

# ANALIZA POPLAVNE NEVARNOSTI IN ODTOČNEGA REŽIMA – UPORABA RAZLIČNIH TIPOV HIDRAVLIČNIH MODELOV

## FLOOD HAZARD AND RUN-OFF REGIME ANALYSIS – APPROACH WITH USE OF DIFFERENT TYPES OF HYDRAULIC MODELS

mag. Sašo Šantl, univ. dipl. inž. grad.

Gašper Rak, univ. dipl. inž. VKI.

UL-FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Hajdrihova 28, Ljubljana

Strokovni članek

UDK 519.61/.64:556.16:627.1:711

**Povzetek** | Podan je postopek izdelave kart in razredov poplavne nevarnosti kot izhodišče za omejitve in pogoje za načrtovanje rabe prostora in gradnjo. V prvem delu so podrobneje podana zakonska izhodišča, ki urejajo zadevno področje, in okvirni postopek pravičnega načrtovanja rabe prostora na poplavno nevarnih območjih. Kot neizogiben del določanja poplavne nevarnosti je v nadaljevanju podano področje hidravličnega modeliranja, od različnih tipov matematičnih modelov, ki so danes v splošni strokovni rabi, prek fizičnega modeliranja do sodobnih hibridnih hidravličnih pristopov, ki za načrtovanje zahtevnih posegov z izrazitimi navzkrižnimi interesi pri rabi prostora poleg izdelave fizičnega modela vključujejo tudi vzpostavitev matematičnega modela. Na koncu prispevka sta splošneje podana tudi primera vzpostavitve hibridnega hidravličnega modela na območju načrtovanja HE Brežice in izdelava kart ter razredov poplavne nevarnosti.

**Summary** | The paper presents the procedure for the determination of flood hazard and the definition of flood hazard classes which are the bases for conditions and limitations for land use planning and construction. In the first part, a legal basis which regulates and defines the area concerned as well as a framework for proper procedure of land use planning in flood hazard areas are briefly introduced. As an unavoidable phase of this procedure the area hydraulic modelling is presented in general, from 1D to 3D mathematical modelling to the use of hybrid models where physical models are combined with a mathematical model to provide the integration of advantages from both types of models. Finally, the paper presents a case of design of hydropower plant Brežice where general procedure of assembling and the calibration of mathematical and physical models as a hybrid model and the elaboration of the flood hazard maps and maps of flood hazard classes are discussed.

## 1 • UVOD

Načrtovanje posegov na poplavno nevarnih območjih se ureja oziroma omejuje s predpisi s področja voda oziroma, podrobneje, na podlagi Pravilnika o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (v nadaljevanju: Pravilnik; MOP, 2007) in Uredbe o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (v nadaljevanju: Uredba; MOP, 2008). Vsebina teh predpisov prinaša v RS uskladitev z Direktivo 2007/69/EC Evropskega parlamenta in Sveta o oceni in obvladovanju poplavne ogroženosti (krajše: Poplavna direktiva).

Osnovni pristop, ki ga upošteva in predpisuje omenjeni Pravilnik, je določitev poplavne nevarnosti, ranljivosti in ogroženosti, ki združuje verjetnost pojava poplave (poplavne nevarnosti) z ranljivostjo tega območja (Gosar, 2007).

Poplavno nevarnost je treba podrobneje določiti na vseh območjih (seveda če za to obstaja interes), ki so na opozorilni karti poplav (<http://gis.arso.gov.si/>) prikazana kot poplavno nevarna območja. Opozorilna karta poplav namreč le označuje območja v Republiki Sloveniji, kjer so že bile zaznane poplave, in sicer z različno stopnjo zanesljivosti in natančnosti obdelave. Gre torej za v preteklosti že evidentirane dogodke ali pa za območja z že izvedenimi hidravličnimi analizami, ki so po Pravilniku že lahko tudi podlaga za izris kart poplavne nevarnosti in določitev razredov nevarnosti.

Ugotavljanje ogroženosti, ki jo določa možnost nastanka škode zaradi izpostavljenosti poplavni nevarnosti, se lahko razdeli na tri glavna področja:

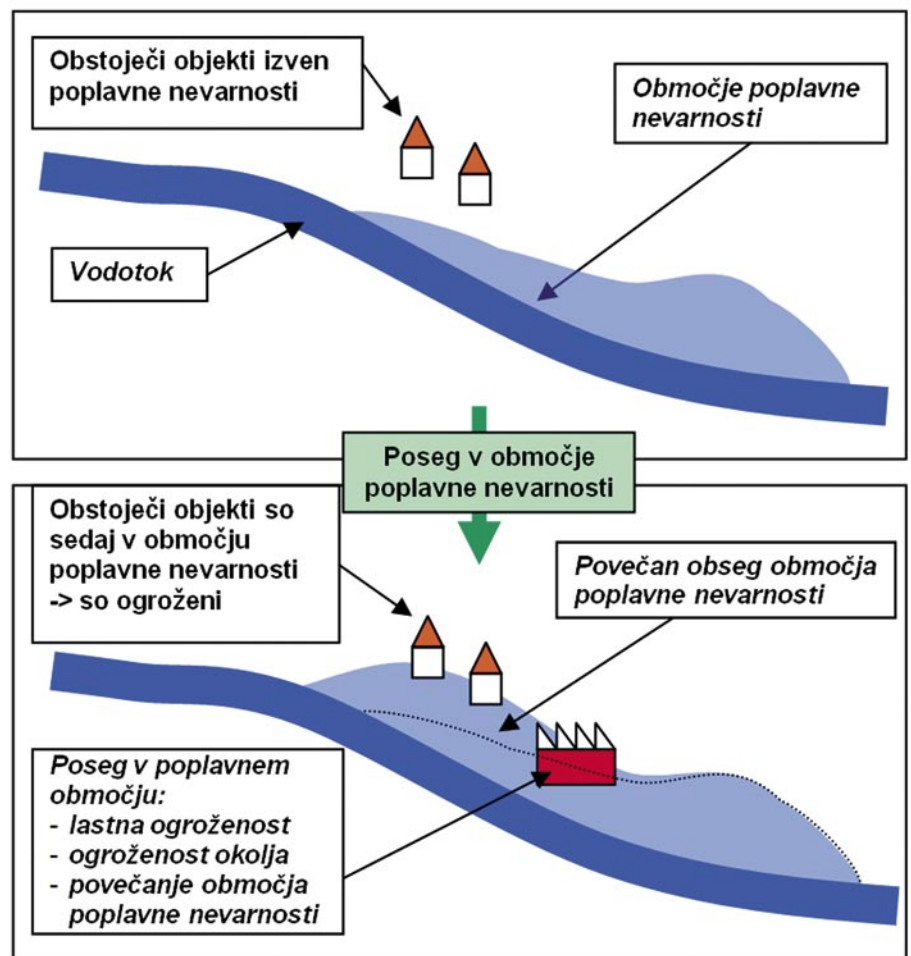
- ogroženost človeka, dejavnosti in objektov v obravnavanem območju;
- ogroženost okolja zaradi poplavljenosti ali posledične nestabilnosti okoljsko nevarnih objektov;
- ogroženost človeka, dejavnosti in objektov zaradi nevarnosti, ki jo povzroči nova predlagana raba obstoječih območij poplavne in erozijske nevarnosti ali njihovega varovanja. Gre torej za določitev vplivnega območja načrtovane nove rabe prostora.

varno območje, ki je lahko zaradi odpravljanja lastne ogroženosti ustrezno načrtovan (vodotesnost, stabilnost itd.), lahko vseeno povzroči poplavno nevarnost tudi na območju, kjer pred posegom ni bilo poplavne nevarnosti. Če pa se v tem območju nahajajo tudi objekti s škodnim potencialom, je lahko posledica posega tudi povečana poplavna ogroženost. Pravilnik predpisuje tudi določitev razredov poplavne nevarnosti in ogroženosti, ki se določajo na podlagi verjetnosti pojava in njegove intenzitete. Glavni kriteriji za določitev razreda nevarnosti so globina poplavitve, sila impulza (udar vodnega toka na objekt) in strižne sile (na nosilni teren ob objektu ipd.) Nadgradnja Pravilnika, ki predpisuje, kako se določijo razredi poplavne nevarnosti, je Uredba (Vlada RS, 2008), s katero se zaradi preprečitve povečanja ranljivosti in posledične

ogroženosti pogojuje in omejuje možnost gradnje na poplavno nevarnih območjih. Pri tem je upoštevana delitev objektov po Enotni klasifikaciji objektov (SURS, 2003).

