

VKLJUČITEV HIDRAVLIČNE ANALIZE ODTOČNIH RAZMER PRI NAČRTOVANJU GRADBENIH FAZ

THE INTEGRATION OF THE HYDRAULIC ANALYSIS OF RUNOFF REGIME IN PLANNING OF THE CONSTRUCTION PHASES

mag. Gašper Rak, univ. dipl. inž. vod. in kom. inž.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem
Hajdrihova 28, Ljubljana

Strokovni članek

UDK 519.8:627.8.034(497.4)

Povzetek | V fazi načrtovanja posegov v vodni in obvodni prostor so hidravlične modelne raziskave odtočnih razmer uveljavljeno orodje pri iskanju končnih rešitev, ki poleg funkcionalnosti zagotavljajo ohranjanje oziroma izboljšanje poplavne in erozijske nevarnosti. Redkeje pa se hidravlične analize vključuje v postopke priprave načrta poteka gradnje, načrtovanje začasnih objektov in ukrepov itd. Pomembnost analiz odtočnih razmer v posameznih vmesnih fazah gradnje se kaže predvsem pri umeščanju obsežnejših in kompleksnih posegov, katerih gradnja traja dlje časa (več let). V obdobju gradnje ima lahko začasno stanje v prostoru (posamezna vmesna faza gradnje) bistveno bolj neugoden vpliv na odtočne razmere kot končno načrtovano stanje. Pomembnost vključitve hidravlične analize v načrtovanje gradbenih faz je v prispevku prikazana na primeru umeščanja posegov v prostor po državnem prostorskem načrtu za območje hidroelektrarne Brežice. Z analizo odtočnih razmer v posameznih fazah gradnje je bilo mogoče preveriti morebitno povečanje nevarnosti in ogroženosti ter tako posledično prilagoditi oziroma optimizirati predviden potek gradnje, kar prispeva k zmanjšanju tveganj kot tudi stroškov.

Gljučne besede: odtočne razmere, hidravlična analiza, numerično modeliranje, HE Brežice, faznost izgradnje

Summary | In the planning stage of the interventions in water space and riparian areas, hydraulic model research of runoff regime is an established tool in the search of final solution, which in addition to providing the functionality provides preservation or mitigation of flood and erosion hazard. Less frequently, hydraulic analyses are included in the process of construction phase plan preparation, planning of temporary structures and measures, etc. The importance of the analysis of runoff regime in particular intermediate phase of the construction is mainly reflected in siting of an extensive and complex intervention, the construction of which takes a long time (several years). During the construction the temporary state in the area (particular intermediate phase of construction) could have significantly more adverse effect on the runoff regime than the final design state. The importance of hydraulic analysis introduced in the planning of the construction phases is presented on the case of siting intervention according to national spatial plan for HPP Brežice. The analysis of runoff regime during particular stage of construction enabled the verification of a potential increase of hazard and risk, and consequently the planned construction process was adapted and optimized, which contributed to reducing risks as well as costs.

Key words: runoff regime, hydraulic analysis, numerical modelling, HPP Brežice, phases of construction

1 • UVOD

Pri (večjih) posegih v prostor je treba analizirati tako vplive na okolje kot vpliv okolja na objekte. Tudi vpliv voda (poplavnih, podzemnih idr.) projektant upošteva pri dimenzioniranju objektov, v katerih primerih pa se izdelava tudi presoja vplivov na (vodno) okolje, pa določa Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje (RS, 2014). Ena od strokovnih podlag pri presoji vplivov na okolje za posege v vodotoke ter na vplivnem območju voda je tudi analiza odtočnih razmer, ki pokaže razliko med obstoječim in načrtovanim stanjem vodnih tokov, globlin, strižnih napetosti (erozije) idr. Za dokaz ohranjanja, če že ne izboljšanja, poplavne in erozijske varnosti pri analizi sedanjega stanja ter načrtovanja in optimiziranja predvidenega končnega stanja je fizično ali matematično hidravlično modeliranje ustaljena in uveljavljena praksa.

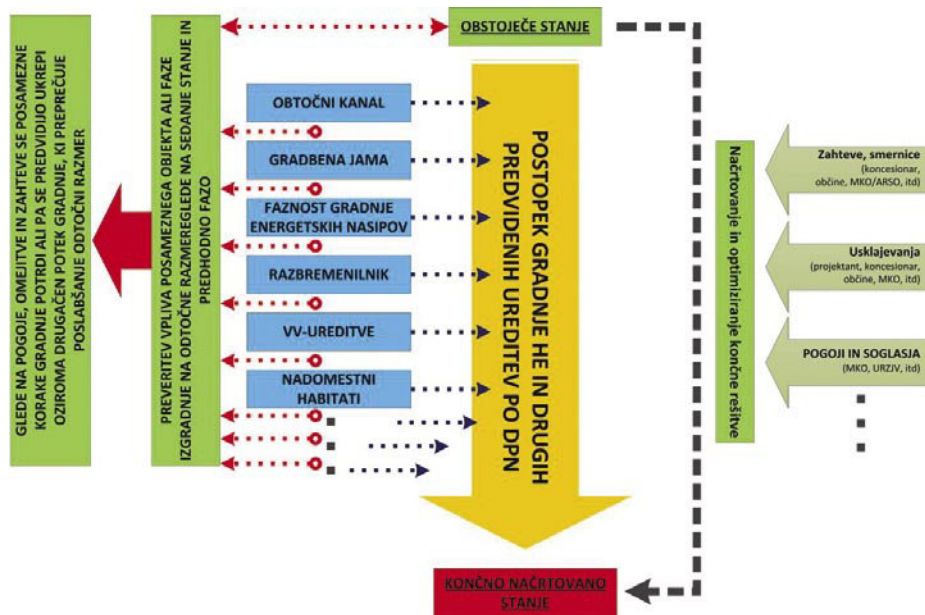
Pri načrtovanju gradnje pa ne sme biti zastavljena ali pomanjkljiva niti analiza stanja v posameznih fazah gradnje niti vpliv začasnih objektov ali ukrepov (dovozne poti, premostitve ipd.). Zlasti v primerih večjih in kompleksnih posegov bi se lahko izkazalo, da posamezna vmesna faza (v primerjavi s končnim načrtovanim stanjem) bistveno bolj neugodno vpliva na odtočne razmere ter posledično na poplavno in erozijsko nevarnost samega gradbišča in drugih uporabnikov prostora. S hidravlično analizo, s katero se določajo obseg poplavljenosti, porazdelitev hitrosti oz. erozijskih sil vodnih tokov in tudi spremembe celotnega odtočnega režima na obravnavanem območju, je treba ugotoviti morebitna tveganja in prilagoditi oziroma optimizirati predvidene faze gradnje posameznih objektov ali ureditev, kar prispeva k zmanjšanju tveganj in stroškov.

