

VPLIV ZARAŠČENOSTI POPLAVNIH POVRŠIN NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV

THE IMPACT OF FLOODPLAIN VEGETATION ON FLOOD WAVE PROPAGATION

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

Matej Müller, univ. dipl. inž. grad.

Karin Kompare, univ. dipl. inž. agron.

prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem

Hajdrihova 28, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 627.13:621.311.21(497.4)

Povzetek | Obsežna ravninska območja zaradi svojih topografskih lastnosti predstavljajo prostor, kjer se visoke vode lahko razlijejo in zadržijo. To ima pomemben vpliv na preoblikovanje poplavnih valov, tj. znižanje konice in podaljševanje potovalnega časa vala ter posledično ugoden vpliv na poplavno varnost dolvodnih območij. Vpliv retenzijskega prostora na potovanje visokovodnega vala čez obravnavano območje je odvisen predvsem od količin vodne mase, ki se prelijejo na retenzijsko površino, in odtočnih razmer na njej. Na pretočno in zadrževalno sposobnost med drugim pomembno vpliva tudi raba prostora. Ker je na poplavnih območjih praviloma dovoljena kmetijska raba oz. grmovna ali gozdna zarast, prispevek podaja rezultate hidravlične analize vpliva obsežnosti zarasti, kot ene od rabe prostora, na odtočne razmere v retenziji in s tem na potovanje poplavnih valov. Z izbranimi kazalniki je analiziran tako vpliv rabe prostora retenzije na odtočne razmere in poplavno nevarnost znotraj obravnavanega območja kot tudi vpliv rabe prostora retenzije na dolvodne razmere za teoretično predpostavljeno geometrijo obvodnega prostora. Ugotovitve so nato primerjane z odzivom poplavnega območja Krško-Brežiškega polja, kjer se pripravlja gradnja HE Brežice.

Ključne besede: poplavni valovi, hidravlično modeliranje, poplavna nevarnost, raba prostora, zarast

Summary | Due to its topographical characteristics extensive flat areas present the surfaces where high waters might spill and retain. This has a significant impact on the transformation of flood waves, i.e. peak attenuation and lengthening of the propagation time and, consequently, positive impact on flood safety of downstream areas. The impact of the retention area on the flood wave propagation over the studied area depends on the quantity of water mass spilled into the retention area and runoff regime on it. The conveyance and retention capacity of the area is significantly influenced by the land use. Since agricultural use and shrub or forest vegetation on the flood areas are generally permitted, the paper presents the results of a hydraulic analysis of the impact of vegetation extensiveness, as one of the land use, on the runoff regime in a retention area and thereby on flood wave propagation. By selected indicators the impact of the land use in the retention area on the runoff regime and flood hazard within the studied area was analysed, as well as the impact of the land use in the retention area on downstream conditions for theoretically assumed geometry of the riparian areas. The findings are then compared with the hydraulic response of the flood area of Krško-Brežiško polje, where HPP Brežice is under construction.

Key words: flood waves, hydraulic modeling, flood hazard, land use, vegetation

1 • UVOD

Obvodni prostor in poplavne površine, predvsem na ravninskih območjih, predstavljajo velik razvojni potencial, hkrati pa obsežnejša poplavna območja s svojo zadrževalno sposobnostjo pomembno vplivajo na odtočni režim in poplavno varnost dolvodnih območij pri visokih vodah (v nadaljevanju VV). Zaradi navzkrižnih interesov pri prostorskem načrtovanju, umeščanju objektov v prostor oziroma določanju daljnoročne namembnosti rabe in varovanja značilnosti prostora oziroma okolja je premišljena strategija razvoja prostora in posegov v vode nujno potrebna.

Načrt trajnostnega razvoja prostora pa mora nedvomno vsebovati tudi celovito in sistematično obvladovanje poplavne nevarnosti ogroženih območij, upoštevaje tako gradbene kot negradbene ukrepe. Z gradbenimi zaščitnimi ukrepi, kot so visokovodni nasipi, regulacije, obtočni kanali itd., se vpliva na preusmerjanje tokov in spreminjanje dinamike visokovodnih dogodkov ter na preprečitev neposredne poplavne škode, kadar je to nujno potrebno. Z njimi torej lokalno izboljšamo stanje, posledično pa izločimo naravno zadrževanje na poplavno varovanih površinah. Žal pa lahko s tem poslabšamo razmere gorvodno (višji vodostaji), na drugi strani pa izključevanje retenzijskega prostora pomeni potovanje konice VV z nezmanjšano ali celo povečano hitrostjo, kar lahko poveča ogroženost dolvodno. Ker se retenzija ne polni z vodo, ni zadrževanja vode v njej, zaradi česar se tudi konica VV-valov ne znižuje (Sholtes, 2011). Negradbeni ukrepi za preventivo in zaščito pred škodljivim delovanjem voda pa so vezani predvsem na pripravo predpisov

o protipoplavni gradnji, ki je ali voodoporna ali vodotesna gradnja, na izvajanje usmeritev in načrtov prostorskega planiranja in (v primeru višje sile) na vzpostavitev sistemov napovedovanja, zgodnjega obveščanja in sistemov podpora odločanja v času poplavnih dogodkov. Z negradbenimi ukrepi se le v manjši meri vpliva na nevarnost (tj. na pojav visokih voda), pomembneje pa na zmanjšanje ranljivosti (tj. na povečanje odpornosti), predvsem pa se želi vzpostaviti sistem celovitega in trajnega obvladovanja poplavne nevarnosti in zmanjševanja čezmernega tveganja. Učinkovito in celovito načrtovanje rabe prostora na področju obvladovanja poplavne nevarnosti zahteva tudi ohranjanje, izboljšanje ali celo ponovno vzpostavitev interakcije med strugo in poplavnimi površinami ter tako z izkoriščanjem obstoječe ali celo s povečevanjem retenzijske sposobnosti poplavnih površin vplivati na zmanjševanje poplavne nevarnosti dolvodnih območij. Poplavne površine, posebno kadar imajo velik retenzijski volumen, so namreč naravni suhi zadrževalniki, ki se jih danes pogosto uporablja kot možen gradbeni ukrep za zmanjšanje poplavne nevarnosti (Hill, 2010).

Na zadrževalno sposobnost poplavnih območij pomembno vplivajo topografske značilnosti, delno pa je nanjo mogoče vplivati tudi s primerno rabo prostora, ki lahko obsega različne kmetijske in rekreacijske dejavnosti. Različne vrste pokrovnosti, različne kmetijske kulture, grmovna in drevesna zarast, drugi dejavniki rabe prostora ter spreminjanje ozelenosti, višine in gostote zarasti v posameznih letnih časih pa vplivajo na odtočne razmere, tj. na

zadrževanje vode na območju retenzije, na hitrosti in smeri vodnega toka, globine vode in obseg poplavljenosti. Po eni strani to vpliva na stopnjo in obseg poplavne nevarnosti na območju retenzije, po drugi pa ima tudi vpliv na preoblikovanje hidrograma visokovodnega vala, tako na znižanje oziroma zvišanje konice kot tudi na čas potovanja konice visokovodnega vala čez obravnavani odsek (Anderson, 2009).

V zadnjih 15 letih je bilo narejenih veliko raziskav na temo gospodarjenja s poplavnimi območji na način, ki omogoča tudi blažene negativnih posledic zaradi visokovodnih dogodkov. S pravilno rabo prostora, predvsem obsežnejših poplavnih območij, je mogoče upočasniti potovanje VV-valov čez poplavne površine in s tem zmanjšati pretok v strugi vodotoka ter zakasnit sprostitev voda iz poplavljenih površin in izboljšati rabo vode (Nisbet, 2004). Thomas in Nisbet (Thomas, 2007) sta v svoji raziskavi pokazala, da je mogoče z gozdom poraslimi poplavnimi območji povečati zadrževalno sposobnost za 15 do 71 % in zakasnit čas potovanja konice za 30 do 140 minut. Pri raziskavah z enodimenzionalnim (1D) modelom je bilo ugotovljeno, da se je z zmanjševanjem gostote zarasti na poplavnih območjih povečala njihova pretočna sposobnost. Z nadaljnjim zmanjševanjem gostote zarasti in s tem zmanjševanjem hidravlične hrapavosti pa se poveča območje aktivnih poplavnih površin pri prevajanju vode in hkrati zmanjša pretok v strugi, kar zmanjšuje skupno pretočno sposobnost, medtem pa kote vodne gladine nihajo v zanemarljivem razponu (Helmio, 2002). V naši raziskavi smo uporabili naprednejši, dvodimenzionalni (2D) hidravlični model in raziskali vpliv gozdne in kmetijske zarasti na potovanje visokovodnih valov.

