

Výskum tlmiaceho účinku opevnenia pod haťou VD Hričov pomocou fyzikálneho modelovania

Ing. Martin Pavúček

Abstrakt

Výskum opevnenia pod haťou vodného diela Hričov je zameraný na tlmiaci účinok energie dopadajúcej vody za vývarom. VD Hričov bolo vybudované s upravenými skrátenými rozmermi stavby vývaru a pilierov. Skrátením vývaru dochádza k vymieľaniu dna koryta, ktoré môže viesť k strate stability stavby. Ani navrhnuté sanačné opatrenie po prvej povodni nezlepšilo tlmiaci účinok a nedokáže trvale zamedziť vymieľaniu podhatia. V hydrotechnickom laboratóriu bol vytvorený trojrozmerný model na ktorom bolo preverované tlenie energie navrhnutého opevnenia. Fyzikálny model je navrhnutý podľa Froudovho kritéria mechanickej podobnosti v mierke 1:55. Z manipulačného poriadku bol na modeli preverovaný povodňový prietok ($Q = 2450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), pre ktorý možno uplatniť dva typy prepúšťania prietoku – symetricky a nesymetricky. Nesymetrická manipulácia haťovými uzávermi je využívaná len v prípade opravy, prípadne náhleho výpadku a spôsobuje zmenu v charaktere prúdenia na hati. V rámci výskumu bola pre zaznamenávanie výmoľov využitá fotogrametrická metóda. Z vytvorených fotografií bol vyhotovený digitálny model pomocou ktorého sa odčítali hĺbky výmoľov v podhatí. Výskumom na trojrozmernom modeli bolo zistené, že k zlepšeniu účinku tmenia energie dochádza len v prípade symetrickej manipulácie na hati. Pri nesymetrickej manipulácii dochádza takmer k rovnakému scenáru vymieľania podhatia ako pri neopevnenom koryte, avšak výmoľ je oddialený od základov stavby vodného diela.

Kľúčové slová: Tlenie energie, fyzikálny model, vývar, výmoľ, fotogrametria

The research of the fortification under the Hričov weir is focused on the energy dissipation of the falling water behind the stilling basin. The Hričov water structure was built with modified shortened dimensions of the construction of the stilling basin and pillars. The bottom of the riverbed is scoured by the shortening stilling basin, which can lead to a loss of stability of the structure. Even the proposed fortification after the first flood did not improve the dissipation effect and cannot permanently prevent the scouring of the riverbed downstream. A three-dimensional model was built in the hydrotechnical laboratory, on which the energy dissipation of the designed fortification was verified. The physical model is designed according to Froud's criterion of mechanical similarity at a scale of 1:55. From the operational manual, the flood flow ($Q = 2450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) was checked at the model, for which two types of flow discharge can be applied – symmetrically and asymmetrically. Asymmetrical manipulation of the gates used only in case of repair or sudden failure and causes a change in the flow character at the weir. The research used a photogrammetric method to record scour development. A digital model was made from the created photographs and the depth of the scours were recorded. Research on a three-dimensional model has shown that the improvement of the energy dissipation occurs only in the case of symmetrical manipulation on the weir structure. In the case of asymmetrical manipulation, almost the same scenario of scouring in the riverbed occurs as in the case of a nonfortified downstream, but the scours are remote from the foundations of the water structure.

Key words: Energy dissipation, physical model, stilling basin, scour, photogrammetry

