

Primljen / Received: 25.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 26.1.2018.

Prihvaćen / Accepted: 23.2.2018.

Dostupno online / Available online: 10.4.2018.

Mjerodavni vodostaji za dimenzioniranje hidrotehničkih nasipa i nasutih brana

Autori:



Željko Pavlin, dipl.ing.građ.
Elektroprojekt, d.d., Zagreb
zeljko.pavlin@elektroprojekt.hr



Prof.dr.sc. **Neven Kuspilić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
kuspa@grad.hr

Pregledni rad

Željko Pavlin, Neven Kuspilić

Mjerodavni vodostaji za dimenzioniranje hidrotehničkih nasipa i nasutih brana

U radu su prikazani različiti pristupi određivanja mjerodavnog vodostaja za analize funkcionalnih zahtjeva i zahtjeva za stabilnost konstrukcije pri projektiranju hidrotehničkih nasipa i nasutih brana retencija i akumulacija. Ukazuje se na različitu praksu pri određivanju mjerodavnih vodostaja u projektiranju, što rezultira različitom pouzdanošću nasutih brana i hidrotehničkih nasipa. Daje se također kritički osvrt na pristupe te donose preporuke za pristup definiranju mjerodavnih protoka i vodostaja za analizu stabilnosti.

Ključne riječi:

nasuta brana, hidrotehnički nasip, mjerodavni vodostaj, stabilnost

Subject review

Željko Pavlin, Neven Kuspilić

Reference water levels for the design of dykes and earthfill dams

Various approaches are presented in the paper with regard to the definition of reference water levels for the analysis of functional and structural stability requirements in the design of dykes and earthfill dams of retarding basins and water-storage reservoirs. It should be noted that various methods are used to define reference water levels at the design stage, which results in differing levels of reliability of earthfill dams and dykes. A critical review of current approaches is made, and recommendations are given for a proper approach to the definition of reference flows and water levels for stability analysis.

Key words:

earthfill dam, dyke, reference water level, stability

Übersichtsarbeit

Željko Pavlin, Neven Kuspilić

Relevante Wasserstände für die Dimensionierung von Aufschüttungen und aufgeschütteten Dämmen

In der Abhandlung werden unterschiedliche Ansätze für die Bestimmung relevanter Wasserstände für die Analyse funktionaler Anforderungen und Anforderungen an die Stabilität von Konstruktionen bei der Projektierung von hydrotechnischen Aufschüttungen und aufgeschütteten Dämmen der Retention und Akkumulation dargestellt. Hingewiesen wird auf die unterschiedliche Praxis bei der Bestimmung relevanter Wasserstände bei der Projektierung, was eine unterschiedliche Zuverlässigkeit bei den aufgeschütteten Dämmen und hydrotechnischen Aufschüttungen zur Folge hat. Darüber hinaus wird auch ein kritischer Rückblick auf die Ansätze dargelegt, und es werden Empfehlungen für den Ansatz bei der Festlegung relevanter Durchflüsse und Wasserstände für die Analyse der Stabilität gegeben.

Schlüsselwörter:

aufgeschütteter Damm, hydrotechnische Aufschüttung, relevanter Wasserstand, Stabilität

1. Uvod

Brane i hidrotehnički nasipi značajni su za razvoj društvene zajednice. Oni štite od poplava i omogućuju zadovoljenje potražnje vode za piće, navodnjavanje i industrijske potrebe; stvaraju uvjete za korištenje hidroenergetskog potencijala, omogućuju povećanje protoka u sušnim razdobljima te stvaraju uvjete za razne rekreacijske aktivnosti.

Osim što predstavljaju vrijedan resurs, brane i hidrotehnički nasipi također su izvor rizika za nizvodna područja i područja koja štite, budući da njihovo rušenje može uzrokovati neprihvatljivu štetu na imovini i gubitke života. Uzroci rušenja mogu biti prelijevanje krune, te narušavanje stabilnosti koje uzrokuje neodgovarajući izbor mjerodavnog vodostaja i neodgovarajući pristup dimenzioniranju građevine. Budući da se u praksi javljaju slučajevi narušavanja stabilnosti brana i nasipa kod vodostaja nižih od kote njihove krune u nastavku se razmatra određivanje mjerodavnog vodostaja za analize:

- funkcionalnih zahtjeva (zadovoljenje namjena),
- zahtjeva za konstrukciju (temeljni zahtjevi za građevinu).

U pogledu funkcionalnih zahtjeva određivanje kote krune hidrotehničkih nasipa i brana vezano je za određivanje mjerodavnog vodostaja na vodnoj strani i određivanje nadvišenja krune nad odabranim mjerodavnim vodostajem. Za hidrotehničke nasipe mjerodavni vodostaj definiran je protokom velike vode određenog povratnog razdoblja od koje se neko područje štiti. Za brane akumulacija i retencija mjerodavni vodostaj definiran je potrebnom ili raspoloživom veličinom prostora planirane akumulacije ili retencije, rješenjem građevine za evakuaciju voda i protokom velike vode koju treba propustiti kroz pregradni profil. U pogledu zahtjeva za stabilnost konstrukcije, mjerodavni vodostaj na vodnoj strani određuje opterećenje za analize geomehaničke i hidrauličke stabilnosti. Ovisno o rješenju nasute građevine pogotovo kod hidrotehničkih nasipa, bitno je i trajanje vodostaja kod velikih voda.

U radu se prikazuju pristupi određivanja mjerodavnog vodostaja za analize funkcionalnih zahtjeva i zahtjeva za stabilnost konstrukcije koji se primjenjuju u hrvatskoj praksi, kao i neki pristupi dani u smjernicama za projektiranje u svijetu. Navedeni pristupi su detaljno analizirani te su dani komentari, zapažanja i razmišljanja. Prikaz se temelji na razmatranju opsežnog fonda podataka, od kojih se u radu navode samo najreprezentativniji.

2. Funkcionalni zahtjev – određivanje mjerodavnog vodostaja i nadvišenja krune brane i hidrotehničkih nasipa

2.1. Općenito

Kote krune brana i hidrotehničkih nasipa određuju se tako da se iznad mjerodavnog vodostaja, koji se dobiva proračunom na temelju mjerodavnog protoka određenog povratnog razdoblja,

uključuju dodaci, pod nazivom nadvišenje. Definicije nadvišenja variraju od zemlje do zemlje i predstavljaju predmet projekta. Zbog specifičnosti pristupa, posebno će se razmatrati:

- hidrotehnički nasipi
- brane za akumulacije
- brane za retencije.

