

Utjecaj geometrije preljeva na transformaciju vodnog vala

Jović, Ana

Master's thesis / Diplomski 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:237:300249>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-05**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Ana Jović

UTJECAJ GEOMETRIJE PRELJEVA NA TRANSFORMACIJU VODNOG VALA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Eva Ocvirk

Zagreb, 2024

PODACI ZA DIGITALNI REPOZITORIJ

Naslov:	Utjecaj geometrije preljeva na transformaciju vodnog vala
Title:	The Influence of Overflow Geometry on Water Wave Transformation
Fakultet:	Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod:	Zavod za hidrotehniku
Vrsta rada:	Diplomski rad
Kolegij:	Korištenje vodnih snaga
Autor:	Ana Jović
Mentor(i):	Prof. dr. sc. Eva Ocvirk
Komentor:	
Godina objave:	2024.
Datum obrane:	15.02.2024
Broj stranica:	54
Sažetak:	<p>Tema ovog diplomskog rada je analiza utjecaja geometrije preljeva na transformaciju vodnih valova. Proračun je proveden na tri tipa preljeva: bočni, labirintski i bunarski. U uvodu su prikazane opće karakteristike preljeva i njihova svrha, a u narednim poglavljima opisane su karakteristike svakog od preljeva koji je analiziran, detaljan postupak proračuna transformacije vodnog vala, dimenzioniranje preljeva, te usporedba rezultata dobivenih proračunom. Cilj ovog rada jest utvrditi koji tip preljeva je optimalan u odnosu na rezultate dobivene proračunom transformacije vodnih valova i izračunom potrebne količine radova.</p>
Summary:	<p>The topic of this thesis is the analysis of the influence of the overflow geometry on the transformation of water waves. The calculation was carried out on three types of spillways: side, labyrinth and drop inlet spillway. The general characteristics of spillways and their purpose are written in the introduction, and the following chapters describe the characteristics of each analyzed spillway, the detailed calculation procedure of water wave transformation, dimensioning of the spillway, and comparison of the results obtained from the calculation. The goal of this thesis is to determine which type of spillway is optimal in relation to</p>

	the results obtained by calculating the transformation of water waves and calculating the required amount of work.
Ključne riječi:	Preljev, labirintski, bunarski, transformacija vodnog vala
Keywords:	Spillway, labyrinth, drop inlet, water wave transformation

ZADATAK



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta:

JMBAG:

Diplomski rad iz predmeta:

Naslov teme diplomskog rada:	HR	Utjecaj geometrije preljeva na transformaciju vodnog vala
	ENG	The Influence of Overflow Geometry on Water Wave Transformation

Opis teme diplomskog rada:

1. Uvod
2. Karakteristike tečenja preko preljeva
3. Metodologija - numerički model
4. Rezultati
5. Diskusija
6. Zaključak

Datum:

Komentor:
(Ime i prezime komentora)

Mentor:
(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

PRINT

IZJAVA STUDENTA O IZVORNOSTI

Ja, Ana Jović, JMBAG 0083219704, rođena 22.03.1998. u Dubrovniku,
izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

UTJECAJ GEOMETRIJE PRELJEVA NA TRANSFORMACIJU VODNOG VALA

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica/jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Građevinskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata/upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana 07.02.2024

Potpis studenta / studentice

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Evi Ocvirk na vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KARAKTERISTIKE TEČENJA PREKO PRELJEVA	2
2.1 Preljev praktičnog profila	2
2.2 Bočni preljev	5
2.3 Labirintski preljev	7
2.4 Bunarski (šahetni) preljev	11
3. METODOLOGIJA	17
3.1 Podloge	17
3.1.1 Hidrološke podloge	17
3.2 Definiranje geometrije	21
3.3 Transformacija vodnog vala	22
3.3.1 Postupak proračuna	23
4. REZULTATI	30
4.1 Postojeći preljev	31
4.2 Labirintski preljev	32
4.3 Bunarski (šahetni) preljev	33
5. DOKAZNICA MJERA	34
6. DISKUSIJA	35
LITERATURA	36
POPIS SLIKA	37
POPIS TABLICA	38
7. GRAFIČKI PRILOZI	39

1. UVOD

Cilj ovog rada je analizirati na koji način različita geometrija preljeva utječe na transformiranje vodnih valova te na konkretnom primjeru provesti proračun transformacije vodnih valova. Također, usporedbom dobivenih rezultata i troškova izgradnje utvrditi koji tip preljeva je optimalan. S obzirom na geometriju preljeva, postoje različiti tipovi, a u ovom radu analizirana je transformacija vodnih valova povratnih perioda od 100, 1000 i 10000 godina na tri tipa preljeva: bočni, labirintski i bunarski (šahtni) preljev.

Preljevi su hidrotehničke građevine koje služe za mjerenje i reguliranje protoka vode, a učestalost korištenja preljeva ovisi o karakteristikama otjecanja sa sliva. Primjerice, tijekom poplava ili dugotrajnog otjecanja kada drugi objekti dosegnu maksimalni kapacitet, funkcija preljeva je od iznimne važnosti. [1]

Projektiranje preljeva može se provesti uz pomoć fizičkih i numeričkih modela. Fizički modeli su smanjene replike preljeva koji su izgrađeni i testirani u laboratoriju, a za simulaciju uvjeta protoka koristi se voda ili druge tekućine. Numerički modeli su matematički prikazi preljeva koji se rješavaju i analiziraju pomoću računala i odgovarajućih programskih paketa, koristeći jednadžbe i algoritme za simulaciju uvjeta protoka. Prilikom projektiranja preljeva treba se osigurati dovoljna protočnost jer je jedan od glavnih razloga popuštanja brana nedovoljna propusna moć preljeva. Kapacitet preljeva je najveći protok koji preljev može podnijeti bez prelijevanja preko brane ili oštećenja brane i njezine okoline, a ovisi o prognoziranom protoku određenog povratnog razdoblja, što se obično se utvrđuje hidrološkom analizom, koristeći povijesne podatke, modele kišnog otjecanja i probabilističke metode. Kapacitet preljeva također ovisi o hidrauličkim karakteristikama preljeva, kao što su geometrija, nagib, hrapavost i gubici energije. Dovoljan kapacitet preljeva je iznimno važan kod nasutih brana koje mogu biti potpuno uništene ukoliko dođe do prelijevanja preko brane dok betonske brane mogu podnijeti umjereno prelijevanje ali to može izazvati eroziju temelja. Osim što mora imati dovoljan kapacitet, preljev mora zadovoljavati hidrauličke i konstrukcijske zahtjeve. Također, potrebno je voditi računa i o kapacitetu korita nizvodno od pregrade te preljev dimenzionirati i u skladu s tim uvjetima.

Projektiranje preljeva složen je zadatak koji zahtjeva pažljivo razmatranje hidroloških, hidrauličkih, konstruktivnih i ekoloških aspekata projekta. Također od iznimne važnosti je održavanje preljeva nakon izgradnje kako bi se spriječili bilo kakvi nedostaci ili oštećenja koja mogu utjecati na funkciju i sigurnost preljeva. [2]

2. KARAKTERISTIKE TEČENJA PREKO PRELJEVA

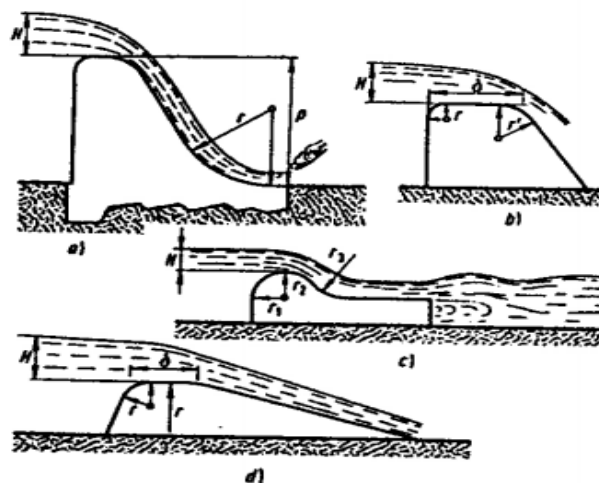
2.1 Preljev praktičnog profila

Preljevi praktičnih profila krivolinijskih obrisa (Slika 1) su hidrotehnički objekti uvjetovani svrshodnošću preljeva i konstruktivnim razlozima, a najrašireniji tipovi su oni koji prate konturu mlaza koji nastaje kod prelijevanja preko oštrobriđnog preljeva. Prema obrisu profila krivolinijski preljevi dijele se na vakuumske i bezvakuumske.

Pod pojmom bezvakuumski obris profila smatra se profil s takvim obrisom kod kojeg je prostor između slobodnog mlaza potpunog oštrobriđnog preljeva i stijenke praga ispunjen betonom, odnosno profil preljeva se podudara s donjim obrisom slobodnog mlaza.

Ukoliko između površine profila preljeva i preljevnog mlaza postoji slobodan prostor, u njemu će nastati vakuum te se takav tip profila zove vakuumski.

Postojanje vakuuma ispod mlaza na preljevu povećava opterećenje na brani, pri tome nastaje nestabilan preljevni mlaz što uzrokuje vibracije brane, koroziju betona te razaranje pokrovnog sloja brane. Iz tog razloga se pri projektiranju preljeva s obrisom u obliku preljevnog mlaza u većini slučajeva bira bezvakuumski profil.

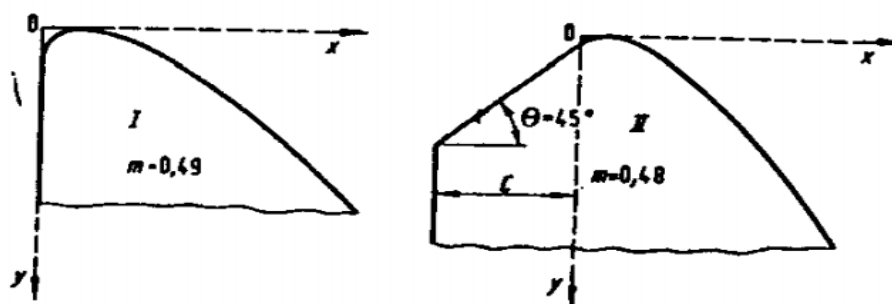


Slika 1. Vrste preljeva praktičnog profila [3]

Prilikom konstrukcije bezvakuumskog profila kao osnova obrisa preljevne plohe uzme se obris donje strane mlaza koji nastaje na oštrobriđnom preljevu pri zadanoj preljevnoj visini.

Takav obris može se konstruirati na različite načine ali najširu primjenu ima način konstruiranja koji je predložio Creager. On je odredio koordinate trajektorije čestice tekućine pri dubini od $\frac{2}{3}H$, uzima se da se donji obris mlaza nalazi na udaljenosti $\frac{1}{3}$ debljine mlaza u presjeku.

Creager je također odredio obris nizvodne strane preljeva na način da ta strana nešto malo ulazi u tijelo mlaza, kako bi se izbjeglo odvajanje mlaza od nje i nastajanje vakuuma ispod mlaza. On je predložio jedinične koordinate x i y za preljevnu visinu (dubina na kruni preljeva) $H=1$ m za dva tipa brane (Slika 2) pomoću kojih se jednostavno mogu odrediti koordinate preljeva za zadanu preljevnu visinu H na način da se jedinične koordinate množe sa H .



Slika 2. Dva tipa brane za koja su određene jedinične koordinate [3]

U sljedećoj tablici prikazane su koordinate za konstrukciju preljeva:

Tablica 1. Koordinate za konstrukciju preljeva

x	TIP 1			TIP 2		
	Obris zida	y		Obris zida	y	
		Obris mlaza			Obris mlaza	
		Vanjska površina	Unutarnja površina		Vanjska površina	Unutarnja površina
0.00	0.126	-0.831	0.126	0.043	-0.781	0.043
0.10	0.036	-0.803	0.036	0.010	-0.756	0.010
0.20	0.007	-0.772	0.007	0.000	-0.724	0.000
0.30	0.000	-0.740	0.000	0.005	-0.689	0.005
0.40	0.007	-0.702	0.007	0.023	-0.648	0.023
0.60	0.06	-0.620	0.063	0.090	-0.552	0.090
0.80	0.147	-0.511	0.153	0.189	-0.435	0.193
1.00	0.256	-0.380	0.267	0.321	-0.293	0.333
1.20	0.393	-0.219	0.410	0.480	-1.200	0.500
1.40	0.565	-0.030	0.590	0.665	-0.075	0.700
1.70	0.873	0.305	0.920	0.992	0.438	1.050
2.00	1.235	0.693	1.310	1.377	0.860	1.470

2.50	1.96	1.50	2.10	2.14	1.71	2.34
3.00	2.82	2.50	3.11	3.06	2.76	3.39
3.50	3.82	3.66	4.26	4.08	4.00	4.61
4.00	4.93	5.00	5.61	5.24	5.42	6.04
4.50	6.22	6.54	7.15	6.58	7.07	7.61

Važno je uzeti u obzir da ukoliko bi se izradio profil po navedenim koordinatama njegova nizvodna strana ne bi se ravnomjerno spajala sa dnom slapišta što znači da bi slapište i dno korita trpjeli udare mlaza a kako bi se to izbjeglo donji dio brane se po krivulji određenog radijusa spaja sa dnom korita.

U sljedećoj tablici navedene su veličine prijelaznih polumjera r za brane, a ukoliko je brana visine $p < 10$ m može se uzeti radijus od $0.5p$.

Tablica 2. Veličine prijelaznih polumjera za brane

p	H								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	3.00	4.20	5.40	6.50	7.50	8.50	9.60	10.60	11.60
20	4.00	6.00	7.80	8.90	10.00	11.00	12.20	13.30	14.30
30	4.50	7.50	9.70	11.00	12.40	13.50	14.70	15.80	16.80
40	4.70	8.40	11.00	13.00	14.50	15.80	17.00	18.00	19.00
50	4.80	8.80	12.20	14.50	16.50	18.00	19.20	20.30	21.30
60	4.90	8.90	13.00	15.50	18.00	20.00	21.20	22.20	23.20

Protok Q na preljevu računa se prema formuli:

$$Q = m b \sqrt{2gH^2}^3 \quad (1)$$

Gdje je: m =koeficijent prelijevanja,

b =duljina preljeva[m],
sni

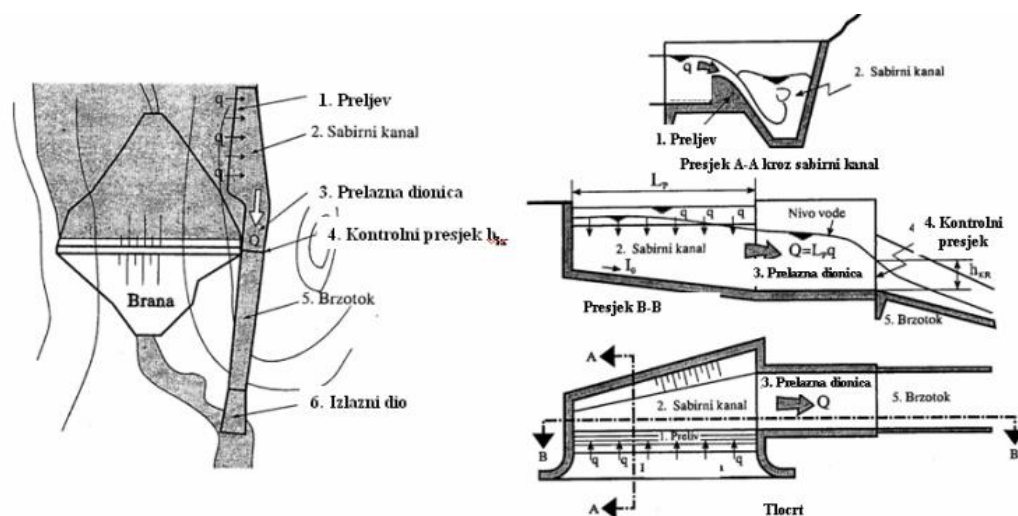
H =preljevna visina [m].

