

UDK/UDC: 556.166:626/627(282.249)(497.4)

Prejeto/Received: 04.12.2019

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 09.03.2020

## OPTIMIZACIJA OBRATOVANJA VERIGE HIDROELEKTRARN NA SPODNJI SAVI V ČASU POPLAVNIH DOGODKOV

## OPTIMIZATION OF HPPS CHAIN OPERATION ON THE LOWER SAVA DURING FLOOD EVENTS

Gašper Rak<sup>1,\*</sup>, Matija Brenčič<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2

<sup>2</sup> IBE, d.d., svetovanje, projektiranje in inženiring, Hajdrihova ulica 4

### Izvleček

Pri načrtovanju hidroenergetske izrabe je treba upoštevati kompleksno sestavo vplivnih dejavnikov in obsežne predvidene posege v prostor. Pri tem je poleg same proizvodnje električne energije glavni cilj ohranjanje odtočnega režima in ohranjanje oziroma izboljšanje poplavne ogroženosti v vplivnem območju. Poleg načrtovanja posegov in objektov, pomembnih za obratovanje HE in drugih spremljevalnih posegov v obravnavani prostor, k doseganju zelenih ciljev v času visokih voda pomembno prispeva tudi ustrezno obratovanje posamezne HE in verige kot celote. Članek prikazuje optimiziranje obratovanja verige HE na reki Savi, na odseku med Radečami in državno mejo z Republiko Hrvaško. Na približno 60 km dolgem, znatno urbaniziranem odseku spodnje Save, kjer je v zaključni fazi izgradnja verige šestih pretočnih HE, je bilo treba izpolniti številne zahteve glede izboljšanja oziroma vsaj ohranjanja iste ravni poplavne nevarnosti in ohranjanja odtočnega režima na meji z Republiko Hrvaško, določenega z meddržavnim sporazumom. Za izpolnjevanje zahtev smo za verigo HE določili poenoten način obratovanja v času visokih voda, ki zagotavlja ohranjanje karakteristik poplavnih valov vzdolž verige HE in upošteva zahteve ostalih deležnikov na vplivnem območju. S hidravlično analizo smo pokazali, da je mogoče ohranjati velikost pretoka konice in samo obliko poplavnega vala, ni pa možno ohraniti naravne hitrosti potovanja vala vzdolž verige HE.

**Ključne besede:** veriga HE, obratovanje, odtočne razmere, ocena poplavne ogroženosti, hidravlična analiza.

### Abstract

A complex combination of influencing factors and extensive planned interventions must be considered when planning hydropower production. In addition to electricity production, the main goal is conservation of the run-off regime and conservation or mitigation of flood risk in an affected area. Besides the design of interventions and structures important for HPP operating and other accompanying measures into a considered area, the appropriate operation of an individual HPP and HPPs chain as a whole contributes significantly to achieving the desired goals during high waters. This paper presents an optimization of the HPP chain operation

---

\* Stik / Correspondence: [gasper.rak@fgg.uni-lj.si](mailto:gasper.rak@fgg.uni-lj.si)

© Rak G., Brenčič M.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](#).

© Rak G., Brenčič M.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – ShareAlike 4.0 Licence](#).

<https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2019.07>

on the section of Sava River between Radeče and state border with the Republic of Croatia. The approximately 60-km long, substantially urbanized section of the Lower Sava, where construction of a chain of six run-of-the-river HPPs is in its final stages, had to meet a number of requirements to improve or at least conserve the same level of flood risk and run-off regime on the border with the Republic of Croatia, defined by interstate agreement. In order to meet the requirements, we determined a uniform operating procedure of HPP chains during flood events that ensures the conservation of flood-wave characteristics along the chain of HPPs, while meeting the requirements of other stakeholders in this influential area. We showed with hydraulic analysis that the shape of the flood wave and its peak discharge can be conserved, but it is not possible to conserve natural flood-wave propagation time along the chain of HPPs.

**Keywords:** HPP chain, operation, run-off regime, flood risk assessment, hydraulic analysis.

## 1. Uvod

Zaradi kompleksnosti rabe prostora, poplavne nevarnosti na obsežnem območju, zahtev po ohranjanju odtočnega režima dolvodno in s tem ohranjanja retenzijske sposobnosti prostora, ohranjanja dobrega ekološkega stanja voda in ohranjanja oziroma ureditev nadomestnih vodnih habitatov na vplivnem območju sodi načrtovanje verige HE med zelo zahtevne procese. Pri (večjih) posegih v prostor je treba analizirati tako vplive objektov na okolje kot vpliv okolja na objekte. Vpliv poplavnih in podzemnih voda se upošteva že pri dimenzioniranju objektov HE. Za takšne objekte je treba izdelati tudi presojo vplivov na okolje. Ena od strokovnih podlag pri presoji vplivov na okolje za posege v področje vodotokov ter na vplivnem območju voda je tudi analiza odtočnih razmer

obstoječega in načrtovanega stanja vodnih tokov, ki v končni fazi tudi definira obratovanje prelivnih objektov v času visokih voda. V članku je prikazan primer optimizacije delovanja verige HE na spodnji Savi, na odseku med Radečami in državno mejo z Republiko Hrvaško (slika 1).

Že sama zasnova HE, umestitev HE v prostor in dimenzioniranje njenih prelivnih objektov je podrejeno zagotavljanju ustreznega odtočnega režima visokih voda na vplivnem območju. Le z ustrezno zasnovanimi in dimenzioniranimi prelivnimi objekti je v času obratovanja hidroelektrarne (več kot 100 let) možno ohranjati, izboljšati oziroma vsaj čim bolj omiliti negativne vplive HE oz. verige HE na vodni režim. Cilj vseh hidravličnih analiz je optimizirati delovanje tako posamezne HE kot verige kot celote.



*Slika 1: Veriga hidroelektrarn na spodnji Savi.*

*Figure 1: Chain of hydropower plants on Lower Sava.*

### **Karakteristike odseka spodnje Save**

Obravnavani odsek spodnje Save spada v povirni, hudourniški zgornji tok Save in se po lastnostih lahko deli na dva (pod)odseka; gorvodni odsek dolžine 40 km, ki leži v razmeroma zaprti dolini brez pomembnejših razlivnih površin, in dolvodni, ravninski odsek dolžine 20 km in širine do 3 km z velikimi inundacijskimi površinami, ki pomembno vplivajo na preoblikovanje visokovodnih valov.

V gorvodnem odseku se nahaja več naselij neposredno ob strugi Save (Radeče, Sevnica, Krško). Ob dolvodnem odseku pa v poplavnem območju leži tudi Nuklearna elektrarna Krško (NEK). Medtem ko je NEK zaščitena do nivoja maksimalne verjetne poplave (PMF), je poselitve in cestna infrastruktura pred visokimi vodami zaščitena do nivoja stoletne vode. Obravnavani odsek Save se na dolvodnem koncu konča na državni meji z Republiko Hrvaško, s katero je bil sklenjen dogovor o zagotavljanju naravnega odtočnega režima visokih voda na državni meji v mejnem profilu Save. Na hrvaški strani, dolvodno od državne meje, leži ob Savi glavno mesto Republike Hrvaške, Zagreb, ki je prav tako poplavno ogroženo.

V pregradnem inženirstvu veljajo različni standardi, vezani predvsem na načrtovanje in varnost samih objektov, izvajanje monitoringa in zagotavljanje njihove varnosti v času življenjske dobe ter v zadnjem času tudi glede sprejemljivega vpliva takšnih objektov na ekološko stanje vodnega telesa (ICOLD, 2002; Zhou et al., 2011; Ren et al., 2017). V nam dostopni literaturi nismo našli primerljivega problema, kjer bi bil, poleg same varnosti objekta, obravnavan in podrobneje predstavljen tudi način obvladovanja poplavne nevarnosti, kontroliran z optimiziranjem obratovanja verige HE. Rezultati objavljenih študij so vezani predvsem na obvladovanje poplavne varnosti z velikimi akumulacijami, ki so zgrajene v zgornjih delih vodozlivnih območij vodotokov (Pircher, 1990; Luis et al., 2013; Ward et al., 2013; Jansen et al., 2013; Zhou et al., 2018). V teh primerih se poplavna nevarnost dolvodno zmanjšuje z zadrževanjem vode v akumulacijah, kjer se s predpraznjenjem doseže razpoložljivi volumen, primerljiv z dotokom v akumulacijo. Takšnega pristopa ni mogoče

uporabiti na spodnji Savi, kjer so zgrajene pretočne HE na kombiniranem odseku vodotoka; brez retenzijskih površin ter z retenzijskimi površinami, ki se ohranjajo in kontrolirano aktivirajo z obratovanjem objektov HE. Prav tako se HE ne nahajajo v zgornjem toku vodotoka, volumni akumulaciji pa so bistveno manjši od volumnov poplavnih valov. Bolj kot z zadrževanjem vodne mase v akumulacijah je na preoblikovanje in potovanje poplavnih valov mogoče vplivati z aktiviranjem poplavnih površin v pravi fazi dogodka. V literaturi objavljene študije optimiziranja delovanja HE so izdelane s poudarkom na proizvodnji električne energije in ekonomike delovanja objekta, pri čemer ne obravnavajo poplavne problematike (Sakr et al., 1985; Popa et al., 2010; Sekretarev et al., 2016; Parvez et al., 2019).