S obzirom na to da je određivanje kote krune vezano za određivanje mjerodavnog vodostaja i određivanje nadvišenja krune nad mjerodavnim vodostajem, razmatrat će se svaki element zasebno. Nadvišenja hidrotehničkih nasipa zbog lokanih uvjeta uzrokovanih utjecajem propusta i mostova neće se posebno obrađivati, ali se ovdje ističe da je takvim lokalnim mjestima potrebno posvetiti posebnu pažnju, jer lokalno povećavaju opasnost mogućeg prelijevanja krune hidrotehničkih nasipa.

2.2. Određivanje kote krune hidrotehničkih nasipa

2.2.1. Određivanje mjerodavnog vodostaja za hidrotehnički nasip

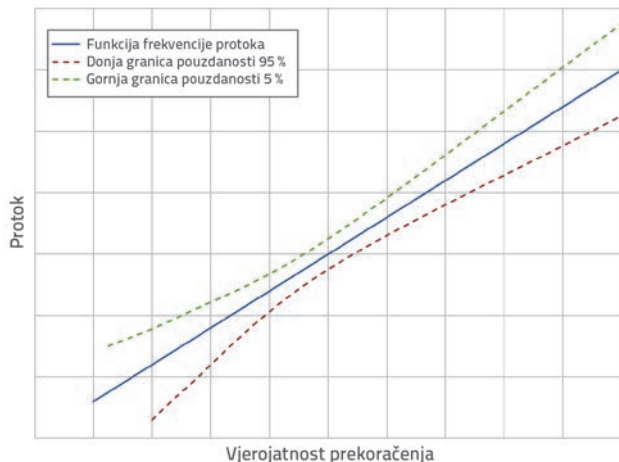
Mjerodavni vodostaj određuje se na temelju mjerodavne poplave, odnosno protoka odabranog povratnog razdoblja. Mjerodavni vodostaj moguće je odrediti na temelju dva pristupa [1]:

- *Deterministički*: mjerodavni događaj može se odrediti nacionalnom ili regionalnom regulativom. Mjerodavni vodostaj je vodostaj određen za mjerodavni protok i određuje se pomoću odnosa protok-vjerojatnost i odnosa vodostaj-protok za određenu vjerojatnost događaja. Obično je mjerodavni događaj povratnog razdoblja od 100 godina (jedan posto vjerojatnosti pojave) ili više.
- *Probabilistički*: početna razina obično se najprije postavlja primjenom determinističke metode. Hidraulički proračun se provodi na temelju protočnog presjeka i hidrauličkih parametara tako da se izračuna vodno lice s 90 ili 95 posto pouzdanosti za kritični poplavni događaj. Izračunana visina se ili potvrđuje ili se korigira analizom rizika, a može koristiti neki oblik Monte-Carlo simulacije i povezana je s analizom koristi i troškova.

Primjer determinističkog određivanja mjerodavnog vodostaja je dosadašnja praksa u Hrvatskoj, gdje su mjerodavni vodostaji određivani prema povratnim razdobljima mjerodavnih protoka koji su bili zadani u planskoj dokumentaciji *Hrvatskih voda* ili su bili zadani u projektnom zadatku.

Statistički izračun mjerodavnog protoka određenog povratnog razdoblja, a time i pripadajući vodostaj, ovise o duljini niza na temelju kojeg se izračun provodi. Tako se, uzimajući u obzir zahtjev za zaštitom od velikih voda određenog povratnog razdoblja uz fiksno nadvišenje krune, ovisno o duljini niza raspoloživih podataka na temelju kojeg se određuje mjerodavni protok, može dobiti različita pouzdanost zaštite.

Na nesigurnost predviđanja upozoreno je u [2, 13]. Elementi distribucije se procjenjuju sa statističkim momentima (prosjeak, standardna devijacija i koeficijent asimetrije) uzorka. Pretpostavka metode je da momenti uzoraka dobro odgovaraju momentima populacije svih godišnjih maksimuma protoka. Tijekom vremena, nova opažanja utječu na momente i promjenu parametara distribucije. Analizirajući statističke momente uzorka, mogu se izvesti zaključci vezani za raspon momenata populacije. Budući da su parametri funkcije vjerojatnosti pojave protoka matematičke funkcije momenata, može se izvesti zaključak o parametrima kroz matematičku analizu. Na primjer, može se izvesti zaključak o donjoj i gornjoj granici protoka koji određuju da srednja vrijednost parametra tipa log Pearson III ima vjerojatnost 0,90, odnosno omogućuje se opis nesigurnosti u funkciji frekvencije. Na osnovi takvog pristupa, može se provesti opisivanje nesigurnosti u procjenama očekivanog godišnjeg protoka i godišnje vjerojatnosti njegovog prekoračenja. Probabilistički opis nesigurnosti vjerojatnosti pojave protoka može se prikazati granicama pouzdanosti na prikazu funkcije, kao što pokazuje slika 1. Prikazana ograničenja su krivulje koje povezuju protok ili vodostaj za svaki slučaj vjerojatnosti prekoračenja izračunane vrijednosti. Na slici 1. su kao primjer prikazane tzv. 5-postotne i 95-postotne granice pouzdanosti čime je omeđeno područje koje ima 90 % pouzdanosti. Granične vrijednosti protoka koje međusobno povezane daju granice pouzdanosti, mogu se izračunati analitičkim postupkom.



Slika 1. Shematski prikaz granica pouzdanosti vjerojatnosti pojave protoka

Također treba napomenuti da se navedene statističke analize temelje na promatranju prošlosti. Statističkim analizama određeni mjerodavni protoci, i na temelju njih mjerodavni vodostaji, prema tome su, vezani uz vjerojatnost pojave u uvjetima kakvi su bili u prošlosti. S obzirom na projektnu dugotrajnost brana i nasipa, klimatske promjene ili varijacije klime, kao i moguće promjene u slivu, utječu na promjenu uvjeta u budućnosti u odnosu na uvjete na kojima su se temeljile statističke analize. Stoga su statističkim analizama određene veličine tijekom uporabe građevine podložne promjenama.

