

dr. Gorazd NOVAK*

Jure MLAČNIK*

Primož RODIČ*

HIDRAVLIČNA MODELNA RAZISKAVA ZAPORNICE JEZU NEK PO IZGRADNJI HE BREŽICE

POVZETEK

Jez na Savi v neposredni bližini nuklearne elektrarne Krško zagotavlja zadostno količino hladilne vode za potrebe NEK. Z izgradnjo dolvodne HE Brežice se bodo razmere na obravnavanem jezu spremenile, kar zahteva podrobno preučitev možnih obratovalnih situacij ter definiranje dopustnih in nedopustnih načinov obratovanja zapornic. V ta namen je bila izvedena hidravlična raziskava na fizičnem modelu enega pretočnega polja jezu NEK. Model je bil zgrajen v merilu 1:17. Raziskava je najprej podala merodajne odločitvene parametre, nato so bile izvedene modelne simulacije možnih obratovalnih primerov zapornic. Izmerjene so bile sile v modelnih dvižnih drogovih in v ležajih modelne zapornice ter tlaki po obodu zajezne ploskve. Obravnavani so bili primeri mirujoče zapornice ter dviganja in spuščanja le-te. Raziskane so bile različne kombinacije dotoka, začetnega odprtja zapornice in višine spodnje vode. V prispevku so predstavljene nekatere zanimivejše ugotovitve, ki se tičejo predvsem dviganja in spuščanja zapornice ter območja dopustnega obratovanja zapornic v novih obratovalnih pogojih.

1. UVOD

Nuklearna elektrarna Krško (NEK) vključuje pregrado, ki je namenjena zagotavljanju hladilne vode. Pregrado sestavlja šest prelivnih polj, širokih po 15 m, vsako pa je opremljeno s segmentno zapornico, ki ima 8 m dolgo ročico. Dolvodno od jezu NEK poteka gradnja HE Brežice in akumulacija le-te bo spremenila hidravlične razmere na obravnavanem jezu. Zaradi višje kote spodnje vode bodo zapornice po novem izrazito potopljene, saj bo normalna kota zajezbe HE Brežice 153,0 m, teme spuščene zapornice NEK pa je na koti 149,7 m. Ker zapornice niso bile dimenzionirane na take razmere, bi lahko prišlo do težav (v telesu segmenta ujet zrak, pojav vibracij), zato je bila izvedena hidravlična modelna raziskava za določitev dopustnih in nedopustnih načinov obratovanja zapornic (Novak in Mlačnik, 2014 in 2015).



Slika 1: Jez NEK (foto: Novak in Mlačnik, 2014)

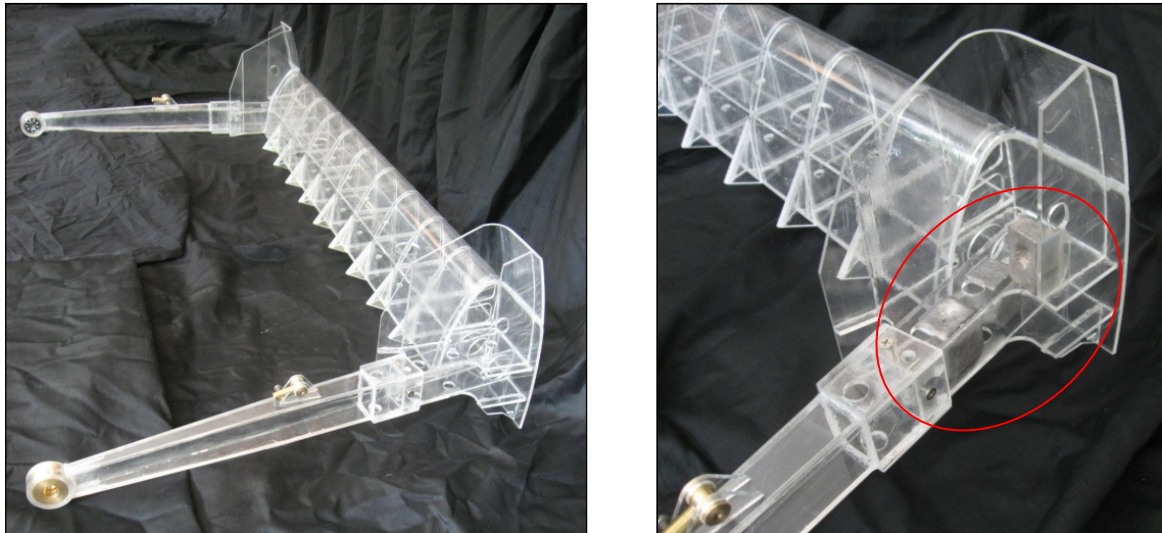
* dr. Gorazd NOVAK, univ. dipl. inž. gradb., Jure MLAČNIK, univ. dipl. inž. gradb., Primož RODIČ, univ. dipl. inž. gradb., HIDROINŠTITUT, Hajdrihova 28, Ljubljana