S primernimi protipoplavnimi ukrepi je v sklopu prostorskega načrtovanja obravnavano poplavno nevarno območje pogosto mogoče ustrezno zavarovati ali vsaj zmanjšati poplavno nevarnost, tako da je v obravnavanem območju načrtovano rabo prostora možno izvesti. Pri tem pa je treba hkrati zagotoviti, da se na vplivnem območju (predvsem gor- in dolvodno) prepreči nov pojav ali povečanje poplavne nevarnosti in ogroženosti. Odprava takšnih posledic lahko zahteva načrtovanje rešitev, ki so celovitejše in rešujejo poplavno nevarnost in ogroženost širšega območja.

Da bi se zagotovilo ustrezno načrtovanje in tudi dejanska izvedba usklajenih ukrepov, je treba v postopku prostorskega načrtovanja in tudi kasneje v postopku gradnje uveljaviti ustrezen nadzor tudi s strani nosilcev urejanja



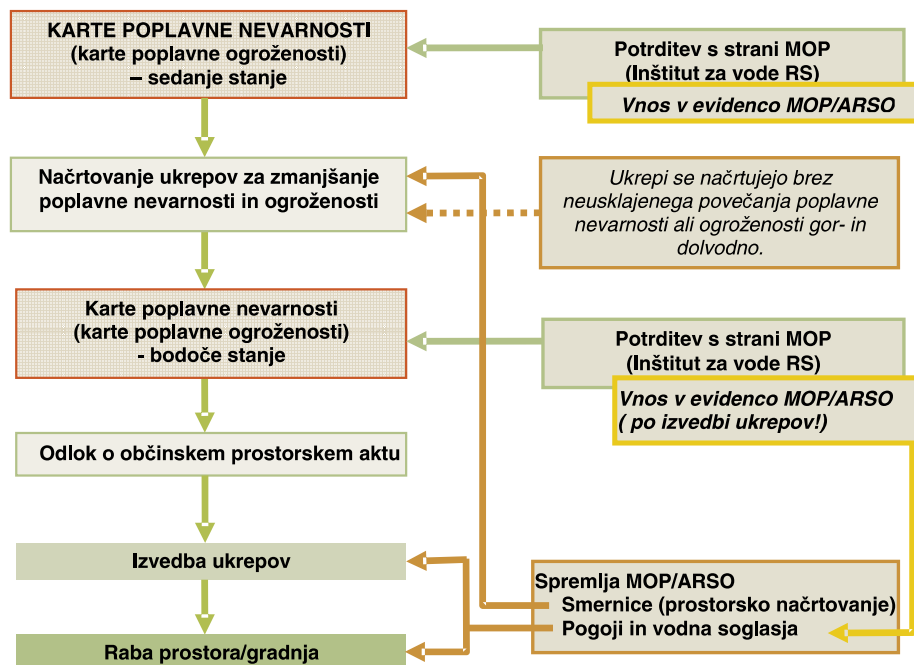
Slika 1 • Preprost shematski prikaz vpliva gradnje na poplavno nevarnem območju, ki poveča obseg poplavljenega območja

Ta področja prikazuje slika 1 na preprostem shematskem primeru. Poseg v poplavno ne-

prostora in soglasodajalcev s področja voda (Ministrstvo za okolje in prostor – MOP, Agencija RS za okolje – ARSO). Shemo postopkov in pristojnih organov s področja voda prikazuje slika 2. Na primeru lokalnega prostorskega načrtovanja, na podlagi kart poplavne nevarnosti in ogroženosti pri sedanjem stanju je treba zaradi omogočanja poseganja na poplavno nevarnih območjih načrtovati tudi usklajene ukrepe. Šele ko se ukrepi tudi dejansko izvedejo, se v prostoru pojavi novo omiljeno stanje poplavne nevarnosti in ogroženosti, kar sploh omogoča posege v prostor, zaradi katerih je tekel tudi sam postopek prostorskega načrtovanja določenega območja (Skutnik in Šantl, 2008).

Takšnim postopkom je podvrženo tudi načrtovanje vodne infrastrukture (visokovodni nasip, jez itd.), ki je namenjena urejanju in rabi voda, na primer načrtovanje vodnih objektov hidroelektrarne. Tudi zanjo je treba preveriti vpliv na odtočni režim in oceniti poplavno (tudi erozijsko) nevarnost najprej za obstoječe stanje, nato pa usklajeno določiti in vključiti ukrepe za zmanjšanje poplavne nevarnosti in ogroženosti tudi za novo stanje v celotnem vplivnem območju načrtovanega posega.

Glede na zatečeno stanje v prostoru obstajajo primeri, ko prostorski akti dovoljujejo določen tip gradnje na območjih, kjer se na podlagi opozorilne karte poplav ugotavlja nevarnost pojava poplav, vendar pa karte poplavne nevarnosti še niso izdelane v skladu s Pravilnikom. Za take primere, če ne gre za območje pomembnega vpliva poplav, ki jih določa omenjeni Pravilnik, se v skladu z omenjeno Uredbo gradnja omejuje in pogojuje na podlagi poenostavljenih meril (upoštevajo se obstoječi podatki o globini poplavne vode pri Q100), pri tem pa se obravnavano območje uvrsti



Slika 2 • Usklajeno načrtovanje rabe prostora z zagotavljanjem poplavne varnosti

v višji razred poplavne nevarnosti. Zatečeno stanje je v prehodnem obdobju dejansko tudi največji kamen spotike pri investitorjih in lokalnih skupnostih.

Strokovno in znanstveno področje, ki se ukvarja z določevanjem obsega poplavljenosti, hitrostmi vodnih tokov in tudi spremembami celotnega odtočnega režima na obravnavanem območju, imenujemo hidravlična analiza. Analiza se izvaja z matematičnimi in tudi fizičnimi modeli, pri katerih je treba izvesti tudi postopek umerjanja (kalibracije) in preveritve (verifikacije), s čimer se zagotovi, da so rezultati modeliranja z zahtevano stopnjo natančnosti enaki dejanskemu stanju in dogajanju v naravi (Šantl, 2007).

V kompleksnih primerih prostorskega načrtovanja vodne infrastrukture, kot je na primer umeščanje hidroenergetskih objektov v prostor, ki zajemajo daljše odseke vodotokov in lahko pomembno spremenijo odtočni režim in poplavno nevarnost v vplivnem območju, se k hidravlični analizi pristopi z izdelavo tako fizičnega kot tudi matematičnega modela. Tedaj govorimo o »hibridnih hidravličnih modelih«. S hkratno uporabo obeh načinov modeliranja se zagotovi ustrezna medsebojna preveritev modelov v fazi umerjanja in optimizacije končnih rešitev ter izkoristi prednosti obeh tipov modelov. Takšen način modeliranja in analiz je predstavljen nadaljevanju.

