

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

GF

Zbornik radova

XIII

Rijeka, 2010.

ZBORNİK RADOVA SVEUČILIŠTA U RIJECI
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM FLUMINENSIS



GRAĐEVINSKI FAKULTET
Sveučilišta u Rijeci

Izdavač:

Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, Viktora Cara Emina 5

Za izdavača:

Aleksandra Deluka-Tibljaš, dekan

Glavni i odgovorni urednik:

Gordan Jelenić

Urednički odbor:

Željko Arbanas

Diana Car-Pušić

Aleksandra Deluka-Tibljaš

Barbara Karleuša

Adresa uredništva:

Rijeka, Viktora Cara Emina 5

Grafičko rješenje omota:

Alen Karlović, student

Grafička obrada, prijelom i tisak:

Digital point tiskara d.o.o.

Naklada:

300 primjeraka

Kategorizacija:

Znanstvena monografija

ISSN 0350-8552

ISBN 978-953-6953-21-9

GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI

ZBORNIK RADOVA

KNJIGA XIII

Rijeka, prosinac 2010.

**GRAĐEVINSKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA U RIJECI****ZBORNİK RADOVA
KNJIGA XIII****Autori:**

Diana Car-Pušić

Marijana Cuculić

Ivan Dražić

Goran Gjetvaj

Davor Grandić

Nataša Grgorinić

Ivona Gudac

Vedran Jagodnik

Gordan Jelenić

Ivan Marović

Nermina Mujaković

Ivana Opala

Nevenka Ožanić

Ines Radošević

Dragan Ribarić

Andrija Rubinić

Josip Rubinić

Ivana Sušanj

Paulo Šćulac

Leo Škec

Ana Šuljić

Sanja Šurdonja

Miran Tuhtan

Marinko Đ. Učur

Goran Volf

Helena Wöfl

Dejan Zupan

Elvis Žic

SADRŽAJ

<i>Ivana Opala, Nevenka Ožanić:</i> Hidrološka analiza sliva rijeke Dobre	11
<i>Andrija Rubinić, Nevenka Ožanić:</i> Hidrologija sliva Dubračine	33
<i>Ivana Sušanj, Goran Gjetvaj, Nevenka Ožanić, Elvis Žic:</i> Mehanizmi formiranja postupnog djelomičnog rušenja nasute brane – brana Botonega	69
<i>Ana Šuljić, Josip Rubinić:</i> Analiza vodnog režima Vranskog jezera u Dalmaciji	91
<i>Helena Wöfl, Goran Volf, Josip Rubinić:</i> Modelska analiza navodnjavanja kišnicom na jadranskim otocima	113
<i>Ines Radošević, Vedran Jagodnik:</i> Baricentrička forma Lagrangeove interpolacije	131
<i>Leo Škec, Nermina Mujaković, Ivan Dražić:</i> Numerička analiza aproksimacija derivacije metodom konačnih razlika	145
<i>Nataša Grgorinić, Davor Grandić, Paulo Šćulac:</i> Sanacija armiranobetonske konstrukcije lansirne stanice torpeda u Rijeci	169
<i>Paulo Šćulac, Dejan Zupan, Gordan Jelenić:</i> Integriranje polja naprezanja u armiranobetonskim poprečnim presjecima	191
<i>Miran Tuhtan, Dragan Ribarić:</i> Usporedba proračunskih konstruktivnih modela na primjeru razuprtog pješačkog mosta "Malonji" u Rijeci	213
<i>Diana Car-Pušić, Ivan Marović, Ivona Gudac:</i> Važnost projekta organizacije građenja u pripremi izvođenja građevinskih radova	225

Marijana Cuculić, Sanja Šurdonja:

Pregled novijih kolničkih konstrukcija koje ublažavaju
efekt urbanih toplinskih otoka245

Marinko Đ. Učur:

Koordinatori za zaštitu na radu kod investitora,
glavnog projektanta i poslodavca263

Mehanizmi formiranja postupnog djelomičnog rušenja nasute brane – brana Botonega

Mechanisms for the formation of gradual partial collapse of earth dam – Botonega dam

Ivana Sušan^{*}, Goran Gjetvaj^{**}, Nevenka Ožanić^{*}, Elvis Žic^{*}

Sažetak. U ovom radu opisani su mehanizmi formiranja otvora u nasutoj brani i rezultati dobiveni matematičkim modelom postepenog djelomičnog proloma nasute brane Botonega, uzrokovani utjecajem prelijevanja. Proračun je izrađen u matematičkom kalkulatoru Microsoft Office Excel 2003. Svrha izrade proračuna je određivanje vremena potrebnog da se, kroz pet faza, formira otvor kroz tijelo brane kao i određivanje dimenzije otvora u tijelu brane. Brzina i razina pozitivnog nizvodnog vala koji nastaje rušenjem brane nije obuhvaćena ovim radom.

Nova saznanja vezana uz mehanizme rušenja nasutih brana omogućila su razvoj novih, znatno realnijih modela formiranja otvora te se u novijoj praksi kao i u prijedlogu novog pravilnika (Pravilnik o određivanju posljedica uslijed prelijevanja ili rušenja brana) predlaže izrada modela postepenog i djelomičnog formiranja otvora usvajajući pritom stvarne karakteristike brane.

U nastavku istraživanja treba izraditi verificiranje proračuna uz pomoć mjerenja na fizikalnim modelima ili u prirodi.

Ključne riječi: nasute brane, erozija tijela brane, postepeno djelomično rušenje brane, brana Botonega, faze rušenja brane,

Abstract. This paper describes the mechanisms and the results obtained by a mathematical model of gradual partial collapse of the earth dam Botonega caused by the influence of spillover. Calculation was created in Microsoft Office Excel 2003. The purpose of the model is to determine the time required for gradual

^{*} Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Viktora Cara Emina 5; 51000 Rijeka, e-mail: ivana.susanj@gradri.hr; nevenka.ozanic@gradri.hr; elvis.zic@gradri.hr;

^{**} Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Fra Andrije Kačića Miošića 26; 10000 Zagreb, e-mail: goran@grad.hr

partial collapse of the dam to occur (through the five stages) and the dimensions of the breach through the dam body. The speed and level of a positive downstream wave is not covered in this paper.

New findings about the mechanisms of gradual partial collapse of earth dams have enabled the development of new, much more realistic models of the formation of the breach. In a newer practice (s in the proposed regulations – Regulations about determining the consequences resulting from the overflow, or collapse of dams) it is recommended to form a model of gradual and partial formation of the breach taking the actual characteristics of the dam.

Verification of the model should be performed using the measurements on a physical model or in nature.

Key words: earth dam, erosion of the dam body, gradual partial collapse of earth dam, Botonega dam, dam collapse phases

1. Uvod

Rušenja brana i poplave izazvane *propagacijom poplavnog vala* nisu česte, ali mogu imati katastrofalne posljedice naročito zbog toga što nizvodno od brana obično ima naseljenih područja.

Brane su hidrotehnički objekti koji služe za zadržavanje velikih količina vode tj. za formiranje akumulacija. Upravo zbog toga mogu, u slučaju naglog rušenja, ugroziti stanovništvo i izgrađene objekte nizvodno od brane [1].

Postoje mnogi primjeri urušavanja nasutih brana, koje su uz velike materijalne štete odnijele i mnogo ljudskih života. Zbog toga se nameće potreba za izračunavanjem posljedica rušenja brana.

Obzirom na negativan utjecaj rušenja brana, u ratnim uvjetima ono može biti strateški važno, pa je potrebno unaprijed znati posljedice rušenja (primjer pokušaja rušenja brane Peruče na rijeci Cetini za vrijeme domovinskog rata u Republici Hrvatskoj). Za svaku projektiranu branu se prije izgradnje zahtjeva provođenje ispitivanja o posljedicama loma brane na okolinu, kao što su veličina plavljenog područja i brzina napredovanja poplavnog vala [2].

