

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 izvirna 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:

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. 2012. Uporaba hibridnih hidravličnih modelov v postopku načrtovanja hidroelektrarn na Spodnji Savi [Elektronski vir] = The use of hybrid hydraulic models in the process of hydropower plants design on the lower Sava. Acta hydrotechnica 25, 42: 129-140.

<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a42gr.pdf>  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/4595/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 9-9-2015

UDK/UDC: 621.311.21:627.8.09(282.249)

Prejeto/Received: 6. 3. 2012

Kratki znanstveni članek – Preliminary scientific paper

Sprejeto/Accepted: 21. 5. 2012

## UPORABA HIBRIDNIH HIDRAVLIČNIH MODELOV V POSTOPKU NAČRTOVANJA HIDROELEKTRARN NA SPODNJI SAVI THE USE OF HYBRID HIDRAULIC MODELS IN THE PROCESS OF HYDROPOWER PLANTS DESIGN ON THE LOWER SAVA

Gašper Rak<sup>1,\*</sup>, Matej Müller<sup>1</sup>, Sašo Šantl<sup>1</sup>, Franci Steinman<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana

### Izvleček

V kompleksnih primerih prostorskega umeščanja infrastrukture, kot so na primer hidroenergetski objekti, ki zajemajo daljše odseke vodotokov in ki lahko pomembno spremenijo odtočni režim in poplavno nevarnost v obvodnem prostoru, je za projektante ključna zahteva natančnost in zanesljivost napovedi načrtovanega stanja. Zato se v takšnih primerih k hidravlični analizi pristopi z izdelavo tako fizičnega kot matematičnega modela. Hibridni hidravlični model združuje prednosti fizičnega in matematičnega modeliranja: fizični model natančneje opiše pojave turbulence in druge tridimenzionalne pojave, ki se pojavljajo na obravnavanem območju; matematični model pa nadgrajuje fizični model, ko je potrebno izdelati veliko število simulacij pri različnih spremembah v fazi projektiranja elektrarne in nudi boljši pregled rezultatov, kar pomembno koristi kot podpora odločanju. Takšen pristop je bil uporabljen tudi pri projektiranju hidroenergetske izrabe reke Save na območju med Krškim in državno mejo s Hrvaško, kjer je kompleksnost morfoloških, hidroloških, hidravličnih in antropogenih dejavnikov zelo velika. Poleg urejanja odtočnega režima, vezanega na obratovanje načrtovane hidroelektrarne, je bilo treba upoštevati tudi ohranjanje stanja poplavne varnosti na širšem območju jezu Nuklearne elektrarne Krško in obstoječega odtočnega režima iz obravnavanega območja dolvodno od sotočja s Krko. V prvi fazi je bil izhodiščni model uporabljen za analize obstoječega stanja (preučitev odtočnega režima, trenutnih retenzijskih sposobnosti in poplavne nevarnosti na vplivnem območju načrtovane elektrarne), v drugi fazi pa so bile z vidika poplavne varnosti z modelom analizirane variante zasnove HE Brežice in HE Mokrice ter drugi načrtovani posegi v prostor in ukrepi za zagotavljanje poplavne varnosti v vplivnem območju obeh HE. V postopku načrtovanja so bile optimizirane lokacije nasipov akumulacije, dimenzije in lokacije objektov za razbremenjevanje ob visokih vodah ter prelivni objekt HE. Ugotovili smo, da se s tako načrtovanimi objekti obstoječa poplavna in erozijska nevarnost ter ogroženost zmanjša, obstoječ odtočni režim in retenzijska sposobnost pa se bosta ohranila tudi po izgradnji vseh objektov.

**Ključne besede:** hibridni hidravlični model, poplavna nevarnost, hidroelektrarne, umerjanje, analiza občutljivosti.

---

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

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

© Rak G. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – Non Commercial – Share Alike 4.0 Licence](#).

## Abstract

In complex spatial planning cases of positioning water infrastructure such as hydropower plants, which impact longer river sections and could significantly change the run-off regime and flood hazard in the influential area, accuracy and reliability of modelling are crucial. Therefore, hydraulic analyses with both physical and mathematical models are used. Hybrid hydraulic models combine the benefits of a physical and a mathematical model: a physical model can still more precisely provide data where the influence of turbulence and other 3D flow phenomena are significant, while a mathematical model upgrades the physical model in the phase where significant number of variant analyses, planning changes and data presentations for decision support are required. Such an approach was also used in planning the exploitation of hydropower potentials of the Sava River in the section between Krško and the state border with Croatia, where the complexity of morphological, hydrological, hydraulic and anthropogenic factors is significant. Beside regulating the run-off regime, related to operation of the hydropower plant, it was also necessary to consider the conservation of the existing run-off flow regime around of the water intake structure for the Nuclear power plant Krško and conservation of the existing run-off regime from the study area downstream of the Sava-Krka confluence. In the first phase the model was used for analysing the existing state (the run-off regime, current retention capacity and flood hazard in the influential area of the planned hydropower plants), whereas in the second phase the design variants of HPP Brežice and Mokrice and all other planned encroachments and measures for assurance of flood safety in the influential area were analysed. In the design process, we optimized the location of left and right bank dike, the dimensions and location of the flood water overflow structures and the dimensions of the HPP weir structure. Thereby, the current flood and erosion hazard and risk are for the most part reduced while the current run-off regime and water retention capacity are preserved.

**Keywords:** Hybrid hydraulic model, flood hazard, hydropower plant, calibration, sensitivity analysis.

## 1. Uvod

Na območju spodnje Save je bil v okviru umeščanja bodočih pretočnih hidroelektrarn Brežice in Mokrice v prostor uporabljen hibridni hidravlični model (HHM). Tovrsten model združuje prednosti fizičnega in matematičnega modeliranja: fizični model natančneje opiše pojave turbulence in druge tridimenzionalne pojave, ki se pojavljajo na obravnavanem območju; matematični model pa nadgrajuje fizični model, ko je potrebno izdelati veliko število simulacij pri različnih spremembah v fazi projektiranja elektrarne in nudi boljši pregled rezultatov, kar pomembno koristi kot podpora odločanju. Tovrstno modeliranje omogoča tudi primerjavo rezultatov v fazi kalibracije in verifikacije modela, kar privede do zmanjšane stopnje negotovosti rezultatov, predvsem pri obravnavi dogodkov z daljšo povratno dobo. Tak pristop je bil izbran zaradi negotovosti razpoložljivih podatkov o preteklih dogodkih ter zavoljo precejšnje kompleksnosti primera, saj je na

