

# **Merenje protoka otpadnih voda u kanalizacionim mrežama: Kombinovanje inovativnih sa konvencionalnim mernim metodama**

dr Damjan Ivetić, mast.građ.inž.  
dr Robert Ljubičić, mast.građ.inž.  
dr Miloš Milašinović, mast.građ.inž.  
dr Dušan Prodanović, dipl.građ.inž.  
dr Dragutin Pavlović, dipl.građ.inž.

*Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet*  
***divetic@grf.bg.ac.rs***

## **Rezime**

Jedan od preduslova za efikasno upravljanje i strateško planiranje razvoja kanalizacionih sistema je dobro poznavanje dinamike rada mreže. Ključnu ulogu imaju mereni podaci, prvenstveno o promenama protoka i nivoa, kako u sušnom tako i u kišnom period. Nažalost, kanalizacione mreže su u većini slučajeva slabo pokrivene adekvatnim mernim mestima. Tako prilikom planiranja kapitalnih investicija, npr. postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda, nedostajući podaci se obezbeđuju kroz merne kampanje. Ključni izazovi pri sprovođenju mernih kampanja su povezani sa lokacijski i hidraulički nepovoljnim mernim lokacijama, koje negativno utiču na kvalitet izmerenih podataka. U ovom radu je prikazan primer kombinovanja inovativnih sa konvencionalnim metodama za merenja protoka u kanalizacionim sistemima sa ciljem dobijanja reprezentativnih podataka u složenim mernim uslovima.

**Ključne reči:** kanalizacioni sistemi, merenje protoka, elektromagnetni senzori, kamere, pad pijezometarske linije.

## **Wastewater flow measurements in sewer networks: Combining innovative and conventional measurement methods**

### **Abstract**

One of the prerequisites for efficient management and development planning of the sewer systems is the adequate knowledge of network dynamics. Measured data play a

key role, mainly the flow rate and level variations in dry and wet periods. Unfortunately, sewer networks are commonly scarcely covered with measurement systems. Thus, when capital investments are planned, e.g. wastewater treatment plants (WWTP), missing data is acquired through measurement campaigns. Challenges in the execution of the measurement campaigns are mostly correlated to hydraulically and organizationally unfavorable measurement locations, reflecting negatively on the quality of the measured data. In this paper, an example of the combination of the innovative and conventional flow measurement methods in sewer networks is shown, to allow for the acquisition of the representative data in complex measurement conditions.

**Keywords:** sewer systems, flow measurement, electromagnetic sensors, cameras, hydraulic gradient

## 1. UVOD

Upravljanje komunalnim infrastrukturnim sistemima, kao što su kanalizacioni sistemi za upotrebljene i atmosferske vode, predstavlja složen izazov. Kanalizacija treba da funkcioniše 24 sata dnevno, svaki dan u nedelji, sprovodeći odgovarajuće količine otpadnih i atmosferskih voda do recipijenta ili postrojenja za preradu otpadnih voda (PPOV), minimizujući rizik po zdravlje stanovništva i negativne posledice po kvalitet vodnih tela koje prihvataju ove vode. Za donošenje pravovremenih i adekvatnih upravljačkih odluka, kao i za planiranje daljeg razvoja, neophodno je dobro poznavanje rada sistema. Ključno je poznavati šta se dešava u samoj kanalizacionoj mreži, odnosno kako sistem reaguje na dnevne, nedeljne i sezonske varijacije u opterećenju upotrebljenim vodama, pri suvim i kišnim uslovima. Jedini način da se dođe do ove spoznaje je putem merenja hidrauličkih veličina, prvenstveno protoka i nivoa, unutar same mreže na reprezentativnim mernim lokacijama.

U idealnom slučaju merenja se obavljaju posredstvom dovoljnog broja stalnih mernih mesta, uspostavljenih od strane nadležnog JKP na karakterističnim lokacijama (crpne stanice, ključni kolektori itd.). Ukoliko su iz nekog razloga, potrebne dodatne i prostorno detaljnije informacije o radu mreže, organizuju se merne kampanje, putem kojih se uspostavljaju privremena merna mesta na lokacijama od interesa. Kako su u poslednjoj deceniji intezivirane aktivnosti u Republici Srbiji na projektovanju i izgradnji PPOV (trenutna pokrivenost opština sa PPOV je oko 20% [1]), evidentno je porasla potreba za merenim podacima koji predstavljaju osnovu za dimenzionisanje PPOV.

