

Temeljni ispusti

Martinović, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:141859>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Luka Martinović

TEMELJNI ISPUSTI

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Luka Martinović

TEMELJNI ISPUSTI

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor: prof. dr. sc. Eva Ocvirk

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Luka Martinović

THE BOTTOM OUTLETS

FINAL EXAM

prof. dr. sc. Eva Ocvirk

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

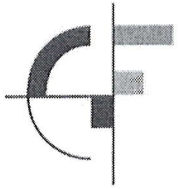
Mentor:

Potpis mentora:

Eva Ocvirk

Digitally signed by Eva Ocvirk
Date: 2024.09.17 12:47:01 +02'00'

Komentor:



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Luka Martinović, 0082067866

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

Temeljni ispusti

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

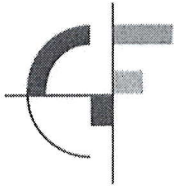
izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

17.9.2024.

Potpis:

Luka Martinović



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

Luka Martinović, 16701061631

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

Temeljni ispusti

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

Eva Ocvirk

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

24.9.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

17.9.2024.

Potpis:

Luka Martinović

SAŽETAK

U ovom završnom radu opisani su temeljni ispusti kao evakuacijske građevine na branama. Opisane su glavne funkcije temeljnog ispusta te pojedini njegovi dijelovi kako bi se na što bolji način prikazao princip rada ispusta. Nadalje, navedeni su primjeri različitih načina izvedbe temeljnih ispusta kroz nasute i betonske brane. U drugom dijelu rada dan je opis proračuna temeljnih ispusta te primjer proračuna pražnjenja akumulacije.

Ključne riječi: temeljni ispusti, brana, akumulacija, zatvarači, regulacijske građevine, evakuacijske građevine

SUMMARY

In this final paper, the basic discharges as evacuation structures on dams are described. The main functions of the bottom outlet and its individual parts are described in order to present the principle of operation of the outlet in the best possible way. Furthermore, there are examples of different ways of performing basic discharges through embankment and concrete dams. In the second part of the paper, a description of the calculation of the main outlets and an example of the calculation of the discharge of the reservoir is given.

Key words: the bottom outlets, dam, reservoir, closures, regulation buildings, evacuation buildings

SADRŽAJ

SAŽETAK	iv
SUMMARY	v
SADRŽAJ	vi
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O TEMELJNIM ISPUSTIMA.....	2
3. IZVEDBA TEMELJNIH ISPUSTA.....	5
3.1. Dijelovi temeljnog ispusta.....	5
3.1.1. Provodnici.....	5
3.1.2. Zatvarači	7
3.1.3. Slapište.....	11
3.1.3.1. Umirujući bazen	12
3.1.3.2. Ski jump – odbačeni skok.....	12
3.1.3.3. Potopljeni ski-jump.....	13
3.2. Kavitacijska erozija.....	13
3.3. Primjeri i načini izvedbe	14
3.3.1. Brana Boundary.....	15
3.3.1.1. Općenito.....	15
3.3.1.2. Izvedba.....	15
3.3.2. Brana Jablanica.....	16
3.3.2.1. Općenito.....	16
3.3.2.2. Izvedba.....	16
3.3.3. Brana Sainte – Croix.....	17
3.3.3.1. Izvedba.....	17
3.3.4. Brana Hoover.....	18
3.3.4.1. Općenito.....	18
3.3.4.2. Izvedba.....	18
4. OSNOVE PRORAČUNA.....	19
5. PRIMJER PRORAČUNA PRAŽNJENJA AKUMULACIJE	21
6. ZAKLJUČAK.....	26
POPIS LITERATURE	27
POPIS SLIKA.....	28
POPIS TABLICA.....	30

1. UVOD

Prvi primjeri upravljanja tokom vode spominju se još od prije 5000 godina. Plemena naseljavaju nizine uz rijeke Eufrat i Tigris, a zbog lakog pristupa vodi stječu uvjete za uspješno obrađivanje zemlje. Tako se počinju razvijati građevine za upravljanje tokom vode kako bi usavršili navodnjavanje, odnosno riješili problem zadržavanja vode. U početku to su bili bazeni koji se ispune vodom tijekom poplava pa se kanalima navodnjavaju do polja. [1]

Temeljni ispusti evakuacijske su građevine na tijelu brane koji igraju važnu ulogu u upravljanju i korištenju vodnih snaga. Pravilno dimenzioniranje ispusta omogućava kontrolu razine vode u akumulacijskom jezeru te prihvaćanje velikog vodnog vala, odnosno zaštitu od poplava. Također, koriste se u slučaju potrebe remonta hidromehaničke opreme te ispuštanja mulja i sedimenata.

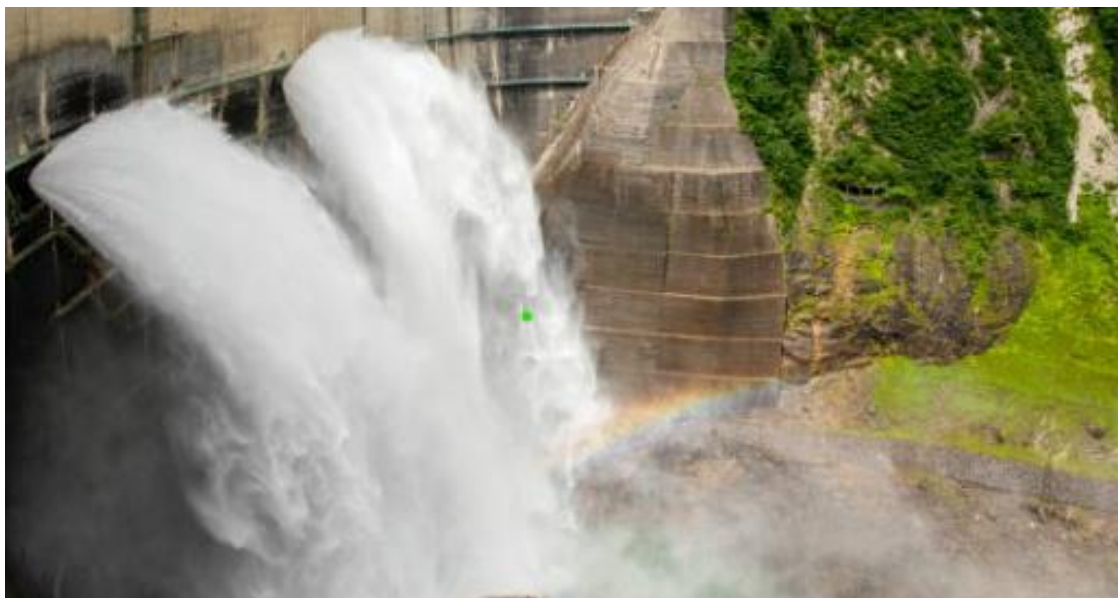
U ovom radu opisani su ispusti i dijelovi ispusta. Također, spomenuta je kavitacijska erozija kao jedna od glavnih uzroka oštećenja u evakuacijskim građevinama zbog velikih brzina vode. Opisana su rješenja izvedbe temeljnih ispusta na nasutim i betonskim branama. Nadalje, u radu su prikazane osnove proračuna temeljnih ispusta te primjer proračuna pražnjena akumulacije.

2. OPĆENITO O TEMELJNIM ISPUSTIMA

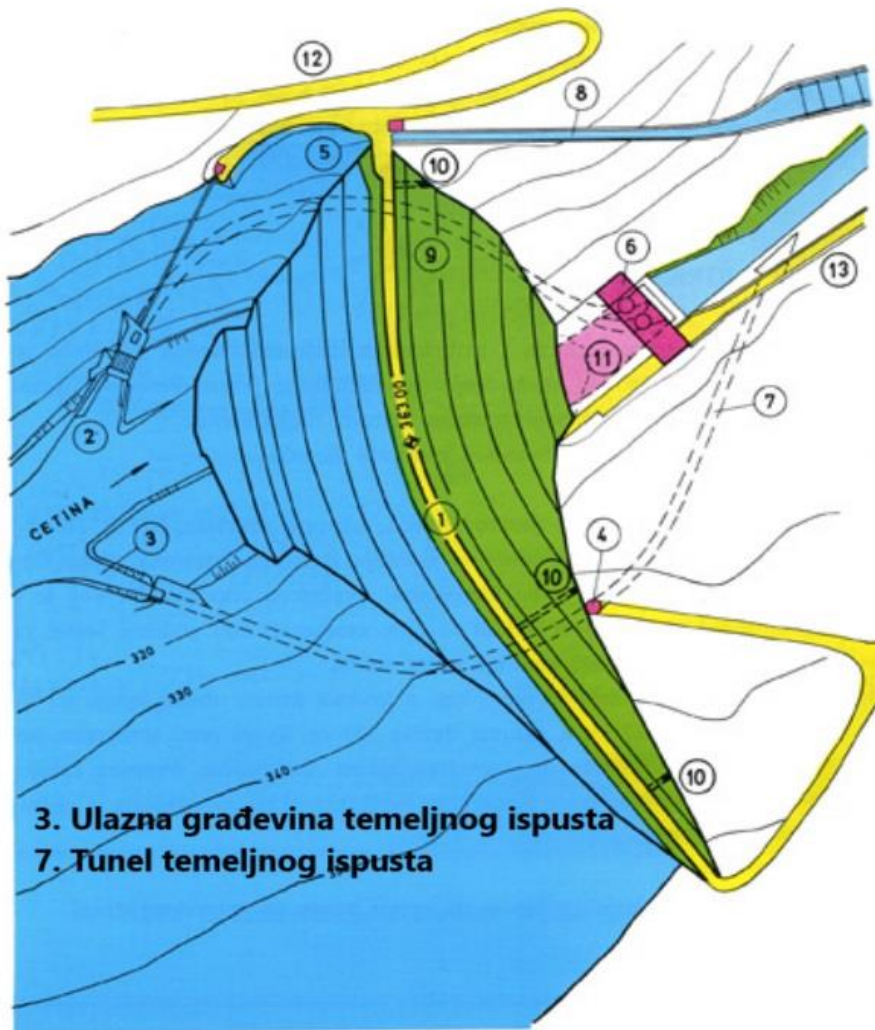
Temeljni ispusti evakuacijske su građevine na tijelu brane koji se primarno koriste u svrhu djelomičnog ili potpunog pražnjenja akumulirane vode. Također, možemo ih opisati kao hidrotehničke evakuacijske građevine koje se koriste za kontrolirano ispuštanje vode radi redovitog pregleda objekta ispod minimalnog radnog nivoa, remonta hidromehaničke opreme, ispuštanja muljevutih struja i produkata anaerobnog raspadanja, radi osiguranja vodoprivrednog i biološkog minimuma u nizvodnom koritu, vodoopskrbe te ponekad radi prihvaćanja velikog vodnog vala, odnosno zaštite od poplava [1].

