

# Mogućnosti povećanja stabilnost hidrotehničkih nasipa

prof.dr.Goran Gjetvaj

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb, [goran@grad.hr](mailto:goran@grad.hr)

## Sažetak:

Hidrotehnički nasipi se grade za potrebe sprječavanja plavljenja naseljenih područja. Najveći dio godine nisu izloženi djelovanju vode te je tlo u njima nesaturirano. Dolaskom vodnog vala i porasta razine vode sa uzvodne strane dolazi do infiltracije vode u nasip i saturiranja tla na uzvodnoj (riječnoj) strani te napredovanja fronte zasićenja kroz anizotropnu nehomogenu sredinu prema nizvodnoj (zaobalnoj) strani. Ovisno o karakteristikama nasipa i trajanju vodnog vala na zaobalnom pokosu može doći do pojave vrelna plohe. U slučaju da razina vode u vodotoku premaši kotu krune nasipa dolazi do prelijevanja krune nasipa i tečenja po zaobalnom pokosu. Pojava procjednih voda kao i formiranje tečenja po zaobalnom pokosu mogu izazvat progresivnu eroziju tijela nasipa i ugroziti njegovu stabilnost. U radu su prikazane nove spoznaje vezane uz mehanizme progresivne erozije nasipa uslijed prelijevanja kao i faktori koji mogu povećati stabilnosti nasipa na hidrauličku eroziju.

**Ključne riječi:** nasip, rušenje nasipa, poplave

## Possibilities of Increasing Hydraulic Stability of Embankments

### Abstract:

Embankments are being built for the purpose of preventing flooding of populated areas. Most of the time they are not exposed to water so the soil in embankment is unsaturated. In the period of high waters (flood) on the upstream side infiltration of water into the embankment occurs as well as spreading of saturation front through the anisotropic heterogeneous environment to the downstream side. Depending on the characteristics of the embankment and duration of the flood on downstream side slope surface water may occur. In the case when the water level in the river exceeds the elevation at the crown of the embankment, overflow occurs. The occurrence of water seepage and/or overflow of the embankment can result in progressive erosion of the dike body. This paper presents new insights regarding the mechanisms of progressive erosion of the embankment due to the overflow as well as factors that can increase the stability of the embankment to hydraulic erosion.

**Key words:** embankments, progressive erosion of the embankment, floods

### 1. UVOD

Obzirom da su nizinska područja Republike Hrvatske isprepletena riječnim tokovima, vrlo često smo bili izloženi poplavama i velikim materijalnim pa čak i ljudskim gubicima. Tradicija izgradnje obrambenih nasipa u Republici Hrvatskoj traje dvjestotinjak godina. Prvo sustavno rješenje obrane od poplava je provedeno nakon katastrofalne poplave 1964. godine,

kada je poplava nanijela ogromne štete gradu Zagrebu. U međuvremenu je sagrađen sustav obrambenih nasipa koji štite veće urbane sredine a plavljenja se javljaju u uvjetima formiranja otvora u postojećim nasipima.

Do formiranja otvora u hidrotehničkim nasipima može doći uslijed hidrauličke erozije prilikom prelijevanja preko krune ili procjeđivanja kroz tijelo nasipa. Otvori u nasipima izazivaju poplave koje mogu uzrokovati veliku materijalnu štetu kao i gubitke ljudskih života.

Poznavanjem mehanizama hidrauličke erozije koja formira otvor se može iskoristiti prilikom projektiranja sigurnijih nasipa. Prikupljene spoznaje mogu poslužiti i za predviđanje moguće brzine nastajanja otvora u nasipu kao i odgovarajućeg hidrograma. Vrijeme koje je na raspolaganju za sanaciju inicijalnog otvora je najvažniji parametar za smanjenje materijalne štete i eventualnog gubitka ljudskih žrtava.



*Slika 1. Sava je probila nasip kod sela Sop Bukevski u blizini Velike Gorice u rujnu 2010. god.*

Vodni val koji se propagirao Savom u rujnu 2010. godine je uzrokovao rušenje nekoliko nasipa (Slika 1) i značajne materijalne štete što je aktualiziralo potrebu prikupljanja spoznaja o uzrocima i mehanizmima formiranja otvora kako bi se izbjegle buduće materijalne štete.

