

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Bombač, M. 2012. Hidravlična raziskava gradbene jame HE Brežice na fizičnem modelu = Hydraulic research of the construction pit of HPP Brežice on a physical model. Acta hydrotechnica 25, 42: 1-17.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42mb.pdf>

UDK/UDC: 627.8:624.1

Prejeto/Received: 6. 3. 2012

Strokovni članek – Professional paper

Sprejeto/Accepted: 21. 5. 2012

HIDRAVLIČNA RAZISKAVA GRADBENE JAME HE BREŽICE NA FIZIČNEM MODELU HYDRAULIC RESEARCH OF THE CONSTRUCTION PIT OF HPP BREŽICE ON A PHYSICAL MODEL

Martin Bombač^{1,*}

¹Inštitut za hidravlične raziskave, Hajdrihova 28, Ljubljana

Izvleček

Pri gradnji takšnih objektov, kot so hidroelektrarne na spodnji Savi, so raziskave na fizičnem hidravličnem modelu nujno potrebne, saj so tokovne razmere v okolici objekta tako specifične, da so potrebni posebni testi na modelu objekta v pomanjšanem merilu. V prispevku je predstavljena hidravlična modelna raziskava gradbene jame HE Brežice na fizičnem prostorskem modelu. Raziskava je potekala v smeri optimizacije oblike oz. izvedbe izkopov obtočnega kanala, optimizacije zaščitnih oblog obtočnega kanala in struge Save, višine nasipa gradbene jame itd. Za preveritev stabilnosti dna in brežin obtočnega kanala gradbene jame je bil zgrajen model z gibljivim dnom. Izkazalo se je, da se erozijski procesi v obtočnem kanalu gradbene jame pričnejo že pri pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, z večanjem pretoka Save pa se erozija še povečuje. Ker se erodirani material odloži dolvodno v strugi Save, na območju projektirane poglobitve, je bilo predlagano, da se že v fazi izvedbe obtočni kanal izkoplje do trdne hribinske podlage. Posebna pozornost je bila posvečena preusmerjanju toka vode iz obtočnega kanala preko prelivnih polj pregrade, kar bo zaradi velike višinske razlike predstavljalo velik inženirski problem. Na podlagi podanih robnih pogojev so bili določeni potrebni parametri, pri katerih je preusmeritev sploh možno izvesti. Za najoptimalnejšo varianto je bilo določeno natančno časovno sosledje zapiranja obtočnega kanala.

Ključne besede: fizični hidravlični model, hidroelektrarna, spodnja Sava, gradbena jama, obtočni kanal, erozija, prelivno polje, robni pogoj.

Abstract

Large buildings such as hydro power plants in the lower part of river Sava need to be studied using a physical hydraulic model, since the flow conditions around the objects are so specific that special tests on smaller scale models are required. This article presents the hydraulic model studies of the construction pit for HPP Brežice on a physical spatial model. The research was focused on optimising the shape of the diversion channel, optimising the lining of diversion channel and the riverbank; and optimizing the height of the edges of the construction pit. We established a model with a mobile bed so that we were able to study the erosion processes of the bottom and banks of the diversion channel. The results show that the erosion in the diversion channel is present already at the flow of $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, while increased flows of the Sava river

* Stik / Correspondence: martin.bombac@hidroinstitut.si

© Bombač M.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [Creative Commons Attribution 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), ki dovoljuje neomejeno rabo, širjenje in reprodukcijo v kateremkoli mediju pod pogojem, da so navedeni avtorji in vir izvirnega besedila.

© Bombač M.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

increase the speed of the erosion. Because the eroded material is deposited downstream in the Sava river in the area of the planned deepening, it was suggested that the diversion channel should be excavated to the solid bedrock. Special attention was given to the routing of the water flow from the diversion channel through the spillways of the dam, which will also be a big engineering challenge because of the large water level difference. Based on the given boundary conditions, we determined the limit parameters that still allow the execution of the rerouting. Precisely timed sequence for closing of the diversion channel was determined for the most optimal technological solution.

Keywords: physical hydraulic model, hydro power plant, lower part of river Sava, construction pit, diversion channel, erosion, spillway, boundary condition.

1. Uvod

Primarna dejavnost Inštituta za hidravlične raziskave so že vrsto let hidravlične modelne raziskave na fizičnih modelih. V prispevku predstavljamo hidravlično raziskavo gradbene jame HE Brežice na fizičnem modelu (Bombač, 2011). Pri gradnji tako velikih objektov, kot so hidroelektrarne na spodnji Savi, so nujne raziskave, saj so tokovne razmere v okolici objekta tako specifične, da so potrebni testi na modelu objekta v pomanjšanem merilu. Le na ta način lahko dovolj natančno napovemo tokovno sliko, hitrosti toka, gladinska stanja in obremenitve brežin oz. dna struge. Prav tako kot za gotov objekt so takšne raziskave potrebne tudi za gradbeno jamo, ki predstavlja večletno stanje objekta med gradnjo. V nadaljevanju članka predstavljamo bistvene ugotovitve in izboljšave, pridobljene na podlagi meritev in opazovanj na zgrajenem fizičnem modelu gradbene jame HE Brežice.

1.1 Opis pregrade

Ko bo zgrajena, bo hidroelektrarna Brežice peta stopnja HE na spodnji Savi. Pregrado sestavlja strojnica s tremi Kaplanovimi turbinami ob levem bregu in jez s petimi pretočnimi polji širine 15 m ob desnem bregu. Jez zajezuje vodo na nominalni koti 153,00 m n. m. Dno struge Save je na koti 140,60 m n. m. (gorvodno – dno akumulacije pred jezum). Instalirani pretok 500 m³/s zagotavlja, ob nazivnem bruto padcu 10,95 m, največjo moč 46 MW. Srednji letni pretok 231,2 m³/s naj bi zadostoval za 148 GWh proizvedene električne energije letno (<http://www.he-ss.si>).

1.2 Hidrološki podatki

Za dimenzioniranje hidrotehničnih objektov so pomembne povratne dobe visokih vod, ki se pojavljajo na obravnavanem območju. Pri obravnavi gradbene jame so pomembni pretoki do Q₅₀. V preglednici 1 so podane povratne dobe za prerez Save na lokaciji bodoče HE Brežice (ARSO, 2011).

Preglednica 1: Povratne dobe za prerez Save na lokaciji bodoče HE Brežice (ARSO, 2011).

Table 1: Return periods for a cross-section of river Sava at the location of the prospective HPP Brežice (ARSO, 2011).

Povratna doba	Pretok
Q ₂	1675 m ³ /s
Q ₅	2190 m ³ /s
Q ₁₀	2560 m ³ /s
Q ₂₀	2900 m ³ /s
Q ₅₀	3365 m ³ /s
Q ₁₀₀	3750 m ³ /s
Q ₅₀₀	4510 m ³ /s
Q ₁₀₀₀	4840 m ³ /s
Q ₁₀₀₀₀	6000 m ³ /s

2. Opis fizičnega hidravličnega modela

V preizkuševalnem laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave je bil v merilu 1:45 zgrajen fizični model, ki v končni konfiguraciji obsega strojnico in pregrado, v vmesni fazi pa celotno gradbeno jamo hidroelektrarne z obtočnim kanalom, za dosego modelne podobnosti toka pa tudi ustrezno dolžino bazena gorvodno od jezu ter približno 600 m struge Save dolvodno od jezu (slika 1). Model je zgrajen na podlagi posnetka

prečnih profilov korita Save (Geodetski biro Slatinšek, 2007) in posnetka pripadajočih poplavnih površin (Flycom, 2007). Geometrijske podatke za gradbeno jamo, strojnico in jez ter vse ureditve v območju bodoče HE Brežice je posredoval naročnik raziskave, IBE d.d.

Izbiri modelnega merila so v največji meri narekovale prostorske kapacitete preizkuševalnega laboratorija in kapaciteta črpališča. Tudi v preteklosti so se za modeliranje HE na spodnji Savi gradili modeli v podobnih merilih, saj takšno merilo predstavlja optimum med investicijskimi in obratovalnimi stroški modela ter natančnostjo rezultatov. Pri obravnavanem primeru gre za tok s prosto gladino, kjer se kot najpomembnejša pojavlja gravitacijska sila, medtem ko je vpliv drugih sil (npr. viskoznosti) zanemarljiv. Zato je bil pri raziskavah upoštevan Froude-ov zakon modelne podobnosti. Parametri za modelno merilo $\lambda = 45$ so podani v preglednici 2.

Vse mere, ki se pojavljajo v prispevku, so v skladu s parametri iz preglednice 2 preračunane za naravne razmere.

Preglednica 2: Parametri za modelno merilo $\lambda = 45$.