2 • VLOGA RETENZIJSKIH POVRŠIN NA PREOBLIKOVANJU VISOKOVODNIH VALOV

Čez odseke vodotokov z enakomernim padcem in malo spreminjajočim se pretočnim prerezom ter brez večjih retenzijskih površin VV-valovi potujejo večinoma s konstantno hitrostjo, konica pa pri tem ostaja praktično nespremenjena. Z razlivanjem dela volumna vode VV-vala iz struge na retenzijo pa se na njej pojavijo vzporedni tokovi s spremenjenimi hidravličnimi karakteristikami. Na re-

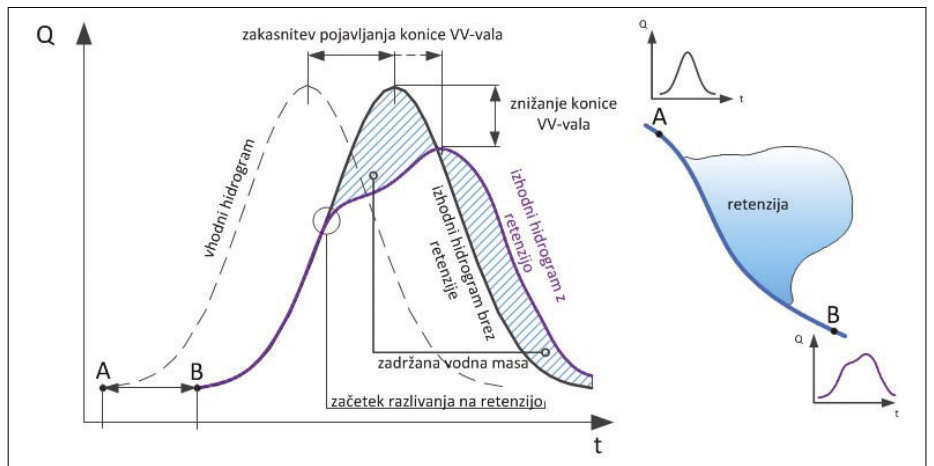
tenziji prevladujejo razmeroma plitvi tokovi z manjšimi hitrostmi, zaradi česar se pojavijo pojav zadrževanja vode na poplavljenem obvodnem prostoru in nato postopnega vračanja vode nazaj v strugo vodotoka s časovnim zamikom. Posebno v primerih, ko je volumen retenzije relativno velik v primerjavi z volumnom vala, ki se odliva, ko je presežena pretočna sposobnost struge, ima zadrževanje

voda na retenziji in postopno vračanje vodne mase v strugo ugoden vpliv na podaljšanje potovalnega časa konice in na njeno znižanje. Vpliv retenzije na VV-val se torej odraža v zmanjšani intenziteti in podaljšanem času visokovodnega dogodka. Na sliki 1 je shematično prikazan vpliv izlivanja vode iz struge in nato vračanja v strugo na hidrogram (diagram spreminjanja pretoka po času). Količina vodne mase se ohranja, na odseku vodotoka od točke A do B pa se hidrogram spremeni – ker se podaljša trajanje VV-dogodka, konica VV-vala pa nastopi kasneje, govorimo o zadrževalnem učinku retenzije.

Če ne bi bilo retenzije, bi VV-val samo nekaj časa potoval po strugi iz A v B. Na območju retenzije pa je pomembna pretočnost struge (angl. bankful discharge). Dokler v naraščajoči fazi VV ni presežena pretočna sposobnost struge, je potovanje VV-vala enako kot na odseku brez retenzije, gradient naraščajočega dela hidrograma pa vzdolž odseka ostaja praktično enak. Ko je presežena pretočna sposobnost struge, se pojavi interakcija med strugo in poplavnimi območji. Na hidrogramu se začetek razlivanja na retenzijo pokaže kot zmanjšanje gradienta naraščanja pretoka v strugi in pojav »rame« v naraščajočem delu (Leopold, 1994).

Volumen VV-vala, relativna velikost retenzije, odtočne razmere (hitrosti in gladine vode) in topografske lastnosti retenzije vplivajo tako na količino vode, ki se prelije na retenzijo, kot tudi na čas zadrževanja na njej ter na začetek in lokacijo vračanja vodne mase nazaj v strugo. Položnejši del naraščajočega veje hidrograma lahko, iz različnih razlogov, postane zopet strmejši. Po obliki izhodnega hidrograma je, ob poznavanju razmer na retenziji, mogoče določiti vzrok ponovnega prevoja v strmejše naraščanje pretoka. V primeru razmeroma hitrih tokov po retenziji in manjšega časovnega zadrževanja vode se hitrejša naraščanja pojavi zaradi sovpadanja tokov po strugi in retenziji. Prav tako pa se povečan gradient naraščanja pretoka v strugi lahko pojavi zaradi zmanjšane sposobnosti odlivanja vode na retenzijo, npr. zaradi zelo goste zarasti na obrežnem pasu.

Bolj ali manj upočasnjeno odlivanje se pojavi zaradi dejanskih hitrosti vodnega toka po retenziji (zaradi velike hidravlične hrupavosti, vpliva topografije, objektov itd.) in relativno hitrejšega naraščanja gladin na retenziji v primerjavi z naraščanjem gladin v strugi vodotoka. Prav tako se odlivanje na retenzijo



Slika 1 • Značilno preoblikovanje hidrograma VV-vala pri prehodu prek območja z retenzijskimi površinami

upočasni oz. praktično povsem prekine, če je volumen retenzije relativno majhen v primerjavi z volumnom dotekajočega VV-vala.

Če je retenzija praktično že povsem zapolnjena ob nastopu konice, ta potuje dolvodno z nespremenjeno hitrostjo in konico. V primeru daljšega zadrževanja vode na retenziji je možen tudi pojav dodatne konice oz. »trebuha« hidrograma v padajoči fazi, ki se pojavi v primerih izrazito počasnejših vzporednih tokov po retenziji, ko se intenzivno vračanje vodne mase v strugo pojavi šele po prehodu konice VV-vala preko obravnavanega odseka.

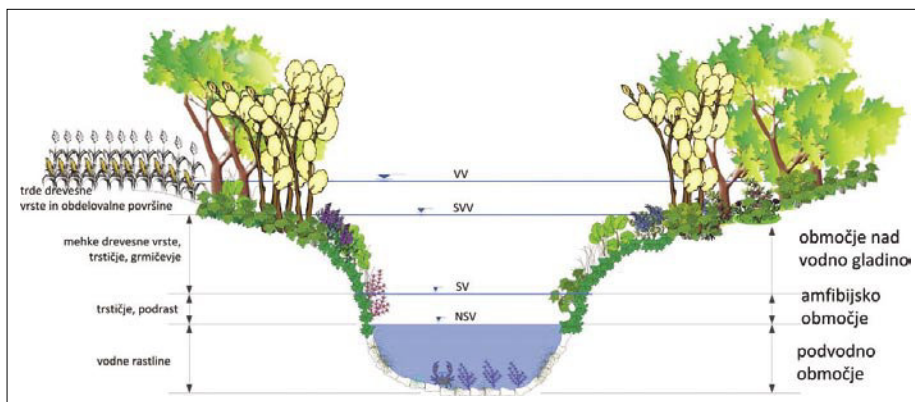
2.1 Vloga retenzijskih površin pri blažitvi intenzitete in obsežnosti poplavnih dogodkov

Poplavne oz. retenzijske površine so območja, kamor doteka voda v času visokovodnih dogodkov, ko je presežena pretočna sposobnost struge vodotoka. Pri tem se lahko pojavijo vzporedni tokovi, praviloma počasnejši od glavnega toka vode po strugi (t. i. poplavlja-

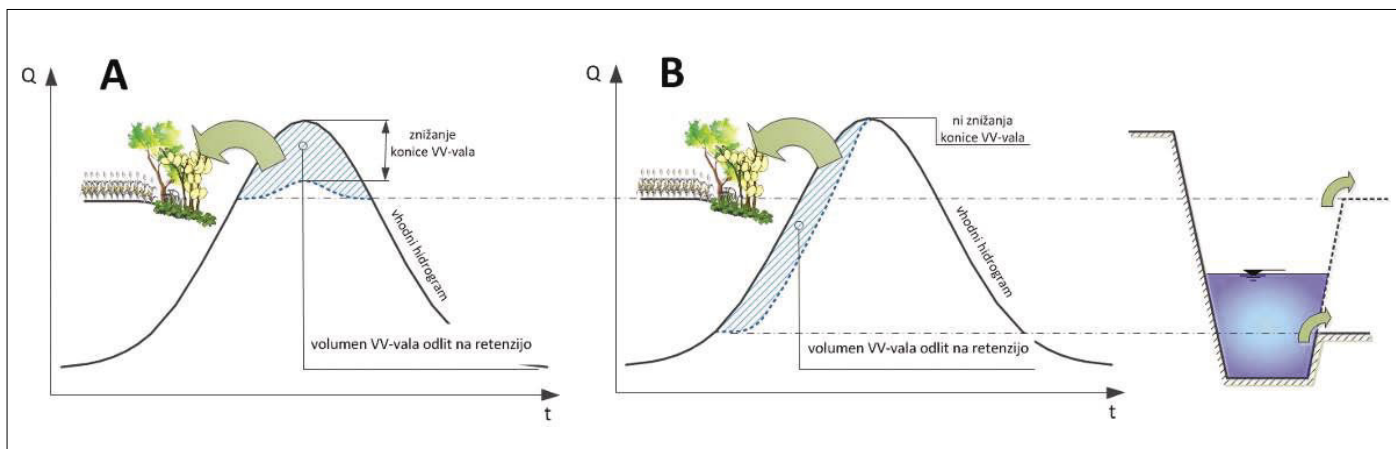
nje), ali pa se voda iz struge samo izlije in v njej praktično stoji, dokler se zopet ne vrne nazaj v strugo (t. i. preplavljanje). Za načrtovanje rabe prostora je pomembno poznati razliko med preplavitvijo in poplavitvijo, saj so slednje povezane večje hitrosti, erozijske sile, hidrodinamične (namesto hidrostaticne) obremenitve idr. V nadaljevanju se bomo ukvarjali le s poplavljanjem v retenzijah.

