

# Analiza posljedica poplavnog vala nastalog prolomom velike brane

Luka Sopta, Sinša Družeta, Danko Holjević

## Ključne riječi

poplavni val,  
prolom velike brane,  
širenje poplavnog vala,  
brana Tribalj,  
modelsko rješenje  
Clausen-Clarkov kriterij

## Key words

flood wave,  
large dam break,  
flood wave propagation,  
Tribalj Dam,  
modelling solution,  
Clausen-Clark criterion

## Mots clés

eaux de crue,  
rupture de grands  
barrages,  
propagation des eaux de  
crue,  
barrage de Tribalj,  
solution de modélisation,  
critère de Clausen-Clark

## Ключевые слова

вал наводнения,  
прорыв крупной  
плотины,  
расширение вала  
наводнения, плотина  
Трибаль, модельное  
решение, критерий  
Клауссена-Кларка

## Schlüsselworte

Überschwemmungswelle,  
Durchbruch grosser  
Staumauer,  
Verbreiterung der  
Überschwemmungswelle,  
Staumauer Tribalj,  
Modellösung,  
Clausen - Clark's Kriterium

L. Sopta, S. Družeta, D. Holjević

Izvorni znanstveni rad

## Analiza posljedica poplavnog vala nastalog prolomom velike brane

Prikazana je analiza posljedica proloma velike brane. Analizirana je problematika proloma velike brane te odabira modelskih rješenja. Numeričkim modelom provedene su simulacije širenja poplavnog vala na primjeru brane Tribalj. Analizom dubine i brzine vode poplavnog vala primjenom Clausen-Clarkovog kriterija određene su moguće posljedice na području plavljenja. Istaknuta je potreba i važnost kategoriziranja i rangiranja područja i posljedica poplavnog vala od proloma brana.

L. Sopta, S. Družeta, D. Holjević

Original scientific paper

## Analysis of effects of flood wave caused by large dam break

The analysis of consequences of a large dam break is presented. Problems relating to large dam failure, and selection of proper modelling solutions, are analyzed. Simulations of flood wave propagation are made using a numerical model, and Tribalj Dam is used as an example. Possible consequences in the flood zone are determined by analyzing water depth and flood wave velocity, using the Clausen-Clark criterion. The emphasis is placed on the need and significance of categorizing and ranking the extent and effects of flood waves caused by dam break.

L. Sopta, S. Družeta, D. Holjević

Ouvrage scientifique original

## L'Analyse des effets des eaux de crue résultant de rupture de grand barrage

L'analyse des conséquences de rupture d'un grand barrage est présentée. Les problèmes relatifs à la rupture de grands barrages, et la sélection des solutions de modélisation appropriées, sont analysés. Les simulations de la propagation des eaux de crue sont faites à l'aide d'un modèle numérique, et le barrage de Tribalj est utilisé comme exemple. Les effets possibles dans la zone inondée sont déterminés par l'analyse de la profondeur d'eau et de la vitesse des eaux de crue, en utilisant le critère de Clausen-Clark. L'accent est mis sur la nécessité et l'importance de catégorisation et classement de l'étendue et des effets des eaux de crue résultant de rupture de barrages.

Л. Сопта, С. Дружета, Д. Хольевич

Оригинальная научная работа

## Анализ последствий вала наводнения, возникшего вследствие прорыва крупной плотины

Приведен анализ последствий прорыва крупной плотины. Произведен анализ проблематики прорыва крупной плотины и выбора модельных решений. С помощью цифровой модели проведена симуляция расширения вала наводнения на примере плотины Трибаль. Посредством анализа глубины и скорости воды вала наводнения с применением критерия Клауссена-Кларка определены возможные последствия в зоне затопления. Подчеркнуты необходимость и важность категоризации и ранжирования зон и последствий вала наводнения вследствие прорыва плотин.

L. Sopta, S. Družeta, D. Holjević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Analyse der Folgen der Überschwemmungswelle die nach dem Durchbruch einer grossen Staumauer entsteht

Dargestellt ist eine Analyse der Folgen des Durchbruchs einer grossen Staumauer. Analysiert ist die Problematik des Durchbruchs einer grossen Staumauer sowie der Auswahl von Modellösungen. Mit einem numerischen Modell wurden Simulationen der Verbreitung und der Erweiterung der Überschwemmungswelle am Beispiel der Staumauer Tribalj durchgeführt. Durch Analyse der Tiefe und Geschwindigkeit des Wassers der Überschwemmungswelle mit Anwendung des Klausen - Clark's Kriteriums bestimmte man die möglichen Folgen der Überschwemmungswelle im Flusstal. Hervorgehoben ist die Notwendigkeit und Wichtigkeit der Kategorisierung und Rangierung des Gebiets und der Folgen der Überschwemmungswelle des Staumauerdurchbruchs.

Autori: Dr. sc. **Luka Sopta**, dipl. ing.; dr. sc. **Siniša Družeta**, dipl. ing., Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjstvo, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka; dr. sc. **Danko Holjević**, dipl. ing., Hrvatske vode, Zagreb

## 1 Uvod

Problematika proloma velikih brana izuzetno je važno područje graditeljstva unutar kojeg se nalaze izazovi i pitanja za mnoge znanstvene discipline građevinarstva i temeljnih tehničkih znanosti, ali i za područje urbanizma, zaštite i spašavanja ljudi i njihovih dobara te strateškoga vojnog i sigurnosnog planiranja. Velike brane posebno su značajne unutar višenamjenskih vodnogospodarskih građevina i sustava, a to je posebno naglašeno i u Strategiji upravljanja vodama koju je Hrvatski sabor donio 15. srpnja 2008. godine.