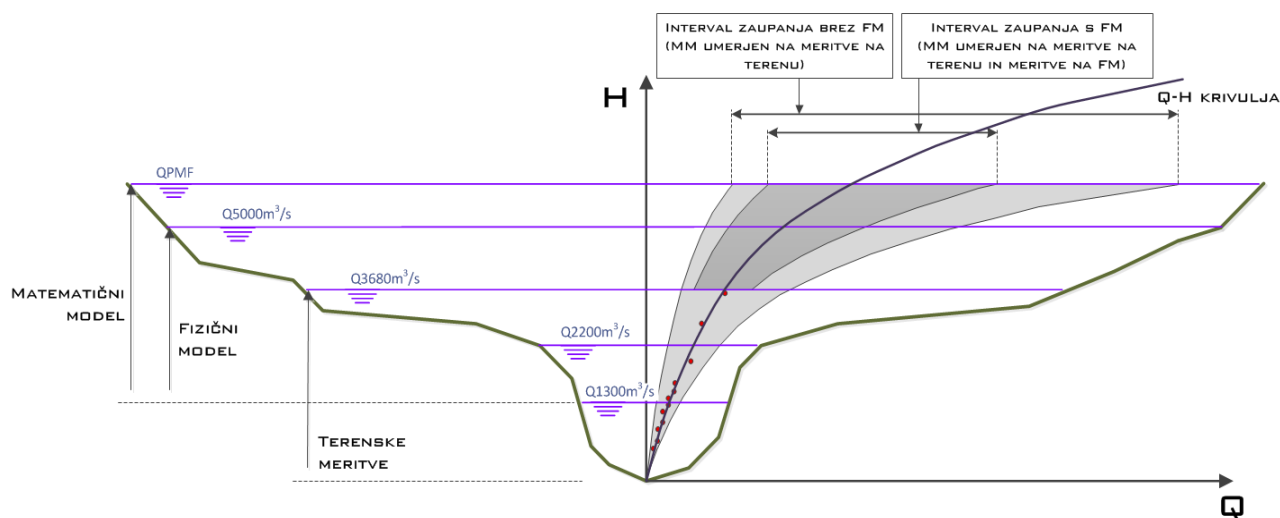
območju Krško-brežiškega polja treba upoštevati vrsto hidroloških, hidravličnih in morfoloških dejavnikov, ter antropoloških vplivov in zahtev, med katere spada tudi zagotavljanje varnega delovanja nuklearne elektrarne Krško. V prvi fazi je bil izhodiščni model uporabljen za analizo sedanjega stanja (preučitev odtočnega režima, trenutnih retenzijskih sposobnosti in poplavne nevarnosti v vplivnem območju načrtovane elektrarne), v drugi fazi pa so bile z modelom analizirane in optimizirane variante zasnove HE Brežice in HE Mokrice ter drugi načrtovani posegi in ukrepi za zagotavljanje poplavne varnosti na vplivnem območju (Rak et al., 2010).

## 2. Hibridno hidravlično modeliranje

Leta 2007 smo prepričali 6 naročnikov o potrebnosti HHM za umeščanje HE na Spodnji Savi. Osnovna ideja modeliranja s kombinacijo fizičnega in matematičnega modela je namreč

združiti prednosti matematičnega in fizičnega modela – posamezni procesi se modelirajo z orodjem, ki proces natančneje in zanesljiveje simulira, hkrati pa je možna medsebojna primerjava (Weigerber et al., 2010). Fizični modeli pri tem zagotavljajo predvsem tiste (izmerjene) informacije o procesih, ki jih tudi sodobni matematični modeli še ne morejo zadovoljivo opisati (predvsem vrtnčenje in razni s tem povezani 3D pojavi). Matematični modeli pa fizične dopolnijo ali nadomestijo tam, kjer je potrebno veliko število variantnih analiz, s preveritvijo velikega števila podatkov v postopku optimizacije načrtovanja ter tedaj, ko je potreben izčrpen in učinkovit prikaz rezultatov v postopkih odločanja. Prav tako matematični modeli omogočajo analize za veliko večja območja kot fizični modeli, ki so omejeni z zmogljivostjo laboratorija (obseg površin, zmogljivost črpališč idr.).

Z izvedbo dveh modelov istega obravnavanega območja se zagotovi tudi ustrezno medsebojno umerjanje modelov. Na primer, če je matematični model (MM), zaradi hitrejše vzpostavitve in bolj obvladljivega delovnega okolja vzpostavljen za večje poplavno območje, je dodatni fizični model (FM) potreben predvsem zaradi umerjanja matematičnega modela pri višjih pretokih, tj. tistih, ki se v naravi še niso pojavili, ali pa za umerjanje tokovnih razmer na poplavnih področjih, kjer v naravi ni bilo izmerjenih veličin toka - za umerjanje MM se torej uporabijo rezultati fizičnega modela. Zaradi tega se negotovost rezultatov pri matematičnem modeliranju zmanjša oziroma se poveča zaupanje v rezultate v območju ekstrapolacije, to je za dogodke, za katere obstaja majhna statistična verjetnost, da bi se v prihodnosti lahko zgodili (Slika 1). Tak primer je npr. pojav največjega verjetnega pretoka (angl. probable maximum flood, PMF) v območju Nuklearne elektrarne Krško (NEK).

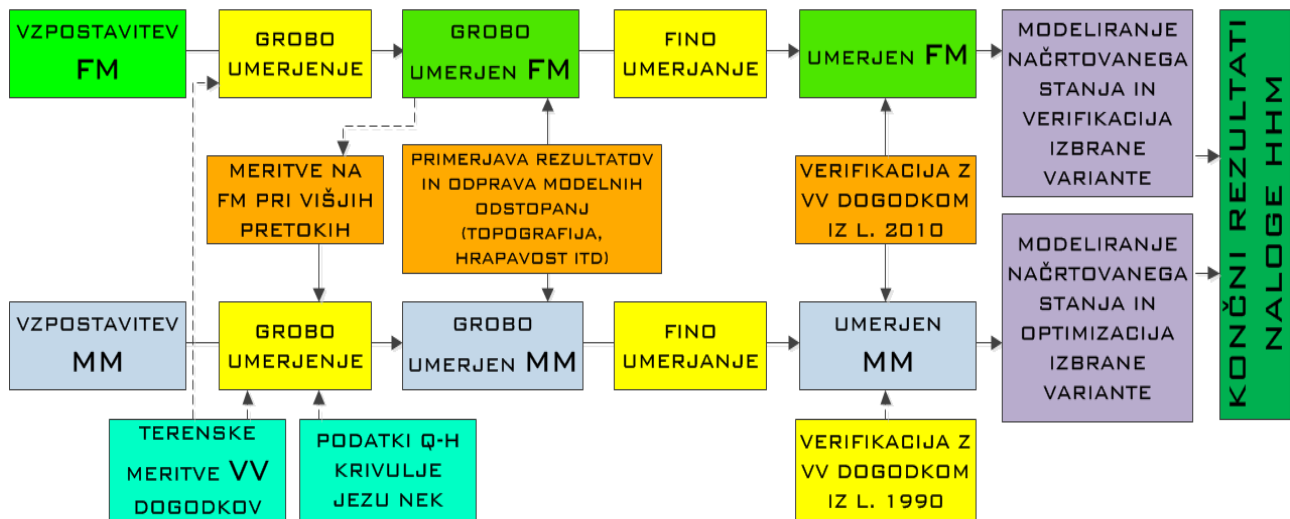


**Slika 1:** Zožitev območja negotovosti rezultatov z uporabo fizičnega in matematičnega modela (interval zaupanja ni prikazan v merilu - je le ilustrativen).

**Figure 1:** Narrowing the range of result uncertainty with the use of the physical and mathematical model (confidence interval is not presented in scale – only illustrative).

V prvi fazi modeliranja sta oba modela vzporedna in neodvisno vzpostavljena skozi standardne faze modeliranja – priprava geometrije/izgradnja modela na podlagi podatkov topografije, izmerjene v naravi, nato pa sledi umerjanje in verifikacija na pretekle visokovodne dogodke. V naslednjem koraku rezultate v prvi fazi umerjenih modelov

primerjamo in analiziramo morebitna odstopanja. Glede na vzroke razhajanja rezultatov modelov se posamezen model modificira. Postopek, ki ga imenujemo fino umerjanje, se ciklično ponavlja dokler ni dosežena želena oziroma zahtevana stopnja zaupanja v rezultate (Slika 2).