Zadrževanje voda, upočasnjeno pretakanje in postopno vračanje vodne mase v strugo vodotoka je odvisno od odtočnih razmer, ki so posledica makro- in mikrotopografije retenzije (padeč, stari rečni rokavi itd.), rabe prostora, višine in gostosti zarasti v posameznih letnih časih itd. Predvsem pa je vpliv retenzije na znižanje konice odvisen od velikosti retenzije v primerjavi z volumnom visokovodnega vala nad pretočno sposobnostjo struge. Ob zapolnjeni retenziji oziroma v primeru majhnega volumna je možen le majhen ugoden vpliv retenzije. Izrazitejši vpliv retenzije se zato pojavi pri visokovodnih dogodkih nižji povratnih dob, krajših trajanj in z večjim gradientom naraščanja pretoka (Williams, 2012). Retenzija ima ugoden vpliv na znižanje konice pri VV-valovih z določenim razponom volumna in konice oziroma pri VV-valovih, pri katerih se odlije vršni del vala, ko torej z retenzijo odrežemo konico VV-vala (slika 2). Kolikšen del VV-vala se odlije za največji učinek, je odvisno od časa začetka prelijanja, razpoložljivega volumna retenzije in odtočnih razmer čez retenzijo. Slika 2 prikazuje na diagramu A največji izkoristek retenzije, na diagramu B pa primer, ko je retenzijski prostor napolnjen, še preden se pojavi konica VV-vala, zato konica ostane nespremenjena.

Takšne razmere je treba še posebno skrbno analizirati, kadar se z gradbenimi ukrepi (nasipi,



Slika 2 • Prelivanje vode iz struge v retenzijo in vračanje nazaj v strugo pomembno določata stanje obrežne zarasti (Steinman, 2012)



Slika 3 • Različno preoblikovanje hidrograma VV-vala glede na začetek prelivanja na retenzijo: A – z večjo pretočnostjo struge ohranjamo retenzijo za konico VV-vala; B – pri premajhni pretočnosti struge retenzijski volumen zapolnijo že nizke visoke vode (EN, 2002)

prelivi itd.) spreminja režim odlivanja na retenzijo oziroma pri projektiranju suhih zadrževalnikov, pri katerih gre za posnemanje naravnih retenzijskih sposobnosti. Pri projektiranju dotekanja vode v retenzijo z objektom s fiksno prelivno krono je potrebna odločitev, za kakšno povratno dobo dogodkov je rešitev projektirana, tj. izbrati »projektni pretok«. Pri objektih, pri katerih se uporablja tudi hidromehanska oprema, pa je treba izdelati pravilnik obratovanja, ki temelji na kakovostni hidrološki prognozi in omogoča optimalno uporabo volumna retenzije oziroma (suhega) zadrževalnika. V obeh primerih pa je treba preveriti tudi vpliv teh objektov na dinamiko potovanja VV-valov s povratnimi dobami zunaj izbranega območja, to je za primer pojava pretokov, ki so večji od izbranih projektnih vrednosti, tj. za primer višje sile (ujme). Posegi morajo namreč izboljšati oziroma vsaj ohranjati odtočne razmere tudi pri VV-dogodkih nad projektnimi pretoki.

Optimalno izkoriščanje koristne prostornine zadrževalnika zato zahteva obratovanje objekta (sistema), ki je volumsko in časovno usklajeno z dinamiko poplavnega vala. Polnjenje v prezgodnji fazi naraščanja pretoka pomeni zapolnitev retenzije pred nastopom konice in posledično nezmožnost znižanja konice. Prav tako pa tudi prepozno aktiviranje retenzije onemogoča izkoriščanje celotne koristne prostornine in vpliva na znižanje konice. Vsakdo si lahko predstavlja jezo poplavljenec, ki jim je bila obljubljena poplavna varnost z izgradnjo dragih zadrževalnikov – pa ti ne bi obratovali ustrezno. Ker lahko na zadrževalno sposobnost vplivajo tudi odtočne razmere na retenziji, je bil v magistrskem delu (Rak, 2013) tudi teoretično raziskan vpliv zarasti (tj. rabe prostora) in ugotovitve prikazane na primeru retenzije ob HE Brežice.

2.2 Vpliv hidravlične hrapavosti retenzije na potovanje visokovodnih valov

Hidravlične analize vodnih tokov po retenziji smo opravili z dvodimenzionalnim hidrodinamičnim modelom, ki temelji na numeričnem reševanju Reynoldsovih povprečenih Navier-Stokersovih enačb, ki so po vertikali integrirana zakona o ohranitvi gibalne količine in zakon o ohranitvi mase:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (1)$$

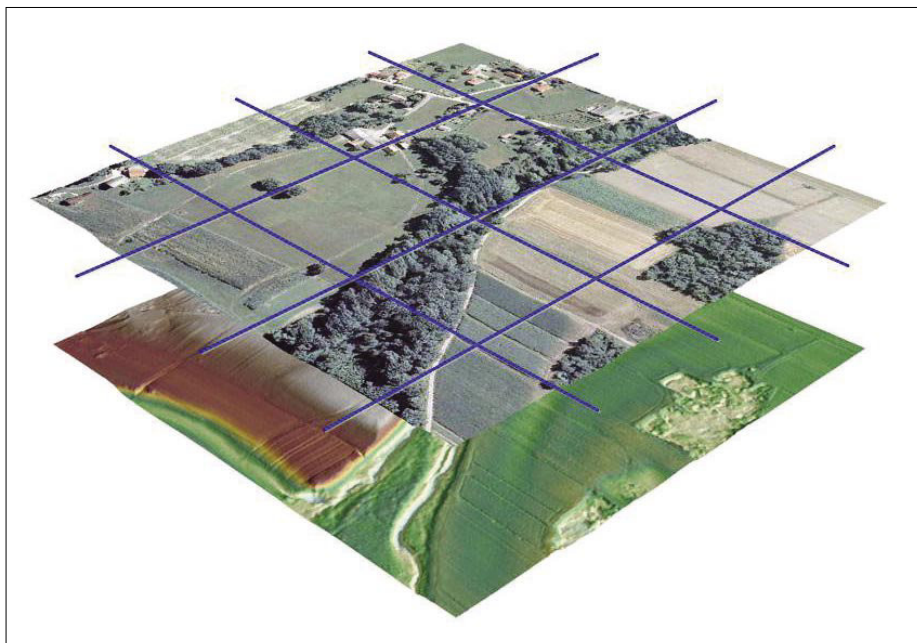
$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (2)$$

Pri tem je predpostavljeno, da so komponente hitrosti po vertikali zanemarljivo manjše. Če ta predpostavka ne velja, je treba razmere obravnavati tridimenzionalno (3D).

Seveda v teh enačbah ni mogoče zajeti vseh parametrov vodnega toka. Pomagamo si s »hidravlično hrapavostjo«, tj. s parametrom toka, ki zajame »tehnično hrapavost« kot izmerljivo hrapavost površja in še vse druge vplive, med njimi tudi vpliv zarasti (gostota in vrste zarasti ter druge motnje v vodnem toku znotraj numerične celice (slika 4)). V enačbah jo upoštevamo s pomočjo »koeffi-

cienta hidravlične hrapavosti«, ki se določa v fazi umerjanja hidravličnega modela.

Iz enačb lahko ugotovimo, da se z večanjem (koefficienta) hidravlične hrapavosti hitrosti vodnega toka zmanjšujejo, globine vode pa povečujejo – načeloma torej povečevanje hidravlične hrapavosti povečuje zadrževalno sposobnost retenzije in posledično vpliva na zniževanje konice VV-vala ter povečevanje poplavne varnosti dolvodno. Številni avtorji ((EN, 2002), (Thomas, 2007), (Hill, 2010), (in drugi)) ugotavljajo, da lahko povečanje gostote vegetacije pomembno vpliva na



Slika 4 • Znotraj računske celice se pojavlja različna raba prostora, katere vpliv je določen z eno vrednostjo koeficienta hrapavosti. V vrednosti koeficienta hrapavosti je zajet vpliv mikrotopografije znotraj celice na energijske izgube in tokovne razmere

zniževanje konice VV-vala. Predvsem pri raziskavah z enodimenzionalnimi (1D) modeli je treba izpostaviti, da lahko rezultati izkazujejo precenjen ali podcenjen vpliv oziroma so re-

zultati napačno interpretirani. Na eni strani so 1D-modeli veliko bolj odzivni na spreminjanje hidravlične hrapavosti, po drugi strani pa z 1D-modeli ni mogoče zajeti izrazitih dvodimen-

zionalnih tokovnih razmer, ki praviloma prevladujejo na poplavnih površinah. Daljša vodna pot, ki je posledica topografskih značilnosti poplavnih območij, ima lahko pomembno večji vpliv od hidravlične hrapavosti.