## **2. Hidravlično modeliranje**

### **2.1. Vzpostavitev hidravličnih modelov**

Da bi ohranili zahtevano poplavno varnost poselitve in nekatere infrastrukture ob Savi, da ne bi poslabšali stanja za NEK s stališča poplavne varnosti in zagotavljanja hladilne vode ter da bi približali odtočni režim naravnemu (pred gradnjo HE), smo z obsežnim modeliranjem za načrtovano stanje verige HE analizirali in optimizirali dimenzije in lokacije objektov za razbremenjevanje visokih voda, prelivnih objektov HE ter drugih spremljajočih posegov v prostor.

V sklopu načrtovanja posameznih stopenj verige HE na spodnji Savi smo izvedli obsežne fizične in matematične modelne raziskave, ki so omogočale pripravo tehničnih rešitev posegov in ureditev ter protipoplavne zaščite, ki zagotavljajo varno obratovanje tako v času nizkih in srednjih pretokov kot tudi pri visokih ter ekstremno visokih vodah (IBE, 2012; Brenčič et al., 2018a).

Hidravlične karakteristike prelivnih objektov so raziskali na fizičnih hidravličnih modelih na Inštitutu za hidravlične raziskave (Mlačnik et al., 2007; Mlačnik et al., 2011; Mlačnik et al., 2012). Obratovanje verige pri prevajanju visokovodnih valov, ki bo v največji možni meri, ob zagotavljanju

načrtovane poplavne varnosti, ohranjal tudi naravni hidrološki režim na obravnavanem odseku, smo določili s hidravlično presojo vpliva različnih variant obratovanja posamezne HE in verige kot celote. Na podlagi numeričnih modelnih raziskav smo tako določili glavne hidravlične parametre za obratovanje akumulacijskega bazena posamezne stopnje verige HE: denivelacijska krivulja (ki definira nivo gladine na jezovni zgradbi glede na pretok v Savi) ter krivulja  $Q_{VVR}/Q_{Save}$ , ki narekuje dinamiko polnjenja retenzijskih površin preko visokovodnega razbremenilnika (VVR) (IBE, 2012; Brenčič et al., 2018a).

V modelni raziskavi smo uporabili numerični model MIKE FLOOD. Programsko orodje, razvito na Danskem hidravličnem inštitutu, ki je bilo uspešno uporabljeno pri reševanju številnih inženirskih projektov, kot tudi pri raziskovalnem delu, združuje 1D model (MIKE 11) za račun razmer v strugi in 2D model (MIKE 21) za simulacijo razmer na poplavnih površinah (Patro et al., 2009; Vanderkimpen et al., 2009; Jongman et al., 2012; Samantaray et al., 2014). Topografija in tokovne razmere na stiku rečne struge in poplavnih površin pomembno vplivajo na odtočne razmere in predvsem polnjenje retenzije. To je v MIKE FLOOD simulirano s posebnimi vozlišči. Povezani 1D–2D modeli predstavljajo učinkovito orodje za simuliranje poplavnih scenarijev na širših območjih, kjer je glavni cilj analiziranje glavnih smeri toka po poplavnih površinah, globine in hitrosti vode ter obseg poplavljanja (Weisgerber et al., 2010), hkrati pa 1D modul omogoča vgraditev različnih objektov s hidromehansko opremo (npr. jezovne zgradbe, VVR), z možnostjo simuliranja dinamike njihovega obratovanja v odvisnosti od časovne spremembe pretoka.

Poplavna območja smo modelirali s hidrodinamičnim modulom MIKE 21. Program temelji na numeričnem reševanju Reynoldsovih povprečenih Navier-Stokesovih (RANS) enačb, ki predstavljajo po vertikali integrirana zakona o ohranitvi gibalne količine in o ohranitvi mase. Za reševanje sistema enačb se uporablja tehnika Alternate direction implicit (ADI), za matrične enačbe pa se uporabljajo t. i. algoritmi Double Sweep (DS). Z enačbami je opisano spreminjanje

globine in specifičnega pretoka vode (DHI, 2012). Primernost kombiniranega 1D–2D modela smo potrdili s fizičnimi modeli bazenov HE Brežice in HE Mokrice (Rak et al., 2012).

Za potrebe načrtovanja posamezne HE na spodnji Savi smo izdelali hidravlične modele za celotno vplivno območje. Za izdelavo hidravlične analize vpliva celotne verige HE in njeno optimizirano delovanje pa smo posamezne modele združili oziroma smo rezultate modela gorvodnega območja uporabili kot vhodni robni pogoj za model dolvodnega območja.

## 2.2. Umerjanje hidravličnih modelov

Umerjanje modelov je potekalo v sklopu načrtovanja posamezne HE na spodnji Savi. Modele odsekov gorvodno od HE Krško smo umerili na podlagi terenskih meritev ob visokih vodah, pri modeliranju odsekov HE Brežice in HE Mokrice smo uporabili hibridno modeliranje, tj. kombinacijo fizičnega in matematičnega modeliranja (Mlačnik et al., 2012). Pri takšnem pristopu se meritve, pridobljene na fizičnem modelu, uporabijo za umerjanje numeričnega modela pri visokih pretokih, tj. tistih, ki se v naravi še niso pojavili, oz. pretokih, za katere ni na voljo podatkov meritev iz narave. Na podlagi terenskih meritev in rezultatov s fizičnih modelov smo dosegli zadovoljivo zanesljivost obravnavanih modelov. Na ta način smo zmanjšali negotovost rezultatov numeričnega modeliranja oziroma smo povečali zaupanje v rezultate modela v območju ekstrapolacije. Fizična modela sta bila vertikalno distorzirana. Faktor distorzije in modelnega merila je bil omejen s prostorskimi kapacitetami laboratorija, z zahtevami modelne natančnosti in hidravličnih omejitev (Kobus, 1980). Razpoložljivi prostor laboratorija je omogočal realizacijo fizičnih modelov v merilu dolžin  $L_r = 125$ , medtem ko je bil faktor distorzije enak  $n = 2$ , kar je dalo skupaj maksimalni pretok  $Q_n = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Za obe območji HE Brežice in HE Mokrice smo v prvi fazi fizični in numerični model vzporedno in neodvisno umerili na pretoke 1230, 1595 in 2465  $\text{m}^3/\text{s}$  (preglednica 1), za katere so bile v naravi izmerjene gladine vode na 21 merilnih mestih vzdolž odseka med mestom Krško in državno mejo z Republiko Hrvaško, in sicer v obdobju 2007–2012 (Mlačnik et al., 2012).

**Preglednica 1:** Visokovodni valovi, uporabljeni za umerjanje in verifikacijo modelov.

**Table 1:** High water waves used for model calibration and verification.

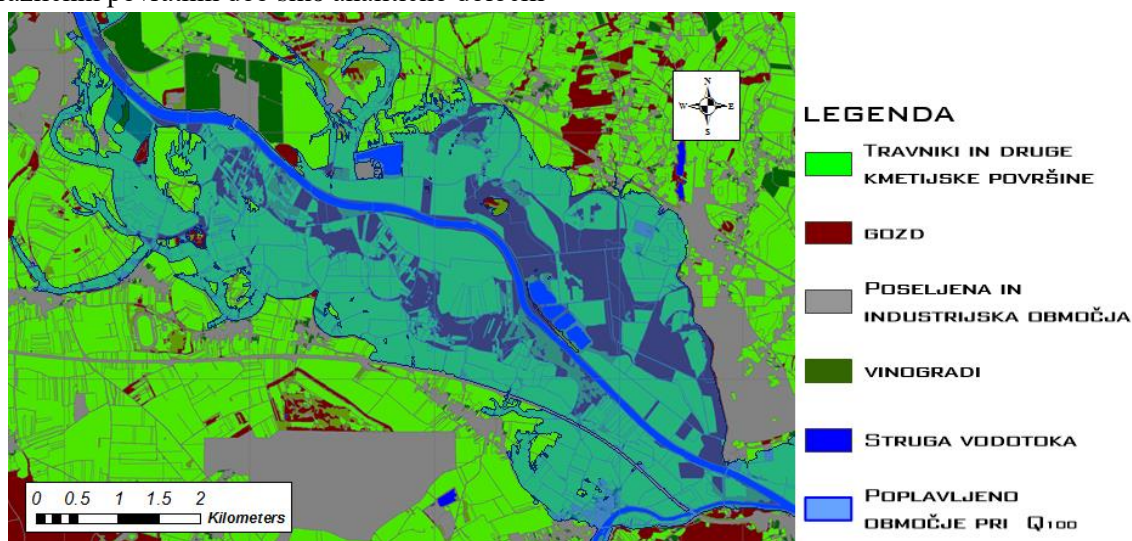
<i>Poplavni val reke Save [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Poplavni val reke Krke [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Opis visokovodnega vala</i>	
PV <sub>1-S</sub> = 1230	PV <sub>1-K</sub> = 217	struga večinoma še ni zapolnjena	umerjanje
PV <sub>2-S</sub> = 1595	PV <sub>2-K</sub> = 196	struga je zapolnjena, pojavi se manjše poplavljanje	
PV <sub>3-S</sub> = 2465	PV <sub>3-K</sub> = 65	PV <sub>3-S</sub> ≈ Q <sub>10</sub>	
PV <sub>4-S</sub> = 3680	PV <sub>4-K</sub> = 470	PV <sub>4-S</sub> ≈ Q <sub>100</sub>	validacija