1 Úvod

Tlmenie kinetickej energie vytvorenej na dne prepadu je potrebné na to, aby sa prietok dostal do rovnakého stavu ako pred vtokom za čo najkratšiu vzdialenosť. Vyžaduje sa to nielen na ochranu koryta a brehov pred eróziou, ale taktiež aby sa predišlo k narušeniu samotnej stavby a súčastí stavby ako je elektráreň, hrádza a pod. Pre rozptyl a tlmenie energie sú využívané rôzne zariadenia avšak k samotnému tlmeniu dochádza turbulentným prúdením. Niektoré prvky pre tlmenie energie však môžu spôsobovať aj opačný negatívny vplyv (Khatsura, 2005). Najbežnejšie navrhovaným tlmiacim prvkom je tzv. vývar, v ktorom dochádza k zmene bystrinného na riečne prúdenie. Rôznymi úpravami vývaru alebo pridaním rozrážáčov, protiprahov a pod. je možné doceliť menšie rozmery samotného vývaru. Rozrážače a ich umiestnenia sa zaoberá ne jeden výskumník. Habibzabeh (2012) vo svojej práci skúmal vplyv umiestnenia a rozmery rozrážáčov na tlmenie energie pri dvoch režimoch prúdenia. Výskumom zistil, že v oboch prípadoch prúdenia vplyv výšky, šírky, pozície a počet radov rozrážáčov nemá význam pri tlmení energie. Rozrážače ovplyvnili len režim prietoku a zatopenie vodného skoku. Pagliara (2011) vo svojom výskume sledoval vlastnosti výmoľov a spôsob prúdenia vo vývare. Návrh vývaru bol menený v pozdĺžnom a priečnom smere. Všetky testy výskumu boli vykonávané pre nezatopený vodný skok. Prietok a následne aj výmoľ v dne bol významne ovplyvnený priečnym aj pozdĺžnym zväčšením. Ali (2014) riešil minimalizovanie výmoľa využitím zvlneného opevnenia – trojuholníkové rozrážače. V obdĺžnikovom žľabe skúmal vplyv zostavenia týchto rozrážáčov pri zatopenom vodnom skoku. Vplyvom rozrážáčov sledoval optimálnu vlnovú dĺžku pri ktorej dochádza k najmenšiemu vytváraniu výmoľov za opevnením. Pre pohyblivé podložie využil dve rôzne frakcie. Tento návrh opevnenia zlepšil tlmiaci účinok priemerne o päťdesiat percent ako bez opevnenia.

Hať vodného diela Hričov disponuje vybudovaným skrátaným vývarom, príčinou ktorého vznikajú výmole v blízkosti samotnej stavby. Vybudovanie skrátaného vývaru bolo realizované vplyvom znižovania investičných nákladov. Pôvodne navrhovaný vývar vodného diela mal dosahovať dĺžku 41 m a 1,85 m hĺbku. Tento návrh bol pozmenený na takmer desatinu pôvodnej dĺžky. Pozornosť sa však venovala úprave hrany prahu vývaru. Jej zošíkmením na sklon kombináciou 1:3 a 1:1,5 sa malo dosiahnuť usmernenie vodného valca tak, že hrana vývarového prahu nebude odkrývaná ale zhrnovaná materiálom. Po prvej povodni bolo nutné vytvoriť sanačné opatrenie a znížiť nebezpečie pre ďalšie prepúšťanie povodňových prietokov. Fyzikálny výskum preveril niekoľko variantných riešení, ktorého výsledným bolo osadenie priehradovej konštrukcie na dno koryta a zasypaním ťažkým kamenivom. Avšak ani tento typ sanácie nie je trvalý, a po prepustení väčšiny prietokov je potrebné materiál dosýpať späť do výmoľov (Doležal a kol., 1969).