Pristop s hidravličnimi modelnimi raziskavami je bil uspešno uporabljen tudi že v času gradnje NEK (Colarič, 1977) in pri analizi okoliščin, ki so v visokovodnem dogodku leta 1980 zaradi okvare hidravlične opreme pripeljale do okvare zapornice (Colarič, 1981).

2. METODOLOGIJA

Raziskava je bila izvedena na geometrijsko podobnem hidravličnem modelu s prosto gladino, zgrajenem v merilu 1:17. Upoštevan je bil Froudov kriterij modelne podobnosti. Model enega prelivnega polja in segmentne zapornice je bil nameščen v zidan kanal pravokotnega prečnega prereza dolžine 19 m, širine 1,06 m in višine 0,63 m. Na vsaki strani zapornice je bila vgrajena polovica pripadajočega prelivnega stebra. Preliv je bil narejen iz lesa, zapornica in stebra pa iz akrilnega stekla. Zapornica je bila sestavljena (večinoma zlepljena) iz posameznih kosov, ki so bili lasersko izrezani iz 3 mm pleksi plošče.

Za zagotovitev modelne podobnosti mase in težišča je bil v ročice modela zapornice na ustrezno mesto dodan svinčen balast (Slika 2).

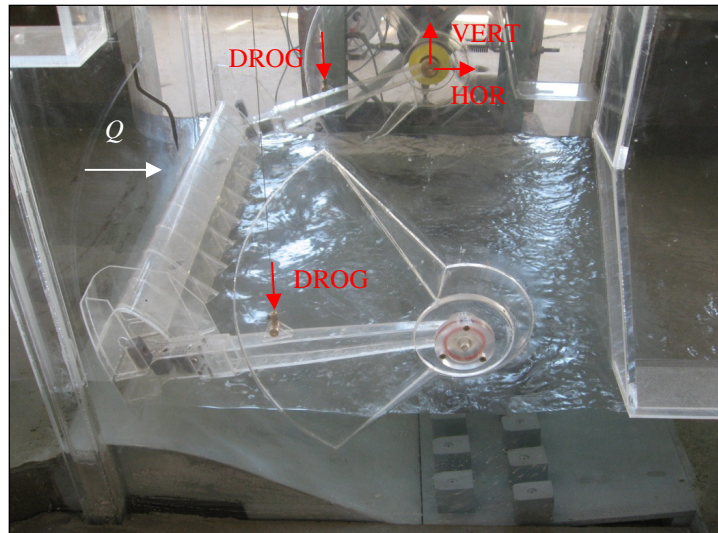


Slika 2: Pogled na modelno zapornico. Slika levo brez balasta, desno s svinčnim balastom.

V naravi se zapornica dviga in spušča z rahlo nagnjenima drogovoma servomotorja, na modelu pa z navpičnimi jeklenimi vrvmi, ki so pritrjene na togo prečko, ta pa na računalniško krmiljeni servo pogon.

