

HIDRAULIČNA PRIMJERENOST MJERNIH MJESTA ZA MJERENJE PROTOKA

Jure MLAČNIK
Uroš CERAR
Primož BANOVEC
Franci STEINMAN

Kratki sažetak

Prilog predstavlja značajnost mjerenja protoka i opis metodologije za ocjenu primjerenosti mjernih mjesta za mjerenje protoka. Mjerenje protoka može zahtijevati sam tehnološki proces u kojemu je protok, izmjeren sa određenom točnošću, uvjet za uspješno sprovođenje kontroliranog procesa, ali ga može zahtijevati i upravni akt poput skupa propisa, koji reguliraju sprovođenje emisijskog monitoringa. Osposobljenost za izvođenje monitoringa zahtijeva specifična znanja, sredstva i iskustvo, a i pojedini postupci su u mnogočemu posebni. U okviru ovog projekta razvijen je postupak za provjeru mjernih mjesta za mjerenje protoka, pomoću kojeg se može, uz upotrebu različitih sredstava, verificirati primjerenost i pogodnost različitih mjernih objekata. Taj se postupak može podijeliti u tri osnovna elementa: mjerenje brzinskog polja i izračun protoka, verifikacija po međunarodnim standardima i provjera pogodnosti upotrjebljenih hidrauličnih rubnih uvjeta pomoću matematičnog modeliranja. Predstavlja se primjena metodologije na dva primjera.

Ključne riječi : *kanalizacija, otpadne vode, modeliranje, mjerenje, protok, hidrologija, hidraulika*

Summary:

The enclosed text represents the meaning of the water-flow measurement and a description of the methodology for the grading of the measuring points suitability for measuring the water flow. Measuring the water flow may require the very technological process in which the water flow is, measured with certain accuracy. This is a requirement for the successful realization of the supervised process, but it can also be demanded by an administrative statement (similar to a document of regulations), which regulates the measuring of successive monitoring. Being qualified for the execution of monitoring requires specific knowledge, means and experience, and the individual procedures are special in many ways also. This project also encompasses the process for the verification of measuring points for measuring the water flow. This process, with the application of different means, helps verify the suitability of various measuring objects. The process can be divided into three basic elements:

- Measuring the velocity field and the water flow estimate*
- Verification by international standards*
- Balance verification of used hydraulic marginal conditions, assisted by mathematical modelling*

We apply the methodology by two examples.

Key Words: *sewer system, liquid waste, modelling, measurement, water flow, hydrology, hydraulics*

1. UVOD

Jedna od osnovnih fizikalnih veličina u hidrotehnici svakako je protok. Podaci o protocima potrebni su kod planiranja novih i sanacije starih objekata, kod praćenja i modeliranja prirodnih i laboratorijskih pojava, kod nadziranja procesa u industrijskoj proizvodnji, kod praćenja emisija iz onečišćivačkih izvora i još u velikom broju drugih primjera. Mjerenja se mogu izvoditi povremeno ili kontinuirano, ovisno o cilju i potrebama mjerenja. Mjerenje protoka može zahtijevati tehnološki proces sam po sebi u slučaju kada je protok, izmjeren određenom preciznošću, uvjet uspješnoga izvođenja kontrolnog procesa, a može ga zahtijevati i upravni akt, kao npr. skup propisa kojima se uređuju pitanja sprovođenja emisijskog monitoringa.

Osposobljenost za mjerenje protoka zahtijeva specifična znanja, oruđa i iskustvo, i sami postupci u mnogočemu su posebni. Metode za mjerenje protoka mogu se podijeliti na:

- neposredne i
- posredne

Neposredno mjerenje izvodi se volumenskom metodom, pri čemu se protok mjeri direktno, pomoću kalibrirane mjerne posude i mjerenjem vremena punjenja, te metodom miješanja supstanci u masu vode. Kod posrednih metoda protok se obično izračunava na osnovi mjerenja veličina, koje su funkcija protoka.

