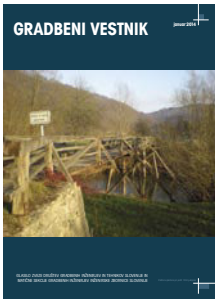
GRADBENI VESTNIK

januar 2014

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, januar 2014, letnik 63, str. 1-24

Izdajatelj:
Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS),** ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS in Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani**

Izdajateljski svet:
ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**
prof. dr. Matjaž Mikoš
Jakob Presečnik
MSG IZS: **Gorazd Humar**
mag. Črtomir Remec
doc. dr. Branko Zadnik
FGG Ljubljana: **izr. prof. dr. Marijan Žura**
FG Maribor: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **akad. prof. dr. Miha Tomaževič**

Glavni in odgovorni urednik:
prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:
Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:
Darja Okorn

Tajnica:
Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:
Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada:
3550 izvodov

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

http://www.zveza-dgits.si.

Letno izide 12 številk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojence 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je vštet DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnim presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

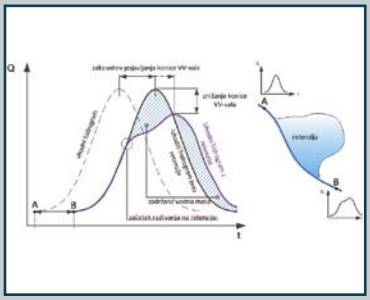
Članki • Papers

stran **2**

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.

VPLIV ZARAŠČENOSTI POPLAVNIH POVRŠIN NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV

THE IMPACT OF FLOODPLAIN VEGETATON ON FLOOD WAVE PROPAGATION



stran **13**

Miha Jukić, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.

POSTOPEK ZA PORUŠNO ANALIZO RAVNINSKIH ARMIRANOBETONSKIH NOSILCEV IN OKVIRJEV

A PROCEDURE FOR FAILURE ANALYSIS OF PLANAR REINFORCED CONCRETE BEAMS AND FRAMES

Obvestilo ZDGITS

stran **22**

SPREMENJEN RAZPORED SEMINARJEV ZA STROKOVNE IZPITE

Poročilo s strokovnega in znanstvenega srečanja

stran **23**

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.

SIMPOZIJ OB 20. OBLETNICI USTANOVITVE SLOCOLD

Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Ali je kaj trden most? foto Janez Duhovnik

VPLIV ZARAŠČENOSTI POPLAVNIH POVRŠIN NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV

THE IMPACT OF FLOODPLAIN VEGETATON 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 vodoodporna ali vodotesna gradnja, na izvajanje usmeritev in načrtov prostorskega planiranja in (v primeru višje sile) na vzpostavitev sistemov napovedovanja, zgodnjega obveščanja in sistemov podpori 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 ozelenelosti, 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 blaženje 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 zakasniti sproščanje 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 zakasniti 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

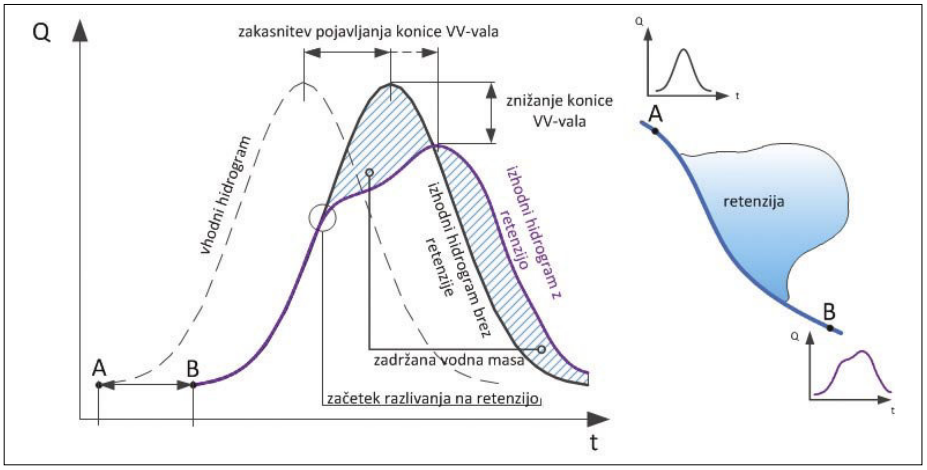
Čez odseke vodotokov z enakomernim padcem in malo spreminjajočim se pretočnim prerezom ter brez večjih retenzijskih površin VV-valovi potujejo večinoma s konstantno hitrostjo, konica pa pri tem ostaja praktično nespremenjena. Z razlivanjem dela volumna vode VV-vala iz struge na retenzijo pa se na njej pojavijo vzporedni tokovi s spremenjenimi hidravličnimi karakteristikami. Na retenziji prevladujejo razmeroma plitvi tokovi z manjšimi hitrostmi, zaradi česar se pojavi 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 naraščajoče 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 hitrejše naraščanje 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 hrapavosti, vpliva topografije, objektov itd.) in relativno hitrejšega naraščanje 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.

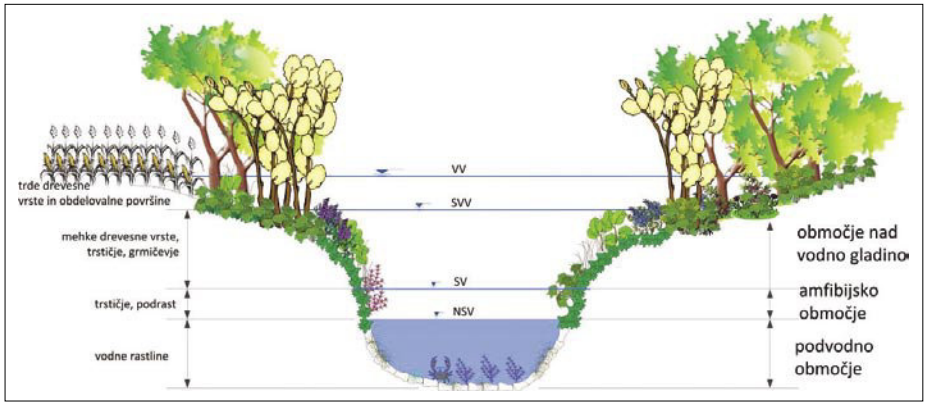
Če je retenzija praktično že povsem zapolnjena ob nastopu konice, ta potuje dolvodno z nespremenjeno hitrostjo in konico. V primeru daljšega zadrževanja vode na retenziji je možen tudi pojav dodatne konice oz. »trebuha« hidrogama v padajoči fazi, ki se pojavi v primerih izrazito počasnejših vzporednih 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

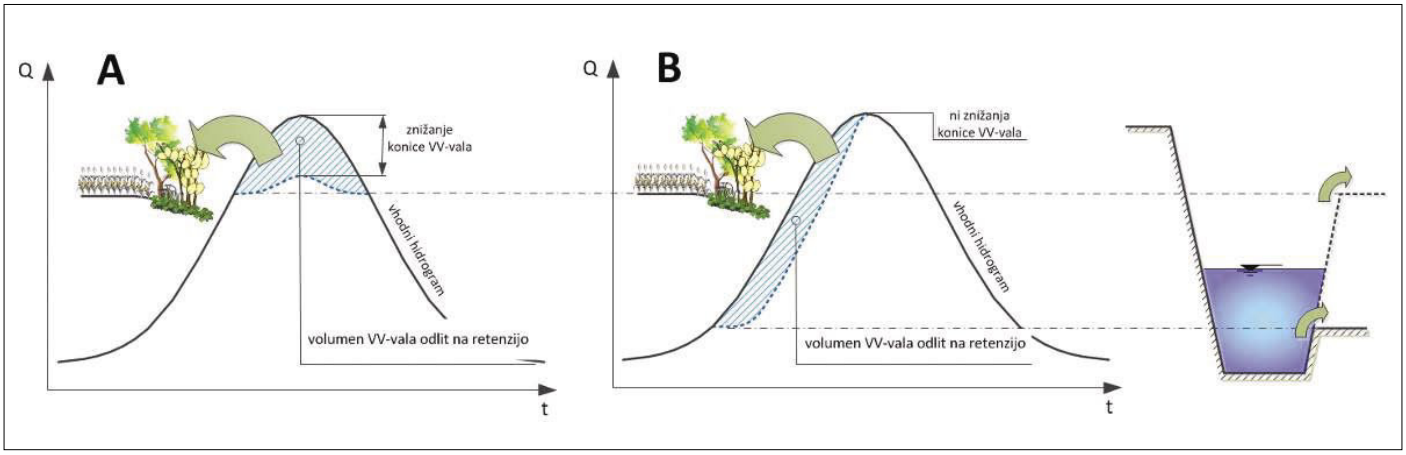
Poplavne oz. retenzijske površine so območja, kamor doteka voda v času visokovodnih dogodkov, ko je presežena pretočna sposobnost struge vodotoka. Pri tem se lahko pojavijo vzporedni tokovi, praviloma počasnejši od glavnega toka vode po strugi (t. i. poplavljanje), ali pa se voda iz struge samo izlije 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 s slednjo povezane večje hitrosti, erozijske sile, hidrodinamične (namesto hidrostatične) 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 (padec, 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 prelivanja, 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 poplavljencev, 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:

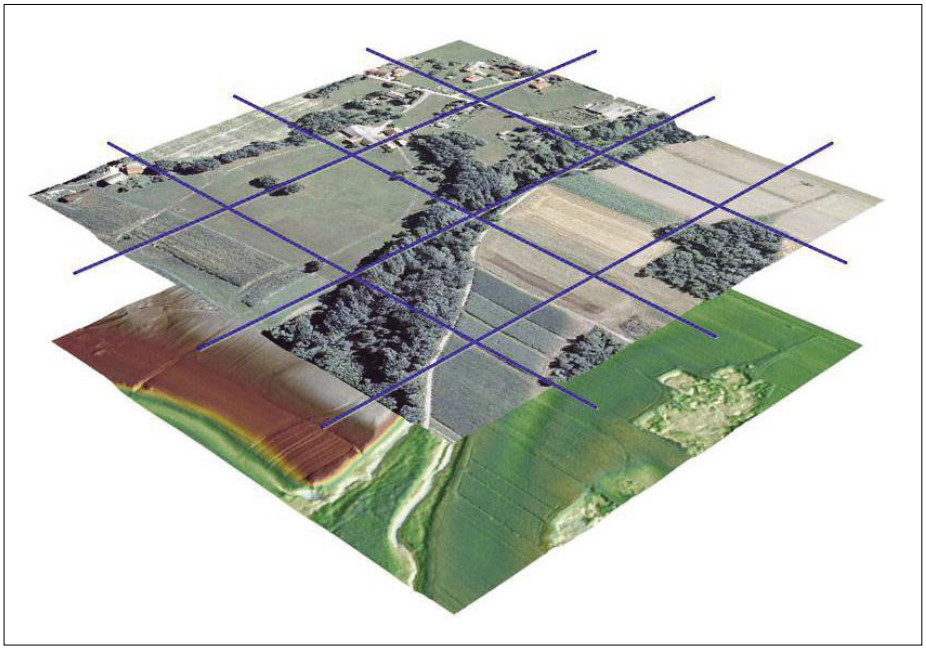
$$\frac{\partial q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2\cdot h^2}$$
$$-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial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

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

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 (gostoto in vrste zarasti ter druge motnje v vodnem toku znotraj numerične celice (slika 4)). V enačbah jo upoštevamo s pomočjo »koeficienta hidravlične hrapavosti«, ki se določa v fazi umerjanja hidravličnega modela.

Iz enačb lahko ugotovimo, da se z večanjem (koeficienta) 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**

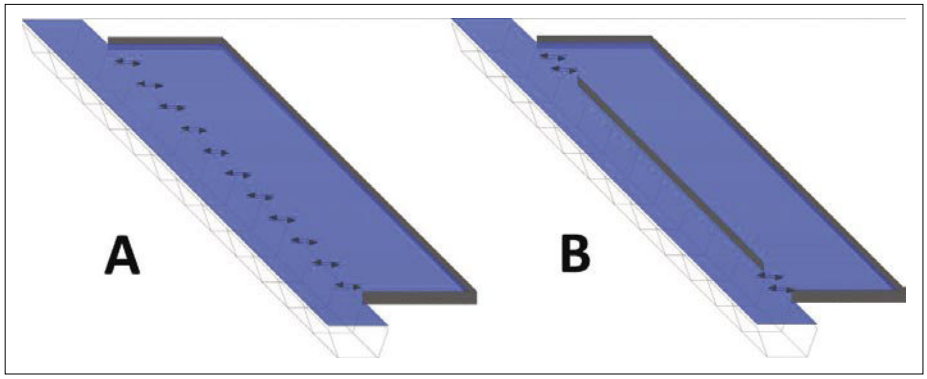
zniževanje konice VV-vala. Predvsem pri raziskavah z enodimenzionalnimi (1D) modeli je treba izpostaviti, da lahko rezultati izkazujejo precenjen ali podcenjen vpliv oziroma so rezultati napačno interpretirani. Na eni strani so 1D-modeli veliko bolj odzivni na spreminjanje hidravlične hrapavosti, po drugi strani pa z 1D-modeli ni mogoče zajeti izrazitih dvodimenzionalnih 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 upočasni 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 nezniżana potuje skozi obravnavani odsek brez vpliva retenzije.

3 • ANALIZA VPLIVA ZARAŠČENOSTI PROSTORA V RETENZIJI 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 Krškim 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 poplavne 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, poselitev itd., ki se trenutno na območju vpliva v retenziji dogajajo, oziroma preveriti vpliv oz. podati pogoje za gradnjo, izvajanje dejavnosti itd., ki se v prostoru načrtujejo. Rezultati obsežne hidravlične raziskave so bili pomembna strokovna podlaga za izdana 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 ustrezno 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)**

državalno 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).