**Slika 2:** Prepletanje in povezovanje pri vzpostavitvi fizičnega (FM) in numeričnega modela (MM) za primer modeliranja območja HE Brežice.

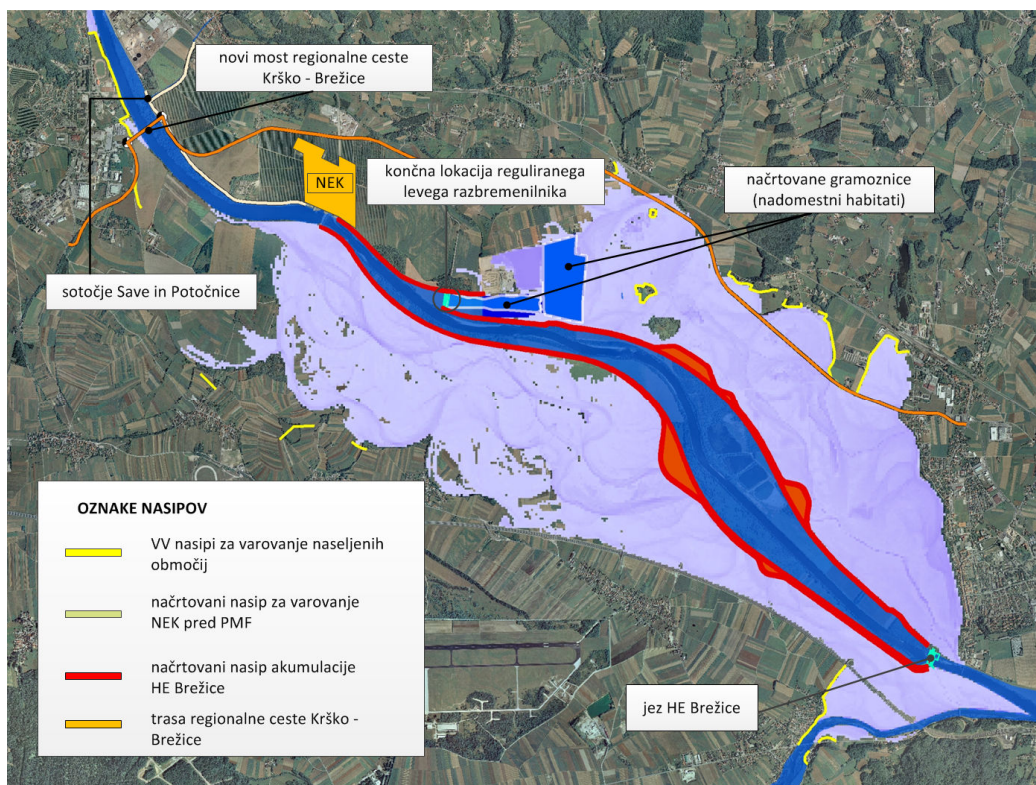
**Figure 2:** Connections between different procedures in the development of a physical (FM) and a numerical model (MM) on the example of modelling the HPP Brežice area.

### 3. Načrtovanje hidroelektrarn na Spodnji Savi

Projektiranje HE Brežice in HE Mokrice sodi med zelo zahtevne procese zaradi mnogih vpletenih morfoloških, hidroloških in hidravličnih dejavnikov v vodnem in obvodnem prostoru, katerim se pridružijo še zahteve po ohranjanju retenzijske sposobnosti Krško-Brežiškega polja. Prav tako je treba ohranjati oziroma izboljšati obstoječe odtočne razmere v okolici NEK, izpolnjevati zahteve po zagotavljanju hladilne vode in višje standarde varovanja pred poplavami (pred PMF), ter ohranjati odtočni režim na meji z Republiko Hrvaško, določen z meddržavnim sporazumom. Zaradi pomembnosti območja, kompleksne sestave vplivnih dejavnikov, obsežnih predvidenih posegov v prostor, predvsem pa zaradi pomanjkanja zanesljivih podatkov o preteklih visokovodnih dogodkih, je bil v raziskovalni nalogi za doseganje zanesljivih analiz obstoječega stanja in za optimizacije načrtovanega stanja uporabljen pristop s hibridnim hidravličnim modelom (HHM). Celotni obseg raziskav naloge, ki zajema območje od HE Krško do državne meje s Hrvaško, je bil razdeljen na 3 podobmočja. Prvi, gorvodni del območja, kjer se gradi HE Krško, je bil simuliran z običajnim, ne-distorziranim

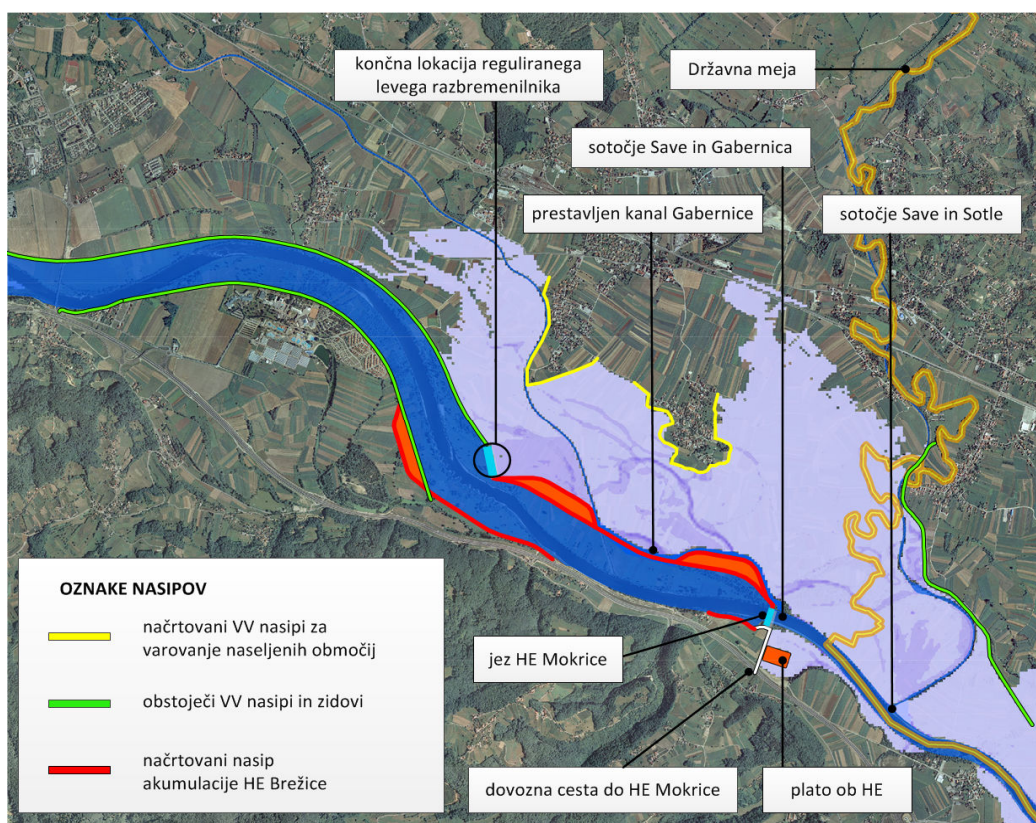
fizičnim modelom. Območje dolvodno od Krškega, kjer se Sava v času visokih pretokov razlije po obsežnih poplavnih površinah, vse do meje z Republiko Hrvaško, pa je bilo razdeljeno na dva dela, kot sta deljeni tudi območji Državnih prostorskih načrtov (DPN) za HE Brežice in HE Mokrice. DPN za HE Brežice obsega območje od Krškega do novega mostu ceste Čatež – Brežice. V DPN so zajete tudi visokovodne ureditve ob Krki za zaščito Krške vasi in Velikih Malenc. Pomembno vlogo v prostoru s svojimi posebnimi zahtevami predstavlja tudi NEK. V modelu sta bila od pritokov Save upoštevana Krka in Potočnica. Območje modela HE Brežice, kjer so bili umeščeni še drugi posegi v prostor, je predstavljeno na sliki 3.