U zadnje vrijeme Hrvatske vode, u sklopu izrade Plana upravljanja rizicima od poplava, započele su korištenje pristupa koji se temelji na izradi karata rizika te se pristup zaštiti nekog područja temelji na analizi rizika i analize koristi i troškova rješenja zaštite sukladno [3]. Prema tome, za određivanje mjerodavnog protoka, a time i mjerodavnog vodostaja u Hrvatskoj, trebao bi se početi primjenjivati probabilistički pristup.

2.2.2. Određivanje nadvišenja za hidrotehnički nasip

U svijetu ne postoje jedinstveni kriteriji za nadvišenje hidrotehničkih konstrukcija nad mjerodavnim vodostajem.

U Hrvatskoj je nadvišenje nad mjerodavnim vodostajem određivano na temelju iskustva svjetske i naše prakse te je propisivano u planskoj dokumentaciji *Hrvatskih voda* ili projektnim zadatkom. Pri tome, iako to nije naglašavano, nadvišenje obuhvaća hidrološke i hidrauličke nesigurnosti pri određivanju mjerodavnog vodostaja, utjecaj vjetra, utjecaj valova, potrebu prekrivanja jezgre i sl. Dodatak zbog slijevanja kod hidrotehničkih nasipa, gdje se ocijenilo da bi mogao značajno utjecati na kotu krune hidrotehničkih nasipa, računao se geostatičkim analizama i uzimao se posebno kao dodatno nadvišenje, a u slučajevima gdje se ocijenilo da slijevanje nije značajno, pokrivalo se propisanim nadvišenjem.

Budući da ne postoje jednoznačni kriteriji u određivanju veličine nadvišenja, primjenjuju se različite norme, smjernice ili projektantska praksa. Pregled podataka iz svjetske prakse pokazuje [4] da se nadvišenja hidrotehničkih nasipa iznad projektiranog vodostaja mogu biti u rasponu od 0,5 do 2,0 metara (tablica 1.).

Tablica 1. Minimalno nadvišenje nad mjerodavnim vodostajem u svijetu [4]

Država	Rijeka	Nadvišenje [m]	Visina hidrotehničkih nasipa [m]
SAD	Mississippi	0,9	
	Huntington	1,0	
	Ironton	0,9	
Italija	Po	0,8-1,0	
Pakistan	Ind	1,2-1,8	4,0-7,0
Indija	Ganges	1,0-1,5	6,0
Vijetnam	Bed River	1,0	7,0
Burma	Irrawady	1,2	4,0-9,0
Tajvan	Pei-Hang	1,5	6,0
Kina	Hwang-Ho	1,6-2,0	
	Yang-Tse	1,0	7,0
Filipini	Agno & Panpanga	1,0	7,0
Japan	Tone	2,0	8,0
Mađarska	Dunav	0,5-1,0	3,0-5,0
	Tisa	1,0-1,6	

U svjetskoj se praksi zahtjev za fiksnom veličinom nadvišenja postupno zamjenjuje zahtjevom da projektanti odrede kotu krune na temelju procjene rizika i posljedica prelijevanja hidrotehničkih nasipa, uz realno predviđanje karakteristika i ponašanja hidrotehničkih nasipa (kao što je npr. slijeganje tijekom vremena). Pri tome treba voditi računa o sljedećem [1]:

- morfološkim promjenama koje se događaju tijekom vremena uzduž toka, a mogu utjecati na vodostaje
- promjenama u vodnim licima za sva povratna razdoblja koje proizlaze iz klimatskih promjena
- utjecajima valova i uspinjanju valova na pokos hidrotehničkog nasipa
- slijeganju temeljnog tla i slijeganju tijela hidrotehničkog nasipa
- lokalnim ili nacionalnim zahtjevima za minimum nadvišenja.

Ako se na hidrotehničkom nasipu predviđa konstrukcija ceste, tada bi se elementi cestovne konstrukcije trebali posebno dodati na prethodno određenu kotu krune.

Princip nadređenosti također bi trebalo uzimati u obzir pri određivanju krune hidrotehničkog nasipa uzduž toka. Naime, u uzdužnom presjeku hidrotehničkog nasipa potrebno je predvidjeti kotu krune, i to takvu da se, pri porastu protoka iznad protoka za koji je hidrotehnički nasip izračunan, u određenom kritičnom trenutku početak prelijevanja hidrotehničkog nasipa dogodi na područjima najmanjega rizika.

2.3. Određivanje kote krune brane

2.3.1. Određivanje mjerodavnog vodostaja za brane

Mjerodavni vodostaj za brane akumulacija i retencija definiran je zadržavanjem određenog volumena vode u akumulaciji ili retenciji i rješanjem evakuacijskih građevina. Zahtjevi za akumuliranjem vode proizlaze iz zahtjeva korisnika vode (za akumulacije) ili zahtjeva za zaštitom nizvodnog područja od poplava (retencije) te prirodnih ograničenja i ograničenja uslijed izgrađenosti. Određivanje potrebnog volumena akumulacije i retencije predmet je posebnih analiza koje se ovdje neće razmatrati. Određeni volumen akumulacije i retencije definira radni vodostaj. U slučaju preljeva s fiksnom kotom, radni vodostaj određuje i kotu krune preljeva. U slučaju preljeva s pokretnom opremom (zapornicama), obično je radni vodostaj ujedno i maksimalni vodostaj, iako ne i nužno.

Određivanje mjerodavnog vodostaja u akumulaciji i retenciji za potrebe definiranja kote krune brane, slijedi iz dimenzioniranja evakuacijskih građevina. Kod akumulacije preljeva, a kod retencija preljeva i temeljnog ispusta.

Mjerodavni vodostaj kojeg određuje kota krune preljeva i dimenzioniranje evakuacijskih građevina na mjerodavnu veliku vodu moguće je odrediti, kao i za hidrotehničke nasipe, na temelju dva generalna pristupa:

- Deterministički: mjerodavni događaj može se odrediti nacionalnom ili regionalnom regulativom. Mjerodavni vodostaj

je onaj koji nastaje pri evakuaciji mjerodavnog protoka i određuje se dimenzioniranjem preljeva kod akumulacija, odnosno preljeva i temeljnog ispusta kod retencija. U svjetskoj praksi se kod ovog pristupa koristi velikovodni val povratnog razdoblja koje je propisano na temelju klasifikacije brane prema posljedicama njenog rušenja [5-8]. Taj pristup obično je konzervativan kako bi se pružila razumna sigurnost i zaštita nizvodnog područja.