Općenito, postoje različiti uzroci rušenja nasutih brana. Razlozi mogu biti prelijevanje brane ili djelovanje valova, procjeđivanje i ispiranje tla, pojava pukotina u tijelu brane, erozija uzvodnog pokosa brane, klizanje tla na uzvodnom ili nizvodnom pokosu brane i slično. Između ostalog, prelijevanje brane ili obrušavanje valova, procjeđivanje i ispiranje tla najčešći su i najopasniji uzroci urušavanja nasutih brana.

Rušenje brane u prošlosti (u praksi) se obično računalo pod pretpostavkom da se događa trenutni potpuni lom. Takva pretpostavka je davala najveći i najbrži

poplavni val, pa se takav val usvajao kao najnepovoljniji slučaj. Zbog toga je takav pristup bio ozakonjen u pravnoj regulativi donesenoj 1975. godine (Uputstvo o izradi dokumentacije za određivanje posljedica usred iznenadnog rušenja ili preljevanja visokih brana; sječanj, 1975. g.). Razvoj računala i razna istraživanja omogućila su u novo vrijeme i mnogo detaljnije opise mehanizama rušenja brana. Nova saznanja vezana uz mehanizme rušenja nasutih brana omogućila su razvoj novih, znatno realnijih modela formiranja otvora, te se u novijoj praksi predlaže izrada modela postepenog i djelomičnog formiranja otvora usvajajući pritom stvarne karakteristike brane, među prvima istakli su se Visser (model iz 1998. g) i Steetzer i De Vroeg (model iz 1998. g) [3].

Neka istraživanja provedena na fizikalnim i matematičkim modelima (*Istraživanja posljedica uslijed iznenadnog prelijevanja ili rušenja visokih brana; 1998. godine*) pokazala su da, za razliku od trenutnog potpunog rušenja brana, kod postupnog djelomičnog proloma nasute brane vodni val koji se širi nizvodno od brane može biti i do 50% manje razine (razina vodnog vala se povećava postupno s obzirom na povećanje otvora kroz tijelo brane). Činjenica vrlo male vjerojatnosti pojavljivanja trenutnog potpunog rušenja nasute brane, dovodi do zaključka da su neki segmenti projektiranih dijelova moguće predimenzionirani (npr. sistem za obavješavanje stanovništva), te da bi se mogli bolje prilagoditi.

Uz to se kod trenutačnog potpunog proloma brane ne uzima u obzir vrijeme koje je potrebno da se stvori nekakav otvor kroz tijelo brane, pa je i s tog stajališta proračun brane na postepeni djelomični prolom zasigurno bliže stvarnom rušenju nasute brane, a time i bolji.

Svojstva strukture izgrađene brane čini branu takvom da mehanizmi loma mogu stvoriti početni otvor na kruni brane. Preljevanje brane ili djelovanje valova može uzrokovati eroziju koja stvara otvor na kruni brane. U slučaju procjeđivanja kroz tijelo brane postoji mogućnost urušavanja brane, kao i stvaranja otvora na kruni brane nakon što se procjeđivanje razvije do te mjere da unutar brane postoje šupljine u kojima se umjesto materijala nalazi voda. Tada dolazi do urušavanja brane. U stvarnosti su također moguće kombinacije više različitih mehanizama loma brane. Ti mehanizmi dovest će do pojavljivanja početnog otvora na kruni brane, uglavnom nepravilnog oblika te različitih veličina. Unutar ovog rada pretpostavljen je relativno mali početni otvor koji je nastao na kruni brane. Također, protok vode kroz početni otvor uzet je kao početak erozijskih procesa na kruni brane. Iako je nastanak otvora na kruni brane bitan preduvjet da dođe do urušavanja brane, u ovom radu su obuhvaćeni samo procesi nakon njegovog nastanka, te se njegove dimenzije zadaju proizvoljno.

U nastavku rada dan je opis fizikalnih procesa postupnog djelomičnog rušenja nasutih brana uslijed prelijevanja dok je zbog jednostavnosti zanemarena

transformacija vodnog vala uslijed dinamike istjecanja vode u akumulaciji. Na primjeru nasute brane Botonega izrađen je matematički model proloma te su prikazani konačni rezultati modeliranja.

2. Pet faza procesa erozije uzrokovanih nastankom početnog otvora na kruni nasute brane

Slično podjeli koju je napravio Visser (1998) [4] za piješčane nasipe, općenito se i cijeli proces erozije na primjeru nasutih brana može podijeliti u pet faza.

U nastavku je dan opis procesa uzrokovanih erozijom vode nakon nastanka početnog otvora na kruni nasute brane koje možemo podijeliti na pet glavnih faza:

- I faza; u trajanju $t_0 \leq t < t_1$
- II faza; u trajanju $t_1 \leq t < t_2$
- III faza; u trajanju $t_2 \leq t < t_3$
- IV faza; u trajanju $t_3 \leq t < t_4$
- V faza; u trajanju $t_4 \leq t < t_5$

2.1. I faza ($t_0 \leq t < t_1$)

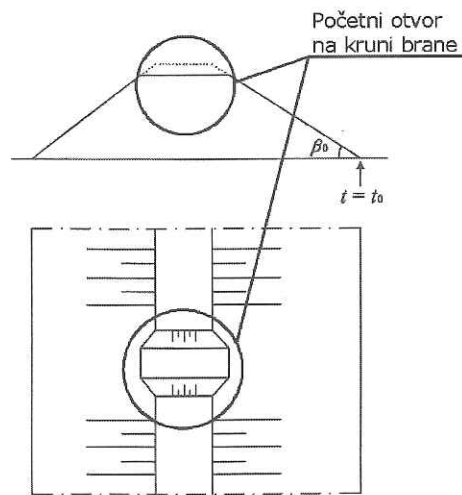
Poplavna voda teče kroz početni otvor na kruni brane i započinje proces erozije na nizvodnom pokosu brane, a ovisno o brzini tečenja vode erodirati se može i kruna brane. (Slika 1.)

U stvarnosti, u slučaju preljeva brane, početna točka erozije može se pojaviti bilo gdje na površini brane, što ovisi o toj specifičnoj situaciji, a često je vezana za topografske nepravilnosti na površini brane (diskontinuiteti, pukotine i šupljine). U nekim slučajevima početak erozije povezuje se i sa slabim točkama čvrstoće materijala od kojih je brana izvedena.

Pretpostavlja se da početni otvor na kruni brane ima poprečni presjek u obliku trapeza s nagibom bočnih pokosa pod kutem unutarnjeg trenja materijala γ . Protok kroz taj početni otvor pokreće proces erozije u trenutku $t=t_0$. Zaštitni pokrovi nizvodnog pokosa brane kao što su zatravnjivanje i zaštitna obloga (od kamena, od kamena nabačaja), u ovom radu nisu uzete u obzir zbog velike složenosti problema, iako pod određenim uvjetima mogu do nekog stupnja utjecati na procese erozije (posebno na nastajanje erozije). Iz istog razloga, utjecaj valova također nije uzet u obzir.