U ovom je području potrebno rješavati niz inženjerskih zadataka, a prvenstveno:

- projektiranje i građenje velikih brana u skladu s najvišim građevinskim i sigurnosnim standardima
- praćenje i promatranje velikih brana u vremenu njihova funkcionalnog iskorištavanja
- utvrđivanje posljedica koje mogu nastati zbog proloma velike brane za ljudska dobra i prirodne resurse
- utvrđivanje zona opasnosti za ljude i njihovu imovinu, prostornih ograničenja te njihov uvrštavanje u prostorno-plansku dokumentaciju
- izradu planova evakuacije i spašavanja ljudi u slučaju rušenja velike brane.

Kompleksnost problematike projektiranja, izgradnje i održavanja velike brane često je u prošlosti za posljedicu imala i njezin prolom, odnosno suočavanje s posljedicama širenja poplavnog vala nastalog zbog proloma brane. U novijoj povijesti zabilježeno je mnogo slučajeva potpunog ili djelomičnog proloma brana od kojih većinu čine prolomi manjih brana (nižih od 15 m, najčešće uz volumen manji od  $10^6$  m<sup>3</sup> vode). Unatoč navedenoj činjenici postoji i čitav niz zabilježenih proloma na velikim branama koji su za posljedicu imali veliki broj ljudskih žrtava te znatne štete na nizvodnim područjima (tablica 1.).

U Hrvatskoj također postoje iskustva s problematikom proloma velikih brana, a vezana su za pokušaj nasilnog rušenja velike brane Peruča na rijeci Cetini u siječnju 1993. godine gdje je potpuni prolom brane spriječen, a brana kasnije u potpunosti obnovljena. Ova i ostala iskustva s prolomima velikih brana pokazuju važnost analize posljedica širenja poplavnog vala nastalog zbog samog proloma brane, kao temeljnih istraživanja nužnih za izradu prostorno-planske dokumentacije područja nizvodno od brana, a koja podrazumijevaju i izradu planova evakuacije stanovništva te mjere i aktivnosti potrebne za zaštitu naselja, gospodarskih i ostalih objekata kao i prirodnih resursa.

Tablica 1. Pregled značajnijih proloma brana u novijoj povijesti [13], [9]

Brana	Visina brane [m]	Broj smrtnih slučajeva	Godina
Puentes (Španjolska)	21,9	2000	1889.
Bouzey (Francuska)	15	86	1895.
Austin (SAD)	14	80	1911.
Gleno (Italija)	22	100	1923.
Saint Francis (SAD)	55	400	1928.
Vega de Terra (Španjolska)	34	144	1959.
Malpasset (Francuska)	66,5	421	1959.
Vaiont (Italija)	265	2600	1963.
Nanaksagar (Indija)	15,6	100	1967.
Shivaji Sakar (Indija)	103	180	1967.
Banqiao/Shimantan (Kina)	118	26000	1975.
Teton (SAD)	120	11	1976.
Belci (Rumunjska)	18	78	1991.

## 2 Scenariji proloma velikih brana i pripadajuća zakonska regulativa

Prolom velike brane može biti uzrokovan čitavim nizom razloga od kojih ipak treba izdvojiti sljedeće:

- pogreške pri projektiranju, ponajprije u smislu poddimenzioniranja dijelova konstrukcije brane koji se odnose na stabilnost zbog karakteristika temeljnog tla i ulaznih hidroloških parametara
- pogreške kod izvođenja brane, a prvenstveno u smislu neispunjavanja projektom propisanih standarda i kvalitete materijala
- neodgovarajuće tehničko održavanje i provedba nadzora glavnih dijelova brane
- izvanredni ekstremni događaji kao što su potres, klizanja tla, ratno djelovanje i sl.

Način proloma velike brane prvenstveno je u funkciji njezinih tehničkih karakteristika, a osobito vrste materijala (nasute zemljane, betonske, itd.) odnosno konstruktivnog rješenja (gravitacijske, lučne, itd.). U tom se smislu definiraju i mogući scenariji proloma, prvenstveno zbog načina određivanja oblika proloma i vremena proloma brane. Navedenim uvjetima određuju se ulazni parametri koji čine osnovu za izradu modela proloma brane te praćenje širenja poplavnog vala koji nastaje kao posljedica proloma brane.

