

# FIELD MEASUREMENTS AND HYDRAULIC COMPUTATION OF A CULVERT

## ТЕРЕНСКА МЕРЕЊА И ХИДРАУЛИЧКИ ПРОРАЧУН ПРОПУСТА

Dániel Koch <sup>1</sup>  
Zoltan Horvat <sup>2</sup>

UDK: 627.133:004.4  
DOI: 10.14415/zbornikGFS34.04  
CC-BY-SA 4.0 license

**Summary:** The purpose of this paper is to present the experiences gained during conducted field measurements on a culvert in Hungary, as well as the hydraulic computation of this structure. The measurements were performed on a culvert with a pipe arch cross-section, which is located on a cutoff meander on the Danube near the town of Baja. During the field measurements velocity distributions and water surface elevations were determined, along with other parameters necessary for establishing a dependency between discharge and water elevation. For the hydraulic computation the HY-8 software was used, which is based on equations published by an USA agency (Federal Highway Administration). The analysis of measured and computed values yielded the conclusion that the software's results are in good agreement with the measured values. Hence, the usage of this software is recommended for hydraulic computation of pipe culverts.

**Keywords:** Field measurements, culvert, HY-8 software, hydraulic computation

**Резиме:** Циљ овог рада је да прикаже искуства при спровођењу теренских мерења на једном пропусту у Мађарској, као и примену софтвера за хидраулички прорачун поменутог објекта.

Мерења су спроведена на пропусту са пресеком засвођене цеви који се налази на мртваји Дунава недалеко од Баје и сводила су се на одређивање распореда брзина и нивоа водног огледала, као и квантификацију осталих параметара потребних за успостављање зависности нивоа и протицаја.

За хидраулички прорачун је примењен софтвер HY-8, који се заснива на образцима прорачуна пропуста издатих од стране владине агенције САД (Федерална администрација за аутопутеве).

Упоређивање мерених и срачунатих вредности указује на добро слагање, па се препоручује примена испитиваног софтвера при хидрауличким прорачунима пропуста.

**Кључне речи:** Теренска мерења, пропуст, HY-8 софтвер, хидраулички прорачун

<sup>1</sup> Dániel Koch, BSc, CE, University of Public Service, Faculty of Water Sciences, Bajcsy-Zsilinszky utca 12-14, H-6500 Baja, Hungary, e – mail: [koch.daniel@uni-nke.hu](mailto:koch.daniel@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> Zoltan Horvat, PhD, CE, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, e – mail: [horvatz@gf.uns.ac.rs](mailto:horvatz@gf.uns.ac.rs)

## 1. INTRADUCTION

The proper hydraulic computation of culverts is the foremost condition for maintaining functionality of the systems which they are a part of, as well as maintaining the functionality of structures that these hydraulic systems are intercepting. The two computational methods boil down to solving the proper energy conservation equation [1,4,7] or the application of semi-empirical equations for some types of flow [6]. The fundamental differences between these two methods, as well as their advantages and shortcomings were analyzed by many authors [2,3].

This paper presents measurements conducted on a culvert with a pipe arch cross-section, which is located on a cutoff meander on the Danube, not far from the town of Baja in Hungary. For the hydraulic computation the HY-8 software was used [5].

## 2. THEORETICAL BACKGROUND

According to the conventional hydraulic practice, there can be 6 types of flow in culverts [3]. This classification, along with the proper equations was published by the USGS (United States Geological Survey) [1] and their overview is given in Table 1. It should be noted that these equations were derived from the energy conservation equation.

## 1. УВОД

Исправан хидраулички прорачун пропуста представља први предулов за обезбеђење несметаног функционисања како хидротехничких објеката чији су они саставни део, тако и објеката са којим се они укрштају. Две основне методе прорачуна се своде на исписивање енергетске једначине [1,4,7] или на примену полуемпиријских израза за неке случајеве течења [6].

Основне разлике између поменуте две методологије, као и њихове предности односно мане су анализирали многи аутори [2,3].

У овом раду се приказују мерења спроведена на пропусту са пресеком засвођене цеви, који се налази на мртваји Дунава недалеко од Баје у Мађарској.

За хидрауличку анализу је коришћен софтвер HY-8 [5].