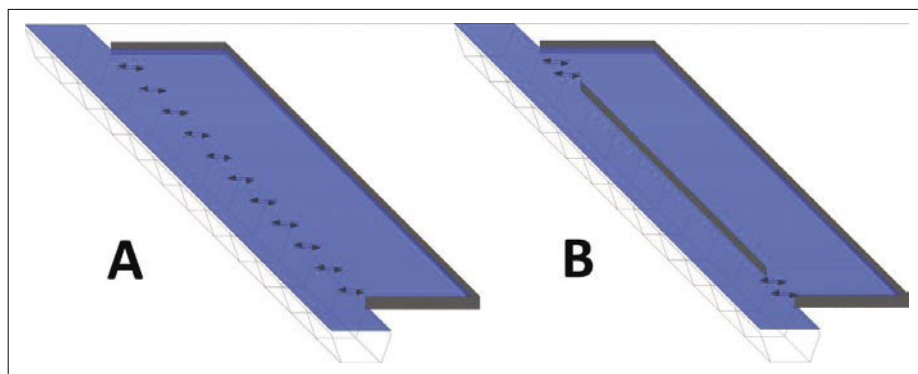
Pri oceni ugodnega vpliva hidravlične hrapavosti na zadrževalno sposobnost in zniževanje konice VV-vala je treba upoštevati tudi negativni vpliv pretirano visoke hidravlične hrapavosti. Z rabo prostora oziroma s spreminjanjem hidravlične hrapavosti je mogoče vplivati tako na količino vodne mase, ki se razlije na retenzijo, kot tudi na hitrosti vodnega toka na njej. S povečano hrapavostjo se sicer upočasnijo vodni tok po retenziji, zaradi česar se voda dlje zadržuje v njej in se kasneje vrača v strugo vodotoka. Hkrati se z večanjem hrapavosti zmanjšuje količina razlite vode, gladine na retenziji pa naraščajo hitreje, kar lahko povzroči, da ob nastopu konice ni zadostne energijske razlike med strugo in retenzijo, zato se konica vala ne more razliti na retenzijo in potuje po strugi brez znižanja. V kolikor je v celotni naraščajoči fazi VV-vala dovolj velika energijska razlika med strugo in retenzijo oziroma retenzija še ni v celoti napolnjena pred nastopom konice VV-vala, se razlivanje pojavlja ves čas naraščanja pretoka. V primeru pa, da je retenzija že zapolnjena v času nastopa konice, ta neznižana potuje skozi obravnavani odsek brez vpliva retenzije.

3 • ANALIZA VPLIVA ZARAŠČENOSTI PROSTORA V RETENZIJU NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV

Od leta 2007 so potekale intenzivne hidravlične analize odtočnih razmer pred izgradnjo HE Brežice in HE Mokrice in po njej ((Mlačnik, 2011), (Rak, 2010), (Šantl, 2010), (Rak, 2012)). Ravninska območja ob reki Savi na odseku med Krškimi in državno mejo z Republiko Hrvaško predstavljajo pomemben retenzijski prostor, ki vpliva na odtočne razmere dolvodno. Na območju je tudi Nuklearna elektrarna Krško (NEK), ki s svojimi objekti na strugi Save in ob njej tudi vpliva na odtočne razmere, hkrati pa novi posegi v prostor ne smejo poslabševati obratovalnih razmer NEK. Pri umeščanju HE Brežice in HE Mokrice v prostor so bili načrtovani tudi drugi posegi v prostor (npr. nadomestni habitat idr.) in ukrepi za zagotavljanje poplavisne varnosti v vplivnem območju obeh HE, s čimer se na celotnem območju delno spreminjajo odtočne razmere in poplavna varnost. Ker je z implementacijo posegov treba zagotoviti ohranjanje ali celo

zmanjšanje poplavne nevarnosti dolvodnih območij in odpraviti morebitni čezmejni vpliv, je bilo treba opraviti celovito presojo vplivov spremenjenih odtočnih razmer na dejavnosti, infrastrukturo, poselitve itd., ki se trenutno

na območju vpliva v retenziji dogajajo, oziroma preveriti vpliv oz. podatki pogoje za gradnjo, izvajanje dejavnosti itd., ki se v prostoru načrtujejo. Rezultati obsežne hidravlične raziskave so bili pomembna strokovna podlaga za izdano dovoljenja za HE Brežice, za HE Mokrice pa so potrebna še nekatera usklajevanja (in dodatni izračuni) v prostoru. Bistvena naloga pa ostane po izgradnji obeh HE – kako ohranjati z ustreznim rabo prostora za-



Slika 5 • Teoretično, geometrijsko poenostavljeno območje retenzije: A – komunikacija med strugo in retenzijo po celotnem obravnavanem odseku, B – komunikacija med strugo in retenzijo je omejena le na dve območji (gorvodno in dolvodno)

drževalno sposobnost prostora, ki zagotavlja ustrezne odtočne razmere dolvodno, vključno z ohranjanjem stanja na državni meji, kot je določeno v sklenjenem meddržavnem sporazumu.

Zamrznitev stanja na vplivnem območju seveda ni možna, saj je dogajanje v prostoru vedno dinamično. S predpisi (Uredba, 2008) so, v skladu s Poplavno direktivo, omejeni posegi na območja poplavne nevarnosti. Tak pristop pa ni posebno nov, saj so že Vodnogospodarske osnove (ZVSS, 1978) določale, da je tam praviloma možna (ekstenzivna) kmetijska raba – le da so posegi v prostor ubrali svojo pot. Zato se pojavlja realno vprašanje, kako se bo ohranjala zadrževalna sposobnost na Krško-Brežiškem polju, če bi se to območje čezmerno zaraščalo (grmovje, gozd) oz. če bi se povečeval delež kmetijskih zemljišč (njive in travniki).

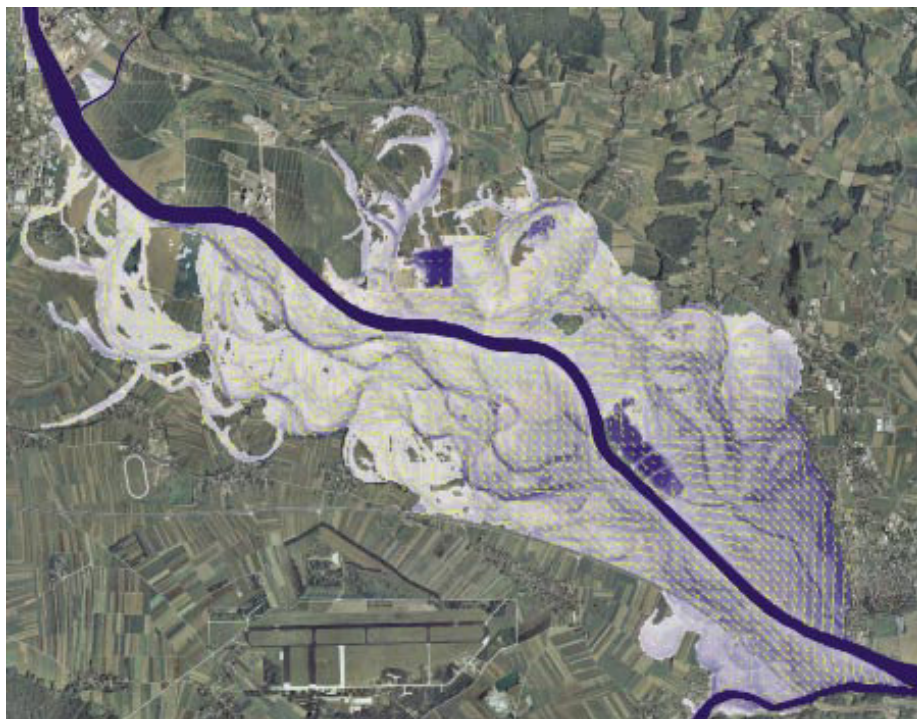
Pomembne podlage za odgovor na zgornje vprašanje podaja raziskovalno delo znanstvenega magistrskega dela (Rak, 2013), ki obravnava teoretično, geometrijsko enostavno območje, po velikosti primerljivo z retenzijskim prostorom Krško-Brežiškega polja, ter ugotovitve s teoretičnega območja retenzije primerja z odzivom na spreminjanje obsega zarasti na Krško-Brežiškem polju.

3.1 Teoretično, geometrijsko poenostavljeno območje retenzije

Za analize odziva retenzije na procese zaraščanja oz. ogoljevanja površin sta bili izbrani dve geometrijsko poenostavljeni območji, kot jih prikazuje slika 5. Dimenzije so primerljive z levo retenzijo ob Savi na območju od NEK do Brežic, varianti A in B pa odražata spremembo odtočnega režima po izgradnji HE Brežice. Varianta A je primer sedanjega stanja, kjer struga in retenzija komunicirata vzdolž celotnega odseka. Varianta B pa je primer načrtovanega stanja, kjer se vršni del poplavnega vala izliva v retenzijo na zgornjem delu, nato pa se voda vrača v Savo na dolvodnem odseku. Vmesno steno predstavlja nasip akumulacije HE Brežice.

Slika 6 kaže poplavljen (retenzijska) območja in vektorje lokalnih hitrosti za obstoječe stanje pri stoletnih pretokih. Dolvodno od VV-nasipa ob NEK se prične razlivanje na levo poplavno območje, preko katerega se oblikuje izrazit vodni tok, voda pa se vrača nazaj v strugo šele pod teraso Brežic, kjer se izliva tudi potok Močnik. Na desnem bregu se Sava izliva že gorvodno od jezusa NEK in se vrača skupaj z vodami Krke.