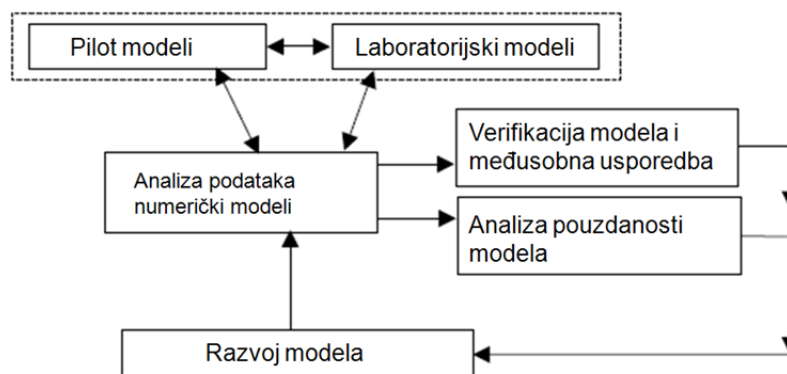
Otvori se najčešće iniciraju prelijevanjem preko krune nasipa pri čemu se u početnoj fazi rušenja voda prelijeva preko krune i erodira nizvodni pokos. Sagledavanje (spoznavanje) mehanizama nastajanja i širenja otvora te njegov matematički zapis i izrada odgovarajućih modela su od velikog značenja za kvalitetno projektiranje nasipa. Razvijene metode modeliranja nastajanja otvora se zasnivaju na odnosu hidrauličkog gradijenta i erodibilnosti materijala iz kojeg je izrađen nasip.

## **2. MEHANIZMI RUŠENJA HIDROTEHNIČKIH NASIPA**

Do rušenja hidrotehničkih nasipa može doći uslijed prelijevanja nasipa kao i uslijed intenzivnog procjeđivanja kroz tijelo nasipa i pojave vrelnе plohe na zaobalnoj strani. U nastavku će se razmatrat formiranje otvora kao posljedica prelijevanja. Zbog složenosti mehanizama koji uzrokuju formiranje otvora, većina modela za zasniva na pretpostavci o homogenom nasipu.

Veličina otvora, definirana širinom i visinom, kao i brzina njegovog nastajanja određuju maksimalni protok i oblik izlaznog hidrograma. Metode određivanja izlaznog hidrograma se uglavnom zasnivaju na fizikalnom pristupu kojim se opisuje nastajanje i širenje otvora te pripadajući protok kroz otvor na osnovu hidrauličke erozije materijala od kojeg je nasip sagrađen uvažavajući pri tome zakone hidraulike, pronosa nanosa i geomehanike. Drugi pristup su parametarski modeli koji na osnovu usvojenih parametara za određen tip nasipa usvajaju vrijeme formiranja otvora i njegove dimenzije, te računaju povećanje otvora i protoka u funkciji vremena. Ponekad se koriste i empirijske jednadžbe zasnovane na obradi prikupljenih podataka o formiranju otvora kao i komparativne analize kojima se parametri formiranja otvora procjenjuju na osnovu sličnih a poznatih i dobro evidentiranih slučajeva rušenja.

Najbolji rezultati se dobivaju odgovarajućim kombiniranjem rezultata eksperimentalnih istraživanja na pilot i fizikalnim modelima, teoretskih razmatranja te numeričkih simulacijama na računalu usmjerenih iskustvom (slika 2).

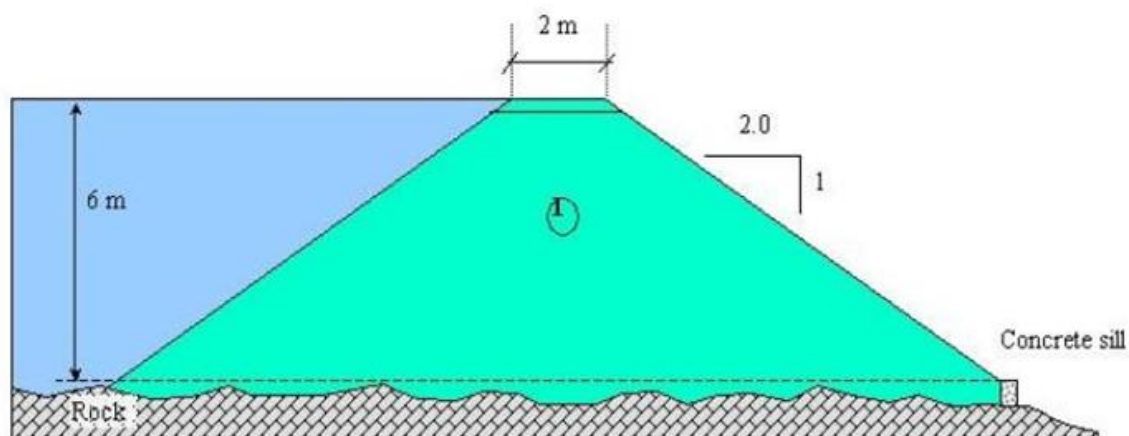


Slika 2. Shema povezanosti numeričkih modela sa laboratorijskim i terenskim istraživanjima (Moriss i sur. 2007)