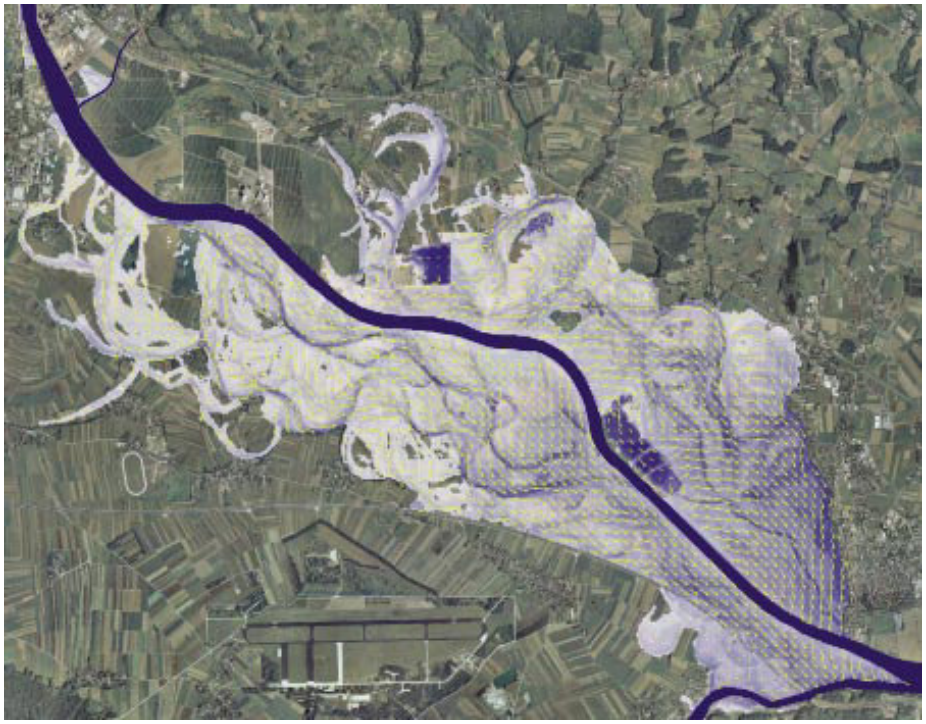
Pomembne podlage za odgovor na zgornje vprašanje podaja raziskovalno delo znanstvenega magistrskega dela (Rak, 2013), ki obravnava teoretično, geometrijsko enostavno območje, po velikosti primerljivo z retenzijskim prostorom Krško-Brežiškega polja, ter ugotovitve s teoretičnega območja retenzije primerja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

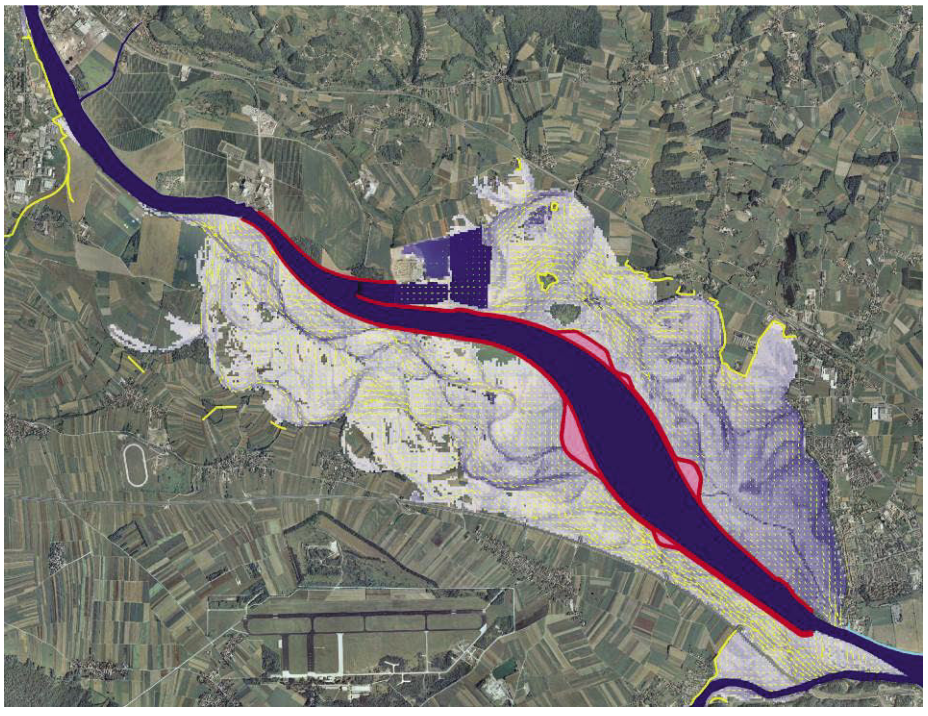
Slika 6 kaže poplavljena (retenzijska) območja in vektorje lokalnih hitrosti za obstoječe stanje pri stoletnih pretokih. Dolvodno od VV-nasipa ob NEK se prične razlivanje na levo poplavno območje, preko katerega se oblikuje izrazit vodni tok, voda pa se vrača nazaj v strugo šele pod teraso Brežic, kjer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

Slika 7 pa kaže načrtovano stanje, kjer se vrhnji del poplavnega hidrograma s hidromehansko opremo nadzorovano izlije v retenzijo, teče ločeno od akumulacije, ki je omejena z energetskimi nasipi, in se pod HE Brežice vrača nazaj v Savo.



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**

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

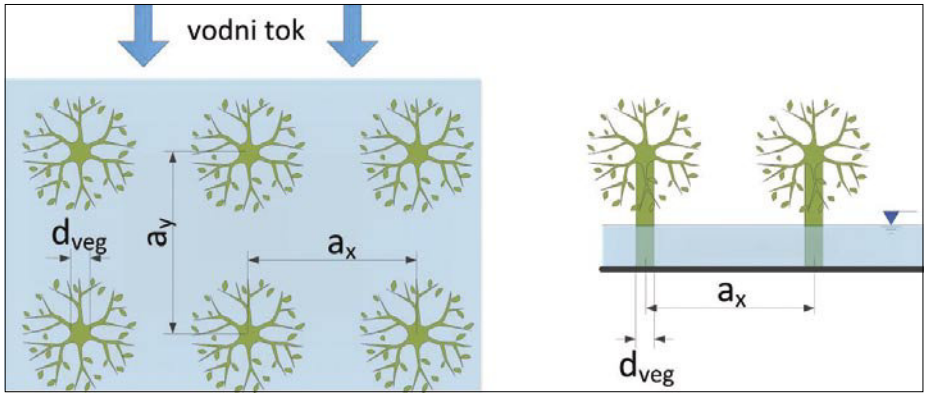
Cilj hidravlične analize je bil analizirati vpliv stopnje zaraščenosti obvodnega prostora, ki neposredno, v obliki upora vodnemu toku, vpliva na energijske izgube vzdolž toka vode. S spreminjanjem koeficienta hidravlične hrapavosti lahko zajamemo spreminjanje razmer v posamezni numerični celici 2D-modela. 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 poraščenosti (travnik, 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.

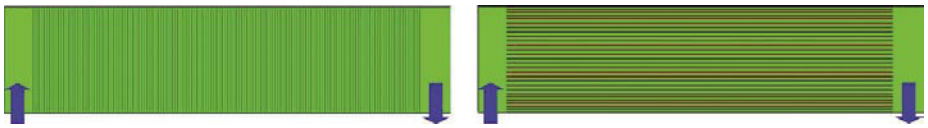
Pri teoretični, poenostavljeni geometriji območja je bilo mogoče izbirati mnogo načinov porazdelitve zarasti po prostoru – na sliki 9 sta prikazana le dva primera z zarastjo v prečnih pasovih oz. v vzdolžnih pasovih, opravljeni pa so bili izračuni še za različne porazdelitve zarasti (pasovi, šahovnica 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 zaraščenosti vpliva na tokove v retenziji oz. na izhodni hidrogram in s tem na dolvodna območja.

Pri primerih iz prakse je zaraščenost 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.

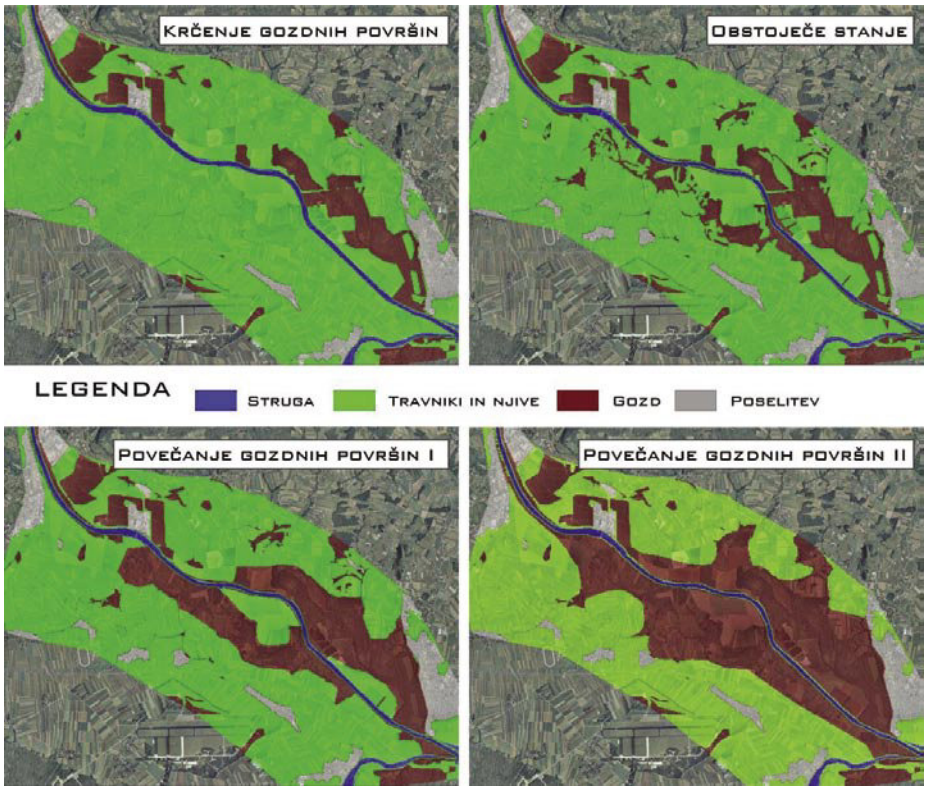


Slika 8 • **Upor zarasti je mogoče zajeti z lastnostmi skupine rastlin znotraj numerične celice 2D-modela. Pri npr. sadovnjaku so pomembni razmik, debelina debel pa tudi, ali poplavna voda doseže krošnje ali ne (Müller in sod., 2009)**



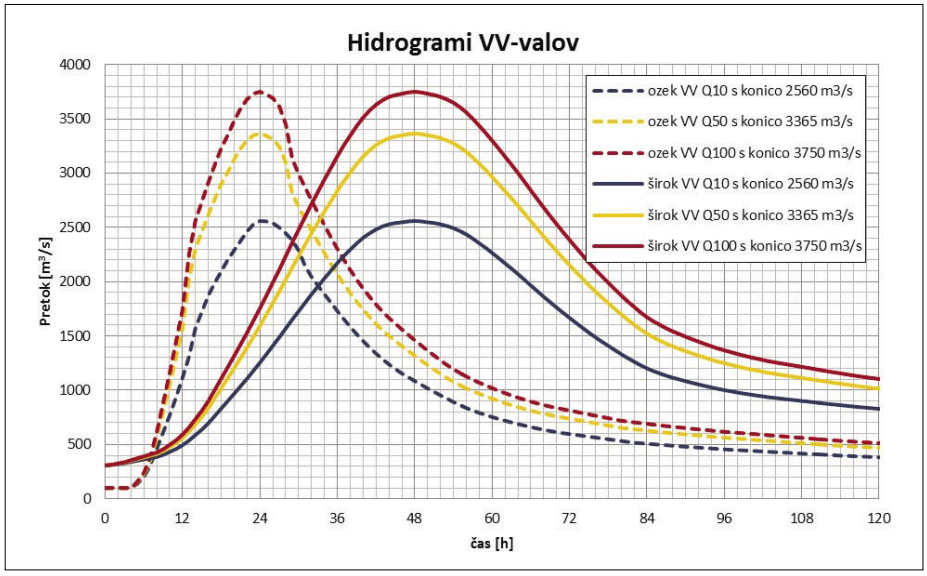
Slika 9 • **Teoretično je mogoče predpostaviti mnogo primerov razporeditve zarasti po prostoru – prikazana sta le dva primera: prečni pasovi zarasti (npr. živa meja) in vzdolžni pasovi zarasti**

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 koeficiente 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 štirje različni primeri oz. scenariji zaraščenosti 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 zaraščenosti, so izbrani, analizirani scenariji le del te množice. Kot omenjeno, sta bili v izračunih upoštevani še skrajni varianti: 100-odstotna pokritost z gozdnimi površinami in 100-odstotna pokritost s kmetijskimi površinami.