Večjo natančnost modeliranja in ujemanja rezultatov na stiku obeh območij smo dosegli s prekrivanjem računskih območij obeh modelov. Območji HE Brežice in HE Mokrice sta bili simulirani tako s fizičnim kot matematičnim modelom, pri čemer je bilo z matematičnim modelom zajeto širše prostorsko območje. Modela se medsebojno dopolnjujeta in skupaj omogočata simulacijo vseh merodajnih scenarijev in različnih variant gradbenih ukrepov ter njihovih kombinacij v tem prostoru.



*Slika 3: Situacijski prikaz območja HE Brežice z vsemi predvidenimi posegi.*

*Figure 3: A schematic view of the area of HPP Brežice with all the planned interventions.*



*Slika 4: Situacijski prikaz območja HE Mokrice z vsemi predvidenimi posegi.*

*Figure 4: A schematic view of the area of the HPP Mokrice with all the planned interventions.*

#### 4. Vzpostavitev fizičnega modela

Zaradi obsežnosti območja obravnave je bilo le-to pri modeliranju razdeljeno na 3 fizične modele (FM) z delnim prekrivanjem obsega FM (Mlačnik et al., 2011). Ta način je omogočal večje merilo fizičnih modelov in manjše osnovne računske elemente matematičnega modela, s čimer se je povečala tudi natančnost modeliranja. Zaradi obsežnosti območja modeliranja HE Brežice in HE Mokrice sta bila fizična modela izvedena v distorziranem merilu. Na ta način se je bilo mogoče pri toku preko retenzijskih površin izogniti preveč plitvemu toku oz. vplivu površinske napetosti na obsežnih inundacijah, ter zagotoviti ustrezne meritve poteka gladin oz. globin vode. Faktor distorzije in modelnega merila je bil omejen s prostorskimi kapacitetami laboratorija, z zahtevami modelne natančnosti in hidravličnih omejitev (Kobus, 1980), ki jih podajajo enačbe:

$$n \leq 0,1(b/h)_n \quad (1)$$

$$n_{\max} = [0,2/(k/h)_n]^{1/3} \quad (2)$$

$$L_{r,\max} = C \cdot n^{10/3} \quad (3)$$

$$C = 5,65 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Re}_n^{2/3} (k/h)_n^{7/9}$$

Kjer je  $n$  faktor distorzije,  $b$  [m] širina vodne površine,  $C$  koeficient [-],  $h$  globina vode [m],  $k$  ekvivalent hrapavosti zrna [mm] (Nikuradse),  $L_r$  merilo dolžin [-],  $Q$  pretok [m<sup>3</sup>/s] in  $\text{Re}$  Reynoldsovo število [-]. Razpoložljivi prostor laboratorija je omogočal realizacijo fizičnega modela območja HE Brežice v merilu dolžin  $L_r=125$ , medtem ko bil faktor distorzije enak  $n=2$ , kar daje skupaj  $n_{\max}=2,2$  za pretok  $Q_n=5000\text{m}^3/\text{s}$ . Faktor merila pretoka je bil torej enak:

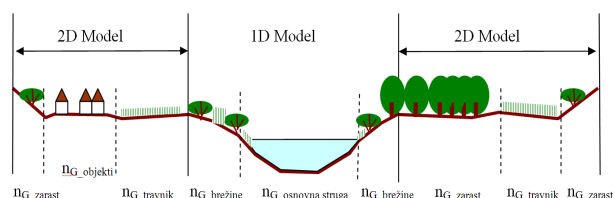
$$Q_r = L_r^{5/2} / n^{3/2} = 61763,24 \quad (4)$$

Topografija modelov je bila izvedena s pomočjo prečnih profilov in je bila zaradi zahtevnosti oblikovanja na veliki površini (površina posameznega modela je namreč merila okoli 1500 m<sup>2</sup>) izvedena v več fazah. Umerjanje modela in kasnejše meritve gladin smo izvajali s pomočjo piezometrov, vgrajenih v telo modela. Hidravlična hrapavost se je v fazi umerjanja dosegala z

vgrajevanjem večjih hrap tako v rečno korito, kot tudi na poplavne površine, na katerih se je upoštevala dejanska raba prostora (npr. sadovnjaki, gozdovi...). Tehnična hrapavost, dosežena z uporabo različnih frakcij peska, se je spreminjala v takšni meri (ti. hidravlična hrapavost), da je bil na FM dosežen potek gladin, izmerjen pri preteklih visokovodnih dogodkih v naravi (Šantl et al., 2010).

#### 5. Vzpostavitev matematičnega modela

Za matematično modeliranje smo izbrali orodje MIKE Flood, ki združuje programsko okolje za 2D modeliranje (MIKE 21) in programsko okolje za 1D modeliranje (MIKE 11) (Slika 5). 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. Manj primerni pa so za analiziranje lokalnih pojavov na stikih med 1D in 2D modelom (Weisgerber et al., 2010), tj. na prehodu iz brežine struge v inundacijo, do česar pa pri izvedbi nasipov za HE ne prihaja. Izbor programskega orodja so v nalogi HHM narekovale predvsem zahteve po analizi načrtovanega stanja, saj programska oprema MIKE 11 omogoča vgraditev različnih objektov (jezovi, razbremenilniki) z možnostjo simuliranja dinamike njihovega obratovanja v odvisnosti od časovne spremembe pretoka. Ustrezno vodenje poplavnega vala, ki ne bo povzročilo dodatne poplavne nevarnosti dolvodno, je bila namreč bistvena zahteva pri optimizaciji načrtovanja objektov HE (Šantl in Rak, 2010).



**Slika 5:** Zasnova numeričnega modela – povezovanje 1D modela vodotokov in 2D modela območij poplavljanja.

**Figure 5:** Design of the numerical model – coupling of 1D stream model with 2D model of flood-prone areas.

Ker so bile na matematičnem modelu simulirane odtočne razmere in obseg poplavljenosti tudi za 1000 in 10000 letno povratno dobo ter za PMF, je bilo območje analize pri matematičnem modelu temu primerno večje.