## 2.1 Pilot modeli

Mogućnost predviđanja nastanka i razvoja otvora u hidrotehničkim nasipima je relativno ograničena. Glavni razlog tome leži u nedovoljnom poznavanju mehanizama koji uzrokuju eroziju odnosno ispiranje čestica kao i nemogućnosti odgovarajućeg opisivanja hidrauličke erozije materijala iz kojeg je nasip građen. Najpouzdaniji način sagledavanja fizikalnog procesa je izrada fizikalnog modela. Fizikalni modeli se dijele na pilot modele koji se grade u prirodi u mjerilu 1:1 i na laboratorijske modele koji se rade u odgovarajućem mjerilu.

U cilju sagledavanja mehanizama rušenja hidrotehničkih nasipa provedeno je nekoliko značajnih istraživanja među kojima se može istaknut pilot model hidrotehničkog nasipa visine 5 – 6m na kojima su ispitivani procesi rušenja odnosno stvaranja otvora u tijelu nasipa u okviru projekta *Stability and Breaching of Embankments Dams* (Hoeg i sur., 2004).

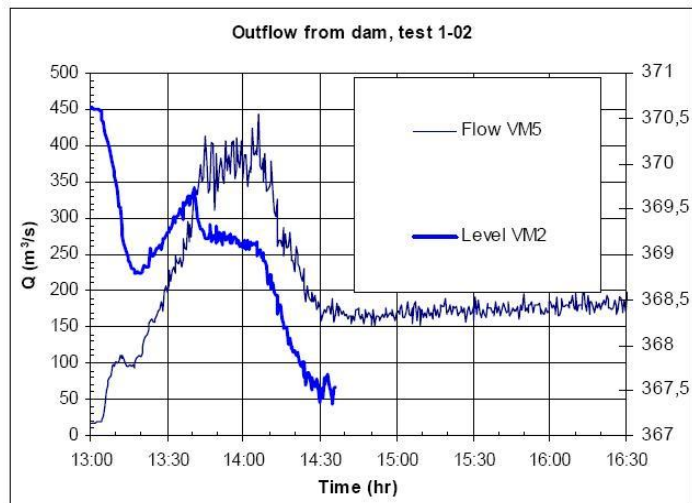


*Slika 3. Presjek homogenog glinenog nasipa podvrgnutog rušenju (Hoeg i sur., 2004)*



*Slika 4. Fotografije nastale za vrijeme testa rušenja glinenog nasipa*

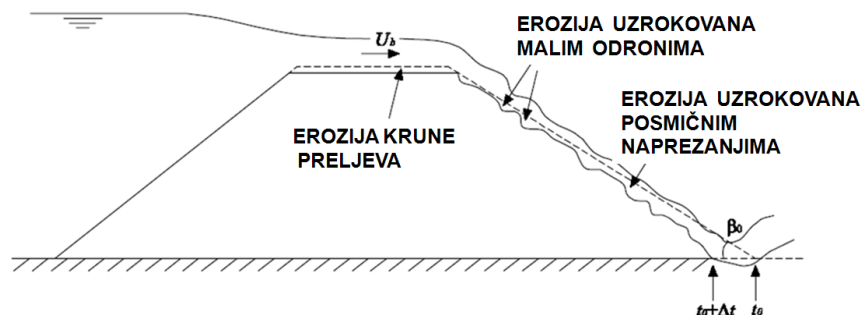
Poprečni presjek ispitivanog homogenog glinenog nasipa je prikazan na slici 3. Kao ciljano mjesto započinjanja formiranja otvora napravljen je usjek u tijelu nasipa u obliku trapeznog kanala dubine 0.5m i širine 3m. Na slici 4 prikazane su četiri fotografije nastale tijekom rušenja nasipa a na slici 5 prikazan je hidrogram otjecanja.