Posredne metode u osnovi se mogu podijeliti na:

- metode površina-brzina
- metode uzdužni pad-površina
- metode uporabe mjernih korita i ustava

2. VRSTE MJERNIH OBJEKATA

Mjerne objekte možemo podijeliti u tri osnovne skupine, od kojih svaka ima i svoje posebnosti kod kalibracije i verifikacije:

a) Mjerni objekti za mjerenje protoka, opisani u standardima (SIST, CEN, ISO, DIN standardi),

Osnovno, zajedničko svojstvo mjernih uređaja za mjerenje protoka, koji su propisani u skladu sa odredbama standarda, je izvođenje pretvorbe iz jedne mjerne veličine (npr. dubine) preko fizikalno-analitičnih transformacija izravno u mjerenu veličinu (protok). Taj jednostavni način pretvorbe mjerene jedinice u veličinu, jako olakšava kalibraciju i verifikaciju takvih mjernih objekata. Primjeri takvih sprava su Venturijevo korito, Khafagi Venturijevo korito, oštrorubni preljevi i zarezi.

b) Mjerni objekti opisani u stručnoj literaturi,

Ovi objekti predstavljaju nešto između objekata opisanih kao standardni i onih koji su specifični za svakog proizvođača. Naime, pojedini specifičniji mjerni objekti za mjerenje protoka, zabilježeni su i relativno dobro opisani u stručnoj literaturi, ali se (još) ne uvrštavaju u standard. Još uvijek pripadaju skupini objekata, koje je moguće verificirati putem jednostavnih pretvorbi. Ova skupina mjernih objekata veća je od skupine opisane pod točkom a); primjeri su Terzaghijev preljev, Cipolletijev preljev, H-korito, isl.

c) Mjerni objekti izvan standarda (verifikacija prema uputama proizvođača).

Ova skupina mjernih objekata obuhvaća objekte za mjerenje protoka, koji su specifičan proizvod određenog proizvođača. U mnogo slučajeva neposredni odnos između mjerene veličine (ili više mjerenih veličina) i protoka, ne postoji, nego se način vrjednovanja određene veličine određuje specifikacijom proizvođača. Zbog toga su kalibracija i verifikacija mjernih mjesta takve vrste načelno zahtjevnije u usporedbi sa objektima pod točkom a) i b).

3. STANDARDIZACIJA MJERENJA PROTOKA

Standarde se može definirati kao dokumentirane dogovore koji sadrže tehnične specifikacije i kriterije u obliku pravila, propisa ili definicije karakteristika. Pomoću njih se omogućava kvaliteta pri uporabi materijala ili proizvoda i pri izvođenju procesa, te djelovanju službi.

Uporaba standarda ujedinjuje izreke i postupke rada, u našem slučaju mjerenja protoka, a uz to omogućava i lakšu stručnu komunikaciju.

U našem prostoru, u oblasti mjerenja protoka u uporabi pretežno su uz slovenske SIST standarde i međunarodni ISO i njemački DIN standardi. Uporaba standarda nije obavezna, ali standardiziranje postupaka i obrada mjerenja obično predstavljaju preduvjet za kvalitetno izvođenje postupaka. Potreba za standardizacijom se svakako javlja, ako izvođači mjerenja žele uspješno nastupiti na međunarodnom tržištu.

Na području mjerenja protoka najveći je broj standarda odredila međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO). Područje protočnih mjerenja obuhvaćeno je u standardnoj klasifikaciji pod brojem 17.120. Do kraja 1999 godine bila su ukupno prihvaćena 33 standarda sa područja mjerenja u zatvorenim vodovima (17.120.10), 61 standard sa područja mjerenja u otvorenim vodovima (17.120.20) te 1 standard zajednički za oba područja.

DIN norme obuhvaćaju na području mjerenja protoka (17.120) 29 standarda za mjerenje protoka u zatvorenim vodovima, 1 standard za mjerenje u otvorenim vodovima (DIN 19559) i jedan standard za oba područja.