## 2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

По уобичајеној хидротехничкој пракси типови течења у пропустима се могу поделити на 6 типова [3]. Ова класификација, као и једначине које у овим случајевима важе су публиковане од стране USGS (United States Geological Survey) [1] и њихов преглед је дат у табели 1. Овде се наводи да су предметне једначине добијене из енергетске једначине.

Табела 1 – Преглед једначина по USGS  
Table 1 – Overview of equations according to USGS

Type Тип	Conditions Услов	Equation Једначина
1	$\frac{(h_1 - z)}{D} < 1.5,$ $\frac{h_4}{h_c} < 1, S_0 > S_c$	$Q = C A_c \sqrt{2g \left( h_1 - z + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_c - \Delta E_{1-2} \right)}$
2	$\frac{(h_1 - z)}{D} < 1.5,$	$Q = C A_c \sqrt{2g \left( h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_c - \Delta E_{1-2} - \Delta E_{2-3} \right)}$

	$\frac{h_4}{h_c} < 1, S_0 < S_c$	
3	$\frac{(h_1 - z)}{D} < 1.5,$ $\frac{h_4}{D} \leq 1, \frac{h_4}{h_c} > 1$	$Q = C A_3 \sqrt{2g \left( h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_3 - h_c - \Delta E_{1-2} - \Delta E_{2-3} \right)}$
4	$\frac{(h_1 - z)}{D} > 1,$ $\frac{h_4}{D} > 1$	$Q = C A_0 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_4)}{1 + \frac{2gC^2n^2L}{R_0^{4/3}}}}$
5	$\frac{(h_1 + z)}{D} \geq 1.5,$ $\frac{h_4}{D} \leq 1$	$Q = C A_0 \sqrt{2g(h_1 - z)}$
6	$\frac{(h_1 - z)}{D} \geq 1.5,$ $\frac{h_4}{D} \leq 1$	$Q = C A_0 \sqrt{2g(h_1 - h_3 - \Delta E_{2-3})}$

In Table 1 lower indexes 1, 2, 3 and 4 denote cross-sections. Cross-section 1 is located immediately upstream from the culvert entrance, cross-section 2 is at the culvert entrance, cross-section 3 is at the culvert exit, while cross-section 4 is placed immediately downstream of the culvert exit. Lower index 0 marks parameters for the full cross-section (i.e. for the culvert cross-section when it is fully submerged), while the lower index  $c$  represents parameters when critical depth occurs. Furthermore,  $h$  denotes water depth,  $z$  is the bed elevation difference between cross-sections 2 and 3, i.e.  $z = S_0 \cdot L$ ,  $D$  is the cross-section height,  $S_0$  is the bed slope of the culvert,  $Q$  marks the discharge,  $C$  is the discharge coefficient which relates theoretical discharge to the real one,  $A$  is the cross-section area,  $g$  is the gravitational acceleration,  $\alpha$  is the kinetic energy coefficient,  $v$  stand for velocity,  $\Delta E_{i-j}$  is the energy loss between cross-sections  $i$  and  $j$ ,  $n$  is the Manning's friction coefficient,  $L$  is the culvert length, while  $R$  stand for the hydraulic radius. However, the HY-8 software used in this paper, is based on the methodology of the FHWA (Federal Highway Administration). This methodology

У табели 1 доњи индекси са бројевима 1, 2, 3 и 4 означавају попречне пресеке. Пресек 1 је непосредно узводно од улаза у пропуст, пресек 2 је на самом улазу у пропуст, пресек 3 је на самом излазу из пропуста, а пресек 4 је непосредно низводно од излаза из пропуста. Доњи индекс 0 означава величине за пун пресек пропуста (пун профил), док доњи индекс  $c$  означава величине при критичној дубини. Поред овога  $h$  означава дубину воде,  $z$  је разлика коте дна у 2 и 3, тј.  $z = S_0 \cdot L$ ,  $D$  је висина отвора пропуста,  $S_0$  је нагиб дна пропуста,  $Q$  је протицај,  $C$  је коефицијент протицаја који коригује теоријски протицај у стварни,  $A$  је површина попречног пресека,  $g$  је гравитационо убрзање,  $\alpha$  је коефицијент неравномерности брзине,  $v$  означава брзину,  $\Delta E_{i-j}$  је губитак енергије од пресека  $i$  до пресека  $j$ ,  $n$  је Манингов коефицијент трења,  $L$  је дужина пропуста, док  $R$  представља хидраулички радијус. Међутим, софтвер HY-8, који се користи у овом раду, је заснован на методологији FHWA (Federal Highway Administration). Ова методологија се заснива на идентичним једначинама

employs the same equation as in Table 1, except for the 1 and 5 flow types. For these cases semi-empirical equations are used (Table 2), which are based on laboratory experiments conducted in the U.S. National Bureau of Standards (NIST).