## 2 • HIDRAVLIČNO MODELIRANJE

Glede na tip problematike, odtočni režim na obravnavanem območju, druge pojave v prostoru, podatke, ki so na razpolago, in želeno natančnost se lahko za določitev obsega poplavljenosti, hitrostnega polja vode, odtočnega režima in drugih iskanih parametrov odloči za uporabo različnih tipov matematičnih hidravličnih modelov. Možna je uporaba od enodimenzionalnih pa do tridimenzionalnih matematičnih modelov, v primeru izrazitih tridimenzionalnih gibanj vode,

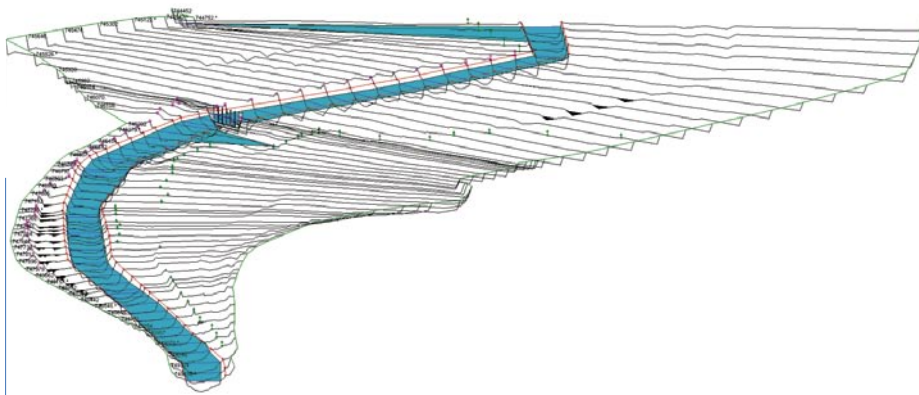
ki so odločilna za optimizacijo načrtovane rabe prostora, pa tudi fizičnega hidravličnega modeliranja kot enega najstarejših tipov modeliranja. V postopku pregleda in potrditve izdelanih kart poplavne nevarnosti, ki ga izvede MOP s strokovno podporo Inštituta za vode RS, je treba seveda tudi dokazati, da je bil izbran ustrezen hidravlični model.

V nadaljevanju so prikazani bistveni tipi hidravličnega modeliranja, ki so uveljavljeni v današnji splošni praksi.

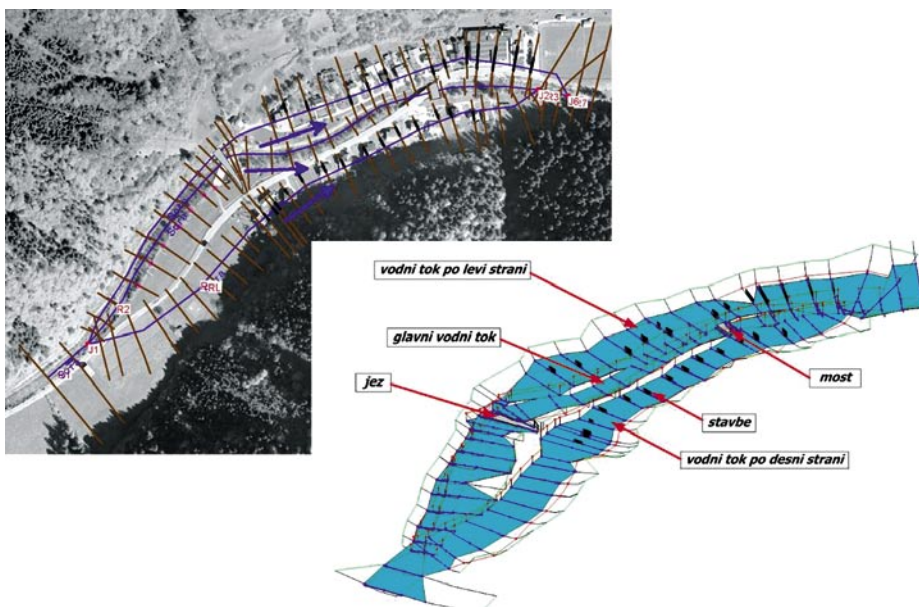
### 2.1 Enodimenzionalno hidravlično modeliranje

V preteklosti se je k hidravličnemu modeliranju vodotokov z vključitvijo poplavnih površin praviloma pristopilo z enodimenzionalnimi modeli (1D-modeli). Pri tem so se poplavne površine modelirale kot razširitev območja struge, to je z razširitvijo prečnih prereзов do višjih kot terena (slika 3). Na ta način se je zajelo celotno potencialno poplavno območje.

Ker gre pri toku vode po poplavnih površinah v večini primerov za izrazit dvodimenzionalni tok, ki pogosto ne teče vzporedno s tokom po glavni strugi, je natančnost rezultatov, ki so



Slika 3 • Primer hidravličnega 1D-modela, ki z razširitvijo prečnih prerezov poenostavi zajame tudi poplavne površine (programska oprema HEC-RAS; FGG-KMTe)



Slika 4 • Primer hidravličnega 1D-modela z dodanima vejama vodnih tokov na levem in desnem poplavnem območju (programska oprema HEC-RAS; FGG-KMTe; Selška Sora v območju Železnikov)

pridobljeni na podlagi enodimenzionalnega modela, relativno nizka (Hubbard, 2001). To pa pri načrtovanju in omejevanju rabe prostora lahko vodi v veliko dodatno varnost (dodatna nadvišanja, omejitve rabe prostora na večjem območju ipd.) ali prinaša podcenjeno nevarnost.

Natančnost 1D-modeliranja se lahko v primerih, ko voda pri visokih pretokih odteka iz osnovne struge in se dolvodno vrača nazaj v osnovno strugo, poveča z uporabo vejčastega modela, pri katerem se dodajo nove struge za simuliranje toka po poplavnih površinah (slika 4). Za »komunikacijo« vode med vejami toka po poplavni površini in osnovno strugo se lahko dodatno vzpostavi pretakanje vode (npr. s prelivnimi objekti) med posameznimi vejami

tokov. Tak model se v strokovnih krogih imenuje »kvazi 2D-model« (Willems et al., 2001). Takšno modeliranje je primerno v jasno določljivih primerih, ko se v primerih načrtovanja vodne infrastrukture jasno definira več vodnih poti. V primerih ugotavljanja poplavne nevarnosti na večjih območjih s stalno vzdolžno in prečno »komunikacijo« vode na poplavnih površinah z osnovno strugo pa bi število vodnih tokov (vej) zaradi možnega velikega števila dodatnih strug in vzpostavljanja prelivanja vode med strugami naraslo. S tem pa bi model postal zelo kompleksen ter zelo zahteven za umerjanje. Umerjanje modela namreč zahteva podatke (teren, fizični model) o pretočnih razmerah za vsako vzpostavljanje novih dodatnih zank.