Iz prethodnog odlomka može se navesti nekoliko glavnih funkcija temeljnih ispusta kao evakuacijskih građevina na branama, a to su kontrola razine vode u akumulacijskom jezeru, sigurnosna funkcija (zaštita od poplava), ispuštanje mulja i sedimenata (očuvanje volumena akumulacije) te ekološka funkcija (očuvanje biološke raznolikosti u nizvodnim područjima).[1]

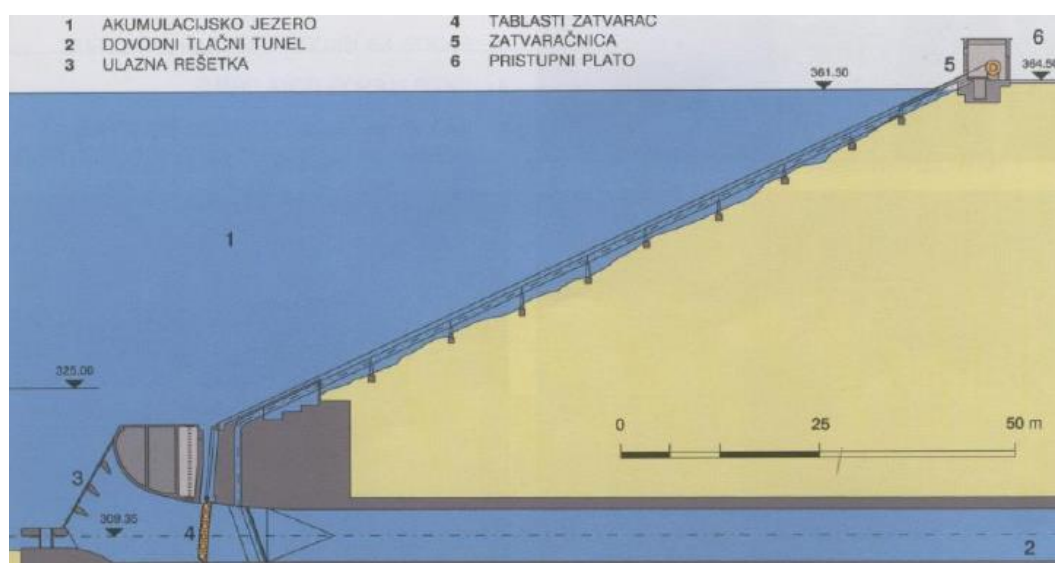
Ispusti, evakuacijske građevine koje zahtijevaju veliku preciznost u fazi projektiranja i izvedbe radi smanjenja štetnih utjecaja vode i njihovog pravilnog funkcioniranja, postavljaju se kroz tijelo brane (slika 1), većinom kod betonskih brana te kroz okolni teren brana (slika 2 i 3), kod nasutih brana. [1]



Slika 1.: Temeljni ispust kroz tijelo brane Kurobe [8]

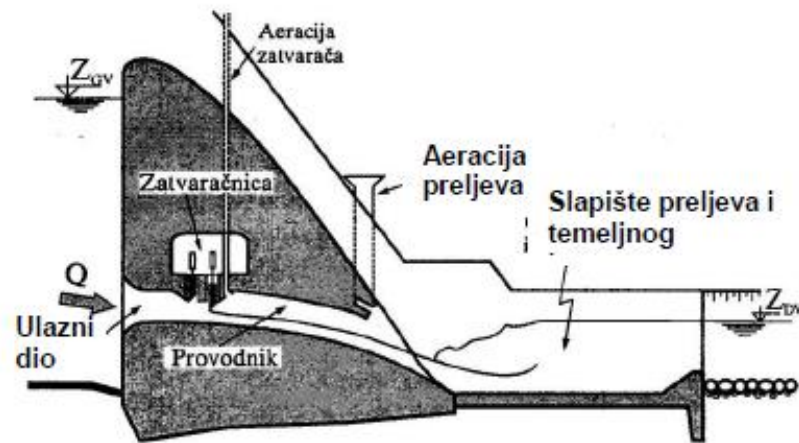


Slika 2.: Situacija brane Peruča na rijeci Cetini [6]



Slika 3.: Temeljni ispust ispod brane Peruča na rijeci Cetini [6]

Temeljni ispust brane sastoji se od nekoliko značajnih dijelova koji zajedno pridonose kontroliranom ispuštanju vode iz akumulacijskog jezera. To su ulazne građevine, provodnici, kontrolni dio (zatvaračnica sa zatvaračem), izlazni dio te slapišta (slika 4). [2]



Slika 4.: Karakteristični poprečni presjek brane kroz temeljni ispust [2]

Osnovna zadaća u fazi projektiranja brana i temeljnih ispusta kao evakuacijskih građevina je dimenzionirati ispuste na način koji omogućuje učinkovito i sigurno upravljanje vodom unutar akumulacije, odnosno važno je osigurati pražnjenje akumulacije unutar zadanog vremena. [6]

3. IZVEDBA TEMELJNIH ISPUSTA

U ovom poglavlju posebna pažnja posvećena je raznim načinima izvedbe temeljnih ispusta na branama, s naglaskom na različite tehničke pristupe i konstrukcijske oblike. Između ostalog, bit će opisana osnovna zadaća pojedinih dijelova temeljnih ispusta kako bi se bolje upoznao njihov princip rada.

Velike brzine vode predstavljaju jedan od većih problema kod projektiranja i izvedbe temeljnih ispusta. Problemi kao što su erozija, oštećenja uslijed vibracija, kavitacija i neadekvatna disipacija energije mogu uzrokovati strukturalno i mehaničko pogoršanje i otkazivanje. Stoga, kod izvedbe temeljnih ispusta važno je izabrati odgovarajući materijali za cijevi, predvidjeti mjere za sprječavanje curenja u nasip i dizajnirati odgovarajuće prijelaze kako ne bi došlo do gubitka tlaka u cjevovodu. [3]

3.1. Dijelovi temeljnog ispusta

Dijelovi temeljnog ispusta su :

- Ulazna građevina
- Provodnici
- Zatvarači
- Izlazni dio
- Slapišta

3.1.1. Provodnici

Provodnici su hidrotehničke građevine koji služe za transport vode. U temeljnim ispustima to su elementi koji provode vodu iz akumulacijskog jezera do nizvodnog područja brane. U izgradnji provodnika koriste se različiti materijali kako bi zadovoljili određene uvjete predviđene u fazi projektiranja brana i ispusta. Odabir pojedinih vrsta materijala ovisi o mogućnostima izgradnje, raspoloživosti, troškovima i održavanju. Najčešće korišteni materijali u izgradnji provodnika temeljnih ispusta su armirani beton, plastika (termoplastika i duroplast) i metal (čelik, nodularno željezo i lijevano željezo). Provodnici su izloženi svakojakim utjecajima, naročito oni koji prolaze kroz nasipe te je zbog toga potrebno odabrati odgovarajući materijal za njihovu izgradnju. [3,4]

Materijali koji se koriste za izgradnju provodnika u temeljnim ispustima su :

- Beton
- Plastika
- Čelik

Glavna prednost betona u izgradnji provodnika temeljnih ispusta je prilagodljivost različitim uvjetima na gradilištu. Mogu se izvesti sa ojačanim betonom lijevanim na licu mjesta i kao predgotovljeni betonski elementi. Beton može izdržati velike unutarnje tlakove i često se koristi u brani koja se gradi na stabilnim temeljima. U temeljnim ispustima se koristi kada je potrebna dugotrajnost jer može trajati više od 100 godina. Međutim, zbog agresivnog djelovanja okolnog tla i vode, vijek trajanja može biti ograničen ako se ne primjene mjere zaštite. [4]

Plastika, poput polietilena (PE) i polivinil klorida (PVC) koristi se u uvjetima kada su korozivni utjecaji vode i tla previše agresivni za beton ili metal. Budući da je plastika otporna na koroziju, koristi se u uvjetima gdje beton ne bi dugo izdržao. Međutim, kod nasipnih brana često se ugrađuju sa betonskom oblogom radi veće čvrstoće. [4]

Čelik se koristi kada odabir materijala provodnika u temeljnom ispustu zahtijeva veliku čvrstoću. Otporni su na velike tlakove, ali su podložni koroziji pa se koriste premazi ili obloge za zaštitu od korozije. U slučaju izvedbe tunelskih ispusta, koristi se armirano betonska podloga i premazi na bazy epoxy smola. [1,4]

Oblici provodnika u temeljnim ispustima su :