- Probabilistički: provodi se analiza rizika s obzirom na posljedice rušenja brane. Kada su volumeni akumulacija mali u odnosu na volumen vodnih valova kojima mogu biti izloženi, može se primijeniti i pristup analize inkrementnih posljedica. U tim slučajevima za mjerodavni vodni val može se odabrati onaj kod kojeg su, za nizvodno područje, posljedice rušenjem i bez rušenja brane gotovo jednake.

U Hrvatskoj ne postoji propisana klasifikacija brana prema posljedicama njihovog rušenja, pa stoga ni određivanje mjerodavnog protoka nije vezano uz analizu posljedica koje bi rušenje brane uzrokovalo na nizvodnom području. U hrvatskoj se praksi, za brane akumulacija primjenjuje deterministički pristup prema kojem je mjerodavna razina vode određena kotom krune preljeva i vodostajem koji se ostvaruje evakuacijom preko preljeva obično 1000-godišnje velike vode. Prema kriteriju koji je dao Nonveiller [9], najviša razina vode određena je kotom krune preljeva i vodostajem pri evakuaciji preljevom 1000-godišnje ili 10000-godišnje velike vode, ovisno o naseljenosti nizvodnog područja i potrebi postizanja sigurnosti uslijed mogućeg rušenja brane. Pri tome se izbor povratnog razdoblja prepušta projektantu, odnosno često ga propisuje investitor u projektnom zadatku. Nailazak velike vode računa se na punu akumulaciju.

Volumen retencije i evakuacijske građevine dimenzioniraju se prema zahtjevu za transformacijom vodnog vala određenog povratnog razdoblja. Povratno razdoblje volumena vodnog vala, koji treba transformirati u retenciji do sada je uglavnom bilo u hrvatskoj praksi određeno projektnim zadatkom. S obzirom na [3], kao i u slučaju hidrotehničkih nasipa, ovaj pristup se mijenja i temelji se na analizi rizika te analizi koristi i troškova. Mjerodavni vodostaj u retenciji u praksi se obično određuje proračunom nailaska vodnog vala 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na praznu retenciju. Evakuacija poplavnog vala se odvija kroz temeljni ispust i preliv.

Pri dimenzioniranju retencija često se ne razlikuje vodni val maksimalnog protoka određenog povratnog razdoblja od vodnog vala maksimalnog volumena istog povratnog razdoblja. Za dimenzioniranje volumena retencije obavezno treba računati s vodnim valom maksimalnog volumena određenog povratnog razdoblja. U praksi se preliv, a posljedično tome i mjerodavni vodostaj dimenzionira na nailazak vodnog vala volumena 1000 godišnjeg povratnog razdoblja na praznu retenciju. Ovaj pristup može biti manjkav budući da retencija ne mora biti nužno prazna kada se uz jaku i kratkotrajnu kišu može javiti vodni val koji ima maksimalni protok 1000 godišnjeg povratnog razdoblja, ali može imati znatno manji volumen. Iz tog razloga trebalo bi za određivanje mjerodavnog vodostaja u retenciji provesti analize nailaska vodnog vala:

Tablica 2. Projektna poplava (eng. *Inflow Design Flood - IDF*) ovisno o kategoriji prema posljedicama rušenja za inicijalne analize [8]

Klasifikacija prema posljedicama rušenja	Opis klasifikacije potencijalne opasnosti	Mjerodavna velika voda IDF
Visoki	Mogući gubitak života zbog rušenja brane ili pogreške u upravljanju (ekonomski gubitak, šteta u okolišu, ili rušenje životno važnih objekata mogu također biti vjerojatan, ali nisu potrebne za ovu klasifikaciju)	PMF
Značajni	Zbog rušenja brane ili pogreške u upravljanju nije vjerojatan gubitak ljudskog života, ali može uzrokovati ekonomski gubitak, štetu u okolišu ili rušenje životno važnih objekata	0,1% vjerojatnosti 1000-godišnja velika voda
Niski	Zbog rušenja brane ili pogreške u upravljanju nije vjerojatan gubitak ljudskih života ali su moguće manje ekonomski gubici i/ili štete u okolišu	1% vjerojatnosti 100-godišnja velika voda

- čiji je maksimalni volumen 1000 godina povratnog razdoblja na praznu retenciju i
- čiji je maksimalni protok 1000 godina povratnog razdoblja na punu retenciju,

te na temelju tako dobivenih rezultata odrediti mjerodavni vodostaj u retenciji. U svijetu se za određivanje mjerodavnog protoka za dimenzioniranje preljeva i mjerodavnog vodostaja u akumulaciji i retenciji primjenjuje pristup vezan uz posljedice rušenja brane [5-8]. Osnovni princip se zasniva na činjenici da se brana čije rušenje može prouzročiti velike štete i gubitke ljudskih života projektira s proporcionalno većim zahtjevima od brane čije bi rušenje uzrokovalo manje štete ili manje ljudskih žrtava. U smjernicama temeljenim na preporukama ICOLD-a, FEM-e i USBR-a, na osnovi kojih se određuje mjerodavna poplava ili stanje u akumulaciji, upotrebljavaju se sljedeći pojmovi:

- projektna poplava za preljev (eng. *Spillway Design Flood - SDF*): poplava koja je mjerodavna za redovni rad preljeva, njegovo hidrauličko dimenzioniranje i razmatranje karakteristika za osiguranje AFC (eng. *Acceptible Flood Capacity*);
- poplava kod koje brana vrhuni (eng. *Dam Crest Flood - DCF*): poplava kod koje je razina mirne vode u akumulaciji jednaka koti krune brane
- prihvatljivi protočni kapacitet (eng. *Acceptible Flood Capacity - AFC*): protočni kapacitet koji ima brana uz nadvišenje koje osigurava odgovarajuću razinu sigurnosti od poplave uslijed rušenja brane
- projektna poplava (eng. *Inflow Design Flood - IDF*): poplava koja je mjerodavna za projekt brane i evakuacijskih građevina
- sigurnosna poplava (eng. *Safety Check Flood - SCF*): ekstremna poplava koju brana mora izdržati i pri tome sigurno izvršavati sve funkcije, uz mogućnost pojave manjih oštećenja koja mogu umanjiti sigurnost ali ne dovode do rušenja brane
- vjerojatnost godišnje pojave (eng. *Annual Exceedance Probability - AEP*): vjerojatnost da će neka poplava biti premašena u bilo kojoj godini.

