activity is to create the first database about the state of bed load sediment from rivers and lakes in Croatia.

*KLJUČNE RIJEČI: suspendirani nanos, nanos s dna, granulometrijska analiza, istraživački monitoring*

*KEYWORDS: suspended sediment, bed load sediment, granulometric analysis, research monitoring*

## 1. UVOD

U hidrološkim je obradama i analizama, uz poznavanje vodnih režima pojedinih vodotoka, od velike važnosti definiranje pronosa i količina nanosa. To je posebno važno za projektiranje akumulacijskih jezera jer njihov vijek trajanja vrlo često ovisi o količinama nanosa koje vodotokom dolaze u akumulaciju. Funkcionalnost plovnih, natapnih, drenažnih i ostalih kanala ovisi o količinama nanosa koji se u njima zadržava (Žugaj, 2000).

Sektor za hidrologiju DHMZ-a provodi monitoring nanosa u Republici Hrvatskoj. Prati se suspendirani nanos te granulometrijski sastav nanosa s dna.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

### 2.1. Suspendirani nanos

Redovni monitoring suspendiranog nanosa u RH provodi se kroz svakodnevno uzimanje uzoraka vode iz vodotoka i jezera te određivanje koncentracije suspendiranog nanosa u tim uzorcima. Koncentracija suspendiranog nanosa je parametar koji predstavlja masu suspendiranog materijala u jedinici volumena vode i izražava se obično u g/l ili kg/m<sup>3</sup>. Svakodnevno uzimanje uzoraka provodi se u suradnji s motriteljskom službom na 22 lokacije, odnosno hidrološke postaje diljem RH (Slika 1, Tablica 1). Jednom dnevno motritelji uzimaju uzorak vode. Uzorak se prelijeva preko filter papira gustoće 0,45 μm. Za filtriranje uzoraka koristi se filter papir "Munktell" 100/N, promjera 320 mm, 85 g/m<sup>2</sup>. Filteri se na kraju mjeseca šalju u DHMZ, gdje se laborato-

rijski obrađuju standardnom metodom (ISO 4365:2005) koja podrazumijeva sušenje na 105 °C, zatim hlađenje i vaganje (Slika 2). Na osnovi razlike u težini praznog i punog filter papira, dobivaju se koncentracije suspendiranog nanosa izražene u g/m<sup>3</sup> (Oskoruš, 2015).

Dobiveni podatak se usvaja kao srednja dnevna vrijednost koncentracije na određenoj lokaciji. Na temelju tog točkastog uzorkovanja proračunavaju se dnevne, mjesečne i godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa.

Početak ovakvog motrenja seže u 1960. godinu, kada se započelo s prvim motrenjima na rijeci Savi, točnije u Slavonskom Brodu.

Drugi oblik praćenja suspendiranog nanosa su povremena profilska mjerenja. Ona se provode na 10 hidroloških postaja i to na 4 rijeke: Mura, Drava, Sava i Dunav. Cilj ovih mjerenja je definiranje krivulja nanosa koje se koriste kao podloge za znanstvena istraživanja i projekte.

Na Slici 1 prikazana je karta Republike Hrvatske s osnovnom hidrografskom mrežom i lokacijama (označenim crnom bojom) na kojima se provode svakodnevna uzorkovanja suspendiranog nanosa te lokacijama (označenim crvenom bojom) na kojima se, uz gore spomenuta svakodnevna uzorkovanja, povremeno vrše i profilska mjerenja. S profilskim mjerenjima suspendiranog nanosa na rijeci Dunav (Batina, Dalj i Ilok) započelo se 2018. godine te je do sada izvršeno 6 mjerenja po postaji.



Slika 1. Redovni monitoring suspendiranog nanosa u Republici Hrvatskoj

Na tri lokacije na rijeci Savi (Podsused žičara, Rugvica i Jasenovac) za vrijeme profilskih mjerenja koncentracija suspendiranog nanosa uzimaju se i tzv. integratorski uzorci vode. Cilj tih uzorkovanja je definiranje granulometrijskog sastava suspendiranog nanosa. Pri tome se koristi metoda hidrauličke krupnoće, odnosno određivanje brzine tonjenja pipetiranjem po Andreasenu.



Slika 2. Uzimanje uzoraka vode za analizu suspendiranog nanosa te laboratorijska obrada dnevnih uzoraka filter papira pristiglih s terena

Tablica 1. Popis hidroloških postaja sa svakodnevnom mjerenjem suspendiranog nanosa

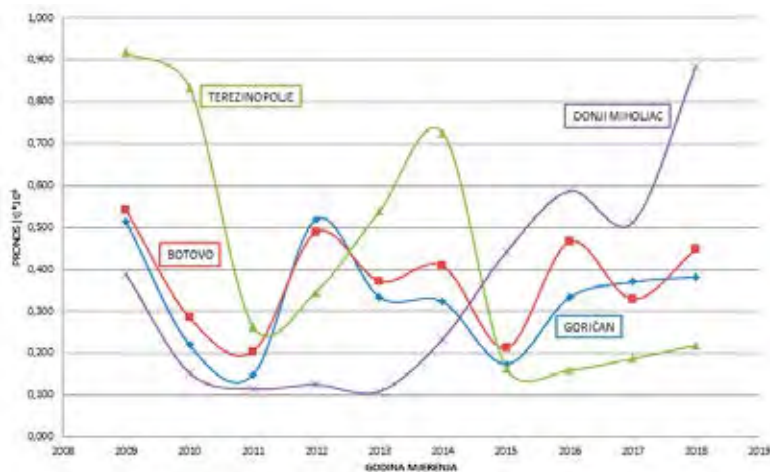
Šifra	Vodotok	Hydro.postaja	G - K koordinate	Period mjerenja	Konc. susp. nanos (min/max) [g/m <sup>3</sup> ]	Pronos susp. nanosa (min/max) [t/dan]
3054	KRAPINA	Kupljenovo	X 5088155; Y 5563758	1980.-2019.	0,030 (29.1.2012.) / 2398 (12.6.2005.)	0,005 (29.1.2012.) / 7983 (14.8.2014.)
3087	SAVA	Podsused	X 5074098; Y 5565652	1979.-2019.	0,010 (13.12.2011.) / 2894 (19.9.2007.)	0,070 (13.12.2011.) / 418460 (19.9.2007.)
3096	SAVA	Rugvica	X 5067325; Y 5595979	1978.-2019.	0,130 (22.12.2006.) / 2093 (10.11.2012.)	1,79 (8.2.2012.) / 153417 (9.11.2012.)
3219	SAVA	Jasenovac	X 5014177; Y 6414661	1978.-2019.	0,020 (9.1.2011.) / 601 (18.7.1998.)	1,14 (14.3.2011.) / 100763 (17.12.2011.)
3098	SAVA	Sl. Brod	X 5000950; Y 6500781	1960.-2019.	0,106 (14.2.1973.) / 747 (25.6.1964.)	2,67 (2.10.2009.) / 104873 (22.2.1969.)
3171	BIJELA	Badljeвина	X 5040307; Y 6437061	1984.-2019.	0,040 (12.12.2003.) / 4059 (13.2.1988.)	0,001 (19.12.2003.) / 4922 (8.5.1987.)
3188	BJELOVATSKA	Bjelovar	X 5083507; Y 6411531	1979.-2019.	0,070 (4.11.1982.) / 1770 (10.6.1992.)	0 (2.8.1983.) / 692 (7.5.1987.)
4016	KUPA	Hrvatsko	X 5043087; Y 5477111	1963.-2019.	0,010 (4.7.1999.) / 504 (25.9.1973.)	0,002 (30.8.2001.) / (25.9.1973.)
5008	DRAVA	Botovo	X 5122574; Y 6418679	1967.-2019.	0,030 (15.1.2012.) / 701 (23.8.2005.)	0,540 (15.1.2012.) / 66216 (23.8.2005.)
5035	MURA	Goričan	X 5142541; Y 6399933	1990.-2019.	0,040 (5.11.1997.) / 1500 (7.8.2017.)	0,288 (5.11.1997.) / 54782 (8.8.2017.)
5044	MURA	Mursko Središće	X 5135307; Y 5611140	2015.-2019.	0,030 (23.1.2017.) / 979 (8.8.2017.)	0,168 (23.1.2017.) / 36383 (8.8.2017.)
5063	DRAVA	Terezino Polje	X 5089033; Y 6458666	1990.-2019.	0,020 (8.1.2012.) / 694 (28.10.1993.)	0 (11.3.2015.) / 126221 (28.10.1993.)
5150	DRAVA	Donji Miholjac	X 5070050; Y 6513811	1967.-2019.	0,010 (5.11.2018.) / 891 (28.6.1981.)	0,177 (19.1.2012.) / 102898 (20.7.1972.)
5075	BEDNJA	Željeznica	X 5120233; Y 5592962	1987.-2019.	0,060 (9.9.2003.) / 2503 (18.5.1991.)	0,001 (9.9.2003.) / 4848 (18.5.1991.)
6007	PAZINČICA	Dubravica	X 5011930; Y 5419262	1971.-2019.	0 (20.8.1973.) / 17355 (25.7.1972.)	0 (20.8.1973.) / 4461 (3.2.2009.)
6080	BRAČANA	Abرامي	X 5031973; Y 5416896	1985.-2019.	0,020 (1.1.1998.) / 3644 (25.5.1990.)	0 (18.8.2003.) / 279 (21.1.1997.)
6086	BOTONEGA	Ispusni kanal	X 5021397; Y 5415439	1986.-2019.	0,090 (29.11.1986.) / 1092 (15.12.1986.)	0 (9.10.1987.) / 1167 (15.1.1987.)
6088	BOTONEGA	Akumulacija	X 5021141; Y 5415621	1988.-2019.	0,010 (22.1.2002.) / 181 (27.11.1988.)	/
6093	RAŠA	Potpičan	X 5005164; Y 5427860	1976.-2019.	0,010 (26.12.1998.) / 6151 (1.11.2008.)	0 (26.12.2001.) / 4342 (1.11.2012.)
5170	DUNAV	Batina	X 5078343; Y 6566799	2018.-2019.	4,60 (18.10.2018.) / 360 (24.9.2018.)	271 (18.10.2018.) / 36973 (25.5.2018.)
5130	DUNAV	Dalj	X 5038667; Y 6577956	2018.-2019.	4,16 (8.12.2018.) / 87,5 (7.11.2018.)	482 (24.10.2018.) / 23081 (30.12.2018.)
5024	DUNAV	Ilok	X 5010485; Y 6608805	2018.-2019.	0,560 (23.11.2018.) / 113 (10.11.2018.)	73,2 (23.11.2018.) / 19859 (10.11.2018.)

U Tablici 1 prikazan je popis svih hidroloških postaja na kojima se svakodnevno uzimaju uzorci suspendiranog nanosa te određuju dnevne koncentracije istih. Prikazane su i koordinate lokacija hidroloških postaja, periodi mjerenja te karakteristične vrijednosti koncentracija ( $\text{g/m}^3$ ) i dnevni pronosi suspendiranog nanosa ( $\text{t/dan}$ ).

Kumulativnim zbrajanjem dnevnih pronosa suspendiranog nanosa raspoložemo mjesečnim, odnosno godišnjim količinama pronosa istog za pojedini protjecajni profil. Tako su, kao primjer, u Tablici 2 i na Slici 3 prikazane sume godišnjih pronosa suspendiranog nanosa za protjecajne profile na rijeci Dravi i Muri u razdoblju od 2009.-2018. godine, što predstavlja niz od 10 godina.

Tablica 2. Godišnji pronosi nanosa za protjecajne profile na rijeci Dravi i Muri

NAZIV STANICE	2009(t)	2010(t)	2011(t)	2012(t)	2013(t)	2014(t)	2015(t)	2016(t)	2017(t)	2018(t)	PROSJEK(t)
MURA-GORIČAN	514013	219548	148430	520713	333681	323131	173999	332650	370117	381641	331792,7
DRAVA-BOTOVO	541303	285464	203528	489240	371758	408496	211935	465851	328583	448916	375507,4
DRAVA TEREZINO POLJE	916660	834537	263726	346737	539045	726185	163807	160420	186784	219496	435739,7
DRAVA-DONJI MIHOLJAC	387935	152840	114912	124707	109218	233933	440733	587259	512226	884161	354792,4

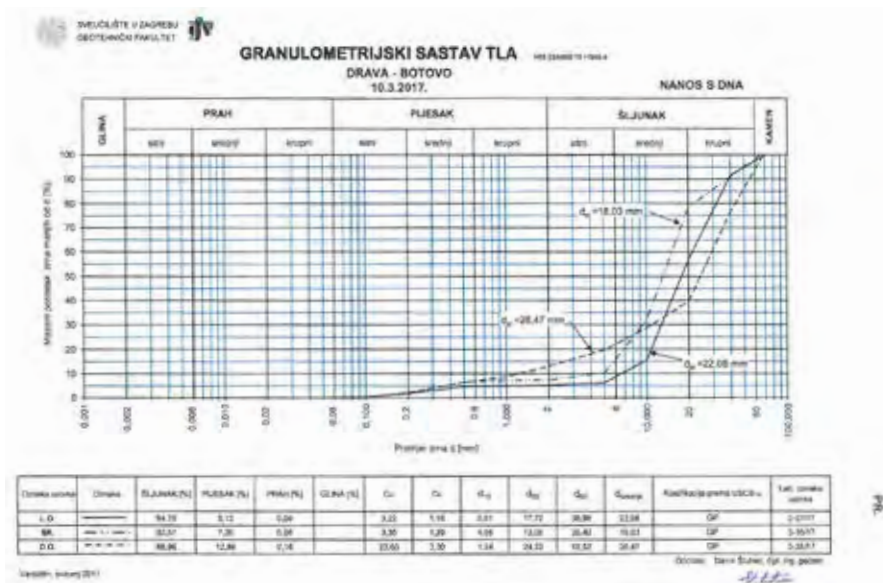


Slika 3. Grafički prikaz godišnjih pronosa nanosa za protjecajne profile na rijeci Dravi i Muri

## 2.2. Nanos s dna

Uz praćenje suspendiranog nanosa redovno se prati i granulometrijski sastav nanosa s dna. To je, prema porijeklu, koritoformirajući nanos koji se taloži na dnu korita vodotoka. Uzorci se uzimaju na 8 lokacija: na Muri (Mursko Središće i Goričan), Dravi (Botovo, Terezino Polje, Donji Miholjac i Šemovec) i Savi (Rugvica i Jasenovac) te se analiziraju metodom sijanja i areometriranja, kako bi se pratila promjena u granulometrijskom sastavu kroz neko vremensko razdoblje (Slika 4).





Slika 4. Primjer rezultata granulometrijske analize u grafičkom i tabličnom obliku za hidrološku postaju Botovo na Dravi

### 2.3. Istraživački monitoring

Tijekom 2019. godine pokrenuta je aktivnost: “Istraživački monitoring sedimenta dna vodotoka i jezera u Republici Hrvatskoj”. Tu aktivnost provodi DHMZ u suradnji s Geotehničkim fakultetom iz Varaždina za Hrvatske vode, kao naručitelja. Lokacije za uzorkovanje sedimenta s dna i obala definirane su na način da obuhvaćaju već postojeće lokacije hidroloških postaja na kojima se vrši hidrološki monitoring. Radi se o sveukupno 55 lokacija diljem Republike Hrvatske (Slika 6). Prilikom uzimanja uzoraka bilježe se točne lokacije uzorkovanja u odnosu na poprečni profil vodotoka. Broj uzoraka u pojedinim poprečnim profilima varira od 3 do 7, ovisno o slivnoj površini i samoj širini vodotoka, a ukupan broj uzoraka iznosi 215. Na definiranim lokacijama monitoringa provode se sljedeće laboratorijske analize uzoraka: gustoća čestica tla (masa jedinice volumena), sadržaj organskih tvari, granulometrijski sastav (raspodjela čestica tla po veličini, izražena u postotku mase) i Atterbergove granice konzistencije. Uz samo uzorkovanje paralelno se, nakon vađenja, provodila i fotodokumentacija izgleda uzorka s mjerilom (Slika 5). Analize se provode prema važećim standardima i normama za uzorkovanje i analiziranje nanosa:

- Određivanje granulometrijskog sastava prema normi HRN EN ISO 17892-4
- Određivanje sadržaja vode u tlu i stijeni u odnosu na masu, metodom ispitivanja ASTM D 2216-10
- Određivanje granice tečenja, metodom ispitivanja BS 1377-2:1990
- Određivanje granice plastičnosti i indeksa plastičnosti, metodom ispitivanja BS 1377:1990

- Određivanje posmične čvrstoće tla izravnim posmikom u maloj ćeliji, metodom ispitivanja BS 1377-7:1990

Cilj ovog projekta je izrada prve baze podataka o stanju nanosa s dna vodotoka i jezera u RH.



Istraživački monitoring sedimenta dna vodotoka i jezera u RH

**Profil "PP 5063"**



I. Osnovni podatci

Vodnogospodarski odjel (VGO)	Podravina
Šifra / Vodotok / Ime / Površina sliva (km <sup>2</sup> )	5063 / Drava / Terezino Polje / 33916
Datum / Vrijeme / Vodostaj / Protok	7.8.2019. / 10:00 / -237 / 433,18
Mikrolokacija	Vodometrični profil
Koordinate poprečnog profila (X, Y) - L.O. i D.O.	5-089-033, 6-453-666

II. Karte (topografska karta, Google karta) s naznačenim poprečnim profilom



III. Fotografije lokacije (vodokazni profil, L.O., D.O., uzvodno, nizvodno, uzorci)



IV. Točke uzorkovanja s pripadajućim stacionažama

Ime točke	PP5063-1	PP5063-2	PP5063-3	PP5063-5	PP5063-7	PP5063-8	PP6053-9
Stacionaža(m)	19,8	39,7	59,5	99,1	138,7	158,5	178,3

Slika 5. Primjer ispunjenog formulara nakon uzorkovanja





*Slika 6. Lokacije postaja za istraživački monitoring sedimenta dna vodotoka i jezera u Republici Hrvatskoj*

### 3. ZAKLJUČAK

Monitoring nanosa u RH trenutno obuhvaća pronos suspendiranog nanosa i granulometrijski sastav nanosa s dna vodotoka.

U planu je implementacija optičkih senzora za mutnoću na lokacijama gdje se svakodnevno prati suspendirani nanos. Uzorkovanje će se i dalje nastaviti te će se definirati korelacijski odnos između mutnoće i koncentracije suspendiranog nanosa na tim lokacijama, kako bi se u realnom vremenu pratila dinamika kretanja suspendiranog nanosa.

U planu je i proširenje mreže hidroloških postaja na kojima će se pratiti suspendirani nanos i nanos s dna vodotoka.

## LITERATURA

- [1] Oskoruš, D. (2015): *Doprinos analizi dinamike suspendiranog nanosa srednjega toka rijeke Save*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, str. 161.
- [2] Žugaj, R. (2000): *Hidrologija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, str. 351-352.



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**MJERENJE KONCENTRACIJE  
SUSPENDIRANOG NANOSA U RIJECI DRAVI  
TIJEKOM VELIKOVODNOG DOGAĐAJA**

**MEASUREMENT OF SUSPENDED SEDIMENT  
CONCENTRATION IN THE DRAVA RIVER  
DURING HIGH WATER EVENT**

Janja Kramer Stajnko<sup>a</sup>, Renata Jecl<sup>a</sup>, Matjaž Nekrep Perc<sup>a</sup>

**SAŽETAK**

Problem suspendiranog nanosa u rijeci Dravi u Sloveniji je višestruk i ima značajan utjecaj u smislu eksploatacije hidroenergije i dugoročnog planiranja upravljanja rizicima od poplava kao i upravljanja vodama. Oborine i otjecanje su glavni pokretači erozije koji uzrokuju pojavu i pronos nanosa. Odnos između koncentracije nanosa i protoka pri pojavi nevremena je često u obliku petlji histereze. U predmetnom radu, analiziran je odnos između koncentracije nanosa i protoka vode pri velikovodnom događaju na rijeci Dravi 2018. godine. Opažena je histereza u smjeru suprotnom od kazaljke sata, što ukazuje da se većina izvora nanosa nalazi na samom kraju područja koje pridonosi površinskom otjecanju, čime nanos dolazi do vodotoka uglavnom tijekom silaznog kraka.

**ABSTRACT**

The problem of suspended sediment in the Drava River in Slovenia is versatile and has a significant impact in terms of hydropower exploitation and the long term planning of flood risk management as well as water management. Rainfall and runoff

---

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, Transportation Engineering and Architecture, University of Maribor, Smetanova 17, Maribor, 2000, Slovenia, janja.kramer@um.si, renata.jecl@um.si, matjaz.nekrep@um.si

are the main erosion agents which are causing the occurrence and transportation of sediment. The relation between sediment concentration and discharge during a storm event is often in the shape of hysteresis loops. In the present contribution, the relation between sediment concentration and water discharge for a high water event in the year 2018 in the Drava River has been analyzed. Anti-clockwise hysteresis was observed, indicating that the majority of sediment sources are located at the far end of the area contributing to surface runoff and thus the sediment reaches the stream mainly during the falling limb.

*KLJUČNE RIJEČI: pronos suspendiranog nanosa, rijeka Drava, velikovodni događaj, efekt histereze*

*KEYWORDS: suspended sediment transport, the Drava River, high water event, hysteresis effect*

## 1. INTRODUCTION

Suspended sediment in the watercourse represents the majority of all material that is moving along the stream and is crucial for the siltation of river profiles, flood-prone areas and surface waters (lakes, sea shore). Sediments in rivers occur due to the weathering processes of the upper layers of the earth's crust with the interaction of erosion forces that move the material and cause further movement along the channel. The amount of material in transportation depends on the discharge, since the higher discharge causes stronger turbulent forces on the solid particles and consequently a bigger amount of suspended load moving along the watercourse. On the other hand, when the discharge is low, the transport capability is reduced and the material starts to deposit on the river bottom and river banks. It is proven that the amount of sediment in the watercourse depends on the climate change, the melting of the glacier and intense erosion processes resulting in bigger amounts of the material. The dynamics of transport as well as the amount of sediment are also influenced by the human actions and interventions on the riverbed, e.g. building of hydropower plants and other hydraulic structures. The result of material transport is filling of the accumulation reservoirs and the river bed which reduces the natural cycle of water circulation because of weaker draining into the aquifers.

Sediment deposition on the river banks is especially problematic in the case of floods, since they are depositing on the floodplains and neighborhood areas. Adsorbed organic as well as inorganic substances occur on the sediment particles, which can cause chemical contamination of the flooded areas. Moreover, it is proven that the damage caused by floods is significantly higher in the case of higher concentration of sediments in water than in the case of clear water. Namely, the material which is deposited in the flooded areas, reduces the capability of the return flood wave which causes bigger damage.

The relation between the sediment concentration and discharge can be described with different hysteretic concentration–discharge curves such as single-valued (straight or curved), clockwise or positive loop, anti- or counterclockwise loop, single-valued plus a loop and figure eight (Williams, 1989, Martin et al. 2014). Different types of loops are indicating the changes in sediment availability and distribution of sediment sources within the catchment. There are several different factors and processes influencing the variation of suspended sediment concentration in dependence on water discharge versus time whereby the interpretation is still very complex and challenging.

To improve the understanding and prediction of the sedimentation processes during high water events, it is crucial to obtain an efficient model based on real data collected in the field. For efficient management of suspended load, it is necessary to perform proper measurements to obtain the amount and dynamics of sediments in movement in dependence on the changing hydraulic conditions. Data collected in the field are the input for the establishment of a suitable model, which can be used to set up long-term plan for sediment management, and also for the calibration of the numerical models. The measurement of the suspended load serves for calculation of common amount of the suspended load in the water which is transported through a selected section of watercourse in one year. The product of the concentration with the mean daily value of discharge gives the transport rate of the suspended load.

In the present paper, an example of suspended sediment measurements in the Drava River during a high water event at the end of October in 2018 is presented. A relationship between the sediment concentration and discharge is obtained resulting in the anti-clockwise hysteresis loop. Based on that some conclusions about the origin of sediment in the river can be predicted.

## **2. MEASUREMENT OF SUSPENDED SEDIMENTS IN THE DRAVA RIVER**

The Drava River is one of the most exploited rivers in the world in terms of hydropower, with almost 100 % of its water potential energy being exploited. There are 8 hydropower plants on the Drava in Slovenia which are strongly influencing the suspended sediment dynamics in the watercourse.

In the past, the monitoring of the suspended load in the Drava River at the measurement site in Ptuj was performed during the period from 1956 until 1975. No other measurements within the national hydrological monitoring were taken. In 2013 the data exchange on measured turbidity of the Drava River was carried out, at the locations where Dravske elektrarne (DEM) – manager of hydropower plants on the Drava River – are performing the monitoring. The turbidity measurement on the four measurement locations in reservoirs of hydropower plants started gradually in 2011 on the first location, in 2012 on two additional locations and in 2013 on the fourth location (Figure 1).



*Figure 1. Locations of turbidity measurements on the Drava River in Slovenia*

The Slovenian Environment Agency (ARSO) has performed the analysis based on the raw hourly data which were forwarded from the DEM. The relation between the measured turbidity and the amount of suspended load was not considered. However, the concentration of suspended load in watercourses is one of the parameters prescribed by the European Union under the European Water Framework Directive (Water Framework Directive 2000/60/EC) and is included into the national hydrological monitoring of surface waters. ARSO is performing continuous monitoring of suspended sediment only on larger watercourses, the Drava River is still not among them, since DEM as the manager of hydropower plants is performing the turbidity measurement continuously.

### **3. SUSPENDED SEDIMENT SAMPLING**

Measurement of the amount and dynamics of the suspended load in watercourses is despite various established methods still a complex problem, where several simplifications and assumptions are necessary. Transport of sediments is a very dynamic process, hence, constantly changing conditions in the rivers cannot be proven by any measurement technique. Consideration of the time and space variability of sediment transport in longitudinal and transversal cross section is necessary when choosing the suitable measurement model. If the exact fraction volume of sediments is needed, the combination of direct and indirect measurement techniques is required. (Habersack & Haimann, 2009).

There are many obstacles and restrictions when performing measurements of suspended load in watercourses, which are mostly related with the selection of appropriate measurement technique, proper use of the measuring instrument and the location of measurement. Measurements are usually carried out close to the bridges whereas the measuring instruments are moved over the watercourse using a motorboat. Therefore, there are several limitations when selecting the measurement

areas, moreover, the access in certain protected areas is limited, since the use of internal combustion engines is prohibited.

Survey of suspended sediment concentration on the Drava River during the high water event at the end of October 2018 has been carried out at a location of Duplek bridge (Figure 2), which is located between the cities of Maribor and Ptuj. In this part of the river the discharge channel is separated from the riverbed of the Drava at the Melje dam in order to supply the Zlatoličje Power Plant, which was built between the years 1964 and 1969. The maximum capacity of the derivation channel is 500 m<sup>3</sup>/s. In case when the capacity of the derivation channel is reached, the excess of the water flows in the (natural) riverbed. The required environmental river discharge in this area during winter time (from 15<sup>th</sup> of October until 15<sup>th</sup> of March) is 10 m<sup>3</sup>/s and during summer time (from 15<sup>th</sup> of March until 15<sup>th</sup> of October) is 20 m<sup>3</sup>/s.

The high water event in autumn 2018 started on 29/10/2018, when the discharge of the Drava exceeded the value of 500 m<sup>3</sup>/s. The discharge in the (natural) riverbed started to increase from 10 m<sup>3</sup>/s, the maximum measured discharge was 1391 m<sup>3</sup>/s (Figure 3). The values of discharge higher than 1000 m<sup>3</sup>/s lasted for three days, after 31/10/2018 the discharge started to decrease.



*Figure 2. Location of Duplek bridge on the Drava River where the samples were collected  
– normal conditions  $Q = 10 \text{ m}^3/\text{s}$*

The real time discharge data were acquired from the automatic measuring station located on the Melje dam from the site of DEM and are available online at any time.

In order to determine the concentration of suspended sediment in dependence on the discharge during high water event the water samples were collected manually from the bridge (Figure 4) in 1000 ml plastic sampling bottles. The collection of water samples started at the discharge 796 m<sup>3</sup>/s. The samples were collected at one- or two-hour intervals according to increase dynamics of the discharge. The samples were collected until 4/11/2018, while in the last four days (when the values of the discharge were less than 500 m<sup>3</sup>/s and were decreasing significantly) only one sample per day was collected.



Afterwards the water samples were filtered through glass microfiber filters, while the suspended sediment concentration was determined according to standard SIST EN 872:2005 (Water quality – Determination of suspended solids – Method by filtration through glass fibre filters). Filter papers were oven dried and weighted with RADWAG AS 220.R2 Analytical Balance.



*Figure 3. Location of Duplek bridge on the Drava River during high water event in October 2018,  $Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$*



*Figure 4. Collection of water samples from Duplek bridge during high water event in October 2018*

#### **4. RESULTS AND DISCUSSION**

The results of the suspended sediment measurements during high water event in October 2018 are given in Table 1 and are furthermore shown in Figure 5. It is obvious that the suspended sediment concentration during a rising limb is not equal to the values measured at equivalent flows during a falling limb. The changes in suspended sediment concentrations are not only a function of energy conditions in dependence on the discharge values, where the sediment is transported in cases of high values of discharge and stored at the low discharge conditions. It is obvious that some

other factors such as sediment availability, rainfall intensity, land use and vegetation cover are crucial for the sediment dynamics. Variable sediment availability results in typical hysteresis effects when observing the dependence on discharge and sediment concentration (Asselman, 1999).

Table 1. Suspended sediment concentrations measured during the high water event at the end of October 2018

Date	Time	Sample	Discharge [m <sup>3</sup> /s]	C [mg/l]	Date	Time	Sample	Discharge [m <sup>3</sup> /s]	C [mg/l]
29/10/2018	05:33:00	V1	796	245,4		15:33:00	V27	1188	1720,8
	06:23:00	V2	895	232,2		16:28:00	V28	1297	1692,4
	07:28:00	V3	885	312,2		17:28:00	V29	1346	1706
	08:33:00	V4	883	446,2		18:33:00	V30	1391	2187,6
	09:28:00	V5	879	421,4		19:33:00	V31	1305	1866
	10:28:00	V6	872	405,4		20:23:00	V32	1303	1792
	11:28:00	V7	831	408		21:28:00	V33	1296	2080,4
	12:28:00	V8	765	507,8		22:33:00	V34	1327	1813,8
	14:38:00	V9	674	455,2		23:28:00	V35	1313	2110
	16:33:00	V10	677	450	31/10/2018	00:28:00	V36	1259	2450,2
	18:28:00	V11	675	351,8		01:28:00	V37	1259	2216,6
	19:38:00	V12	900	371		03:33:00	V38	1163	1874,2
	21:23:00	V13	872	504,6		04:33:00	V39	1004	1956,6
	23:28:00	V14	790	362,4		05:39:00	V40	795	2162,8
30/10/2018	01:29:00	V15	937	376,2		06:33:00	V41	826	1984,2
	02:28:00	V16	1037	369,6		08:33:00	V42	837	2058,2
	03:25:00	V17	1105	484		11:28:00	V43	510	1921,8
	05:27:00	V18	1262	596,4		14:28:00	V44	412	1826,8
	07:24:00	V19	1385	817,6		17:33:00	V45	603	2109
	08:37:00	V20	1380	1077		20:28:00	V46	444	1994,8
	09:28:00	V21	1388	1162,2	01/11/2018	09:18:00	V47	465	1621,6
	10:18:00	V22	1317	1176,8		16:23:00	V48	334	1221
	11:28:00	V23	1243	1376,2	02/11/2018	10:33:00	V49	357	604,4
	12:28:00	V24	1108	1448,6	03/11/2018	10:23:00	V50	157	308,8
	13:33:00	V25	1142	1548,8	04/11/2018	10:28:00	V51	160	172,6
	14:28:00	V26	1143	1468	05/11/2018	15:13:00	V52	92	104,6

Figure 6 shows a relationship between suspended sediment concentrations and discharge for a section of the Drava River during the high water event in October 2018. A variation of suspended sediment concentrations at equivalent flows can be observed resulting in an anti- or counterclockwise hysteresis loop: suspended sediment concentrations are lower on the rising limb than on the falling limb or turbidity peaks

occur after discharge peaks. This behavior indicates a more distant sediment source, a discharge threshold that must be reached to entrain consolidated bank sediments, or a rainfall threshold required to initiate overland flow (Williams, 1989, Martin et al., 2014). However, this can be also due to material which was eroded within a drainage basin and did not reach the stream during the previous high water event and settled on the slope. The surface runoff transported the sediments during the next high water event right into the stream. There are some reports (Russel et al., 2001) where the high values of suspended sediment concentrations during a falling limb are attributed as a consequence of bank collapse.

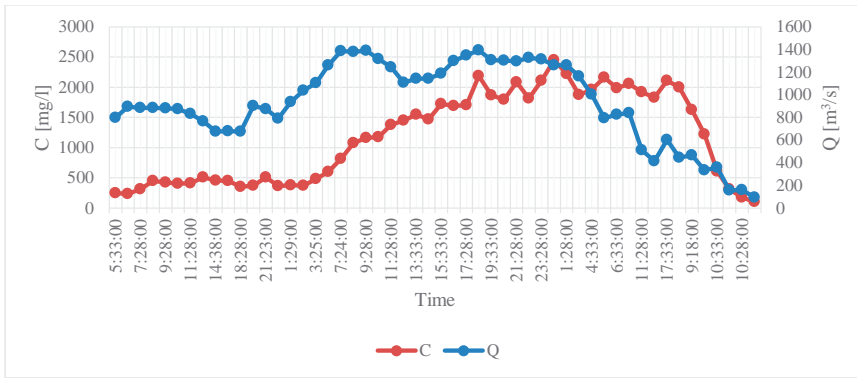


Figure 5. Time evolution of the water discharge  $Q$  and suspended sediment concentrations  $C$  for the high water event in October 2018

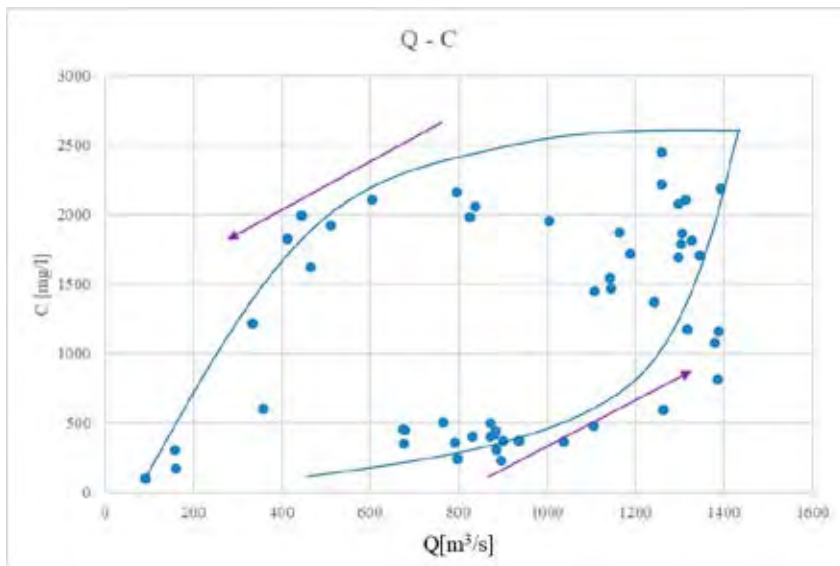


Figure 6. Relationship between the suspended sediment concentrations  $C$  and the water discharge values  $Q$

In order to determine which of the above-mentioned factors play a significant role in increasing suspended sediment concentrations during the falling limb, more data about the land use and rainfall intensities should be analyzed.

## 5. CONCLUSION

An example of suspended sediment dynamics in a section of the Drava River during the high water event in October 2018 is presented where the water samples of one discharge wave have been collected and analyzed. An anti-clockwise hysteresis occurred, where the majority of sediments is transported during the falling limb. This can be a consequence of bank collapse during a high discharge wave or the sources of sediments which are located at the far end of the streambank. On the other hand, in the studied case the high values of discharge (higher than 1000 m<sup>3</sup>/s) lasted for three days, which also initiated the movement of settled sediment in the (natural) riverbed which started moving downstream with delay. However, further investigations e.g. about the land use, would be needed in order to determine the origin of the sediment occurring in the streambank during the high water event.

The rate of suspended sediment transport during rainfall-runoff events is significant with respect to total suspended sediment load. In order to obtain a reliable and comprehensive model of suspended sediment dynamics during extreme conditions, it is necessary to determine all key factors which are influencing the quantity and dynamics of suspended sediment such as energy condition, sediment availability, rainfall intensity, land use, vegetation cover.

## REFERENCES

- [1] Asselman, N. E. M. (1999): *Suspended sediment dynamics in a large basin: the River Rhine*, Hydrol. Processes, 13, 1437-1450.
- [2] Bača, P. (2008): *Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia*, Hydrological Sciences Journal, 53:1, 224-235.
- [3] Habersack, H., Haimann, M. (2009): *Schwebstoffmessungen in Österreich*, Universität für Bodenkultur, Wien.
- [4] Khanchoul, K., Saaidia, B., Altschul R. (2018): *Variation in sediment concentration and water discharge during storm events in two catchments, northeast of Algeria*, Earth Sciences Malaysia, 2, 1-9.
- [5] Martin, S. E., Conklin, M. H., Bales, R. C. (2014): *Seasonal Accumulation and Depletion of Local Sediment Stores of Four Headwater Catchments*, Water, 6, 2144-2163.
- [6] Russel, M. A., Walling, D. E., Hodgkinson, R. A. (2001): *Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK*, J. Hydrology 252, 1-24.

- [7] Williams, G. P. (1989): *Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers*, Journal of Hydrology, 111, 89-106.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**BILANCA RIJEČNOG NANOSA NA SAVI I DRAVI  
KAO DIO PROJEKTA DANUBE SEDIMENT**

**SAVA AND DRAVA RIVER SEDIMENT BALANCE  
AS PART OF DANUBE SEDIMENT PROJECT**

**Tanja Lubura Matković<sup>a</sup>, Renata Vidaković Šutić<sup>a</sup>**

**SAŽETAK**

Na slivu rijeke Dunav identificirane su sve veće razlike u procesima erozije i taloženja nanosa. U sklopu međunarodnog projekta Danube Sediment - „Upravljanje dunavskim nanosom - Obnova ravnoteže nanosa u Dunavu“ izrađene su transnacionalne Smjernice za upravljanje nanosom na slivu rijeke Dunav koje će pružiti podršku dionicima i tijelima za upravljanje vodama na slivu.

Unaprijeđenje spoznaja o nanosu i relevantnim procesima (erozija, taloženje, transport i eksploatacija) nužno je za održivo upravljanje nanosom. Mjerenje i pohranjivanje podataka o pronosu nanosa na području RH u nadležnosti je Državnog hidrometeorološkog zavoda RH.

U sklopu projektnih aktivnosti, provedeno je prikupljanje i sistematizacija svih provedenih mjerenja na dijelu sliva rijeke Dunav u RH. Za raspoložive podatke izrađena je bilanca nanosa, a rezultati su pohranjeni u odgovarajućoj bazi podataka.

U radu će se prikazati elementi bilance riječnog nanosa u Savi i Dravi, u korelaciji s hidrološkim značajkama i trendovima, te dati prilog ocjeni utjecaja antropogenih aktivnosti na pronos nanosa.

---

<sup>a</sup> Institut za elektroprivredu d.d., Koturaška 51, Zagreb, 10000, Hrvatska, tanja.lubura-matkovic@ie-zagreb.hr, renata.sutic@ie-zagreb.hr

## ABSTRACT

Increasing differences in sediment deposition and erosion have been identified in the Danube basin. As part of the Danube Sediment international project - "Management of the Danube sediment - Restoration of the sediment balance in the Danube", Transnational Guidelines for sediment management in the Danube River Basin have been developed, which will support stakeholders and Water Management Institutions in the basin.

Improving the knowledge of the river sediment and the relevant processes (erosion, sedimentation, transport and exploitation) are necessary to reach sustainable sediment management. Measurement and database of sediment transport data in Croatia is the responsibility of the Croatian Meteorological and Hydrological Service.

As part of the project activities, the collection and systematization of all measured data in the part of the Danube basin in the Republic of Croatia was carried out. For the available data, a balance sheet was created and the results were stored in an appropriate database.

The paper will present the elements of the river sediment balance in the Drava River and the Sava River in correlation with hydrological characteristics and trends, and provide an assessment of the impact of anthropogenic activities on the sediment regime.

*KLJUČNE RIJEČI: pronos riječnog nanosa, rijeka Sava, rijeka Drava, režim površinskih voda, morfološke promjene*

*KEYWORDS: river sediment transport, Sava River, Drava River, surface water regime, morphological changes*

## 1. UVOD

Nanos je integralni prirodni dio akvatičnih sustava, bitan u odvijanju hidroloških, geomorfoloških i ekoloških procesa. Morfodinamički status prirodnih vodotoka očituje se u ravnoteži ulaznih i izlaznih količina nanosa. Promjene u dinamici riječnog nanosa, u najvećoj su mjeri posljedica utjecaja ljudskih aktivnosti na rijekama i njihovim slivovima.

Sukladno cilju projekta Danube Sediment [3] prikupljeni su, sistematizirani, obrađeni i interpretirani svi raspoloživi podaci o količinama i sastavu riječnog nanosa na dijelu sliva rijeke Dunav u Republici Hrvatskoj.

Obrade su također obuhvatile:

- hidrološke i batimetrijske podatke na lokacijama hidroloških stanica
- analizu značajki suspendiranog i vučenog nanosa, te nanosa s dna
- izradu bilance nanosa
- analizu morfološkog razvoja rijeka s naglaskom na ljudske aktivnosti.

## 2. RASPOLOŽIVI MJERENI PODACI

Analizom ulaznih podataka ustanovljeno je da je od većih hrvatskih rijeka, na rijeci Dravi provedeno najviše istraživanja, mjerenja i analiza riječnog nanosa, dok se za rijeku Savu raspolaže ograničenim fondom podataka. Za razliku od opažanja vodostaja, koja se na hidrološkim stanicama provode gotovo dva stoljeća, nanos se na rijekama Dravi i Savi započeo mjeriti tek šezdesetih godina prošlog stoljeća, dok se na Dunavu takva mjerenja uopće ne provode.

### 2.1. Metodologija i lokacije mjerenja na rijeci Dravi

Istraživanja i mjerenja riječnog nanosa na rijeci Dravi vezana su uz pripremu i realizaciju izgradnje lanca hidroelektrana na rijeci Dravi i provedbi opsežnih regulacijskih radova. Na Dravi su uglavnom vršena tri tipa mjerenja suspendiranog nanosa:

- svakodnevna uzimanja uzoraka riječne vode i laboratorijska ispitivanja koncentracije suspendiranog nanosa
- povremena profilna mjerenja batometrom kojim se uzimaju uzorci (s površine, sredine i dna) na vodomjernim vertikalama poprečnog presjeka, s laboratorijskim ispitivanjem koncentracije i granulometrijskog sastava uzoraka
- povremena uzimanja integratorskih uzoraka po površini rijeke preko cijele širine poprečnog presjeka i laboratorijska ispitivanja koncentracije i granulometrijskog sastava uzoraka.

Od 2012. godine u primjeni je metoda profilskih mjerenja ADCP uređajem (Acoustic Doppler Current Profiler) čija se mjerenja i laboratorijska ispitivanja uzoraka provode sukladno odgovarajućim ISO i HR normama.

Povremena profilna mjerenja pronosa vučenog nanosa na predmetnim dionicama Drave, Karolyevim hvatačima ili obilježivačima vršile su hrvatska i mađarska hidrometeorološka služba na lokacijama h.s. Donja Dubrava, h.s. Botovo, h.s. Novo Virje, h.s. Terezino Polje (Barcs) i h.s. Donji Miholjac (Dravaszabolcs). Uslijed nedostatka financijskih sredstava ta mjerenja su ukinuta i danas se ne provode.

U sklopu Projekta Danube Sediment provedena je sistematizacija i analiza raspoloživih dnevnih podataka vodostaja, protoka, koncentracije i pronosa suspendiranog nanosa u razdoblju 1926.-2016. godina s hidroloških stanica Varaždin, Donja Dubrava, Botovo, Novo Virje skela, Terezino Polje i Donji Miholjac na Dravi. Mjerenja suspendiranog nanosa na lokacijama Varaždin i Donja Dubrava prestala su nakon izgradnje hidroelektrana na Dravi.

### 2.2. Metodologija i lokacije mjerenja na rijeci Savi

Mjerenja suspendiranog nanosa na rijeci Savi sastavni su dio sustava redovitog hidrološkog praćenja, a uključuju sljedeće:

- svakodnevna mjerenja koncentracije nanosa iz jedne točke pri površini na ukupno četiri stanice na rijeci Savi (Podsused žičara, Rugvica, Jasenovac i Slavonski Brod) i na šest stanica na pritokama



- proračun dnevnog pronosa suspendiranog nanosa na navedenim hidrološkim stanicama na rijeci Savi, na temelju točkastog uzorkovanja
- povremena profilna mjerenja koncentracije i sekundnog pronosa nanosa na tri lokacije na rijeci Savi (hidrološke stanice Podsused žičara, Rugvica i Jasenovac)
- povremena analiza granulometrijskog sastava suspendiranog nanosa za navedene tri lokacije na rijeci Savi.

Svakodnevna uzorkovanja riječne vode s površine, radi određivanja koncentracije i kasnijeg određivanja pronosa suspendiranog nanosa, započela su na rijeci Savi kod Slavonskog Broda 1960. godine i traju u navedenom profilu do danas, s time da su postojali prekidi u mjerenjima u razdoblju 1993.-2004. godina. Potkraj sedamdesetih godina takva su mjerenja započeta i na lokacijama h.s. Podsused žičara, h.s. Rugvica i h.s. Jasenovac. Osim navedenog, mjerenja su se od 1963. godine vršila u još jednom profilu, h.s. Stara Gradiška, ali su ukinuta 1991. godine.

U novije vrijeme, na predmetnoj dionici Save nisu vršena mjerenja vučenog nanosa već se mjeri samo koncentracija, pronos i sastav suspendiranog nanosa i nanosa s dna. Hidrološke značajke rijeke Save za potrebe Projekta Danube Sediment definirane su na temelju rezultata mjerenja vodostaja i protoka raspoloživih za razdoblje 1921.-2016. godina na hidrološkim stanicama

### ***2.3. Raspoloživi mjereni podaci na Dunavu***

S obzirom da na Dunavu u Hrvatskoj nema motrenja nanosa sve obrade u sklopu Projekta Danube Sediment temeljene su na podacima o vodostajima i protocima na hidrološkim stanicama Batina, Aljmaš, Dalj, Vukovar i Ilok, kao i zabilježenim promjenama u Q-H krivuljama koje se na svim stanicama definiraju tek posljednjih 10-ak godina. Provedena je i sistematizacija i analiza snimki poprečnih presjeka na lokaciji stanica, koje su u HIS-u raspoložive samo za novije razdoblje u 2010. i 2014./2015. godini.

## **3. OSVRT NA ANTROPOGENE UTJECAJE**

Rijeke Drava i Sava pokazuju izrazite morfološke promjene u koritu. Te promjene izazvane su kumulativnim djelovanjem brojnih regulacijskih radova, intenzivnom eksploatacijom šljunka i pijeska iz korita i inundacijskog područja, a prvenstveno izgradnjom i radom lanca izgrađenih hidroenergetskih objekata. Premda neredovita, snimanja poprečnih presjeka na lokacijama hidroloških stanica, pokazuju da su promjene geometrije korita izrazite i unutar razdoblja od jedne godine, što za posljedicu ima i učestale promjene Q-H krivulja u profilu stanica. Pokazatelj kvantitativnih promjena u režimu površinskih voda svakako su promjene u veličini vodostaja i protoka u razdoblju obrade, te rezultati analize trenda u nizovima karakterističnih godišnjih vodostaja i protoka Save, Drave i Dunava. Promjene se prije svega odražavaju na procese otjecanja kod malih voda, pa se i provedene obrade odnose na nizove minimalnih godišnjih vodostaja i protoka.

### **3.1. Antropogeni utjecaji na rijeci Dravi**

Rijeka Drava u svom gornjem i srednjem toku (od Spittala u Austriji do Donje Du-brave u Hrvatskoj) u velikoj je mjeri „pregrađena“ brojnim hidroelektranama. Izuzev dva velika sustava planinskih akumulacija i hidroelektrana na slivovima pritoka Moell i Malta u austrijskim Alpama, sve ostale hidroelektrane na rijeci Dravi svojim branama usporavaju i zaustavljaju pronos riječnog nanosa. Osim hidroelektrana, kao značajni čimbenici izdvajaju se radovi na izgradnji regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina, te eksploataciji riječnog nanosa za cestogradnju i druge gospodarske potrebe.

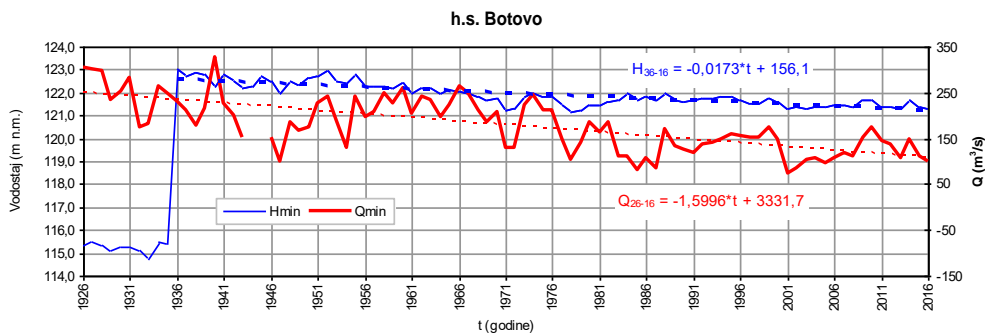
U sklopu projektnih aktivnosti [3], provedene su analize promjena korita Drave u profilu hidroloških stanica, na temelju raspoloživih podataka o izmjerenim poprečnim presjecima na tim lokacijama kao i promjene Q-H krivulja u profilima stanica u razdoblju 1926.-1961. do 2016. godina. Analize ukazuju na konstantno snižavanje vodostaja, odnosno produbljivanje korita u svim razmatranim profilima. Iznesene procjene treba smatrati orijentacijskim, budući da izmjerene veličine mogu biti pod utjecajem lokalne erozije ili zasipavanja korita nanosom koja nastaju u blizini nekih vodnih građevina ili uslijed prolaza velikih voda prije hidrografskih snimanja.

Sustavno praćenje morfoloških procesa otežano je zbog rijetkih hidrografskih snimanja poprečnih presjeka pa je dugotrajno usijecanje korita najbolje uočljivo na negativnim trendovima vremenskih nizova minimalnih godišnjih vodostaja na svim hidrološkim stanicama donjeg toka Drave. Općenito, u razdoblju obrade 1926.-2016. godina na svim je hidrološkim stanicama na Dravi vidljiv trend sniženja minimalnih godišnjih vodostaja i smanjenja minimalnih godišnjih protoka. Računanje trenda kraćih razdoblja ukazuje na ovisnost predznaka i veličine sniženja/smanjenja ili porasta/povećanja minimalnih godišnjih vodostaja i protoka, o vodnosti pojedinog razdoblja, posebno u razdoblju slabije izgrađenosti sliva i obustave radova na uređenju sliva.

Dugogodišnji radovi na slivu, prvenstveno izgradnja sustava hidroelektrana, izazvali su i značajne promjene režima suspendiranog nanosa. Promjene se očituju smanjenjem pronosa i koncentracije i vremenski se mogu vezati uz početak rada pojedine hidroelektrane. Budući da je DHMZ nanos počeo mjeriti tek 1960. godine, nije moguće ocijeniti koliko je rad svih do tada izgrađenih hidroelektrana utjecao na smanjenje pronosa nanosa.

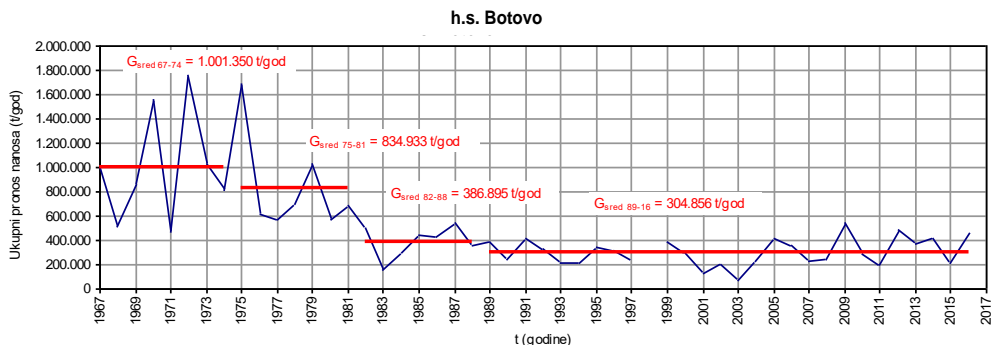
Ovdje treba istaknuti da, za razliku od šezdesetih godina i prve polovice sedamdesetih godina, koje karakterizira učestala pojava velikih voda i povećan pronos nanosa, osamdesete godine pripadaju sušnom dijelu hidrološkog ciklusa, što za vrijeme velikih voda znači i manje preljevne protoke preko brana hidroelektrana, njihovo kraće trajanje, a time i i manju transportnu moć pa se veći dio nanosa nataloženog kroz određeni broj godina u akumulacijskim jezerima, zadržava u starim koritima hidroelektrana. Prema tome, može se reći da to što sušno razdoblje koincidira s razdobljem izgradnje i početka rada HE Varaždin (1975. godine), HE Formin (1978. godine), HE

Čakovec (1982. godine) i HE Dubrava (1989. godine) pridonosi izrazitim smanjenju pronosa suspendiranog nanosa. Za ilustraciju prethodno navedenih promjena na rijeci Dravi daje se primjer za h.s. Botovo (Slika 1 i Slika 2).



Slika 1. Minimalni godišnji vodostaji i protoci na h.s. Botovo na Dravi u razdoblju 1926.-2016. godina

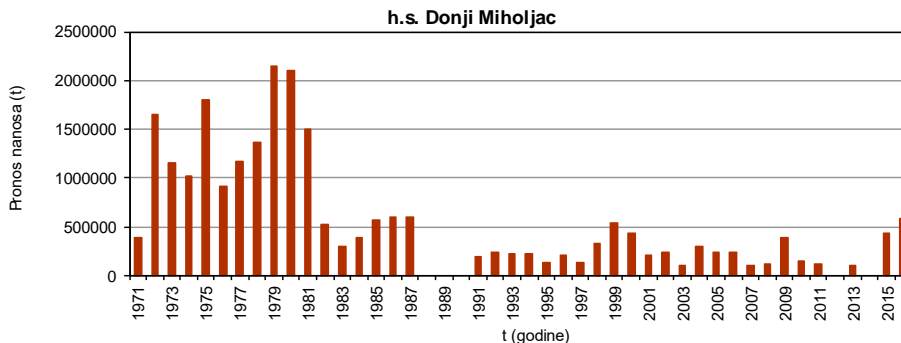
Na hodogramu prikazanom na Slici 2, izdvojena su razdoblja u kojima su se dogodile značajne promjene, odnosno smanjenje ukupnih godišnjih količina nanosa te su za njih ucrtane prosječne vrijednosti. Tako je za razdoblje 1967.-1974. godina prosječna količina pronosa nanosa iznosila oko 1.001.350 t/god, za razdoblje 1975.-1981. godina oko 834.933 t/god, za razdoblje 1982.-1988. godina oko 386.895 t/god, da bi se u posljednjem razdoblju 1989.-2016. godina prosječna godišnja količina pronosa nanosa stabilizirala na vrijednosti od oko 304.856 t/god.



Slika 2. Ukupni godišnji pronos nanosa na lokaciji h.s. Botovo na Dravi

Iako razdoblja značajnih smanjenja koincidiraju s izgradnjom i puštanjem u rad HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava na hrvatskom dijelu toka Drave, potrebno je naglasiti da se lokacija h.s. Botovo nalazi nizvodno od ušća rijeke Mure u Dravu, te da se evidentirano smanjenje pronosa nanosa odnosi kumulativno na obje rijeke (na Muri u Austriji izgrađeno je dvadesetak hidroelektrana). Nedvojbeno je međutim, da se kumulativna količina pronosa nanosa u posljednjih 50 godina reducirala na 30 % nekadašnjih količina, što je zabrinjavajuća činjenica.

Na Slici 3 u nastavku, dan je prikaz ukupnog godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa na lokaciji h.s. Donji Miholjac na Dravi. I na ovom profilu uočava se značajnije smanjenje pronosa nanosa uslijed izgradnje i puštanja u rad HE Varaždin, HE Čakovec i HE Dubrava.



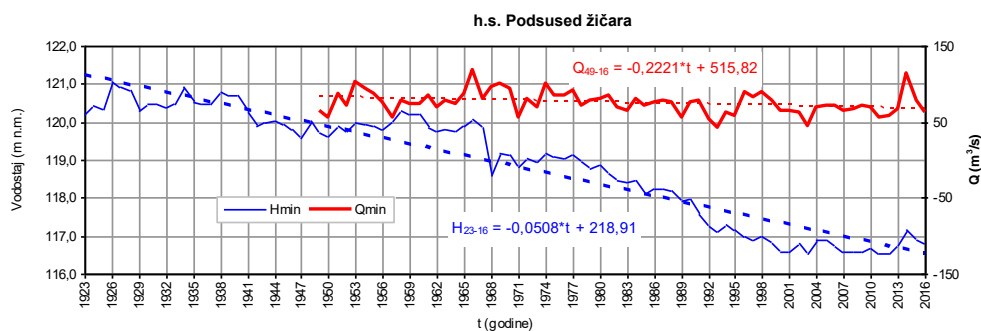
Slika 3. Ukupni godišnji pronos nanosa na lokaciji h.s. Donji Miholjac na Dravi

### 3.2. Antropogeni utjecaji na Savi

Utjecaj na vodni režim Save u Republici Hrvatskoj predstavljaju brane i akumulacije izgrađene za proizvodnju električne energije u uzvodnom toku u Sloveniji, što se posebno odražava na pronos suspendiranog nanosa. Na gornjem dijelu toka rijeke Save u Sloveniji, idući od najuzvodnije, izgrađene su HE Moste, HE Mavčiče i HE Medvode. Na srednjem dijelu toka između Ljubljane i Radeča planirana je izgradnja još deset hidroelektrana. S realizacijom lanca hidroelektrana na Donjoj Savi, Slovenija je započela već 1987. godine izgradnjom HE Vrhovo. Do danas je u pogonu pet hidroelektrana: HE Vrhovo (1993.), HE Boštanj (2006.), HE Blanca (2009.), HE Krško (2012.) i HE Brežice (2017.). Još je neposredno uzvodno od državne granice s Republikom Hrvatskom planirana izgradnja i HE Mokrice.

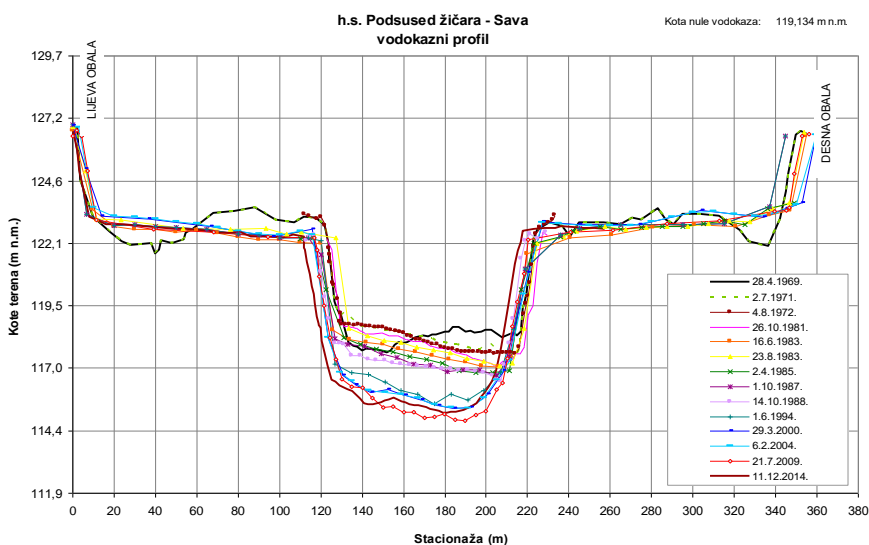
Prema dosada provedenim obradama, na hidrološkoj stanici Podsused žičara vidljiva su značajna smanjenja u količini pronosa u odnosu na razdoblje prije izgradnje hidroenergetskih objekata. Na analiziranoj dionici došlo je do značajnih morfoloških promjena u koritu, odnosno snažno izraženih erozijskih procesa u koritu Save i spuštanja nivelete dna, uz istovremeno taloženje finog pijeska i mulja na obalama. To ima za posljedicu sve jače „ukopavanje“ rijeke u svoje korito uz sniženje vodostaja i istovremeno povećanje brzine toka u gornjem toku. Lokalni erozijski procesi i produbljivanje dna su vrlo opasne pojave te treba upozoriti na moguću posljedicu narušavanja stabilnosti konstrukcija mostova i hidrotehničkih građevina. U Rugvici i nizvodno od nje fini nanos se taloži na obalama, posebice na desnoj obali, koja se svake godine naočigled mijenja. Iz rasporeda brzina izmjenjenih na vertikalama uz desnu obalu za vrijeme profilskih mjerenja, vidljivo je da je brzina toka u Rugvici na desnoj obali izuzetno mala [3]. Iz tog razloga proces mijenjanja i obrastanja desne obale snažno je izražen.

Redovita mjerenja vodostaja na ovim, kao i na ostalim hidrološkim stanicama Save također su upozorila na procese snižavanja dna korita. Iz analize minimalnih godišnjih vodostaja, može se zaključiti da je na svim hidrološkim stanicama na Savi vidljiv trend njihova sniženja u razdoblju obrade 1923.-2016. godina. Linije trenda minimalnih protoka ne pokazuju tendenciju značajnog pada protoka, kao što je slučaj s vodostajima. Za ilustraciju navedenih promjena u nastavku je na Slici 4 dan prikaz minimalnih godišnjih vodostaja i protoka na h.s. Podsused žičara na Savi.

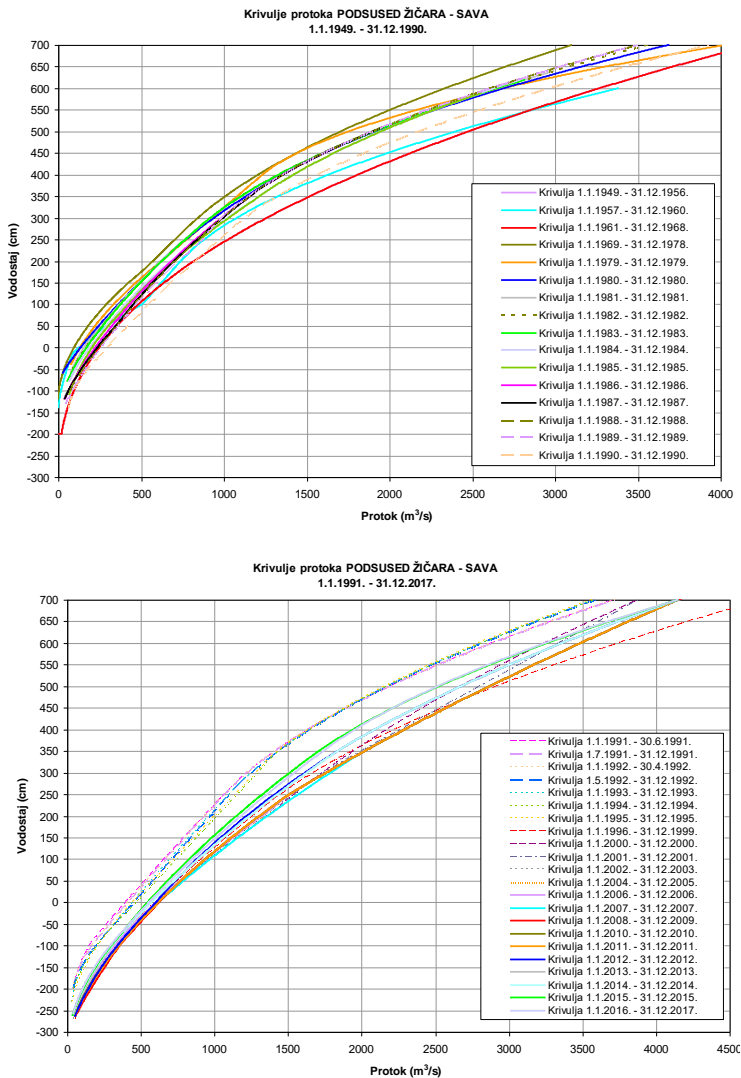


Slika 4. Minimalni godišnji vodostaji i protoci na h.s. Podsused žičara na Savi

Provedene analize promjena korita Save na temelju raspoloživih podataka o izmjenim poprečnim presjecima na lokaciji razmatranih hidroloških stanica na Savi i analize promjena Q-H krivulja u profilu stanica za raspoloživo razdoblje potvrđuju proces snižavanja dna korita Save, koji je najizraženiji u profilu Podsused žičara. Tako je zadnjih 50-tak godina u profilu Podsused žičara u području malih i srednjih voda vidljiv trend produbljivanja korita u cijelom razdoblju za oko 2,5 m (Slika 5).



Slika 5. Poprečni presjeci korita na lokaciji h.s. Podsused žičara u razdoblju 1969.-2014. godina



Slika 6. Protočne krivulje za h.s. Podsused žičara za razdoblje 1949.-2016. godina

#### 4. OCJENA BILANCE NANOSA NA RIJECI DRAVI I SAVI

Projektom aktivnostima [3] provedene su analize temeljem dnevnih vrijednosti koncentracije na osnovi površinskih uzoraka iz jedne točke pri površini, kao i analize dnevnih, mjesečnih i godišnjih pronosa suspendiranog nanosa, pomoću kojih su na osnovi promjena u povijesnim nizovima podataka definirani trendovi za pojedine hidrološke parametre. Također su analizirani i rezultati mjerenja srednjih profilskih koncentracija suspendiranog nanosa i trenutnog pronosa koja se u mjernim profilima na Dravi i Savi vrše najviše šest puta godišnje.