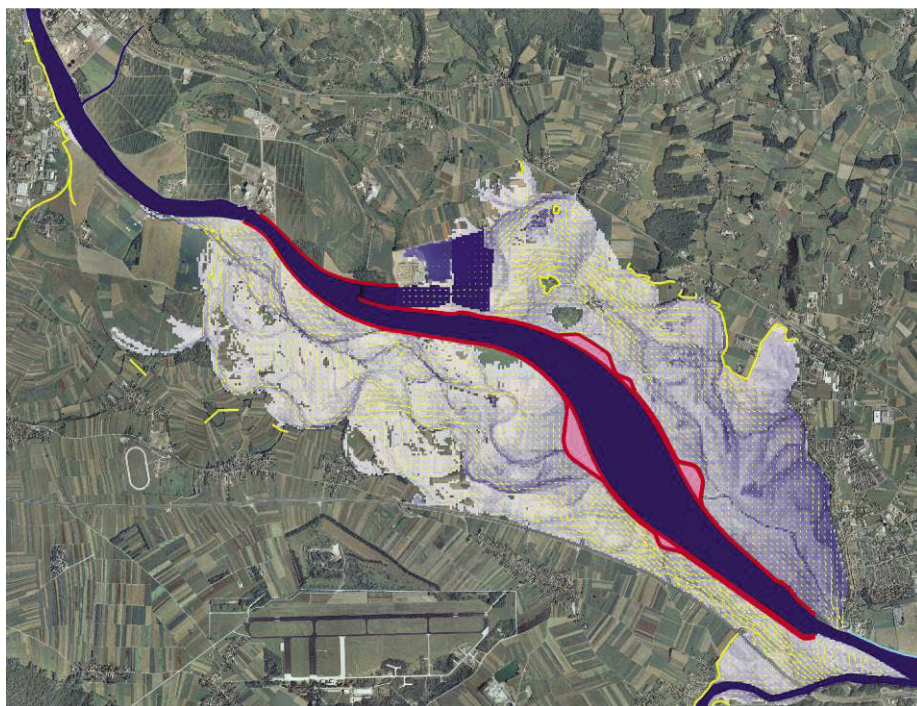
Slika 7 pa kaže načrtovano stanje, kjer se vrhni del poplavnega hidrograma s hidro-



Slika 6 • Iz izrisa vektorjev hitrosti vodnega toka so jasno razvidni smeri vodnih tokov pri Q_{100} in mesta izlivanja/vračanja vodne mase v retenzijo in iz nje pri obstoječem stanju

mehansko opremo nadzorovano izlije v retenzijo, teče ločeno od akumulacije, ki je omejena z energetskimi nasipi, in se pod HE Brežice vrača nazaj v Savo.

Tokovne razmere na obeh slikah lepo pokažejo tudi vpliv razgibane topografije na obravnavanem območju, kjer so globine vode pomembno odvisne od tega, kje je Sava



Slika 7 • Izris vektorjev hitrosti vodnega toka pokaže smeri vodnih tokov pri Q_{100} in mesta izlivanja/vračanja vodne mase v retenzijo in iz nje pri načrtovanem stanju

spreminjala svojo traso. Na odtočni režim (smeri in jakost odtekajoče vode, vodostaje itd.) torej v veliki meri vpliva tudi topografija. Da bi lahko v raziskavi analizirali vpliv zarasti, je bilo treba vpliv razgibanosti terena na teoretičnem območju izločiti. Zato je bila za teoretično območje privzeta ravna površina terena retenzije, a z vzdolžnim padcem, kot ga ima vodotok na tem odseku.

3.2 Scenariji spreminjanja hidravlične hrapavosti

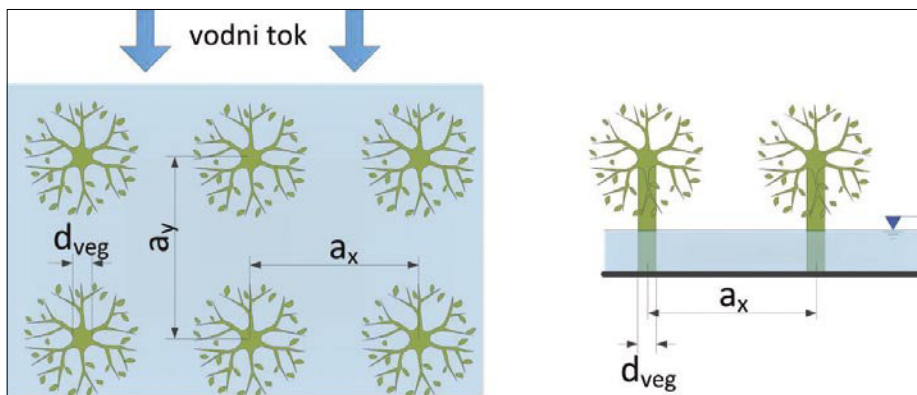
Cilj hidravlične analize je bil analizirati vpliv stopnje zaraščенosti obvodnega prostora, ki neposredno, v obliki upora vodnemu toku, vpliva na energijske izgube vzdolž toka vode. S spreminjanjem koeficienta hidravlične hrapavosti lahko zajamemo spreminjanje razmer v posamezni numerični celici 2D-modela. Glede na velikost celice (npr. 5 x 5, 10 x 10 m) je torej s koeficientom zajeta sestava zarasti znotraj nje – pri žitnem polju precej homogena, pri grmovni ali drevesni zarasti pa bolj raznolika (Rak, 2013).

V obširni hidravlični analizi vrednosti koeficienta hrapavosti niso bile definirane s trenutno vrsto rabe prostora, temveč so bile upoštevane vrednosti za posamezne vrste poraščенosti (travniki, njiva, gozd z nizko podrastjo idr.) v razponu realnih vrednosti za poplavna območja, določenih pri umerjanju numeričnih modelov na podlagi terenskih meritev stanja ob visokih vodah.

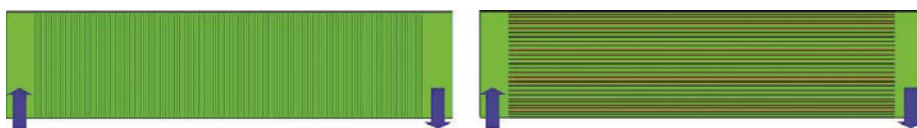
Pri teoretični, poenostavljeni geometriji območja je bilo mogoče izbirati mnogo načinov porazdelitve zarasti po prostoru – na sliki 9 sta prikazana le dva primera z zarastjo v prečnih pasovih oz. v vzdolžnih pasovih, opravljene pa so bili izračuni še za različne porazdelitve zarasti (pasovi, šahovnica idr.).

Za geometrijsko poenostavljeno območje so se za določanje vpliva zarasti na odtočne razmere koeficienti hrapavosti izbirali v obsegu realnih oziroma v številni strokovni literaturi priporočenih vrednosti koeficienta hidravlične hrapavosti n_g za poplavna območja. Rezultati naj bi pokazali, kako vrsta zaraščенosti vpliva na tokove v retenziji oz. na izhodni hidrogram in s tem na dolvodna območja.

Pri primerih iz prakse je zaraščенost praviloma vezana na parceliranost območja. Za prostor ob Savi je bil na voljo fotografski posnetek območja, zato smo po njem povzeli dejansko stanje zarasti, ga sicer primerjali z mejami posameznih parcel, v hidravličnem modelu pa dejanske razmere preslikali v numerične celice 2D.



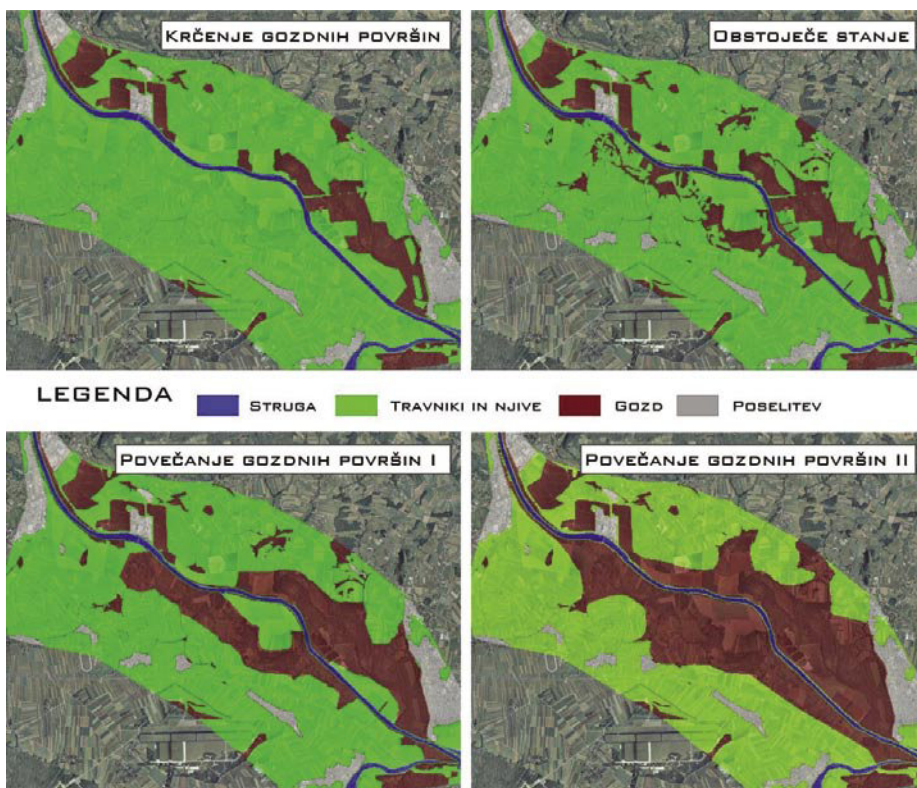
Slika 8 • Upor zarasti je mogoče zajeti z lastnostmi skupine rastlin znotraj numerične celice 2D-modela. Pri npr. sadovnjaku so pomembni razmik, debelina debel pa tudi, ali poplavna voda doseže krošnje ali ne (Müller in sod., 2009)