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

3.3 Uporabljeni hidrogrami visokovodnih dogodkov

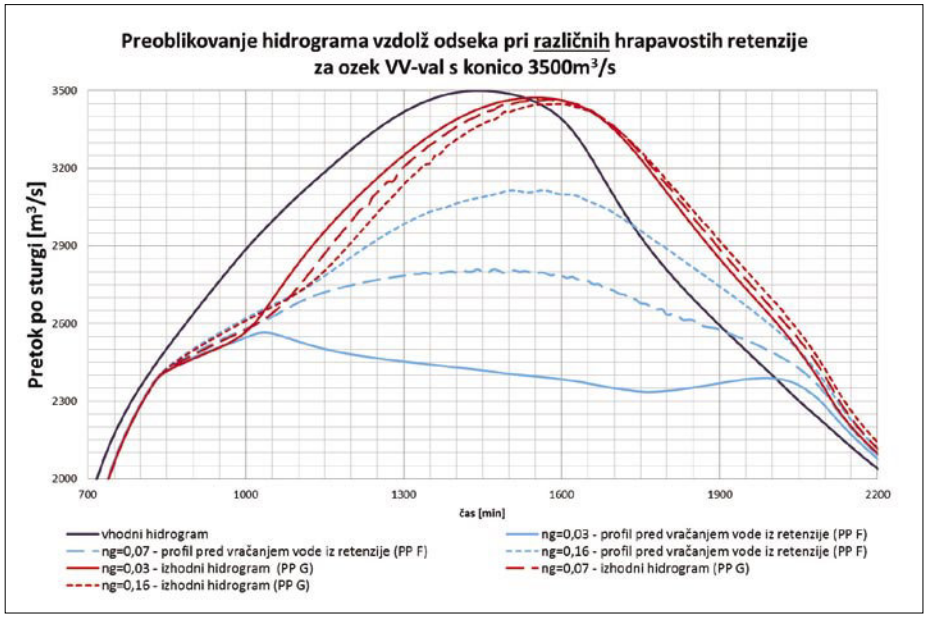
Hidravlična analiza je bila tudi za teoretično, geometrijsko poenostavljeno območje opravljena za osem VV-valov, to je za VV-valove s štirimi različnimi vrednostmi konic in dvema različnima dolžinama trajanja. Vrednosti konic valov so bile določene tako, da pokrivajo razpon konic in volumnov VV-valov,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

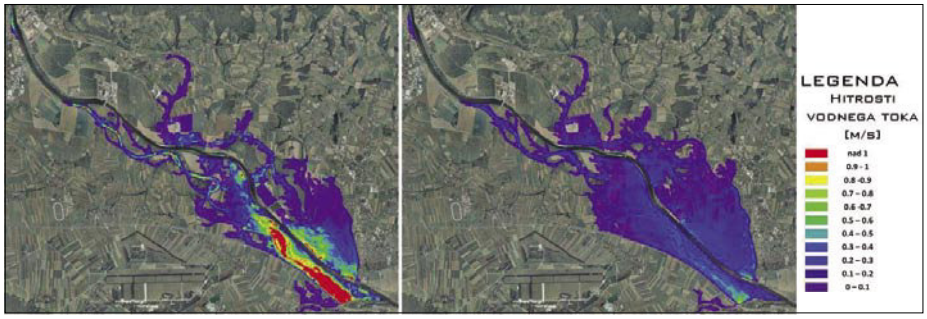
Rezultati analize za zmanjšanje konice dolvodnega hidrograma pokažejo:

- 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 inudaciji 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 (zaraščenost).
- 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 m^3/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 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?



Slika 13 • **Primerjava porazdelitve lokalnih maksimalnih hitrosti vodnega toka pri ozkem VV-valu s konico 2560 m^3/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**

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 omilitev negativnih posledic visokovodnih dogodkov, znižanje konice pa tudi zmanjšanje intenzitete visokovodnega dogodka. Tako absolutne kot tudi relativne vrednosti znižanja konice se zmanjšuje 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 zaraščenosti 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. zaraščenosti, 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 odtekati, 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

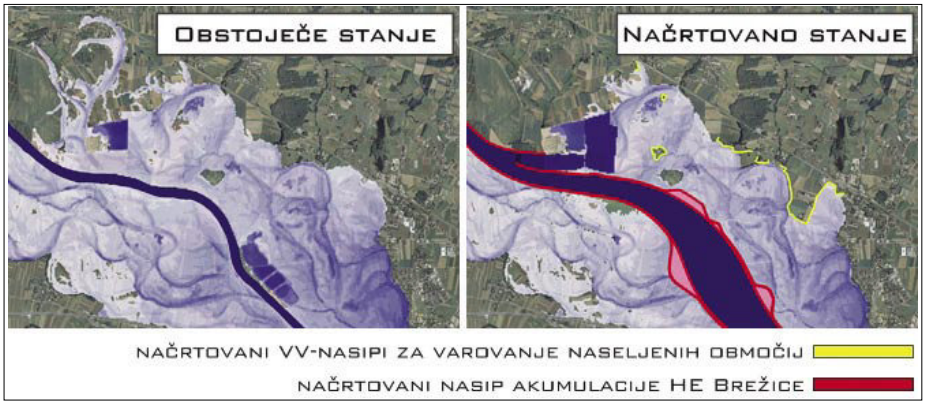
Za teoretično, geometrijsko poenostavljeno retenzijo z vmesno steno in za Krško-Brežiško polje z načrtovanim energetskim nasipom med akumulacijo HE Brežice in retenzijo je bila opravljena hidravlična analiza, kako izboljšati izrabo retenzijskega prostora. Gre za vprašanje, kako je mogoče kljub zmanjšanju 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 globinami vode na retenziji nad 1,5 m pri obeh variantah komunikacije primerljivega 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 globinami 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 odprtin 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 (večciljne) 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 zaraščenosti 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 retenzijskih območjih je treba v celotni dobi delovanja objektov (npr. nasipov ob Savi) zagotavljati ustrezno zadrževalno sposobnost retenzijskega prostora. Šele to daje zagotovilo, da se razmere ob visokih vodah ne poslabšujejo niti uporabnikom na retenzijskem območju niti dolvodnim uporabnikom prostora.

6 • LITERATURA

Andersen, B. G., Rutherfurd, 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., Kompare, 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. Austrija, Graz, Verlag der Technischen Universitat 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.

POSTOPEK ZA PORUŠNO ANALIZO RAVNINSKIH ARMIRANOBETONSKIH NOSILCEV IN OKVIRJEV

A PROCEDURE FOR FAILURE ANALYSIS OF PLANAR REINFORCED CONCRETE BEAMS AND FRAMES

dr. Miha Jukić, univ. dipl. inž. grad.
mjukic@fgg.uni-lj.si
prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.
bbrank@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek
UDK 624.072.2:691.3

Povzetek | Opisan je postopek za porušno analizo armiranobetonskih ravninskih nosilcev in okvirjev. Zasnovan je na modificiranem Timošenkovem končnem elementu za nosilce. Uporabljene enačbe snovi modelirajo osnovne neelastične pojave v armiranobetonskem linijskem konstrukcijskem elementu: pokanje betona v nategu, drobljenje betona v tlaku ter plastično tečenje in odpoved vzdolžne jeklene armature. Podatke o kvaliteti betona in jekla, ki so potrebni za analizo, se lahko dobi ali s standardiziranimi preskusi betona in armature ali iz Evrokodov in drugih ustreznih publikacij. Prikazani so rezultati izračunanih primerov, ki kažejo na to, da je postopek robusten in da lepo opiše proces porušitve armiranobetonskih linijskih konstrukcij pri velikih obtežbah.

Ključne besede: armiranobetonski okvir, porušna analiza, metoda končnih elementov

Summary | A procedure for failure analysis of reinforced concrete planar beams and frames is presented. It is based on a modified Timoshenko beam finite element. Chosen material models take into account main phenomena of inelastic response of a reinforced concrete frame member: concrete damage by cracking in tension and crushing in compression, and longitudinal steel yielding and failure. Material data needed for the analysis can be obtained either by standardized tests on concrete and steel or from the Eurocodes and other relevant publications. The results of computed examples are presented. They illustrate very satisfying performance of the derived procedure that turned out to be robust and able to nicely describe material failure process in reinforced concrete frames and beams at large load levels.

Keywords: reinforced concrete frame, failure analysis, finite element method

1 • UVOD

V armiranobetonskih linijskih konstrukcijah že pri relativno majhnih obtežbah nastanejo razpoke v betonu. Temu lahko ob povečevanju obtežbe sledijo plastično tečenje jeklene armature, drobljenje betona v tlaku, zdrs armature, uklon tlačenih armaturnih palic, popuščanje natezne armature, luščenje krovne plasti betona in podobno. Za te pojave je zelo težko pripraviti ustrezne modele in jih povezati s standardnimi končnimi elementi za analizo linijskih konstrukcij.

Zaradi tega linijski končni elementi za porušno analizo, ki je v potresnem inženirstvu imenovana tudi potisna analiza, npr. (Fajfar, 2006), še niso dozoreli do te mere, da bi bili na voljo v splošnih komercialnih računalniških programih za analizo inženirskih problemov, kot je npr. (Abaqus, 2013). Ker se pri porušni analizi sledi obnašanju konstrukcije še po tem, ko je njena mejna nosilnost že dosežena, morajo znati končni elementi, ki naj bi se uporabljali za porušno analizo, dobro opisati vsaj

najpomembnejše od zgoraj omenjenih pojavov. To pomeni, da je treba posvetiti pozornost opisu razvoja poškodb v betonu in plastičnih deformacij v vzdolžni armaturi, ki postopoma privedejo do lokalnih procesov odpovedovanja betona in armature, ki se kažejo v razpokanosti betona v nategu, zdrobljenem betonu v tlaku in popuščanju natezne armature. Slednje je pomembno tudi pri računu mejne nosilnosti konstrukcije, saj v mnogih območjih konstrukcije pride do procesa lokalne odpovedi materiala – ki se pogosto označi tudi kot mehčanja materiala –, že mnogo preden konstrukcija doseže mejno nosilnost, po kateri se pomiki konstrukcije povečujejo ob hkratnem zmanjševanju obtežbe.

Dodatno kompleksnost pri pripravi primernih končnih elementov za porušno analizo prinese dejstvo, da je treba zagotoviti neodvisnost numerične rešitve od mreže končnih elementov, ko preide material v nekem območju konstrukcije v fazo mehčanja – torej, ko se tam začne proces odpovedi materiala. Postopkov, ki pri mehčanju materiala bolj ali manj uspešno zagotavljajo neodvisnost rešitve od mreže in orientacije končnih elementov, je bilo razvitih cela vrsta; za njihov pregled glej npr. (Ibrahimbegović, 2009).

V strokovni literaturi je mogoče najti različne predloge, kako pristopiti k porušni analizi armiranobetonskih linijskih konstrukcij tako, da se: (i) ustrezno opiše razvoj poškodb v betonu in plastičnih deformacij v armaturi, ki postopoma privedejo do procesa lokalnih odpovedi (tj. do mehčanja) betona in armature, ter (ii) te opise vključi v (včasih nekoliko modificirane) standardne linijske končne elemente tako, da bodo rešitve, dobljene z izpeljanimi elementi, v veliki meri neodvisne od mreže končnih elementov pri mehčanju materiala. Za različne tovrstne predloge glej npr. ((Saje, 2005), (Jukić, 2013a), (Markovič, 2013)) in tam navedene vire. Dostopen raziskovalni računalniški program, v katerem je na voljo nekaj tako izpeljanih linijskih končnih elementov za porušno analizo armiranobetonskih linijskih konstrukcij, ki so poimenovani vlaknasti končni elementi, je OpenSees (2013).

V potresnem inženirstvu se za porušno analizo armiranobetonskih linijskih konstrukcij uspešno uporabljajo posebni (nestandardni) končni elementi, npr. (Fajfar, 2006), ki imajo vse materialno-nelinearne efekte zgoščene v obeh krajnih vozliščih v obliki nelinearnih vzmeti z (empirično) določenimi elastoplastičnimi konstitutivnimi zvezami. Takšni končni elementi so na voljo npr. v komercialnem računalniškem programu, ki je specializiran za linearno in nelinearno analizo konstrukcij Sap2000 (2013), skupaj s postopki za prerazporeditev notranjih sil, ko se v kakšnem od vozlišč začne mehčanje prereza (npr. zmanjševanje momenta ob hkratnem povečevanju zasuka).

V tem delu na kratko prikažemo naš končni element za porušno analizo armiranobetonskih ravninskih nosilcev in okvirjev, ki je razmeroma enostaven, robusten in učinkovit. Pomembno je tudi, da potrebuje le tiste podatke o betonu in jeklu, ki se jih lahko dobi ali s standardiziranimi preskusi betona in armature ali pa se jih povzame iz Evrokodov in drugih ustreznih publikacij. Gre za slojevit, ravninski linijski končni element, ki smo ga dobili z modifikacijo kinematike standardnega geometrijsko linearnega Timošenkovega končnega elementa za nosilce. Posledica modificirane kinematike je, da so dobljene rešitve v veliki meri neodvisne od mreže končnih elementov pri mehčanju materiala. Poškodbe v betonu opiše s poškodbenimi enačbami snovi, za opis delovanja armature pa uporabi elastoplastične enačbe snovi. Z izbranimi konstitutivnimi enačbami dobro opiše naslednje neelastične pojave v armiranobetonskem linijskem konstrukcijskem elementu: razvoj manjših poškodb v betonu, lokalno odpoved betona v nategu v obliki razpoke, lokalno odpoved betona v tlaku v obliki zdrobljene cone, plastično tečenje vzdolžne armature in lokalno odpoved vzdolžne armature v nategu. Končni element je vgrajen v raziskovalni računalniški program AceFEM (Korelc, 2013). Izpeljan je bil v (Jukić, 2013b), kjer so na voljo tudi vsi detajli.