Za potrebe ocjene bilance nanosa, Projektnim aktivnostima [3] su obuhvaćeni svi raspoloživi dnevni podaci pronosa suspendiranog nanosa, određeni na temelju svakodnevnih zahvaćanja uzorka vode u jednoj točki mjernog presjeka na lokacijama hidroloških stanica na Dravi i Savi. Svakodnevna mjerenja nisu reprezentativna za cijeli presjek, ali imaju svoje prednosti u odnosu na profilnska. Jedna od njih je da se kontinuirano provode kroz duže vremensko razdoblje pa su na taj način ipak prikupljeni vrijedni podaci, na temelju kojih se može procijeniti pronos suspendiranog nanosa duž toka.

#### 4.1. Ocjena bilance nanosa na rijeci Dravi

U Tablici 1 dan je prikaz prosječnih vrijednosti ukupnog godišnjeg pronosa nanosa za razmatrane profile na Dravi u raspoloživom razdoblju obrade 1960.-2016. godina. Kao što je ranije spomenuto, promjene režima pronosa nanosa, koje se očituju u smanjenju pronosa suspendiranog nanosa vezane su uz početak rada uzvodnih hidroelektrana na Dravi, čijom izgradnjom je prekinut prirodni pronos nanosa duž toka. One se najbolje uočavaju iz prikaza danih u Tablici 1 gdje su prikazani odnosi prosječnih vrijednosti ukupnog pronosa nanosa po razdobljima.

Tablica 1. Prosječne vrijednosti ukupnog godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa za razmatrane profile na Dravi u raspoloživom razdoblju obrade 1960.-2016. godina

Prosječni godišnji pronos nanosa (t/god)			
h.s. Varaždin	h.s. Botovo	h.s. Terezino Polje	h.s. Donji Miholjac
535.520 (1960.-1981.)	506.014 (1967.-2016.)	350.580 (1990.-2016.)	629.173 (1968.-2016.)
704.585 (1960.-1974.)	1.001.350 (1967.-1974.)		1.197.678 (1968.-1974.)
173.237 (1975.-1981.)	834.933 (1975.-1981.)		1.572.473 (1975.-1981.)
	386.895 (1982.-1988.)		492.697 (1982.-1988.)
	304.856 (1989.-2016.)		258.893 (1989.-2016.)

Iz provedenih analiza može se zaključiti da je značajnije smanjenje pronosa nanosa izazvala izgradnja i rad HE Varaždin. Naime, prosječni godišnji pronos nanosa poslije 1975. godine je čak 4 puta manji od pronosa u razdoblju 1967.-1974. godina. Na Botovu je situacija nešto povoljnija jer u ukupno izmjerenoj količini nanosa koja prođe kroz presjek, u određenom iznosu sudjeluje i nanos koji u Dravu donosi Mura, pa je prosječni pronos nanosa u Botovu u razdoblju od 1975. do 1981. godine "samo" 1,2 puta manji od pronosa u razdoblju 1967.-1974. godina. U razdoblju rada HE Čakovec 1982.-1989. godina prosječni ukupni godišnji pronos nanosa u Botovu smanjen je 2

puta u odnosu na razdoblje 1975.-1981. godina, dok je u razdoblju rada HE Dubrava 1989.-2016. godina smanjen 1,3 puta u odnosu na pronos nanosa u prethodnom razdoblju. Usporedi li se prosječni godišnji pronos suspendiranog nanosa kroz presjeke Varaždin i Botovo u razdobljima 1967.-1975. godina i 1976.-1981. godina, proizlazi da Mura u Dravu donosi najmanje polovicu ukupno izmjerenih količina na Botovu.

Prethodno navedeni odnosi prosječnih vrijednosti ukupnog pronosa nanosa po razdobljima, ne daju stvarnu sliku stanja suspendiranog nanosa, ali mogu poslužiti kao orijentacijske vrijednosti raspona unutar kojih se kreće pronos suspendiranog nanosa, tj. za opću procjenu smanjenja pronosa suspendiranog nanosa: u razdoblju poslije početka rada HE Čakovec prosječni ukupni godišnji pronos nanosa u Botovu čini otprilike trećinu, a u Donjem Miholjcu četvrtinu prosječnih količina pronosa u razdoblju prije 1982. godine.

#### **4.2. Ocjena bilance nanosa na rijeci Savi**

U Tablici 2 dan je prikaz prosječnih vrijednosti ukupnog godišnjeg pronosa nanosa za razmatrane profile na rijeci Savi u raspoloživom razdoblju obrade 1960.-2016. godina. Također su iskazani i odnosi prosječnih vrijednosti ukupnog pronosa nanosa po razdobljima, vezano za uočene promjene na slivu.

Iz provedenih analiza uočava se da srednja godišnja količina pronosa suspendiranog nanosa u profilu Podsused žičara, za niz 1979.-2016. godina, iznosi 0,87 mil. tona, dok su godišnji pronosi nanosa u profilu Rugvica za isto razdoblje znatno niži od profila Podsused žičara uz srednju vrijednost za niz od 0,347 mil. tona. Razlog tako velikoj razlici u količinama suspendiranog nanosa u odnosu na Podsused je prvenstveno lokacija uzorkovanja. Naime, brzina toka rijeke na rubnim dijelovima korita je znatno manja u usporedbi sa srednjom brzinom toka vode u cijelom poprečnom profilu, te se time dobiva znatno manja koncentracija suspendiranog nanosa u odnosu na stvarnu koncentraciju suspendiranog nanosa u poprečnom profilu.

Prosječna vrijednost ukupnog godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa u profilu Jasenovac za razdoblje 1979.-1990. godina iznosi 0,506 mil. tona. U razdoblju 1998.-2008. godina zabilježene su značajno manje količine prosječne vrijednosti i iznose 0,201 mil. tona (s obzirom da su uzorci za analizu uzimani u profilu Save prije ušća Une), te u razdoblju 2009.-2016. godina srednje godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa iznosile su oko 0,352 mil. tona.

Iz analiza ukupnih godišnjih pronosa nanosa za razdoblje 1960.-2016. u profilu Slavonski Brod vidljiv je također trend smanjenja pronosa nanosa, uz srednju godišnju količinu pronosa suspendiranog nanosa od 0,95 mil. tona, dok je za razdoblje 1979.-2016. godina srednja godišnja količina pronosa suspendiranog nanosa značajno manja i iznosila je 0,55 mil. tona.



Tablica 2. Prosječne vrijednosti ukupnog godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa za razmatrane profile na Savi u raspoložvom razdoblju obrade 1960.-2016. godina

Prosječni godišnji pronos nanosa (t/god)				
h.s. Podsused žičara	h.s. Rugvica	h.s. Jasenovac	h.s. Stara Gradiška	h.s. Slavonski Brod
872.389 (1979.-2016.)	347.159 (1979.-2016.)	353.235 (1979.-2016.)	1.124.695 (1963.-1990.)	955.544 (1960.-2016.)
		506.022 (1979.-1990.)		547.785 (1979.-2016.)
		201.014 (1998.-2008.)		
		352.346 (2009.-2016.)		

## 5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I MORFOLOŠKI RAZVOJ RIJEKA DRAVE I SAVE U ODNOSU NA BILANCU NANOSA

Drava je vodotok koji pokazuje izrazite morfološke promjene u koritu. Premda neredovita, snimanja poprečnih presjeka na lokacijama hidroloških stanica pokazuju da su promjene geometrije korita izrazite i unutar razdoblja od jedne godine. Iako je svako snimljeno stanje prvenstveno slika trenutačne hidrološke situacije u riječnom koritu, ono je ujedno i odraz općih promjena izazvanih brojnim radovima u koritu, inundacijama i nasipima, sve intenzivnijom eksploatacijom šljunka i pijeska iz korita i inundacijskog područja kao i radom hidroenergetskih objekata izgrađenih uzvodno od ušća Mure.

Sve ove aktivnosti značajno utječu na režim voda i smanjenje nanosa u rijeci Dravi, a budući da se veći dio njih odvijao paralelno, danas je vrlo teško odrediti pojedinačni utjecaj izgradnje i rada uzvodnih hidroelektrana, lokalno izvedenih regulacijskih radova i neredovitog održavanja izvedenih građevina, utjecaj reguliranih i nereguliranih riječnih poteza, hidroloških prilika na slivu i promjena u mjernim presjecima, na formiranje i oblik riječnog korita i promjene hidroloških karakteristika Drave.

U tome presudnu ulogu ima i relativno skroman fond mjerenih podataka, nerijetko dodatno opterećenih iznimno čestim promjenama položaja i visine mjernih uređaja i vrste mjerne opreme. Ovdje se prije svega misli na mjerenja protoka i koncentracija suspendiranog nanosa, s kojima se gotovo na svim stanicama, za razliku od duge tradicije mjerenja vodostaja, redovito počelo tek šezdesetih godina prošlog stoljeća. Svakako je potrebno povećati broj i kvalitetu mjerenja pronosa nanosa, dajući prednost profilskim pred mjerenjima u jednoj točki presjeka i vodeći računa o podjednako zastupljenosti mjerenja pri raznim protocima (malim, srednjim i velikim vodama).

Dugogodišnji radovi na slivu rijeke Save, a prvenstveno se tu misli na izgradnju brana i rad sustava uzvodnih hidroelektrana, izazvali su promjene režima suspendiranog nanosa na razmatranoj dionici rijeke Save u Republici Hrvatskoj. U koritu Save došlo je do značajnih morfoloških promjena, odnosno snažno izraženih erozijskih procesa u koritu i spuštanja nivelete dna, uz istovremeno taloženje finog pijeska i mulja na obalama. To ima za posljedicu sve jače „ukopavanje“ rijeke u svoje korito uz sniženje vodostaja i istovremeno povećanje brzine toka u gornjem toku.

Kako postojeći monitoring riječnog nanosa na Dunavu ne postoji, a na Dravi i Savi, kao najvećim pritocima Dunava u Hrvatskoj nije zadovoljavajući, u okviru Projekta Danube Sediment predviđen je opsežni plan proširenja i unaprijeđenja monitoringa.

## LITERATURA

- [1] Institut za elektroprivredu d.d. (1998): *Prognoze morfološko – psamoloških procesa u rijeci Dravi nakon izgradnje HE Novo Virje: “Procjena utjecaja postojećih vodnih građevina i eksploatacije riječnog nanosa na morfološko-psamološke značajke Drave”*, Zagreb.
- [2] Institut za elektroprivredu i energetiku (2015): *WB8-HR-ENE-11 - Hidrološke analize rijeke Save na potezu od granice sa Slovenijom do Siska*, Zagreb.
- [3] Institut za elektroprivredu i energetiku (2019): *PROJEKT DANUBE SEDIMENT - Okvirna procjena sedimenta rijeke Dunav i većih pritoka*, Zagreb.
- [4] [www.interreg-danube.eu](http://www.interreg-danube.eu)



## OBORINE I EROZIJA ZEMLJIŠTA U SLOVENIJI

### PRECIPITATION AND SOIL EROSION – SLOVENIA CASE

Matjaž Mikoš<sup>a</sup>, Nejc Bezak<sup>a</sup>

#### SAŽETAK

Sedimenti u vodnim sustavima dio su ciklusa erozije i sedimentacije. Osim masovnih pokreta, erozija tla važan je izvor (posebno) sitnih sedimenata u kontinentalnim površinskim vodama. Studije bilanca sedimenata i prijenosa sedimenata trebaju uključivati eroziju tla kao izvor sedimenata. Prvo, ovaj rad osvrće se na nedavna istraživanja napravljena u Sloveniji s obzirom na varijabilnost i trendove u raspodjeli i količinama oborina te erozivnosti oborina. Drugo, prikazuje kratak pregled nedavnih studija sedimenata provedenih u Sloveniji, uključujući i neke studije modeliranja u bujicama. Rad završava popisom najrelevantnije literature na ovom području objavljene u Sloveniji.

#### ABSTRACT

Sediments in water bodies are part of erosion and sedimentation cycles. Apart from mass movements, soil erosion is an important source of (especially) fine sediments in continental surface waters. Sediment balance and sediment transport studies should incorporate soil erosion as a sediment supply source. Firstly, this paper reviews recent studies made in Slovenia with regard to variability and trends in precipitation patterns and amounts, and rainfall erosivity. Secondly, it shows a short overview of recent sediment studies done in Slovenia, including some modelling studies in torrential catchments. The paper concludes with a list of the most relevant literature in this field published in Slovenia.

---

<sup>a</sup> Sveučilište u Ljubljani, Fakultet za gradevinarstvo i geodeziju, Jamova c. 2, Ljubljana, SI-1000, Slovenija, matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si, nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

*KLJUČNE RIJEČI: klimatske promjene, erozivitet oborina, trendovi*

*KEYWORDS: climate change, rainfall erosivity, trends*

## 1. INTRODUCTION

Soil erosion is an important source of sediments in water bodies, especially fine sediments that are transported mainly in the form of suspended sediments during high flows or as wash load causing high turbidity of running waters and are responsible for siltation of river reservoirs and for clogging of coarse gravel river beds. These processes reduce the filtration of water through river banks and diminish connection between running and ground waters.

An important factor of soil erosion processes is rainfall erosivity; therefore, understanding of hydrometeorological processes causing precipitation and defining rainfall energy and amounts is needed for soil erosion studies. We should firstly understand precipitation patterns and rainfall amounts that cause soil erosion.

## 2. VARIABILITY AND TRENDS IN PRECIPITATION PATTERNS AND AMOUNTS

Any regional study on precipitation should be one way or another put into a larger context. A study for the region of Slovenia was performed within the framework of larger general climate (change) models and scenarios that were downscaled to Slovenia (ARSO, 2018). The key messages of this study are:

1. Rainfall declined by about 15 % annually in the western half of the country during the period 1961–2011, slightly less (10 %) in the eastern half of the country, where changes are not statistically significant. Precipitation decreased the most in spring and summer, but the decline was not statistically significant for the most part.
2. Annual and winter rainfall will increase significantly under the moderately optimistic and pessimistic scenarios of the mid- to late-21st century emissions. In the case of both scenarios, the average increase in annual rainfall at the end of the century will be up to 20 % compared to the period 1981–2010. Rainfall will increase further in winter, slightly more in the east of the country.
3. In the middle of the century, winter rainfall in eastern Slovenia will increase by up to 40 %, and by the end of the century, in the case of a pessimistic scenario, more than 60 % more winter rainfall will occur. In other seasons, the direction and magnitude of precipitation change is highly dependent on the discharge scenario and partly on the model, and the changes are mostly smaller than the natural variability of the precipitation.
4. Indicators used to measure extreme rainfall show that both the severity and the frequency of the extreme rainfall will increase and the increase will be most pro-

nounced in the case of a pessimistic discharge scenario (see Figure 1 for high-emission climate scenario RCP 8.5).

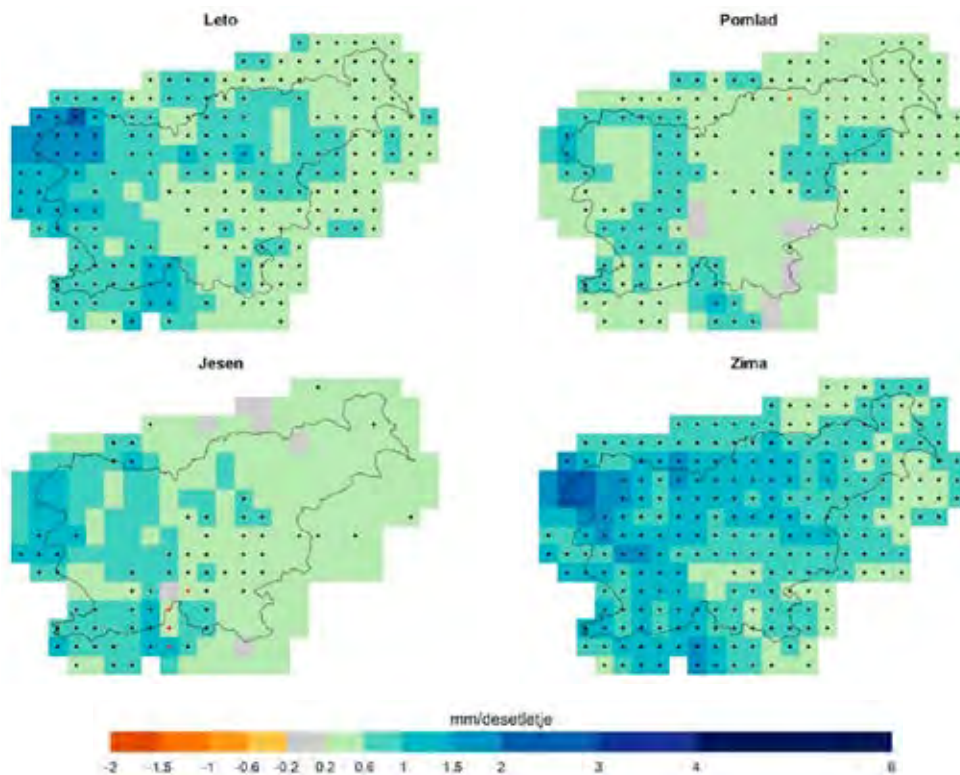


Figure 1. Mean maximum one-day rainfall trend (mm/decade) for the whole year (upper left), spring (upper right), autumn (lower left), and winter (lower right) - with the corresponding reliability for climate scenario RCP8.5 in the period 1981-2100 (reliable trend – black dots, the rest within natural variability) (Fig. 5.41 from ARSO, 2018)

High-frequency rainfall data is needed in practical hydrologic applications, such as the construction of the intensity-duration-frequency curves (IDF). Bezak and Mikoš (2019) investigated trends (station-wise and regional) for several rainfall durations that were constructed based on the 5 min rainfall data from 10 rainfall stations (44 years of data 1975–2018), analyzed changes in IDF results for two 22-year sub-samples, and analyzed changes in extreme events clustering at the regional scale (Figure. 2).

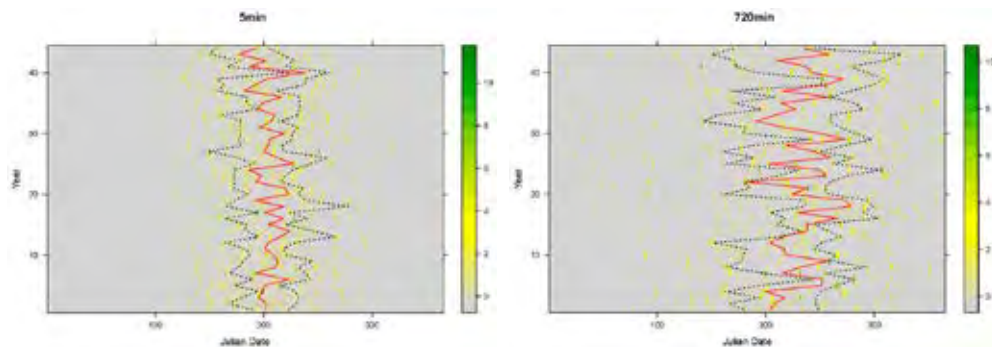


Figure 2. Clustering of annual maximum 5 events for the 5 min (left) and 720 min (right) rainfall duration. Red line shows the median Julian date and dotted black lines shows 25 % and 75 % Julian date (from Bezak and Mikoš, 2019)

The key results of the study are:

1. No clear pattern in the detected trends can be found based on the analyzed stations. However, all the statistically significant trends at the significance level of 0.05 for the 5 min rainfall data were negative.
2. Regional trends for 5 min duration were also negative and statistically significant.
3. The changes in the design rainfall events between two equal sub-samples (1975–1996, 1997–2018) were between -30 % and 60 %.
4. The investigation of changes in extreme rainfall event clustering indicated that extreme 5, 30, and 60 min events could more frequently occur a few days earlier in spring or summer compared to the past period.
5. Longer duration events (i.e., 360 and 720 min) tend to more frequently occur a few days later in autumn compared to the past. In most cases, changes are not statistically significant.

A study in the torrential catchment of the Koroška Bela Torrent (area of 6.6 km<sup>2</sup>, mean slope ~51 %, 72 % forested, mean annual precipitation ~ 1900mm) in NW Slovenia evaluated climate change impact on the intensity-duration-frequency (IDF) curves for precipitation (ARSO, 2019; Bezak and Mikoš, 2020). The analysis was carried out for rainfall durations of 0.5, 1, 3 and 5 days. The comparison was made for 2, 5, 10, 25, 50, 100 and 250-year return period. The results indicated that design rainfall values in the future will more or less stay the same as in the reference period (i.e. 1981-2020). For example, for the 100-year return period and for the 24 h rainfall duration, the design rainfall should increase by 2 % and 4 % for the 2021-2060 and 2061-2100 periods, respectively. Surprisingly, future relationship between IDF curves and empirical rainfall thresholds could remain more or less the same.

### 3. VARIABILITY AND TRENDS IN RAINFALL EROSIVITY

The Rainfall Erosivity Database at European Scale (REDES) includes 1,541 stations with the highest rainfall erosivity factor R (R-factor) in the Mediterranean and Alpine regions (Panagos et al., 2015a). From Slovenia, 5 min rainfall data from 312 stations mainly from the period 1999-2008 were used, Croatia contributed 10 min data from 42 stations in the period 1961-2012. The Global Rainfall Erosivity Database (Glo-REDA) includes 3,625 stations distributed in 63 countries worldwide (Panagos et al., 2017a). The REDES database was developed to a monthly database and used for mapping monthly rainfall erosivity in Europe and estimating seasonal patterns of erosivity (Ballabio et al., 2017).

Slovenia is one of the EU countries with the largest rainfall erosivity (maximum annual values exceeding 10,000 MJmmha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>), and its largest variability. Petek et al. (2018) analyzed 5-minute rainfall data from 10 Slovenian rainfall stations (total 443 years of rainfall data, minimum of 25 years). The key results are:

1. Trends in R-factor were detected for 4 different sub-samples using monthly, half-year, and annual rainfall erosivity values. The results indicate that rainfall erosivity trends for the selected Slovenian stations are mostly statistically insignificant (significance level of 0.05). However, a larger share of identified trends is positive than negative.

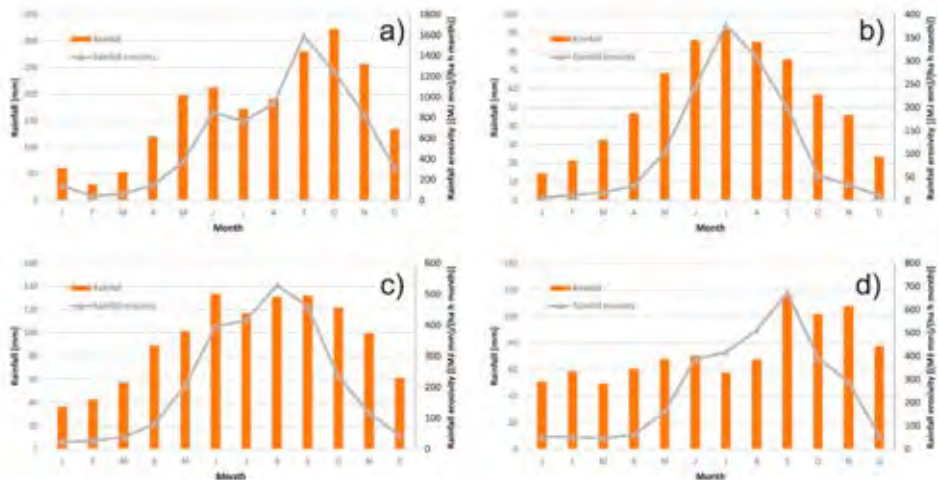


Figure 3. Temporal rainfall [mm] and rainfall erosivity [(MJ mm)/(ha h month)] distribution for different stations (a) Vogel, b) Murska Sobota, c) Ljubljana, d) Portorož (from Petek et al., 2018)

2. Sensitivity analysis regarding the R-factor calculation showed that the rainfall threshold parameter (12.7 mm; removal of small-magnitude rainfall events) can attribute up to 10 % of the average annual R-values in cases where this threshold is not used.



- Using kinetic energy equations developed for Slovenia resulted in, on average, about 20 % higher annual rainfall erosivity values compared to the equation that is proposed by the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) manual (Figure 3).

#### 4. SEDIMENT STORAGE IN TORRENTIAL STREAMS

Sediment routing from sediment sources to larger rivers and to sedimentation basins is a complex process. Bezak et al. (2017) performed repeated Terrestrial laser Scanning (TLS) surveys in the Kuzlovec Torrent, a small forested torrential catchment near the City of Ljubljana (Figure 4). The key results are:

- The flash flood changed the geomorphic characteristics of the torrent channel.
- Erosion rates due to the flash flood event were much higher than average annual rates.
- High spatial resolution data are a useful tool to detect changes in steep forested torrents, and to estimate sediment deposition and erosion during short but flash floods in torrential streams.

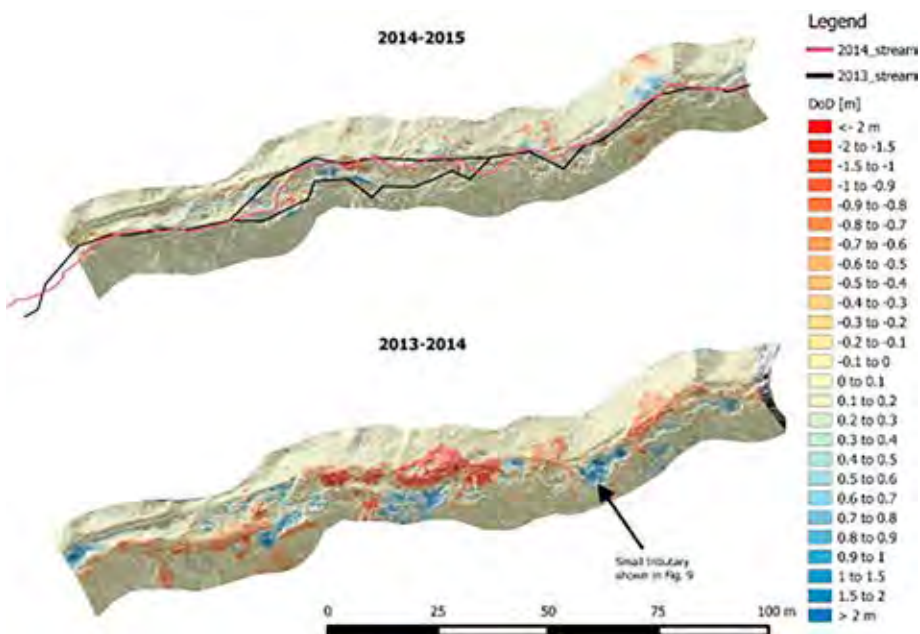


Figure 4. The DoD maps [meters] with the location of the main stream channel thalweg in 2013 and 2014 for a small section of the Kuzlovec torrent (from Bezak et al., 2017)

## 5. SEDIMENT BUDGETS

Five Slovenian catchments (Figure 5, left) with inhomogeneous topography, land use, geological conditions, hydro-meteorological properties and sizes (Table 1) were modeled with calibrated parameters, while the WATEM/SEDEM model was calibrated with an automatic parameter estimation procedure PEST, which is model independent (Bezák et al., 2015).

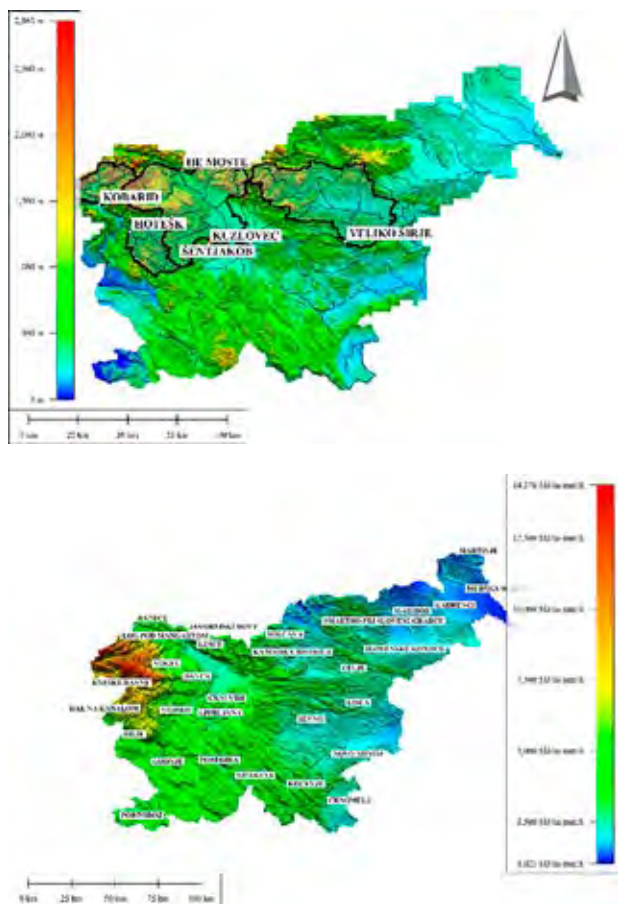


Figure 5. Location of 5 catchments and gauging stations (left) and rainfall erosivity map and the locations of rainfall stations (right) on digital elevation map of Slovenia (from Bezák et al., 2015)

Both direct and indirect information regarding sediment yields, including turbidity measurements, daily suspended sediment concentration observations and bed load observations, were used for the WATEM/SEDEM model's calibration. A detailed rainfall erosivity ( $R$ ) factor map, which was constructed from 5-min rainfall data from 31 pluviographic meteorological stations (Figure 5, right), was used as one of the inputs for

the WATEM/SEDEM model. These catchments were determined based on the availability of suspended and bed load measurements/estimates that were used for model calibration. Some additional stations with suspended sediment loads (SSL) data availability are located in Slovenia (Table 3 and Bezak et al., 2016). We also investigated trends and seasonal characteristics of suspended sediment loads (Bezak et al., 2016 and Figure 6).

Table 1. Basic characteristics of the selected catchments (from Bezak et al., 2015)

Station name	Water body	Catchment area (km <sup>2</sup> )	Station elevation (m a.s.l.)	Mean elevation (m a.s.l.)	Mean annual precipitation (mm)
Kuzlovec	Kuzlovec	0.70	394	631	1700
Kobarid	Soča	434.7	196	1192	3000
Hotešk	Idrijca	442.8	161	689	2390
Veliko Širje	Savinja	1841.9	190	605	1280
Šentjakob	Sava	1950.8	268	844	1500

Table 2. Estimated absolute and specific annual suspended loads (SL), bed loads (BL) and total loads (TL) for 5 catchments in Slovenia (from Bezak et al., 2015)

Station name	Type of measurement	BL	SL	TL	Specific BL	Specific SL	Specific TL
		(t/year)	(t/year)	(t/year)	(t/ha.year)	(t/ha.year)	(t/ha.year)
Kuzlovec	Turbidity sonde	40	80	120	0.6	1.1	1.7
Kobarid	MS	117,000	91,000	208,000	2.7	2.1	4.8
Hotešk	MS	18,000	72,000	90,000	0.4	1.6	2.0
Veliko Širje	MS	22,000	216,000	238,000	0.1	1.2	1.3
Šentjakob	MS	64,000	168,000	232,000	0.3	0.9	1.2

MS - Manual Sampling

Table 3. Basic characteristics of Slovenian gauging stations where suspended sediment measurements were taken at a daily time step for at least three year (Table 1 from Bezak et al., 2016)

Station	Stream	Analysed period	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Mean elevation (m a.s.l.)	Mean daily Q (m <sup>3</sup> /s)	Mean daily SSC (g/m <sup>3</sup> )	Transported SST (t/year)
Gornja Radgona	Mura	1977–2005	10 197	1012	150.7	49.5	407 388
Petanjci	Mura	1956–1973	10 391	998	171.7	111.0	1 015 948
Polana	Ledava	1963–1973	208	283	1.6	140.7	20 985
Ranca	Pesnica	1967–1973	84	362	1.1	55.1	3 769
Zamušani	Pesnica	1967–1973	478	288	5.8	47.6	15 057
Sentjakob	Sava	1955–1973	2285	931	97.5	23.9	142 775
Sentjakob	Sava	1978–1993	2285	931	84.3	23.8	157 370
Hrastnik	Sava	1997–2006	5177	733	152.7	24.0	241 030
Radeče	Sava	1955–1973	7084	701	232.3	84.1	838 544
Radeče	Sava	1975–1993	7084	701	209.0	69.5	739 304
Laško	Savinja	1990–1993	1664	624	38.7	25.1	98 586
Veliko Širje	Savinja	1955–1973	1842	605	45.6	54.5	167 766
Veliko Širje	Savinja	1978–1989	1842	605	45.3	51.3	216 285
Veliko Širje	Savinja	1994–2005	1842	605	39.9	46.8	216 237
Kobarid	Soča	1962–1973	437	1192	35.1	19.3	52 560
Miren	Vipava	1985–2005	590	153	16.7	19.0	29 785

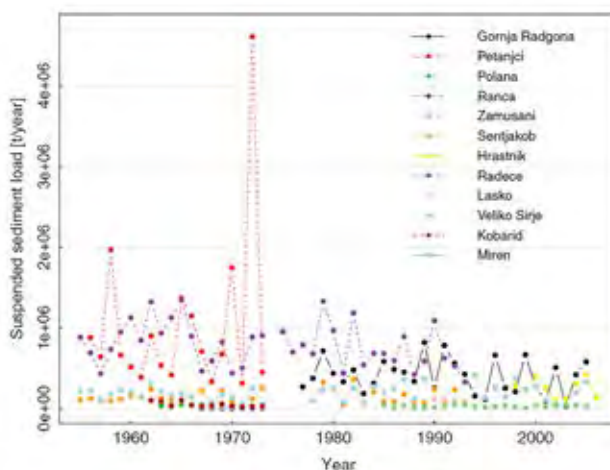


Figure 6. Temporal variability of suspended sediment loads in case of Slovenian gauging stations with at least three years of measurements (from Bezak et al., 2016)

The key results are:

1. The calculated mean annual soil loss was between 0.3 and 7.4 t/ha, and the sediment delivery ratio (SDR) ranged from 0.07 to 0.22 for 5 modeled catchments (WATEM/SEDEM case study).
2. The SDR decreases with increasing catchment area; however, the ratio between the average sediment yield and mean soil erosion obviously depends on many other factors, e.g., topography, climatic and geological conditions.
3. The parcel trap efficiency parameter for forests had the greatest influence on the WATEM/SEDEM model's outputs in all five case studies.

4. Approx. half of the detected trends in the SSL where negative and all the statistically significant trends were negative. The possible reasons for these negative trends could be sedimentation in the accumulation reservoirs, construction of wastewater treatment plants, increasing forest cover due to urbanization.
5. SSL seasonal regimes were mostly in line with discharge seasonal characteristics. Most of the SSL peaks occurred in summer (thunderstorms) or autumn (frontal precipitation).
6. For most of the Slovene stations, on average, SSL peak occurred before the peak discharge but it should be noted that daily data was used for this analysis.

## 6. CONCLUSIONS

Sediments are important part of river systems, and their dynamics within the framework of erosion and sedimentation cycles is to be fully understood (measured, modeled, forecast) when river morphology or quality of water bodies is studied. Soil erosion is an important erosion factor, and studies on precipitation, their spatial and temporal variability, seasonality, and also future trends due to climate change, as well as consequently rainfall erosivity and soil losses are contributing to better understanding of erosion process in hinterlands of large alluvial rivers.

The paper showed on selected case studies from Slovenia how estimates of hydro-meteorological and soil erosion processes at large scales (world, European) should be combined with field measurements and simulations at smaller scales to yield estimates on sediment loads in river network at regional and local scales. New techniques and technologies promise to support an even more detailed analysis of sediments in water bodies at all scales.

## LITERATURE

- [1] ARSO (2018): *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja*, Dolinar, M. (Ed.), Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.
- [2] ARSO (2019): *Ocena sprememb povratnih nivojev za padavinsko postajo Javorniški Rovt*.
- [3] Ballabio, C., Borrelli, P., Spinoni, J., Meusburger, K., Michaelides, S., Begueria, S., Klik, A., Petan, S., Janeček, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewick, A., Dumitrescu, A., Perčec Tadić, M., Diodato, N., Kostalova, J., Rousseva, S., Banasik, K., Alewell, C., Panagos, P. (2017): *Mapping monthly rainfall erosivity in Europe*, Science of the Total Environment, 579, str. 1298-1315, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.123>.
- [4] Bezak, N., Rusjan, S., Petan, S., Sodnik, J., Mikoš, M. (2015): *Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure*,

- Environmental Earth Sciences, 74, str. 5245-5261, <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4534-0>.
- [5] Bezak, N., Šraj, M., Mikoš, M. (2016): *Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers*. Hydrological Sciences Journal, 61(6), 1094-1108, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2015.1006230>.
- [6] Bezak, N., Rusjan, S., Kramar Fijavž, M., Mikoš, M., Šraj, M. (2017): *Estimation of Suspended Sediment Loads Using Copula Functions*, Water, 9(8), str. 628, <https://doi.org/10.3390/w9080628>.
- [7] Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S., Mikoš, M. (2018): *Impact of the Rainfall Duration and Temporal Rainfall Distribution Defined Using the Huff Curves on the Hydraulic Flood Modelling Results*, Geosciences, 8(2), str. 69, <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>.
- [8] Bezak, N., Mikoš, M. (2019): *Investigation of Trends, Temporal Changes in Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves and Extreme Rainfall Events Clustering at Regional Scale Using 5 min Rainfall Data*, Water, 11(10), str. 2167, <https://doi.org/10.3390/w11102167>.
- [9] Iliopoulou, T., Aguilar, C., Arheimer, B., Bermudez, M., Bezak, N., Ficchi, A., Koutsoyiannis, D., Parajka, J., Polo, M.J., Thirel, G., Montanari, A. (2019): *A large sample analysis of European rivers on seasonal river flow correlation and its physical drivers*, Hydrology and Earth Systems Sciences, 23, str. 73-91, <https://doi.org/10.5194/hess-23-73-2019>.
- [10] Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Klik, A., Rousseva, S., Perčec Tadić, M., Michaelides, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Beguería, S., Alewell, C. (2015a): *Rainfall erosivity in Europe*, Science of the Total Environment, 511, str. 801-814, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008>.
- [11] Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C. (2015b): *The new assessment of soil loss by water erosion in Europe*, Environmental Science & Policy, 54, str. 438-447, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- [12] Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K.J., Yang, J.E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G.A., Krasnov, S.F., Gorobets, A.V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Oliveira, P.T.S., Bonilla, C.A., Meddi, M., Nel, W., Al-Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M., Ballabio, C. (2017a): *Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records*, Scientific Reports, 7:4175, doi:10.1038/s41598-017-04282-8.
- [13] Panagos, P., Ballabio, C., Meusburger, K., Spinoni, J., Alewell, C., Borrelli, P. (2017b): *Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES*

---

*and WorldClim datasets*, Journal of Hydrology, 548, str. 251-262, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006>.

- [14] Petek, M., Mikoš, M., Bezak, N. (2018): *Rainfall erosivity in Slovenia: Sensitivity estimation and trend detection*, Environmental Research, 167, str. 528-535, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.020>.
- [15] Rusjan, S., Mikoš, M., Bezak, N. (2015): *Vodna erozija v porečju Gradaščice*, UJMA, 29, str. 79-84, [http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2015/79\\_84.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2015/79_84.pdf).

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**PRAĆENJE STANJA I SMJERNICE  
ZA UPRAVLJANJE NANOSOM U  
AKUMULACIJSKOM JEZERU HE VARAŽDIN**

**MONITORING AND GUIDELINES FOR THE  
MAINTENANCE MANAGEMENT FOR DEPOSIT  
WITHIN THE RESERVOIR OF HPP VARAŽDIN**

**Antonia Mirčeta <sup>a</sup>, Goran Zrinski <sup>b</sup>**

**SAŽETAK**

U radu su dani opći podaci o hidroelektrani (HE) Varaždin s naglaskom na akumulacijsko jezero. Opisan je sustav tehničkih promatranja za praćenje količine, raspodjele i granulometrijskog sastava nanosa unutar akumulacije HE Varaždin. Provedena je analiza mjerenih podataka za period od početka rada hidroelektrane do 2019. godine, te su opisane dosadašnje aktivnosti vezane za problematiku nanosa u akumulacijskom jezeru HE Varaždin.

**ABSTRACT**

The paper provides general information on the Varaždin hydroelectric power plant (HPP) with an emphasis on reservoir lake. The system of technical observations for monitoring the amount, distribution and granulometric composition of deposits within the reservoir of the HPP Varaždin is described. An analysis of the measured data for the period from the start of the operation of the hydroelectric power plant up to 2019. has been carried out, and past activities related to the problem of deposition in the reservoir of HPP Varaždin are described.

---

<sup>a</sup> Elektroprojekt d.d, Ulica Alexandera von Humboldta 4, Zagreb, 10000, Hrvatska, antonia.mirceta@elektroprojekt.hr

<sup>b</sup> HEP Proizvodnja d.o.o. - PP HE Sjever, Međimurska ulica 26C, Varaždin, 42000, Hrvatska, goran.zrinski@hep.hr



*KLJUČNE RIJEČI: akumulacijsko jezero, hidroelektrana, HE Varaždin, nanos, DMR, regulacijske vodne građevine*

*KEYWORDS: reservoir, hydropower plant, HPP Varaždin, deposit, DEM, water control structures*

## 1. UVOD

Hidroelektrana (HE) Varaždin je izgrađena u aluvijalnoj dolini koja započinje kod Ormoža, a isklinjava na području Ferdinandovca. Aluvijalnu dolinu tvore kvartarne naslage koje se u površinskom sloju sastoje od pijeska i praha, a u donjem (vodonošnom) sloju od pjeskovitog šljunka. Podinu sačinjavaju lapori, gline i pješčenjaci. Od izgradnje prve hidroelektrane na rijeci Dravi (HE Fala u pogonu od 1918. godine) kojom je usporena rijeka Drava, dolazi do geomorfoloških promjena u njenom koritu, a koje su u porastu izgradnjom svake slijedeće hidroelektrane. HE Varaždin je u pogonu od 1975. godine. U sklopu izrade Idejnog i Glavnog projekta HE Varaždin te kasnije u vrijeme eksploatacije HE Varaždin, sustavno je analizirana problematika nanosa u cilju određivanja smjernica za njegovim upravljanjem i zadržavanjem sigurnosti objekata HE Varaždin.

## 2. HE VARAŽDIN

### 2.1. Opis HE Varaždin s naglaskom na akumulacijsko jezero

HE Varaždin smještena je na rijeci Dravi, kraj grada Varaždina i koristi vodne snage rijeke Drave na dionici od rkm 309 do rkm 288. Srednji godišnji protok kroz HE Varaždin iznosi  $315 \text{ m}^3/\text{s}$ , jednogodišnja velika voda iznosi  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ , a tisućugodišnja velika voda  $3700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Akumulacija HE Varaždin je duljine 3,5 km, širine od 240 do 1200 m (prosječno 800 m), te ukupne zapremine kod srednjeg protoka  $8 \text{ hm}^3$ . Dubina u inundacijama iznosi do 4 m, a u koritu do 8 m pri koti uspora 191,00 m n.m. Akumulacija je formirana šljunčanim obodnim nasipima koji su s unutarnje strane obloženi asfalt-betonskom vodonepropusnom oblogom, a s vanjske strane humusirani i zatravljeni. Kruna nasipa nadvisuje najvišu radnu kotu u jezeru za 1,5 m, a vodostaj tisućugodišnje velike vode ( $3700 \text{ m}^3/\text{s}$ ) za 70 cm. Uz obodne nasipe iskopom su izvedeni drenažni jarci čija je uloga regulacija razine podzemne vode u zaobalju. Unutar akumulacije izvedene su regulacijske poprečne vodne građevine (pera) čija je funkcija zadržavanje pozicije korita rijeke u akumulaciji. Pera se pružaju od nasipa do korita rijeke unutar akumulacije. Ukupno ih je izvedeno 26, od čega 13 na lijevoj i 13 na desnoj strani inundacijskog područja unutar akumulacije. Prvo punjenje i pražnjenje akumulacije obavljeno je u pokusnom pogonu od 11.03.1975. do 16.03.1975. godine. Normalni uspor u jezeru (radna kota ili gornja voda brane) kreće se od 190,00 m n.m. do 191,00 m n.m. Iznimno, ali kratkotrajno Pogonskim pravilnikom HE Varaždin dozvoljava

se 20 cm viša kota. Usporno jezero služi za dnevnu djelomičnu regulaciju dotoka. Na završetku akumulacijskog jezera izvedena je nasuta brana kojom je pregrađeno staro korito rijeke Drave, te armiranobetonska pokretna brana sa šest preljevnih polja, čija je uloga evakuacija velikih voda rijeke Drave. Evakuacijska moć pokretne brane iznosi 4300 m<sup>3</sup>/s. Završetak akumulacije predstavlja čvor zahvata koji je koncipiran na način da kod otvorene brane uzrokuje spiralno kretanje vode koje nanos usmjerava prema brani, a udaljava ga od ulaza u dovodni kanal. Prag ulaza u dovodni kanal visok je 2,5 metra kako bi se spriječilo ulaženje vučenog nanosa u dovodni kanal prema strojar-nici.

Akumulacija HE Varaždin dio je nacionalne ekološke mreže (HR1000013) i regionalnog parka Mura-Drava. Dio akumulacije nalazi se na teritoriju Republike Slovenije i dio je ornitološkog rezervata.

## **2.2. Sustav tehničkih promatranja za praćenje nanosa**

Prema Pravilniku o tehničkom promatranju visokih brana (službeni list SFRJ br. 7/66), Proizvodno područje Sjever (PP HE Sjever) - Varaždin obvezan je kao korisnik visokih brana obavljati tehnička promatranja prema Projektu tehničkih promatranja. Projekt tehničkih promatranja definira sustav tehničkih promatranja, vrstu, obim i učestalost mjerenja i vizualnog pregleda objekata hidroelektrane, te mjerenja i pregleda prostora na koji hidroelektrana ima utjecaj. Tehnička promatranja provode se u svrhu određivanja stanja, tj. sigurnosti visokih brana i pratećih objekata, prikupljanja potrebnih podataka radi racionalnog održavanja objekata tijekom eksploatacije, te donošenja ocjene utjecaja hidroelektrane na okoliš.

Projektom tehničkih promatranja HE Varaždin iz 1970. godine (Franković, 1970) za određivanje količine nanosa istaloženog u akumulaciji i njegovog rasprostiranja određeno je snimanje reljefa dna akumulacije. Definirana su 52 profila na duljini od cca 6,5 km, što predstavlja potez uspornog djelovanja brane HE Varaždin kod srednjih voda. Također je predviđeno uzimanje 100 uzoraka nanosa na 19 profila za definiranje raspodjele vučenog i lebdećeg nanosa duž akumulacije. U jednom mjerenju predviđeno je obaviti 100 vađenja uzoraka na 50 pozicija te vizualno kategorizirati nanos na lebdeći (muljeviti) nanos i vučeni nanos (šljunkoviti), te odrediti granulometrijski sastav svih uzoraka.

U 2010. godini izrađena je novelacija Projekta tehničkih promatranja HE Varaždin (Aničić, 2010) koji racionalizira i dorađuje postojeći sustav tehničkih promatranja. Projekt predviđa hidrografska snimanja u akumulaciji na 54 poprečna hidrografska profila koje je potrebno snimati jedanput godišnje. Položaj profila prikazan je na Slici 1 i 2. Na osnovu hidrografskog snimanja akumulacije, u sklopu obrade i interpretacije rezultata izračunava se zapunjenost akumulacije nanosom količinski i postotno. Također je predviđeno uzimanje uzoraka nanosa iz akumulacije na 20 poprečnih profila, ukupno 49 uzoraka svake druge godine na kojima se određuje granulometrijski sastav.

### 3. MORFOLOŠKE PROMJENE U AKUMULACIJI

#### 3.1. Analiza količine nanosa do 2019. godine

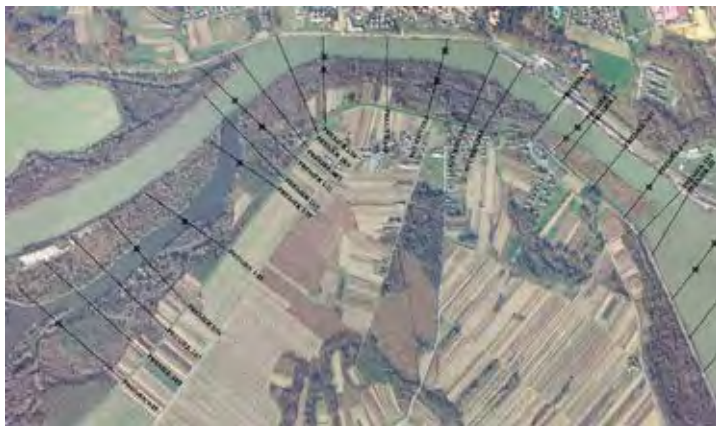
U cilju proračuna količine nanosa, definiranja područja zasipavanja nanosom i erozije dna akumulacije, od početka rada HE Varaždin do 2019. godine, proveden je proračun volumena pomoću softvera AutoCad Civil 3D.

Prema podacima hidrografskih mjerenja na profilima prikazanim na Slikama 1 i 2 iz 1974. (Pofak, 1975) i 2019. godine (Vuko, 2019) izrađena su dva digitalna modela reljefa (DMR) u vektorskom obliku. Preklapanjem dvaju digitalnih modela reljefa i primjenom prostornih analiza jasno se uočavaju promjene dna akumulacije.

Prema provedenim proračunima ukupna količina nanosa do 2019. godine u akumulaciji HE Varaždin iznosi  $2,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , odnosno 36,7 % ukupnog radnog volumena akumulacije što je prikazano na Slici 3. Srednja vrijednost visine zasipavanja nanosom za cijelo područje iznosi 0,56 m.

Prema Slici 4 koja prikazuje prostorno rasprostiranje područja zasipavanja nanosom i erozije dna akumulacije HE Varaždin može se zaključiti:

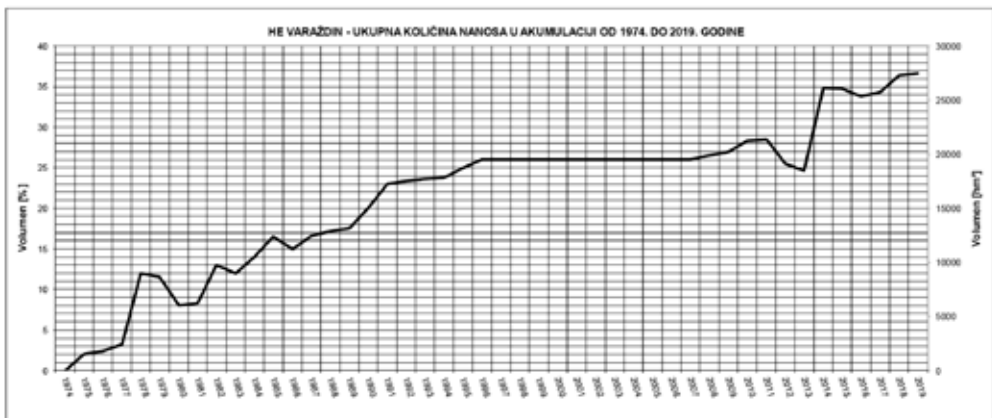
- u području glavnog korita rijeke unutar akumulacije dolazi do pojave erozije korita u području Ormoškog mosta i uzvodno od njega, a manjim dijelom nizvodno od Ormoškog mosta na pozicijama oko glava regulacijskih poprečnih vodnih građevina,
- u području glavnog korita rijeke unutar akumulacije dolazi do zasipavanja nanosom u srednjem dijelu akumulacije,
- izraženije zasipavanje nanosom uočava se u inundacijskom području unutar akumulacije i neposredno uz betonski prag na ulazu u dovodni kanal,
- zasipavanje nanosom se odvija u formi sprudova u smjeru tečenja rijeke Drave.



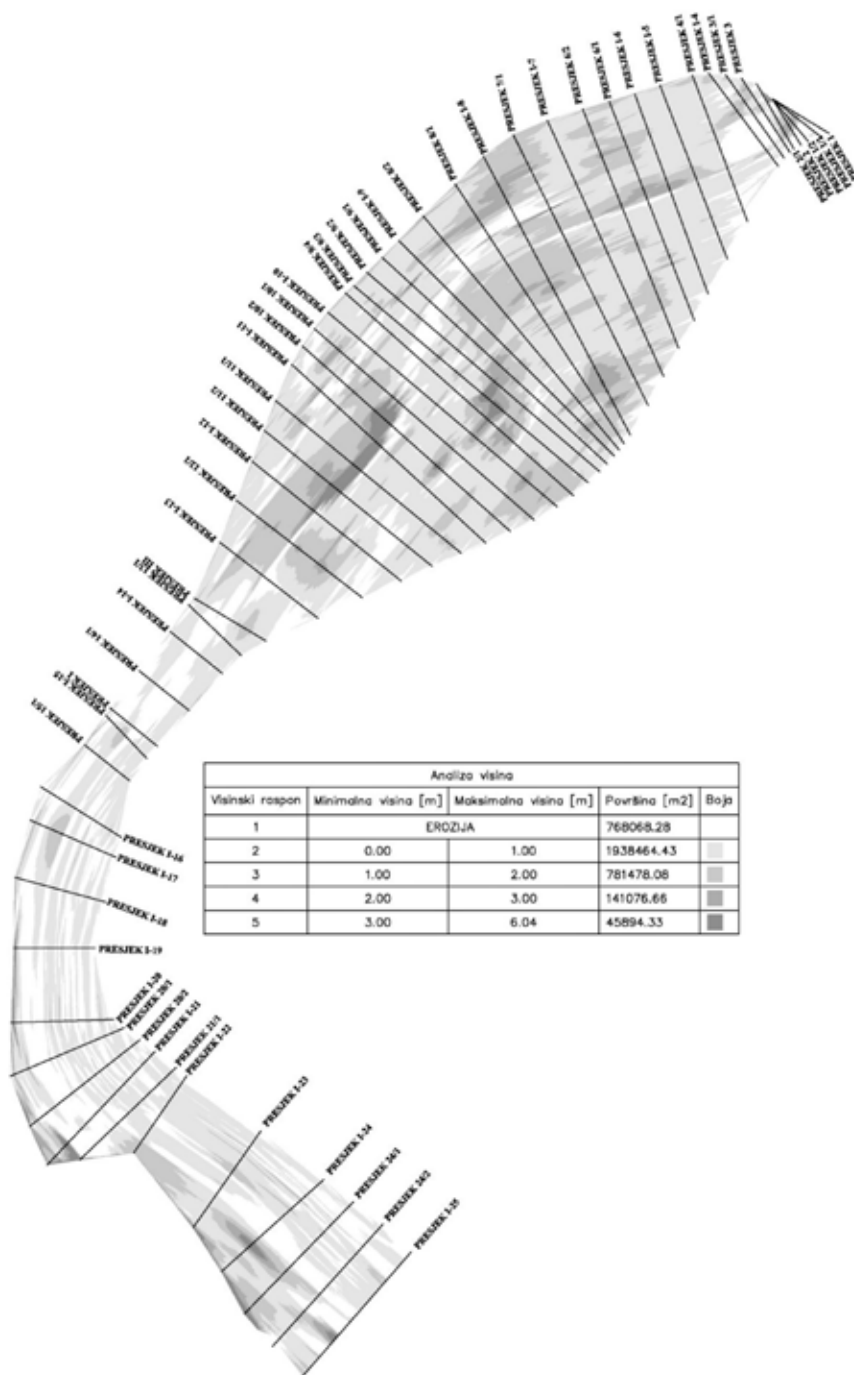
Slika 1. Položaj hidrografskih profila i pozicija uzimanja uzoraka nanosa na repu akumulacije HE Varaždin



Slika 2. Položaj hidrografskih profila i pozicija uzimanja uzoraka nanosa u akumulaciji HE Varaždin



Slika 3. Dijagram zapunjenosti akumulacije HE Varaždin nanosom od 1974. do 2019. godine



Slika 4. Analiza prostornog rasporeda područja zasipavanja nanosom i erozije dna akumulacije

### **3.2. Analiza sastava nanosa u 2019. godini**

Prilikom izmjere hidrografskih profila u akumulaciji HE Varaždin 2019. godine, na pozicijama sa Slika 1 i 2, uzeti su uzorci materijala s dna akumulacije za granulometrijsku analizu (Vuko, 2019).

Generalno, uzorci se mogu podijeliti na dva tipa materijala s obzirom na granulometrijski sastav. Prvi tip su uzorci uzeti iz područja glavnog korita rijeke unutar akumulacije koji sadrže šljunkovito pjeskovite čestice. Drugi tip su uzorci koji su uzeti u inundacijskom području unutar akumulacije gdje su prisutni procesi taloženja nanosa koji sadrže čestice gline, praha i sitnog pijeska. Dodatno, u inundacijskom području uz lijevu obalu akumulacije pojavljuje se tip 2 s malim udjelom sitnog do srednje krupnog šljunka.

Prema granulometrijskoj analizi uzoraka, izračunato je da se u akumulaciji nalazi 70 % šljunkovito-pjeskovitog materijala i 30 % prašinsto-pjeskovitog materijala.

## **4. PREGLED PROVEDENIH AKTIVNOSTI VEZANIH NA UPRAVLJANJE NANOSOM U AKUMULACIJSKOM JEZERU HE VARAŽDIN**

Već u fazi izrade projektne dokumentacije za izgradnju HE Varaždin obavljene su analize taloženja i pronosa nanosa kroz akumulacijsko jezero. U veljači 1971. izrađen je matematički model zasipavanja akumulacije nanosom (Franković, 1971). Pomoću matematičkog modela izračunate su usporne krivulje duž akumulacije za protoke od  $310 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $4200 \text{ m}^3/\text{s}$  za sve računске profile, u zavisnosti od uspora pred branom te dijagrami promjene vučnih sila duž korita u zavisnosti od protoka Drave. Na temelju dobivenih protočnih krivulja izrađen je matematički model proračuna zasipanja akumulacije vučenim nanosom. Za izračun količina nanosa korišten je izraz Meyer-Petera i Mullera koji su svoj izraz dali na osnovi eksperimenata u laboratoriju, koje su vršili za vodotoke alpskog područja. Na osnovi rezultata proračuna generalno je zaključeno da će se cjelokupni nanos taložiti u uzvodnom dijelu akumulacije, a da se nanos neće taložiti u području nizvodno od profila na polovici akumulacije.

U svibnju 1980. izrađena je Studija zasipanosti akumulacijskog jezera nanosom (Franković, 1980). U sklopu predmetne Studije izračunato je da se u razdoblju od početka rada HE Varaždin 1975. pa do 1979. u jezeru ukupno istaložilo  $700.000 \text{ m}^3$  nanosa i da istaloženi nanos nema bitniji utjecaj na promjenu vodnih lica u akumulaciji - tisućgodišnja velika voda ( $3700 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ne ugrožava obodne nasipe akumulacije, a vodostaj za protok u iznosu  $4200 \text{ m}^3/\text{s}$  vrhuni s krunom nasipa na repu akumulacije. U rujnu 1990. godine izrađena je analiza hidrauličkih mjerenja akumulacije HE Varaždin (Russo, 1990). U sklopu predmetne analize izračunato je da se u razdoblju od početka rada HE Varaždin 1975. pa do 1989. u jezeru ukupno istaložilo  $1.400.000 \text{ m}^3$  nanosa (19 % ukupnog volumena akumulacije). U sklopu predmetnog elaborata izrađen je proračun vodnih lica (program HEC-2) zasipanog stanja akumulacije

(1989. godina), te je zaključeno da zasipanost akumulacije nije kritična za obodne nasipe akumulacije.

U prosincu 2009. godine izrađen je Projekt uklanjanja nanosa iz akumulacijskog jezera HE Varaždin (Aničić, 2009). U sklopu projekta izračunato je da se u razdoblju od početka rada HE Varaždin 1975. pa do 2009. godine u jezeru ukupno istaložilo 2.000.000 m<sup>3</sup> nanosa (27 % ukupnog volumena akumulacije) i zaključeno da ta količina ne dovodi u pitanje sigurnost nasipa i normalno korištenje akumulacije. U sklopu izrade projekta obavljeno je ispitivanje uzoraka nanosa prema *Zakonu o poljoprivrednom zemljištu (NN 152/08)*, odnosno ispitivanje prema parametrima određenim *Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja štetnim tvarima (NN 15/92)* – teških metala i organskih štetnih tvari. Na osnovi rezultata ispitivanja zaključeno je da uzorci zadovoljavaju propisane granične vrijednosti za sve ispitane parametre.

Projektom je definirano ukupno osam pozicija na kojima se uklanja nanos, od čega sedam u koritu rijeke unutar akumulacije i jedna u inundacijskom području akumulacije. U koritu rijeke unutar akumulacije predviđeno je uklanjanje 190.000 m<sup>3</sup> uglavnom šljunkovito-pjeskovitog materijala, a u inundacijskom području akumulacije 200.000 m<sup>3</sup> prašinsto-pjeskovitog materijala.

U mjesecu rujnu i listopadu 2011. izvedeni su radovi na izmještanju prašinsto-pjeskovitog nanosa unutar akumulacijskog jezera. Nanos koji je prethodno bio uzorkovan i kojem je bio određen granulometrijski sastav (50 % prah, 50 % pijesak, s malim primjesama šljunka) je uklanjan na uzvodnom dijelu inundacijskog područja akumulacije, gdje je debljina istaloženog nanosa oko 0,5 metra i dubina vode oko 1 metar. Tim radovima ukupno je iz akumulacije uklonjeno 11.500 m<sup>3</sup> nanosa. Ovaj princip uklanjanja nanosa planirao se provoditi u narednim godinama, međutim prolazak velikog vodnog vala rijekom Dravom u studenom 2012. (na HE Varaždin je 06.11.2012. u 8 sati evidentiran protok od 3300 m<sup>3</sup>/s) i hidrauličke i geomorfološke analize akumulacije koje su provedene nakon prolaska tog vodnog vala, ukazale su na potrebu za sustavnim sagledavanjem problematike nanosa u akumulaciji uključujući i stanje zaštitnih vodnih građevina izvedenih unutar akumulacijskog jezera. U tom smislu je u travnju 2013. izrađena Analiza protočnosti rijeke Drave na širem području HE Varaždin (Bekić, 2013). Predmetna analiza sadržavala je izradu hidrauličkog i hidromorfološkog modela pomoću programskog paketa Delft3D - programskog modula Delft3D-FLOW. Za akumulacijsko jezero izrađen je morfodinamički i hidrodinamički model. Naime, unutar akumulacije izvedene su regulacijske poprečne vodne građevine čija je funkcija zadržavanje pozicije korita rijeke u akumulaciji. Zamisao je bila djelomično skraćenje tih građevina, što bi rezultiralo poticanju pronosa nanosa i povećanju protočnosti akumulacije. Također su računata vodna lica u akumulacijskom jezeru u ovisnosti o protoku, za postojeće stanje sustava i za stanje s djelomično skraćenim regulacijskim poprečnim vodnim građevinama (postojeće stanje sustava odnosilo se na količinu nanosa u akumulaciji od 2.100.000 m<sup>3</sup> - 29 %

ukupnog volumena akumulacije). Na osnovu analize rezultata proračuna zaključeno je da postoji mogućnost djelomičnog skraćanja regulacijskih građevina, s tim da je potrebno između postojećih izvesti dodatne, kako bi se zadržala sigurnost obodnih nasipa akumulacije. Djelomično skraćenje regulacijskih građevina povećalo bi protočnost akumulacije te bi se aktivirala erozija materijala istaloženog na prostoru na kojem se krata regulacijske građevine. Na osnovi analize rezultata proračuna također je zaključeno da su obodni nasipi akumulacijskog jezera sigurni na protok kroz sustav u iznosu od 4300 m<sup>3</sup>/s, što je projektirana evakuacijska moć armiranobetonske pokretne brane.

Na osnovi svih provedenih analiza i sustavnog sagledavanja problematike nanosa i izrađenih regulacijskih vodnih građevina unutar akumulacijskog jezera, u rujnu 2018. izrađena je projektna dokumentacija rekonstrukcije vodnih građevina u akumulaciji HE Varaždin (Marasović, 2018) kojom se predviđaju radovi koji će dodatno povećati sigurnost objekata HE Varaždin te pospješiti pronos nanosa kroz akumulaciju.

## 5. ZAKLJUČAK

Akumulacija HE Varaždin je plitka akumulacija. Iz tog razloga bitno je praćenje kvantitativnih i kvalitativnih svojstava nanosa, koji može ugroziti sigurnost obodnih nasipa akumulacije. Od početka rada HE Varaždin 1975. pa do 2019. u akumulaciji je ukupno istaloženo 2.700.000 m<sup>3</sup> nanosa (36,7 % ukupnog radnog volumena akumulacije), što za sada ne ugrožava sigurnost objekata HE Varaždin.

Dokaz tome je događaj iz studenog 2012. godine, kada je pri protoku od 3.300 m<sup>3</sup>/s kruna nasipa na repu akumulacije imala nadvišenje u odnosu na vodostaj u akumulaciji u iznosu 1,1 m.

Dinamika taloženja i pronosa nanosa kroz sustav HE Varaždin ovisi o vodnom režimu rijeke Drave i njenih pritoka (učestalosti i intezitetu vodnih valova). Ekstremni vodni valovi, kao što je to bio vodni val iz studenog 2012., erodiraju istaloženi nanos unutar akumulacije, te ga pronose preko brane, nizvodno u staro korito rijeke Drave. Nakon prolaska vodnog vala iz studenog 2012. količina nanosa u akumulaciji smanjena je za cca. 300.000 m<sup>3</sup>.

Unutar akumulacije izvedene su regulacijske poprečne vodne građevine koje sprečavaju meandriranje glavnog korita rijeke unutar akumulacije, što može ugroziti sigurnost obodnih nasipa akumulacije. Izrađene hidrauličke i geomorfološke analize akumulacije ukazale su na potrebu za sustavnim sagledavanjem problematike nanosa u akumulaciji uključujući i stanje zaštitnih vodnih građevina izvedenih unutar akumulacije. Planirana rekonstrukcija tih građevina povećala bi protočnost akumulacije te bi aktivirala eroziju materijala istaloženog na prostoru na kojem se krata regulacijske građevine i pospješila pronos nanosa. Na preostalom inundacijskom prostoru na kojem je istaložen prašinasto-pjeskoviti materijal, rješenje za njegovim uklanjanjem je njegovo izmještanje na poziciju neposredno ispred brane, kako je to odrađeno u 2011. godini. Pozicije na kojima je istaložen šljunkovito-pjeskoviti materijal u glavnom ko-



ritu rijeke na srednjem dijelu akumulacije, nalaze se na teritoriju Republike Slovenije, te je način uklanjanja i eventualno korištenje tog materijala potrebno usaglasiti s nadležnim institucijama Republike Slovenije.