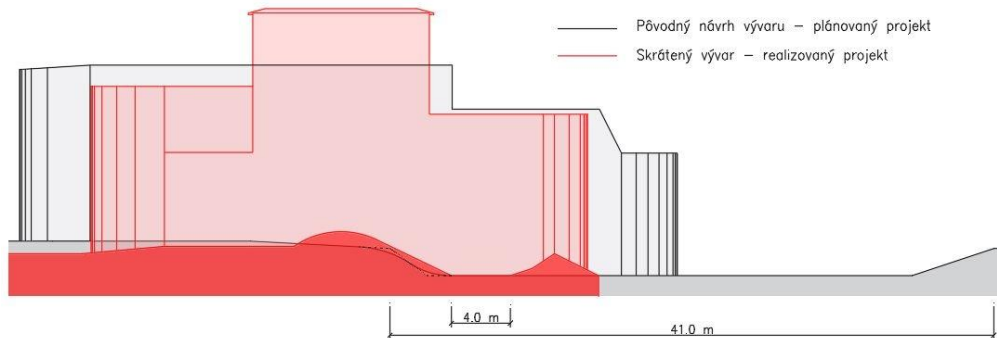
Cieľom tohto výskumu je preveriť účinok tlmenia energie na 3D fyzikálnom modeli. Na modeli bude preverovaný aktuálny stav vodného diela t.j. bez opevnenia podhatia a navrhovaného opatrenia skúmaného výskumom (Dušička a kol., 2019). Na zameranie veľkosti výmoľov bude využitá bezkontaktná fotogrametrická metóda. Na základe fotografií bude vytvorený 3D model z ktorého je možné vyhodnotiť veľkosť vzniknutých výmoľov a posúdiť tlmenie energie na opevnení.

2 Model a metodika

2.1 Hať VD Hričov

Dlhodobý problém vodného diela Hričov je vybudovaný skrátaný vývar spôsobujúci výmole v podhatí. Vývar a piliere hate boli v čase schvaľovania projektu výrazne upravené (Obrázok 1). Pôvodný návrh vývaru bol klasický železobetónový vývar, ktorého dĺžka mala dosahovať 41 m s hĺbkou 1,85 m. Počas projektu bol vytvorený výskum, ktorý výrazne zmenšil rozmery vývaru, pilierov a upravil pevnú spodnú stavbu hate. Fyzikálny výsekový model počas druhej etapy projektu preveril skrátané rozmery vývaru (dĺžka 10 m a hĺbka 1,5 m). Záver výskumu vyhodnotil, že skrátaná konštrukcia nevykazovala výrazné zhoršenie funkcie v porovnaní s pôvodným návrhom. Avšak samotné závery poukazovali na posunutie výmoľa bližšie k ťažisku vodného diela.

Po vybudovaní vodného diela Hričov a prvej náhlej povodni, kedy prietok dosahoval hodnoty 10-ročného prietoku ($Q = 1740 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) vytvorila povodeň výmole s priemernou hodnotou 4 – 4,5 m. Následný výskum taktiež výsekovým modelom bol zameraný na vývoj výmoľa a možnosť sanácie podhatia. Z viacerých návrhov bol uskutočnený variant sanačného záhozu s oceľovou priehradovou konštrukciou. Avšak ani toto sanačné opatrenie nie je trvalé a takmer po každom prepúšťaní je potrebné materiál dosýpať do vzniknutých výmoľov. (CABEX, 2014)



Obrázok 1: Rozmery pôvodného a skráteného návrhu hate VD Hričov

2.2 Fyzikálny model VD Hričov

Trojrozmerný model vodného diela Hričov bol vytvorený v hydrotechnickom laboratóriu (Obrázok 2). Hlavná modelovaná časť vodného diela sú haťové polia s pohyblivými uzávermi a podhatie s pohyblivým dnom. Samotný model je navrhnutý podľa Froudovho kritéria mechanickej podobnosti. Základná mierka použitá na modeli je mierka dĺžky $M_l = 1:55$. Od tejto hodnoty sú ďalej vypočítané ostatné potrebné veličiny:

- Čas (M_t): 1 : 7.416
- Špecifický prietok (M_q): 1 : 408
- Prietok (M_Q): 1 : 22 434

Na modeli bolo využité pohyblivé dno vytvorené z praneho štrku frakcie 2 – 4 mm. Veľkosť materiálu pohyblivého dna nezodpovedá modelovej podobnosti skutočného materiálu dna koryta vodného diela pre nedostatočné údaje o materiáli (krivka zrnitosti, úroveň nepriepustného podložia, uľahnutosť a pod.). Výskum sa predovšetkým zameriava na tlmiaci účinok v podhatí. Z toho dôvodu je postačujúca kvalitatívna podobnosť vytvorených výmoľov v dne koryta.