Table 2: Parameters for the model scale $\lambda = 45$.

za Froude-ovo število	λ^0	1
za dolžino in premer modelnega proda (m)	λ^1	45
za površino (m ²)	λ^2	2.025
za prostornino (m ³)	λ^3	91.125
za hrapavost	$\lambda^{1/6}$	1,886
za čas (s), za hitrost (m/s)	$\lambda^{1/2}$	6,708
za Reynoldsovo število Re	$\lambda^{3/2}$	301,869
za pretoke (m ³ /s)	$\lambda^{5/2}$	13.584,113



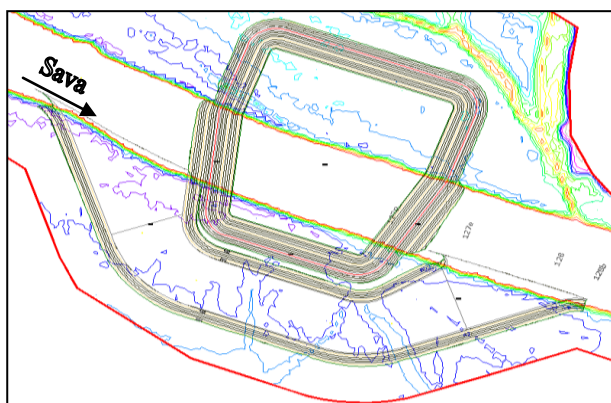
Slika 1: Fizični hidravlični model HE Brežice z vgrajeno gradbeno jamo in obtočnim kanalom. Puščica označuje smer toka vode.

Figure 1: Physical hydraulic model of the HPP Brežice including the construction pit and the diversion channel. The arrow denotes the direction of flow.

3. Oblika in prevodnost obtočnega kanala

Obtočni kanal gradbene jame mora s svojo obliko in dimenzijami zagotavljati v projektu določeno pretočno sposobnost. Oblikovan mora biti tako, da je kar se da hidravlično ugoden, tj. da se tokovnice čim lepše prilagajo obliki kanala.

Najprej smo raziskali ustreznost s strani projektanta predlagane oblike gradbene jame oz. obtočnega kanala (slika 2). Določena je bila pretočna sposobnost obtočnega kanala, ki znaša $1800 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 2: Prva varianta gradbene jame in obtočnega kanala.

Figure 2: First version of the construction pit and the diversion channel.



Slika 3: Vrtinčenje vode in mrtva cona s protitokom na zgornjem robu gradbene jame pri pretoku $Q = 2460 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 3: Vortices and the dead zone with counter current on the upper edge of the construction pit at the flow $Q = 2460 \text{ m}^3/\text{s}$.

Oblika obtočnega kanala se je tekom raziskave izkazala kot hidravlično neustrezna, saj je zaradi

ostrih vogalov prihajalo do večjih mrtvih con, območij s protitokom in vrtincev (slika 3). Zato in zaradi drugih sprememb v projektu se je projektant odločil za drugo, hidravlično ugodnejšo obliko obtočnega kanala gradbene jame.



Slika 4: Tokovnice ob gradbeni jami pri osnovni obliki vtoka v obtočni kanal. Pojavijo se manjši vrtinci ob zgornjem robu gradbene jame ter manjša mrtva cona vzdolž gradbene jame $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 4: Streamlines along the construction pit with the basic shape of inflow into the diversion channel. Smaller vortices appear at the upper edge of the construction pit and a smaller dead zone along the construction pit $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 5: Tokovnice ob gradbeni jami pri zoženem vtoku v obtočni kanal. Pojavi se manjša zatišna cona vzdolž gradbene jame z manj izrazitimi vrtinci ob robu gradbene jame, ob hkrati manjšem izkopu $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 5: Streamlines along the construction pit with a narrower inflow into the diversion channel. A smaller calm zone appears along the construction pit with less prominent vortices at the edge of the pit. The extent of the excavation is also smaller $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

V nadaljevanju je bilo območje gradbene jame z obtočnim kanalom na fizičnem modelu preurejeno v skladu z novim načrtom, ki je bil posredovan s strani projektanta.

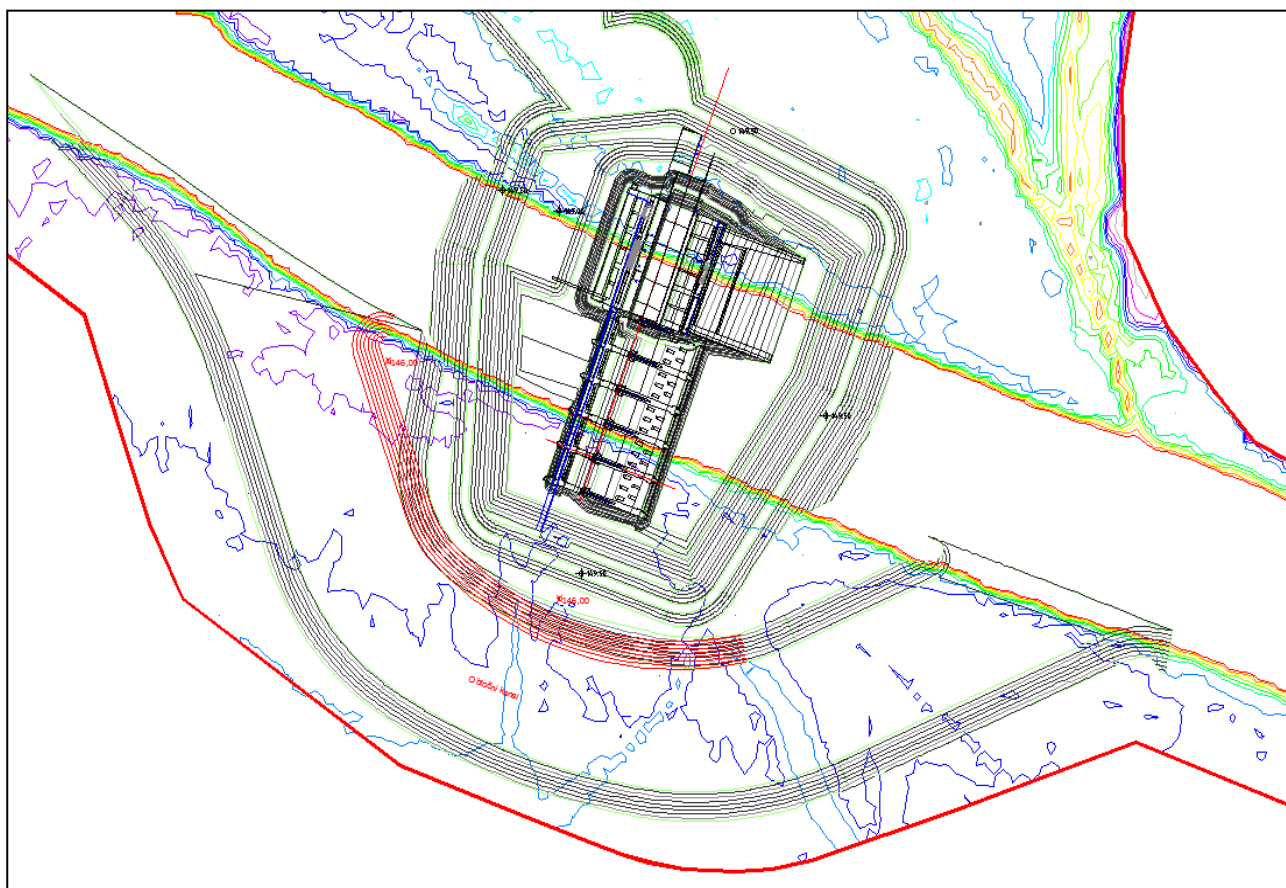
Čeprav je šlo za, hidravlično gledano, precej ugodnejšo obliko obtočnega kanala, brez izrazito ostrih robov, smo na podlagi opazovanj tokovnic ugotovili, da je mogoče količino izkopov za obtočni kanal precej zmanjšati z izločitvijo t.i. mrtvih con, brez negativnega vpliva na pretočno sposobnost kanala (slika 4 in slika 5).

V dogovoru s projektantom je bila sprememba geometrije obtočnega kanala tudi izvedena na fizičnem modelu (slika 6). Pri tem se pretočna sposobnost takšnega obtočnega kanala ni spremenila in ostaja $Q_{MAX} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

4. Erozijski procesi v območju obtočnega kanala

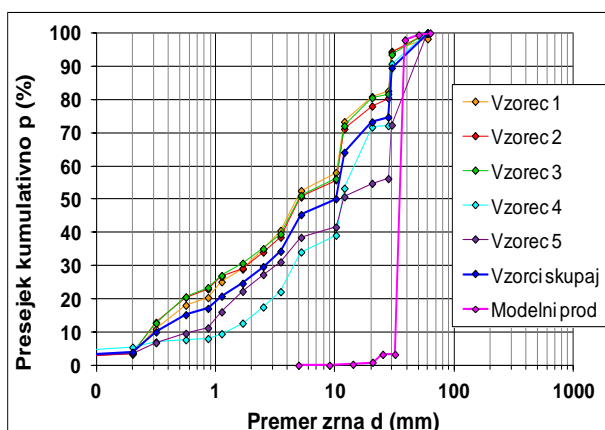
Obtočni kanal bo zgrajen na prodnatih tleh, zato je bilo potrebno preučiti procese erozije. V ta namen smo na fizičnem modelu izvedli več poizkusov (pri različnih pretokih) z gibljivim dnom. Prod je bil modeliran z izrazito okroglim modelnim peskom z maksimalnim premerom $D_{max} = 1,4 \text{ mm}$, ki se v grobih frakcijah zelo dobro ujema z vzorci pridobljenimi na tem območju v naravi (slika 7).