као у табели 1, осим за случајеве течења 1 и 5. За ове ситуације се користе полуемпиријски образци приказани у табели 2, који се ослањају на лабораторијске експерименте спроведене у Националном бироу за стандарде (NIST) Сједињених Америчких Држава.

Табела 2 – Преглед једначина по FHWA  
Table 2 – Overview of equations according to FHWA

Type Тип	Equation Једначина
1	$\frac{H}{D} = \begin{cases} \frac{E_c}{D} + K \cdot 32.2^{M/2} \cdot F^M - 0.5 \cdot S \\ K' \cdot 32.2^{M'/2} \cdot F^{M'} \end{cases}, F = \frac{Q}{A_0 \sqrt{gD}}$
5	$\frac{H}{D} = 32.2 \cdot c \cdot F^2 + Y - 0.5 \cdot S, F = \frac{Q}{A_0 \sqrt{gD}}$

In Table 2  $H$  denotes the upstream specific energy measured relative to the bed elevation of the cross-section at the culvert entrance,  $F$  is the Froude number computed according to the given equation.  $E_c$  is the specific energy at the culvert entrance when critical depth occurs,  $S$  marks the slope between bed elevations of the culvert entrance and the cross-section where critical depth appears,  $Q$  is the discharge,  $A_0$  represents the area of the full culvert cross-section,  $g$  is the gravitational acceleration, while  $D$  denotes the culvert cross-section height.  $K, K', M$  and  $M'$  are empirical coefficients that can be found in the proper literature [6]. The equations for type 1 flow in Table 2 can be used for  $F \leq 0.6$ , while the first form of the equation is recommended. In case of the type 5 flow equation,  $c$  and  $Y$  are empirical coefficients which can also be found in literature [6]. The type 5 flow equation can be used for  $F \geq 0.7$ .

У табели 2  $H$  означава узводну специфичну енергију мерену у односу на коту дна улаза у пропуст,  $F$  је Фрудов број који се рачуна по горе наведеном образцу.  $E_c$  је специфична енергија на улазу у пропуст која се јавља при критичној дубини,  $S$  је нагиб између коте дна улаза и коте дна где се јавља критична дубина,  $Q$  је протицај,  $A_0$  означава површину пуног попречног пресека пропуста,  $g$  је гравитационо убрзање, док  $D$  представља висину отвора пропуста.  $K, K', M$  и  $M'$  су емпиријски коефицијенти који се могу наћи у одговарајућој литератури [6]. Једначине за тип течења 1, дате у табели 2, су примењиве за  $F \leq 0.6$ , при чему се препоручује први тип једначине. Што се тиче једначине у табели 2 за тип течења 5, у њој  $c$  и  $Y$  представљају емпиријске коефицијенте чије вредности постоје у литератури [6]. Једначина за тип течења 5 је применљива за  $F \geq 0.7$ .

### 3. FIELD MEASUREMENTS

Field measurements were conducted on a culvert located in a cutoff meander called Cserta-Duna. This meander separated from the Danube around 1830 without any human intervention.

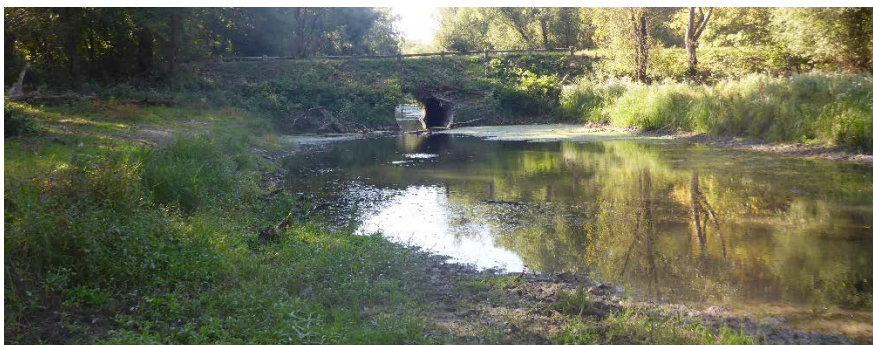
### 3. ТЕРЕНСКА МЕРЕЊА

Пропуст на коме су вршена мерења се налази на мртваји Дунава под називом Cserta-Duna која се природним путем одвојила од главног тока