Koeficijent prelijevanja m prikazuje konstruktivne osobitosti preljeva, za tip 1 može se uzeti da je $m=0,49$, a za tip 2 $m=0,48$. [3]

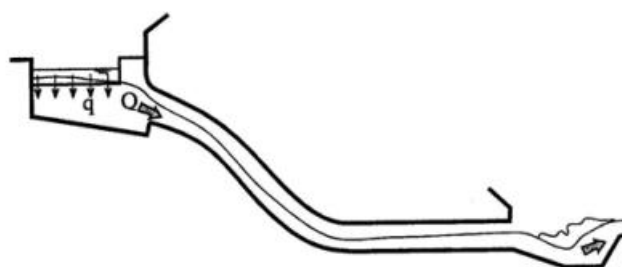
Ovako definirana kontura preljeva najčešće se praktično primjenjuje kod svih dalje opisanih tipova preljeva.

2.2 Bočni preljev

Bočni preljevi smješteni su na boku akumulacije, neovisno o tijelu brane i mogu biti izgrađeni sa ili bez zapornice, no u većini slučajeva izvode se slobodni preljevi. Praktično gledano smatraju se standardnom izvedbom preljeva nasutih brana kada to dozvoljava topografija terena. Funkcija im je omogućiti protok vode u najčešće otvoreni kanal (Slika 3) ili tunel (Slika 4). [1]



Slika 3. Bočni preljev sa sabirnim kanalom [4]



Slika 4. Bočni preljev sa tunelskim provodnikom [4]

Hidrauličke značajke bočnog preljeva definirane su kako slijedi:

- 1) Oblik krune preljeva temelji se na istim kriterijima kao i kruna preljeva kod čeonog tipa preljeva koji također spada u preljeve s brzotokom.
- 2) Preljev se projektira s ciljem osiguravanja stalnog i ravnomjernog protoka u kanal. Tako kontrolirani protok neophodan je za učinkovitu disipaciju energije generirane prelijevanjem.
- 3) Razina vode u kanalu procjenjuje se prema formuli:

$$\Delta Y = \frac{Q_2(V_1 + V_2)}{g(Q_1 + Q_2)} \left[(V_1 - V_2) + V_1 \frac{(Q_1 - Q_2)}{Q_2} \right] \quad (2)$$

Gdje je: ΔY = promjena razine vode na dionici ΔX

Q_1, V_1 = protok i brzina u uzvodnom dijelu

Q_2, V_2 = protok i brzina u nizvodnom dijelu

Izračun počinje s unaprijed određenom razinom vode na nizvodnom dijelu, zatim se postupno kreće uzvodno u koracima od ΔX iterativnim postupkom uz pretpostavku određenih veličina. Ako se izračunati profil vode počne približavati kapacitetu kanala, potrebna je prilagodba geometrije kanala.

- 4) Bočni preljevi većih kapaciteta gotovo su uvijek testirani na modelu zbog složenosti uvjeta strujanja u području korita.[5]

2.3 Labirintski preljev

Labirintski preljevi (Slika 5) projektirani su za povećanje duljine preljeva unutar fiksne širine. Ovo povećanje efektivne duljine povećava kapacitet prelijevanja, stoga se veći protok vode pri malim visinama može lako prenijeti nizvodno. Ovakvi preljevi su u obliku trapezoida ili trokuta i sastoje se od niza tankih, konzolnih zidova s okomitim uzvodnim stranama i strmo nagnutim nizvodnim stranama, raspoređenim unutar ukupne širine preljeva.

Labirintski preljev je izvrsna alternativa tradicionalnim metodama dodavanja još jednog preljeva, prikladni su za nadogradnju postojećih građevina, također su ekonomični te ostvaruju uštede tijekom izgradnje, budućeg rada i troškova održavanja. Kod ove vrste preljeva, pri sličnom hidrauličkom opterećenju, protočnost je veća nego kod linearnih preljeva. To se postiže produženjem krune unutar zadane širine preljeva.[1] Također koeficijent otjecanja je viši nego kod linearnih preljeva što omogućuje da se na vrhuncu poplavnog opterećenja u vrlo kratkom vremenskom periodu dosegne maksimalna vrijednost otjecanja preko preljeva. Međutim, vrijedi napomenuti da labirintski preljevi mogu biti osjetljivi na oštećenja od leda i velikih plutajućih krhotina.[6]



Slika 5. Labirintski preljev[5]

Postupak proračuna prikazan je kako slijedi:

1) Protok koji se preljeva dobije se prema formuli:

$$Q_{pr} = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$H_t = h + \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

Gdje je: C_d =koeficijent prelijevanja,

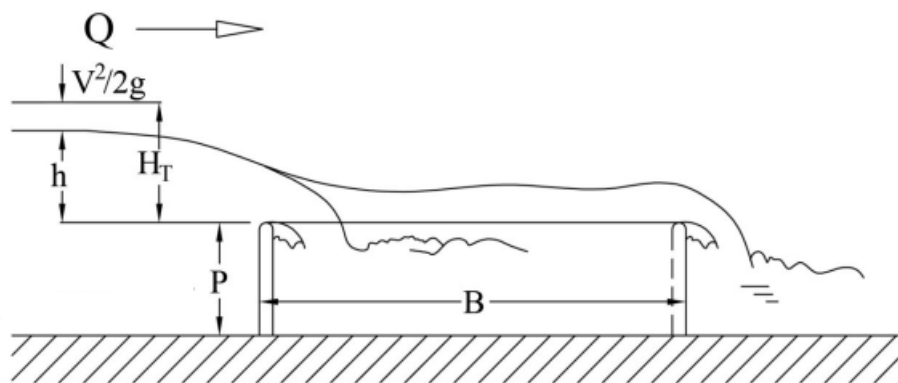
L =efektivna duljina krune preljeva[m],

h = preljevna visina [m],

H_t = linija energije,

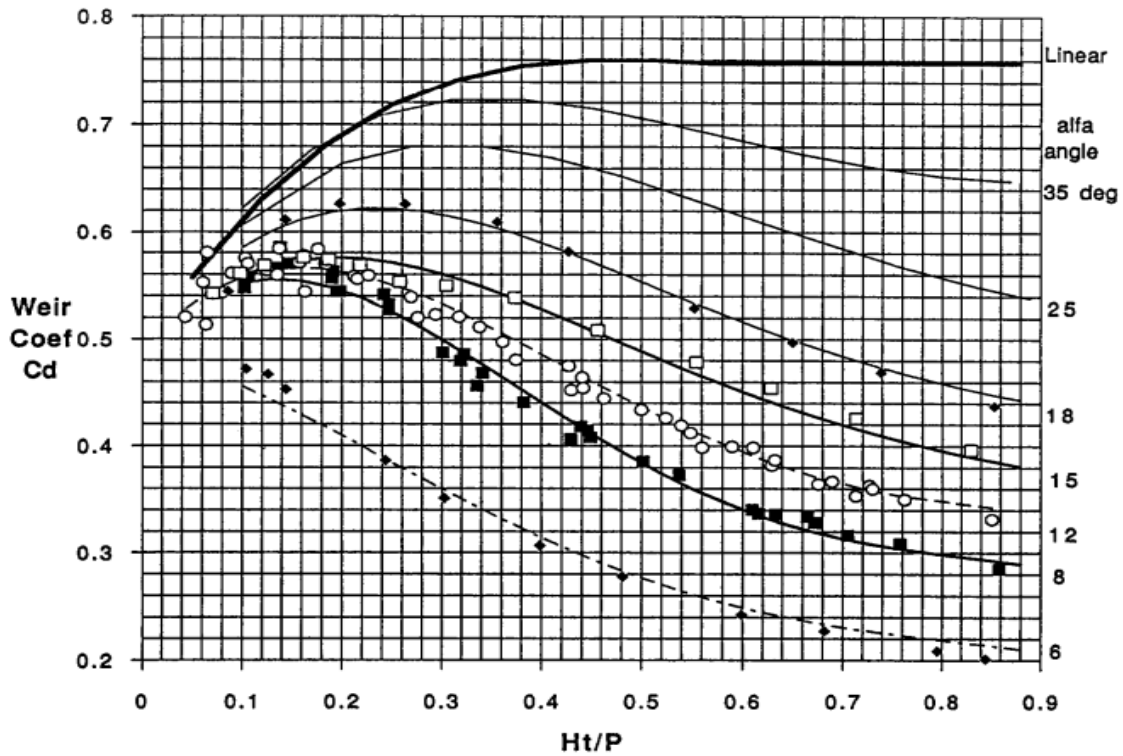
V =brzina strujanja neposredno prije preljeva [m/s].

Na sljedećoj slici su prikazani neki od parametara labirintskog preljeva koji su bitni za proračun (Slika 6):



Slika 6. Prikaz parametara labirintskog preljeva [10]

Koeficijent prelijevanja očitava se sa grafa ovisnosti H_t/P i kuta nagiba bočnih stijenki α (Slika 7):



Slika 7. Očitavanje koeficijenta prelijevanja [5]

Također, radi jednostavnosti proračuna izvedene su sljedeće formule koje opisuju prethodni dijagram. Preporučljivo je da odnos H_t/P bude manji od 0.9 radi funkcionalnosti preljeva, no ta vrijednost može biti i veća, kada se uzmu u obzir i ekonomski čimbenici.[11]

$$\text{Za } \alpha=6^\circ \quad C_d = 0.49 - 0.24 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 1.20 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 2.17 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.03 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (5)$$

$$\text{Za } \alpha=8^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.08 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 5.27 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 6.79 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 2.83 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (6)$$

$$\text{Za } \alpha=12^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.06 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4.43 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 5.18 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.97 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (7)$$

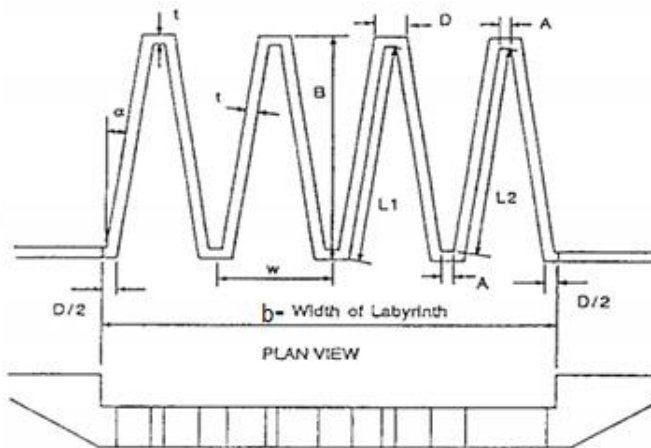
$$\text{Za } \alpha=15^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.00 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 3.57 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3.82 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.38 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (8)$$

$$\text{Za } \alpha=18^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.32 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4.13 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 4.24 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.50 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (9)$$

$$\text{Za } \alpha=25^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.51 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 3.83 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3.40 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.05 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (10)$$

$$\text{Za } \alpha=35^\circ \quad C_d = 0.49 + 1.69 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 4.05 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3.62 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.10 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (11)$$

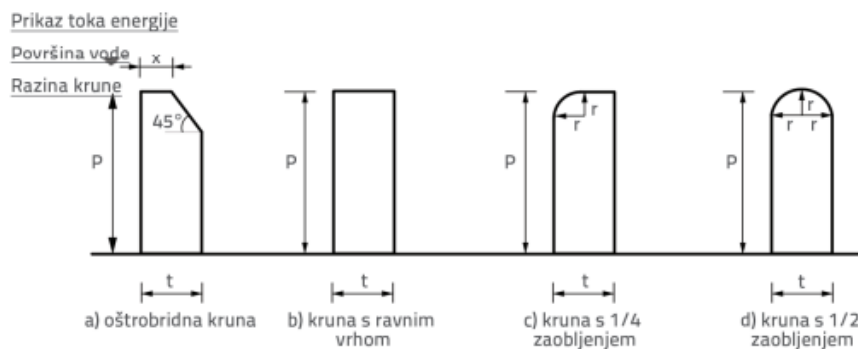
- 2) Odredi se broj vrhova A, te broj polja N, a na sljedećoj slici vidljiv je tlocrtni prikaz preljeva (Slika 8):



w =širina preljevnog polja
b =ukupna širina preljeva
B =duljina preljevnog polja
D =duljina krune preljeva
$L1$ =efektivna duljina bočnog zida
$L2$ =stvarna duljina bočnog zida
α =kut nagiba bočne stijenke
t =debljina stijenke preljeva

Slika 8. Tlocrtni prikaz dijelova preljeva [5]

Također, postoje različiti oblici krune preljeva koje je važno prikazati (Slika 9):



Slika 9. Različiti oblici krune preljeva [8]

- 3) Ako se mora dokazati ekonomičnost veličine labirintskog preljeva, druge probne veličine mogu se odrediti pod pretpostavkom da kutovi nisu 8° ili variranjem Ht/p ($\leq 0,9$) i ponavljanjem koraka 1 i 2.
- 4) Nakon odabira veličine preljeva, određuju se detalji kako slijedi:

$$t=P/6$$

$$R=P/12$$

$$A=1-2 \times t$$

r =polumjer zakrivljenosti krune

t =debljina stijenke preljeva

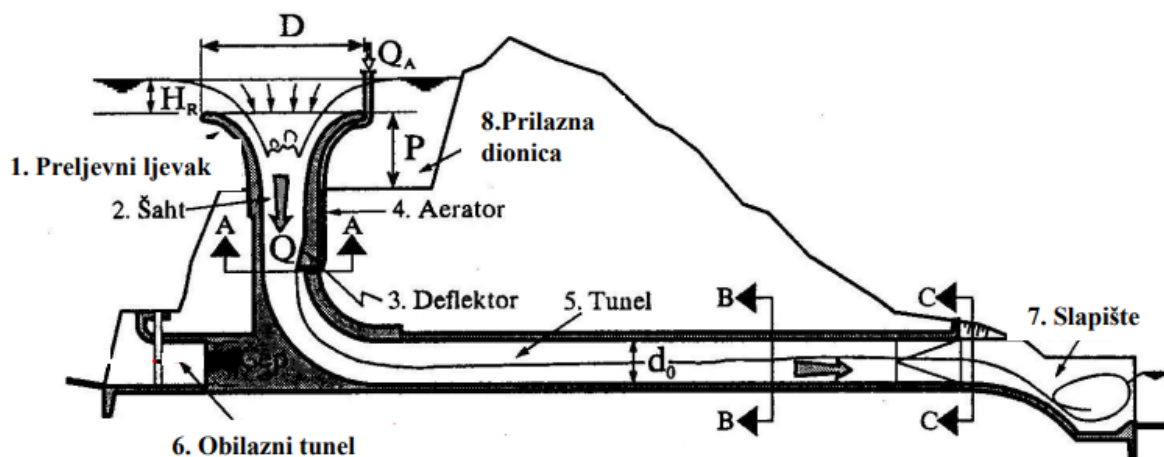
- 5) Početna širina brzotoka nizvodno jednaka je širini preljeva[5]