## 6. Umerjanje in verifikacija modelov

Tako fizični kot matematični model sta bila v prvi fazi neodvisno drug od drugega umerjena na meritve iz narave ob visokovodnih dogodkih iz obdobja 2007-2010. Pretoki Save v Krškem so znašali od  $Q=1230 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $Q=3680 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ti pretoki so bili na območju Mokric zaradi pritokov primerno večji. Pri  $1230 \text{ m}^3/\text{s}$  je vsa voda še v strugi Save, pri pretoku okoli  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  se ponekod že pojavlja delno prelivanje na retenzijo, pri dogodkih iz let 2007, 2009 in 2010, katerih pretoki so znašali od  $2460 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $Q=3680 \text{ m}^3/\text{s}$ , pa sta bili aktivni že obe retenziji. Za umerjanje so bili vzdolž odseka Krško-Brežice na voljo podatki iz 13 merilnih mest na strugi Save, ki so bila opremljena z merilnimi sondami z namenom pridobiti podatke o toku visokih vod za potrebe naloge HHM. Na območju HE Mokrice je bilo na voljo 10 enako opremljenih merilnih mest.

Po izgradnji modelov smo v prvi fazi oba modela umerjali na izvedene meritve v naravi, v drugi fazi pa smo medsebojno primerjali izmerjene rezultate na fizičnem modelu in izračunane rezultate na matematičnem modelu. Umerjanje modelov je potekalo odsekoma, s spreminjanjem hrapavosti rečnega korita pri fizičnem modelu oziroma s spreminjanjem Manningovega koeficienta hrapavosti na primernih območjih dolvodnega robnega pogoja in parametrov jezovne zgradbe NEK pri matematičnem modelu. Postopek je potekal v treh fazah:

- Umerjanje glede na izhodni, tj. dolvodni robni pogoj,
- Umerjanje parametrov jezovne zgradbe NEK, kot notranji robni pogoj,
- Umerjanje koeficientov hrapavosti struge Save in poplavnih območij.

Pri matematičnem modelu smo morali, poleg vhodnim in izhodnim robnim pogojem, veliko

pozornost posvetiti tudi notranjemu robnemu pogoju na lokaciji jezu NEK. Na pretoke do  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  smo pretočnost jezu NEK simulirali in umerjali na podlagi modelnih raziskav iz leta 1976 (Vodogradbeni laboratorij, 1976). Pri višjih pretokih pa se na desnem bregu, nasproti NEK, že pojavlja vpliv prelivanja na desno poplavno površino gorvodno od jezu NEK, in je bilo zato treba kot spodnji robni pogoj upoštevati zmanjšani (tj. dejanski) pretok v strugi ter vpliv dejanskih razmer, upoštevajoč dejanski pretok na dolvodni strani jezu.

Program MIKE Flood omogoča simulacijo razmer na jezu s prelivnimi polji na 5 načinov, upoštevaje enačbe posameznih avtorjev oz. dejanske pogoje delovanja jezu. Z analizo podanih možnosti za simulacijo eksperimentalno določene pretočne krivulje smo ugotovili, da je mogoče jez NEK ustrezno modelirati kot prelivni objekt, pri katerem se upošteva pretočna enačba, kot jo je podal Villemonte [DHI, 2009]:

$$Q = W \cdot C \cdot (H_{us} - H_w)^k \cdot \left[ 1 - \left( \frac{H_{ds} - H_w}{H_{us} - H_w} \right)^{k-0,385} \right] \quad (5)$$

kjer je  $W$  skupna širina prelivnih polj jezu,  $C$  koeficient preliva,  $k$  eksponentni koeficient preliva,  $H_{us}$  gorvodna kota gladine vode,  $H_{ds}$  dolvodna kota gladine vode in  $H_w$  kota krone jezu.

Na podlagi izmerjene prelivne krivulje jezu, podane v modelni raziskavi iz leta 1976, je bilo v postopku umerjanja za zgornjo enačbo mogoče ovrednotiti koeficienta  $C$  in  $k$ , ki imata vrednosti  $C = 2,6$  in  $k = 1,82$ . Iz zgornjega izraza pa je razvidno, da smo v MM lahko na hidravlično korekten način upoštevali tudi poglobljanje struge dolvodno od jezu NEK, tj. različne odtočne razmere pri visokih vodah od 1990 do 2010.

Verifikacijo končno umerjenega matematičnega modela smo opravili z meritvami poplavnih dogodkov, ki za umerjanje niso bili uporabljeni, tj. za poplave jeseni leta 1990 in septembra 2010. Ker ima spreminjanje struge Save svojo dinamiko, smo opravili vzdolžno analizo nivelete Save, v kateri je primerjava batimetrije iz let 1986 in 2007 pokazala, da je na nekaterih mestih prišlo do izrazitega poglobljanja. Ker ima zato struga Save



zaradi poglobljanja danes večjo pretočnost, bi pri simuliranju dogodka iz leta 1990 in upoštevanju batimetrije iz leta 2007 dobili bodisi nižje gladine in s tem manjši obseg poplavljenosti, bodisi bi za enake kote gladin in obseg poplavljenosti dobili večji pretok. Zato je bilo treba za verifikacijo z dogodkom leta 1990 upoštevati tedanjo batimetrijo struge, z uporabo takrat izmerjenih (časovno najbližjih) prečnih profilov iz leta 1986. Model, ki je bil vzpostavljen po končanju finega umerjanja, omogoča analiziranje različnih dogodkov, ki so se ali bi se lahko zgodili, oziroma določanje vplivov različnih posegov v prostor na odtočne razmere. Različne variante in modifikacije ter optimizacije posegov v prostor smo opravili z matematičnim modelom, končno varianto pa smo nato preverili še s fizičnim modelom.

## 7. Rezultati

### 7.1. Poplavna nevarnost obravnavanega območja

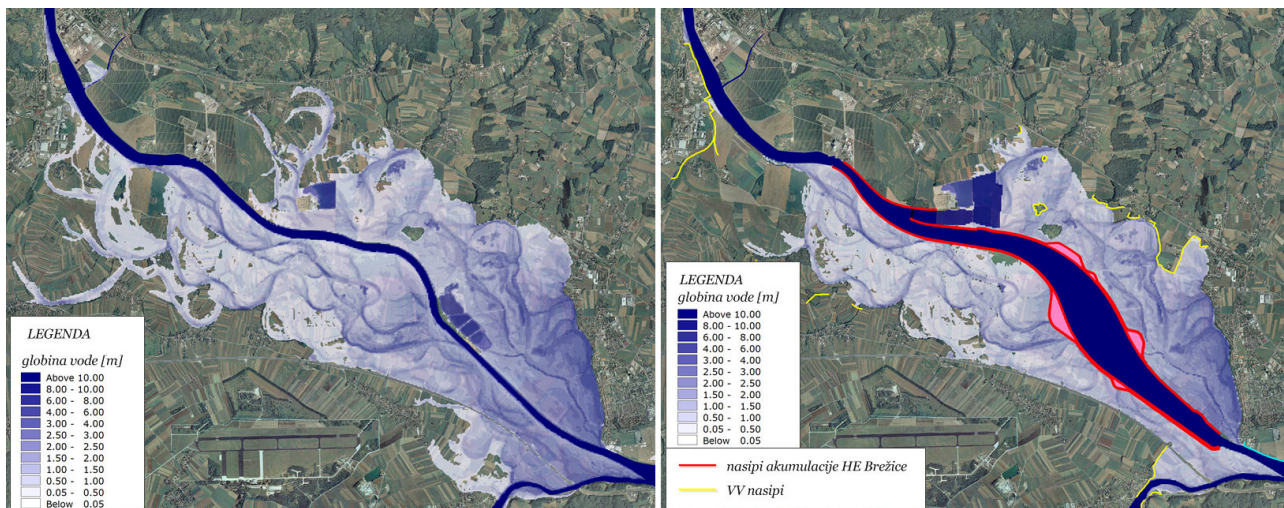
Glavna zahteva pri načrtovanju HE na Spodnji Savi je bila, da se naj poplavna nevarnost ne povečuje – torej se lahko stanje le ohranja oziroma izboljšuje. Rezultati izračunov so pokazali, da se poplavljenost na pomembnem obsegu površin zmanjša, le v zgornjem območju leve retenzije smo, zaradi razbremenilnika, v smeri severa proti železniški progi ugotovili rahlo povečanje poplavne nevarnosti, ki pa je še vedno znotraj obsega poplav leta 1990, kar je bil eden osnovnih pogojev, ki jih je bilo treba upoštevati pri analizi poplavne nevarnosti. Pri HE Brežice se s podaljšanjem nasipa na levi strani razbremenilnika sicer poplavljenost območja starih rokavov reke Save proti NEK precej zmanjša, vendar pa se zaradi skoncentriranosti celotnega pretoka na levo retenzijo preko razbremenilnika poplavijo nekatera do sedaj nepoplavljen območja. Kot primer rezultatov je podana primerjava obsega poplavljenosti območja HE Brežice za obstoječe in načrtovano stanje (*Slika 6*) pri ozkem visokovodnem (VV) valu s konico  $3960\text{m}^3/\text{s}$ .