U Sloveniji na području standardizacije djeluje Ured za standardizaciju i mjeriteljstvo (Urad za standardizaciju in meroslovje - USM). Standardi se određuju preko tehničkih komisija, slično organiziranim po područjima, kao što je to u međunarodnoj ISO organizaciji. Do 1999 g. bilo je ukupno određenih 17 SIST standarda sa područja protoka u zatvorenim vodovima, međutim, područje otvorenih vodova SIST standardi još ne pokrivaju.

Opis metoda mjerenja protoka u otvorenim kanalima nalazi se u standardima ISO 8363 i ISO 9824 i DIN 19559. Standard DIN 19559, kao metoda rada za izvođenje monitoringa otpadnih voda, propisan je Pravilnikom o prvim mjerenjima i pogonskom monitoringu otpadnih voda (Pravilnik o prvim meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih vod, Ur.l. RS 35/96).

4. VERIFIKACIJA MJERNIH MJESTA

Stupanjem na snagu Pravilnika o prvim mjerenjima i pogonskom monitoringu otpadnih voda (Ur.l. RS 35/96), u Sloveniji, određeni su i obveznici za monitoring. Uvođenjem takse na količinu i vrstu onečišćivala koji zagađuju okoliš, neprestano raste i potreba za kvalitetnim mjerenjima protoka otpadnih voda i koncentracija tvari u njima.

Određenje masnog protoka nekog onečišćivala predstavlja tzv. sastavljeno mjerenje i u ovisnosti je od vremenskog mijenjanja koncentracije i protoka otpadne vode, radi čega je potrebno oba parametra izmjeriti jednako kvalitetno odn. jednakom preciznošću.

Pri samom planiranju mjerenja protoka nadasve značajno je imati jasno definiran cilj mjerenja i to kolika je zahtijevana preciznost mjerenja. Kod biranja mjernog mjesta često se moraju uzeti u obzir ograničenja glede raspoložive energije, jer su mjerna mjesta određena na odabranim strateškim lokacijama postojećih kanalizacijskih sustava, tj. npr. na ispustima iz uređaja za pročišćavanje, na priključenjima većih onečišćivača na javnu kanalizaciju i sl., gdje nema dovoljnog hidrauličnog pada, potrebnoga za mjerenje protoka. Radi toga je planiranje mjernoga mjesta kompleksan proces, pri kojem je potrebno imati u vidu mnogo čimbenika. Pri tom imaju najveću ulogu hidraulične prilike na širem odsjeku mjernoga mjesta i rubni uvjeti, npr. utjecaj visokih voda odvodnika na djelovanje mjernog objekta.

U praksi se mogu pojaviti brojne pogreške na mjernim objektima:

- pogreška pri projektiranju geometrije i lokacije mjernog objekta,
- pogreška radi neodgovarajućeg namještenja mjerne opreme,
- pogreška neodgovarajuće izvedbe mjernog mjesta,
- utjecaj nizvodnih hidrauličnih uslova na mjerno mjesto,
- utjecaj neodgovarajućih dotočnih uslova (siloviti tok, nejednoliki tok u profilu, povratni tokovi),
- prevelika variranja protoka za uspostavljeno mjerno mjesto (izvan mjernog područja)
- smetnje zbog promjenljivog sadržaja otpadnih tvari u vodi (prljavština, odlaganje, začepjenja),
- agresivan okoliš (temperatura, kemikalije),
- smetnje u mjernom profilu (sprave za uzorkovanje, oduzimanja,...).

Uvjet za normalan rad mjernog objekta je isto tako i odsutnost plavina i sedimenata.

Opseg veličine protoka, u kojem objekt omogućava zadovoljivo mjerenje odn. mjerno područje sprave, definiran je minimalnim i maksimalnim protokom i uvjetuje se vrstom i veličinom mjernog objekta.

