

ZAŠTITA GRAĐEVINSKE JAME I TEMELJENJE USTAVE “ŠIŠLJAVIĆ” NA ODTERETNOM KANALU KUPA – KUPA

IVAN MIHALJEVIĆ¹, MARKO KAIĆ², NENAD HEĆEK³

¹ Geokon-Zagreb d.d., Hrvatska

² Geokon-Zagreb d.d., Hrvatska

³ Elektroprojekt d.d., Hrvatska

Sažetak

Za izgradnju betonske hidrotehničke građevine “Ustave Šišljavić” na kanalu Kupa-Kupa potrebno je riješiti čitav niz geotehničkih izazova kako bi se omogućila izgradnja ustave. Temeljno tlo u podlozi postojećeg kanala sastoji se od sloja propusnih šljunaka, organske meko stišljive gline te izmjene krućih aluvijalnih naslaga u podlozi. Za fazu izgradnje unutar oteretnog kanala, osigurava se građevna jama za rad “u suhom”. U tu svrhu projektirana je zaštita građevinske jame koja je postavila zagate na uzvodnoj i nizvodnoj strani kanala, uz izvedbu injekcijske zavjese po cijelom opsegu jame. Za temeljenje ustave tlo se poboljšava mlazno injektiranim stupnjacima, dok se hidraulička stabilnost temeljnog ta ispod ustave ostvaruje injekcijskom zavjesom. Potporni zidovi i plato ustave u bokovima kanala također se osiguravaju poboljšanjem tla. Specifičnost predstavlja faza izgradnje jer je građevna jama projektirana na način da se dopušta privremeno “potapanje” i kontrolirano propuštanje u slučaju nailaska velikog vodnog vala rijeke Kupe. Primjerom je pokazano kako izvedba zaštite građevinske jame i temeljenja hidrotehničkog objekta kao što je ustava u oteretnom kanalu zahtijeva, osim razumijevanja složene geotehničke problematike, razumijevanje i usklađivanje sa hidrotehničkim zahtjevima i specifičnostima objekta te cijeli niz organizacijskih i gradilišnih zahtjeva, kao preduvjeta uspješnih rješenja.

Ključne riječi

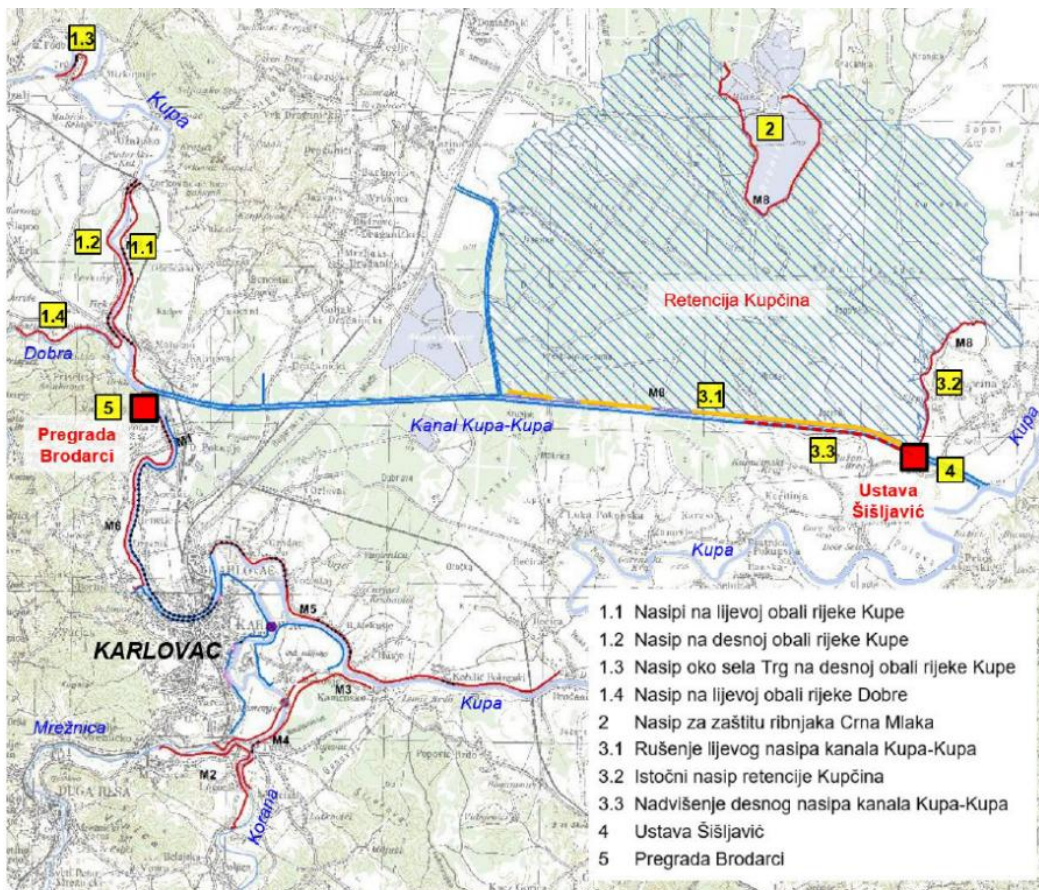
hidrotehničke građevine, ustava, građevinska jama, zagat, injekcijska zavjesa, poboljšanje tla