Dimenzionisanje PPOV, uz odabir odgovarajućih tehnoloških procesa prečišćavanja, vrši se na osnovu podataka o količini vode i količini i vrsti polutanata [2]. Specifični istorijski i sociološki procesi u Republici Srbiji su diktirali ograničene budžete nadležnih javnih komunalnih preduzeća (JKP), što je dovelo do trenutnog stanja gde je pokrivenost kanalizacionih sistema, stalnim mernim mestima, uglavnom veoma niska. Kao prihvatljivo rešenje, usvojena je praksa da se organizuju merne kampanje, kojim bi se, koliko je moguće, pokrio nedostatak merenih podataka. Zadatak mernih kampanja je da se formiranjem dovoljnog broja privremenih mernih mesta, na ključnim lokalitetima unutar kanalizacione mreže, u relativno kratkom vremenskom periodu (od 2 nedelje do 2 ili 3 meseca) prikupe relevantni podaci o dinamici protoka, nivoa i koncentracija polutanata, kako u suvom tako i u kišnom periodu. Značajan nedostatak ovog pristupa, sa aspekta dimenzionisanja PPOV, je što se na ovaj način dobijaju kratkotrajne serije podataka koje najverovatnije nisu obuhvatile sve merodavne varijacije hidrauličkih veličina i polutanata. Međutim, i to je bolje nego dimenzionisati PPOV bez realnih izmerenih podataka.

Drugi, jednako važan, problem u organizaciji mernih kampanja je vezan za merne lokacije. Odabir lokacija mernih mesta diktira topologija kanalizacione mreže kao i prostorni raspored i tip objekata priključenih na mrežu. Činjenica je da se privremena merna mesta često formiraju na lokacijski i hidraulički nepovoljnim delovima kanalizacione mreže za primenu konvencionalnih metoda (npr ultrazvučnih dopler protokomera, [3,4]) za merenja protoka i nivoa. Same lokacije se obično ne mogu menjati zbog reprezentativnosti prikupljenih podataka, a opet neophodno je obezbediti zadovoljavajuću pouzdanost izmerenih podataka. U opštem slučaju ne postoji univerzalna merna metoda ni merni instrument, koji se u svim uslovima može jednako pouzdano koristiti, pa je potrebno odabrati optimalno rešenje za svako pojedinačno merno mesto. Ključni uticaj imaju [5] hidraulički uslovi na mernom mestu, fizičke karakteristike vode, geometrijske karakteristike cevi/kolektora, uslovi sredine, odnosno uslovi za montažu i obilazak opreme, potrebna dužina merenja, kao i ekonomska cena primene određenog rešenja. Prethodno navedeni lokacijski i hidraulički nepovoljni delovi mreže, u kojima je planirano formiranje privremenih mernih mesta, su specifični po tome što u većini slučajeva ne postoji jedna merna metoda koja se može na tom mestu pouzdano iskoristiti. Najčešće je neophodno kombinovati više metoda, gde se sa jednom pokriva samo deo spektra mogućih hidrauličkih uslova (protoka), ili čak

primenjivati određena inovativna rešenja, kako bi se obezbedio dovoljan kvalitet izmerenih podataka.

U ovom radu su prikazani neki od primera kombinovanja i primene konvencionalnih i inovativnih tehnika za merenje protoka u kanalizacionim sistemima, u sklopu merne kampanje organizovane na teritoriji opština Inđija, Stara i Nova Pazova. Analizirana su dva inovativna rešenja, upotreba lokalno konstruisane baterijske kamere osetljive na blisko-infracrveni spektar svetlosti (Near InfraRed – NIR za rad u noćnim uslovima) i merenje pada linije energije u kolektoru pod pritiskom, primenjena na dve merne lokacije, Novim Banovcima i Staroj Pazovi respektivno. Razmotrena je neophodnost primene ovakvih rešenja i zašto, odnosno kako, su se uklapale sa merenjima ostvarenim pomoću konvencionalnih metoda kao što su elektromagnetna [6,7] ili ultrazvučna (Dopler) merila protoka. Poseban osvrt je dat na analizu merne nesigurnosti dobijenih podataka, kao i na potrebu za ovakvom analizom u sprovođenju mernih kampanja.

## **2. ANALIZIRANA MERNA MESTA**

Merna kampanja na teritoriji naselja Inđija, Stara Pazova, Nova Pazova i Novi Banovci je organizovana i sprovedena krajem 2022. i početkom 2023. godine. Ukupno je opremljeno pet privremenih mernih mesta na ključnim lokalitetima navedenih naselja, kao što su ispusti i odvodni kolektori bilo u stambenim ili u industrijskim zonama. Odgovorni za sprovođenje merne kampanje je bio Institut za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a kooperant domaće preduzeće koja se bavi proizvodnjom merne opreme i metrološkim uslugama, Svet instrumenata d.o.o. [8].