Na modelu so bile izmerjene sile v ležaju ročice (oznaka HOR in VERT) in v obeh dviznih drogovih modela (oznaka DROG), tlaki po obodu zajezne ploskve in poteki gladin za različne kombinacije dotoka Q , odprtja zapornice a' in kote spodnje vode SV (Slika 3). Za meritve sil v ležaju ročice sta bila pripadajoča silomera povezana z osjo zapornice s pomočjo posebnega togega okvirja z vzmetmi. Za meritve tlakov po obodu zajezne ploskve je bilo treba v notranjosti modelne zapornice speljati piezometrične cevke, zato so bile te meritve izvedene po zaključku merjenja sil, tako da cevke niso vplivale na rezultate merjenja sil.

Za meritve so bili uporabljeni ustrezno umerjeni in certificirani silomeri (1 kN in 0,5 kN; natančnost 0,1 % merilnega območja), tlačne sonde (1 bar) in piezometri (natančnost odčitka ostnega merila 0,1 mm).



Slika 3: Modelna zapornica z označeno smerjo toka in pozitivnimi smerni izmerjenih sil

3. MERITVE

Raziskava je obravnavala širok razpon glavnih parametrov, tako da so bile modelirane zdajšnje in predvidene bodoče razmere:

- pretoki Q od 50 do 900 m³/s (merjeno za celotno pregrado, ne na eno prelivno polje)
- odprtja zapornice a' od 1 do 350 cm (merjeno kot vertikalni pomik temena zapornice)
- kote spodnje vode SV od 146,5 do 153,2 m (teme preliva je na koti 147,5 m)
- hitrost dviganja povsem spuščene zapornice v_{dvig} od 0,1 do 1,1 m/min (merjeno na dvižnem drogu; nižja vrednost je podobna zdajšnji hitrosti dviga, višja vrednost pa predstavlja hitrost, ki jo dvižni mehanizem na terenu še lahko prenese).

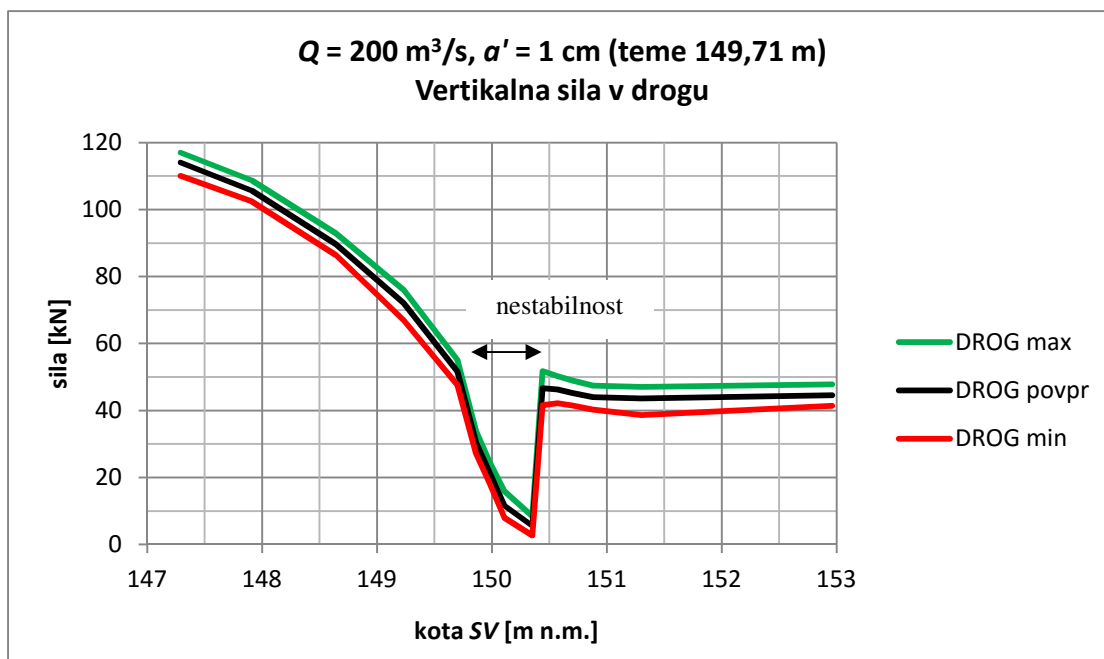
Meritve so potekale v treh sklopih, v katerih je bilo določeno naslednje:

- sile pri različnih stacionarnih pogojih (stalni Q , a' in SV)
- vpliv hitrosti dviga zapornice na sile (stalni Q , konstantna v_{dvig})
- območja nestabilnosti zapornice (pojav tresenja modelnih dvižnih drogov in/ali premikanja zapornice pri stalnih pogojih). V ta območja neželenih razmer spadajo predvsem primeri, ko so sile v dvižnih drogovih blizu vrednosti nič, kajti v naravi bi to pomenilo tlačno obremenitev drogov, ki bi lahko povzročila okvaro dvižnega mehanizma.

Pojav nestabilnosti modelne zapornice lahko prepoznamo po eni ali več izmed naslednjih značilnosti:

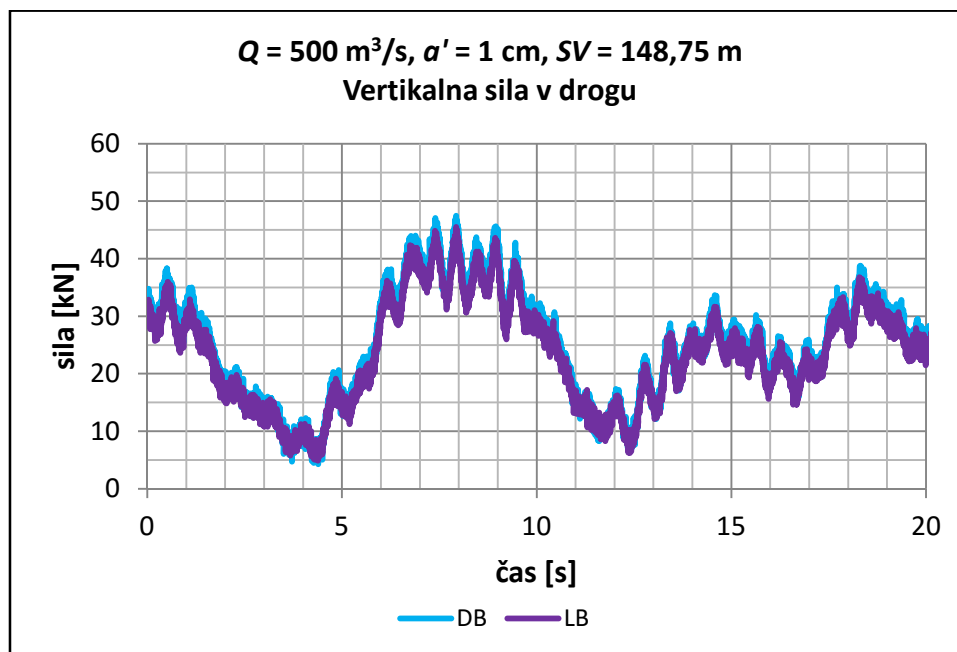
- sile v dvižnih drogovih so majhne (približno < 40 kN za naravo),
- razlika med maksimalnimi in minimalnimi silami (v dvižnih drogovih in/ali ležaju zapornice) v danih stacionarnih razmerah je večja kot v razmerah izven območja nestabilnosti,
- jekleni vrvi na modelu izrazito vibrirata ali sta celo ohlapni,
- modelna zapornica se trese ali dvigne iz izhodiščne lege, nato pa obstane v tako premaknjeni legi ali niha v toku.