The importance of this water body can be traced back to the fact that it is positioned in the Danube-Drava National Park in Hungary, which encompasses one of the largest flood areas in Europe (approximate length 33km, area 180km<sup>2</sup>). The mentioned cutoff meander has the length of 5.7km, it's average width is 80m, it has the area of 45ha, while the average water depth is 0.8m. The estimated water volume in the meander is 360000m<sup>3</sup>. In 2010, a revitalization was carried out, and a TUBOSIDER T150 TR/2 type culvert with a pipe arch cross-section was installed. The culvert is positioned horizontally, with a bed elevation of 84.5mBs (meters over Baltic sea), it's length is 21.3m, while the cross-section height and width are respectively 2.85m and 3.35m.

Дунава 1830-их година. Важност овог водног тела се огледа у томе да је оно део Националног парка Дунав-Драва у Мађарској, који обухвата једно од највећих повезаних плавних подручја у Европи (дужина од око 33км, површина око 180км<sup>2</sup>). Предметна мртваја је дугачка 5.7км, просечна ширина јој износи 80м, површине је 45ха, а просечна дубина воде у њој је 0.8м. Запремина воде у њој се процењује на 360000м<sup>3</sup>.

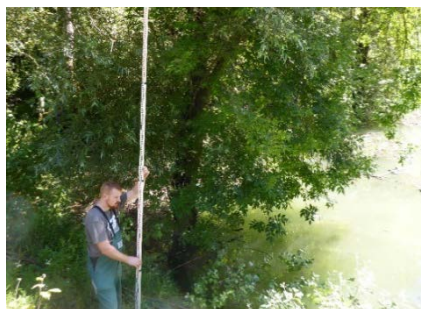
У оквиру ревитализације мртваје 2010. године је постављен пропуст типа TUBOSIDER T150 TR/2, који има попречни пресек типа засвођена цев. Пропуст је постављен хоризонтално на коту 84.5мБМ (метара над Балтичким морем), дужина му износи 21.3м, висина и ширина пресека су редом 2.85м и 3.35м.



Слика 1 – Анализирани пропуст  
Figure 1 – The analyzed culvert

Field measurements on the analyzed culvert were conducted between the 18<sup>th</sup> and the 20<sup>th</sup> of July 2016. In this time period a moderate flood wave was passing down the Danube, which filled up the cutoff meander. This ensured measurable velocities at the culvert. The proper instruments were used for determining the upstream and downstream water levels (Figure 2). As a result, the upstream and downstream water levels were obtained, as well as the denivelation (Table 3).

Теренска мерења на поменутом објекту су спроведена од 18. до 20 јула 2016. године. У ово време је на Дунаву пролазио поплазни талас средњег интензитета који је напунио мртвају, па се на пропусту могло опазити мерљиво струјање воде. Одређивање узводног и низводног нивоа воде је вршено одговарајућим геодетским инструментима (Слика 2). Као резултат су добијени узводни и низводни нивои воде као и њихова денивелација (Табела 3).



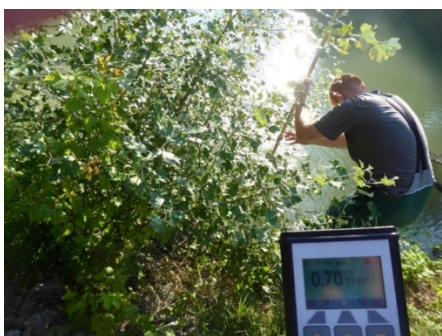
Слика 2 – Мерење нивоа воде  
Figure 2 – Water level measurement

Табела 3 – Мерени нивои воде  
Table 3 – Measured water elevations

Date Датум	Upstream elevation (moBs) Узводни ниво (мнБм)	Downstream elevation (moBs) Низводни ниво (мнБм)	$\Delta h$ (m)
18.07.2016.	87.683	87.595	0.088
19.07.2016.	87.719	87.696	0.023
19.07.2016.	87.709	87.691	0.018
20.07.2016.	87.454	87.456	0.002

Velocity measurements were carried out with a OTT ADC – digital acoustic velocity meter. The measurements were performed on a vertical axes on every 20cm (Figure3). Each measurement lasted 40 seconds.