Pri formiranju svakog od privremenih mernih mesta javljali su se određeni problemi i izazovi, kao što su npr. previsoki nivoi vode u šahtovima, konstrukcijska oštećenja zidova, poklopaca i penjalica šahta, itd. Blagovremenim pripremnim radnjama i efikasnom koordinacijom aktivnosti sa nadležnim javnim komunalnim preduzećima, većina je uklonjena i sanirana. Međutim, na dve lokacije, uprkos veoma konstruktivnom pristupu svih angažovanih strana, problemi nisu mogli biti sanirani u dogledno vreme. Takođe, imajući u vidu topološke specifičnosti kanalizacionih mreža, kao i ograničen broj komada merne opreme, nije bilo moguće promeniti lokacije mernih mesta, a da se ne ugrozi značajno reprezentativnost izmerenih

podataka. U nastavku je dat kraći opis specifičnosti dva problematična merna mesta u Staroj Pazovi i Novim Banovcima.

## Stara Pazova

Kanalizacija za upotrebljene vode u Staroj Pazovi prikuplja uglavnom komunalne upotrebljene vode i sprovodi do magistralnog kolektora. Postoje dva značajna priključka na magistralni kolektor, od kojih jednim ide približno 5 – 10% upotrebljenih voda iz naselja i koji nije obuhvaćen ovom mernom kampanjom i drugi, ovde analiziran, ka kome gravitira oko 90% upotrebljenih voda. Na slici 1., je dat ortofoto snimak sa „GoogleEarth“ servisa, lokacije odvodnog kolektora koji se priključuje na magistralni cevovod sa pozicijama šahtova od interesa za mernu kampanju (Š<sub>SP1</sub>, Š<sub>SP2</sub>, Š<sub>SP3</sub> i Š<sub>SP4</sub>).



*Slika 1. Ortofoto snimak lokacije obuhvaćene mernom kampanjom u Staroj Pazovi – cevi (isprekidane linije) i šahtovi (krugovi)*

*Figure 1. The Stara Pazova orthophoto of the campaign network reach – pipes (dotted lines) and manholes (circles)*

Duž celog poteza, označenog žutom isprekidanom linijom, pruža se kolektor koji je po projektnoj dokumentaciji prečnika  $\Phi 600$  mm. Dubina šahtova varira (od kote površine do dna šahta) između 6 i 7.5 m. Pri prvom obilasku terena uočeno je da je ceo kolektor pod pritiskom, sa nivoom vode na rastojanju od 1.5 do 2 m od površine terena, odnosno u svim šahtovima dubina vode je bila preko 5 m! Dodatno, u svim šahtovima je na površini vode formiran tzv. „kolač“ od otpada procenjene debljine čak do oko 0,5 m (Slika 2.). Uprkos nekoliko uzastopnih aktivnosti na razbijanju „kolača“ i čišćenju šahtova i

kolektora, kako bi se otpušavanjem pokušao oboriti nivo vode, nije dobijen zadovoljavajući rezultat. Nivoi vode se ostali visoki, a „kolač“ bi se ponovo formirao za dan ili dva. Montaža konvencionalne opreme, koja meri protok principom Brzina-Proticajni presek nije bila moguća u suvom zbog nemogućnosti sniženja nivoa vode, dok angažman ronilaca za podvodnu montažu je isključen iz razmatranja zbog visokih bezbednosnih rizika. Primenjeno je rešenje sa merenjem pada piježometarske linije koje omogućava montažu praktično sa površine terena, i na koje navedeni otpad ne može značajno uticati. Ovaj pristup sam po sebi može dati samo okvirne procene protoka, zbog čega je kombinovan sa trenutnim merenjima protoka pomoću konvencionalnog ultrazvučnog kros-korelacionog merila protoka postavljenim na posebno produžen teleskopski štap.



*Slika 1. Stanje u Š<sub>SP2</sub> i Š<sub>SP3</sub>, tokom montaže opreme*  
*Figure 2. Manholes Š<sub>SP2</sub> and Š<sub>SP3</sub> state in regular operation*

## **Novi Banovci**

Naselje Novi Banovci ima relativno nizak stepen priključenosti na kanalizaciju za upotrebljene vode i sve prikupljene vode se prikupljaju i ispuštaju kroz jedan ispus u Dunav. Na sabirnom kolektoru prečnika  $\Phi 600$  koji vodi ka ispusnoj građevini, nalaze se samo dva šahta koja se mogu iskoristiti za pristup kolektoru i postavljanje merne opreme (Slika 3.). Uzvodni šaht Š<sub>NB1</sub> je dubine 7,2 m i nalazi se na kolovozu sa umerenim intezitetom saobraćaja. Nizvodni šaht Š<sub>NB2</sub>, dubine oko 5,0 m, je u neposrednoj blizini ispusne građevine i u njemu se nalazi kaskada kojom se savlađuje denivelacija od 2,7 m. Osovina dovodne cevi se nalazi na 2,5 m od površine terena. Inicijalno, kao optimalno rešenje, usvojeno je da se u uzvodnom šahtu montira ravno elektromagnetno