Ti pokazatelji nestabilnosti ne nastopajo vsi v vseh primerih in tudi ne enako izrazito. Meja območja nestabilnosti se lahko dokaj zanesljivo določi na podlagi grafa izmerjenih sil. Območje nestabilnosti se odraža na grafu vertikalne sile v drogu kot interval vrednosti SV , pri katerih se graf približa vrednosti nič. To območje nakazuje tudi pripadajoča sprememba na grafu vertikalne sile v ležaju ročice. Značilen primer izmerjenih sil v dvižnih drogovih je prikazan na sliki 4:



Slika 4: Območje nestabilnosti zapornice, določeno iz grafa izmerjenih sil

Primer sil v razmerah, ko je zapornica nestabilna, je prikazan na sliki 5.



Slika 5: Primer izmerjenih sil, ko je zapornica nestabilna

Iz slike 5 je razvidno, da dvižna drogova vibrirata (graf sile izrazito niha) in da sta jekleni vrvi, s katerima sta modelirana drogova, občasno ohlapni (sila zelo blizu vrednosti nič), kar pomeni, da je zapornica tik pred tem, da jo tok dvigne iz izhodiščne lege.

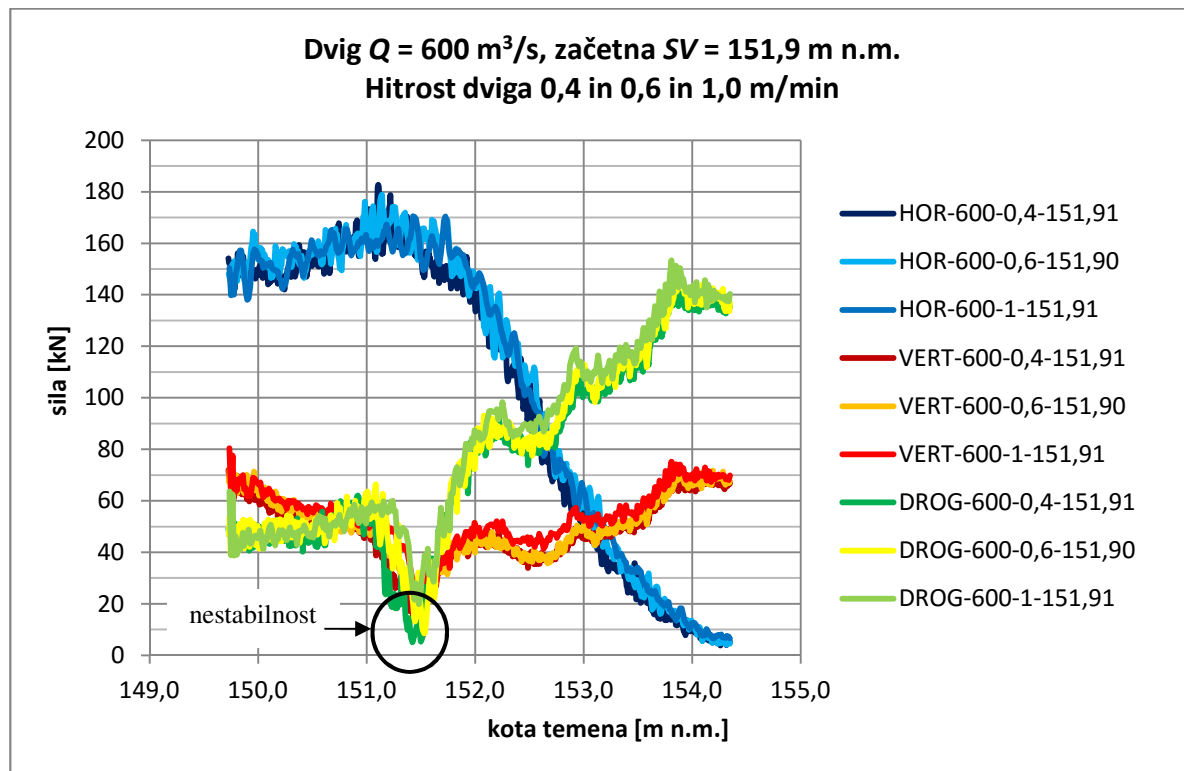
4. DISKUSIJA REZULTATOV

V tem prispevku se izmed obsežnih rezultatov meritev omejujemo na vsaj grobo diskusijo dvojega: 1) vpliv hitrosti dviga zapornice, 2) območje nestabilnosti zapornice.