Rezultati hidravlične analize posameznih faz omogočajo ovrednotenje tveganj med gradnjo, tj. v prehodnem stanju prostora med sedanjimi in načrtovanimi razmerami. Če se ugotovi možno poslabšanje stanja v neki fazi gradnje, npr. preusmeritev toka vode ali zajezitev zaradi začasnih deponij zemljine, se predvidijo omilitveni ukrepi za preprečitev povečanja nevarnosti in ogroženosti ali pa načrtujejo drugačni ukrepi oz. drugačna faznost izvedbe posameznih objektov, ureditev itd.

Prikazan je primer načrtovanja in izvajanja faz gradnje pri posegu v prostor po državnem prostorskem načrtu (DPN) za HE Brežice. V sklopu DPN se v prostor umeščajo objekti in ureditve, potrebni za delovanje hidroelektrarne,

kot so nasipi akumulacije, pregradni objekti HE idr., vključno z deponijami za odlaganje materiala ob čiščenju struge Save. Hkrati se v prostor umeščajo posegi za rekonstrukcijo obstoječih in gradnjo novih visokovodnih nasipov in drugih ureditev za zagotavljanje poplavne varnosti v vplivnem območju, ureditve izlivnega odseka Krke in obvodnega prostora, kot to zahtevajo smernice Zavoda RS za ribištvo, nadomestni habitati itd. Gre torej za umestitev kompleksnega sistema infrastrukturnega objekta in spremljajočih ureditev v območje, kjer se prepletajo številne zahteve, omejitve in pogoji številnih soglasodajalcev, subjektov, ki so v projekt neposredno vključeni, ter drugih udeležencev, ki sicer v projekt niso neposredno vključeni, bi pa načrtovani posegi morebiti lahko tako ali drugače vplivali nanje oziroma na njihovo opravljanje dejavnosti itd. Zaradi strogih varnostnih zahtev Nuklearne elektrarne Krško, ki leži v neposredni bližini območja urejanja HE Brežice, ter morfološke, hidrološko-hidravlične in antropogene kompleksnosti retenzijskega prostora, ki bi lahko vplivale tudi na odtočne razmere na meji z Republiko Hrvaško, že od leta 2007 potekajo intenzivne hidravlične analize odtočnih razmer pred izgradnjo HE Brežice in HE Mokrice in po njej. Za zagotavljanje ustrezne natančnosti oz. zanesljivosti modelnih napovedi o vplivu predvidenih posegov v prostor po DPN HE Brežice

in DPN HE Mokrice je bilo uporabljeno hibridno hidravlično modeliranje (HHM), ki je bilo že predstavljeno v različnih virih ((Mlačnik, 2011), (Rak, 2010), (Rak, 2012)). Z obsežnim modeliranjem so se analizirale in optimizirale lokacije nasipov akumulacije, dimenzije in lokacije objektov za razbremenjevanje visokih voda, prelivni objekt HE in drugi spremljajoči posegi v prostor. Ker se v dveh DPN obravnava obsežno območje, je bilo treba za načrtovano stanje analizirati še morebitne vplive načrtovanih investicij drugih uporabnikov prostora, kot so npr. ureditev sotočja Save in Krke ter gorvodnega odseka Krke, umeščanje regionalne ceste Krško–Brežice, zagotavljanje poplavne varnosti Nuklearne elektrarne Krško (NEK), morebitno širitev avtoceste za tretji vozni pas idr. Gradnja tako obsežnih objektov traja več let, zato se spremembe odtočnih razmer dogajajo postopoma, npr. v fazi izgradnje jezovne zgradbe, ko je potreben obtočni kanal ob gradbeni jami, oziroma gradnje nasipov in spremljevalnih posegov, kar bi lahko vplivalo na odtočne razmere. Zato so za podrobnejše načrtovanje v fazi izdelave PGD in PZI bile analizirane še odtočne razmere na vplivnem območju HE Brežice v posameznih fazah gradnje. Pri opredelitvi variant oz. faz izvedbe, vključenih v hidravlično raziskavo, pripravo vhodnih podatkov geometrije gradbišča, deponij in faz nasipov, za izbiro scenarijev ter pregled in vrednotenje vmesnih rezultatov izračunov kakor tudi za prevzem končnih rezultatov je bilo ključno dobro sodelovanje s projektantom HE Brežice (IBE, d. d.).



Slika 1 • Konceptualni prikaz aktivnosti pri načrtovanju izvedbe objekta po fazah

2 • HIDRAVLIČNO MODELIRANJE

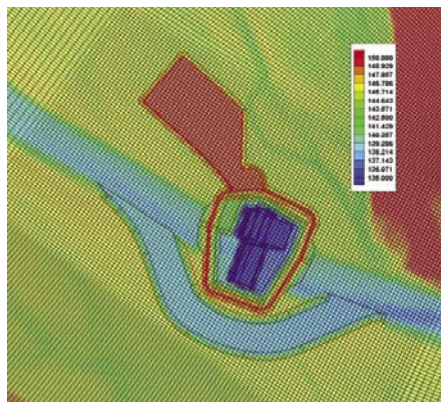
V sklopu hibridnega hidravličnega modeliranja (HHM) je bil za programsko orodje uporabljen kombinirani eno- in dvodimenzijski (1D-2D) model MIKE FLOOD, ki je ustrezno zajel hitrejši 1D-tok v strugi Save in počasnejši 2D-tok na poplavnih območjih. Za analize odtočnih razmer v času gradnje HE Brežice pa je bilo opravljeno novo, polno 2D-modeliranje s hidravličnim programskim orodjem CICHE2D (razvil: National Center for Computational Hydroscience and Engineering – The University of Mississippi). Glavni razlog za uporabo polnega 2D-modela je v izraziti dvodimenzijski naravi tokovnih razmer, ko se struga Save na območju gradbene jame preusmerja in nato vrača v staro traso. Na sliki 2 levo je



Slika 2 • **Levo** – ortofoto posnetek z vrisanim območjem posegov za gradbeno jamo HE Brežice; **desno** – isto območje, zajeto z numerično mrežo hidravličnega modela 2D (Rak, 2012)

dimenzionalnih (3D) Navier-Stokesovih enačb po vertikalni smeri. Numerično reševanje teh enačb poteka z implicitno metodo končnih elementov. Strižne napetosti, ki se pojavijo zaradi turbulence, so modelirane z Boussinesqovo aproksimacijo, medtem ko je za izračun vrtnične viskoznosti treba izbrati enega od treh pristopov.