Finih frakcij iz narave v merilu 1:45 ni mogoče dovolj dobro simulirati, vendar izvedena izločitev za modeliranje neustreznih frakcij ob izrazito okrogli obliki zrn modelnega proda zagotavlja dodatno rezultatsko varnost (Djurovič, 1990).



Slika 6: Z rdečimi črtami vrisana predlagana končna oblika obtočnega kanala, ki precej zmanjša potrebne izkope.

Figure 6: Red lines depict the proposed final shape of the diversion channel that significantly decreases the required excavations.



Slika 7: Granulacijska sestava proda v naravi in na modelu (preneseno v naravno merilo).

Figure 7: Granulometric composition of the natural gravel and the material used in the model (calculated to natural size).

Prvi poizkus je potekal pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ in s prodrom na projektni koti dna kanala. Debelina plasti proda na začetku poizkusa je bila po celotnem dnu obtočnega kanala enaka in sicer en meter. Ugotovili smo, da je pri tem pretoku prodonosnost že zelo izrazita, saj je po 11,7 urah (za naravo) voda na nekaterih mestih odnesla že ves material (slika 8).



Slika 8: Stanje dna v obtočnem kanalu na fizičnem modelu po 11,7 urah pri pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 8: The bottom of the diversion channel on the physical model after 11.7 hours at the flow $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ker se je že v prvih poizkusih izkazalo, da bo erozija v obtočnem kanalu izrazita, je bil pred nadaljevanjem raziskave fizični model na območju

obtočnega kanala poglobljen do kote trdne podlage. Na takšno dno je bil pred vsakim poizkusom ponovno nanesen modelni prod do projektirane kote dna obtočnega kanala (slika 9). Pri podrobni hidravlični analizi območja projektirane HE Brežice smo ugotovili, da je za stabilnost dna obtočnega kanala najbolj neugodno, ko sega gladina v obtočnem kanalu do zgornjega roba brežine, tok po poplavnih površinah okrog gradbene jame pa še ni vzpostavljen. Zato smo raziskavo erozijskih procesov v obtočnem kanalu nadaljevali s pretokom $1800 \text{ m}^3/\text{s}$, katerega obtočni kanal ravno še prevaja.



Slika 9: Začetno stanje modelnega proda na projektni koti dna obtočnega kanala.

Figure 9: The initial state of the model gravel at the project altitude of the bottom of the diversion channel.

Zaradi še nedorečenih hidravličnih razmer na obravnavanem območju v času raziskave smo izvedli dva poizkusa erozije dna kanala pri pretoku $1800 \text{ m}^3/\text{s}$, in sicer pri dveh različnih spodnjih robnih pogojih. V prvem smo za spodnji robni pogoj v točki, ki je od dolvodnega nasipa gradbene jame oddaljena za 220 m, uporabili vrednost, dobljeno iz "hibridnih modelov" (Mlačnik et al., 2011) za sedanje stanje struge. V drugem primeru smo preverili tudi bolj neugodno možnost in sicer 1 m nižjo koto gladine kot dolvodni robni pogoj.

Rezultati prvega poizkusa pri stalnem pretoku $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ in trajanju 27 ur so prikazani na sliki 10.

Kota gladine v referenčni točki, ki predstavlja spodnji robni pogoj, je v tem primeru znašala $H_{SP} = 144,96 \text{ m n. m.}$ Pri sedanjem stanju dna struge to pomeni globino vode 8 m.



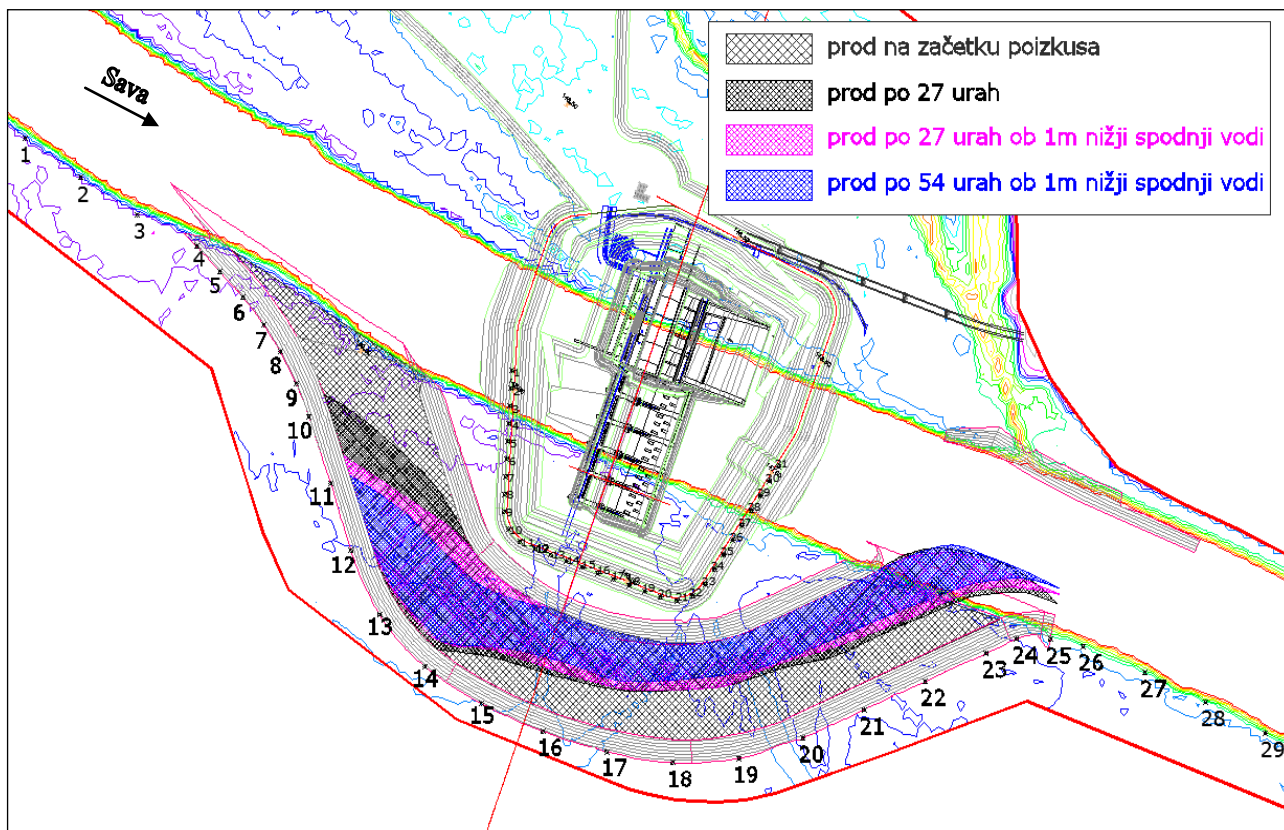
Slika 10: Močna erozija na konkavni polovici obtočnega kanala po 27 urah obratovanja pri pretoku $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 10: Strong erosion on the concave part of the diversion channel after 27 hours of operation at the flow $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 11: Ostanki proda na konveksni strani obtočnega kanala po 27 urah pri spodnjem robnem pogoju 143,96 m n. m. in pretoku $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 11: Residual gravel on the convex side of the diversion channel after 27 hours at the lower boundary condition 143.96 m a.s.l. and the flow $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 12: Primerjava erozije v obtočnem kanalu med različnimi poizkusi. Pretok $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 12: Comparison of erosion in the diversion channel in different experiments. Flow $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kot je razvidno iz fotografije na sliki 10, je voda skoraj po celi dolžini obtočnega kanala na konkavni strani prod izprala do trdne podlage. Del izpranega proda se je akumuliral v spodnji strugi, pod obtočnim kanalom, del pa ga je vodni tokodložil ob konveksni brežini kanala. Potrebno je poudariti, da proces premeščanja proda po 27 urah še ni končan. Po naši oceni bi ob dovolj dolgem trajanju poizkusa iz obtočnega kanala spralo ves material. Glede na znane hidrograme iz meritev visokih vod Save je upoštevanje 27 ur dolgega poplavnega vala relativno realna ocena trajanja vala v naravi.