Sanacija neodgovarajućih mjernih objekata u mnogo slučajeva zahtijeva velika financijska ulaganja ili nije ni moguća, te je zato najbolje već u fazi planiranja mjernog mjesta izvesti cjelovitu pretragu primjerenosti, odn. verifikaciju mjernog mjesta.

Na Institutu za hidraulična istraživanja te Građevinskom fakultetu na Sveučilištu u Ljubljani (Katedra za mehaniku tekućina sa laboratorijem), razvijen je postupak prosuđivanja mjernih mjesta za mjerenje protoka, sa kojim se može, uz upotrebu različitih oruđa, ustanoviti u kakvu je stanju mjerni objekt ili verificirati prikladnost odabrane lokacije za mjerno mjesto. Postupak se u osnovi može podijeliti na slijedeća tri elementa:

1. Verifikacija skladnosti sa postojećim standardima, stručnom literaturom ili uputama proizvođača

Cilj je provjeravanje skladnosti uređenja mjernoga mjesta sa SIST, ISO, CEN i DIN standardima. U slučaju da mjerno mjesto nije standardizirano, uvažavaju se podaci iz stručne literature ili uputa proizvođača. Rezultat analize je određenje tipa i oblika novog mjernog objekta ili provjeravanje odstupanja geometrijskih podataka za postojeće mjerno mjesto i izračun protoka po važećim jednadžbama.

2. Terensko mjerenje postojećih hidrauličnih prilika

Cilj mjerenja je analiza postojećih prilika na mjernom objektu i/ili predviđenoj lokaciji.

Mjerenja obuhvaćaju izmjeru dvo- ili trodimenzionalnoga polja brzine u mjernom presjeku (ISO 748 : metode brzina-površina) i integraciju brzine po presjeku za određenje protoka (ISO 8363). Kada je pregledom utvrđeno, da je mjerno mjesto uređeno u skladu sa odredbama odgovarajućih standarda, te kada su obezbjeđeni odgovarajući uzvodni i nizvodni rubni uvjeti, izvođenje mjerenja nije obavezno potrebno, ali sa mjerenjima brzinskog polja možemo uvidjeti i neregularnosti na dotoku u mjerni objekat.

3. Matematično modeliranje hidrauličnih prilika

Cilj je provjeravanje prikladnosti hidrauličnih rubnih uvjeta za mjerno mjesto. Kod mjernih objekata u kojima dolazi do kritičnoga toka važno je da ne dolazi do uticaja sa nizvodne strane. Sa matematičnim modelom može se analizirati i utjecaje mogućih korekcija geometrije mjernog objekta na preciznost mjerenja. Analize se izvodi uporabom jednodimenzionalnih matematičnih modela.

Međusobnim uspoređivanjem analiza po svim navedenim načinima može se, glede na deklariranu preciznost svake od njih, prosuditi primjerenost novog ili postojećega mjernoga mjesta i predložiti eventualne korekcije.

Postupak je posebno primjeren za mjerne naprave koje zahtijeva zakonodavstvo, važeće u Sloveniji i zakonodavstvo EU. Iako Pravilnik o prvim mjerenjima i pogonskom monitoringu otpadnih voda te o uvjetima za njegovo izvođenje (Uradni list RS 35/96) propisuje uporabu standarda DIN, u praksi se pokazalo da je u pravilniku (jedini) propisani standard u svojim određenjima previše općenit, preciznije određuje samo Venturijevo mjerno korito (DIN 19559-2), a ostale mjerne metode samo su općenito obrađene i nisu podrobnije opredijeljene kao npr. u ISO standardima. Smatramo, da je radi toga uporaba ISO standarda u takvim slučajevima primjerenija, a kao nadopuna propisanoj metodi vrlo smisljena.