Podlaga za opis topografije v 2D numerični mreži računskih elementov je bil LIDAR-posnetek terena leta 2007 (Flycom, 2007), v letih 2007 in 2010 pa so bili geodetsko izmerjeni še prečni profili struge in bližnjega obrečnega prostora. Hidravlično orodje CICHE omogoča uporabo spremenljive gostote numerične mreže, zato se je velikost posameznih elementov prilaga-



jala geomorfološkim spremembam in detajlom topografije, ki vplivajo na tokovno sliko. Prav tako je bila mreža zgoščena na območjih objektov (npr. jez NEK) in posegov v prostor, ki so bili predmet raziskave (gradbena jama, obtočni kanal, območje razbremenilnika itd.). Velikost celic uporabljene numerične mreže za opis topografije, ki je zagotavljala sprejemljiv računski čas simulacij in zahtevano natančnost rezultatov, je bila v razponu od 5 x 5 m do 10 x 15 m. Pri tem so se podrobneje obravnavala območja, kjer je bilo treba natančneje zajeti digitalni model reliefa (DMR), da se je uskladilo dejansko stanje višin na terenu in upoštevanih višin v matematičnem modelu (npr. levi nasip za zavarovanje NEK, ožji protipoplavni zidovi, izraziti prelomi v naklonu terena (bivši rokavi Save), telo avtoceste ipd.), saj bi ta odstopanja sicer nerealno vplivala na spremembe odtočnega režima. Digitalni model višin se je za posamezne lokacije natančno preveril in ustrezno dopolnil/nadvišal, da je bila dosežena istovetnost topografije in matematičnega zapisa topografije ter morebitnih ovir vodnemu toku v prostoru.

Analiza detajlnih tokovnih razmer s polnim 2D-pristopom je bila mogoča šele, ko se je opravilo umerjanje – ko je bila dosežena skladnost z izračuni HHM. Umerjanje je bilo opravljeno v 38 točkah, in sicer na istih mestih, kot je potekalo fino umerjanje fizičnega in numeričnega modela v sklopu HHM za pretoke Save med 20- in 100-letno povratno dobo.

Za dodatno umerjanje ožjega območja gradbene jame in pretočne sposobnosti obtočnega kanala ter za kontrolo hitrostnega polja in

na ortofoto podlagi prikazano ožje območje gradbene jame, na desni pa numerična mreža istega območja.

Kombinirani model 1D-2D, uporabljen pri HHM, je učinkovito orodje za simuliranje poplavnih scenarijev na širših območjih, kjer so glavni cilji analiziranje spremembe smeri toka po poplavnih površinah, globine in hitrosti vode ter obseg poplavljanja, pri tem pa je pomembno še, da 1D-modul omogoča vgraditev različnih objektov (jezovi, razbremenilniki) in simuliranje dinamike njihovega obratovanja v odvisnosti od časovne spremembe pretoka. Kljub dinamični povezavi 1D- in 2D-izračunov pa takšen pristop seveda ne more podati dovolj natančnih rezultatov o smeri in jakosti vodnih tokov v strugi in na ožjem obvodnem prostoru (Weisgerber, 2010).

Model CICHE temelji na numeričnem reševanju globinsko povprečenih enačb (Shallow water equations), izpeljanih z integracijo tri-



Slika 3 • **Fizični model gradbene jame HE Brežice (Hidroinštitut, 2011)**

odtočnih razmer so se za primerjalno stanje upoštevali rezultati hidravlične modelne raziskave, ki je bila na fizičnem modelu opravljena leta 2011 na Inštitutu za hidravlične

raziskave. Z raziskavo na fizičnem modelu, ki je bil izdelan v merilu 1:45 in je obsegal območje celotne gradbene jame hidroelektrarne z obtočnim kanalom ter odsekom reke

Save 600 m dolvodno od predvidene lokacije jezusa, so bili analizirani tokovna in hitrostna polja v času gradnje, gladinska stanja ter erozijska obremenitev brežin in struge (Bombač, 2011).

3 • IZRAČUNI

Numerično modeliranje ima pred fizičnimi modeli prednost, da lažje spreminjamo geometrijo, robne in obratovalne pogoje, žal pa še ne dosega zanesljivosti rezultatov s fizičnih modelov. Številni izračuni so bili opravljeni v dveh večjih sklopih. V prvem je bila opravljena numerična modelna raziskava vpliva gradbene jame z obtočnim kanalom in vplivov lokacij deponij izkopanega materiala, v drugem sklopu pa se je optimiziral vrstni red posameznih faz izgradnje nasipov. Vsi primeri so bili primerjani glede na tokovne slike različnih pretokov pri obstoječem stanju. Upoštevani sta bili ureditev gradbene jame in oblika obtočnega kanala, določena na fizičnem modelu, ki zagotavlja pretočnost ca. 1800 m³/s in pri katerem se ne pojavljajo ostri prelomi brežin, zaradi katerih bi se pojavljala območja vrtilčenja, ki bi zmanjševala pretočnost (Bombač, 2012). Na izbiro možnih lokacij deponij pa so vplivale prostorske omejitve, optimizacija gradbenih del, predvsem pa zahteva, da se ne povečuje poplavna in erozijska nevarnost.

Pri določitvi zaporedja faz gradnje nasipov je bil glavni cilj, da se poskuša čim dlje ohranjati obstoječe odtočne razmere in vzdrževati komunikacijo med glavno strugo in poplavnimi površinami ter s tem retenzijsko funkcijo inundacije. Zato se je v začetnih fazah upoštevala gradnja nasipov na odsekih, v katerih je komunikacija vodnega toka ob Q₁₀₀ med osnovno strugo in inundacijo najmanjša oz. le lokalna. Ocenjeno je bilo, da vzporedna izvedba nasipov na levem in desnem bregu zagotavlja ohranjanje pretokov po levi in desni inundaciji, izvedba nasipa na zgolj enem bregu pa bi povzročila povečanje toka in zvišanje gladine v inundaciji na nasprotnem bregu.

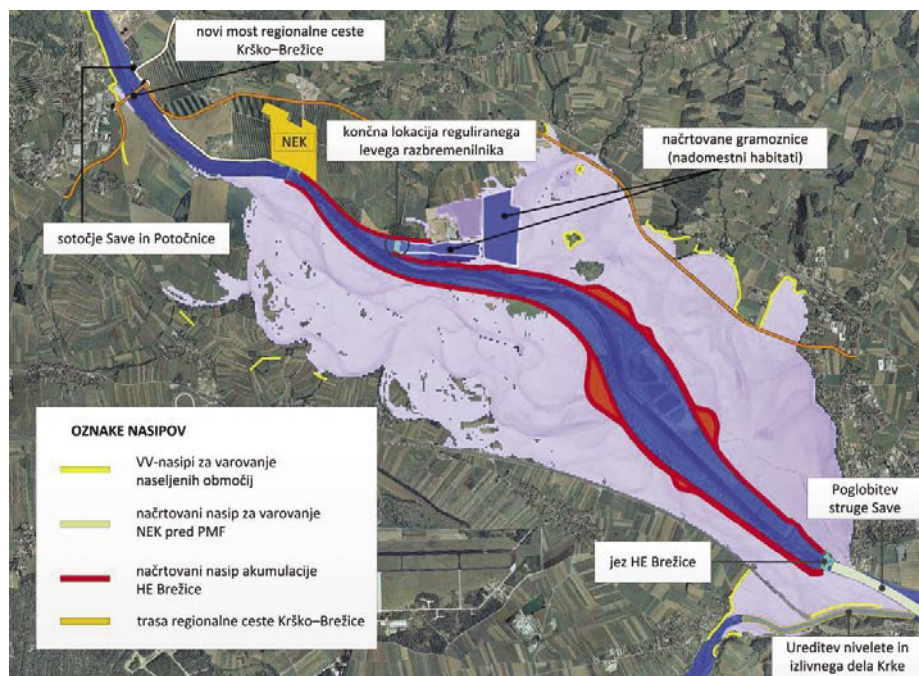
Pri izračunih so bili upoštevani tudi posamezni predvideni posegi in stanje prostora spreminjano postopoma, s čimer je bilo mogoče ugotavljati tudi vpliv posameznega posega v prostor. Večji del nabora obravnavanih posegov oz. faz gradnje je prikazan na sliki 4.