merilo brzine FLAT 400 (Slika 4.), proizvođača „Svet instrumenata“ sa eksternim nivomerom [6,7,8]. Međutim, nakon ugradnje i upoređivanjem sa trenutnim merenjima pomoću ultrazvučnog kros-korelacionog merila protoka ustanovljeno je da elektromagnetni senzor brzine beleži brzine dva do tri puta manje vrednosti. Kako je eksterni nivomer adekvatno radio, trenutna merenja protoka su iskorišćena za definisanje kalibracionog koeficijenta Q-H krive, odnosno za obezbeđivanje posrednog kontinualnog merenja protoka. Radi dodatne pouzdanosti odlučeno je da se u nizvodnom šahtu Š<sub>NB</sub>2 postavi NIR Kamera za merenja protoka.



*Slika 2. Ortofoto snimak lokacije obuhvaćene mernom kampanjom u Novim Banovcima*

*Figure 3. The Novi Banovci orthophoto of the campaign network reach – pipes (dotted lines) and manholes (circles)*

### **3. PRIMENJENA METODOLOGIJA MERENJA PROTOKA**

Osnova za poređenje i validaciju podataka zabeleženih primenom inovativnih metoda, moraju predstavljati rezultati dobijeni konvencionalnim metodama merenja protoka. Pored kraćeg opisa predloženih metoda, u ovom poglavlju su razmotrene i poteškoće u primeni konvencionalnih pristupa.

#### **Stara Pazova**

Montaža pod vodom konvencionalnih protokomera (Dopler, ultrazvučni ili elektromagnetni) nije bila moguća ni u jednom od šahtova, zbog visokog nivoa vode i bezbedonosnih rizika. Standardno, u sličnim situacijama se koriste teleskopski štapovi, na čijem kraju se postavi odgovarajući senzor (u ovom slučaju ultrazvučni). Na ovaj način omogućava se da korisnik sa površine terena

potopi protokomer u cev i obavi trenutna merenja protoka (fiksiranje i ostavljanje teleskopske palice za kontinualna merenja je veoma loša praksa i nikako se ne preporučuje).

Problem u ovom slučaju je predstavljala činjenica da je dužina teleskopskih štapova (proizvođača NIVUS) do 4,0 m, dok je dubina vode u šahtu bila preko 5,0 m (Slika 4. levo). U radionici Instituta za hidrotehniku izrađen je nastavak od polipropilenskih cevi čime je produžen domet na preko 6,5 m nauštrb smanjenja krutosti nosećeg štapa. Jedini šaht u kome je bilo moguće pouzdano zabeležiti trenutna merenja protoka je Š<sub>SP1</sub>, u ostalim su nanosne formacije toliko bile visoke, da bi protokomer brzo potonuo u njih i izgubio signal (ili bi se vitoperio bez oslonca).

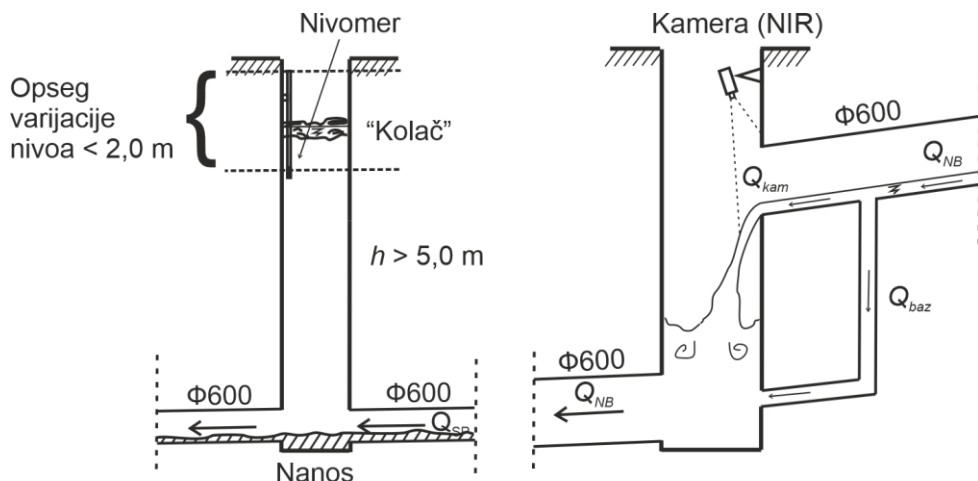
Trenutna merenja protoka su iskorišćena za kalibraciju primenjene metode merenja protoka preko pada energetske/pijezometarske linije. Osnova primenjene metodologije je činjenica da je u cevima pod pritiskom, protok proporcionalan korenu pada energetske linije  $\Delta E$ . Brzine strujanje u šahtovima su relativno male, pa zanemarenjem brzinske visine, energetska kota postaje jednaka pijeziometarskoj koti  $E = \Pi$  (odnosno  $\Delta E = \Delta \Pi$ ). Odabrano je da se vrši merenje pada pijeziometarske linije između tri šahta Š<sub>SP1</sub>, Š<sub>SP2</sub> i Š<sub>SP3</sub>. Naime, uz pomoć tri tzv. „dajvera“ firme Eijkelkamp ([www.royaleijkelkamp.com](http://www.royaleijkelkamp.com)), montiranih unutar perforiranih polipropilenskih cevi, dužine 2,2 m, beleženi su podaci o visini vodenog stuba iznad senzora (i temperaturi vode), dok je apsolutna kota nivoa vode dobijena uz pomoć geodetskog snimanja kote poklopca šahta i merenjem odstojanja laserskim daljinomerom od kote poklopca do referentne ravni na polipropilenskim cevima (pocinkovani limovi vidiljivi na Slici 2.). Dužina cevi između dva šahta je određena takođe na osnovu geodetskih snimanja. Vrednost protoka je računata upotrebom sledećeg obrazca:

$$Q = k \cdot \sqrt{\Delta \Pi} \quad (1.)$$

Vrednost koeficijenta  $k$ , koji prema Bernulijevoj jednačini zavisi od prečnika cevi  $D$  i koeficijenta trenja  $\lambda$ , je određena kalibracijom budući da je direktno određivanje bilo praktično nemoguće. Poseban problem je predstavljalo prisustvo relativno visokih nasloga nanosa na dnu šahta/cevi (Slika 4. levo). Takođe, duž kolektora postoje i bočni doticaji iz dve fabrike, čiji uticaj treba kompenzovati na odgovarajuć način. Konačno, iskustva zaposlenih iz



nadležnog JKP su ukazala da se povremeno šaht Š<sub>SP4</sub> koristi za ilegalno pražnjenje septičkog otpada iz cisterni čime se remeti hidraulička slika u kolektoru.



*Slika 3. Levo) Skica montaže nivomera u potopljenom šahtu u Staroj Pazovi; Desno) skica montaže NIR Kamere u šahtu sa kaskadom u Novim Banovcima*  
*Figure 4. The Novi Banovci settlement manholes in surcharged sewerage flow reach - Left: Scheme of water stage equipment installation. Right: Scheme of NIR camera installation in cascade manhole*

### Novi Banovci

Prvo rešenje sa elektromagnetnim merilom protoka FLAT400 nije dalo zadovoljavajuće rezultate nakon poređenja sa ultrazvučnim protokomerom montiranim na produžen teleskopski štap. Inicijalno, sumnjalo se da u šahtu Š<sub>NB1</sub>, doticaj od jedne od dovodnih cevi, usmeren suprotno od smera glavnog toka, remeti strujnu sliku iznad EM senzora. Navedena dovodna cev je ugrađena naknadno, nalazi se otprilike 2,0 m iznad dna šahta i dovodi otpadne vode iz obližnjih novoizgrađenih stambenih objekata. Međutim, nakon demontaže ustanovljeno je da je i na dnu kolektora primetno prisustvo mazuta, koji je prekrrio elektrode senzora, uzrokujući oslabljen signal (Slika 5. gore). Sa druge strane, merenja nivoa su se verodostojno podudarala sa merenjima pomoću ultrazvučnog protokomera. Na osnovu trenutnih merenja protoka u različitim hidrauličkim uslovima, i poređenjem sa kontinualnim čitanjem nivoa sa eksternim nivomerom, formirana je Q-H kriva.



*Slika 4. Gore) Elektromagnetni sensor na nosećem limu nakon demontaže; Levo) Kamera pre montaže; Desno) Montirana kamera na mernom mestu  
 Figure 5 Above: Electromagnetic flat sensor on metal sheet support after deinstallation. Bottom left: NIR camera before installation, Bottom right: NIR camera in installed position*

Kako bi se obezbedila dodatna sigurnost, u nizvodnom šahtu je montirana eksperimentalna NIR kamera konstruisana na Institutu za hidrotehniku, Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu (Slika 5. Desno) [9]. Kamera je postavljena iznad same kaskade, i usmerena je tako da snima kraj dovodne cevi i mlaz koji ističe iz nje. Treba imati na umu da ovaj mlaz predstavlja samo deo protoka kroz kolektor (nazvan  $Q_{kam}$ ), budući da se deo protoka sprovodi kroz odušak kaskade ( $Q_{baz}$ ). Na svakih 10 minuta kamera bi se upalila i lokalno memorisala video snimak od 5 s. Naknadno se fotogrametrijskom obradom [10,11,12] video snimaka dobija raspored površinskih brzina, dubina vode i