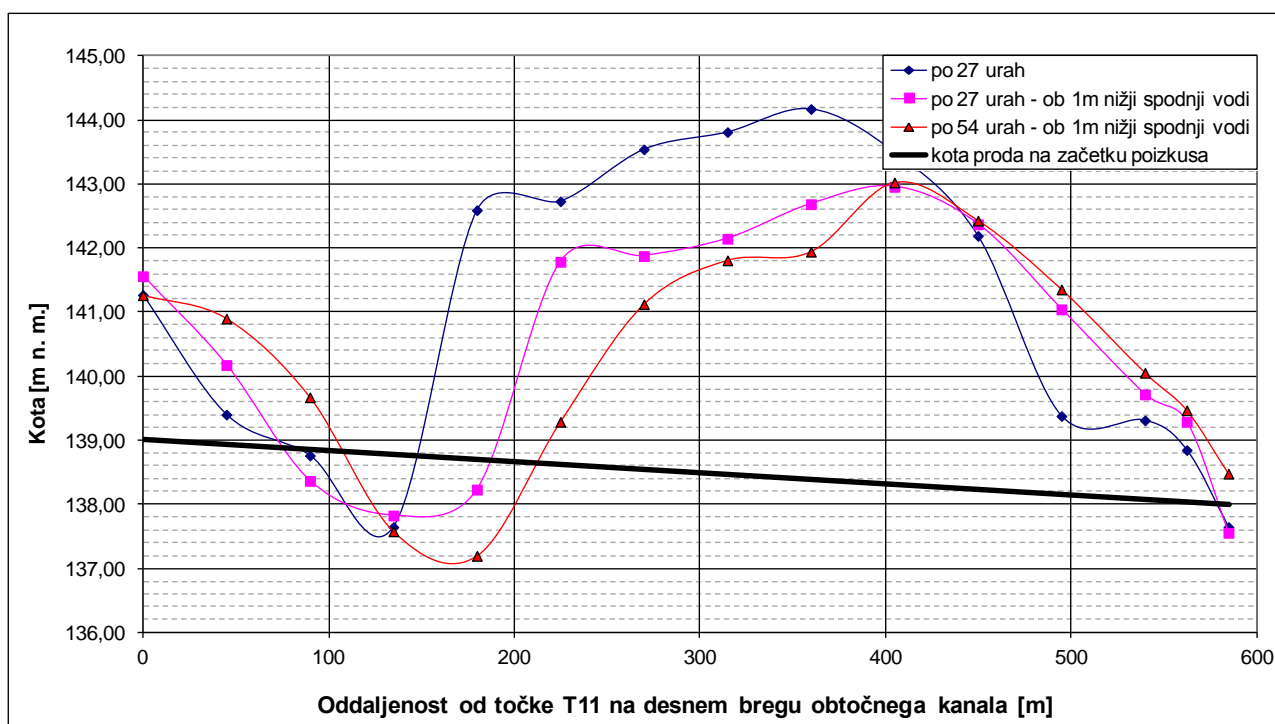
Enak poizkus z en meter nižjim dolvodnim robnim pogojem je, skladno s pričakovanji, dal še bolj neugoden rezultat, saj je bilo spiranje materiala v tem primeru še hitrejše. Na sliki 11 je prikazano stanje po 27 urah poizkusa (za naravo).

Slika 12 prikazuje območja v obtočnem kanalu, kjer je prod ostal tudi po koncu poizkusa. Najvišje izmerjene kote proda ob levi brežini po končanem

poizkusu so prikazane na diagramu na sliki 13. Vidimo lahko, da voda na konveksni strani nanese prod precej visoko. S podaljševanjem poizkusa oz. ponavljanjem visokih vod v naravi, pa se tudi ta prod izpira v spodnjo strugo. Ker se je erozija pojavila že tudi pri razmeroma nizkem pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$, smo predlagali izkop obtočnega kanala do fiksne podlage, ki se nahaja v povprečju dva metra pod projektno koto dna obtočnega kanala. Na ta način se reši tudi problem utrjevanja brežin, ki se morajo zaključiti do trdne podlage.

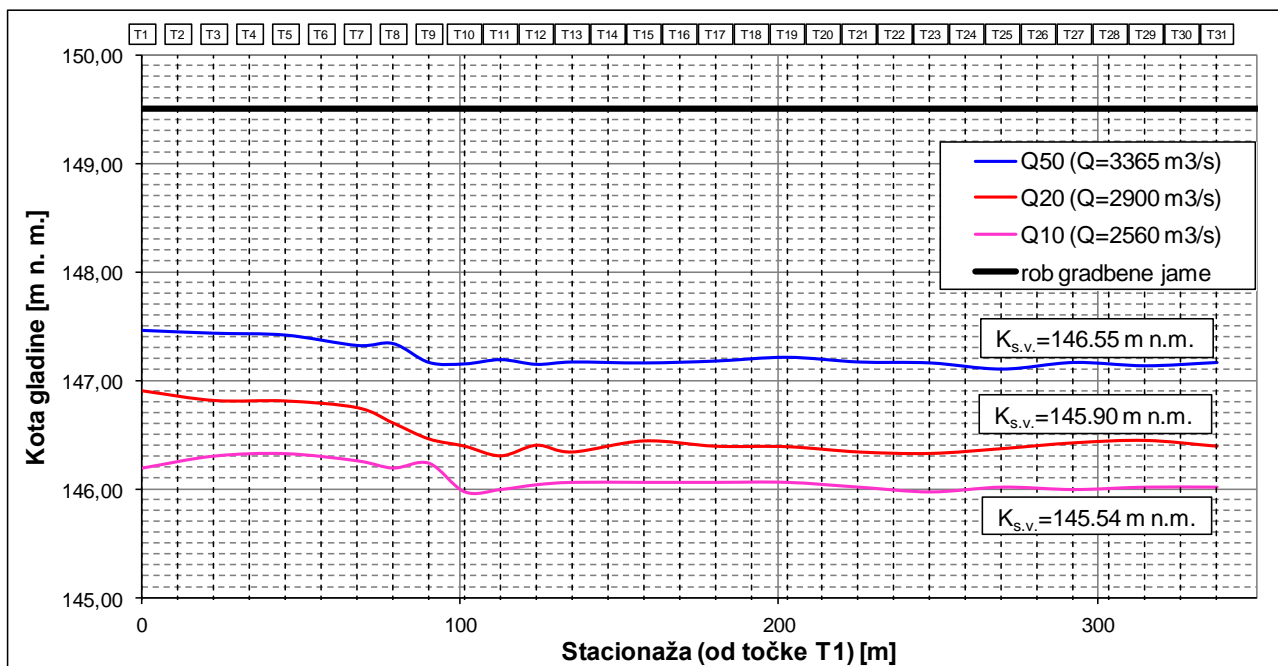
5. Meritve hitrosti in gladin vzdolž gradbene jame

Vzdolž gradbene jame oz. obtočnega kanala smo za pretoke z različnimi povratnimi dobami merili gladine in hitrosti. Točke, v katerih smo izvajali meritve, so prikazane na sliki 12. Na slikah 14 in 15 so prikazane izmerjene gladine za pretoke Q_{50} , Q_{20} in Q_{10} .



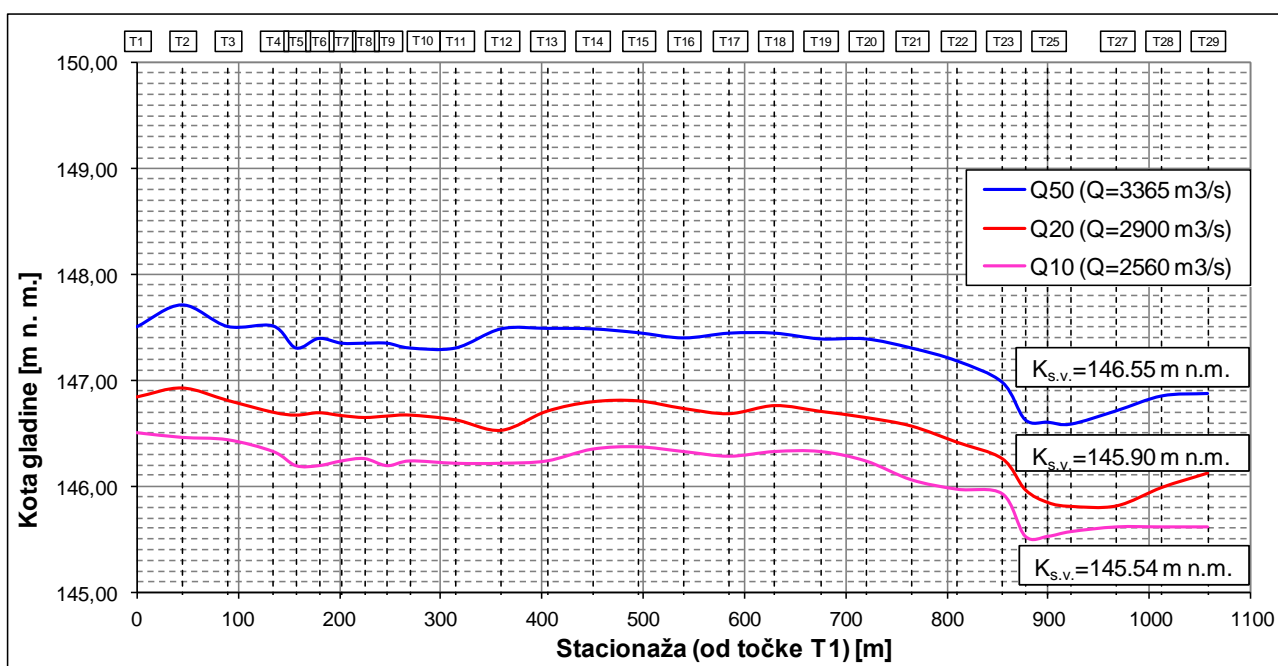
Slika 13: Najvišje izmerjene kote proda vzdolž obtočnega kanala HE Brežice po prevajanju visokovodnih valov s pretokom $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ za različne čase trajanja.

Figure 13: Highest measured gravel levels along the diversion channel of HPP Brežice after the passage of flood waves with the flow $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ for different durations.



Slika 14: Vz dolžni potek gladin ob gradbeni jami (ob levem bregu obtočnega kanala).