Z izračuni je bilo potrjeno tudi, da se z izvedbo nasipov v spodnjem delu bazena izboljšuje poplavna varnost avtoceste. Glede na rezultate vmesnih izračunov so se v območju modeliranja upoštevale modifikacije, ki bi lahko izboljšale odtočne razmere (predvsem znižanje gladin) v območjih, v katerih bi se v času izgradnje povečala poplavna nevarnost,

in ugotavljale razmere na robovih gradbene jame zaradi nevarnosti vdora savske vode vanjo. Tako se je zmanjšal obseg potrebnih (začasnih) protipoplavnih ukrepov.

Glede na projektantove analize o upravičenosti stopnje varovanja (suhe) gradbene jame so končni izračuni vpliva posameznih predlaganih posegov na odtočne razmere kot tudi vpliva vseh posegov skupaj bili izvedeni za naslednji kombinaciji pretokov Save in Krke:

- stalni tok za hkratni pojav pretokov $Q_{20,Save} = 2900 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{Krka} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ in
 - stalni tok za hkratni pojav pretokov $Q_{100,Save} = 3750 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{20,Krka} = 453 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Pretoka Save z 20- in 100-letno povratno dobo sta bila povzeta po Inštitutu za vode RS iz leta 2011 (IzVRS, 2011), za 20-letni pretok Krke pa po študiji IzVRS iz leta 2004 (IzVRS, 2004).



Slika 4 • Situacijski prikaz končnega načrtovanega stanja območja DPN HE Brežice z vsemi predvidenimi posegi

4 • REZULTATI IN DISKUSIJA

Vpliv posameznih vmesnih stanj na terenu v času gradnje se je na podlagi opravljenih

izračunov določal s primerjavo vodostajev posamezne faze izvedbe glede na obstoječe

stanje. Primerjava gladin se je izvajala v 43 točkah, porazdeljenih preko celotnega obravnavanega območja (slika 5).

Dodatno so bile analize gladin in hitrosti vode opravljene še na območjih, kjer bi se v času gradnje zaradi neugodnih vplivov začasno spremenjenih odočnih razmer morebiti izrazito nevarnost oziroma omejila

inkcija infrastrukturnih objektov. Z analizo stabilnosti varovalnih bneje so se analizirali tudi adbene jame, npr. odsek a–Zagreb, potek gladin v ločesto in sotočjem s Savo, avno varnost Krške vasi in roma gladine neposredno

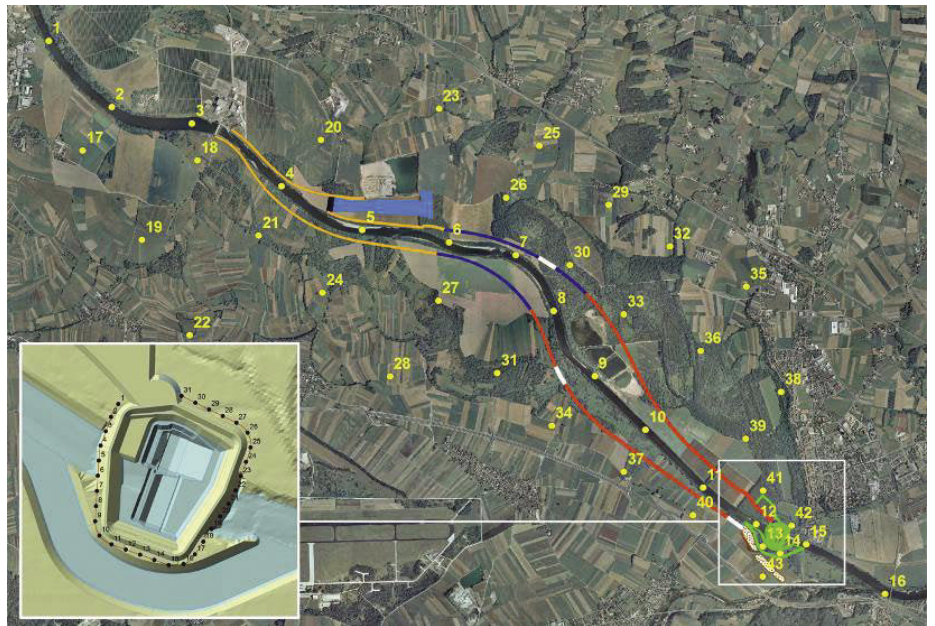


**! jame in obtočnega
lice na odočni režim**

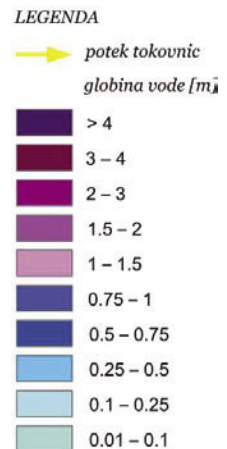
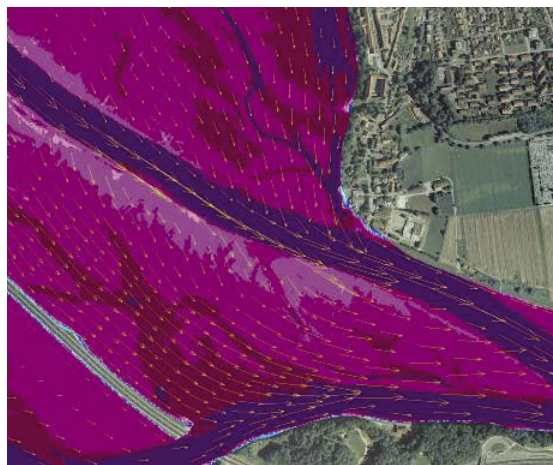
Po prvotni zamisli bi izkopani material iz gradbene jame odložili na desnem bregu Save, izkop iz obtočnega kanala pa na levem bregu. Za zmanjšanje stroškov izkopa obtočnega kanala bi bila najugodnejša lokacija deponij čim bližje kanalu. Upoštevaje tokovno sliko pri obstoječem stanju (slika 6), so bile načrtovane začasne deponije zemljine tako, da bi čim bolj sledile vodnemu toku.