Duž pokosa mogu se javiti i posmična erozija i mala udubljenja, a uzrokovana su dinamičkim djelovanjem vode. Tokom erozijskih procesa koji se događaju u

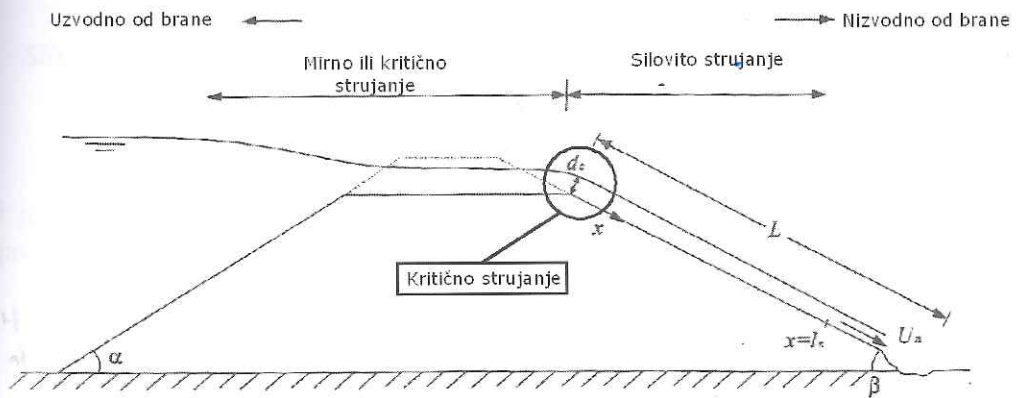
otvoru na kruni nasute brane, tečenje kroz otvor se često aproksimira preljevom sa širokim pragom.



Slika 1. Shematski prikaz izgleda početnog otvora na kruni brane u trenutku $t=t_0$ [5]

Režim tečenja u prvoj fazi moguće je općenito podijeliti na dva uvjeta (Slika 2.):

- Protok vode na kruni brane je kritičan, ili miran ali postiže kritično strujanje na nizvodnom rubu krune brane;
- Na nizvodnom pokosu brane tok vode prelazi u siloviti režim, obzirom na to da voda teče po strmom pokosu (gledano sa hidrauličkog stajališta).



Slika 2. Shematski prikaz režima tečenja kroz otvor na kruni brane u prvoj fazi [5]

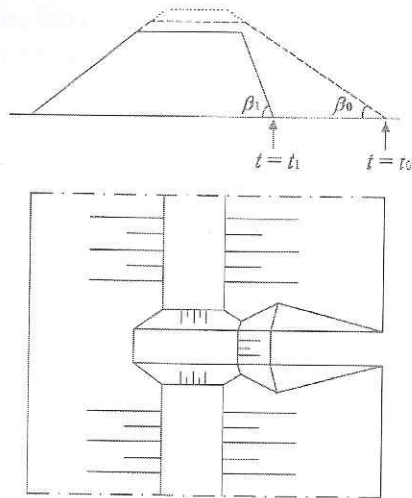
U slučaju visoke vode nizvodno od brane (donja voda), na dnu nizvodnog pokosa (u nožici) može se formirati hidraulički skok koji predstavlja prijelaz iz silovitog u miran režim strujanja nizvodno od brane.

Općenito, erozija koja se javlja na nizvodnom pokosu jača je u nožici pokosa nego pri vrhu pokosa. Prolaskom vode kroz otvor brane i potom nizvodno po pokosu (povećanje brzine vode) postiže se najjači erozijski potencijal u blizini nožice nizvodnog pokosa brane. Taj slučaj se ostvaruje ukoliko pokos nije izrazito dugačak, odnosno duži od dužine na kojoj se događa transport sedimenata.

Takva nejednolika raspodjela djelovanja erozije na pokosu uzrokuje promjenu kuta pokosa u vremenu, te pokos postaje sve strmiji. Pri kraju prve faze u trenutku $t=t_1$, nagib nizvodnog pokosa raste od početnog kuta β_0 do kritičnog kuta β_1 (kut je obično u rasponu između $80^\circ - 90^\circ$), nakon kojeg počinje druga faza. Promjena kuta unutarnjeg pokosa ovisi o vrsti i karakteristikama materijala od kojeg je izgrađena brana (Slika 3.).

U nožici brane, gdje je intenzitet turbulencija vode višestruko jači, i gdje protok postiže svoj najveći erozijski potencijal, za očekivati je da će proces erozije započeti u blizini nožice nizvodnog pokosa brane. Tijekom vremena, djelovanje erozije se širi na cijeli nizvodni pokos brane kao i na krunu brane na mjestu otvora, čineći pokos strmiji te snižavajući visinu brane.

U slučaju male brzine toka vode kroz otvor na kruni brane, ili kad je erozija na kruni brane zanemarujuće mala u usporedbi s onom koja se događa u nožici nizvodnog pokosa brane, eroziju možemo u potpunosti prikazati pod utjecajem erozije u blizini nožice unutarnjeg pokosa brane.

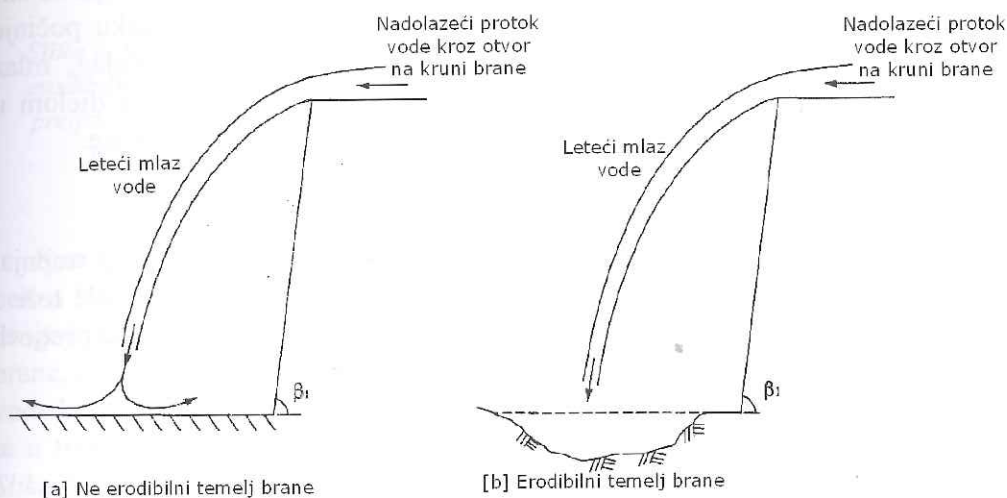


Slika 3. Shematski prikaz izgleda brane po završetku I faze u trenutku $t = t_1$ [5]

2.2. II faza ($t_1 \leq t < t_2$)

U drugoj fazi zadržava se nagib nizvodnog pokosa (kritični kut β_1), te se zbog njegovog strmog nagiba i visinske razlike između krune i nožice brane, ponaša kao preljev. Preljevi se mogu podijeliti s obzirom na oblik (jednostepeni i višestepeni) i erodibilnost temeljnog tla preljeva (u ovom slučaju to je sam temelj brane koji može biti erodibilan ili neerodibilan). S obzirom na gore navedenu podjelu postoje 4 moguće vrste preljeva: jednostepeni preljev s erodibilnim temeljem, jednostepeni preljev s neerodibilnim temeljem, višestepeni preljev s erodibilnim temeljem i višestepeni preljev s neerodibilnim temeljem.

Zbog velike složenosti proračuna erozijskih procesa na višestepenom preljevu, u matematičkim se modelima obično računaju jednostepeni preljevi s erodibilnim ili neerodibilnim temeljem (Slika 4.).



Slika 4. Skica jednostepenog preljeva na nizvodnom pokosu brane sa neerodibilnim i erodibilnim temeljem [5]

Slike 5. i 6. prikazuju, na primjeru dva preljeva (jedan s erodibilnim temeljem i jedan s neerodibilnim temeljem), pojavu četiri vrste erozije (koje se nadalje javljaju i u trećoj fazi):

1. Prvi tip erozije

Prvi tip erozije javlja se na vršnoj površini preljeva, nastaje zbog protoka vode i naziva se posmična erozija. Utjecaj posmične erozije očituje se u snižavanju visine brane.