- Kružni
- Pravokutni
- Ovalni

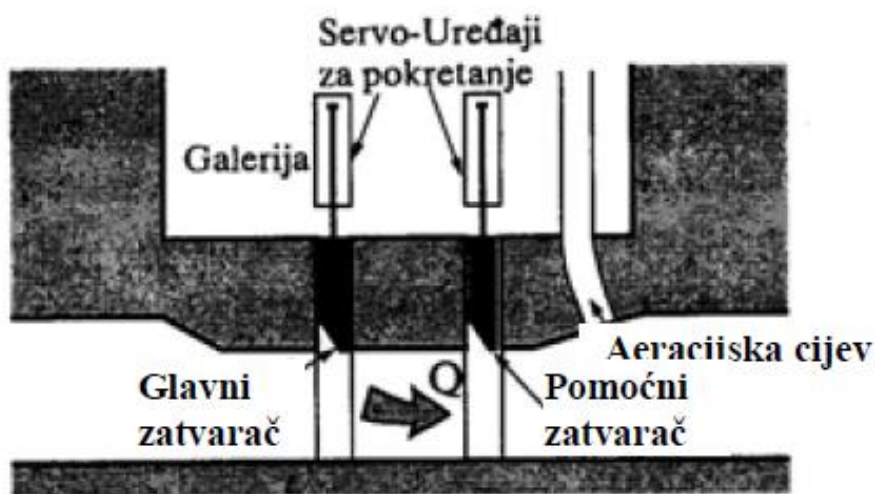
Najčešće korišteni provodnici u temeljnim ispustima su kružnog poprečnog presjeka zbog ravnomjerne raspodjele opterećenja. Oblik je učinkovit za protok pod pritiskom i smanjuje mogućnost unutarnje erozije brane. Kod korištenja predgotovljenih kružnih betonskih elemenata potrebno je osigurati vodonepropusnost. [4]

Provodnici sa pravokutnim poprečnim presjekom koriste se kada je potrebna velika količina protoka kroz temeljni ispust. Njihova mana je povećana koncentracija naprezanja u kutovima. [4]

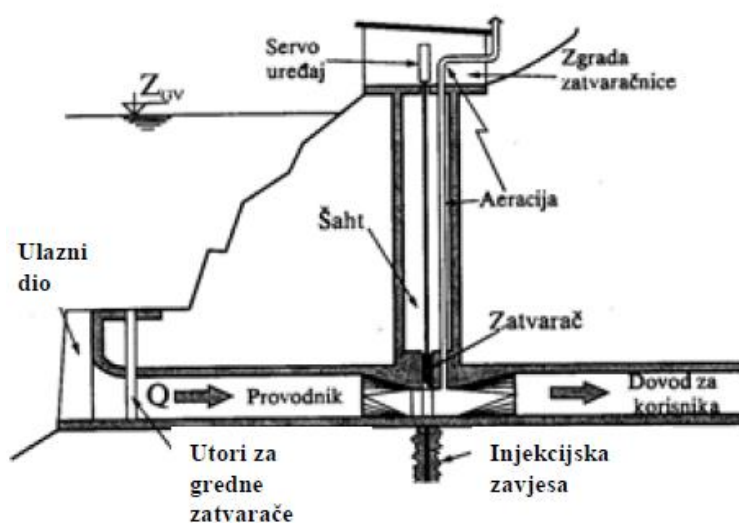
Ovalni poprečni presjeci koriste se u temeljnim ispustima gdje su veliki hidraulički tlakovi. Ovi oblici smanjuju koncentracije naprezanja, a izvode se sa betonskim podlogama radi veće stabilnosti. [4]

3.1.2. Zatvarači

U provodnike se ugrađuju zatvarači koji omogućuju regulaciju protoka kroz temeljni ispust. Dijele se u dvije velike skupine prema zahtjevima koji se postavljaju. U prvu skupinu spadaju zatvarači kojima se povremeno rukuje, odnosno oni koji su potpuno zatvoreni ili potpuno otvoreni. U drugu skupinu spadaju zatvarači koji djelomičnim ili potpunim otvaranjem reguliraju istjecanje vode kroz temeljni ispust. [1] Zatvaračnice, mjesta gdje se nalaze mehanizmi za pokretanje zatvarača mogu biti dubinske (slika 5), neposredno iznad zatvarača ili površinske (slika 6), iznad razine vode u akumulaciji. [6]



Slika 5.: Skica dubinske zatvaračnice [6]



Slika 6.: Skica površinske zatvaračnice [6]

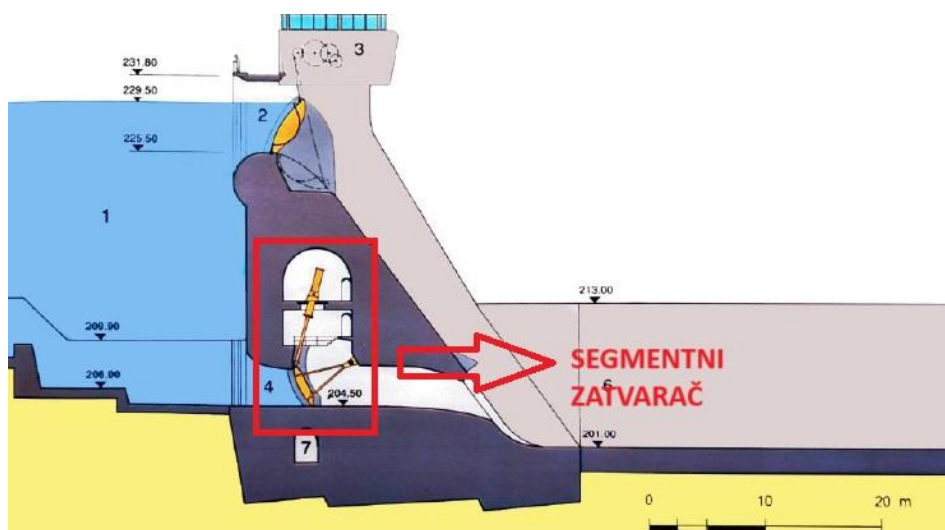
Mogu se izvesti kao :

- Pločasti i segmentni
- Leptirasti i kuglasti
- Konusni i iglasti

Pločasti (slika 7) i segmentni (slika 8) koriste se na dovodima velikog poprečnog presjeka s tlakovima do 100 mVS. Manja naprezanja u osloncu te jednostavnija i jeftinija ugradnja prednosti su pločastog zatvarača, dok su prednosti u segmentnom zatvaraču manja pogonska snaga za podizanje zatvarača, bolja otpornost vibracije i veća krutost konstrukcije, lakše i pouzdanije brtvljenje te mogućnost pojave kavitacije je manja. [2]

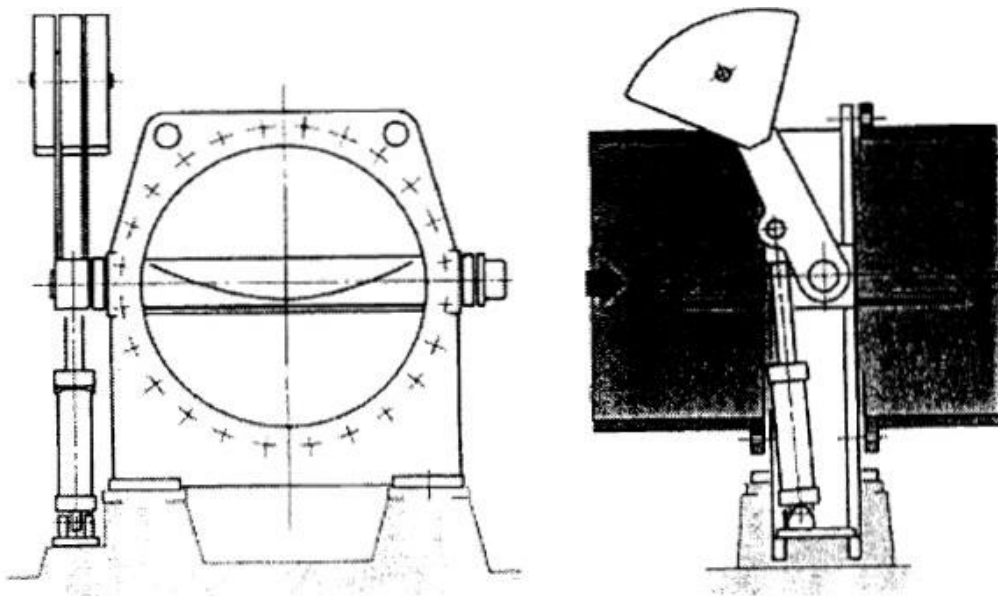


Slika 7.: Pločasti zatvarači na ulazu u malu HE Varaždin [6]

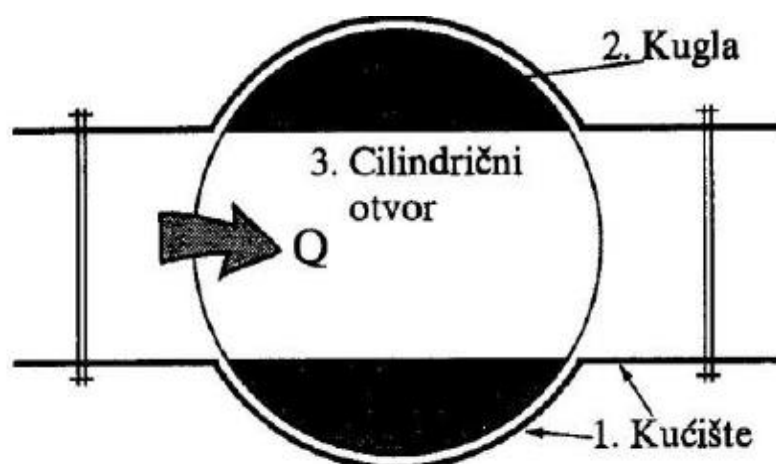


Slika 8.: Segmentni zatvarač, Brana Valići [6]

Leptirasti (sa vertikalnom ili horizontalnom osovinom) i kuglasti havarijski su zatvarači koji se mogu koristiti pri vrlo velikim tlakovima. Prednost leptirastog zatvarača (slika 9) leži u tome što je relativno lagan i malih dimenzija, jednostavan te pouzdan u korištenju, dok su veliki lokalni gubitci njegova mana. Vrlo mali hidraulički gubitci prednost su kuglastog zatvarača (slika 10), dok je njegova mana velika težina i visoka cijena. [2]