Figure 14: Longitudinal profile of the water surface along the construction pit (by the left bank of the diversion channel).



Slika 15: Vz dolžni potek gladin ob desnem bregu obtočnega kanala.

Figure 15: Longitudinal profile of the water surface by the right bank of the diversion channel.

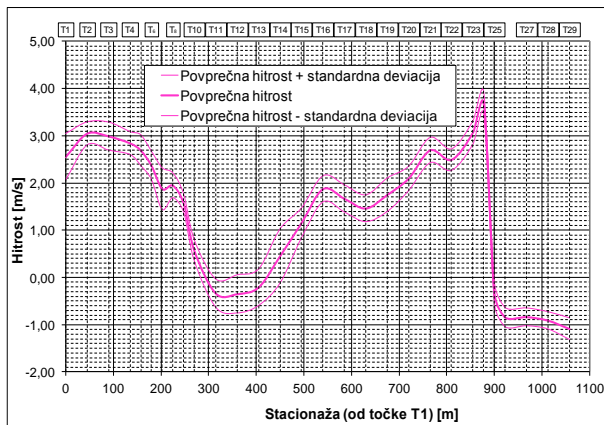
Iz grafikona na sliki 14 je razvidno, da je varnostna višina zaščitnega zidu gradbene jame ob obtočnem kanalu pri Q_{50} še vedno večja od 2 m. Glede na uveljavljene projektne varnostne višine nasipov

gradbene jame, je s tem dana možnost optimizacije in precejšnjega prihranka pri izvedbi nasipov.

Na grafih (slike 16 do 21) so prikazane izmerjene hitrosti vzdolž brežin obtočnega kanala gradbene

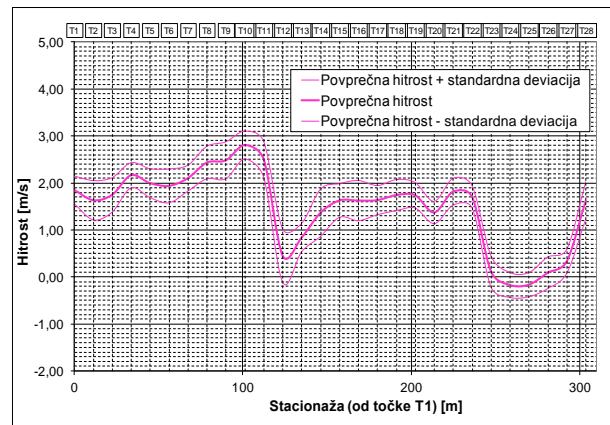
jame. Meritve so bile izvedene z 2D ultrazvočno hitrostno sondo proizvajalca SonTek, pri frekvenci 25 Hz in trajanju merilnega intervala 15 sekund, kar za naravo pomeni 3,7 Hz v merilnem intervalu 100 sekund. Meritve so bile opravljene na mestih z največjimi hitrostmi vode.

Podane vrednosti na grafikonih predstavljajo komponento hitrosti vode, vzporedno brežini. Na vsakem grafikonu so izrisane 3 linije in sicer poudarjena povprečna vrednost hitrosti v opazovani točki, ter ovojnici izmerjenih hitrosti, ki predstavljata standardno deviacijo oziroma 95% vseh meritev zbranih okrog srednje vrednosti.



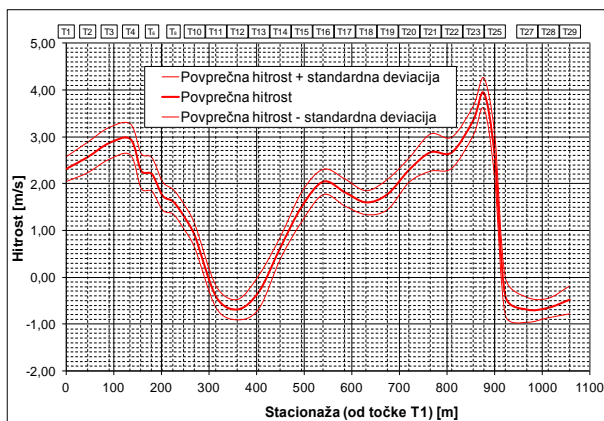
Slika 16: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž desnega brega obtočnega kanala gradbene jame pri $Q_{10} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 16: Longitudinal velocity profile along the right bank of the diversion channel of the construction pit at $Q_{10} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$.



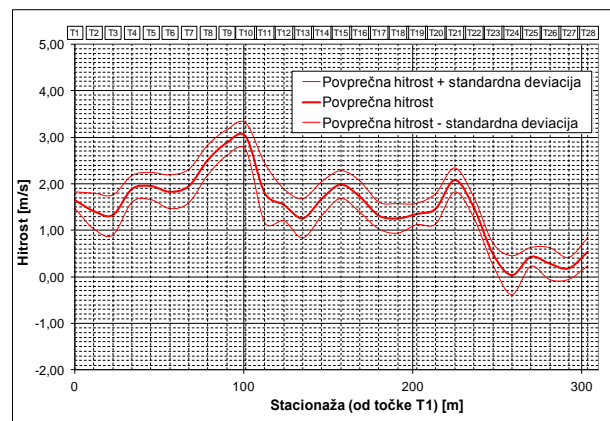
Slika 17: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž nasipa gradbene jame pri $Q_{10} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 17: Longitudinal velocity profile along the levee of the construction pit at $Q_{10} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$.



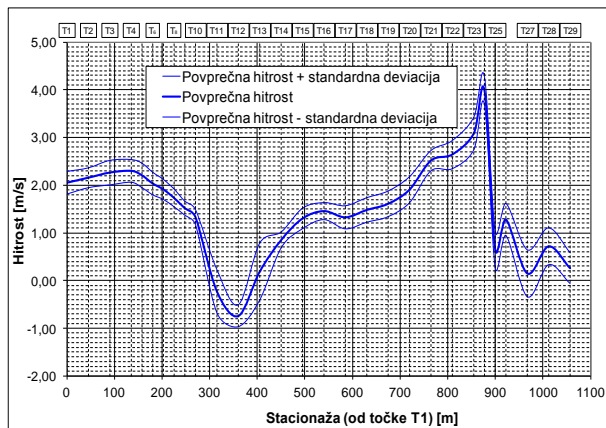
Slika 18: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž desnega brega obtočnega kanala gradbene jame pri $Q_{20} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 18: Longitudinal velocity profile along the right bank of the diversion channel of the construction pit at $Q_{20} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$.



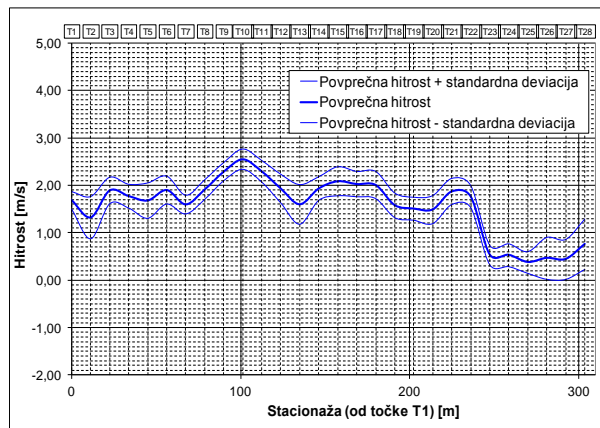
Slika 19: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž nasipa gradbene jame pri $Q_{20} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 19: Longitudinal velocity profile along the levee of the construction pit at $Q_{20} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 20: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž desnega brega obtočnega kanala gradbene jame pri $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 20: Longitudinal velocity profile along the right bank of the diversion channel of the construction pit at $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 21: Potek vzdolžnih hitrosti vzdolž nasipa gradbene jame pri $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 21: Longitudinal velocity profile along the levee of the construction pit at $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$.

Iz grafikonov na slikah od 16 do 21 je razvidno, da se največje hitrosti ob desnem bregu obtočnega kanala pojavijo ob njegovem dolvodnem priključku na strugo Save in znašajo cca 4 m/s. Vzdolž nasipa gradbene jame pa se največje izmerjene hitrosti pojavijo na gorvodnem robu gradbene jame in so reda velikosti 3 m/s.