2. Drugi tip erozije

Drugi tip erozije javlja se duž nizvodnog pokosa brane, odnosno na pokosu preljeva. Ova erozija se sastoji od posmične erozije izazvane hidrauličkim posmičnim naprezanjima koja nastaje zbog vode koja se obrušava niz pokos i klizanja sloja materijala na pokosu zbog fluidizacije.

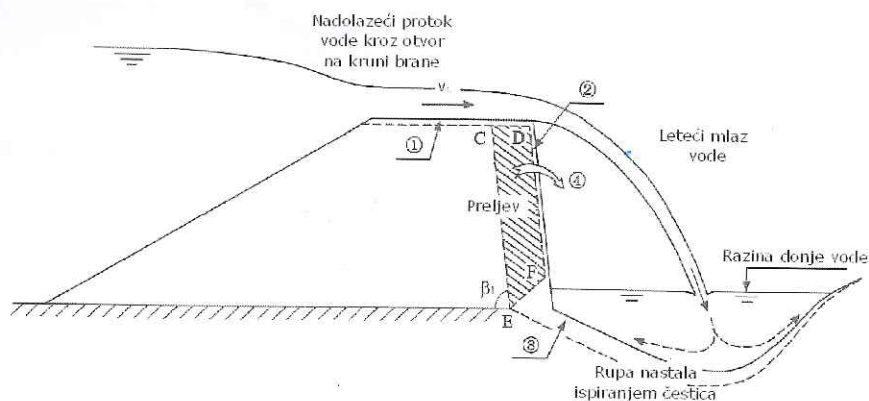
3. Treći tip erozije

Treći tip erozije javlja se na temelju preljeva (brane), gdje zbog udara mlaza vode u temelj (ukoliko je erodibilan) dolazi do ispiranja čestica materijala i nastajanja rupa te postepenog podlokavanja nožice pokosa.

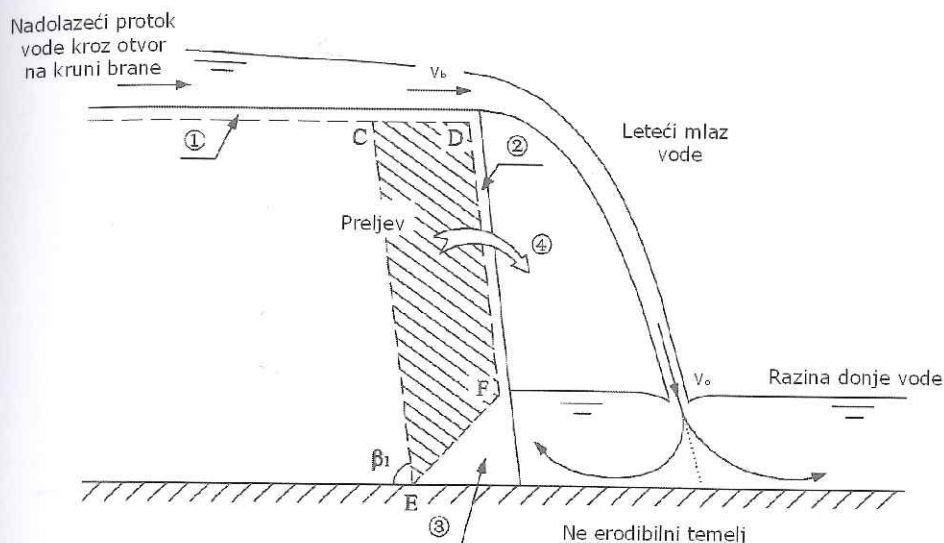
Udar preljavnog mlaza vode utječe na nizvodni temelj brane, izazivajući intenzivne turbulencije u prostoru udara mlaza i stvara znatne erozivne sile kako na temelju tako i u nožici brane. Kao rezultat dobivamo rupu nastalu ispiranjem čestica tla u temelju (ukoliko je temelj erodibilan). Ta rupa se širi i horizontalno i vertikalno kroz vrijeme, te u određenom trenutku počinje podlokavati nizvodni pokos brane. Ukoliko je temelj neerodibilan, mlaz koji udara u temelj djelom će skrenuti strujnice prema pokosu, a djelom u suprotnom smjeru prilikom čega započinje podlokavanje pokosa brane.

4. Četvrti tip erozije

Kada se podlokavanje pokosa brane razvilo do određenog kritičnog stupnja, preljev postaje nestabilan i ne može se više oduprijeti djelovanju sile teže i silama procjeđivanja, te dolazi do sloma tla i obrušavanja djela pokosa preljeva koji ćemo definirati kao blok materijala.



Slika 5. Erozija na preljevu za vrijeme postepenog djelomičnog proloma brane s erodibilnim temeljem: 1 - posmična erozija izazvana tokom vode na površini na vrhu preljeva; 2 - erozija duž nizvodnog pokosa brane; 3 - ispiranje čestica na temelju brane i podlokavanje nožice nizvodnog pokosa brane; 4 - slom bloka tla (CDFE) na nizvodnom pokosu brane [5]

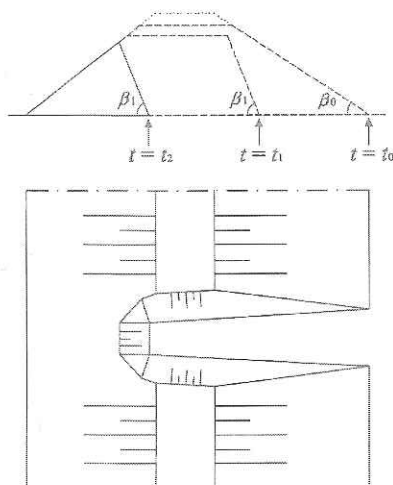


Slika 6. Erozijski procesi na preljevu za vrijeme postupnog djelomičnog proloma brane s ne erodibilnim temeljem: 1-posmična erozija izazvana tokom vode na površini na vrhu preljeva; 2-erozija duž nizvodnog pokosa brane; 3-podlokavanje nožice nizvodnog pokosa brane; 4-slom bloka tla (CDFE) na nizvodnom pokosu brane [5]

Kao rezultat spomenutih četiriju mehanizama erozije, pokos (strmi nizvodni pokos brane) se pomiče uzvodno nejednoliko, ali neprestano kako vrijeme ide u drugoj fazi, a s time se i smanjuje širina krune brane. U isto se vrijeme visina brane, na mjestu otvora na kruni brane, smanjuje zbog erozije uzrokovane tokom vode kroz otvor. Na kraju druge faze preljev se pomiče do uzvodnog pokosa brane te u trenutku $t = t_2$ u potpunosti nestaje kruna brane (na mjestu otvora brane; Slika 7.).

Pretpostavljeno je da se urušavanje bloka CDFE (točke koje označavaju dio pokosa preljeva koji će se urušiti; Slika 5. i 6.) odvija rotacijom oko točke E, što je vjerojatnije nego da se blok otkliže prema dolje. Nakon što se dogodi slom materijala, širina preljeva se smanjuje za širinu bloka koji se urušio, nakon čega se preljevni mlaz vode prilagođava novonastalom stanju te započinje ponovo novi ciklus erozijskih procesa.

Fluidizacija površine nizvodnog pokosa brane zbog raspršenog mlaza vode u drugoj fazi (također kasnije i u trećoj fazi) smanjuju mehaničku čvrstoću tla površinskog sloja i ubrzavaju erozijske procese. No, kvalitetno razmatranje ovih utjecaja je vrlo teško.