Mjerodavni protok, SDF ili IDF, određuje se u rasponu od 100-godišnjeg povratnog razdoblja do najveće poplave koja bi se mogla javiti (eng. *Probable maximum flood - PMF*), a izbor se temelji na kategoriji posljedica rušenja kojoj brana pripada. Kategorija se određuje prema potencijalnim gubicima života (eng. *Potential loss of life - PLL*) i gubicima materijalnih vrijednosti

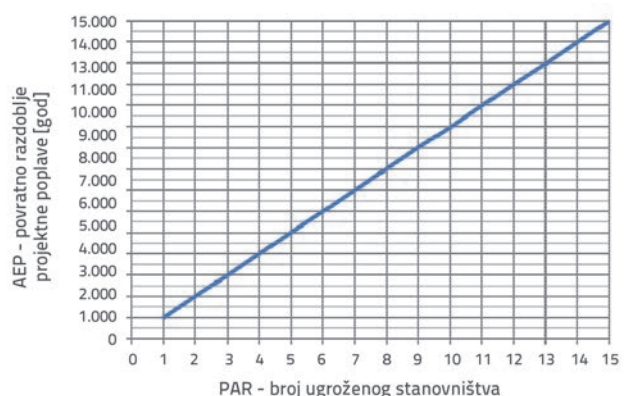
koji bi nastali kao posljedica rušenja brane pri pojavi razmatrane poplave. Kao primjer (tablica 2.) prikazani su propisani IDF koji se koriste za inicijalne analize [8]. Na primjeru Queenslanda, Australija, za male brane u koje ulaze brane:

- niže od 12 m,
- ugroženo stanovništvo (PAR - Population at Risk) je manje od 15,
- preljev je slobodan – bez zapornica,
- dubina poplave na ugroženom području je manja od 3 m i
- umnožak dubine i brzine toka na poplavljenom području je manji od $4,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$,

daje se jednadžbom (1) jednostavna veza za određivanje povratnog razdoblja za definiranje IDF [5]:

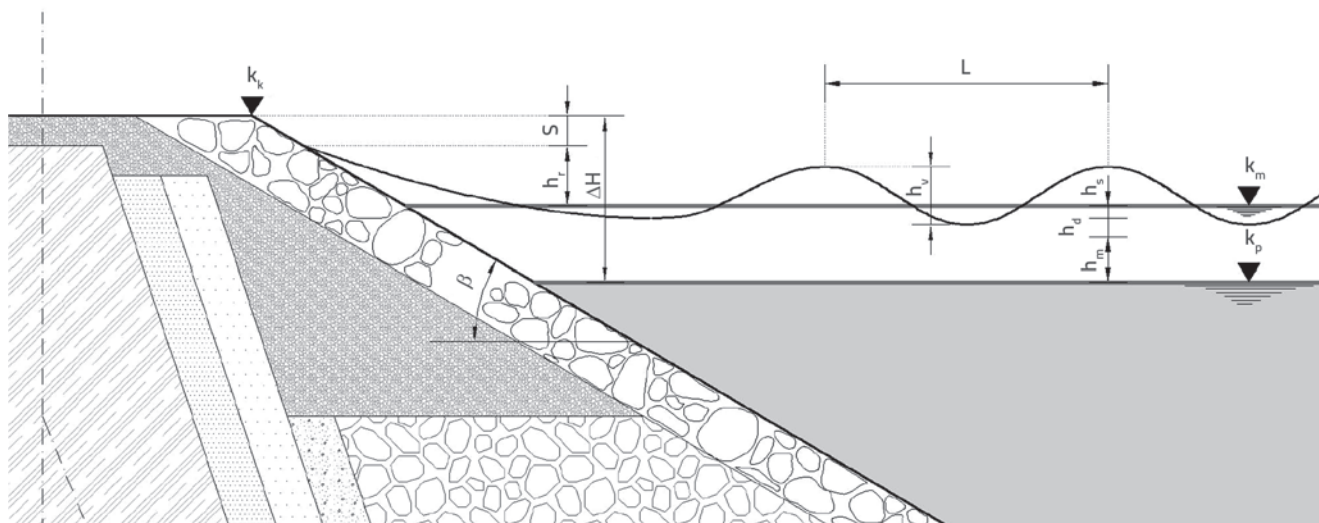
$$AEP = \left(\frac{1}{PAR} \right) \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Za tako određeno povratno razdoblje određuje se ulazni hidrogram za IDF za račun brane i evakuacijskih građevina. Za dani pristup daje se grafički prikaz (slika 2) određivanja vjerojatnosti pojave projektne poplave ovisno o broju ugroženog stanovništva.



Slika 2. Povratno razdoblje za projektnu poplavu ovisno o broju ugroženog stanovništva

Za ostale slučajeve predviđaju se metode propisane u odgovarajućim smjernicama Australskog društva za velike brane [6, 7] (eng. *Australian National Committee on Large Dams*)



Slika 3. Elementi za račun kote krune brane

- ANCOLD), prema kojima se određuje AEP i ulazni hidrogram za IDF.

U svjetskoj praksi se postupci koji se predviđaju za određivanje mjerodavnog protoka razlikuju, ovisno o području u koje se primjenjuju, što je regulirano lokalnim smjericama i pravilnicima, a temelje se na analizi rizika i posljedicama šteta uslijed rušenja brane.

2.3.2. Određivanje nadvišenja za brane

Kao i za hidrotehničke nasipe, u svijetu ne postoje jedinstveni kriteriji za određivanje nadvišenja brana nad mjerodavnim vodostajem. Iako se u literaturi posebno ne spominje nadvišenje jezgre, odnosno vododrživog elementa brane nad mjerodavnim vodostajem, nego se spominje nadvišenje krune u odnosu na mjerodavni vodostaj, pri određivanju nadvišenja treba voditi računa o konstrukciji krune brane iznad vododrživog elementa brane.