2 • KONČNI ELEMENT ZA ARMIRANOBETONSKE NOSILCE

Vzemimo standardni 2-vozlišči ravninski geometrijsko-linearni Timošenkov končni element za nosilce, glej npr. (Reddy, 2005), ki ima v vsakem vozlišču tri prostostne stopnje: dva pomika in en zasuk (slika 1). Pomik težiščne osi nosilca in zasuk prereza nosilca opišemo kot:

$$\tilde{u}(x) = \boldsymbol{N}(x)\boldsymbol{u}, \quad \boldsymbol{N}(x) = \{N_1, N_2\} = \{1 - x/L, x/L\}, \quad \boldsymbol{u} = \{u_1, u_2\}^T \tag{1}$$

$$\tilde{v}(x) = \boldsymbol{N}(x)\boldsymbol{v} + N_3(x)v_3, \quad \boldsymbol{v} = \{v_1, v_2\}^T, \quad N_3 = 4(L-x)x/L^2, \quad v_3 = L(\theta_1 - \theta_2)/8 \tag{2}$$

$$\tilde{\theta}(x) = \boldsymbol{N}(x)\boldsymbol{\theta}, \quad \boldsymbol{\theta} = \{\theta_1, \theta_2\}^T, \quad x \in [0, L] \tag{3}$$

Iz zgornjih enačb sledi, da je prečna strižna deformacija $\tilde{\gamma} = \partial\tilde{v}(x)/\partial x - \tilde{\theta}(x)$ konstantna po elementu. Osno in upogibno deformacijo nosilca opišemo s sistemom navideznih betonskih in jeklenih palic (ki jim rečemo tudi sloji), ki so razvrščene po višini elementa od enega do drugega robnega prereza (slika 2). Osni pomik *i*-te palice je:

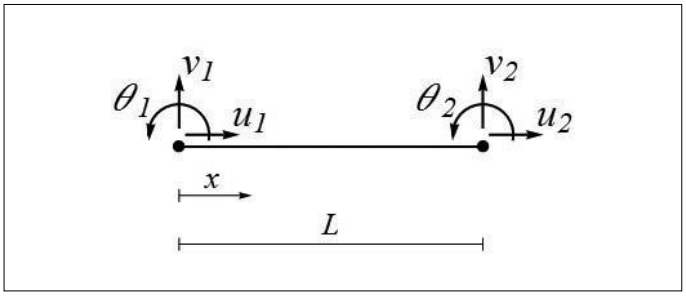
$$u^i(x, x_d^i) = \tilde{u}(x) - y\tilde{\theta}(x) + P^i(x, x_d^i)\alpha^i, \quad y \in [y^i - h^i/2, y^i + h^i/2] \tag{4}$$

$$P^i(x) = H_{x_d^i}(x) - N_2(x), \quad H_{x_d^i}(x) = \begin{cases} 0 & \text{za } x < x_d^i \\ 1 & \text{za } x \geq x_d^i \end{cases} \tag{5}$$

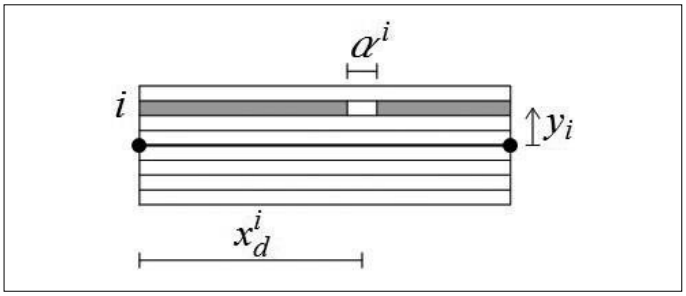
kjer sta h^i in y^i debelina in koordinata težišča palice, α^i je parameter, ki je enak širini razpoke ali odseku zdrobljenega betona v palici (slika 2), x_d^i pa je lokacija razpoke. Privzeto je, da nastane razpoka na sredini palice. Osna deformacija *i*-te palice je konstanta, razen na mestu razpoke:

$$\varepsilon^i(x, x_d^i) = \frac{\partial u^i}{\partial x} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} - y\boldsymbol{B}\boldsymbol{\theta} + \bar{G}\alpha^i + \delta_{x_d^i}\alpha^i, \quad \delta_{x_d^i} = \begin{cases} \infty \text{ pri } x = x_d^i \\ 0 \text{ sicer} \end{cases} \tag{6}$$

saj sta $\boldsymbol{B} = \{-1/L, 1/L\}$ in $\bar{G} = -1/L$.



Slika 1 • **Timošenkov končni element za ravninski nosilec**



Slika 2 • **Navidezne palice (sloji) betona in jekla med obema ravnima in nedeformabilnima robnima prerezoma končnega elementa**

Če uporabimo princip virtualnega dela za obravnavani končni element, dobimo dve skupini enačb (Jukić, 2013b):

$$\boldsymbol{f}^{not,(e)} - \boldsymbol{f}^{zun,(e)} = \boldsymbol{0}, \quad \boldsymbol{h}^{(e)} = \left\{h^{(e),1}, h^{(e),2}, \ldots, h^{(e),n_L}\right\}^T = \boldsymbol{0} \tag{7}$$

Prva skupina zagotavlja enakost notranjih in zunanjih sil v obeh vozliščih, druga pa opisuje ravnotežje v vseh n_L palicah vsakega elementa (e), ki so ali razpokane ali so se zdrobile v tlaku. Notranje sile v vozliščih so:

$$\boldsymbol{f}^{not,(e)} = \sum_{i=1}^{n_L} \int_L \breve{\mathbf{B}}^T \int_{A^i} \left\{\sigma^i, -y\sigma^i, \tau^i\right\}^T dA dx = \int_L \breve{\mathbf{B}}^T \left\{N, M, V\right\}^T dx \tag{8}$$

kjer je σ^i osna napetosti v i-ti palici, τ^i je strižna napetost na mestu i-te palice, N, M in V so osna sila, upogibni moment in prečna sila, in

$$\breve{\boldsymbol{B}} = \begin{bmatrix} -1/L & 0 & 0 & 1/L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/L & 0 & 0 & 1/L \\ 0 & -1/L & -1/2 & 0 & 1/L & -1/2 \end{bmatrix} \tag{9}$$

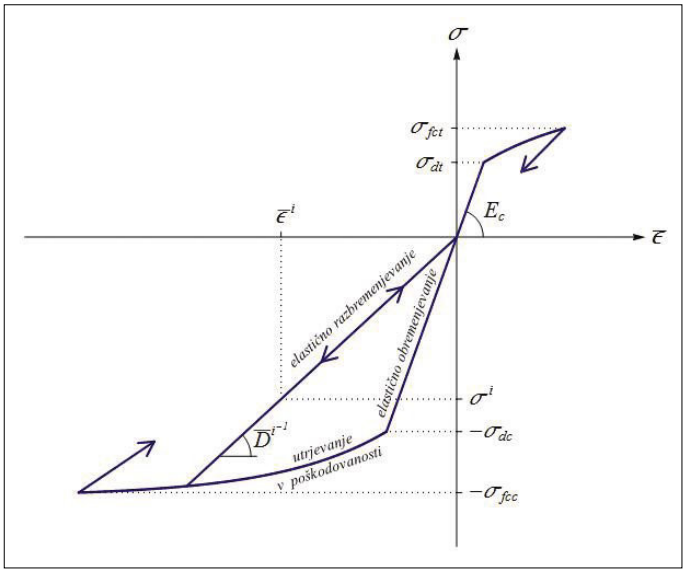
Zunanje sile v vozliščih se izračunajo iz zunanje obtežbe elementa na standarden način, npr. (Reddy, 2005). Ravnotežje v i-ti razpokani palici zahteva, da je osna napetost v palici enaka kohezijski napetosti v razpoki ali zdrobljenem betonu, ki jo označimo s t^i (Jukić, 2013b):

$$h^{(e),i} = 0 \Rightarrow t^i = \sigma^i \tag{10}$$

Za mrežo končnih elementov z Nv nepodprtimi prostostnimi stopnjami imamo Nv ravnotežnih enačb za enako število neznanih vozliščnih pomikov in zasukov. Število ravnotežnih enačb, povezano z navideznimi palicami, pa se spreminja med analizo. Na začetku analize je 0, kasneje pa vsaka razpokana oziroma zdrobljena palica prispeva po eno enačbo, v kateri je neznanka parameter, ki opisuje širino razpoke v nategu oziroma širino zdrobljenega dela v tlaku v tej palici.

Strižno obnašanje nosilca predpostavimo kot elastično. Torej velja $\tau^i = c\tilde{G}^i\tilde{\gamma}$, kjer je $\tilde{G}^i$ strižni modul materiala na mestu i-te palice, $c = 5/6$ pa je standardni strižni korekcijski faktor.

Betonska palica je elastična v napetostnem območju $\sigma^i \in (-\sigma_{dc}, \sigma_{dt})$, kjer sta $\sigma_{dc} > 0$ in $\sigma_{dt} > 0$ meji elastičnosti v tlaku in nategu. Ko je meja elastičnosti presežena, nastanejo v betonski palici poškodbe, ki jih modeliramo s poškodbenim modelom 1d, opisanim v ((Ibrahimbegović, 2009), (Jukić, 2013b)). Osnovna lastnost poškodbenega modela je, da se, glede na nakopičene poškodbe, spreminja elastični modul materiala (slika 3). Drobljenje betona v tlaku in pojav razpoke v nategu se v obravnavani palici zgodita, ko je $\sigma^i = \sigma_{fcc}$ oziroma ko je $\sigma^i = \sigma_{fct}$ (slika 3), kjer sta σ_{fcc} in σ_{fct} trdnosti betona v tlaku in nategu. Širjenje zdrobljene cone v tlaku oziroma razpoke v nategu se kinematično opiše s parametrom α^i (slika 2), ki se aktivira, ko je ena od porušnih vrednosti presežena. Kohezijske napetosti v razpoki določimo s poškodbenim modelom 1d za mehčanje, ki je prikazan na sliki 4 in detajlno opisan v (Jukić, 2013b).

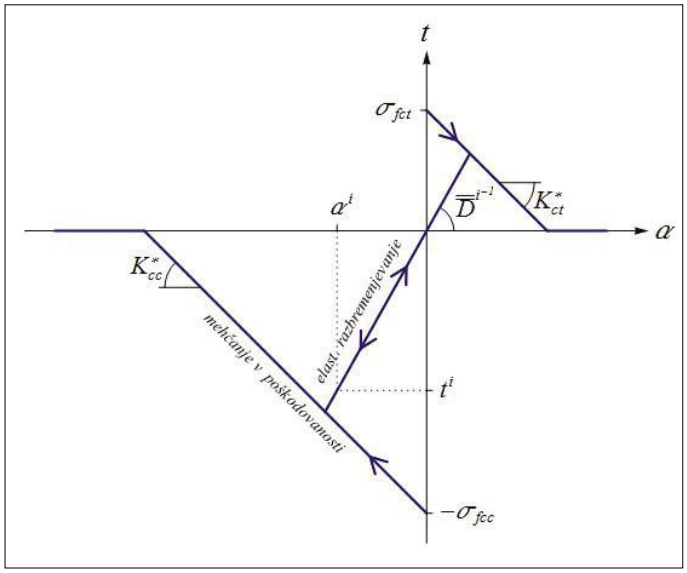


Slika 3 • **Enoosna zveza med napetostmi in deformacijami za betonski sloj do odpovedi betona v tlaku (ko se začne drobiti) ali nategu (ko nastane razpoka)**

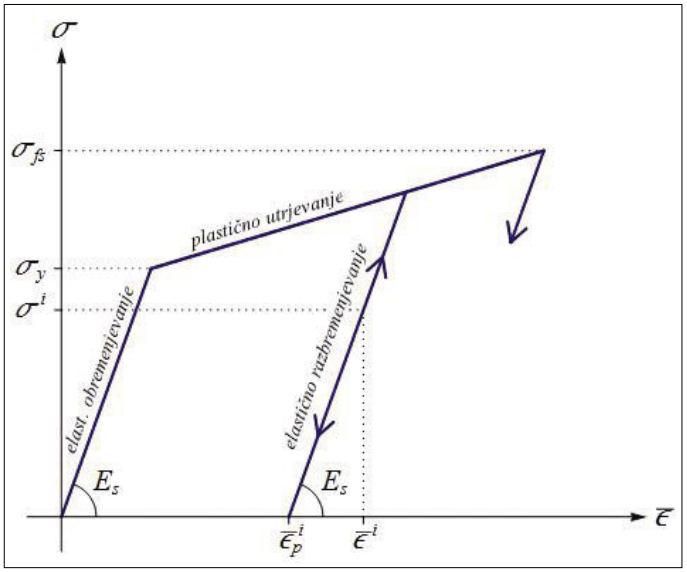
Jeklena palica je elastična v napetostnem območju $\sigma^i \in (-\sigma_y, \sigma_y)$, kjer je σ_y napetost na meji elastičnosti. Ko je ta presežena, pride do plastičnega tečenja jekla, ki ga opišemo z elastoplastičnim modelom 1d z izotropnim utrjevanjem, slika 5, glej npr. (Ibrahimbegović, 2009). Jeklena palica začne popuščati, ko je $\sigma^i = \sigma_{fs}$, kjer je σ_{fs} trdnost jekla. Širjenje mehčanja v palici se kinematično opiše s parametrom α^i, ki se aktivira, ko se začne proces odpovedi jekla. Kohezijske napetosti na mestu popuščanja določimo s plastičnim modelom 1d za mehčanje, ki je prikazan na sliki 6 in opisan v (Jukić, 2013b).

Potrebnih materialnih podatkov za izvedbo analize je dvanajst, če privzamemo, da je obnašanje betona v nategu linearno elastično vse do dosežene natezne trdnosti, tj., da velja $\sigma_{dt} = \sigma_{fct}$. Za opis

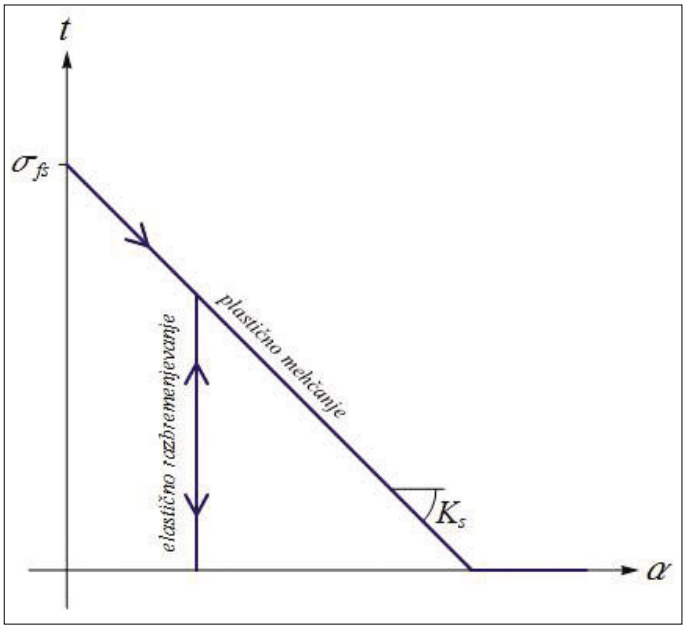
obnašanja betona potrebujemo (glej sliki 3 in 4): elastični modul nepoškodovanega betona E_c, mejo elastičnosti v tlaku σ_{dc}, tlačno trdnost σ_{fcc} in pripadajočo deformacijo D_{c1}, energijo loma za beton v tlaku G_{fcc}, natezno trdnost $\sigma_{dt} = \sigma_{fct}$ in energijo loma za beton v nategu G_{fct}. Za opis obnašanja armature potrebujemo (glej sliki 5 in 6): elastični modul jekla E_s, mejo plastičnega tečenja σ_y, modul linearnega utrjevanja jekla H_s, trdnost jekla σ_{fs} in energijo loma za jeklo G_{fs}. Omenjene podatke o kvaliteti betona in jekla se lahko dobi ali s standardiziranimi preskusi betona in armature ali iz Evrokodov in drugih relevantnih publikacij. Iz naštetih dvanajstih podatkov lahko izračunamo vse potrebne materialne parametre za našo analizo.