Slika 9 • Teoretično je mogoče predpostaviti mnogo primerov razporeditve zarasti po prostoru – prikazana sta le dva primera: prečni pasovi zarasti (npr. živa meja) in vzdolžni pasovi zarasti

V drugi fazi izračunov smo analizirali, kaj se dogaja, če se na obravnavanem območju spreminja obseg posamezne vrste zarasti (gozd, travniki, polja ...). Za opis lastnosti vrste zarasti smo uporabili konstantne koefi-

ciente hrapavosti, npr. za kmetijske površine $n_g = 0,04$, za gozdne površine $n_g = 0,125$ in $n_g = 0,20$ za poseljena območja. Za analizo vpliva spremembe rabe prostora na odtočne razmere se je predpostavilo postopno



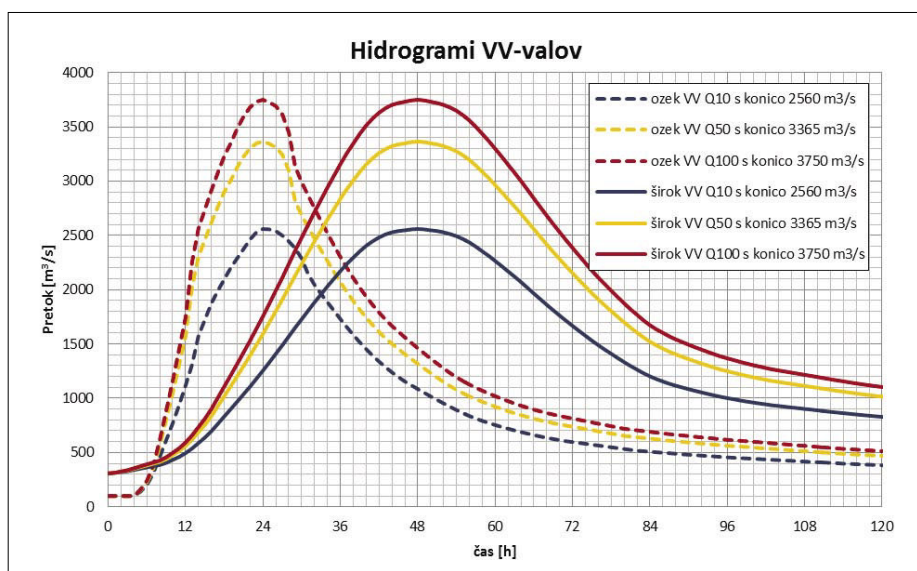
Slika 10 • Različna razmerja površin posamezne rabe prostora, ki so bila upoštevana v izračunih

zaraščanje od sedanjega stanja do 100-odstotnega deleža gozdnih površin oziroma nasprotno, trend širjenja kmetijskih površin prav tako do 100-odstotnega deleža.

Na sliki 10 so prikazani štiri različni primeri oz. scenariji zaraščенosti površin, ki so bili upoštevani v izračunih, ko se je na območju dosega stoletne visoke vode spreminjalo razmerje med gozdnimi in kmetijskimi površinami. Porazdelitev prostorske rabe je v veliki meri vezana na parcelne meje, zato smo pri postopnem spreminjanju rabe upoštevali tudi povezanost s sosednjimi parcelami. Ker je tudi tu mogoče sestaviti številne kombinacije spreminjanja zaraščенosti, so izbrani, analizirani scenariji le del te množice. Kot omejneno, sta bili v izračunih upoštevani še skrajni varianti: 100-odstotna pokritost z gozdnimi površinami in 100-odstotna pokritost s kmetijskimi površinami.

3.3 Uporabljeni hidrogrami visokovodnih dogodkov

Hidravlična analiza je bila tudi za teoretično, geometrijsko poenostavljeno območje opravljena za osem VV-valov, to je za VV-valove s štirimi različnimi vrednostmi konic in dvema različnima dolžinama trajanja. Vrednosti konic valov so bile določene tako,



Slika 11 • Hidrogrami VV-valov, ki so bili upoštevani za modeliranje območja Krško-Brežiškega polja

da pokrivajo razpon konic in volumnov VV-valov, od takšnih, pri katerih se na poplavno območje razlije le konica VV-vala, do takšnih, pri katerih je volumen vala nad pretokom, pri katerem se prične poplavljanje, zelo velik in je retenzija ob nastopu konice že povsem zapolnjena ter na ta način nima velikega vpliva na preoblikovanje hidrograma VV-vala. Za

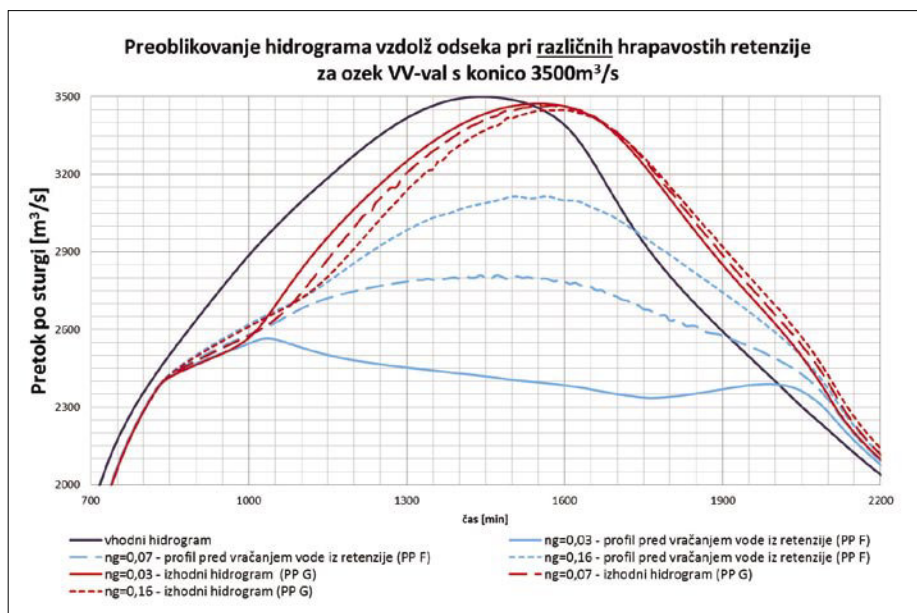
območje HE Brežice so bili obravnavani VV-valovi visokovodnih dogodkov s povratnimi dobami 10, 50 in 100 let. Za vse tri VV-dogodke sta bili upoštevani ozka in široka oblika vala. Pri enaki vrednosti konice ima ozki VV krajši čas trajanja, gradient naraščajoče in padajoče faze hidrograma je večji, volumen pa manjši kot pri širokih VV.

4 • REZULTATI

Opravljeni so bili številni izračuni, saj sta upoštevani dve območji (teoretično območje in Krško-Brežiško polje), štiri oziroma trije visokovodni dogodki (10-, 50-, 100-letne vode) z dvema oblikama hidrogramov (široki in ozki val, tj. dolgotrajne in kratkotrajne visoke vode), ter številne prostorske porazdelitve zarasti na teoretičnem in realnem poplavnem območju. Iz rezultatov raziskave povzemamo le nekaj ugotovitev, ki so pomembne za razumevanje, zakaj je treba ohranjati (če ne celo izboljšati) zadrževalne sposobnosti prostora. Za HE na spodnji Savi je seveda pomemben še dodatni cilj, tj. ohranjanje odtočnih razmer na državni meji z Republiko Hrvaško.

4.1 Vpliv hidravlične hrapavosti zaradi zarasti na zadrževalno sposobnost poplavnih površin, preoblikovanje VV-vala, konico VV-vala in njen potovalni čas

Zadrževalna sposobnost retenzije je odvisna od dejanske količine prelite vodne mase, hitro-



Slika 12 • Preoblikovanje hidrograma vzdolž odseka pri različni hrapavosti retenzije za ozek VV-val s konico 3500 m³/s

sti vodnega toka preko retenzije in posledično sovpadanja hidrogramov na odseku, kjer se voda vrača iz retenzije v strugo.