Za posamezne izmerjene pretoke PV<sub>1-S</sub> do PV<sub>3-S</sub> (preglednica 1) smo koeficiente hrapavosti po odsekih struge reke Save umerili glede na izmerjene gladine vode, z natančnostjo ±0,05 m. Pri tem so se vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti gibale med  $n_G = 0,031 \text{ s m}^{-1/3}$  do  $n_G = 0,046 \text{ s m}^{-1/3}$ . Pri umerjanju modela na nizke visokovodne valove, ko še ne prihaja do znatnega razlivanja na poplavne površine, se je pokazalo nihanje koeficienta hrapavosti. Vzrok za takšno nihanje koeficientov hrapavosti je v lastnostih obrežne vegetacije in razgibane vzdolžne ter prečne geomorfologije in hidromorfologije. Za pravilno nadaljnjo uporabo numeričnega modela pri simulacijah nestalnega toka različnih povratnih dob smo analitično določili

krivulje spreminjanja  $n_G$  v odvisnosti od povprečne hitrosti vode na posameznih odsekih reke Save. To omogoča tudi programsko orodje MIKE, uporabili pa smo nastavek:

$$n_G = a \cdot V_{pop}^b \quad (1)$$

Vrednosti  $n_G$  za poplavna območja smo izbrali na podlagi razpoložljivih podatkov o porazdelitvi rabe prostora (ortofoto, dejanska raba zemljišč, kataster stavb, terenski ogled); v prvi fazi umerjanja pa smo uporabili podatke za poplavni val PV<sub>3-S</sub> (preglednica 1). Raba zemljišč za odsek Save dolvodno od Krškega, kjer se pojavljajo obsežnejše poplavne površine, prikazuje slika 2.



**Slika 2:** Raba prostora, upoštevana za določitev hidravlične hrapavosti na območju Krško-Brežiškega polja (Rak et al., 2016).

**Figure 2:** Land use considered in determining hydraulic roughness for the plain Krško-Brežiško polje (Rak et al., 2016).

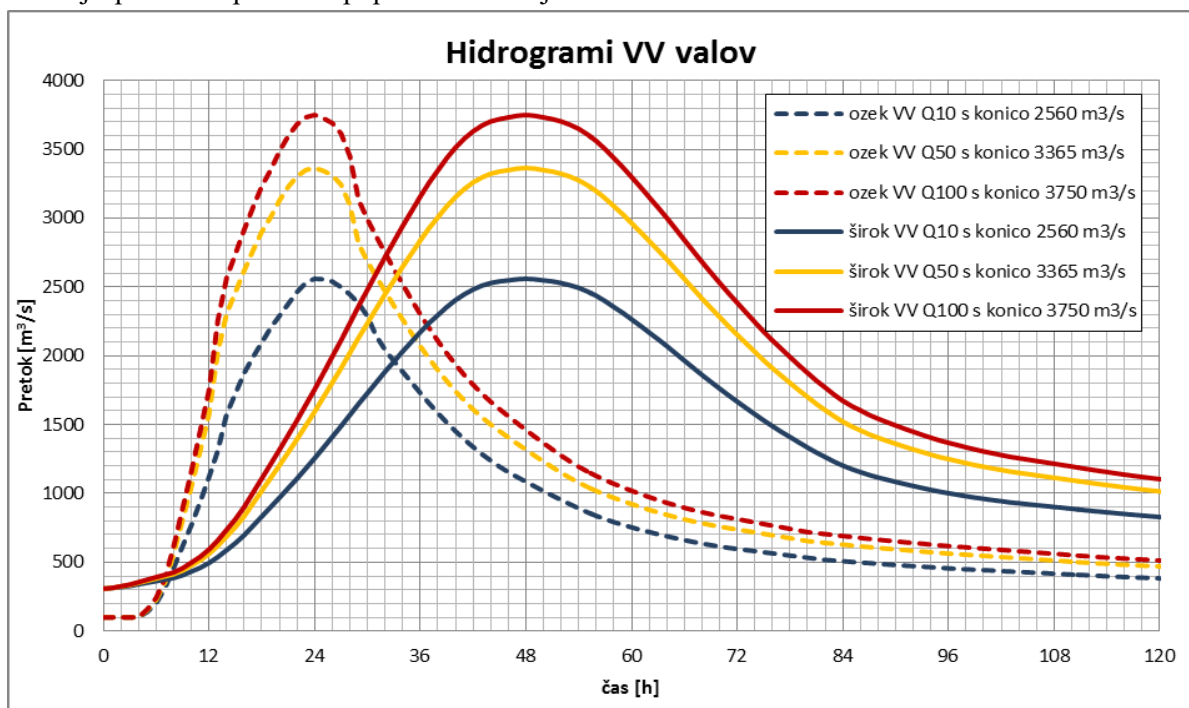


V drugi fazi smo primerjali rezultate obeh modelov in analizirali odstopanja. Glede na vzroke razhajanja rezultatov modelov smo posamezni model modificirali. Postopek smo ciklično ponavljali, dokler maksimalna odstopanja pri pretokih do  $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$  niso bila znotraj  $\pm 0,1 \text{ m}$ . Pri verifikaciji modela s poplavnim valom PV<sub>4,s</sub> (preglednica 1) so bila največja odstopanja znotraj  $\pm 0,12 \text{ m}$ . Glede na zadovoljivo majhna odstopanja pri celotnem razponu pretokov, upoštevanih pri umerjanju in verifikaciji modela, je mogoče trditi, da model pravilno kaže tudi dinamiko odtočnih razmer pri poplavnih valovih, opisanih v nadaljevanju.

### 2.3. Uporabljeni hidrogrami visokovodnih dogodkov

Hidravlično analizo smo izvedli za šest poplavnih valov. Uporabili smo poplavne valove s tremi različnimi vrednostmi konic in dvema različnima dolžinama trajanja. Vrednosti konic valov smo izbrali tako, da pokrivajo širok razpon, od takšnih, pri katerih VVR ostajajo zaprti, na odsekih reke Save zunaj vpliva HE pa se na poplavno območje

razlije le konica poplavnega vala, do takšnih, pri katerih je volumen vala nad pretočnostjo struge zelo velik, retenzija se polni tudi preko VVR in je ob nastopu konice že povsem zapolnjena ter na ta način nima velikega vpliva na preoblikovanje hidrograma poplavnega vala. Za obravnavani odsek reke Save smo obravnavali poplavne valove s povratnimi dobami 10, 50 in 100 let. Pri tem smo prevzeli vrednosti pretokov po hidrološki študiji iz leta 2011 (IzVRS, 2011). Ker na odseku reke Save med sotočjem Save in Savinje in mestom Krško ni večjih razlivnih površin, niti ni večjih pritokov, smo uporabili VV valove s konicami, ki veljajo za odsek reke Save med Krškim in Brežicami (konice VV valov so  $Q_{10} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{50} = 3365 \text{ m}^3/\text{s}$  in  $Q_{100} = 3750 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dodatno smo na odseku med Krškim in državno mejo upoštevali pritoke: Krko, Gabernico in Sotlo. Za posamezno povratno dobo smo za reko Savo upoštevali ozek in širok poplavni val. Pri enaki vrednosti konice ima ozki poplavni val krajši čas trajanja, gradient naraščajoče in padajoče faze hidrograma je večji, volumen pa manjši kot pri širokih poplavnih valovih. Prikaz in primerjava poplavnih valov sta na sliki 3.



**Slika 3:** Hidrogrami VV valov, ki so bili upoštevani pri optimizaciji obratovanja HE na spodnji Savi.

**Figure 3:** Hydrographs of the high water waves considered for the optimization of HPP operation on the Lower Sava.

## 2.4. Izhodišča in cilji optimizacije prevajanja VV valov preko verige HE

Pri prehodu poplavnega vala v nezajezeni reki se voda razlije iz struge in polni poplavna območja, kar upočasnjuje naraščanje pretoka in zmanjšuje hitrost potovanja poplavnega vala. Z vzpostavitvijo energetskih zajezitev in z izgradnjo protipoplavnih varovalnih in energetskih nasipov se zadrževalna sposobnost rečnih odsekov zmanjšuje. Posledično se vzdolž zajezene rečne odseka spremenita tako pretok kot hitrost potovanja poplavnega vala: pojavi se nevarnost povečanja pretoka konice poplavnega vala (nad naravnega), pričakuje se pospešitev potovanja poplavnega vala in sprememba sočasnosti (koincidence) pojava visokih pretokov Save in njenih pritokov.

Na velikost sprememb pretoka in hitrosti potovanja poplavnega vala je mogoče pomembno vplivati z ustreznim vodenjem poplavnega vala preko akumulacije in prelivnih objektov, torej z ustreznim obratovanjem zapornic na jezovni zgradbi. Cilj prevajanja poplavnega vala je približati se v največji možni meri naravnemu rečnemu režimu pri visokih vodah.