Slika 9.: Leptirasti zatvarač s horizontalnom osovinom [1]



Slika 10.: Skica kuglastog zatvarača [2]

Konusni zatvarač (slika 11) je regulacijski čija je prednost laka i ekonomična konstrukcija, mogućnost jednostavnog ispuštanja nanosa i sedimenta, a mane su prskanje vode i vibracije koje se javljaju zbog pomicanja točke odljepljivanja mlaza. Iglasti zatvarač (slika 12)

je regulacijski koji se koristi kod lučnih brana kada se mlaz želi točno usmjeriti bez prskanja. [2] Osjetljivost na kavitaciju i nanos te visoka cijena i složenost konstrukcija mana je iglastog zatvarača. Tipovi igličastih zatvarača su :

- Igličasti zatvarač tipa Larner – Johnson
- Diferencijalni igličasti zatvarač
- Cjevasti zatvarač
- Zatvarač sa šupljim mlazom [1]



Slika 11.: Ispust kroz Howell-Bunger (konusni) zatvarač [9]



Slika 12.: Igličasti zatvarač na brani Bull Run [10]

U temeljnim ispustima posebnu pažnju treba posvetiti zatvaračima jer je to najosjetljivija točka hidrauličkog sustava. Ulazne građevine moraju biti zaštićene izvedbom odgovarajućih rešetki kako se veći lebdeći elementi ne bi zaglavili u ispustu. Iza rešetke često se nalazi sigurnosni zatvarač koji se zatvara pod jednostranim a otvara pod obostranim pritiskom. Uzvodi sigurnosni zatvarač u većini slučaja izvodi se kao pločasti vozni – kotrljajući zatvarači sa točkovima. [1]

U slučaju kada je uzvodni zatvarač leptirast koristi se posebna 'by pass' cijev koja služi za izjednačavanje hidrostatičkog pritiska s uzvodne i nizvodne strane leptirastog zatvarača. Također, zatvarač mora biti dobro ozračen sa aeracijskom cijevi. Leptirasti zatvarači mogu se koristiti na početku tlačne cijevi ispusta ili ispred nizvodnog regulacijskog zatvarača. [1]

Zatvarači na nizvodnoj strani uvijek su regulacijskog tipa. Kod ovakvih zatvarača važna je brzina zatvaranja jer o njoj ovise hidrodinamički efekti u provodniku. Regulacijski tip zatvarača je konusni zatvarač Howell-Bunger (slika 11). Otvaranjem ovog tipa zatvarača nastaje mlaz u obliku lepeze. Zbog disperzije mlaza potrebna je velika slobodna površina, ali ne prijeti erozija korita. Također, prednost zatvarača tipa Howell-Bunger je ispuštanje velikih količina suspendiranog nanosa. [1]

Segmentni zatvarači također su regulacijski, a primjenjuju se kod ispusta sa velikim protjecajem i gdje postoji opasnost od taloženja nanosa na ulaznoj građevini, podizanjem segmentnog zatvarača lako se ispire. [1]

3.1.3. Slapište

Temeljni ispusti evakuacijske su građevine koje vodu iz akumulacije propuštaju velikim brzinama. Voda koja istječe iz tijela brane ima veliku kinetičku energiju pa je zbog toga potrebno dimenzionirati prostor koji služi za disipaciju, odnosno odbacivanje energije.

Najveća količina energije izgubi se kroz vrtloge, odnosno turbulencije koji nastaju prilikom prelaska iz silovitog u mirno tečenje, dok se preostali dio energije utroši na energiju trenja na preljevu i brzotoku te na gubitak pri udaru mlaza od površinu. Dimenzije i oblik slapišta određuju se prema geološkom sastavu tla i topografije terena te na temelju protočnog toka nizvodno od brane. [6]

Slapišta mogu biti izvedena na različite načine, a ovise o karakteristikama i širini riječne doline.

3.1.3.1. Umirujući bazen

Slapište je koje se koristi za padove do 50 metara. U ovom načinu izvedbe slapišta energija se disipira turbulencijama koje nastaju prelaskom iz silovitog u mirno tečenje, odnosno javlja vrtložni valjak hidrauličkog skoka. Gabarite koje treba odrediti kod umirujućeg bazena (slika 13) su :

- Širina slapišta
- Duljina slapišta
- Kota dna
- Visina bočnih zidova
- Dimenzije i raspored elemenata za disipaciju energije [2]



Slika 13.: Primjer umirujućeg bazena [6]

3.1.3.2. Ski jump – odbačeni skok

Ovaj način pogodan je za izvedbe kod vrlo visokih brana. U izboru slapišta ski odskok vrlo je povoljan i jednostavan izbor te se zbog toga često odabire kao izlazni dio evakuacijskih građevina. [6] Parametre koje je potrebno odrediti su :

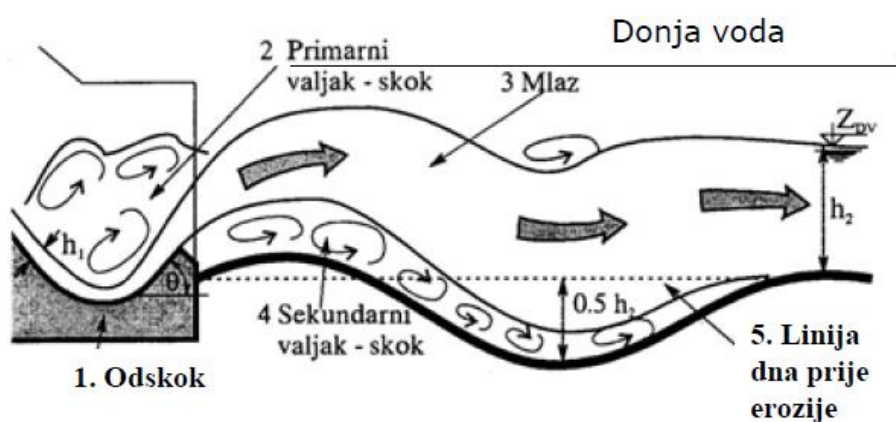
- Visinski položaj tjemena odskoka
- Radijus odskoka
- Kut odskoka
- Duljinu odskoka
- Kut udara u donju vodu [2]

Proračunom kosog hica za kruto tijelo može se odrediti putanja mlaza vode, odnosno mjesto na koje voda udara o dno korita. Izvedbom odskoka mlaz se nastoji što više odbaciti

od objekta kako ne bi došlo do potkopavanja temelja i narušavanja stabilnosti konstrukcije. Posljedica udara mlaza je stvaranja rupe u koritu zbog erozijskog djelovanja vode. [1]

3.1.3.3. Potopljeni ski-jump

Razlika ovog načina izvedbe slapišta je kontrolirano potapanje mlaza donjom vodom nakon odskoka. Ova tehnika izrade izvodi se kada je donja voda dovoljno visoka, odnosno potrebna je veća dubina voda nego kod uobičajenog slapišta. Prednost potopljenog odskoka (slika 14) je izvedba konstrukcije manjih dimenzija te manja erozija korita. [6]



Slika 14.: Potopljeni ski-jump [6]

3.2. Kavitacijska erozija

Veliki protoci i hidrostatički pritisak uvjetuju izgradnju sa velikom debljinom i masom što zahtijeva velike sile u podizanju i spuštanju zatvarača. Kavitacijska erozija jedan je od većih problema koji se javlja zbog velikih brzina vode ispod zatvarača. Javlja se kada tlak u protoku vode padne na vrijednost tlaka zasićene vodene pare. Posljedica je stvaranje mjehurića ispunjenih parom koja se brzo kondenzira te nakon prelaska u područja višeg tlaka mjehurići implodiraju uz pojavu nepoželjnih udarnih tlakova. [5]

Oštećenje uzrokovano kavitacijom (slika 15) možemo kontrolirati na sljedeće načine :

- Ojačanjem mjesta u konstrukciji gdje se pojavljuje kavitacija
- Izračunavanjem indeksa kavitacije
- Odabir povoljnijih profila protočnog toka
- Prozračivanje toka pomoću aeracijske cijevi [4]

Na mjestima gdje se pojavljuje rizik od kavitacijske erozije potrebno je izvesti aeraciju protoka pomoću ozračnog okna (aeracijske cijevi). Ova tehnologija pokazala se kao djelotvorna metoda u smanjenju oštećenja uzrokovanih kavitacijom te je iz tog razloga korištena u većini suvremenih konstrukcija. [5]



Slika 15.: Oštećenje od kavitacije na ploči ventila [11]

3.3. Primjeri i načini izvedbe

Dimenzioniranje ispusta temelji se na propuštanju što veće količine vode kroz što manje protočne površine. Posljedica toga su velike brzine vode koje uzrokuju štetne utjecaje kao što su vibracije i kavitacijska erozija koje negativno utječu na stabilnost brane. Budući da postoje mnogi štetni utjecaji vode dimenzioniranju ispusta treba se pažljivo pristupiti. Odabirom odgovarajućih glatkih površina i izbjegavanjem naglih lomova u provodnicima možemo smanjiti i produljiti vijek trajanja konstrukcije. [1]

Na sljedećim primjerima prikazat će se različiti načini izvedbe temeljnih ispusta kao evakuacijskih građevina na branama.