## LITERATURA

- [1] Elektroprojekt Zagreb (1970): *HE Varaždin, Tehnička promatranja, Glavni projekt*, Franković, B., Zagreb.
- [2] Elektroprojekt Zagreb (1971): *HE Varaždin, Matematički modeli, Glavni projekt, Dio I: Usporane krivulje duž akumulacije Ormož*, Beraković, B., Zagreb.
- [3] Elektroprojekt Zagreb (1971): *HE Varaždin, Matematički modeli, Glavni projekt, Dio II: Zasipanje bazena Ormož vučenim nanosom*, Franković, B., Zagreb.
- [4] Elektroprojekt Zagreb (1980): *HE Varaždin, Studija zasipanosti jezera nanosom*, Franković, B., Zagreb.
- [5] Elektroprojekt d.d. (1999): *Pogonska pravila HE Varaždin*, Franković, B., Zagreb.
- [6] Elektroprojekt d.d. (2018): *Glavni projekt rekonstrukcije vodnih građevina u akumulaciji HE Varaždin*, Marasović, M., Zagreb.
- [7] Geodetski zavod d.d. (2019): *Hidrografski radovi na objektima HE Varaždin*, Vuko, G., Split.
- [8] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hidroing d.o.o. Osijek (2013): *Analiza protočnosti rijeke Drave na širem području HE Varaždin*, Bekić, D., Zagreb.
- [9] Institut za elektroprivredu Zagreb (1990): *Analiza hidrauličkih mjerenja akumulacije HE Varaždin*, Russo, A., Zagreb.
- [10] Institut za elektroprivredu i energetiku d.d. (2009): *Projekt uklanjanja nanosa iz akumulacijskog jezera HE Varaždin*, Aničić, M., Zagreb.
- [11] Institut za elektroprivredu i energetiku d.d. (2010): *HE Varaždin, Projekt tehničkih promatranja*, Aničić, M., Zagreb.
- [12] Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske - Zagreb (1975): *HE Varaždin bazen Ormož, hidrografsko snimanje – poprečni profili*, Pofak, V., Zagreb.
- [13] Sever, Z., Franković, B., Pavlin, Ž., Stanković, V. (2000): *Hidroelektrane u Hrvatskoj*, Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb, str. 11-24.
- [14] Službeni list SFRJ (1966): *Pravilnik o tehničkom promatranju visokih brana*, br. 7/66, Hafner, V., Beograd.
- [15] Zavod za javno zdravstvo Dr. Andrija Štampar (2009): *Izješće o ispitivanju fizikalnih i kemijskih svojstava otpada – 05803 0482/09*, dr.sc. Želimira Cvetković, Zagreb
- [16] [www.dem.si/sl/](http://www.dem.si/sl/), (Preuzeto 10. prosinca 2019.)

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**STANJE I TRENDОВI U MONITORINGU  
NANOSA**

**STATE AND TRENDS IN THE SEDIMENT  
MONITORING**

**Dijana Oskoruš<sup>a</sup>**

**SAŽETAK**

Procesi stvaranja, pronosa i taloženja nanosa na riječnim slivovima i vodotocima u Hrvatskoj prate se još od sredine prošlog stoljeća. Državni hidrometeorološki zavod (u daljnjem tekstu DHMZ) kao institucija zadužena za hidrološki monitoring, raspolaže nizovima arhivskih podataka o koncentracijama i pronosu suspendiranog nanosa te o granulometrijskom sastavu nanosa s dna i obala. Također postoje povijesni podaci o količinama vučenog nanosa na nekim dionicama rijeke Save i Drave ili lokacijama koje su bile izučavane prije izgradnje hidrotehničkih objekata. Nakon raspada Jugoslavije monitoring nanosa bio je uglavnom u prekidu, a od 1990-tih godina na ovamo, mreža postaja i sam program mjerenja bitno se smanjio. Cilj ovog rada je pregled trenutnog stanja u monitoringu nanosa u prirodnim i izgrađenim vodnim sustavima u Hrvatskoj, upoznavanje s novim metodama i trendovima, kao i potrebama vezanim za razvoj novih metoda mjerenja i modeliranja pronosa nanosa u svrhu održivog upravljanja slivovima i vodotocima.

**ABSTRACT**

The processes of formation, transport and sediment deposition in river basins and watercourses in Croatia have been monitored since the middle of the last century. The State Hydrometeorological Institute (hereinafter referred to as DHMZ), as the institution in charge of hydrological monitoring, has a set of archival data on concentra-

---

<sup>a</sup> Državni hidrometeorološki zavod, Grič 3, Zagreb, 10000, Hrvatska, oskorus@cirus.dhz.hr

tions and transport of suspended sediment and on the granulometric composition of deposits from the bottom and the banks. There is also historical data on the volumes of bed load drawn on some sections of the Sava and Drava Rivers or locations that were studied prior to the construction of hydraulic structures. After the breakup of Yugoslavia, sediment monitoring was mostly interrupted, and since the 1990s, the network of stations and the measurement program itself have decreased substantially. The aim of this paper is to review the current state of sediment monitoring in natural and artificial water systems in Croatia, to get acquainted with new methods and trends, as well as the needs related to the development of new methods of measuring and modeling sediment transport for sustainable management of watersheds and watercourses.

*KLJUČNE RIJEČI: pronos nanosa, vučeni nanos, povijesni podaci, nove metode*

*KEYWORDS: sediment transport, bed load, historical data, new methods*

## 1. UVOD

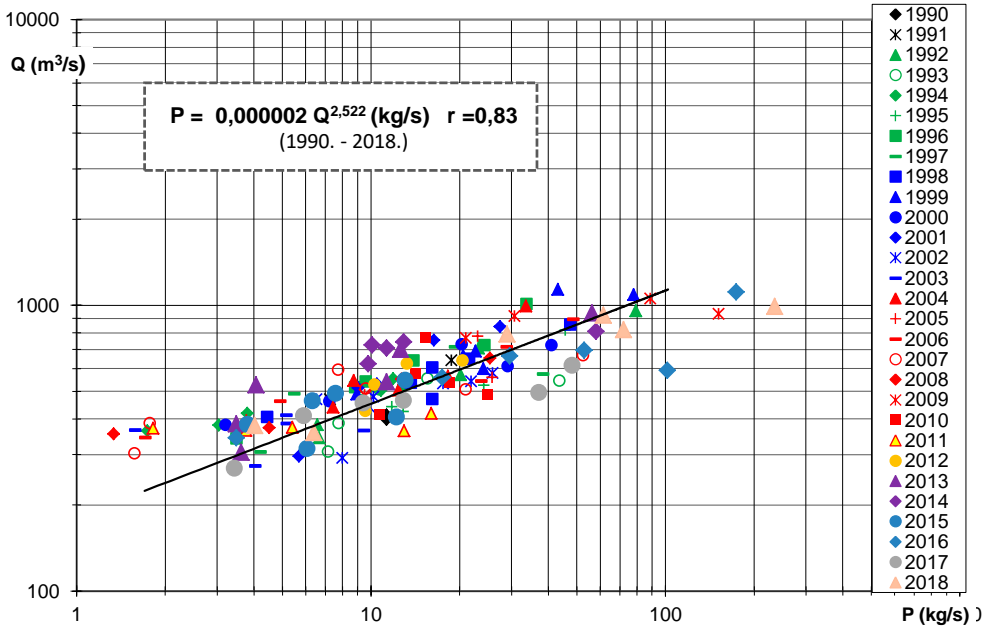
Nanos je integralni, prirodni dio akvatičnih sustava, bitan u odvijanju hidroloških, geomorfoloških i ekoloških procesa te je za dobar morfodinamički status vodotoka važna ravnoteža ulaznih i izlaznih količina nanosa. Često je ta prirodna ravnoteža bitno narušena djelovanjem čovjeka u vidu brojnih zahvata u slivu ili na samom vodotoku, stoga je spoznaja o procesima taloženja, transporta i eksploatacije nanosa nužna za postizanje održivog upravljanja slivom ili hidrotehničkim objektima. Sektor za hidrologiju DHMZ-a provodi monitoring nanosa u Republici Hrvatskoj. Prati se suspendirani nanos te granulometrijski sastav nanosa s dna. Pored tradicionalne, direktne metode proračuna koncentracije nanosa u jednoj točki, vrše se profilaska mjerenja suspendiranog nanosa na Muri, Dravi, Savi i Dunavu novom indirektnom metodom. Redovite geodetske snimke poprečnih profila korita na većini lokacija ukazuju na značajno produbljivanje korita, što upućuje na potrebu pokretanja monitoringa vučenog nanosa.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Redovni monitoring suspendiranog nanosa u RH provodi se kroz svakodnevno uzimanje uzoraka vode iz vodotoka i jezera na 22 hidrološke postaje diljem RH te naknadnom laboratorijskom analizom standardnom metodom (ISO 4365:2005). Ova metoda propisuje sušenje filter papira na 105 °C, zatim hlađenje i vaganje. Na osnovi razlike u težini praznog i punog filter papira, dobivaju se koncentracije suspendiranog nanosa izražene u g/m<sup>3</sup>. Dobiveni podatak iz jedne točke u vodotoku usvaja se kao dnevna vrijednost koncentracije na određenoj lokaciji te se na osnovi te vrijednosti proračunavaju i analiziraju trendovi dnevne, mjesečne i godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa (Bonacci i Oskoruš, 2010; Zhu i drugi, 2019).

Nedostatak ove tradicionalne metode je vremenska pristranost. Naime, koncentracija u nekom vremensku terminu ne može opisati njenu stvarnu raspodjelu tijekom 24 sata u nekom vodotoku, budući da je poznato da vrijednost koncentracije suspendiranog nanosa može varirati i nekoliko desetaka puta, ovisno o tome da li je došlo do propagacije ili recesije vodnog vala (Oskoruš, 2015). Stoga će u sklopu trenutno aktivnog projekta „**Unaprjeđenje negrađevinskih mjera upravljanja rizicima od poplava u Republici Hrvatskoj - VEPAR**“ (2019.-2023.) dio aktivnosti biti usmjeren na modernizaciju mreže za hidrološko praćenje površinskih voda. S tim u vezi se na 21 hidrološkoj postaji u sklopu državne mreže planira modernizacija monitoringa suspendiranog nanosa tako da se uvede kontinuirano praćenje mutnoće ugradnjom optičkih senzora za mutnoću. Korelacijskim odnosom definiranim na osnovi analize zahvaćenih uzoraka i trenutne mutnoće (jedinica za mutnoću NTU) može se u realnom vremenu pratiti koncentracija suspendiranog nanosa u nekom vodotoku. Vezano za taj postupak, trenutno se provodi suradnja u sklopu stručne grupe za hidrologiju u sklopu Stalne hrvatsko-slovenske potkomisije Agencije za okoliš Slovenije (ARSO) na dionici Mure između Gornje Radgone i Murskog Središća gdje će se na osnovi izmjerenih dnevnih koncentracija u Murskom Središću i mutnoće (NTU) u Gornjoj Radgoni definirati korelacijski odnos.

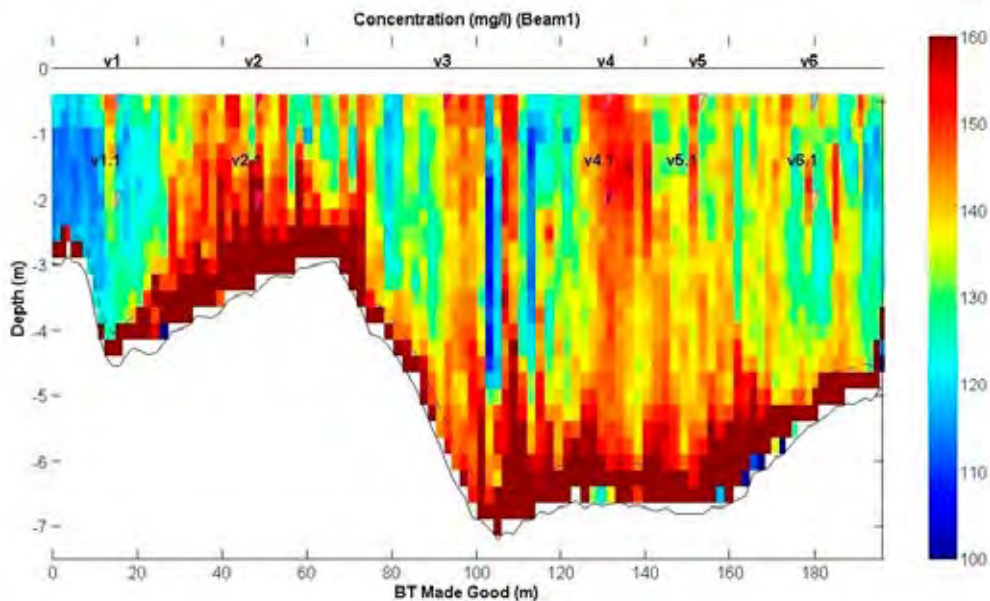
Također, koncentracija iz uzorka zahvaćenog uz obalu često nije mjerodavni pokazatelj zastupljenosti suspendirane tvari u sredini ili matici vodotoka. Iz tog razloga se usporedno s mjerenjem protoka povremeno vrše profilna mjerenja koncentracije suspendiranog nanosa. U prošlosti su se ova mjerenja provodila u mjernim vertikalama u profilu vodotoka prije izgradnje nekih objekata, kako bi se prikupio određen niz podataka na osnovi kojeg su se utvđivale godišnje količine pronosa nanosa kao i njegova profilna raspodjela. Ova mjerenja se trenutno provode periodično na 10 hidroloških postaja i to na našim najvećim rijekama: Muri, Dravi, Savi i Dunavu. Cilj ovih mjerenja je definiranje korelacijskih odnosa između protoka  $Q$  ( $m^3/s$ ) i koncentracija  $C$  ( $g/m^3$ ), odnosno trenutnog pronosa suspendiranog nanosa  $P$  ( $kg/s$ ), kao i određivanje koeficijenta korekcije koncentracije iz jedne točke uz obalu u odnosu na srednju profilnu koncentraciju u nekom mjernom profilu. Ovi korelacijski odnosi definiraju se za svaki mjerni profil posebno, na osnovi pojedinačnih mjerenja za dugi niz godina (Oskoruš, 2015). Na grafičkom prikazu (Slika 1) prikazan je pronos suspendiranog nanosa u funkciji protoka za hidrološku postaju Drava-Terezino Polje, s označenim rezultatima profilskih mjerenja od 1990.-2018. godine.



Slika 1. Drava-Terezino Polje, pronos nanosa u funkciji protoka  $P = f(Q)$

Profilsko mjerenje se provodi korištenjem akustičnog mjerača trenutnih brzina (u daljnjem tekstu ADCP). Princip rada ADCP-a zasniva se na transmisiji akustičnog signala poznate frekvencije koji uređaj odašilje prema stupcu vode. Stupac vode, u kojem se istom brzinom kreću i čestice suspendiranog nanosa, reflektira signal natrag prema odašiljaču, a jačina odjeka signala obično se naziva intenzitet odbijanja signala, odnosno akustični povratni signal (*echo intensity backscatter*). Razlika između odašlanog i povratnog signala zove se prigušenje ultrazvučnog signala, a ono je proporcionalno količini i sastavu čvrstih čestica u vodi. Dakle, svojstvo zavisnosti refleksije signala od mutnoće vode iskorišteno je za konverziju intenziteta povratnog signala u stvarnu koncentraciju suspendiranog nanosa u vodi. Na osnovi tog svojstva se iz prigušenja ultrazvučnog signala i koncentracije nanosa iz uzorka vode zahvaćenog u nekoj poznatoj točki (v1.1-v6.1), može proračunati koncentracija suspendiranog nanosa za bilo koju točku (eng. *beam*) u mjernom profilu, njena srednja profilska vrijednost  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), kao i trenutni pronos nanosa  $P$  ( $\text{kg/m}^3$ ) (Slika 2) (Oskoruš, 2015).

Ova metoda mjerenja i obrade zove se indirektna metoda i primjenjuje se u mnogim europskim zemljama. Od 2013. godine je uvedena u Hrvatskoj, nešto kasnije i u Mađarskoj te se sada rezultati istovremenih profilskih mjerenja u sklopu programa zajedničkih mjerenja na graničnim profilima Mura: Goričan/Letenye; Drava: Botovo/Ortilos, Terezino Polje/Barcs i Donji Miholjac/Dravaszabolcs, međusobno uspoređuju dva puta godišnje u sklopu Stručne grupe za hidrologiju koja djeluje u sastavu Stalne hrvatsko-mađarske potkomisije za količine voda, Tablica 1 (Oskoruš, 2018).



Slika 2. Raspodjela koncentracije suspendiranog nanosa u profilu HP Drava-Terezino Polje, Datum: 4. svibnja 2016.; Protok ( $m^3/s$ ): 1113;  $\rho$  ( $kg/m^3$ ): 0,139;  $P$  ( $kg/s$ ): 148,5

Tablica 1. Rezultati zajedničkih mjerenja protoka i pronosa suspendiranog nanosa na Dravi u 2016

Vodotok	Hid. Postaja	Mjerni uređaj	Datum	Vrijeme mjerenja h : min	H cm	Q $m^3/s$	$v_{sr}$ m/s	F $m^2$	B m	NANOS	
										sek.pron. kg/s	sred.konc. $g/m^3$
DRAVA	T.Polje	ADCP	04.05.2016.	10:39	-18	1113	1,09	1018	203	173,90	162,60
"	Barcs	~	04.05.2016.	9:37	188	1089	1,23	879	180	198,57	182,30
"	T.Polje	ADCP	08.06.2016.	10:48	-124	696	0,99	703	173	53,00	76,00
"	Barcs	~	08.06.2016.	10:26	85	731	1,03	709	175	58,00	79,00
"	D.Miholjac	ADCP	05.05.2016.	10:44	258	1028	1,09	941	170	98,43	102,20
"	Dravaszab.	~	05.05.2016.	10:46	323	1057	1,08	976	176	113,07	107,00

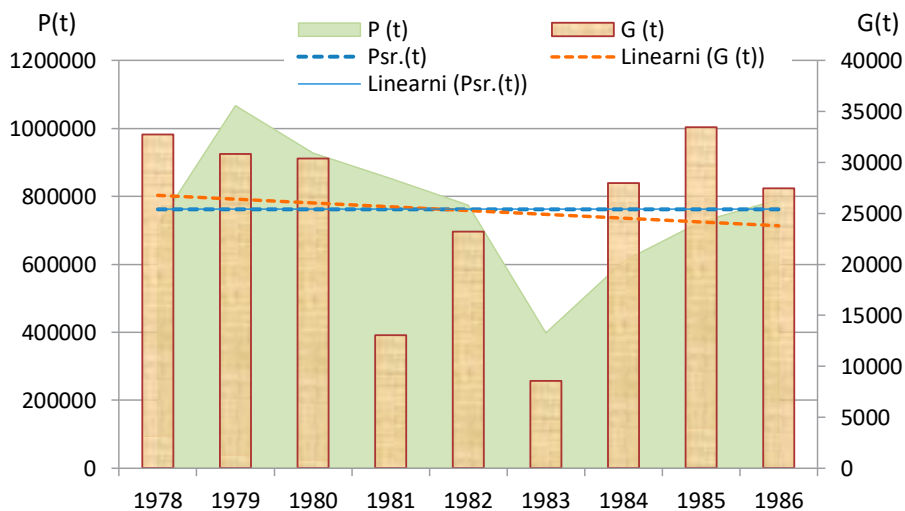
H...vodostaj, Q...protok,  $v_{sr}$ ...srednja profilaska brzina, F...površina protjecajnog profila, B...širina profila

Mjerenja vučenog nanosa vršila su se na pet lokacija na Dravi, a najduže razdoblje ovih mjerenja bilo je od 1968.-1986. na Savi u profilu Podsused, Tablica 2. Osim utvrđivanja količina vučenog nanosa, za vrijeme mjerenja bio je analiziran i granulometrijski sastav vučenog nanosa na pojedinim mjernim vertikalama.

Analizom godišnjih količina pronosa vučenog nanosa na hidrološkoj postaji Sava - Podsused vidljivo je značajno smanjenje pronosa nakon 1975. godine. Izgradnjom uspornog praga na Savi za potrebe NE Krško taj proces je od 1980-tih godina nastavljen sve do današnjih dana (Slika 3) (IEE, 1994). Na žalost, monitoring vučenog nanosa nije obnovljen nakon osamostaljenja Hrvatske, iako za to postoje realne potrebe.

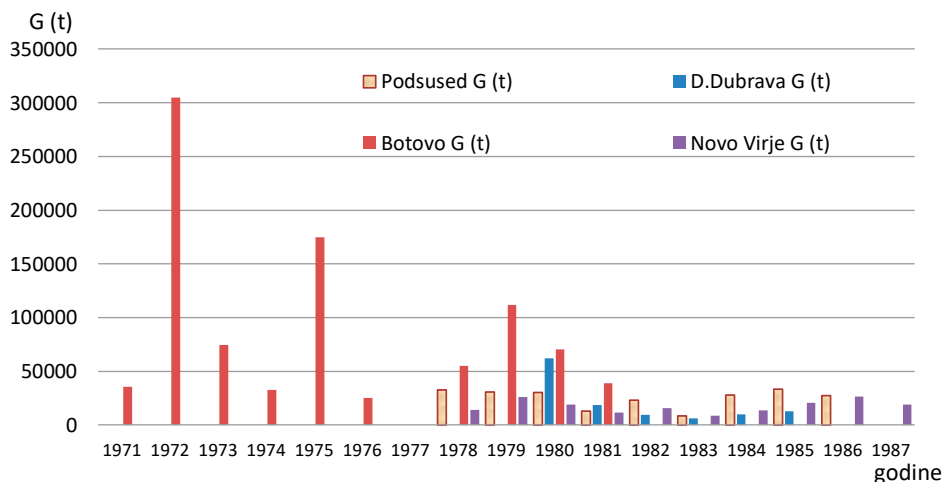
Tablica 2. Popis lokacija na kojima se u prošlosti mjerio pronos vučenog nanosa

MJERNA POSTAJA	NAČIN MJERENJA	KONTINUITET MJERENJA	RAZDOBLJE MJERENJA			
Donja Dubrava, Drava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1980.-1985.			
Botovo, Drava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1969.-1981.			
Novo Virje, Drava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1978.-1987.			
Terezino Polje, Drava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1968.-1975.			
Donji Miholjac, Drava	Karolyevim hvatačem	Povremeno </tr <tr> <td>Podsused, Sava</td> <td>Karolyevim hvatačem</td> <td>Povremeno</td> <td>1968.-1986.</td> </tr>	Podsused, Sava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1968.-1986.
Podsused, Sava	Karolyevim hvatačem	Povremeno	1968.-1986.			

Slika 3. Odnos godišnje količine pronosa suspendiranog nanosa  $P(t)$  i vučenog nanosa  $G(t)$  u profilu HP Sava-Podsused, za razdoblje 1978.-1986.

Na grafičkom prikazu (Slika 3) je vidljivo da se godišnje količine pronosa vučenog nanosa ( $G$ ) kreću od 8 549 t (1983.) do maksimalnih 33 441 t (1985.), a godišnje količine suspendiranog nanosa ( $P$ ) na HP Sava-Podsused kreću se od 398 260 t (1983.) do maksimalne količine od 1 067 300 t (1979.). Prosječna vrijednost godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa iznosi 762 385 t, dok prosječna vrijednost pronosa vučenog nanosa iznosi 25 282 t, što predstavlja samo 3,2 % od ukupne količine pronosa nanosa u tom profilu. Također je vidljivo da nema trenda promjene u pronosu suspendiranog nanosa, dok je kod pronosa vučenog nanosa vidljiv trend smanjenja. Razdoblje usporedbe podataka je relativno kratko (9 godina), stoga bi se za daljnje praćenje ovog trenda, pored mjerenja suspendiranog nanosa trebao uvesti i monitoring vučenog nanosa na ovoj hidrološkoj postaji, s obzirom na značajan utjecaj pre-

grada i akumulacija na pronos vučenog nanosa u uzvodnom dijelu Save, u Sloveniji. Na Slici 4 prikazane su usporedne godišnje količine vučenog nanosa na hidrološkim postajama na Dravi u usporedbi s količinama izmjerenim u Podsusedu na Savi. Prema arhivskim podacima DHMZ-a, mjerenja nisu vršena u istom razdoblju, ali je ipak vidljivo da su daleko najveće količine vučenog nanosa izmjerene na HP Botovo u razdoblju 1971.-1981. godine, dakle prije izgradnje hidroelektrana na Dravi. Posebno se tu ističe maksimalna vrijednost od preko 300 000 t iz 1972. godine jer je u toj godini bio zabilježen najveći vodni val na Dravi. Stoga bi i za ovu lokaciju bilo zanimljivo usporediti podatke o vučenom nanosu prije i nakon izgradnje triju brana i akumulacija za HE Varaždin (1975.), HE Čakovec (1982.) i HE Donja Dubrava (1989.)



Slika 4. Godišnje količine vučenog nanosa izmjerene na hidrološkim postajama na Savi i Dravi

Morfološke promjene u koritu redovito se prate usporedbom geodetskih snimaka poprečnih profila, međutim, sve se više pokazuje potreba za modeliranjem procesa erozije ili taloženja nanosa u koritu. Rezultati takvih modela bi omogućili pravovremene intervencije vezano za optimalne uvjete tečenja koji su neophodni za ravnotežu pronosa nanosa i zaštitu pojedinih hidrotehničkih objekata (Gilja i drugi, 2010) .

U posljednje vrijeme se pitanje režima nanosa aktualiziralo kroz nekoliko projekata u slivovima Save, Drave i Dunava. Međutim, konačni rezultati su se uglavnom vezali za izradu metodologija ili smjernica za upravljanje nanosom, opisom dosadašnje baze podataka, ali ne i uspostavom monitoringa ili razvojem modelskih simulacija za buduću procjenu procesa taloženja i/ili erozije. Unaprjeđenje u svrhu podizanja kvalitete ove vrste monitoringa vidi se kroz međunarodnu suradnju država i krajnjih korisnika na određenom slivu tj. kroz međusobnu razmjenu znanja, iskustava i podataka (Oskoruš, 2018).



### 3. ZAKLJUČAK

Prekogranična suradnja na zajedničkim mjernim profilima je vrlo važna kad govorimo o razmjeni iskustava, metodologije i rezultata mjerenja.

Monitoring suspendiranog nanosa je potrebno unaprijediti kroz implementaciju optičkih senzora za mutnoću. U svrhu kontinuiranog praćenja koncentracije nanosa u realnom vremenu potrebno je definirati korelacijski odnos između mutnoće (NTU) i koncentracije suspendiranog nanosa (mg/l) na postojećim lokacijama.

Vezano za sve veći antropogeni utjecaj na prirodni režim pronosa nanosa, u nekim vodotocima se pokazuje potreba za monitoringom vučenog nanosa. S obzirom na iskustva drugih zemalja vezana za upotrebu novih uređaja za ovu vrstu mjerenja potrebno razmotriti i/ili razviti neku metodu za ovu vrstu mjerenja.

Primjena modela za procese pronosa nanosa omogućilo bi pravovremene spoznaje o trenutnim i budućim procesima erozije ili taloženja na nekim dionicama, a što bi u konačnici omogućilo optimalno upravljanje vodotocima i slivovima.

### LITERATURA

- [1] Bonacci, O., Oskoruš, D. (2010): *The changes in the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime*, Environ Earth Sciences, 59/8, Springer-Verlag.
- [2] Gilja, G., Oskoruš, D., Kuspilić, N. (2010): *Erosion of the Sava riverbed in Croatia and its foreseeable consequences*, The Fourth International Scientific Conference BALWOIS 2010, Ohrid, Republic of Macedonia, 25-29 May 2010.
- [3] *HIS 2000*, Baza hidroloških podataka DHMZ.
- [4] Institut za elektroprivredu i energetiku (1994): *Identifikacija utjecajne zone podvodnog regulacijskog praga u koritu rijeke Save kod TE-TO Zagreb*, Elaborat, Zagreb.
- [5] ISO 4365:2005: *Liquid flow in open channels — Sediment in streams and canals — Determination of concentration, particle size distribution and relative density*.
- [6] Oskoruš, D. (2015): *Doprinos analizi dinamike suspendiranog nanosa srednjega toka rijeke Save*, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, str. 161.
- [7] Oskoruš, D. (2018): *Analiza dinamike suspendiranog nanosa u aluvijalnim koritima*, Znanstveno stručni skup s međunarodnim sudjelovanjem: Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda i korištenja voda te smanjivanju poplavnih rizika - suvremeni trendovi i pristupi, Brela, 18.-20. listopada 2018.
- [8] Zhu, S., Bonacci, O., Oskoruš, D. (2019): *Assessing sediment regime alteration of the lower Drava river*, Electronic journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek -e-GFOS, 19, 1-12.

## REVITALIZACIJA VODOTOKA U URBANIM PODRUČJIMA

## REVITALIZATION OF WATERCOURSES IN URBAN AREAS

Nevenka Ožanić<sup>a</sup>, Ivana Sušanj Čule<sup>a</sup>, Barbara Karleuša<sup>a</sup>, Bojana Horvat<sup>a</sup>

### SAŽETAK

Revitalizacija vodotoka u Republici Hrvatskoj relativno je nova aktivnost vodnoga gospodarstva iako se u ostalim europskim zemljama provodi više desetljeća. Provođenjem te aktivnosti na vodotocima, teži se k vraćanju njihovom prirodnijem stanju na pojedinim lokacijama ili cijelom vodotoku stvarajući preduvjete za povratom prirodnih procesa i funkcija vodotoka. Na dijelovima vodotoka koji prolaze urbanim područjima cilj revitalizacije je i stvaranje atraktivnog odredišta pogodnog za razvoj turizma, rekreacije i sporta te uslužnih djelatnosti malog gospodarstva pomoću hidrotehničkih, građevinskih, arhitektonskih i drugih zahvata.

U svakom slučaju na pojedinim se dionicama vodotoka nastoji osigurati kontrola tečenja vode građenjem retencijskih prostora i na taj način omogućiti transformacija velikog vodnog vala te spriječiti poplave u urbanim dijelovima sliva. Posebnu pozornost potrebno je posvetiti zaštiti okoliša, flore i faune, očuvanju vrijednosti krajolika, te omogućiti revitalizaciju zapuštenih i neiskorištenih prostora.

U ovom je radu dano nekoliko primjera mogućeg uređenja (revitalizacije dijelova sliva vodotoka) u urbaniziranim područjima grada Rijeke i okolnih područja. Naime, grad Rijeka u svojem centru i bližoj okolici gotovo da nema zelenih površina neophodnih za očuvanje prirode i biološke raznolikosti, zdravlja građana, te rekreaciju i turizam. Uređenje javnih zelenih površina danas postaje važan faktor prepoznatljive

---

<sup>a</sup> Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, nozanic@uniri.hr, isusanj@gradri.uniri.hr, barbara.karleusa@gradri.uniri.hr, bojana.horvat@gradri.uniri.hr

slike grada, te ima važnu ulogu u urbanom planiranju s tendencijom stvaranja zelenih jezgri grada i okolnih naselja.

Raspoložive mjere revitalizacije vodotoka prilično variraju u opsegu i kompleksnosti stoga su u radu prikazane neke od najjednostavnijih pa do nešto opsežnijih zahvata s opisom njihovog željenog učinka kao i njihov utjecaj s hidrauličkog, hidrološkog, morfološkog, ekološkog i socio-ekonomskog aspekta.

## ABSTRACT

The revitalization of watercourses in the Republic of Croatia is a relatively new activity of water management, although it has been implemented in other European countries for decades. By conducting this activity on watercourses, it seeks to restore their natural state at individual locations or throughout the watercourse, creating preconditions for the restoration of natural processes and functions of watercourses. In parts of watercourses that pass through urban areas, the goal of revitalization is to create an attractive destination suitable for the development of tourism, recreation and sports and small business services through hydraulic and other structures construction, architectural and other activities.

In any case, some sections of the watercourse seek to ensure that the flow of water is controlled by building retention areas, thus enabling the transformation of a large water wave and preventing flooding in urban areas of the basin. Particular attention should be paid to environmental, flora and fauna protection, conservation of the landscape values, and the revitalization of neglected and underutilized areas.

This paper provides some examples of possible landscaping (revitalization of parts of a watershed) in urbanized areas of the city of Rijeka and its surroundings. Namely, the city of Rijeka in its center and the surrounding area has almost no green areas necessary for the preservation of nature and biodiversity, citizens' health, recreation and tourism. The landscaping of public green spaces is now becoming an important factor in recognizing the city's image, and plays an important role in urban planning, with a tendency to create green cores of the city and surrounding settlements.

The available measures for the revitalization of watercourses vary greatly in scope and complexity, so some of the simplest and to some extent extensive interventions are described in the paper, describing their desired effect as well as their impact from the hydraulic, hydrological, morphological, ecological and socio-economic aspects.

*KLJUČNE RIJEČI: revitalizacija vodotoka, urbana područja, planiranje, regulacija vodotoka, zaštita okoliša*

*KEYWORDS: revitalization of watercourses, urban areas, planning, water flow regulation, environmental protection*

## 1. UVOD

Revitalizacija vodotoka u Republici Hrvatskoj relativno je nova aktivnost vodnoga gospodarstva iako se u ostalim europskim zemljama provodi više desetljeća. U *Vodiču za izradu planova revitalizacije vodotoka*, revitalizacija vodotoka definirana je kao vraćanje sustava u stanje približno jednako stanju neporemećenog ekosustava koji je otporan i samoodrživ, iako dinamičan po svom sastavu i funkcioniranju [1]. Dakle, cilj revitalizacije nije vraćanje u "prirodno" stanje, već postizanje dovoljne raznolikosti vodotoka uz prisustvo svih potrebnih biotopa.

Naime, tekuće i stajaće vode, u zdravim - neizmijenjenim uvjetima, staništa su mnogim biljnim i životinjskim vrstama. Njihov opstanak i razvoj uvjetuje život u simbiozi pa je očuvanje ekološke ravnoteže od izuzetne važnosti. Osim toga, uslijed utjecaja raznih faktora, od prirodnih do antropogenih, vodni tokovi su izloženi svakodnevnom stresu koji za posljedicu imaju drastično izmijenjeno stanje i funkcioniranje vodnih tijela.

Kada se degradacija nekog vodotoka dogodi, jedan od načina uspostave ponovne ravnoteže je eliminiranje negativnih utjecaja i puštanje vodotoka da se samostalno regulira i obnovi. S obzirom da je za to potrebno duže vremensko razdoblje, pojavila se potreba za tehnološkim rješenjima koji bi uz poštivanje prirode u kraćem roku omogućili vraćanje izmijenjenog vodotoka u prijašnje stanje uz uređenje i regulaciju riječnog korita. Radi se o rješenjima koja uključuju formiranje akumulacija (bazena), slapova, omogućavanje prelijevanje vodotoka na okolna područja za trajanja velikih voda (ako je to moguće), omogućavanje skladištenja (odlaganja, op.r.) nanosa u koritu koji ne mora biti nepoželjna pojava, omogućavanje dvosmjerne propusnosti migracije revitaliziranog vodotoka, te drugih mogućnosti pri kojima se poštuju principi zadržavanja vode.

Neophodno je pri tome napraviti procjenu stanja vodotoka, odnosno njegovih elemenata poput stanja riječnog korita i obala, opterećenje nutrijentima i raznovrsnost staništa. Jednako je tako potrebno posvetiti veliku pažnju ograničenjima uz postizanje najboljeg ekološkog potencijala, uz zadržavanje i iskorištavanje svih pozitivnih elemenata koje trenutno ima vodotok, kako bi se smanjili i potrebni financijski resursi za revitalizaciju. U tom smislu treba upotrijebiti građevne materijale s mjesta na kojima se vrši revitalizacija vodotoka, a sadnice biljaka bi trebalo odabrati kako bi se korijenski sustav stabala učvrstio i stabilizirao obale vodotoka u budućnosti, čime će se stvoriti i potencijalna skloništa za životinje na tlu, ali i u vodi.

Planirane mjere revitalizacije vodotoka u krajoliku, moraju prije svega uključiti optimizaciju krajobraznog vodnog režima, zaštitu od poplava i promicanje biološke raznolikosti. Jednako je tako važno povećati rekreacijski potencijal krajolika oko samog vodotoka. U zadnje se vrijeme u društvu nametnula neophodnost rekreacije stanovništva, budući da veliki dio stanovništva živi u urbanim naseljima i zaposlen je u umjetnom tehničkom okruženju koje uglavnom ima neadekvatne sanitarne uvjete (nepovoljna mikroklima, buka, prašina itd.).

Rekreacija kao društveni fenomen stoga je stalan dio stila života u ekonomski razvijenim zemljama. Zbog toga se naglašava potreba za revitalizacijom vodotoka u smislu rekreacijskog potencijala, odnosno osiguranja prostora za odmor i rekreaciju, što doprinosi i zaštiti klime, ali i razvoju grada i urbanih područja. Obnova vodotoka u gusto naseljenim područjima pruža mogućnosti, ali i ograničenja razvoja urbanih područja pri čemu je neophodno držati se pozitivnih zakonskih propisa s posebnim naglaskom na Europsku okvirnu direktivu o vodama [3]. Izuzetno je važna i kontinuirana svijest stručne javnosti o rezultatima realiziranih akcija revitalizacije raznih vrsta, ali i šireg društva. Informacije o uspješnim, ali i neuspješnim revitalizacijskim akcijama nužni su uvjet za razvoj ovog novog polja u vodnom gospodarstvu.

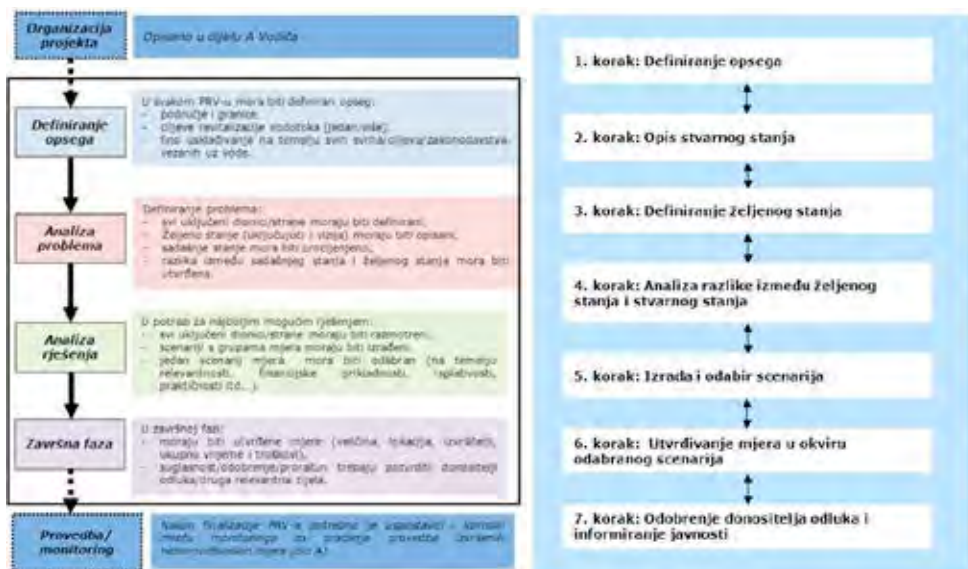
Zbog svega navedenog, upravo je revitalizacija vodotoka u urbanim područjima s naglaskom na uređenje zelenih površina i tendencijom stvaranja zelenih jezgri detaljnije obrađena tema u ovom radu.

## 2. POSTUPAK IZVOĐENJA REVITALIZACIJE (HODOGRAM)

Za revitalizaciju vodotoka koja je ujedno i funkcionalno i estetski prihvatljiva, neophodno je izraditi Plan revitalizacije vodotoka. Kako je uvijek moguće ponuditi više rješenja, a zatim omogućiti odabir optimalnog rješenja, potrebno je izraditi i više planova revitalizacije vodotoka koji će predstavljati prvi korak u stvarnoj provedbi mjera na terenu u sklopu Plana upravljanja vodnim područjem koji je glavni plan za sve planove revitalizacije vodotoka. Plan revitalizacije vodotoka će tako biti najprije usuglašen „na papiru“, nakon čega slijedi stvarna provedba mjera na terenu kroz Plan provedbe. Plan provedbe predstavlja tehnički opis stvarnih mjera koje treba provesti na terenu, s izračunom jedinica, količinama, propisanim dimenzijama, planiranjem provedbe i specifikacijama [1].

U ovom su radu prikazani rezultati četiri diplomska rada čija je tema bila revitalizacija različitih vodotoka u urbanim područjima s naglaskom na povećanje rekreacijskog potencijala krajolika oko samog vodotoka i to vodotoka Plešće u istoimenom naselju Plešće u Čabru, vodotoka Rječine na području Školjića u centru grada Rijeke, vodotoka Rječine na području Martinovog Sela, te Škurinjskog potoka u Rijeci.

U svim je diplomskim radovima korištena „Step by step“ (korak po korak) procedura za izradu Plana revitalizacije vodotoka, koja je preuzeta iz *Vodiča za izradu Planova revitalizacije vodotoka u Hrvatskoj* koji detaljno opisuje i razrađuje kompletan projekt revitalizacije isključivo za hrvatsko područje [1], a njezin je shematski prikaz i sedam koraka za izradu Plana dan na Slici 1.



Slika 1. Opća shema i sedam koraka za izradu Plana revitalizacije vodotoka (Hrvatske vode, 2017)

Iako svaki od sedam koraka sadrži zasebne zadatke, koraci su međusobno povezani i utječu na korake prije i poslije njih u tijeku procesa. Primjerice, ishod monitoringa biti će početak analize za sadašnje stanje; vizija je dio analize problema, čak i procesa planiranja; svrha i ciljevi su povezani s budućim stanjem kako bi se osiguralo da rezultat projekta odražava gledište dionika definiranje scenarija, a može potaknuti na redefiniranje željenog stanja i nastavljanje tim smjerom; utvrđivanje mjera može navesti tim da ponovo razmotri tehnička rješenja ili čak scenarije. Voditelj projekta ili projektni tim obvezni su ispuniti praznine među koracima ili prilagoditi proces kada je to potrebno u projektu [1].

Kako je već spomenuto, svaki od prikazanih sedam koraka sastoji se od pet elemenata koje je potrebno uzeti u obzir i to Svrhe - razjašnjava čemu bi trebao voditi analizirani korak, te koji se ciljevi trebaju postići, zatim Načela i metode – koji opisuju načela koja su primijenjena, a koja se odnose na znanstvena načela iz zaštite okoliša, hidrologije ili ekonomije ili mogu biti više socijalnog ili političkog karaktera, Ograničenja – koja se smatraju granicama nastalim zbog npr. raspoloživih podataka, vremena, vještina, nejasnih definicija, konfliktnih interesa i potreba među dionicima ili bilo kojeg drugog ograničavajućeg elementa, potom Rezultati projekta – koji se trebaju pripočiti što je moguće jasnije i što konkretnije, te Alati – koji se mogu koristiti u tijeku svakog koraka. Važno je odabrati i pažljivo opisati raspoložive alate, naročito one koji su se ranije pokazali korisnim [2].

Najvažniji dio započetog posla oko revitalizacije vodotoka je organizacija, gdje je posebnu pažnju potrebno obratiti na usuglašavanje opsega projekta, izradi (grupe) scenarija i pri odabiru poželjnog scenarija. To su odlučujuće okolnosti za prolaz ili pad projekta u ciklusu izrade plana, a u situaciji s visokom razinom podjele odgovornosti, prikupljanje podataka može biti vrlo dugotrajno i skupo. Da bi se definirao opseg projekta (područje projekta određeno granicama u pogledu geografije, problematike, sadržaja, vremena i novca), prvo je potrebno shvatiti njegovu svrhu. U koraku - opis stvarnog stanja moraju se prikupiti relevantni podaci ovisno o prirodi projekta koji opisuju stvarno stanje, a taj korak pomaže u određivanju koji su podaci važni i koji podaci nedostaju. Korak - opis željenog stanja podrazumijeva izradu vizije usuglašene sa svim sudionicima, gdje je potrebno prikupiti zahtjeve za željeno stanje kako bi se mogla utvrditi razlika između stvarnog i željenog stanja, a za što je potrebno formulirati mjere u sljedećem koraku - analiza razlike između željenog i stvarnog stanja. Razlike se utvrđuju kroz analizu usporedbom, definiranjem grupa rješenja, te provjerom programa mjera Plana upravljanja vodnim područjem čime se dobiva opća slika mogućih rješenja za sve ciljeve Okvirne direktive o vodama. Rezultat ovog koraka je opis razlika između stvarne i željene situacije i okvirne ideje o tome kako prevladati razliku.

Sljedeći je korak izrada i odabir scenarija s dionicima, koji je kombinacija različitih mjera i politika, a pomaže pri dobivanju podrške javnosti. Svi dionici su pozvani da daju svoj doprinos u izradi scenarija te u slučaju konfliktnih interesa scenariji i njihove posljedice (troškovi i koristi) mogu pomoći u pronalaženju zajedničkog interesa. Krajnji rezultat ovog koraka je odabran i široko prihvaćen scenarij koji općenito predstavlja grupu mjera s jasno prikazanim pozitivnim i negativnim učincima na sve referentne aspekte projektnog područja. Naredni je korak - utvrđivanje i ocjena mjera u okviru odabranog scenarija rezultat kojeg je konačna karta (ili nekoliko podkarata) s detaljnim mjerama, uključujući dijagrame, tablice, ciljeve, ishode, aktivnosti (proračun i odgovorne strane), itd. Zadnji korak je odobrenje donositelja odluka i informiranje javnosti kada se formalno i informira šira javnost o rezultatima procesa revitalizacije vodotoka. Rezultat ovog konačnog koraka u izradi Plana revitalizacije vodotoka je dokument, usvojen od strane donositelja odluka i prihvaćen od šire javnosti koji služi kao plan provedbe za revitalizaciju vodotoka [1].

Svaki je autor ova četiri diplomatska rada za rješenja revitalizacije vodotoka svojeg odabranog područja prošao kroz sve ove spomenute korake, a njihova predložena rješenja biti će nastavno prikazana.

Pleščanski potok je desna pritoka vodotoka Čabranka u naselju Plešće grada Čabra s utokom kod školske zgrade. Ukupna duljina potoka iznosi oko 700,0 m s dvije desne i dvije lijeve pritoke. Zbog svojih specifičnosti, područje Gorskog kotara gotovo je u potpunosti uvršteno u prijedlog NATURA 2000 (ekološka međunarodna mreža očuvane prirodne baštine) područja u RH. S obzirom da se Plešće razvija u turističko mjesto Gorskog Kotara kao i susjedna naselja, a nastalo je na razvijanju vodenica

- pilana, kovačnica i mlinova, uređenje vodotoka kao i ostalih dijelova, trebalo bi zadržati izvornost i duh kraja. Put prema krajobraznom turizmu, otvorila je turistička zajednica kroz šetnicu uz Čabranku i Malski potok gdje se vide povijesni sadržaji, biciklističke staze različitih težina, skijaški centar, botanički vrt i slično. Samim time, svako novo uređenje krajolika bi trebalo doprinijeti daljnjem razvoju.

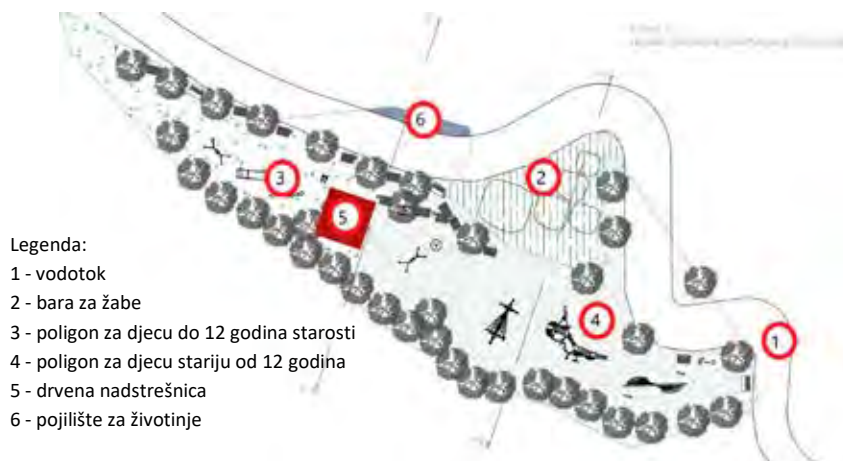
Predloženo je uređenje oko vodotoka prikazano na Slici 2. Idejnim projektom revitalizacije Plešćanskog vodotoka obuhvaćen je uski pojas prostora uz sam vodotok na dionici od 150 metara duž vodotoka površine cca 2300 m<sup>2</sup>, a uzvodno od samog mjesta Plešca. S obzirom da je postojeća regulacija vodotoka izvedena u prirodnom kamenom materijalu, revitalizacija vodotoka je usmjerena na prilagođavanje postojeće regulacije kako potrebama lokalnog stanovništva, tako i postizanjem sinergije prirode i ljudi.

Idejnim projektom planirana je izvedba staništa za žabe, bare, ispunjene muljem i povezane s vodotokom što omogućava optimalnu količinu vode u staništu te pojilište za divlje životinje sa stalnim dotokom vode čime se stvara prostor sličan prirodnom staništu životinja. Ostatak prostora je idejnim projektom predviđen društvenoj namjeni koja će obuhvatiti uređenje šetnice, izradu drvene nadstrešnice, postavu klupa, rasvjetu, kante za smeće, edukativne sadržaje te izradu adrenalinskog parka za djecu manjeg te većeg uzrasta. Na primjeru Plešćanskog potoka, može se ustvrditi bitan utjecaj klime, flore i faune, stanja okoliša, ali i povijesne baštine na planiranu izvedbu kako regulacije tako i revitalizacije prostora oko vodotoka [2].

Škurinjski potok jedan je od rijetkih prirodnih bujičnih tokova na području grada Rijeke. Karakteriziraju ga procesi produkcije i pronosa nanosa te ovisnost o intezitetu oborina. Nalazi se u zapadnom dijelu grada u dnu sinklinale Škurinjske Drage. Donji dio toka prolazi užim gradskim područjem te je natkriven dok je gornji dio toka otvoren i dijelom kanaliziran [4].

Naglim širenjem urbanih prostora, širenjem poslovne zone i gradnjom infrastrukture gotovo sav prirodni okoliš je zamijenjen umjetnim. Dionica potoka koja je obuhvaćena idejnim rješenjem obrađenim u ovom radu, nalazi se u blizini Osnovne škole Ivan Zajc i predstavlja jednu od zadnjih autentičnih lokaliteta u ovoj inače urbanoj zoni. Prioritet ovog zahvata je formiranje zone parka unutar postojeće zapuštene zelene površine za javno-društvene sadržaje, bez utjecaja na funkcionalnost korita i vodni režim Škurinjskog potoka i očuvanje postojeće vegetacije (Slika 3). Unutar uređenog područja predviđene su tri cjeline i to: *Amfiteatar* kao zona javno-društvene namjene prvenstveno za održavanje školskih priredbi, ali i drugih događanja s mogućnošću pristupa svih posjetioca parka, zatim *Park* sa sadržajima za igru i odmor te šetnicom u sklopu kojeg se nalaze dva bazena za kornjače, te *Park za pse* ograđen ogradom zajedno s *poligonom za pse*. Planira se rušenje postojećeg mosta te predviđa izgradnja tri mosta za pristup različitim zonama parka. Most za pristup amfiteatru bio bi građen od armiranog betona, dok su preostala dva drvena, jedan za pristup zoni parka sa sadržajima za igru i odmor i jedan za pristup parku za pse.





Slika 2. Idejno rješenje uređenja dijela područja i vodotoka Plešće  
(Mandekić, 2018) [2]



Slika 3. Idejno rješenje uređenja dijela područja oko Škurinjskog potoka  
(Cuculić, 2019) [4]

Slijedeća dva rješenja vezana su uz uređenje i revitalizaciju Rječine, jedan u samom centru grada i drugi malo izvan centra. Rječina je vodotok koji je od velike važnosti za riječko područje, odnosno cijelo Hrvatsko primorje. Duga je oko 19 kilometara, a korito joj je prosječne širine od 9-16 metara. Izvire na Zviru (Zvirjak), na nadmorskoj visini 323 m ispod strme litice brda Kičaja (606 m n.m.) i u gradu Rijeci se ulijeva u Jadransko more. Visinska razlika izviranja Rječine i ušća u gradu Rijeci iznosi 325 m [5].

U ovome je radu dano moguće rješenje uređenja gornjeg toka Rječine na području Martinovog Sela (Slika 4). Područje revitalizacije locirano je na Grobniku i započinje



Napravljeno je i Idejno rješenje revitalizacije vodotoka Rječine u industrijskoj zoni Školjića u samom centru grada Rijeke (Slika 5). Kako u samome centru grada Rijeke kronično nedostaje zelenih površina i za stanovnike i za životinje, prenamjena garaže Autotroleja na Školjiću uz samo korito Rječine pridonijela bi ostvarenju jednog takvog cilja. Pogled na Rječinu, zelenilo i mogućnost rekreacije privukao bi stanovnike grada Rijeke, ali i turiste. Nadopuna atraktivnih sadržaja grada Rijeke sa šetnicom uz korito Rječine i novim parkom uz Rječinu zasigurno bi bila jedna zanimljiva i privlačna investicija. Projekt je moguće podijeliti u tri faze i to: prva faza - izgradnja parka za kućne ljubimce, druga faza izgradnja područja namijenjenog za održavanje različitih manifestacija, te treća faza - mirisni vrt [6].



Slika 5. Idejno rješenje uređenja dijela područja vodotoka Rječine u centru grada – Školjić (Mohorovičić, 2019) [6]

### 3. ZAKLJUČAK

Revitalizacija vodotoka je dokaz da čovjek u svojoj sebičnoj težnji unapređenja i olakšavanja svog vlastitog života postaje svjestan svoje okoline i svog utjecaja na nju, te svoje povezanosti s njome. Kroz mjere revitalizacije vodotoka u krajolik u se preko optimizacije krajobraznog vodnog režima, zaštitu od poplava i promicanje biološke raznolikosti može povećati rekreacijski potencijal krajolika oko samog vodotoka pogotovo u urbanim mjestima. Rekreacija kao društveni fenomen postaje dio stila života u ekonomski razvijenim zemljama. Obnova vodotoka u gusto naseljenim područjima pruža mogućnosti, ali i ograničenja razvoja urbanih područja pri čemu je neophodno držati se pozitivnih zakonskih propisa. Rad i učinak rada koji je postignut kroz akcije revitalizacije vodotoka u Europi i svijetu pokazuje sliku moguće svijetle budućnosti u kojoj priroda i čovjek koegzistiraju u ravnoteži – to je ujedno i jedina moguća budućnost.

## LITERATURA

- [1] Cuculić, Z. (2019): *Revitalizacija vodotoka Rječine - dionica uz Škurinjski potok*, diplomski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka.
- [2] Hrvatske vode (2017): *Vodič za izradu Planova revitalizacije vodotoka u Hrvatskoj*, Zagreb.
- [3] [https://www.voda.hr/sites/default/files/04\\_-\\_okvirna\\_direktiva\\_o\\_vodama\\_-\\_2000\\_60\\_ec\\_-\\_2000.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/04_-_okvirna_direktiva_o_vodama_-_2000_60_ec_-_2000.pdf) (pristup veljača 2020.).
- [4] Mandekić, K. (2018): *Revitalizacija vodotoka Plešće*, diplomski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka.
- [5] Mavrinac, M. (2019): *Revitalizacija gornjeg toka Rječine u Martinovom Selu*, diplomski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka.
- [6] Mohorovičić, M. (2019): *Revitalizacija industrijske zone uz vodotok Rječinu*, diplomski rad, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka.

## ZAHVALA

Istraživanje za potrebe ovoga rada i objavljivanje ovoga rada sufinancirano je sredstvima potpora Sveučilišta u Rijeci pod naslovom *Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškom području* (broj potpore 13.05.1.03). i *Razvoj novih metodologija u gospodarenju vodama i tlom u krškim, osjetljivim i zaštićenim područjima* (broj potpore 13.05.1.3.08).



## **ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA VUČENOG RIJEČNOG NANOSA**

### **GRAIN SIZE ANALYSIS OF BED LOAD**

**Damir Štuhec<sup>a</sup>**

#### **SAŽETAK**

Riječni nanos je materijal koji voda transportira od mjesta nastanka do mjesta taloženja, a sastoji se od čvrstih mineralnih zrna različite krupnoće, odnosno promjera. Prema veličini zrna, nanos se može grubo podijeliti na vučeni i lebdeći, iako je teško odrediti njegovu graničnu vrijednost promjera. U hidrološkom smislu, mehaničke karakteristike nanosa opisuju se pomoću granulometrijskog sastava, hidraulične krupnoće, pronosa nanosa i koncentracije nanosa. Granulometrijski sastav vučenog nanosa veličine zrna do 0,063 mm (šljunak i pijesak) određuje se metodom sijanja. Prema potrebi, sijanje se kombinira s metodom areometriranja za zrna manja od 0,063 mm (prah i glina). Iz granulometrijske analize izračunava se promjer srednjeg zrna koji predstavlja reprezentativnu veličinu krupnoće nanosa. U radu se opisuje laboratorijska metoda određivanja granulometrijskog sastava tla (nanosa) prema normi HRN EN ISO 17892-4 i daje primjer obrade i interpretacije rezultata ispitivanja.

#### **ABSTRACT**

The river sediment is a material that is transported by water from the place of origin to the place of deposition. It consists of solid mineral particles of different size, or diameter. According to grain size, the river sediment can be roughly divided into bed load and suspended load, although it is difficult to determine its grain size limit. In the hydrological sense, the mechanical characteristics of the sediment are described by grain size composition, hydraulic size, load transport rate and concentration of the

---

<sup>a</sup> Sveučilište Sjever, Sveučilišni centar Varaždin, Jurja Križanića 31b, Varaždin, 42000, Hrvatska, dstuhec@unin.hr

load. The grain size composition of bed load of grain size up to 0.063 mm (gravel and sand) is determined by the sieving method. If necessary, sieving is combined with the aerometric method for grains of less than 0.063 mm (silt and clay). From the grain size analysis, the diameter of the medium grain is calculated, which presents a representative size of the river sediment. This paper describes the laboratory method used to determine grain size composition of soil (sediment) according to standard HRN EN ISO 17892-4 and gives an example of test result interpretation.

*KLJUČNE RIJEČI: vučeni riječni nanos, granulometrijski sastav, metoda sijanja, srednji promjer zrna*

*KEYWORDS: bed load, grain size composition, sieving method, medium grain size*

## 1. UVOD

Suradnjom Sektora za hidrologiju Državnog hidrometeorološkog zavoda s Geotehničkim fakultetom Sveučilišta u Zagrebu, od 2008. godine se u Geotehničkom laboratoriju Zavoda za geotehniku kontinuirano provode granulometrijske analize uzoraka nanosa riječnog dna s rijeka Mure, Drave i Save. Godišnje se ispita četrdesetak uzoraka s riječnih profila na određenim hidrološkim postajama tih rijeka.

## 2. GRANULOMETRIJSKA ANALIZA VUČENOG RIJEČNOG NANOSA

Za određivanje krupnoće zrna nanosa mjerodavan je njegov granulometrijski sastav određen prema nekoj od normiranih metoda ispitivanja u laboratoriju. U RH se u geotehničkom inženjerstvu najčešće koriste europske norme ispitivanja (HRN EN 1997-2:2012), pri čemu se na određivanje granulometrijskog sastava tla u laboratoriju odnosi norma oznake HRN EN ISO 17892-4:2016. Za materijal sa zrnima većim od 0,063 mm ispitivanje se provodi postupkom mokrog ili suhog sijanja uzorka tla kroz set sita propisanih otvora oka. Granulometrijski sastav materijala s česticama manjim od 0,063 mm određuje se metodom areometriiranja. Ukoliko je potrebno, koristi se kombinacija obje metode ispitivanja.

Uzorke nanosa riječnog dna uzimaju na terenu i dopremaju u Geotehnički laboratorij djelatnici Službe za mjerenja i opažanja površinskih i podzemnih voda Sektora za hidrologiju DHMZ-a. Svaki uzorak sadrži podatak o datumu i lokaciji uzorkovanja s oznakom riječnog profila. Prilikom dostave u laboratorij, svakome od njih dodjeljuje se i interna laboratorijska oznaka koja ga prati kroz cijeli proces ispitivanja.

Granulometrijska analiza izvodi se u laboratoriju prema europskoj/nacionalnoj normi HRN EN ISO 17892-4:2016, a započinje vizualnim pregledom i opisom uzoraka. Neki od njih sadrže organske primjese, što zahtijeva posebnu pripremu takvih uzoraka za daljnje ispitivanje. S obzirom da se općenito radi o nekoherentnim materijalima, za određivanje granulometrijskog sastava koristi se metoda sijanja suhim postupkom



(HRN EN ISO 17892-4, točka 5.2). Ako je na raspolaganju veća količina uzorka, propisana masa za ispitivanje izdvaja se metodom četvrtanja (Slika 1). Nakon određivanja mase u vlažnom i suhom stanju, uzorci se ispiru vodom kroz otvor sita od 0,063 mm, čime se iz njih odstranjuju čestice praha i gline (Slika 2). Prema potrebi, njihov granulometrijski sastav određuje se metodom areometrijanja (HRN EN ISO 17892-4, točka 5.3). Isprani, osušeni i izvagani uzorci zatim se pomoću tresilice određeno vrijeme prosijavaju kroz set sita normiranih otvora oka, pri čemu se bilježi masa materijala ostala na svakom situ (Slika 3). Postupak sijanja shematski prikazuje Slika 4.



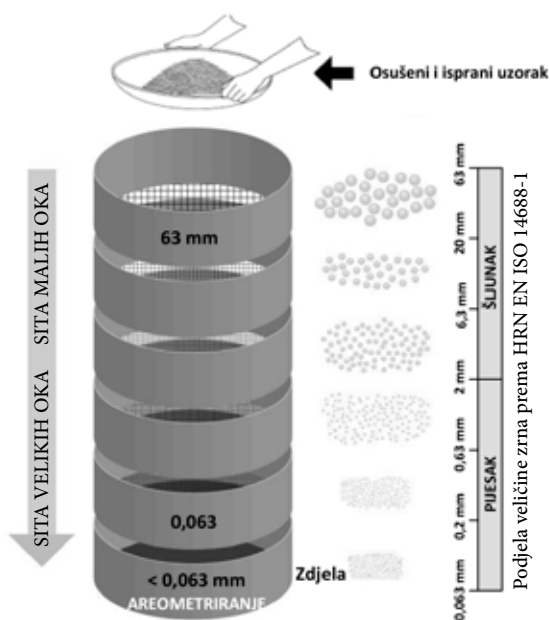
Slika 1.  
Četvrtanje uzorka



Slika 2.  
Ispiranje uzorka



Slika 3.  
Tresilica za sijanje



Slika 4. Shematski prikaz postupka suhog sijanja nekoherentnog tla (preuzeto s [www.particletechlabs.com](http://www.particletechlabs.com) i doradeno prema HRN EN ISO 14688-1)



Obradom podataka ispitivanja dobije se maseni sadržaj pojedinih razreda veličina zrna i njihova međusobna zastupljenost u ukupnoj masi ispitivanog materijala. Rezultat se grafički interpretira kao granulometrijska krivulja u dijagramu polulogaritamskog mjerila. Statistički gledano, radi se o kumulativnoj krivulji relativnih frekvencija u padajućem nizu. Na osi  $x$  prikazuje se promjer zrna  $D$  u logaritamskom mjerilu, dok se na osi  $y$  najčešće prikazuje postotak zrna materijala manji od nekog promjera zrna  $D$ . Krivulja ima ishodište u najvećem izmjerenom promjeru zrna, od kojeg je 100 % zrna u masi ispitivanog materijala manje od tog promjera.

Za analitičku obradu podataka sijanja primjenjuju se deskriptivne statističke metode. Postotak mase materijala između dva promjera otvora oka sita (razred veličine zrna) u odnosu na početnu suhu masu uzorka ( $m_p$ ) može se odrediti prema izrazu (Kvasnička i Domitrović, 2007):

$$N_i = \frac{\sum_i m_i}{\sum_n m_i} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

gdje je:

$$m_i = \text{masa ostatka na situ } i \text{ [g].}$$

Kontrola postupka sijanja provodi se zbrajanjem masa svih razreda veličine zrna ( $m_i$ ) prema izrazu:

$$\sum_{i=1}^n m_i = m_p \quad (2)$$

gdje je:

$$m_i = \text{masa ostatka na situ } i \text{ [g]}$$

$$m_p = \text{početna suha masa ispitivanog uzorka [g].}$$

Udio pojedinih razreda veličine zrna ( $N_i$ ) u odnosu na početnu suhu masu ispitivanog materijala računa se prema izrazu:

$$N_{Di} = 100 - \sum_1^i N_i \text{ [%]} \quad (3)$$

gdje je:

$$N_{Di} = \text{koeficijent prolaza mase u [%] kroz sito (linearno mjerilo osi } y)$$

$$D = \text{promjer zrna u [mm] (logaritamsko mjerilo osi } x).$$

Sijanjem se dobiju veličine zrna iskazane kao „ekvivalentni promjeri zrna“, jer ona oblikom mogu biti pločasta ili izdužena pa im jedna dimenzija može biti veća od promjera oka sita.

U dijagramu se može prikazati i krivulja karakterističnog promjera zrna nanosa  $D_{sr}$

koja se uglavnom određuje kao srednji promjer zrna dobiven iz granulometrijske krivulje. Srednji promjer zrna  $D_{sr}$  određen je odnosom:

$$D_{sr} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i \cdot N_i}{100} \quad (4)$$

gdje je:

$D_i$  = srednji promjer  $i$ -te frakcije veličine zrna [mm]

$N_i$  = maseni udio  $i$ -te frakcije [%].

Iz geometrijskog oblika granulometrijske krivulje može se odrediti i koeficijent jednoličnosti ili uniformnosti  $U$  prema izrazu:

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

gdje je:

$D_{60}$  = promjer zrna 60 %-tnog masenog prolaska kroz otvor sita [mm]

$D_{10}$  = promjer zrna 10 %-tnog masenog prolaska kroz otvor sita [mm].