Specifične zahteve prostora ob spodnji Savi narekujejo nekatere omejitve pri načrtovanju evakuacije visokih voda preko verige:

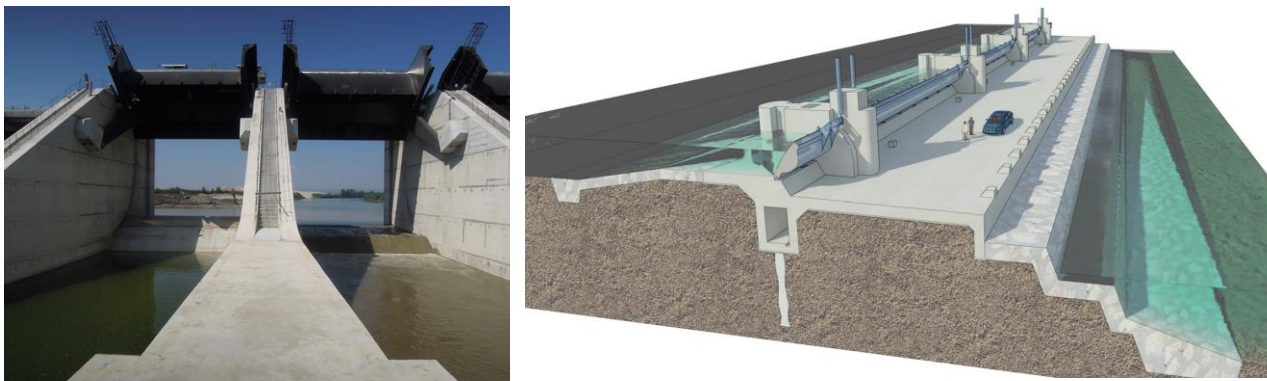
- Zahtevana je poplavna varnost poselitve in nekatere infrastrukture ob Savi.
- Poplavna varnost NEK se ne sme zmanjšati.
- Zagotoviti je treba naravni odtočni režim visokih voda dolvodno od verige.

Poleg tega smo s predhodno analizo več konceptov obratovanja HE v času visokih voda ugotovili nekaj hidravličnih izhodišč:

- Z obratovanjem HE v času naraščanja pretoka poplavnega vala se volumen vode v bazenu ne sme zmanjševati.

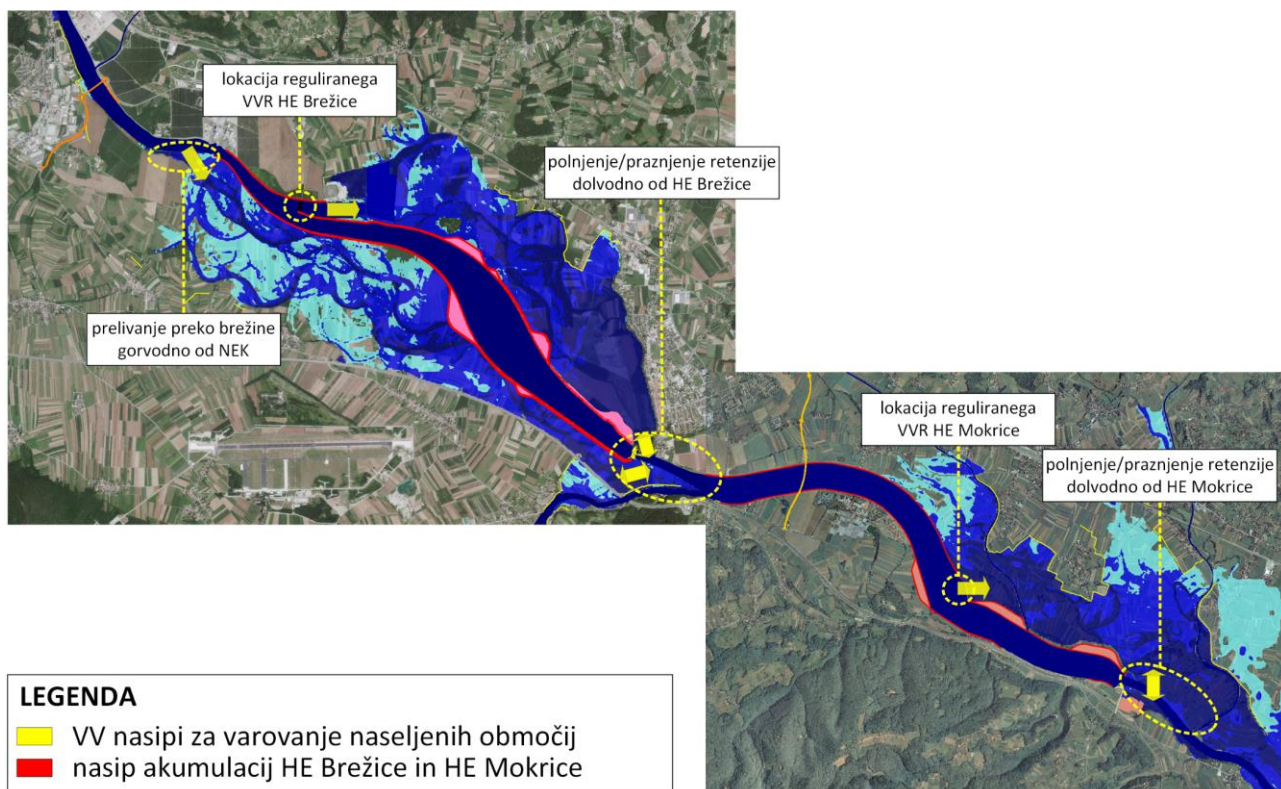
- Z naraščanjem pretoka v reki je treba zniževati nivo gladine na pregradi. S tem znižujemo potrebno višino visokovodnih nasipov vzdolž bazenov.
- Ohranjati je treba karakteristike poplavnega vala vzdolž verige HE. Ohranjati je možno velikost pretoka konice poplavnega vala in obliko vala, ni pa možno ohraniti naravne hitrosti potovanja vala vzdolž bazenov.

S hidravlično analizo smo preverili več konceptov obratovanja verige HE na spodnji Savi v času visokih voda. Uravnavanje volumna v akumulacijskih bazenih se vrši z uravnavanjem nivoja gladine pri pregradnem objektu, tj. zgornje vode, kar dosežemo z ustreznim obratovanjem z zapornicami na jezovih (slika 4, levo). V odvisnosti od pretoka Save je velikost znižanja zgornje vode določena s t. i. »denivelacijsko krivuljo«. Na odseku reke Save med sotočjem Savinje in mestom Krško ni mogoče vplivati na preoblikovanje VV valov, saj ob akumulacijah ni retenzijskih površin (Brenčič et al., 2018b). Do pretoka, ko delovanje HE preide na prosti preliv, HE na odseku reke Save med Vrhovim in Krškim, delujejo po denivelacijski krivulji, ki ohranja konstantni volumen v akumulaciji (IBE, 2012). V primeru zmanjševanja volumna v posamezni akumulaciji bi dolvodno otekala večja količina vodne mase kot priteka v akumulacijo, kar pomeni, da bi se razmere dolvodno poslabšale. V nasprotnem primeru, torej da bi se volumen v posamezni akumulaciji povečeval, bi gladina v akumulaciji naraščala, kar bi zmanjševalo poplavno varnost območij ob akumulaciji. Na območju HE Brežice in HE Mokrice, kjer se tudi po izgradnji HE ohranjajo retenzijske površine, smo morali z obratovanjem hidromehanske opreme na jezovni zgradbi uskladiti tudi razlivanje vodne mase v retenzijske površine preko VVR (slika 4, desno) oziroma preko urejene desne brežine s fiksnim prelivnim robom gorvodno od jezu NEK. Lokacije, kjer prihaja do razlivanja vode v retenzijo oziroma vračanja nazaj v strugo, so prikazane na sliki 5.



*Slika 4: Segmentni zapornici z zaklopkami HE Brežice (levo) in VVR z zaklopkami (desno).*

*Figure 4: Segment gates with flaps of HHP Brežice (left) and high water spillways with flaps (right).*



*Slika 5: Lokacije na območju HE Brežice in HE Mokrice, kjer prihaja do razlivanja/vračanja vodne mase na retenzijske površine oz. z njih.*

*Figure 5: Locations of spilling/returning of water mass to/from the retention area for HPP Brežice and HPP Mokrice.*

Analizo smo izvedli za obratovanje posamezne HE z različno hitro denivalacijo glede na skupni pretok reke Save. Poleg vpliva na pretok dolvodno od HE in zagotavljanja varnosti nasipov akumulacije način deniveliranja gladine v akumulacijah HE Brežice in HE Mokrice vpliva tudi na dinamiko razbremenjevanja visokih vod na inundacijo.