2.4 Bunarski (šahтни) preljev

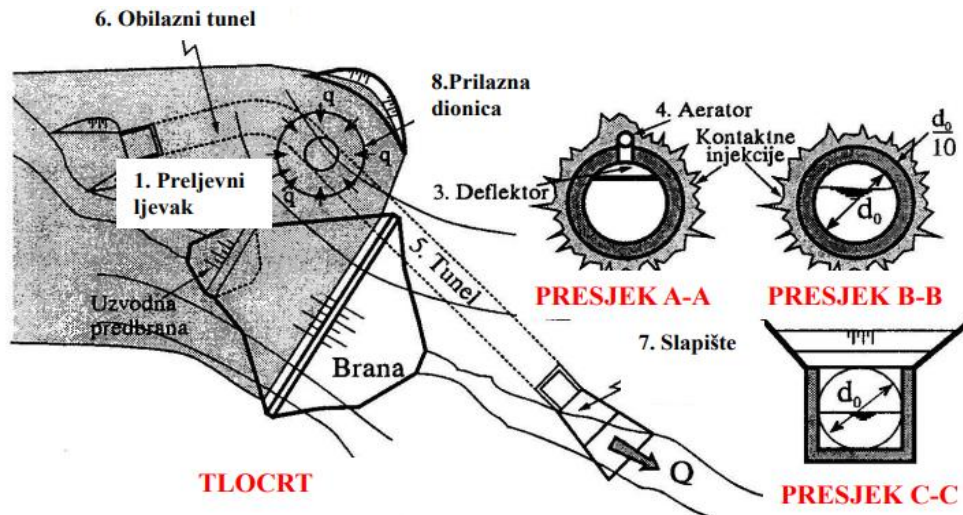
Bunarski preljev obično se koristi u kombinaciji s tunelskim cjevovodom i provodnikom u obliku vertikalne konstrukcije. Kapacitet preljeva mora biti relativno velik zbog ulaska vodnog toka sa svih strana.[1]

Na uzdužnom presjeku i tlocrtu (Slike 10, 11) vidljivi su dijelovi bunarskog preljeva:

1. Preljevni ljevak je kružni ljevkast preljev kojim se zahvaćena voda upušta u provodnik
2. Šaht
3. Deflektor koji služi kao skretač mlaza, odnosno odvaja mlaz od zida
4. Aerator ima funkciju dovođenja zraka i sprječavanja vakuuma
5. Tunel kojim voda odlazi u slapište
6. Obilazni tunel
7. Slapište
8. Prilazna dionica [9]



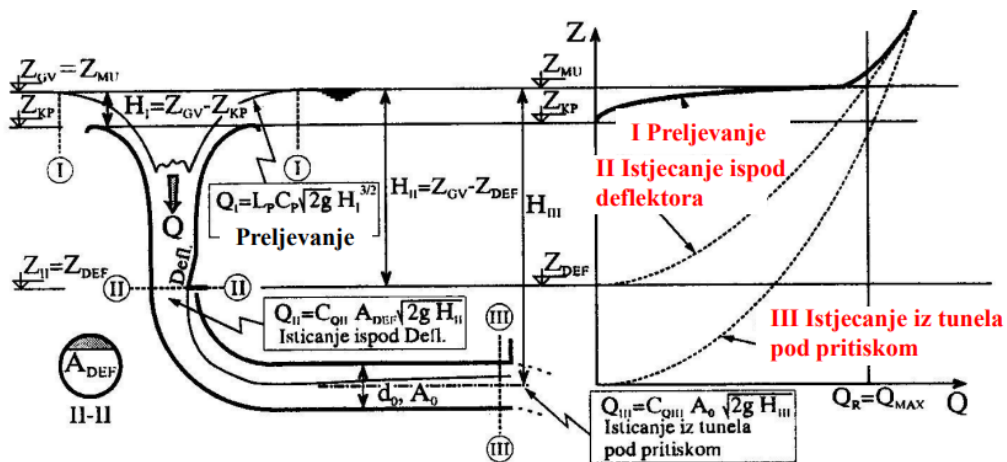
Slika 10. Uzdužni presjek bunarskog preljeva [9]



Slika 11. Tlocrt i pripadajući presjeci [9]

Proračun je potrebno provesti za 3 presjeka (Slika 12):

- 1) Preljev
- 2) Istjecanje ispod deflektora
- 3) Istjecanje iz tunela pod pritiskom



Slika 12. Kontrolni presjeci kod bunarskog preljeva [9]

Prilikom hidrauličkog dimenzioniranja potrebno je uskladiti kapacitet preljeva Q_1 i kapacitet šahta u presjeku deflektora Q_2 , a pod kapacitetom se podrazumijeva protok Q koji se ostvari pri maksimalnom nivou u akumulaciji, odnosno Z_{MU} .

Protok koji se preljeva dobije se prema formuli:

$$Q_{pr} = L_p C_p \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$H_1 = Z_{GV} - Z_{KP}$$

$$L_p = \mu D$$

Gdje je: C_p = koeficijent prelijevanja,

D = promjer preljeva [m],

L_p = dužina preljeva mjerena po vanjskom obodu preljeva [m],

H = preljerna visina [m].

Također, ne preporučuje se da odnos debljine mlaza H_R i promjera preljeva D bude veći od 0.25

Visina usijecanja P dobije se prema izrazu $P=2H_R$. Usijecanje veće od $2H_R$ nije hidraulički dobro, znatno poskupljuje konstrukciju te uzrokuje osjetljivost na seizmičke utjecaje.

Protok koji istječe ispod deflektora dobije se prema formuli:

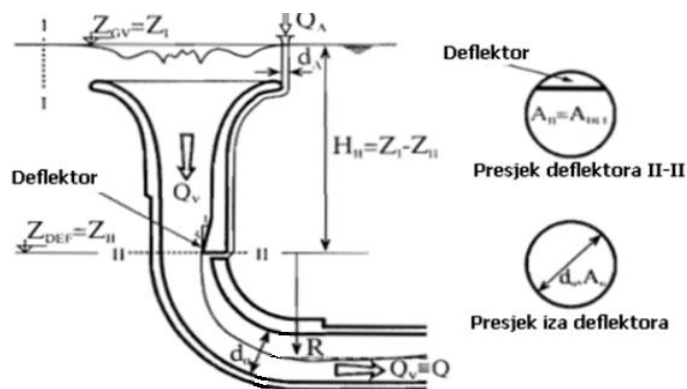
$$Q_2 = C_Q A_{DEF} \sqrt{2gH_2} \quad (13)$$

C_Q = Koeficijent protjecanja, određuje se pomoću eksperimentalne ovisnosti

$$C_Q = 0.92 - 0.2 \frac{d_0}{R} \quad (14)$$

$$H_2 = Z_{GV} - Z_{DEF}$$

Preporučuje se da zakrivljenost vertikalne krivine (Slika 13) R/d_0 bude $3.5 \geq R/d_0 \geq 2.5$, ukoliko je $R < 2d_0$ doći će do nestabilnog tečenja pri skretanju mlaza u krivini, a ukoliko je R prevelik dolazi do smanjenja pada istjecanja na deflektoru.



Slika 13. Presjek deflektora i vertikalno koljeno [9]

Prilikom odabira položaja, oblika i veličine deflektora potrebno je osigurati da se mlaz kontrolirano odvaja od zida bez vibracija, a kao najpovoljnije mjesto za položaj deflektora smatra se početak vertikalne krivine no u praksi postoje i druga rješenja.

Kako bi se osiguralo tečenje sa slobodnim vodnim licem u tunelu potrebno je odrediti protjecanje zraka Q_A .

$$\begin{aligned}Q_A &= K_A Q & (15) \\K_A &= 0.03(\sqrt{Fr} - 1) \\Fr &= \frac{v_{II}^2}{gd_0} \\v_{II} &= C_v \sqrt{2gH_{II}} \\C_v &= 0.85 - 0.90\end{aligned}$$

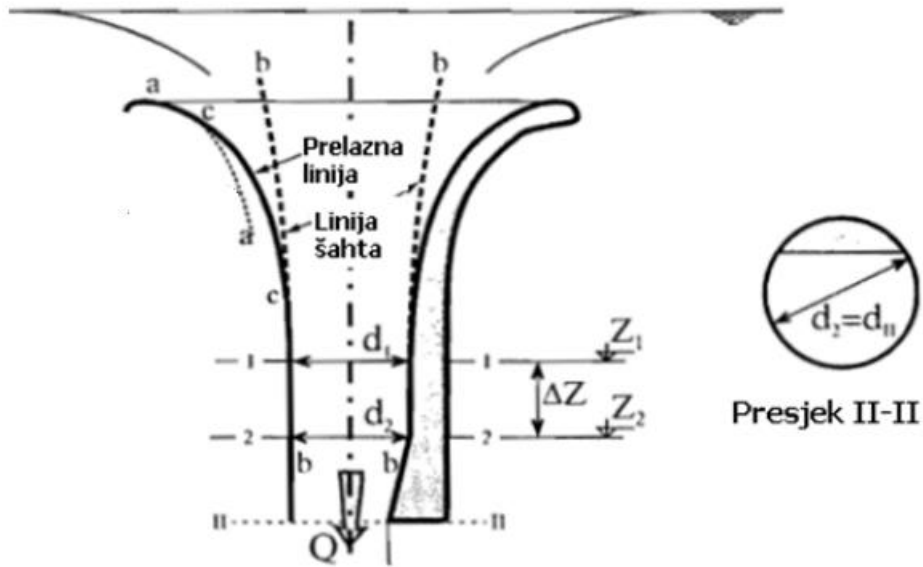
Gdje je: K_A =koeficijent odzračivanja,

Fr =Froudeov broj,

C_v =koeficijent brzine.

Prilikom određivanja promjera aeracijske cijevi d_A potrebno je procijeniti brzinu zraka v u cijevi. Dopušteno je da v zraka bude do 50 m/s zbog toga što veće brzine zraka uzrokuju neugodne zvukove i opasnost od vibracija.

Kod dimenzioniranja šahta (Slika 14) iznad deflektora potrebno je omogućiti tečenje bez vakuuma i tečenje bez lokalnih gubitaka, a to zahtjeva postepeno širenje šahta, od deflektora prema preljevnom lijevku. Također, nije preporučljivo previše širiti šaht jer može doći do povećanja uzgona na preljev. Najniži dio šahta (presjek II) uvijek je cilindričnog oblika iz konstruktivnih razloga.



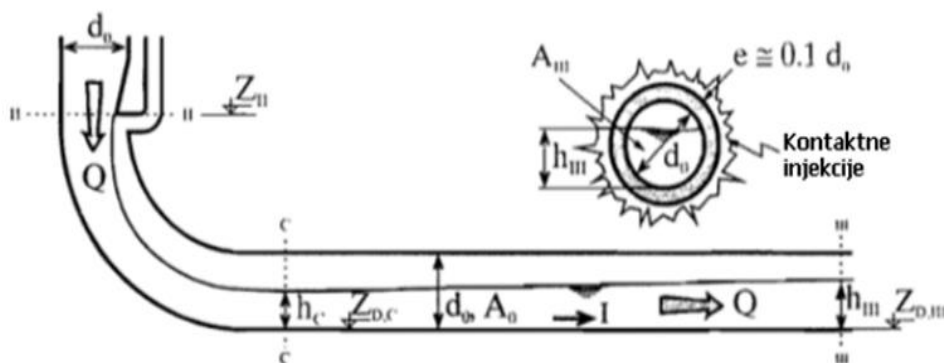
Slika 14. Dimenzioniranje vertikalnog šahta iznad deflektora [9]

Površina u presjeku 1 iznosi:

$$A_1 = \frac{Q}{V_1} \quad (16)$$

$$V_1 = \sqrt{2g(E_2 + \Delta E_{1-2} - Z_1)} \quad (17)$$

Voda nakon izlaza iz deflektora prolazi kroz vertikalno koljeno i ulazi u horizontalni tunel (Slika 15) te teče sa slobodnim vodnim licem do istjecanja iz tunela. Kako bi se osiguralo tečenje sa slobodnim vodnim licem potrebno je duž tunela imati dovoljnu površinu proticajnog presjeka za mješavinu vode i zraka. To znači da ispunjenost tunela vodom ne smije biti veća od 80%.



Slika 15. Tečenje u vertikalnoj krivini i horizontalnom tunelu [9]

Dubina h_c računa se na način da se presjek C poveže energijom s presjekom deflektora II, zatim se uz proračun gubitaka na krivini iteracijom dobije h_c .

Nagib tunela iznosi 0,1%-1% kako bi se osiguralo gravitacijsko tečenje.

Promjer tunela potrebno je procijeniti, a brzina u presjeku III dobije se:

$$V_{III} = \frac{0.80}{0.85} \sqrt{2gH_{III}} \quad (17)$$

Gdje je: H_{III} = ukupni bruto pad od kote GV do osi tunela u presjeku III

Na kraju tunela voda istječe u korito koje je obično pravokutnog presjeka, prijelaz iz tunela u korito je uglavnom postepen te se ostvaruje u obliku prijelazne dionice.[9]

3. METODOLOGIJA

U prethodnom poglavlju prikazani su različiti tipovi preljeva i njihove karakteristike, a u nastavku će se na primjeru geometrije bočnog, labirinskog i bunarskog preljeva prikazati proračun transformacije vodnih valova povratnih perioda 100, 1000 i 10000 godina te utvrditi kako različita geometrija utječe na transformaciju vodnih valova te kolike su razlike u maksimalnoj visini.

Proračun se provodi na postojećem bočnom preljevu brane Butoniga, čija širina iznosi 21.75 m pa će se tako unutar fiksne širine od 21.75 m smjestiti labirintski preljev što će povećati propusnu moć preljeva unutar zadanog prostora, a kod bunarskog tipa preljeva opseg preljeva po vanjskom obodu iznosi 21.75 m. Također, u nastavku su prikazane podloge bitne za proračun te postupak proračuna transformacije vodnog vala.

3.1 Podloge

3.1.1 Hidrološke podloge

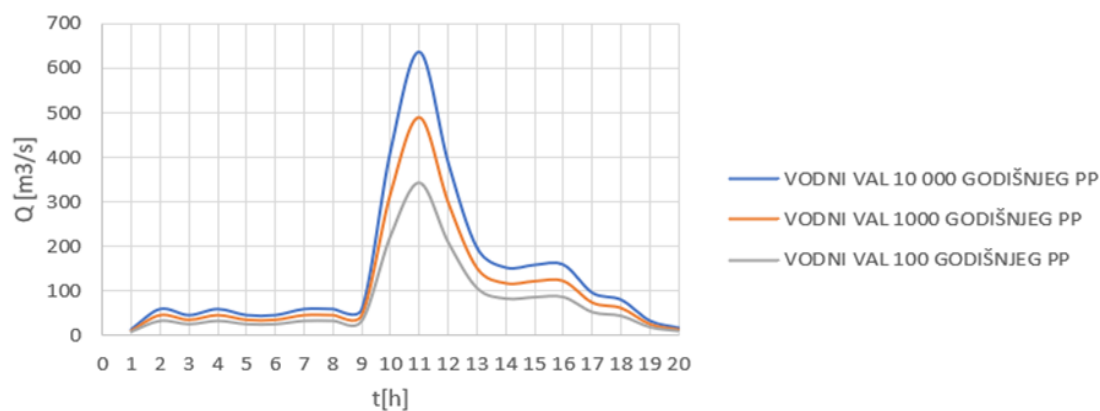
Hidrološki podaci su osnova za provođenje hidrauličkih analiza koje omogućuju pravilno dimenzioniranje elemenata brane, odnosno preljeva. Pružaju informacije o maksimalnim količinama vode koje se očekuju u određenom vremenskom razdoblju. To uključuje analize ekstremnih hidroloških događaja, poput velikih kiša, snježnih taloženja ili topljenja snijega, koji mogu uzrokovati nagli porast protoka. Bez preciznih hidroloških podataka, postoji veći rizik od neadekvatnog dimenzioniranja preljeva i nepredviđenih hidroloških događaja.