Slika 4 • **Zveza med kohezijsko napetostjo v razpoki in širino razpoke v sloju betona v nategu oziroma med kohezijsko napetostjo v zdrobljeni coni in širino zdrobljene cone v tlaku. Energija loma za beton v tlaku G_{fcc} je enaka površini spodnjega obarvanega pravokotnega trikotnika. Energija loma za beton v nategu G_{fct} je enaka površini zgornjega obarvanega pravokotnega trikotnika**



Slika 5 • **Zveza med napetostmi in deformacijami za jekleni sloj, ki predstavlja armaturo, do odpovedi jekla**



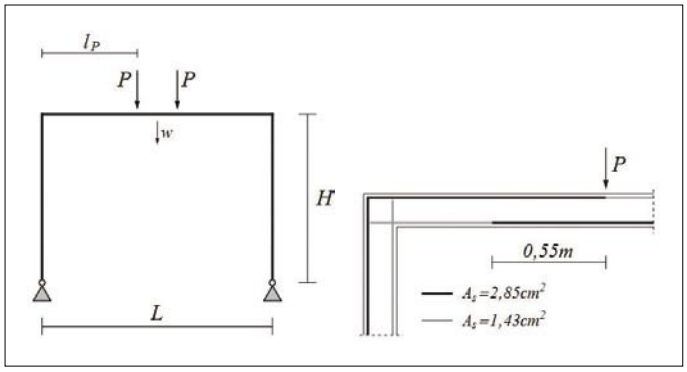
Slika 6 • **Zveza med napetostjo v jekleni armaturi v popuščanju in dolžino območja, na katerem jeklo popušča. Energija loma za jeklo je enaka površini zgornjega pravokotnega trikotnika, katerega dve stranici sta odseka na abscisi in ordinati**

3 • PORUŠITEV SIMETRIČNEGA PORTALNEGA OKVIRJA

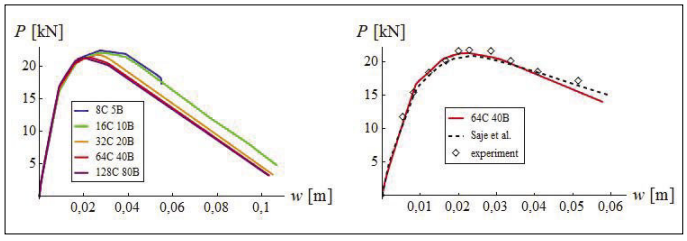
Obravnavamo členkasto podprt portalni okvir, predstavljen na sliki 7. V sklopu eksperimentov na armiranobetonskih okvirjih ga je preizkusil (Cranston, 1965), numerično pa so ga analizirali (Saje, 2005). V tem poglavju predpostavimo, da je bil preizkušeni okvir simetričen. V naslednjem poglavju pa bomo predstavili rezultate analize z upoštevanjem začetne imperfektnosti okvirja, ki jo je izmeril (Cranston, 1965). Višina obravnavanega okvirja je $H = 1{,}93$ m, razpon je $L = 2{,}64$ m, širina in višina betonskih prerezov stebrov in prečke sta $b = 0{,}1016$ m in $h = 0{,}1524$ m. Odmika armature od spodnjega in zgornjega roba prereza znašata $a_1 = a_2 = 0{,}014$ m. Količina armature se spreminja po okvirju in je predstavljena na sliki 7 (desno). Upoštevani podatki za jeklo so: elastični modul $E_s = 200000$ MPa, meja plastičnega tečenja

σ_y = 293 MPa, trdnost σ_{fs} = 310 MPa, modul utrjevanja H_s = 2020 MPa in modul mehčanja K_s = – 2,5 × 10^7 kNm^{-3} (kar ustreza G_{fs} = 1922 kNm). Materialne lastnosti betona so: elastični modul E_c = 31500 MPa, meja elastičnosti v tlaku σ_{dc} = 0,4 σ_{fcc} = 14,6 MPa, tlačna trdnost σ_{fcc} = 36,5 MPa, modul utrjevanja v tlaku H_{cc} = 29000, modul mehčanja v tlaku K^*_{cc} = – 4 × 10^7 kNm^{-3} (kar ustreza G_{fcc} = 16,65 kNm), natezna trdnost σ_{fct} = 0,95 MPa, modul mehčanja v nategu K^*_{ct} = – 1,1 × 10^7 kNm^{-3} (kar ustreza G_{fct} = 0,04 kNm). Privzamemo, da je obnašanje betona v nategu linearno elastično vse do dosežene natezne trdnosti, tj., da velja $\sigma_{dt} = \sigma_{fct}$. Vrednosti za E_s, σ_y, E_c in σ_{fcc} so povzete neposredno po (Saje, 2005). Naslednje parametre smo določili posredno iz podatkov v (Saje, 2005): trdnost jekla $\sigma_{fs} = \sigma_y + E_p\,(D_{y2} - D_{y1})$, kjer je E_p = 2000 MPa naklon enoosnega bilinearnega nateznega diagrama v plastičnem območju, D_{y2} = 1 % je deformacija na meji nosilnosti in $D_{y1} = \sigma_y/E_s$ je deformacija na meji tečenja; modul utrjevanja jekla $H_s = E_sE_p\,/\,(E_s - E_p)$; modul utrjevanja betona v tlaku H_{cc} določimo tako, da je trdnost betona v tlaku σ_{fcc} dosežena pri deformaciji D_{c1} = – 0,23 %; natezna trdnost je σ_{fct} = 0,55 ($D_{cr}E_c$), kjer je D_{cr} = 0,0055 %. Za parametre mehčanja, K_s, K^*_{cc}, K^*_{ct}, izberemo značilne vrednosti za jeklo in beton, kot jih navaja npr. (Pham, 2009). Ker je v vseh končnih elementih, ki modelirajo nosilec v območju med silo in osjo simetrije, napetostno stanje enako, trdnost jeklene armature v enem od elementov oslabimo za 1 %. S tem se izognemo možnosti, da bi se v vseh elementih armatura mehčala hkrati.

Okvir je simetrično obremenjen z dvema točkovnima silama P na razdalji l_p = 1,09 m od osi stebrov. Ker predpostavimo simetrično konstrukcijo, modeliramo samo polovico okvirja in pri tem upoštevamo ustrezne robne pogoje. Obtežbo nanašamo z vsiljevanjem vertikalnega pomika na mestu in v smeri sile P. Okvir opišemo z različno gostimi mrežami končnih elementov (od 8 do 128 elementov za steber (C) in od 5 do 80 elementov za polovico prečke (B)).



Slika 7 • **Simetrični portalni okvir: geometrija in obtežba (levo) ter armatura (desno)**

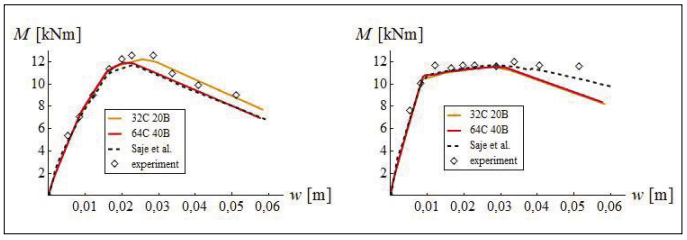


Slika 8 • **Simetrični okvir: konvergenca krivulje *P-w* za različne mreže končnih elementov (levo); primerjava z eksperimentom (Cranston, 1965) in numerično analizo (Saje, 2005) (desno)**

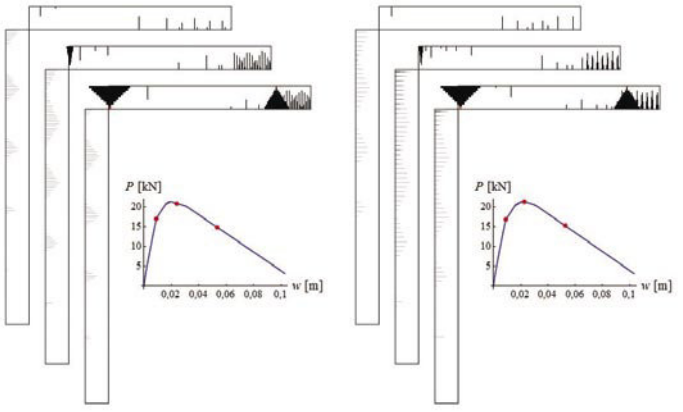
Rezultati porušne analize so predstavljeni na slikah 8 do 10. Na sliki 8 (levo) je prikazana zveza med silo P in pomikom na sredini razpona (glej sliko 7) za različne mreže končnih elementov. Pomik w lepo konvergira h končni rešitvi, pri čemer se z mrežo 32S 20B že zelo približamo končnim rezultatom. Primerjava naših rezultatov z eksperimentom (Cranston, 1965) in z numerično rešitvijo (Saje, 2005) je podana na sliki 8 (desno). Očitno je, da se naši rezultati lepo ujemajo tako z eksperimentom kot tudi z referenčno numerično rešitvijo. Dodatna primerjava je podana na sliki 9, kjer se izračunani momenti primerjajo s tistimi, ki jih je določil (Cranston, 1965) na podlagi meritev specifičnih deformacij. Za konvergenco vogalnega momenta, slika 9 (levo), je potrebna gostejša mreža kot za konvergenco pomika w, slika 8 (desno), in konvergenco momenta na sredini nosilca, slika 9 (desno).

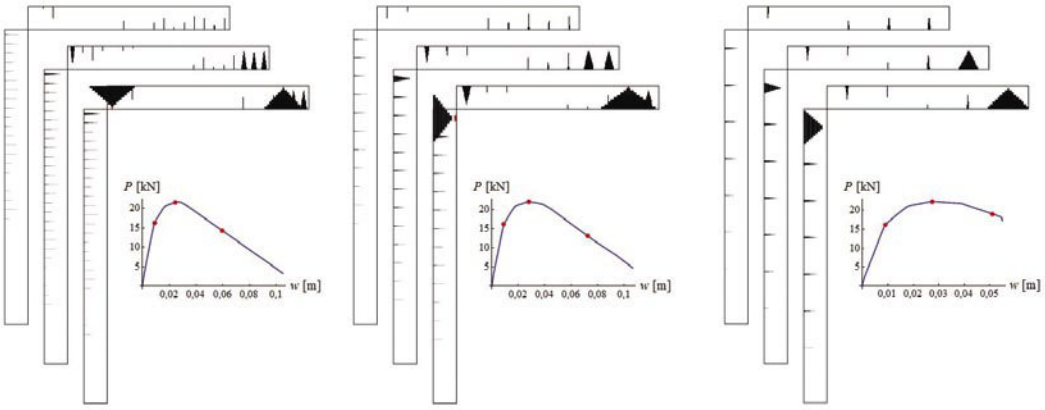
Slika 10 prikazuje širjenje razpok in zdrobljenih con v betonu pri treh vrednostih pomika ter za različne mreže končnih elementov. Široki razpoki se vedno pojavita na dveh najbolj kritičnih mestih: najprej na stiku prečke in stebra, nato pa še pod silo blizu simetrijske osi. Vendar lokacija široke razpoke v vogalu ni zmeraj ista: dve bolj grobi mreži oblikujeta razpoko v stebru, tri finejše mreže pa v prečki. Posledica tega se vidi na sliki 8 levo: krivulji bolj grobih mrež sta oddaljeni od krivulj finejših mrež.

Na sliki 10 je opazno, da razpoke z zgoščevanjem mreže konvergirajo k nekemu vzorcu razpok, ki bi lahko nakazoval lego realnih razpok, razdaljo med njimi in morda tudi širino realnih razpok. Ali se lokacije dobljenih vzorcev razpok ujemajo z realnostjo, ne moremo presoditi, ker o tem ni podatkov v (Cranston, 1965); če pa bi bili, bi morali eksperimentalne rezultate primerjati z rezultati analize za okvir z začetno imperfektnostjo, ki je podana v naslednjem poglavju.