Želena razlivanje vodne mase v inundacijo in ohranjanje retenzijske sposobnosti poplavnih površin je mogoče doseči le ob zadostni višini gladine v akumulaciji na lokacijah prelivanja preko VVR oziroma prelivnega roba struge pri HE Brežice. Na vseh stopnjah verige HE smo analizirali vpliv različne vrednosti skupnega pretoka reke



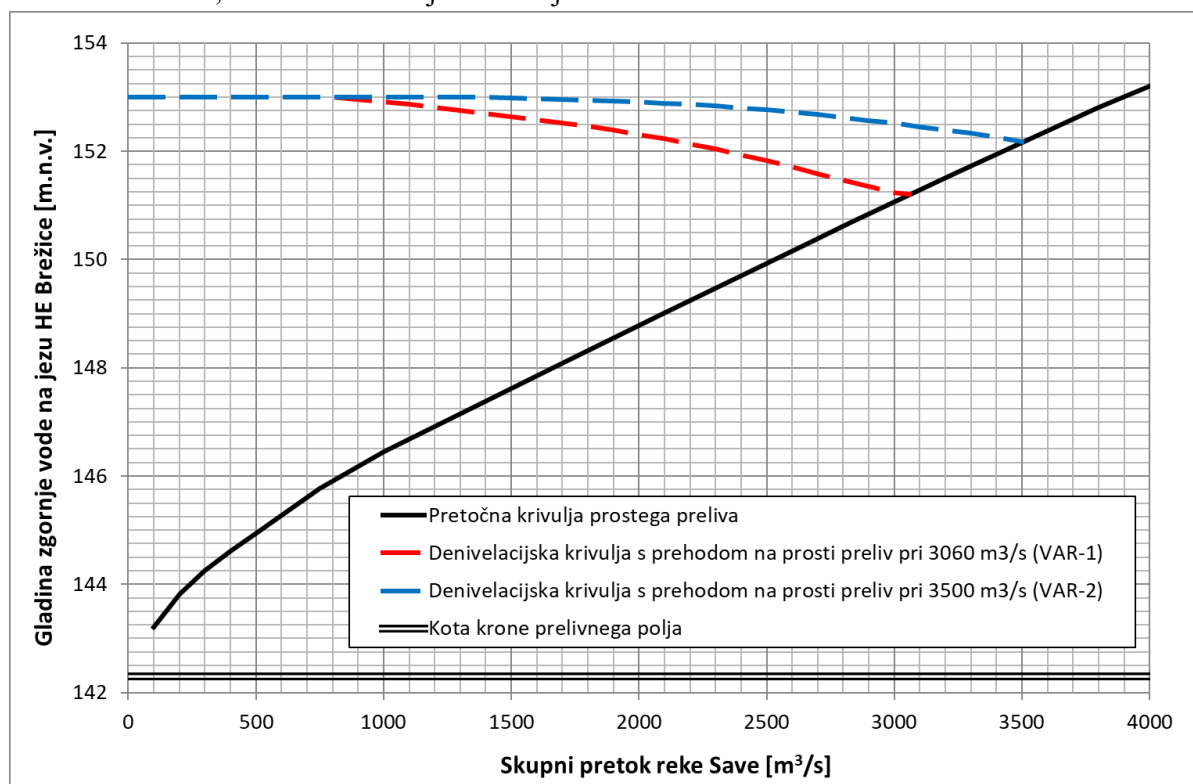
Save, pri katerem se prične denivelacija gladine v akumulaciji, in sicer v razponu med 800 in 1300 m<sup>3</sup>/s. Kot primer sta na sliki 6 prikazani denivelacijski krivulji ene od stopenj verige (HE Brežice). Nivo zgornje vode se od nominalne kote zajeze z naraščanjem pretoka znižuje, dokler se ne priključi krivulji prostega preliva. Po prvi krivulji se na prelivih HE Brežice denivelacija obratovalne gladine 153 m n. v. prične pri 800 m<sup>3</sup>/s in preide na krivuljo prostega preliva pri 3060 m<sup>3</sup>/s (VAR-1), pri drugi pa se prične pri pretoku 1300 m<sup>3</sup>/s in preide na prosti preliv pri pretoku 3500 m<sup>3</sup>/s (VAR-2). Pri usklajevanju obratovanja verige smo pri obratovanju HE Brežice po VAR-2 za HE Mokrice preverili možnost obratovanja brez denivelacije zgornje vode, torej se v akumulacijskem bazenu vzdržuje konstantna gladina, dokler niso zapornice povsem izvlečene iz vodnega toka in HE brez deniveliranja zgornje vode preide na prosti preliv. V tem primeru se v akumulaciji zadržuje dodatno količino vodne mase, s čimer se zvišajo vodostaji

vzdolž akumulacije HE Mokrice, kar je ugodno s stališča prelivanja vode preko VVR na inundacijo, treba pa je ob tem preverjati in ohranjati tudi varnost nasipov.

### 3. Rezultati in diskusija

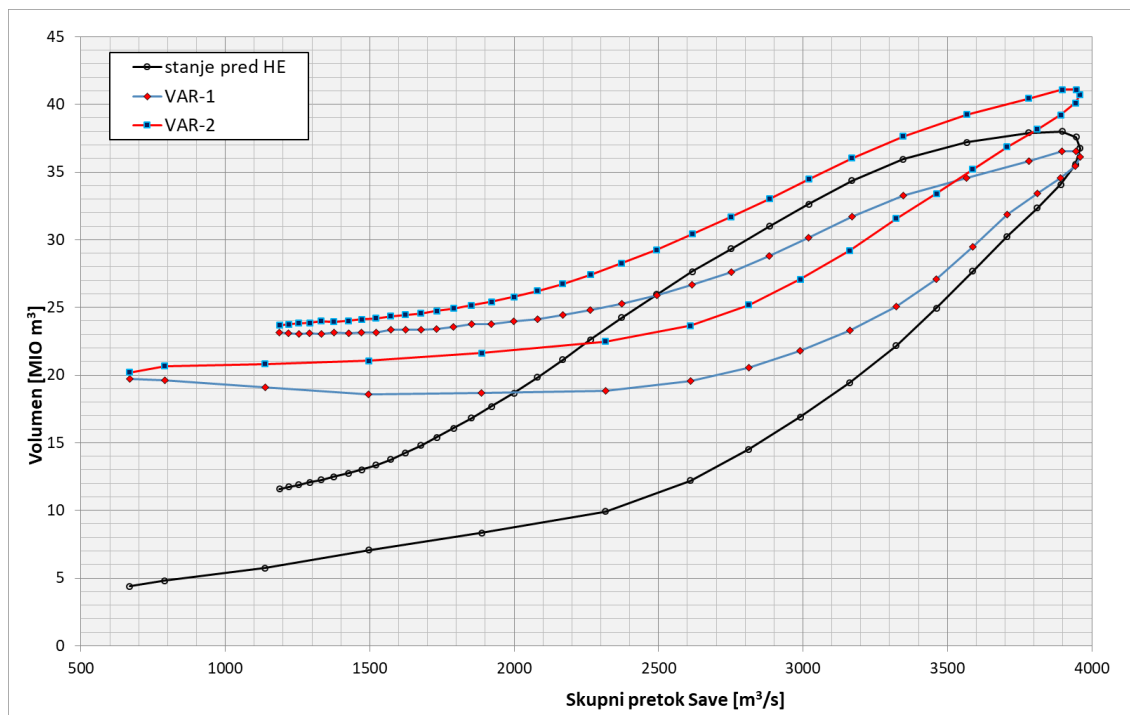
Na podlagi analiz smo potrdili koncept obratovanja stopenj v verigi po pretoku in z vsaj konstantnim volumnom vode v posameznem bazenu v času naraščanja pretoka poplavnega vala. Pri tem načinu ne prihaja do povečevanja pretoka vzdolž verige nad naravnega, kar se sicer dogaja pri drugih konceptih obratovanja.

Slika 7 prikazuje primerjavo spreminjanja volumna vode na odseku HE Brežice (upoštevani je volumen vode v akumulaciji in inundaciji), ob upoštevanju denivelacijskih krivulj na jezovni zgradbi HE Brežice, prikazanih na sliki 6.



Slika 6: Varianti denivelacijskih krivulj zgornje vode HE Brežice.

Figure 6: Drawdown curve variants of upper water level of HPP Brežice.



**Slika 7:** Spreminjanje skupnega volumna vode na območju HE Brežice v odvisnosti od skupnega pretoka reke Save za stanje brez HE in za prikazani krivulji obratovanja.

**Figure 7:** Changes in total water volume in the HPP Brežice area of influence in dependence on the Sava river discharge for a state without HPP and the presented drawdown curves.

V primerjavi s skupnim koristnim volumnom akumulacijskih bazenov HE Save imajo poplavni valovi do nekaj desetkrat večji volumen. Zato npr. s predpraznjenjem ne bi dosegli ugodnega učinka pri prevajanju VV valov oziroma bi bil vpliv takšnega načina obratovanja zanemarljiv. Prav tako je predpraznjenje lahko tudi sporno, saj se na ta način povečuje pretok na odsekih dolvodno, posledično pa lahko tudi poplavna nevarnost. Primerjava volumnov na sliki 7 kaže, da se pri hitrejši denivelaciji zgornje vode (VAR-1) skupni volumen vodne mase v akumulacijskem bazenu in obvodnem prostoru zmanjšuje, torej se v fazi deniveliranja z odseka HE Brežice dolvodno spušča večji pretok kot priteka v bazen HE Brežice skozi HE Krško. Pri denivelaciji zgornje vode po VAR-2, ki je usklajena z obratovanjem gorvodnih HE, pa se volumen vodne mase ohranja, oziroma celo povečuje, tj. se na območju zadrži dodatna količina vodne mase.