4.1 Vpliv hitrosti dviga zapornice

Meritve so pokazale, da v večini primerov sama hitrost dviga zapornice v opazovanem območju od 0,1 do 1,0 m/min, merjeno na dviznem drogu, praktično nima vpliva na sile v ležaju ročice in na sile v dviznih drogovih. Pri istem pretoku in koti začetne spodnje vode so si pripadajoči grafi, ki kažejo spreminjanje posameznih sil med izvajanjem dviga zapornice z različnimi hitrostmi dviga, zelo podobni. Grafi sil za posamezne hitrosti dviga se večinoma razlikujejo za ± 10 kN za naravo. V posameznih primerih dviga zapornice lahko tekom dviga nastopijo zelo izrazite vibracije, oz. lahko pride do tega, da je na določenem odseku dviga zapornica nestabilna (Slika 6).

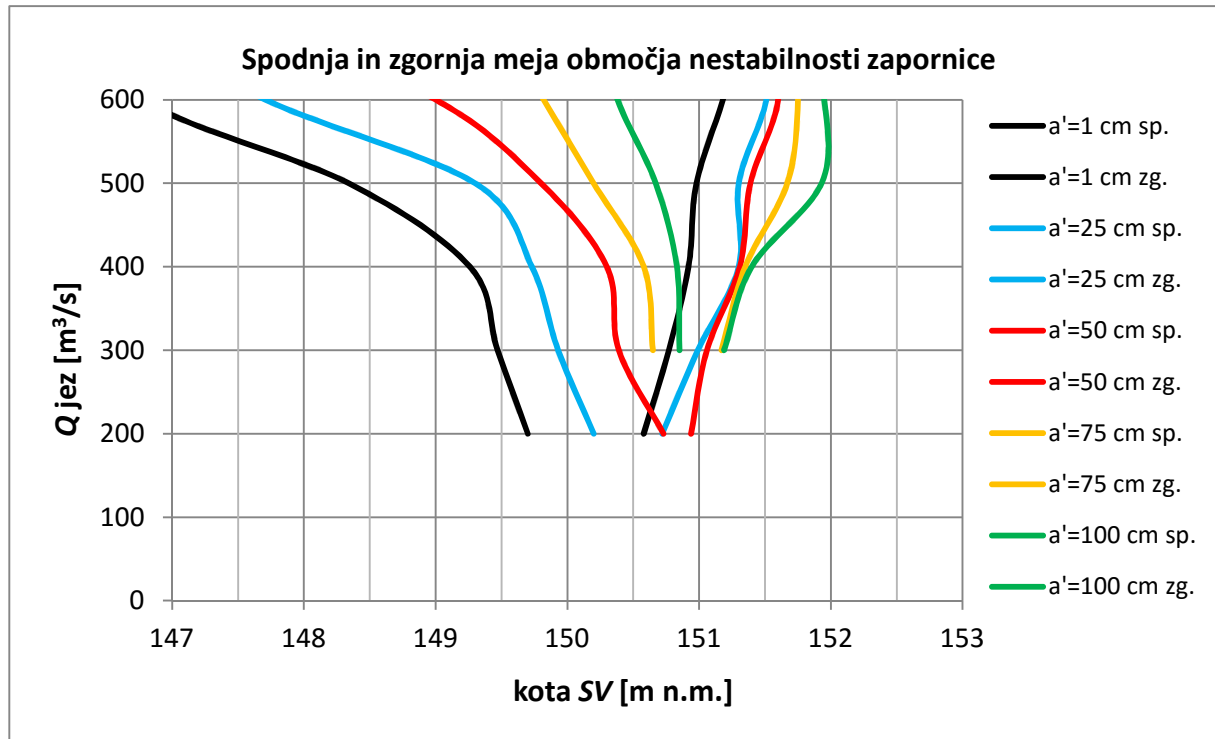
Nadalje se je izkazalo, da se z dvigom zapornice, ki je sprva v območju nestabilnosti, njena stabilnost lahko izboljša, saj se sile v dviznih drogovih povečajo in torej postanejo manj tlačne, z večanjem odprtja pa vibracije pojenjajo.