Dosadašnja zakonska i podzakonska regulativa, osobito za vrijeme bivše zajedničke države, prepoznala je važnost velikih brana kao građevina koje znatno utječu na ljudska dobra i prirodne resurse. U tom smislu usvojen je i Pravilnik o tehničkom promatranju velikih brana, odnosno na saveznoj je razini donijeta Uredba o obvezatnoj izradi modela širenja poplavnog vala nastalog zbog proloma velike brane. Navedeni propisi, a posebno savezna uredba, rezultirali su krajem sedamdesetih i početkom osamdesetih godina prošloga stoljeća izradom fizikalnih modela posljedica proloma velikih brana za takve građevine na području cijele Hrvatske. Provedenim simulacijama na uspostavljenim modelima, dobivene su linije utjecaja poplavnog vala zbog proloma velikih brana, koje su označene na nizvodnim područjima. Za potrebe koordinacije i kontrole cijelog procesa modeliranja i verifikacije dobivenih rezultata, uspostavljene su komisije kojima su predsjedali predstavnici tadašnje vojske. Kod provedenih su simulacija na modelima za ulazne podatke najčešće primijenjeni ekstremni početni uvjeti (potpuno ispunjena akumulacija, trenutni nestanak dijela tijela brane, uz paralelnu pojavu tisućugodišnjeg protoka iz sliva) što je rezultiralo nerealno velikim područjima poplavlivanja i velikim potencijalnim štetama.

Republika Hrvatska u potpunosti je preuzela postojeće zone utjecaja poplavnog vala nastalog kao posljedica proloma velike brane, kao i veći dio tehničkih propisa. Uz ograničenja koja proizlaze iz Pravilnika o mjerama zaštite od elementarnih nepogoda i ratnih opasnosti u prostornom planiranju i uređivanju prostora, a koja se odnose na područja koja se nalaze između linija plavljenja u slučaju proloma velike brane (mogu se planirati samo zelene i neizgrađene površine), dolazi se do značajnih površina (najčešće gospodarski vrlo vrijednih) na kojima je onemogućen budući gospodarski razvoj u smislu izgradnje stambenih ili gospodarskih građevina i prometnica. Ova činjenica posebno dolazi do izražaja kod gradova koji se nalaze pokraj obala rijeka nizvodno od velikih brana, a gdje navedena ograničenja predstavljaju najveće potencijalne štete na ljudskim dobrima i prirodnim resursima.

Zbog navedenih se razloga potvrđuje potreba analize i veliko značenje novog pristupa utvrđivanju posljedica zbog proloma velikih brana, kao i ograničenja u prostoru koja iz toga proizlaze. Vodeći se idejom smanjenja ograničenja u prostoru, uz sačuvani nivo sigurnosti ljudi i njihove imovine, u ovom radu provedena je analiza posljedica širenja poplavnog vala zbog proloma velike brane, uzimajući u obzir sljedeće:

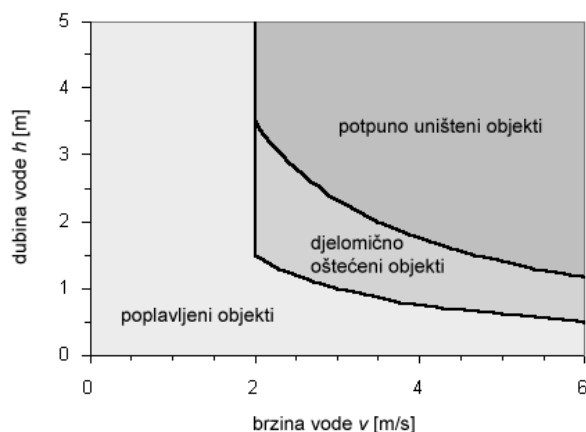
- više načina proloma velike brane
- različite ulazne hidrološke i hidrauličke parametre

- nehomogenost područja utjecaja poplavnog vala, a prvenstveno u smislu realno proračunanih brzina i dubina vode
- mogućnosti preciznog određivanja potencijalnih ljudskih žrtava i šteta na građevinama u području plavljenja uvođenjem modela procjene na temelju poznatih vrijednosti brzine i dubine vode

### 3 Modeliranje rušilačke moći poplavnog vala

Građevine u poplavnom području općenito su pod utjecajem hidrostatskog tlaka, dinamičkog tlaka i uzgonske sile. Zbog izrazito nestacionarne prirode širenja poplavnih valova nastalih rušenjem velikih brana, samo poznavanje poplavnog područja daje vrlo ograničene mogućnosti procjene rušilačke moći poplavnog vala čak i ako se utjecaj poplave na građevine u poplavnom području sveđe isključivo na efekt hidrostatskog tlaka.

S druge strane, numerički modeli omogućuju proračun brzina i dubina vode u svakoj točki poplavnog područja, a to omogućuje kvalitetniju procjenu rušilačke moći koja će osim hidrostatskog tlaka uzeti u obzir i kinetičku energiju poplavnog vala. Neki su od razvijenih kriterija za određivanje razorne moći poplavnog vala na temelju poznatih dubina i brzina vode Clausen-Clarkov kriterij za rušenje građevina od kamena i cigle [4] te Smithov kriterij za kamene i betonske građevine [14]. S obzirom na preporuke relevantnih studija Europske Unije [11] i [12], u ovdje prikazanim analizama primijenjen je Clausen-Clarkov kriterij za rušenje građevina.



Slika 1. Clausen-Clarkov kriterij štete od poplave na građevinama

Clausen-Clarkov kriterij definiran je 1990. godine na temelju podataka o rušenju brane Dale Dyke (UK, 1864.). Prema njemu se poplavljeno područje dijeli u tri kategorije, ovisno o dubinama i brzinama strujanja vode (slika 1.):

- područje poplavljenih građevina: materijalna šteta slična onoj nastaloj zbog poplave (ne nastupa trenutna šteta na građevinama)

- područje djelomično oštećenih građevina: djelomična šteta na građevinama (npr. izbijeni prozori i vrata, mala šteta na konstrukciji građevina)
- područje potpuno uništenih građevina: rušenje ili potpuno uništenje građevina.