Pri obstoječem stanju bi ob pojavu 100-letne vode (3750 m³/s) po desnem poplavnem prostoru med Savo in avtocesto (AC) Ljubljana–Zagreb tekla četrtina celotnega pretoka (ca. 900 m³/s). Zaradi umestitve gradbene jame in obtočnega kanala Save pa se tokovna slika precej spremeni, saj iz vodnega toka izločeni prostor gradbene jame zmanjša pretočnost v preostalem prečnem prerezu in se vodni tokovi drugače prerazporedijo, s tem pa tudi globine, hitrosti, erozija idr. Odlaganje materiala na predlaganem območju pa bi pretočni prerez na desnem bregu dodatno zožilo, kar bi povzročilo zajezitev oz. dvig gladin gorvodno in s tem povečanje poplavne nevarnosti. Hkrati bi se povečale tudi hitrosti vodnega toka in strižne napetosti med vodo in terenom, s tem pa tudi erozijska ogroženost kmetijskih zemljišč in avtocestnega telesa.

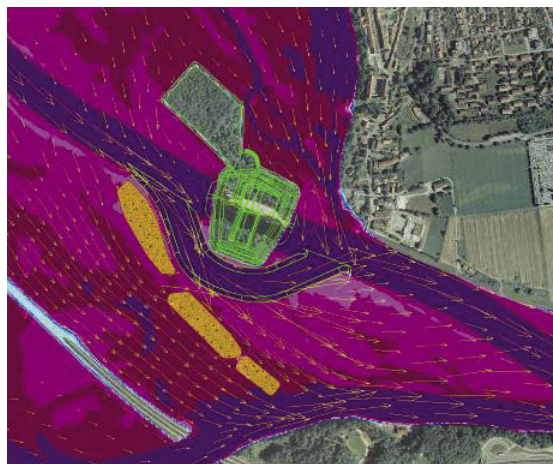
Slika 7 pokaže spremenjeno hitrostno polje (vektorje hitrosti) in porast globin ob AC. Zgolj zaradi izgradnje gradbene jame bi se pri obravnavanih pretokih pojavil dvig gladine na levem in desnem poplavnem območju velikosti do 45 cm, ki bi izzvenel približno 2 km gorvodno po strugi. Zaradi spremenjenih odočnih razmer bi bilo treba na nekaterih mestih (npr. naselje Šentlenart) protipoplavne nasipe zgraditi že v začetnih fazah gradnje HE Brežice. Skupni izračunani vpliv gradbene jame in deponij bi bil že tolikšen, da bi se ob 100-letni vodi pojavila preplavitev AC, deponije



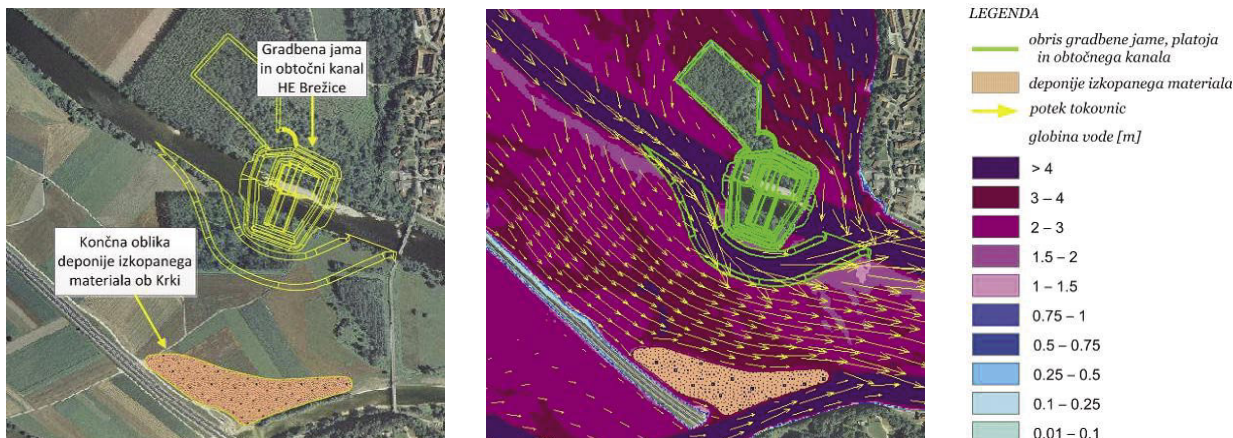
Slika 5 • Lokacije točk, v katerih je bila izdelana primerjava gladin



Slika 6 • Polje hitrosti in globin na območju gradbene jame pri obstoječem stanju



Slika 7 • Glede na sedanje stanje (slika 6) so bile oblike deponij izkopa iz obtočnega kanala načrtovane po načinu, ki sledi porazdelitvi lokalnih hitrosti, kar pa poveča globine in hitrosti ob avtocesti



Slika 8 • Končna lokacija in oblika deponije izkopenega materiala gradbene jame in obtočnega kanala ter tokovno polje pri 100-letni visoki vodi



Slika 9 • Fotografija območja gradbene jame in obtočnega kanala ob visokih vodah septembra 2014 (pretok ca. 2000 m³/s) (Vir: 24ur.com)

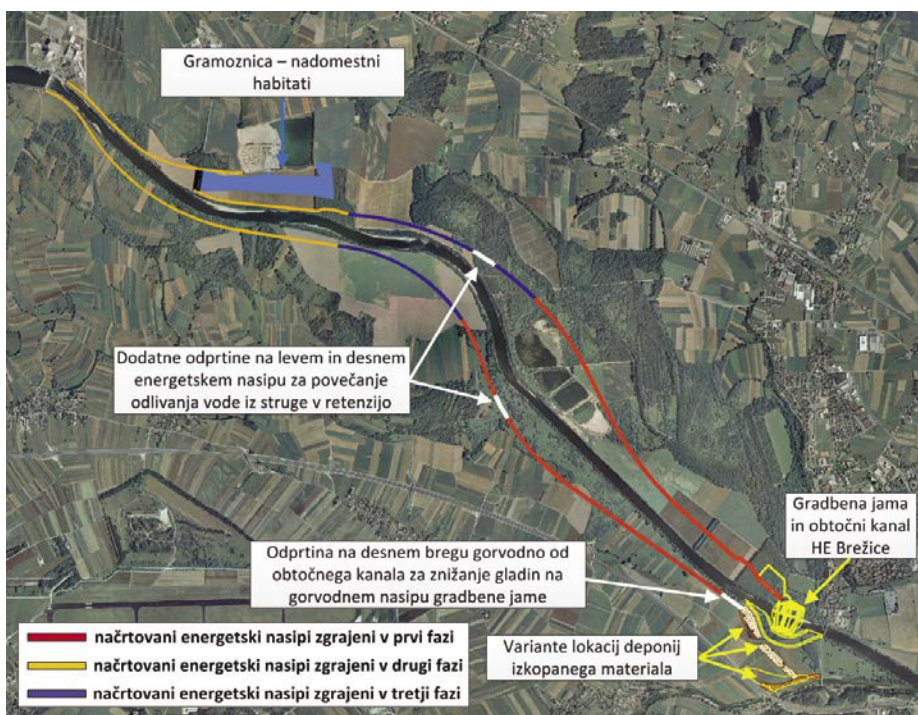
pa bi delno onemogočale tudi vračanje vode iz desne retenzije proti sotočju Save in Krke oziroma bi tok bolj usmerjale proti odseku Krke dolvodno od AC-mostu. Zato bi se gorvodno v strugi Krke pojavile višje gladine ter poslabšale poplavne razmere pri Krški vasi in Velikih Malencah. Začetno umestitev deponij izkopenega materiala je bilo treba zaradi zmanjšanja pretočnega prereza in posledičnega slabšanja odtočnih razmer spremeniti.