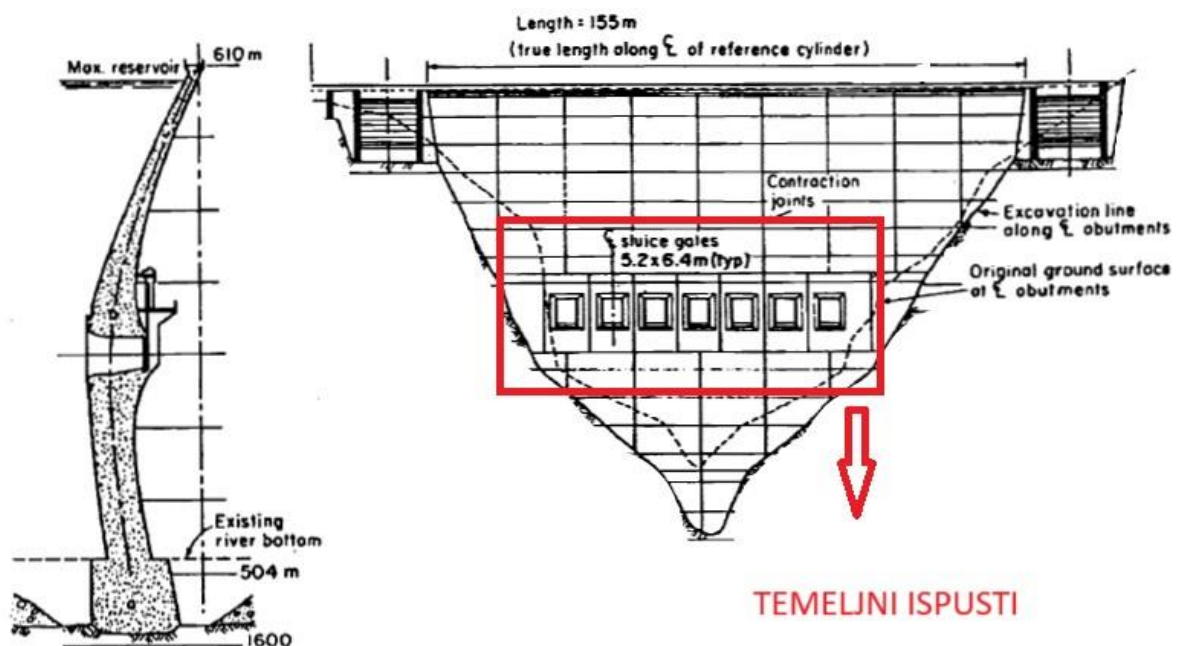
3.3.1. Brana Boundary

3.3.1.1. Općenito

Brana Boundary (slika 16) nalazi se na granici između SAD-a i Kanade, blizu grada Estevana. Visine 100 i širine 155 metara, ova betonska lučna brana predstavlja golemu konstrukciju koja sa okolinom pruža snažan estetski dojam. Osposobljena je za proizvodnju velike količine električne energije dovoljna za napajanje grada Seattlea. 1953. godine počelo je planiranje gradnje hidroelektrane, a u pogonu je od 1967. [12]

3.3.1.2. Izvedba

Na ovom primjeru može se prikazati kombinirano rješenje sa temeljnim ispustima i bočnim preljevima kao evakuacijskim građevinama. Tijelo brane sadrži sedam srednjih temeljnih ispusta u obliku pravokutnika, svaki širine 5,2 metra i visine 6,4 metra. Kompletan sustav evakuacije vode čine ispusti sa pločastim vozničkim zatvaračima dimenzionirani na $Q_w = 7200 \text{ m}^3$ te dva bočna preljeva sa segmentnim ustavama dimenzija $9,15 \times 13,4 \text{ m}$. [1]



Slika 16.: Lučna brana Boundary [1]

3.3.2. Brana Jablanica

3.3.2.1. Općenito

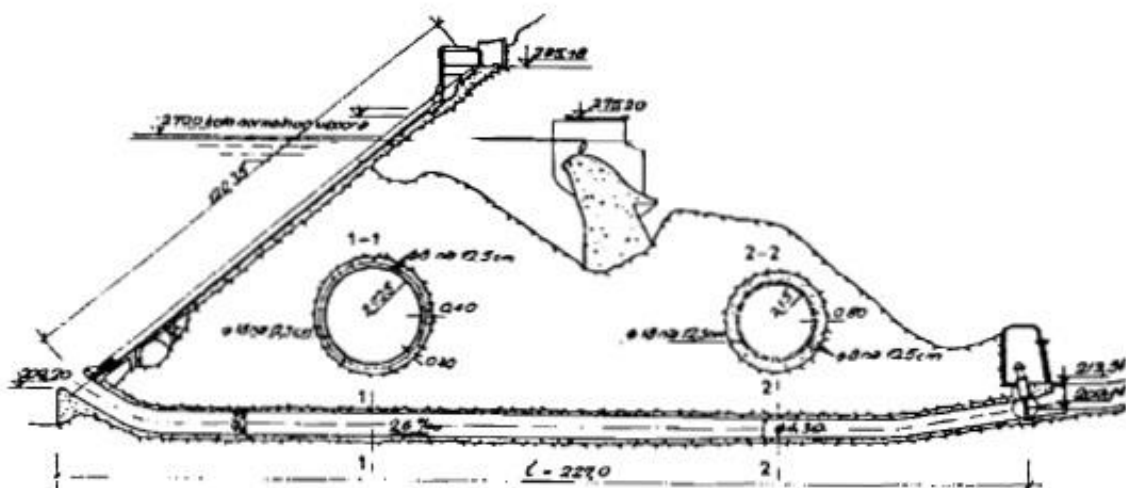
Tip lučno gravitacijske brane visoke 85 metara koja tvori Jablaničko jezero u Bosni i Hercegovini. Hidroelektrana brane Jablanice 1955. godine prvi put je puštena u pogon, a sadrži 6 agregata sa Francis turbinama koje godišnje proizvode 770GWh. [13]

3.3.2.2. Izvedba

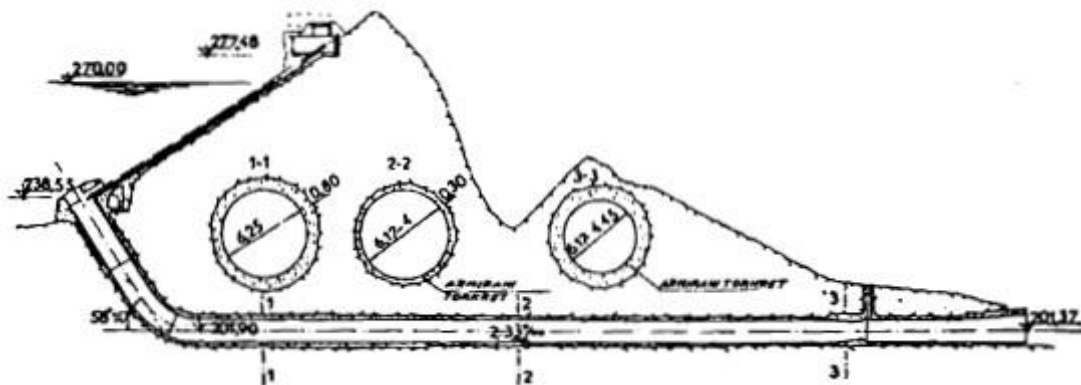
Kod izvedbe betonskih brana generalno se odabiru ispusti koji prolaze kroz tijelo brane, no ima i primjera gdje su ispusti izvedeni kao tunelski kao u slučaju brane Jablanice. Za pražnjenje akumulacije služe dva ispusta.

Na lijevoj obali nalazi se tunelski temeljni ispust (slika 17) sa dva zatvarača na ulazu i izlazu. Derivacijski (obilazni) je tunel koji na ulazu sadrži pločasti zatvarač dimenzija 2,9m x 5,4m, dok je na izlazu smanjen poprečni presjek tunela te ugrađen blindirani klizni pločasti zatvarač dimenzija 1,9m x 5,9m.

Na desnoj obali izveden je srednji temeljni ispust (slika 18) sa zatvaračima na ulazu i prigušivačima na izlazu. Ulazna građevina opremljena je sa dva pločasta zatvarača., dok je na izlaznoj građevini postavljen prigušivač radi smanjenja brzine vode u tunelu s čime je osigurana zaštita obloge. [1]



Slika 17.: Uzdužni profil temeljnog ispusta, brana Jablanica [1]



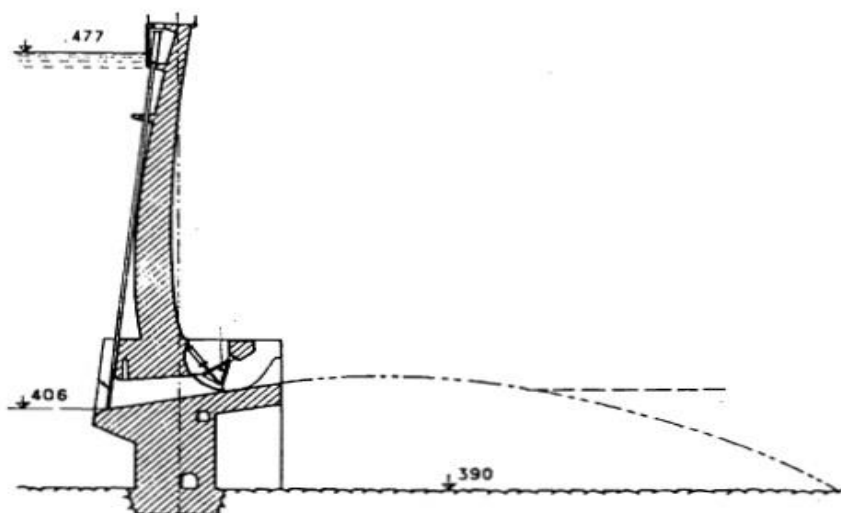
Slika 18.: Uzdužni profil srednjeg ispusta, brana Jablanica [1]

Kroz tijelo betonskih brana postavljaju se čelične cijevi ili betonske cijevi obložene čelikom radi veće otpornosti na kavitacijsku eroziju. U slučaju nasutih brana, većina temeljni ispusta izvedeno je ispod nasipa kao tunnelska cijev obložena armirano betonskom oblogom otporna na razne utjecaje. [1]

3.3.3. Brana Sainte – Croix

3.3.3.1. Izvedba

Lučna brana Sainte – Croix (slika 19) izvedena je bez preljeva, a sadrži dva temeljna ispusta koja se koriste kao 'potopljeni preljevi'. Na ulaznom dijelu temeljni ispusti sadrže uzvodni sigurnosni pločasti vozni zatvarač dimenzija 4m x 7,9m, a na izlaznom su opremljeni sa regulacijsko segmentnim zatvaračem dimenzija 4m x 4,5m. [1]



Slika 19.: brana Saint – Croix [1]

Kod projektiranja hidroelektrana, važno je uskladiti kapacitet temeljnih ispusta tako da zadovolje potrebne protjecaje turbina za proizvodnju električne energije.