## 2.2 Dvodimenzionalno hidravlično modeliranje

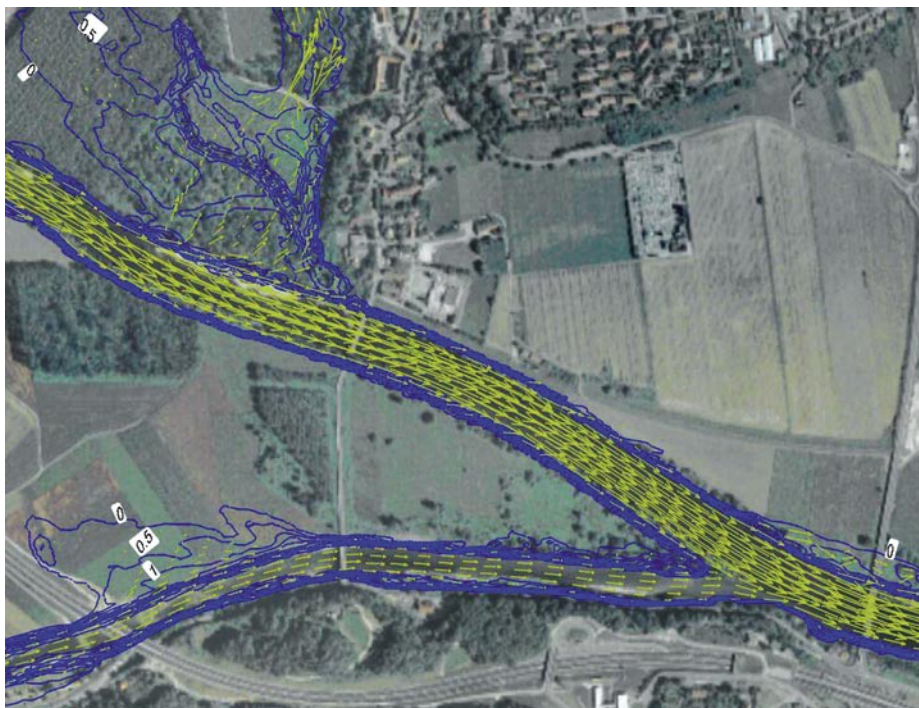
Ko se na obravnavanem območju pojavijo izrazitejšje komponente hitrosti pravokotno na smer glavnega toka oziroma prihaja do izrazitih dvodimenzionalnih pojavov toka vode (poplavna območja, hipne zožitve ali razširitve struge itd.), lastnosti toka pa je še vedno mogoče po globini »povprečiti«, se lahko za učinkovito hidravlično analizo uporabi dvodimenzionalno hidravlično modeliranje – 2D-modeliranje (slika 5).

Čeprav so bila teoretična izhodišča za 2D-modeliranje razvita že pred časom ((Rajar, 1980) (Abbott et al., 1981)), je šele sodobna dovolj hitra procesna računalniška oprema omogočila širše inženirsko izvajanje analiz na 2D-modelih z ustreznimi majhnimi računskimi celicami v realnem času.

Proces vzpostavitve 2D-modela okvirno sledi naslednjemu postopku:

- pridobitev geometrijskih podatkov (LIDAR, geodetske izmere struge itd.) celotnega obravnavanega območja;
- izdelava digitalnega modela reliefa (DMR);
- izdelava geometrije/mreže celic 2D-modela ustrezne gostote;
- preveritev geometrije 2D-modela z DMR in izvedba popravkov na območjih, ki so poenostavljena zaradi izdelave mreže celic, so pa s hidravličnega vidika pomembna (npr. protipoplavni zid, ki je ožji od numerične celice);
- določitev robnih pogojev (pretočne krivulje, pretoki vode z različnimi povratnimi dobami, določitev hidravlične značilnosti prelivnih objektov ipd.), pridobljeni podatki z vodomer-nih postaj ali iz predhodnih hidroloških in tudi hidravličnih analiz;
- določitev izhodiščnih vrednosti koeficientov hrapavosti v numeričnih celicah, odvisnih od lastnosti dna struge, rabe zemljišč, poraščenosti in pozidave;
- umerjanje in verifikacija koeficientov hrapavosti na podlagi primerjave gladin in hitrosti vode med izračuni na modelu in dejanskimi meritvami v naravi pri različnih pretokih.

Za čim boljše približanje hidravličnim razmeram v naravi, še zlasti v primerih, ko se pojavlja izraziti tridimenzionalni tok, bi bilo treba v končni fazi preiti na tridimenzionalno modeliranje (3D), kar sodobna računalniška oprema že omogoča v realnih časih izračuna, vendar le za manjša obravnavana območja oziroma z velikimi numeričnimi celicami za večja območja.



Slika 5 • Primer hidravličnega 2D-modela s prikazom črt enakih globin (izobat) in vektorjev hitrosti vode (programska oprema CCHE; FGG-KMTe; območje sotočja Save in Krke)

Bistveno vprašanje pri odločitvi za tridimenzionalno modeliranje je predvsem, ali so za tako natančnost izračunov na razpolago ustrezni vhodni podatki za vzpostavitev in umerjanje modela (topografija, potek vodnih tokov za različne povratne dobe pretokov vode ipd.). Praviloma se tridimenzionalno matematično modeliranje uporablja pri načrtovanju bistvenih hidravličnih elementov pri vodnih objektih (pretok preko zapornic, načrtovanje vtočnih objektov ipd.).

Ker je področje tridimenzionalnega matematičnega modeliranja še v razvoju, se pri zahtevnih vodnih objektih še vedno uporabljajo fizični modeli v različnih merilih. Slednji hkrati omogočajo tudi umerjanje matematičnih modelov in končno verifikacijo optimalne rešitve, ki je bila določena na podlagi matematičnega modeliranja.

### 2.3 Fizični hidravlični modeli

Izdelava laboratorijskih fizičnih modelov, to je izdelava pomanjšanega stanja v naravi v nepopačenem ali višinsko popačenem (distorziranem) modelnem merilu, je bila na področju hidrotehnike v najintenzivnejšem razvoju sredi prejšnjega stoletja, v našem prostoru pa ima že 80-letno tradicijo.

Osnovno izhodišče je zagotoviti zakonitosti o podobnosti pojava v naravi in na modelu, pri čemer je mehanska podobnost

modela in prototipa osnovni pogoj, da so količine, merjene na fizičnem modelu, ustrezne tudi po preračunu iz modela v naravo. Hidravlične razmere na fizičnem modelu so podobne tistim na prototipu, kadar model izkazuje podobnost oblike (*geometrijska podobnost*), podobnost gibanja (*kinematična podobnost*) in podobnost sil (*dinamična podobnost*).



Slika 5 • Primer fizičnega modela (Inštitut za hidravlične raziskave; odsek Save s HE Krško in novim mostom)

Slika 6 prikazuje fizični model reke Save na območju gradnje HE Krško z načrtovanjem novega mostu obvezne ceste mimo Krškega. Fizični modeli so v slovenski praksi že dovolj znani. Zato bi poudarili, da se njihov pomen ne zmanjšuje, spreminja pa se njihova vloga. Pred pojavom matematičnih modelov je bil to edini način za dovolj natančno hidravlično analizo razmer, pri vedno večji uporabi matematičnih modelov pa imajo fizični modeli še vedno vsaj dve nalogi – zagotoviti dovolj podatkov za umerjanje matematičnega modela in nato še omogočiti preveritev rezultatov, dokler matematični modeli ne bodo dovolj zanesljivi.