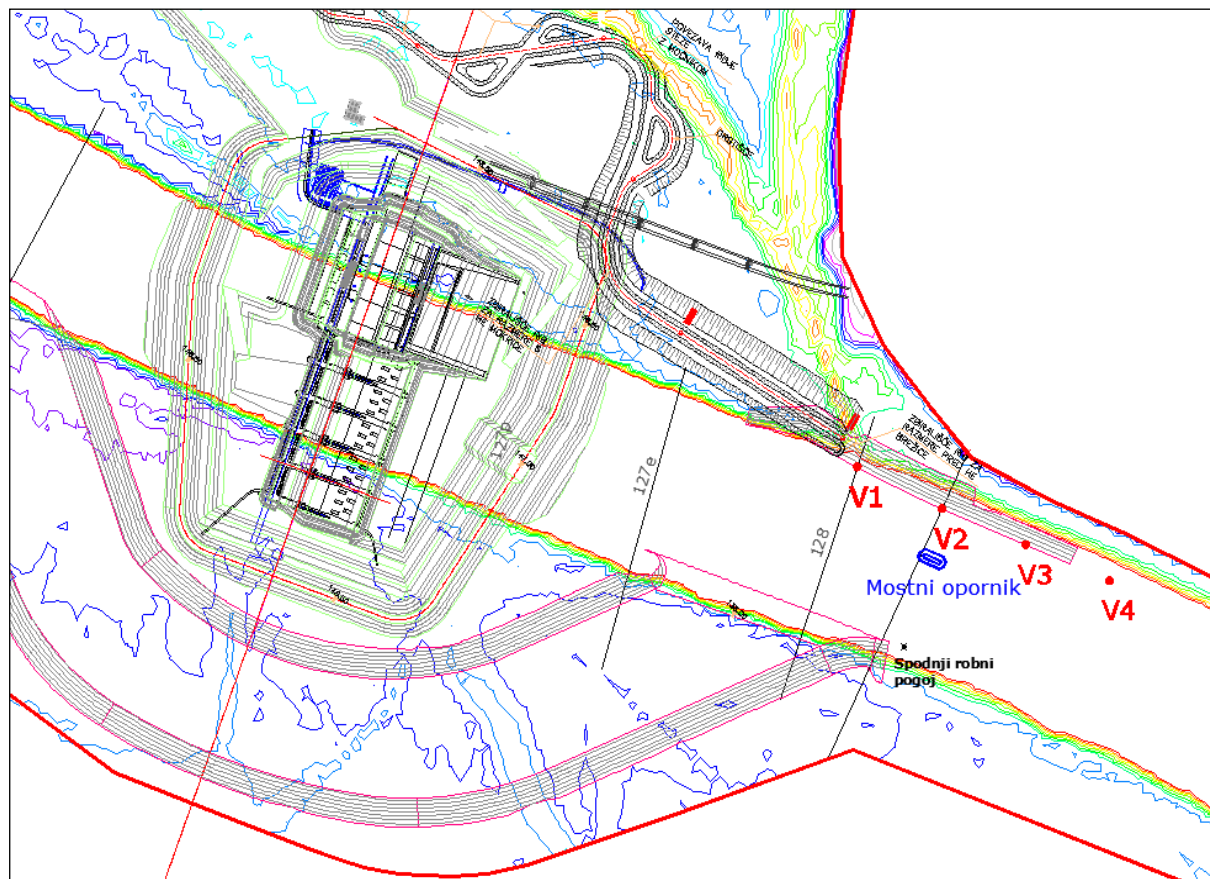
6. Stabilnost leve brežine pod HE Brežice in meritve hitrosti ob mostnem oporniku v strugi Save

V času, ko Sava po obtočnem kanalu obtoka gradbeno jamo HE Brežice, prihaja lokalno do večjih obremenitev leve brežine obstoječe struge ob sotočju obtočnega kanala z matično strugo Save. Vodni tok iz obtočnega kanala je usmerjen proti levi brežini in bi lahko povzročal močnejšo erozijo. Iz tega razloga smo na fizičnem modelu preizkusili najbolj neugodno varianto, ko je v Savi največji pretok, ki ga še prevaja obtočni kanal, to je $1800 \text{ m}^3/\text{s}$. Hkrati smo upoštevali projektirano poglobitev dna struge Save pod elektrarno. Leva

brežina obstoječe struge je bila izvedena po projektu in utrjena z lomljencem dimenzij 18-36 cm. Spodnji robni pogoj v referenčni točki (poglavje 4) je v tem primeru znašal $H_{SP} = 144,00 \text{ m n. m.}$ Vzdolž levega brega so bile tik ob bregu merjene hitrosti v štirih profilih (slika 22) na treh višinah z 2D ultrazvočno sondo. Na sliki 23 so prikazane največje povprečne vrednosti izmerjenih hitrosti, povečane za standardno deviacijo.

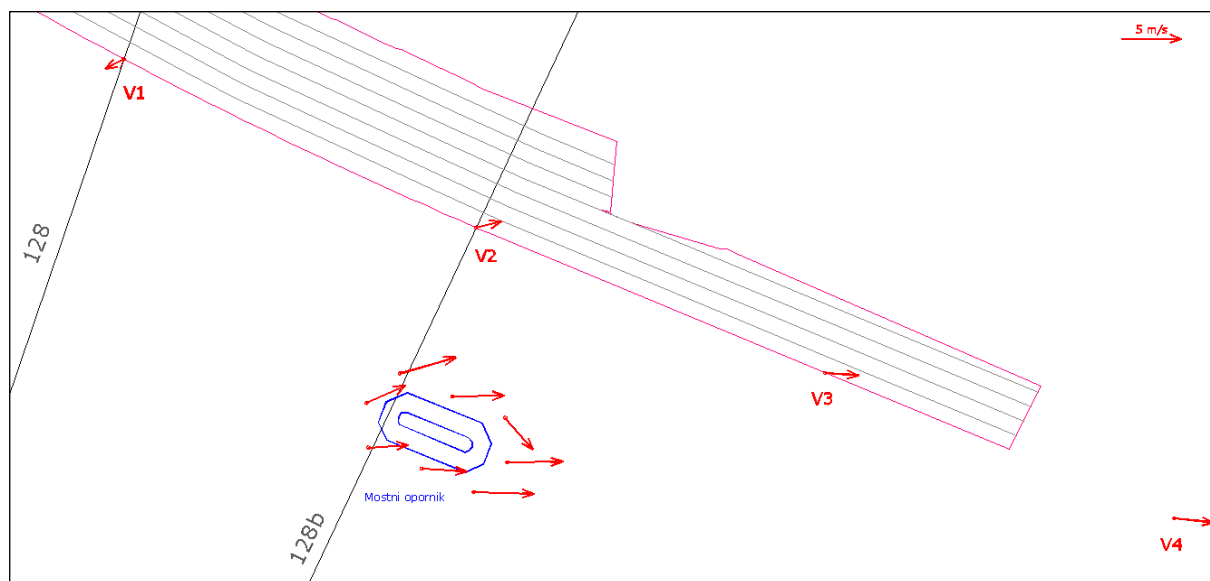
Hkrati z meritvami hitrosti ob levem bregu so bile izmerjene tudi hitrosti ob mostnem oporniku v strugi Save, ki je prav tako prikazan na pregledni situaciji na sliki 22. Rezultati teh meritev so bili obdelani na enak način kot rezultati meritev hitrosti ob levem bregu in so skupaj z njimi v vektorski obliki prikazani na sliki 23. Hitrosti ob levi brežini znašajo od 1,8 do 3,3 m/s, ob mostnem oporniku pa od 3,3 do 5,0 m/s.

Poizkus je hkrati pokazal, da je zaščita leve brežine z lomljencem dimenzij 18-36 cm ustrezna, saj med poizkusi ni prišlo do nikakršnih poškodb modelne ureditve brežine.



Slika 22: Pregledna situacija s prikazom merilnih mest, na katerih so bile merjene hitrosti ob levi brežini (V1, V2, V3, V4).

Figure 22: Overview with marked measurement locations on the left bank (V1, V2, V3, V4).



Slika 23: Največje izmerjene hitrosti ob levi brežini in ob mostnem oporniku pri $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 23: Highest measured velocities by the left bank and by the bridge pier at $Q = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

7. Zapiranje obtočnega kanala in preusmerjanje vodnega toka na prelivna polja

Po končani gradnji telesa pregrade se varovalni nasip gradbene jame odstrani in preusmeri vodni tok preko prelivnih polj. V primeru HE Brežice gre ves vodni tok, tudi po odstranitvi obodnega zidu gradbene jame, še vedno skozi obtočni kanal, ker imajo prelivna polja višjo koto krone, kot je koda vode pred pregrado pri preusmerjevalnem pretoku. Zato je predvideno, da se v naslednji fazi obtočni kanal postopoma zasipa in na ta način preusmeri tok vode preko prelivnih polj. Preusmerjevalni nasip smo na fizičnem modelu izvedli v obvodni liniji pete bodočega energetskega nasipa.

Zapiranje obtočnega kanala je bilo najprej raziskano pri pretoku Save $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$, po dogovoru s projektantom pa so bile vse ostale variante raziskane pri višjem pretoku $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$, saj morda v času preusmerjanja toka z obtočnega kanala preko prelivnih polj ne bo mogoče zagotoviti tako nizkega pretoka Save. Pri vseh variantah je bilo upoštevano popolnoma erodirano dno obtočnega kanala ter poglobljena struga Save za pregrado. Variirana parametra sta bila poleg pretoka Save še premer zasipnega materiala in višina izgotovitve prelivnih pragov. Preizkušene variante so opisane v nadaljevanju:

- $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vsi prelivni pragovi so izvedeni v celoti, do projektne kote 142,30 m n. m. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.
- $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Vsi prelivni pragovi so izvedeni v celoti, do projektne kote 142,30 m n. m. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.
- $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajno desno prelivno polje pregrade je znižano oz. izvedeno do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njim; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.

- $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajni desni dve prelivni polji pregrade sta znižani oz. izvedeni do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njima; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.
- $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajno desno prelivno polje pregrade je znižano oz. izvedeno do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njim; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Najprej se izvede del nasipa na levem bregu obtočnega kanala, nadaljuje se z zasipanjem od desnega brega. Nasip je tesnjen in grajen do kote 143,50 m n. m.