Fyzikálnym modelom bol preverený prietok z manipulačného poriadku (Tabuľka 1), ktorý predstavuje 100-ročný prietok. Tento prietok je možné previesť všetkými 4 haťovými poľami. V prípade, že je jedno haťové pole odstavené (údržba, poškodenie a pod.), dochádza k nesymetrickej manipulácii. Avšak aj pri nesymetrickej manipulácii majú haťové polia kapacitu previesť sto ročný prietok. Pri nesymetrickej manipulácii sa mení charakter prúdenia a dochádza k výraznejšiemu vymieľaniu dna koryta. (Dušička a kol., 2019)



Obrázok 2: Fyzikálny trojrozmerný model VD Hričov

Simulácia prietokov trvala vždy 15 minút modelového času. Pred každou simuláciou bolo dno koryta zarovnané na kótu prahu vývaru. Po skončení simulácie bola veľkosť výmoľňa zaznamenaná fotogrametrickou metódou.

Tabuľka 1: Scenár prietokov na fyzikálnom modeli

Prietok	Celkový prietok [m ³ .s ⁻¹]	Počet haťových polí [-]	Typ prepúšťania [-]
Q ₁	2450	4	voľný prepád cez hať
Q ₂	2450	3	voľný prepád cez hať

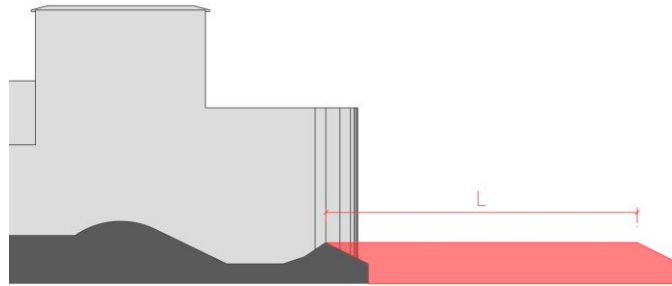
2.3 Návrh opevnenia podhatia

Rôzne geometrické úpravy opevnenia podhatia boli vyhodnocované na tlmiaci účinok (Tabuľka 2). Veľkosť výmoľňov a teda aj tlmenie energie je porovnávané s existujúcim stavom bez opevnenia. Pri nesymetrickej manipulácii (uzatvorením vždy jedného poľa), s uzávermi sa postupovalo od pravého brehu koryta. (Dušička a kol., 2019)

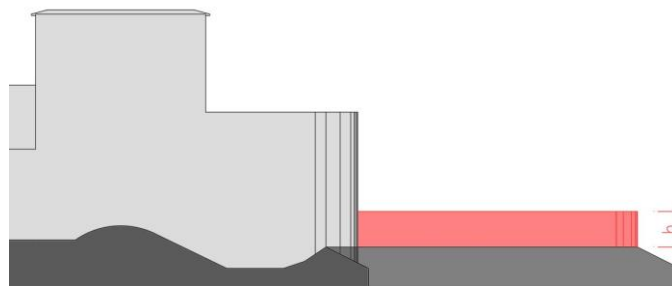
Tabuľka 2: Variatné riešenie opevnenia podhatia

Symetrická manipulácia			
Q ₁	A	B	C
Nesymetrická manipulácia			
Q ₂	A ₁	B ₁	C ₁
	A ₂	B ₂	C ₂
	A ₃	B ₃	C ₃
	A ₄	B ₄	C ₄

- A – bez opevnenia,
- B – opevnenie vodorovnou doskou (L = 22 m),
- C – opevnenie vodorovnou doskou (L = 22 m) doplnenou o predĺžení piliere (h = 2,5 m).
- Indexy vyjadrujú, ktoré pole je na hati uzavreté.