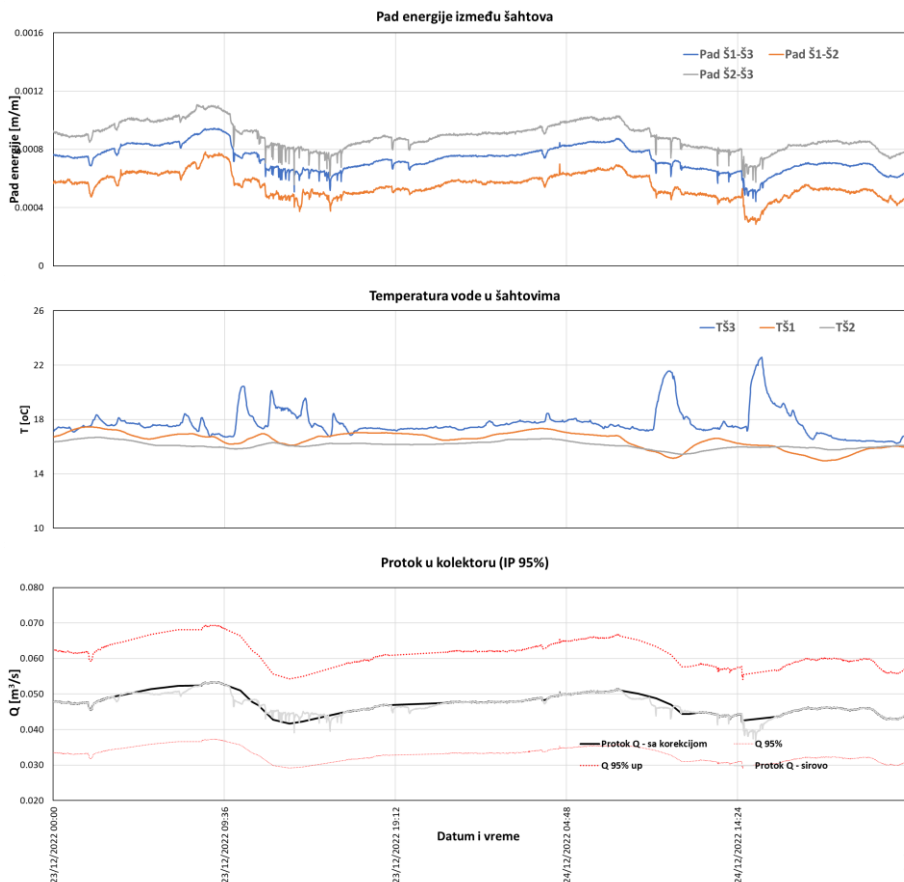
širina vodenog ogledala. Problem sa optičkim metodama u kanalizacionim sistemima, predstavlja kondenzacija vlage na objektivu kamere što dovodi do beleženja neupotrebljivih snimaka. Uobičajeno se ovaj problem rešava dodatnim grejačem oko objektiva, međutim kako su grejači veliki potrošači struje ovde to rešenje nije primenjeno.

#### 4. REZULTATI MERENJA

Kontinualno merenje promena nivoa vode i temperatura vode u prethodno spomenuta tri šahta (1, 2 i 3) u Staroj Pazovi je trajao dve nedelje. Sračunati padovi pijezometarske linije u sve tri kombinacije, izmerene temperature u sva tri šahta i sračunat protok kroz kolektor (odnosno najnižvodniji šaht Š<sub>SP3</sub>) za izdvojena dva dana merne kampanje su prikazani na Slici 6. Iz padova Pi linije može se zaključiti da je veći pad, odnosno veći protok između Š<sub>SP2</sub> i Š<sub>SP3</sub>, u odnosu na Š<sub>SP1</sub> i Š<sub>SP2</sub>. Ovo je i očekivano budući da je se u nizvodnu deonicu ulivaju otpadne vode iz obližnjih fabrika. Takođe, vide se i nepravilnosti u padovima Pi linije koje su prouzrokovane istakanjem septičkog otpada u Š<sub>SP4</sub>, što se može registrovati na osnovu porasta temperature vode u najbližnjem šahtu Š<sub>SP3</sub>. Hidraulički, porast nivoa u Š<sub>SP4</sub>, dovodi do smanjenja nagiba linije energije pa samim tim i „kočenja“ protoka. Promena nagiba linije energije ne prati istovetnu dinamiku promena protoka zbog čega su u konačnim rezultatima ove nagle promene korigovane i ublažene. Konačno, može se isto zaključiti da je glavni doticaj u kolektor zapravo posledica infiltracije podzemnih voda, zbog čega dnevne promene protoka nisu značajno izražene.