7.1 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Vsi prelivni pragovi so izvedeni v celoti, do projektne kote 142,30 m n. m. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.

V prvi fazi zasipanja obtočnega kanala je preusmerjanje potekalo brez problemov do višinske razlike med zgornjo in spodnjo vodo $\Delta h = 1,65 \text{ m}$ oz. do oddaljenosti vrha nasipa od levega brega 40 m. Od tu dalje se je pričelo odnašanje začetnega zasipnega materiala (lomljenec 18-36 cm), zato je bilo zasipanje v drugi fazi izvedeno z bolj grobim materialom 36-72 cm. Z večanjem višinske razlike in približevanjem nasipa levemu bregu se je odnašanje materiala povečevalo. Odnoseni material je v obtočnem kanalu za nasipom pričel tvoriti sipino, ki je počasi rasla in preprečevala nadaljnje odnašanje zasipnega materiala. Do konca poizkusa se je v kanalu za nasipom nabralo v stabilni sipini cca. 2000 m^3 grobega materiala (36-72 cm), ki ga je vodni tok odnesel med zasipanjem iz preusmerjevalnega nasipa. Nastala sipina je segala 40 m vzdolž obtočnega kanala in je bila v povprečju visoka 2,8 m ter široka 24 m.

7.2 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Vsi prelivni pragovi so izvedeni v celoti, do projektne kote 142,30 m n. m. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.

V prvi fazi zasipanja obtočnega kanala je preusmerjanje potekalo brez problemov do višinske razlike med zgornjo in spodnjo vodo $\Delta h = 2,0$ m oz. do oddaljenosti vrha nasipa od levega brega 44 m. Tedaj je pričelo odnašati začetni zasipni material (lomljenec 18-36 cm), zato je bilo zasipanje v drugi fazi izvedeno z bolj grobim materialom 36-72 cm. Ta ukrep pa ni bil zadosten, saj se je odnašanje materiala nadaljevalo, ob razliki med gladinama gorvodno in dolvodno od nasipa $\Delta h = 3,0$ m oz. pri oddaljenosti vrha nasipa od levega brega 37 m pa je sproti odnašalo praktično **ves zasipni material**. Poizkus se je tako predčasno zaključil, saj ob danih začetnih predpostavkah ni bilo moč dokončati zapiranja obtočnega kanala.

7.3 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajno desno prelivno polje pregrade je znižano oz. izvedeno do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njim; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.

Tudi ob znižanem skrajno desnem prelivnem polju je, pri praktično enakem stanju nasipa kot v prejšnjem primeru (krona nasipa oddaljena 44 m od levega brega), pričelo odnašati drobnejši material (18-36 cm). Z bolj grobim materialom je bil nasip izveden do konca, vendar je v obtočni kanal odneslo cca. 600 m^3 zasipnega materiala dimenzij 36-72 cm. Ob koncu poizkusa, ko vodni tok teče preko znižanega prelivnega polja, voda nad pregrado doseže koto 142,16 m n. m., kar je 14 cm pod projektno koto prelivov. Zato vsa voda teče čez znižano prelivno polje oz. skozi netesnjeni nasip in se vzpostavi višinska razlika med gladino gor- in dolvodno od nasipa $\Delta h = 3,5$ m. Na fizičnem modelu se je izkazalo, da ob neustreznem tesnjenju nasipa taka višinska razlika lahko pomeni nevarnost za porušitev nasipa. Iz tega razloga in zaradi količine odnesenega materiala v obtočni kanal, je bila izvedena naslednja raziskava z dvema znižanima prelivnima poljema.

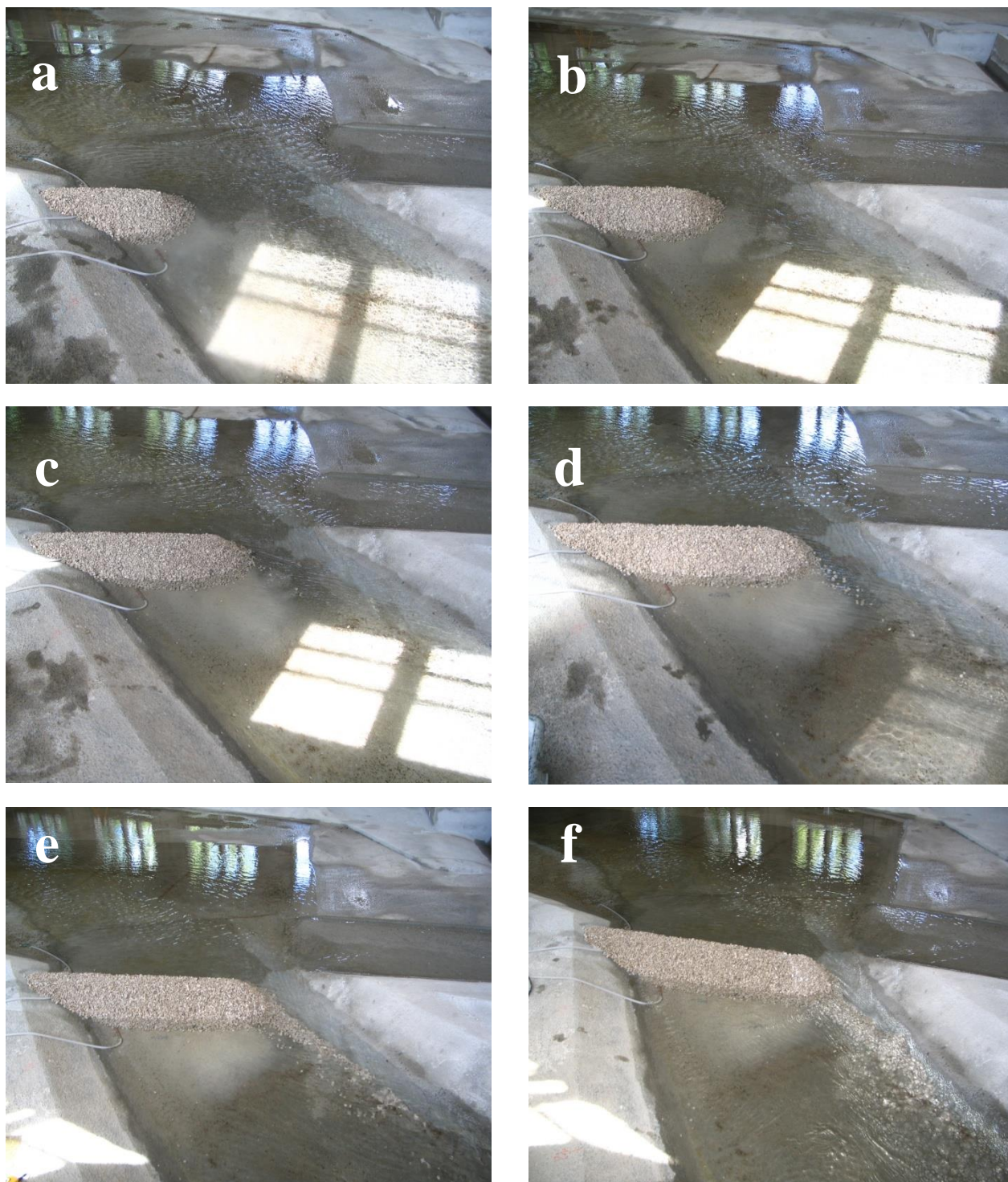
7.4 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajni desni dve prelivni polji pregrade sta znižani oz. izvedeni do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njima; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Zasipanje se izvaja od desnega brega obtočnega kanala proti levemu s koto krone nasipa 144,60 m n. m.

Na podlagi opazovanj iz prejšnjih poizkusov je bil za ta poizkus določen zasipni material kot mešanica frakcij 18-36 cm in 36-72 cm (razmerje 1:1), saj voda enako intenzivno odnaša frakcije 18-36 cm kot tudi bolj grobe frakcije 36-72 cm. V tem primeru se je odnašanje pričelo pri $\Delta h = 1,6$ m oz. pri oddaljenosti vrha nasipa do levega brega 38 m. Čeprav je bila zaradi dveh znižanih prelivnih polj pregrade višinska razlika med zgornjo in spodnjo vodo manjša (na koncu poizkusa je bil $\Delta h = 2,57$ m), je do konca poizkusa med zasipanjem v obtočni kanal kljub temu odneslo cca. 500 m^3 zasipnega materiala. Potek zapiranja obtočnega kanala je dokumentiran s fotografijami, prikazanimi na sliki 24.

7.5 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$. Skrajno desno prelivno polje pregrade je znižano oz. izvedeno do kote 138,60 m n. m., na to koto je poglobljena tudi struga Save pred njim; ostala prelivna polja so izvedena v celoti. Najprej se izvede del nasipa na levem bregu obtočnega kanala, nadaljuje se z zasipanjem od desnega brega. Nasip je tesnjen in grajen do kote 143,50 m n. m.