Ukoliko riječni nanos sadrži više od 10 % čestica manjih od 0,063 mm, za dobivanje potpunog granulometrijskog sastava potrebno je metodu sijanja kombinirati s metodom areometriranja (HRN EN ISO 17892-4:2016). Veličina i količina čestice tla manjih od 0,063 mm određuje se indirektno, mjerenjem gustoće suspenzije u određenim vremenskim intervalima. Metoda se temelji na Stokes-ovom zakonu (6) kojim se definira brzina padanja zrnaca poznate gustoće u mirnoj tekućini poznate gustoće:

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\eta} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (6)$$

Transformacijom iz (6) dobije se:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot H}{(\rho_s - \rho_w) \cdot t}} \quad (7)$$

Usklađivanjem originalnih fizikalnih jedinica u „cgs“ sustavu s fizikalnim jedinicama SI, (7) se može pisati u obliku (HRN EN 17892-4:2016):

$$D = 0,005531 \sqrt{\frac{\eta \cdot H}{(\rho_s - \rho_w) \cdot t}} \quad (8)$$

gdje su:

- $v$  = brzina padanja zrna [cm/s]  
 $D$  = ekvivalentni promjer istaloženog zrna nakon vremena  $t$  [mm]  
 $\eta$  = dinamička viskoznost vode na temperaturi mjerenja [mPa·s]  
 $H$  = visina padanja zrna u trenutku mjerenja gustoće suspenzije [mm]  
 $t$  = vrijeme od početka mjerenja sedimentacije [min]  
 $\rho_s$  = gustoća zrna tla bez pora [Mg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  = gustoća vode na temperaturi mjerenja [Mg/m<sup>3</sup>].

Postupak određivanja promjera i količine zrnaca metodom areometriranja sadrži neke pretpostavke i ograničenja, a sam proračun zahtijeva korekcije zbog temperature i viskoznosti tekućine, vrste antikoagulansa i areometra te promjera menzure u kojoj se izvodi ispitivanje.

Pri objedinjavanju rezultata kombinirane metode ispitivanja, korekcija sadržaja pojedinih veličina zrna dobivenih metodom areometriranja, izvodi se prema izrazu:

$$N_{Di}' = N_{Di} \cdot \frac{m_1}{m_p} \quad (9)$$

gdje je:

- $N_{Di}$  = postotak prolaza kroz sito najmanjeg otvora oka [%]  
 $m_1$  = masa uzorka koja je prošla kroz sito najmanjeg otvora oka [g]  
 $m_p$  = početna suha masa ispitivanog uzorka [g].

Srednji promjer zrna izračunava se ranije opisanim postupkom. Granulometrijski sastav riječnog nanosa određen metodom sijanja do veličine zrna 0,063 mm, obuhvaća materijal vučenog nanosa kao i vučenog i lebdećeg nanosa pa se potreba za primjenom kombinirane metode ispitivanja ne javlja često. Iznimka su uzorci s dna voda stajačica (jezera) ili vodotoka vrlo malih brzina tečenja.

### 3. INTERPRETACIJA REZULTATA ISPITIVANJA METODOM SIJANJA

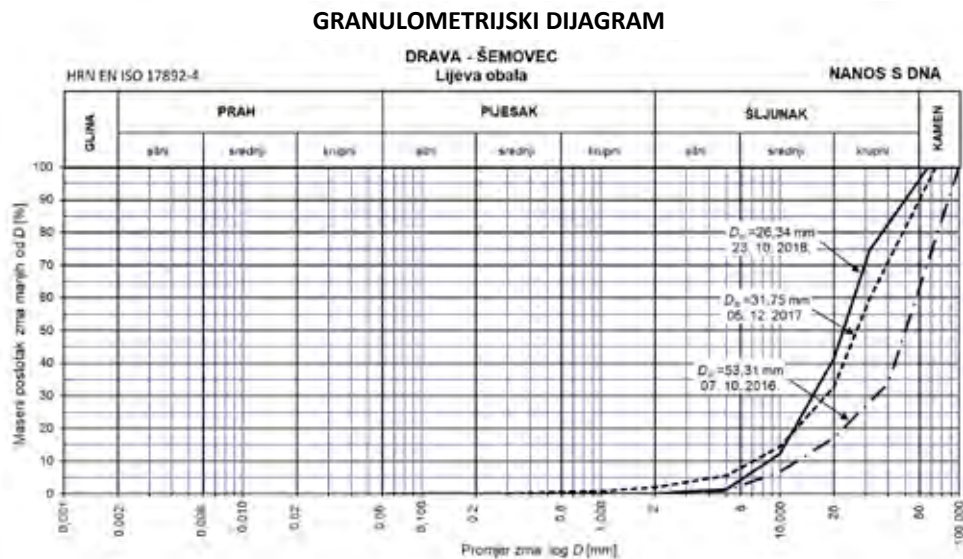
Primjer obrade podataka sijanja uzorka riječnog nanosa s lijeve obale mjernog profila na rijeci Dravi kod mjesta Šemovec (uzorkovano 05.12.2017.) prema (1), (2) i (3) te izračun srednjeg promjera zrna prema (4) sadržan je u Tablici 2 (podaci Geotehničkog laboratorija GFV-a uz dozvolu DHMZ-a). Grafičku interpretaciju obrađenih podataka sijanja u obliku granulometrijske krivulje prikazuje dijagram na Slici 5. Za ilustraciju, na granulometrijskom dijagramu su osim granulometrijske krivulje uzorka iz primjera, dodane i krivulje granulometrijskog sastava nanosa uzetog na istom mjernom profilu u 2016. i 2018. godini. Iz dijagrama se jasno uočavaju razlike u veličini i količini istaloženih zrna nanosa, što ukazuje na moguću promjenu morfoloških značajki korita rijeke. Različitost u granulometrijskom sastavu uzoraka nanosa s obzirom na godinu uzorkovanja prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Granulometrijski sastav nanosa lijeve obale rijeke Drave kod Šemovca prema godini uzorkovanja

Datum uzorkovanja	Kamen [%]	Šljunak [%]			Pijesak [%]			Prah [%]	Dimenzije najvećeg zrna [mm]	Srednji promjer zrna $D_{sr}$ [mm]
		krupni	srednji	sitni	krupni	srednji	sitni			
23. 10. 2018.	3,0	55,0	38,0	4,0	----	----	----	----	67,2 × 63,3 × 45,4	26,34
05. 12. 2017.	10,0	57,0	25,0	6,0	1,0	1,0	----	----	74,0 × 59,1 × 42,5	31,75
07. 10. 2016.	37,0	45,5	14,5	2,9	0,1	----	----	----	119,6 × 71,0 × 38,4	53,31

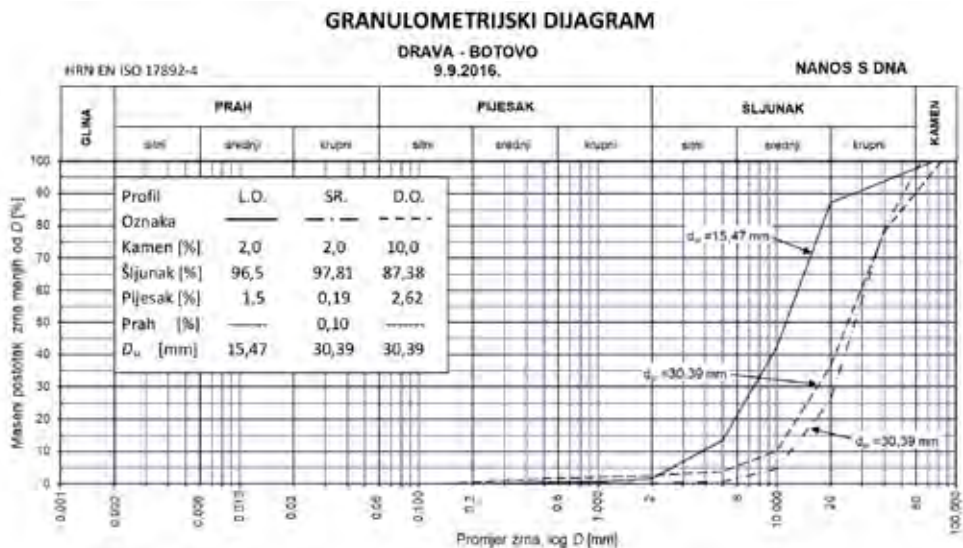
Tablica 2. Primjer obrade podataka sijanja uzorka riječnog nanosa s lijeve obale rijeke Drave kod Šemovca i izračuna srednjeg promjera zrna

Masa vlažnog uzorka [g]		2030,4	Masa ispranog i suhog uzorka [g]		1975,1	
Masa suhog uzorka [g]		1975,1	Dimenzije najvećeg zrna [mm]		74,0 × 59,1 × 42,5	
Vlažnost uzorka [%]		2,8	Granulometrijski sastav		Srednji promjer zrna $D_{sr}$ [mm]	
Otvor oka sita $i$ [mm]	Masa uzorka ostalog na situ $m_i$ [g]	Maseni udio razreda veličine zrna $N_i$ [%]	Ekvivalentni promjer zrna $D_i$ [mm]	Udio pojedinog razreda zrna u ukupnoj masi $N_{D_i}$ [%]	Srednji promjer zrna $D_i$ [mm]	$D_i \times N_i$
63,0	----	----	74	100,00	52,75	2128,46
31,5	797,0	40,35	31,5	59,65		
20,0	529,9	26,83	20,0	32,82	25,75	690,87
10,0	361,8	18,32	10,0	14,50	15,0	274,80
5,0	175,4	8,88	5,0	5,62	7,5	66,60
2,0	70,3	3,56	2,0	2,06	3,5	12,46
1,0	23,1	1,17	1,0	0,89	1,5	1,76
0,5	9,1	0,46	0,5	0,43	0,75	0,345
0,25	6,7	0,34	0,25	0,09	0,375	0,128
0,125	1,4	0,07	0,125	0,02	0,1875	0,0113
0,063	0,4	0,02	0,063	0,00	0,0940	0,0019
Zdjela	----	----	< 0,063	----	$\Sigma D_i \times N_i =$	3175,4362
$\Sigma$	1975,1	100,00	Datum uzorkovanja: 05. 12. 2017.		$D_{sr} =$	31,75

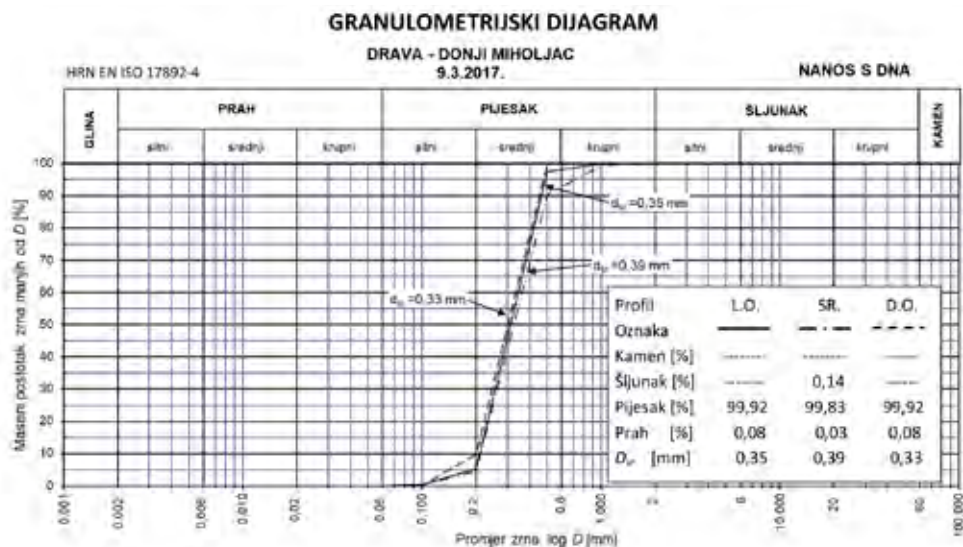


Slika 5. Granulometrijski dijagram dobiven obradom podataka sijanja, s ucrtanim granulometrijskim krivuljama nanosa na lijevoj obali rijeke Drave kod Šemovca u periodu 3 godine

Parametri riječnog nanosa dobiveni granulometrijskom analizom koriste se u daljnjoj obradi podataka za procjenu stabilnosti i uvjete pokretanja pojedinih veličina zrna vučenog nanosa. Pokretanje nanosa se razlikuje u gornjem, srednjem i donjem toku rijeke. Na njegovo stvaranje i deponiranje utjecat će između ostalog uzdužni pad korita rijeke i brzina strujanja vode. Tako će u srednjem toku dominirati šljunčani nanos s malo pijeska, dok će u donjem toku prevladavati nanos od pijeska s malo sitnog šljunka (Kuspilić i Šustić, 2006). Granulometrijski sastavi nanosa uzorkovanih kod hidroloških postaja Botovo (Slika 6) u srednjem toku i Donji Miholjac (Slika 7) na donjem toku rijeke Drave to jasno pokazuju.



Slika 6. Granulometrijski dijagram vučenog nanosa kod Botova (srednji tok Drave)



Slika 7. Granulometrijski dijagram vučenog nanosa kod Donjeg Miholjca (donji tok Drave)

#### 4. ZAKLJUČAK

Praćenje prirodnih procesa vezanih za morfologiju površinskih vodotoka obuhvaća i mjerenja riječnih nanosa. Budući da je vučeni riječni nanos koritoformirajući i jedan od najvažnijih morfoloških pokazatelja, važno je određivanje njegovog granulometrijskog sastava. Iz granulometrijskih analiza dobivaju se podaci o srednjoj veličini zrna nanosa ( $D_{sr}$ ) i karakteristični promjeri zrna ( $D_{90}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{10}$ ) koji se koriste za procjenu kretanja vučenog nanosa. U radu je prikazana metoda određivanja granulometrijskog sastava vučenog nanosa prema normi HRN EN ISO 17892-4:2016 s primjerom izračunavanja srednjeg promjera zrna. Ilustracija važnosti ovakvih ispitivanja dana je u usporedbama promjene granulometrijskog sastava vučenog i suspendiranog nanosa na nekoliko mjernih profila, razmještenih u srednjem i donjem toku rijeke Drave. Razlike u masenoj količini i veličini promjera zrna utječu na njihov pronos i deponiranje, a ono će izazvati određene promjene u konfiguraciji riječnog korita. Čimbenici koji izazivaju promjene u granulometrijskom sastavu riječnog nanosa i posljedice toga nisu dalje analizirani jer izlaze iz okvira ovog rada.

#### LITERATURA

- [1] Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu (2020): *Izvješća o rezultatima geomehaničkih laboratorijskih ispitivanja uzoraka nanosa s riječnog dna rijeka Save, Drave i Mure*, 2016., 2017. i 2018. godina, arhivski podaci Geotehničkog laboratorija Zavoda za geotehniku.
- [2] HZN: HRN EN 1997-2:2012, Eurokod 7: *Geotehničko projektiranje – 2 dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla* (EN 1997-2:2007+AC:2010).
- [3] HZN: HRN EN ISO 14688-1:2018, *Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Identifikacija i klasifikacija tla – 1 dio: Identifikacija i opis* (ISO 14688-1:2017; EN ISO 14688-1:2018).
- [4] HZN (6/2016): HRN EN ISO 17892-4:2016, *Geotehničko istraživanje i ispitivanje -- Laboratorijsko ispitivanje tla -- 4. dio: Određivanje granulometrijskog sastava* (ISO 17892-4:2016; EN ISO 17892-4:2016).
- [5] Kuspilić, N., Šustić, D. (2006): *Predavanja iz Regulacija*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zavod za hidrotehniku, Internet stranice za potrebe studentske nastave na TVZ-u iz kolegija Melioracije i regulacije, <http://grad.hr/nastava/hidrotehnika/index.htm> (preuzeto dana 06. 03. 2020.).
- [6] Kvasnička, P., Domitrović, D. (2007): *Mehanika tla*, interna skripta, RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, str. 15-20.
- [7] [www.particletechlabs.com](http://www.particletechlabs.com) (preuzeto dana 20. 02. 2020.).

## **PRIMJERI SEDIMENTACIJE KANALA ZA ODVODNJU I NAVODNJAVANJE**

## **EXAMPLES OF SEDIMENTATION PROCESSES IN IRRIGATION AND DRAINAGE CANALS**

Lidija Tadić<sup>a</sup>, Marija Leko-Kos<sup>b</sup>, Tamara Brleković<sup>a</sup>

### **SAŽETAK**

Zadržavanje nanosa u kanalima površinske odvodnje je standardni problem melioracijskih područja i osnova njihovog održavanja. Godišnja akumulacija nanosa u kanalima je velika, a povećava ju smanjeno održavanje kanala, zadržavanje na vegetaciji i smanjena količina vode kao posljedica učestalijih suša. Kao posljedica se javlja manji poprečni profil kanala i njegova neučinkovitost kod dolaska velikih voda.

Kanali namijenjeni distribuciji vode za navodnjavanje također su podložni sedimentaciji materijala nastalog erozijom dna i pokosa. Iako se intenziteti procesa razlikuju, posljedice su jednake kao i kod melioracijskih kanala površinske odvodnje. Razlika je i u tome što na području Hrvatske takvih kanala ima vrlo malo.

Istraživanja sedimentacije kanala površinske odvodnje koja se u ovom radu obrađuju provedena su na malom slivu rijeke Vuke.

Istraživanje sedimentacijskog procesa na kanalu za navodnjavanje na području Baranje provedeno je na lateralnom kanalu Zmajevac-Kneževi Vinogradi. On u stvari ima dvojaku funkciju – služi i za odvodnju i za navodnjavanje te je i proces formiranja nanosa specifičan.

Problem onečišćenja nanosa u melioracijskim kanalima, njegovog vađenja i odlaganja drugi je važan aspekt formiranja sedimenta u kanalima. Pri tome je posebice kon-

---

<sup>a</sup> Sveučilište J. J. Strossmayera, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Ul. Vladimira Preloga 3, Osijek, 31000 Hrvatska, ltadic@gfos.hr, tamaradadic@gfos.hr

<sup>b</sup> Institut IGH d.d., Drinska 14, Osijek, 31000, Hrvatska, marijalekokos@igh.hr



centracija teških metala izrazito opasna i nepoželjna. Istraživanja su pokazala veliku varijabilnost koncentracija teških metala u analiziranim kanalima.

## ABSTRACT

Sedimentation process in drainage canals is a common problem in drainage areas and the basis of their maintenance. The annual accumulation of sediment is very large with an upward trend due to the lack of maintenance, vegetation impacts and decreasing discharges as an effect of more frequent droughts. Finally, we have smaller canal cross-sections and inefficient drainage system during high water periods. Irrigation canals also have problems with sediments originating from slopes, banks and bottom erosions. The intensities of these processes differ from drainage canals, but consequences are the same. In Croatia there are no many irrigation canals. Research of drainage canal sedimentation was performed in a small catchment area of the Vuka River. Research of irrigation canal sedimentation was performed in the Baranja region, on the lateral canal Zmajevac-Kneževi Vinogradi which has a dual function. It conveys water for irrigation during the vegetation period and drains the surrounding area during the rest of the year.

The problem of sediment pollution, its dredging and disposal is the second very important problem related to canal sedimentation. Especially, the concentration of heavy metals is dangerous and unwanted. The research showed big variability of heavy metal concentrations in the observed canals.

*KLJUČNE RIJEČI: sediment, onečišćenje, kanal, odvodnja i navodnjavanje*

*KEYWORDS: sediment, pollution, canal, drainage and irrigation*

## 1. UVOD

Pojava sedimenta u vodotocima je hidrološka i hidraulička pojava koja utječe na morfologiju vodotoka, kako prirodnih tako i umjetnih. Iako nizinska područja u pravilu nisu jako ugrožena erozijom, ipak se tisuće tona muljnog sedimenta godišnje izvadi iz melioracijskih kanala (Ferrero, 2002). Kvaliteta, odnosno stupanj onečišćenosti sedimenta također se razlikuje u prirodnim i umjetnim vodotocima, primjerice koncentracija teških metala višestruko je veća u umjetnim vodotocima (kanalima) nego u prirodnim vodotocima (Ferronato i drugi, 2013). Više je istraživanja objavljeno o nastanku i onečišćenju nanosa u kanalima za navodnjavanje nego za odvodnju. Nastanak i transport sedimenta u kanalima je složen stohastički proces (Gao i Pasterneck, 2007). U kanalima za navodnjavanje, pokretljivost sedimenta prati se iz razloga osiguravanja potrebne protočnosti (Zenebe, 2015). Redukcija protočnog profila, posebice pri malim uzdužnim padova prepoznata je kao problem, ali i problem odlaganja izmuljenog sedimenta nakon čišćenja kanala, osobito ako je on onečišćen (Lawrence i Atkinson, 1998; Koc, 2014).

Ove tvrdnje mogu se primijeniti i na odvodne kanale, iako se onečišćenja u kanalima za navodnjavanje ne očekuju u mjeri u kojoj su prisutna u kanalima za odvodnju zbog većih protoka i brzina strujanja. Unatoč tim spoznajama, istraživanja onečišćenja sedimenta u odvodnim kanalima su rjeđa i uglavnom se vežu za konkretne probleme na određenom području (Bellucci i drugi, 2002). Posljednjih godina ima sve više i istraživanja, posebice u Nizozemskoj i Italiji (Kelderman, 2000; Maggi, 2002). Onečišćujuće tvari koje dominiraju u sedimentu su fosfor i teški metali, najveći uzročnici onečišćenje su promet i poljoprivreda, odnosno antropogeni utjecaji. Koncentracije variraju ovisno o namjeni zemljišta i hidrološkim i hidrografskim karakteristikama sliva. Njegovo pokretanje također ovisi o lokalnim uvjetima, uzdužnim padovima i obraslosti kanala koji značajno smanjuje pokretanja sedimenta (Lopez, 1998) i naravno o hidrološkom režimu (trajanju i intenzitet oborinskih epizoda) (Maggi, 2002), a vrlo često melioracijski kanali presušuju te se u njima njima onečišćenja duže zadržavaju.

Ravničarska područja osobito su ugrožena jer podrazumijevaju relativno gustu mrežu melioracijskih kanala za koje se traži redovito održavanje i izmuljivanje velikih količina sedimenta onečišćenog teškim metalima (Savić i drugi, 2013). Problem predstavlja i odlaganje onečišćenog nanosa nakon njegovog vađenja iz kanala.

U Hrvatskoj ne postoji regulativa koja se odnosi na odlaganje izmuljenog sedimenta s obzirom na sastav ili količinu te se odlaze unutar zaštitnog pojasa ili se tretira kao otpad.

Time je otvoreno nekoliko novih problema: problem monitoringa, problem legislative u smislu dozvoljenih graničnih vrijednosti onečišćenja, problem odlaganja i problem remedijacije (Leko-Kos, 2019).

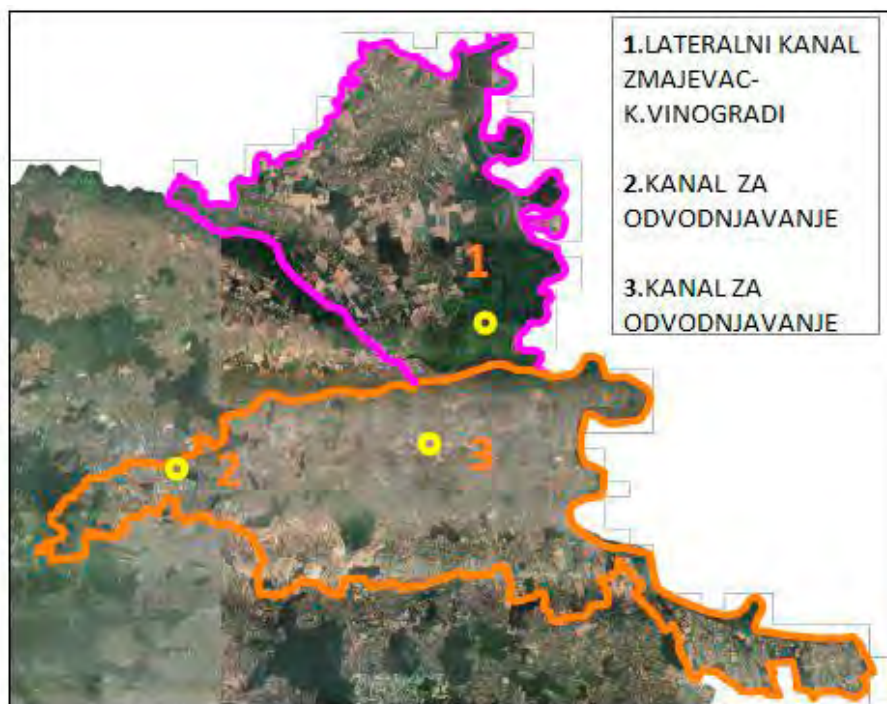
Prihvaćenjem Okvirne direktive o vodama (Directive 2000/60/EC) preuzeta je i obaveza monitoringa površinskih voda i sedimenta prema kojoj svaka zemlja članica treba izvršiti identifikaciju onečišćenih sedimenata budući da isti mogu predstavljati prepreku u uspostavljanju dobrog ekološkog statusa vodnog tijela.

Bitno je za naglasiti, budući da su melioracijski kanali manja vodna tijela, kako su analizama u Planu upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. obuhvaćene tekućice sa slivnom površinom većom od 10 km<sup>2</sup> i stajaćice s površinom vodnog lica od 0,5 km<sup>2</sup>. Oko 80 % duljine evidentiranih tekućica i 2 % površine evidentiranih stajaćica otpada na vrlo mala vodna tijela za koje se ne provodi tipizacija ni ocjenjivanje prema odredbama Okvirne direktive o vodama (Directive 2000/60/EC). Za sva takva tijela ocjenjivanje se vrši prema standardima koji vrijede za veće vodno tijelo s kojim su u površinskom kontaktu ili koji vrijede za najbliže ili najprimjerenije tijelo, te događanja na području nekog podsliva neće biti evidentirana ukoliko se zadrže unutar istoga. Mali vodotoci, uključujući i kanale, su upravo oni na kojima onečišćenje brže ostavlja traga, a teže je vratiti ga u prirodno ili zadovoljavajuće stanje.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Proces sedimentacije kanala za odvodnju i potreba njihovog redovitog održavanja standardni je problem, ali i djelatnost u vodnom gospodarstvu. Na malom slivu rijeke Vuke u 2017. godini, iz melioracijskih kanala izvađeno je 184 036 m<sup>3</sup> zemljanog materijala (Leko-Kos, 2019). U ovom slučaju analizirana su dva kanala za odvodnju (mali sliv rijeke Vuke) i Lateralni kanal Zmajevac-Kneževi Vinogradi, izgrađen 2015. godine na području malog sliva Baranje (Slika 1).

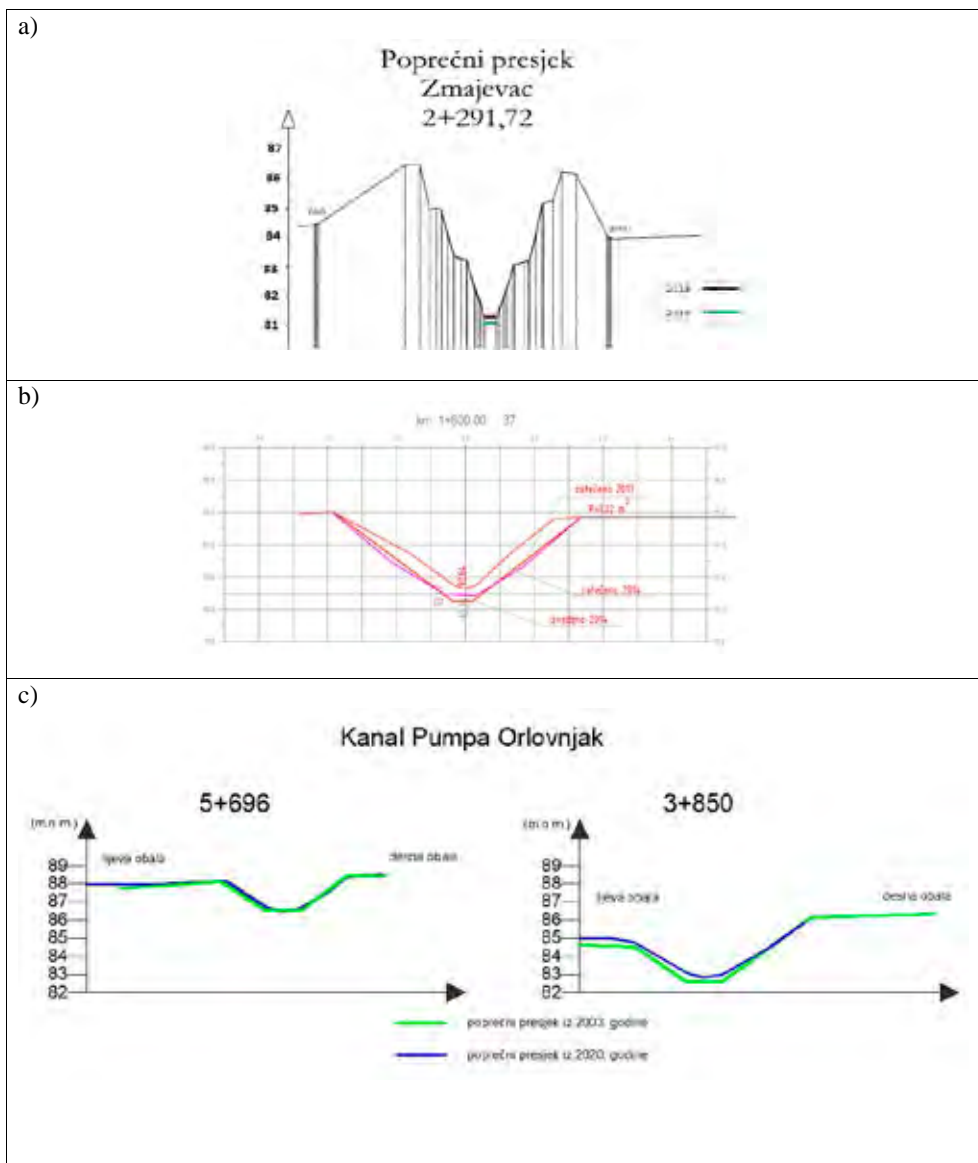
Istraživanja u svijetu pokazala su da je godišnja akumulacija sedimenta u kanalima velika, a povećava ju smanjeno održavanje kanala, zadržavanje vegetacije i smanjena količina vode što u kvalitativnom smislu utječe na stabilnost nanosa i mogućnost pronosa u okoliš, posebice podzemne vode (Hartley i Dickinson, 2010). Slična situacija je i u Hrvatskoj i to u njezinom kontinentalnom dijelu gdje je samo na području Vodnogospodarske ispostave za mali sliv „Vuka“ u 2016. godini izvađeno oko 112 000 m<sup>3</sup> sedimenta i sve na području koje prema riziku od vodne erozije, spada u područje niskog rizika (Hrvatske vode, podaci o održavanju melioracijskih kanala).



Slika 1. Situacija područja istraživanja

Na ove tri lokacije, također su uočeni procesi sedimentacije nastali erozijom obala i pokosa i erozijom sitnih čestica okolnog zemljišta uslijed površinskog otjecanja. Dinamika je vrlo različita, bez obzira što su svi primjeri nizinskog područja što samo do-

kazuje složenost procesa. Budući da za navedeno područje ne postoje mjereni podaci, jedine informacije kojima se raspolaže su podatci o redovitom održavanju kanala II. reda. Ono se odvija svakih četiri do pet godina, vrši izmuljenje i u tom vremenskom razdoblju se na dnu formira sediment u visini od 20-30 cm, odnosno cca 0,12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.



Slika 2. Poprečni presjeci analiziranih kanala

Na Slici 2a prikazan je poprečni presjek Lateralnog kanala s promjenom kote nivelete u razdoblju od 2015. do 2018. godine oko 25 cm nanosa na dnu, ali samo na nekim dionicama, uz ušća kanala nižeg reda. Na Slici 2b je primjer kanala za odvodnjavanje s dinamikom zamuljivanja i čišćenja od 2014. do 2017. godine gdje su promjene nivelete čak do 40 cm.

Na Slici 2c prikazana su po dva poprečna profila kanala Pumpa Orlovnjak na dvije stacionaže. Jedan poprečni profil je iz 2003. godine kada se radila rekonstrukcija promatranog kanala, a drugi je iz 2020. godine. Vidljivo je da je došlo do promjene kote nivelete zbog istaloženog nanosa tijekom promatranog razdoblja od 17 godina. Na stacionaži 3+850 debljina istaloženog nanosa varira od 20-30 cm, dok na stacionaži 5+696 ne prelazi 15 cm.

Prema teksturi, kod izmuljenog materijala dominiraju sitne frakcije sitnog i krupnog praha, te gline. Ukupno ove 3 frakcije čine više od 75 %, a one su puno osjetljivije na onečišćenje teškim metalima (Leko-Kos, 2019).

Problem predstavlja i odlaganje onečišćenog nanosa nakon njegovog vađenja iz kanala. Prema veličini koncentracije, određuje se mogućnost odlaganja sedimenta na poljoprivredne površine za što u mnogim zemljama postoje propisane granične vrijednosti, ali ne i u Hrvatskoj.

Prema praksi zemalja koje imaju propisane vrijednosti kvalitete sedimenta, definirano je po nekoliko klasa, odnosno kriterija prema kojima se propisuje način postupanja s izmuljenim sedimentom.

U Hrvatskoj postoji Prijedlog graničnih vrijednosti za određene opasne tvari u sedimentu kopnenih površinskih voda (Frančišković-Bilinski, 2017), koji sadrži granične vrijednosti za sedam teških metala i jedan metaloid u sedimentu kopnenih površinskih voda koji ide u pravcu sljedećega koraka u razvoju monitoringa sedimenta i odnosi se na procjenu njegovog onečišćenja. U Hrvatskoj ovaj prijedlog čini značajniji pomak, jer su, kako se i navodi u samom zaključku prijedloga, predložene granične vrijednosti dobra osnova za buduću legislativu u tom području. Isto tako se navodi kako je poželjno narednih 5 godina pratiti trendove vrijednosti koncentracija elemenata u sedimentima hrvatskih rijeka na svim dosada praćenim postajama koje ne udovoljavaju predloženim kriterijima.

Također, prema Pravilniku o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 9/14) definirano je stanje onečišćenosti poljoprivrednog zemljišta koje nastaje izravnim unošenjem ili postupnim rasprostranjenjem (transportom ili taloženjem) onečišćujućih tvari i njihovim nakupljanjem u zemljištu iznad najviših dopuštenih količina po odredbama ovog Pravilnika čime se kontrolira odlaganje izvađenog mulja na poljoprivredno zemljište. Osim ovih kriterija korišteni su i: Sediment Quality Guidelines US EPA (2001); Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002); Sediment Quality Guidelines (Dutch Ministry of transport and Public Works, 1994, 2000) i Uredba o

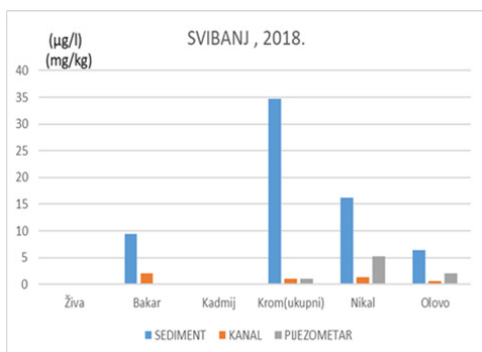
graničnim vrijednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje (Službeni glasnik RS 50/12).

## 2.1. Onečišćenje teškim metalima

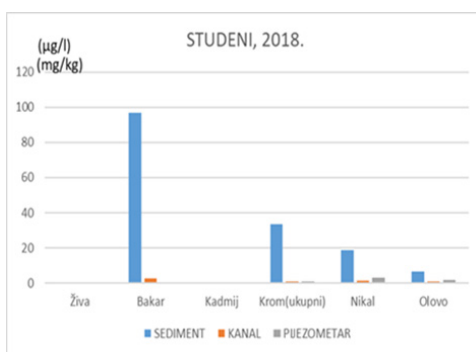
Sediment melioracijskih kanala izvađen u više navrata u razdoblju od 2017.-2020. godine pokazao je različit stupanj onečišćenosti i vrlo varijabilne koncentracije teških metala. Uglavnom su one bile manje od graničnih vrijednosti definiranih pravilnicima raznih zemalja.

Uzorci izvađeni iz lateralog kanala Zmajevac-Kneževi Vinogradi koji služi za dovod vode iz Dunava za potrebe navodnjavanja, ali i odvodnju tijekom izvanvegetacijskog razdoblja pokazali su vrlo varijabilne rezultate. Od analiziranih koncentracija teških metala bakra, kroma, žive, kadmija, olova i nikla jedino bakar i krom (ukupni) pokazuju nešto veće vrijednosti (Tadić i drugi, 2019).

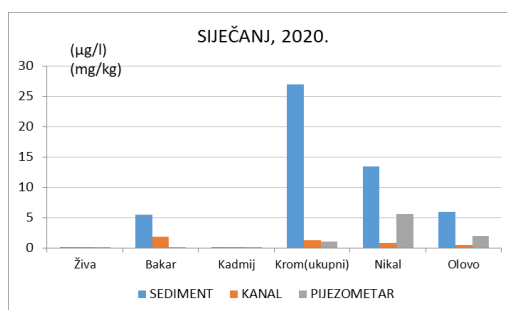
a)



b)



c)

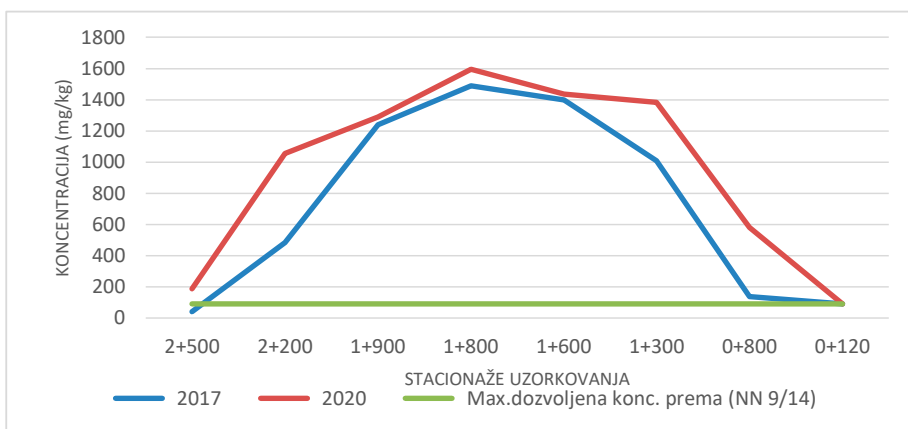


Slika 3. Onečišćenost površinske vode, podzemne vode i sedimenta a) u svibnju 2018., b) u studenom 2018. i c) siječnju 2020.

Dozvoljene koncentracije bakra kreću se od 28 mg/kg (Prijedlog graničnih vrijednosti za određene opasne tvari u sedimentu kopnenih površinskih voda) do 197 mg/kg (US EPA, 2001). Tijekom 2018. godine opažane koncentracije bile su veće od svih

kriterija, osim US EPA, ali su 2020. godine znatno manje u odnosu na sve raspoložive pravilnike. Koncentracija kroma (ukupnog) bila je nešto veća u svibnju 2018. godine, ali još uvijek ispod najniže dozvoljene vrijednosti od 37,3 mg/kg (Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002) (Slika 3).

Na Slici 3 prikazani su i rezultati analize onečišćenja teškim metalima površinske vode iz kanala i podzemne vode u neposrednoj blizini kanala koje su bile unutar dozvoljenih koncentracija.



Slika 4. Promjena koncentracije bakra duž kanala

Istraživanje onečišćenosti sedimenta u kanalima namijenjenim odvodnji provedeno je u razdoblju od 2016. do 2020. godine na malom slivu rijeke Vuke. U nekoliko faza analizirani su izvađeni sedimenti na više od deset kanala na raznim lokacijama. Odabrani kanali bili su melioracijski kanali namijenjeni odvodnji poljoprivrednog zemljišta, cestovni kanali i kanali koji su uz neki koncentrirani izvor onečišćenja. Zatim su laboratorijski ispitane koncentracije teških metala koje su se kretale u određenom rasponu i uspoređene su s najstrožim graničnim vrijednostima. Višestruko povećane koncentracije bile su kod bakra i to na kanalima koji se nalaze u područjima s evidentnim antropogenim utjecajima (cesta, farma i slično). Koncentracije kadmija, olova, nikla i kroma pokazivale su neznatno povećanje koncentracije, dok je koncentracija žive unutar dozvoljenih granica (Leko-Kos i drugi, 2019). Uzorkovanje bakra, kao najizrazitijeg onečišćenja i to cijelom dužinom kanala, ponovljeno je ponovno u siječnju 2020. godine, te je ono bilo još izrazitije. U međuvremenu nije bilo čišćenja kanala. Kanal u kojem je uočeno najviše onečišćenje, osim što je okružen poljoprivrednim zemljištem, kao i većina ostalih, nalazi se u blizini farme, te se pretpostavlja utjecaj otpadnih voda farme na koncentraciju teških metala u sedimentu (Slika 4). Ponovljeno uzorkovanje pokazalo je još izrazitije onečišćenje i njegovo povećanje na lokaciji samog ispusta otpadne vode. Prekoračenja su izraženija u sredini kanala (od stac. 2 + 200 do stac. 0 + 800) i prema ušću, odnosno kraju kanala. Sediment prema

analizi pripada klasi izuzetno onečišćenoga sedimenta za koji je obavezna remedijacija ili čuvanje materijala u kontroliranim uvjetima uz posebne mjere zaštite kako bi se spriječilo rasprostiranje onečišćujućih materijala u okoliš (nizozemski propisi i Uredba o graničnim vrijednostima Republike Srbije).

U usporedbi s onečišćenjem bakrom Lateralnog kanala Zmajevac-Kneževi Vinogradi, odvodni kanali imaju daleko veću koncentraciju bakra.

### 3. ZAKLJUČAK

Održavanje melioracijskih kanala je uobičajena djelatnost vodnog gospodarstva. Međutim procesi zamuljivanja vrlo su složeni, relativno slabo istraženi i uvjetovani brojnim faktorima. Dodatni problem je u stupnju onečišćenosti sedimenta u kanalima za odvodnju i navodnjavanje, osobito u ravničarskim područjima s razvijenom poljoprivrednom proizvodnjom, ali i drugim antropogenim izvorima onečišćenja teškim metalima. Na širem analiziranom području onečišćenja teškim metalima su vrlo varijabla i u prostoru i vremenu. Najizrazitije su koncentracije bakra i to posebice tamo gdje osim poljoprivrede, postoji i dodatni točkasti izvor onečišćenja. Istraživanja su provedena indikativno, daljim postupcima potrebno je utvrditi jesu li izvađeni sedimenti ekološki prihvatljivi za samo vodno tijelo, ali upućuju na nužnost provođenja analize prilikom iskopa sedimenta i njegovog odlaganja na poljoprivredna zemljišta.

Bitno je za naglasiti, da su analizirana manja vodna tijela, dok su analizama u Planu upravljanja vodnim područjima obuhvaćene tekućice sa slivnom površinom većom od 10 km<sup>2</sup> i stajaćice s površinom vodnog lica od 0,5 km<sup>2</sup>. Istovremeno, 80 % duljine evidentiranih tekućica i 2 % površine evidentiranih stajaćica otpada na vrlo mala vodna tijela za koje se ne provodi tipizacija ni ocjenjivanje prema odredbama Okvirne direktive o vodama. Za sva takva tijela ocjenjivanje se vrši prema standardima koji vrijede za veće vodno tijelo s kojim su u površinskom kontaktu ili koji vrijede za najbliže ili najprimjerenije tijelo. Monitoring sedimenta na većim vodotocima ne daje realnu sliku onečišćenog sedimenta. Mali vodotoci, uključujući i kanale, su upravo oni na kojima onečišćenje brže ostavlja traga, a teže je vratiti ga u prirodno ili zadovoljavajuće stanje.

### LITERATURA

- [1] Bellucci, L. G., Frignani, M., Paolucci, D., Ravanelli, M. (2002): *Distribution of heavy metals in sediments of the Venice Lagoon: the role of the industrial area*, Sci Total Environ, 5, 295(1-3), str. 35-49.
- [2] *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council*, 23 October 2000, <https://www.voda.hr/hr/okvirna-direktiva-o-vodama>.



- [3] Ferrero A., Lisa L., Parena S., Sudiro L. (2002): *Runoff and soil erosion from tilled and controlled grass - covered vineyards in a hillside catchment*, 9<sup>th</sup> Conference of the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB), Demänovská dolina (Slovakia), 25 - 28 September 2002, str. 105-111.
- [4] Ferronato, C., Antisari, L. V., Modesto, M. M., Vianello, G. (2013): *Speciation of heavy metals at water-sediment interface*, <https://eqa.unibo.it/article/view/3932> [20.04. 2016].
- [5] Frančišković-Bilinski, S., Mlakar, M., Bilinski, H. (2017): *Izrada prijedloga graničnih vrijednosti za određene opasne tvari u sedimentu kopnenih površinskih voda*, (elaborat).
- [6] Gao, P., Pasternack, G. (2007): *Dynamics of suspended sediment transport at field-scale drain channels of irrigation-dominated watersheds in the Sonoran Desert, southeastern California*, Hydrol. Process, 21(16), 2081–2092.
- [7] Hartley, W., Dickinson, N. M. (2010): *Exposure of anoxic and contaminated canal sediments: Mobility of metal(loid)s*, Environmental Pollution, 158 (3), 649-658.
- [8] Kelderman, P., Drossaert, W. M. E., Zhang M., Galione, L.S. (2000): *Pollution assessment of the canal sediments in the city of Delft (the Netherlands)*, Water Research, 34 (3), str. 936-944.
- [9] Koc, C., Yilmaz, E. (2014): *A Study on the Causes of Sediment, Accumulation in the Drainage Systems*, Journal of Water Resource and Protection, 6, 224-235.
- [10] Lawrence, P., Atkinson, E. (1998): *Deposition of fine sediments in irrigation canals*, Irrigation and Drainage Systems, 12, str. 371-385.
- [11] Leko-Kos, M. (2019): *Nastanak i pokretljivost sedimenta onečišćenog teškim metalima u melioracijskim kanalima ravničarskih područja*, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, disertacija.
- [12] Leko-Kos, M., Tadić, L. (2019): *Prikaz istraživanja zadržavanja teških metala u nanosu melioracijskih kanala*, 7. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, str. 835-842.
- [13] Lopez, F., Marcelo, G. (1998): *Open-channel flow through simulated vegetation: Suspended sediment transport modeling*, Water Resources Research, 34(9), str. 2341-2352.
- [14] Maggi I., Maraga F., Ottone, C. (2002): *Erosive rains related to in-channel sediment delivery in a small Alpine basin (North-Western Italy)*, 9<sup>th</sup> Conference of the European Network of Experimental and Representative Basins, Demänovská dolina (Slovakia), 25-28 Sep., str. 91-99.
- [15] *Plan upravljanja vodnim područjima za razdoblja 2016.-2021.*, NN 66/16.
- [16] *Pravilnik o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja*, NN 9/14.

- 
- [17] Tadić, L., Brleković, T., Leninger, I., Blažević, D. (2019): *Monitoring učinkovitosti lateralnog kanala Zmajevac-Kneževi Vinogradi*, 7. hrvatska konferencija o vodama, Opatija, str. 163-171.
- [18] Savić, R., Belić, A., Pantelić, S. (2013): *Comparative review of sediment properties from drainage canals*, Polish Journal of Environmental Studies, Volume 22, Issue 3, 2013, str. 849-859.
- [19] *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, (2002), CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment).
- [20] *Sediment Quality Guidelines*, (2001), EPA 905-R-00-007, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.
- [21] *Sediment Quality Guidelines*, (1994, 2000), Ministry of transport and Public Works. *Vierde Nota Waterhuishouding Directorate-General for Environmental Protection*.
- [22] Službeni glasnik RS 50/12 (2012): *Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje*.
- [23] Zenebe, T.F., Mohamed, Y., Haile, A.M. (2015): *Mitigation of Sedimentation at the Diverstion Intake of Fota Spate Irrigation: Case Study of the Gash Spate Irrigation Scheme, Sudan*, Irrigat Drainage Sys Eng, <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9768.1000138>



**KONTAMINIRAJUĆI ANORGANSKI  
POTENCIJAL SEDIMENTA RIJEKE DRAVE  
USLIJED VODNOG VALA 2012. GODINE U  
VARAŽDINSKOJ ŽUPANIJI**

**CONTAMINATING INORGANIC POTENTIAL OF  
THE DRAVA RIVER SEDIMENT DURING 2012  
HIGH WATER EVENT IN VARAŽDIN COUNTY**

Igor Tošić <sup>a</sup>

**SAŽETAK**

U okviru ovoga rada je istražena prisutnost pojedinih teških metala u uzorcima tla i biljaka na sjeverozapadu Hrvatske, uz tok rijeke Drave. U svrhu utvrđivanja stvarne prisutnosti akumuliranih teških metala na obalnom području rijeke Drave u travnju 2014. godine pristupilo se prikupljanju uzoraka tla i biljaka na ukupno sedam lokacija na području Varaždinske županije. Ta područja su povremeno izložena poplavama zbog izlivanja rijeke Drave i nanosa mulja onečišćenog teškim metalima koji su u rijeku dospjeli kao posljedica antropogenih i prirodnih procesa na uzvodnim dijelovima toka Drave u Sloveniji i Austriji. Dobiveni rezultati ukazuju da na pojedinim lokacijama koncentracije nekih teških metala premašuju zakonom propisane maksimalno dopuštene koncentracije (MDK). Utvrđeno je prekoračenje MDK za kadmij, olovo, cink, bakar i nikal. Biljke krasolika, maslačak, zlatošipka i lucerna su pokazale vrlo dobar fitoakumulacijski, fitoeksploatacijski i indikatorski potencijal za daljnja opažanja i istraživanja.

---

<sup>a</sup> Hrvatske vode, VGO za Muru i gornju Dravu, Međimurska 26 b, Varaždin, 42000, Hrvatska, igor.tosic@voda.hr

## ABSTRACT

The paper explores the presence of certain heavy metals in the soil and plant samples taken along the Drava River course in northeast Croatia. In order to determine the actual presence of accumulated heavy metals in the Drava riverbank area, soil and plant sampling was carried out at seven Varaždin County locations in April 2014. These areas are occasionally exposed to flooding by the Drava River, which includes its bedload polluted with heavy metals that entered the river consequential to anthropogenic and natural processes in the upstream Drava sections in Slovenia and Austria. The obtained results indicate that the concentrations of certain heavy metals exceed the legally prescribed maximum permissible concentrations (MPCs) in some locations. The MPC exceedances were determined for cadmium, lead, zinc, copper and nickel. The plants fleabane, dandelion, goldenrod and alfalfa showed very good phytoaccumulation, phytoexploitation and indicator potentials for further observation and exploration.

*KLJUČNE RIJEČI: teški metali, kakvoća sedimenta, rijeka Drava, poplave, onečišćenje*

*KEY WORDS: heavy metals, sediment quality, Drava River, floods, pollution*

## 1. UVOD

Ubrzana, prostorno koncentrirana urbanizacija i industrijalizacija generira velike količine otpadnih voda koje, ovisno o industrijskom procesu, mogu sadržavati veće ili manje količine teških metala. Ove vrste anorganskih onečišćivala su sveprisutni izvori narušavanja kvalitete riječnog sedimenta, osobito ako se ne obrade na odgovarajući način prije ispuštanja u prirodne recipijente poput Drave. Prodiranje i akumuliranje teških metala u tlu ima ozbiljne posljedice za različita područja ljudskih potreba i djelatnosti kao što su korištenje tla u poljoprivredi i vodoopskrba. U Hrvatskoj postoji nužnost za novom, sveobuhvatnom zakonskom zaštitom tla, čime bi se indirektno zaštitile i podzemne vode inundacijskog područja rijeke.

U jesen 2012. godine, na području sjeverozapadne Hrvatske su zabilježene poplave kao posljedica velikih količina oborina i izlivanja rijeke Drave. Nakon povlačenja vode zaostao je naplavni mulj koji je, prema napisima nekih medija ([www.medimurje.hr](http://www.medimurje.hr), 2013), u sebi sadržavao povećane količine teških metala (pristiglih s uzvodnih dijelova rijeke Drave u Austriji i Sloveniji) koji su uvjetovali onečišćenje i smanjenje sposobnosti tla za uzgoj poljoprivrednih kultura u područjima zahvaćenim poplavama. Izvori teških metala u riječnom sedimentu u ovom slučaju su bili pesticidi, gorivo za strojeve, sadržaji septičkih jama, deponiji stajskog gnojiva te nusprodukti industrijske aktivnosti koje je poplavna voda nanijela na inundacijska područja rijeke. Kako bi se znanstveno evaluirali medijski napisi, provedeno je ovo istraživanje u okviru kojeg su uz tok rijeke Drave u Varaždinskoj županiji uzeti uzorci tla i biljaka na područjima koja su u vrijeme kišnih razdoblja bila izložena poplavama.

## 2. OPĆI DIO

### *Teški metali u okolišu*

Teški metali su sve prisutniji u okolišu. To su nerazgradive anorganske tvari koje imaju izraženu sposobnost nakupljanja (akumuliranja) i translociranja u okolišu, osobito u tlima i vodenom sedimentu, prilikom čega dospijevaju i u hranidbene lance predstavljajući opasnost po okoliš i žive organizme koji u njemu obitavaju. Od teških metala najopasniji su kadmij (Cd), olovo (Pb), živa (Hg), bakar (Cu) i cink (Zn), čiji su izvori nabrojani u Tablici 1. Osim antropogenog utjecaja, u riječnim sustavima prisutan je i izvor teških metala (osobito za velikih voda) nastalih erozivnim djelovanjem vode i ispiranjem finih čestica (minerala).

*Tablica 1. Antropogeni izvori najpoznatijih teških metala u okolišu (Wuana i Okieimen, 2011)*

<b>Teški metal</b>	<b>Izvori</b>
<b>Cd</b>	Bojila i pigmenti, plastični stabilizatori, galvaniziranje, spaljivanje plastike koja sadrži kadmij, fosfatna gnojiva
<b>Pb</b>	Emisije u atmosferu iz izgaranja olovnog benzina, proizvodnja baterija, herbicida i insekticida
<b>Hg</b>	Emisije iz Au-Ag rudarenja i izgaranja ugljena, medicinski otpad
<b>Cu</b>	Pesticidi, fungicidi, gnojiva

Pod pojmom teški metali se podrazumijevaju metali čija je gustoća veća od 5 g/cm<sup>3</sup>. No, u teške metale se svrstavaju i metali s manjom gustoćom koji imaju izražena toksična svojstva (Wuana i Okieimen, 2011). U živim organizmima i u ekosustavu teški metali mogu biti toksični (olovo, živa, kadmij, arsen) ili biološki značajni (esen-cijalni). Povećane koncentracije teških metala u ljudskom organizmu predstavljaju otrov te mogu uzrokovati različite zdravstvene probleme (neurološka oštećenja, kardiovaskularne bolesti, oštećenje vitalnih organa, deformacije i dr.). Razina utjecaja je ovisna o vrsti metala, njegovoj koncentraciji, oksidacijskom stanju i drugim svojstvima, kao i o trajanju i učestalosti izlaganja (Wright, 2007).

### *Zakonska regulativa*

Zbog mogućih štetnih učinaka teških metala po okoliš i ljudsko zdravlje, njihove koncentracije bi trebale biti pod nadzorom. U Republici Hrvatskoj su Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja štetnim tvarima (NN 09/14) za pojedine teške metale propisane granične koncentracije (MDK). Spomenuti pravilnik je, uz još nekoliko pravilnika, jedina postojeća zakonska regulativa koja indirektno štiti poljoprivredno tlo, no postoji nužnost za doradom i integracijom pravilnika u sveobuhvatni Zakon o zaštiti tla.

### *Vodni val rijeke Drave*

Uspoređujući s povijesnim podacima, vodni val rijeke Drave iz studenog 2012. godine poseban je iz nekoliko razloga. U zadnjih 60 godina bio je to najveći vodni val koji je dospio iz Austrije i Slovenije s maksimalnim/vršnim protokom u Hrvatskoj na hidroelektrani (nadalje: HE) Varaždin od 3 311 m<sup>3</sup>/s. Povećanje vodostaja iz 2012. na ulazu u Hrvatsku na HE Varaždin dogodilo se u samo 6 sati što je uzrokovalo poplave nizvodno. Poplave u studenom 2012. godine su rezultat prelijevanja te popuštanja nasipa na nekoliko lokacija (Otok Virje – Brezje i Pušćine) što je rezultiralo velikim štetama okolnih naselja i okoliša (Bekić i drugi, 2013).

### **3. REZULTATI I RASPRAVA**

Svrha ovog rada je bila ispitati potencijalni negativni učinak poplava na onečišćenje pedosfere uzduž toka rijeke Drave, s posebnim naglaskom na kontaminirajući potencijal zaostalog naplavnog mulja opterećenog teškim metalima. Kako bi se utvrdila stvarna prisutnost teških metala u inundacijskoj zoni rijeke Drave potrebno je odrediti njihovu količinu u tlu. Iz tog razloga pristupilo se prikupljanju uzoraka tla i pojedinih biljnih vrsta - fitoakumulatora na području Varaždinske županije gdje su zabilježena izlijevanja rijeke. Uzorkovanje je provedeno u travnju 2014. godine. Izmjerene udjele interesnih metala u tlu nije bilo moguće usporediti s prethodno izmjerenim podacima o sadržaju teških metala. Prikupljeni uzorci tla i biljaka su nakon laboratorijske obrade podvrgnuti određivanju koncentracija sljedećih teških metala: arsena (As), bakra (Cu), cinka (Zn), kadmija (Cd), kobalta (Co), kroma (Cr), mangana (Mn), nikla (Ni), olova (Pb), željeza (Fe) i žive (Hg).

#### *Područje istraživanja*

S obzirom da se ispitivao kontaminacijski potencijal uzrokovan plavljenjem inundacijske zone rijeke Drave, pristupilo se ciljanom načinu uzorkovanja gdje su bile ispunjene pretpostavke da nije bilo premještanja gornjeg sloja tla te preoblikovanja krajobraza ljudskom djelatnošću u dogledno vrijeme na promatranom području. Istraživačko područje sastojalo se od sedam lokacija uz obalna područja rijeke Drave u inundaciji starog korita na prosječno 200 m n.m., uglavnom nekoliko stotina metara udaljenih od same rijeke, na potezu od Velikog Lovrečana, preko Družbinca i Zamlake, do Donjeg Vidovca; sve u Varaždinskoj županiji. Položaj svih lokacija predočen je na autorskoj karti (Slika 1) gdje je korištena TK200 podloga (geoportal.dgu.hr).



Slika 1. Kartografski prikaz lokacija naznačenih crvenim točkama

Na lokacijama 1b, 2, 3 i 6 se nalaze zapuštene poljoprivredne površine ili pošumljeni tereni kod kojih nema značajnijeg lokalnog antropogenog utjecaja. Na preostalim lokacijama u okolini su prisutne aktivnosti poput sijanja i košnje, no također nema intenzivnih ljudskih aktivnosti. Stoga su odabrane reprezentativne lokacije na kojima se eventualna prisutnost teških metala može pripisati naplavnom mulju. Pri odabiru lokacija konzultirani su stručnjaci iz Hrvatskih voda te Ministarstva zaštite okoliša i energetike.

### **Uzorkovanje tla i biljaka**

Uzorke tla, na šest različitih lokacija prikupljani su nadzemni dijelovi biljaka sedam samoniklih biljnih vrsta, potencijalno dobrih fitoakumulatora teških metala za određivanje stupnja akumuliranosti teških metala; krasolika (*Erigeron annuus*), maslačak (*Taraxacum officinale*), lucerna (*Medicago sativa* L.), bijela djetelina (*Trifolium repens*), zlatošipka (*Solidago virgaurea*), uskolisni trputac (*Plantago lanceolata*) i crni gavez (*Symphytum officinale*). Uzorkovanjem iz gornjeg sloja tla do dubine od 0,15 m prikupljeno je 7 miješanih uzoraka tla koji predstavljaju prosječnu vrijednost istih. Naime, na svakoj lokaciji tlo je uzeto s tri različita mjesta koje se potom pomiješalo. Prikupljeno je ukupno 20 uzoraka biljnog materijala, a na lokacijama su brani samo nadzemni dijelovi biljaka, ponajviše listovi, u manjoj mjeri i cvatovi. Uzorci tla i biljnog materijala su istog dana bili dopremljeni u laboratorij.

### **Analize dobivenih rezultata**

Na osnovi fizikalne analize prikupljenih uzoraka, odnosno određivanja udjela pijeska (0,063-2,0 mm), praha (0,002-0,063 mm) i gline (<0,002 mm), Hrvatski šumarski institut utvrdio je teksturnu oznaku tla (pjeskovita ilovača, praškasta ilovača ili ilovasti pijesak), koju su autori potom uskladili s nomenklaturom i MDK iz Pravilnika o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (NN 09/14). Tekstura tla određuje mogućnost zadržavanja teških metala u tlu, što znači da tla s krupnijim česticama



mogu vezati manju količinu teških metala (niže propisane MDK), dok tla sa sitnijim česticama imaju veći kapacitet vezanja teških metala (više propisane MDK). No, uvidom u navedeni *Pravilnik*, može se uočiti da on propisuje samo MDK vrijednosti za olovo (Pb), kadmij (Cd), krom (Cr), nikal (Ni), cink (Zn), bakar (Cu) i živu (Hg), dok za ostale teške metale: arsen (As), kobalt (Co), mangan (Mn) i željezo (Fe), čije su vrijednosti mjerene u ovom istraživanju, MDK nisu propisane.

Utvrđivanje stupnja onečišćenja tla teškim metalima na ispitivanim lokacijama provedeno je prema propisima iz istog *Pravilnika* (NN 09/14) koji uvjetuje MDK za pojedine teške metale. Prema njemu, stupanj onečišćenja (So) se računa pomoću sljedećeg omjera:

$$So (\%) = \frac{\text{ukupni sadržaj teških metala u zemljištu}}{\text{maksimalno dopuštena vrijednost}} \times 100 \quad (1)$$

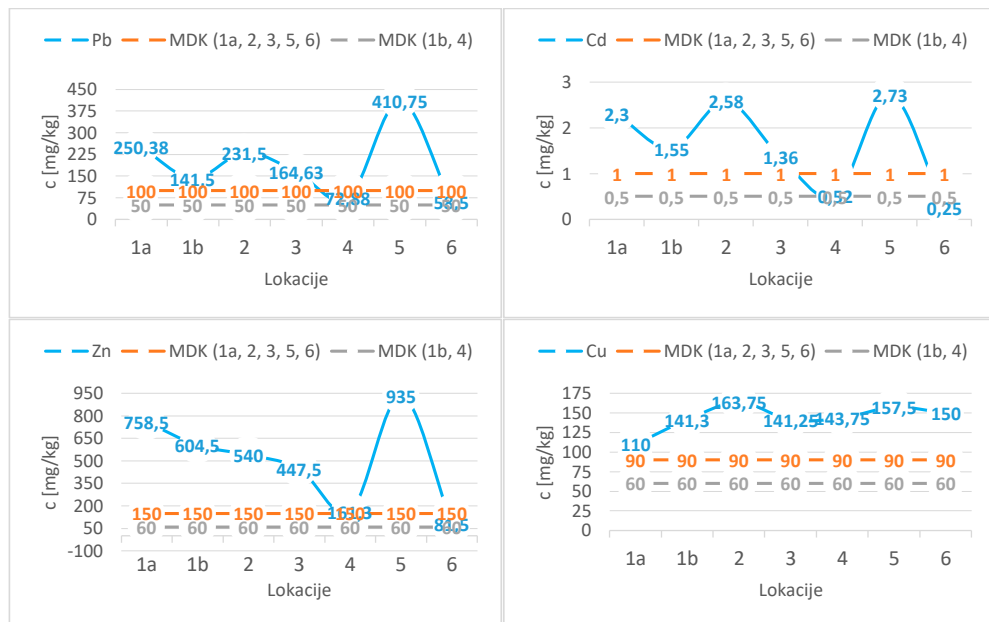
Tlo se temeljem stupnja onečišćenja (So), kao i teksturne klase, pH vrijednosti te masenog udjela humusa prema važećem *Pravilniku* (NN 09/14) dijeli u sljedeće kategorije: čisto, neopterećeno zemljište, So <25 %; zemljište povećane onečišćenosti, So: 25–50 %; zemljište velike onečišćenosti, So: 50–100 %; onečišćeno zemljište, So: 100–200 % te zagađeno zemljište, So >200 %.

Fitoakumulacijski potencijal biljnih vrsta u ovom se radu ispitivao pomoću fitoakumulacijskog koeficijenta (FAC) definiranog sposobnošću akumuliranja teških metala pomoću omjera koncentracije pojedinog metala u biljci i njegove koncentracije u tlu, odnosno uz upotrebu izraza:

$$FAC = \frac{C_{s.b.}}{C_{s.t.}} [-], \quad (2)$$

gdje je u brojniku (djeljeniku) koncentracija suhog biljnog materijala ( $C_{s.b.}$ ), a u nazivniku (djelitelju) koncentracija suhog tla ( $C_{s.t.}$ ). U slučaju da omjer tih veličina (koeficijent) premašuje 1, biljka se može smatrati potencijalnim fitoakumulatorom.

Laboratorijskim analizama uzoraka tla utvrđene su koncentracije teških metala, u mg/kg suhe tvari, za svaku pojedinu lokaciju. No, u ovom radu bit će grafički interpretirane samo vrijednosti opasnih teških metala koji premašuju propisane MDK (Slika 2).



Slika 2. Koncentracije Pb, Cd, Zn i Cu u tlu u odnosu na MDK na istraživanim lokacijama

Usporedbom dopuštenih graničnih vrijednosti teških metala i stupnjeva onečišćenja iz Pravilnika (NN 09/14) s izmjerenim vrijednostima (Slika 2) i izračunatim vrijednostima vidljivo je da su prisutna prekoračenja MDK i kako je na većini lokacija tlo onečišćeno. Lokacije na kojima je zabilježeno prekoračenje MDK za kadmij, olovo i cink su 1a, 1b, 2, 3, 4 i 5. Na svim lokacijama zabilježeno je prekoračenje MDK za bakar i nikel. Na niti jednoj lokaciji nije zabilježeno prekoračenje MDK za krom i živu. Na svim je lokacijama zabilježen visok stupanj onečišćenja i/ili zagađenja tla ovisno o pojedinom teškom metalu (Tablica 2).