Također, kod kombiniranih rješenja sa preljevima i temeljnim ispustima, potrebno je dimenzionirati na takav način da protočnost akumulacije u izvanrednim slučajevima bude zadovoljena. Dimenzioniranje ispusta ovisi o načinu izvedbe preljeva. Na branama to mogu biti kontrolirani preljevi sa ustavama koji omogućuju brzo pražnjenje pa zahtijevaju manje kapacitete temeljnih ispusta te slobodni preljevi koji zatijevaju veću protočnost ispusta. [1]

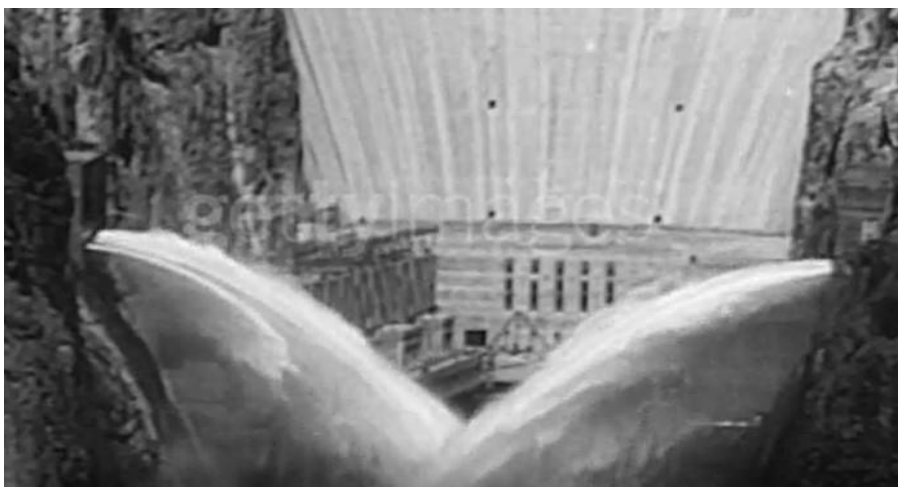
3.3.4. Brana Hoover

3.3.4.1. Općenito

Brana Hoover (slika 20) nalazi se na rijeci Colorado u SAD-u između saveznih država Arizone i Nevade. Hidroelektrana je u pogonu je od 1936. godine. Akumulacijsko jezero Mead osim za proizvodnju električne energije služi za ribarstvo, industriju i turizam. Zbog izgradnje brane omogućen je pristup donjem dijelu Grand Canyona. U strojarnici se nalazi 17 Francis turbina koje godišnje proizvode 4200 GWh. [1,14]

3.3.4.2. Izvedba

Evakuacijske građevine na brani Hoover izvedene su kao derivacijski tuneli koji se koriste za dovod vode do turbina, a sastoje se od 4 tlačne cijevi. Također, brana se sastoji od 6 temeljnih ispusta sa igličastim zatvaračima za regulaciju protoka. Sa svake obale dovode se 4 tlačne cijevi za napajanje preostalih turbina, a također su korišteni kao i srednji ispusti sa igličastim zatvaračima na ulaznom dijelu i pločastim zatvaračima na izlaznom dijelu. [1]

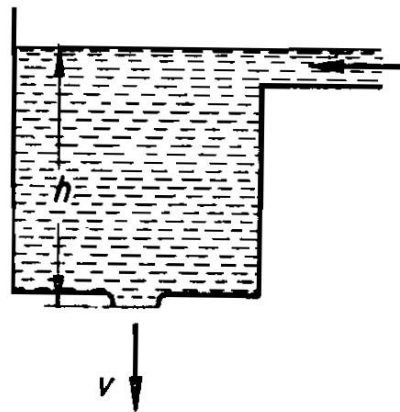


Slika 20.: Srednji ispust na lijevoj i desnoj obali brane Hoover [8]

4. OSNOVE PRORAČUNA

Osnove proračuna za temeljni ispust zasnivaju se na Torricelijevom zakonu. Istjecanje kroz mali bočni otvor, u ovom slučaju temeljni ispust, ovisno je o raspoloživoj energijskoj visini. Torricelijev zakon kaže da je istjecanje kroz mali bočni otvor na dnu neke posude jednak slobodnom padu s površine tekućine do otvora. [15]

Pomoću zamišljenog rezervoara (slika 21) u koji dotječe tekućina može se opisati pretvorba energije iz gravitacijsko-potencijalne u kinematičku. Na dnu nalazi se otvor kroz kojeg tekućina istječe. Tekućina na nekoj visini h , ima potencijalnu energiju. U trenutku kada voda istječe iz rezervoara potencijalna energija tekućine pretvara se u kinematičku. [15]



Slika 21.: Torricelijev zakon, zamišljeni rezervoar [15]

Može se opisati izrazom :

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Iz ovoga izraza može se napisati izraz za h (visina brzine), visinu tekućine na koju bi se popela zbog kinetičke energije :

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Iz izraza za visinu brzine, brzina istjecanja tekućine kroz mali otvor je:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3)$$

Protok možemo dobiti umnoškom površine poprečnog presjeka i izraza za brzinu (3):

$$Q = A \cdot v = A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4)$$

U idealnim uvjetima bez trenja brzina bi uistinu bila jednaka izrazu (4), no kako se radi o realnim tekućinama mora se uzeti u obzir unutarnje trenje tekućine. Obzirom na lokalne i linijske gubitke može se napisati izraz za koeficijent gubitaka : [15]

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{LOK} + \sum \xi_{LIN}}} \quad (5)$$

Cjevovodi su objekti koji se sastoje od cijevnih poteza istih ili različitih promjera, istih ili različitih vrsta materijala, spojenih na razne načine kao što su zasuni, prijelazni potezi i koljena. Kroz njih struji tekućina te se mehanička energija smanjuje uzduž strujanja. Otpori zbog trenja nazivaju se linijskim gubicima, a lokalni gubici su gubici koji nastaju na spojevima cijevnih poteza.

Linijski gubitak na cijevi dužine L promjera D određuje se padom energijske visine prema izrazu :

$$\Delta H_{tr} = \int_1^2 \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} dl = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = \zeta_{tr} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5.1.)$$

gdje je λ koeficijent otpora strujanju, D promjer cijevi, a $\zeta = \lambda \cdot \frac{L}{D}$ koeficijent linijskog gubitka energije. Slično tome ako se između dviju točaka strujanja javlja lokalni otpor, izraz glasi :

$$\Delta H_{lok} = \zeta \cdot \frac{v_{ref}^2}{2g} \quad (5.2.)$$

gdje je v_{ref} mjerodavna brzina lokalnog gubitka.

Na kraju, može se napisati formula za protok (m^3 / s) temeljnog ispusta uzeći u obzir trenje i kontrakciju mlaza :

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6)$$

5. PRIMJER PRORAČUNA PRAŽNJENJA AKUMULACIJE

U ovom poglavlju obradit će se primjer proračuna pražnjenja akumulacije kroz temeljni ispust.

Konstantni dotok u vrijeme pražnjenja iznosi $8 \text{ m}^3/\text{s}$, a maksimalni kapacitet nizvodnog korita $65 \text{ m}^3/\text{s}$. Za zadane podatke potrebno je odrediti vrijeme pražnjenja i prikazati krivulju protoka nizvodno od akumulacije.

Ulazni podaci :

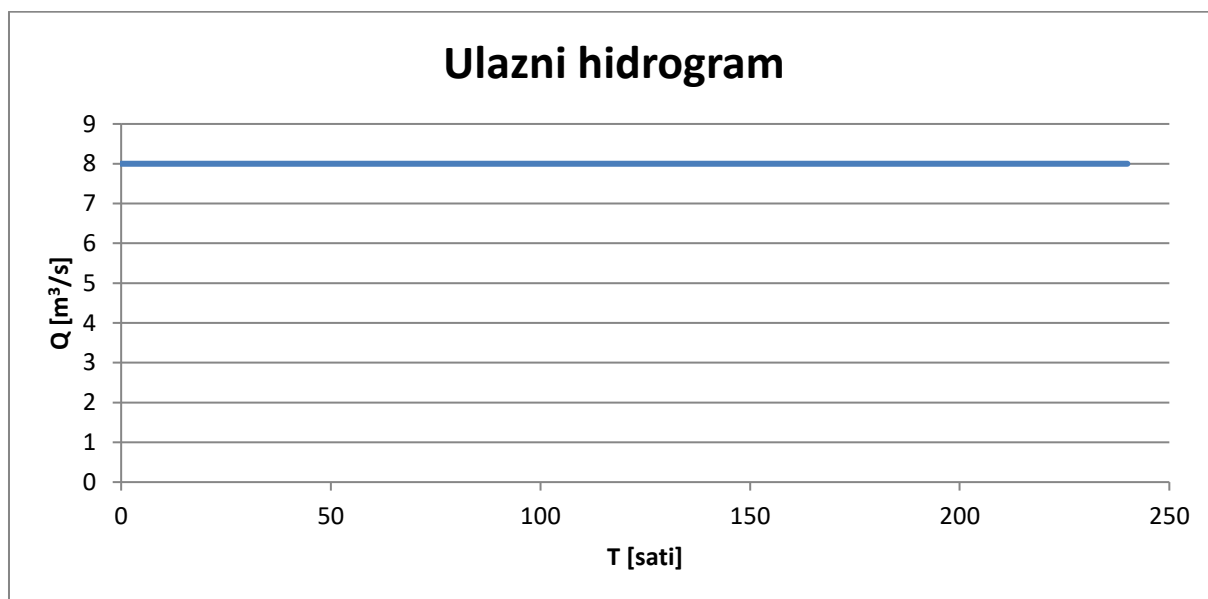
Tablica 1.: Ulazni podaci

ULAZNI PODACI		
dotok [m^3/s]	Q_{ul}	8
razina vode u akumulaciji [m.n.m.]	H_{GV}	41
površina akumulacije [km^2]	A	2,452
volumen akumulacije [m^3]	V	19522000
nizvodni kapacitet korita [m^3/s]	Q_{NIZ}	65
koeficijent gubitaka	μ	0,70
Promjer temeljnog ispusta [m]	D	2,5