Sljedeća tablica prikazuje prognoziranje vodne valove povratnih perioda od 100, 1000 i 10000 godina na temelju kojih će se raditi proračun transformacije vodnih valova. Također, vodni valovi su prikazani i grafički (Slika 16) prema podacima iz tablice.

Tablica 3. Prognozirani val za povratne periode od 100, 1000 i 1000 godina

PROGNOZIRANI			
VAL	10000	1000	100
1	13.73046	10.60009	7.42654
2	59.22116	45.71948	32.03157
3	45.4907	35.11939	24.60503
4	59.22116	45.71948	32.03157
5	45.4907	35.11939	24.60503
6	45.4907	35.11939	24.60503
7	59.22116	45.71948	32.03157
8	59.22116	45.71948	32.03157
9	59.22116	45.71948	32.03157
10	415.7845	320.9909	224.8897
11	636	491	344
12	386.4224	298.323	209.0084
13	195.569	150.9817	105.7795
14	152.054	117.3876	82.24304
15	158.3166	122.2224	85.63035
16	158.3166	122.2224	85.63035
17	95.4174	73.66343	51.60941
18	79.6926	61.52369	43.10417
19	32.51821	25.10447	17.58847
20	16.79341	12.96473	9.083229

VODNI VALOVI 10000, 1000, 100 GODIŠNJEG POVRATNOG
PERIODA

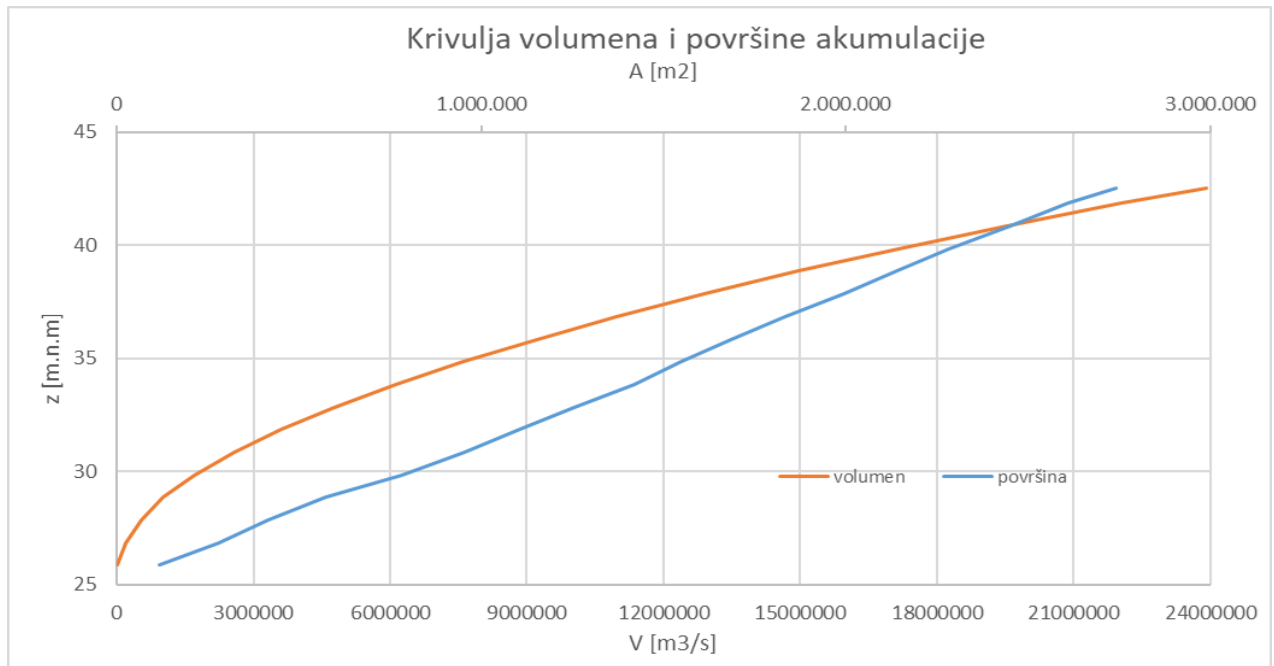


Slika 16. Grafički prikaz vodnih valova različitih povratnih perioda

U sljedećoj tablici dani su podaci o volumenima i površinama do pojedine kote odnosno nivoa vode. Podaci o volumenima za početno stanje koji se smatraju službenima navedeni su u elaboratu „Površina i volumen akumulacije Butoniga“. Podaci su dobiveni na osnovu situacije iz 1985. te kasnije manjih dopuna. Na slici 17. vidljiv je grafički prikaz krivulja volumena i površine akumulacije u ovisnosti o nivou vode u akumulaciji.

Tablica 4. Ovisnost razine vode i volumena u akumulaciji Butoniga [13]

Nivo vode	Površina	Površina	Zapremnina	Zapremnina	Razlika zapremnina po dubini	Suma zapremnina po pojasevima
m n.m.	km ²	m ²	hm ³	m ³	ΔV m ³	ΔV m ³
25,85	0,116	116	0	0	198	
26,85	0,28	280	0,198	198	341	
27,85	0,413	413	0,539	539	484	
28,85	0,573	573	1,023	1.023.000	673	
29,85	0,78	780	1,696	1.696.000	871	
30,85	0,955	955	2,567	2.567.000	1.030.000	
31,85	1,105	1.105.000	3,597	3.597.000	1.175.000	
32,85	1,254	1.254.000	4,772	4.772.000	1.346.000	
33,85	1,418	1.418.000	6,118	6.118.000	1.483.000	
34,85	1,548	1.548.000	7,601	7.601.000	1.613.000	
35,85	1,685	1.685.000	9,214	9.214.000	1.755.000	4.851.000
36,85	1,832	1.832.000	10,969	10.969.000	1.912.000	
37,85	1,994	1.994.000	12,881	12.881.000	2.068.000	
38,85	2,141	2.141.000	14,949	14.949.000	2.210.000	6.190.000
39,85	2,283	2.283.000	17,159	17.159.000	2.363.000	
40,85	2,452	2.452.000	19,522	19.522.000	2.531.000	
41,85	2,611	2.611.000	22,053	22.053.000	1.879.000	6.773.000
42,55	2,742	2.742.000	23,932	23.932.000		



Slika 17. Grafički prikaz krivulje volumena i površine akumulacije

3.2 Definiranje geometrije

Postojeći preljev je bočni sa širinom preljeva od 21.75 m. Kruna preljeva je na koti od 40.85 m.n.m, a kruna jezgre nalazi se na koti od 43.55 m.n.m. Visina preljeva P je 3.5 m. Temeljni ispust je dimenzija 4.5×5 m. Također, temeljni ispust ne radi istovremeno kad i preljev jer bi to uzrokovalo nepovoljne utjecaje na slapište.

Geometrija labirinskog preljeva definirana je na način da se unutar zadane širine postojećeg preljeva od 21.75 m smjesti što više preljevnih polja te tako poveća propusna moć preljeva. Odabrano je 7 preljevnih polja s nagibom stijenke preljeva $\alpha=8^\circ$. Efektivna duljina preljeva iznosi $L=63$ m što je znatno veće nego postojeća duljina preljeva. Visina preljeva $P=3.5$ m jednaka je kao i kod postojećeg stanja. Debljina stijenke preljeva iznosi $t=0.50$ m.

Definirana geometrija za labirintski preljev prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 5. Geometrija labirinskog preljeva

Ukupna širina preljeva	b [m]	21.75
Kota krune preljeva	KKP [m.n.m]	40.85
Oblik krune preljeva		trapezni
Kut nagiba bočne stijenke	α	15
Broj preljevnih polja	n	7
Širina preljevnog polja	w [m]	1.8
Debljina stijenke preljeva	t [m]	0.50
Efektivna duljina preljeva	L [m]	63
Visina preljeva	P [m]	3.5

Kod bunarskog tipa, preljev je oblika kružnice s radijusom $r=3.462$ m, a opseg iznosi 21.75 m što je ekvivalent širini postojećeg preljeva.

Radijus vertikalne krivine iznosi 8.7 m, a promjer tunela kojim voda utječe u slapište iznosi 4.36 m.

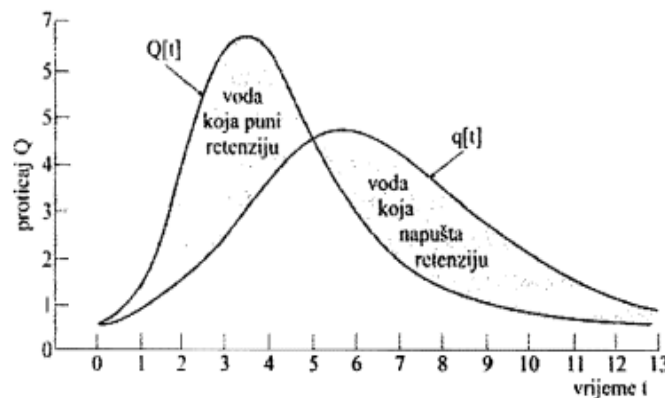
Kod sva tri tipa, preljev je na koti od 40.85 m.n.m i akumulacija je puna.

Ovi podaci su potrebni kako bi se proveo proračun transformacije vodnog vala, što je prikazano u narednom poglavlju.

3.3 Transformacija vodnog vala

Transformacija vodnih valova je proces kojim se definiraju karakteristike vodnih valova nizvodno od neke akumulacije ili na nekoj nizvodnoj dionici na osnovu poznatih vodnih valova na uzvodnoj dionici. Utjecaj akumulacijskog prostora je da modificira vodne valove na ulazu u akumulaciju ili na uzvodnoj dionici riječnog toka. Kada je pri tome interes da se definiraju karakteristike vodnog vala na izlazu iz postojeće akumulacije taj proces naziva se transformacija vodnog vala kroz akumulaciju. Kada je interes definiranje karakteristika vodnog vala na nizvodnom profilu dionice riječnog toka, a na osnovu poznatih karakteristika vodnog vala na uzvodnom profilu dionice, taj proces naziva se transformacija vodnog vala duž riječnog toka. [12]

Kako bismo mogli odrediti transformirani vodni val potrebno je poznavati dolazne protoke $VV[m^3/s]$ za različite povratne periode te definirati krivulju ovisnosti volumena akumulacije o različitim nadmorskim visinama odnosno nivoima vode. Proračunom transformacije vodnih valova može se na pravilan način dimenzionirati slapište i preljev. U nastavku je vidljiv grafički prikaz transformacije vodnog vala. (Slika 18.)



Slika 18. Grafički prikaz transformacije vodnog vala [12]

$Q[t]$ =ulazni hidrogram

$q[t]$ =izlazni hidrogram

3.3.1 Postupak proračuna

Ulazni podaci korišteni za proračun su prognozirani dolazni protok vodnih valova za 24-satni period za povratna razdoblja od 100, 1000 i 10000 godina (Tablica 6.) te koeficijent prelijevanja m , podaci o koti krune prelijeva KKP [m.n.m], širini prelijeva b [m], i volumenu vode u akumulaciji V [hm³] (Tablica 7.)

Tablica 6. Prognozirani dolazni protok za 24 satni period

PROGNOZIRANI			
VAL	10000	1000	100
1	13.73046	10.60009	7.42654
2	59.22116	45.71948	32.03157
3	45.4907	35.11939	24.60503
4	59.22116	45.71948	32.03157
5	45.4907	35.11939	24.60503
6	45.4907	35.11939	24.60503
7	59.22116	45.71948	32.03157
8	59.22116	45.71948	32.03157
9	59.22116	45.71948	32.03157
10	415.7845	320.9909	224.8897
11	636	491	344
12	386.4224	298.323	209.0084
13	195.569	150.9817	105.7795
14	152.054	117.3876	82.24304
15	158.3166	122.2224	85.63035
16	158.3166	122.2224	85.63035
17	95.4174	73.66343	51.60941
18	79.6926	61.52369	43.10417
19	32.51821	25.10447	17.58847
20	16.79341	12.96473	9.083229

Tablica 7. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, postojeći preliv

m	0.45
KKP [m.n.m]	40.85
b [m]	21.75
$V_{\text{puna ak}}$ [hm ³]	19.52

U tablici 8. prikazan je proračun vodnih valova za postojeće stanje povratnog perioda od 100 godina. Identičan postupak se provodi za povratne periode od 1000 i 10000 godina.

Tablica 8. Prikaz proračuna transformacije vodnih valova za prvih 1h, postojeći preljev, 100 PP

t	VV	Q _{d-sr}	Q _{pr}	Q _{d-sr} - Q _{pr}	F	h	H
[min]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m]	[m.n.m]
0:00	0.0000						40.8500
0:05	0.6189	0.3094	0.00	0.3094	2452000.00	0.0000	40.8500
0:10	1.2378	0.9283	0.00	0.9283	2452006.02	0.0002	40.8502
0:15	1.8566	1.5472	0.00	1.5471	2452024.08	0.0003	40.8503
0:20	2.4755	2.1661	0.00	2.1658	2452054.17	0.0006	40.8506
0:25	3.0944	2.7850	0.00	2.7843	2452096.31	0.0009	40.8509
0:30	3.7133	3.4038	0.00	3.4026	2452150.47	0.0014	40.8514
0:35	4.3321	4.0227	0.00	4.0205	2452216.66	0.0019	40.8519
0:40	4.9510	4.6416	0.00	4.6381	2452294.86	0.0024	40.8524
0:45	5.5699	5.2605	0.01	5.2553	2452385.08	0.0031	40.8531
0:50	6.1888	5.8793	0.01	5.8720	2452487.30	0.0038	40.8538
0:55	6.8077	6.4982	0.01	6.4881	2452601.51	0.0046	40.8546
1:00	7.4265	7.1171	0.01	7.1037	2452727.69	0.0054	40.8554

Prvi korak je interpolacija 24-satnog perioda i dolaznih protoka na vremenske inkremente od $\Delta t=5\text{min}$.