Slika 5. Hidrogram otjecanja

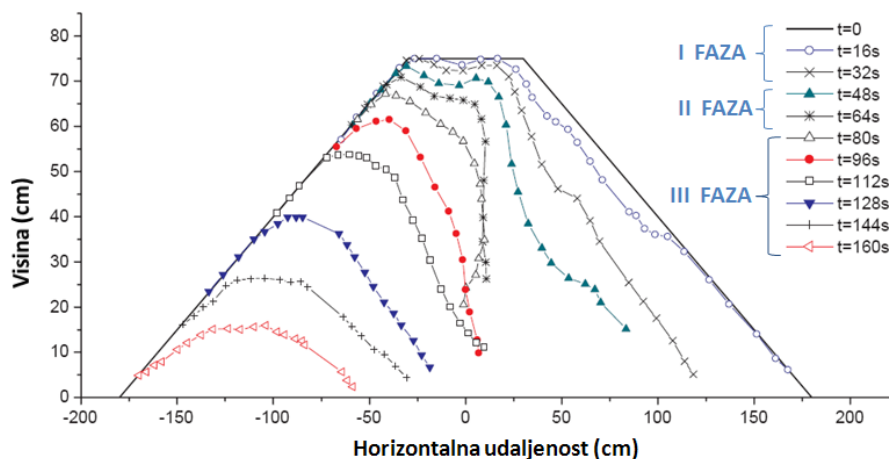
Uslijed prelijevanja preko krune nasipa voda počinje teći po njegovom nizvodnom pokosu povećavajući pritom svoju brzinu (Slika 6). Na određenoj udaljenosti od krune se uspostavlja normalna dubina. U uvjetima kad nizvodni pokos nije previše dugačak, najveća erozivna snaga vode se javlja pri nožici nasipa gdje najčešće i počinje progresivna erozija. Zbog intenzivnije erozije pri nožici nego pri kruni dolazi do povećanja nagiba nizvodnog pokosa. Na taj način dolazi do erozije nizvodnog pokosa pri čemu se, zbog približno konstantne prelivne visine i konstantne veličine otvora, ne mijenja bitno protok kroz otvor.

U trenutku kada uslijed erozije zona erozije dosegne uzvodni rub krune nasipa odnosno uzvodni pokos, proširenje otvora u tijelu nasipa postaje znatno brže. Otvor u tijelu nasipa se širi vertikalno sve do temelja nasipa, a tek onda se nastavlja horizontalno širenje otvora po bokovima. Primijećeno je da su bočne strane otvora u tijelu nasipa prilikom rušenja vertikalne.



Slika 6 Erozijski nizvodnog pokosa nasipa (početna faza formiranja otvora) (Zhu, 2006)

Primjer napredovanja erozivnih procesa u profilu formiranja otvora u nasutoj brani je pokazan na slici 7.



Slika 7. Napredovanje erozivnih procesa u otvoru nasipa u funkciji vremena izmjeren na modelu (Zhu, 2006)

U novije vrijeme razvijeni modeli razlikuju pet faza razvoja otvora kako u nekoherentnim (Visser, 1998) tako i u koherentnim materijalima (Zhu, 2006). Prilikom modeliranja formiranja otvora u nasipu, najveći problem je određivanje intenziteta erozije uzrokovane tokom vode. Intenzitet erozije je definiran koeficijentom erodibilnosti  $M_e$  čija vrijednost se određuje eksperimentima ili na osnovu ekspertnih ocjena (Zhu, 2006).