Potreba za verifikaciju mjernih mjesta značajna je i sa vidika izvođenja nadzornih mjerenja sa strane države ili ovlaštene institucije. Za vrijeme djelovanja mjernih objekata za mjerenje protoka svakako će biti potrebno uspostaviti i sustav nadzora nad izvođačima monitoringa. Postupak verifikacije mjerenja koji u slučajevima otkrivanja koncentracije različitih tvari u otpadnoj vodi potječe s međulaboratorijskom razmjenom uzoraka, na području mjerenja protoka ne dolazi u obzir. Nadzorna mjerenja, se naime, ne mogu izvoditi na neodgovarajućem mjernom objektu, već je potrebno mjerno mjesto prethodno odgovarajuće verificirati. Tek kada je postignuto da se mjerenja (svo vrijeme) mogu primjerenom izvoditi, moguć je povremeni nadzorni pregled.

5. PRIMJERI UPORABE POSTUPKA VERIFIKACIJE

5.1. MJERAČ PROTOKA CENTRALNOG UREĐAJA ZA PROČIŠĆAVANJE DOMŽALE

Mjerenje protoka na ispustu CČN Domžale izvodi se s pomoću Khafagi Venturi mjerača širine korita 118 cm sa kratkim suženjem širine 52 cm. Mjerač je lociran ispred ispusta iz CČN u Kamnišku Bistricu. Cilj zadatka bio je provjeriti djelovanje mjernog mjesta i odrediti krivulju protoka. Mjerno korito je prikazano na slici 1.



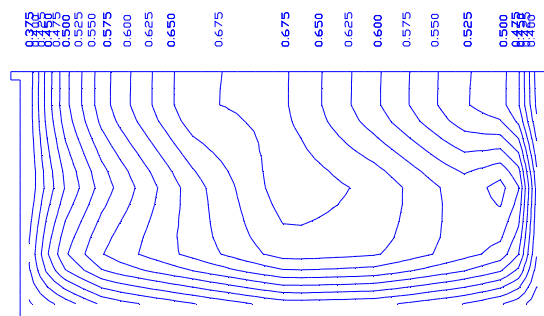
Slika 1: Khafagi Venturi korito na istoku CUP Domžale
Figure 1: Khafagi Venturi flume on Domžale WWTP outflow

U prvoj fazi zadatka, bili su precizno izmjereni i provjereni geometrijski podaci korita i istražena odstupanja odn. tolerancije, pri čemu se smisleno upotrebljavaju zahtjevi standarda DIN 19559-2 koji inače ne obrađuju takav slučaj, nego samo klasično Venturijevo korito sa dugim suženjem. Na osnovi podataka iz stručne literature određena je teorijska protočna krivulja.

Terenska mjerenja protoka izvođena su u mjernom profilu ispred suženja. Primjenjivan je način kalibracije mjernoga mjesta sa metodom mjerenja brzine u pojedinim točkama presjeka i integracijom brzine po presjeku za izračun protoka u skladu sa uputama standarda ISO 8363 i ISO 748.

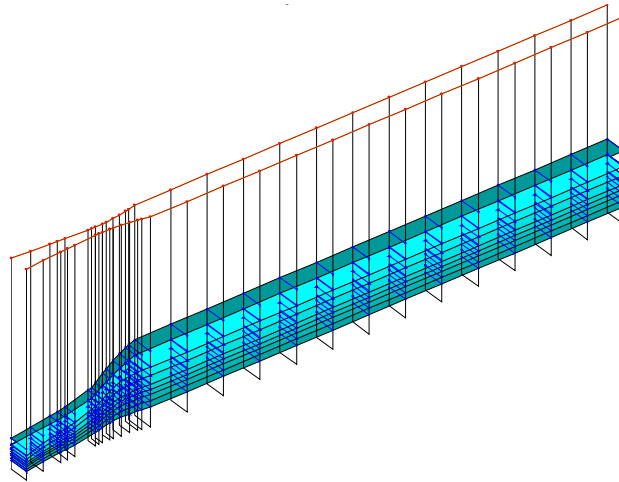
Mjerenja dvodimenzionalnoga polja brzine bila su izvedena u 21 točki presjeka kod 7 različitih protoka. Uporabljena je bezkontaktna sonda za točkovno mjerenje dvodimenzionalnoga vektora brzine ADVLab-2D sa nazivnom točnošću 0,5 % mjernoga polja i rezolucijom 0,1 mm/s, proizvođača Nortek AS. Prednost uporabe te sonde pokraj njene preciznosti je i to da nema pomičnih dijelova, kao npr. hidrometrijsko krilo.