Dolazni srednji protok Q_{d-sr} predstavlja srednju vrijednost 5-minutnih vodnih valova.

$$Q_{d-sr} = \frac{VV_i + VV_{i-1}}{2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (18)$$

Protok na preljevu Q_{pr} se dobije prema sljedećoj formuli:

$$Q_{pr} = m \times b \times \sqrt{2g} \times h^{\frac{3}{2}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (19)$$

Gdje je: m=koeficijent prelijevanja, iznosi 0.45

b=širina preljeva [m]

h=preljevna visina [m.n.m]

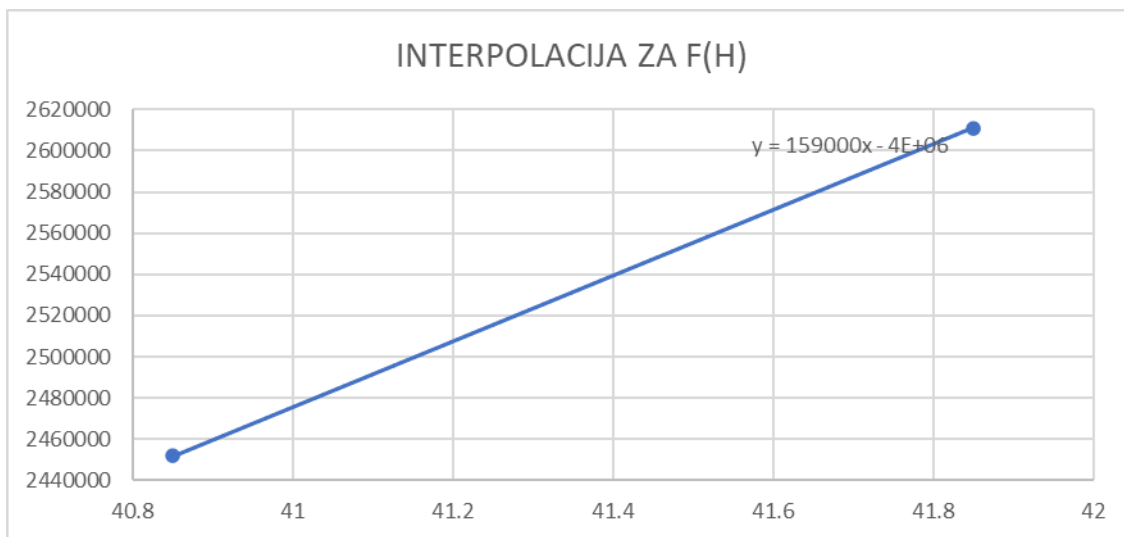
g=sila teža [m/s²]

Zatim se srednjem protoku oduzme protok prelijevanja:

$$Q_{d-sr} - Q_{pr} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (19)$$

Površina F dobije se interpolacijom u odnosu na visinu vode u akumulaciji H [m.n.m]. (Slika 19.)

$$F = f(H)$$



Slika 19. Grafički prikaz ovisnosti površine F u odnosu na visinu H

Preljevna visina h [m] računa se kumulativno prema sljedećoj formuli:

$$h = (Q_{d-sr} - Q_{pr}) \times \frac{\Delta t}{F} \quad [m] \quad (20)$$

Razina vode u akumulaciji H [m.n.m] dobije se zbrajanjem razine na kojoj se nalazi kruna preljeva KKP [m.n.m] i preljevne visine h [m].

$$H = KKP + h \quad [m.n.m] \quad (21)$$

Za ostale povratne periode postupak proračuna je isti, ali su različiti ulazni podaci, odnosno prognozirani dolazni protoci.

Ulazni podaci (Tablica 9.) korišteni za proračun transformacije vodnog vala kod labirinskog preljeva (uz postojeće podatke) su kut nagiba bočnih stijenki α °, visina preljeva P[m], efektivna duljina prelijevanja L[m] i širina akumulacije neposredno prije preljeva l[m]. U nastavku je prikazan postupak proračuna za 100 godišnji povratni period, no postupak je jednak i za povratni period od 1000 i 10000 godina.

Tablica 9. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, labirintski preljev

KKP [m.n.m]	40.85
V _{puna ak} [hm ³]	19.52
b [m]	21.75
P[m]	3.50
α °	15
L [m]	63.00
l [m]	300

Prikaz proračuna transformacije vodnog vala (Tablica 10.) kod labirintskih preljeva za prvih 1h opisan je u nastavku:

Tablica 10. Prikaz proračuna transformacije vodnog vala za prvih 1 h, labirintski preljev, 100 PP

t	VV	Q _{d-sr}	V	Ht	Ht/P	Cd $\alpha=15$
[min]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m/s ²]			
0:00	0.0000					
0:05	0.6189	0.3094	0.0010	0.000	0.000000	0.4900
0:10	1.2378	0.9283	0.0031	0.000	0.000008	0.4900
0:15	1.8566	1.5472	0.0052	0.000	0.000031	0.4900
0:20	2.4755	2.1661	0.0072	0.000	0.000069	0.4901
0:25	3.0944	2.7850	0.0093	0.001	0.000122	0.4901
0:30	3.7133	3.4038	0.0113	0.001	0.000191	0.4902
0:35	4.3321	4.0227	0.0134	0.001	0.000274	0.4903
0:40	4.9510	4.6416	0.0155	0.002	0.000373	0.4904
0:45	5.5699	5.2605	0.0175	0.002	0.000487	0.4905
0:50	6.1888	5.8793	0.0196	0.003	0.000617	0.4907
0:55	6.8077	6.4982	0.0217	0.004	0.000761	0.4908
1:00	7.4265	7.1171	0.0237	0.005	0.000920	0.4910

Q _{pr}	Q _{d-sr} - Q _{pr}	F	h	H
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m]	[m.n.m]
				40.8500
0.0000	0.3094	2452000.00	0.0000	40.8500
0.0000	0.9283	2452006.02	0.0002	40.8502
0.0002	1.5470	2452024.08	0.0003	40.8503
0.0006	2.1655	2452054.17	0.0006	40.8506
0.0014	2.7836	2452096.30	0.0009	40.8509
0.0027	3.4011	2452150.45	0.0014	40.8514
0.0046	4.0181	2452216.61	0.0019	40.8519
0.0074	4.6342	2452294.77	0.0024	40.8524
0.0110	5.2495	2452384.91	0.0031	40.8531
0.0156	5.8637	2452487.01	0.0038	40.8538
0.0214	6.4768	2452601.06	0.0046	40.8546
0.0285	7.0886	2452727.02	0.0054	40.8554

Brzina strujanja V [m/s²] računa se kao omjer srednjeg dolaznog protoka Q_{d-sr} i širine akumulacije neposredno prije preljeva l:

$$V = \frac{Q_{d-sr}}{l} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (22)$$

Linija energije H_t računa se prema formuli:

$$H_t = \frac{V^2}{2g} + h \quad (23)$$

Gdje je: h =visina prelijevanja [m]

V =brzina vode neposredno prije preljeva [m/s²]

Koeficijent prelijevanja C_d za odabrani kut nagiba stijenke preljeva $\alpha=15^\circ$ računa se kako slijedi:

$$C_d = 0.49 + 1.00 \left(\frac{H_t}{P}\right) - 3.57 \left(\frac{H_t}{P}\right)^2 + 3.82 \left(\frac{H_t}{P}\right)^3 - 1.38 \left(\frac{H_t}{P}\right)^4 \quad (24)$$

Gdje je: P =visina preljeva [m]

H_t =linija energije

Protok na preljevu računa se:

$$Q_{pr} = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_t^{\frac{3}{2}} \text{ [} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{]} \quad (25)$$

Površina F [m²], visina prelijevanja h [m] i razina vode u akumulaciji H [m.n.m] računaju se jednako kao i kod postojećeg bočnog preljeva.

Ulazni podaci za proračun transformacije vodnih valova kod bunarskog (šahtnog) tipa preljeva za 100 godišnji povratni period prikazani su u tablici 11:

Tablica 11. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, bunarski preljev

KKP[m.n.m.]	40.85
Lp [m]	21.75
V _{puna ak} [hm ³]	19.52
r [m]	3.46

Gdje je: L_p=opseg preljeva [m]

r=polumjer preljeva [m]

Prikaz proračuna transformacije vodnog vala (Tablica 12.) kod bunarskog preljeva za prvih 1h opisan je u nastavku, a za povratne periode od 1000 i 10000 godina vrijedi isti postupak:

Tablica 12. Prikaz proračuna transformacije vodnog vala za prvih 1 h, bunarski preljev

t	VV	Q _{d-sr}	Q _{pr}	Q _{d-sr} - Q _{pr}	F	h	C _p	H
[min]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ²]	[m]		[m.n.m]
0:00	0.0000					0.0000		40.8500
0:05	0.6189	0.3094	0.00	0.3094	2452000.00	0.0000	0.4500	40.8500
0:10	1.2378	0.9283	0.00	0.9283	2452006.02	0.0002	0.4500	40.8502
0:15	1.8566	1.5472	0.00	1.5471	2452024.08	0.0003	0.4500	40.8503
0:20	2.4755	2.1661	0.00	2.1658	2452054.17	0.0006	0.4500	40.8506
0:25	3.0944	2.7850	0.00	2.7843	2452096.31	0.0009	0.4500	40.8509
0:30	3.7133	3.4038	0.00	3.4026	2452150.47	0.0014	0.4500	40.8514
0:35	4.3321	4.0227	0.00	4.0205	2452216.66	0.0019	0.4500	40.8519
0:40	4.9510	4.6416	0.00	4.6381	2452294.86	0.0024	0.4500	40.8524
0:45	5.5699	5.2605	0.01	5.2553	2452385.08	0.0031	0.4500	40.8531
0:50	6.1888	5.8793	0.01	5.8720	2452487.30	0.0038	0.4500	40.8538
0:55	6.8077	6.4982	0.01	6.4881	2452601.51	0.0046	0.4500	40.8546
1:00	7.4265	7.1171	0.01	7.1037	2452727.69	0.0054	0.4500	40.8554

Dolazni srednji protok Q_{d-sr} predstavlja srednju vrijednost 5-minutnih vodnih valova.

$$Q_{d-sr} = \frac{VV_i + VV_{i-1}}{2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (26)$$

Protok na preljevu Q_{pr} se dobije prema sljedećoj formuli:

$$Q_{pr} = L_p C_p \sqrt{2gh}^{\frac{3}{2}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (27)$$

Gdje je: C_p =koeficijent prelijevanja, iznosi 0.45, L_p =opseg preljeva [m], h =preljevna visina [m.n.m], g =sila teža [m/s^2]

Zatim se srednjem protoku oduzme protok prelijevanja:

$$Q_{d-sr} - Q_{pr} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (28)$$

Površina F dobije se interpolacijom u odnosu na visinu vode u akumulaciji H [m.n.m] što je prethodno prikazano na slici 19.

Preljevna visina h [m] računa se kumulativno prema sljedećoj formuli:

$$h = (Q_{d-sr} - Q_{pr}) \times \frac{\Delta t}{F} [m] \quad (29)$$

Razina vode u akumulaciji H računa se zbrajanjem razine na kojoj se nalazi kruna preljeva (KKP) i preljevne visine h [m].

$$H = KKP + h [m.n.m] \quad (30)$$

4. REZULTATI

U nastavku je prikazana tablica s rezultatima ekstrema protoka prelijevanja Q_{pr} [m^3/s] i razina vode u akumulaciji H [m.n.m] i te grafički prikazani rezultati za sva tri tipa preljeva za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina.

Tablica 13. Prikaz ekstrema

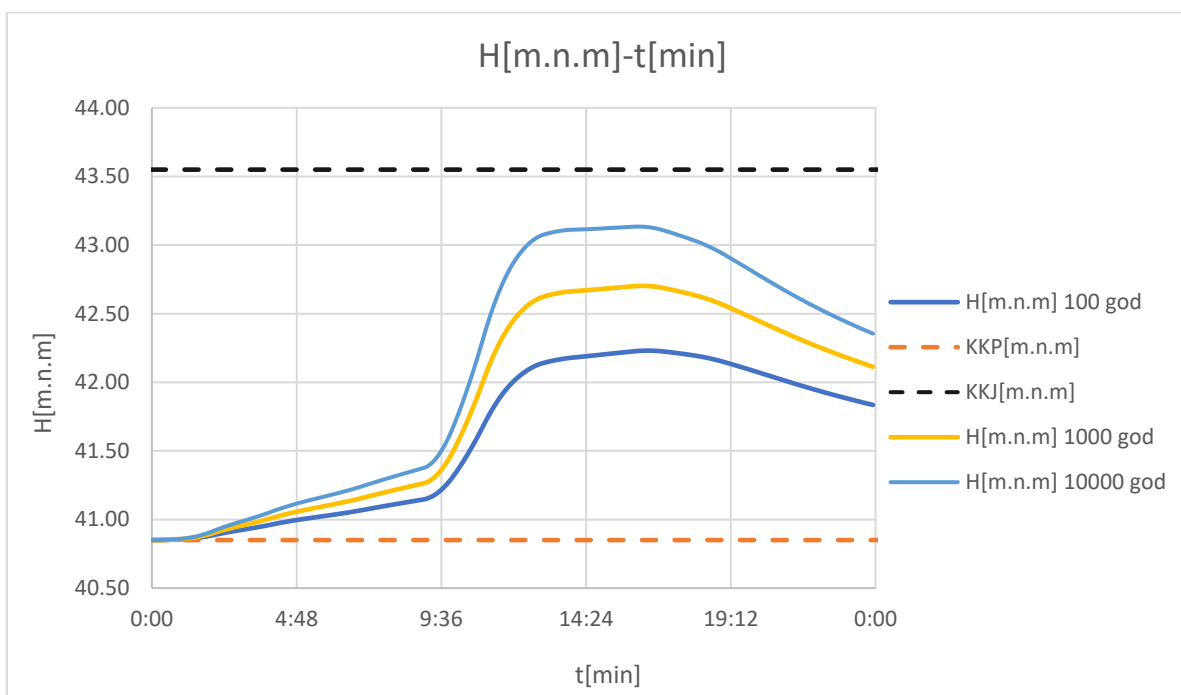
POVRATNI PERIOD [god]	POSTOJEĆI PRELJEV		LABIRINTSKI PRELJEV		BUNARSKI PRELJEV	
	Q[m3/s]	H[m.n.m]	Q[m3/s]	H[m.n.m]	Q[m3/s]	H[m.n.m]
100	70.33	42.23	112.81	41.92	70.33	42.23
1000	109.31	42.70	166.59	42.30	109.31	42.70
10000	149.72	43.13	214.13	42.66	149.71	43.13

Iz tablice je vidljivo da se najveća količina vode preljeva preko labirinskog preljeva, dok je količina vode koja se preljeva preko postojećeg (bočnog) i bunarskog (šahtnog) preljeva jednaka i nešto manja nego kod labirinskog preljeva, a razlog tome je veća efektivna duljina prelijevanja koju osigurava labirintski preljev. Labirintski preljev omogućuje da se unutar zadane odnosno fiksne širine preljeva poveća efektivna duljina prelijevanja te se samim time omogućuje prelijevanje veće količine vode što uzrokuje manje maksimalne razine vode u akumulaciji, no također treba uzeti u obzir da veći protoci prelijevanja mogu imati negativan utjecaj na nizvodno područje jer postoji opasnost od potapanja.