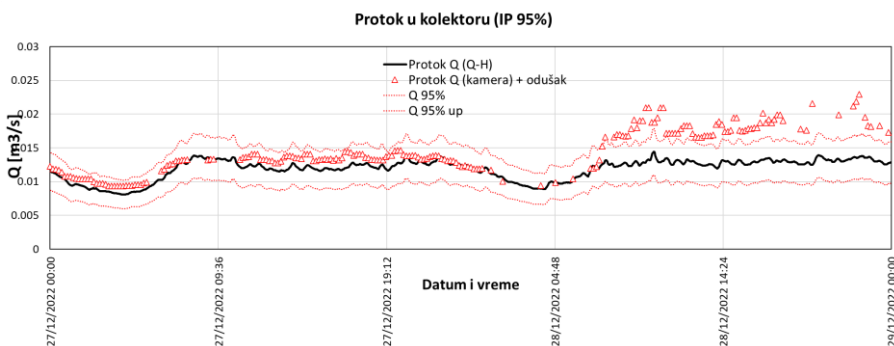
U Novim Banovcima, EM senzor FLAT400 sa eksternim nivomerom je takođe prikupljao podatke u trajanju od dve nedelje, dok su NIR kamerom podaci beleženi samo nedelju dana. Na slici 7. prikazano je poređenje izmerenih protoka dobijenih preko kalibrisane Q-H krive sa intervalom poverenja od 95% i protoka dobijenim primenom NIR kamere, za dva karakteristična dana merenja. Prvog dana, vidi se odlično poklapanje rezultata dok su se drugog dana javila značajna odstupanja. Razlog leži u činjenici da se tokom noći zakačila krpa na čeličnu armaturu zavarenu u dnu kolektora neposredno uzvodno od kaskade, koja je promenila proticajni presek i podigla nivo. Nakon uklanjanja krpe, podaci su ponovo pokazivali veoma dobro slaganje. Bitno je konstatovati da su snimci zabeleženi tokom noćnog perioda uglavnom bili lošijeg kvaliteta i vrednost protoka nije mogla biti procenjena iz njih. Pretpostavlja se da noću sa padom temperature, dolazi do porasta

temperaturnog gradijenta između unutrašnjosti šahta i spoljašnjosti što dovodi do pojačane kondenzacije na objektivu kamere.



Slika 5. Stara Pazova: Gore) Promena pada energije između šahtova; Sredina) Promena temperature vode u šahtovima; Dole) Promena protoka u kolektoru sa intervalom poverenja od 95%

Figure 6. Above: Energy grade vs. Time between manholes. Middle: Temperature vs. Time in manholes, Bottom: 95% confidence intervals Discharge vs. Time record



*Slika 6. Novi Banovci: Promene protoka u kolektoru snimljenih preko kalibrisane Q-H krive sa intervalom poverenja od 95% i preko NIR kamere  
Figure 7. Novi Banovci: 95% Confidence Interval Sewerage flow Hydrograph derived from calibrated Stage-Discharge Curve; Stage data was obtained by NIR camera records*

## 5. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Veoma bitan aspekt u merenjima hidrauličkih veličina (i svih merenja uopšte) je pouzdanost izmerenih podataka, odnosno koliko mi zaista možemo da verujemo dobijenim podacima. Prvi logičan korak je vizuelni pregled snimljenih podataka, odnosno provera smislenosti na osnovu „zdrave logike“ (npr da li se u zoni gde nema uticaja pumpi vidi dnevna varijacija protoka?). Korak dalje, koji autori ovog rada smatraju čak neophodnim je kvantitativna analiza pouzdanosti podataka. Kao reprezent pouzdanosti podatka, usvaja se vrednost merne nesigurnosti (a ne merne greške – zastareo koncept) prema referentnim preporukama metroloških organizacija (vidi GUM [13]). Uobičajeno, za merenja protoka u kanalizacionim sistemima se prihvatljivom nesigurnošću smatraju vrednosti visoke čak do 10% (u posebnim slučajevima i više), zbog nepovoljnih mernih uslova [14].

Procenu merne nesigurnosti sprovodi sam izvođač merenja, koristeći raspoložive podatke o mernoj lokaciji, radu korišćenih instrumenata u kontrolisanim uslovima, pravila proračuna i propagacije merne nesigurnosti kod merenja složenih veličina i samih izmerenih podataka. Za potrebe merne kampanje analizirane u ovom radu, sva korišćenja merila su neposredno pre instalacije bila ispitana na laboratorijskom kanalu Instituta za hidrotehniku Građevinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu i poređena sa odgovarajućim etalonskim merilima. Ustanovljene su zavisnosti između komponenata mernih nesigurnosti (slučajne i sistematske) i promena hidrauličkih veličina (brzina,

dubina i Frudov broj). Nakon obavljenih merenja, sproveden je proračun merne nesigurnosti kojim je definisan interval poverenja izmerenih podataka od 95% prikazan na Slikama 6. i 7. Interesantno je primetiti da na Slici 7, merenja protoka uz pomoć kamere upadaju u interval poverenja od 95% podataka izmerenih pomoću Q-H krive u periodu pre remećenja strujne slike, odnosno ispadaju izvan opsega nakon uočenog poremećaja.