S stališča stroškov in poplavne varnosti bi bila ugodnejša predstavitev deponij gorvodno od gradbene jame, kjer je pretočni prerez desne retenzije še velik in bi bil vpliv deponij manjši. Vendar to ni mogoče zaradi arheološkega

najdišča, na katerem bodo raziskave potekale še precejšnji del časa gradnje HE.

Tudi za druge lokacije deponije na desnem bregu Save so izračuni pokazali, da se kritična točka ob izgradnji jezovne zgradbe in nasipov pojavlja na zoženem območju med gradbeno jamo in AC Ljubljana–Zagreb, zato je preostala le možnost, da se deponije čim bolj odmaknejo od Save in se umestijo ob levi breg Krke (slika 8). Tako bi deponija v vogalu med levim bregom Krke in nasipom AC začasno delovala tudi kot visokovodni nasip, ki bo odvrčal vdiranje savske vode iz desne retenzije Save v strugo Krke, s čimer se bo že v fazi gradnje doseglo delno izboljšanje poplavne varnosti Krške vasi in Velikih Malenc. Za ta naselja je bil izračunan ugoden vpliv VV-nasipa na levem bregu Krke že v študiji iz leta 2012 (Rak, 2012). Začasno odlaganje materiala na tem območju bi gladine Krke v profilu avtocestnega mostu znižale (glede na obstoječe stanje) do 50 cm, kar pomeni, da se za približno toliko znižata tudi gladina v Krški vasi in s tem poplavna nevarnost. Deponija pa preusmeri tok vode proti Savi, zato se gladine ob gradbeni jami seveda nekoliko zvišajo.

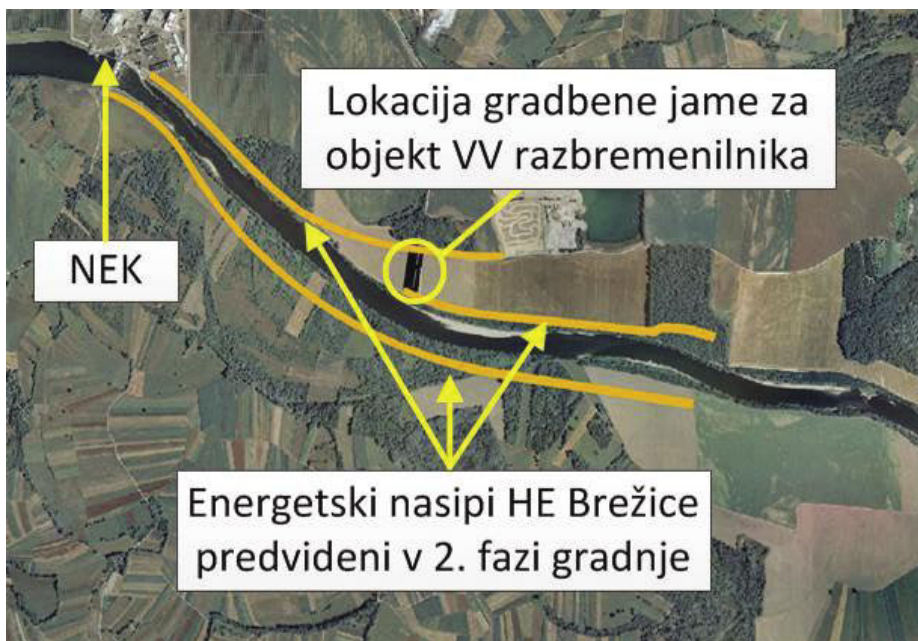
Slika 8 prikazuje končno obliko odlagališča, ki sprejme celotno količino materiala iz kopa obtočnega kanala. Deponija je v smeri vzdolž Krke krajša, kot bo načrtovani protipoplavni nasip, zgrajen po DPN HE Brežice, njena oblika pa je prilagojena glede na tokovnice v desni inundaciji ob gradbeni jami.



Slika 10 • Prikaz faznosti izgradnje posegov, ki so bili upoštevani v hidravlični analizi

4.2 Spreminjanje odtočnih razmer v posameznih fazah gradnje energetskih nasipov HE Brežice

Izračunane razmere primerov za gradbeno jamo z deponijami oziroma brez njih so bile izhodišče za iskanje najugodnejšega



Slika 11 • Energetski nasipi dolvodno od NEK predvideni za drugo gradbeno fazo

zaporedja (faznost) gradnje nasipov akumulacije, takšnega, ki bi v kar najmanjši možni meri dodatno negativno vplival na odtočne razmere oziroma bi se stanje celo izboljšalo, predvsem vzdolž AC Ljubljana–Zagreb (slika 10).

V prvi fazi se je predvideval pričetek gradnje nasipov na obeh bregovih Save od jezovne zgradbe HE Brežice gorvodno, z odprtino na desnem bregu ob gradbeni jami, ob vtoku v obtočni kanal. Pri obstoječem stanju se visoke vode na tem odseku še vedno izlivajo iz struge v retenzijo. Zgrajeni nasipi bodo prekinili dotok vode iz struge na poplavne površine, zato se bo povečal pretok med

zgrajenimi nasipi proti prerezu ob gradbeni jami. V tem obdobju se bodo torej zmanjšali dotoki v obe poplavni območji in se bodo tam znižale gladine (in s tem poplavna nevarnost), večji pretok proti gradbeni jami pa bo vzdolž varovalnih nasipov gladine vode zvišal (za 10 do 40 cm).