### 3.1. Sava dolvodno od mesta Krško

Pri analizi hidravlično-hidroloških razmer odseka Save dolvodno od Krškega v času visoke vode smo

ugotovili, da obsežne retenzijske površine ob Savi v tem odseku lahko akumulirajo znaten delež poplavnega vala. V primeru razlitja vode iz struge pride vzdolž odseka do t. i. »učinka suhega zadrževalnika«, z značilno sedlasto obliko izhodnega hidrograma. Na tem odseku Save se je ta oblika v preteklosti pojavila pri več poplavnih valovih in je tudi dokumentirana (Strojan et al., 2010; Rak et al., 2012). Učinek tega pojava je dvojen: znižanje konice poplavnega vala dolvodno in zakasnitev njenega nastopa. Če razlivanja ne bi bilo, bi bil čas potovanja konice vala na tem odseku hitrejši za 260 min, sama konica vala pa višja za 145 m³/s. Preoblikovanje in sedlasta oblika VV vala na odseku dolvodno od območij z retenzijsko sposobnostjo kasneje prikazujemo v poglavju 3.3.

Iz navedenega smo za koncipiranje objektov HE Brežice in HE Mokrice izluščili dve najpomembnejši hidravlični zahtevi, ki zagotavljata izpolnjevanje vseh potrebnih pogojev:

- zniževanje zgornje vode v času visokih voda po predpisu t. i. denivelacijske krivulje in

- ohranjanje oz. nezmanjševanje obstoječih retenzijskih površin.

Prva zahteva se izpolni z ustreznim obratovanjem z zapornicami na jezui v času visoke vode. Za izpolnitev druge pa je bilo treba razviti mehanizem kontroliranega poplavljanja levih in desnih poplavnih površin, skupne širine pribl. 3 km.

### 3.2. Kontrolirano poplavljanje poplavnih površin

Z odlivanjem vode iz struge na poplavne površine vplivamo na višino konice poplavnega vala in na hitrost potovanja vala. Velikost vpliva pa je odvisna od časa začetka prelivanja, razpoložljivega volumna retenzije in odtočnih razmer čez retenzijo. Slika 8 prikazuje na diagramu A največji izkoristek retenzije, na diagramu B pa primer, ko je retenzijski prostor napolnjen, še preden se pojavi konica VV vala, zato konica ostane nespremenjena.

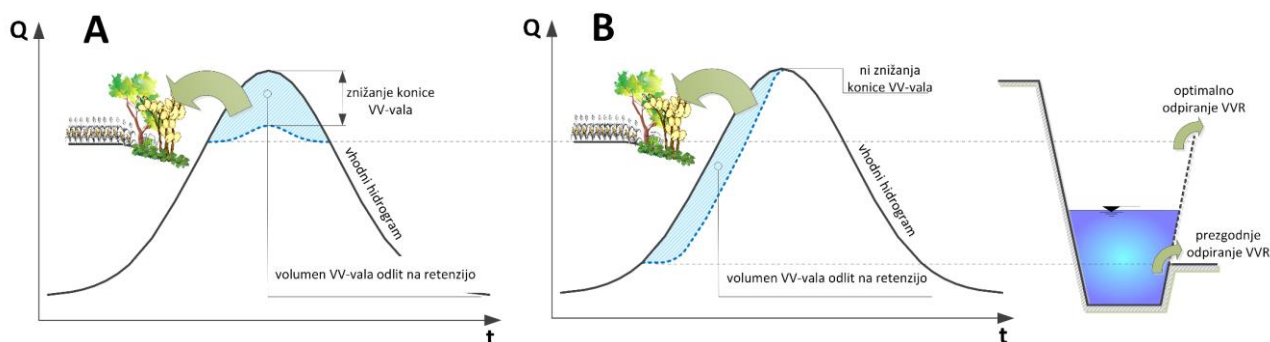
Za območje HE Brežice smo s hidravličnimi analizami določili ustrezna razmerja med pretoki po bazenu in po obeh inundacijah ter glede na topografske značilnosti območja ustrezno zasnovali prelivne objekte iz bazena na levi in desni breg. Koncept razlivanja vode iz struge na poplavna območja in razmerje med pretoki je moral zagotavljati največji možni hidravlični učinek na znižanje pretoka konice poplavnega vala in zakasnitev konice vala dolvodno.

Na levem bregu je bil tako zasnovan visokovodni razbremenilnik. Na desno poplavno območje pa se visoke vode prelivajo preko urejenega roba obstoječe brežine.

S hidravličnimi analizami bazena HE Brežice smo ugotovili, da je s stališča odtočnega režima in poplavne varnosti najugodnejše obratovanje VVR s pričetkom odpiranja pri pretoku Save, ki ustreza 20-letni povratni dobi ( $Q_{20,HE\ Brežice} = 2900\text{ m}^3/\text{s}$ ), nato pa se pretok preko VVR povečuje do nastopa 100-letne visoke vode Save, ko je VVR popolnoma odprt. Na desno poplavno območje se visoke vode prelivajo preko urejenega roba obstoječe brežine gorvodno od jezui NEK, pri čemer se voda prične prelivati pri nastopu 10-letne visoke vode.

Upravljanje gladine na glavni pregradi in s pretoki preko VVR se izvaja glede na pretok preko gorvodne HE Krško. Preko desne brežine se voda razliva enako kot pred izgradnjo HE.

Podobno smo koncipirali tudi HE Mokrice. Tudi za HE Mokrice je predvidena izgradnja levoobrežnega VVR. Desna retenzija HE Mokrice na območju Čateškega polja bo Savi z izgradnjo HE Mokrice odvzeta. Tudi na tem odseku so rezultati hidravlične analize pokazali optimalni začetek odpiranja VVR pri 20-letnem pretoku Save ( $Q_{20,HE\ Mokrice} = 3130\text{ m}^3/\text{s}$ ). Tak način obratovanja izkazuje najnižjo konico hidrograma na državni meji z Republiko Hrvaško, hkrati pa tudi poveča poplavno varnost.



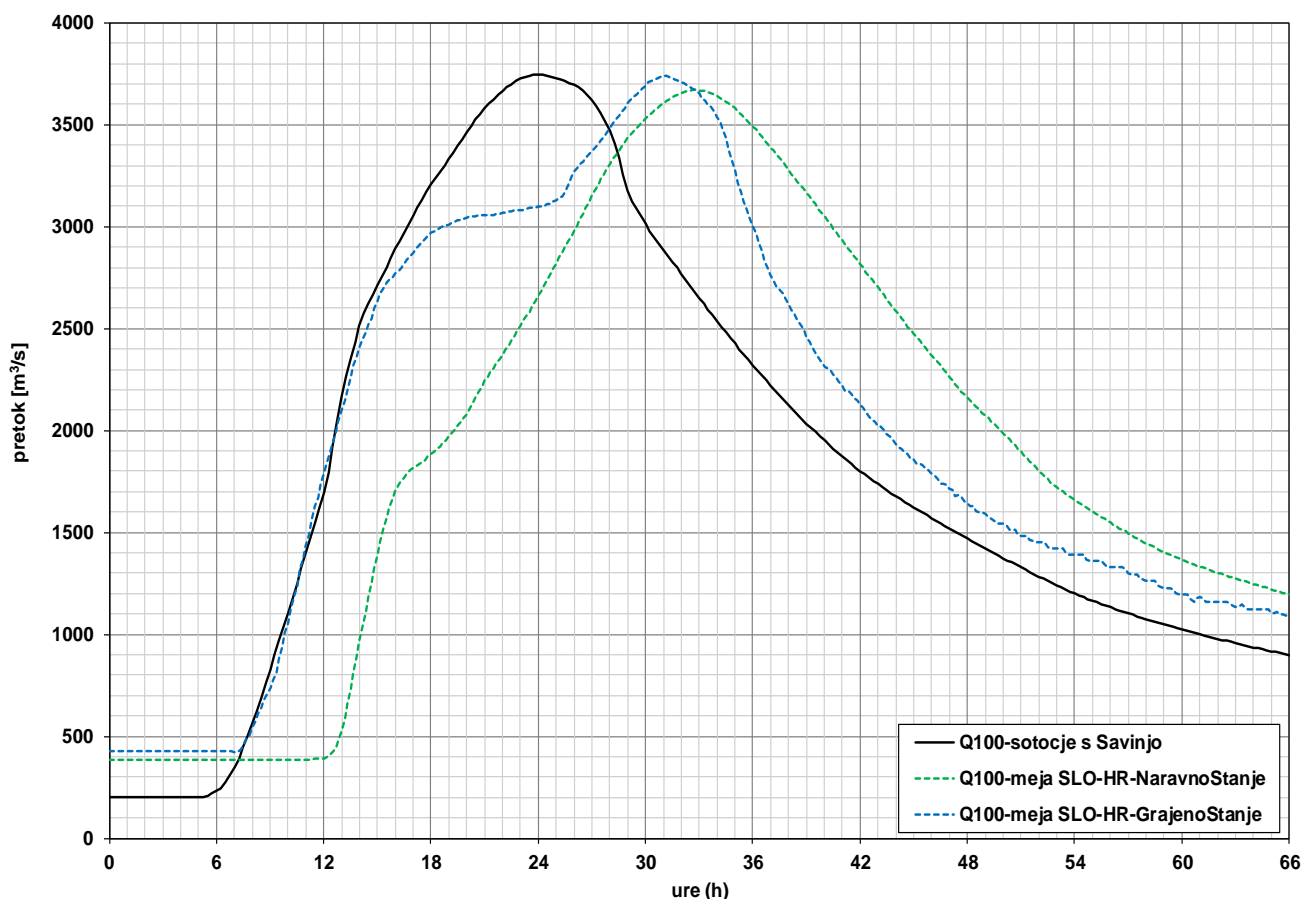
**Slika 8:** Različno preoblikovanje hidrograma VV vala glede na začetek prelivanja na retenzijo: A – s kasnejšim odpiranjem VVR ohranjamo retenzijo za konico VV vala; B – pri prezgodnjem odpiranju VVR retenzijski volumen zapolni že vodna masa v zgodnji naraščajoči fazi hidrograma.