### 2.4 Hibridno hidravlično modeliranje

Za zanesljive in dovolj natančne izračune sta potrebna umerjanje (kalibracija) in preveritev (verifikacija) rezultatov modela. To sta postopka, ki na podlagi informacij o preteklih dogodkih omogočita, da model s sprejemljivo natančnostjo simulira tudi dogodke, ki se še niso zgodili, obstaja pa verjetnost, da bi se lahko pojavili v naravi. Zato je pomembno, da so podatki meritev preteklih dogodkov brez grobih napak ter da so naključne in sistematične napake ustrezno statistično obdelane in ovrednotene, da bi se lahko določila merilna oziroma računsko negotovost (toleranca). Praviloma so meritve v naravi (pretokov in glavin voda) pridobljene v obdobju nižjih pretokov, saj so meritve pri višjih pretokih redkeše oziroma manj natančne. Izjemnih dogodkov je namreč malo, hkrati pa je možnost napak v tem času mnogo večja (nevarno iz-

vajanje meritev pri velikih hitrostih toka, okvare opreme zaradi povečane prodnosti in plavja ipd.).

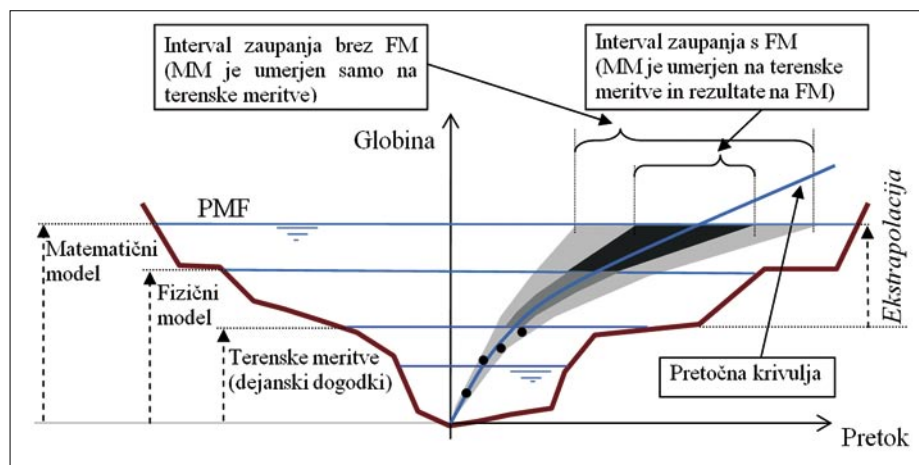
V primerih, ko se načrtuje raba vode, ki zahteva obširno gradnjo na vodnih zemljiščih (struga, brežine struge), zaradi katerih lahko pride do bistvenega vpliva na spremembo odtočnega režima in celo do povečanja poplavne nevarnosti, se tudi pri uporabi hidravličnega modela zahteva bistveno ožji (boljši) interval zaupanja v rezultate.

Zlasti pri načrtovanju pomembnejših objektov vodne infrastrukture (npr. hidroelektrane), ki bi zaradi neustreznega načrtovanja lahko povzročilo bistveno spremembo odtočnega režima in posledično poplavno nevarnost in ogroženost večjih razsežnosti, se pogosto hkrati vzpostavi dva hidravlična modela, ob matematičnem modelu še fizični model. Fizični modeli pri tem zlasti zagotavljajo predvsem tiste informacije o procesih, ki jih tudi sodobni matematični modeli še ne morejo zadovoljivo opisati (predvsem turbulenca in razni z njo povezani 3D-pojavi). Matematični modeli pa fizične dopolnijo 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 lahko omogočajo analize za veliko večja območja kot fizični modeli, ki so omejeni z zmogljivostjo laboratorija. Z izvedbo dveh modelov istega obravnavanega območja se prav tako zagotovi

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, za katere se kot izhodišče uporabijo rezultati fizičnega modela. Zaradi tega se interval zaupanja v rezultate pri matematičnem modelu zmanjša oziroma se izboljša zaupanje v rezultate na območju ekstrapolacije, to je za dogodke, za katere obstaja majhna

statistična verjetnost, da bi se v prihodnosti lahko zgodili (slika 7).

V nadaljevanju je podan primer modeliranja s hibridnim hidravličnim modelom na območju, kjer je bilo treba za določitev poplavne nevarnosti opraviti hidravlične analize za visoke pretoke, ki še niso bili izmerjeni v naravi, imajo pa majhno verjetnost, da se pojavijo. Gre za vode, kjer statistično verjetnost pojava opišemo s statistično povratno dobo (npr. 1 % – 100-letne poplavne vode, 0,5 % – 500-letne poplavne vode, 0,1 % – 1000-letne poplavne vode, itd.).



Slika 7 • Shematski prikaz umerjanja in uporabe matematičnega modela (MM) na podlagi terenskih meritev ob visokih vodah (točke) in rezultatov fizičnega modela (FM) ter posledičnega zmanjševanja intervala zaupanja, ki se doseže s hibridnimi modeli, za potrebe ekstrapolacije: statistično verjetnih dogodkov, ki se še niso zgodili, vse do verjetno najvišjih pretokov (Probable Maximum Flood – PMF)

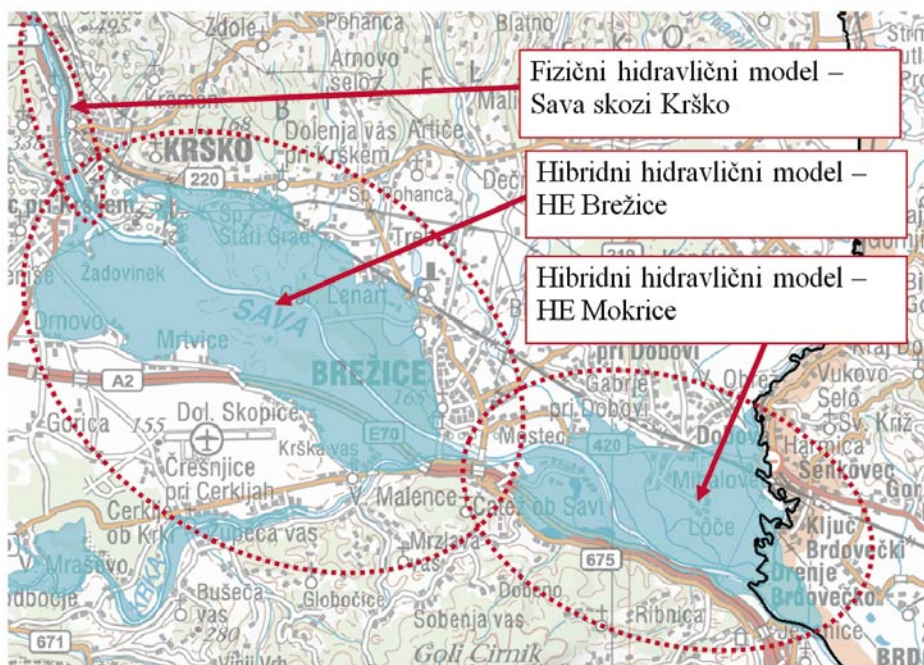
### 3 • PRIMER UPORABE HIBRIDNEGA HIDRAVLIČNEGA MODELA

Za načrtovanje hidroelektrarn na Spodnji Savi so za hidravlično modeliranje uporabili hibridne hidravlične modele. Razlogov za tako odločitev je več. Gre namreč za načrtovanje hidroelektrarn z jezovno zgradbo in nasipi ob akumulaciji. Hkrati se načrtujejo tudi prelivni objekti na začetku akumulacij, s čimer se želi ohraniti zadrževalna sposobnost danes obstoječih poplavnih površin na obeh bregovih reke Save na celotnem območju Krško-Brežiškega polja in dolvodnega območja od Čateža do Mokric. Območje modeliranja je razdeljeno na 3 dele, ki so s prikazom sloja opozorilne karte poplav prikazani na sliki 8. V vplivnem območju načrtovanja HE Brežice (Krško-Brežiško polje), ki bo v nadaljevanju tudi

podrobneje predstavljeno, se nahaja tudi NEK Krško z zahtevami po zagotavljanju hladilne vode in višjimi standardi varovanja pred poplavami (pred PMF). Dolvodno pa je meddržavno določeno tudi ohranjanje odtočnega režima reke Save, saj se preko državne meje ne smejo povečevati sedanji odtoki. To pa z drugimi besedami pomeni ohranjanje obstoječih referenjskih (vodozadrževalnih) kapacitet gorvodno. Ker gre v skladu z opozorilno karto poplav za območje poplavne nevarnosti, je treba za celotno območje določiti razrede poplavne nevarnosti sedanjega stanja, nato pa usklajeno z načrtovanjem HE Brežice tudi prihodnjega stanja.