Slika 9 • **Simetrični okvir: upogibni moment na stiku med stebrom in prečko (levo) in upogibni moment na osi simetrije (desno); primerjava z eksperimentom (Cranston, 1965) in numerično analizo (Saje, 2005)**

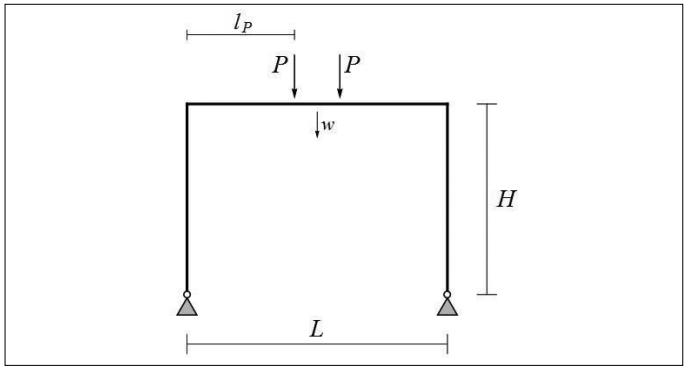




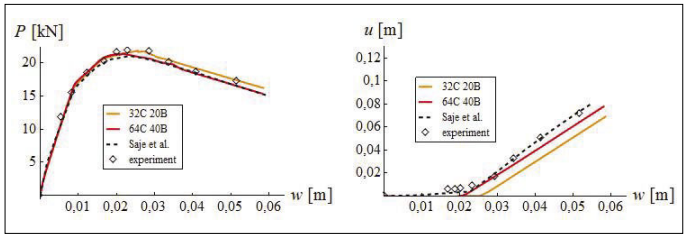
Slika 10 • **Simetrični okvir: izračunane razpoke (črne črte) in zdrobljene cone (rdeče črte) pri treh različnih vrednostih pomika , ki so označene na slikahs pikami, za različne mreže končnih elementov: 128C 80B (levo zgoraj), 64C 40B (desno zgoraj), 32C 20B (levo spodaj), 16C 10B (sredina spodaj), do 8C 5B (desno spodaj). Širine razpok so 50-krat povečane**

4 • PORUŠITEV PORTALNEGA OKVIRJA Z ZAČETNO IMPERFEKTNOSTJO

Ponovno obravnavamo členkasto podprt portalni okvir, predstavljen na sliki 7, ki ga je preizkusil (Cranston, 1965), le da zdaj upoštevamo tudi začetno imperfektnost okvirja $u_{im} = 0{,}32$ cm (slika 11), ki je bila izmerjena pred izvedbo eksperimenta. Vrednosti vseh materialnih parametrov ostanejo enake kot v prejšnjem poglavju; spremenimo le K_s na $K_s = -1{,}2 \times 10^7$ kNm^{-3} (kar ustreza $G_{fs} = 4004{,}17$ kNm), ker se s to vrednostjo računsko bolj približamo izmerjeni vrednosti momenta na osi simetrije (glej sliki 9 (desno) in 13 (desno)).

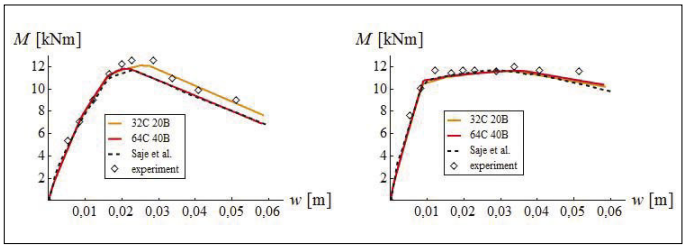


Slika 11 • **Portalni nesimetrični okvir: oblika začetne imperfektnosti**

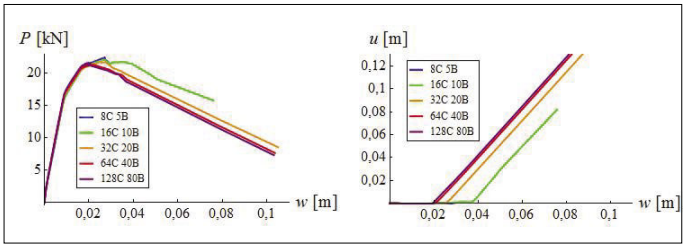


Slika 12 • **Nesimetrični okvir: odnos *P-w* (levo) in odnos *u-w* (desno)**

Rezultati analize so prikazani na slikah 12 do 17. Na sliki 12 (levo) je prikazana zveza med silo P in pomikom na sredini razpona w za dve mreži končnih elementov, ki sta se že v prejšnjem poglavju izkazali za dovolj gosti. Iz primerjave slik 8 (desno) in 12 (levo) se lahko opazi, da sta se izračunani krivulji zaradi upoštevanja začetne imperfektnosti le malo spremenili. Na sliki 12 (desno) je prikazan odnos med horizontalnim pomikom levega vogala in pomikom (slika 11). Za mrežo 64C 40B se izračunane vrednosti lepo ujemajo z rezultati eksperimenta (Cranston, 1965) in tudi z rezultati numerične analize (Saje, 2005). Na sliki 13 so prikazani izračunani upogibni momenti v levem vogalu in na sredini prečke. Iz primerjave slik 9 in 13 lahko opazimo, da se je izračunani vogalni moment le malo spremenil glede na simetrični okvir. Moment na sredini prečke se je spremenil opazneje predvsem zaradi spremenjene vrednosti modula mehčanja jeklene armature . Konvergenca pomikov in momentov je prikazana na slikah 14 in 15, kjer C predstavlja število končnih elementov za en steber, B pa število končnih elementov za polovico prečke. Najmanj občutljiv za gostoto mreže končnih elementov je moment na osi simetrije, kar je posledica skoraj konstantnega upogibnega momenta med obema silama.

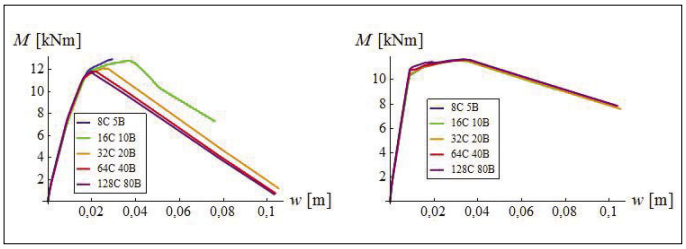


Slika 13 • **Nesimetrični okvir: moment na stiku med stebrom in prečko (levo) in moment na osi simetrije (desno)**



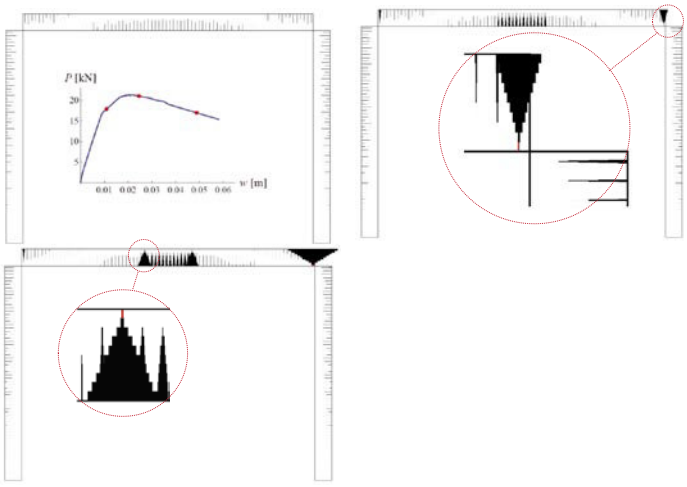
Slika 14 • **Nesimetrični okvir: konvergenca pomika *w* (levo) in pomika *u* (desno) glede na število končnih elementov v mreži**

Razpoke v betonu in zdrobljene cone betona so za mrežo 64C 40B prikazane na sliki 16. Pri drugi piki na diagramu *P-w* na sliki 16 je prišlo do odpovedi celotnega prereza prečke v desnem vogalu, tj. do mehčanja vsega materiala v tem prerezu, tako armature kot betona. Na zgornjem delu prereza tik ob desnem vogalu je nastala široka razpoka (črne črte), na spodnjem delu prereza pa se je beton zdrobil v tlaku (rdeča črta). Pri drugi piki na diagramu *P-w* na sliki 16 je v prerezu tik ob desnem vogalu v tlaku ostal en sam sloj betona. (Cranston, 1965) poroča, da se je približno pri tej velikosti pomika *w* začelo odluščenja betona v desnem vogalu (uporabi izraz »side spalling at corner«), kar se lepo sklada z rezultati analize. Pri tretji piki na diagramu *P-w* na sliki 16 sta odpovedala oba prereza pod silama v prečki. Na spodnjem delu prereza je nastala široka razpoka (črne črte), na zgornjem tlačenem delu prereza pa se je beton zdrobil v tlaku (rdeča črta). V prerezu pod silo je v tlaku ostal en sam sloj betona. (Cranston, 1965) poroča, da je pri malo manjši velikosti pomika *w* nastalo drobljenje betona 22,9 cm na desno od vnosa leve sile v okvir (uporabi izraz »crushing«), kar se dobro sklada z rezultati analize. Slika 16 kaže, da se tudi pri okvirju z začetno imperfektnostjo nakaže vzorec razporeditve razpok, ki je bolj izrazit pri večjem pomiku *w* (pri tretji piki v diagramih *P-w* na sliki 16). Če lahko ta vzorec razpok povežemo z realnimi razpokami, ne more presoditi.



Slika 15 • **Nesimetrični okvir: konvergenca momenta na stiku med stebrom in prečko (levo) in momenta na osi simetrije (desno) z večanjem števila končnih elementov**

Na sliki 17 je drugače kot na sliki 16 prikazano stanje betona in armature. Gre za stanje pri tretji piki na krivulji *P-w* za na sliki 16 in za mrežo 64C 40B končnih elementov. Zelena barva označuje območja v betonu, ki so razpokana, ne glede na to, koliko so široke razpoke. Primerjava slik 16 in 17 za vrhnje območje obeh stebrov pokaže, da so vsi končni elementi razpokani do enake višine, da pa so razpoke različno široke; nekatere so tako tanke, da se jih na sliki 16 ne vidi kljub 50-kratni povečavi. Beton je v mehčanju le v treh prerezih (vijolična barva na sliki 17), ki so bolje vidni na sliki 16.



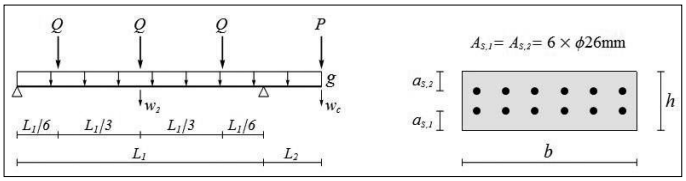
Slika 16 • **Nesimetrični okvir: izračunane razpoke (črne črte) in zdrobljene cone (rdeče črte) pri treh različnih vrednostih pomika *w*, ki so označene na sliki *P-w* s pikami, za mrežo 64C 40B končnih elementov. Širine razpok so 50-krat povečane. Prikazana je povečana porušitev desnega vogala pri drugi piki in porušitev prečke pod silo pri tretji piki**

Slika 17 • **Stanje betona in armature pri tretji piki na krivulji *P-w* na sliki 16 za mrežo 64C 40B končnih elementov. Oznaka »tlak po mehčanju v nategu« pomeni, da se je tam razpoka zaprla in beton nosi v tlaku**

5 • PORUŠITEV PREVISNEGA NOSILCA

Obravnavamo previsni nosilec, prikazan na sliki 18, ki so ga eksperimentalno preizkusili v Franciji na Ecole Normale Supérieure de Cachan (Ibrahimbegović, 2013) ob različnih vrednostih nateznih osnih sil. Modeliramo primer brez osne sile. Polje med podporama je dolgo L_1 = 7,2 m,

previsni del nosilca pa L_2 = 1,69 m. Širina in višina betonskega prereza sta in b = 0,6 m in h = 0,2 m, odmika armature od spodnjega in zgornjega roba prereza sta $a_1 = a_2$ = 0,065 m. Količini zgornje in spodnje armature sta enaki $A_{s1} = A_{s2}$ = 31,86 cm^2. Uporabljene materialne lastnosti jekla so (Ibrahimbegović, 2013): elastični modul E_s = 215000 MPa, meja tečenja σ_y = 498 MPa, trdnost σ_{fs} = 587 MPa, modul utrjevanja H_s = 786 MPa, modul mehčanja $K_s = -5 \times 10^6$ kNm^{-3} (kar ustreza G_{fs} = 34457 kNm). Materialne lastnosti betona so (Ibrahimbegović, 2013): elastični modul E_c = 32400 MPa, meja elastičnosti v tlaku σ_{dc} = 28,8 MPa, tlačna trdnost σ_{fcc} = 41,2 MPa, modul utrjevanja v tlaku H_{cc} = 26400 kNm, modul mehčanja v tlaku $K^*_{cc} = -10^7$ kNm^{-3} (kar ustreza G_{fcc} = 84,9 kNm), meja elastičnosti v nategu in natezna trdnost $\sigma_{dt} = \sigma_{fct}$ = 3,21 MPa, modul mehčanja v nategu $K^*_{ct} = -5 \times 10^6$ kNm^{-3} (kar ustreza G_{fct} = 1,03 kNm).

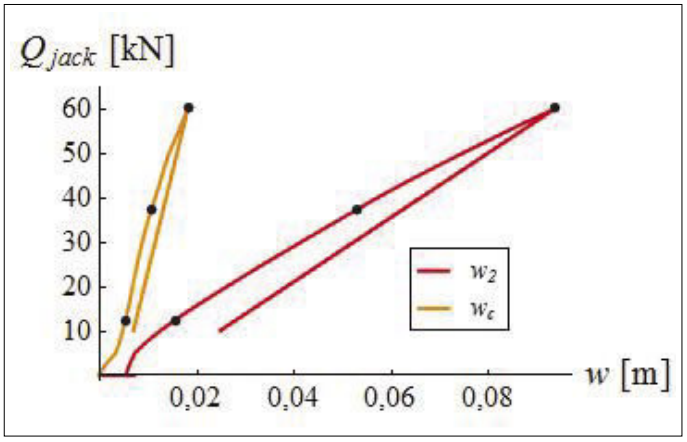


Slika 18 • **Previsni nosilec: geometrija in obtežba (levo) ter prerez (desno)**

Del nosilca med podporama razdelimo na 36 enakih končnih elementov, previsni del pa na devet. Vsi elementi so sestavljeni iz desetih slojev betona in dveh slojev armature. Lastna teža nosilca je podana kot zvezna obtežba g = 3,2 kN/m. Točkovne sile $Q = Q_g + Q_{jack}$ in $P = P_g + P_{jack}$ se vsiljujejo s hidravličnimi bati, pri čemer Q_g = 1,8 kN in P_g = 3,8 kN predstavljata lastno težo naprave za vsiljevanje obtežbe, Q_{jack} in P_{jack} pa vsiljeno obtežbo. Slednji se monotono povečujeta po predpisani shemi, prikazani v tabeli 1. Za vsak obtežni korak izračunamo pomik w_2 na sredini razpona in pomik w_c na prostem koncu nosilca.