Izhodni hidrogram iz modela HE Brežice smo uporabili kot vhodni hidrogram za model HE

Mokrice. Pri primerjavi obsega poplavljenosti za območje HE Mokrice se za VV val s konico  $3960\text{m}^3/\text{s}$  na modelu HE Brežice kot dotok na model HE Mokrice pojavi ozek visokovodni val s konico  $Q = 4085\text{m}^3/\text{s}$  za obstoječe oz.  $4120\text{m}^3/\text{s}$  za načrtovano stanje. Analiza je pokazala, da se lokalno obseg poplavljenosti poveča, na nekaterih lokacijah pa zmanjša. Zaradi koncentriranosti pretoka iz razbremenilnika na zgornjem delu leve inundacije, je na tem območju zaznati porast globin vode, kar pa smo upoštevali pri načrtovanju protipoplavnih ureditev. Območja, ki so tako poplavljenost na račun koncentriranega toka na levo inundacijo, so kmetijska zemljišča, pomembno pa je, da nekoliko povečan obseg poplavljenosti ne ogroža nobenih objektov. Zaradi prečne izravnave znotraj akumulacije HE Mokrice se je vzdolžni potek gladin pri visokih pretokih na odseku obstoječih visokovodnih nasipov znižal za približno 1m. Tako imajo obstoječi visokovodni nasipi ob Termah Čatež, ki bi bili v obstoječem stanju prelit ži pri stoletnih vodah ( $Q_{100} + 5\%$ ), zaradi zmanjšanih gladin v strugi ponovno ustrezno varnostno nadvišanje. Pri tem je treba omeniti, da bi bili pri prelitju omenjenega nasipa v obstoječem stanju ogroženi tudi nekateri objekti, do česar pri načrtovanem stanju več ne prihaja. Prav tako je treba omeniti, da so se pri načrtovanem stanju gladine na spodnjem delu leve inundacije ob železniški progi znižale, zato se je poplavna nevarnost za to infrastrukturo na tem območju zmanjšala.

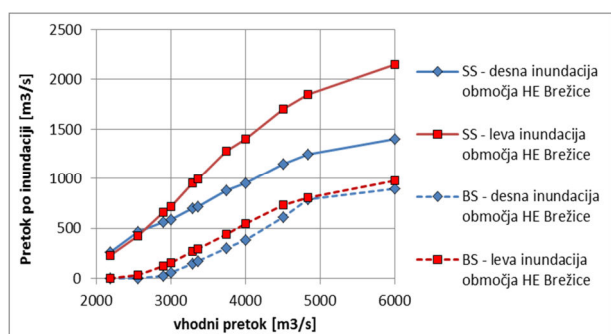
### 7.2. Retenzijski volumni za različne VV valove

Prelivanje dela visokih voda na levo retenzijo je tako za območje HE Brežice kot tudi za HE Mokrice nadzorovano preko razbremenilnika. Razbremenjevanje visokih voda iz struge na desno inundacijo je za območje HE Brežice vzpostavljeno s prostim prelivom, kar zagotavlja znižanje gladin vzdolž nasipa ob NEK. Razbremenjevanja na desno stran za območje HE Mokrice pa v načrtovanem stanju ni več, saj se celotna retenzija, ki obsega območje Čateškega polja, namenja za drugo rabo prostora.



**Slika 6:** Primerjava območja poplavljanja pred (levo) in po (desno) izgradnji HE Brežice ter ustreznih protipoplavnih ukrepov za primer ozkega visokovodnega vala s konico  $3960 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Figure 6:** Comparison of the flooded area before (left) and after (right) the construction of HPP Brežice and of the proper flood protection measures for an example with a narrow high water wave with a peak discharge of  $3960 \text{ m}^3/\text{s}$ .

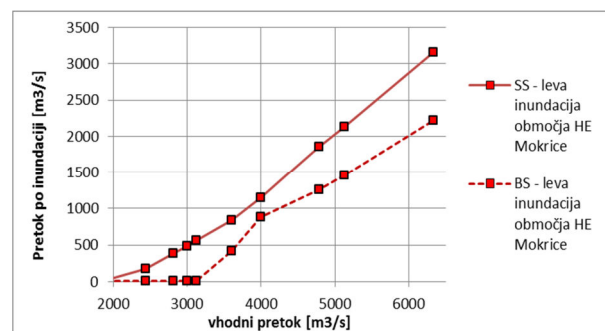


**Slika 7:** Pretoki po levi in desni inudaciji za območje HE Brežice pri obstoječem in načrtovanem stanju (SS – obstoječe stanje; BS – načrtovano stanje).

**Figure 7:** Discharges on the left and right inundation for the area of HPP Brežice at the current and designed state (SS – current state; BS – designed state).

Kako se bodo pretoki po retenzijskih površinah območja HE Brežice in HE Mokrice v načrtovanem stanju zmanjšali, je podano v diagramih (Slika 7 in 8). Manjša količina razbremenjevanja ugodno vpliva na poplavno varnost, saj se zaradi zmanjšanih pretokov po inundacijah obseg poplavljanja prav tako zmanjša. Povečan pretok v strugi, obdani z energetskimi nasipi, pa nekoliko vpliva na odtočni režim

dolvodno, kar pokažejo izhodni hidrogrami. Zmanjšanje pretokov na retenziji je razvidno iz grafov (Sliki 7 in 8), ki prikazujejo pretoke po retenziji v odvisnosti od skupnega pretoka (vhodni pretok) za obstoječe in načrtovano stanje.

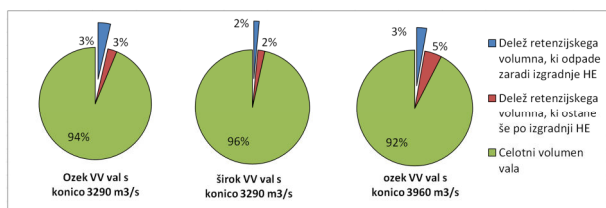


**Slika 8:** Pretoki po levi inudaciji za območje HE Mokrice pri obstoječem in načrtovanem stanju (SS – obstoječe stanje; BS – načrtovano stanje).