Ovako definirani model primijenjen je u ovome radu za klasifikaciju dijelova poplavnog područja po stupnju rušilačke moći poplavnog vala.

#### 4 Dvodimenzijski numerički model strujanja plitkih voda

Općenito se trodimenzijsko strujanje fluida sa slobodnom površinom matematički opisuje s pomoću Navier-Stokesovih jednadžbi. Radi dobivanja matematičkog modela strujanja sa slobodnom površinom veće upotrebne vrijednosti i fleksibilnosti moguće je Navier-Stokesove jednadžbe reducirati uvođenjem uvjeta slobodne površine i usrednjenjem brzine po dubini na dvodimenzijski model plitkih voda koji je određen Saint Venantovim jednadžbama. Saint Venantove jednadžbe čine jednadžba zakona očuvanja mase i jednadžba zakona očuvanja količine gibanja za nestacionarno 2D strujanje koje uz odsutnost ponora i izvora fluida glase:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(v_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y h)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(v_x h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_x^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial(v_x v_y h)}{\partial y} = g h (S_{bx} - S_{fx}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(v_y h)}{\partial t} + \frac{\partial(v_x v_y h)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_y^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) = g h (S_{by} - S_{fy}), \quad (3)$$

gdje je  $h$  dubina vode,  $t$  vrijeme,  $x$  i  $y$  su prostorne koordinate, a  $v_x$  i  $v_y$  su komponente vektora brzina osrednjenih po dubini  $h$ .  $S_{bx}$  i  $S_{by}$  su nagibi dna u  $x$  i  $y$  smjeru, dok se nagibi trenja u  $x$  i  $y$  smjeru  $S_{fx}$  i  $S_{fy}$  proračunaju po sljedećim izrazima:

$$S_{fx} = v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \left( \frac{n^{3/2}}{h} \right)^{4/3},$$

$$S_{fy} = v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \left( \frac{n^{3/2}}{h} \right)^{4/3} \quad (4)$$

gdje je  $n$  Manningov koeficijent hrapavosti.

Jednadžbe (1)-(3) diskretizirane su metodom konačnih volumena i rješavane eksplisitnom Q-shemom prvog

reda točnosti s Van Leerovim usrednjenjem i egzaktnim očuvanjem mirne vode, uz balansiranje izvornog člana [1], [2], [3], što omogućuje pouzdano modeliranje strujanja na vrlo zahtjevnim geometrijskim oblicima. Opisani numerički model implementiran je u softveru Stripp12, koji je afirmiran kroz dugogodišnji razvoj i upotrebu u znanstvenom i stručnom radu [5] i [6].

Proračunska domena u numeričkom modelu definira se 2D numeričkom mrežom trokutastih elemenata iz koje se kreira dualna mreža [5]. Tijekom simulacije se čelije numeričke mreže u kojima je dubina vode  $h < 5$  cm tretiraju kao „suhe“ (neaktivne). Vremenski korak  $\Delta t$  je promjenjiv i dinamički se proračunava tako da u svakom trenutku odgovara zadanom Courant-Friedrichs-Levy broju  $CFL = 0,8$ .

#### 5 Primjer simulacije rušenja brane Tribalj

Kao primjer, za potrebe ovog rada provedene su simulacije širenja poplavnog vala zbog proloma brane akumulacije Tribalj. Akumulacija Tribalj sastavni je dio hidroenergetskog sustava HE Vinodol, a nalazi se u dolini rijeke Dubračine uz mjesto Tribalj, 7,5 km uzvodno od grada Crikvenice. Volumen akumulacije pri maksimalnoj koti uspora iznosi  $1,5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>, a voda iz akumulacije rabi se i kao tehnološka voda za potrebe rafinerije nafte i petrokemijskog postrojenja na otoku Krku.

Domena dvodimenzijskoga numeričkog modela obuhvaća jezero Tribalj, korito vodotoka Dubračine od ulaska u jezero do ušća sa širim okolnim poplavnim područjem, uključujući dio urbanog područja grada Crikvenice i njegova predgrađa. Geometrijski oblik terena numeričkog modela izgrađen je na temelju geodetskih karata (M 1:2000 i M 1:1000), ortofoto karata i geodetskih mjerenja. U konačnici je dobivena 2D nestrukturirana numerička mreža optimalne gustoće s obzirom na zahtijevanu točnost [7] i dostupne računalne resurse (slika 2.).

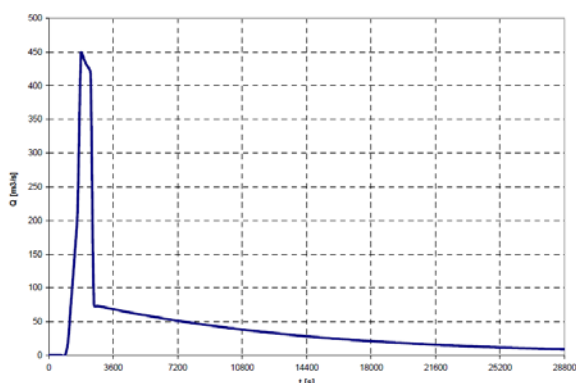


Slika 2. Detalj numeričke mreže područja brane akumulacije Tribalj i dijela mjesta Tribalj s ortofoto snimkom u podlozi

Svakom čvoru mreže pridružen je pripadni Manningov koeficijent hrapavosti. Cjelokupna domena podijeljena je na 9 zona hrapavosti s pripadnim Manningovim koeficijentima. Osim toga, numerička mreža dopunjena je

podacima o nizovima čvorova mreže na rubovima domene, kao što su izlazna granica (morska obala u gradu Crikvenici) i zidovi građevina u Triblju i Crikvenici.