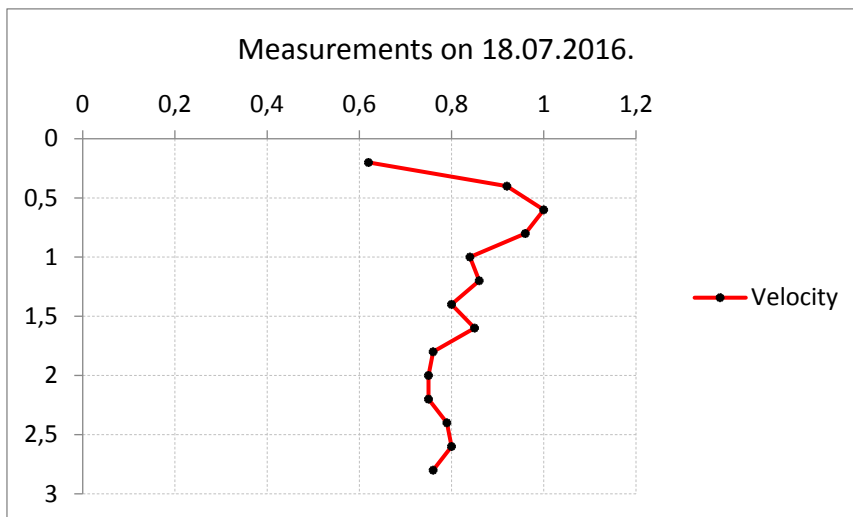
Мерење брзине воде је вршено ОТТ АДЦ – акустичним дигиталним мерачем брзине дуж вертикалне осе пропуста на сваких 20цм (Слика 3). Време трајања узорковања је износило 40 секунди за сваку тачку.



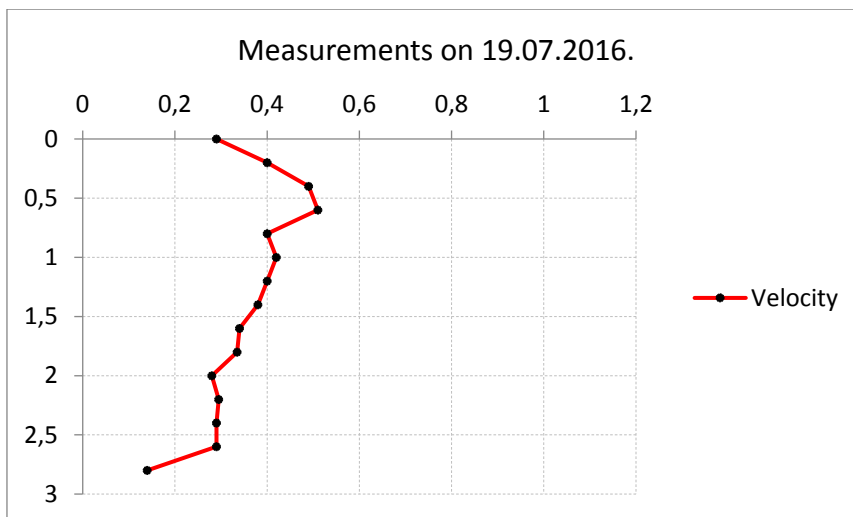
Слика 3 – Мерење брзине воде  
Figure 3 – Velocity measurement

The measured velocity distributions on the culvert's cross-section vertical axes are presented on Figures 4, 5 and 6.

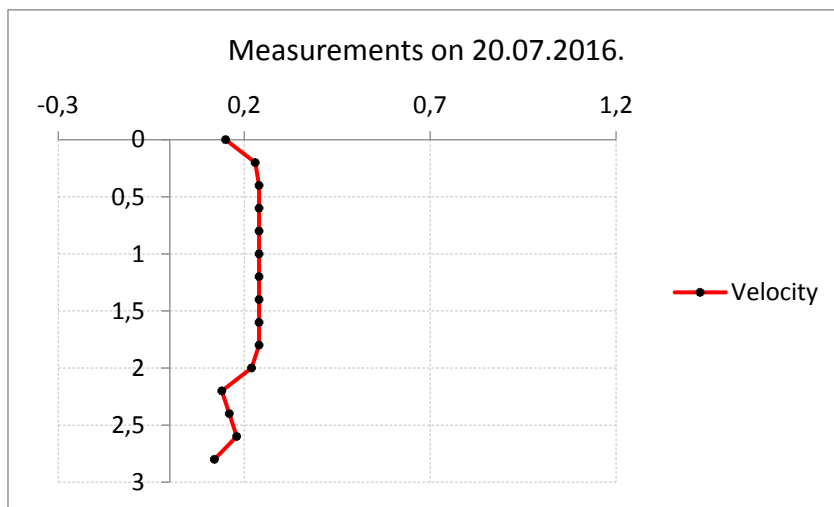
У наставку су дати прикази распореда брзина по оси предметног пропуста (Слика 4, 5 и 6).