Za izračun protoka uporabljen je program PROTOK7 koji izvodi integraciju izmjerenih brzina po presjeku, uz pretpostavku jako razvijene turbulencije u mjernom profilu (slika 2).



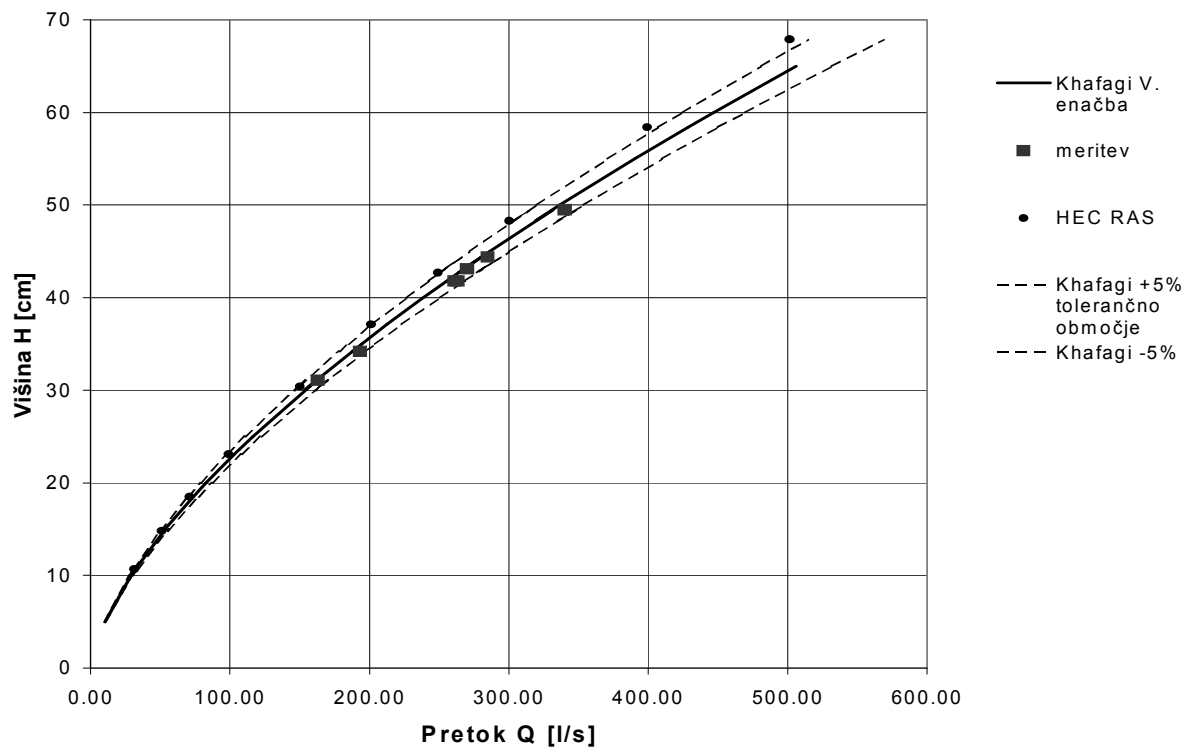
Slika 2. Izotahe mjenoga profila kod protoka 285 l/sek
Figure 2. Velocity profile at discharge 285 l/sek

Provjera hidrauličnih rubnih uvjeta izvedena je pomoću HEC RAS programa odgovarajućeg za izračun konstantnoga, postupno mijenjajućeg se toka. Uračunata je stvarna geometrija korita, i analiziran utjecaj korekcija geometrije korita na izračun uzdužnog profila razina vode i protoka (slika 3).