Proveden je niz različitih simulacija proloma brane Tribalj i širenja poplavnog vala. Primijenjena su tri modelska tipa rušenja brane: istjecanje iz akumulacije prema hidrogramu protoka po BREACH modelu [8], trenutačno formiranje otvora u tijelu brane te postupno formiranje otvora u tijelu brane (širenje otvora u brani). Radi usporedbe, u sklopu scenarija s trenutačnim formiranjem otvora u tijelu brane rekonstruiran je i scenarij iz rezultata fizikalnog modela [10]. Zajedno sa svim podvarijantama, provedene su simulacije sljedećih scenarija:



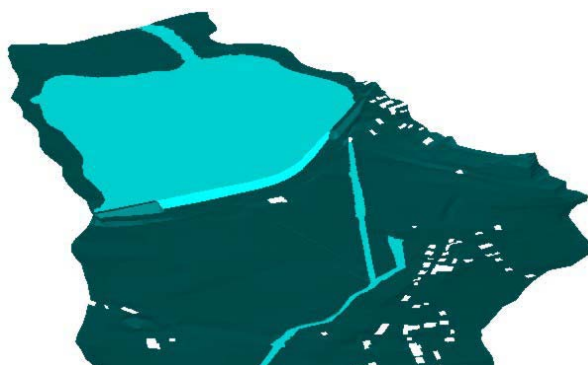
Slika 3. Hidrogram istjecanja iz akumulacije dobiven na temelju BREACH modela 1) istjecanje iz akumulacije po hidrogramu protoka

2) trenutačno formiranje otvora u tijelu brane

- a) otvor od 500 m (rekonstrukcija scenarija fizikalnog modela)
- b) otvor od 100 m
- c) otvor od 50 m
- d) otvor od 500 m sa trenutačnim rušenjem zida kod staciona u Crikvenici

3) postupno formiranje otvora u tijelu brane

U varijanti s dotokom vode po BREACH modelu iz proračunske domene uklonjena je akumulacija, a dobiveni hidrogram istjecanja vode prilikom proloma brane (slika 3.) nametnut je kao rubni uvjet na otvoru u brani širokom 24 m. U varijantama s trenutačnim formiranjem otvora u tijelu brane, dio brane odabrane duljine uklonjen je iz numeričke mreže (slika 4.), a u početnom trenutku simulacije akumu-

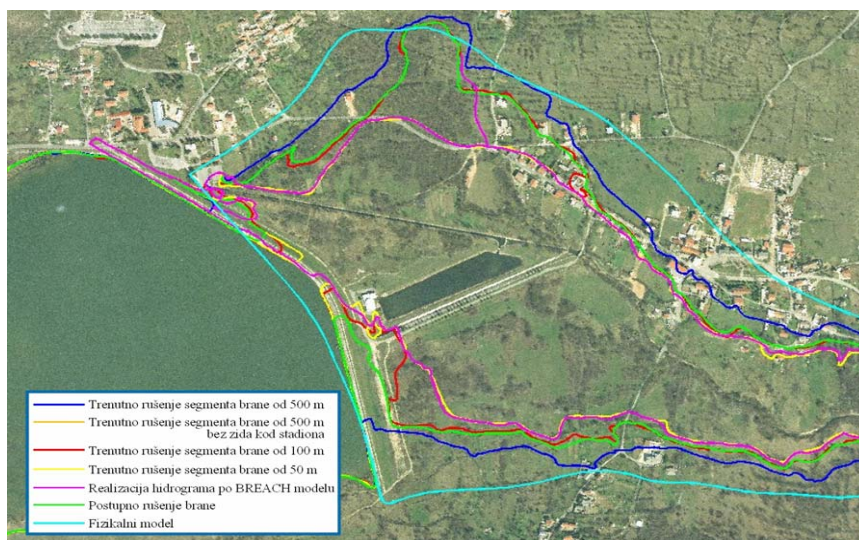


Slika 4. Inicijalno vodno lice za scenarij trenutačnog formiranja otvora u tijelu brane širine 500 m (dio domene koji uključuje cijelu akumulaciju i veći dio mjesta Tribalj)

lacija je potpuno ispunjena vodom. U simulaciji sa postupnim formiranjem otvora u tijelu brane geometrijski oblik brane se u modelu dinamički mijenja tako da se otvor u brani širi od početnih 10 m širine do krajnjih 200 m širine u razdoblju od 20 minuta. U svim je ovim varijantama otvor u tijelu brane u modelu izveden simetrično s obzirom na središnju točku brane.