Slika 7. Shematski prikaz izgleda brane nakon II faze u trenutku $t = t_2$ [5]

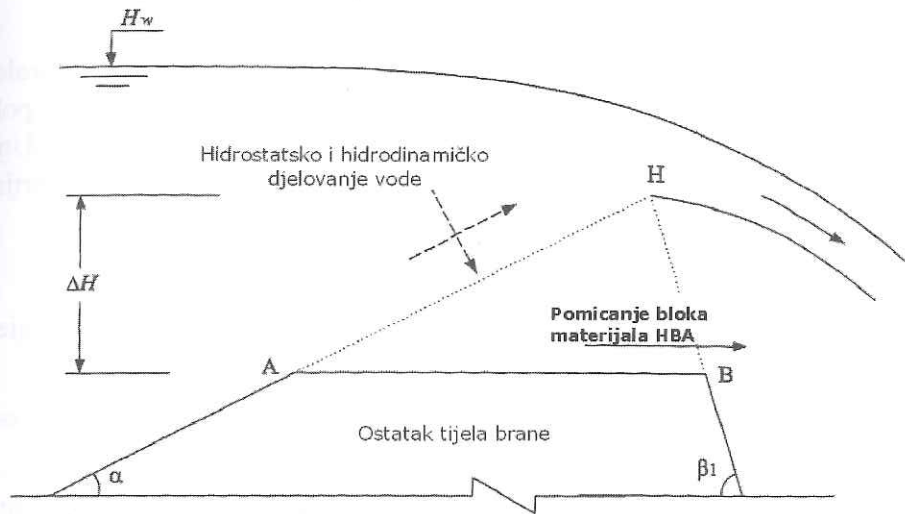
2.3. III faza ($t_2 \leq t < t_3$)

U početku treće faze u trenutku $t = t_2$ preljev se pomaknuo do uzvodnog pokosa brane, a poprečni presjek ostatka tijela je trokutno oblikovan, no i dalje nizvodni pokos brane zadržava kritični nagib pod kutom β_1 kroz treću fazu.

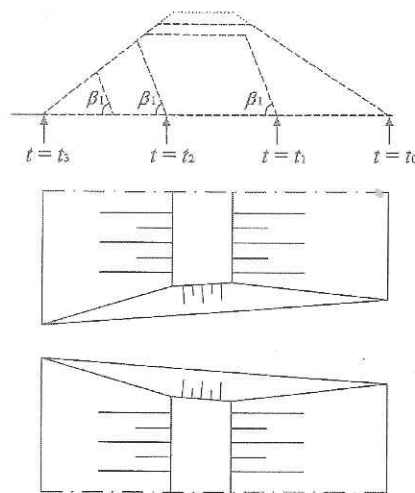
U trećoj fazi nizvodni pokos brane zadržava kritični kut β_1 . Različiti mehanizmi erozije opisani u drugoj fazi vrijede također i u trećoj fazi. Jedina razlika između ove dvije faze je u tome što je u trećoj fazi tijelo brane mnogo tanje i slabije pa se proces erozije odvija brže.

Preostali dio tijela brane teško može odoljeti silama vode (kako hidrostatskim tako i hidrodinamičkim) od rijeke (ili mora, ili akumulacije) i zbog toga vrlo brzo dolazi do ispiranja (pomicanja) dijela brane do određene visine, što rezultira brzim povećanjem otvora i povećanjem protoka kroz otvor (blok ABH – točke koje označavaju dio tijela brane koji će se pomaknuti; *Slika 8.*).

Povećanje otvora brane uzrokuje prirast protoka i utjecaj erozije na tom mjestu. Geometrija samog otvora se također mijenja, pa bočni pokosi postaju strmiji i od početnog kuta γ dostižu kritični kut β_1 . U trenutku $t = t_3$ tijelo brane, na mjestu otvora, u potpunosti nestaje, odnosno isprano je pod utjecajem erozije do temelja brane ili do zaštitne nožice na nizvodnom pokosu brane, ukoliko ona postoji. U tom trenutku završava treća faza (*Slika 9.*).



Slika 8. Shematski prikaz pomicanja bloka ABH – ostatka tijela brane ubrzo nakon trenutka $t=t_2$ [5]



Slika 9. Shematski prikaz izgleda brane nakon III faze u trenutku $t = t_3$ [5]

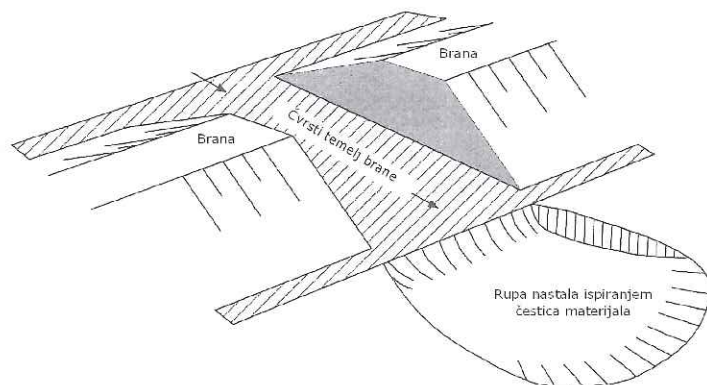
Zajedno s redukcijom širine i visine brane na mjestu otvora brane u trećoj fazi, uloga sloma tla na pokosu brane će opadati, a nasuprot toga, uloga posmične erozije uzrokovane tokom vodom u granicama otvora brane porasti će zbog povećanja protoka.

2.4. IV faza ($t_3 \leq t < t_4$)

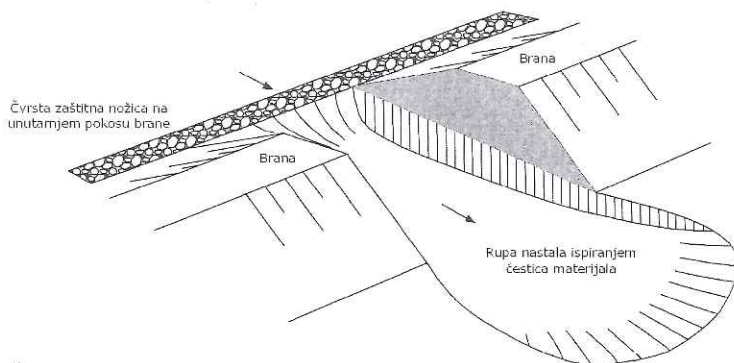
Četvrta faza započinje kada je tijelo brane na mjestu otvora erodiralo do temelja brane, ili, ako postoji, do zaštitne nožice na dnu uzvodnog pokosa brane. Erozijski otvor je u ovoj fazi (kao i u petoj fazi) primarno bočna. Utjecaj vertikalne erozije u ovim fazama ovisi primarno o određenim geometrijskim karakteristikama brane i o svojstvima materijala od kojih je sačinjena:

- otpornost temelja brane od daljnje erozije;
- postojanje zaštitne nožice na dnu uzvodnog pokosa brane i njezina sposobnost da štiti uzvodni pokos od daljnje erozije;
- postojanje relativno visoke razine tla iza brane (odmah uz uzvodni pokos brane) i njegova otpornost na eroziju i postojanje efektivne zaštite.