Q_{jack} (kN)	P_{jack} (kN)	Q_{jack} (kN)	P_{jack} (kN)
0	0	35	59,0
0	5,6	40	66,2
5	15,8	45	73,4
10	23,0	50	80,6
15	30,2	55	87,8
20	37,4	60	95,0
25	44,6	65	102,0
30	51,8	70	109,4

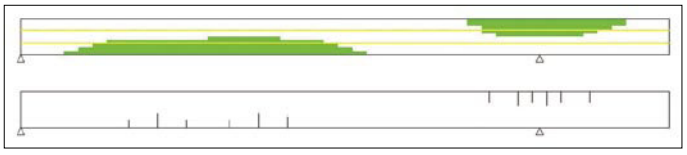
Preglednica 1 • **Shema vsiljevanja obtežbe**



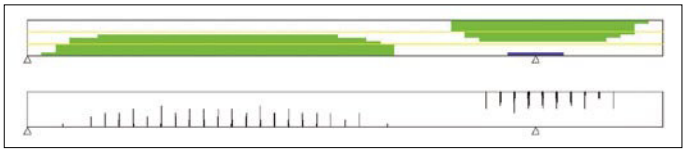
Slika 19 • **Previsni nosilec: pomik w_2 na sredini razpona in pomik w_c na koncu nosilca v odvisnosti od sile Q_{jack}**

Slika 19 prikazuje izračunana pomika w_2 in w_c v odvisnosti od sile Q_{jack}. S pikami so označene tri konfiguracije nosilca, za katere je na slikah 20 do 22 prikazano stanje materiala. Že zaradi lastne teže in teže obremenjevalnih naprav se v polju in nad desno podporo pojavijo dovolj veliki nategi, da beton razpoka. Z nalaganjem obtežbe se območje razpokanosti širi (slika 20). V okolici desne podpore se pojavijo poškodbe betona v tlaku (slika 21). Armatura je elastična vse do sile $Q_{jack} \approx 60$ kN, ko se začne plastično tečenje zgornje armature. Takoj zatem se poruši prerez tik ob podpori na desni strani. Prerez se poruši po betonu, kar je lepo vidno s slike 22. Porušitvi kritičnega prereza sledi porušitev nosilca, kar se vidi s slike 19.

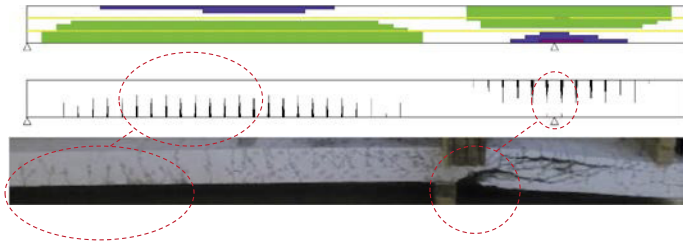
Na sliki 23 je prikazan obravnavani nosilec med preizkusom, na sliki 24 pa so prikazani porušeni preizkušanci, ki so bili predobremenjeni z različnimi vrednostmi osnih sil. Ob pomoči slik 22 in 24 lahko primerjamo izračunane rezultate z eksperimentom. V obeh primerih pride do porušitve nosilca zaradi porušitve betona nad podporo in desno od nje (slika 22). V obeh primerih imamo enakomerno razpokanost na sredinskem območju polja med podporama (slika 22). Razpoke segajo do približno dveh tretjin višine nosilca (vse do zgornje armature). Številčni rezultati eksperimenta za detajlno primerjavo še niso na voljo.



Slika 20 • **Stanje materiala (zgoraj) in prikaz razpok v betonu (spodaj) pri obtežbi, označeni s prvo piko na krivulji sila–pomik na sliki 19. Prikazana višina nosilca je 2-krat večja od dejanske. Razpoke so 50-krat povečane. Za legendo barv glej sliko 17**

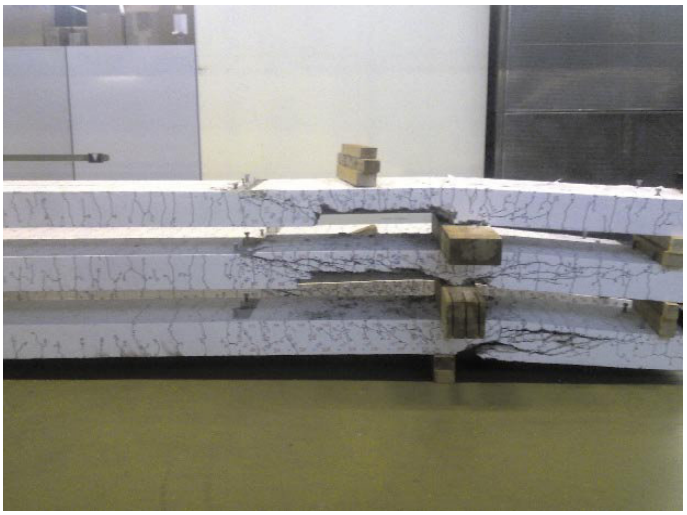


Slika 21 • **Stanje materiala (zgoraj) in prikaz razpok v betonu (spodaj) pri obtežbi, označeni z drugo piko na krivulji sila–pomik na sliki 19. Prikazana višina nosilca je 2-krat večja od dejanske. Razpoke so 50-krat povečane. Za legendo barv glej sliko 17**



Slika 22 • **Stanje materiala (zgoraj), prikaz razpok v betonu in drobljenja betona (sredina) ter preizkušanec po eksperimentu (spodaj), pri obtežbi, označeni s tretjo piko na krivulji sila–pomik na sliki 19. Razpoke so črne črte, krušenje v tlaku je prikazano z rdečima črtama. Prikazana višina nosilca je 2-krat večja od dejanske. Razpoke so 50-krat povečane. Za legendo barv glej sliko 17**

Slika 23 • **Izvedba preizkusa (Ibrahimbegović, 2013)**



Slika 24 • **Porušeni preizkušanci (Ibrahimbegović, 2013). Spodnji je bil numerično analiziran**

6 • SKLEP

Opisali smo računski postopek, ki deluje po metodi linijskih končnih elementov in je zelo primeren za porušno analizo armiranobetonskih nosilcev in okvirjev pri statični, tj. monotoni obremenitvi. Je robusten in potrebuje le tiste materialne podatke, ki se jih lahko pridobi ali s standardiziranimi preskusi betona in armature ali iz Evrokodov in drugih primernih publikacij. Rezultati prikazanih numeričnih testov za portalni okvir in previsni nosilec nakazujejo naslednje sklepe. (i) Za takšen okvir (in verjetno tudi za večino armiranobetonskih okvirjev) je geometrijska nelinearnost zanemarljiva v primerjavi z materialno-nelinearnimi efekti. (ii) Z opisanim postopkom lahko zelo dobro ponovimo (in verjetno tudi predvidimo) rezultate eksperimenta. (iii) Rezultati opisanega postopka so praktično neodvisni od mreže končnih elementov, ko material na več območjih konstrukcije funkcionira v mehčanju. (iv) Z zgoščevanjem mreže končnih elementov rezultati, ki jih izračunamo z opisanim postopkom, konvergirajo k rešitvi. Ugotovimo tudi, da se z zgoščevanjem mreže končnih elementov oblikuje vzorec razpok, za katerega pa nismo pokazali, na kakšen način ga lahko povežemo z dejanskimi razpokami v armiranobetonskih linijskih konstrukcijskih elementih (takšna študija presega namene tega članka). Detajli prikazanega končnega elementa in drugi računski primeri so prikazani v (Jukić, 2013b).

7 • LITERATURA

Abaqus, komercialni program za analizo s končnimi elementi, povzeto po: http://www.simulia.com, 2013.

Cranston, W. B., Tests on reinforced concrete frames, 1: Pinned portal frames, Technical report TRA/392, Cement and concrete association, London, 1965.

Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., Stratan, A., Pre- and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 35: 1359–1379, 2006.

Ibrahimbegović, A, Nonlinear solid mechanics: Theoretical formulations and finite element solution methods, Springer, 2009.
Ibrahimbegović, A. Ecole Normale Supérieure de Cachan, osebni stik, 2013.
Jukić,M., Brank, B., Ibrahimbegović, A., Embedded discontinuity finite element formulation for failure analysis of planar reinforced concrete beams and frames, Engineering Structures 50: 115–125, 2013.
Jukić, M., Končni elementi za modeliranje lokaliziranih porušitev v armiranem betonu, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2013.
Korelc, J., AceFEM, raziskovalni program za analizo s končnimi elementi, povzeto po: http://www.fgg.uni-lj.si/Symech, 2013.
Markovič, M., Krauberger, N., Saje, M., Planinc, I., Bratina, S., Non-linear analysis of pretensioned concrete planar beams, Engineering Structures 46: 279–293, 2013.
OpenSees, raziskovalni program za analizo konstrukcij, povzeto po: http://opensees.berkeley.edu, 2013.
Pham, B. H., Stress-resultant models for optimal design of reinforced-concrete frames, doktorska disertacija, Ecole Normale Superieure de Cachan, Cachan, 2009.
Reddy, J. N., An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill, 2005.
Saje, M., Planinc, I., Bratina, S. Large displacements and instability of beam-like structural systems, v A. Ibrahimbegović, B. Brank (urednika), Engineering structures under extreme conditions: Multi-physics and multi-scale computer models in nonlinear analysis and optimal design, IOS Press, 329–350, 2005.
Sap2000, komercialni program za analizo konstrukcij, povzeto po: http://www.csiamerica.com/sap2000, 2013.

OBVESTILO

Zaradi manjšega zanimanja za pripravljalne seminarje za strokovne izpite za gradbeno stroko bosta v letu 2014 organizirana le dva namesto predvidenih treh seminarjev.

SEMINAR	IZPIT	
	Osnovni in dopolnilni	Revidiranje
10.–12. 2. 2014	25. 3. 2014 (po potrebi še 24. in 26.)	24. 3. 2014
	27. 5. 2014 (po potrebi še 26. in 28.)	
6.–8. 10. 2014	25. 11. 2014 (po potrebi še 24. in 26.)	21. 10. 2014

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana;**
Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure:
ponedeljek, torek, sreda od 09.00 do 13.00 ure;
četrtek od 12.00 do 16.00 ure.
V petek NI URADNIH UR za stranke!

Seminar vključuje **izpitne programe** za:
1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov (za kandidate, ki opravljajo dopolnilni strokovni izpit; predavanje se odvija v okviru rednih seminarjev).
5. Kandidati drugih strok lahko poslušajo posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS – MSG: http://www.izs.si, v rubriki »Strokovni izpiti«)

Cena za udeležbo na seminarju (za predavanje in literaturo) po izpitnih programih pod 1., 2. in 3. točko znaša 623,22 EUR z DDV, pod 4. točko pa 89,10 EUR z DDV. Cena za udeležbo na posameznem predavanju je 89,10 EUR z DDV.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**. Prijavo je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje 14 dni pred pričetkom seminarja!

Prijavni obrazec je mogoče dobiti na spletni strani ZDGITS (http://www.zveza-dgits.si).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana.**
Informacije o strokovnih izpitih in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS http://www.izs.si ali po telefonu (01) 547-33-19 ob uradnih urah (ponedeljek, sreda, četrtek, petek: od 08.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).

SIMPOZIJ OB 20. OBLETNICI USTANOVITVE SLOCOLD

Slovenski nacionalni komite za velike pregrade (Slovenian National Committee on Large Dams – SLOCOLD) je v letu 2013 praznoval 20-letnico obstoja in delovanja. Po ustanovnem sestanku konec leta 1992 je bil 14. aprila 1993 vpisan v register društev, v istem letu pa na letnem zasedanju Mednarodne komisije za velike pregrade (International Commission on Large Dams – ICOLD) tudi sprejet v svetovno krovno organizacijo za področje pregradnega inženirstva. Od leta 2005 je SLOCOLD tudi član Evropskega kluba ICOLD.

Kaj je SLOCOLD?

SLOCOLD je organiziran kot združenje posameznikov in pravnih oseb, ki so aktivni na vseh področjih pregradnega inženirstva: pri načrtovanju, raziskavah in analizah, izvedbi, monitoringu, vzdrževanju, zagotavljanju varnosti in zakonodaji. Trenutno ima 120 individualnih in 20 podpornih članov, ki prihajajo iz podjetij za proizvodnjo (hidro)električne energije, projektantov in konzultantov, inštitutov in drugih razvojnoraziskovalnih ustanov, izvajalcev gradbenih del in opreme, izvajalcev monitoringa ter iz nekaterih državnih organov. Člani SLOCOLD so kot eksperti na svojih področjih v okviru matičnih organizacij aktivni pri projektih v Sloveniji in tujini, poleg tega pa v telesih ICOLD in EU-kluba ICOLD.

V prvih letih obstoja SLOCOLD sta bili glavni aktivnosti priprava slovenske izdaje sedemjezičnega Tehničnega slovarja za pregrade in izdelava katastra velikih pregrad. Slednji je še vedno najpopolnejše urejena evidenca velikih pregrad v Sloveniji. V drugem desetletju obstoja so bile glavne aktivnosti SLOCOLD organizacija in soorganizacija posvetovanj (doslej 15) in strokovnih ekskurzij, publiciranje prispevkov na srečanjih ICOLD (28) ter vzdrževanje obsežne specialistične knjižnice.

V obdobju po letu 2009 je največji poudarek aktivnosti SLOCOLD na prizadevanjih za dopolnitev slovenske zakonodaje s področja (velikih) pregrad in s tem njihovega varnostnega stanja, na krepitvi ožjega (Balkan in srednja Evropa) in širšega (EU-klub ICOLD) regionalnega sodelovanja ter na večjem vključevanju predstavnikov SLOCOLD v delovne komiteje ICOLD.