Početne razine vodnog lica u domeni (slika 4.) dobivene su iz zasebnih simulacija kojima je proračunato inicijalno tečenje u domeni (stacionarno strujanje u Dubračini s protokom od  $6,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), s tim da je razina vode u akumulaciji Tribalj postavljena na visinu 60 m n. m., a razina Jadranskog mora na visinu 1,5 m n. m. Tijekom svih simulacija realizira se stacionarni utok u akumulaciju od  $6,1 \text{ m}^3/\text{s}$  na granici domene na mjestu utjecanja, dok je izlazna granica na Jadranskom moru modelirana rubnim uvjetom zadane razine vode.

Rezultati simuliranih scenarija u nastavku su prikazani poplavnim linijama i zonama rušilačke moći poplavnog vala.

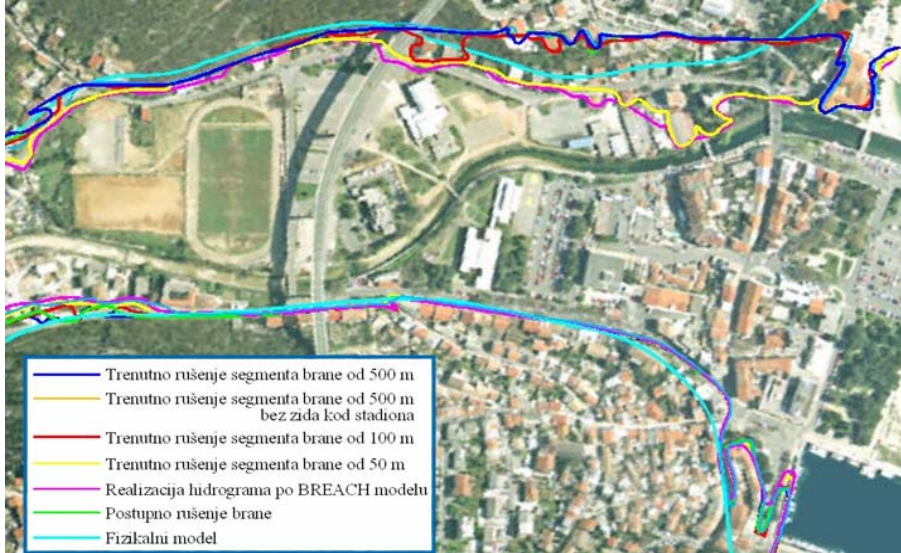


Slika 5. Poplavne linije kod mjesta Tribalj



5.1 Poplavne linije područja nizvodno od brane Tribalj

Poplavne linije po definiranim scenarijima dobivene su iz maksimalnih razina vodnog lica registriranih tijekom



Slika 6. Poplavne linije u gradu Crikvenici

simulacije i prikazane su na najzanimljivijim mjestima, a to su područje naselja Tribalj neposredno ispod brane (slika 5.) te grad Crikvenica (slika 6.).

Iz prikazanih poplavnih linija odmah se može opaziti da se poplavne linije relativno malo razlikuju unatoč činjenici da su dobivene na temelju vrlo različitih scenarija rušenja brane. Posebno to vrijedi za urbano područje grada Crikvenice gdje se sve poplavne linije gotovo potpuno poklapaju (slika 6.). Takav je rezultat posljedica toga što se u svim scenarijima akumulacija prazni relativno brzo u odnosu na konfiguraciju terena poplavnog područja (dolina rijeke Dubračine relativno je uska, sa strmim obroncima).

5.2 Zone rušilačke moći poplavnog vala nastalog prolomom brane Tribalj

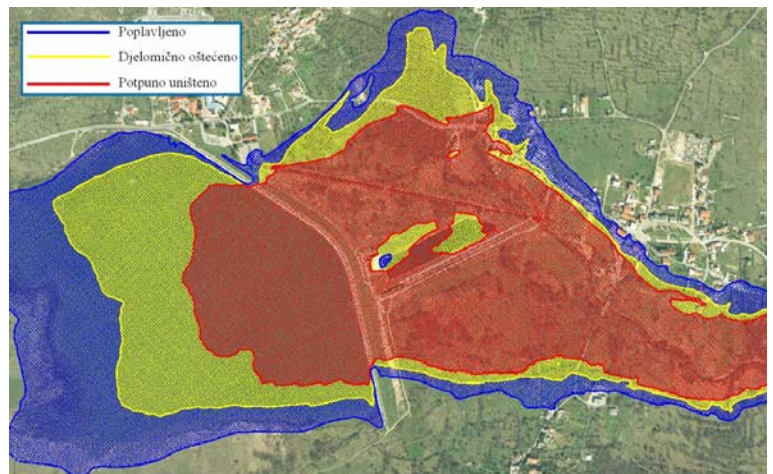
Zone rušilačke moći poplavnog vala određene su po Clausen-Clarkovu modelu za scenarije trenutačnog formiranja otvora u tijelu brane Tribalj širine 500 m (slike 7. i 8.) i širine 50 m (slike 9. i 10.).