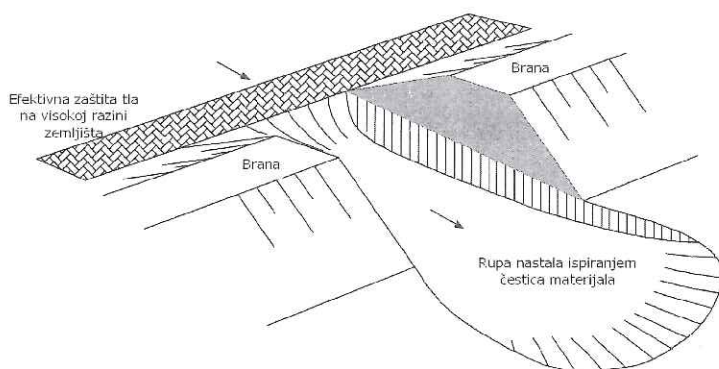
Ovisno o spomenutim mjerilima, prikazujemo tri tipa ponašanja otvora vezano za četvrtu i petu fazu postepenog djelomičnog proloma brane [5]. Ako je vertikalna erozija na dotoku u otvor spriječena ili jako usporena čvrstim temeljem brane, čvrstom zaštitnom nožicom na uzvodnom pokosu brane, relativno visokom razinom tla iza brane i njegovom efektivnom zaštitom, javlja se TIP A otvora (*Slika 10.*). U ovom slučaju "čvrsto" znači da materijal posjeduje visoku otpornost na djelovanje erozije. TIP B otvora podrazumijeva postojanje relativno visoke razine tla iza brane (odmah uz uzvodni pokos brane), no u ovom slučaju neotpornog na eroziju (*Slika 11.*). Sve ostale slučajeve koji se mogu javiti svrstavamo u TIP C otvora (*Slika 12.*).



[a]

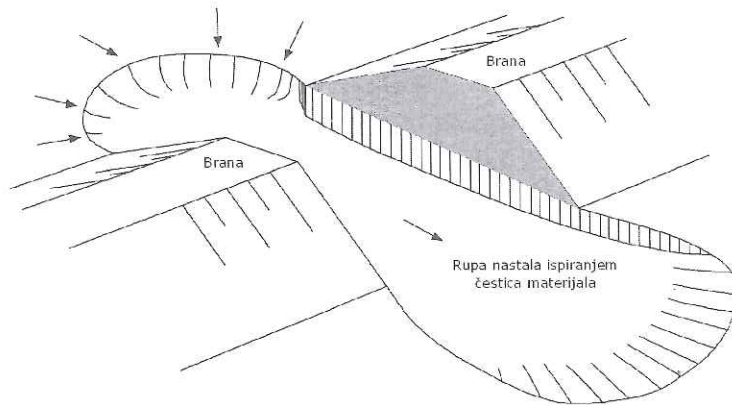


[b]

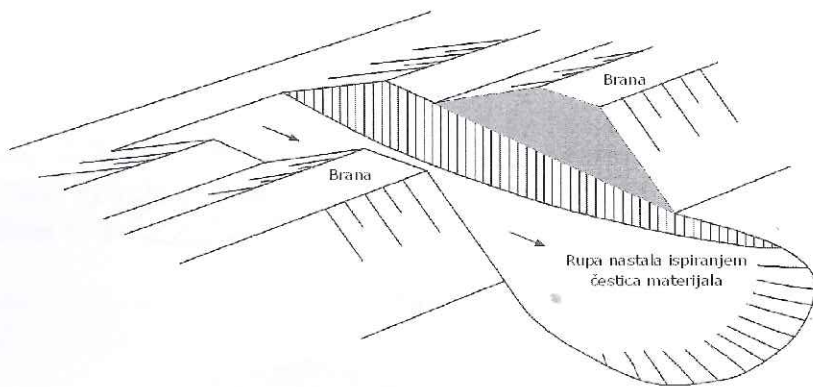


[c]

Slika 10. Vertikalna erozija je u četvrtoj fazi spriječena čvrstim temeljem brane [a], čvrstom zaštitnom nožicom na unutarnjem pokosu brane [b] ili visokom razinom zemljišta uz unutarnji pokos brane i njegovom efektivnom zaštitom [c] (TIP A otvora) [5]

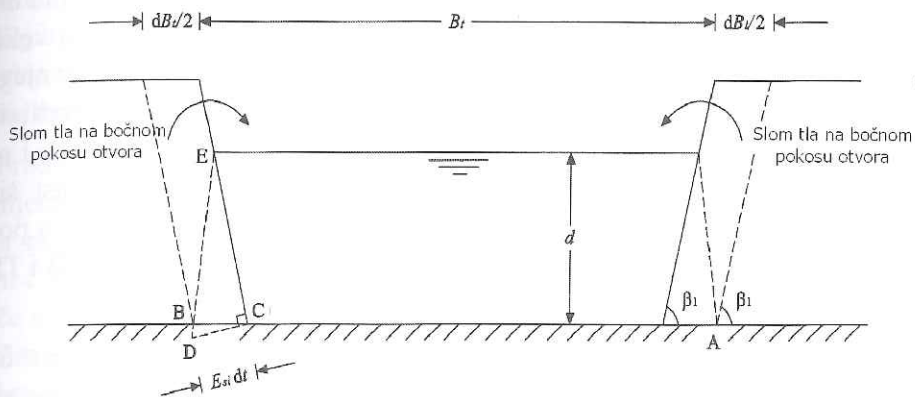


Slika 11. Vertikalna erozija je u četvrtoj fazi s erodibilnom visokom razinom zemljišta uz unutarnji pokos brane (TIP B otvora) [5]



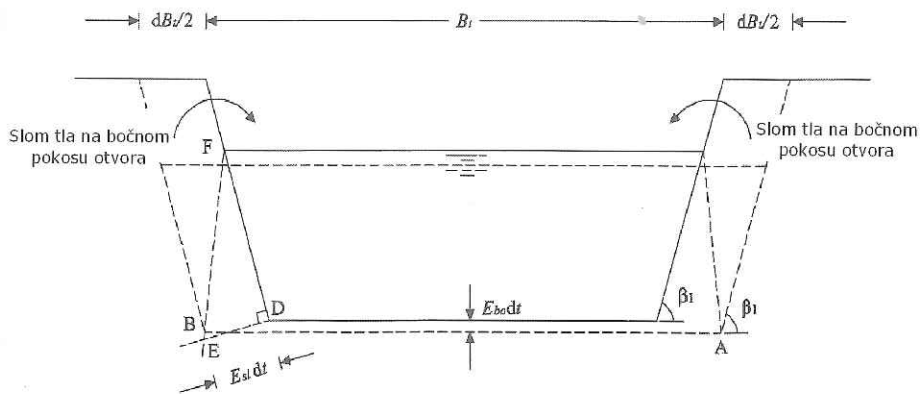
Slika 12. Vertikalna erozija u petoj fazi (TIP C otvora) [5]

Protok kroz otvor brane nameće posmično naprezanje na oba bočna pokosa otvora i na dno otvora brane, što vodi do toga da bočni pokosi postaju sve strmiji, zbog snažnije erozije koja se javlja na donjim dijelovima pokosa. Uzročno tome, kut pokosa raste i dostiže kritični kut β_c , izazivajući slom tla s prestrmog bočnog pokosa u određenom trenutku. Kada se nakon određenog vremena nagib bočnog pokosa otvora ponovno vrati na kut β_c , započinje ponovno ciklus bočne posmične erozije na pokosima i slom tla. Proces odvajanja bloka materijala s bočnih pokosa se često događa prevrtanjem oko točaka A i B (Slika 13. i 14.).



Slika 13. Povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi (TIP A otvora) [5]

Slika 13. shematski prikazuje porast širine otvora u četvrtoj i petoj fazi za TIP A otvora pri kojem je E_{sl} posmična erozija na dnu bočnih pokosa. Vertikalna je erozija na dotoku u otvor spriječena ili jako usporena čvrstim temeljem brane, čvrstom zaštitnom nožicom na vanjskom pokosu brane ili relativno visokom razinom tla iza brane i njegovom efektivnom zaštitom. Kada posmična erozija pri dnu bočnih pokosa otvora brane postigne određeni stupanj, bočni pokosi postaju prestrmi da bi ostali stabilni te dolazi do sloma tla.