**Figure 8:** Various transformation of the HW wave hydrograph of the river channel according to the beginning of the spill on the retention area: A – opening high-water spillways later helps save the retention volume for the peak of the HW wave; B – if the high-water spillways are opened too early, the retention volume is already filled by the water mass in the early rising phase of the hydrograph.

### 3.3. Vpliv obratovanja HE Brežice in HE Mokrice na odtočni režim

Med potovanjem VV vala preko verige HE prihaja do transformacije vala, pri čemer na preoblikovanje in čas potovanja VV vala, tj. znižanje konice in podaljševanje potovalnega časa vala ter posledično ugoden vpliv na poplavno varnost dolvodnih območij, pomembno vplivajo obvodna ravninska območja, kjer se visoke vode lahko razlijejo in zadržijo. V primeru spodnje Save se na odseku med HE Vrhovo in HE Krško, zaradi razmeroma ozke doline, brez izrazitih poplavnih površin, hidrogram le malo spremeni. V območju pretokov, kjer se na prelivih izvaja denivelacija zgornje vode, prihaja do pospešitve vala, v območju pretokov stalne zaježitve in pri prostem prelivanju pa karakteristike hidrograma ostajajo približno enake naravnemu valu, vendar s časovnim zamikom. Denivelacijske

krivulje HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Arto-Blanca in HE Krško tekom naraščanja pretoka ne omogočajo akumulacije znatnejših količin vode v akumulacijah. Posledica tega je, da se poplavni val s pretokom konice pod približno 3000 m<sup>3</sup>/s pospeši, in sicer se pretok, ki se v nekem trenutku pojavi na sotočju Save in Savinje, (približno) v istem času pojavi tudi v Krškem. Vrhovi visokih VV valov (npr. Q<sub>100</sub>) segajo že v območje pretokov, ko je na vseh HE že vzpostavljen prost odtok preko prelivov. Pri prostem prelivanju preko prelivov zadrževanja vode v akumulacijah ni več, dinamika potovanja poplavnega vala preko verige HE pa se približa naravnemu. Posledično se tudi hitrost potovanja vala na tem odseku približa hitrosti naravnega vala, prav tako pa se v območju visokih pretokov potek transformiranega hidrograma približa naravnemu hidrogramu (slika 9).



**Slika 9:** Transformacija ozkega  $Q_{100}$  vala na odseku reke Save med sotočjem Save s Savinjo in državno mejo z Republiko Hrvaško.

**Figure 9:** Transformation of a narrow  $Q_{100}$  HW wave along the Sava River reach between the junction of the Sava and Savinja, and the border with the Republic of Croatia.



Na odtočni režim pomembno vpliva ohranjanje retenzijskega prostora Krško-Brežiškega polja. Kot omenjeno, je z aktivacijo retenzijskih površin preko VVR pri višjem pretoku ( $Q_{20}$ ) mogoče doseči najugodnejši vpliv na odtočni režim in poplavno varnost. Ta način izkazuje najnižjo konico izhodnega hidrograma, hkrati pa tudi nekoliko poveča poplavno varnost leve retenzije, saj zmanjšuje pogostost poplavljanja. Na sliki 9 je prikazan vpliv verige šestih HE na spodnji Savi na odtočni režim na odseku Save med sotočjem s Savinjo in državno mejo z Republiko Hrvaško, za primer visokovodnega vala  $Q_{100}$ . Pri pretokih reke Save nad  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  se VVR na dolvodnih dveh HE aktivirata in sta ob konici  $Q_{100}$  že povsem odprta, zadrževalni učinek poplavnih površin se polno razvije. Nad omenjenim pretokom se potek poplavnega vala približa poteku naravnega vala, kakršen je bil pred izgradnjo hidroelektrarn. Iz hidrogramov VV valov  $Q_{100}$  na državni meji je razvidno, da pretok po inundacijah HE Brežice in HE Mokrice teče približno 7 ur. V tem času je pretok na meji, kljub naraščanju pretoka na sotočju s Savinjo, konstanten.

### 3.4. Vpliv različnih višin in oblik poplavnih valov

Rezultati analize kažejo, da se z načrtovanimi posegi in načinom obratovanja odtočne razmere najbolj izrazito spreminjajo pri VV valovih nižjih povratnih dob (tj. pri pogostejših VV dogodkih, do  $Q_{20}$ ) tudi na odseku HE Brežice in HE Mokrice. Ker VVR obeh HE ostajata zaprta do skupnega pretoka Save  $Q_{20}$ , desna retenzija na območju Čateškega polja pa se povsem zapira, so retenzijske površine aktivirane v manjši meri. Pri ozkih VV valovih se to odraža v zvišanju konice VV vala. Ob upoštevanju celotne verige HE na spodnji Savi se skupni vpliv odraža v zvišanju konice za  $155 \text{ m}^3/\text{s}$  in skrajšanju potovalnega časa za 420 min. Pri širokih VV valih nižjih povratnih dob je vpliv obratovanja, ki v manjši meri aktivira retenzijske površine, manj izrazit. Izkaže se, da je pri stanju brez HE, zaradi dolžine VV dogodka, retenzijski prostor v času nastopa konice že zapolnjen in je odlivanje vršnega dela VV vala manjše kot pri ozkih VV valovih. Konica se zato manj zniža, hkrati pa potuje hitreje.

Glede na stanje brez HE Brežice in HE Mokrice se z vplivom posegov DPN HE Brežice in DPN HE Mokrice konica širokega VV vala  $Q_{20}$  na odseku med Krškim in državno mejo celo zniža (za pribl.  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), skupni vpliv celotne verige pa na meji s Republiko Hrvaško prinese povišanje konice za  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Čas potovanja VV vala preko celotne verige HE se skupno skrajša za 200 min.

Pri VV valovih višjih povratnih dob sta VVR na obeh HE že aktivirana in ob konici tudi že povsem odprta. S tem so aktivirane tudi retenzijske površine, zaradi česar je vpliv obratovanja HE manjši. Pri ozkih VV valovih se konica pri potovanju preko območja sicer zviša, vendar pa je zvišanje glede na vrednost pretoka razmeroma majhno. Za primer VV vala  $Q_{100}$  skupni vpliv celotne verige na spodnji Savi na meji z Republiko Hrvaško prinaša povišanje konice za  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  (pri konici vhodnega vala  $3750 \text{ m}^3/\text{s}$ ) in skrajšanje potovanja za 100 min. Vpliv pri širokem VV valu pa je nekoliko manjši. Kumulativni vpliv celotne verige pri širokem VV valu  $Q_{100}$  je dvig konice za  $35 \text{ m}^3/\text{s}$  in skrajšanje časa potovanja za 50 min.

## 4. Zaključek

Pri načrtovanju hidroenergetske izrabe vodotoka, še posebej kadar gre za verigo HE, gre zaradi mnogih vpletenih morfoloških, hidroloških, hidravličnih, ekoloških in antropogenih dejavnikov za zelo kompleksne primere prostorskega umeščanja infrastrukture. Poleg zagotavljanja varnosti obratovanja posameznih stopenj verige HE in verige HE kot celote je treba upoštevati tudi zahteve ostalih uporabnikov v prostoru.

Z vzpostavitvijo energetske zajeze in z izgradnjo protipoplavnih varovalnih ter energetske nasipov se zadrževalna sposobnost rečnih odsekov zmanjšuje. Posledično se vzdolž zajezenega rečnega odseka spremenijo tako pretoki kot hitrost potovanja poplavnega vala – pojavlja se nevarnost povečanja pretoka konice poplavnega vala (nad naravnega), pospešitev potovanja vala in sprememba sočasnosti (koincidence) pojava visokih pretokov Save in njenih pritokov. Na velikost sprememb pretoka in hitrosti potovanja poplavnega vala je mogoče pomembno vplivati z ustreznim

vodenjem vala preko verige akumulacij in prelivnih objektov HE. Cilj prevajanja poplavnega vala je približati se v največji možni meri naravnemu odtočnemu režimu pri visokih vodah.