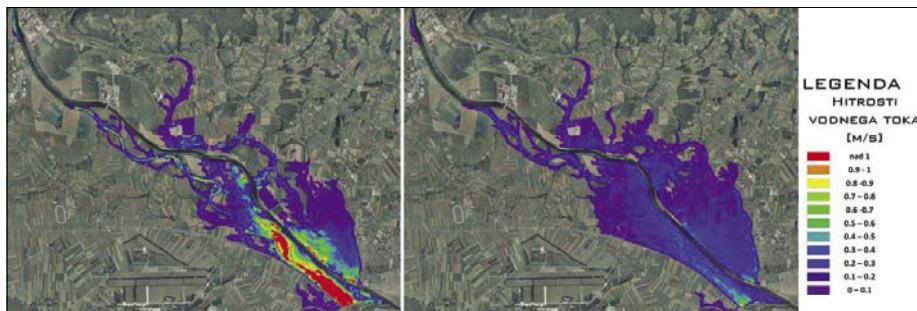
Rezultati analize za zmanjšanje konice dolvodnega hidrograma pokažejo:

- Čezmerno povečanje hrapavosti zmanjša hitrosti vodnega toka v retenziji, kar negativno vpliva na proces polnjenja retenzije. Ker ni razlivanja konice, je zadrževalni učinek retenzije premajhen in konica visokega vala v dolvodnem prerezu ostane praktično nezmanjšana.
- Pri drugem skrajnem primeru, ko je zarast zelo zmanjšana in retenzija zelo gladka, se na retenzijo sicer prelijejo večje količine vodne mase, vendar pa so hitrosti vode v njej velike, tj. reda velikosti hitrosti v strugi. Ker ni znatnega zadrževanja vodne mase v retenziji, torej konici po strugi in po inundaciji na delu, kjer se voda vrača nazaj v strugo, nastopita približno istočasno. To pa pomeni, da (skupna) konica visokega vala v dolvodnem prerezu ostane praktično nezmanjšana.

Rezultati analize za obseg poplavljenosti obvodnega prostora pokažejo:

- Z večanjem hrapavosti retenzije je tok vode po retenziji vse počasnejši. Pri neki hidravlični hrapavosti, ki je različna za različne VV-valove, je tok po retenziji že prepočasen, vodostaji pa posledično višji, kar zmanjšuje dotok vode v retenzijo. Tok vode po retenziji je sicer počasen in le malenkostno prispeva k zvišanju konice v izhodnem profilu, vendar pa so zaradi nizkih hitrosti gladine v retenziji višje, kar onemogoča odlivanje večjih količin vodne mase, prav tako pa se poveča obseg poplavljenosti pri istem pretoku glede na izhodiščno hrapavost (zaraščенost).
- Hidravlična analiza odtočnih razmer na Krško-Brežiškem polju kaže, da ima hrapavost retenzije vpliv na hitrosti vodnega toka in na vodostaje na retenziji. S slike 13 je razvidna sprememba v porazdelitvi lokalnih hitrosti za ozek VV-val s konico 2560 m³/s, posredno pa je razviden tudi obseg poplavljenosti – pri večji hrapavosti retenzije se zvišujejo vodostaji, zaradi česar se posledično povečuje obseg poplavljenosti.

Izračuni jasno pokažejo, o kakšnih problemih je treba razpravljati: če opustimo rabo podeželskega prostora in se ta čezmerno zarase, se povečajo globine poplavljanja in s tem obseg poplav; če se obseg zarasti krči, vodni tok hitreje teče in se nevarnost erozije povečuje. Vprašanje je, kdo bo zagotavljal



Slika 13 • Primerjava porazdelitve lokalnih maksimalnih hitrosti vodnega toka pri ozkem VV-valu s konico 2560 m³/s in različni hrapavosti retenzije (levo – ng = 0,03, desno – ng = 0,2) za stanje brez načrtovane HE. Zmanjšanje hitrosti poveča globine, pojavi pa se tudi večji obseg poplavljanja

oz. nadziral ciljno stanje in ukrepal, če se bo povečala poplavna nevarnost? Bi lahko in s kakšnimi mehanizmi sploh bi koncesionar lahko vplival na rabo podeželskega prostora v retenzijah?

4.2 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti na poplavno nevarnost

Analiza je pokazala, da je s povečano hrapavostjo (zarastjo) retenzije mogoče ugodno vplivati na znižanje konice VV-valov in podaljševanje potovalnega časa ter s tem na zmanjšano poplavno nevarnost dolvodnih območij. Podaljšanje potovalnega časa konice preko obravnavanih vrst retenzije za dolvodna območja podaljšuje razpoložljivi čas za pripravo protipoplavnih ukrepov in omilitve negativnih posledic visokovodnih dogodkov, znižanje konice pa tudi zmanjšanje intenzitete visokovodnega dogodka. Tako absolutne kot tudi relativne vrednosti znižanja konice se zmanjšujejo z višanjem konic VV-valov in dolžino trajanja VV-vala, ko je presežena pretočna sposobnost osnovne struge vodotoka. Povečanje hrapavosti negativno vpliva pri širši obliki VV-valov, pri katerih se v retenzijo odlije le vršni, položnejši del vala. Velika hrapavost retenzije povzroča hitro naraščanje vodostajev v retenziji glede na naraščanje vodostaja v strugi, zaradi česar ni odlivanja dovolj velikih količin vodne mase v retenzijo, kar ne omogoča, da bi retenzija ugodno vplivala na znižanje konice dolvodno.

Povečana hrapavost torej ugodno vpliva na poplavno varnost dolvodnih območij, vendar pa se ob tem spreminjajo tudi razmere v retenziji. Povečana hrapavost retenzije zmanjšuje hitrosti vodnega toka in s tem povezano nevarnost erozije. Hkrati pa poviša vodostaje, kar povečuje obseg poplav in spreminja prostorsko razporeditev poplavljenih območij ter karto razredov poplavne nevarnosti (Šantl,

2010), določene po kriterijih iz predpisa (Pravilnik, 2007). Za Krško-Brežiško polje je bilo za 100-letne visoke vode analizirano spreminjanje deleža površin, uvrščenih glede na razrede kriterijev za določanje KRPN. Pokaže se, da se s povečanjem hrapavosti retenzije delež območij z globinami nad 1,5 m (velika nevarnost po 1. kriteriju KRPN) povečuje, odstotek površin z globinami med 0,5 m in 1,5 m (srednja nevarnost po 1. kriteriju KRPN) ostaja praktično nespremenjen, odstotek območij z globinami vode, manjšimi od 0,5 m (majhna nevarnost po 1. kriteriju KRPN), pa se zmanjša. Ti trendi veljajo le za ta primer, saj ima pri spreminjanju deležev površin posameznih razredov pomembno vlogo topografija poplavnih površin. Ker je raba prostora s predpisom (Uredba, 2008) omejevana, je za uporabnike prostora pomemben podatek tudi o spreminjanju poplavne nevarnosti glede na rabo (zarast) prostora na celotnem območju.

Pozitiven vpliv povečane hrapavosti retenzije se kaže pri določanju stopnje nevarnosti po 2. kriteriju (sila vodnega toka), saj se s povečanjem hrapavosti izrazito hitro, pod 1 %, zmanjša delež površin s hitrostmi vode nad 1 m/s, kjer veljajo strožje omejitve po uredbi. Treba pa je upoštevati, da je na ravninskih odsekih vodotokov, kjer se pojavlja poplavljanje, navadno prevladujoč 1. kriterij (globine vode).

Prikazani vplivi se pojavljajo že pri spreminjanju zaraščенosti prostora, zato se namenski posegi v prostor posebej obravnavajo. Odločitev, ali dati prednost dolvodnim območjem ali v čim večji meri upoštevati uporabnike retenzije ali iskati kompromis, je zahtevna naloga »skrbnikov prostora«. Če so pri umeščanju posegov v prostor še jasne naloge in pristojnosti, pa je vprašanje, kdo bo dolgoročno skrbel za ohranjanje zadrževalne

sposobnosti prostora. »Zamrznitev stanja«, tj. rabe oz. zaraščeniosti, kot je bila upoštevana pri umeščanju v prostor (oz. pri izdaji Gradbenega dovoljenja), najbrž ni možna, saj življenje teče dalje.

V praksi se je že pokazalo, da omejitve pri kmetovanju na vodnem in obvodnem prostoru povzročijo stihijsko zaraščanje prostora, ki ga nekateri celo (institucionalno) podpirajo. Zadnji tak primer je poškodba odvodnega kanala HE Formin – ker visoke vode po čezmerno zaraščeni strugi Drave niso mogle odtehati, je voda našla svojo rušilno pot.

S hidravličnim modeliranjem pa danes že lahko ovrednotimo delež poplavnih površin, ki jih povzroči čezmerna zarast (Müller, 2013), zato je že mogoče povezati opustitev oz. preprečitev odstranjevanja čezmerne zarasti s povzročeno škodo.

4.3 Vpliv spreminjanja hidravlične hrapavosti za primer omejenega komuniciranja struge in retenzije

Za teoretično, geometrijsko poenostavljeno retenzijo z vmesno steno in za Krško-Brežiško polje z načrtovanim energetskim nasipom med akumulacijo HE Brežice in retenzijo je bila opravljena hidravlična analiza, kako

izboljšati izrabo referenjskega prostora. Gre za vprašanje, kako je mogoče kljub zmanjšanju dotekajoče skupne količine vodne mase v inundacijo doseči ugodnejši vpliv na znižanje konice v izhodnem prerezu, če naj potovalni časi ostajajo podobni kot pri varianti brez predelne stene. Rezultati za teoretično območje so podani v (Rak, 2013), tu pa prikažemo le nekaj ugotovitev za Krško-Brežiško polje.