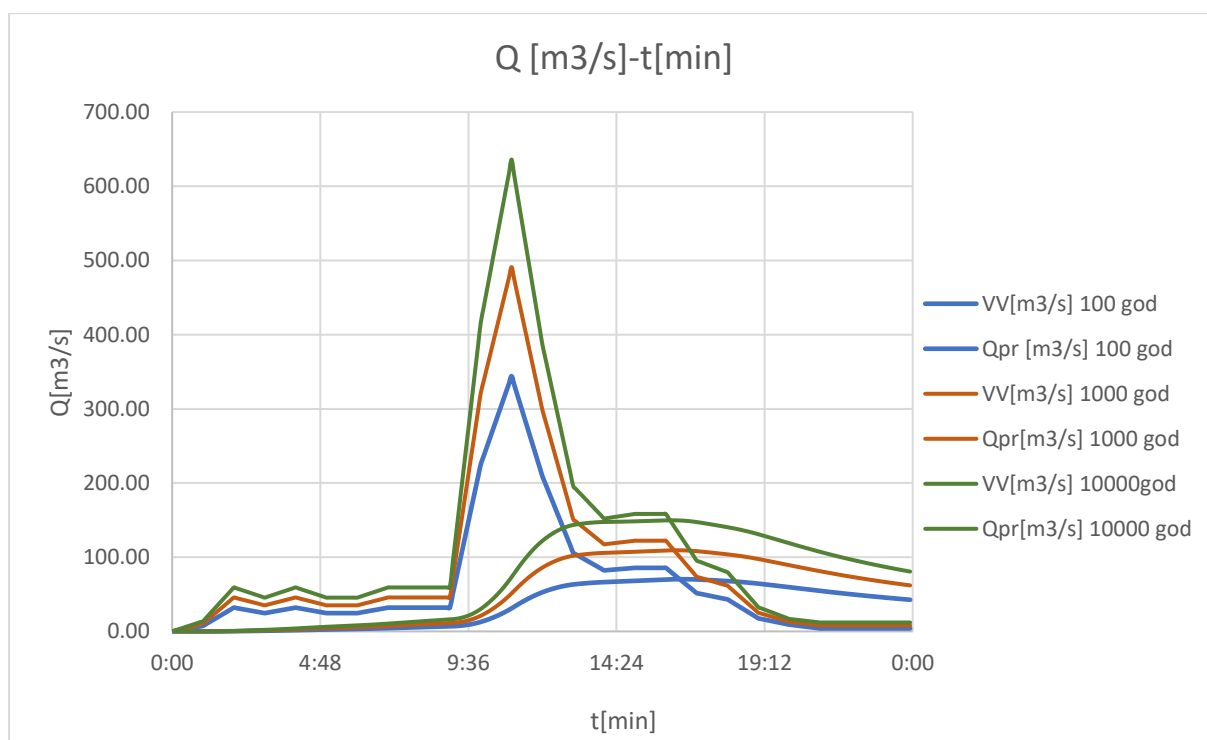
Također, važno je napomenuti kako je bitno utvrditi količine potrebnih radova te financijsku isplativost izgradnje pojedinog preljeva, jer je to jedan od najvažnijih čimbenika koji se uzima u obzir prilikom odabira optimalnog tipa preljeva.

U sljedećim poglavljima grafički su prikazani i uspoređeni rezultati razina vode u akumulaciji u vremenu, količine protoka koji se preljeva i dolazni vodni valovi za sve vrste preljeva i sve povratne periode.

4.1 Postojeći preljev

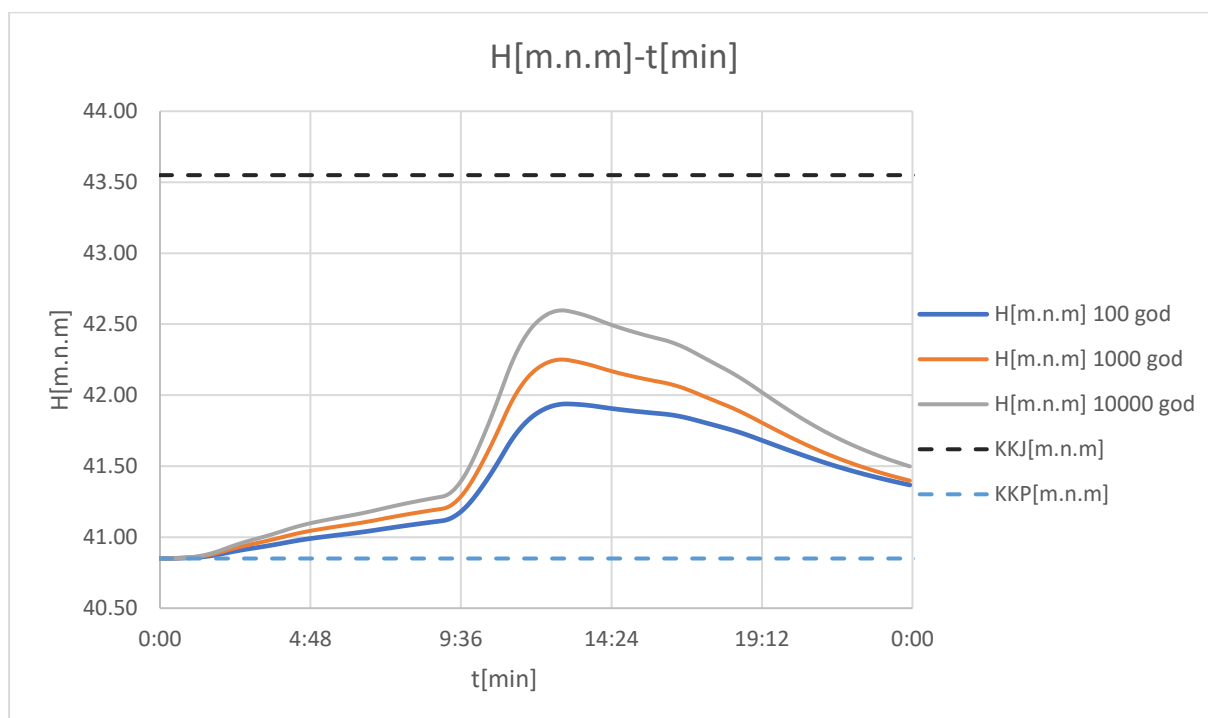


Slika 20. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za postojeći preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina periode

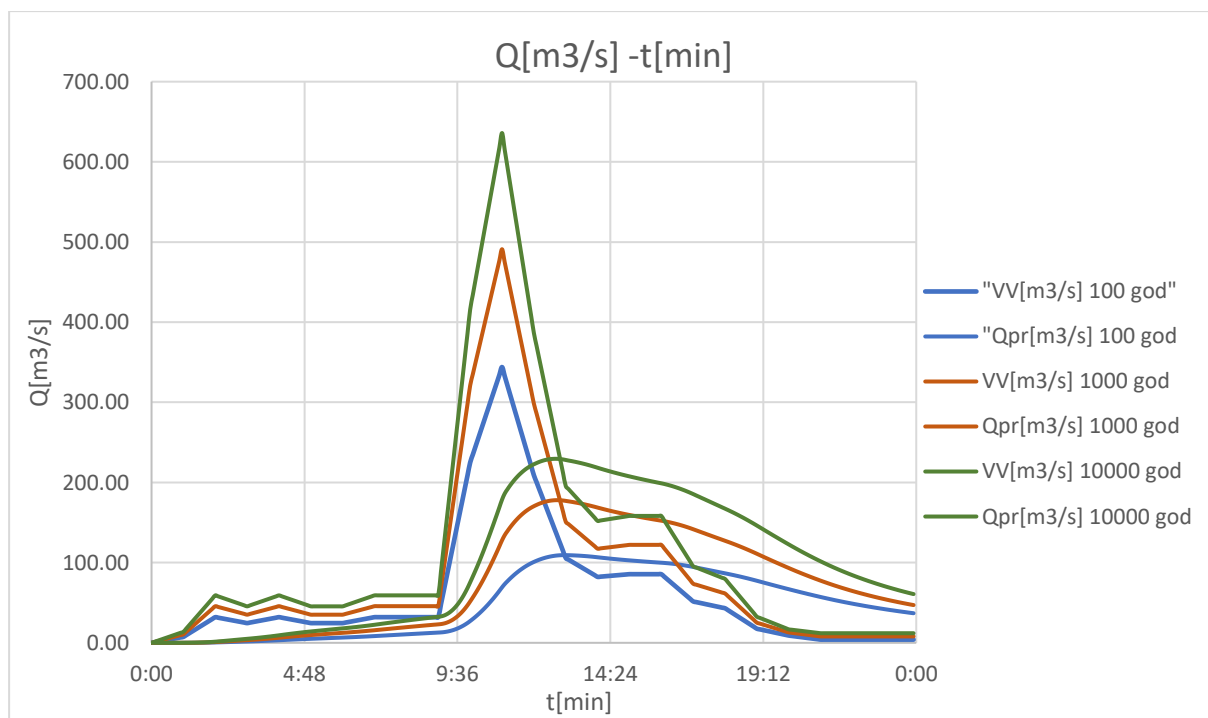


Slika 21. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja u vremenu za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina

4.2 Labirintski preljev

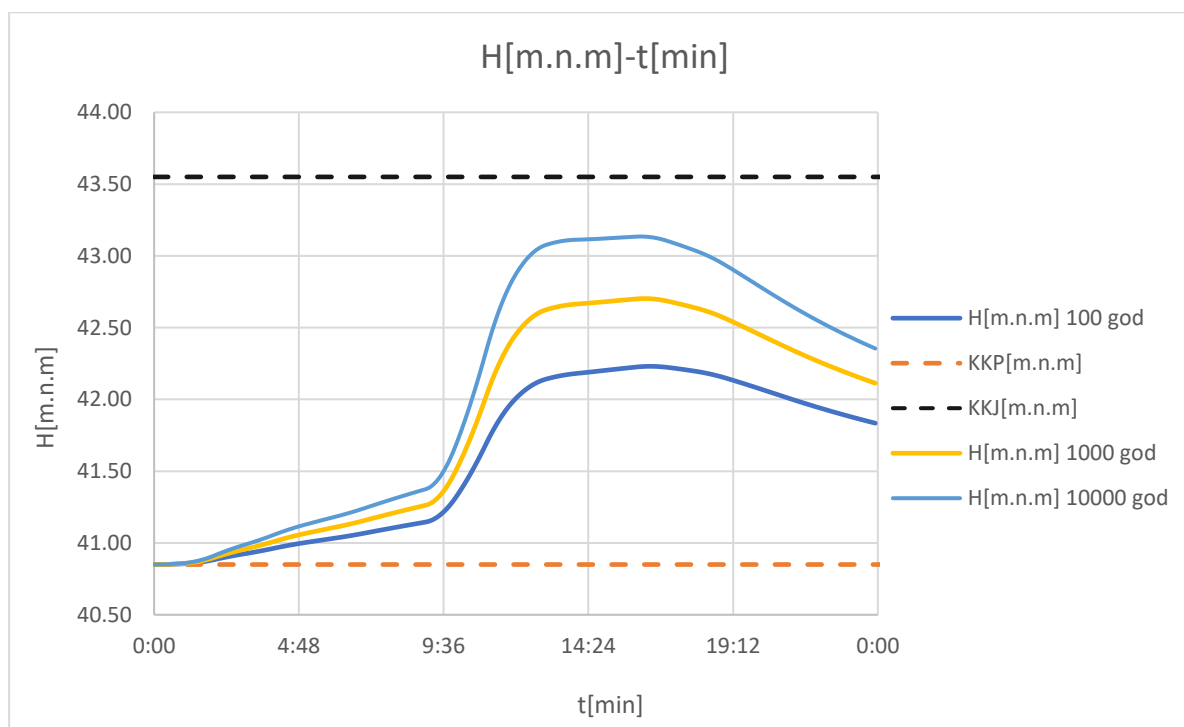


Slika 22. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za labirintski preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina

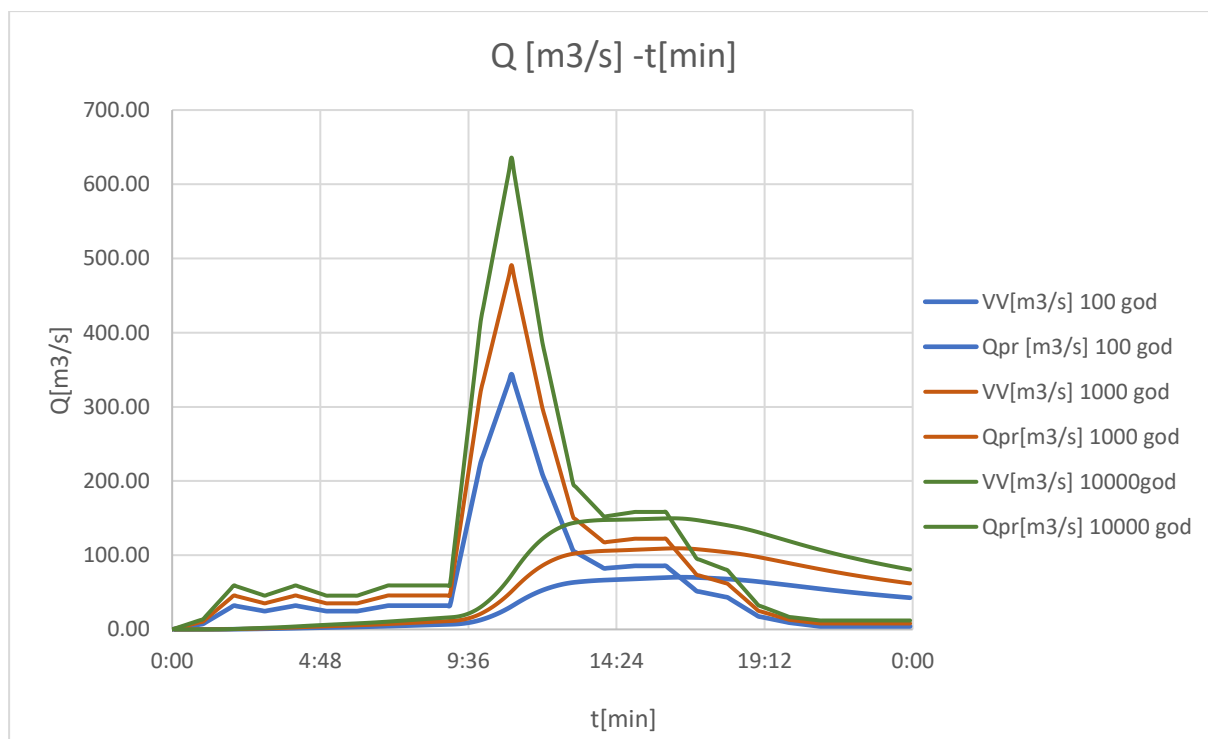


Slika 23. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja u vremenu za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina, labirintski preljev

4.3 Bunarski (šahтни) preljev



Slika 24. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za bunarski preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina



Slika 25. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina, bunarski preljev

5. DOKAZNICA MJERA

1. Pripremni radovi					
Stavka	Opis stavke	Obračunska jedinica	Količina		
			Postojeći preljev	Labirintski preljev	Bunarski preljev
1.1.	Geodetski radovi: mjerenja koja su u vezi s prijenosom podataka iz projekta na teren i obratno, iskolčenje objekata.	1	1	1	1
1. Zemljani radovi					
1.1	Iskop humusa do dubine 30cm. Cijena obuhvaća iskop, utovar u prijevozno sredstvo, odvoz na legalnu deponiju.	m ³	322	358	390
1.2	Široki iskop do kote dna. Rad obuhvaća strojni iskop u širokom otkopu s utovarom iskopanog materijala u prijevozno sredstvo. Iskop se vrši po definiranim kotama i u definiranim nagibima.	m ³	9000	9780	17865
1.3	Uređenje temeljnog tla mehaničkim zbijanjem. Rad obuhvaća sve radove koji su potrebni kako bi se ostvarile potrebne geomehaničke karakteristike tla	m ²	953	1080	1300
1.4	Odvoz iskopanog materijala na legalnu deponiju	m ³	5838	6038	10652
1.5	Odvoz i dovoz iskopanog materijala na privremeno odlagalište za potrebe zatrpavanja građevinskih jama	m ³	3162	3742	7213
2. Betonski i armirano betonski radovi					
2.1	Nabava, doprema i ugradnja podložnog betona C10/16, debljine 10cm	m ³	95	108	61.8
2.2	Izrada temelja i tijela zidova iz betona C25/30 u dvostranoj oplati po nacrtima. U rad je uključena izvedba oplata, čišćenje priprema gornje površine podloge, priprema, doprema i ugradnja betona, izravnjanje do projektirane kote, zaštita i njega betona, kontrola kvalitete i zbijenosti betona, skidanje oplata i odvoz otpadaka.	m ³	2522	2930	1253.8
2.3	Izrada vertikalne dionice, krivine i tunelskog provodnika iz betona C25/30 u debljini od 0.5 m po nacrtima i zadanim kotama.	m ³	-	-	576

6. DISKUSIJA

Proračunom transformacije vodnih valova na tri tipa preljeva: postojeći (bočni), labirintski i bunarski za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina uspoređene su vrijednosti maksimalnog protoka prelijevanja i maksimalnih preljevskih visina za svaki od povratnih perioda te količine radova.