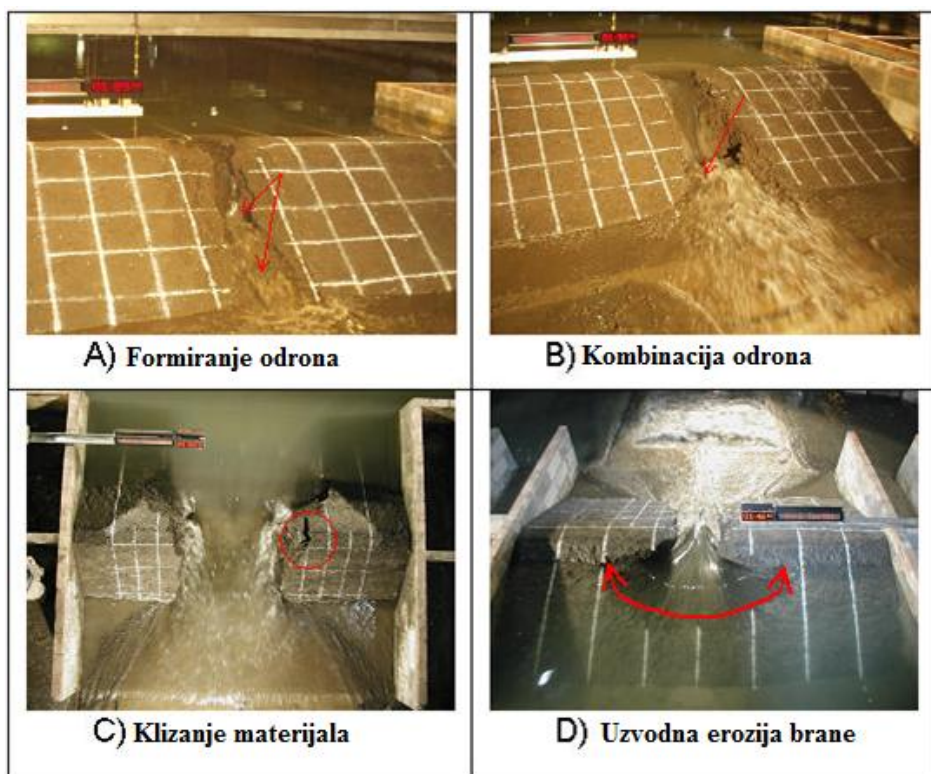
## 2.2 Laboratorijski modeli formiranja otvora u tijelu nasipa

U okviru istraživačkog programa pod nazivom *IMPACT* je izrađen niz laboratorijskih eksperimenata formiranja otvora u tijelu nasipa visine 0,5 – 0,6m (modeli u mjerilu 1:10). Ispitivani su nasipi od koherentnih i nekoherentnih materijala (Slika 9).

Prilikom izrade modela korišteni su materijali različitih granulometrija, mijenjan je oblik poprečnog presjeka te stupanj vlažnosti i zbijenosti tla. Promijenom vlažnosti ugrađenog materijala sa optimalne vrijednosti od 24% na 30% je pri istoj zbijenosti tla značajno povećana erodibilnost nasipa. Nasip čiji je materijal pri ugradnji imao optimalnu vlažnost znatno se bolje odupirao formiranju otvora. Krutost, čvrstoća i vododrživost, rastu s porastom zbijenosti tla.

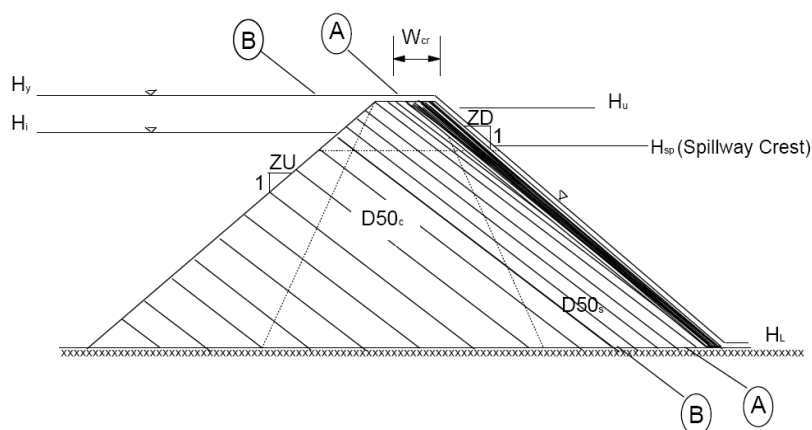
## 2.3 Numerički modeli

Danas postoji niz dostupnih programa za analizu formiranja otvora u nasipima i određivanje rezultirajućeg hidrograma. Jedan od najčešće korištenih modela je i BREACH (Fread, 1988) koji se zasniva na hidrauličkom pristupu, jednadžbama pronosa nanosa i principima geomehanike. Za računanje protoka kroz otvor se koriste jednadžbe preljeva i istjecanja kroz otvor koji se postepeno povećava uslijed erozije. Erodiranje nasipa a time i povećanje otvora se računa na osnovu modificirane Meyer-Peter i Mullerove jednadžbe za strme kanale.