Obrázok 3: Návrh opevnenia podhatia VD Hričov - vodorovná doska



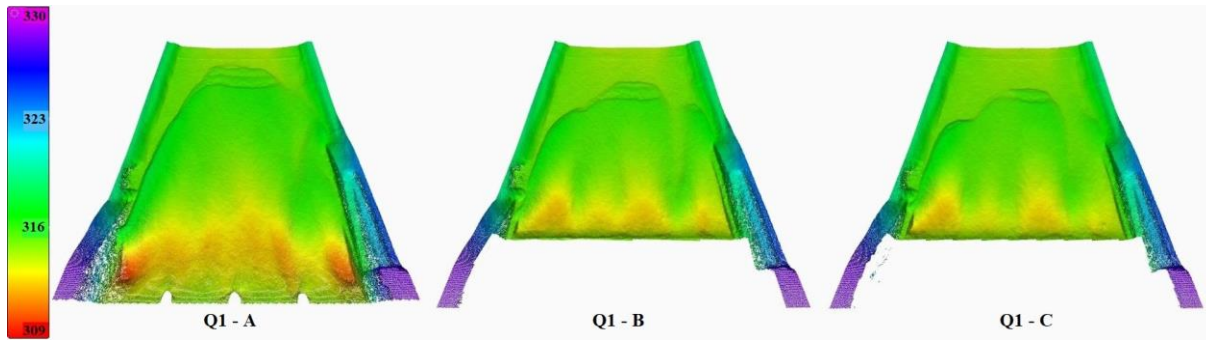
Obrázok 4: Návrh opevnenia podhatia VD Hričov - predĺženie pilierov

3 Výsledky

Navrhované opatrenia pre tlmenie kinetickej energie boli posudzované na základe veľkosti vzniknutého výmoľa za vývarom. Simulácia prietoku bola nastavená na povodňový sto-ročný prietok.

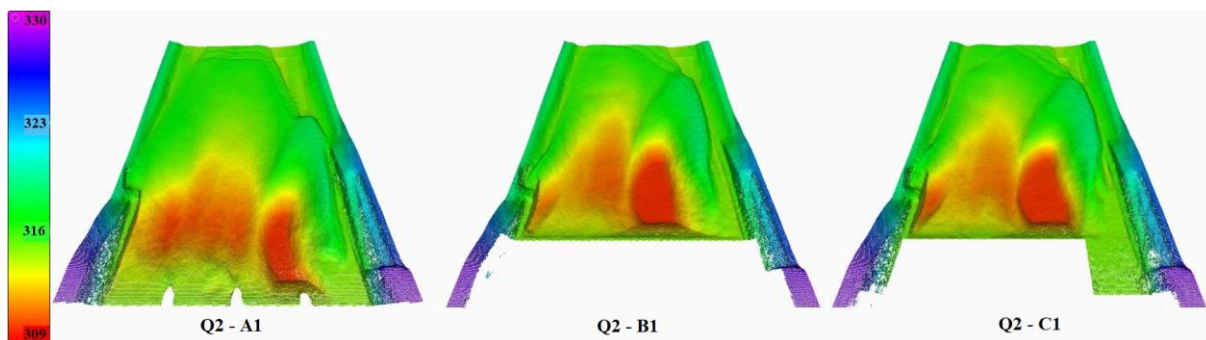
Pre spracovanie hĺbky výmoľov v podhatí bola využitá fotogrametrická metóda. Pre zobrazenie modelu terénu a spracovanie fotografií pre fotogrametriu je možné využiť niekoľko typov programov. Digitálny model dna koryta bol vytvorený v programe AutoDesk Recap. Výsledkom fotogrametrického merania je mračno bodov dosahujúce rozlíšenie približne 1 mm. Barker (1997) vo svojom výskume využil fotogrametriu pre merania a monitorovania erozívneho účinku na hrádzi, na základe dlhodobého pozorovania a zachytávania snímok hrádze. Rôzne techniky fotogrametrie využil Westaway (2000) vo svojej práci pri zameriavaní rieky a korekcií chýb spojených s fotogrametriou zameriavaných v teréne.