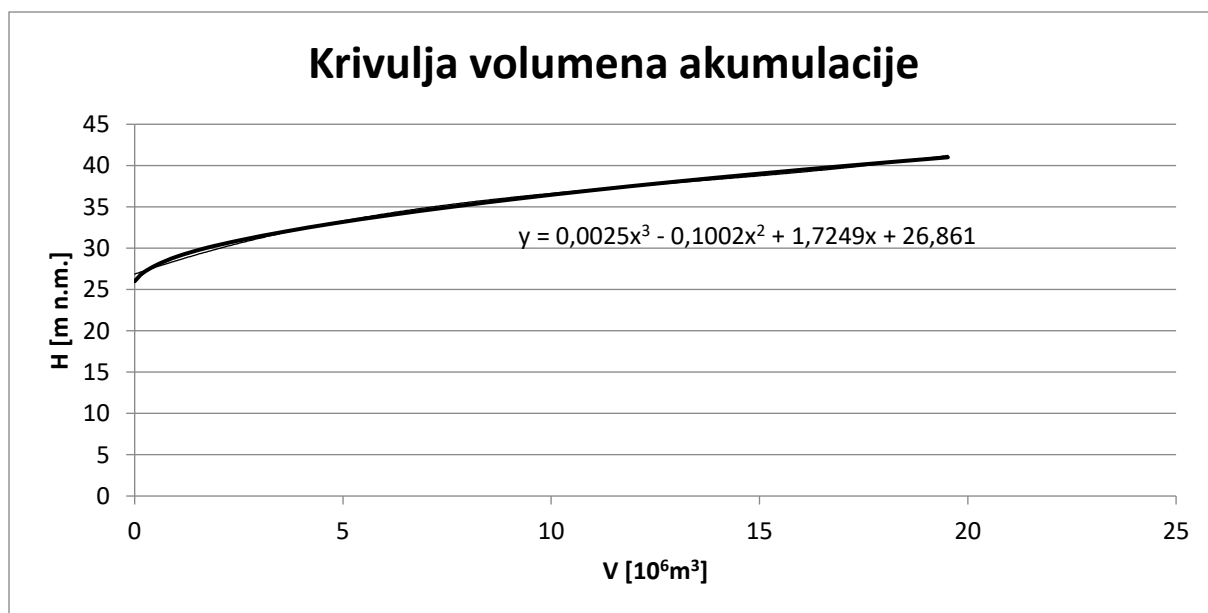
Tablica 2.: Ovisnost razine i volumena vode u akumulaciji

Ovisnost razine vode I volumena vode u akumulaciji	
Zapremnina	Nivo vode
V [10^6m^3]	H [m n.m.]
0	26
0,198	27
0,539	28
1,023	29
1,696	30
2,567	31
3,597	32
4,772	33
6,118	34
7,601	35
9,214	36
10,969	37
12,881	38
14,949	39
17,159	40
19,522	41

Na temelju ulaznih podataka može se prikazati ulazni hidrogram (slika 22) i krivulja volumena akumulacije (slika 23):



Slika 22.: Ulazni hidrogram



Slika 23.: Krivulja volumena akumulacije

Uvrštavanjem podataka u izraz (6) dobiva se protok kroz temeljni ispušt koji iznosi :

$$Q_{ti} = 0,7 \cdot \frac{2,5^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (41 - 26)} = 58,95 \text{ m}^3/\text{s}$$

Maksimalni kapacitet nizvodnog korita iznosi $Q_{NIZ} = 65 \text{ m}^3/\text{s}$ pa je uvjet $Q_{ti} < Q_{NIZ}$ zadovoljen.

Nakon prvog intervala volumen pražnjenja akumulacije, uzeći u obzir da je dotok $8 \text{ m}^3/\text{s}$ i vremenski inkrement $\Delta t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$, iznosi :

$$V_{Ak} = 19522000 - (58,95 - 8,00) \cdot 300 = 19506720 \text{ m}^3 = 19,50672 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

Zatim se iz krivulje volumena akumulacije (slika 23) može dobiti nivo vode nakon pražnjenja akumulacije.

Kako bi se dobilo vrijeme pražnjenja i krivulja protoka nizvodno od akumulacije, mora se izračunati protok kroz temeljni ispušt koji se mijenja u vremenu zbog opadanja razine vode u akumulaciji. Postupak se ponavlja sve dok se akumulacija ne isprazni što je prikazano u sljedećoj tablici (tablica 3).

Tablica 3.: Proračun pražnjenja akumulacije

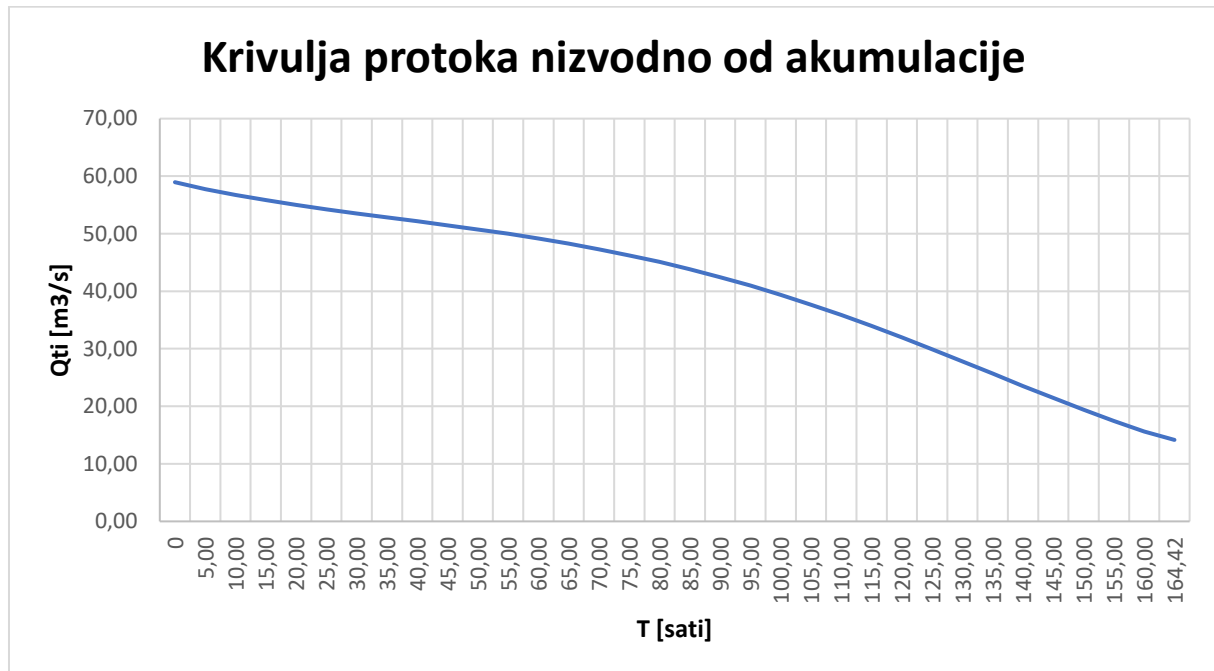
Dotok	Interval	Volumen prije pražnjenja	Nivo vode prije pražnjenja	Protok kroz temeljni ispušt	Istjecanje iz akumulacije	Volumen nakon pražnjenja	Nivo vode nakon pražnjenja
Q_{UL} [m^3/s]	t [h]	V_{UL} [10^6m^3]	H_{GV} [m n.m.]	Q_{ti} [m^3/s]	$Q_{ti} - Q_{ul}$ [m^3/s]	V_{AK} [10^6m^3]	H_{GV} [m n.m.]
0,00	0	19,52200	41,00	0,00	0,00	19,52200	41,000
8,00	0,08	19,52200	41,00	58,95	50,95	19,50672	40,937
8,00	0,17	19,50672	40,94	58,82	50,82	19,49147	40,927
8,00	0,25	19,49147	40,93	58,80	50,80	19,47623	40,917
8,00	0,33	19,47623	40,92	58,78	50,78	19,46099	40,907
8,00	0,42	19,46099	40,91	58,76	50,76	19,44576	40,897
8,00	0,50	19,44576	40,90	58,74	50,74	19,43054	40,886
8,00	0,58	19,43054	40,89	58,72	50,72	19,41532	40,876
8,00	0,67	19,41532	40,88	58,70	50,70	19,40011	40,866
8,00	0,75	19,40011	40,87	58,68	50,68	19,38491	40,856
8,00	0,83	19,38491	40,86	58,66	50,66	19,36971	40,846
8,00	0,92	19,36971	40,85	58,64	50,64	19,35451	40,836
8,00	1,00	19,35451	40,84	58,62	50,62	19,33933	40,826
8,00	1,08	19,33933	40,83	58,61	50,61	19,32414	40,816
8,00	1,17	19,32414	40,82	58,59	50,59	19,30897	40,807
8,00	1,25	19,30897	40,81	58,57	50,57	19,29380	40,797
8,00	1,33	19,29380	40,80	58,55	50,55	19,27864	40,787

Zbog opsežnih podataka u tablici (tablica 3) prikazano je samo nekoliko početnih redaka. Nadalje je prikazana tablica (tablica 4) s podacima svakih 5 sati, ali računata sa vremenskim intervalom $\Delta t=5 \text{ min}=0,08 \text{ h}$.