Nadvišenje brane treba određivati od slučaja do slučaja s obzirom na mnoge čimbenike, uključujući veličinu odabranog IDF, predvidivo trajanje visokih vodostaja kod IDF, veličinu privjetrišta i karakteristike akumulacije za stvaranje valova, vjerojatnosti pojave velike brzine vjetra iz kritičnog smjera, uspinjanje vala po pokosu na temelju hrapavosti i nagiba pokosa, mogućnosti smanjenja kapaciteta preljeva zbog nanosa i/ili zbog rukovanja i otpornosti brane na eroziju uslijed preljevnih valova. U hrvatskoj praksi se nadvišenje za nasute brane još uvijek određuje prema normi [10], kojim se propisuje da kota krune nadvisuje mjerodavni vodostaj za „slobodnu visinu“ koja obuhvaća:

- projektnu valnu visinu
- visinu uspinjanja vala po pokosu brane
- dodatnu sigurnosnu visinu koja iznosi 0,5-0,7 m.

Pri tome nadvišenje prema toj normi ne smije biti manje od 1,5 m za brane niže od 15 m odnosno 2,0 m za brane više od 15 m. Prema udžbeniku [9], kojim se u praksi također koristi, kota

krune brane k_k određena je kotom krune preljeva k_p i veličinom ΔH koja je (slika 3.) jednaka sumi:

- visine preljevne mlaze (h_r) iznad krune preljeva pri evakuaciji mjerodavne velike vode
- visine uspinjanja vala po pokosu (h_v) kod najjačeg vjetra u najnepovoljnijem smjeru i koja ovisi o nagibu uzvodnog pokosa β , projektnoj valnoj visini h_v i vrsti obloge uzvodnog pokosa
- porastu razine jezera uz branu (h_p) zbog pojave plime u smjeru potiskivanja vode vjetrom - ova pojava može doći do izražaja kod širokih i plitkih jezera dok je kod malih i dubokih neznatna i može se uključiti u sigurnosni dodatak
- porastu razine uslijed polaganih oscilacija (h_m) – sejša – budući da za određivanje njene veličine nema pouzdane metode, ta se veličina prema ocjeni uključuje u sigurnosni dodatak
- sigurnosnog dodatka (S) od 0,3 do 1,5 m. U seizmički aktivnim područjima ovisno o veličini jezera preporuka je da sigurnosni dodatak iznosi od 1,5 do 3,0 m.

Pri tome izbor povratnog razdoblja mjerodavne velike vode na koju se računa preljevni mlaz nije vezan uz vjerojatnost pojave tijekom projektnog trajanja, već se prepušta odluci projektanta ili se propisuje projektnim zadatkom. I kod određivanja projektne valne visina nije definirana vjerojatnost pojave najjačeg vjetra. Smjer brzina i učestalost vjetra su promjenljivi i ovisi o morfologiji doline u kojoj se nalazi vodena površina, a podaci o vjetru se registriraju na meteorološkim stanicama koje su obično udaljene od razmatrane lokacije. Stoga se može razmatrati i pouzdanost određivanja visine vala, koja značajno utječe na definiranje veličine nadvišenja.

Jansen [11] navodi da kriterij nadvišenja varira te da je jedan od kriterija, za zemljane brane s visokim rizikom, mogućnost evakuacije PMF ili da može izdržati maksimalni potres bez prelijevanja krune. Analize provedene u [13], koje se temelje na ICOLD-ovim preporukama [14, 15], pokazuju da bi se projekti brana trebali temeljiti na SCF uz vodostaj u akumulaciji blizu razine krune brane.

Tablica 3. Povratna razdoblja za karakteristični i projektni vodostaj ovisno o projektnom trajanju građevine

n - projektno trajanje [godine]	Povratno razdoblje p_d za karakteristični vodostaj H_{kv} (vjerojatnost prekoračenja u projektnom trajanju $P = 50\%$)	Povratno razdoblje p_d za projektni vodostaj H_{pv} (vjerojatnosti prekoračenja u projektnom trajanju $P = 1\%$)
10	15	1.000
50	75	5.000
100	150	10.000
120	180	12.000

Analogno tome u našoj se praksi za određivanje kote krune brane akumulacije često primjenjuje i dodatni kriterij prema kojem kota krune brane ne smije biti niža od vodostaja u akumulaciji pri kojem se osigurava evakuacija 10000 g velike vode, a za retenciju da ne smije biti niža od vodostaja koji se postiže pri sigurnoj evakuaciji vodnog vala maksimalnog volumena 10000 godišnjeg povratnog razdoblja koji dolazi na praznu retenciju. Nadvišenje uslijed slijeganja brane izračunava se geotehničkim proračunom i predviđa se kao nadvišenje izračunane kote krune, dodatno za veličinu očekivanog slijeganja [10].

3. Zahtjevi za stabilnost konstrukcije – određivanje mjerodavnog vodostaja za analize hidrauličke i geomehaničke stabilnosti

Vodostaj koji je dobiven kao mjerodavan za ispunjavanje funkcionalnih zahtjeva, odnosno vodostaj na temelju kojega se uz nadvišenje definira kota krune brane i hidrotehničkog nasipa, obično se u hrvatskoj praksi uzima kao mjerodavan i kod analiza hidrauličke i geomehaničke stabilnosti brana i hidrotehničkih nasipa.

Ovakav odabir vodostaja za analize stabilnosti može biti u suprotnosti s elementima na temelju kojih se definira nadvišenje brane. Naime, ako su u nadvišenju krune brane uključene nepouzdanosti vezane za hidrauličko-hidrološke analize vezane za određivanje mjerodavnog vodostaja za ispunjavanje funkcionalnih zahtjeva, tada bi trebalo, kod analize hidrauličke i geomehaničke stabilnosti, uzimati u obzir povišeni vodostaj barem za veličinu koja uključuje navedene nepouzdanosti.

Vodostaji koji su mjerodavni za analizu stabilnosti hidrotehničkih nasipa i nasutih brana ne moraju biti i nisu identični vodostajima na osnovi kojih se određuje kota njihovih kruna.