#### 3.1 Vzpostavitev in umerjanje modelov

Za izdelavo modelov je bil pridobljen LIDAR-posnetek terena in izmerjeni prečni prerezi struge reke Save. Zajem podatkov s tehnologijo LIDAR je v današnji praksi že zelo razširjen in je v različni literaturi tudi ustrezno predstavljen (Gosar, 2007). Ker gre za veliko območje, je bil izdelan t. i. »distorziran« fizični hidravlični model vplivnega območja HE Brežice, zgrajen v merilu 1 : 125 za dolžine in širine ter v merilu 1 : 62,5 za višine (slika 9). Ta distorzija (višinsko popačenje) se na modelu kaže kot povečan naklon struge, večja relativna hrapavost ter večji naklon gladine na modelu glede na naravo, vendar pa model po drugi strani omogoča večjo natančnost meritev in vključitev celotnega obravnavanega območja kljub velikim dimenzijam poplavnega območja.



Slika 8 • Prikaz območja hibridnega hidravličnega modeliranja, obravnavanega s tremi hidravličnimi modeli, s slojem opozorilne karte poplav – katastrofalne poplave



Slika 9 • Prikaz izdelanega fizičnega modela od mesta Krško do sotočja Save s Krko (Inštitut za hidravlične raziskave)

Dolžina modelirane rečne struge znaša v naravi 10,8 km oz. na modelu 86,6 m. Celotna modelirana površina pa v naravi zajema območje velikosti 23,4 km<sup>2</sup> oz. na modelu 1499 m<sup>2</sup>. Izdelava površine takšnega obsega – s starimi rokavi Save, gramoznicami in prometnicami – je seveda zahteven podvig.

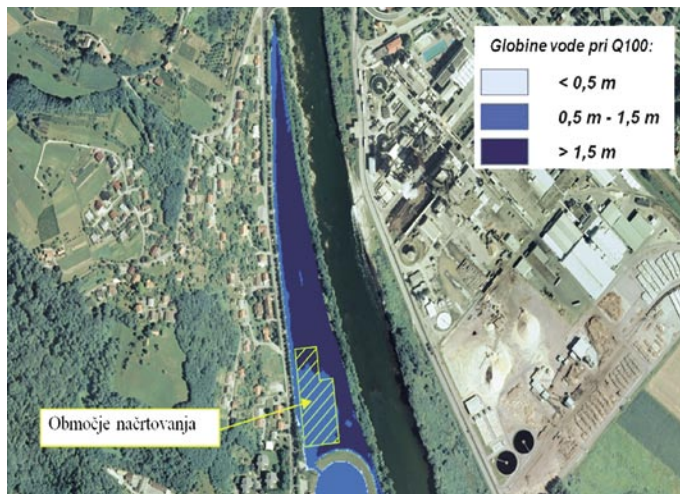
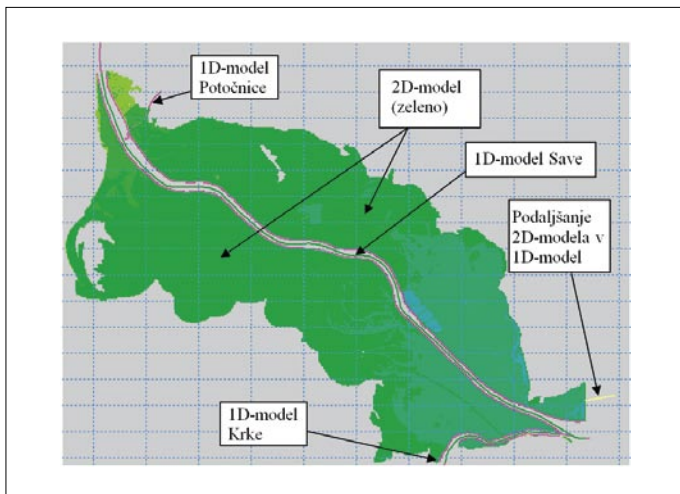
Hidrodinamični matematični model območja bazena HE Brežice je bil vzpostavljen s programsko opremo MIKE Flood, ki združuje programsko okolje za modeliranje 2D-modela (MIKE 21) in programsko okolje za modeliranje 1D-modela (MIKE 11) (slika 10). Izbor takega modela temelji predvsem na zahtevah po analizi prihodnjega stanja, saj programska oprema MIKE 11 omogoča vgraditev različnih objektov z možnostjo simuliranja dinamike njihovega obratovanja v odvisnosti od časovne spremembe pretoka. Ustrezno vodenje poplavnega vala, ki ne bo prinesel dodatne poplavne nevarnosti, je namreč bistvena zahteva pri optimizaciji načrtovanja objektov HE Brežice.

Celotno območje matematičnega modela za HE Brežice zajema reko Savo v dolžini 13.227,00 metra in reko Krko od izliva v Savo do vodomerne postaje Podbočje gorvodno. Matematični model poplavnega območja ima tako površino 31,89 km<sup>2</sup>. Torej obsega prostor, ki je kar 36 % večji od fizičnega modela in omogoča simuliranje dotoka Krke kot tudi učinkovitejšo simulacijo nestalnega toka.

Po vzpostavitvi modelov sta se pri umerjanju v prvi fazi oba modela umerjala na izvedene meritve v naravi, v drugi fazi pa so se medsebojno primerjali izmerjeni rezultati na fizičnem modelu in izračunani rezultati na matematičnem modelu. Verifikacija obeh modelov se je opravila z meritvami poplavnega dogodka jeseni leta 1990, ki seveda niso bile uporabljene pri umerjanju modela, pa tudi s primerjavo z rezultati z drugim matematičnim 2D-modelom.

Na matematičnem modelu se je izvajala tudi analiza občutljivosti rezultatov na spremembe vhodnih parametrov, to je občutljivost rezultatov na spremembe v pretokih, v izmerjenih kotah gladin vode in spreminjanja hidravličnih parametrov modela – koeficientov hrpa-vosti.

Ko se je dosegla zahtevana stopnja zaupanja v rezultate modelov, se je analiza sedanjega stanja in variant prihodnjega stanja vršila na matematičnem modelu. Fizični model, ki je v prvem koraku dal dragocene podatke o poplavnih tokovih za umerjanje matematičnega modela, bo v ključni fazi raziskav služil še za verifikacijo končnih rezul-



Slika 10 • Zasnova matematičnega modela – sistem 1D-modela vodotokov in 2D-modela območij poplavljanja omogoča izračune razmer za stalni in nestalni tok

samo obravnavano poplavno območje

tatov in odločitev o najprimernejših rešitvah, ki bodo izhajale iz izračunov na matematičnem modelu.