Tablica 2. Stupnjevi onečišćenja za pojedine teške metale prikazani po lokacijama

Lokacija	Stupnjevi onečišćenja (So) u % *						
	Pb	Cd	Cr	Ni	Zn	Cu	Hg
1a	1002	460	59	192	1264	183	20
1b	566	310	78	173	1008	236	12
2	463	258	51	143	360	182	13
3	329	136	49	133	298	157	11
4	292	104	81	220	269	240	12
5	822	273	59	173	623	175	17
6	117	25	33	118	136	167	5

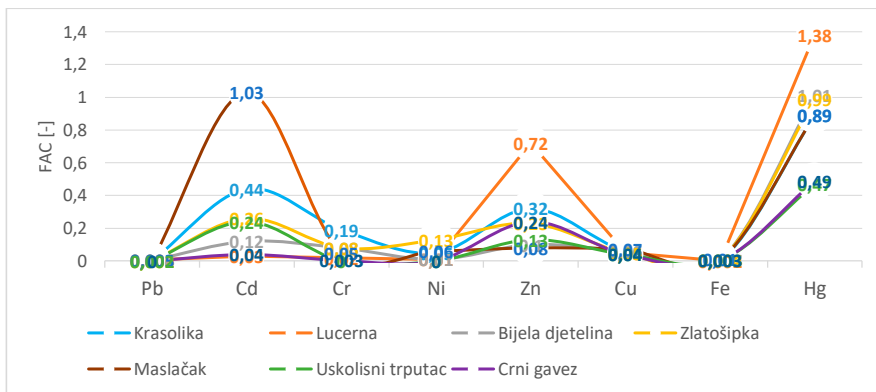
\* *Zelenom* bojom označene su vrijednosti koje predstavljaju tlo povećane onečišćenosti (So: 25-50 %), *plavom* bojom tlo velike onečišćenosti (So: 50-100 %), *narančastom* bojom onečišćeno tlo (So: 100-200 %) i *crvenom* bojom zagađeno tlo (So: >200 %) (NN 09/14).

Temeljem laboratorijskih rezultata može se izračunati i stupanj onečišćenja (So) prema izrazu (1) propisanim Pravilnikom definiranim od strane Ministarstva poljoprivrede. Izračunate vrijednosti su prikazane u Tablica 2.

Prema gore navedenim rezultatima analize uzoraka tla može se ustvrditi da su na svim istraživanim lokacijama zabilježene povećane koncentracije opasnih teških metala poput olova, kadmija, cinka i bakra, čime je potvrđeno da je naplavni mulj pridonio onečišćenju inundacijske zone rijeke Drave teškim metalima. Međutim, nije moguće u potpunosti utvrditi koliki je udio teških metala u riječnom sedimentu rezultat antropogenog utjecaja, a koliki prirodnog pa se stupanj i uzrok opterećenja tla može ugrubo okvalificirati i biti dobra smjernica za buduća istraživanja i opsežnije obrade uzoraka, posebno na nizvodnom toku rijeke Drave. Stupanj onečišćenja opasnih metala poput Cd i Pb je najizraženiji na Lokaciji 1, zatim na Lokacijama 5 i 2.

Izmjerene vrijednosti (Slika 2) teških metala u tlu najveće su na 100 m od Drave udaljenoj Lokaciji 5 za olovo (Pb), kadmij (Cd), krom (Cr), nikal (Ni), mangan (Mn), cink (Zn), kobalt (Co), arsen (As) i živu (Hg) te na Lokaciji 2 za bakar (Cu) i željezo (Fe). Uobičajena srednja vrijednost koncentracija olova u tlu iznosi 32 mg/kg i kreće se od 10 do 67 mg/kg (Kabata-Pendias i Pendias, 2001). Prema istoj literaturi razine izmjerene u ovom istraživanju indiciraju na rizik od trovanja olovom kroz hranidbeni lanac na Lokaciji 5 (>300 mg/kg), a normalne koncentracije premašuju na svim lokacijama osim Lokacije 6. Na Lokaciji 6 zabilježene su najniže koncentracije zbog visoke obale odvodnog kanala HE Dubrave. Uobičajenu srednju vrijednost koncentracija kadmija 0,5 mg/kg su utvrdili Kabata-Pendias i Mukherjee (2007), dok recentna istraživanja imaju utvrđene koncentracije kadmija od 0,29 mg/kg i arsena od 6,65 mg/kg (Canty i drugi, 2011). Premašene koncentracije kadmija slijede zaključke rezultata analiza prema Pravilniku (NN 09/14), dok se kod arsena može smatrati da su koncentracije (iako u prosjeku blago povećane) u razini normalnih, odnosno dopuštenih. Temelj ovom zaključku je uobičajeni raspon prisutnosti arsena u tlu (između 0,2 i 40 mg/kg) prema Smedley i Kinniburgh (2002), a u ovom istraživanju razine arsena variraju između 10 mg/kg i 25 mg/kg. Prema dostupnoj literaturi (Bodek i drugi, 1988) uobičajena koncentracija željeza u tlu iznosi od 20 000 do 550 000 mg/kg, a rezultati dobiveni ovim istraživanjem upućuju na male razine željeza (između 15 000 i 30 000 mg/kg), što znači da biljke tijekom svojeg rasta mogu pojačano akumulirati teške metale.

Analizirajući rezultate na uzorcima biljaka može se zaključiti da su izmjerene koncentracije teških metala u korelaciji s fitoakumulacijskim potencijalom (Slika 3) ispitivanih biljnih vrsta. Za sve biljke korištene u ispitivanju na osnovi izmjerenih vrijednosti koeficijenata za svaku lokaciju izračunate su njihove prosječne vrijednosti statističkom metodom aritmetičke sredine.



Slika 3. Uprosječeni fitoakumulacijski koeficijenti za teške metale iznad DL (razine As, Co i Mn su ispod razine detekcijskog limita)

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja FAC-a (2) razvidno je kako najveću sposobnost akumulacije ispitivanih teških metala imaju biljke maslačak i krasolika, potom bijela djetelina te lucerna i zlatošipka za svega dva do tri ispitivana teška metala, dok su najmanji akumulacijski potencijal pokazale biljke crni gavez i uskolisni trputac. Jedine srednje vrijednosti FAC-a koje premašuju 1 temeljem ovog istraživanja su dobivene za maslačak [kadmij (Cd), Lokacija 1a i Lokacija 1b], lucerna [živa (Hg), Lokacija 4] i bijela djetelina [živa (Hg), Lokacija 1b]. Ipak valja napomenuti da osim ovih vrijednosti koeficijenta ( $FAC > 1$ ) i ostale biljke u velikoj mjeri pokazuju fitoakumulacijski kapacitet za akumuliranje pojedinih teških metala u intervalu ( $0,25 < FAC < 1$ ) te se kao takve mogu iskoristavati kao fitoakumulatori s obzirom na to da se radi o čestim samoniklim vrstama karakterističnim za istraživana područja uz obalu rijeke Drave. Koncentracije olova i kadmija u uzorcima biljaka, prosječno između 0,3 i 0,6 mg/kg, zabilježili su Kulizhskiy i drugi, 2014. godine. U ovom istraživanju koncentracije za olovo su osjetnije premašene u uzorcima maslačka (prosječno 2,5 mg/kg) i bijele djeteline (prosječno 1,3 mg/kg), posebice na Lokacijama 1a i 5. Za kadmij su koncentracije također osjetnije premašene za uzorke maslačka (prosječno 2,1 mg/kg) i u manjoj mjeri za uzorke krasolike (0,8 mg/kg), na Lokacijama 1a,b i 5.

#### 4. ZAKLJUČAK

Rezultati dobiveni u okviru ovog istraživanja ukazuju na značajno opterećenje inundacijskog područja teškim metalima na gotovo svim istraživanim lokacijama i na prisutnim samoniklim biljkama. Dobiveni podaci upućuju na povišene koncentracije olova, kadmija, nikla, cinka i bakra prema Pravilniku NN 09/14. U istraživanju su najveći fitoakumulacijski potencijal na najkritičnijim lokacijama pokazali krasolika, maslačak, zlatošipka i lucerna. Sve su biljke pokazale vrlo izražena fitoremedijacijska svojstva za živu. Maslačak i krasolika, potom zlatošipka i uskolisni trputac su u pro-

sjeku pokazali vrlo dobru sposobnost za akumulaciju kadmija. Lucerna i krasolika, potom zlatošipka i crni gavez su u prosjeku pokazali vrlo dobru sposobnost za akumulaciju cinka. Za ostale ispitivane metale biljke su u prosjeku pokazivale FAC ispod 0,2 što i dalje daje dovoljan potencijal za akumuliranjem pojedinih metala. Međutim, rezultati ovog istraživanja ukazali su na loša fitoremedijacijska svojstva ispitivanih biljnih vrsta na olovo i željezo, što bi trebalo biti predmet novih istraživanja, pogotovo za olovo čije su koncentracije iznad uobičajenih u uzorcima maslačka i bijele djeteline, inače čistih biljaka na aluvijalnim tlima. Neke od biljaka koje su pokazale prihvatljiv fitoakumulacijski potencijal u ovom istraživanju mogu se koristiti i kao remedijatori i kao indikatori povišenih koncentracija teških metala.

Vrlo visok stupanj onečišćenja dravske inundacije (Lokacija 1, 2 i 5) olovom, cinkom i kadmijem uzrokovan je ponajviše otpadnim komunalnim i industrijskim otpadnim vodama uzvodnih gradova, od Klagenfurta preko Maribora i Ptuja u Austriji i Sloveniji, do Varaždina u Hrvatskoj. Razina onečišćenja ekvivalentna je razini ovih metala u otpadnom mulju iz uređaja za pročišćavanje, što otežava obnovu šuma i sužava mogućnosti korištenja inundacijskog prostora u bilo kakve namjene (Mayer i Pezdirc, 1990). Industrijsko onečišćenje transportirano zrakom (aerosoli) također uzrokuje sedimentaciju teških metala u rijeci Dravi, pogotovo na područjima (Lokacija 1, 2 i 5) nizvodno od akumulacija hidrocentrala (HE Formin, HE Varaždin i HE Čakovec). Naravno, prisutnost ovih metala u inundaciji je dijelom i geogenog (prirodnog) porijekla, nastalih erozijom i taloženjem vučenog nanosa rijeke Drave i njezinih pritoka. Cjelokupni monitoring razina teških metala crnomorskog sliva u Hrvatskoj uz praćenje razina podzemnih voda i detektiranje izvora onečišćenja riječnog sedimenta (antropogeni ili prirodni; organski, mikrobiološki ili anorganski), mogao bi dovesti do očuvanja kvalitete tla i flore inundacijskih područja. Ovom slična, inicijalna istraživanja, bilo bi uputno provesti i na dijelovima rijeke Drave nizvodno od Varaždinske županije, kako bi se stvorile kvalitetne podloge i izvori podataka za daljnje promatranje kakvoće sedimenta rijeke Drave u Hrvatskoj.

## LITERATURA

- [1] Bekić, D., Sekovanić, L., Mioč, A., Kerin, I. (2013): *Propagation of 2012 flood wave through HPP system on the river Drava*, 24. Mišičev vodarski dan, str. 40-48.
- [2] Bodek, I., Lyman, W. J., Reehl, W. F., Rosenblatt, D. H. (1988): *Environmental Inorganic Chemistry: Properties, Processes, and Estimation Methods*, SETAC Special Publication Series, Walton, B. T., Conway, R. A. (Eds.) Pergamon Press, New York.
- [3] Canty, M. J., McCormack, S., Lane, E. A., Collins, D. M., More, S. J. (2011): *Essential elements and heavy metal concentrations in a small area of the Castlecomer Plateau, Co. Kilkenny Ireland: Implications for animal performance*, Irish Journal of Agricultural and Food Research, 50, 223-238.

- 
- [4] FAO (2006): *Soil quality – determination of particle size distribution in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation: Guidelines for soil description*, Fourth edition, FAO, Rome, pp 109.
- [5] Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (2001): *Trace elements in soils and plants*, 3<sup>rd</sup> edition, Boca Raton, London, New York, Washington, 413.
- [6] Kabata-Pendias, A., Mukherjee, B. A. (2007): *Trace Elements from Soil to Human*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 560.
- [7] Kulizhskiy, S., Rodikova, A., Evseeva, N., Kvasnikova, Z., Kashiro, M. (2014): *The compomemnts of critical zone (soil and vegetation) as indicators of atmospheric pollution with heavy metals of the Tomsk district (Western Siberia) in the natural ecosystems*, *Procedia Earth and Planetary Science*, 10, 399–404.
- [8] Kushwaha, A., Rani, R., Kumar, S., Gautam, A. (2015): *Heavy metal detoxification and tolerance mechanisms in plants: Its implications for Phytoremediation*, Indian Institute of Technology, Kanpur.
- [9] Marković, T. (2003): *Istraživanje pokretljivosti onečišćivača u pokrovnim naslagama krškog karbonatnog vodonosnika na području izvora Turanjsko jezero u Vranskom polju*, Magistarski rad, RGNE, Sveučilište u Zagrebu.
- [10] Mayer, B., Pezdirc, N. (1990): *Teški metali (Pb, Zn, Cu) u tlima nizinskih šuma sjeverozapadne Hrvatske*, *Šumarski list*, 6-8, 251-259, Zagreb.
- [11] Mudipalli, A., (2008): *Metals (Micro nutrients or toxicants) & Global Health*, *The Indian Journal of Medical Research*, 331–334.
- [12] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_01\\_9\\_167.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_01_9_167.html), [10.12.2018.].
- [13] Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G. (2002): *A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters*, *Applied Geochemistry*, 17, 517–568.
- [14] Wright, R. T. (2007): *Environmental Science Toward a Sustainable Future*, 9<sup>th</sup> Ed, Prentice Hall of India, New Delhi.
- [15] Wuana, R. A., Okieimen, F. E. (2011): *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risk and Best Available Strategies for Remediation*, *ISRN Ecology*, Article ID 402647, 1-20.



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**MEĐUODNOS POJAVA NANOSA I KAKVOĆE  
VODE NA POSTAJI BOTOVO NA RIJECI DRAVI**

**INTERRELATION BETWEEN SEDIMENT AND  
WATER QUALITY AT BOTOVO STATION ON  
DRAVA RIVER**

Alma Tudić <sup>a</sup>

**SAŽETAK**

U radu su, na primjeru postaje Botovo na Dravi, analizirani međuodnosi između hidroloških pokazatelja koji karakteriziraju vodni režim Drave (protoci, koncentracije i pronos nanosa) i odabrani pokazatelji kakvoće vode (mutnoće, ukupne suspendirane tvari, ukupni fosfor, protok). Utvrđeno je da postoji značajna povezanost između odabranih pokazatelja kakvoće i hidroloških prilika vezanih uz pronos nanosa.

**ABSTRACT**

Using an example of the Botovo station on the Drava River, the paper analyses interrelations between the hydrological indicators that characterize the Drava water regime (sediment flows, concentrations and transport) and the selected water quality indicators (turbidity, total suspended solids, total phosphorus, flow). Significant correlation has been identified between the selected quality indicators and hydrological conditions associated with sediment transport.

*KLJUČNE RIJEČI: mutnoća, kakvoća, koncentracija suspendirane tvari, protok*

*KEYWORDS: turbidity, quality, suspended sediment concentration, discharge*

---

<sup>a</sup> Hrvatske vode, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, 10000, Hrvatska, alma.tudic@voda.hr



## 1. UVOD

Stanje kakvoće površinskih vodotoka uvjetovano je dvama osnovnim utjecajima – antropogenim pritiscima u slivu i hidrološkim prilikama. Pri provedbi ocjene stanja kemijskih značajki vodotoka dosta se često hidrološke prilike zanemaruju ili se ocjenjuju uglavnom samo prema najčešće zastupljenom hidrološkom pokazatelju – protocima. Pojava nanosa u vodotoku (koncentracije suspendiranog nanosa i pronosa nanosa) koje se puno rjeđe hidrološki prate također imaju utjecaja na stanje kakvoće voda. Pri provedenim analizama je kao referentna postaja odabrana hidrološka postaja Botovo na Dravi (Slika 1), a koja je ujedno i postaja nacionalnog monitoringa za površinske vode.



*Slika 1. Prikaz lokacije hidrološke postaje Botovo - Drava na kojoj se prate i značajke kakvoće voda*

Značajke pojava i pronosa suspendiranog nanosa se uglavnom povezuju s utjecajem koga on ima na geomorfološke procese u koritu, a puno manje s kakvoćom vode u rijekama, i uz to vezanim biokemijskim procesima. Stoga je i većina publiciranih radova u kojima se razmatra problematika nanosa u rijeci Dravi bila usmjerena na analize vezane uz međudnose hidroloških značajki nanosa i protoka, te promjena koje su uočene u njihovom vodnom režimu tijekom dugotrajnog vremenskog razdoblja od kad postoje mjerenja koncentracija i pronosa nanosa na Dravi, a koje se uglavnom povezuju s antropogenim utjecajima, prije svega izgradnjom hidroenergetskih objekata i uz to vezanih zahvata (Bonacci, 1981; Bonacci i Oskoruš, 2008, 2010, 2019; Bonacci i drugi, 1992; Gilja i drugi, 2010; Štefanec i drugi, 2019).

U ovome radu analizirana je unutargodišnja dinamika vodnog režima Drave i kakvoća njenih voda tijekom puno kraćeg razdoblja (2009.-2017.), no unutar kojeg su posto-

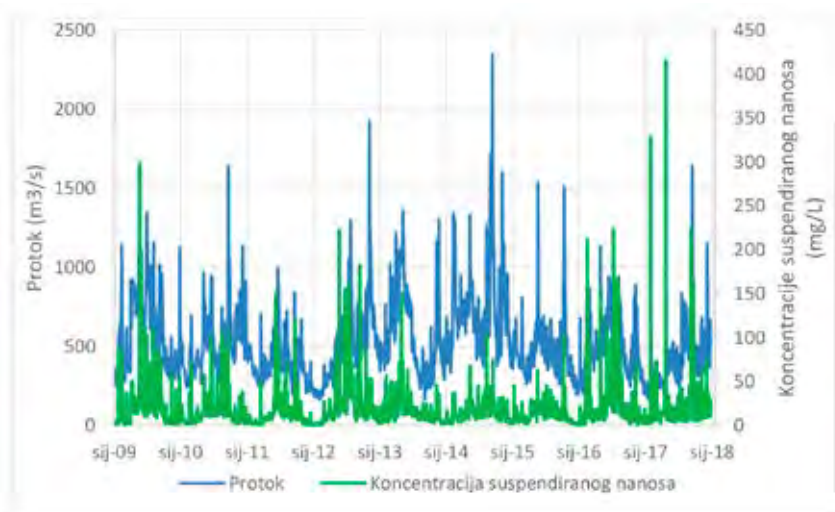
jali cjeloviti podaci o hidrološkim praćenjima na postaji 5008 Botovo – Drava (dnevni podaci o protocima, koncentracijama i pronosu suspendiranog nanosa), kao i s postaje 29130 Botovo-Ortilos za koju postoje podaci mjesečnih uzorkovanja (s povremenim prekidima) fizikalno kemijskih pokazatelja kakvoće vode, među kojima su za potrebe provedbe analiza u danom radu kao primjer fizikalnih značajki izdvojene koncentracije suspendirane tvari ukupne, a kao primjer nutrijenata sadržaj fosfora. Iako značajke kakvoće voda imaju mnogo (30-ak puta) manju učestalost očitavanja u odnosu na hidrološko praćenje koncentracija i pronosa nanosa, provedene usporedbe pokazuju da postoji međusobna povezanost. Karakteristični statistički pokazatelji analiziranih parametara tijekom analiziranog razdoblja dani su u Tablici 1.

Tablica 1. Prikaz karakterističnih pokazatelja hidroloških prilika i kakvoće vode na postaji Botovo (2009.-2017.)

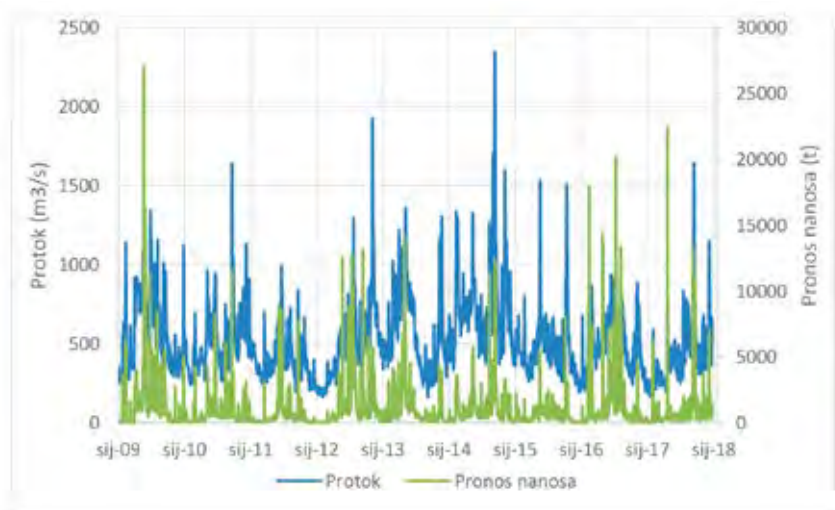
Pokazatelj	Hidrološki pokazatelji			Pokazatelji kakvoće vode	
	Protok (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Koncentracija suspendiranog nanosa (mg L <sup>-1</sup> )	Pronos nanosa (t/dan)	Suspendirane tvari ukupne (mg L <sup>-1</sup> )	Fosfor (mg L <sup>-1</sup> )
SR	525	17,6	1000,9	16,1	0,066
St.dev.	241	23,0	1697,3	23,7	0,042
Cv	0,46	1,31	1,70	1,47	0,64
Max	2345	415	26465	211	0,292
Min	159	0,0	0,5	0,5	0,013
Broj članova niza	3318	3318	3318	134	110

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Prikaz hoda srednjih dnevnih protoka i koncentracija suspendiranog nanosa dani su na Slici 2, a protoka i pronosa suspendiranog nanosa na Slici 3. Vidljivo je da s povećanjem protoka postoji i generalna povezanost povećanja koncentracija, kao i pronosa suspendiranog nanosa, ali se ne radi o čvrstoj povezanosti. Vidljivo je da postoji unutargodišnja ciklična izmjena vodnijih i sušnijih razdoblja, a koja ima neposredan utjecaj na slične izmjene razdoblja s višim ili nižim koncentracijama suspendiranog nanosa, te većim ili manjim pronosom dnevnih količina nanosa.

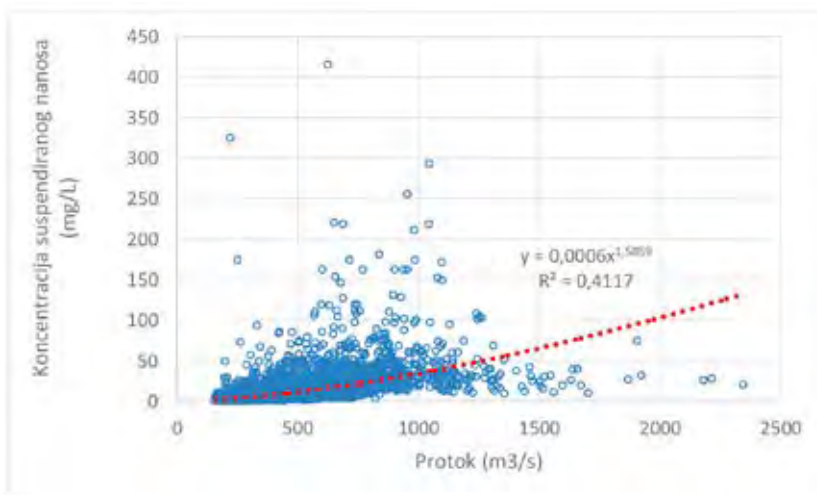


*Slika 2. Hod srednjih dnevnih protoka i koncentracija suspendiranog nanosa na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)*

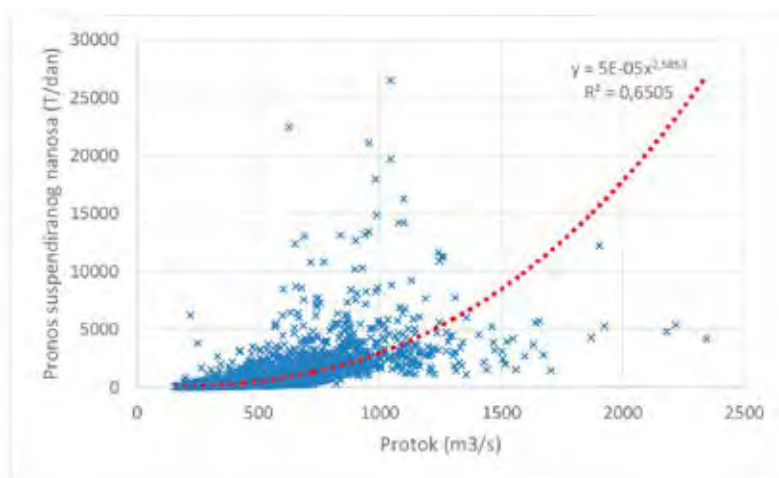


*Slika 3. Hod srednjih dnevnih protoka i pronosa suspendiranog nanosa na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)*

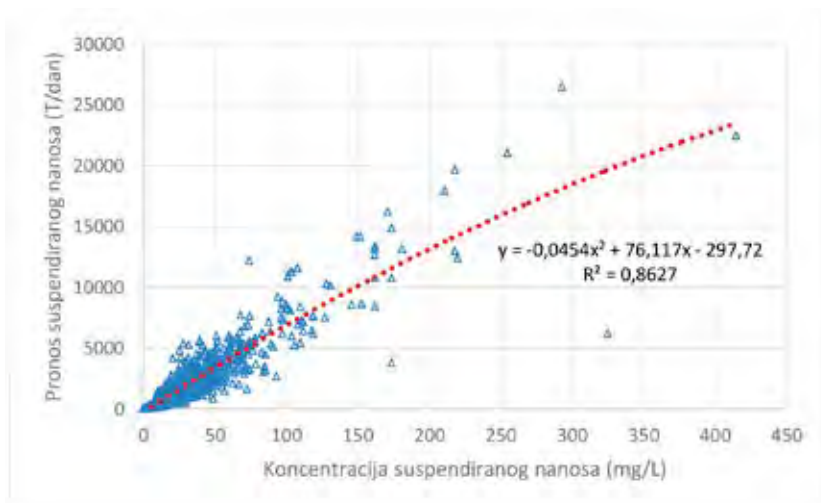
Ti se međuodnosi između srednjih dnevnih protoka, te dnevnih koncentracija i pronosa suspendiranog nanosa mogu vidjeti i na grafičkim prikazima na Slikama 4 - 6, iz kojih je vidljivo da najčvršća neposredna veza postoji između koncentracija i pronosa suspendiranog nanosa (koef, determinacije  $R^2= 0,86$ ), a najmanja između protoka i koncentracija suspendiranog nanosa ( $R^2= 0,41$ )



Slika 4. Međuodnos između srednjih dnevnih protoka i koncentracija suspendiranog nanosa na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)

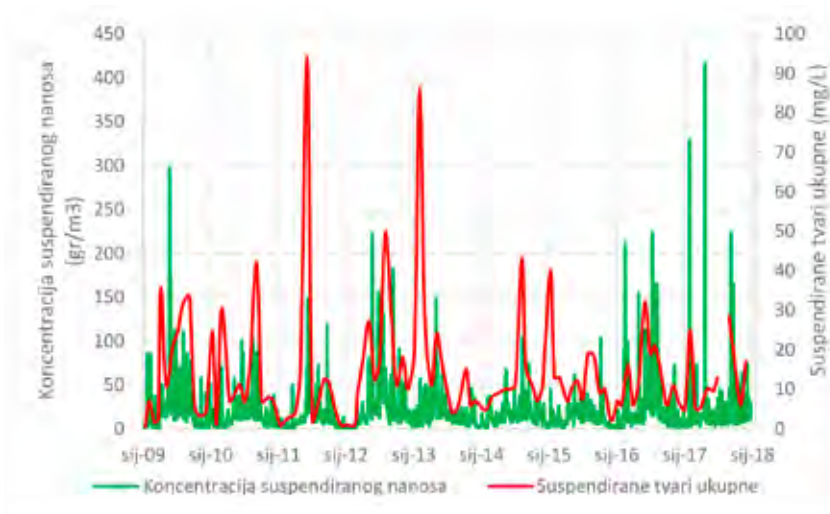


Slika 5. Međuodnos između srednjih dnevnih protoka i pronosa suspendiranog nanosa na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)

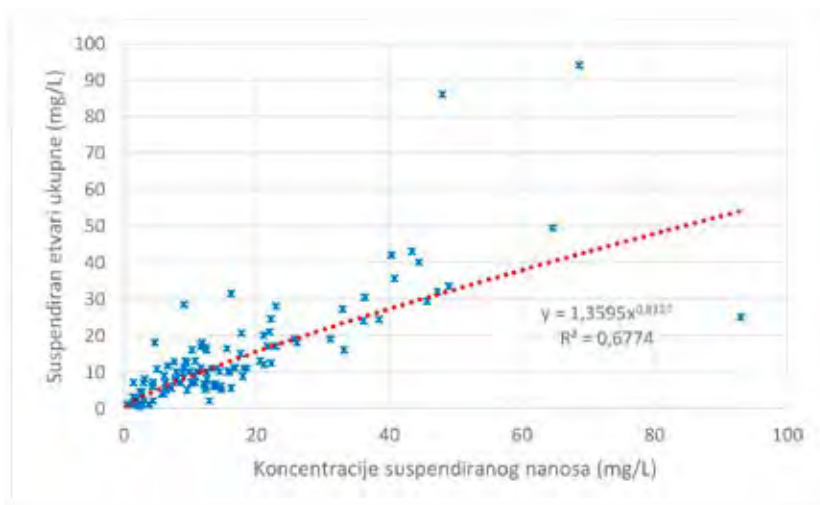


Slika 6. Međuodnos između dnevnih koncentracija i pronosa suspendiranog nanosa na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)

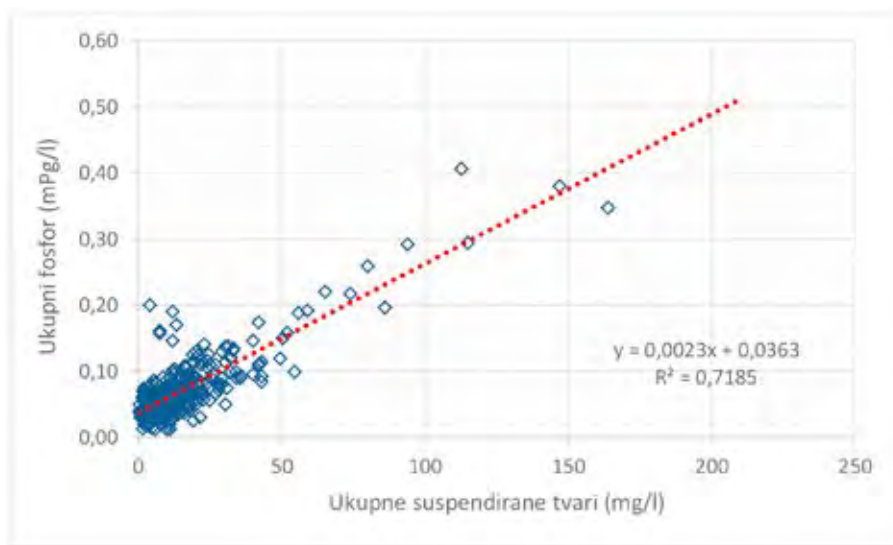
Iako nije jednaka vremenska diskretizacija monitoringa, odnosno bilježenje podataka, puno bolje se podudara hod koncentracije suspendiranog nanosa (mjerene hidrološkim pristupom) i sadržaj ukupnih suspendiranih tvari (mjenjenih prilikom provedenih uzorkovanja kakvoće voda), prikazanih na Slici 7, pri čemu je moguće odstupanje dijelom uvjetovano upravo tim različitim čestinama uzorkovanja. Njihov je međuodnos prikazan i na Slici 8, iz koje je vidljivo da postoji relativno čvrsta povezanost tih dvaju pokazatelja ( $R^2 = 0,68$ ). Vidljivo je da postoje značajna odstupanja pojedinih visokih vrijednosti, ali se većina drugih rezultata nalazi unutar manjih odstupanja. Slična, ali ipak manja u domeni većih vrijednosti, su odstupanja pri analizi međuodnosa između sadržaja ukupnih tvari i sadržaja fosfora (Slika 9).



Slika 7. Hod srednjih dnevnih koncentracija suspendiranog nanosa i ukupnog sadržaja suspendirane tvari na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)



Slika 8. Međuodnos između dnevnih koncentracija nanosa i sadržaja ukupne suspendirane tvari na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)



Slika 9. Međudodnos između sadržaja ukupne suspendirane tvari i fosfora na postaji Botovo-Drava (2009.-2017.)

### 3. ZAKLJUČAK

Dobiveni rezultati pokazuju da u pravilu što je veći protok, veće su i koncentracije i pronos suspendiranog nanosa, ali i sadržaj nekih fizikalnih i kemijskih pokazatelja kakvoće nanosa, u danom slučaju sadržaj ukupnih suspendiranih tvari kao i fosfora. Povišene koncentracije odabranih pokazatelja posljedica su pojava velikih voda Drave koje dolaze iz Slovenije i Austrije, koje su najizrazitije prilikom topljenja snijega u proljeće, kada se aktivira i donos nanosa koritima bujičnih tokova. Analizirani su samo neki od pokazatelja kakvoće, i za očekivati je da će još neki biti povezani s režimom protjecanja voda i nanosa u koritu Drave.

### LITERATURA

- [1] Bonacci, O. (1981): *Accuracy of suspended sediment measurements in natural streamflows*, Journal of Hydraulic Research, 19.
- [2] Bonacci, O., Oskoruš, D. (2008): *Analiza osnovnih hidroloških parametara*, Hrvatska Vodoprivreda, XVII, 186-187, 16-21.
- [3] Bonacci, O., Oskoruš, D. (2010): *The changes of the lower Drava River water level, discharge and suspended sediment regime*, Environmental Earth Sciences, 59, 8, 1661-1670.

- 
- [4] Bonacci, O., Oskoruš, D. (2019): *Human Impacts on Water Regime*, The Drava River Environmental Problems and Solutions/Lóczy, Dénes(ur.). Cham : Springer, Str. 125-137.
- [5] Bonacci, O., Tadić, Z., Trninić, D. (1992): *Effects of dams and reservoirs on the hydrological characteristics of the lower Drava river*, Regulated rivers: Research & Management, 7, 349-357.
- [6] Gilja, G., Bekić, D., Oskoruš, D. (2009): *Processing of Suspended Sediment Concentration Measurements on Drava River*, Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering/Cvetanka Popovska (ur.). Skopje : University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, 181-191.
- [7] Štefanec, N., Rubinić, J. (2009): *Usporedba režima pronosa suspendiranog nanosa rijeka Save i Drave*, Zbornik radova Građevinskoga fakulteta Sveučilišta u Rijeci, 12, 1; 113-123.
- [8] Zhu, S., Bonacci, O., Oskoruš, D. (2019): *Assessing sediment regime alteration of the lower Drava river*, Electronic journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek -e-GFOS, 19, 1-12.





OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**PROCESI POKRETANJA TOKOVA  
KRUPNOZRNATOG I SITNOZRNATOG  
MATERIJALA**

**MOVEMENT PROCESSES OF DEBRIS FLOW  
AND MUDFLOW**

Elvis Žic<sup>a</sup>, (Nenad Bićanić)<sup>a</sup>, Nevenka Ožanić<sup>a</sup>

**SAŽETAK**

U radu su dane osnovne smjernice i međuovisnosti pojedinih hidroloških i geoloških parametara koji uvjetuju nastanak toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala na strmim padinama. Gravitacija je primarni uzrok nastanka klizanja koja u doticaju s velikim intenzitetima oborina u kratkom vremenskom periodu formira tokove krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala. Međutim, postoji niz faktora koji doprinose formiranju takvih tokova kao što su podzemna voda, karakteristike tla, erozija, potresi, erupcije vulkana i slično. Mnogobrojnim klizanjima predhode pojave jakih bujica, erozijsko djelovanje šireg područja oko klizišta, pojava poplava i slično. U radu su opisane karakteristike toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, uzroci i posljedice njihova pokretanja te ovisnosti pojedinih hidroloških i geoloških parametara prilikom mehanizma pokretanja. Dan je način određivanja protoka, brzina, dosega i ukupnog volumena toka krupnozrnatog materijala.

**ABSTRACT**

The basic guidelines and interdependencies of individual hydrological and geological parameters that condition the flow of coarse-grained (debris flow) and fine-grained material (mudflow) on steep slopes are given in the paper. Gravity is the primary cause of slippage that, in contact with high rainfall intensities, forms flows of coarse-

---

<sup>a</sup> Građevinski fakultet Rijeka, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, elvis.zic@uniri.hr, bicanic@civil.gla.ac.uk (preminuo 2016.), nevenka.ozanic@uniri.hr

grained or fine-grained material over a short period of time. However, there are a number of factors that contribute to the formation of such flows as groundwater, soil characteristics, erosion, earthquakes, volcanic eruptions, etc. Numerous landslides are preceded by the appearance of heavy torrents, the erosion action of the wider area around the landslide, the occurrence of floods and similar. The paper describes the characteristics of the flow of coarse-grained and fine-grained material, the causes and consequences of their initiation, and the dependencies of certain hydrological and geological parameters during the initiation mechanism. Also, the paper describes the method of determining the flow rate, velocity, reach and total flow volume of coarse-grained material.

*KLJUČNE RIJEČI: mehanizam pokretanja klizanja, tok krupnozrnatog materijala, tok sitnozrnatog materijala, intenzitet oborina, procjena rizika*

*KEYWORDS: flow initiation mechanism, debris flow, mudflow, rainfall intensity, risk assessment*

## 1. UVOD

Prema definiciji Crudena i Varnesa (1996) klizište predstavlja svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz kosinu. Gravitacija je primarni uzrok nastanka klizanja, ali postoji niz faktora koji doprinose klizanju kao što su podzemna voda, karakteristike tla, erozija tla, bujice i poplave, potresi, erupcije vulkana i slično. Materijal podložan klizanju može se opisati kao stijena (eng. *rock*, tvrda ili čvrsta masa koja je intaktna prije inicijacije kretanja) ili tlo (eng. *soil*, agregat čvrstih čestica, minerala ili stijena, koje su prethodno transportirane ili su nastale trošenjem na licu mjesta) (Varnes, 1978). Tla se dodatno dijele na vezani (eng. *earth*) i nevezani materijal (eng. *debris*). Tlom se smatraju materijali u kojima je 80 % ili više čestica manje od 2 mm (gornja granica pijeska), dok nevezani materijal (debris) sadrži značajan udio krupnozrnatog materijala, 20-80 % čestica koje su veće od 2 mm s ostatkom čestica manjih od 2 mm (Varnes, 1978). Pojam „debris“ (*debricit, detritus, stijensko kršje, gruh*) predstavlja u geologiji površinsku akumulaciju (nakupinu) nevezanog (rahlog, rastresitog) materijala koji je otkinut od mase temeljnih stijena kemijskim ili mehaničkim načinima, npr. razlaganjem (eng. *decay*) ili razaranjem (eng. *disintegration*) (Perić, 2007), Slika 1. Sastoji se od fragmenata (odlomaka) stijena, materijala tla i katkada od organske tvari.



Slika 1. Klasifikacija gibanja mase kao funkcija krutih frakcija i tipa materijala, (modificirano prema Coussot i Meunier, 1995)

Prema najnovijoj modificiranoj klasifikaciji tipova klizanja koju su dali Hungr i drugi (2014), tečenje (eng. *flow*), kao jedan od temeljnih tipova klizanja se dijeli na tečenje stijenske mase (eng. *flows in rock*) i na tečenje tla (eng. *flows in soil*). Tečenje tla se dodatno može podijeliti na: tečenje stijenskog materijala (eng. *rock flow*) u koji spadaju siparišta (eng. *rock creep*), tok krupnozrnatog materijala (u koji spada tečenje talusnog materijala, tok debritnog materijala, debritna lavina, soliflukcija, protok suhog pijeska) i zemljani tok (s dodatnom podijelom u tok suhog pijeska, tok vlažnog pijeska, brzi tok glinovitog materijala, zemljani tok, brzi zemljani tok i tok prapora i lesa).

Na temelju krupnozrnatih i sitnozrnatih materijala, te njihova udjela vode i čvrstog materijala može se definirati osnovna klasifikacija gibanja mase (Slika 1). Veći sadržaj vode odgovara tečenju u vodotocima i rijekama (bujicama, kanalima), dok je veći udio čvrstog materijala vezan za tip odrona i klizanje. U ovisnosti o sadržaju vode i krutog materijala može se jasno uvidjeti podjela na sipare, tok krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, hiperkoncentrirano tečenje i tečenje vode u vodotocima.

## 2. TOKOVI KRUPNOZRATOG I SITNOZRATOG MATERIJALA

Pojavi toka krupnozrnatog materijala (debritni tokovi) prethodi klizanje materijala koje se može opisati kao stijena ili tlo. Udio čvrstih čestica u tečenju suspendiranog nanosa (toka krupnozrnatog materijala) je veći od 50 %. Tokovi krupnozrnatog materijala obično sadrže manje od 30 % mulja i sitnih čestica. Zemljano tečenje ima glinene sadržaje u rasponu između 10-70 (u prosjeku 40 %) i indeks plastičnosti 10-60 (u prosjeku oko 35 %) (Hungr i drugi, 2014). Tokovi krupnozrnatog materijala su obično neplastični ili slabo plastični, a predstavljaju iznimno brzi protok zasićene neplastične

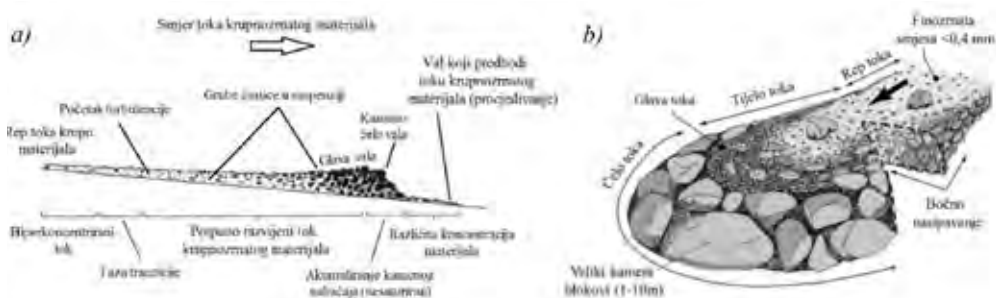
mase stijenskog kršja (drobine) u strmom kanalu. Tok krupnozrnatog materijala se definira kao nestacionarni i nejednoliki protok mase u strmom ograničenom kanalu koji se deponira na kraju toka (Davies i drugi, 1992). Pritom se promatra pulsirajuće tečenje pri kojem su hidrodinamički udari vode i nevezanog krupnozrnatog materijala odvojeni (Slika 2a). Udari rastu zbog nestabilnosti protoka, pojave uzastopnog klizanja otpuštajućeg materijala ili zbog usporavanja toka uslijed formiranja prirodne brane od kamenog nabačaja. Tečenje toka krupnozrnatog materijala se sastoji od tekuće i čvrste (krute) faze propagacije. Čvrsta faza zauzima veći volumen (50-80 %) od tekuće faze (Takahashi, 2007). Tečenje krupnozrnatog materijala nastaje na padinama s prosječnim kutem nagiba od 20-45° (Iverson, 1997), a najveći uzročnik njegova nastanka su jaki intenziteti oborina i/ili seizmičko djelovanje. Tokovi krupnozrnatog materijala i hiperkoncentrirani tokovi spadaju u najrazornije pojave povezane s vodom. Oni se uglavnom pojavljuju u planinskim područjima u širokom rasponu morfoklimatskih okruženja. Te se pojave događaju u vrlo kratkom vremenskom periodu, te zbog nenadanog događaja treba osigurati mjere od obrane, pogotovo kada su povezane s iznenadnim poplavama ili rušenjem brane.



Slika 2. Klasični prikaz toka a) krupnozrnatog i b) sitnozrnatog materijala (Žic, 2015)

Količina sadržaja vode je vrlo promjenjiva zbog heterogenosti toka krupnozrnatog materijala i tranzicije iz gustog i krupnozrnastog vala ispred i više tekućeg dijela vala pozadi (Žic i drugi, 2015), Slika 3. Tok krupnozrnatog materijala se sastoji od nekoliko osnovnih elemenata. Rep toka (eng. *afterflow*) sačinjava protok sedimenata opterećen vodom i ima iste karakteristike kao i krupnozrnati materijal nastao poplavama, odnosno razrijeđen je i turbulentan. Tijelo vala u srednjem dijelu toka se sastoji od sitnijih čestica i pretežno tekućeg otpada. Posljednji dio vala je glava toka, koja je isturena naprijed (Slika 3). Nositelj je najveće koncentracije velikih kamenih obluka te drugog krupnozrnatog materijala. Veliki kameni obluci mogu biti uključeni i zadržani u glavi toka. Oni dolaze iz repa toka i migriraju do glave toka uslijed transporta. Dubina tečenja i koncentracija krutih tvari se progresivno smanjuje od glave prema kraju repa određenog vala. Tijelo vala je zasićeno vodom dok je čelo vala nesaturirano.

Tečenje sitnozrnatog materijala definira tok čiji je sastav (prah, glina) znatno plastičniji i čiji je indeks tečenja tijekom kretanja veći od 0,5. Takvo tečenje predstavlja vrlo brzi do iznimno brzi protok zasićenog plastičnog sitnozrnatog materijala u kanalu, uključujući značajan udio sadržaja vode (Slika 2b) u odnosu na izvorni materijal s indeksom plastičnosti  $>5\%$  (Hungur i drugi, 2014). Stupanj fluidnosti se određuje prema opažanoj brzini toka ili prema distribuciji i morfologiji formiranih sedimenata. Tokovi sitnozrnatog materijala su srednji članovi gradacijskog niza procesa u kojima sudjeluju voda, glina i stijensko kršje (fragmenti stijena) u različitim odnosima. Sadržaj vode u takvim tokovima može doseći  $60\%$  (O'Brien i drugi, 1993). Stupanj vezivanja vodom, određen sadržajem gline i mineralogijom čvrstih čestica, ima kritični utjecaj na viskoznost smjese i brzinu toka.



Slika 3. a) uzdužni profil vala kod toka krupnozrnatog materijala, b) tipični poprečni profil toka krupnozrnatog materijala (Žic, 2015)

### 3. PROCESI POKRETANJA TOKOVA STIJENSKOG MATERIJALA

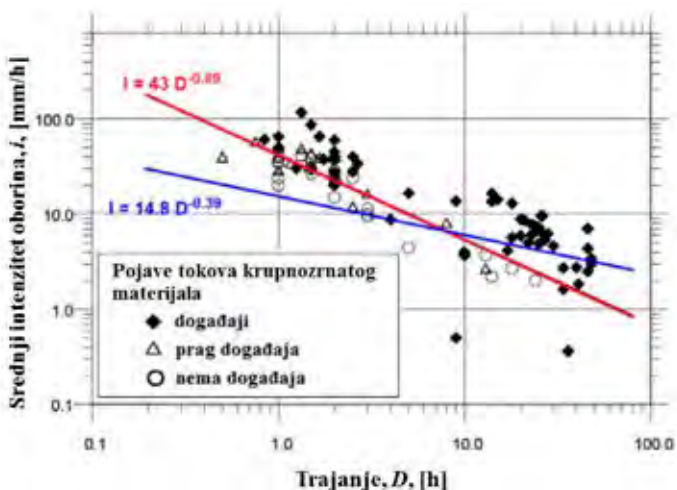
Do pojave formiranja tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala dolazi kada se masa slabo sortiranih sedimenata, stijena i fino zrnatog materijala, pomiješana s vodom, počne pokretati niz padinu uslijed povećanja porenog tlaka i gravitacijske sile. Takve tokove mogu uzrokovati različiti mehanizmi poput potresa koji može destabilizirati kosinu i uzrokovati klizišta, puknuće prirodno formirane brane koja pritom može otpustiti dovoljno materijala za formiranje toka krupnozrnatog materijala, kao i ljudska djelatnost (npr. rudarenje, iskopi i sl.). Podaci koje je skupio Iverson (1997) pokazuju da je nagib kosine veći od  $20^\circ$  dovoljan da pokrene njegovo klizanje i formiranje. Za pokretanje klizanja voda ima važnu ulogu. Ona dolazi putem oborina ili snijega. U početnoj fazi voda u tlu povećava porni tlak i time smanjuje silu otpora materijala, a time i stabilnost kosine. Osjetljivost tla na pojavu likvefakcije uglavnom ovisi o veličini zrna i poroznosti, ali i o uvjetima stanja naprezanja u tlu (Hungur, 1995). U drugoj fazi, oborine povećavaju površinsko otjecanje vode stvarajući pritom erozijsko djelovanje na površini klizišta. Voda brzo erodira dno i miješa se s krupnozrnatim materijalom. Prema Caineu (1980) koji je koristio podatke sa 73 plitka kli-

zišta i tečenja krupnozrnatog materijala, predložena je razina (prag) intenziteta oborina koja mora biti prekoračena za iniciranje takvog tipa tečenja, a ona glasi:

$$I = 1,82 \cdot (D^*)^{-0,39} \quad (1)$$

pri čemu su  $I$  prosječan intenzitet oborina, [mm/h], te  $D^*$  trajanje oborina, [sati].

Dvije vrste meteoroloških događaja uzrokuju nastanak i pokretanje tokova krupnozrnatog materijala (Slika 4). Prvi događaj ili pojavu čine kratke oluje visokog intenziteta koje u većini slučajeva generiraju poplavne bujice koje promiču stvaranje toka krupnozrnatog materijala uz glavni kanal. Takve pojave su česte u Švicarskoj, a stvaraju se već pri minimalnoj količini oborina intenziteta od oko 30 mm/h, dok su minimalne kumulativne količine oborina od oko 40 mm/h dostatne za stvaranje toka krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala (Rickenmann, 2005). Drugi tip oborina je vezan za stalne regionalne oluje koje dovode do značajnog prodora vode, velikih podzemnih otjecanja i djelomičnog ili potpunog zasićenja tla. Takve pojave pogoduju povećanju površinskog otjecanja, čime tla na strmim padinama postaju osjetljivija na mobilizaciju i pokretanje tokova krupnozrnatog materijala (Rickenmann, 2005).



Slika 4. Odnos između kritičnog intenziteta oborina i trajanja pojave toka krupnozrnatog materijala. Podaci sa švicarskih Alpi (modificirano prema Zimmermann i drugi, 1997)

#### 4. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA TOKA KRUPNOZRATOG MATERIJALA

Prema liniji zakrivljenosti kanala, zbog centrifugalnih sila i reoloških svojstava tečenja, nasipi krupnozrnatog materijala s vanjske strane su veći od onih unutar kanala (Blanc, 2008). Ovaj fenomen se naziva nadvišenje i omogućuje označavanje dinamičkog kretanja tečenja krupnozrnatog materijala. Na taj način moguće je izračunati brzine toka

pomoću jednadžbe:

$$\bar{v} = (k_1 r_c g \cos \beta \tan \delta) \cdot 0,5 \quad (2)$$

gdje su,  $\bar{v}$  srednja brzina toka, [m/s],  $r_c$  polumjer zakrivljenosti krivine, [m],  $g$  veličina gravitacijskog ubrzanja, [m/s<sup>2</sup>],  $\beta$  nagib kanala ( $\beta > 15^\circ$ ,  $\cos \beta$  se može zanemariti!),  $\Delta h$  nadmorska visina kao razlika između unutarnje i vanjske strane zavoja, [m],  $w$  širina ( $\tan \delta = \Delta h/w$ ) [m], te  $k_1$  korekcijski koeficijent, [/] (Costa i Williams, 1984).

Dosegnuta udaljenost toka se definira kao duljina puta preko koje putuje tok krupnozrnatog materijala. To je važan parametar zbog saznanja gdje taloženje prestaje i gdje su ugrožene zone. Tok krupnozrnatog materijala može dosegnuti dužine ( $L$ ) od nekoliko stotina metara pa sve do više kilometara (primjer u Nevado del Ruizu u Kolumbiji koji je putovao preko 10,3 km) (Iverson, 1997). Na temelju povezanosti između kvocijenta  $H/L$  i volumena toka krupnozrnatog materijala Rickenmann (2005) daje slijedeću vezu:  $L=30 \cdot (MH)^{1/4}$ , pri čemu parametar  $M$  označava magnitudu događaja toka. Empirijski odnosi za određivanje magnitude toka krupnozrnatog materijala prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Empirijski odnosi za procjenu veličine događaja tokova krupnozrnatog materijala i/ili bujičnih poplava s nanosom (IRASMOS projekt, 2008)

Empirijski izrazi	N	Primjena	$M$ – maksimalna jačina događaja, [m <sup>3</sup> ] $M_a$ – srednja jačina događaja, [m <sup>3</sup> ] $A_c$ – površina sliva, [km <sup>2</sup> ] $S_c$ – srednji pad dna kanala, [-] $S_f$ – srednji nagib deponitne lepeze, [-] $L_c$ – duljina aktivnog kanala, [m] $K$ – faktor bujičnosti, [-] $I_G$ – geološki indeks, [-] $N$ – broj događaja, [-]
$M=K \cdot A_c \cdot 100 \cdot S_c$	1420	bujična poplava	
$M \approx 37000 \cdot A_c^{0,78}$	≈ 65	tok krupnozr. materijala	
$M_a = 150 \cdot A_c \cdot (100 \cdot S_f - 3)^{2,3}$	15	bujična poplava	
$M = L_c \cdot (110 - 250 \cdot S_f)$	82	tok krupnozr. materijala	
$M_a = 13600 \cdot A_c^{0,61}$	551	bujična poplava	
$M_a = 29100 \cdot A_c^{0,67}$	64	tok krupnozr. materijala	
$M_a = 70 \cdot A_c \cdot S_c^{1,28} \cdot I_G$	64	tok krupnozr. materijala	

Predviđanje dosega udaljenosti može biti podijeljeno u empirijsko-statističke i dinamičke metode (Žic, 2015). Empirijsko-statistički pristup je nešto jednostavniji za korištenje u odnosu na dinamički pristup.

Za podskupinu od 71 toka krupnozrnatog materijala, uključujući i odrone te lavinu krupnozrnatog materijala, ali isključujući tokove sitnozrnatog materijala Corominas (1996) razvija empirijski odnos za određivanje dosega materijala, koji se može prikazati kao:

$$L = 1,03 \cdot V \cdot 0,105 \cdot H \quad (3)$$

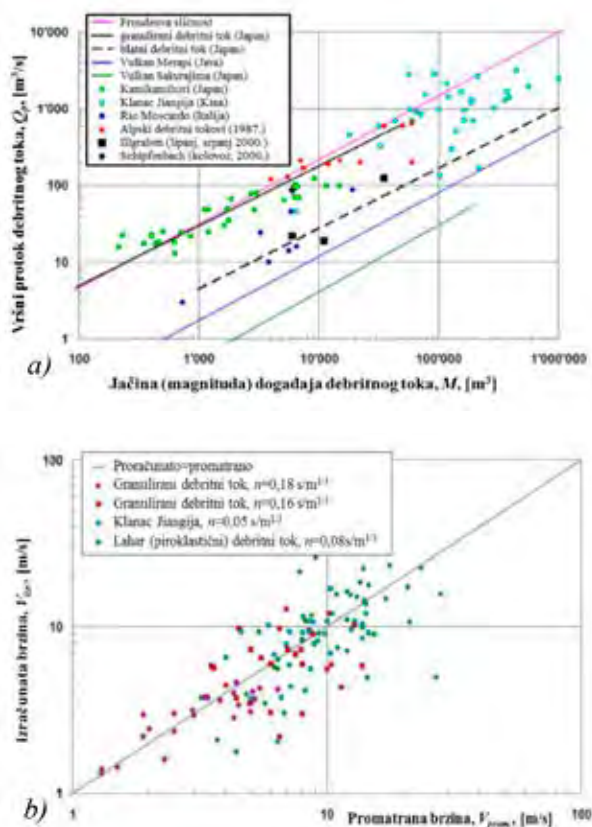
gdje je  $H$  u [m],  $L$  u [m],  $V$  u [m<sup>3</sup>]. Vrijednost volumena varira između 10<sup>2</sup> i 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>. Jednadžba ima koeficijent korelacije  $R^2=0,76$ . Iz regresijske analize koja koristi osnovne podatke o tokovima krupnozrnatog materijala iz švicarskih Alpi proizlazi slijedeća jednadžba (Rickenmann, 1999):



$$L = 1,9 \cdot V^{0,16} \cdot H^{0,83} \quad (4)$$

gdje je duljina  $L$  u [m], volumen  $V$  u [m<sup>3</sup>] i visina  $H$  u [m]. Gornja opisana jednadžba ima koeficijent korelacije  $R^2=0,75$  za skup koji uključuje 160 događaja toka krupnozrnatog materijala s vrijednosti  $L$  u rasponu od 300 do 12600 m, volumenom  $V$  od  $7 \cdot 10^2$  do  $10^6$  m<sup>3</sup>, te visinom  $H$  od 110 do 1820 metara.

Osim empirijskih izraza za određivanje dosega toka krupnozrnatog materijala, postoje i empirijski pristupi za određivanje procjene vršnog protoka i brzina toka. Dinamički modeli se temelje na jednadžbi očuvanja količine gibanja i zakonu očuvanja energije. Takvi pristupi za predviđanje brzine i dosega toka krupnozrnatog materijala se temelje na metodi kontinuuma u kojima se unutar modela simuliraju deformacije pokretne mase uzduž korita (Žic, 2015). Na Slici 5a prikazane su vrijednosti vršnog protoka i volumena toka krupnozrnatog materijala.



Slika 5. a) Odnos između vršnog protoka toka krupnozrnatog materijala i jačine događaja, b) primjena Manningove jednadžbe za tokove krupnozrnatog materijala, koristeći pseudo Manningove povratno izračunate vrijednosti koeficijenta hrapavosti  $n$  za svaki podskup podataka (Rickenmann, 1999)

Odgovarajuća jednadžba ima sljedeći oblik:

$$Q_p = 0,1 \cdot M^{0,833} \quad (5)$$

Jednadžba vrijedi za zrnate tokove i tokove velikih kamenih oblutaka. U tim jednadžbama fizikalni parametar  $M$  je dan u  $[m^3]$ , a protok  $Q_p$ , u  $[m^3/s]$ . Podaci prikazani na Slici 5a odnose se na granulirani tok krupnozrnatog materijala koji je isturen ispred čela vala. Tijekom gibanja, gravitacijska potencijalna energija toka krupnozrnatog materijala se pretvara u rad. Ukupni potencijal energije izgubljene tokom tečenja može se proračunati na slijedeći način:

$$E_p = M \cdot g \cdot H \quad (6)$$

pri čemu su  $E_p$  ukupna potencijalna energija,  $[kgm^2/s^2]$ ,  $M$  masa toka krupnozrnatog materijala,  $[kg]$ ,  $g$  konstanta gravitacije,  $[m/s^2]$ , te  $H$  nadmorska visina izvora toka krupnozrnatog materijala,  $[m]$ .

Mnoge predložene empirijske formulacije na bazi jednadžbi protoka i otpornosti u koritu baziraju se na određivanju srednjih brzina bilo preko empirijskih podataka dobivenih u prirodi ili u laboratoriju na fizikalnim modelima. Čeona brzina  $V$  toka krupnozrnatog materijala se može procijeniti pomoću Manning-Stricklerove jednadžbe (Rickenmann, 1999):

$$V = (1/n) h^{0,67} I^{0,5} \quad (7)$$

gdje je  $h$  dubina toka,  $I$  nagib kanala, dok je pseudo-Manningova vrijednost koeficijenta hrapavosti  $n$  uzeta s vrijednošću  $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$ . Na Slici 5b uspoređena je primjena Manningove jednadžbe koja daje usporedbu izračunatih i izmjerenih vrijednosti brzina za neke tokove krupnozrnatog materijala u svijetu.

Velike brzine daju tokovima krupnozrnatog materijala velike udarne pritiske, koji su odgovorni za uništenje materijalnih dobara i života ljudi. Watanabe i Ikeya (1981) predlažu slijedeći odnos za izračun veličine sile hidrodinamičkog udara:

$$P = \alpha \left( \frac{\gamma (v')^2}{g} \right) \quad (8)$$

pri čemu je  $P$  tlak sile hidrodinamičkog udara,  $[Pa]$ ,  $\alpha$  brzinski koeficijent glave toka,  $[/]$ ,  $\gamma$  specifična težina materijala,  $[kN/m^3]$ , te  $v'$  glavna brzina toka krupnozrnatog materijala,  $[m/s]$ . Tok krupnozrnatog materijala se obično zaustavi na mjestu gdje njegova propagacija dosegne točku konačnog taloženja, tzv. koluvijalna ili taložna lepeza. Ukupni volumen pohranjenog materijala  $V_{uk} [m^3]$  dobije se zbrajanjem volumena početne (inicirajuće) mase ( $V_{ini}$ ) koja je uzrokovala pokretanje toka i volumen koji ulazi u tok ( $V_{ul}$ ) te se od te količine oduzme volumen deponiranog materijala ( $V_{dep}$ ).

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisane su osnovne karakteristike i značajke tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Analize takvih tokova su izuzetno važne zbog procjene rizika i ograničavanja ranjivih područja u kojima su potrebne mjere ublažavanja. Takvi tokovi predstavljaju proces disipacije mase nevezanog krupnozrnatog (nekoherentnog) i sitnozrnatog (koherentnog) materijala s izuzetno brzim protokom u strmom ograničenom kanalu koji se deponira na rubu toka. Hidrodinamički udari takvih tipova tečenja su iznimno jaki jer u sebi sadrže mješavinu vode, krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, kamenih blokova i drvnih primjesa koji znaju propagirati brzinama od 20-25 m/s, pa i više. Na temelju prikupljenih hidroloških, geoloških, hidrogeoloških i geotehničkih parametara te izradom odgovarajućih numeričkih modela mogu se adekvatno prognozirati i spriječiti mogući potencijalni hazardi u vidu odrona stijenskog materijala, pojava poplava te propagacije tokova krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Treba imati u vidu da odron stijenskog materijala u interakciji s fluidom nastalim rušenjem brane može izazvati značajne propagacije tokova krupnozrnatog ili sitnozrnatog materijala (primjer brane Valići u neposrednoj blizini klizišta Grohovo nedaleko grada Rijeke). Primjenom numeričkih integriranih modela po dubini mogu se odrediti dosezi toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, brzine toka, konačni deponirani volumeni krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala kao i površine koje su pod utjecajem djelovanja takvog toka za različite moguće scenarije pri različitim vremenskim inkrementima. Provedbom simulacijskih analiza temeljenih na numeričkim modelima omogućuje se učinkovita procjena ulaznih parametara koji definiraju nastanak i pokretanje tečenja nevezanog stijenskog materijala na pojedinom ispitivanom području. Pritom je bitno sagledati kvantificirane vrijednosti svih ulaznih parametara i izlaznih vrijednosti za kvalitetan opis takvih tipova tečenja.

## LITERATURA

- [1] Blanc, T. (2008): *Numerical simulation of debris flows with the 2D - SPH depth integrated model*, Master's thesis, Escuela Superior de Ingeniera Informatica (ESII), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 115 pp.
- [2] Caine, N. (1980): *The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows*, Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, Wiley Article Stable, 62(1/2), pp. 23-27.
- [3] Corominas, J. (1996): *The angle of reach as a mobility index for small and large landslides*, Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271.
- [4] Costa, J.E., Williams, G.P. (1984): *Debris-flow dynamics (videotape)*, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep., 84-6606, Duration: 22,5 min.
- [5] Coussot, P., Meunier, M. (1995): *Recognition, Classification and Mechanical description of debris flows*, Earth Sciences Reviews, 40, pp. 209-227.

- 
- [6] Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996): *Landslide types and processes*, In: Turner, A.K., Schuster, R.L., (eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation research board, US National Research Council, Special Report 247, Washington, pp. 36-75.
- [7] Davies, T.R., Phillips, C.J., Pearce, A.J., Zhang, X.B. (1992): *Debris flow behaviour - an integrated overview*, In *Erosion, debris flow and environment in mountain regions* (Proceedings of Chengdu Symposium, June 1992), IAHS Publication, No. 209.
- [8] Hungr, O. (1995): *A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches*, Canadian Geotechnical Journal, 32, pp. 610-623.
- [9] Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014): *The Varnes classification of landslide types, an update*, Landslides, 11, pp. 167-194.
- [10] IRASMOS (Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements) (2008): *Deliverable D3.1 Hazard mapping of extremely rapid mass movements in Europe State of the art methods in practice*, Project No. 018412, Specific Targeted Research Project (Edited by: Massimiliano Barbolini).
- [11] Iverson, R.M. (1997): *The physics of debris flows*, Review of Geophysics, 35(3), pp. 245-296.
- [12] O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993): *Twodimensional water flood and mudflow simulation*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 119(2), pp. 244-261.
- [13] Perić, M. (2007): *Englesko hrvatski enciklopedijski rječnik istraživanja i proizvodnje nafte i plina*, Sveučilišni priručnik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta u Zagrebu, INA Industrija nafte d.d., Sektor korporativnih komunikacija, Grafocolor d.o.o. Zagreb, Zagreb, 1038 str.
- [14] Rickenmann, D. (1999): *Empirical relationships for debris flows*, Natural Hazards, 19, pp. 47-77.
- [15] Rickenmann, D. (2005): *Runout prediction methods*, In: Jakob, M., Hungr, O. (eds.), *Debris-Fow Hazards and Related Phenomena*, Praxis-Springer, pp. 263-282.
- [16] Takahashi, T. (2007): *Debris flow: Mechanics, Prediction and Counter Measures*, Taylor and Francis, 448 pages.
- [17] Varnes, D.J. (1978): *Slope movement types and processes*, In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC., pp. 11-33.
- [18] Watanabe, M., Ikeya, H. (1981): *Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima - Japan*, Erosion sediment transport measurement, International Association on Hydrol. Florence, Science Publication, 133, pp. 245-256.