Spracovaním týchto mračien je možné vyhodnotiť vplyv opevnenia na tvorbu výmoľov v podhatí. Na Obrázok 5 je zobrazená symetrická manipulácia a jej vplyv na výmole v podhatí pre existujúci stav a dve navrhované riešenia opevnenia. Pre existujúci stav (A) bez opevnenia sú výmole vytvárané pri krajných poliach siahajúce až takmer na úroveň základov hate. Navrhované opevnenie vodorovnou 22 m doskou (B), zlepšilo tlmiači účinok a znížilo veľkosť výmoľov v podhatí spoločne s oddialením výmoľov od základov. Návrh s predĺženými piliermi (C) usmerňoval prietok do koryta pri ktorom nedochádzalo k zvýšenej turbulencii a čiastočne zlepšil tlmenie v porovnaní s predošlým návrhom (B).

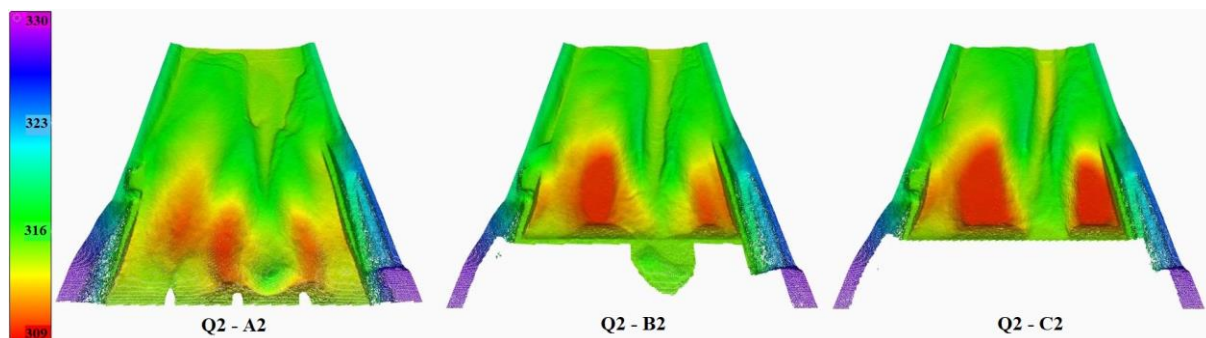


Obrázok 5: Mračno bodov – porovnanie veľkosti výmoľov v podhatí – symetrická manipulácia

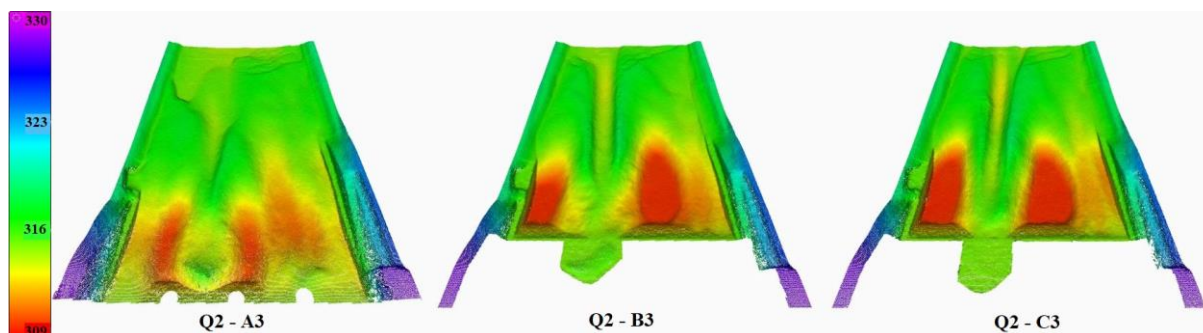
Na výsledných modeloch Obrázok 6, Obrázok 7, Obrázok 8, Obrázok 9 je zobrazená nesymetrická manipulácia na hati. Preverili sa všetky varianty, kedy môže byť vždy iba jedno pole zavreté. Navrhnuté opevnenie koryta spôsobilo lokálne vymieľanie a samotný výmoľ dosiahol úroveň základov hate. Tento prípad však nastal pri každom scenári zatvoreného jedného haťového poľa. Z vytvorených mračien bodov bol odčítaný najhlbší bod výmoľa, z ktorého bol vytvorený graf (Obrázok 10). Tak ako na vytvorených mračnách bodov, tak aj na grafe je vidieť rozdiel najhlbšieho bodu vzniknutých výmoľov. Každý scenár bol preverovaný 3x z ktorého bol vypočítaný priemer a použitý v grafe.