S obzirom na projektnu dugotrajnost hidrotehničkih nasipa i brana, potrebno je, pri određivanju mjerodavnog vodostaja za analize stabilnosti, voditi računa i o vjerojatnosti njegovog premašenja tijekom projektnog trajanja [13-15] te o trajanju visokih vodostaja u slučaju hidrotehničkih nasipa.

Pri analizi stabilnosti hidrotehničkih nasipa i nasutih brana potrebno je odabrati slučaj čija je vjerojatnost pojave vrlo mala tijekom projektnog trajanja analizirane građevine. Vjerojatnost (P) prekoračenja pojave nekog događaja, vjerojatnosti pojave (p_d) u projektnom trajanju (n) dana je jednadžbom:

$$P = 1 - (1 - p_d)^n \quad (2)$$

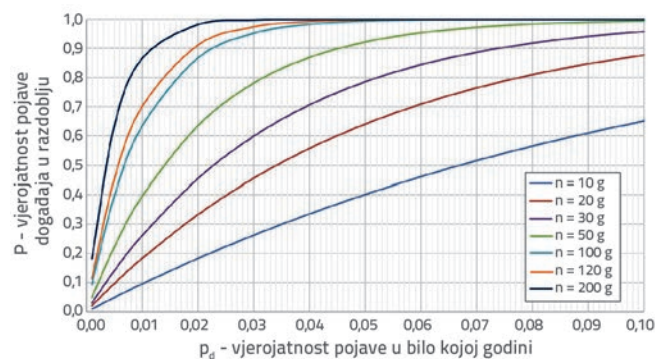
gdje je p_d vjerojatnost pojave nekog događaja u bilo kojoj godini, n je projektno trajanje u godinama, a P vjerojatnost prekoračenja pojave razmatranog događaja u projektnom trajanju. Za potrebe analiza stabilnosti definiraju se [12]:

- karakteristični vodostaj, H_{kv} , najnepovoljniji vodostaj koji će se vjerojatno dogoditi za projektno stanje
- projektni vodostaj, H_{pv} , najnepovoljniji vodostaj koji se može pojaviti za projektno stanje.

Obično se za karakteristični vodostaj odabire vodostaj koji ima povratno razdoblje ne manje od trajanja građevine, odnosno prema [12] preporuka je $H_{kv-50\%}$ - vodostaj koji ima najviše 50% vjerojatnosti prekoračenja u projektnom trajanju građevine. Za ovaj slučaj provođenje analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti predviđa se uz korištenje parcijalnih faktora za opterećenje.

Za projektni vodostaj prema [12] preporuka je $H_{pv-1\%}$ - vodostaj koji ima najviše 1% vjerojatnosti prekoračenja u projektnom trajanju građevine. Provođenje analiza mehaničke otpornosti i stabilnosti predviđa se bez korištenja parcijalnih faktora za opterećenje.

Kad se analizira hidraulička stabilnost, mjerodavni je slučaj koji daje veće opterećenje. Kad se analizira geomehanička stabilnost, granično stanje globalne stabilnosti (eng. *Ultimate Limit State* - ULS), stanje nakon kojeg dolazi do rušenja konstrukcije i kod kojeg dolazi do ugrožavanja sigurnosti ljudi i dobara, tada je mjerodavan projektni vodostaj bez korištenja parcijalnih faktora za opterećenje.

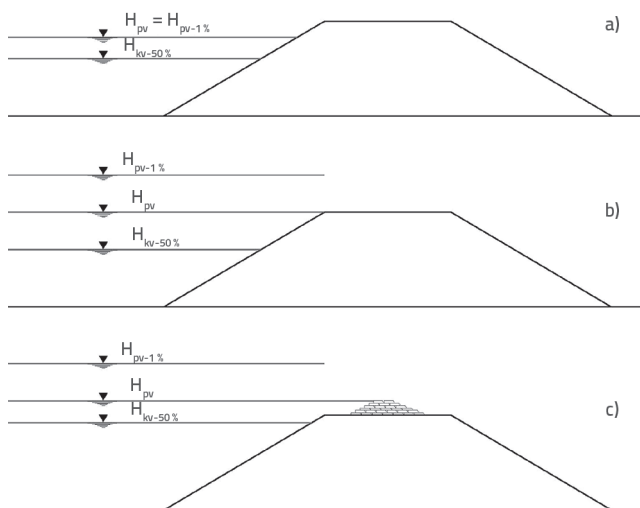


Slika 4. Odnos vjerojatnosti godišnje pojave i pojave događaja u određenom razdoblju

Za naprijed navedeni prijedlog vjerojatnosti prekoračenja u projektnom trajanju, na temelju jednadžbe (2) daju se povratna razdoblja (tablica 3., slika 4.) karakterističnog i projektnog vodostaja ovisno o projektnom trajanju.

Na temelju naprijed navedenog daje se prijedlog određivanja H_{kv} i H_{pv} ovisno o projektnoj situaciji koju određuje mjerodavni vodostaj koji je definiran funkcionalnim zahtjevima i nadvišenjem.

Tako bi se mehaničke otpornosti i stabilnosti za nasipe i brane čija bi kota krune bila viša od $H_{pv-1\%}$ provesti za vodostaj jednak $H_{pv-1\%}$ (slika 5.a). Za nasipe čija bi kota krune zbog dokazane potrebe nižeg stupnja zaštite trebala biti niža od $H_{pv-1\%}$ potrebno je analizirati mehaničke otpornosti i stabilnosti za vodostaj H_{pv} na razini krune (slika 5.b). Za slučaj da se na konstrukciji predviđa mogućnost postavljanja zečjih nasipa radi eventualnog povećanja stupnja zaštite branjenog područja, potrebno je u račun mehaničke otpornosti i stabilnosti nasipa uzeti u obzir povišeni vodostaj H_{pv} uslijed postavljanja zečjih nasipa (slika 5.c).



Slika 5. Mjerodavni vodostaji za analizu stabilnosti ovisno o projektnoj situaciji

Poučeni iskustvom pri evakuaciji katastrofalno velike vode na brani Oroville u Kaliforniji kada je došlo do problema stabilnosti evakuacijskih građevina potrebno je, kad je riječ o branama omogućiti sigurnu evakuaciju voda i za projektnu veliku vodu, odnosno za povratno razdoblje od minimalno 1% vjerojatnosti prekoračenja u projektnom trajanju koje nije manje od 100 godina te za taj slučaj provesti i analizu stabilnosti evakuacijskih građevina.