- 
- [19] Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. (1997): *Murgangefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz*, Schlussbericht NFP 31, vdf-ETH, Zürich, Switzerland, 161 pp.
- [20] Žic, E. (2015): *Prilog modeliranju potencijalnih poplavnih tokova i tokova krupnozrnatog materijala u slivu Rječine*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 281 str.
- [21] Žic, E., Arbanas, Ž., Bićanić, N., Ožanić, N. (2015): *A model of Mudflow propagation downstream from the Grohovo Landslide near the City of Rijeka (Croatia)*, Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS), 15, 1, pp. 293-313., doi:10.5194/nhess-15-293-2015.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**PRIMJENA SOLFEC RAČUNALNOG KODA  
ZA ANALIZU PROPAGACIJE NEVEZANOG  
STIJENSKOG MATERIJALA**

**APPLICATION OF THE SOLFEC COMPUTER  
CODE FOR ANALYSIS OF THE DEBRIS FLOW  
PROPAGATION**

**Elvis Žic<sup>a</sup>, (Nenad Bićanić)<sup>a</sup>, Tomasz Koziara<sup>b</sup>**

**SAŽETAK**

Analiza toka nevezanog stijenskog materijala vrlo je važna zbog procjene rizika i ograničavanja ranjivih područja u kojima su potrebne mjere ublažavanja. Pritom, numerički model može predstavljati vrlo točan i učinkovit alat za analizu toka takvog nevezanog stijenskog materijala kod kojih se pojavljuju izuzetno velike brzine propagacije. U ovom radu opisan je SOLFEC računalni kod koji omogućava simulaciju sustava više tijela (blokova ili čestica) s ograničenjima. SOLFEC provodi proračun dinamike kontakata na temelju metode Moreau i Jean te rješava dinamičke probleme uslijed kontakata uz trenje. Također, SOLFEC kod može poslužiti kao razvojna platforma za druge aspekte metoda vremenskih koraka (npr. detekciju kontakata, vrijeme integracije i sl.). Računalni kod implementira nekoliko kinematskih modela, kao i nekoliko algoritama za detekciju kontakata, nekoliko vremenskih integratora i nekoliko rješenja ograničenja. Kod je primijenjen na erozijskoj bazi vodotoka Slani potok u slivu vodotoka Dubračine.

---

<sup>a</sup> Građevinski fakultet Rijeka, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, elvis.zic@uniri.hr, bicanic@civil.gla.ac.uk (preminuo 2016. godine)

<sup>b</sup> Rullion Engineering Ltd, Mansion House, 3 Bridgewater Embankment, Altrincham, WA14 4RW, UK, tomasz.koziara@durham.ac.uk

## ABSTRACT

The analysis of debris flow is very important because of the risk assessment and the limitation of vulnerable areas where mitigation measures are required. In doing so, the numerical model can be a very accurate and efficient tool for analyzing the flow of such unbound rock material at which extremely high velocity of flow propagation occurs. This paper describes a SOLFEC computer code aimed at simulating multi-body systems (blocks or particles) with constraints. The code calculates the Dynamics of Contact based on the Moreau and Jean method. One of its main goals is to solve dynamic friction contact problems. Also, the SOLFEC code can serve as a development platform for other aspects of time step methods (e.g. contact detection, integration time, etc.). The code implements several kinematic models, as well as several contact detection algorithms, several time integrators, and several constraint solutions. The resulting computer code was applied on the erosion base of the Slani potok watercourse in the Dubračina water basin.

*KLJUČNE RIJEČI: SOLFEC računalni kod, numeričko modeliranje, suspendirani materijal, erozijska baza, vodotok Slani potok*

*KEYWORDS: SOLFEC computer code, numerical modeling, suspended material, erosion base, Slani potok watercourse*

## 1. UVOD

Temeljito razumijevanje mehanizma pokretanja i mobiliziranja pojave toka nevezanog stijenskog materijala igra ulogu od iznimne važnosti za projektiranje odgovarajućih mjera prevencije i ublažavanja. Postizanje skupa konstitutivnih jednadžbi za opis toka takvog materijala zadatak je od posebne važnosti (Takahashi, 2007). Matematički (analitički) modeli se mogu grubo kategorizirati na temelju tri svojstva: prisutnost jednadžbi za razvoj erozijskog djelovanja po dnu kanala, broj faza toka (jednofazno ili višefazno tečenje) i odabir reoloških zakona (Ghilardi i drugi, 2000). Vjerodostojnu provjeru modela, omogućuje tek njegova usporedba s ponašanjem modeliranog sustava u uvjetima koji su relevantni s obzirom na svrhu modeliranja. Metode na temelju kojih se baziraju numerički modeli moraju biti kvantitativne, točne, objektivne i moraju biti dostupne. Danas u svijetu postoji nekoliko numeričkih simulacijskih programa koji se primjenjuju u analizi tečenja sitnozrnatog i krupnozrnatog nevezanog stijenskog materijala, a to su: SPH simulacijski program, PFC<sup>3D</sup>, SOLFEC, FLO-2D te MIKE 11. Većina numeričkih modela za opis toka nevezanog materijala temelje se na zakonu očuvanja mase i količini gibanja, ali samo neki od njih uzimaju u obzir erozijsko djelovanje. Reološka svojstva toka nevezanog materijala ovise o različitim faktorima, kao što je koncentracija suspendiranih čestica, granulometrijski sastav i oblik čestica, trenje među česticama i porni tlak. Danas u praksi postoji nekoliko reoloških zakona (modela) za opis toka nevezanog materijala. Oni se klasificiraju kao:

Newtonovi reološki zakoni, linearni i nelinearni viskoplastični, dilatantni, disperzivni ili turbulentni zakoni naprezanja, biviskozni Binghamovi zakoni i zakoni trenja (Žic, 2015). Razvoj složenih numeričkih modela za opis toka nevezanog materijala ima važnu primjenu u procjeni opasnosti i njenoj analizi te omogućuju kvantitativne procjene toka nevezanog materijala.

## 2. SOLFEC RAČUNALNI KOD

SOLFEC računalni kod simulira dinamički sustav više tijela uz strogo uvažavanje uvjeta na međusobnom kontaktu tijela (Koziara, 2010). Kod se bazira na proračunu dinamike kontakata temeljem metode Moreau i Jean (Moreau, 1988) koja zadovoljavanje rubnih uvjeta na kontaktu tretira implicitno. SOLFEC je „open source“ simulacijski računalni kod temeljen na NSCD metodologiji (eng. *Non Smooth Contact Dynamics*) u kojoj su glavne varijable brzina i impulsi kontaktnih sila. Glavni cilj je osiguranje kvalitetne i robusne simulacijske platforme za rješavanje dinamičkih problema za promjenjive kontakte i trenje. Računalni kod provodi numeričku integraciju jednadžbi gibanja uz detekciju i rezoluciju uvjeta na kontaktu. Unutar koda postoji niz algoritamskih detalja poput raznih shema vremenskih integratora, nekoliko modela deformabilnosti tijela (kruti, pseudo-kruti, modeli s konačnim elementima), kao i nekoliko algoritama za detekciju (otkrivanje) kontakata te nekoliko rješenja za simultano zadovoljenje uvjeta na kontaktima, kao na primjer Gauss-Seidelova metoda numeričke integracije (Moreau, 1988). Definiranje ulaznih datoteka u SOLFEC računalnom kodu su pisane u Python programskom jeziku, na temelju kojeg se može proširiti funkcionalnost SOLFEC-a dodavanjem brojnih objekata i podprograma. Računalni kod se izvršava na više načina: interaktivno (kod se izvršava u trenutku kada ga pišemo), skriptno (kod se sprema unutar tekstualne datoteke koja se izvršava u trenutku pokretanja skripte, datoteke) te umetnuti način (računalni kod je moguće izvršavati unutar programa pisanog u drugim programskim jezicima). Definiranim naredbama u Python računalnom kodu povezuje se ulazna datoteka koja specificira geometriju samog terena (generiranje mreže pomoću metode konačnih elemenata) (Koziara, 2010). Kreiranjem pojedinih SOLFEC objekata definiraju se karakteristike površine materijala po kojem teče tekućina, kao i tip materijala (njegov oblik, veličina, fizikalna svojstva i sl.) koji će se nizvodno propagirati (Tablica 1). Svaki „objekt“ u SOLFEC kodu ima određeni broj specificiranih entiteta koji određuju svojstva i oblik objekta (Žic, 2015). Stoga je važno definiranje fizikalnih parametara (Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, koeficijent trenja i kohezije i sl.) kako bi se što bolje opisao kontakt između tekućine i nepokretnog tla te tekućine i suspendiranog materijala u toku. Python zapisom se dalje odabire jedan od algoritama za vremensku integraciju jednadžbi gibanja, kao i odabir iterativne metode za zadovoljenje kontaktnih rubnih uvjeta (Koziara, 2010; Žic, 2015). SOLFEC simulacije primjenjuju tzv. Signorini-Coulombov neglatki rubni uvjet na kontaktnoj plohi između tijela prilikom čega se definiraju koeficijent trenja i kohezije, koeficijent restitucije i amortizacija kru-



tosti. Sheme vremenskih integracija koje se mogu primijeniti u SOLFEC računalnom kodu prikazane su u Tablici 2.

Tablica 1. Vrste konfiguracija u SOLFEC računalnom kodu (Koziara, 2010)

Tip tijela	Opis konfiguracije
„RIGID“	Stupčana matrica rotacije slijedi trenutni centar mase
„PSEUDO_RIGID“	Stupčani deformacijski gradijent slijedi trenutni centar mase
„FINITE_ELEMENT“	Trenutne koordinate $x,y,z$ čvorova mreže
„OBSTACLE“	Nema objekata definiranih Python programskim jezikom

Unutar SOLFEC-a primjenjuje se nelinearna blok Gauss-Seidelova metoda za iterativno rješavanje simultanog zadovoljenja kontaktnih uvjeta na svim mjestima gdje su tijela u dodiru (Koziara, 2010). U svrhu dobivanja numeričke simulacije potrebno je definirati određena ograničenja na objekte koji su definirani unutar numeričkog koda. Neki od tih ograničenja koji se primjenjuju u SOLFEC računalnom kodu su: GRAVITY (potprogram koji definira gravitacijsko ubrzanje), FORCE (definira mjesto djelovanja sile na tijelo), TORQUE (definira okretni moment na kruto tijelo), (Žic, 2015).

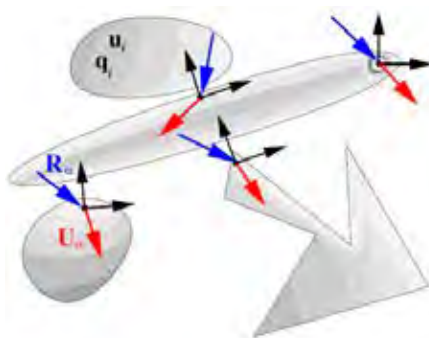
Tablica 2. Sheme vremenskih integracija u SOLFEC računalnom kodu (Koziara, 2010)

Sheme	Kinematika (tijela)	Napomene
'DEFAULT'	Svi	Koristi integrator zadanog vremena, bez obzira na temeljnu kinematiku
'RIG_POS'	Kruto	EksPLICITNI, pozitivan energetske doprinosa, bez očuvanja količine gibanja
'RIG_NEG'	Kruto	EksPLICITNI, negativan energetske doprinosa, točno očuvanje količine gibanja; po pretpostavci za kinematiku krutih tijela
'RIG_IMP'	Kruto	PolueksPLICITNA, nema energetske doprinosa i točnog očuvanja količine gibanja
'DEF_EXP'	Polu-kruto, konačni element	EksPLICITNA shema; po pretpostavci za kinematiku deformabilnih tijela, očuvanje energije i količine gibanja, uvjetno stabilna
'DEF_LIM'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; očuvanje energije i količine gibanja, stabilna za umjerene korake
'DEF_LIM2'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; jaka numerička disipacija, stabilna za velike korake
'DEF_IMP'	Polu-kruto, konačni element	Linearno implicitna shema; očuvanje energije i količine gibanja, stabilna za velike korake

### 3. VLADAJUĆE JEDNADŽBE U SOLFEC RAČUNALNOM KODU

U nastavku slijede teoretske osnove i formulacija neglatke kontaktne mehanike korištena u razvoju SOLFEC računalnog koda (Kozijara, 2010; Žic i drugi, 2014) u svrhu lakšeg razumijevanja. Na Slici 1 postoje četiri različita tijela. Položaj svake točke svakog tijela definiran je konfiguracijom  $q$ , dok je brzina svake točke svakog tijela označena brzinom  $u$ . S parametrima  $q$  i  $u$  prikupljaju se sve konfiguracije i brzine svih tijela. Za poznato proteklo vrijeme brzina, vremenska konfiguracija glasi:

$$q(t) = q(0) + \int_0^t u dt \quad (1)$$



Slika 1. Četiri različita tijela za primjenu u SOLFEC računalnom kodu (Kozijara, 2010)

Brzina se dobiva integrirajući Newtonov zakon:

$$u(t) = u(0) + M^{-1} \int_0^t (f + H^T R) dt \quad (2)$$

gdje je  $M$  inercijski operator (ovdje prikazan kao konstanta),  $f$  je vanjska sila,  $H$  linearni operator, dok  $R$  definira vektor kontaktnih sila u određenim točkama kontakata  $R_\alpha$ . Dok se integrira gibanje tijela, prati se broj lokalnih koordinatnih sustava (lokalni okviri) na svakom kontaktu. Svaki lokalni okvir se odnosi na par točaka, koji pripadaju dvama različitim tijelima. Promatrač postavljen na lokalnom okviru izračunava lokalne relativne brzine  $u_\alpha$  jedne od točaka, gledano iz perspektive druge točke. Tako vektor  $U$  sadrži sve lokalne brzine. Zatim se traži linearna transformacija  $H$ , tako da vrijedi:

$$U = Hu \quad (3)$$

Rubni uvjeti na kontaktu su opisani u lokalnom koordinatnom sustavu. Lokalnim relativnim brzinama odgovaraju lokalni reaktivni impulsi  $R_\alpha$ . To može biti zajednički opisano implicitnim odnosom:

$$C(U, R) = 0 \quad (4)$$

U cilju integracije (1) i (2), u svakom trenutku vremena rješavaju se implicitne relacije (4). Primjer numeričke aproksimacije takvog postupka se može opisati kao:

$$q^{t+\frac{h}{2}} = q^t + \frac{h}{2}u^t \rightarrow u^{t+h} = u^t + M^{-1}hf^{t+\frac{h}{2}} + M^{-1}H^T R \rightarrow q^{t+h} = q^{t+\frac{h}{2}} + \frac{h}{2}u^{t+h} \quad (5)$$

Kako se diskretni vremenski korak  $h$  ne pojavljuje u izrazu  $M^{-1}H^T R$ , tada  $R$  može biti tumačen kao impuls (kao integral reaktivne sile u intervalu  $[t, t+h]$ ). Na početku proračuna postoje  $q^0$  i  $u^0$  kao početni opisani uvjeti. Veličina vanjske sile ovisi o konfiguraciji i vremenskom trenutku, te slijedi:

$$f^{t+\frac{h}{2}} = f\left(q^{t+\frac{h}{2}}, t + \frac{h}{2}\right) \quad (6)$$

a uključuje i unutarnje i vanjske sile. Simetričan i pozitivno-definitan operator inercije

$$M = M(q^0) \quad (7)$$

ne ovisi o vremenu i izračunava se samo jednom. Linearni operator

$$H = H\left(q^{t+\frac{h}{2}}\right) \quad (8)$$

se izračunava u svakom vremenskom koraku. Broj redova linearnog operatora  $H$  ovisi o broju ograničenja. Zatim se izračunava:

$$B = H\left(u^t + M^{-1}hf^{t+\frac{h}{2}}\right) \quad (9)$$

i

$$W = HM^{-1}H^t \quad (10)$$

koja je simetrična i polu-pozitivno definitna. Linearna transformacija  $U=B+WR$  (lokalni problem dinamike) daje reaktivni impuls  $R$  vezan za lokalnu relativnu brzinu  $U=Hu^{t+h}$  u trenutku  $t+h$ . Slijedi:

$$C(U, R) = C(B + WR, R) = C(R) = 0 \quad (11)$$

gdje je  $C$  nelinearan i obično glatki operator. U svakom vremenskom koraku implicitna jednačina  $C(R)=0$  mora biti zadovoljena. Detektiranje kontaktnih točaka u SOLFEC računalnom kodu se temelji na činjenici da prolazimo iznad svih kontaktnih mjesta i uspoređujemo svaki od njih s ostalim susjednim kontaktima kroz zajednička tijela. Ukoliko je područje kontakta manje od površine topološki susjednog kontakta, tada ga uklanjamo. Isto se događa ako dvije kontaktne točke koincidiraju. Površinski materijal je dodijeljen za uparivanje površina. Za definiranje površinskog materijala u SOLFEC računalnom kodu koristi se Signorini-Coulombov zakon. Uvjet brzine Signoriniega zakona piše se u obliku:

$$\bar{U}_N \geq 0 \quad R_N \geq 0 \quad \bar{U}_N R_N = 0 \quad (12)$$

gdje je  $\bar{U}_N = U_N^{t+h} + \eta \min(0, U_N^t)$  koeficijent restitucije,  $U_N$  je normalna relativna brzina, a  $R_N$  je normalna reakcija. Normalni smjer je u skladu s pozitivnim smjerom brzine (Koziara, 2010).

Prostorna diskretizacija koristi metodu konačnih elemenata (MKE), koja aproksimira domenu rješenja konačnim brojem susjednih elemenata raspoređenih u proizvoljne trokute, tetraedre i heksaedre. Nepoznanice problema su komponente vektora brzine,  $u$  u smjeru osi  $x$ ,  $v$  u smjeru osi  $y$  i  $w$  u smjeru osi  $z$ , definirane u centrima svakog elementa, dok se ostale skalarne vrijednosti definiraju u centru svakog elementa. Prateći odabir tipa numeričke mreže, potrebno je i odabrati aproksimaciju koja će se koristiti u diskretizacijskom procesu. Kod MKE primijenjene u SOLFEC kodu proračunska domena je podijeljena u sustav diskretnih volumena ili konačnih elemenata općeg oblika. Rezultat diskretizacije je sustav algebarskih jednadžbi koji je linearan ili nelinearan, ovisno o prirodi pripadajuće parcijalno diferencijalne jednadžbe od koje je sustav nastao. Nakon diskretizacije prostornih derivacija u glavnim jednadžbama postiže se povezani sustav nelinearnih diferencijalnih jednadžbi oblika:

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}(\vec{u}, t) \quad (13)$$

Takva jednadžba se može integrirati po vremenu koristeći neku od metoda za rješavanje problema nestabilnih tokova (Kozijara, 2010). Za rješavanje stabilnih tokova, prostorna diskretizacija vodi do povezanog sustava nelinearnih algebarskih jednadžbi oblika  $\vec{F}(\vec{u}) = 0$ . Za dobivanje rješenja potrebno je uvesti određenu iterativnu metodu kako bi se riješila nelinearnost gore navedenih jednadžbi.

#### 4. PRIMJENA SOLFEC RAČUNALNOG KODA

Na temelju metodologije rada SOLFEC računalnog koda kreiran je numerički model za propagaciju toka stijenskog materijala na bujičnom vodotoku Slani potok i njegove erozijske baze unutar sliva vodotoka Dubračine (Slika 2). Vodotok Slani potok se nalazi u slivu vodotoka Dubračine (43,5 km<sup>2</sup>), smještenom u Primorsko-goranskoj županiji u zaleđu grada Crikvenice koja se proteže u smjeru SZ-JI, paralelno s jadranskom obalom. U slivu Dubračine je prisutna intenzivna erozija, koja je osobito jako izražena na padinama Slanog potoka, gdje je formiran krajolik tipa tzv. „badlands“ (Benac i drugi, 2005). Sliv Slanog potoka (oko 2 km<sup>2</sup>) se nalazi između 50 i 700 m n.m. Donji dio sliva (0,9 km<sup>2</sup>) prekriven je flišom, te čini glavninu površinskog otjecanja. Gornji dio sliva je većinom krška zaravan zanemarivog otjecanja. Zahvaćena površina erozijske baze bujičnog vodotoka Slani potok je veličine oko 3 km<sup>2</sup>, čime su ugrožena okolna naselja Belgrad, Baretići, Grižane i Kamenjak, kao i okolne ceste. Retencije unutar vodotoka su gotovo u potpunosti ispunjene nanosom, pretežno prahom i blatom.

Srednji nagib sliva Slanog potoka je 22 %, što sliv karakterizira kao veoma strm (Ružić i drugi, 2011). Za potrebe izrade numeričkih modela propagacije toka stijenskog materijala izrađen je digitalni model terena za sliv Dubračine i bujični vodotok Slani potok (Žic i drugi, 2014). Flišna erozijska baza iznad vodotoka Slani potok predstavlja vrlo trošan i nestabilan materijal koji pri jakim intenzitetima oborina odronjava sti-

jenski materijal i transportira ga do manjih bočnih pritoka koji u konačnici dospijevaju u vodotok Slani potok (Slika 2b).



Slika 2. a) bujični vodotok Slani potok (zimski period), b) erozijska baza vodotoka Slani potok

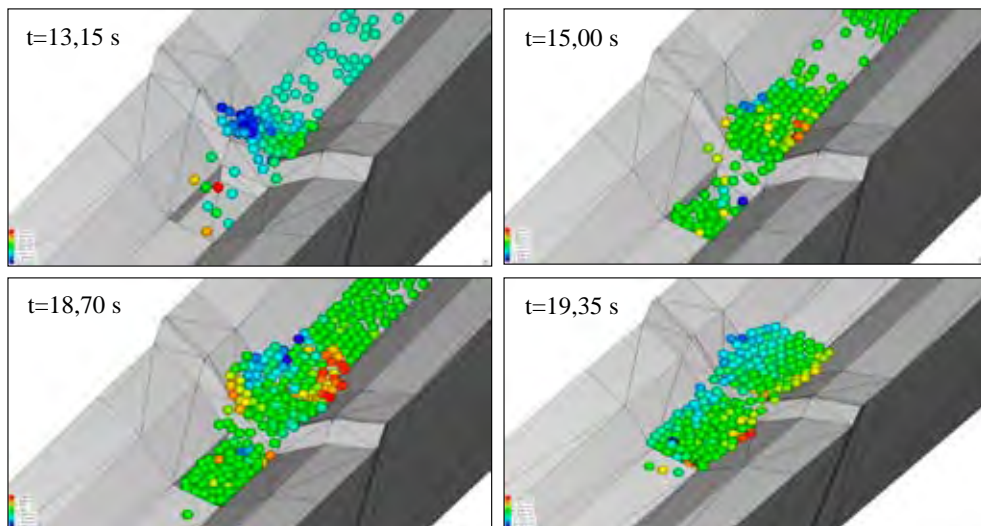
U SOLFEC računalnom kodu je težnja da se iterativnim postupkom zadovolje neglatki rubni uvjeti na svim kontaktima (klizanje, statičko trenje i sl.). Pritom se koristi Gauss-Seidelova metoda za traženje reakcija na jednom kontaktu, uz zadovoljavanje rubnog uvjeta na tom istom mjestu, a da su pri tome reakcije na svim ostalim lokacijama „zamrznute“. Budući da se na svakoj lokaciji pri tome mijenja reakcija, treba se vratiti na stare lokacije pa postupak iterativno prelazi preko svih lokacija, dok uvjeti nisu simultano posvuda zadovoljeni. Iterativne metode u SOLFEC-u daju dobra rješenja za mali  $\Delta t$ .

Problemi s velikim rasponom vremenskih koraka su najveća poteškoća na koju se nailazi pri rješavanju diferencijalnih jednadžbi. Za stabilnu integraciju potreban je mali vremenski korak, tako da je pogreška ograničavanja vremenskog koraka mnogo manja od pogreške ograničavanja prostornog koraka.

Za područje vodotoka Slani potok napravljeno je nekoliko numeričkih simulacija za procjenu osjetljivosti propagacije toka stijenskog materijala na promjene vrijednosti modelskih parametara. Pri tome se varirao: koeficijent trenja 0-0,3 Pas, promjer čestica 0,005-0,3 m, gustoća krupnozrnatog materijala 1800-2100 kg/m<sup>3</sup>, Poissonov koeficijent 0,2-0,25 dok je Youngov modul elastičnosti uzet kao konstantna vrijednost od 15·10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>. Vremenski korak u proračunu je uzet s 0,005 s. Broj čestica koje propagiraju u tečenju se dobiva generiranjem dimenzija (širine, duljine i visine) pojedinih kliznih ploha unutar računalnog koda, te odabira promjera materijala. U nastavku su prikazane simulacije taloženja nevezanog materijala na jednoj od taložnica unutar vodotoka Slani potok (Slika 3). Iako je u modelima uzet relativno veliki promjer zrna materijala (formalno su to u prirodi manji kameni obluci!) valja napomenuti da su kod promatranja modela punjenja gornje i donje taložnice na samom početku uzimani relativno mali promjeri čestica, gdje se željela analizirati propagacija toka sitnozrnatog materijala s erozijske flišne baze. Međutim, zbog velikog broja sitnozrnatih čestica broj matematičkih operacija znatno raste u kratkom vremenskom

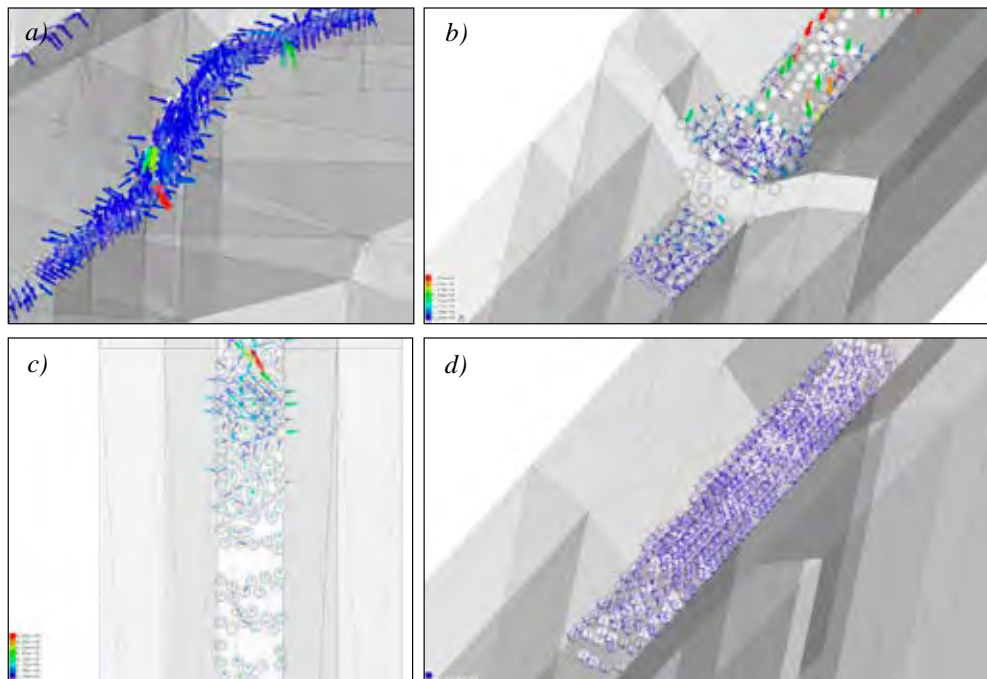
periodu (veliki broj kontaktnih točaka) za što je potrebno mnogo memorije, kao i postojanje određenog super klastera.

Tijekom simulacije u SOLFEC kodu u svakom se trenutku mogu pregledavati dobivene fizikalne veličine: pomaci čestica u x, y i z smjeru ( $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$ ), brzine čestica  $V_x$ ,  $V_y$  i  $V_z$ , veličina napreznja u odabranom smjeru ili ravnini ( $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$ ,  $S_{yz}$ ), sile u kontaktnim točkama, reakcije čestica s okolnim terenom, reakcije među česticama i još mnogo drugih fizikalnih parametara (Slika 4).



*Slika 3. Simulacija tečenja suspendiranog nevezanog materijala na primjeru gornje i donje taložnice unutar bujičnog vodotoka Slani potok (Žic i drugi, 2014)*

Nakon proračuna u SOLFEC kodu se za svaku traženu fizikalnu veličinu može izvršiti detaljan ispis podataka u vremenu. Primjenom naredbe HISTORY može se dobiti točna pozicija određene suspendirane čestice u vremenu na temelju jasno definiranih geometrijskih položaja gornje i donje taložnice u modelu. U radu Žic i drugi (2014) detaljno je proveden cijeli proračun izrade numeričkog modela propagacije stijenskog materijala u SOLFEC kodu, izrada i generiranje mreže pomoću MKE te je provedena verifikacija modela s provedenim terenskim mjerenjima na dijelu gornje i donje taložnice vodotoka Slani potok. Može se konstatirati da izrađeni numerički model u SOLFEC kodu vrlo dobro opisuje tok stijenskog materijala, odnosno punjenje gornje i donje taložnice suspendiranim materijalom.



Slika 4. Vizualni prikazi a) kontaktnih točaka, b) kontaktnih sila, c) tangencijalnih naprezanja i brzina, d) reznih sila unutar SOLFEC postprocesorskog dijela (Žic i drugi, 2014)

## 5. ZAKLJUČAK

Primjenom SOLFEC računalnog koda mogu se provoditi simulacije toka nevezanog krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala. Time se omogućava dobra procjena utjecaja koji definiraju nastanak i pokretanje takvih čestica na određenom području. Računalni kod daje kvantificirane vrijednosti svih ulaznih parametara i izlaznih vrijednosti koji su potrebni za kalibraciju i verifikaciju numeričkog modela. Znanstveni doprinos SOLFEC računalnog koda je proširenje saznanja i bolje razumijevanje fizike procesa propagacije krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, kao i mogućnost dobivanja grube procjene opasnosti i rizika takvih tipova tečenja. Primjenom Python programskog jezika može se postići implementiranje erozijskih zakona unutar SOLFEC koda čime bi se u budućnosti moglo bolje sagledavati pojave propagacije nevezanog stijenskog materijala po određenoj konfiguraciji terena. Prikazani numerički model u SOLFEC kodu se može kvalitativno upotrijebiti za primjenu i na drugim sličnim vodotocima, bujicama, rijekama ili kanalima. Primjenom numeričkog modela izrađenog u SOLFEC kodu mogu se odrediti doseg toka krupnozrnatog i sitnozrnatog materijala, brzina toka, konačni istaloženi volumen materijala kao i površine pod utjecajem takvih tokova. Svakako bi bio zanimljiv razvoj nadogradnje SOLFEC računalnog koda u 3D, čiji bi rezultati zasigurno bili točniji od 2D modela, a što pridonosi realnijem opisivanju toka nevezanih materijala.

**LITERATURA**

- [1] Benac, Č., Jurak, V., Oštrić, M., Holjević, D., Petrović, G. (2005): *Pojava prekomjerne erozije u području Slanog potoka (Vinodolska dolina)*, U: Velić, I., Vlahović, I., Biondić, R.: Knjiga sažetaka 3. hrvatskog geološkog kongresa, Zagreb, str. 173-174.
- [2] Ghilardi, P., Natale, L., Savi, F. (2000): *Debris flow propagation and deposition on urbanized alluvial fans*, Excerpta, 14, pp. 7-20.
- [3] Koziara, T. (2010): *Solfec User Manual*, University of Glasgow, pp. 55.
- [4] Moreau, J.J. (1988): *Unilateral Contact and Dry Friction in Finite Freedom Dynamics*, volume 302 of Non-smooth Mechanics and Applications, CISM Courses and Lectures, Springer, Wien.
- [5] Ružić, I., Sušanj, I., Ožanić, N., Žic, E. (2011): *Otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine na području Vinodolske doline*, 5. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena, Opatija, str. 225-236.
- [6] Takahashi, T. (2007): *Debris flow: Mechanics, Prediction and Counter Measures*, Taylor and Francis, 448 pages, URL: <http://congress.cimne.com/particles2009/frontal/default.asp>
- [7] Žic, E. (2015): *Prilog modeliranju potencijalnih poplavnih tokova i tokova krupnozrnatog materijala u slivu Rječine*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, 281 str.
- [8] Žic, E., Bićanić, N., Koziara, T., Ožanić, N. (2014): *The numerical modelling of suspended sediment propagation in small torrents with the application of the Contact Dynamics Method*, Tehnical Gazette, 21(5), pp. 939-952.





**II.**

**PROŠIRENI  
SAŽETCI**



OKRUGLI STOL

***Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi***

Varaždin, 2020.

---

**2D MODEL PRONOSA NANOSA U  
AKUMULACIJI HIDROELEKTRANE VARAŽDIN**

**2D SEDIMENT TRANSPORT MODEL IN RESERVOIR  
OF THE HYDRO POWER PLANT VARAŽDIN**

**Damir Bekić<sup>a</sup>, Goran Zrinski<sup>b</sup>**

*KLJUČNE RIJEČI: pronos nanosa, morfodinamički model, rijeka Drava, HE Varaždin, akumulacija*

*KEYWORDS: sediment transport, morphodynamic model, Drava River, HPP Varaždin, reservoir*

## **1. UVOD**

Hidroelektrana Varaždin je prva od tri hrvatske dravske hidroelektrane u Hrvatskoj i nalazi se između posljednje slovenske hidroelektrane HE Formin i HE Čakovec u Hrvatskoj. Uzvodni tok rijeke Drave kroz Austriju i Sloveniju je reguliran i energetski iskorišten izgradnjom niza hidroelektrana. Od 1978. u pogonu je HE Formin, nakon čega su puštene u pogon HE Varaždin 1975., HE Čakovec 1983. i HE Dubrava 1989. godine. HE Varaždin sastoji se od akumulacijskog jezera i pripadajućih obodnih nasipa, nasute i armirano-betonske brane te derivacijskog kanala sa strojarnicom.

Akumulacijsko jezero HE Varaždin u duljini od 3,5 km i širini 0,8 km ima zapreminu od  $7,4 \times 10^6$  m<sup>3</sup> kod normalnog uspora. Gornja voda brane u akumulaciji nalazi se između 190,00 m n.m. i 191,00 m n.m. Izgradnjom brana i akumulacijskih jezera prirodni tok rijeke Drave je usporen, a vodni režim i režim nanosa su izmijenjeni. Smanjenje brzine vode u akumulacijama na oko 0,1 m/s povećalo je taloženje nanosa

---

<sup>a</sup> Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26, Zagreb, 10000, Hrvatska, damir.bekic@grad.hr

<sup>b</sup> HEP Proizvodnja d.o.o. – PP HE Sjever, Medimurska 26c, Varaždin, 42000, Hrvatska, goran.zrinski@hep.hr

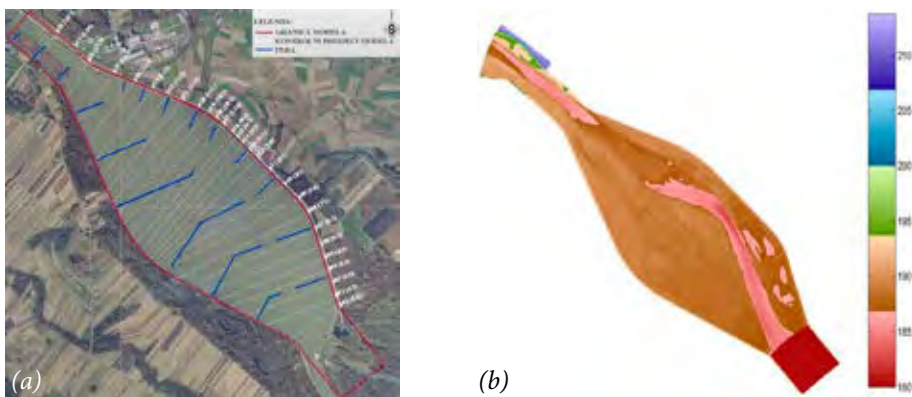
te se oko 30 % ukupnog volumena akumulacijskog jezera HE Varaždin zapunilo nanosom.

U cilju ublažavanja meandriranja korita unutar akumulacije pri prolasku velikih voda izvedena su poprečna pera koja se protežu od nasipa akumulacije do korita rijeke (Slika 1a, plave linije). Pera su izvedena od kamenog nabačaja širine oko 2 metra i visinski znatno više od postojećeg terena, tako da taloženje finog nanosa na inundacijama jezera do visine izvedenih pera ukazuje na veliku količinu nanosa u jezeru. Pera su na uzvodnom dijelu akumulacije izvedena iznad kote 190,00 m n.m., tako da je istaloženi nanos ušao u radni metar akumulacije.

Skraćivanje i snižavanje visine postojećih poprečnih pera u akumulaciji jedna je od mjera kojom se može utjecati na povećanje brzine vode i ublažavanje postojećeg trenda taloženja nanosa u akumulaciji. U radu se prikazuju rezultati analize mjera snižavanja visine i skraćivanja poprečnih pera na dinamiku pronosa nanosa u akumulaciji HE Varaždin (Bekić, 2013a). Dinamika pronosa nanosa analizirana je korištenjem paketa Delft3D koji uključuje 2d modeliranje hidrodinamičkih i morfodinamičkih procesa te njihovu međusobnu interakciju na ortogonalnoj zakrivljenoj mreži točaka (Bekić, 2013b).

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Morfodinamički model akumulacijskog jezera izrađen je od brane HE Varaždin uzvodno do mosta Ormož u duljini od 3+636 m temeljem satnih hidroloških podataka, hidrografskih snimaka dna te monitoringa granulometrijskog sastava nanosa s dna jezera i suspendiranog nanosa Drave (Gilja, 2009). Satne simulacije izrađene su za različite varijante računskih parametara modela, a pouzdanost modela ocijenjena je usporedbom računске i izmjerene geometrije na kontrolnim poprečnim presjecima (Slika 1a, bijele linije).



Slika 1. Akumulacijsko jezero HE Varaždin – (a) prikaz lokacija pera i kontrolnih poprečnih profila i (b) računska geometrija modela iz 2002. godine

Početa geometrija modela izrađena je za 2002. godinu (Slika 1b), a morfodinamičke simulacije provedene su za razdoblje 2002.-2011. godine. Kalibracija modela izvršena je detaljnom analizom pronosa nanosa unutar korita i na inundaciji na 28 kontrolnih profila varirajući sastav materijala u koritu, sastav i prostorni raspored materijala na inundacijama, unos suspendiranog materijala u model, brzinu taloženja suspendiranog materijala i morfološki faktor simulacije.

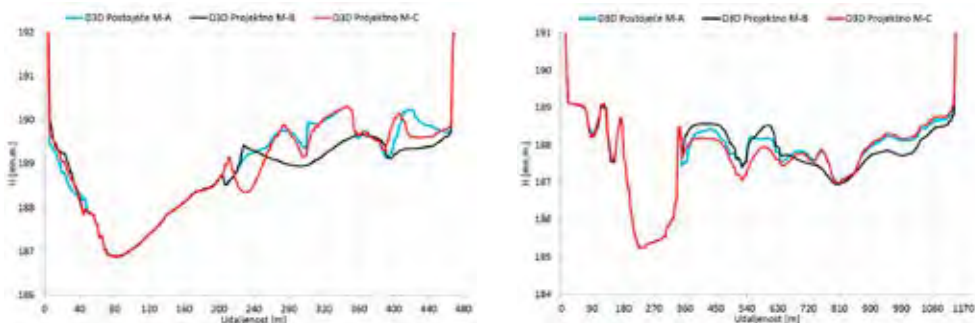
Rezultati morfodinamičkih simulacija u postojećem stanju pokazuju da je područje akumulacije moguće podijeliti na (i) uzvodni dio akumulacije s najvećim brzinama vode koje je izloženo erozijskim procesima u glavnom koritu, (ii) prijelazni dio akumulacije s miješanim procesima slabe erozije u uzvodnom dijelu i taloženjem u nizvodnom dijelu te (iii) nizvodni dio akumulacije s taloženjem sitnijih čestica na inundacijama.

U projektnom stanju izvršene su morfodinamičke simulacije sa sniženjem pera i simulacije sa skraćanjem pera na desnom dijelu akumulacije HE Varaždin uz korištenje računskih parametara iz kalibracije modela. Simulacije sa sniženjem pera na desnoj inundaciji jezera (Slika 2, crno) pokazuju relativno mali utjecaj na dinamiku pronosa nanosa u glavnom koritu i lijevoj inundaciji, ali da je i dno na desnoj inundaciji izloženo erozijskim procesima duž cijele dužine jezera.

Linija skraćenja pera na desnoj inundaciji odabrana je na način da se skraćenje pera izvrši na hidraulički prihvatljiv način, uz uvažavanje rezultata hidromorfološkog modela postojećeg stanja i sigurnosti građevinskih objekata. Simulacije sa skraćanjem pera na desnoj inundaciji jezera (Slika 2, crveno) pokazuju relativno mali utjecaj na dinamiku pronosa nanosa u glavnom koritu i lijevoj inundaciji, ali i erozijske procese duž desne inundacije uzduž glavnog korita. Duž cijele nožice desnog nasipa akumulacije HE Varaždin pokazuje se da dno zadržava postojeći oblik, no na uzvodnom dijelu akumulacije pokazuju se određene manje nestabilnosti dna na desnom dijelu inundacije, što ukazuje na potrebu postavljanja dodatnih pera.

(a) kontrolni profil p25

(b) kontrolni profil p17



Slika 2. Usporedba rezultata modela za projektno stanje sa snižavanjem pera (crno) i skraćivanjem pera (crveno) s rezultatima modela za postojeće stanje za (a) uzvodni i (b) nizvodni dio jezera

### 3. ZAKLJUČAK

Rezultati kalibracije morfodinamičkog modela pokazuju da je moguće pouzdano simulirati procese erozije i taloženja nanosa kako u glavnom koritu tako i na inundaciji duž cijelog jezera HE Varaždin. Simulacije u projektnom stanju pokazuju ne samo očekivane procese pronosa nanosa nego i lokacije potrebnih mjera za ublažavanje negativnih posljedica predloženih mjera na sigurnost postojećih objekata. Rezultati simulacija hidrodinamike i pronosa nanosa u akumulaciji HE Varaždin ukazuju da detaljniji morfodinamički modeli (2d, 3d) mogu pouzdano simulirati dugovremene procese u jezeru te nužnost primjene 2d ili 3d modela kod ocjene primjene različitih mjera za upravljanje pronosom nanosa u složenijim hidrauličkim uvjetima.

### LITERATURA

- [1] Bekić, D., Mioč, A., Kerin, I. (2013a): *2D numerical simulations of 2012 flood wave passage through HPP system on the River Drava*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering (Šoltész, A.), Slovak University of Technology, Bratislava, str. 51-70.
- [2] Bekić, D., Andročec, V., Kerin I., Mioč A., Gilja G. (2013b): *Analiza protočnosti rijeke Drave na širem području HE Varaždin*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Hidroing d.o.o.
- [3] Gilja, G., Bekić, D., Oskoruš, D. (2009): *Processing of Suspended Sediment Concentration Measurements on Drava River*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering (Cvetanka, P.), University Ss. Cyril and Methodius, Faculty of Civil Engineering, Skopje, str. 181-191.

# PROMJENE RIJEČNIH UŠĆA U ISTRI

## CHANGES OF RIVER MOUTHS IN ISTRIA

Čedomir Benac<sup>a</sup>, Maja Radišić<sup>a</sup>, Josip Rubinić<sup>a</sup>, Igor Ružić<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: erozija, fliš, riječno ušće, estuarij*

*KEYWORDS: erosion, flysch, river mouth, estuary*

### 1. UVOD

Središnji dio istarskog poluotoka, poznat kao Siva Istra, oblikovan je u paleogenskim sedimentnim stijenama: laporima i flišu. Na tom je području razvijena površinska hidrografska mreža svih značajnijih istarskih vodotoka. Upojnost i vodopropusnost terena pretežito su mali pa u razdobljima intenzivnih oborina prevladava površinsko otjecanje koje je često bujičnih značajki. Zato je Siva Istra, područje s najizraženijim erozijskim procesima na teritoriju Republike Hrvatske (Gulam i drugi, 2014). Zbog ubrzanog trošenja i intenzivne erozije, izražena je produkcija i pronos nanosa (Rubinić i drugi, 1998).

Na temelju dosadašnjih geoloških istraživanja i povijesnih podataka može se smatrati da su se i ušća Dragonje i Mirne nalazila u estuarijima, koji su s vremenom zatrpani pa su zato u posljednjim stoljećima vidljive manje promjene. Samo je u znatno većem estuariju Raše primjetna tijekom posljednjih nekoliko stoljeća značajna progresija ušća (Benac i drugi, 2017). Mjerenja pronosa nanosa obavljana su samo mjestimično i periodično. Zato je jedna od mogućnosti procjene veličine pronosa i akumulacije sedimenata bila analiza geomorfoloških promjena riječnih ušća. U ovom radu je prikazana usporedba topografskih karata iz različitih povijesnih razdoblja s onim suvremenim za područja nizvodnog toka i ušća Dragonje, Mirne i Raše. Također su

---

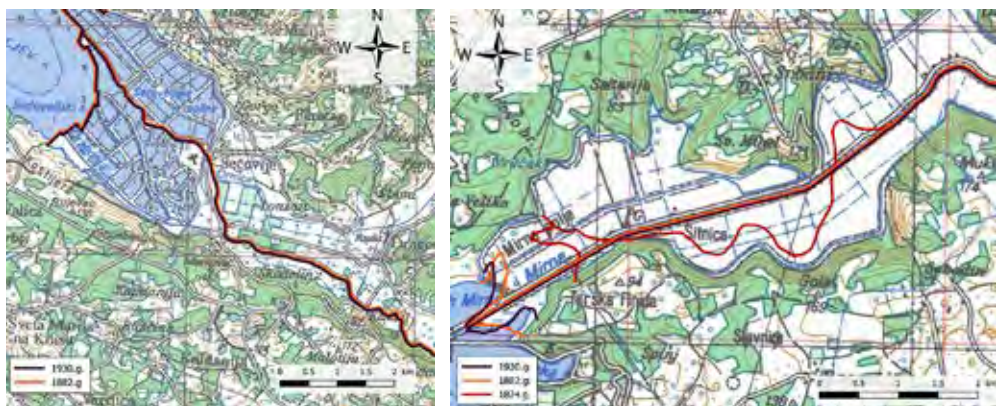
<sup>a</sup> Građevinski fakultet u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, cbenac@gradri.uniri.hr, maja.radisic@uniri.hr, jrubic@uniri.hr, iruzic@uniri.hr



objašnjene uzročno-posljedične veze između produkcije pronosa nanosa i progresije riječnih ušća.

## 2. REZULTATI

Pronađene su dovoljno precizne povijesne topografske karte u muzejima i arhivima. Usporedbom topografskih karata iz 1824., 1882., 1930. i 2011. godine, ustanovljeno je da se položaj korita rijeke Dragonje nije značajnije mijenjao uzvodno od mjesta Škrile. Na karti iz 2011. godine (Slika 1) vidljivo je da je tok Dragonje preusmjeren u kanal Sv. Odorika u razdoblju od 1948. do 1954. godine. Od tada je djelomično promijenjena sedimentacija u Piranskom zaljevu, ali procesi taloženja nanosa nisu dosad sustavno istraženi. Položaj obalne linije oko ušća nije promijenjen, zbog uređenja obale radi zaštite nekadašnjih solana (Slika 1).



Slika 1. Morfološke promjene doline i ušća Dragonje (lijevo) i Mirne (desno)

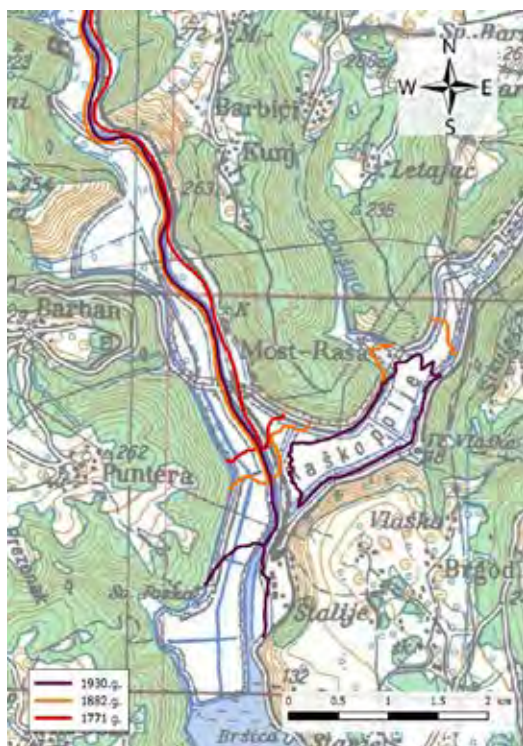
Usporedbom topografskih karata iz 1824., 1882., 1930. i 2011. godine, vidljiv je pomak od približno 350 m sjeverno od ušća Mirne, dok pomicanje obalne linije prema dolini južno od ušća može biti posljedica građevinskih zahvata (Slika 1). Prvi prokopi na ostrim krivinama i produbljivanje korita Mirne obavljani su već u razdoblju od 1829. do 1830. godine. Opsežniji radovi na regulaciji nizvodnog dijela doline Mirne, od ušća do Portonskog mosta, koji su uključivali i značajno premještanje korita, započeli su 1902. godine i s prekidima su trajali sve do 1955. godine. Do 1975. godine završena je regulacija uzvodnog dijela doline, sve do toplica Sv. Stjepana. Posljednji veći građevinski zahvat u slivu rijeke Mirne završen je 1988. godine. To je bila izgradnja brane i formiranje akumulacije na lijevoj pritoci Butoniga (Kos, 2005), pa je korito Mirne tijekom posljednjih stotinjak godina regulirano čitavim njegovim dolinskim tokom. To je imalo značajan utjecaj na intenzitet pronosa nanosa i na njegovo taloženje koje se danas događa gotovo u cijelosti na ušću Mirne u Tarskoj vali.

Usporedbom topografskih karata iz 1771., 1824., 1882., 1930. i 2011. godine, vidljiva je vrlo izražena progresija riječnog ušća Raše do tridesetih godina 20. stoljeća: oko

4 km u posljednjih 240 godina. Analizom povijesnih karata također je ustanovljena lateralna migracija korita rijeke Raše prema istoku u uzvodnom dijelu doline. Krajem 19. stoljeća ušće Raše se premjestilo prema istočnom kraku estuarija, gdje je uz glavni tok Raše počelo intenzivnije taloženje pa je nastalo Krapansko jezero, a njegove vode su bile bočate. U to jezero su utjecale vode iz krških izvora Fonte Gaia i Kokoti (Slika 2).

Prvi radovi na regulaciji Raškog polja odvijali su se od 1902. do 1908. godine, a nastavljeni su od 1925. do 1941. godine. Tada je izvršen prokop tunela i isušivanje jezera u Čepićkom polju, koje je do tada istjecalo u Rašu. Također je isušeno Krapansko jezero i uređeno ušće rijeke Raše. Od 1958. do 1963. godine završena je posljednja faza regulacije doline Raše koja je uključivala i melioracijske radove u Potpićanskom i Posertskom polju (Kos, 2005).

Primjetno smanjivanje dubine mora oko ušća jasan je pokazatelj pronosa i akumulacije nanosa. Usporedbom karata mjerila 1:5.000 ustanovljeno je da je morsko dno na ušću Raše postalo pliće za 4 do 5 m između 1950. i 1980. godine, a taloženje se odvija uglavnom zapadno od ušća (Benac i drugi, 2017).



Slika 2. Geomorfološke promjene doline i ušća Raše

### 3. ZAKLJUČAK

Razvitak progresije i sedimentacije na ušćima Dragonje, Mirne i Raše, ustanovljen je na temelju usporedbe dovoljno preciznih povijesnih karata s onim suvremenim. Usporedba je pokazala izrazito velike promjene u estuariju rijeke Raše, a znatno manje na ušću Mirne. Razlozi različite progresije ušća su velike razlike u produkciji nanosa i erozijska moć vodotoka u slivovima ovih rijeka, ali i djelomično različiti okoliši taloženja. Sedimentacija na ušćima Dragonje i Mirne izložena je djelovanju valova i morskih struja pa se dio sedimenata taloži daleko od ušća. Nasuprot tomu, u dubokom estuariju Raše zbiva se miješanje riječne i morske vode u tri kilometra dugačkoj zoni. Do tridesetih godina 20. stoljeća zaustavljeno je taloženje u nekadašnjim naplavnim ravninama, kao i prirodne promjene na ušćima tih rijeka zbog regulacije dolinskih dijelova korita. Primjetno je smanjenje pronosa nanosa već od kraja 20. stoljeća zbog smanjenja korištenja poljoprivrednog zemljišta i povećanja šumskih površina.

### LITERATURA

- [1] Benac, Č., Rubinić, J., Ružić, I., Radišić, M. (2017): *Geomorfološka evolucija riječnih dolina i ušća na istarskom poluotoku*, Hrvatske vode, 100, 71-80.
- [2] Gulam, V., Pollak, D., Podolszki, L. (2014): *The analysis of the flysch badlands inventory in central Istria, Croatia*, Geologia Croatica, 67(1), 1-15.
- [3] Kos, Z. (2005): *Vodogradnja*, Istarska enciklopedija (Bertoša, M., Matijašić, R. [urednik]), Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 884-885.
- [4] Rubinić, J., Bušelić, G., Kukuljan, I., Kosović, M. (1998): *Hidrološka analiza suspendiranog nanosa u istarskim vodama*, Hrvatske vode, 7 (27), 127-131.

### ZAHVALA

Rad je financiralo Sveučilište u Rijeci (projekti Uniri-tehnic-18-97 1232 i Uniri-tehnic-18-298 6805).

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# HIDRAULIČKO MODELIRANJE – SIMULACIJA PROCESA TALOŽENJA SEDIMENTA U INUNDACIJI

## HYDRAULIC MODELLING – SIMULATION OF THE SILTING UP PROCESS OF THE INUNDATION AREA

Zsuzsanna Engi <sup>a</sup>, Johanna Ficsor <sup>b</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: hidrauličko modeliranje, taloženje sedimenta, inundacija*

*KEYWORDS: hydraulic modeling, silting up, inundation area*

### 1. INTRODUCTION

In this paper the flooding and silting up processes of the inundation area in the downstream sections of the meandering river were studied. The results of different research methods were compared (sedimentological analyses, dating of the layers in the sediment sample, hydraulic modelling, geomorphological methods) to evaluate the possible effect of the changes of discharge on the flood hazard due to the climate change. The experimental area covers the Hungarian section of the River Mura with inundation area. The long-term tendency of the silting up process of the inundation area could be determined using the method of dating the layers in the sediment drill core which was taken from an old oxbow-lake. The sediment sample represents the

---

<sup>a</sup> West-Transdanubian Water Directorate, Vörösmarty u. 2, Szombathely, 9700, Hungary, engi.zsuzsanna@nyuduvizig.hu

<sup>b</sup> National University of Public Service – Faculty Of Water Sciences, Bajcsy-Zsilinszky u. 12-14, Baja, 6500, Hungary, ficsor.johanna@uni-nke.hu

environmental changes of the inundation area. In the study, the two-dimensional flood propagation hydraulic model and the adequate flood maps were developed for the inundation area. Using the calibrated and validated flood model for the simulations of the silting up processes of the inundation area, the silting up maps for different flood cases were generated. From the silting up process of the inundation areas we draw a conclusion about the development of the hydraulic status of the area. It is worth to examine those geomorphologic processes that are responsible for forming the present inundation area and water environment. The morphometric parameters (the central line and the width of the river, the amplitudes of meanders, the length of the bend) were analysed with the aim to understand the long-term development of the river and the inundation area. The observed time span was almost 230 years. Obtained data allowed analysis of the status for the years 1785, 1860, 1880, 1920, 1976, 2002 and 2014. Based on the results adequate interventions could be projected for the decreasing of flood hazard in the inundation area.

## 2. METHODS AND RESULTS

### *2.1. Sedimentological analyses of the samples and dating of the layers in the sample*

#### *The experimental area*

In order to determine the tendency of the silting up process of the inundation area the sediment sample was taken from the oxbow lake Hosszúvíz (in the 2D model there is the monitoring point). The sampling location has been an oxbow lake approximately since 1830.

#### *Dating of the layers in the sediment samples*

The layers of sediment connecting to flood events could be separated on the X-ray image. The sedimentology analyses were also done and the grain size distributions of 195 sediment samples were analyzed. The sand fraction grains were taken into account for the dating of the drill core. The increased velocity transports the larger fraction during the flood events. On the grain size distribution curve the sediment of floods from the years 1972 and 1998 could be identified very clearly (Engi, 2016). The dating of the sediment samples was done and the tendency of the silting up process of the inundation area was calculated. The value is 1.17 cm/year (Engi, 2016; Engi et al., 2016 b). The method gives an adequate long-term forecast for the future silting up process. The result was compared with the similar data of other Hungarian floodplains.

### *2.2. Hydraulic modelling - Simulation of flooding of the inundation area*

#### *The experimental areas and the modelling system*

The experimental area covers the Hungarian section of the Mura River with the inundation area, Figure 1. The model was built from 9 rkm to 48 rkm. For detailed

visualization of the results in 20-60 points, monitoring cross-sections (monitoring profiles) were selected in the 2D model. To compare areas (river section and floodplain) with different effects of river training or regulation works in the past, 4 minor experimental areas were also selected. MIKE 2D FM modelling system was used for the hydraulic modelling. The model was developed using DEM data from the Mura Hydrographic Atlas of 2014 and the hydrological data of the flood events in 2005 and 2009 at Letenye and Murakeresztúr stations for the calibration and validation process. The research timeframe was closed in 2014.

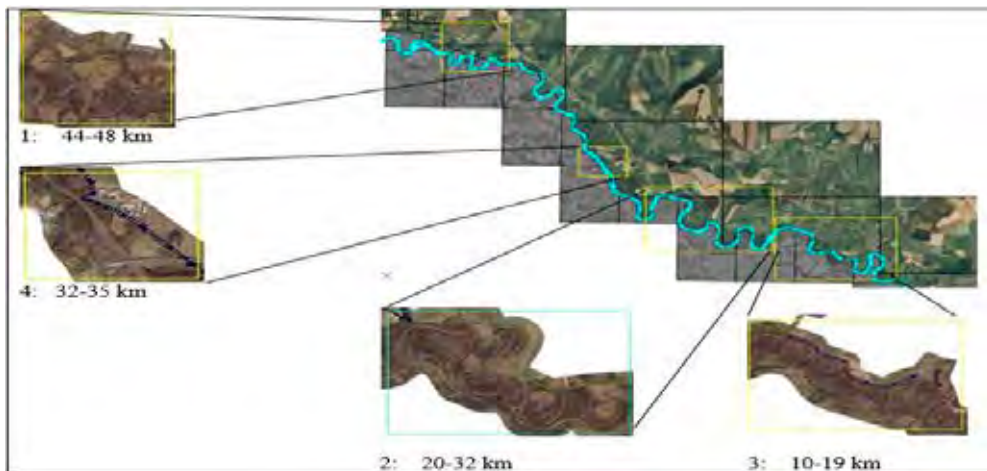


Figure 1. The experimental area of the Hungarian section of the Mura River with inundation area and the locations of 4 minor experimental areas

### *The effect of flood propagation*

By comparing computational results the effect of flood propagation on the inundation area was studied. The values of specific discharge and velocity were analyzed for the whole inundation area (flood maps) and in detail in 20-60 points of monitoring profiles. The main direction of flow and the depth of water was also shown on maps using different layers and colours. The results show separated zones of specific discharge and velocity with the values of 0.2-0.8 m<sup>3</sup>/s/m and 0.2-0.8 m/s.

### *Comparison using a GIS method*

Old historical maps were used for comparison and 7 digitalized river paths from 1785, 1860, 1880, 1920, 1976, 2002, 2014 were analyzed. The conclusion was that the Mura flows also in the old river paths and uses them for the conveyance of discharge in the inundation area. The old Mura River paths were identified in two minor experimental areas from the time of the Second and Third Military Surveys.

### *The effect of flash floods*

Simulations were run to discover the effect of flash floods on the development of the inundation area, specific discharge, and velocity. Based on the experience of the experts, from the flood wave in 2005 three synthetic flood waves were prepared and imported in the model, with max value of the discharge 500 m<sup>3</sup>/s. At this value flooding in the inundation area began. The aim was to simulate heavy rainfall in short, medium and long time periods. The results were shown on flood maps of the 4 minor experimental areas in characteristic time steps and the flood wave propagation was described: flooding in the rising limb of the flood wave, during the flood wave peak, in the falling limb of the flood wave. The flood maps of the Hungarian section of the Mura River and the inundation area are annexes of the dissertation (Engi, 2016).

## **2.3. Hydraulic modelling - Simulation of the silting up process of the inundation area**

### *The experimental areas and the modelling system*

The experimental area, the minor areas and monitoring profiles are the same as in the previous chapter, Figure 1. For the purpose of modelling the silting up process of the inundation area of the Mura River the modelling systems MIKE 11 ST- Graded ST and MIKE 2D FM ST were used. The results of the 1D model supported the decision-making of further development of the 2D model. The initial datasets were taken from previous flood simulations. In the sediment transport modelling process the Van Rijn and Engelund-Hansen equations were used.

### *Simulation of the silting up process*

The results of erosion and silting up process were underestimated with the Van Rijn method. The transport method of Engelund-Hansen gave more realistic values, but in some locations the forecasted erosion and silting up of the bed level were »beyond possibility«. Results of the simulations provided information about the morphological changes of the river bed, the silting up or erosion processes of the inundation area. The comparison of the forecasted bar locations by the model with registered locations of bars on maps was also shown. Because such research work on this downstream section of the Mura River hasn't yet been carried out, the computed results were evaluated on the basis of geodetic surveying of the current situation (measured silting up values) after previous floods (Engi, 2016; Engi et al., 2016b).

## **2.4. Morphometric parameters for the long-term development**

The study includes the overview of the regulation works documentation, as it is an integral part of the historical morphology (Engi et al., 2012). The database contains seven vectorised river paths of the studied Mura River section (1785, 1860, 1880,

1920, 1976, 2002, 2014) and 535 meanders in different developing stages. The morphometric parameters were studied and compared in different ages: the central line and the width of the river, amplitudes of meanders, the length of the bend, etc. The average length of the river was 185 m in 1785 and 80 m in 2014. The average length of the bend was 759 m in 1785 and 512 m in 2014. The conditions in 1785 correspond to the natural state without human intervention, while the state in 1860 already shows the result of the first meander cut-offs. It can be seen from the compared maps that the number of curves and the amplitudes decreased significantly due to the regulations. Also, it is evident that the river started to increase its curves. Using these parameters we drew conclusions about the development of meanders. The curve amplitudes determine the width of the meander belt or the area that is formed by the river actively. Temporal change of this is an important parameter of the historical morphology of the river. Comparison of short- and long-term methods was also shown and the lateral movement of meanders was evaluated. Near the village of Muraszemenye there is a river section without anthropogenic interventions. The lateral movement of the meanders was 2.3 m/year in the period of 1920–1976 and 4.5 m/year between 1976 and 2002 (Tóth et al., 2013; Engi et al., 2011, 2012; Engi et al., 2012; Engi, 2016; Engi et al., 2016a).

### 3. CONCLUSIONS

From the silting up process of the inundation areas we draw a conclusion about the development of the hydraulic status of the area. The sediment trapped in the oxbow lake Hosszúvíz contains mostly silt categories. The deposition of this matter is connected to the annual flood events. The sand fraction appears in the case of extremely high discharge in 10-15 years' time cycle. The 2-63  $\mu\text{m}$  fraction is responsible for the silting up and it is at the rate of 1-2 cm per year. Comparing values with the silting up maps it is not evident that the silting up process causes the main problem of conveyance in the inundation area. Further investigations are suggested and the effect of the vegetation in the inundation area should be included into the model.

In the past the effects of river training or regulation works were evident in the short-time period. The effects of climate change will appear in a long-time period. If we identify the changes in morphometric parameters of the river network we could make conclusions about the possible flood hazard in the future. Using the hydraulic model the main direction of flow in special cases could forecast the meander cut-off locations. The old maps could help in better understanding of the flood propagation because in our case the Mura flows also in the old river paths and uses them for the conveyance of discharge in the inundation area. The flood maps and the silting up or erosion maps could be generated from the modelling system after simulations as the results. With the synthesis of the research methods adequate interventions could be projected for the decreasing of flood hazard in the inundation area.