Slika 6: Vpliv hitrosti dviga zapornice
(oznake grafov pomenijo: sila – pretok [m^3/s]– hitrost dviga [m/min] – kota spodnje vode [m n.m.]

4.2 Območja nestabilnosti zapornice

Z vidika upravljanja zapornic so bolj kot obravnavane hitrosti dviga zapornice lahko problematične kombinacije pretokov, odprtij zapornice in višin spodnje vode, ki povzročijo, da zapornica vibrira ali celo postane nestabilna. Območja nestabilnosti so za odprtja $a' \leq 100$ cm in pretoke $Q \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$ prikazana na sliki 7:



Slika 7: Območja nestabilnosti zapornice za $a' \leq 100$ cm in $Q \leq 600$ m³/s (oznaka sp. oz. zg. pomeni spodnjo oz. zgornjo mejo območja nestabilnosti)

Kombinacijam $Q - a' - SV$, ki so znotraj prikazanih območij nestabilnosti, se je treba pri obratovanju jezua NEK izogniti.

5. ZAKLJUČKI

Hidravlična modelna raziskava jezua NEK je pokazala, da so bili nekateri strokovni pomisleki glede dovoljenih obratovalnih pogojev zapornice po izgradnji HE Brežice utemeljeni. Rezultati raziskave kažejo naslednje:

- 1.) Hitrost dviganja zapornice nima vpliva na sile v ležaju ročice in v dvižnih drogih.
- 2.) Pri določenih kombinacijah stalnega pretoka, konstantnega odprtja zapornice in kote spodnje vode lahko pride do pojava nestabilnosti zapornice.
- 3.) Območje nestabilnosti zapornice je pri manjših odprtjih obsežnejše kot pri večjih odprtjih. Pri istem odprtju se območje nestabilnosti povečuje s pretokom; pri tem spodnja meja nestabilnosti pada, zgornja pa raste.

Raziskava kaže, da je v obravnavanem primeru pristop s fizičnim hidravličnim modelom primeren in zelo uporaben, ter da bi ga bilo treba uporabiti tudi pri reševanju bodočih podobnih problemov.

OZNAKE

DB, LB	desni breg, levi breg (tj. stran modela, gledano v smeri toka)
DROG	vertikalna sila v dvižnem drogu modelne zapornice
HOR	horizontalna sila v ležaju ročice modelne zapornice
VERT	vertikalna sila v ležaju ročice modelne zapornice
$V_{dviž}$	hitrost dviganja zapornice (merjeno na dvižnem drogu)

VIRI

Colarič, O., 1977. Hidravlična modelna raziskava pretočnega polja jezu NE Krško v merilu 1:17. (poročilo št. 593), Vodogradbeni laboratorij Ljubljana

Colarič, O., 1981. Hidravlična analiza segmentne zapornice na jezu NE Krško v modelnem merilu 1:17. (poročilo št. 646), Vodnogospodarski inštitut Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij

Colarič, O., 1981. Hidravlična analiza ene blokirane segmentne zapornice na jezu NE Krško (predlog za dokončno ureditev) modelno merilo 1:17 (poročilo št. 650). Vodnogospodarski inštitut Ljubljana, Vodogradbeni laboratorij

Novak, G. in Mlačnik, J., 2014. Hidravlična modelna raziskava zapornice jezu Nuklearne elektrarne Krško (NEK) po izgradnji HE Brežice (poročilo 995-rev.1). Hidroinštitut, Ljubljana.

Novak, G. in Mlačnik, J., 2015. Hidravlična modelna raziskava za določitev sil pri obratovanju zapornic jezu Nuklearne elektrarne Krško po izgradnji HE Brežice (poročilo 1003). Hidroinštitut, Ljubljana.