Mednarodni simpozij

Kot delovno počastitev jubileja je SLOCOLD 16. oktobra 2013 v hotelu Plaza v Ljubljani organiziral mednarodni simpozij z naslovom Dam Engineering in Southeast and Middle Europe – Recent experience and future outlooks. Simpozij je bil namenjen predvsem slovenski strokovni javnosti in hkrati prikazu slovenskih dosežkov v mednarodnem merilu jugovzhodne Evrope. Teme simpozija so bile: stanje obstoječih pregrad, materiali in tehnologije ter novejši projekti in perspektive. Od 19 prejetih prispevkov je bilo osem vabljenih, predavatelji pa so poleg Slovenije prišli še iz sedmih držav: Italije, Avstrije, Češke, Slovaške, Bosne in Hercegovine, Makedonije in Švedske. Tako kot predavatelji so tudi udeleženci prišli iz več evropskih držav, skupaj jih je bilo več kot 90, od tega je bila približno tretjina tujih gostov. S posebnim ponosom smo ugotovili, da je bilo prisotnih kar osem predsednikov ali generalnih sekretarjev nacionalnih komitejev ICOLD.

Udeleženci simpozija, v prvi vrsti od leve proti desni: B. Zadnik (prvi predsednik SLOCOLD), A. Širca (aktualni predsednik), G. Ruggeri (predsednik ITCOLD), N. Humar in A. Kryžanowski (drugi predsednik SLOCOLD)

V dopoldanskem delu so se zvrstili vabljeni predavatelji, v popoldanskem pa so sledili drugi prispevki, organizirani v tri sklope: šest z naslovom Dam safety and monitoring, trije z naslovom Calculation methods in štirje v sklopu Dam construction, rehabilitation and modification.

P. Žvanut (ZAG) med svojim predavanjem

B. Zadnik in U. Norstedt (Švedska) med neuradno diskusijo

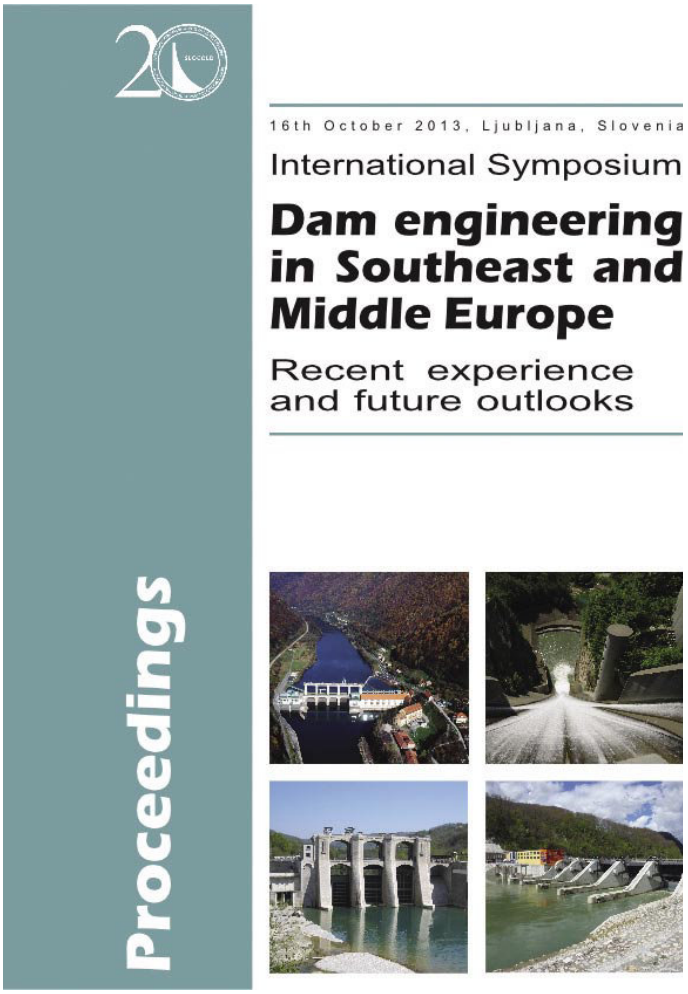
Vsi udeleženci simpozija so dobili zbornik, ki je zainteresiranim še na voljo v tiskani obliki, s podporo IZS in v tehnični izvedbi IB PROCADD pa so bila vsa predavanja tudi snemana in so za ogled na voljo na spletni strani IZS, oziroma z neposrednim dostopom s strani www.slocold.si. Na slednji so tudi članki v elektronski obliki.

Zaradi širine tematike je izpostavljanje pomena posameznih prispevkov nehvaležna naloga, ki jo mora opraviti vsakdo sam, nedvomno pa so bili najbolje sprejeti vabljeni predavatelji, ki so praktično vsi tudi aktivni člani ICOLD. G. Ruggeri iz Italije (v preteklem mandatu podpredsednik ICOLD) je predstavil razmišljanja in prizadevanja v smeri skupne evropske zakonodaje za področje pregrad, M. Minarik iz Slovaške je govoril o geofizikalnih, numeričnih in statističnih metoda kot orodjih za oceno varnosti pregrad, U. Norstedt je prikazal stanje pregradne varnosti na Švedskem in R. Hornich zelo zanimiv prispevek o pregradah za zagotavljanje poplavne varnosti na avstrijskem Štajerskem. Predavatelji L. Tančev, L. Satrapa in Đ. Malović so v svojih predavanjih podali stanje in perspektive razvoja pregradnega inženirstva v Makedoniji, Slovaški ter Bosni in Hercegovini. Za vse podrobnosti in predstavitve preostalih predavateljev pa ste vabljeni na spletno stran www.slocold.si.

Pri izdaji zbornika simpozija je s prispevkom pomagala tudi IZS, za kar se na tem mestu še enkrat zahvaljujemo.

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.,
predsednik SLOCOLD

Dan po simpoziju, 17. oktobra 2013, je SLOCOLD organiziral še strokovno ekskurzijo na pregradi Za Travnikom in Fala. Na sliki so udeleženci ekskurzije ob vznožju pregrade Za Travnikom, ki jo upravlja Cinkarna Celje



Naslovnica zbornika simpozija

Del organizacijskega odbora simpozija: A. Sedej, M. Ravnikar Turk in A. Širca

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Anja Kotar, Vpliv podnebnih sprememb na visoke pretoke Vipave, mentor prof. dr. Mitja Brilly, somentor mag. Andrej Vidmar

Simon Vrbovšek, Projektiranje ponapete betonske plošče, mentor prof. dr. Boštjan Brank, somentor doc. dr. Sebastjan Bratina

Simon Skvarča, Vpliv vremenskih razmer na prometni tok v cestnem prometu, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor viš. pred. mag. Robert Rijavec

Nives Gerbec, Projektiranje prometnih površin za starejše voznike in pešce, mentor doc. dr. Peter Lipar

Gregor Ocepek, Tranzitni tovorni promet čez Slovenijo, mentor izr. prof. dr. Marijan Žura

Jure Raspor, Oscilacije in vibracije v železniškem prometu, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentorica asist. Darja Šemrov

Katarina Smrke, Analiza novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z metodo končnih elementov, mentor prof. dr. Boštjan Brank, somentor Boštjan Zupanc

Karmen Jazbec, Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona, mentorica izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentorica asist. Patricia Cotič

Andrej Šabec, Primerjalna študija svetlobnega in toplotnega udobja med montažnim in klasično zgrajenim vrtcem, mentorica doc. dr. Živa Kristl, somentorica asist. dr. Mateja Dovjak

Primož Novak, Analiza nosilne konstrukcije večetažne poslovne stavbe v Idriji, mentor doc. dr. Sebastjan Bratina

Ester Džamastagić, Ocena energetskega potenciala akumulacije Vogršček, mentor doc. dr. Andrej Kryžanowski, somentor doc. dr. Simon Schnabl

Helena Bogataj, Vodenje prometa na državnih cestah v Celju, mentor doc. dr. Peter Lipar

Iris Stopar, Vrednotenje zemljišč v primerih stvarne služnosti, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Viktor Torkar, Primerjava 2D in 3D analize hudourniške pregrade s programom Midas GTS, mentor izr. prof. dr. Janko Logar, somentor doc. dr. Andrej Kryžanowski

Ervin Brulc, Načrtovanje vzdrževanja in obnove skupine premostitvenih objektov, mentorica izr. prof. dr. Jana Šelih

VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM I. STOPNJE OPERATIVNO GRADBENIŠTVO (VS)

Sanel Ćejvanović, Projektiranje enoetažne jeklene stavbe s paličnimi nosilci, mentor prof. dr. Jože Korelc, somentor asist. dr. Primož Može

Boštjan Končina, Raba elektrofiltrskega pepela za izdelavo hidravlično vezanih plasti, mentorica doc. dr. Ana Petkovšek

Gregor Konjar, Uporaba pasivnih sider v geotehničnih konstrukcijah, mentor izr. prof. dr. Janko Logar

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM I. STOPNJE GRADBENIŠTVO (UN)

Matic Kotnik, Semantični katalog gradbenih produktov, mentor doc. dr. Vlado Stankovski

DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Aleš Česen, Spremljanje in karakterizacija korozijskih procesov jekla v betonu, mentorica izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentor izr. prof. dr. Andraž Legat

Vanja Ramšak, Numerično modeliranje tokov onesnažil med okoljskimi segmenti, mentor doc. dr. Dušan Žagar

Miha Jukić, Končni elementi za modeliranje lokaliziranih porušitev v armiranem betonu, mentor prof. dr. Boštjan Brank, somentor prof. dr. Adnan Ibrahimbegović

Marko Brozovič, Izbira akcelerogramov za projektiranje stavb, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Andraž Hočevar, Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju, mentorica izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Blaž Kramar, Spremljanje načrtovanja in proizvodnje elementov montažnega objekta, mentorica doc. dr. Vesna Žegarac Leskovar, somentor red. prof. dr. Miroslav Premrov

Damjan Vogrinec, Zasnova in izvedba Wienerberger hiše e^4, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorica doc. dr. Kaja Pogačar

Andrej Panker, Določanje ponudbenih cen za vgradne elemente za izgradnjo čistih prostorov, mentorica viš. pred. Metka Zajc Pogorelčnik

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Denis Žuran, Računska analiza nosilnosti in izdelavnih stroškov jeklenega okvirja transportnega traku podjetja Ocado v Angliji, mentorja red. prof. dr. Stojan Kravanja in red. prof. dr. Duško Uršič

2. STOPNJA, MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Klara Mihalič, Parametrična analiza vpliva geometrijskih parametrov na solarni potencial pritličnih objektov, mentorica doc. dr. Vesna Žegarac Leskovar

Bojan Preložnik, Projektiranje sovprežnega ločnega mostu dolžine 251,5 m, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Dušan Rožič, univ. dipl. inž. grad.

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-14.2.2014

4th International FIB Congress
Mumbai, Indija
www.fibcongress2014mumbai.com

17.-21.2.2014

GNP 2014
5th International Confrence
"Civil Engineering – science and practice"
Žabljak, Črna gora
www.gnp.ac.me

27.3.2014

3. Trienalni znanstveni posvet
Naravne nesreče v Sloveniji
Ig, Slovenija
http://giam.zrc-sazu.si/?q=sl/nns

3.-5.4.2014

Structures Congress 2014
Boston, Massachusetss, ZDA
http://content.asce.org/conferences/structures2014/index.html

27.4.-2.5.2014

EGU General Assembly
Dunaj, Avstrija
www.egu2014.eu

1.-6.6.2014

82nd ICOLD Annual Meeting
Bali, Indonezija
www.icold2014bali.org/en/agenda.html

2.-6.6.2014

3rd World Landslide Forum "Landslide risk mitigation: Constructing a safe geo-environment"
Peking, Kitajska
www.wlf3.org

5.-6.6.2014

Prvi srpski kongres o putevima
Beograd, Srbija
www.kongresoputevima.rs

23.-27.6.2014

10th International Symposium on Ecohydraulics
Trondheim, Norveška
www.ntnu.edu/ecohydraulics2014

30.6.-2.7.2014

EURODYN 2014
9th International Conference on Structural Dynamics
Porto, Portugalska
http://paginas.fe.up.pt/~eurodyn2014/

16.-18.7.2014

Footbridge 2014: Past, Present & Future
London, Anglija
www.footbridge2014.com

24.-29.8.2014

2ECEES
2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology
Istanbul, Turčija
www.2eceesistanbul.org

3.-5.9.2014

37th IABSE Symposium Madrid 2014
Madrid, Španija
www.iabse.org/Images/Conferences/Madrid/symposium_iabse2014.pdf

15.-19.9.2014

IAEG XII Congress Engineering Geology for Society and Territory
Torino, Italija
www.iaeg2014.com

23.-24.9.2014

ISCD 2014
10th International Symposium on Cable Dynamics
Kopenhagen, Danska
www.aimontefiore.org/iscd2014/

20.-22.10.2014

EEBP7 – 7th International Symposium on Environmental Effects on Buildings and People – Actions, Influences, Interactions, Discomfort
Krakov, Poljska
http://psiw.org.pl/eebp7

6.-8.11.2014

International Conference on Sustainable Infrastructure 2014
Long Beach, Kalifornija, ZDA
http://content.asce.org/conferences/icsi2014/index.html

12.-17.4.2015

7th World Water Forum
Daegu-Gyeongbuk, Republika Koreja
http://worldwaterforum7.org/en

25.-29.5.2015

XVth IWRA World Water Congress
Edinburgh, Škotska
www.worldwatercongress.com

22.6.-2.7.2015

XXVIth IUGG General Assembly
Praga, Češka
www.iugg.org/programmes/grants2015.php

Rubriko ureja • **Eva Okorn,** ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: **gradb.zveza@siol.net**