Utvrđeno je da su kod postojećeg i bunarskog preljeva vrijednosti protoka prelijevanja Q_{pr} [m^3/s] i maksimalnih visina prelijevanja h [m] jednake, dok je analizom labirintskog preljeva utvrđeno da su protoci prelijevanja Q_{pr} [m^3/s] veći nego kod preostala dva tipa jer veća efektivna duljina prelijevanja koju osigurava labirintski preljev uzrokuje veću protočnost. To uzrokuje niže razine vode H [m.n.m] u akumulaciji i povoljan je uvjet jer razina vode u akumulaciji ne smije prelaziti jezgru brane koja je na koti od 43.55 m.n.m. s obzirom da se radi o nasutoj brani. S druge strane veći protoci prelijevanja mogu izazvati negativan utjecaj na nizvodno područje jer postoji opasnost od potapanja.

Usporedbom dokaznica mjera prikazanih u prethodnom poglavlju za sva tri tipa preljeva, utvrđeno je da je ukupna količina radova najmanja prilikom izgradnje postojećeg preljeva dok je količina radova pri izgradnji labirintskog preljeva značajno veća. Izgradnja bunarskog preljeva zahtjeva najveću ukupnu količinu radova, no sagledavajući samo betonske radove, za izgradnju bunarskog preljeva količine radova su najmanje, zatim slijede postojeći pa labirintski preljev.

Uzimajući u obzir protoke prelijevanja, maksimalne visine prelijevanja i ukupne količine radova, labirintski tip preljeva najpovoljnija je opcija ukoliko se želi postići veći kapacitet prelijevanja unutar ograničenog prostora i niže razine vode u akumulaciji no potrebno je uzeti u obzir i ograničen kapacitet korita nizvodno te sagledati potrebu i isplativost povećanja kapaciteta korita na dimenzije koje zadovoljavaju veći protok. Uspoređujući postojeći i bunarski preljev, s obzirom da osiguravaju jednake protoke prelijevanja, isplativija opcija je postojeći preljev zbog nižih troškova izgradnje.

LITERATURA

- [1] US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, 1987.
- [2] How do you design a spillway for a dam to prevent overtopping and erosion?
www.linkedin.com. Dostupno na: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-do-you-design-spillway-dam-prevent>. [Pristupljeno: 05.02.2024]
- [3] Agroskin I. I., Dimitrijević G. T., Pikalov F. I. *Hidraulika*. Zagreb: Tehnička knjiga; 1964
- [4] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet. Hidrotehničke građevine-3.dio, *grad.hr*.
Dostupno: http://grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/hidrotehnicke_gradevine/nastavni_materijali/Dio2/Nasutebrane%20i%20dalje.pdf [Pristupljeno: 05.02.2024]
- [5] Coleman Wayne H., *Hydraulic design od spillways*. Chicago, Illinois: Harza Engineering Company, 1992
- [6] Zeerat B., Heidarnejad M., Masjedi A., Kamanbedast A. A., Hasoonizadeh H.,
Laboratorijska analiza hidrauličkog koeficijenta labirinskog preljeva zakrivljenog tlocrta i tipkastog preljeva, *Građevinar*, 2019. 71(5): 409-416
- [7] The Constructor, Building ideas. <https://theconstructor.org/>. Dostupno na:
<https://theconstructor.org/water-resources/hydraulic-structures/different-types-spillways/32484/> [Pristupljeno: 05.02.2024]
- [8] Dogan Y., Kaya N., Utjecaj oblika krune na koeficijent prelijevanja linearnih preljeva,
Građevinar, 2023. 75(7): 695-702
- [9] Suljić N., Prelivi i brzotoci, <https://rggf.ba/>. Dostupno na: <https://www.nedim-suljic.mojweb.ba/file/4-prelivi-i-brzotoci/282>. [Pristupljeno: 05.02.2024]
- [10] Crookston B. *Labyrinth weirs*, Logan, Utah state university, 2010.
- [11] Tullis Paul J., Amanian N., Waldron D., Design of labyrinth spillways, *Journal of Hydraulic engineering*, 1995
- [12] Transformacija poplavnih talasa, *pdfcoffee.com*. Dostupno na:
<https://pdfcoffee.com/transformacija-poplavnih-talasa-pdf-free.html>. [Pristupljeno: 05.02.2023]
- [13] Rubinić A., Mjerenje nanosa u akumulacijskom jezeru Butoniga, <https://hrcak.srce.hr/>.
Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/372430> [Pristupljeno: 06.02.2024]

POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste preljeva praktičnog profila [3].....	2
Slika 2. Dva tipa brane za koja su određene jedinične koordinate [3].....	3
Slika 3. Bočni preljev sa sabirnim kanalom [4]	5
Slika 4. Bočni preljev sa tunelskim provodnikom [4].....	5
Slika 5. Labirintski preljev[5]	7
Slika 6. Prikaz parametara labirinskog preljeva [10]	8
Slika 7. Očitavanje koeficijenta prelijevanja [5].....	9
Slika 8. Tlocrtni prikaz dijelova preljeva [5]	10
Slika 9. Različiti oblici krune preljeva [8]	10
Slika 10. Uzdužni presjek bunarskog preljeva [9]	11
Slika 11. Tlocrt i pripadajući presjeci [9].....	12
Slika 12. Kontrolni presjeci kod bunarskog preljeva [9]	12
Slika 13. Presjek deflektora i vertikalno koljeno [9].....	13
Slika 14. Dimenzioniranje vertikalnog šahta iznad deflektora [9].....	15
Slika 15. Tečenje u vertikalnoj krivini i horizontalnom tunelu [9].....	15
Slika 16. Grafički prikaz vodnih valova različitih povratnih perioda	18
Slika 17. Grafički prikaz krivulje volumena i površine akumulacije.....	20
Slika 18. Grafički prikaz transformacije vodnog vala [12].....	22
Slika 19. Grafički prikaz ovisnosti površine F u odnosu na visinu H.....	25
Slika 20. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za postojeći preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina periode	31
Slika 21. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja u vremenu za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina	31
Slika 22. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za labirintski preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina.....	32
Slika 23. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja u vremenu za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina, labirintski preljev.....	32
Slika 24. Grafički prikaz razina vode u akumulaciji za bunarski preljev za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina.....	33
Slika 25. Grafički prikaz dolaznih vodnih valova i protoka prelijevanja za povratne periode od 100, 1000 i 10000 godina, bunarski preljev	33

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koordinate za konstrukciju preljeva	3
Tablica 2. Veličine prijelaznih polumjera za brane.....	4
Tablica 3. Prognozirani val za povratne periode od 100, 1000 i 1000 godina.....	18
Tablica 4. Ovisnost razine vode i volumena u akumulaciji Butoniga.....	19
Tablica 5. Geometrija labirinskog preljeva	21
Tablica 6. Prognozirani dolazni protok za 24 satni period.....	23
Tablica 7. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, postojeći preljev	23
Tablica 8. Prikaz proračuna transformacije vodnih valova za prvih 1h, postojeći preljev, 100 PP	24
Tablica 9. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, labirintski preljev.....	26
Tablica 10. Prikaz proračuna transformacije vodnog vala za prvih 1 h, labirintski preljev, 100 PP	26
Tablica 11. Ulazni podaci za proračun transformacije vodnog vala, bunarski preljev	28
Tablica 12. Prikaz proračuna transformacije vodnog vala za prvih 1 h, bunarski preljev	28
Tablica 13. Prikaz ekstrema	30

7. GRAFIČKI PRILOZI

Prilog 1 Situacijski nacrt-labirintski preljev

Prilog 2 Tlocrt preljeva, brzotoka i slapišta

Prilog 3 Presjek 4-4

Prilog 4 Presjek 1-1, Presjek 2-2

Prilog 5 Presjek 3-3, Presjek 5-5

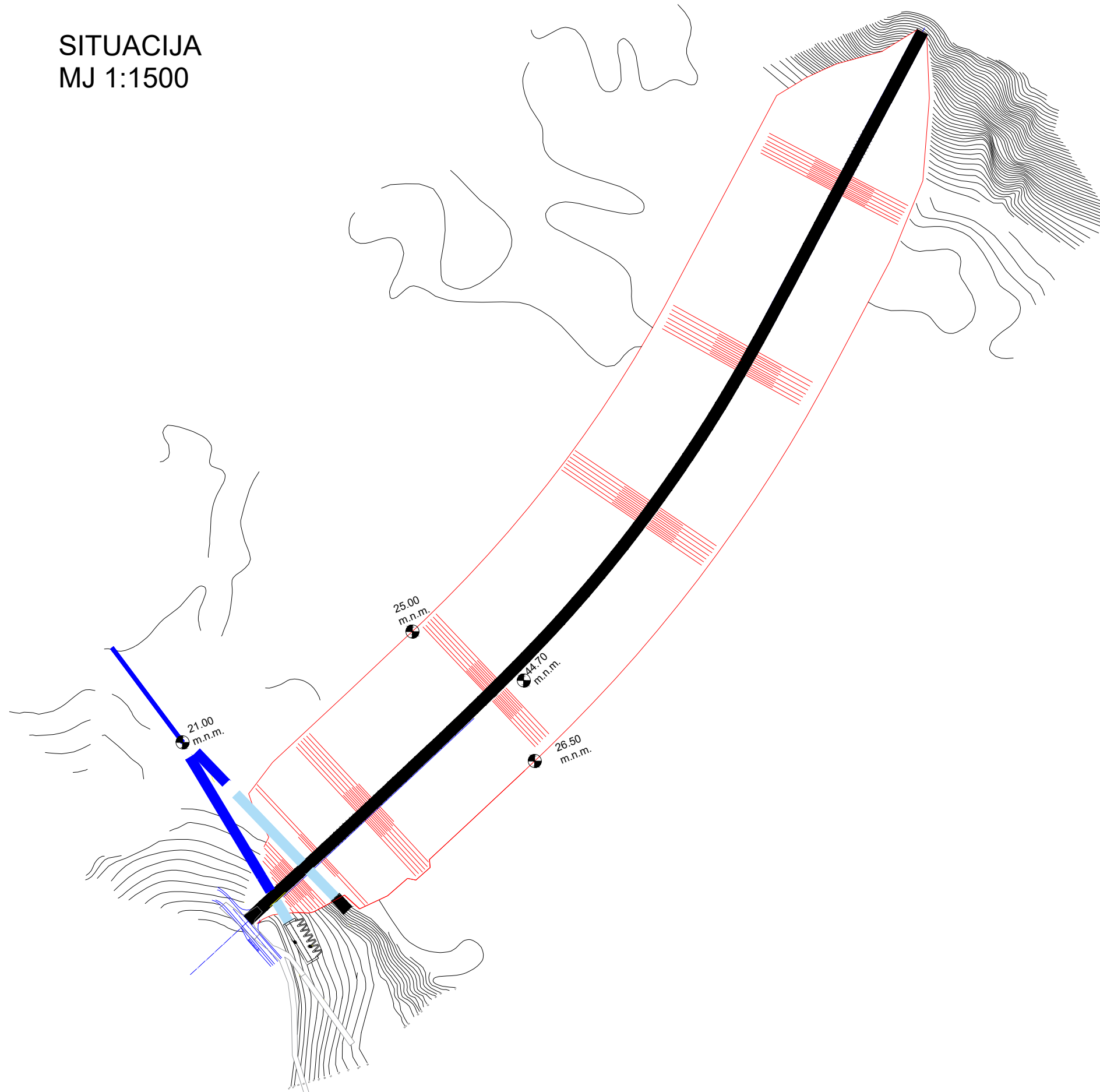
Prilog 6 Situacijski nacrt-bunarski preljev


Prilog 7 Tlocrt preljeva i slapišta

Prilog 8 Presjek 1-1

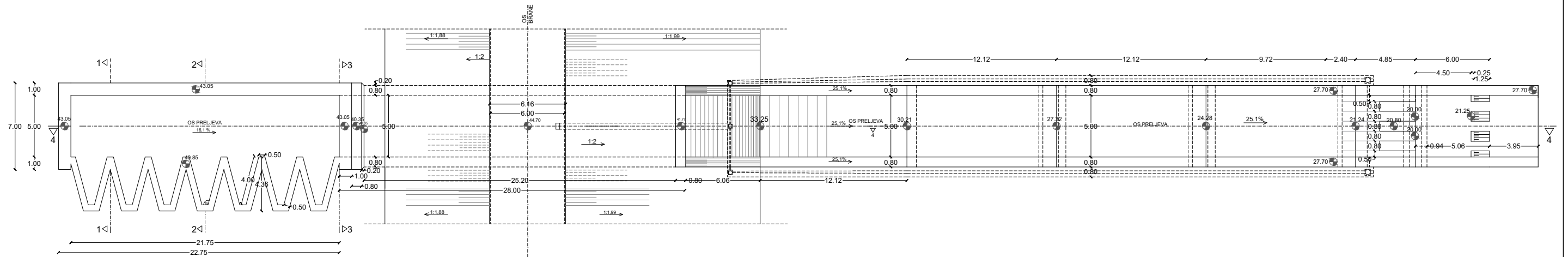
Prilog 9 Presjek 2-2


SITUACIJA
MJ 1:1500



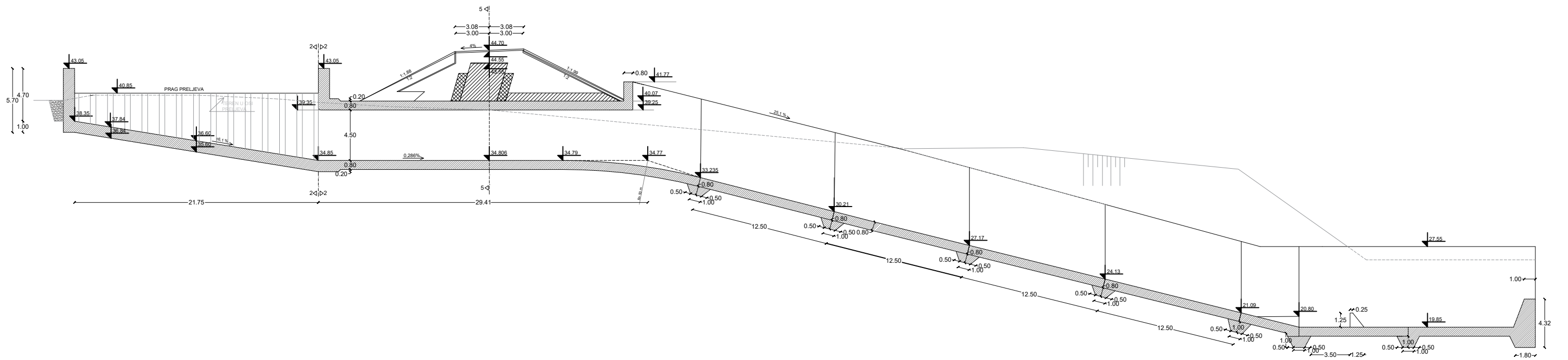
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 1
KOLEGIJ	Diplomski rad
SADRŽAJ	Situacijski nacrt-labirintski preljev
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk
IZRADIO	Ana Jović
MJERILO	1:1500
DATUM	07.02.2024