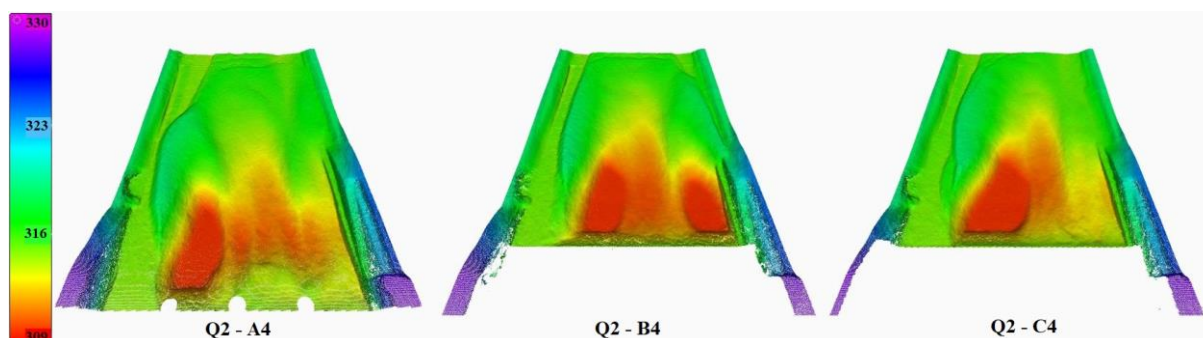
Obrázok 6: Mračno bodov – porovnanie veľkosti výmoľov v podhatí – nesymetrická manipulácia (zavreté pole č. 1)



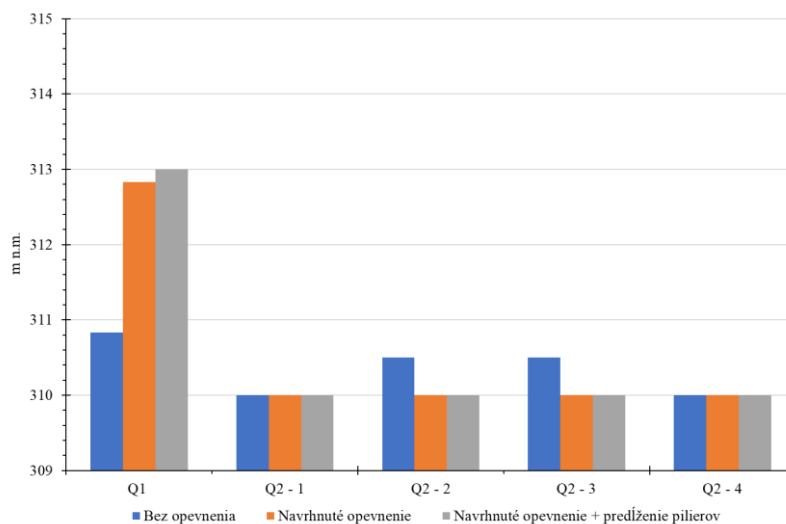
Obrázok 7: Mračno bodov – porovnanie veľkosti výmoľov v podhatí – nesymetrická manipulácia (zavreté pole č. 2)