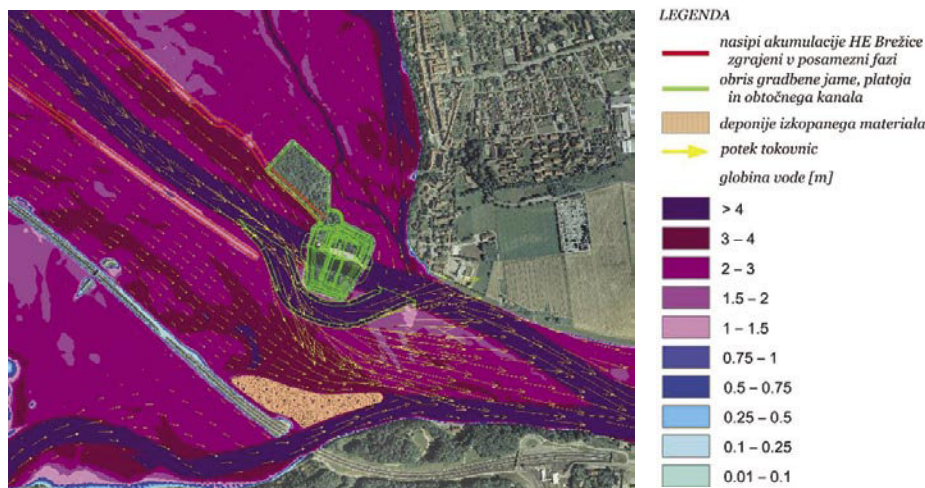
V drugi fazi je predvidena gradnja nasipov od jezov NEK dolvodno, vključno z visokovodnim razbremenilnikom. Ta bo po končani izgradnji sicer opremljen s hidromehansko opremo, ki pa v fazi izgradnje seveda ni upoštevana. Na odseku med Savo in gradbeno jamo razbremenilnika je predvidena še deponija izkopanega materiala, ki do določene mere štiti

delovišče pred visoko vodo. Kota nasipov ob gradbeni jami razbremenilnika je bila pri izračunih upoštevana kot kota prelivanja pri pojavu višjih voda, ki zalijejo gradbeno jamo.

Po končani izgradnji nasipov predvidenih v 2. fazi se bo visoka voda iz struge lahko izlivala le še na desnem bregu gorvodno od jezov NEK na desno poplavno območje in na odseku, kjer nasipi 3. faze še ne bodo zgrajeni. Računi pokažejo, da bi se pri višjih visokih vodah leva retenzija delno polnila tudi na mestu načrtovanega razbremenilnika, saj višje visoke vode prelijejo varovalni nasip gradbene jame razbremenilnika. Nasipi 2. faze dodatno zmanjšajo izlivanje vode iz struge v retenziji, zato se še poveča pretok med nasipi, kar povzroči dvig gladine vode v strugi Save in območju znotraj nasipov glede na obstoječe stanje (do 70 cm), na večjem delu retenzijskih površin pa se gladine znižajo (do 35 cm). Le v spodnjem delu desne retenzije so gladine zaradi vpliva gradbene jame in deponije izkopanega materiala v tej fazi gradnje še vedno nad sedanjim stanjem.

Ko bodo v 3. fazi zgrajeni energetski nasipi v celotni dolžini, bo izlivanje vode iz struge na poplavne površine omejeno na odsek nad jezom NEK, na krajši del nezgrajenih nasipov neposredno pred gradbeno jamo, kjer je tudi vtok v obtočni kanal, in na pretok čez razbremenilnik. Pri slednjem se je v kot prelivni rob v izračunih upoštevala kota krone preliva povsem odprtega razbremenilnika, torej stanje, ko je betonska konstrukcija zgrajena, ni pa še vgrajena hidromehanske opreme (zapornic). V tem obdobju gradnje bodo retenzijske površine ob visokih vodah aktivirane v podobnem obsegu, kot bodo tudi po izgradnji HE Brežice, kar pomeni, da so v retenzijah že nižji pretoki kot pri sedanjem stanju, posledično pa v večjem delu retenzijskih površin tudi nižje gladine.

Glavnina vode torej teče znotraj nasipov akumulacije HE Brežice do lokacije jezovne zgradbe, kjer je preusmerjena na obtočni kanal in območje spodnjega dela desne retenzije. Izračuni so pokazali, da bi takšen potek gradnje zahteval precej višje varovalne nasipe gradbene jame, kot je bilo predvideno v idejnem projektu. V izogibitev potrebnemu nadvišanju nasipov so bile z izračuni raziskane razmere, ko bi bil desnobrežni energetski nasip v prvi fazi krajši in bi se končal 200 m gorvodno od vtoka v obtočni kanal (slika 10). Tako bi se povečal odliv vodne mase iz struge gorvodno od gradbene jame, kar pozitivno vpliva na gladinsko stanje ob gorvodnem va-



Slika 12 • Hitrostno polje in polje globlin na ožjem območju gradbene jame pred pričetkom zapiranja obtočnega kanala in preusmeritve vodnega toka preko prelivnih polj jezovne zgradbe

rovalnem nasipu gradbišča. Vendar se hkrati poslabša stanje ob AC, saj se vodni tok proti njej, ker je izlivanje visoke vode omejeno le na desno, že tako kritično območje.

Za razbremenitev spodnjega dela desne retenzije in zmanjšanje količine vodne mase, ki se odlije na območju ob gradbeni jami, sta bili zato dodatno predvideni dve 200 m dolgi odprtini v srednjem akumulaciji (slika 10). Z odprtino na levi, ki je locirana na mestu, ki omogoča kar največji odliv (zunanj del krivine), se aktivira leva retenzija, z odprtino na desni pa se aktivira tudi srednji del desne retenzije, s čimer se doseže ugodnejše tokovno polje na delu med gradbeno jamo in AC. Povečana masa vodnega toka iz srednjega dela v spodnji del desne retenzije pri tem bistveno oslabi moč vodnega toka, ki je zaradi oblike gradbene jame in obtočnega kanala usmerjen prečno, proti AC. Kot je razvidno iz vektorjev hitrosti na spodnji sliki končne variante, je vodni tok iz odprtine ob gradbeni jami in obtočnega kanala na razmeroma kratki razdalji povsem preusmerjen proti sotočju

Save in Krke in tako ne vpliva na povečanje hitrosti (erozijske nevarnosti) in dvig gladin ob telesu AC.

V članku so predstavljene le nekatere ugotovitve iz obsežnega nabora izračunov, ki kažejo, kako raznolik je odziv vodnega toka na posege v poplavnem območju. Projektant je z njimi dobil hidravlične podlage, da je lahko ovrednotil različne zasnove in ustrezno načrtoval izkop gradbene jame in obtočnega kanala, zaporedje faz gradnje energetskih in visokovodnih nasipov ter drugih načrtovanih posegov, ki bi v kar najmanjši možni meri vplivali na poplavno in erozijsko nevarnost. Kljub iskanju najugodnejšega poteka gradnje pa so analize pokazale, da bodo v posameznih gradbenih fazah odtočne razmere na nekaterih območjih nekoliko slabše kot pri obstoječem oziroma končnem načrtovanem stanju. Ker gre pri tem tudi za poseljena območja in infrastrukturne objekte državnega pomena, rezultati izračunov narekujejo potrebo po prioritetni izgradnji nekaterih protipoplavnih nasipov pa tudi do-