V članku smo na primeru verige HE na spodnji Savi prikazali optimiziranje delovanja prelivnih objektov na jezovnih zgradbah HE in VVR, preko katerih se v času visokih voda polnijo retenzijske površine, s čimer se ohranja zadrževalna sposobnost retenzijskih površin na obravnavanem odseku Save. Pri izvedbi hidroenergetskih in drugih ureditev ter optimizaciji delovanja verige HE so bili glavni cilji ohranjanje obstoječega stanja odtočnega režima dolvodno od verige in ohranjanje poplavne varnosti območij vzdolž verige. S predlaganim načinom obratovanja in ostalimi gradbenimi ukrepi so v največji možni meri upoštevane tako zahteve vseh uporabnikov v prostoru kot hidrološko-hidravlične zakonitosti prevajanja visokih voda Save. Obenem tako optimizirani koncept obratovanja za dane pogoje zahteva minimalne potrebne gradbene ukrepe za zaščito obrečnega prostora (VV nasipi, nadvišanje terena).

Pred pričetkom obratovanja posamezne HE se izdelajo navodila za obratovanje prelivnih objektov. Obratovalna navodila se nanašajo na pravilno in skladno manevriranje z zapornicami na jezovni zgradbi in visokovodnem razbremenilniku, ki pa mora biti usklajeno z obratovanjem ostalih HE v verigi.

Na podlagi opravljenih raziskav na odseku spodnje Save z verigo HE lahko podamo nekatere širše veljavne ugotovitve za primere načrtovanja posegov za izrabo hidroenergetskega potenciala in obratovanje verige HE na vodotokih, kjer volumni VV valov bistveno presega razpoložljive volumne akumulacij verige, negativne vplive na odtočni režim pa se preprečuje z ohranjanjem poplavnih površin:

- Za ohranjanje poplavne varnosti dolvodno se z obratovanjem HE v času naraščanja pretoka poplavnega vala volumen vode v akumulaciji ne sme zmanjševati.
- Z naraščanjem pretoka v reki je treba zniževati nivo gladine na pregradi. Na ta način se znižuje

potrebno višino visokovodnih nasipov vzdolž akumulacijskih bazenov.

- S pravilnim obratovanjem zaporničnih objektov in pravočasno aktivacijo retenzijskih površin preko visokovodnih razbremenilnikov je pri transformaciji poplavnih valov mogoče ohranjati velikost pretoka njihove konice in obliko vala.
- Denivelacijske krivulje HE tekom naraščanja pretoka poplavnega vala ne omogočajo zadrževanja znatnejših količin vode v akumulacijah. Posledično se potovanje poplavne vala pospeši, saj se pretok, ki se v nekem trenutku pojavi na vtočnem prerezu HE, v istem času pojavi tudi na iztočnem prerezu. Torej s takim načinom obratovanja ni mogoče ohraniti naravne hitrosti potovanja vala vzdolž celotne verige.
- Skupni koristni volumen akumulacijskih bazenov na obravnavani verigi HE predstavlja le majhen delež volumna vodne mase poplavnih valov (<10%), zato s predpraznjenjem akumulacij in zadrževanjem vodne mase v času nastopa poplavnih valov ni mogoče doseči ugodnega učinka pri prevajanju VV valov oziroma bi bil vpliv takšnega načina obratovanja zanemarljiv.
- Prikazani način obratovanja je možno uporabiti tako na akumulacijah v ozkih rečnih dolinah kot tudi na akumulacijah v širokih rečnih dolinah z retenzijsko sposobnostjo. Pri slednjih je na akumulacijah treba predvideti dodatne stranske prelivne objekte, preko katerih se v času poplavnih dogodkov polnijo retenzijske površine.

## Viri

DHI (2012). MIKE 21 flow model – Hydrodynamic Module. Scientific Documentation. Hørsholm, Danish hydraulic institute.

IBE (2012). Obratovanje verige hidroelektrarn na Spodnji Savi pri visokih vodah Save. Ljubljana.

Brenčič, M., Kvaternik, K., Steinman, F., Rak, G. (2018a). Obratovanje verige hidroelektrarn na Spodnji Savi pri visokih vodah v primeru izjemnih obratovalnih dogodkov. Ljubljana.

- Brenčič, M., Širca, A., Steinman, F., Rak, G. (2018b). Primerjava hidrogramov odtoka Save na državni meji za stanje naravnega vodotoka in po izgradnji verige HE na Spodnji Savi. Ljubljana.
- ICOLD Bulletin (2002). Risk Assessment. In Dam Safety Management. Pariz, Francija.
- IzVRS, januar 2011, Verjetnostna analiza spremenjenih vrednosti visokih vod Save za v.p. Radeče, Dopolnitev 2. Ljubljana.
- Jansen, J., Lariyah, M.S., Nor Bin Mohamed Desa, M., Julien, P.Y. (2013). Hydropower reservoir for flood control: a case study on ringlet reservoir, Cameron highlands, Malaysia. *Journal of flood engineering* 4(1): 87–102.
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P.D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J. C. J. H., Ward, P.J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, 3733–3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>.
- Kobus, H. (1980). Hydraulic Modelling, Verlag Paul Parey, Hamburg, 323 p.
- Mlačnik, J., Banovec, P., Bombač, M. (2007). Hidravlična modelna raziskava segmentnih zapornic HE Boštanj: poročilo. Ljubljana.
- Mlačnik, J., Mišigoj, S. (2011). Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: hidravlična modelna raziskava visokovodnih razbremenilnikov HE Brežice, HE Mokrice: poročilo. Ljubljana.
- Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Čiuha, D. (2012). Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: poročilo. Ljubljana.
- Parvez, I., Shen, J.J., Khan, M., Cheng, C. (2019). Modeling and Solution Techniques Used for Hydro Generation Scheduling. *Water* 11. <https://doi.org/10.3390/w11071392>.
- Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty, S., Singh, R., Raghuwanshi, N.S. (2009). Flood Inundation Modeling using MIKE FLOOD and Remote Sensing Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 37, 107–118.
- Pircher, W. (1990). The contribution of hydropower reservoirs to flood control in the Austrian Alps, Lusanne: *Hydrology in Mountainous Regions*: 1 – 8.
- Popa, R., Popa, F., Popa, B., Zachie-Zlatea, D. (2010). Optimization of the weekly operation of a multipurpose hydroelectric development, including a pumped storage plant. *Earth and Environmental Science* 12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/12/1/012118>.
- Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. (2012). Uporaba hibridnih hidravličnih modelov pri načrtovanju hidroelektrarn na Spodnji Savi. *Acta hydrotechnica* 25, 42, 59–70.
- Rak, G., Kozelj, D., S., Steinman, F. (2016). The impact of floodplain land use on flood wave propagation. *Natural Hazards* 83, 1, 425–443. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2322-0>.
- Ren, M., He, X., Kan, G., Wang, F., Zhang, H., Li, H., Cao, D., Wang, H., Sun, D., Jiang, X., Wang, G., Zhang, Z. (2017). A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water* 9, 1–13. <https://doi.org/10.3390/w9030152>.
- Samantaray, D., Chatterjee, C., Singh R., Kumar Gupta, P., Panigrahy, S. (2014). Flood risk modeling for optimal rice planning for delta region of Mahanadi river basin in India. *Natural Hazards* 76: 347–372. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1493-9>.
- Sakr, A.F., Dorrah H.T. (1985). Optimal Control Algorithm for Hydropower Plants Chain Short-term Operation. *IFAC Proceedings* 18 (11): 165–171.
- Sekretarev, Y., Sultonov S., Nazarov, M. (2016). Optimization of Long-Term Modes of Hydropower Plants of the Energy System of Tajikistan. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): 1–5.
- Strojan, I., Kobold, M., Polajnar, J., Šupek, M., Pogačnik, N., Jeromel, M., Petan, S., Lalić, B., Trček, R. (2010). Poplave v dneh od 17. do 21. septembra 2010. Mišičev vodarski dan: zbornik referatov: 1 – 11.
- Vanderkimpfen, P., Melger, E., Peeters, P. (2009). Flood modeling for risk evaluation – a MIKE FLOOD vs. SOBEK 1D2D benchmark study. *Flood Risk Management: Research and Practice*, 77–84.
- Ward, P.R.B., Räsänen, T.A., Meynell, P.J., Ketelsen, T. (2013). Flood control challenges for large hydroelectric reservoirs: Nam Theun-Nam Kading Basin, Lao PDR. Project report: Challenge Program on Water & Food Mekong project MK3 “Optimizing the management of a cascade of reservoirs at the catchment level”. ICEM – International Centre for Environmental Management, Hanoi Vietnam.

Zhou, X., Yang, B., Wang, Z., Shan, J. (2011). Comparative study on domestic and foreign flood control standards of reservoir project. *Water Power*, 37, 72–74.

Zhou, C., Sun, N., Chen, L., Ding, Y., Zhou, J., Zha, G., Luo, G., Dai, L., Yang, X. (2018). Optimal Operation of Cascade Reservoirs for Flood Control of Multiple Areas Downstream: A Case Study in the Upper Yangtze River Basin. *Water* 10, 1–24.  
<https://doi.org/10.3390/w10091250>.

Weisgerber, A., Gutierrez-Andres, J., Wilson, G., Marias, F., Karanxha, A., Clarke, R., Millington, R. 2010. Physical-computational modelling comparison in Ireland. International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Nanjing, Kitajska, 192–198.