## 6. ZAKLJUČCI

Projektovanje PPOV se direktno oslanja na postojeće podatke o radu pripadajuće kanalizacione mreže, prvenstveno o dinamici protoka, nivoa i koncentracija polutanata. Često, ovi podaci nisu ažurno prikupljeni zbog čega se u projektnoj fazi organizuju merne kampanje relativno kratkog trajanja sa ciljem nadoknade nedostatka podataka. Treba imati na umu da kratko trajanje mernih kampanja ima negativne posledice na reprezentativnost rezultata, budući da se ne vidi sezonska dinamika (leto-zima) a i zabeleženi kišni periodi neretko nisu značajni. Ovi nedostaci se jedino mogu nadomestiti formiranjem stalnih mernih mesta, koja bi za potrebe određenih aktivnosti mogla biti dopunjena privremenim lokacijama formiranim tokom mernih kampanja.

Lokacije privremenih mernih mesta se primarno biraju prema topologiji mreže, što neretko dovodi do situacija da se formiraju na pozicijama nepovoljnim za montažu konvencionalne merne opreme. Kako bi se obezbedio zadovoljavajući kvalitet i reprezentativnost izmerenih podataka, na nekim lokacijama je potrebno kombinovati više mernih tehnika, uključujući i one inovativnog karaktera. U ovom radu su prikazana i analizirana dva primera ovakvih mernih lokacija gde su primenjena inovativna rešenja u kombinaciji sa konvencionalnim. Oba rešenja su dala zadovoljavajuće i smislene rezultate.

Poseban osvrt je dat na potrebu za analizom merne nesigurnosti dobijenih podataka, kako bi se kvantifikovala njihova pouzdanost i dalja primenljivost. Pored kvalitativne procene smislenosti podataka, na osnovu pravilnikom definisane procedure, rezultata ispitivanja merila u kontrolisanim uslovima i izmerenih podataka na terenu, definiše se interval poverenja (najčešće od 95%) kojim se daje neophodan okvir za upotrebu prikupljenih podataka.

## LITERATURA

1. UTVSI (2020). Izvodi iz studije: „Mapiranje postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u Srbiji“. Pristupljeno 06.04.2023 <https://utvsi.com/mapiranje-postrojenja-za-preciscavanje-otpadnih-voda-u-srbiji/>
2. Qasim, S.R. (1999). Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Second Edition (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203734209>
3. Larrarte F., M. Lepot, F. H.L.R.Clemens-Meyer, J.-L. Bertrand-Krajewski, D. Ivetić, D. Prodanović, B. Stegeman (2021). Water level and discharge measurements. Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management: Plug & Pray. Edited by: J.-L. Bertrand-Krajewski, F.H.L.R. Clemens-Meyer and M. Lepot. IWA Publishing. Pages: 35-104.
4. Larrarte, F., Bardiaux, J. B., Battaglia, P., & Joannis, C. (2008). Acoustic Doppler flow-meters: a proposal to characterize their technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(5), 261-267.
5. Godley, A. (2002). Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), 197-201.
6. Ivetić, D., Prodanović, D., & Stojadinović, L. (2018). Bed-mounted Electro Magnetic meters: Implications for robust velocity measurement in Urban Drainage Systems. *Journal of Hydrology*, 566, 455-469.
7. Ivetić, D., Prodanović, D., Stojadinović, L., & Pavlović, D. (2019). Bed-mounted electro magnetic meters: Assessment of the (missing) technical parameters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 68, 101588.
8. Svet Instrumenata d.o.o. <http://www.si.co.rs/>
9. Ljubičić, R., Ivetić, D., Milašinić, M. & Pavlović, D. (2023). Primena kamera i tehnika obrade video zapisa za procenu protoka u kanalizacionim sistemima – iskustva merne kampanje Novi Banovci. *Konferencija „Vodovodni i kanalizacioni sistemi 2023“*. Banja Koviljača 24.5.-26.5.2023.
10. Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and Riverine Environments. (2023). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2020-0-02177-8>
11. Ljubičić, R. (2022) „SSIMS-Flow: UAV image velocimetry workbench“. <https://github.com/ljubicicr/SSIMS-Flow>.
12. Ljubičić, R., Zindović, B., Rosić, N., & Pavlović, D. (2022). SSIMS-FLOW: Alat za procenu protoka u otvorenim tokovima na osnovu polja površinskih brzina iz video zapisa sa lakih bespilotnih letilica. *Vodoprivreda*, 54(317-318), 123-139.
13. Joint committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organization for Standardization.
14. Campisano, A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M. and Vanrolleghem, P.A., 2013. Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems. *Urban Water Journal*, 10(5), pp.300-311.