Slika 3. Aksonometrični prikaz izračunatih razina vode sa programom HEC RAS ver.2.2.
Figure 3. Axonometric view of water levels computed with HEC RAS ver.2.2.

Rezultati tri vrste analiza prikazani su na donjem dijagramu



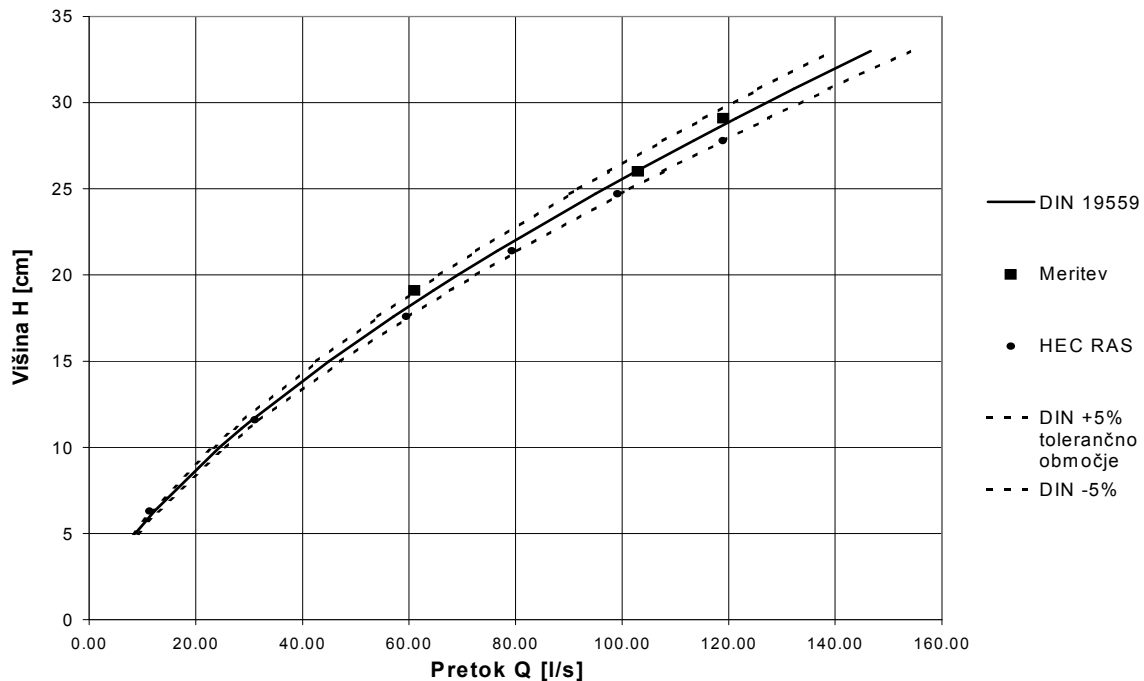
Slika 4. Q-H dijagram – usporedba rezultata
Figure 4. Q-H curves analysis

Iz dijagrama očito je (vrlo) dobro slaganje rezultata mjerenja protoka sa izračunom po teorijskoj jednačini, jer odstupanja nigdje nisu iznosila više od 3%. Izračun s pomoću HEC RAS programa bio je u prvom redu namijenjen provjeri rubnih uslova, radi čega koeficijent hrapavosti nije preciznije kalibriran. Rezultati su zato samo indikativni.

Kao konačni rezultat zadatka može se zaključiti, da je sa mjerenjima i izračunima dokazano da je mjerni objekt odgovarajuće izveden, da su rubni uvjeti odgovarajući i da je mjerni objekt pravilno umetnut na ispustu iz uređaja za pročišćavanje. Tako se kao kalibracijska krivulja na području mjerenja može uporabiti teorijska krivulja protoka Khafagi Venturi korita, kao odgovarajuća zamjena odredbama Pravilnika o prvim mjerenjima i pogonskom monitoringu otpadnih voda te o uvjetima za njegovo izvođenje.