**Figure 8:** Discharges on the left inundation for the area of HPP Brežice at the current and designed state (SS – current state; BS – designed state).

Zaradi spremenjenih pretokov po retenzijskih površinah pri visokovodnih dogodkih se ustrezno spremeni tudi retenzijski volumen celotnega območja. Volumni retenzij so majhni (6-8 %) glede na celotni volumen visokovodnega vala. V

povprečju se volumen retenzij zaradi HE Brežice in HE Mokrice zmanjša za manj kot polovico sedanjega stanja, a se s primernim obratovanjem razbremenilnikov učinkovitejše uporablja. Deleži odvzetih retenzijskih volumnov območja HE Brežice in HE Mokrice so prikazani na sliki 9.



**Slika 9:** Deleži odvzetih retenzijskih volumnov območja HE Brežice in HE Mokrice, glede na volumen celotnega vala.

**Figure 9:** Proportions of the taken retention volumes of the areas of HPP Brežice and HPP Mokrice according to the entire wave volume.

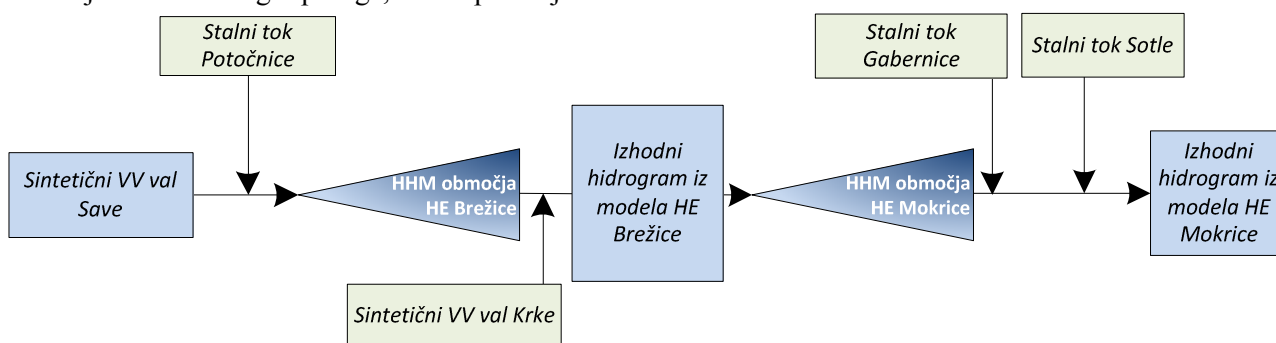
Ker ima lahko zmanjšanje retenzijske sposobnosti bistven vpliv na odtočne razmere dolvodno, je bila izdelana še analiza vpliva načrtovanega stanja na povišanje in zamik konice izbranega izhodnega VV vala.

### 7.3. Vpliv HE Brežice in HE Mokrice na odtočni režim

Ker je bil eden od glavnih pogojev za izvedbo hidroenergetskih in drugih ureditev ohranjanje obstoječega stanja odtočnega režima dolvodno od načrtovanih posegov in ohranjanje oziroma po možnosti izboljšanje poplavne varnosti v vplivnem območju načrtovanega posega, smo primerjalno

analizo med obstoječim in načrtovanim stanjem izvajali v fazi variantnih izračunov za optimiziranje načrtovanega stanja. Pri tem smo za načrtovano stanje HE Mokrice upoštevali tudi vpliv gorvodne HE Brežice (**Error! Reference source not found.**), zato so uporabljeni VV valovi različni za obstoječe in načrtovano stanje že na samem vtoku v model HE Mokrice – takšni, kot so bili določeni z MM za HE Brežice.

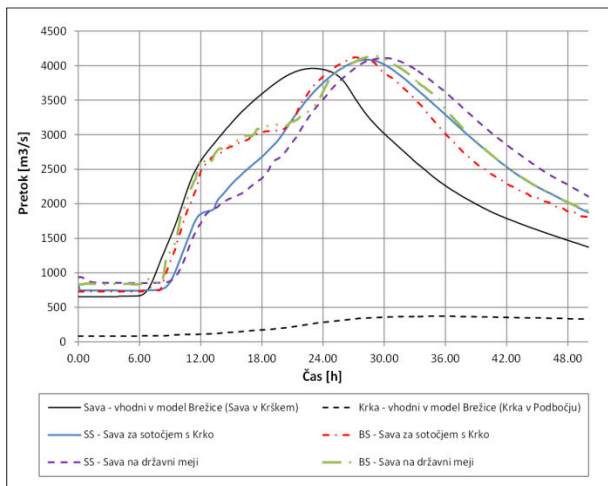
Kot najbolj kritičen scenarij smo obravnavali sintetični visokovodni val s konico 3960 m<sup>3</sup>/s, ki doteka na profilu nad sotočjem s Potočnico (gorvodno od NEK), saj smo ugotovili, da je le-ta po konici in volumnu najbližji 100-letnemu pretoku Save. Na profilu vodomerne postaje (v.p.) Čatež je tako konični pretok omenjenega vala pri obstoječem stanju enak 4085 m<sup>3</sup>/s, pri načrtovanem stanju pa 4130 m<sup>3</sup>/s (zaradi vpliva HE Brežice). Na profilu državne meje je konični pretok istega visokovodnega vala pri obstoječem stanju enak 4110 m<sup>3</sup>/s (z upoštevanjem 20 letne (5 % verjetnost) Sotle in pretokom 10 m<sup>3</sup>/s za Gabernico), medtem ko je pri načrtovanem stanju in za enake pogoje Sotle in Gabernice enak 4140 m<sup>3</sup>/s. Iz tega ugotovimo, da sama HE Mokrice ugodno vpliva na visokovodne razmere (pri približno 100 letnih pretokih) na dolvodnih odsekih, saj nekoliko znižuje konico hidrograma izhodnega VV iz območja HE Brežice. Le-to je posledica poznega odpiranja razbremenilnika (suhi zadrževalnik). Negativni vpliv HE Brežice (45 m<sup>3</sup>/s pri konici 3960 m<sup>3</sup>/s) se tako do neke mere kompenzira na območju HE Mokrice.



**Slika 10:** Prikaz enega od scenarijev za račun nestalnega toka na celotnem odseku od Krškega do državne meje.

**Figure 10:** A schematic view of one of the scenarios for the calculation of unsteady flow for the entire reach from Krško to the state border.

Omeniti velja še ugoden vpliv HE Brežice pri nižjih pretokih, ki zmanjšuje pogostost poplavljanja. Na sliki 11 in v preglednici 1 so povzeti nekateri rezultati HHM, ki se nanašajo na spremembo hidrogramov zaradi izgradnje HE Brežice in HE Mokrice.



**Slika 11:** Prikaz vhodnih in izhodnih hidrogramov obstoječega (SS) in načrtovanega (BS) stanja HE Mokrice (kot vhodni hidrogram se uporabi ozek visokovodni val s konico 4085 m<sup>3</sup>/s za obstoječe oz. 4130 m<sup>3</sup>/s za načrtovano stanje).

**Figure 11:** A presentation of the input and output hydrographs for the current state (SS) and the designed state (BS) of HPP Mokrice (a narrow high water wave with a peak discharge of 4085 m<sup>3</sup>/s is used as input hydrograph for current state and a narrow high water wave with a peak discharge of 4130 m<sup>3</sup>/s for the designed state).