Na slikama 7. do 10. zorno je prikazana prostorna nejednolikost rušilačke moći poplavnog vala unutar poplavnog područja. Na primjer, čak i kod vrlo radikalnog scenarija trenutačnog for-

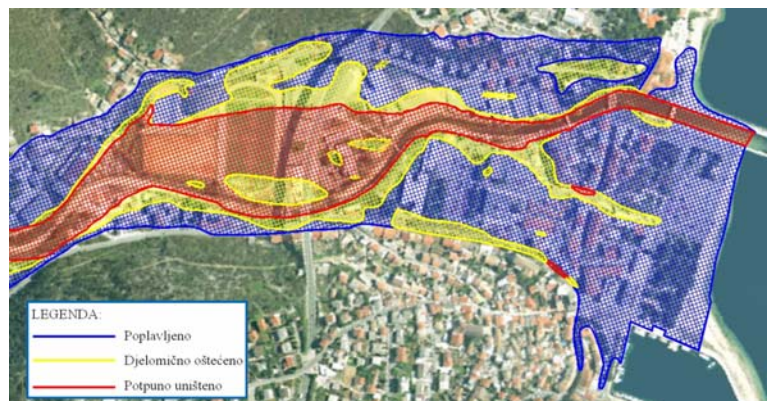
miranja otvora u tijelu brane širine 500 m samo je manji dio poplavnog područja u gradu Crikvenici u opasnosti od uništenja građevina. Osim toga, vidljiva je velika razlika između rušilačke moći poplavnih valova nastalih zbog trenutačnog formiranja otvora u tijelu brane širine 500 m i 50 m.

5.3 Usporedba dobivenih rezultata simulacije poplavnog vala nastalog prolomom brane Tribalj

Usporedba prikazanih poplavnih linija i zona rušilačke moći pokazuje da je samo manji dio poplavnog područja ugrožen u smislu opstojnosti građevina. U tablici 2. dani su opći podaci za scenarij rušenja brane s najrazornijim poplavnim valom (trenutačno formiranje otvora u tijelu bra-

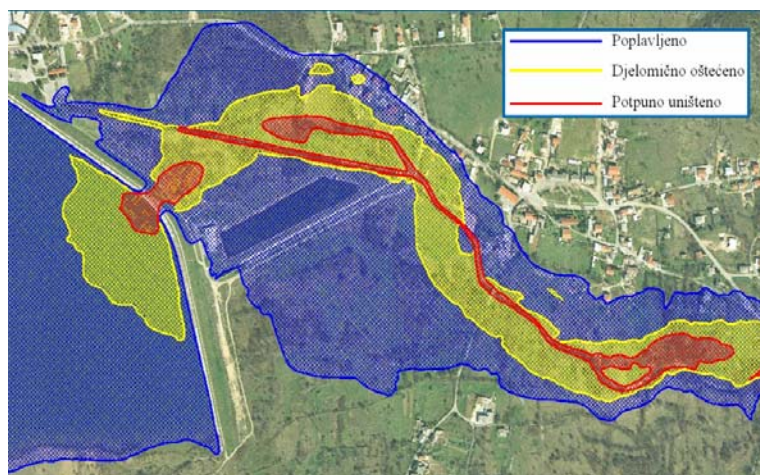


Slika 7. Zone rušilačke moći kod mjesta Tribalj za scenarij trenutačnog formiranja otvora u tijelu brane širine 500 m

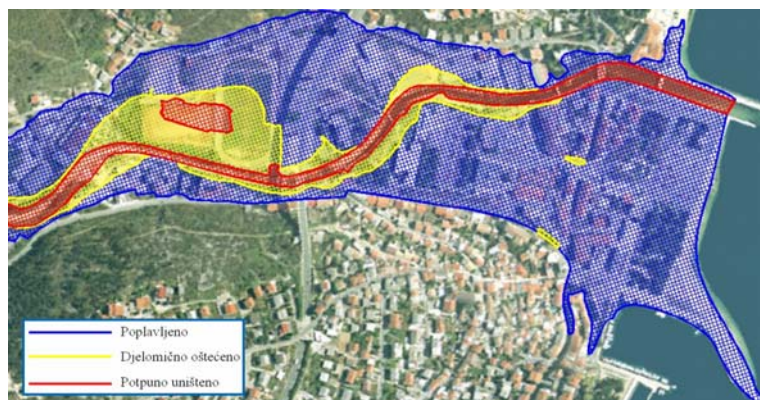


Slika 8. Zone rušilačke moći u gradu Crikvenici za scenarij trenutačnog formiranja otvora u tijelu brane širine 500 m





Slika 9. Zone rušilačke moći kod mjesta Tribalj za scenarij trenutnog formiranja otvora u tijelu brane širine 50 m



Slika 10. Zone rušilačke moći u gradu Crikvenici za scenarij trenutnog formiranja otvora u tijelu brane širine 50 m

ne širine 500 m, bez zida kod stadiona u Crikvenici) i scenarij rušenja brane s relativno slabim poplavnim valom (trenutačno formiranje otvora u tijelu brane širine 50 m).

Podaci u tablici 2. pokazuju da je rušilački potencijal poplavnog vala mnogo manji kod scenarija trenutnog formiranja otvora u tijelu brane širine 50 m, nego kod scenarija trenutnog formiranja otvora u tijelu brane

širine 500 m. Pri tome je razlika u površini poplavnih područja za ta dva scenarija relativno mala. Time je i kvantitativno pokazano da simulacijski scenariji koji za rezultat daju slično poplavno područje mogu producirati vrlo različite rušilačke efekte unutar tog istoga poplavnog područja.