Obrázok 8: Mračno bodov – porovnanie veľkosti výmoľov v podhatí – nesymetrická manipulácia (zavreté pole č. 3)



Obrázok 9: Mračno bodov – porovnanie veľkosti výmoľov v podhatí – nesymetrická manipulácia (zavreté pole č. 4)



Obrázok 10: Graf vplyvu opevnenia na hĺbku výmoľa pri symetrickej a nesymetrickej manipulácii

4 Záver

Cieľom výskumu bolo vyhodnotiť tlmiaci účinok navrhovaného opevnenia na tvorbu výmoľov v podhatí vodného diela Hričov. V hydrotechnickom laboratóriu bol vytvorený trojrozmerný model na základe Froudovho kritéria mechanickej podobnosti. Na modeli bol preverovaný návrh opevnenia podhatia vodorovnou doskou dĺžky 22 m a následne pridaním predĺženia pilierov s výškou 2,5 m. Pre

simuláciu bol zvolený povodňový sto-ročný prietok, ktorý je možné prepúšťať cez haťové polia symetricky a nesymetricky. Pre zaznamenanie výmoľov v podhatí bola zvolená fotogrametrická metóda, ktorou je možné zaznamenať celú sledovanú oblasť podhatia.

Simulácie a následné merania preukázali, že navrhnuté opevnenie výrazne zmenšilo vymieľanie dna symetrickou manipuláciou aj pri povodňovom prietoku. V porovnaní s neopevneným dnom je možno povedať, že veľkosť výmoľov sa zmenšila o 50%. Pri nesymetrickej manipulácii nedošlo k výraznejšiemu zlepšeniu tlmenia energie. Avšak vytvorené výmole v podhatí sú oddialené o dĺžku navrhnutého opevnenia. V tejto vzdialenosti už výmole nemajú vplyv na stabilitu vodného diela Hričov.

PodĎakovanie:

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0472.

5 Literatúra

KHATSURIA, R.M., *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, Marcel Dekker, 2005, ISBN: 0-8247-5789-0

HABIBZADEH, A., LOEWEN, M. R., & RAJARATNAM, N., *Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps*, Journal of Hydraulic Engineering, 2012, Vol. 138, No. 10, s. 902–908.

PAGLIARA, S., & PALERMO, M., *Effect of Stilling Basin Geometry on Clear Water Scour Morphology Downstream of a Block Ramp*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, Vol. 137, No. 9, s. 593–601.

ALI, H. M., EL GENDY, M. M., MIRDAN, A. M. H., ALI, A. A. M., & ABDELHALEEM, F. S. F., *Minimizing downstream scour due to submerged hydraulic jump using corrugated aprons*, Ain Shams Engineering Journal, 2014, Vol. 5, No. 4, s. 1059–1069.

DOLEŽAL, L., KIJOVSKÝ, A., HUBÁČEK, Z., *Nová metóda stabilizácie koryta za vývarom a jej použitie na vodnom diele Hričov*, Nové smery v úprave vodných tokov, Slovenská vodohospodárska spoločnosť, Bratislava, 1969, s. 53–73.

DUŠIČKA, P., RUMANN, J., ORFÁNUS, M., *Hydraulický výskum vývaru podhatia VD Hričov. Správa za 3. etapu*. BRATISLAVA, 2019.

BARKER, R., DIXON, L., & HOOKE, J. (1997). *Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion*, Earth Surface Processes and Landforms, 1997, Vol. 22, No. 13, s. 1217–1227.

WESTAWAY, R. M., LANE, S. N., & HICKS, D. M., *The development of an automated correction procedure for digital photogrammetry for the study of wide, shallow, gravel-bed rivers*, Earth Surface Processes and Landforms, 2000, Vol. 25, No. 2, s. 209–226.