Poleg optimalnega načrtovanja objektov HE Brežice sta cilja naloge tudi izdelava kart poplavne nevarnosti in določitev razredov poplavne nevarnosti, ki predstavljajo izhodišče za omejitve in pogoje pri načrtovanju rabe prostora v skladu s predpisi, kot je bilo opisano že v uvodu.

### 3.2 Določitev razredov poplavne nevarnosti

V postopku določevanja razredov poplavne nevarnosti so izhodišča podana z omenjenim Pravilnikom, pri čemer so poleg glavnega izhodišča, to je pretoka vode s 100-letno povratno dobo (Q100), odločilni tudi pretok vode s povratno dobo 10 let (Q10) in 500 let (Q500) ter tokovi vode, ki presegajo hitrost 1 m/s.

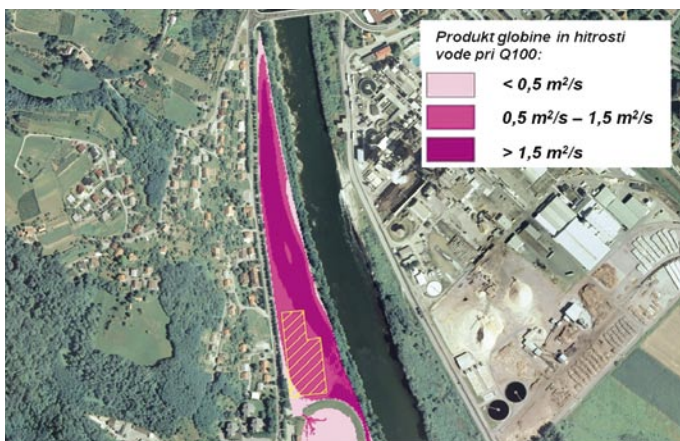
Kot primer določitve razredov poplavne nevarnosti je v nadaljevanju prikazan del celotnega območja, ki zajema desno poplavno območje od mostu v Krškem do stadiona dolvodno, kjer je obstajal interes za poseg v prostor. Za določitev razredov poplavne nevarnosti se morata izdelati dve karti za 2 kriterija. Ena je karta globin vode pri Q100, primer podaja slika 11, druga pa karta zmnožka globine in hitrosti vode (sile impulza), ki jo podaja slika 12.

Pri določitvi razredov poplavne nevarnosti (slika 13) se za obravnavano lokacijo na terenu upošteva tisti kriterij izmed obeh, ki je bolj neugoden. Za območje, kjer se pojavi poplava že pri Q10, se samodejno določi najmanj razred srednje nevarnosti.

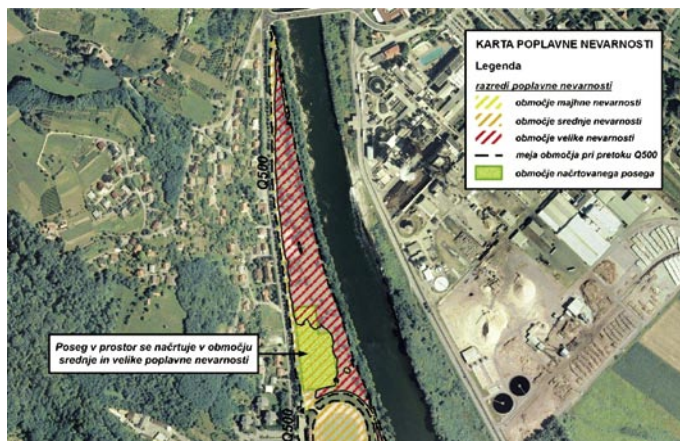
Ker določene omejitve rabe prostora izhajajo tudi z vidika zmanjševanja obstoječe ogroženosti, je treba na karti razredov po-

plavne nevarnosti voda določiti tudi linijo o poplavljenosti pri pretoku vode Q500, ki prikazuje obseg območja preostalega tveganja (residual risk). Tako izdelana karta razredov poplavne nevarnosti je podlaga k Uredbi, na podlagi katere se omejuje in poguje možnost določene gradnje v posameznih razredih poplavne nevarnosti.

Ker imajo vhodni podatki (topografija, pretoki) in sami hidravlični parametri modela (koeficienti hrapavosti, parametri prelivnih objektov, pretočna krivulja na spodnjem robnem pogju) neko stopnjo negotovosti, je izdelavo karte poplavne nevarnosti vsekakor treba preveriti z ustrezno analizo občutljivosti. Slika 14 tako prikazuje občutljivost izračuna obsega poplavljenosti pri spreminjanju pretoka Q v razponu ± 5 % za celotno območje matematičnega modela. Na ta način se preveri, kako močno

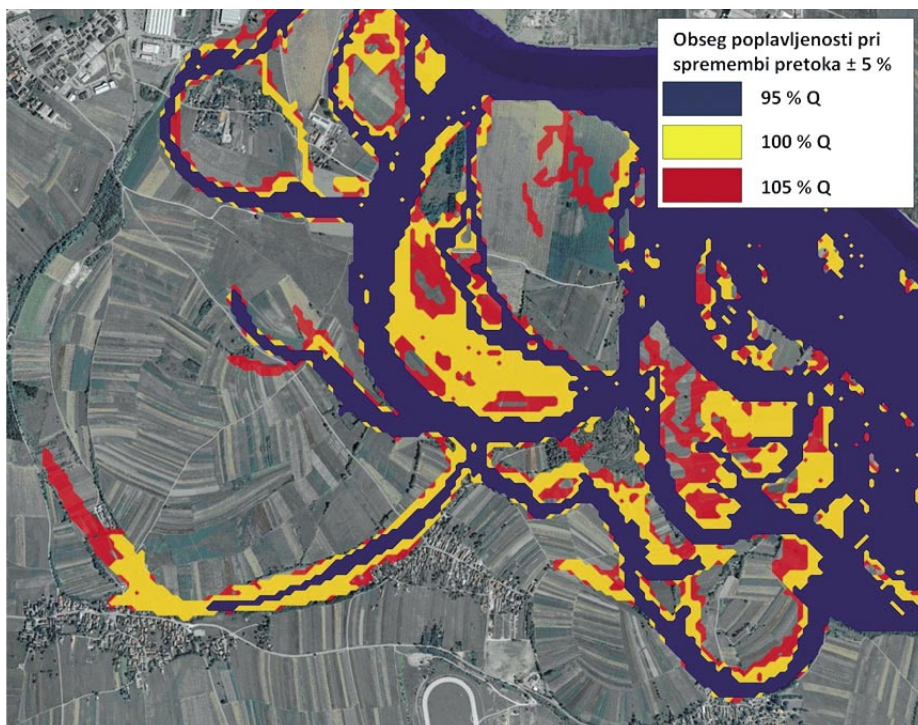


Slika 12 • Karta poplavne nevarnosti – prikaz območij po 2. kriteriju: zmnožek globine in hitrosti vode pri Q100



Slika 13 • Razredi poplavne nevarnosti – kakšni posegi so na določenih območjih sploh dovoljeni, določa omenjena Uredba iz leta 2008.





Slika 14 • Analiza vpliva računske negotovosti prikaže, koliko se spremeni obseg poplavljenosti, če spreminjamo računski pretok v mejah  $Q_{\text{RACUN}} \pm 5\%$  (prelivanje Save na desno poplavno območje)

#### 4 • SKLEP

Za ustrezno določitev kart in razredov poplavne nevarnosti, ki so podlaga za omejitve in pogoje za načrtovanje rabe prostora, je treba opraviti ustrezno hidravlično modeliranje. K hidravličnemu modeliranju se lahko pristopi z uporabo matematičnih ali fizičnih modelov. Glede na tip problematike, samega odtočnega režima in pojavov v prostoru se lahko odločimo za uporabo različnih vrst modelov, od enodimenzionalnih do tridimenzionalnih matematičnih modelov ali pa fizičnih modelov.