Može se zaključiti da prikazani rezultati upućuju na važnost određivanja zona rušilačke moći poplavnog vala u analizi posljedica rušenja velikih brana. Same poplavne zone u sebi ne sadrže informacije o kinetičkoj energiji poplavnog vala i kao takve daju nepotpunu informaciju o ugroženosti poplavljenog područja.

## 6 Zaključak

Provedene analize posljedica širenja poplavnog vala zbog proloma velike brane na primjeru brane Tribalj potvrdile su okvirnu valjanost rezultata proračuna prethodno uspostavljenim fizikalnim modelom. Dobiveni rezultati pokazuju da je konfiguracija doline rijeke Dubračine takva da, bez obzira na brojne varijacije ulaznih parametara simulacija u odnosu na način i vrijeme proloma brane, nema velikih promjena u ukupnoj površini plavljenja. Primjenom modela procjene rušilačke moći poplavnog vala (prema Clausen-Clarkovu kriteriju) kao nadogradnje 2D numeričkog modela širenja poplavnog vala zbog proloma brane, omogućena je provedba postupka zoniranja ukupnoga utjecajnog područja na tri zone i to: poplavljeno područje, zona djelomičnog oštećenja i zona rušenja građevina.

lavljeno područje, zona djelomičnog oštećenja i zona rušenja građevina.

Provedena analiza i predložena unapređenja potvrđuju da se uvođenjem prikazane metode procjene posljedica poplavnog vala nastalog zbog proloma velike brane mogu znatno smanjiti područja najstrožih ograničenja u prostoru, a vezano za buduću namjenu i prostorno definiranje promatranih najčešće urbanih područja (primjer

Tablica 2. Usporedba rušilačke moći poplavnih valova nastalih prolomom brane Tribalj

Zona poplavnog područja	Trenutačno formiranje otvora u tijelu brane širine 500 m, bez zida kod stadiona u Crikvenici		Trenutačno formiranje otvora u tijelu brane širine 50 m	
	Površinski udio u modelskoj domeni [%]	Površinski udio u poplavnom području [%]	Površinski udio u modelskoj domeni [%]	Površinski udio u poplavnom području [%]
Poplavljeno, bez štete na građevinama	21	30	40	70
Djelomično oštećenje građevina	14	21	10	18
Potpuno uništenje građevina o a	35	49	7	12
Ukupno poplavno područje	70	(100)	57	(100)

uže jezgre grada Crikvenice). Na taj su način moguće velike uštede i racionalizacije u smislu gospodarenja zemljištem i prostorom koji se nalazi ispod velikih bra-

na, a to ima veliko značenje za gospodarski, urbani i infrastrukturni razvoj područja koje se nalazi nizvodno od brana.

#### LITERATURA

- [1] Bermudez, A.; Vazquez, M. E.: *Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms*, Computers & Fluids 23 (1994) 8, 1049-1071
- [2] Brufau, P.; Garcia-Navarro, P.; Vazquez-Cendon, M. E.: *Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography*, International Journal for Numerical Methods in Fluids 45 (2004) 10, 1047-1082
- [3] Brufau, P.; Vazquez-Cendon, M. E.; Garcia-Navarro, P.: *A numerical model for the flooding and drying of irregular domains*, International Journal for Numerical Methods in Fluids 39 (2002) 3, 247-275
- [4] Clausen, L.; Clark, P. B.: *The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures*, International Conference on River Flood Hydraulics, 369-380, ed. W. R. White, John Wiley & Sons Ltd. Hydraulics Research Limited, 1990.
- [5] Družeta, S.: *Numeričke simulacije strujanja u vodotocima sa slobodnom površinom*, doktorska disertacija, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2007.
- [6] Družeta, S.; Kranjčević, L.; Škifić, J.: *Usporedba numeričkih modela strujanja na primjeru rušenja brane*, Građevinar 61 (2009) 5, 429-434
- [7] Družeta, S.; Sopta, L.; Maćešić, S.; Črnjarić-Žic, N.: *Investigation of the Importance of Spatial Resolution for Two-Dimensional Shallow-Water Model Accuracy*, ASCE Journal of Hydraulic Engineering 135 (2009) 11, 917-925
- [8] Fread, D. L.: *BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures*, NWS Report, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, Maryland, 1988/1991.
- [9] Graham, W.: *The Worst Dam Failures - Why?*, Proceedings of Munich CADAM meeting, CADAM CD-ROM, ed. S. Soares Frazao, M. W. Morris, Y. Zech, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 2000.
- [10] *Određivanje posljedica zbog iznenadnog rušenja ili prelijevanja pregrade donjeg bazena PHE Vinodol u Triblju*, Elektroprojekt, Zagreb, 1983.
- [11] *RESCDAM - Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis (Final Report)*, Finnish Environment Institute, Helsinki, 2001.
- [12] *RESCDAM - The Use of Physical Models in Dam-Break Flood Analysis (Final Report of Helsinki University of Technology)*, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2000.
- [13] Seth, S. M.; Palaniappan, A. B.; Mohapatra, P. K.: *Hydrological Aspects of Flood Disaster Management*, National Institute of Hydrology, Jal Vigyan Bhawan, Roorkee, 1998.
- [14] Smith, D. I.: *Extreme floods and dam failure inundation implications for loss assessment*, Proceedings of a Seminar "Natural and Technological Hazards: Implications for the Insurance Industry", 149-165, 1991.