Slika 8. Procesi formiranja otvora u modelu nasipa izgrađenog od koherentnog materijala

U primjerima u kojima se modelira rušenje uslijed prelijevanja, da bi započelo formiranje otvora razina vode mora biti viša od najniže kote krune nasipa. Erozija započinje na nizvodnoj strani nasipa što je na slici 9 prikazano linijom A-A. Prelijevanje uzrokuje formiranje kanala na nizvodnom pokosu. Protok kroz ovako formirani otvor se računa kao prelijevanje preko preljeva. Kada dno erozionog kanala dosegne profil B-B označen (slika 9) počinje erozija i uzvodnog pokosa. Dno erozionog kanala se tada spušta dok ne dosegne nožicu uzvodnog pokosa.



Slika 9. Poprečni presjek nasute brane sa parametrima za modeliranje rušenje uslijed prelijevanja (prema Fread,1998)

U okviru IMPACT projekta su rezultati mjerenja širenja otvora na pilot i fizikalnim modelima uspoređeni sa rezultatima modeliranja na matematičkim modelima. Modeli su ocjenjivani prema točnosti predviđanja vršnog protoka, razine vode u trenutku vršnog protoka, trenutka pojavljivanja vršnog protoka i krajnje širine otvora nasipa (širine nakon rušenja). Sudeći prema sveukupnim rezultatima došlo se do zaključka da su najpouzdaniji modeli zasnovani na programima BREACH i DEICH.

### 3. ZAKLJUČAK

U uvjetima prolaska vodnih valova u otvorenim koritima se ponekad na obrambenim nasipima uslijed prelijevanja ili procjeđivanja vode formiraju otvori koji uzrokuju istjecanja vode iz korita i plavljenje štićenih područja. Zbog velikih šteta koje poplave mogu uzrokovat u posljednje vrijeme je provedeno niz istraživanja sa ciljem sagledavanja mehanizama formiranja otvora i mogućnosti povećanja sigurnosti hidrotehničkih nasipa.

Istraživanjima na modelima je ustanovljeno da u uvjetima prelijevanja vode preko krune nasipa prvo dolazi do erozije nizvodnog pokosa. Kod homogenih nasipa, zbog veće erozije kod nožice nego pri kruni, nagib nizvodnog pokosa u otvoru postaje sve strmiji i strmiji. U ovoj fazi formiranja otvora nema značajnijeg povećanja protjecajnog profila niti protoka. U trenutku kada uslijed hidrauličke erozije novonastali otvor dosegne rub uzvodnog pokosa, širenje otvora u tijelu nasipa postaje znatno brže te se odgovarajuće povećavaju i protoci.

Kod projektiranja novih i sanacije postojećih nasipa treba posvetiti odgovarajuću pažnju erodibilnosti nizvodnog pokosa, kako bi se u početnim fazama usporio ili prekinuo proces formiranja otvora i time omogućilo smanjivanje ili izbjegavanje šteta. Potrebno je uspostaviti sustav mjerenja koeficijenta erodibilnosti nasipa.

Hidrauličkim analizama je dosad definirana potrebna visina nasipa kao i vodopropusnost. Prilikom projektiranja hidrotehničkih nasipa bi trebalo izraditi analizu mogućnosti rušenja nasipa u uvjetima prolaska vodnog vala. Analiza otpornosti nasipa na rušenja treba sadržavati odgovarajuće modele rušenja uslijed procjeđivanja kao i analizu otpornosti na rušenje uslijed prelijevanja preko krune što će povećati sigurnost hidrotehničkih nasipa u uvjetima prolaska vodnog vala.

### 4. LITERATURA

1. Fread D.L (1988): BREACH – *An Erosion Model for Earthen Dam Failures, Model Description*,
2. Höeg, K., Løvoll, A. And Vaskinn, K.A (2004): *Stability and breaching of embankment dams: field tests on 6 meter high dams*. The International Journal of Hydropower and Dams, Issue 5
3. Morris M.W, Hassan M.A.A.M., Vaskin K.A., (2007): *Breach formation: Field test and laboratory experiments*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 45 Extra Issue, pp. 9–17
4. RESCDAM (2000): Final report of Helsinki University of Technology, *The use of Physical Models in Dam-break Flood Analysis*,
5. RESCDAM (2002): *Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis*, Final report: contribution of Enel.Hydro – Polo Idraulico e Strutturale
6. Visser P.J (1998): *Breach Growth in Sand-Dikes*, Technische Universiteit Delft, Thesis,
7. Zhu Y. (2006): *Breach Growth in Clay-Dikes*, Technische Universiteit Delft, Thesis,