---

## LITERATURE

- [1] Engi, Zs., Tóth, G., Braun, M., Hubay, K., Hercsel, R. (2011): *Study of the silting up process of the Mura River's floodplain in Hungary*, XXVth Conference of the Danubian Countries, Budapest.
- [2] Engi, Zs., Tóth, G., Steinman, F., Braun, M. (2012): *Historical morphological reconstruction of the Mura River (SW of the Carpathian Basin) by using GIS methods*, Zeitschrift Für Geomorphologie, Stuttgart, Vol. 56, Suppl. 2, 063-077.
- [3] Engi, Zs., Tóth, G., Somogyi, K., Lanter, T., Hercsel, R., Bozzay, F. (2016a): *A Mura folyó kanyarulatvándorlásainak elemzése és hullámterének feliszapolódás vizsgálata 2 D modellezéssel. = Meandering of the Mura river and 2D modelling of the silting up processes of the inundation area*, Hidrológiai Közlöny 96, 1: 33–48.
- [4] Engi, Zs., Tóth, G., Braun, M. (2016b): *A Mura folyó hullámterének feliszapolódás vizsgálata II. rész. = The silting up processes of the inundation area of the Mura river - Part II*, Hidrológiai Közlöny 96, 2: 52–66.
- [5] Engi, Zs. (2016): *Hidravlično modeliranje poplavne nevarnosti na izlivnih odsekih vodotokov, oprto na procese zamuljevanja. = Flood hazard modelling on river outfall stretches, based on silting up processes*, Doctoral dissertation, Ljubljana, Univerza v Ljubljani - Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo.
- [6] Tóth, G., Engi, Zs., Majdán, J., Fábrián, S. Á. (2013): *Historijsko-morfološka rekonstrukcija inundacije rijeke Mure. = Historical morphological reconstruction of the inundation area of Mura River*, Ekonomska i ekohistorija, 9, 9: 28-34.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**ISTRAŽIVANJA EROZIJSKIH PROCESA  
UNUTAR VODNIH SUSTAVA NA PODRUČJU  
ISTRE**

**INVESTIGATION OF EROSION PROCESSES  
WITHIN WATER SYSTEMS IN ISTRIA**

**Danko Holjević<sup>a</sup>, Danko Biondić<sup>a</sup>, Toni Holjević<sup>b</sup>**

*KLJUČNE RIJEČI: istraživanje, erozijski proces, produkcija nanosa, vodni sustavi, Istra*

*KEYWORDS: research, erosion process, sediment production, water systems, Istria*

## **1. UVOD**

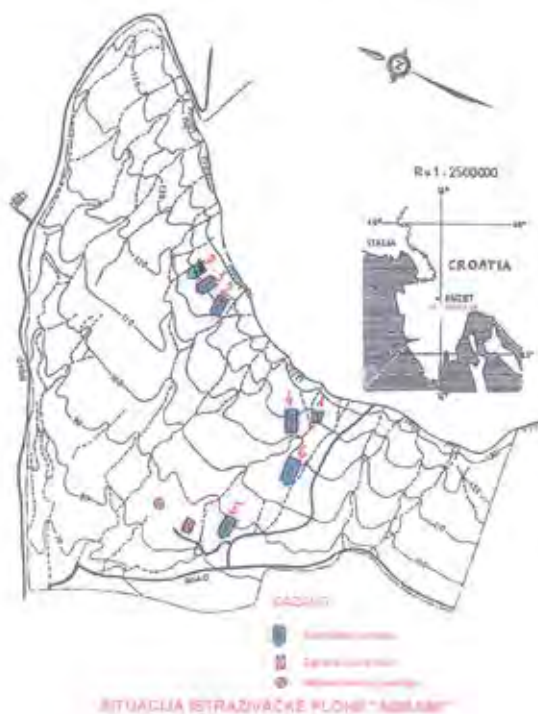
Istraživanja produkcije i pronosa nanosa unutar vodnih sustava na području Istre provedena su na više lokacija tijekom višegodišnjeg perioda. Stanje vegetacije, struktura i građa tla, kao i količina te intenzitet oborina bitno određuju količinu i dispoziciju nanosa unutar vodnih sustava Istre. Prva istraživanja započela su u okviru sliva bujice Bračana, na lokaciji Abrami (Slika 1). Cilj tih istraživanja bilo je testiranje tadašnjih suvremenih metoda zaštite brdskih zemljišta od erozije, odnosno stjecanja potrebnih iskustva o primjenjivosti tih metoda na istarskom flišu, kao i sakupljanje podataka o troškovima izvođenja i gospodarskim efektima provedenih radova. Godine 1956. na toj je lokaciji osnovan istraživački poligon koji zauzima površinu od 23,46 ha, ekspozicije istok-sjeveroistok. U prvoj fazi istraživanja od 1957. do 1963. godine na poligonu su izvedene različite vrste protiverozijskih radova, sukladno postavljenom cilju istraživanja. Godine 1961. osnovana je na pokusnoj plohi meteorološka stanica. Godine 1969. organizirana su istraživanja kvantitativnih pokazatelja in-

---

<sup>a</sup> Hrvatske vode, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, 10000, Hrvatska, dholjev@voda.hr, danko.biodic@voda.hr

<sup>b</sup> Hidroprojekt-ing, Draškovićeve 35/I, Zagreb, 10000, Hrvatska, tholjevic@hp-ing.hr

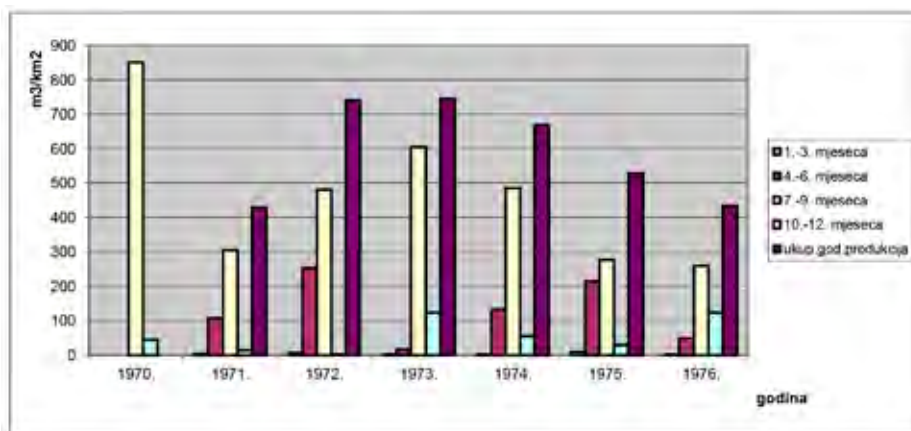
tenziteta erozije. U tu svrhu izdvojeno je i limom ograđeno 6 erozijskih istraživačkih parcela na karakterističnim površinama, od kojih su neke bile obrasle vegetacijom, a neke nisu. Istraživanja su na poligonu "Abrami" trajala do 1978. godine, kada su prekinuta. Godine 1998. Građevinski fakultet iz Zagreba pokrenuo je inicijativu da se obnove istraživanja erozije tla na poligonu u Abramima. Koncem 1999. godine obavljani su pripremni radovi i obnovljena istraživačka oprema na parcelama, a prva mjerenja započela su 2000. godine. U razdoblju od 2003. do 2009. godine realizirana su dva znanstveno-istraživačka projekta: "Istraživanja erozije tala i zaštitnih mjera na bujičnim slivovima u Istri" (Petraš, 2006) i "Bujična erozija tala na flišu Istre" (Petraš, 2007). Započela su i mjerenja pronosa erozijskog nanosa s bujičnih slivova i to na dva bujična vodotoka u slivu akumulacije Botonega (Grdoselski potok i potok Denići) i na tri potpuno ogoljele strme flišne padine.



Slika 1. Istraživački poligon Abrami (Petraš i drugi, 2008)

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Prema usvojenoj metodologiji (identičnoj tijekom svih provedenih istraživanja) prikupljenja je i obrađena velika količina izmjerenih podataka. Kao primjer rezultata provedenih mjerenja na istraživačkom poligonu Abrami (Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, 1977) u periodu 1970.-1977. godina na Slici 2 dani su podaci za istražnu plohu 2.



Slika 2. Prikaz erozijske produkcije na plohi br. 2 po kvartalima u razdoblju 1970.-1977. godine

U Tablici 1 prikazani su rezultati istraživanja prema istražnim ploham u periodu 2003.-2007. godina (Petraš i drugi, 2008). Na uspostavljenim pregradnim profilima Jukani i Denići provedena su mjerenja količina istaloženog nanosa unutar zaplava istih, kao i mjerenja koncentracije preljevnih voda u funkcije protoke.

Tablica 1. Prikaz godišnjih količina spiranja tla i godišnjih oborina u periodu 2003.-2007.

Parcela	Površina m <sup>2</sup>	Nagib %	Godišnja produkcija nanosa u g/m <sup>2</sup> = t/km <sup>2</sup>						srednjak
			2003.	2004.	2005.	2006.	2007.		
P2	84,75	62	33,98	51,76	57,51	78,39	69,86	58,30	
P3	93,25	44	0,17	0,25	0,26	0,34	0,23	0,25	
P4	102,40	59	0,06	0,08	0,06	0,10	0,55	0,17	
P5	98,57	30	1,63	2,07	1,77	4,19	2,29	2,39	
P6	122,70	27	0,20	0,32	0,11	0,16	0,30	0,22	
P7	93,25	44			1,16	3,04	1,14	1,78	
Godišnja oborina u mm			643,3	675,9	658,3	931,8	920,2	765,9	

Rezultati provedenih mjerenja produkcije i pronosa nanosa na području Abrama i sliva akumulacije Botonega potvrđuju značajan utjecaj erozijskih procesa unutar vodnih sustava Istre. Izmjereni podaci čine jedinstvenu banku egzaktnih pokazatelja erozijskih procesa. Nastavno predstavljaju dobru osnovu za pokretanje eventualnih daljnjih istraživačkih projekata sa svrhom unapređenja prevencije i kontrole erozijskih procesa unutar vodnih sustava. Posredno se ostvaraju pretpostavke za kalibraciju standardnih parametarskih metoda za procjenu produkcije i pronosa nanosa na slivovima Istre.

### 3. ZAKLJUČAK

Da sada provedena istraživanja erozijskih procesa unutar vodnih sustava i slivova u Istri, još jednom potvrđuju izrazitu složenost problematike erozijskih procesa, odnosno produkcije i pronosa nanosa. Potvrđuje se činjenica da su erozijski procesi dominantno određeni vrstom, i strukturom vegetacijskog pokrova tla, te dinamikom i količinom otjecanja vode. Ostvareni su preduvjeti za korištenje baze mjerenih podataka u svrhu kalibracije i optimalizacije modela za predikciju erozijskih procesa. Postojeća mjerna infrastruktura i uspostavljeni istraživački poligon, uz odgovarajuće dorade i osuvremenjavanja mjerne opreme, može odgovoriti na izazove koji se na području nanosa i erozijskih procesa nameću pred stručnjake i znanstvenike u budućnosti.

### LITERATURA

- [1] Petraš, J. (2006): *Izvješća znanstveno istraživačkog projekta "Istraživanja erozije tla i zaštitnih mjera na bujičnim slivovima u Istri" za godine 2003.-2006.*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za hidrotehniku.
- [2] Petraš, J. (2007): *Izvješće znanstveno istraživačkog projekta "Bujična erozija tala na flišu Istre" za godinu 2007.*, Građevinski fakultet Zagreb, Zavod za hidrotehniku.
- [3] Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi (1977): *Rezultati istraživanja s pokusne plohe "Abrami"*, Period 1970.-1977., elaborat, Beograd.
- [4] Petraš J., Holjević, D., Patrčević, V. (2008): *Prikaz mjerenja erozijskog nanosa s bujičnih slivova u flišu Istre*, Savjetovanje: Hidrološka mjerenja i obrada podataka, Nacionalni park Plitvička jezera, 26.-28.studenj 2008., Zbornik radova, str. 173-191.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# HIDROMORFOLOŠKA ANALIZA PERA POLOJ NA RIJECI SAVI

## HYDROMORPHOLOGICAL ANALYSIS OF GROYNE POLOJ AT RIVER SAVA

Vedran Ivezić<sup>a</sup>, Vlatko Kadić<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: pero, morfodinamika, hidrodinamika, 2D hidraulički model*

*KEYWORDS: groyne, morphodynamics, hydrodynamics, 2D hydraulic model*

### 1. UVOD

Riječni nanos nastaje kao posljedica erozijskih procesa u slivu. Riječ je o razaranju tla pod utjecajem fizičkih pojava kao što su padaline, sezonske promjene temperature, površinsko otjecanje itd. Prema porijeklu, nanos se dijeli na tranzitni nanos i koritoformirajući nanos (vučeni i dio lebdećeg). Prema načinu kretanja, dijeli se na vučeni i lebdeći nanos. Od ukupne količine materijala koji nosi aluvijalni vodotok, oko 85-95 % otpada na lebdeći, a 5-15 % na vučeni nanos (Lick, 2009).

Vučeni nanos u najvećoj mjeri ima koritoformirajuću ulogu. Kada posmično naprezanje toka premaši određenu kritičnu vrijednost, nevezani aluvijalni materijal se počinje kretati po riječnom dnu. U zavisnosti od hidrauličkih uvjeta, krupnoće i gustoće nanosa, to kretanje se odvija na različite načine: kotrljanjem, klizanjem, u vidu skokova. Pri nižim vrijednostima posmičnog naprezanja, nanos se kreće klizanjem i kotrljanjem, a s povećanjem ovog naprezanja, dolazi najprije do skokovitog kretanja pojedinih zrna, a zatim i do masovnog kretanja nanosa (Barbalić, 1989).

---

<sup>a</sup> Hidrokonzalt projektiranje d.o.o., Hvarska 11, Zagreb, 10000, Hrvatska, vedran.ivezic@hidrokonzalt.hr, vlatko.kadic@hidrokonzalt.hr



Slika 1. Pero Poloj i ugrožena desna obala

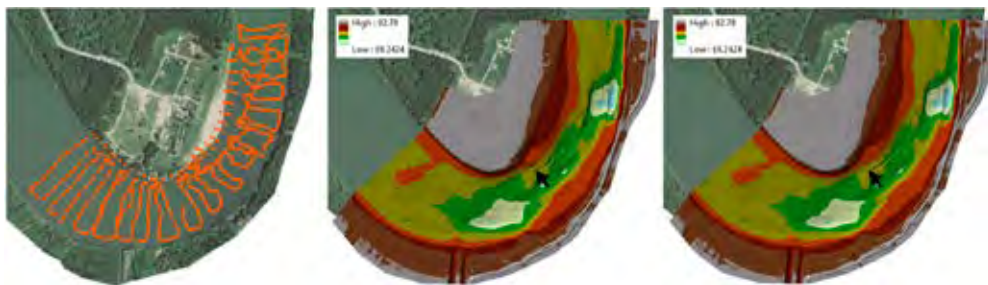
Pera su poprečne riječne građevine koje najčešće služe za definiranje regulacijske linije (nove obale) i kao posljedicu imaju taloženje nanosa u svom zaleđu. Izgradnjom pera dolazi do poremećaja strujne slike rijeke te tek modelska ispitivanja daju odgovarajuću sliku strujanja i mogućnost ocjene njegove koritiformirajuće uloge. Stoga su, kako bi se ocijenio utjecaj pera Poloj na lijevoj obali rijeke Save u rkm 373+540 (nizvodno od grada Slavonski Brod) na desnu obalu rijeke Save, provedene morfodinamičke i hidrodinamičke analize šire lokacije pera (Hidrokozult projektiranje, 2019). Analize su trebale pokazati da li postojanje pera i sprudišta (ujedno i plaža na popularnom ŠRC Poloj) na lijevoj obali rijeke Save, direktno ugrožavaju desnu obalu na kojoj je ljetni nasip (Slika1).

## 2. PROVEDENE ANALIZE

Analiza povijesnih snimki ukazala je na morfodinamičke trendove na širem području zone pera, odnosno trendove prirodnog kretanja obala (meandriranja). Hidraulički modeli ukazali su na hidrodinamičke utjecaje pera. U tu svrhu, izrađen je 1D hidraulički model šireg područja rijeke Save duljine 104 km (Sl. Brod - Županja), s 544 poprečna profila za protoke trajanja 95 %, 75 %, 50 %, 30 %, 15 % i 1 % (Slika 2). On je iskorišten za definiranje rubnih uvjeta 2D hidrauličkog modela zone pera. Nakon detaljnog snimanja zone pera echo-sonderom pristupilo se njenom hidrauličkom modeliranju i to za postojeće stanje i stanje bez pera (na Slici 3 lokacija pera naznačena je strelicom).



Slika 2. 1D hidraulički model šireg područja rijeke Save



Slika 3. Snimanje echo-sonderom (lijevo), model terena postojećeg stanja (u sredini) i stanja bez pera (desno)

### 3. REZULTATI

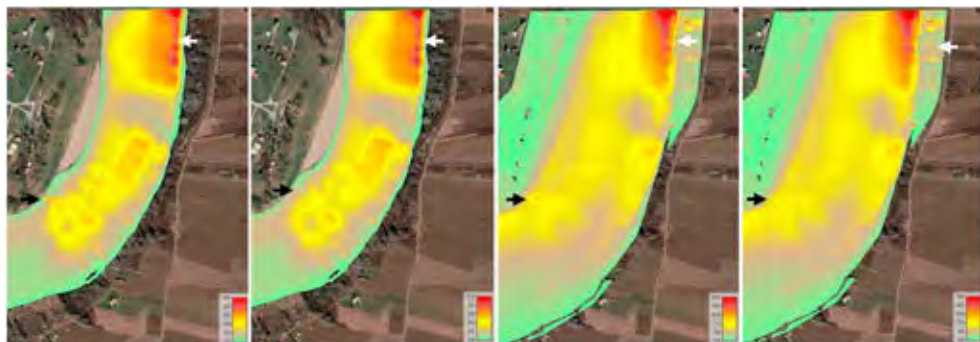
Na Slici 4 prikazane su snimke s naznačenim obalama rijeke Save nastale 1968. (uz nadopunu dijelova koji nedostaju HOK kartom iz 1982.), 2011. i 2017. godine. Crnim strelicama su naznačene lokacije nasipavanja obala dok su bijelim strelicama naznačene lokacije erozije obala.

Hidrauličko 2D modeliranje ukazalo je da ne postoje značajnije razlike u dubinama vode, brzinama tečenja i posmičnim napreznjima postojećeg stanja i stanja bez pera, osim na samoj mikrolokaciji pera. Na Slici 5, s lijeva na desno, su prikazana posmična napreznja: postojećeg stanja za protoke trajanja 50 %, stanja bez pera za protoke trajanja 50 %, postojećeg stanja za protoke trajanja 1 % i stanja bez pera za protoke trajanja 1 %. Crnim strelicama su naznačene lokacije pera dok su bijelim strelicama naznačene lokacije najvećih posmičnih napreznja.



Slika 4. Trendovi kretanja obala rijeke Save (1968., 2011. i 2017. godina)





Slika 5. Posmična naprezanja [ $N/m^2$ ]

#### 4. ZAKLJUČAK

Provedena analiza pera Poloj na lijevoj obali rijeke Save u rkm 373+540 ukazala je da ono nema značajnijeg utjecaja na desnu obalu rijeke. Provedene analize postojećeg stanja i stanja bez pera pokazale su da pero nema utjecaja na dubine vode, brzine tečenja i posmična naprezanja na desnoj obali rijeke Save na kojoj su uočena klizišta, odnosno da ono direktno ne ugrožava desnu obalu rijeke. Analize su pokazale da su glavni uzrok erozije velika posmična naprezanja uz desnu obalu. Razloge treba tražiti u hidraulički nepovoljnoj konkavnoj obali, a što je posljedica prirodnog meandriranja rijeke. Radi se o području na kojem se vrlo vjerojatno i u budućnosti mogu očekivati slični problemi.

#### LITERATURA

- [1] Barbalić, Z. (1989): *Riječna hidrotehnika – Regulacija rijeka*, GF Sarajevo, BH, 350.
- [2] Hidrokonzalt projektiranje (2019): *Analiza utjecaja pera Poloj na lijevoj obali rijeke Save u rkm 373+540 na desnu obalu rijeke Save*, Ivezić, V., Zagreb.
- [3] Lick, W. (2009): *Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters*, IWA, UK, 456.

OKRUGLI STOL

## *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# PORIJEKLO NANOSA U HIDROGEOLOŠKIM SUSTAVIMA

## ORIGIN OF DEPOSITS IN HYDROGEOLOGICAL SYSTEMS

Sanja Kapelj<sup>a</sup>, Dragana Dogančić<sup>a</sup>, Jelena Loborec<sup>a</sup>, Saša Zavrtnik<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: nanos, mutnoća, pronos zagađenja, podzemne vode, krš*

*KEYWORDS: deposits, turbidity, transport of pollution, groundwater, karst*

### 1. UVOD

U stijenama pukotinske i pukotinsko-disolucijske poroznosti prisutan sediment predstavlja bitnu komponentu za pronos različitih vrsta zagađenja. Može biti različitog sastava i porijekla ovisno o geološkim i hidrogeološkim obilježjima vodonosnika, klimi, hidrološkom režimu, vegetacijskim obilježjima i korištenju površina koje prekrivaju vodonosnike. Pod zajedničkim nazivom se pojava takvog sedimenta u vodonosnicima, odnosno na izvorima koji ih dreniraju naziva mutnoća.

Autohtonim sedimentom se obično naziva sediment ili nanos koji je porijeklom nastao iz stijena koji su sastavni dijelovi hidrogeološkog sustava, a alohton je onaj koji je u podzemlje dospio najčešće bujičnim ili poplavnim vodama s površine sliva različite udaljenosti od samog izvora.

Pretpostavlja se da je sediment alohtonog porijekla pretežito nositelj različitih onečišćujućih tvari u podzemnim vodama i može se transportirati na vrlo velike udaljenosti u krškim vodonosnicima. Autohton sediment nas opet upućuje na sam sa-

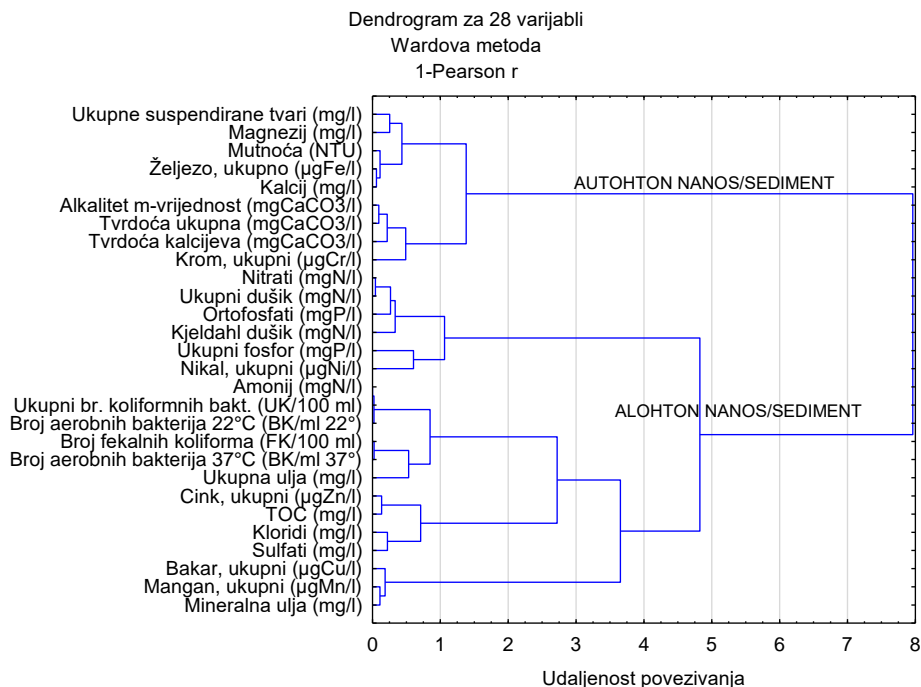
---

<sup>a</sup> Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hallerova aleja 7, Varaždin, 42000, Hrvatska, sanja.kapelj@zg.ht.hr, dragana.dogancic@gfv.hr, jelena.loborec@gfv.hr, zavrtnik@gfv.hr

stav hidrogeološkog sustava koji ne možemo uvijek prepoznati iz same analize sastava podzemnih voda te može potjecati iz različitih stijena (vapnenaca, dolomita, silikatne frakcije klastičnih naslaga, zone trošenja itd.).

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Općenito znamo da većina podzemnih voda u krškim vodonosnicima Hrvatske ima tijekom hidrološke godine dobru kakvoću, a do pogoršanja dolazi nakon intenzivnih oborina. U isto vrijeme pojavljuje se i povećana mutnoća vode na izvorima koju prati i mikrobiološko zagađenje različitog intenziteta. Slično se pojavljuje i u drugim krškim hidrogeološkim sustavima poput npr. švicarskih Alpi itd. Podzemne vode u krškom području Švicarske generalno imaju dobar mikrobiološki status dok su krški izvori nešto češće zahvaćeni zagađenjem fekalnim bakterijama (Sinreich i drugi, 2014). Autohtonu mutnoću nazivaju i primarna jer je povezana uz litološki sastav vodonosnika, a alohtonu nazivaju sekundarnom dakle onom koja je došla s površine terena iz zone tla. Pritom su došli do zaključka da je s obzirom na veličinu čestica lako odrediti o kojoj se vrsti mutnoće radi. Ako je veći postotak velikih do sitnih čestica radi se o primarnoj mutnoći, a ako su zastupljene sitne čestice riječ je o sekundarnoj mutnoći (Goldscheider i drugi, 2010). Pojava sekundarne mutnoće s povećanjem broja fekalnih bakterija i ukupnog organskog ugljika može upućivati na početak onečišćenja.



Slika 1. Dendrogram porijekla tvari/geokemijskog afiniteta na primjeru tipičnog velikog krškog izvora u Hrvatskoj

U kojoj mjeri postoji sličnost s krškim vodonosnicima u Hrvatskoj još nismo u mogućnosti odgovoriti jer ne postoji dovoljno složenih istraživanja. Obično se postavlja pitanje je li upravo mutnoća ili suspendirana tvar u podzemnoj vodi nositelj onečišćenja ili je ona samo indikator pokreta mase nanosa različitog porijekla i koje su njene posljedice?

Uvidom u rezultate statističke multivarijantne, tzv. klaster analize napravljene na primjeru 120 mjerenja 28 različitih pokazatelja kakvoće voda koja istječe na jednom velikom izvoru u kršu Dinarida, očito je da je mutnoća i koncentracija suspendirane tvari na izvoru pretežito povezana s autohtonim, odnosno primarnim nanosom, dok su bakteriološko onečišćenje, ukupni organski ugljik (TOC), ukupna ulja, mineralna ulja, koncentracija ukupnog cinka, bakra, mangana, klorida i sulfata te hranjive soli dušika i fosfora povezani s ispiranjem zone tla, dakle s potencijalnim izvorom onečišćenja – alohtonim nanosom. Ovdje alohton nanos predstavlja samo onečišćenje, ukupnu organsku tvar, dakle ukupna ulja, mineralna ulja i metale koji su s njima povezani kao i dio potpuno otopljenih pokazatelja koji su indikatori potencijalnog i/ili stvarnog onečišćenja poput sulfata, klorida i hranjivih soli dušika i fosfora. Autohton ili primarni nanos u našem slučaju je prema izmjerenim pokazateljima vjerojatno zemlja crvenica i deluvijalni sediment krških polja koji se nalaze u predmetnom slivu.

### 3. ZAKLJUČAK

Prema iznesenoj raspravi postavlja se pitanje u kojoj mjeri bi uklanjanje samo mutnoće iz izvorske vode poboljšalo njenu kakvoću u krškim vodonosnicima Dinarida? Izneseno upućuje na nužnost promjene načina motrenja kakvoće podzemnih voda u kršu kao i potrebu za složenijim mineraloškim, sedimentološkim, geokemijskim i biogeokemijskim te mikrobiološkim istraživanjima koja trebaju obuhvatiti ispitivanja sastava nanosa kako u samom vodonosniku tako i na izvorima. Tek temeljem dobivenih rezultata mogu se procijeniti potreba kao i načini pročišćavanja izvorskih voda uključenih u sustav javne vodoopskrbe.

### LITERATURA

- [1] Goldscheider, N., Pronk M., Zopfi J. (2010): *New insights into the transport of sediments and microorganisms in karst groundwater by continuous monitoring of particle-size distribution*, *Geologia Croatica*, 63/2, 137–142.
- [2] Sinreich, M., Pronk, M., Kozel, R. (2014): *Microbiological monitoring and classification of karst Springs*, *Environmental Earth Sciences*, 71, str. 563-572.



OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**PRODUBLJIVANJE RIJEČNOG KORITA I REŽIM  
NANOSA: MJERE ZA KORIŠTENJE VUČENOG  
NANOSA U REVITALIZACIJI RIJEKE**

**RIVERBED DEEPENING AND SEDIMENT  
REGIME: MEASURES FOR BED LOAD  
MOBILIZATION IN RIVER RESTORATION**

Klaus Michor <sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: hidromorfološka dinamika, pokretanje vučnog nanosa, revitalizacija rijeke*

*KEYWORDS: hydromorphological dynamics, bed load mobilization, river restoration*

**1. INTRODUCTION**

Most of the rivers of Central Europe have an impaired bed load regime. There is not enough bed load in these systems. This is becoming an increasingly extensive problem with serious impacts. As a hydro-engineering problem, bed load deficit causes riverbed deepening, which in turn undermines the foundations of longitudinal structures and dams. The deepening also has serious ecological consequences, as it decouples rivers from their floodplains. Without enough bed load, complex braided rivers with gravel banks and islands turn into monotonous single-channel systems with limited dynamics, and with progressively deepening beds. The consequences are also increasingly felt by agriculture, since the ground water level is lowered across the entire valley. In areas used for tourism, rivers contribute heavily to an attractive

---

<sup>a</sup> REVITAL Integrative Naturraumplanung, Nußdorf-Debant, 9990, Austria, k.michor@revital-ib.at

landscape and may have important recreational functions. Rivers with a bed load deficit lose this attractiveness. These processes are subtle and have often gone unnoticed for decades. The comparison of old with new orthophotos (Figure 1) reveals that most alpine rivers show signs of bed load deficit and bed deepening. The question is: Can revitalization measures effectively increase bed load input and and, in turn, dynamize or at least stabilize river ecosystems? A field report on experiences with Austrian alpine rivers.

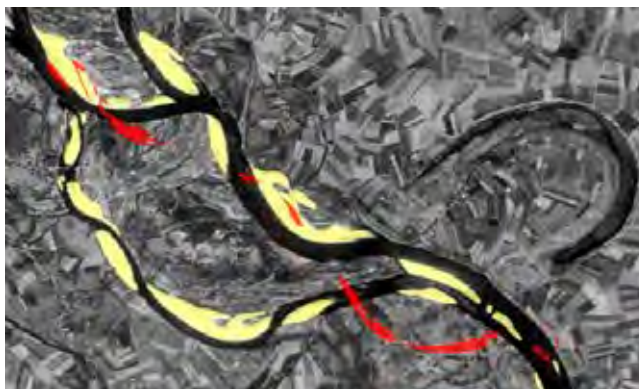


Figure 1. Changes in the hydromorphological dynamics of the Drava in Croatia, visible in its gravel surfaces (yellow: 1965, red: 2015).

## 2. MEASURES FOR BED LOAD MOBILIZATION

For decades, actions have been taken at the Austrian alpine rivers like the Mura, Drava and Salzach, one goal of which is to mobilize bed load and thus to stabilize the riverbeds. Several different types of measures have been developed:

### 2.1. “Soft” banks

For “soft” banks, revetments are removed on a reach with a certain minimum length. If necessary, covered groynes can be inserted into the land side for bank protection. Where river dynamics are lacking, further micro-groynes at the opposing bank can deflect flow and increase lateral erosion (Figure 2). Advantages of this construction type: This is a low-cost measure for which authorizations are easy to obtain even in protected areas. It becomes effective during high, bed-forming water levels.

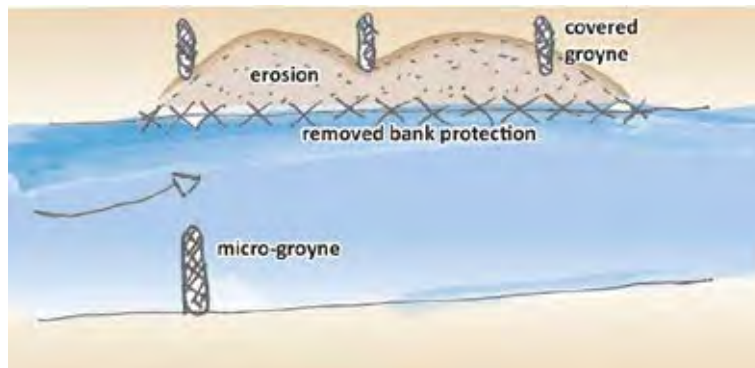


Figure 2. "Soft" banks (sketch)

## 2.2. River widening with bed load mobilization

For this measure, the river is widened through excavation, and the excavated material is moved towards the middle of the river (Figure 3). This loosely heaped material is directly available as bed load input, and experience shows that it is swiftly eroded by the river. The length, width and shape of the widening depend on the river type. Here, too, a certain minimum length is indicated.

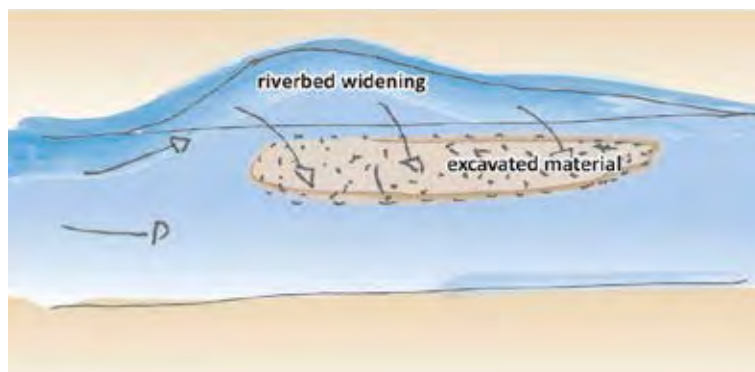


Figure 3. Riverbed widening with bed load mobilization (sketch)

## 2.3. Initial channel

Initial (or pilot) channels – side channels excavated in parallel to the main channel (Figure 4) are another option. They remain unprotected. Experience has shown that this strongly dynamizes river morphology, given correct construction, depth and length in proportion to the main channel. Advantages: At a comparatively low cost, pilot channels are often highly effective.



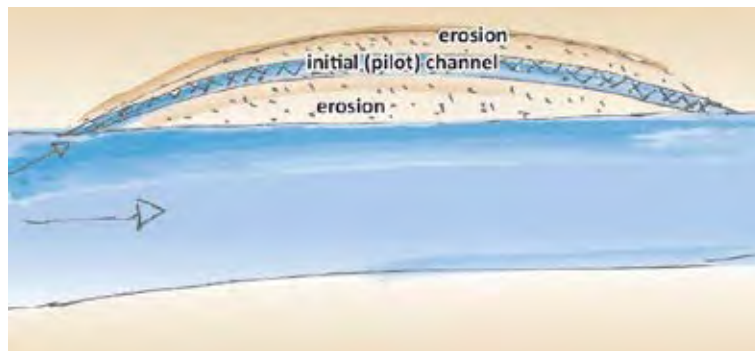


Figure 4. Pilot channel (sketch)

### 3. CONCLUSION

A balanced sediment regime is important for the function of river ecosystems. Many Central European rivers show bed load deficit, which not only reduces morphological dynamism, but also causes bed deepening. In Austria, experience with bed load mobilization in the context of alpine river revitalizations reaches back 30 years. Depending on the deepening rate, extant bed load and other factors relevant to obtaining authorizations, “soft” banks, riverbed widening, or pilot channels have been successfully implemented. Monitoring studies at the Upper Drava in Carinthia (Figure 5) have shown that these measures stabilize the riverbed on the one hand and have positive morphodynamical effects on the other. Obviously, the measures cannot replace comprehensive action in the catchment areas. Still, large amounts of material remain piled up in valleys alongside our rivers as a result of past river regulation efforts. Due to this, the measures can nevertheless make a substantial short to mid term contribution to a balanced bed load regime.



Figure 5. River restoration at the Upper Drava near Obergottesfeld – morphological development over the first three years. From left to right: aerial survey - 20 Oct. 2009, aerial survey - 20 April 2011, aerial survey -15 Oct. 2011, aerial survey - 8 Oct. 2012.  
(© Government of Carinthia / Department 12 – Water Management, S. Tichy)

OKRUGLI STOL

## *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# NANOS DRVENIH I DRUGIH BILJNIH OSTATAKA U NACIONALNOM PARKU PLITVIČKA JEZERA

## WOODY AND OTHER FLORAL DEBRIS IN THE PLITVICE LAKES NATIONAL PARK

Kazimir Miculinić<sup>a</sup>, Andrijana Brozinčević<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: NP Plitvička jezera, vodotoci, jezera, sedrene barijere, drveni i drugi biljni nanosi*

*KEYWORDS: Plitvice Lakes NP, watercourses, lakes, tufa barriers, woody and other floral debris*

### 1. UVOD

U vodotocima i jezerima odvija se najvažniji ekološki proces Nacionalnog parka Plitvička jezera (NPPJ) – proces sedrenja. Zbog izuzetne važnosti vodnih tijela, provode se brojna istraživanja koja se bave čimbenicima neophodnim za proces sedrenja kao što su fizikalno – kemijski i biološki, ali i čimbenicima koji na neizravan način mogu utjecati na proces. Jedan od njih su i nanosi drvenih i drugih biljnih ostataka (u daljnjem tekstu *nanos*) u vodotocima i jezerima što je i svojevrsna prepoznatljiva vizura NPPJ. Nanosi mogu biti krupni drveni ostaci poput cijelih stabala, korijenja i grana (eng. Large Woody Debris - LWD), sitni drveni ostaci kao što su manje grane, grančice i lišće (eng. Coarse Woody Debris - CWD) (Mott, 2006) te ostaci ostalog bilja. Od 1970-tih godina svijest o važnosti nanosa u vodenim ekosustavima znatno je napredovala. Prepoznata je njihova uloga u stabilizaciji vodotoka, sprečavanju pro-

---

<sup>a</sup> JUNP Plitvička jezera, Znanstveno-stručni centar dr. Ivo Pevalek, J. Jovića 19, Plitvička Jezera, 53231, Hrvatska, kazimir.miculinic@np-plitvicka-jezera.hr, andrijana.brozincevic@np-plitvicka-jezera.hr

nosa sitnozrnatog materijala, usporavanju brzine toka te stvaranju različitih staništa za brojne vrste (Reich i drugi, 2003). Stanište Sedrene barijere krških rijeka Dinarida (32A0) na području Europske unije (EU), kao ciljni stanišni tip Natura 2000, nalazi se samo u Hrvatskoj te se aktivne mjere upravljanja tim staništem tek trebaju definirati. Javna ustanova NPPJ smatra da definiranje tih mjera mora doći upravo od parkova i javnih ustanova koji upravljaju tim staništima, a vrlo važno mjesto među njima svakako zauzima i pitanje upravljanja nanosima.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

U EU se velika pažnja poklanja restauraciji vodotoka odnosno njihovom vraćanju u stanje što bliže prirodnom. Restauracija uključuje i prisutnost nanosa drvenih ostataka u vodotocima koji se unose u restaurirane vodotoke tamo gdje ih u antropogeno izmijenjenom okolišu nema (Mott, 2006). Potreba ovakvih restauracijskih zahvata svoje uporište ima i u propisima EU i Republike Hrvatske kao što su Okvirna direktiva o vodama i Uredba o standardu kakvoće voda, u kojima su oni sadržani u hidromorfološkim elementima kakvoće voda. Za razliku od velikog dijela prostora EU, vodotoci i jezera, kao i njihov okoliš, na području NPPJ u prilično su prirodnom stanju, uključujući i nanose u njima (Slika 1).



*Slika 1. Prirodni drveni nanosi*

Brojni stručni i znanstveni članci predlažu načine upravljanja drvenim nanosima, restauraciju drvenih nanosa, njihovu količinu i smještaj unutar vodenih površina. Tako se primjerice predlaže da se LWD koji ne blokira više od 10 % presjeka vodotoka ne uklanja ili da se LWD smješten poprečno na vodotok treba zakretati do kuta od 20–40° u smjeru vodotoka (Trayer, 2000). Veći dio tih smjernica nije direktno primjenjiv na području NPPJ zbog specifičnosti vodotoka i jezera sa sedrenim barijerama.

Brojnim terenskim izlascima ustanovljeni su pozitivni i negativni primjeri utjecaja nanosa na dinamiku vode. Prepoznat je već prije navedeni pozitivni utjecaj na vodna tijela dok se negativni utjecaj odrazio kroz nakupljanje velikih količina nano-

sa na sedrenim barijerama koji može dovesti do promjena smjerova kretanja vode, presušivanja pojedinih barijera, povećanja koncentracije organske tvari i sl.

S obzirom na prirodnost nanosa moguće je razlikovati tri tipa:

- Prirodni nanos – srušena drva i otpala vegetacija
- Poluprirodni nanos – fiziološki oslabljena drva oborena zbog sigurnosti posjetitelja
- Animalni nanos – nastao djelovanjem dabara (na području NPPJ prisutan u zadnjih 15-tak godina).

S vremenom se stav o tome da se nanosom ne upravlja počeo mijenjati. Tako se primjerice planira da se, u većini slučajeva, oborena fiziološki oslabljena stabla ne ostavljaju u vodi. Takvim je stablima potrebno znatno više vremena da istrunu te je zaključeno da njihovo uklanjanje ipak doprinosi prirodnosti sustava. Na mjestima gdje je uočena znatna promjena protoka planira se uklanjanje ili zakretanje isključivo poluprirodnih i animalnih nanosa iako je vjerojatno da će se na isti način postupiti i kod značajnih promjena protoka uzrokovanih prirodnim nanosom. Fiziološki oborena stabla na više mjesta usporavaju, preusmjeravaju tok ili stvaraju barijere (Slike 2 i 3). Trska i močvarni ljutak koje je odgrizao dabar počeli su zatvarati pojedine kanale, a nakon nekog vremena tonu na dno jezera čineći debeli sloj organske tvari na mjestima gdje je prije taložen jezerski sediment (Slika 4). U ovakvim slučajevima planira se uklanjanje dijela biljnog materijala iz vode.



*Slike 2. i 3. Utjecaj poluprirodnih nanosa na vodeni tok*

Navedene aktivnosti su tek u inicijalnoj fazi, smjernice su ustanovljene, a kroz ciljane akcije i praćenja stanja utvrdit će se metodologija upravljanja nanosima što bi u konačnici trebalo dovesti do izrade preporuka za upravljanje i očuvanje stanišnog tipa Sedrene barijere krških rijeka Dinarida (32A0).



Slika 4. Trska i močvarni ljutak na površini i dnu jezera

### 3. ZAKLJUČAK

U vodotocima i jezerima NPPJ postoje znatne količine nanosa drvenog i drugog biljnog materijala. Osim već poznatih pozitivnih utjecaja ustanovljeni su i neki negativni utjecaji nanosa poput smanjenja protoka, promjena smjerova kretanja vode, presušivanja pojedinih sedrenih barijera i povećanja koncentracije organske tvari. Konkretno mjere za upravljanje stanišnim tipom Sedrene barijere krških rijeka Dinarida (32A0) još uvijek nisu definirane pa NPPJ pokreće aktivnosti vezane uz njihovu izradu, a jedna od njih je upravljanje nanosima. Planiraju se ciljane akcije na pojedinim mikrolokacijama u NPPJ koje će se temeljiti na dosadašnjim spoznajama. Na temelju rezultata praćenja provedenih ciljanih akcija uspostaviti će se metodologija upravljanja nanosima što će se ugraditi u preporuke za upravljanje i očuvanje stanišnog tipa Sedrene barijere krških rijeka Dinarida (32A0).

### LITERATURA

- [1] Mott, N. (2006): *Managing Woody Debris in Rivers, Streams & Floodplains*, Staffordshire Wildlife Trust, UK, 16.
- [2] Reich, M., Kershner, J. L., Wildman, R. C. (2003): *Restoring Streams with Large Wood: a Synthesis*, American Fisheries Society Symposium, 37, str. 1-12.
- [3] Trayer, K. (2000): *The management and replacement of large woody debris in waterways*, Water Notes, 13, url: [https://www.water.wa.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0008/3122/11442.pdf](https://www.water.wa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0008/3122/11442.pdf) (Preuzeto 30. siječnja 2020.).

OKRUGLI STOL

## *Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# **PREDVIĐANJE PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA U VODOTOCIMA MODELIMA UTEMELJENIM NA PODACIMA**

## **PREDICTION OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN WATERCOURSES USING DATA-DRIVEN MODELS**

**Kristina Potočki<sup>a</sup>, Neven Kuspilić<sup>a</sup>, Gordon Gilja<sup>a</sup>**

*KLJUČNE RIJEČI: pronos suspendiranog nanosa, rijeka Krapina, neuronska mreža, modeli utemeljeni na podacima*

*KEYWORDS: suspended sediment transport, River Krapina, neural network, data-driven models*

### **1. UVOD**

Pronos nanosa u otvorenim vodotocima, kao i mogućnost procjene njegovog režima, predstavlja važnu komponentu razumijevanja morfo dinamičkih procesa povezanih s različitim klimatskim i antropogenim utjecajima te omogućava učinkovitije upravljanje vodama na razini sliva. Modeliranju pronosa nanosa se može pristupiti na dva načina: primjenom procesnih modela utemeljenih na fizikalnim zakonima i poznavanju procesa ili modelima utemeljenim na podacima. Modeli utemeljeni na podacima, za razliku od modela utemeljenih na fizikalnim zakonima, u potpunosti su bazirani na izmjerenim podacima i često se tradicionalno s aspekta modeliranja hidroloških vremenskih serija nazivaju još i modelima crne kutije, a mogu se podijeliti

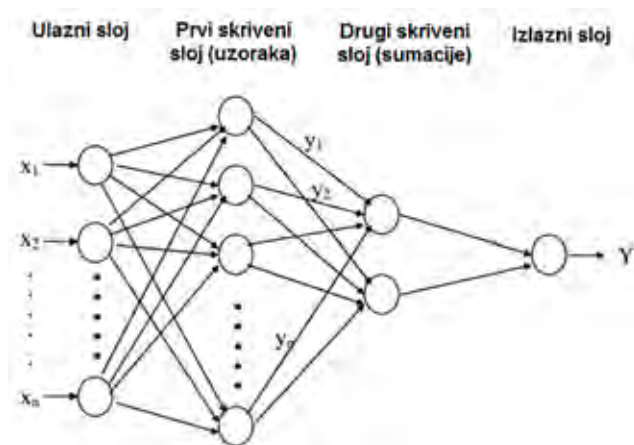
---

<sup>a</sup> Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, Zagreb, 10000, Hrvatska, kristina.potocki@grad.unizg.hr, neven.kuspilic@grad.unizg.hr, gordon.gilja@grad.unizg.hr



na tri grupe: (1) regresijski modeli (2) modeli vremenskih serija i (3) modeli umjetne inteligencije (Wang, 2006). Danas sve širu primjenu u modeliranju hidroloških varijabli, pa tako i pronosa nanosa, imaju modeli umjetne inteligencije kao što su genetski algoritmi, genetsko programiranje, neuronske mreže i potporni vektori (Kisi i drugi, 2012; Nourani i drugi, 2014). Spomenuti modeli su se pokazali dobrim u modeliranju različitih hidroloških procesa pa tako i protoka i pronosa nanosa u vodotocima. Osobita im je prednost što varijable ne trebaju zadovoljiti preduvjet stacionarnosti i linearnosti jer ih velika većina hidroloških varijabli ne može zadovoljiti.

Modeliranje pronosa mjesečnog suspendiranog nanosa pomoću modela generalizirane regresijske neuronske mreže (GRNN) je prikazano na primjeru mjesečnog pronosa nanosa na vodomjernoj stanici (VS) Kupljenovo na slivu rijeke Krapine za vremensko razdoblje 1980.-2011., tj. za niz od 32 godine na temelju ulaznih podataka o pronosu suspendiranog nanosa (QSS) i o protocima (Q) te su rezultati predviđanja uspoređeni s regresijskim modelom višestruke linearne regresije (MLR). Evaluacija modela provedena je na temelju uvjeta minimalne srednje kvadratne pogreške (RMSE) i maksimalnog koeficijenta determinacije ( $R^2$ ) modela (Slika 1). Rijeka Krapina lijeva je pritoka rijeke Save s duljinom toka od 66,9 km i površinom sliva od 1237 km<sup>2</sup>. VS Kupljenovo se nalazi 13,8 km od ušća i ima pripadnu slivnu površinu od 1150 km<sup>2</sup>.



Slika 1. Shematski prikaz GRNN modela za predviđanje varijable Y pomoću ulaznih varijabli  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (Kim i drugi, 2003)

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Ulazni podaci su prethodno skalirani na raspon u intervalu [0,1 0,9] te su podijeljeni na dio podataka za kalibraciju modela (trening set za GRNN) koji se sastoji od 78 % podataka (1980.-2004.) i dio za validaciju modela (test set za GRNN) koji se sastoji od 22 % podataka (2005.-2011.) (Bowden i drugi, 2005; Hsu i drugi, 1995). Provedena je analiza auto-korelacijskih i kros-korelacijskih karakteristika mjesečnih protoka i

pronosa suspendiranog nanosa te su kao ulazni podaci razmatrani protok u trenutnom mjesecu ( $t$ ) te protok i pronos nanosa u prethodnim mjesecima ( $t-n$ ), tj. sedam mogućih varijabli:  $Q$ ,  $Q(t-1)$ ,  $Q(t-2)$ ,  $Q(t-3)$ ,  $QSS(t-1)$ ,  $QSS(t-2)$ ,  $QSS(t-3)$ . Odabir ulaznih parametara je napravljen prema uvjetu da ne dolazi do povećanja greške u testu, tj.: za MLR je to stepwise metoda, a za ANN (GRNN) model je programirana rutina koja je slična stepwise metodi (Potočki, 2014).

Tablica 1. Rezultati MLR i GRNN modela za predviđanje mjesečnog pronosa suspendiranog nanosa na VS Kupljenovo s prikazanih nekoliko najboljih kombinacija ulaznih varijabli. Odabrana najbolja kombinacija ulaznih varijabli je označena podebljano

Model	Ulazne varijable	Kalibracija / trening		Validacija / test	
		R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
MLR	Q(t), Q(t-1)	0,70	73,37	0,59	77,03
	Q(t), Q(t-1), QSS(t-1)	0,72	70,19	0,58	78,47
GRNN	Q(t), Q(t-1)	0,794	60,89	0,583	77,57
	<b>Q(t), Q(t-3)</b>	0,872	47,74	<b>0,644</b>	72,49
	Q(t), Q(t-3), QSS(t-3)	0,912	39,71	0,640	<b>72,37</b>

Rezultati MLR i GRNN modela za predviđanje mjesečnog pronosa suspendiranog nanosa na VS Kupljenovo su prikazani u Tablici 1. Prikazane su dvije najbolje kombinacije za MLR model i tri kombinacije ulaznih podataka za GRNN model. Predviđanju MLR modela su najviše pridonijeli protok u istom mjesecu  $Q(t)$  i protok iz prethodnog mjeseca  $Q(t-1)$ , a predviđanju GRNN modela protok u istom mjesecu  $Q(t)$  i protok od prije tri mjeseca  $Q(t-3)$ . Dvije su najbolje kombinacije prema uvjetu minimalne RMSE i maksimalnog R<sup>2</sup> za GRNN model ( $Q(t) + Q(t-3)$  te  $Q(t) + Q(t-3) + QSS(t-3)$ ), a odabran je model s dvije ulazne varijable  $Q(t)$  i  $Q(t-3)$  zbog principa jednostavnosti koji se ogleda u manjem broju varijabli za predviđanje. Usporedba MLR i GRNN modela pokazuje da je za najbolju kombinaciju ulaznih podataka kod GRNN modela došlo do smanjenja RMSE i povećanja R<sup>2</sup> u odnosu na MLR model što ujedno potvrđuje bolju sposobnost predviđanja pronosa nanosa.

### 3. ZAKLJUČAK

Prikazan je primjer primjene dva modela utemeljena na podacima za modeliranje mjesečnog pronosa nanosa na VS Kupljenovo na rijeci Krapini, pri čemu je model neuronske mreže pokazao bolju sposobnost predviđanja u odnosu na rezultate iz regresijskog modela. U modeliranju pronosa suspendiranog nanosa potrebno je iskoristiti sve mogućnosti postojećih procesnih modela i modela utemeljenih na podacima, uz korištenje mogućnosti modela umjetne inteligencije koje prati brzi i snažan



razvoj. Unatoč svim prednostima modela umjetne inteligencije, za kvalitetnu primjenu i evaluaciju dobivenih rezultata potrebno je ekspertno poznavanje hidroloških procesa i varijabli koje se modeliraju, kombiniranje različitih modela i usporedba rezultata s drugim modelima.

## LITERATURA

- [1] Bowden, G. J., Dandy, G. C., Maier, H. R. (2005): *Input determination for neural network models in water resources applications*, Part 1—background and methodology, *Journal of Hydrology*, 301(1-4), 75-92.
- [2] Hsu, K., Gupta, H. V., Sorooshian, S. (1995): *Artificial Neural Network Modeling of the Rainfall-Runoff Process*, *Water Resources Research*, 31, 2517-2530.
- [3] Kim, B., Kim, S., Kim, K. (2003): *Modelling of plasma etching using a generalized regression neural network*, *Vacuum*, 71, 497-503.
- [4] Kisi, O., Dailr, A. H., Cimen, M., Shiri, J. (2012): *Suspended sediment modeling using genetic programming and soft computing technique*, *Journal of Hydrology*, 450-451, 48-58.
- [5] Nourani, V., Hosseini Baghanam, A., Adamowski, J., Kisi, O. (2014): *Applications of hybrid wavelet-Artificial Intelligence models in hydrology: A review*, *Journal of Hydrology*, 514, 358-377.
- [6] Potočki, K. (2014): *Primjena valične transformacije u analizi hidroloških vremenskih serija*, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.
- [7] Wang, W. (2006): *Stochasticity, nonlinearity and forecasting of streamflow processes*, Delft University Press.

**VODNI REŽIM PRONOSA NANOSA U SLIVU  
PAZINČICE I PODZEMNOM KRŠKOM  
VODONOSNIKU IZVORA RAKONEK**

**WATER REGIME OF SEDIMENT TRANSPORT  
IN PAZINČICA CATCHMENT AND RAKONEK  
KARST AQUIFER**

**Maja Radišić<sup>a</sup>, Bojana Horvat<sup>a</sup>, Maja Oštrić<sup>b</sup>, Josip Rubinić<sup>a</sup>**

*KLJUČNE RIJEČI: Pazinska jama, izvor Rakonek, pronos nanosa, mutnoća*

*KEYWORDS: Pazin pit, Rakonek spring, sediment transport, turbidity*

## **1. UVOD**

Područje sliva i toka Pazinčice iznimno je vrijedan i osjetljiv resurs. Posebno se to odnosi na donji dio njezina toka koji završava Pazinskom jamom koja je i zaštićena kao značajan krajobraz. No, prirodne vrijednosti i ambijentalno vrijedni prostori nisu ograničeni samo na spomenutu donju dionicu toka, već se radi o puno većem utjecajnom području sliva Pazinčice, kao i s njime hidrografski povezanih prostora, koje se zbog podzemnih hidrografskih veza ponora Pazinčice, pruža na velik dio Istarskog poluotoka. Prije svega se to odnosi na područje Raše gdje je najznačajniji vodni resurs izvor Rakonek uključen još 1960. godine u vodoopskrbni sustav Vodovoda Pula, ali i više drugih izvora.

U vrijeme obilnijih padalina vodonepropusno flišno zaleđe sliva Pazinčice vodotocima daje izrazito bujični karakter. Zbog jako izraženih erozijskih procesa, izražena je

---

<sup>a</sup> Građevinski fakultet u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, maja.radisic@uniri.hr, bojana.horvat@gradri.uniri.hr, jrubic@uniri.hr

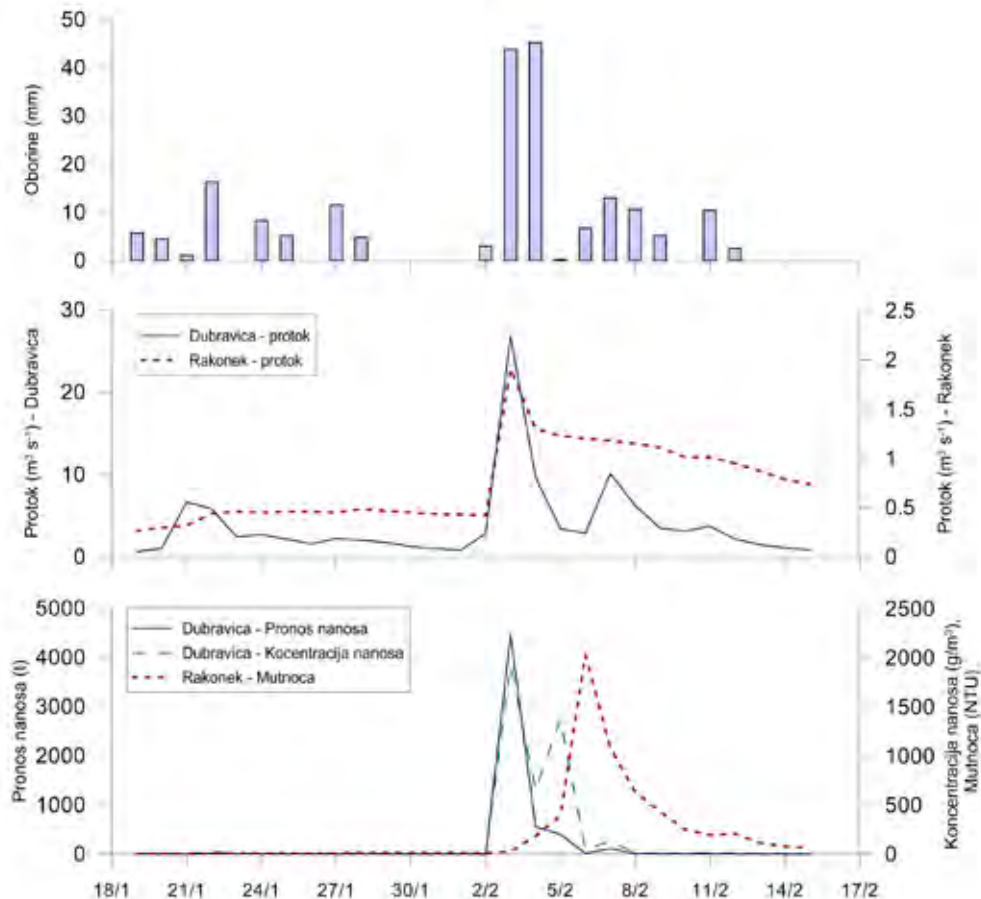
<sup>b</sup> Hrvatske vode, Ulica Đure Šporera 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, maja.ostric@voda.hr

produkcija i pronos nanosa (Rubinić i drugi, 1999). Iz tog razloga i povezanosti sliva Pazinčice s izvorom Rakonek (Rubinić, 1994), koji je uključen u vodoopskrbni sustav, pojava mutnoća na tom izvoru vrlo je česta pojava. U sklopu rada prikazani su i rezultati modeliranja mutnoće na izvoru Rakonek. Prilikom provedenih modeliranja korišteni su modeli strojnog učenja – neuronske mreže (*Multilayer Perceptron*) i regresijska stabla odlučivanja (*Trees.M5P*) koji su dali vrlo prihvatljive rezultate za više različitih korištenih nizova ulaznih podataka s različitih meteoroloških i hidroloških postaja.

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

U radu su, pri procjenama pojavnosti nanosa u slivu Pazinčice i međuodnosu s pojavama mutnoća na izvoru Rakonek, korišteni podaci s hidroloških postaja Dubravica na Pazinčici te izvora Rakonek, kao i meteorološke postaje Pazin i kišomjerne postaje Rakonek za razdoblje od 1994. do 2018. godine. Pronos nanosa na postaji Dubravica prati se od 1972. godine. Srednji godišnji pronos za razdoblje 1972.-2018. iznosi 8,37 t, maksimalni 31,9 t (1979. godine), a minimalni 0,781 t (2015. godine). Prisutan je trend opadanja srednjeg (0,21 t/god) i maksimalnog pronosa nanosa (18 t/god). Najveći pronos nanosa javlja se u mjesecu veljači, a najmanji u srpnju kada je i najmanja količina vode u koritu.

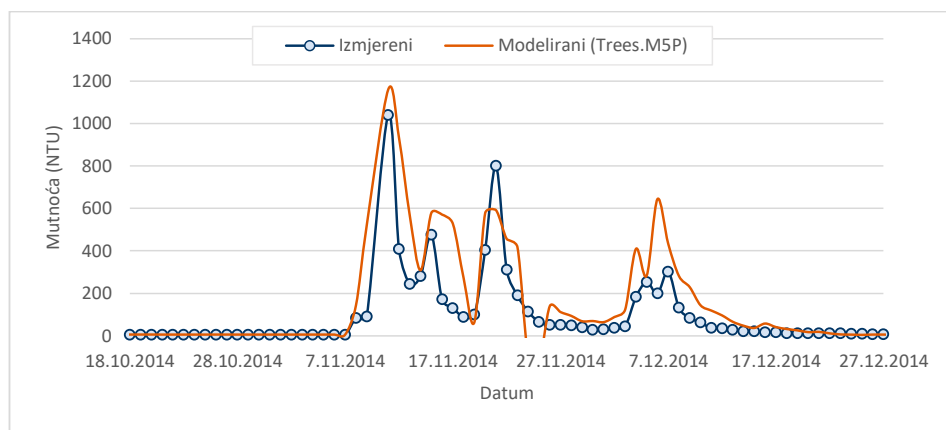
Povezanost stanja hidroloških prilika na Pazinčici i izvoru Rakonek vidljivo je na Slici 1. Vodni val Pazinčice iz veljače 2009. godine, praćen s iznimno velikim dnevnim pronosom nanosa od 4461 t, inicirao je nakon tri dana i pojavu maksimalne mutnoće na izvoru Rakonek od 2033 NTU-a. Pojava mutnoće na ovom izvoru javlja se u vodnjim razdobljima, nakon obilnih oborina, koje uz povećani donos nanosa u podzemlje površinskim tokom Pazinčice kroz ponorsku zonu, dinamiziraju podzemno protjecanje koje pokreće u krškom podzemlju i ranije sedimentirani nanos. Mutnoća je vrlo česta pojava na izvoru Rakonek. U razdoblju od 1994. do 2018. u prosjeku čak 250 dana godišnje mutnoća je veća od 4 NTU, što je ujedno i granica za pitku vodu, a 11 dana godišnje veća od 100 NTU.



Slika 1. Prikaz dnevnih podataka pronosa i koncentracije nanosa na postaji Dubravica, mutnoća na postaji Rakonek, protoka na postajama Dubravica i Rakonek, te oborinama na postaji Pazin (19.1.2009.-15.2.2009.)

Kako bi se dobili elementi za unaprjeđenje operativnog upravljanja ovim izvorištem, provedena su i modeliranja dnevnih mutnoća izvora Rakonek (Slika 2). Za modeliranje odabranim tehnikama inteligentne obrade korišten je WEKA programski alat za strojno učenje (Hall i drugi, 2009). Pri modeliranju su, nakon verifikacije modela, odabrane ulazne varijable oborine na postajama Rakonek i Pazin, te vodostaj na postaji Rakonek. Za sve atribute dodatno su uključena i prethodna stanja kako bi se ispitalo utjecaj prethodnih hidroloških stanja na pojavnost velikih mutnoća. Na Slici 2 dan je prikaz rezultata modela regresijskog stabla odlučivanja u vidu usporedbe izmjerenih i prognoziranih vrijednosti dnevnih mutnoća na nezavisnom, testnom nizu ulaznih podataka. Rangiranje atributa pokazalo je da prevladavajući utjecaj na proračunate vrijednosti mutnoća imaju ukupne oborine na postajama Pazin i Rakonek dva do pet dana prije. Provedene su i obrade koje prikazuju jačinu prilagodbe predviđenih vrijednosti s registriranim. Za registrirane mutnoće veće od 100 NTU-a,

modelom regresijskih stabla predviđeno je od njih 58 čak 50 (86 %), a modelom neuronskih mreža 47 (81 %).



Slika 2. Usporedni prikaz izmjerenih i modeliranih dnevnih mutnoća vode regresijskim stablima odlučivanja na izvoru Rakonek za razdoblje od 18. 10. 2014. do 27. 12. 2014.

### 3. ZAKLJUČAK

Na vodni režim izvora Rakonek i pojavu mutnoća utječu značajke nadzemnog toka rijeke Pazinčice i njenog pronosa nanosa, kao i procesi u podzemnom krškom vodonosniku s kojim je Pazinčica povezana svojim ponorom. Rezultati provedenih modeliranja pojava dnevnih mutnoća pokazali su da najveći utjecaj na pojavu mutnoća imaju vrijednosti ukupnih oborina palih dva do pet dana prije na postajama Pazin i Rakonek. Generiranim modelom dobiveni su vrlo dobri rezultati, čime je osiguran alat za pravovremenu prognozu pojave povećanih mutnoća te operativno upravljanje ovim izvorom.

### LITERATURA

- [1] Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., Witten, I. H. (2009): *The WEKA Data Mining Software: An Update*, SIGKDD Explorations, 11/1.
- [2] Rubinić, J. (1994): *Hidrološka analiza bilansa i mutnoća vode izvora Rakonek*, Drugi stručni skup Sekcije za vodoopskrbu i odvodnju (Ur.: Makvić, Ž., Vančina, E.), Zbornik radova, Hrvatsko društvo za zaštitu voda i mora, Zagreb, 189-201.
- [3] Rubinić, J., Bušelić, G., Kukuljan, I., Kosović, M. (1999): *Hidrološka analiza suspendiranog nanosa u istarskim vodama*, Hrvatske vode, 7 (27), 127-131.

### ZAHVALA

Ovaj rad je sufinanciralo Sveučilište u Rijeci projektom Uniri-tecnic-18-298.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**HIDROLOŠKA I MORFOLOŠKA DINAMIKA  
DUNAVA I UTJECAJ NA PODRUČJE KOPAČKOG  
RITA (PROJEKT NATURAVITA)**

**HYDROLOGICAL AND MORPHOLOGICAL  
DYNAMICS OF THE DANUBE AND IMPACT ON  
THE AREA OF KOPAČKI RIT  
(NATURAVITA PROJECT)**

Vedrana Ričković<sup>a</sup>, Renata Vidaković Šutić<sup>a</sup>, Silvija Sitar<sup>b</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: sliv rijeke Dunav, Kopački rit, režim površinskih voda, morfološke promjene*

*KEYWORDS: the Danube river basin, Kopački rit, surface water regime, morphological changes*

## 1. UVOD

Temeljni fenomen i iznimna vrijednost Parka prirode Kopački rit (PPKR) zasnovana je na poplavnoj prirodi područja nastalog djelovanjem dviju velikih rijeka, Dunava i Drave, pri čemu Dunav ima prevladavajući utjecaj na punjenje vodom predmetnog područja. Hidrološki režim Dunava karakteriziraju prosječno dva razdoblja velikih voda i dva razdoblja malih voda godišnje. Prema mjesečnom hodu zabilježenih vodostaja Dunava, maksimalni vodostaji najčešće se javljaju u lipnju, uz sekundarni maksimum u travnju, dok se glavni minimum javlja u siječnju, a sekundarni u listo-

---

<sup>a</sup> Institut za elektroprivredu d.d., Koturaška 51, Zagreb, 10000, Hrvatska, vedrana.rickovic@ie-zagreb.hr, renata.sutic@ie-zagreb.hr

<sup>b</sup> Hrvatske vode, VGO za Dunav i donju Dravu, Splavarska 2a, Osijek, 31000, Hrvatska, silvija.sitar@voda.hr

padu [2].

Područje je pod neprekidnim utjecajem toka voda koje daju ritam taloženja i erozije na području PPKR. Uočeni trendovi na području PPKR ukazuju na potencijalno smanjenje retencijskog kapaciteta poplavnog područja te na smanjenje bioraznolikosti područja.

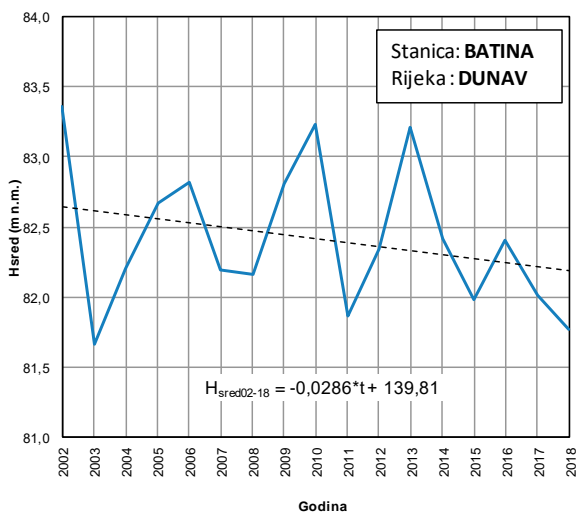
## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Analizom srednjih godišnjih vodostaja Dunava na hidrološkim stanicama Batina [1] (2002.-2018.) i Apatin [4] (1992.-2018.), prikazanih na Slikama 1 i 2 vidljiv je njihov opadajući trend [3].