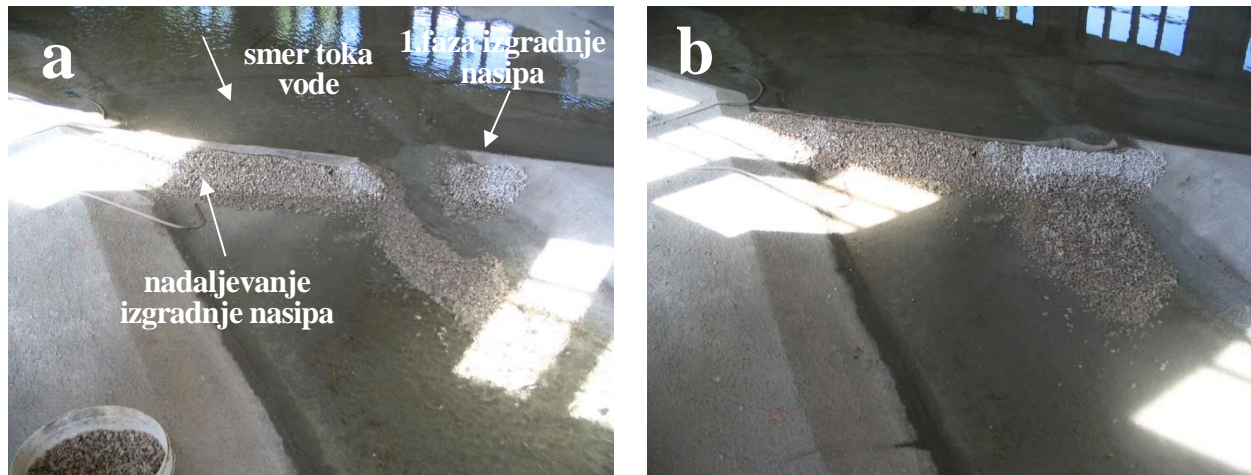
Pri vseh predhodnih poizkusih, ko se je zapiranje izvajalo od desnega proti levemu bregu obtočnega kanala, so se ob napredovanju nasipa proti levemu bregu pojavile visoke hitrosti ob levi brežini obtočnega kanala. Te hitrosti so dosegale cca. 6-7 m/s in bi zahtevale nujno dodatno zavarovanje leve brežine na dolžini vsaj 80 m.

Zato smo pri tem poizkusu najprej z grobim materialom (lomljenec 36-72 cm) izvedli levi del nasipa s prostornino cca. 600 m^3 , katerega vrh je segal 15 m v strugo.



Slika 24: Napredovanje izgradnje preusmerjevalnega nasipa od desnega proti levemu bregu obtočnega kanala v primeru dveh znižanih prelivnih polj pregrade in pretoku $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 24: Progression of the diversion levee construction from the left bank of the diversion channel towards the right in case of two lowered spillways of the dam and at the flow $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 25: Izgradnja preusmerjevalnega nasipa se prične na levem bregu, zasipanje pa se nadaljuje z desnega brega obtočnega kanala; $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 25: Construction of the diversion levee begins on the left bank and the backfill continues from the right bank of the diversion channel; $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na ta način se vodni tok odmakne od leve brežine proti sredini obtočnega kanala. Gradnjo nasipa smo nato nadaljevali z desnega brega z enako mešanico zasipnega materiala kot v prejšnjem poizkusu. Napredovanje gradnje nasipa je prikazano na fotografijah na sliki 25. Sočasno z napredovanjem nasipa smo izvajali tesnitev nasipa. Pri $\Delta h = 2,0 \text{ m}$ oz. pri oddaljenosti vrha nasipa od referenčne točke na levem bregu 41 m je pričelo ta material odnašati, zato smo gradnjo nadaljevali samo z bolj grobo frakcijo lomljenca 36-72 cm, ki pa ga je prav tako odnašalo v obtočni kanal dolvodno od nasipa. Do konca poizkusa je tako odneslo cca. **1300 m³** materiala, ki je od referenčne točke na levem bregu segal 36 m v obtočni kanal. Na tej širini bi bilo smiselno fizično preprečiti odnašanje materiala dolvodno v obtočni kanal. Voda nad pregrado doseže ob koncu poizkusa koto 142,50 m n. m., kar ob zelo nizki spodnji vodi (merjeni neposredno za nasipom) pomeni $\Delta h = 4,25 \text{ m}$.

Meritve hitrosti tako ob levem bregu (gradbeni jami), kot ob desnem bregu obtočnega kanala so pokazale, da maksimalne hitrosti ne presegajo vrednosti izmerjenih in opisanih v poglavju 5. To pomeni, da pri zgoraj opisanem sosledju gradnje nasipa za preusmerjanje vodnega toka preko prelivnih polj niso potrebne dodatne zaščite brežin.

8. Zaključki

Z raziskavami na fizičnem hidravličnem modelu smo optimizirali obliko obtočnega kanala, ki ob manjših izkopih, zaradi hidravlično boljše oblike, zagotavlja izhodiščno pretočnost $Q_{\text{MAX}} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$.

Erozija v obtočnem kanalu gradbene jame je intenzivna že pri pretoku $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, z večanjem pretoka po Savi pa se še povečuje. Pri poplavnem valu s konico pretoka $Q_{\text{MAX}} = 1800 \text{ m}^3/\text{s}$ in trajanjem približno 27 ur, lahko pričakujemo erozijo do trdne hribinske podlage praktično na polovici prečnega profila ob konkavni brežini obtočnega kanala. Ker se erodirani material odloži dolvodno v strugi Save na območju projektirane poglobitve lahko zaključimo, da je nujno že v fazi izvedbe obtočni kanal izkopati do trdne hribinske podlage.

Meritve gladin vzdolž obtočnega kanala in gradbene jame pri visokih pretokih so pokazale, da je gradbena jama v obravnavanem območju pretokov Save varna pred prelivanjem, saj znaša pri največjem opazovanem pretoku $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$ varnostna višina pred zalitjem gradbene jame $H_V = 2 \text{ m}$, kar je za gradbeno jamo veliko in dopušča projektantu optimiziranje višine nasipov.

Največje izmerjene hitrosti ob desnem bregu obtočnega kanala se pojavijo ob njegovem dolvodnem priključku na strugo Save in znašajo približno 4 m/s. Vzdolž gradbene jame pa se največje izmerjene hitrosti pojavijo na gorvodnem robu gradbene jame in so reda velikosti 3 m/s. Hitrosti toka vzdolž brežin gradbene jame so običajne in ne predstavljajo posebne erozijske nevarnosti.

Raziskava stabilnosti leve brežine pod HE Brežice, ki je obremenjena s tokom iz obtočnega kanala, je pokazala, da je zaščita brežine z lomljencem 18-36 cm ustrezna, saj pri najneugodnejšem pretoku 1800 m³/s ne prihaja do poškodb. Največje izmerjene hitrosti ob mostnem oporniku, ki je prav tako izpostavljen toku iz obtočnega kanala, so višje in sicer do največ 5 m/s.

Preusmerjanje vodnega toka iz obtočnega kanala preko prelivnih polj predstavlja zahteven poseg, saj zaradi velike višinske razlike med zgornjo in spodnjo vodo prihaja do velike erozivne moči vodnega toka. Kot zelo primerna varianta se je izkazala tista, pri kateri bi najprej zgradili manjši del nasipa na levem bregu obtočnega kanala in na ta način zavarovali brežino gradbene jame pred erozijo, nadaljevali pa z nasipanjem z desne strani. Morda bi bilo smiselno dolvodno tik za traso nasipa fizično (npr. z manjšimi piloti) preprečiti odnašanje materiala v obtočni kanal, ki ga sicer voda pri pretoku 200 m³/s odnese cca. 1300 m³. Izvedbena in ekonomska presoja posameznih preizkušenih variant pa je seveda prepuščena projektantu.

Opisane raziskave predstavljajo tipičen primer v hidravliki, ki ga je potrebno raziskati na fizičnem modelu, saj matematični modeli kljub velikemu napredku v zadnjih letih ne bi mogli odgovoriti na vsa zastavljena vprašanja.

Viri

ARSO (2011). *dopis št. 35921-5/2011*.

Bombač, M. (2011). *Hidravlična modelna raziskava HE Brežice na prostorskem modelu – Preliminarno poročilo raziskav gradbene jame: poročilo*. Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana, 15 str., pril., ilustr.

Djurović, V., Ciuha, D. (1990). *Hidravlične modelne raziskave preusmerjanja vodnega toka skozi pretočna polja na prostorskem modelu za HE Boštanj – varianta B-II: poročilo*. Vodnogospodarski inštitut, Ljubljana, 12 str., pril., ilustr.

Flycom d.o.o. (2007). *Posnetek stanja terena s tehnologijo LIDAR*. Snemano 14. Do 16. januarja 2007; (naročnik Ministrstvo za okolje in prostor).

Geodetski biro Iztok Slatinšek s.p. (2007). *Geodetski posnetek prečnih profilov reke Save v odseku od meje s Hrvaško do Krškega*.

Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Mueller, M., Ciuha, D. (2011). *Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: Distorzirani fizični model območja bazena HE Brežice in Hidrodinamični matematični model območja bazena HE Brežice: poročilo*. Ljubljana, Hidroinštitut; Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem; IBE, 53 str.

<http://www.he-ss.si> (Pridobljeno 2.3.2012).