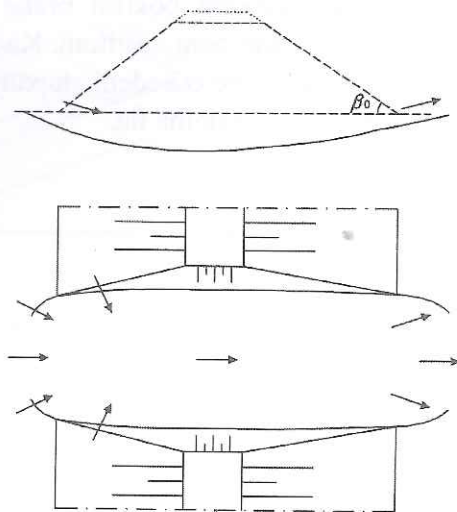


Slika 14. Povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi (TIP B i TIP C otvora) [5]

Slika 14. shematski prikazuje povećanje širine otvora na brani u četvrtoj i petoj fazi kada je temelj brane erodibilan (TIP B i C otvora). Erozijska se u otvoru ne javlja samo bočno (E_{sl}), već i na dnu otvora brane (E_{bo} – erozija na dnu otvora

brane). U realnim slučajevima proloma velikih brana, konačna širina otvora brane obično ima red veličine od stotinjak metara, dok dubina otvora ima red veličine od desetak metara. Obično je krajnja širina otvora puno veća u odnosu na njegovu dubinu. Zbog toga, je za TIP B i C otvora brane (kada je temelj brane erodibilan), erozija na dnu mnogo manja nego na dnu bočnih pokosa otvora u četvrtoj i petoj fazi postupnog djelomičnog proloma brane. Zato možemo reći da rast širine otvora brane (B) primarno ovisi o posmičnoj eroziji bočnih pokosa (E_{sp}), a potom i o vertikalnoj eroziji dna otvora (E_{bo}) u dvije zadnje završne faze za TIP B i TIP C otvora brane.

Za vrijeme procesa erozije u otvoru brane, zajedno s protokom vode kroz otvor i utjecajem vode u nizvodni okoliš (ili korito), razina donje vode neprestano raste, posebno nakon trenutka $t = t_3$ kada je brana u potpunosti prolomljena. Pri kraju četvrte faze u trenutku $t = t_4$ razina donje vode je narasla do te mjere (razine) da je počela utjecati na protok vode koji utječe u nizvodni okoliš. Protok vode mijenja uvjete prelaskom iz tečenja sa slobodnom površinom (pod utjecajem visoke donje vode) u uvjete potopljenog tečenja.



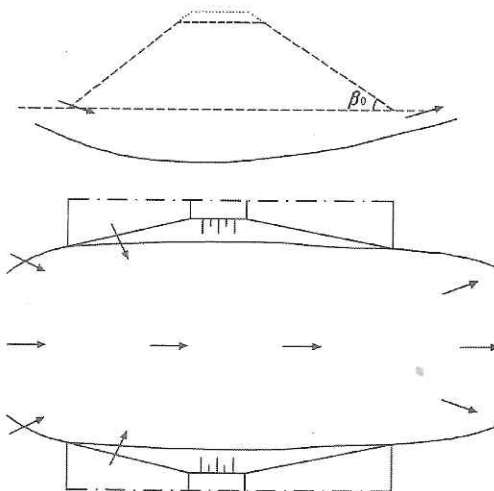
Slika 15. Shematski prikaz izgleda brane nakon IV faze u trenutku $t = t_4$ [5]

2.5. V faza ($t_4 \leq t < t_5$)

U petoj fazi zbog rastućeg ometajućeg efekta donje vode, dolazi do postepenog smanjivanja protoka i brzine vode kroz otvor brane, a s tim i do smanjenja utjecaja erozije. U ovoj fazi se i dalje primarno događa posmična erozija na bočnim pokosima otvora brane. Utjecaj vertikalne erozije u ovoj fazi i dalje ovisi

o određenim geometrijskim karakteristikama brane i o svojstvima materijala od kojih je sačinjena. Dominantni mehanizmi erozije u otvoru brane su, kao i u četvrtoj fazi, posmična erozija uzrokovana tokom vode duž bočnih pokosa otvora, te kao rezultat erozije mehanička nestabilnost tla na tim istim pokosima.

Pred kraj pete faze u trenutku $t = t_5$ brzina toka vode kroz otvor brane je toliko smanjena da više ne može erodirati niti tijelo brane niti njezin temelj. Na taj način otvor poprima svoju krajnju dimenziju i u trenutku $t = t_5$ završava rast otvora. Unatoč maloj brzini vode kroz otvor, voda i dalje protječe kroz otvor brane i utječe u nizvodni okoliš nakon vremena $t = t_5$ (Slika 16.). Protok kroz otvor brane završiti će u trenutku $t = t_6$ ukoliko se izjednače razina donje vode i razina vode iza brane (razina vode rijeke ili mora) ili se razina vode iza brane spusti niže od same razine dna otvora.



Slika 16. Shematski prikaz izgleda brane nakon V faze u trenutku $t = t_5$ [5]

3. Prikaz rezultata matematičkog modela na primjeru brane Botonega

Brana Botonega izgrađena je 1986. godine na vodotoku Butoniga u slivu rijeke Mirne. Visinom od 23 metra, dužinom od 590 metara, te volumenom akumulacijskog bazena od $19,7 \cdot 10^6$ m³ spada u velike brane (prema definiciji ICOLD-a) [6],[7]. Brana Botonega je nasuta kamena brana s nepropusnom jezgrom od prirodnih materijala (glinena jezgra) te djelomičnim temeljnim klinom kako bi se osigurala vodonepropusnost tijela i temelja brane. Njezina svrha je trostruka: koristi se u svrhu zaštite od štetnog djelovanja vode (sprečavanje

poplava i protuerozijske mjere), kao zahvat vode (vodoopskrba), te kao vodni resurs za navodnjavanje površina u Srednjem i Donjem dijelu sliva rijeke Mirne. Bitno je napomenuti da se, zbog nedostatnih zaliha vode, akumulacija ne koristi za navodnjavanje. Preljev (konstruiran kao bočni preljev i udaljen od krune brane) i temeljni ispušt brane Botonega prolaze kroz tijelo brane, te su izvedeni od betona [8],[9],[10].

Osnovne pretpostavke i pojednostavljenja koja su prilikom izrade matematičkog modela usvojena, kako bi se umanjila kompleksnost izračuna, su:

- homogen poprečni presjek (laporovita glina – nepovoljni slučaj);
- pojednostavljenje geometrije poprečnog presjeka;
- izostavljanje vremena potrebnog za stvaranje početnog otvora na kruni brane;
- oblik početnog otvora pravilnog trapeza s kutom pokosa $\gamma = 26.57^\circ$;
- uspostavljanje protoka vode kroz početni otvor označava trenutak u kojem započinju erozijski procesi na kruni brane;
- zanemarivanje neravnina koje nastaju na nizvodnom pokosu brane pod utjecajem erozije, aproksimirano ravnom površinom;
- kritični kut nizvodnog pokosa i bočnih pokosa u otvoru brane β_1 u rasponu od 80° do 90° ;
- neerodibilni temelj brane;
- ne uzimanje u obzir hidrološko-hidrauličke promjene stanja vodnih zaliha u akumulaciji uslijed dinamike istjecanja vodnih količina prilikom procesa erozije tijela brane.