Слика 4 – Мерене брзине 18.07.2016.  
Figure 4 – Measured velocities 18.07.2016.



Слика 5 – Мерене брзине 19.07.2016.  
Figure 5 – Measured velocities 19.07.2016.



Слика 6 – Мерене брзине 20.07.2016.  
Figure 6 – Measured velocities 20.07.2016.

#### 4. HYDRAULIC COMPUTATION

The hydraulic computation was carried out using the HY-8 software. The input data was the culvert's geometric parameters, and the computed discharge using measured velocities. The software, as a result, gave the denivelation between the upstream and downstream water levels. The numerical values have been summarized in Table 4.

#### 4. ХИДРАУЛИЧКИ ПРОРАЧУН

Хидраулички прорачуј је вршен применом софтвера HY-8. Као улазни подаци су служили гео-метрија пресека и протицај воде, који је срачунат користећи мерене брзине. Програм је као резултат дао денивелацију између узводног и низводног нивоа воде. Бројчане вредности прорачуна су сумирани у табели 4.

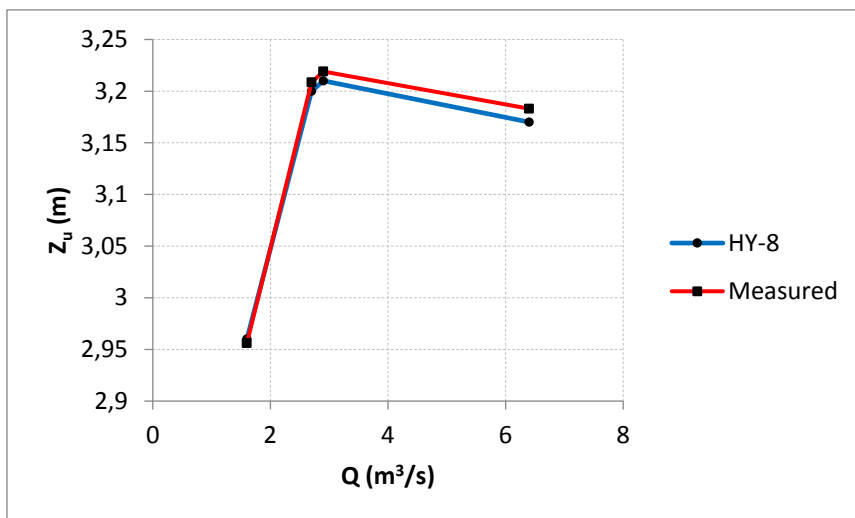
Табела 4 – Рачунате и мерене вредности  
Table 4 – Computed and measured values

Computed Рачунато					Measured Мерено	
$Z_u$ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	$Z_d$ (m)	$v$ (m/s)	$\square h$ (cm)	$v$ (m/s)	$\square h$ (cm)
2.96	1.6	2.95	0.208	1	0.208	0.2
3.2	2.7	3.19	0.35	1	0.350	1.8
3.21	2.9	3.2	0.377	1	0.371	2.3
3.17	6.4	3.1	0.83	7	0.818	8.8