Tablica 4.: Proračun pražnjenja akumulacije

Dotok	Interval	Volumen prije pražnjenja	Nivo vode prije pražnjenja	Protok kroz temeljni ispuš	Istjecanje iz akumulacije	Volumen nakon pražnjenja	Nivo vode nakon pražnjenja
Q_{UL} [m ³ /s]	t [h]	V_{UL} [10 ⁶ m ³]	H_{GV} [m n.m.]	Q_{ti} [m ³ /s]	$Q_{ti}-Q_{ul}$ [m ³ /s]	V_{AK} [10 ⁶ m ³]	H_{GV} [m n.m.]
0,00	0	19,52200	41,00	0,00	0,00	19,52200	41,000
8,00	5,00	18,63196	40,39	57,73	49,73	18,61704	40,376
8,00	10,00	17,74598	39,89	56,72	48,72	17,73136	39,880
8,00	15,00	16,87715	39,45	55,82	47,82	16,86281	39,443
8,00	20,00	16,02377	39,06	55,00	47,00	16,00967	39,052
8,00	25,00	15,18453	38,70	54,25	46,25	15,17065	38,697
8,00	30,00	14,35847	38,37	53,53	45,53	14,34481	38,365
8,00	35,00	13,54502	38,05	52,84	44,84	13,53157	38,049
8,00	40,00	12,74390	37,74	52,16	44,16	12,73065	37,739
8,00	45,00	11,95517	37,43	51,46	43,46	11,94213	37,428
8,00	50,00	11,17917	37,11	50,74	42,74	11,16635	37,109
8,00	55,00	10,41652	36,78	49,98	41,98	10,40393	36,776
8,00	60,00	9,66811	36,43	49,16	41,16	9,65577	36,425
8,00	65,00	8,93506	36,06	48,27	40,27	8,92298	36,050
8,00	70,00	8,21870	35,66	47,30	39,30	8,20692	35,650
8,00	75,00	7,52058	35,23	46,24	38,24	7,50911	35,222
8,00	80,00	6,84237	34,77	45,08	37,08	6,83125	34,765
8,00	85,00	6,18593	34,29	43,82	35,82	6,17518	34,280
8,00	90,00	5,55316	33,78	42,45	34,45	5,54283	33,769
8,00	95,00	4,94608	33,24	40,96	32,96	4,93619	33,235
8,00	100,00	4,36668	32,69	39,37	31,37	4,35727	32,681
8,00	105,00	3,81696	32,12	37,66	29,66	3,80806	32,115
8,00	110,00	3,29884	31,55	35,86	27,86	3,29048	31,541
8,00	115,00	2,81409	30,98	33,96	25,96	2,80631	30,968
8,00	120,00	2,36435	30,41	31,97	23,97	2,35716	30,403
8,00	125,00	1,95098	29,86	29,92	21,92	1,94440	29,854
8,00	130,00	1,57505	29,34	27,81	19,81	1,56911	29,331
8,00	135,00	1,23730	28,85	25,68	17,68	1,23199	28,839
8,00	140,00	0,93799	28,39	23,54	15,54	0,93333	28,386
8,00	145,00	0,67692	27,98	21,44	13,44	0,67289	27,977
8,00	150,00	0,45333	27,62	19,39	11,39	0,44991	27,617
8,00	155,00	0,26579	27,31	17,44	9,44	0,26296	27,308
8,00	160,00	0,11224	27,05	15,62	7,62	0,10995	27,049
8,00	164,42	0,00266	26,87	14,16	6,16	0,00000	26,861

Protok nizvodno od akumulacije jednak je protoku temeljnog ispusta ($Q_{ti} = Q_{NIZ}$) pa se može prikazati krivulja protoka nizvodno od akumulacije (slika 24):



Slika 24.: Krivulja protoka nizvodno od akumulacije

Konačno, iz tablice (tablica 4) se može očitati ukupno vrijeme pražnjenja akumulacije, a to je $t=164,42h$, odnosno 6,85 dana.

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu obrađeni su temeljni ispusti kao evakuacijske građevine na branama. Spomenute su glavne funkcije temeljnog ispusta i njegova bitna uloga kao evakuacijske građevine. Obrađeni su dijelovi temeljnog ispusta, kao što su provodnici i zatvarači. Prikazana je važnost odabira odgovarajućeg materijala i oblika provodnika te uvjeti u kojima se pojedini materijali i oblici koriste kako bi se osigurala dugovječnost temeljnog ispusta. Također, objašnjen je princip rada zatvarača te navedena njihova podjela uz primjere na slikama. Nadalje, ukratko je opisano gdje se koristi pojedini tip zatvarača.

U radu su spomenuti štetni utjecaji vode u temeljnim ispustima i ukratko je obrađena kavitacijska erozija kao jedan od najvećih problema u temeljnim ispustima. Zatim su na temelju navedenih primjera brana prikazali različiti načini izvedbe temeljnih ispusta. Nadalje, dane su osnove proračuna temeljnih ispusta na temelju kojih se obradio primjer proračuna pražnjena akumulacije.

Na kraju možemo zaključiti da je smanjenje štetnih utjecaja vode i pravilno funkcioniranje ispusta ostvareno sa velikom preciznošću u fazi projektiranja i izvedbe ispusta. Također, pravilno planiranje i održavanje temeljnog ispusta predstavlja bitnu ulogu u održavanju dugovječnosti i stabilnosti brane.

POPIS LITERATURE

Popis literature treba izraditi u skladu s odabranim stilom navođenja prema [1].

- [1] Petar Stojić: Hidrotehničke građevine, Sveučilište u Splitu, Građevinski fakultet, 1998.
- [2] Neven Kuspilić, Eva Ocvirk: Skripta iz kolegija Hidrotehničke građevine, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [3] Federal Emergency Management Agency: Technical Manual: Conduits through Dams; Best Practices for Design, Construction, Problem, identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair, 2005.
- [4] Pouya Amirsayafi: Measures for Success in dam bottom outlet design, 2015.
- [5] Roya Kolachian, Akram Abbaspour, Farzin Salmasi: Aeration in Bottom Outlet Conduits of Dams for Prevention of Cavitation, 2012.
- [6] Predavanja iz kolegija Korištenje vodnih snaga, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet
- [7] Vinko Jović: Osnove Hidromehanike, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Splitu
- [8] getty images, <https://www.gettyimages.com/search/2/image-film?family=creative&phrase=kurobe%20dam>
- [9] Inhisa Ingenieira Hidraulica, <https://grupo-inhisa.com/en/equipment/valves/howell-bunder-conical-hollow-jet-valve/>
- [10] Vintage portland, <https://vintageportland.wordpress.com/2021/07/01/bull-run-dam-1-1972-2/>
- [11] Wikipedija, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kavitacija>
- [12] Seattle City Light, <https://web.archive.org/web/20180812214230/https://www.seattle.gov/light/Boundary/>
- [13] Hydro Power Plants On Neretva, <https://web.archive.org/web/20131123072322/http://www.elektroprivreda.ba/eng/page/hpps-on-neretva>
- [14] Wikipedija, https://bs.wikipedia.org/wiki/Hooverova_brana
- [15] Velimir Kruz: Tehnička fizika za tehničke škole, školska knjiga, 1969.

POPIS SLIKA

Slika 1: Temeljni ispušt kroz tijelo brane Kurobe [8]	2
Slika 2: Situacija brane Peruča na rijeci Cetini [6].....	3
Slika 3: Temeljni ispušt ispod brane Peruča na Cetini [6]	3
Slika 4: Karakteristični poprečni presjek brane kroz temeljni ispušt [2]	4
Slika 5: Skica dubinske zatvaračnice [6]	7
Slika 6: Skice površinske zatvaračnice [6].....	7
Slika 7: Pločasti zatvarači na ulazu u malu HE Varaždin [6].....	8
Slika 8: Segmentni zatvarač, brana Valići [6]	8
Slika 9: Leptirasti zatvarač sa horizontalnom osovinom [1]	9
Slika 10: Skica kuglastog zatvarača [2].....	9
Slika 11: Ispušt kroz Howell-Bunger (konusni) zatvarač [9].....	10
Slika 12: Igliačasti zatvarač na brani Bull Run [10]	10
Slika 13: Primjer umirujućeg bazena [6].....	12
Slika 14: Potopljeni ski-jump [6].....	13
Slika 15: Oštećenje od kavitacije na ploči ventila [11]	14
Slika 16: Lučna brana Boundary [1].....	15
Slika 17: Uzdužni profil temeljnog ispusta, brana Jablanica [1]	16
Slika 18: Uzdužni profil srednjeg ispusta, brana Jablanica [1]	17
Slika 19: Brana Saint-Croix [1].....	17
Slika 20: Srednji ispušt na lijevoj i desnoj obali brane Hoover [8].....	18

Slika 21: Torricelijev zakon, zamišljeni rezervoar [15].....	19
Slika 22: Ulazni hidrogram.....	22
Slika 23: Krivulja volumena akumulacije.....	22
Slika 24: Krivulja protoka nizvodno od akumulacije.....	25

POPIS TABLICA

Tablica 1: Ulazni podaci.....	21
Tablica 2: Ovisnost razine i volumena vode u akumulaciji.....	21
Tablica 3: Proračun pražnjenja akumulacije	23
Tablica 4: Proračun pražnjenja akumulacije	24