4. Zaključak

Kod dimenzioniranja hidrotehničkih nasipa i nasutih brana razlikujemo dva zahtjeva koje treba zadovoljiti:

- funkcionalni zahtjev (zadovoljenje namjena)
- zahtjev za konstrukciju (temeljni zahtjevi za građevinu),

što za posljedicu ima i dva mjerodavna vodostaja za njihovo dimenzioniranje. Razlikujemo mjerodavni vodostaj za dimenzioniranje u pogledu zadovoljenja funkcionalnih zahtjeva od mjerodavnog vodostaja za određivanje mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije. Mjerodavni vodostaji koji proizlaze iz zadovoljenja funkcionalnih zahtjeva posljedica su analiza o potrebi zaštite nekog područja. Mjerodavni vodostaji koji se služe za analizu mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije predstavljaju predvidiva opterećenja koja mogu djelovati na konstrukciju i pri kojima ne dolazi do njenog rušenja, neprihvatljivih deformacija ili oštećenja koja su nerazmjerna uzroku.

Pri definiranju mjerodavnih vodostaja, zbog specifičnosti uvjeta i zahtjeva, treba razlikovati: brane za akumulacije, brane za retencije i hidrotehničke nasipe.

U Hrvatskoj se za ispunjavanje funkcionalnih zahtjeva akumulacija, pri definiranju njihovog korisnog volumena, primjenjuju pristupi ovisno o njihovoj namjeni kao i drugdje u svjetskoj praksi. No, za definiranje mjerodavnog vodostaja, koji je posljedica mjerodavnog protoka koji treba evakuirati i koji služi za određivanje kote krune brane akumulacije, ne postoji nacionalna regulativa ni smjernice već se primjenjuje projektantska praksa.

Kod definiranja volumena retencija i određivanja mjerodavnog vodostaja za ispunjenje funkcionalnih zahtjeva nasipa, a kao dijelovi sustava obrane od poplave potaknuti Direktivom [3], mijenja se dosadašnji pristup administrativnog određivanja i uvodi se pristup koji se temelji na analizi rizika. Pri definiranju mjerodavnog vodostaja za određivanje kote krune brane retencija stanje je identično kao i kod brana akumulacija.

Za potrebe analiza stabilnosti, s obzirom na projektnu dugovječnost hidrotehničkih nasipa i brana, mjerodavni vodostaj treba odrediti prema vjerojatnosti njegovog premašenja tijekom projektnog trajanja. Ako takav pristup nije moguć, iz bilo kojeg razloga, treba utvrditi dodatak i potrebu takvog dodatka na mjerodavni vodostaj koji je posljedica zadovoljenja funkcionalnih zahtjeva te s tako povećanim stanjem provesti analize stabilnosti. Dodatak bi trebao pokriti u najmanju ruku nepouzdanosti koje imaju za posljedicu utjecaj na moguće povišenje vodostaja kao i moguće događaje pri uporabi, npr. postavljanje zečjih nasipa na krunu.

Određivanje mjerodavnog protoka, na temelju kojeg se određuje mjerodavni vodostaj, temelji se na statističkim analizama nizova u prošlosti. Pri tome duljina niza na kojem se analiza provodi bitno utječe na pouzdanost rezultata te bi trebalo provoditi analizu pouzdanosti. S obzirom na dugovječnost brana i nasipa, klimatske promjene ili varijacije klime utječu na promjenu uvjeta u budućnosti u odnosu na uvjete na kojima su se temeljile statističke analize, te su statističkim analizama određene veličine tijekom uporabe podložne promjenama. To je razlog zašto treba uvesti kontrolu mjerodavnih protoka i vodostaja te po potrebi mjere

prilagodbe novim uvjetima tijekom razdoblja korištenja. S obzirom na to da se zbog dugovječnosti može osim klimatskih uvjeta mijenjati i stanje nizvodno od razmatranih građevina uslijed izgradnje i korištenja prostora, mijenja se

i rizik koji brane i nasipi predstavljaju za nizvodno područje. Stoga treba i u tom pogledu predvidjeti provođenje kontrolnih proračuna te po potrebi mjere prilagodbe kako bi se održala potrebna sigurnost nizvodnih područja.

LITERATURA

- [1] CIRIA: The International Levee Handbook (ILH), CIRIA, London, 2013.
- [2] Griffin, R.H.: EM1110-2-1619 – Engineering and Design, Risk based analysis for flood damage reduction studies, Department of Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 1996.
- [3] Direktiva 2007/60/EC Europskoga parlamenta i vijeća o procjeni i upravljanju poplavnim rizicima, Službeni list Europske unije, L 288/27.
- [4] Framji, K.K.: Manual of Flood Control Methods and Practices, International Commission on Irrigation and Drainage, Delhi, 1983.
- [5] DEWS: Guidelines on Acceptable Flood Capacity for Water Dams, State of Queensland, Department of Energy and Water Supply, Australia, 2013.
- [6] ANCOLD: Guidelines on Dam Safety Management, Australian National Committee on Large Dams, Australia, 2003.
- [7] ANCOLD: Guidelines on Selection of Acceptable Flood Capacity for Dams, Australian National Committee on Large Dams, Australia, 2000.
- [8] FEMA: Selecting and Accomodating Inflow Design Floods for Dams, Federal Emergency Management Agency, 2013.
- [9] Nonveiller, E.: Nasute brane, projektiranje i građenje, Školska knjiga, Zagreb, 1983.
- [10] HRN U.C5.020/80 – Projektiranje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa, Tehnički uvjeti.
- [11] Jansen, R.B.: Advanced Dam Engineering, Van Nostrand Reinhold, New York, 1988.
- [12] Pickles, A., Sandham, S., Simpson, B., Bond, A.: Application of Eurocode 7 to the design of flood embankments, CIRIA, London, 2014.
- [13] Lemperiere, F., Vigny, J.P.: Shall we forget the traditional design flood?, Hydropower&Dams, 12 (2005) 2, pp. 140-147
- [14] ICOLD: Bulletin 82; Selection of Design Flood, 1992.
- [15] ICOLD: Bulletin 125; Dams and Floods, 2003.