datnih začasnih ukrepov za zaščito območij in infrastrukture, ki bo v času gradnje izpostavljena povečani poplavni in erozijski nevarnosti (npr. zavarovanje dela AC-telesa). Sporočilo tega prispevka je tudi, da je treba uporabnike prostora in dejavnosti, ki v njem potekajo, seznaniti s procesi in vplivi postopnega umeščanja posegov v prostor, torej dalj časa trajajoče gradnje objektov in ureditev. Čeprav tega zakonodaja ne zahteva, bo treba pri tako obsežnih umeščanjih posegov v prostor vzdolž daljših odsekov vodotokov z obsežnim vplivnim območjem opravljati periodične izračune, s katerimi se bo preverjalo, ali morebiti spremenjene razmere oz. uporaba prostora ne vpliva na odtočne razmere v tolikšni meri, da niso več izpolnjeni pogoji, pod katerimi je bil DPN sprejet. Kot so pokazale razmere ob poplavah na Dravi jeseni 2012, lahko že čezmerna zarast na poplavnih območjih bistveno vpliva na vodne tokove in povzroči drugačno sliko poplavne nevarnosti. Takšno dodatno tveganje je treba z ustreznim prostorskim redom čim bolj zmanjšati.

5 • SKLEP

Za ustrezno prostorsko umeščanje objektov in načrtovanje ureditev, ki bistveno vplivajo na odtočni režim in bi se lahko zaradi njih povečala poplavna in erozijska nevarnost ter posledično ogroženosti drugih rab prostora, je treba upoštevati vpliv na vodno okolje kot tudi vpliv delovanja voda na objekte in ureditve. Pri ugotavljanju sprejemljivosti posegov je običajno dan poudarek na ugotavljanju razlik med obstoječim stanjem in načrtovanim oz. končanim posegom, ki seveda mora biti izveden v skladu s pogoji, soglasji in dovoljenji.

Pri dalj časa trajajoči gradnji pa je treba upoštevati, da se spreminjajo tudi razmere na vodah in se lahko tudi v času gradnje pojavijo visoke vode. Zaradi začasnih objektov, deponij ipd. ter posameznih faz gradnje, npr. gradnje nasipov po odsekih, se v prostoru pojavi stanje, ko načrtovani poseg še ne deluje kot funkcionalna celota. Zato je treba analizirati tudi morebitne negativne vplive spreminjajočih se (odtočnih) razmer na vsakokratno poplavno in erozijsko ne-

varnost uporabnikov obvodnega in dolvodnega prostora, saj se lahko pomemben vpliv začasnega stanja v prostoru pojavi že pri visokih vodah nižje povratne dobe.

V članku je prikazano, da je vključitev hidravlične analize v postopek načrtovanja faznosti izvedbe enako pomembna kot pri načrtovanju in optimiziranju končnih rešitev posegov v prostor. Na primeru izgradnje objektov in ureditev v sklopu DPN HE Brežice so hidravlični izračuni podali informacije za primerno načrtovanje gradbenih faz in iskanja lokacij oz. gabaritov začasnih objektov ali ukrepov, saj je to pomemben referenčni prostor na odseku med Krškimi in državno mejo, ki vpliva na odtočne razmere na mejnem profilu z Republiko Hrvaško. Hkrati je bilo treba upoštevati, da leži na vplivnem območju tudi NEK, kjer kakršnokoli poslabšanje odtočnih ali njihovih obratovnih razmer ni sprejemljivo ne v času gradnje ne pri končnem načrtovanem stanju. S primerjavo vmesnih stanj in rezultatov sedanjega in končnega stanja je bilo mogoče ugotavljati in ovredno-

titi morebitno poslabšanje v posamezni fazi gradnje oz. spremembe v prostoru, da je lahko projektant predvidel drugačno časovno faznost izvedbe posameznih objektov oziroma predlagal in utemeljil dodaten nabor (začasnih) ukrepov za odpravo povečane nevarnosti in ogroženosti.

Z izgradnjo objektov po DPN HE Brežice se bodo za obsežno območje Krško-Brežiškega polja spremenile odtočne razmere. Pogostejšega poplavljanja ob nižjih pretokih ne bo več, preko razbremenilnikov pa se bo vendarle ohranjalo poplavljanje in s tem zadrževanje vode pri višjih visokih pretokih. Zato bo treba upoštevati izkušnje drugih, ki kažejo, da se po izgradnji objektov lahko pomembno spreminja raba prostora, posebno kadar se hkrati izvajajo tudi protipoplavni ukrepi. Zmanjšana poplavna nevarnost namreč »privabi« intenzivnejšo rabo prostora, s tem pa narašča škodni potencial ob nastopu poplav. Od izgradnje objektov po DPN pa do morebitne posodobitve DPN oz. do spremembe/razgradnje teh ureditev bo treba spremljati, po potrebi pa tudi omejevati neprimerne rabe prostora na vplivnem območju v celotni dobi delovanja objektov, da ne bi voda (znova) pokazala svoje moči.

6 • LITERATURA

- Bombač, M., Hidravlična raziskava gradbene jame HE Brežice na fizičnem modelu. *Acta hydrotechnica* 25/42 (2012), 1–17, 2011.
- Flycom, d.o.o.; Posnetek stanja terena s tehnologijo LIDAR, snemano 14. do 16. januarja 2007; (naročnik Ministrstvo za okolje in prostor RS), 2007.
- IzVRS, Inštitut za vode RS. Hidrološka študija pritokov Save – na odseku od vtoka Savinje do državne meje, C-1261, Ljubljana, 2004.
- IzVRS, Inštitut za vode RS. 2011, Verjetnostna analiza spremenjenih vrednosti visokih vod Save v.p. Radeče, Dopolnite 2, Ljubljana, 2011.
- Mlačnik, J., Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Müller, M., Ciuha, D.. Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hibridni hidravlični model območja HE Brežice, končno poročilo, Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave, 57 str., 2011.
- Rak, G., Müller, M., Steinman, F., Šantl, S., Novak, G., Hydraulic modeling of future hydro power plants on lower Sava, ICOLD Symposium. Austria, Graz, Verlag der Technischen Universität Graz, 133–138, 2010.
- Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F., Uporaba hibridnih hidravličnih modelov pri načrtovanju HE na Spodnji Savi, *Acta hydrotechnica* 25/42 (2012), 59–70, 2012.
- Rak, G., Steinman F., Müller, M., Zupančič, G., Analiza vpliva spremembe nivelete struge Krke in visokovodnega nasipa med AC Ljubljana–Zagreb in sotočjem Krke in Save na poplavno varnost Krške vasi in Velikih Malenc, UL FGG, KMTe, 2012.
- RS, Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje, Uradni list RS, št. 51/14, 2014.
- Weisgerber, A., Gutierrez-Andres, J., Wilson, G., Marias, F., Karanxha, A., Clarke, R., Millington, R., Physical-computational modelling comparison in Ireland. *International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation*, Nanjing, Kitajska, 192–198, 2010.
- Yafei, J., Wang S. Y., CICHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed, School of Engineering, University of Mississippi, 2001.