S obzirom na pretpostavke i pojednostavljenja koja su uvedena kako bi modeliranje postepenog djelomičnog proloma brane bilo jednostavnije, izrađen je proračun koji je dao sljedeće rezultate:

- kao rezultat, ukupno vrijeme potrebno da se dogodi postepeni djelomični prolom brane, iznosi $t = 3,31$ sati. Ukupno vrijeme jednako je zbroju vremena potrebnih da se dogodi svaka od pet faza;
- vrijeme potrebno da se dogodi svaka od pet faza postepeno djelomičnog proloma brane prikazano je u *Tablici 1*.

Tablica 1. Tablični prikaz potrebnog vremena da se kroz pet faza dogodi djelomični prolom brane Botonega i protoka vode kroz otvor na brani na kraju svake faze

	Vrijeme [sati]	Protok vode kroz otvor na kraju faze [m ³ /s]
I Faza	2,49	≈ 28
II Faza	0,58	≈ 28
III Faza	0,08	≈ 1342
IV Faza	0,15	≈ 3988
V Faza	0,01	≈ 837
UKUPNO:	3,31	

Unutar proračuna, uz računanje vremena potrebnog da se dogodi postepeni djelomični prolom brane, računata je i dimenzija otvora brane te protok koji se kroz pet faza ovog proračuna postupno povećavaju. Protok vode je kroz faze prikazan u *Tablici 1.*

Dimenzije otvora kroz tijelo brane koji nastaje na kraju postepenog djelomičnog rušenja brane su sljedeće:

- širina otvora brane pri dnu $b=39,43$ m
- širina otvora brane pri vrhu krune brane $B=39,62$ m
- dubina otvora brane $d=19,70$ m
- kut nagiba bočnih pokosa otvora (kritični nagib) $\beta_1 = 89^\circ 43'$

4. Zaključak

Cilj ovoga rada bio je prikazati mehanizme vezane za postepeni djelomični lom brane i dati primjer izračuna.

Brane su hidrotehnički objekti koji najčešće služe za formiranje akumulacija potrebnih u sustavima vodoopskrbe, zaštite od poplava i energetike. Zbog velikih količina vode koje se zadržavaju u akumulacijama, eventualno nekontrolirano prelijevanje ili rušenje brana može izazvati formiranje poplavnog vala velike razorne moći. Nasute brane se mogu urušiti zbog cijelog niza različitih uzroka, no najčešći su prekoračenje hidrauličke stabilnosti brane (unutrašnja erozija i regresivna erozija) i prelijevanje brane.

Iako je za nasute brane vjerojatnost pojavljivanja trenutnog potpunog loma mala, i one su se obično računale pod pretpostavkom takvog mehanizma rušenja kao najnepovoljnijeg rješenja, ozakonjenog u pravnoj regulativi donesenoj 1975. godine.

Mnogo izgledniji mehanizam loma kod nasutih brana je postepeni djelomični lom brane, prilikom kojeg se brana ne urušava u potpunosti već na tijelu brane nastaje veliki otvor, pa je u ovom radu rušenje brane prikazano pod tom pretpostavkom.

Nasute brane su nepreljevne u smislu prelijevanja preko krune brane. Koriste se bočni, bunarski preljevi i sl. Prelijevanje preko nasute brane, pogotovo ukoliko je ono dugotrajno rezultira erodiranjem nizvodnog pokosa što može rezultirati rušenjem brane.

Da se spriječi prelijevanje potrebno je dobro odrediti visinu krune brane, odrediti mjerodavni vodni val (velike vode) koji akumulacijski bazen iza brane mora prihvatiti, dimenzionirati, izvesti i održavati evakuacijske organe.

Rezultati dobiveni ovim proračunom su:

- vrijeme potrebno da se dogodi postepeni djelomični prolom brane $t = 3,31$ sati
- širina otvora brane pri dnu $b = 39,43$ m
- širina otvora brane pri vrhu krune brane $B = 39,62$ m
- dubina otvora brane $d = 19,70$ m
- kut nagiba bočnih pokosa otvora (kritični nagib) $\beta_1 = 89^\circ 43'$

Uzimajući u obzir pomanjkanja podataka i usvojenih pojednostavljenja, rezultate ne možemo uzeti kao točne projektne vrijednosti. Razvojem ovoga proračuna u budućnosti te njegovom provjerom kroz istraživanja na fizikalnim modelima i u prirodi biti će moguće proračun usvojiti mjerodavnim

U stvarnosti, vrijeme potrebno za prolom brane bi zasigurno bilo i veće a dimenzije otvora kroz tijelo brane manje, što slijedi iz činjenica [9],[10]:

- brana Botonega ima heterogen poprečni presjek sastavljen i od materijala otpornijih na djelovanje erozije, te je realno očekivati da će erozijski procesi trajati duže vrijeme
- otvor koji se stvara na kruni brane nema u stvarnosti oblik pravilnog trapeza, te su obično sve površine pod utjecajem erozije ispunjene neravninama;
- zaštitni pokrov nizvodnog pokosa brane, kao što je zatravnjivanje utječe na procese erozije (posebno na nastajanje erozije) tako da je ono sporije;
- u dinamičkim procesima kao što je stvaranje otvora na kruni brane ili prolom nasute brane, visina preljeva može dostići i čak prekoračiti mehaničku granicu stabilnosti tla, pa tako i viši i strmiji pokos od kritičnog

kuta β_1 može ostati stabilan neko određeno vrijeme prije nego se uruši (ne mora biti u granica od 80° do 90°);

- erozija na nizvodnom pokosu brane ne započinje u trenutku kada je uspostavljen protok kroz otvor brane, već je potrebno vrijeme da se erozijske sile razviju do te mjere da započnu erodirati nizvodni pokos brane;
- s obzirom da je temelj brane u stvarnosti erodibilan moguće je u realnosti očekivati veće dimenzije otvora.

5. Literatura

- [1] Barbara Karleuša; *Predavanja iz kolegija Hidrotehničke građevine*; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci; Rijeka, 2007.
- [2] Goran Gjetvaj, Goran Lončar, Krešimir Plantić; *Istraživanja posljedica uslijed iznenadnog prelijevanja ili rušenja visokih brana na fizikalnom modelu*; Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb; listopad 1998.: Izvj. Br.: 509.
- [3] H.J. Steetzel and J.H. De Vroeg; *Extension and validation of the BREACH – model*; Alkyon/ Delf Hydraulics for Rijkswaterstaat /DWW; Delf, Netherlands, 1998.: Tehnical report A094R1r2.
- [4] P.J. Visser; *Breach growth in sand-dikes. PhD thesis*; Delft University of Technology; Delft; the Netherlands, 1998.
- [5] Yonghui Zhu; *Breach Growth in Clay – Dikes*; Hohai University geboren te Hunan; China; 2006.
- [6] <http://www.wikipedia.com>; 2009.
- [7] <http://www.elektroprojekt.hr.hdvb/katastar>; 2009.
- [8] Vulić Željko; *Akumulacija Botonega, Inženjerskogeološki radovi, Izvještaj*; Fond stručne dokumentacije IGH El. Br.:204/1971; Zagreb; 1971.
- [9] Branimir Muller; *Akumulacija Botonega, Glavni projekt nasute brane (prilog Knjigama 5 i 6)*; Fond stručne dokumentacije Geotehnike El. Br.: 20-804.2/80; Zagreb; 1980.
- [10] Mihajlo Ćuk; *Akumulacija Botonega, Brana Botonega; Završni izvještaj o geomehaničkoj kontroli ugradnje materijala tijekom građenja brane Botonega*; Fond stručne dokumentacije Geotehnike El. Br.:804.2-490/87; Zagreb; 1987.