V primerih, ko se načrtuje objekte, ki bistveno vplivajo na odtočni režim, ali je zaradi povečanja poplavne nevarnosti in posledično ogroženosti drugih rab prostora tveganje lahko veliko, se k hidravličnemu modeliranju lahko pristopi z uporabo tako imenovanih hibridnih hidravličnih modelov, ko se poleg fizičnega modela izdela še matematični model. Na ta način se zagotovi ustrezno medsebojno dopolnjevanje že pri umerjanju in verifikaciji modelov vse do analiz in optimiziranja rešitev načrtovanega posega v prostor.

#### 5 • LITERATURA

- Abbott, M. B., McCowan, A., Warren, I. R., Numerical Modelling of Free-Surface Flows that are two-dimensional in Plan, Proceedings of a symposium on Predictive Ability of Transport Models for Inland and Coastal Waters, Academic Press, 1981.
- Gosar, L., Rak, G., Steinman, F., Banovec, P., Z LIDAR-tehnologijo zajeta topografija v hidravličnih analizah vodotokov = Using LIDAR data in open channel hydraulic analysis, Gradbeni vestnik, maj 2007, let. 56, str. 115–123, graf. prikazi, 2007.
- Hubbard, M., E., On the accuracy of one-dimensional models of steady converging/diverging open channel flows, International journal for numerical methods in fluids, 2001, vol. 35, no. 7, pp. 785–808, 2001.

je obseg poplavljenosti odvisen od tolerance pri določanju pretoka. Za uporabnike prostora pa je pomembno vedeti, da se poplavne linije v prostoru lahko spreminjajo tudi zaradi spremenjene rabe prostora. Takšen primer se pojavi npr. zaradi zaraščanja poplavnih območij, ko vegetacija zmanjša prečni prerez in s tem pretočnost – posledica je seveda pričakovana: pri istem pretoku se pojavijo višje globine in s tem večji obseg poplavljenosti (Mueller et al., 2009).

Omenjeno je vsekakor treba vključiti v izdelavo kart in razredov poplavne nevarnosti, pri čemer je treba upoštevati varnejšo stran. Izdelana karta razredov poplavne nevarnosti je podlaga za omejitve in pogoje rabe ter načrtovanje prostora, ki so sestavni deli projektnih pogojev in vodnega soglasja.

Poudariti je treba, da karta, izdelana na podlagi hidravlične analize razredov poplavne nevarnosti, predstavlja v prvi fazi predlog, ki ga morata potrditi še Ministrstvo za okolje in prostor RS in Inštitut za vode RS, ki preveri, ali je karta izdelana v skladu s Pravilnikom. Šele ko je ugotovljena ustreznost predlaganih kart, le-te postanejo ustrezna podlaga za omejitve in pogoje rabe prostora na nivoju prostorskega načrtovanja in tudi projektiranja ter izvedbe.

Pri hidravličnem modeliranju je treba v fazi vzpostavitve in umerjanja modela izvesti tudi analizo občutljivosti, s katero se ocenijo natančnost oziroma toleranca izračunov in tudi stopnja zaupanja v rezultate. Na ta način se lahko ustrezno kvantitativno oceni potrebna varnost, ki se upošteva tako pri izdelavi kart poplavne nevarnosti kot tudi pri samem načrtovanju objektov. Hkrati se opredeli izhodiščne podatke in robne pogoje z večjo občutljivostjo in vplivom na končne rezultate, katere je treba v hidravlični analizi podrobneje raziskati. Delo na umeščanju hidroelektrarn na Spodnji Savi se nadaljuje, zato bodo rezultati detajlnih raziskav objavljeni v prihodnje.

- Inštitut za hidravlične raziskave (IHR), Vmesno poročilo – projekt »Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Naročniki: MOP, MG, GEN Energija, d. o. o., HSE, d. o. o., Občina krško, Občina Brežice, 2009.
- Metelko Skutnik, V., Šantl, S., Poplavna direktiva in prostorsko načrtovanje, 19. Mišičev vodarski dan 2008, Maribor, 8. december, Zbornik referatov (Mišičev vodarski dan), Maribor: Vodnogospodarski biro, 2008, str. 103–110, ilustr., 2008.
- Ministrstvo za okolje in prostor RS, Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, Ur. list RS, št. 60/2007, 2007.
- Mueller, M., Steinman, F., Rak, G., Vpliv redčenja zarasti na obseg poplavne nevarnosti, 20. Mišičev vodarski dan 2009, Maribor, Zbornik referatov, Vodnogospodarski biro, str. 68–76, ilustr., 2009.
- Rajar, R., Hidravlika nestalnega toka, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1980.
- Statistični urad RS, Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena, Ur. list RS, št. 33/2003, 2003.
- Steinman, F. in drugi, Recenzija PGD/PZI »Rekonstrukcija Dolenčevega jezua«, Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor RS, 2008.
- Steinman, F., Papež, J., Kozelj, D., Hazard mapping based on the new guidelines in Slovenia, Monitor 08, systems behind a safer environment, international conference on monitoring methods, the conference took place from 21st to 22nd February 2008 in A-8952 Irdning (Styria / Austria), Irdning, Agricultural Research and Education Centre, str. 55–62, 2008.
- Šantl, S., Makrokaliibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov, magistrsko delo, Ljubljana, 2007, str. 45, 2007.
- Vlada RS, Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, Ur. list RS, št. 89/2008, 2008.
- Willems, P., Christiaens, K., Vaes, G., Popa, D., Timbe, L., Berlamont, J., Feyen, J., Methodology for river flood modelling by the quasi two-dimensional approach, World Water and Environmental Resources (EWRI) Congress, Orlando, 20–24 mei 2001, 2001.

## Varnostno opozorilo.

### **SIEGENIA-AUBI opozarja na morebitne napake v delih okovja drsnih vrat in drsnih oken.**

»Drsniki«, ki so bili v letih 1994 do 1998 vstavljeni v okovje drsnih vrat in drsnih oken, so morda poškodovani oziroma imajo napako. Ti drsniki se lahko, tudi če so do sedaj brezhibno delovali, zlomijo. To lahko povzroči, da krilo pri uporabi oziroma v odprtem stanju pade iz okvirja in povzroči materialno škodo ali telesno poškodbo.

Predmet tega opozorila so izključno elementi, ki jih je možno odpreti z drsenjem IN z nagibom. Izključeni pa so elementi, ki se odpirajo samo z drsenjem ali pa samo z nagibom, ter vse ostale oblike odpiranja. Podrobnejše informacije, katera drsna vrata in okna imajo morda napako in kako odpraviti težavo, so vam na voljo na strani **[www.siegenia-aubi.com](http://www.siegenia-aubi.com)**.

Nujno vam priporočamo, da zadevnih elementov ne odpirate in se nemudoma obrnete

na specializirano podjetje za drsna vrata in okna, ki lahko opravi zamenjavo drsnikov.

SIEGENIA-AUBI KG  
Tehnika prezračevanja in stavbnega okovja  
Industriestrasse 1–3, D-57234 Wilnsdorf  
Telefaks: +49 271 393177 020  
[gleiterservice@siegenia-aubi.com](mailto:gleiterservice@siegenia-aubi.com)

**SIEGENIA AUBI**  
SOLUTIONS INSIDE