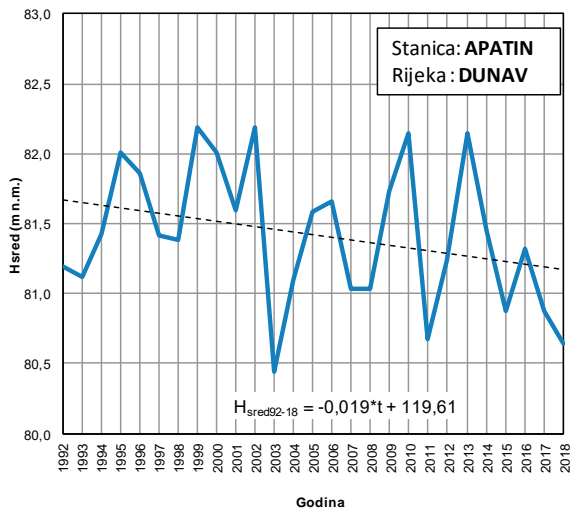
U razdoblju 2006.-2018. na lokacijama hidroloških stanica Batina i Aljmaš sniženje srednjih godišnjih vodostaja kreće se od oko 20 cm u području malih voda, do 30 cm u području srednjih voda.

Analizirane krivulje protoka na h.s. Batina temeljem raspoloživih podataka od 2009. do 2019. godine [1] ukazuju da je i korito Dunava na lokaciji h.s. Batina podložno promjenama [2], [3]. Iz prikaza konsumpcijskih odnosa prikazanih na Slici 4, u području malih voda uočava se pomicanje krivulja protoka u desno. Prisutna denivelacija vodostaja ukazuje na lokalnu denivelaciju korita, što potvrđuju i raspoložive snimke poprečnog presjeka korita na h.s. Batina iz 2010. i 2015. godine [1] prikazane na Slici 3.

Slike 1 i 2 prikazuju nivograme srednjih godišnjih vodostaja s pripadajućim trendovima na h.s. Batina i h.s. Apatin na Dunavu.

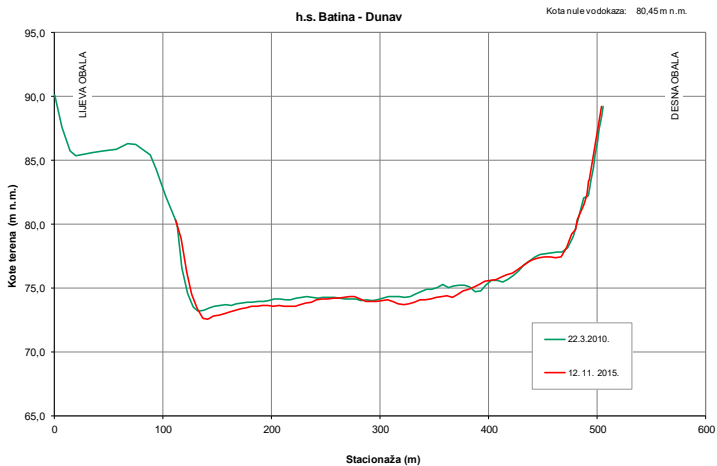


Slika 1. Nivogram srednjih godišnjih vodostaja na h.s. Batina



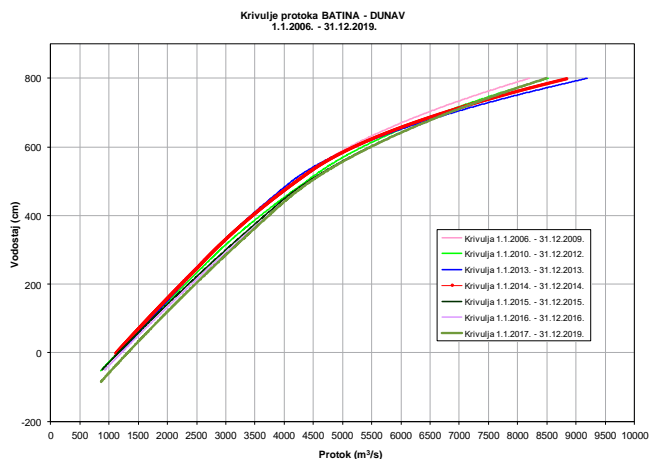
Slika 2. Nivogram srednjih godišnjih vodostaja na h.s. Apatin

Na Slici 3 prikazani su poprečni presjeci korita Dunava na h.s. Batina, a na Slici 4 protočne krivulje na istoj hidrološkoj stanici.



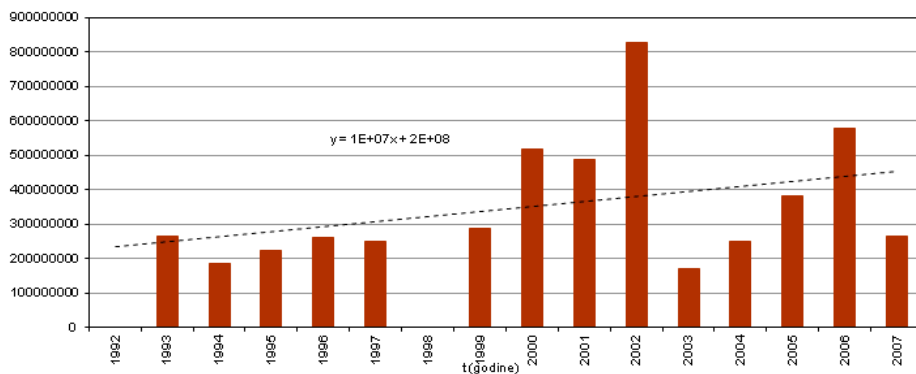
Slika 3. Poprečni presjeci korita na lokaciji h.s. Batina na Dunavu





*Slika 4. Protočne krivulje za h.s. Batina na Dunavu*

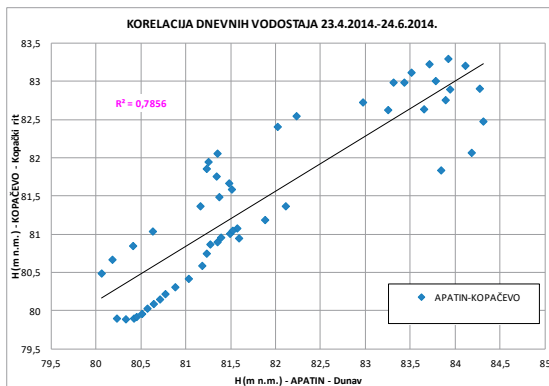
Kako za lokacije hidroloških stanica na Dunavu u Republici Hrvatskoj nema raspoloživih podataka o pronosu nanosa, korišteni su podaci s h.s. Bezdan na Dunavu u Republici Srbiji [4]. Slika 5 prikazuje ukupni godišnji pronos suspendiranog nanosa Dunava na h.s. Bezdan s pripadajućim trendom. Za raspoložive podatke razdoblja od 1992. do 2007. godine trend ukupnog godišnjeg pronosa suspendiranog nanosa na lokaciji h.s. Bezdan je rastući.



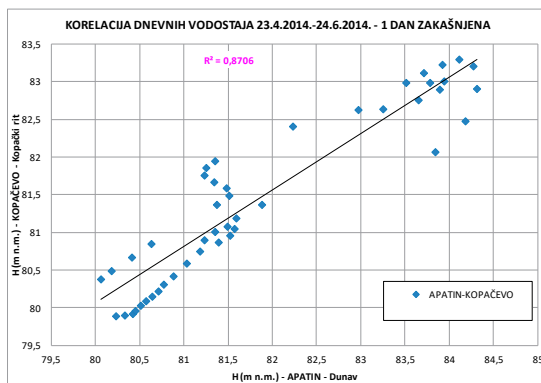
*Slika 5. Ukupni godišnji pronos suspendiranog nanosa (t/god) na h.s. Bezdan na Dunavu*

U cilju ocjene utjecaja vodostaja Dunava na područje Kopačkog rita provedene su korelacijske analize vodostaja za lokacije mjerenja h.s. Apatin i h.s. Kopačevo. Prema provedenoj analizi, najveći koeficijent korelacije odnosno najveća podudarnost vodostaja, dobivena je usporedbom vodostaja Dunava i Kopačkog rita za jedan do tri dana zakašnjenja, ovisno o analiziranome vodnom valu (Slike 6, 7, 8 i 9). Visoki koeficijenti korelacije ukazuju na ovisnost vodostaja u Kopačkom ritu o vodostajima na Dunavu. Prikazane vrijednosti treba smatrati orijentacijskima zbog toga što su za korelacijske analize bile dostupne srednje dnevne vrijednosti vodostaja Dunava i dnevne

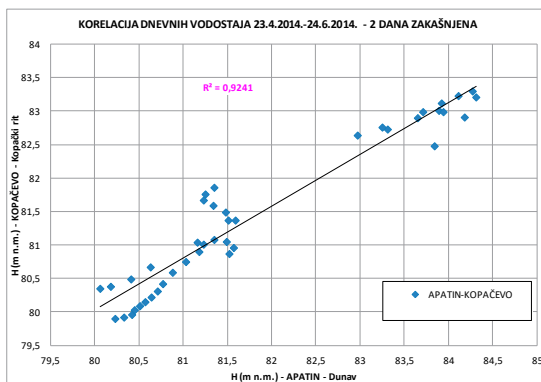
vrijednosti vodostaja u Kopačkom ritu (očitanje jednom dnevno u 7.30). Preciznije vrijednosti moguće je dobiti korelacijom satnih vrijednosti vodostaja Kopačkog rita i Dunava, koji nisu bili raspoloživi [3].



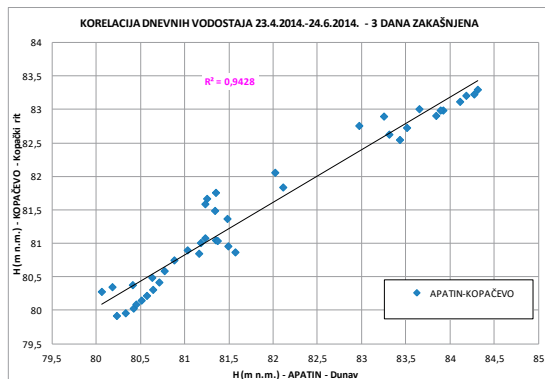
Slika 6. Korelacija vodostaja Kopačkog rita i Dunava – VV 2014. god.



Slika 7. Korelacija vodostaja Kopačkog rita i Dunava – VV 2014. god. - 1 dan zakašnjenja



Slika 8. Korelacija vodostaja Kopačkog rita i Dunava – VV 2014. god. - 2 dana zakašnjenja



Slika 9. Korelacija vodostaja Kopačkog rita i Dunava – VV 2014. god. - 3 dana zakašnjenja

### 3. ZAKLJUČAK

Vodni režim hidrografske mreže na području Parka prirode Kopački rit u velikoj mjeri ovisi o hidrološkim prilikama na Dunavu. Trendovi srednjih godišnjih vodostaja Dunava su opadajući, trend pronosa suspendiranog nanosa je rastući, a snimke poprečnih profila ukazuju na lokalnu denivelaciju korita. Provedena korelacijska analiza vodostaja Dunava i Kopačkog rita potvrdila je njihovu ovisnost što potvrđuju i visoki koeficijenti korelacije. Temeljem uočenih efekata i trendova, na području Parka prirode Kopački rit ne može se očekivati veći doprinos vodnih količina i dulje trajanje poplavnih vodostaja.

### LITERATURA

- [1] HIS 2000, Baza hidroloških podataka DHMZ.
- [2] Institut za elektroprivredu d.d. (2019): *Projekt Danube Sediment - okvirna procjena sedimenta rijeke Dunav i većih pritoka*, Lubura-Matković, T., Zagreb.
- [3] Institut za elektroprivredu d.d., Vitaprojekt (2020): *Razminiranje, obnova i zaštita šuma i šumskog zemljišta u zaštićenim i Natura 2000 područjima u dunavsko-dravskoj regiji - Naturavita – Utvrđivanje retencijskog kapaciteta i nultog stanja voda i o vodama ovisnih ekosustava (aktivnost 7.1.)* – u izradi, Vidaković Šutić, R., Zagreb.
- [4] <http://www.hidmet.gov.rs>, Stranice Republičkog hidrometeorološkog zavoda Republike Srbije.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**MJERENJE NANOSA U AKUMULACIJSKOM  
JEZERU BUTONIGA**

**MEASUREMENT OF SEDIMENT IN BUTONIGA  
RESERVOIR**

Andrija Rubinić<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: Akumulacija Butoniga, akumulacijsko jezero, nanos, jezerski sedimenti*

*KEYWORDS: Butoniga reservoir, reservoir, sediments, lake sediments*

**1. UVOD**

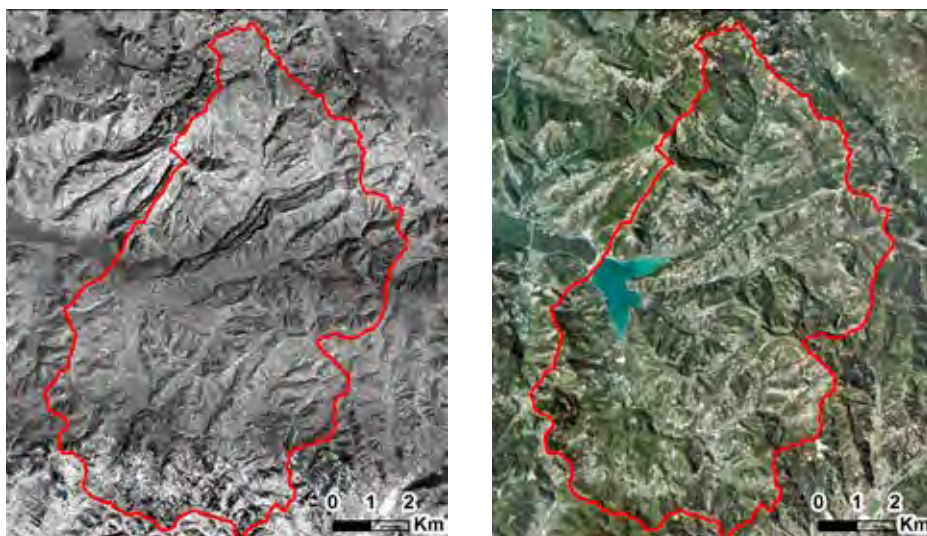
Akumulacija Botonega je projektirana i izgrađena kao centralni višenamjenski objekt za integralno upravljanje vodom u Istri. Projektirana je sa svrhom reduciranja poplavnog vala potoka Botonege i njezinog recipijenta rijeke Mirne kao i osiguranja dovoljnih količina vode za rastuće potrebe u vodoopskrbi i navodnjavanju poljoprivrednih površina u Istri (Hrvatske vode, 2017). Izrada projektne dokumentacije započela je u drugoj polovici 60.-tih godina, a građevinski radovi započinju 1979. godine i završavaju 1988. godine. Prema projektnoj dokumentaciji ukupni volumen akumulacije je 22,1 milijuna m<sup>3</sup>, od čega je 2,0 milijuna m<sup>3</sup> mrtvi prostor za prihvatanje nanosa i 2,6 milijuna m<sup>3</sup> prostor za prihvatanje vodnoga vala (Kos, 2005). Akumulacija i njen sliv od oko 73 km<sup>2</sup> nalaze se većinom na fliškom terenu.

Prilikom projektiranja akumulacije razmatrana je problematika taloženja nanosa u zaplavnom prostoru akumulacije, zbog očekivanja nastavka jake erozije tada velikih golih fliških područja. Od vremena projektiranja akumulacije smanjile su se poljoprivredne površine, a povećale su se površine s prirodnom vegetacijom (Slika 1)

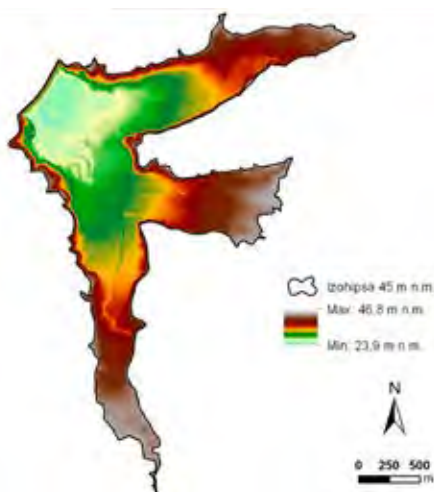
---

<sup>a</sup> Hrvatske vode VGO za slivove sjevernoga Jadrana, Đure Šporera 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, andrija.rubinic@voda.hr

pa je za očekivati da se bitno smanjila i erozija tla. Od puštanja u rad akumulacije rađeno je više kontrolnih mjerenja metodom kontrolnih poprečnih profila, a kontrolno mjerenje rađeno 2012. godine provedeno je puno detaljnije mjerenjem mreže točaka (Hrvatske vode, 2013). Tim mjerenjem snimljeno je čak 23716 točaka, sa srednjom udaljenosti mjerenih točaka od oko 5 m. Na osnovi tih mjerenja je napravljen model terena zaplavnog prostora akumulacije, odnosno dna jezera, od najveće dubine do približne visine krune brane (Slika 2). Radi usporedbe s početnim stanjem zaplavnog prostora digitalizirana je geodetska snimka iz 1985. godine koja je nastala prije dovršetka izgradnje brane, te je na osnovi nje napravljen model terena početnog stanja. Usporedbom ta dva modela došlo se do količina nanosa u zaplavnom prostoru.



Slika 1. Sliv akumulacije Butoniga na ortofoto snimku iz 1968. i 2011. godine

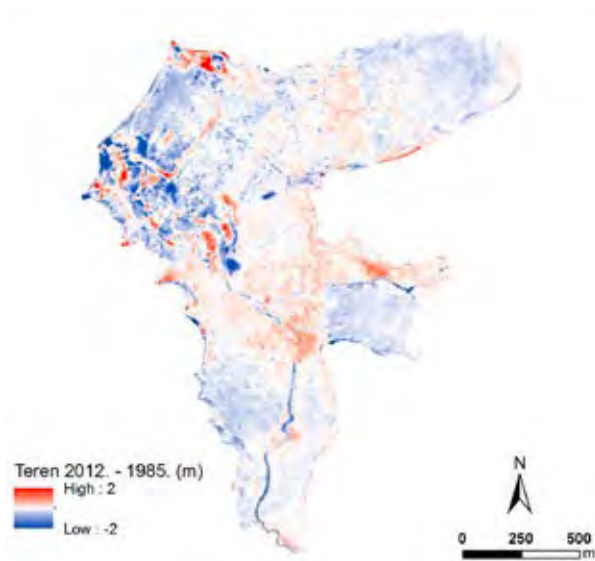


Slika 2.  
Model terena dna  
akumulacije Botoniga  
na osnovu mjerenja  
iz 2012. godine

## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Kako je 2012. godine u Istri vladala velika suša, vodostaj akumulacije Butoniga spustio se u ljetnim mjesecima na rekordno niske razine. Stoga je znatan dio zaplavnog prostora, od oko 40 % snimljenih točaka, od 23716 izmjerenih točaka, mogao biti snimljen klasičnim načinom - geodetskim GPS-om. Ostatak točaka dna akumulacijskog jezera snimljen je geodetskim sonarom. Radi kontrole mjerenja jedne i druge metode, manji dio terena snimljen je s obje metode kako bi se usporedila točnost mjerenja. Ta usporedba je pokazala da se rezultati mjerenja po objema metodama podudaraju. Iz mjerenih podataka i rubnih uvjeta dobivenih iz DMR podataka dobiven je DEM model rezolucije 5x5 m koristeći metodu interpolacije „natural neighbour“.

Kako bi se nova mjerenja mogla usporediti s početnim stanjem, stanjem prije izgradnje akumulacijskog jezera, potrebno je bilo izraditi model terena početnog stanja. To je napravljeno na osnovi situacije terena zaplavnog prostora iz 1985. godine koji je izrađen u mjerilu 1:2000 i dobiven na osnovi aerofotogrametrijske snimke prije punjenja akumulacije. Kod geodetske situacije problem predstavljaju korita vodotoka koja nisu detaljno definirana (snimljena) i močvarna područja koja su snimljena samo do razine vode. Za izradu digitalnog modela terena ta situacija je vektorizirana, te je čine: izohipse ekvidistance 1 m, izohipse ekvidistance 0,5 m na dijelu terena s blažim padom, mjerne točke i linije loma terena kojima je definirana brana. Iz ovih podataka napravljen je TIN model terena, a iz njega DEM model razlučivosti 5x5 m. Razlika dobivena oduzimanjem ta dva rasterska modela terena (DEM-a), iz 2012. i 1985. godine, dobiven je novi raster visinske razlike između njih, odnosno karta dubine nanosa (Slika 3).



Slika 3. Prikaz razlike visina modela terena iz 2012. i 1985. godine

### 3. ZAKLJUČAK

Iz razlika modela dobivenog mjerenjem 2012. godine i modela dobivenog na osnovi mjerenja 1985. godine uočljivo je da je dno akumulacije ostalo na približno istim kotama. Postoje mjesta gdje se po ovom modelu teren značajno razlikuje, što se više može pripisati različitim metodama mjerenja i velikoj razlici u redu veličine točnostima mjerenja. Obzirom na tu razliku, može se zaključiti da se ukupni volumen nije značajno promijenio jer je dobivena razlika u volumenu akumulacije od 0,1 %. Ta razlika je više rezultat značajno manje točnosti mjerenja iz 1985. nego nepostojanju sedimenta, ali možemo smatrati da ne postoji neka značajna količina nanosa. Tek s budućim mjerenjem dna jezera istom razinom točnosti, dobit ćemo točne podatke o količini i brzini taloženja nanosa.

### LITERATURA

- [1] Hrvatske vode (2013): *Kontrola nanosa akumulacije Botonega*, Petrović, V., Rijeka.
- [2] Hrvatske vode (2017): *Brana i akumulacija Botonega, opis, osnovni podatci, situacija, presjeci*, brošura, Rijeka.
- [3] Kos, Z. (2005): *Butoniga, vodoopskrbni sustav*, Istarska enciklopedija (Bertoša, M., Matijašić, R.), Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

# DONOS I SEDIMENTACIJA NANOSA U VRANSKOM JEZERU U DALMACIJI

## SEDIMENT TRANSPORT AND DEPOSITION IN VRANSKO LAKE IN DALMATIA

Josip Rubinić<sup>a</sup>, Maja Čuže Denona<sup>b</sup>, Maja Radišić<sup>a</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: Vransko jezero, pronos nanosa, sedimentacijski procesi, utjecaj mora*

*KEYWORDS: Vransko lake, sediment transport, processes of sediment production, impact of the sea*

### 1. UVOD

U radu su, na temelju kratkotrajnih hidroloških opažanja koncentracija i pronosa suspendiranog nanosa, prikazane značajke donosa nanosa u Vransko jezero s njegovog slivnog područja. Opisani su i sedimentacijski procesi u samom jezeru, te razlozi izrazito asimetričnog sedimentnog tijela na dnu jezera. Ta asimetrija ukazuje na vrlo značajnu otvorenost jezerskog sustava prema moru. Radi se o složenom vodnom sustavu u priobalju, koji je vrlo osjetljiv na promjene rubnih uvjeta koji definiraju njegovu opstojnost kao priobalnog, blago bočatog, ali ipak slatkovodnog jezerskog sustava koje je po površini najveće u Hrvatskoj i predstavlja vrijedni ramsarski lokalitet.

---

<sup>a</sup> Građevinski fakultet u Rijeci, Radmile Matejčić 3, Rijeka, 51000, Hrvatska, jrubinic@uniri.hr, maja.radisic@uniri.hr

<sup>b</sup> JU Park prirode Vransko jezero, Ul. kralja Petra Svačića 2, Biograd na Moru, 23210, Hrvatska, maja.cuze.denona@pp-vransko-jezero.hr

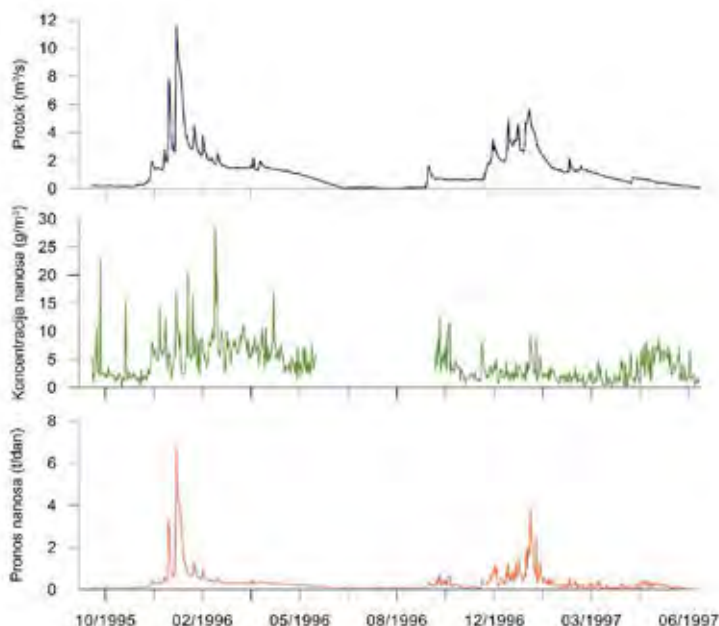


## 2. REZULTATI I RASPRAVA

Vransko jezero kod Biograda n/M je površinom najveći slatkovodni jezerski sustav u Hrvatskoj koji glavninu dotoka dobiva putem svojih pritoka iz Vranskog polja. Radi se o plitkom jezeru površine 31,12 km<sup>2</sup> pri srednjoj razini vode od 0,82 m n.m., s najvećom dubinom dna na koti od -3,47 m ispod razine mora – sve prema HVRS 1875 visinskom sustavu. Jezero se dinamički uravnotežuje s dotocima iz sliva i kolebanjima razine mora, a za održavanje jezera kao pretežno slatkovodnog sustava, vrlo značajnu ulogu imaju sedimentacijski procesi. Oni se u jezeru odvijaju na način da jezerski sustav karakteriziraju dominantni autigeni procesi taloženja kalcita (Ilijanić, 2014) s relativno malim neposrednim donosom terigenog materijala koji u jezerski sustav dopijeva dotocima njegovih pritoka, kao i povremenim eolskim erozijskim donosima. Kalcit se izlučuje iz voda samog jezera i taloži posredstvom organizama koji izgrađuju skelete od kalcita, a njihovim se ugibanjem akumuliraju fosilni fragmenti tvoreći biogeni vapnenac. Djelovanje bakterija, a posebno cijanobakterija, glavni je mehanizam formiranja recentnih karbonatnih taloga u slatkovodnim sredinama (Thompson i Ferris, 1990). Proces taloženja kalcita ovisan je o pH vode, temperaturi i koncentraciji hranjivih tvari. Veće količine nutrijenata tijekom rasta bakterija, rezultiraju bržim rastom i većim količinama istaloženog kalcita.

Provedenim istraživanjima utvrđena je brzina sedimentacije u različitim dijelovima jezerskog sustava. U radu Ilijanić (2014) razmatrani su procesi sedimentacije tijekom duljeg, geološki gledano, povijesnog razdoblja. Fajković (2014) razmatra dinamiku sedimentacije tijekom recentnog povijesnog razdoblja (1954.–2010.), za koje je procijenjena prosječna brzina sedimentacije 5,5 mm/god u sjeverozapadnom dijelu jezera, te 3,4 mm/god u jugoistočnom dijelu. Ako bi se kao prosječna vrijednost uzela 4,45 mm/god, proizlazi da se pri srednjoj razini jezera godišnje istaloži oko 140.000 m<sup>3</sup> sedimenta. Donos terigenog sedimenta putem vodotoka koji utječu u jezero iz Vranskog polja može se orijentacijski procijeniti na osnovi raspoloživih praćenja protoka, koncentracija i pronosa nanosa od listopada 1995. do lipnja 1997., koje je DHMZ provodio na postaji Vrana – Lateralni kanal (Slika 1). Vidljivo je da se relativno značajniji dnevni pronosi nanosa (reda veličine iznad 1 tone dnevno), odvijaju tijekom naglašenijih vodnih razdoblja, poglavito kad se veće vode jave nakon dugotrajnijeg sušnog razdoblja.

Uz pretpostavke da i ostali vodotoci koji utječu u jezero imaju sličan međudnos protoka i koncentracija suspendiranog nanosa, utvrđeno je da je prosječan godišnji pronos/donos nanosa u jezero sa sliva Vranskog polja tijekom razdoblja 1997.-2005. svega 207 t/god. Uz pretpostavku prosječne specifične gustoće nanosa od 1.500 kg/m<sup>3</sup>, dobiva se prosječan donos od svega oko 138 m<sup>3</sup>/god. To je, iako opterećeno mogućom greškom danih pretpostavki, čak za nekoliko redova veličina manje nego što je količina koja sedimentira u samom jezeru kao posljedica precipitacije otopljenih tvari koje dotječu u jezero, odnosno kemijskih i biogenih procesa u jezeru.



Slika 1. Prikaz hoda protoka, koncentracija i pronosa nanosa na postaji Vrana – Lateralni kanal (10.1995.-6.1997. ) - pronos tijekom izostanka praćenja koncentracija nadopunjen regresijom

Posebno je interesantna morfologija jezerskog dna koje tvori izrazito asimetrično sedimentno tijelo. Ono ima najveće dubine neposredno uz karbonatni hrbat koji na jugoistočnoj jezerskoj strani dijeli jezero od mora, posebno u zoni isklinjavanja vodonepropusnih slojeva koje dijelom prate konturu jezerske obale te se južnije od nje nalazi područje neposredne komunikacije jezera i mora kroz taj hrbat. Zbog toga se sedimentacija na toj jezerskoj strani odvija usporeno u odnosu na ostale dijelove jezerskog sustava gdje je naglašenije njegovo oplićavanje.

Sedimentacijski procesi su iznimno važni za očuvanje opstojnosti kriptodepresijskih jezera u priobalnim krškim područjima, kao i općenito za zaštitu priobalnih krških vodonosnika od zaslanjavanja. Naime, u uvjetima prisutnih utjecaja klimatskih promjena koje se ogledaju u podizanju razine mora, ravnotežno stanje između podzemnih voda u vodonosniku i moru se također podiže na više razine gdje su pukotinski sustavi u većoj mjeri otvoreni. No, podizanje razine mora uvjetuje i usporavanje protjecanja kroz priobalne krške vodonosnike, čime se intenziviraju sedimentacijski procesi unutar vodonosnika. Kada je podizanje razine mora intenzivnije nego spomenuti procesi sedimentacije unutar priobalnih krških vodonosnika, što se i događa u recentno doba, hidrološke veze mora i podzemnih voda, a u danom slučaju i jezerskog sustava, se intenziviraju i naglašenije su prisutni rizici od njihovog zaslanjavanja, posebno uslijed istovremeno prisutnih smanjivanja dotoka.

Dokazi otvorenosti jezerskog sustava Vranskog jezera i njegovog priobalnog krškog vodonosnika prema utjecajima mora ogledaju se i u strukturi bentoskih zajednica. Tako su skupine pridnenih makroskopskih beskralješnjaka obalne zone Vranskog jezera pokazale specifične i izrazite promjene u sastavu ovisno o lokaciji i salinitetu. Tijekom višegodišnjih izmjena uvjeta zaslanjenosti jezerske vode u razdoblju dominacije voda visokog saliniteta i razdoblju postepenog oslađivanja vode dominirale su skupine prilagođene bočatoj vodi, pogotovo u dijelovima jezera koji su pod većim utjecajem mora, dok su u slatkovodnom razdoblju s niskim salinitetom dominirale skupine prilagođene slatkovodnim uvjetima (oligohaline) (Žganec i drugi, 2019).

### 3. ZAKLJUČAK

Dobiveni rezultati pokazuju na složene procese koji utječu na procese sedimentacije u Vranskom jezeru kod Biograda n/M, a koji su uvjetovali i prisutnu asimetričnu morfologiju jezerskog dna. Uočljiv je utjecaj mora kako na same procese sedimentacije, tako i na životne zajednice koje obitavaju na dnu.

### LITERATURA

- [1] Fajković, H. (2014): *Utjecaj odlagališta otpada Baštijunski brig na geokemijski sastav površinskih jezerskih sedimenata Vranskog jezera u Ravnim kotarima*, disertacija, PMF fakultet, Zagreb, 207.
- [2] Ilijanić, N. (2014): *Minerali glina u jezerskim sedimentima istočno jadranske obale kao pokazatelji promjena okoliša tijekom kasnog pleistocena i holocena*, disertacija, PMF fakultet, Zagreb, 382.
- [3] Thompson, J.B., Ferris, F.G. (1990): *Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water*, *Geology*, 18/10, 995–998.
- [4] Žganec, K., Lajtner, J., Čuže Denona, M., Rubinić, J., Pušić, I., Kralj, T., Valić, D. (2019): *Climate change caused increased salinity fluctuations effects on littoral macroinvertebrate assemblages in the shallow lake Vransko jezero (Croatia)*, *Procc. SEFS11 Abstract book* (ur. Sertić Perić i drugi), 174.

### ZAHVALA

Ovaj rad su sufinancirali JU PP Vransko jezero i Sveučilište u Rijeci projektom Uniritecnic-18-298.

# VAŽNOST HIDROMORFOLOŠKIH PROCESA ZA ODRŽANJE POPULACIJA BREGUNICA I ČIGRI NA RIJECI DRAVI

## THE IMPORTANCE OF HYDROMORPHOLOGICAL PROCESSES FOR THE POPULATIONS OF SAND MARTINS AND STERNS ON THE DRAVA RIVER

Ivana Šarić<sup>a</sup>, Goran Šafarek<sup>b</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: Rijeka Drava, hidromorfološki procesi, bregunica (Riparia riparia), crvenokljuna čigra (Sterna hirundo), mala čigra (Sterna albifrons)*

*KEYWORDS: Drava River, hydromorphological processes, Sand Martin (Riparia riparia), Common Tern (Sterna hirundo), Little Tern (Sterna albifrons)*

### 1. UVOD

Tok rijeke Drave od Donje Dubrave do Terezinog Polja proglašen je područjem ekološke mreže oznake HR1000014 Gornji tok Drave površine oko 22.980 ha. Područje je značajno za očuvanje 25 vrsta ptica - gnjezdarica, preletnica i zimovalica te 14 vrsta ptica koje predstavljaju značajne negnijezdeće (selidbene) populacije (Uredba, 2019). U radu je dan osvrt na tri vrste ptica koje su svojom ekologijom vezane za staništa ovisna o hidromorfološkim procesima na rijeci. Bregunica (*Riparia riparia*) je vrsta vezana za okomito odronjene neobrasle obale na kojima su prisutni erozijski procesi. Crvenokljuna (*Sterna hirundo*) i mala čigra (*Sterna albifrons*) su vrste vezane za

---

<sup>a</sup> Vita projekt d.o.o., Ilica 191c, Zagreb, 10000, Hrvatska, ivana.saric@vitaprojekt.hr

<sup>b</sup> Trg kralja Krešimira 10, Koprivnica, 48000, Hrvatska, goran@safarek.com

šljunčane sprudove.

Zbog veće brzine vode ovaj dio toka rijeke znatno je podložniji promjenama te ima najveću raznolikost staništa pogodnih za gniježđenje ptica u odnosu na ostale dijelove toka rijeke Drave. Evidentirano je oko 40 sprudova i oko 40 lokacija sa strmim obalama (Grlica, 2007). Nastanak i održanje ovih staništa ovisno je o procesima erozije, prijenosa i taloženja sedimenta duž toka rijeke (Šafarek, 2012).

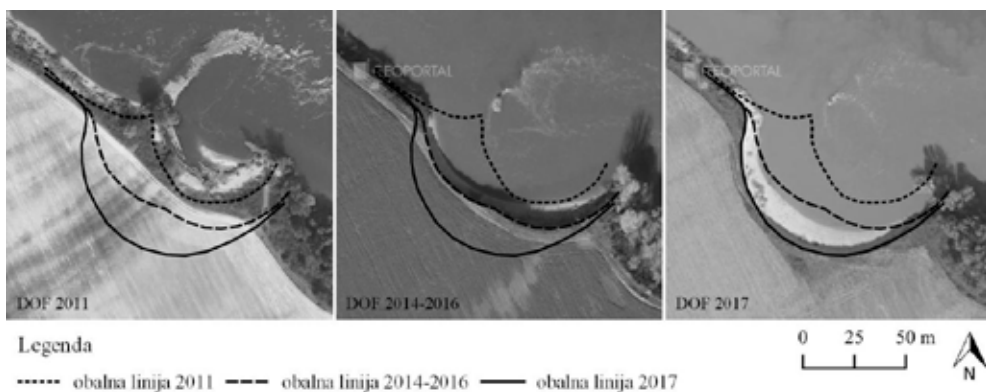
Regulacijama, branama i ostalim ljudskim utjecajem dolazi se do novih hidrotehničkih rješenja koje imaju svoje funkcije, ali i do nestanka i pogoršanja prirodnih staništa. Nestaje prirodna dinamika rijeka koja neprestano obnavlja staništa i omogućuje visoku biološku raznolikost. Nedostatkom sedimenta sve je manje i sprudova, a utvrđivanjem obala nestaju prirodne strme i visoke obale (Loczy, 2019).

## 2. RASPRAVA

### 2.1. Bregunica (*Riparia riparia*)

Bregunica je gnjezdarica nizinske Hrvatske. Gnijezdi se u strmim, odronjenim obalama Drave, Mure, Save i Dunava, po okolnim šljunčarama, a rjeđe i u manjim zemljanim odronima. Najvažnija su joj gnjezdilišta na rijeci Dravi. Pogodnost mjesta za gniježđenje ovisi o njegovoj podložnosti eroziji, pa tako bregunice za gniježđenje preferiraju svježe odrone u kojima mogu iskopati svježe rupe za gniježđenje (Tutiš i drugi, 2013). Prema Grlici (2007), na ovom je području ekološke mreže evidentirano 46 lokacija pogodnih za gniježđenje bregunica na duljini toka od 89 km.

Jedna od takvih lokacija je strma obala s desne strane rijeke kod Libanovca, na 233 rkm. Na ovoj lokaciji su prisutni vrlo intenzivni procesi erozije. Usporedbom digitalnih ortofoto snimaka vidljivo je da je u razdoblju od 2011. do najkasnije 2016. godine došlo do pomaka obalne linije oko 20-32 m, a nakon toga do 2017. godine do pomaka dodatnih oko 20 m (Slika 1).



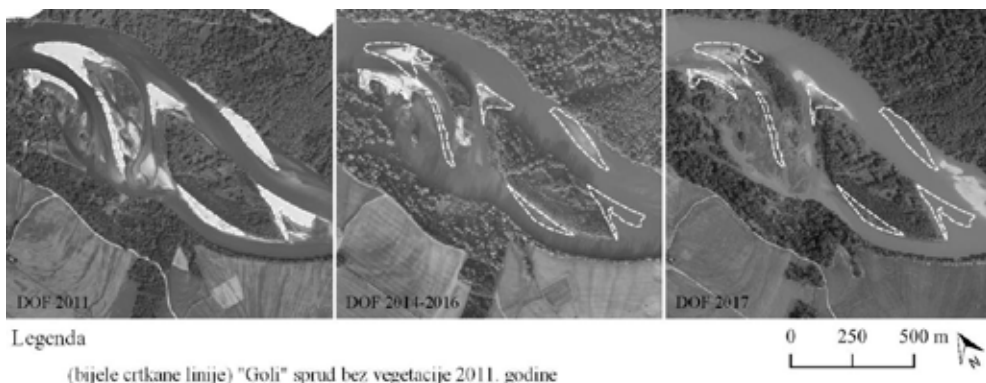
Slika 1. Promjena obalne linije rijeke Drave uslijed erozije obale na lokaciji Libanovec – tipično stanište za gniježđenje bregunice

Na području Drave monitoring bregunica redovito se provodio od 2005. do 2014. godine, a podaci ukazuju na prisutan trend opadanja broja parova (Grlica i Razlog-Grlica, 2014). Istovremeno, populacija piljaka koja je po vrsti ishrane i plijenu, migratornim rutama i gniježdenju vrlo slična bregunici, ostala je više-manje iste brojnosti. U odnosu na ukupan broj parova bregunica evidentiranih u razdoblju od 2013. do 2014. godine, na lokaciji Libanovec gnijezdilo je oko 35-50 % ukupne populacije na području ekološke mreže (ZZOP-MZOE, 2018). To ukazuje na važnost ove lokacije, odnosno na važnost održavanja prirodne riječne morfologije za održanje povoljnog stanja populacije bregunice na području ekološke mreže.

## 2.2. Crvenokljuna (*Sterna hirundo*) i mala čigra (*Sterna albifrons*)

Crvenokljuna i mala čigra gnijezde se na višim šljunčanim sprudovima - otocima, koji mogu djelomično biti obrasli pionirskom vegetacijom. Na području rijeke Drave gniježđenje je ograničeno na područje ekološke mreže HR1000014 Gornji tok Drave, odnosno od Donje Dubrave do Ferdinandovca, jer jedino još ovdje ima dovoljno pogodnih sprudova (Grlica i Razlog-Grlica, 2014). Mala čigra se najčešće gnijezdi u koloniji crvenokljune čigre, a na Dravi prema do sada zabilježenim podacima brojnost joj je oko 10 % populacije crvenokljune čigre (Grlica i Razlog-Grlica, 2014).

Monitoring čigri provodio se kontinuirano od 2005. do 2014. godine. Temeljem podataka monitoringa, ali i osobnim opažanjima (Šafarek, Grlica) uvidjelo se da je do 2010. godine glavna kolonija na ovom području bila populacija uzvodno od mosta Botovo. U prirodnim uvjetima rijeke s vremenom pomiču same sprudove odnoseći šljunak nizvodno, ali i donoseći novi šljunak iz uzvodnih dijelova (Kralj i drugi, 2019). Uslijed izmijenjenog prirodnog režima toka vode na ovoj lokaciji nema donosa novog šljunka i obnove spruda te je posljednjih godina zamijećeno da čigre napuštaju ovu lokaciju (Slika 2). Uočeno je da je glavna kolonija čigri nakon 2014. godine na lokaciji oko 20 km nizvodno, u predjelu Repaša.



(bijele crtkane linije) "Goli" sprud bez vegetacije 2011. godine

Slika 2. Procesi zaraštavanja i nestajanja spruda uzvodno od mosta Botovo (lokacije dugogodišnje glavne kolonije čigri) u razdoblju od 2011. do 2017. godine

### 3. ZAKLJUČAK

Iako broj parova i kolonija bregunica na području ekološke mreže HR1000014 Gornji tok Drave varira iz godine u godinu ovisno o vodostaju i drugim prirodnim fluktuacijama, evidentan je trend smanjenja njihove brojnosti koji se u najvećoj mjeri može pripisati nedostatku mjesta za gniježđenje.

Kao i kod bregunica, tako je i kod čigri na području ekološke mreže HR1000014 Gornji tok Drave evidentno smanjenje brojnosti zbog nestanka staništa. Poglavitno se to odnosi na nemogućnost obnavljanja šljunčanih sprudova zbog smanjenog donosa nanosa.

Na temelju svega iznesenog, zaključuje se da je za opstanak navedenih vrsta, visokospecijaliziranih za riječna staništa, ključno održanje prirodne dinamike, odnosno procesa erozije i taloženja nanosa. Prirodna staništa zaraštavaju ili nestaju, pa su stalno potrebne obnove strmih obala i sprudova.

### LITERATURA

- [1] Grlica, I.D. (2007): *Studija biološke raznolikosti rijeke Drave - Dio 1 Staništa – strme obale i sprudovi*, Virovitica, 83 str.
- [2] Grlica, I.D., Razlog-Grlica, J. (2014): *Monitoring bregunice (Riparia riparia), vodomara (Alcedo atthis), male čigre (Sterna albifrons) i crvenokljune čigre (Sterna hirundo) na rijekama Muri, Dravi i Dunavu tijekom 2014. godine*, Završno izvješće, Virovitica.
- [3] Kralj, J., Martinović, M., Tome, D., Basle, T., Božič, L., Ječmenica, B. (2019): *Nacrt prekograničnog akcijskog plana zaštite kontinentalne populacije crvenokljune čigre*, Projekt Interreg V-A Si-Hr ČIGRA. ZZO HAZU, NIB, DOPPS, Biom. Zagreb, Ljubljana, Maribor, 36 str.
- [4] Lóczy, D., Ciglić, R. (2019): *Nature Conservation, The Drava River, Environmental Problems and Solutions*, Loczy, D. (ur.), Springer Geography, Springer, Cham, str. 337-344.
- [5] Šafarek, G. (2012): *Recentne hidromorfološke promjene na širem području ušća Mure u Dravu*, Ekonomska i ekohistorija, VIII/8, str. 5-13, Samobor.
- [6] Tutiš, V., Kralj, J., Radović, D., Čiković, D., Barišić, S. (ur.) (2013): *Crvena knjiga ptica Hrvatske*, Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb, 258 str.
- [7] *Uredba o ekološkoj mreži i nadležnostima javnih ustanova za upravljanje područjima ekološke mreže*, NN 80/2019.
- [8] Zavod za zaštitu okoliša i prirode pri Ministarstvu zaštite okoliša i energetike (2018): *Baza podataka*.

OKRUGLI STOL

***Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi***

Varaždin, 2020.

---

**PROJEKT SIMONA: PRIJEDLOG  
TRANSNACIONALNO USKLAĐENIH  
PROTOKOLA UZORKOVANJA NANOSA  
I LABORATORIJSKIH PROTOKOLA ZA  
OPASNE TVARI U POVRŠINSKIM VODAMA  
DUNAVSKOGA SLIVA**

**SIMONA PROJECT: TRANSNATIONALLY  
HARMONIZED SEDIMENT SAMPLING AND  
LABORATORY PROTOCOLS FOR HSS IN DRB'S  
SURFACE WATERS PROPOSAL**

Ajka Šorša <sup>a</sup>, Danijel Ivanišević <sup>a</sup>, Lidija Galović <sup>a</sup>, Ana Čaić Janković <sup>a</sup>,  
Ivan Mišur <sup>a</sup>, Đorđa Medić <sup>b</sup>, Jasmina Antolić <sup>b</sup>, Neven Bujas <sup>b</sup>, Aleksandra  
Kovačević <sup>c</sup>, Jelena Vićanović <sup>c</sup>

*KLJUČNE RIJEČI: SIMONA, opasne tvari, nanos, protokol uzorkovanja, protokol laboratorijskih analiza*

*KEYWORDS: SIMONA, HSSs, sediment, sampling protocol, laboratory analyses protocol*

---

<sup>a</sup> Croatian Geological Survey, Sachsova 2, Zagreb, 10000, Croatia

<sup>b</sup> Croatian Waters, Ulica grada Vukovara 220, Zagreb, 10000 Croatia

<sup>c</sup> Public Institution „Waters of Srpska“, Miloša Obilića 51, Bijeljina, 76300, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina

\* Corresponding author: [ajka.sorsa@hgi-cgs.hr](mailto:ajka.sorsa@hgi-cgs.hr)



## 1. INTRODUCTION

The Interreg project Sediment-quality Information, MONitoring and Assessment System (SIMONA) is designed to ensure support for transnational cooperation in joint Danube Basin Water Management. The main task of the project is a proposal of a SIMONA tool for harmonized monitoring of the hazardous substances (HSs) in drainage sediment in the Danube River Basin (DRB) countries. The participants in the SIMONA project include various institutions from the DRB countries: Austria, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Germany, Hungary, Moldova, Montenegro, Romania, Serbia, Slovakia, Slovenia, and Ukraine. The Croatian Geological Survey (HGI-CGS) participated in all 6 Work packages and it is responsible for Working Package 4 (WP4) of the SIMONA project. The objective of the WP4 is to develop transnationally harmonized sampling and laboratory analysis protocols for mid- and long-time surface water sediment quality monitoring and assessment to assist the water authorities in their daily work across the DRB countries. The sampling and laboratory analysis protocols will be parts of the SIMONA System. HGI-CGS with the contribution of its Associated Strategic Partners (ASPs) Croatian Waters (Croatia) and Waters of Srpska (Bosnia and Herzegovina) completed both protocols.

## 2. RESULTS AND DISCUSSION

The river channel sediments are a sink as well as a source of HSs in a fluvial system. The HSs in sediments could represent a risk for the environment, and consequently, they should be monitored. Monitoring of HSs in sediments includes sampling, chemical analyses and risk assessments. The criteria proposed by the EQS Directive 2013/39/EU for the selections of the HSs in sediment and biota to be monitored are their insolubility in water, tendency to accumulate in sediments or association with pore water. These protocols aim to provide proposals for harmonized sampling strategy and laboratory analyses of the HSs in sediments according to the 2000/60/EC Water Framework Directive (WFD), in particular the EQS Directives (2013/39/EU and 2008/105/EC) and CIS Guidance Documents 7, 19, 25 and 27 (EC, 2003, 2009, 2010, 2018), ISO standards, ICPDR (ICPDR, 2003), and taking into consideration geological background and anthropogenic influences.

### *2.1. Transnationally harmonized sediment sampling protocol for HSs in DRB's surface waters (Sampling protocol)*

The drainage sediment in a river environment considered as suitable for monitoring are stream/bottom sediments and suspended sediment or suspended solids, and additionally, active floodplain sediment. Stream/bottom sediments represent what is entering a fluvial system from upstream and the suspended sediments describe the transport of HSs downstream to the next water body.

A monitoring procedure includes: selections of compounds to be monitored in sedi-

ments, selection of sediment sampling station (relevant standards for stream/bottom sediment - ISO 5667-12:2017; for suspended sediment - ISO 5667-17:2008 with some additional recommendations given in the Sampling protocol), sediment collection (composite samples, sampling depth and frequency, sample fraction for analysis, sample volume), sampling equipment, field observation sheet, wet-sieving in the field, transport, quality control and safety measure (Šorša and SIMONA Project team, 2019).

## ***2.2. Transnationally harmonized sediment laboratory analysis protocol for HSs in DRB's surface waters (Laboratory analysis protocol)***

The most used method for the determination of heavy metals is Inductively-coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and for the organic substances, Liquid chromatography and/or gas chromatography, linked to mass spectrometry (LC-MS and GC-MS). The ISO and/or EPA standards for chemical analytical methods for the HSs are proposed in the Laboratory analysis protocol (Čaić Janković et al.). The HSs for monitoring in the protocol were selected under the EQS Directive 2013/39/EU amending the Directive 2008/105/EC. Additionally, 5 heavy metals and their compounds from the List of Priority Substances for the Danube River Basin are included in this protocol (ICPDR, 2003). The Laboratory analyses protocol proposes procedures for sieving and drying sediment samples, their storage and archive, if necessary some kind of normalization (grain size correction, quartz correction, Al- and Li-normalization) and proper quality control (Čaić Janković et al., 2019).

## **3. CONCLUSION**

Both protocols, Sampling protocol and Laboratory analysis protocol, propose techniques for monitoring of selected HSs in sediments in a river environment. These procedures comprehensively investigate sediment-associated HSs in the Danube river basin according to the WFD requirements and other relevant regulative documents in Europe.

## **REFERENCES**

- [1] Čaić Janković, A., Šorša, A., The SIMONA Project Team (2019): *Sediment quality laboratory protocol for HSs*, EU Interreg Danube Transnational Programme, 37p.
- [2] EC (2000): *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*.
- [3] EC (2003): *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No. 7. Monitoring under the Water Framework Directive*. Luxembourg.

- [4] EC (2008): *Directive 2008/105/EC on Environmental Quality Standards (EQSs) in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council.*
- [5] EC (2009): *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No. 19 Guidance on Surface Water Chemical Monitoring under The Water Framework Directive*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- [6] EC (2010): *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No. 25 Guidance on chemical monitoring of sediment and biota under the Water Framework Directive*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- [7] EC (2013): *Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy.*
- [8] EC (2018): *Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Technical Guidance for deriving Environmental Quality Standards, Guidance Document No. 27.*
- [9] <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/simona>  
(Last access: 21.2.2020).
- [10] ICPDR (2003): *List of Priority Substances for the Danube River Basin. International Commission for the Protection of the Danube River*, 4p, Updated version 2018.
- [11] ISO 5667-12:2017 *Water quality – Sampling – Part 12: Guidance on sampling of bottom sediments from rivers, lakes and estuarine areas.*
- [12] ISO 5667-15:2009 *Water quality – Sampling – Part 15: Guidance on the preservation and handling of sludge and sediment samples* (reviewed and confirmed in 2015).
- [13] Šorša, A., The SIMONA Project Team (2019): *Sediment quality sampling protocol for HSs*, EU Interreg Danube Transnational Programme, 45p.

OKRUGLI STOL

*Nanos u vodnim sustavima – stanje i trendovi*

Varaždin, 2020.

---

**MONITORING SUSPENDIRANOG NANOSA I  
MUTNOĆE VODE U SLOVENIJI**

**MONITORING OF SUSPENDED SEDIMENT AND  
WATER TURBIDITY IN SLOVENIA**

**Florjana Ulaga<sup>a</sup>**

*KLJUČNE RIJEČI: suspendirani nanos, mutnoća vode, hidromorfologija, monitoring*

*KEYWORDS: suspended sediment, water turbidity, hydromorphology, monitoring*

**1. INTRODUCTION**

The suspended sediment is a result of surface soil erosion caused by rainfall, temperature differences, wind, terrain slopes and surface runoff. In Slovenia, the erosion is present and a significant proportion of sediment passes through the river profile during high waters. The purpose of suspended sediment monitoring is determination of the concentration and total amount of suspended sediment at a specific location along the river. A suitable monitoring network, correct measuring methods and standard laboratory analyses increase the monitoring quality and accuracy of sediment transport estimation. Good knowledge of sediment transport is an important element of river hydromorphology, which is, according to the Water Framework Directive, the most important indicator of the ecological status of water bodies.

---

<sup>a</sup> Slovenian Environment Agency, Vojkova 1b, Ljubljana, 1000, Slovenia, florjana.ulaga@gov.si

## 2. RESULTS AND DISCUSSION

The beginning of the monitoring of suspended sediment in Slovenia goes back to 1955, when sampling started in the Savinja River catchment. Regular monitoring of suspended material concentration on the Mura and Vipava rivers has been taking place since 1985. The number of sampling sites on the Sava River is subject to change. Some stations were included in monitoring network only for short periods. Until the year 2012, 44 hydrometric stations were included in the monitoring.

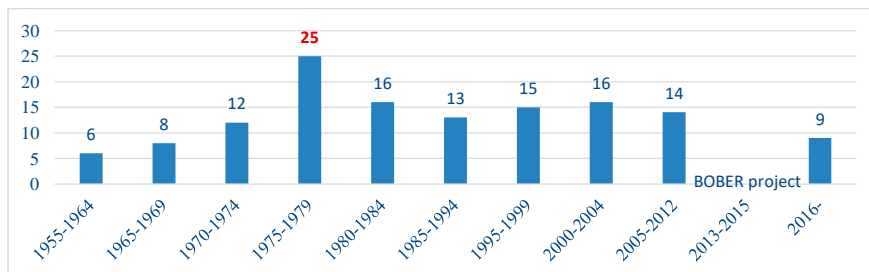


Figure 1. Number of gauging stations included in suspended sediment monitoring network

During the project BOBER (2009-2016), new measuring equipment for water turbidity monitoring was set up on nine stations. Turbidity is the cloudiness or haziness of a fluid caused by large numbers of individual solid particles that are generally invisible and is measured in FTU or NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Turbidity sensor gives a realistic picture of the stream blurriness dynamics, therefore the implementation of automatic turbidity sensors is recommended for better understanding of continuous suspended sediment transport in the rivers. Real time data transmission is one of the advantages of automatic sensor. The relationship between turbidity and suspended solids concentration is not completely invariable but depends on geological and hydrological parameters of river basin, on the size, structure and colour of the particles as well (Ulaga, 2015). The relationship between two parameters needs to be tested and proved periodically for every hydrological station. Single water sampling, suspended sediment profile measurements and laboratory analyses are still needed to evaluate the concentration of suspended sediment in the stream.

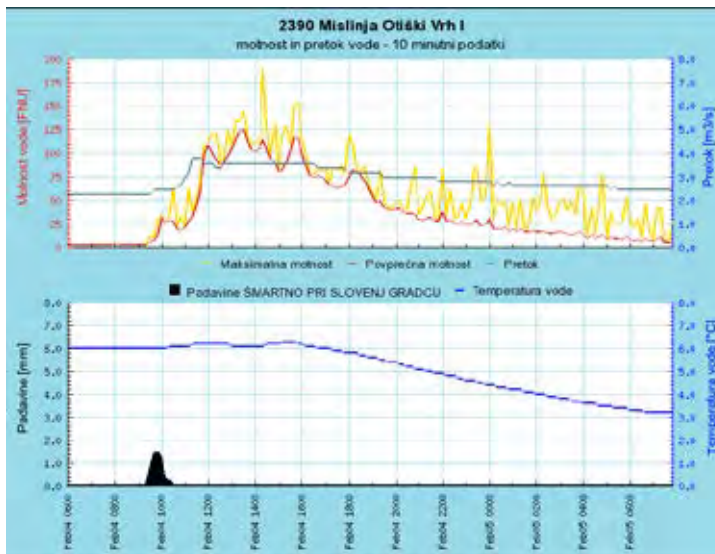


Figure 2. Real time data transmission of turbidity (motnost vode)[FNU], discharge (pretok) [ $m^3/s$ ], precipitation (padavine) [mm] and water temperature (temperatura vode) [ $^{\circ}C$ ] of Mislinja River



Figure 3. Turbidymeter Solitax\_sc (Hach Company)



Figure 4. Sampling with a water trap on the Vipava River (Photo: Ulaga, F.)



Figure 5. Sampling with a milk bottle on the Reka River (Photo: Ulaga, F.)

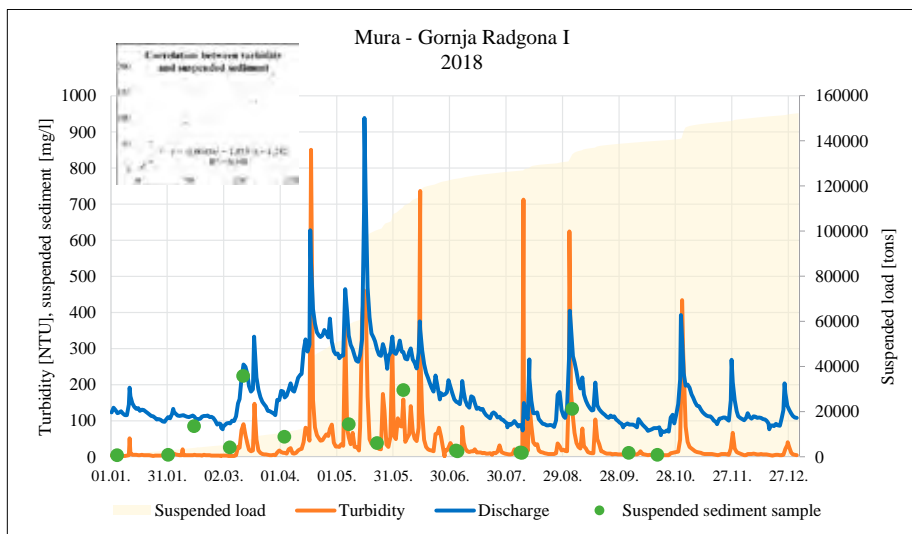


Figure 6. Turbidity, discharge and suspended sediment load of the Mura in Gornja Radgona in the year 2018

### 3. CONCLUSION

When interpreting values of suspended sediment concentration and turbidity, monitoring is necessary to take into account the geological variety of the hinterland, the selectivity of erosion, the corrosion in karstic areas and the deposition on alluvial river systems.

For most of the geomorphological changes a long period is necessary, therefore a long set of data is recommended for better understanding of real processes in the river.

The implementation of automatic turbidity sensors is recommended for better understanding of continuous suspended sediment transport in the rivers.

Water sampling is still needed to evaluate the concentration of suspended sediment solids.

Knowledge of sediment transport is important for river hydromorphology, which is, according to the Water Framework Directive, also the most important indicator of the ecological status of water body.

### LITERATURE

- [1] EU Water Framework Directive, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal L 327, 22/12/2000 P. 0001 – 0073.
- [2] <http://www.arso.gov.si/vode/podatki/>, (downloaded 07.02.2020).

- [3] Ulaga, F. (2015): *Evaluation of suspended sediment in Slovenian rivers by using automatic turbidity sensor*, Solving societal challenges; working with sediments, 9<sup>th</sup> International SedNet Conference, Krakow, Poland, page 94.
- [4] Ulaga, F. (2019): *Pregled hidroloških razmer površinskih voda v Sloveniji*, Poročilo o monitoringu za leto 2018, (Kobold, M. [Editor]), Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.





## KAZALO AUTORA

### A

- 1 R 5. Adžaga Nikola 61  
2 R 37. Antolić Jasmina 315

### B

- 3 R 4. Baranya Sandor 49  
4 R 1. Barnabas Batki Bruno 15  
5 R 23. Bekić Damir 255  
6 R 24. Benac Čedomir 259  
7 R 13. Bezak Nejc 143  
8 R 21. Bičanić Nenad 229  
9 R 22. Bičanić Nenad 241  
10 R 26. Biondić Danko 269  
11 R 2. Bočić Neven 27  
12 R 4. Brleković Dražen 49  
13 R 18. Brleković Tamara 195  
14 R 30. Brozinčević Andrijana 285  
15 R 37. Bujas Neven 315  
16 R 2. Buzjak Nenad 27

### C

- 17 R 4. Cikojević Antonija 49  
18 R 5. Cikojević Antonija 61

### Č

- 19 R 37. Čaić Janković Ana 315  
20 R 2. Čanjevac Ivan 27  
21 R 8. Čebuhar Larsen 87  
22 R 35. Čuže Denona Maja 307

### Ć

- 23 R 3. Ćosić Flajsig Gorana 37

### D

- 24 R 28. Dogančić Dragana 277

### E

- 25 R 25. Engi Zsuzsanna 263

### F

- 26 R 25. Ficsor Johanna 263

### G

- 27 R 37. Galović Lidija 315  
28 R 4. Gilja Gordon 49  
29 R 5. Gilja Gordon 61  
30 R 31. Gilja Gordon 289  
31 R 6. Gradečak Albino 71  
32 R 7. Gupta Sapana 79

### H

- 33 R 26. Holjević Danko 269  
34 R 26. Holjević Toni 269  
35 R 16. Horvat Bojana 173  
36 R 32. Horvat Bojana 293

### I

- 37 R 37. Ivanišević Danijel 315  
38 R 27. Ivezić Vedran 273

### J

- 39 R 11. Jecl Renata 119  
40 R 6. Jeftić Goran 71  
41 R 7. Jena Vinod 79

**K**

42	R 27.	Kadić Vlatko	273
43	R 8.	Kajapi Ivan	87
44	R 28.	Kapelj Sanja	277
45	R 3.	Karleuša Barbara	37
46	R 16.	Karleuša Barbara	173
47	R 9.	Kereša Zdenko	97
48	R 7.	Kordić Stjepan	79
49	R 37.	Kovačević Aleksandra	315
50	R 10.	Kovačićek Nenad	109
51	R 22.	Koziara Tomasz	241
52	R 11.	Kramer Stajnko Janja	119
53	R 4.	Kuspilić Neven	49
54	R 31.	Kuspilić Neven	289

**L**

55	R 18.	Leko-Kos Marija	195
56	R 28.	Loborec Jelena	277
57	R 12.	Lubura Matković Tanja	129

**M**

58	R 7.	Majić Dragan	79
59	R 7.	Maldini Krešimir	79
60	R 2.	Martinić Ivan	27
61	R 8.	Mataija Anton	87
62	R 7.	Matić Natalija	79
63	R 37.	Medić Đorđa	315
64	R 29.	Michor Klaus	281
65	R 30.	Miculinić Kazimir	285
66	R 13.	Mikoš Matjaž	143
67	R 14.	Mirčeta Antonia	155
68	R 31.	Mišur Ivan	289

**N**

69	R 11.	Nekrep Perc Matjaž	119
----	-------	--------------------	-----

**O**

70	R 2.	Orešić Danijel	27
71	R 10.	Oskoruš Dijana	109
72	R 15.	Oskoruš Dijana	165
73	R 32.	Oštrić Maja	293
74	R 16.	Ožanić Nevenka	173
75	R 21.	Ožanić Nevenka	229

**P**

76	R 4.	Pomázi Flora	49
77	R 5.	Potočki Kristina	61
78	R 31.	Potočki Kristina	289

**R**

79	R 24.	Radišić Maja	259
80	R 32.	Radišić Maja	293
81	R 35.	Radišić Maja	307
82	R 33.	Ričković Vedrana	297
83	R 34.	Rubinić Andrija	303
84	R 24.	Rubinić Josip	259
85	R 32.	Rubinić Josip	293
86	R 35.	Rubinić Josip	307
87	R 24.	Ružić Igor	259

**S**

88	R 33.	Silvija Sitar	297
89	R 7.	Stanković Mirko	79
90	R 16.	Sušanj Čule Ivana	173

**Š**

91	R 36.	Šafarek Goran	311
92	R 36.	Šarić Ivana	311
93	R 37.	Šorša Ajka	315
94	R 17.	Štuhec Damir	185

**T**

95	R 18.	Tadić Lidija	195
96	R 4.	Tadić Zdenko	49
97	R 1.	Tamás Enikő Anna	15
98	R 19.	Tošić Igor	207
99	R 7.	Tot Ivan	79
100	R 20.	Tudić Alma	219

**U**

101	R 38.	Ulaga Florjana	319
-----	-------	----------------	-----

**V**

102	R 5.	Varga Matej	61
103	R 37.	Vićanović Jelena	315
104	R 12.	Vidaković Šutić Renata	129
105	R 33.	Vidaković Šutić Renata	297
106	R 3.	Vučković Ivan	37

**Z**

107	R 28.	Zavrtnik Saša	277
108	R 14.	Zrinski Goran	155
109	R 23.	Zrinski Goran	255

**Ž**

110	R 21.	Žic Elvis	229
111	R 22.	Žic Elvis	241

*Zahvaljujemo suorganizatorima i  
navedenim institucijama na potpori:*



VARAŽDIN



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET



**HRVATSKE VODE**



**DHMZ**

**Državni hidrometeorološki zavod**  
**Croatian Meteorological and Hydrological Service**

ISBN 978-953-96705-5-7