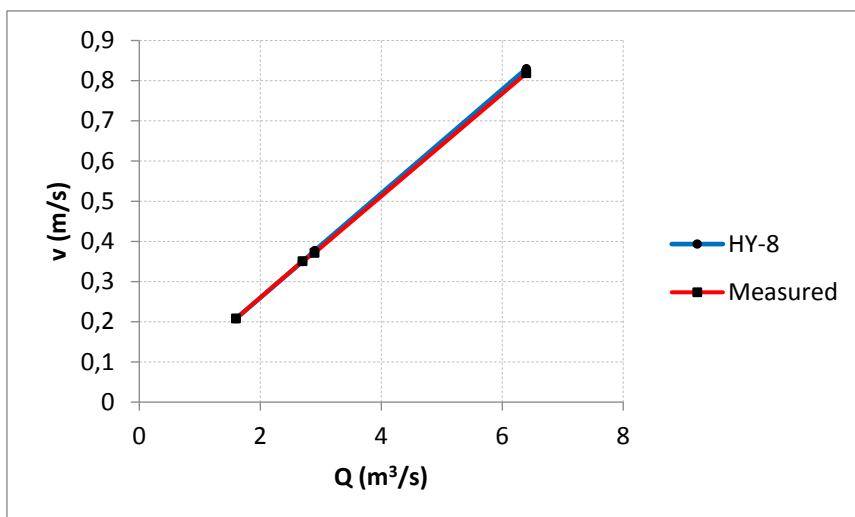
On Figure 6 the dependency between discharge and the upstream depth is presented using computed and measured values. The dependency between discharge and water velocity is depicted on Figure 7.

На слици 6 је приказана зависност протицаја и узводне дубине користећи срачунате и мерене вредности. Зависност између протицаја и брзине воде у пропусту је дата на слици 7.





Слика 7 – Зависност протицаја и узводне дубине  
Figure 7 – Dependency between discharge and upstream water level



Слика 8 – Зависност протицаја и брзине  
Figure 8 – Dependency between discharge and velocity

It can be observed that the difference amid computed and measured values increases as for higher discharges. This consideration is true for both the upstream water level (Figure 7) and the water velocity (Figure 8). However, the

Примећује се да су одступања срачунатих вредности у односу на мерења већа са повећањем протицаја. Ова констатација је тачна и за узводни ниво воде (слика 7) и за брзину воде (слика 8). Међутим, може

noted discrepancy can be neglected when performing practical hydraulic computations of culverts.

## 5. CONCLUSION

The basic theoretical background for hydraulic computation of culverts was presented in this paper. Furthermore, the measurements of water levels and velocities on a culvert in Hungary were also conferred. The field measurements enabled the usage of the HY-8 software for hydraulic computation of the analyzed culvert, as well as the comparison of measured and computer values. The inquiry was focused on the dependency between discharge and the upstream water depth as well as the dependency between discharge and water velocity in the culvert. Although a discrepancy among measured and computed values grew with larger discharges, the applicability of the HY-8 software is highly recommended when performing practical hydraulic computations of culverts.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia, project number TR 37009.

## REFERENCES

- [1] Bodhaine, G.: Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods – Chapter A3, USGS, Washington DC, **1968**.
- [2] Charbeneau, R., Henderson, A., Sherman, L.: Hydraulic performance curves for highway culverts, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2006**, vol. 132, № 5, p.p. 474-481.
- [3] Chin, D.A.: Hydraulic Analysis and Design of Pipe Culverts: USGS versus FHWA, *Journal of Hydraulic Engineering*, **2013**, vol. 139, № 8, p.p. 886-893.
- [4] Chow, V.: Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York, **1959**.
- [5] Federal Highway Administration (FHWA): Culvert hydraulics software, HY-8, version 7.3, Federal Highway Administration, Washington DC, **2012**.
- [6] Federal Highway Administration (FHWA): Hydraulic design of highway culverts, 3rd Ed., Federal Highway Administration, Washington DC, **2012**.
- [7] Starosolszky Ó.: Vízépítési hidraulika, Műszaki könyvkiadó, Budapest, **1970**.

се тврдити да су примећена одступања прихватљива за инжењерске прорачуне пропуста.

## 5. ЗАКЉУЧАК

У раду су представљени основни теоријски принципи који се користе при хидрауличком прорачуну пропуста. Такође су приказана мерења нивоа воде и брзина на једном пропусту на мртваји Дунава у Мађарској. Теренска мерења су омогућила коришћење програма HY-8 ради спровођења хидрауличких прорачуна изучаваног пропуста и упоређивање ових резултата са мереним вредностима. Анализа се сводила на зависности протицаја и узводне дубине воде, односно протицаја и брзине воде у пропусту. Иако је примећено да одступања мерених и срачунатих вредности расту при већим протоцима, констатује се да је примена софтвера HY-8 при хидрауличким прорачунима пропуста оправдана.

## ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је финансиран од стране Министарства за образовање и науку Републике Србије, број пројекта TP 37009.