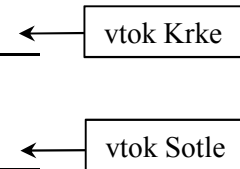
Skupni vpliv HE Brežice in HE Mokrice na konico hidrograma na državni meji znaša tako 30 m<sup>3</sup>/s, konica pa nastopi približno 30 minut bolj zgodaj. Za pravilno interpretacijo teh rezultatov je treba poudariti, da gre pri tem za relativno majhne spremembe najvišjega pretoka, saj se le-ta poviša za 0,7%, ter nastopi 30 min bolj zgodaj, pri čemer traja celotni val približno 3 dni. Prav tako je treba poudariti, da ima HE Mokrice pozitiven vpliv na dolvodni odtočni režim, saj se konica hidrograma od v.p. Čatež do državne meje zniža za 5 m<sup>3</sup>/s glede na vhodni hidrogram modela HE Mokrice. Prav tako je ugodno, da se prične prelivanje nasipa ob Sotli na državni meji pri naselju Rigonce pri višjih pretokih kot v obstoječem stanju, s tem se

poplavna nevarnost dolvodnih območij močno zmanjša. Ta ugoden vpliv je posledica poznega odpiranja razbremenilnika in nekoliko zmanjšane pretoka po retenziji. Tako se v obstoječem stanju prične prelivanje omenjenega nasipa med 100 in 500 letnimi pretoki, medtem ko se v načrtovanem stanju prične kasneje, komaj med 1000 in 10000 letnimi pretoki.

**Preglednica 1:** Primerjava konic izhodnih hidrogramov med obstoječim in načrtovanim stanjem za primer nestalnega toka (v računih je bil upoštevan visokovodni val Krke s konico 380 m<sup>3</sup>/s, konstanten pretok Sotle Q<sub>20</sub>=100 m<sup>3</sup>/s, Gabernice- 10 m<sup>3</sup>/s in Potočnice 2 m<sup>3</sup>/s).

**Table 1:** Comparison of peaks of output hydrographs between current and designed state on the example of unsteady flow (high water wave of Krka with peak discharge of 380 m<sup>3</sup>/s and constant discharges of Sotla Q<sub>20</sub>=100 m<sup>3</sup>/s, Gabernica - 10 m<sup>3</sup>/s and Potočnica 2 m<sup>3</sup>/s were used in the calculations).

PROFIL	stanje	Konica ozkega VV vala
Nad sotočjem s Potočnico (gorvodno od NEK)	obstoječe	3960
	načrtovano	3960
Tik za sotočjem Save s Krko (Čatež)	obstoječe	4085
	načrtovano	4130
Državna meja	obstoječe	4110
	načrtovano	4140
ΔQ zaradi HE Brežice		45
ΔQ zaradi HE Brežice in HE Mokrice		30



## 8. Zaključek

Obraunavano območje obvodnega prostora ob Savi od Krškega do državne meje z Republiko Hrvaško obsega obširne poplavne ravnice (Krško-Brežiško polje). Zaradi pomembnosti območja, kompleksne sestave vplivnih dejavnikov, obsežnih predvidenih posegov v prostor, predvsem pa zaradi pomanjkanja zanesljivih podatkov o preteklih visokovodnih dogodkih, smo v raziskovalni nalogi za doseganje zanesljivih analiz obstoječega stanja in za optimizacije načrtovanega stanja uporabili

pristop s hibridnim hidravličnim modelom (HHM). Tak pristop obsega tako fizično kot tudi numerično matematično modeliranje. Oba modela sta bila umerjena na meritve iz narave visokovodnih dogodkov, ki so se pojavili med leti 2007 in 2010. Z medsebojno primerjavo rezultatov obeh vrst modelov ter s finim umerjanjem le-teh je bilo možno povečati zanesljivost končnih rezultatov, ki bi bila brez fizičnega modela v večini odvisna od negotovosti vhodnih podatkov (negotovost meritev iz narave). S pomočjo umerjenega in verificiranega matematičnega modela smo izvedli optimizacijo objektov HE Brežice in HE Mokrice ter drugih posegov v obravnavani prostor. Pri tem sta bila glavna izpostavljeni cilja ohranjanje odtočnega režima na državni meji in ohranjanje oziroma izboljšanje poplavne varnosti v vplivnem območju HE. Končne variante, ki te pogoje izpolnjujejo, smo v zadnji fazi optimizacije dodatno verificirali še s fizičnim modelom.

Ugotovili smo, da bi se z izgradnjo HE Brežice in HE Mokrice ter z vsemi predvidenimi protipoplavnimi ukrepi in drugimi načrtovanimi ureditvami konica sintetičnega hidrograma, ki je bil uporabljen za analizo nestalnega toka, na državni meji povišala za 30 m<sup>3</sup>/s, celotni val pa bi se pospešil za približno 30 min. Pri tem je treba poudariti, da so te vrednosti glede na celotno konico (4085 m<sup>3</sup>/s) ter glede na trajanje vala (3 dni) skoraj zanemarljive. Razlika 0.7 % pri pretokih je namreč manjša od merilne oziroma računske negotovosti.

Za modeliranje visokovodnih dogodkov na tako obsežem območju pristop s HHM v Sloveniji še ni bil uporabljen. Metodologija, ki obsega postopek vzpostavitve hibridnih modelov ter njihovo umerjanje in verifikacijo, bo podala uporabne smernice za modeliranje podobnih primerov v praksi. Prav tako bo podala uporabne splošne informacije o zanesljivosti meritev gladin in pretokov visokovodnih dogodkov iz narave, natančnosti numeričnih matematičnih modelov ter občutljivosti njihovih rezultatov na glavne hidravlične parametre. Izvedba HHM omogoča nadzor odtočnega režima tudi v bodoče, saj bo mogoče preverjati vplive sprememb obstoječe rabe

ali okoliščin v prostoru (npr. vpliv povečanega zaraščanja). Omogoča tudi usmerjanje nove rabe prostora oziroma izdelavo strokovne podporne dokumentacije za potrebe prihodnjega prostorskega načrtovanja.

## Viri

DHI (2009). "MIKE 11 – *A modeling system for Rivers and Channels – User Guide*, MIKE by DHI 2009, Hørsholm, 536 p.

Kobus, H. (1980). *Hydraulic Modelling*, Verlag Paul Parey, Hamburg, 323 p.

Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Ciuha, D. (2011). Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: poročilo. Ljubljana, Int.št. 938-dop. (in Slovenian).

Rak, G., Müller, M., Steinman, F., Šantl, S., Novak, G. (2010). Hydraulic modeling of future hydro power plants on lower Sava. ICOLD Symposium. Innsbruck, Avstrija, 133–138.

Šantl, S., Novak, G., Rak, G., Steinman, F. (2010). Hybrid hydraulic modeling approach in the process of hydropower plant design. International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation. Nanjing, Kitajska, 54–61.

Šantl, S., Rak, G. (2010). Analiza poplavne nevarnosti in odtočnega režima – Uporaba različnih tipov hidravličnih modelov. *Gradbeni vestnik* 59(6), 147–156. (in Slovenian).

Vodogradbeni laboratorij (1976). Hidravlična modelna preiskava jezua na Savi za NE Krško v merilu 1:35. Ljubljana, int.št. 577. (in Slovenian).

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.