5.2. MJERAČ PROTOKA NA KANALIZACIJSKOM SUSTAVU KAMNIK - DOMŽALE

Mjerač protoka je lociran na granici između općina Kamnik i Domžale i služi za provjeravanje dotoka otpadne vode iz općine Kamnik. Mjerni objekt je klasično Venturijevo korito, širine korita 70 cm sa dugim suženjem, širine 47 cm.



Uporabljena je ista metodologija rada, a konačni rezultati analiza prikazani su na dijagramu ispod.

Slika 5. Q-H dijagram – usporedba rezultata
Figure 5. Q-H curves analysis

Odstupanja izvedenih mjerenja od teorijski izračunatih protoka su nešto veća, *no* još uvijek unutar dozvoljene granice tolerancije po standardu DIN 19559-2. Na osnovi tog zaključka na području mjerenja verificirala se uporaba protočne krivulje po DIN standardima.

6. ZAKLJUČAK

Zaključke možemo ovako sažeti:

- Izvođenje mjerenja protoka mora biti kvalitetno i zahtijeva specifična znanja.
- Preporučuje se uporaba standarda pri projektiranju mjernih objekata, ocjeni postojećih objekata i izvođenju mjerenja protoka.
- Verifikacija mjernih mjesta potrebna je prije početka izvođenja monitoringa protoka.
- Elementi verifikacije obuhvaćaju provjeru skladnosti mjernog objekta sa standardima, mjerenja protoka i matematično modeliranje hidrauličnoga djelovanja objekta.
- Postupak verifikacije je u praksi pokazao široku uporabnost, od verifikacije izbora vrste i generalnog uređenja mjernog objekta do prijedloga za premještaj odn. sanaciju, a i pitanja o nužnosti uklanjanja objekata koje nije moguće primjereno osposobiti.
- Verifikaciju mjerenja (kontrolna mjerenja) protoka moguće je izvoditi na verificiranim mjernim mjestima.

7. IZVORI

- International Organisation for Standardisation (2000). ISO catalogue 2000, (<http://www.iso.ch/>)
- Deutsches Institut fuer Normung (2000). DIN katalog 2000, (<http://www.din.de/>)
- MZT-Urad za standardizaciju in meroslovje (1999). SIST katalog 1999, Urad za standardizaciju in meroslovje, Ljubljana
- Cerar, U. (2000). Standardi za meritve pretokov in natančnost meritev, Strokovni seminar 2000 Zbornice sanitarnih inženirjev in tehnikov, Radenci, Zbornik predavanj (v tisku)
- Banovec, P. (1996). Merilni sistemi, Strokovni seminar o meritvah pretokov, Portorož, Zbornik predavanj, 15-27.
- Steinman, F., Banovec P. (1996). Merski objekti, Strokovni seminar o meritvah pretokov, Portorož, Zbornik predavanj, 31-50.
- Cerar, U., Banovec, P. (1999). Umerjanje merilnikov pretoka CČN Domžale - iztok in Nožice. Poročilo o raziskavi, Inštitut za hidravlične raziskave in FGK Katedra za mehaniko tekočin, 40p.
- Mlačnik, J. (2003). Vodilo za meritve pretokov, Slovenska akreditacija, strokovno gradivo za ocenjevanje laboratorijev, akreditiranih za vzorčevanje odpadnih vod.

Naslovi autora

Jure MLAČNIK, Uroš CERAR, dr. Primož BANOVEC
Inštitut za hidravlične raziskave
Hajdrihova 28, SI – 1000 Ljubljana

prof.dr.Franci STEINMAN
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem
Hajdrihova 28, SI – 1000 Ljubljana