TLOCRT PRELJEVA,
BRZOTOKA I SLAPIŠTA
MJ 1:100



	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb		Prilog 2
	KOLEGIJ	Diplomski rad	
SADRŽAJ	Tlocrt preljeva, brzotoka i slapišta		
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk		
IZRADIO	Ana Jović		
MJERILO	1:100		
DATUM	07.02.2024		

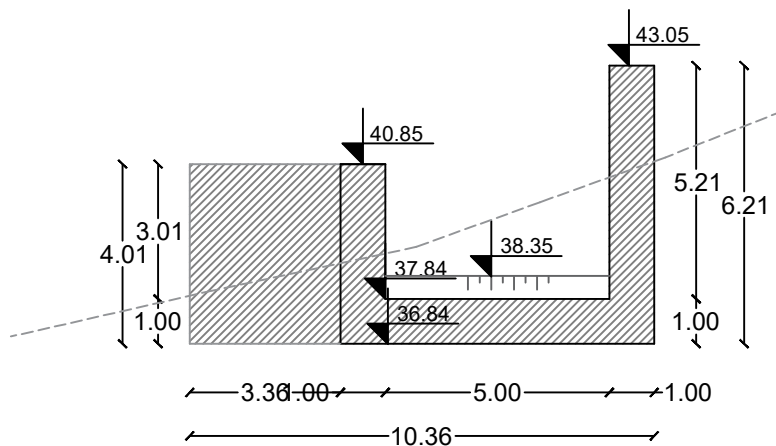
PRESJEK 4-4
MJ 1:100



	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb		Prilog 3
	KOLEGIJ	Diplomski rad	
SADRŽAJ	Presjek 4-4		
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk		
IZRADIO	Ana Jović		
MJERILO	1:100		
DATUM	07.02.2024		

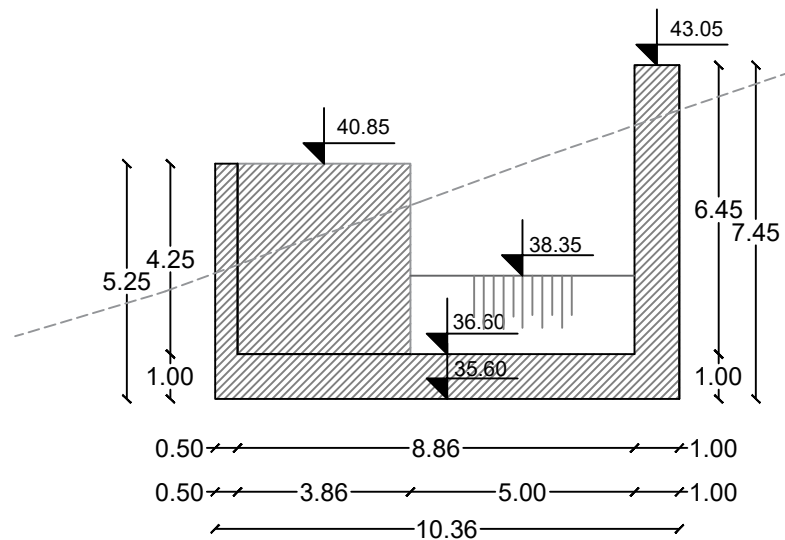
PRESJEK 1-1


MJ 1:100



PRESJEK 2-2

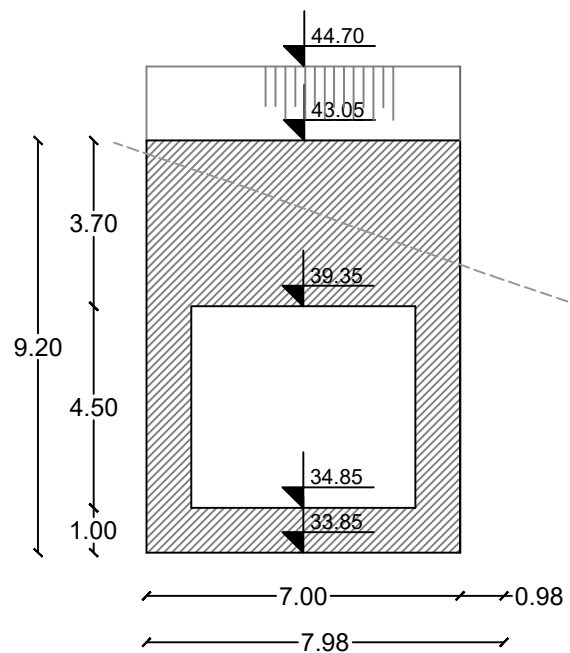
MJ 1:100



 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 4
	KOLEGIJ
SADRŽAJ	Presjek 1-1, Presjek 2-2
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk
IZRADIO	Ana Jović
MJERILO	1:100
DATUM	07.02.2024

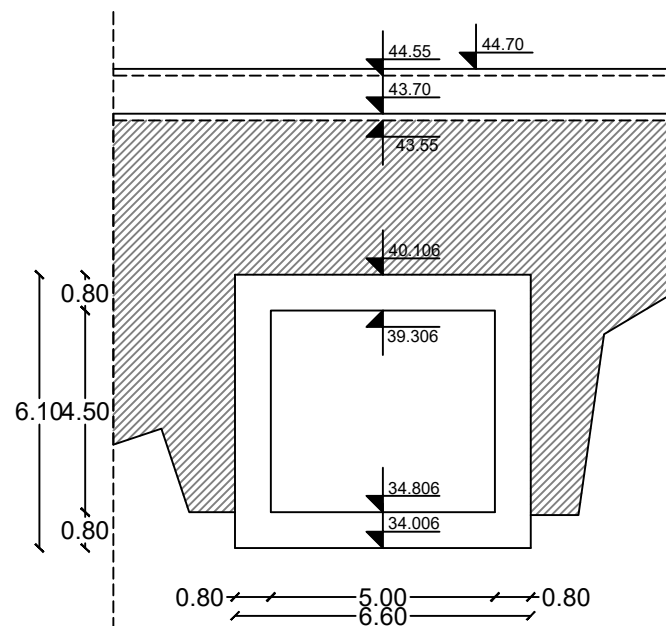
PRESJEK 3-3


MJ 1:100



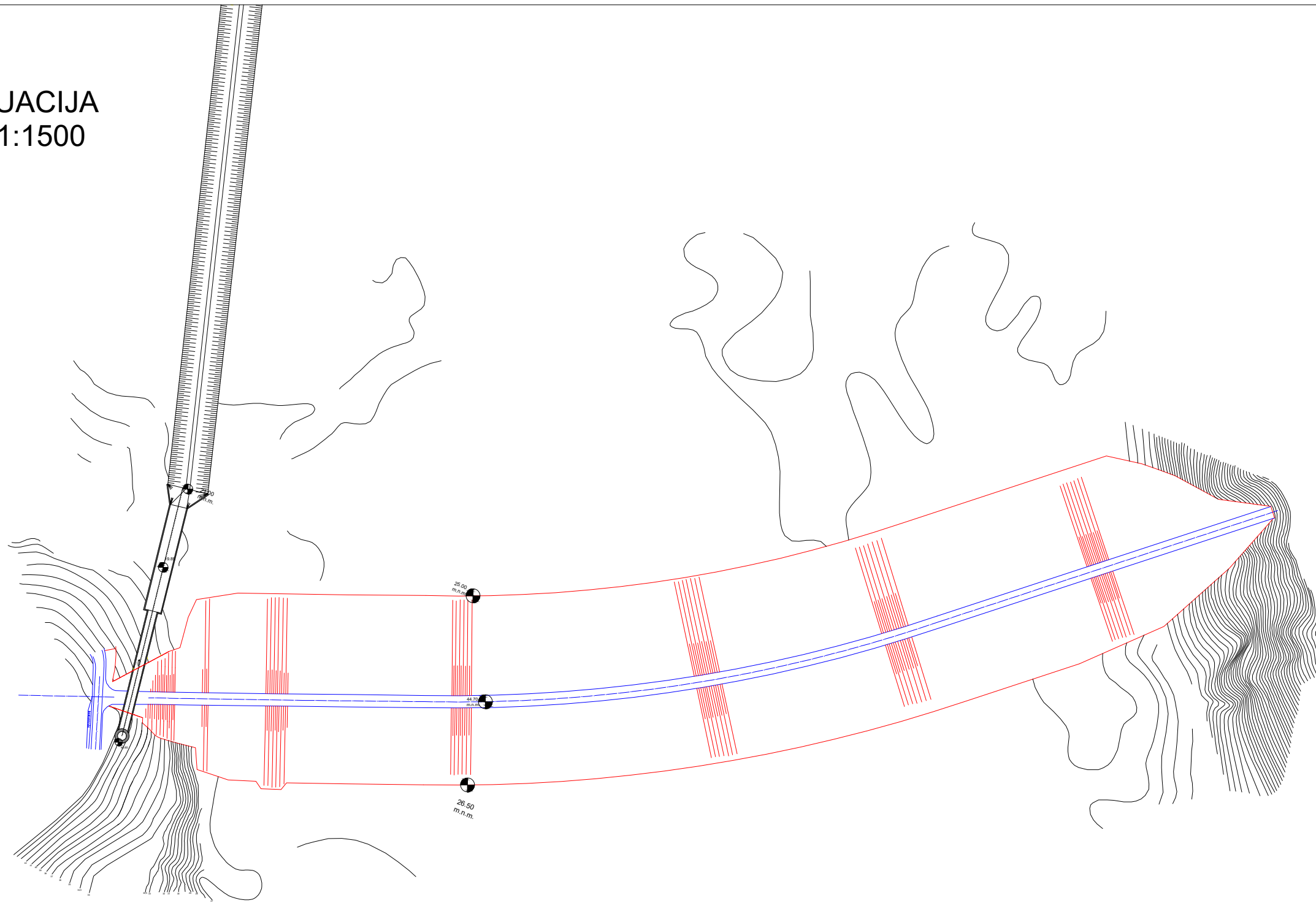
PRESJEK 5-5


MJ 1:100



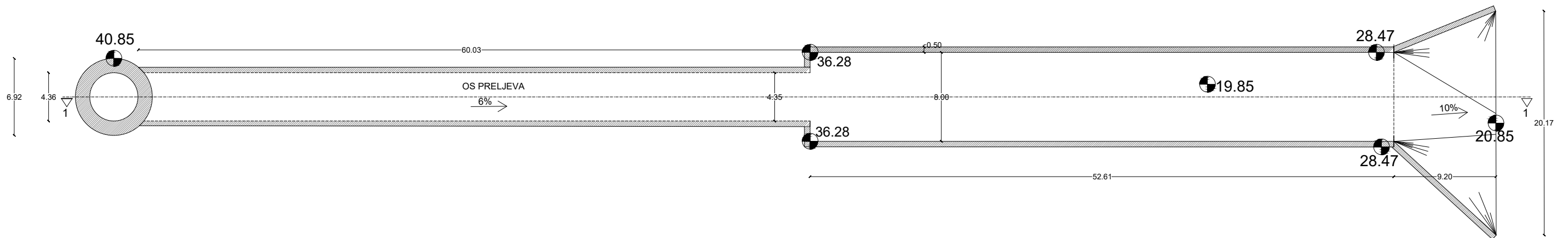
 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 5
KOLEGIJ	Diplomski rad
SADRŽAJ	Presjek 3-3, Presjek 5-5
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk
IZRADIO	Ana Jović
MJERILO	1:100
DATUM	07.02.2024


SITUACIJA
MJ 1:1500



	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 6
KOLEGIJ	Diplomski rad	
SADRŽAJ	Situacijski nacrt-bunarski preljev	
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk	
IZRADIO	Ana Jović	
MJERILO	1:1500	
DATUM	07.02.2024	

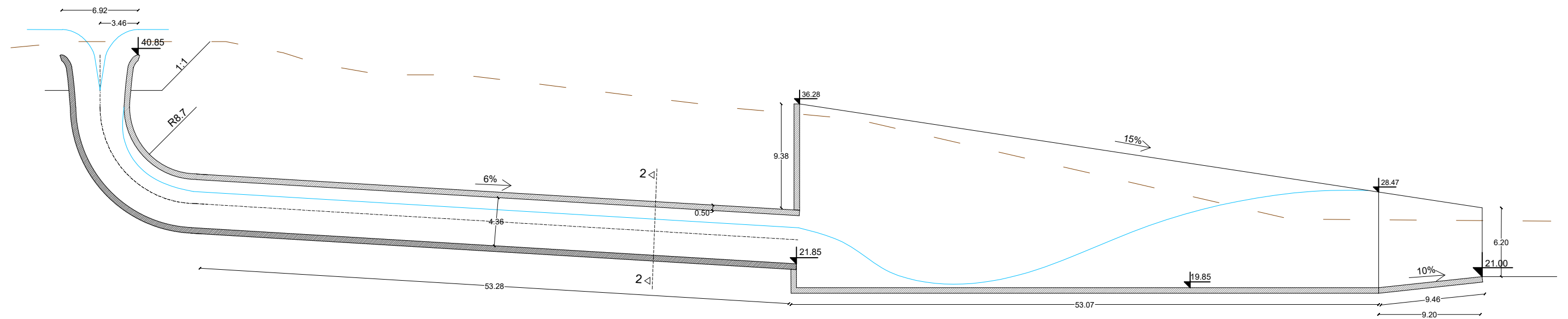
TLOCRT PRELJEVA I
SLAPIŠTA
MJ 1:100




	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 7
	KOLEGIJ SADRŽAJ MENTOR IZRADIO MJERILO DATUM	

PRESJEK 1-1

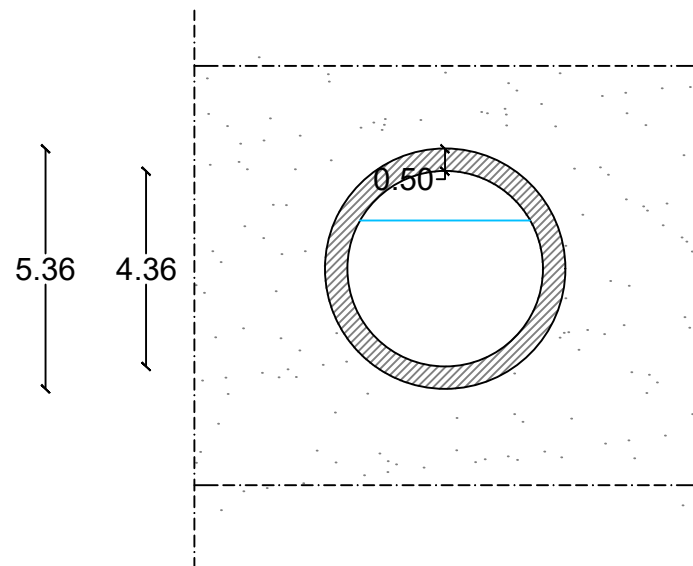
MJ 1:100




	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 8
KOLEGIJ	Diplomski rad	
SADRŽAJ	Presjek 1-1	
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk	
IZRADIO	Ana Jović	
MJERILO	1:100	
DATUM	07.02.2024	

PRESJEK 2-2

MJ 1:100



	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET Kačićeva 26, Zagreb	Prilog 9
	KOLEGIJ	
SADRŽAJ	Presjek 2-2	
MENTOR	Prof. dr. sc Eva Ocvirk	
IZRADIO	Ana Jović	
MJERILO	1:100	
DATUM	07.02.2024	