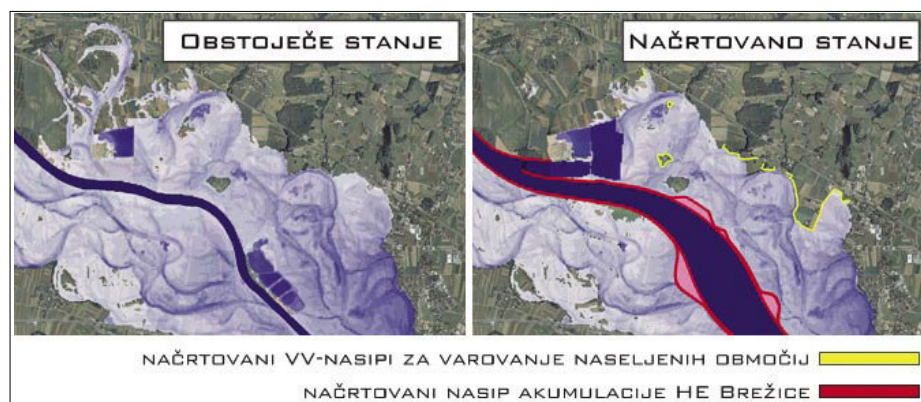
Obsežnost poplavljenih območij je tudi pri varianti z omejeno komunikacijo odvisna predvsem od topografije, še posebno na območjih koncentriranega odlivanja vodne mase iz struge. Na območju Krško-Brežiškega polja se namreč, kljub manjši skupni količini vodne mase v retenziji, zaradi topografskih značilnosti poplavnih območij zgornjega dela retenzije (širša retenzija) skupna površina poplavljenih območij pri varianti s predelno steno poveča. Zato je moral projektant HE na tem območju predvideti omilitvene ukrepe, s katerimi se odpravi poplavljanje površin v večjem obsegu, kot je bilo pri obstoječem stanju.

Pri primerjavi površin po razredih 1. kriterija se na območju Krško-Brežiškega polja pokaže, da so pri majhni hrapavosti retenzije velikosti površin z globlinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primer-

ljivega obsega. Pri večjih hrapavostih retenzije pa se pri varianti z omejeno komunikacijo v retenzijo odlijejo manjše količine vodne mase, zaradi česar vodostaji naraščajo počasneje, posledično pa je obseg površin z globlinami vode na retenziji nad 1,5 m bistveno manjši. Neugoden vpliv omejene komunikacije se pri nižjih VV valovih lahko pojavi dolvodno, zaradi možnega nastopa dvojnega vrha na hidrogramu v izhodnem prerezu, ki nastane zaradi večjih razlik v hitrostih potovanja VV-vala po strugi in po retenziji.

V dosedanjih raziskavah je bil poudarek na analizi razmer v retenziji, zato je bila analizirana le ena dolžina območja razlivanja oz. vračanja vode v strugo ter ena varianta nadmorske višine prelivnega roba v strugi ipd. Zato ostane raziskovalni izziv še iskanje optimalne velikosti odprtih izlivanja in vračanja vode tako za primer fiksnega prelivnega roba vzdolž struge kot tudi raziskave optimalnih dimenzij objektov s hidromehansko opremo za regulacijo odlivanja vodne mase v retenzijo oz. vračanje nazaj v strugo. Za optimiziranje je treba postaviti (veščiljne) kriterije, ki pa se morajo v prostoru šele izoblikovati. V prostorskem načrtovanju bo treba namreč doreči cilje in razmerja med njimi tako za območje retenzije (Dopuščati razvoj? V kakšni meri in namembnosti?) kot za dolvodna območja (Zmanjševati poplavno nevarnost v enaki meri? V večjem ali morebiti celo manjšem obsegu?).

Z umestitvijo HE v prostor je končana prva, zelo zahtevna faza dela. Ostane pa naslednja faza, ki traja celo dobo delovanja HE: Kako ohranjati/izboljšati oz. nadzorovati rabo prostora v retenziji, da bo vzdrževana tista zadrževalna sposobnost prostora, ki je bila upoštevana pri umeščanju objekta v prostor? Sicer se lahko zgodi, da dolvodni uporabniki pričakujejo trajno delovanje dogovorjene stopnje urejenosti odtočnega režima, ki pa se (nenadzorovano) spreminja.



Slika 14 • Obseg poplavljenosti na levi retenziji pri obstoječem in načrtovanem stanju

5 • SKLEP

Analiziran je bil vpliv spreminjanja obsega zaraščanja retenzijskih površin na odtočne razmere. Hidravlični izračuni omogočajo sledenje spreminjanja dinamike potovanja poplavnih valov, konice pretoka in smeri vodnih tokov. Ker sta na poplavnih območjih s predpisi omejeni intenzivna raba prostora

in poselitev, je analiziran prevladujoči vpliv povečevanja ali zmanjševanja zaraščeniosti v ruralnem območju. Bistveni procesi so najprej prikazani na teoretičnem, geometrijsko poenostavljenem območju, ki pa je po lastnostih primerljiv z retenzijo na Krško-Brežiškem polju, da bi lahko ugotovitve s teoretičnega območja

bile primerjane še v dejanskih razmerah. Na istem odseku so nato primerjani sedanje stanje in spremembe zaradi predpostavljenih protipoplavnih nasipov vzdolž Save. V tej fazi raziskave niso bile dodatno obremenjene še z dinamiko obratovanja HE Brežice v izgradnji, saj ta vidik analizira investitor HE.

Rezultati raziskave so še posebno pomembni zato, ker pokažejo, da po fazi umeščanja objekta v prostor (v tem primeru predpostavljenih nasipov vzdolž Save na Krško-Brežiškem

polju) ostane še zelo zahtevna naloga – z načrtovanjem oz. nadzorom rabe prostora na referenjskih območjih je treba v celotni dobi delovanja objektov (npr. nasipov ob Savi) zagotavljati ustrezno zadrževalno sposobnost referenjskega prostora. Šele to daje zagotovilo, da se razmere ob visokih vodah ne poslabšujejo niti uporabnikom na referenjskem območju niti dovolnim uporabnikom prostora.

6 • LITERATURA

- Andersen, B. G., Rutherford, I. D., Western, A. W., An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves. *Environmental Modelling & Software* 21, 9: 1290–1296, 2006.
- EN, English Nature, The Environment Agency, the Department for Environment, Food and Rural Affairs and the Forestry Commission, Wetlands, land use change and Flood Management, 23 str., povzeto 3. 4. 2013 po <http://archive.defra.gov.uk/environment/flooding/documents/manage/jointstment.pdf>, 2002.
- Helmio, T., Unsteady 1D flow model of compound channel with vegetated floodplains, *Journal of Hydrology* 269, 1–2, 89–99, 2002.
- Hill, C. J., The role of floodplains on the propagation of land management signals in the Vale of York., Durham, Durham University, 274 str., 2010.
- Leopold, L. B., Flood hydrology and the floodplain, *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 94–95, 11–14, 1994.
- 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.
- Müller, M., Rak, G., Kozelj, D., Kompore, K., Šantl, Š., Novak, G., Bajcar, T. Analiza vpliva izvedenih vodnogospodarskih ukrepov na pretočnost struge Drave na območju Malečnika in Dogoš. Tehnično poročilo, Ljubljana, EU projekt SI-AT, DRA-MUR-CI, 2013.
- Müller, M., Steinman, F., Rak, G., Vpliv redčenja zarasti na obseg poplavne nevarnosti, 20. Mišičev vodarski dan, 68–75, 2009.
- Nisbet, T., Interactions between floodplain woodland and the freshwater environment, *Forest Research annual report and accounts 2004–2005*, 32–39, 2004.
- 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, 3216, 2007.
- Rak, G., Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov, magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 119 str., 2013.
- Rak, G., Müller, M., Steinman, F., Šantl, S., Novak, G. Hydraulic modeling of future hydro power plants on lower Sava, ICOLD Symposium. Avstrija, 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* 2012.
- Sholtes, J. S., Doyle, M.W., Effect of Channel Restoration on Flood Wave Attenuation, *Journal of Hydraulic Engineering* 137, 2, 196–208, 2011.
- Steinman, F., Banovec, P., Kozelj, K., Rak, G., Sonaravno varovanje brežin pri večjih hidrodinamičnih obremenitvah. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 46 str., 2009.
- Šantl, S., Novak, G., Rak, G., Steinman, F., Hybrid hydraulic modeling approach in the process of hydropower plant design, *International Symposium on hydraulic Physical Modelling and Field Investigation*, Kitajska, Nanjing, 54–61, 2010.
- Šantl, S., Rak, G., Analiza poplavne nevarnosti in odtočnega režima – uporaba različnih tipov hidravličnih modelov, *Gradbeni vestnik*, Ljubljana, 147–156, 2010.
- Thomas, H., Nisbet, T. R., An assessment of the impact of floodplain woodland, *Water and Environmental Journal* 21, 2, 114–126, 2007.
- Uredba o uvedbi in uporabi enotne klasifikacije vrst objektov in o določitvi objektov državnega pomena, UL RS št. 33/2003, 1359, 2003.
- Williams, L., Harisson, S., O'Hagan, A.M., The Use of Wetlands for Flood Attenuation, Report for An Taisce, Irska, Cork, University College Cork, Aquatic Services Unit, 118 str., 2012.
- ZVSS, Zveza vodnih skupnosti Slovenije in Vodnogospodarsko podjetje Maribor, Vodnogospodarske osnove Slovenije, 1978.