1 Uvod

Područje Karlovca i Siska, zbog svog geografskog položaja na slivovima rijeka Kupe i Dobre, povijesno je izloženo značajnim poplavnim rizicima koji ugrožavaju stanovništvo, gospodarstvo i okoliš. Kao odgovor na ovu ugrozu, Republika Hrvatska pokrenula je stratešku inicijativu pod nazivom "Sustav zaštite od poplava karlovačko-sisačkog područja" (Odluka, NN 111/2008), s ciljem izgradnje sveobuhvatnog sustava za upravljanje velikim vodama i smanjenje poplavnih rizika na prihvatljivu razinu.

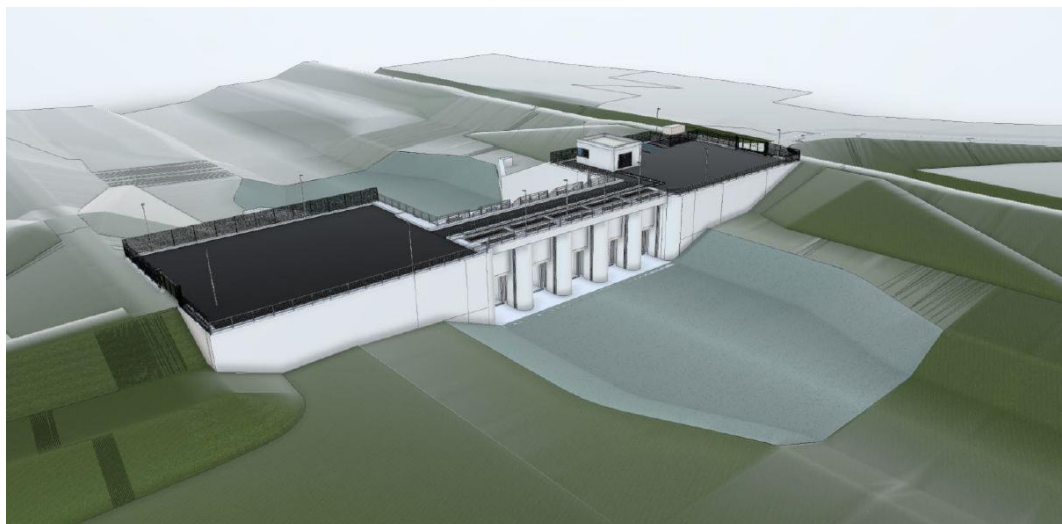
Jedan od temeljnih elemenata ovog sustava je projekt "MJERA M8: Pregrada Brodarci s vodnim građevinama na kanalu Kupa-Kupa, rijekama Kupi i Dobri i retenciji Kupčina" (Glavni projekt, 2024.). Riječ je o kompleksnom zahvatu koji obuhvaća niz hidrotehničkih građevina, nasipa i regulacijskih objekata namijenjenih integriranom upravljanju vodnim resursima.

Objekt „Ustava Šišljavić“ je dio građevine 4. etape izgradnje projekta „MJERA M8“. Smještena na oteretnom kanalu Kupa-Kupa (stac. 1+995 km) predviđena je radi zadržavanja velikih voda unutar retencije Kupčina te kontrolirano ispuštanje natrag u korito rijeke Kupe (slika 1)



Slika 1. Pregledna karta objekata u sustavu projekta „Mjera M8“ na TK 25

Projektirana je kao betonska gravitacijska ustava. Kruna ustave postavljena je na projektiranoj koti nadvišenja nasipa uvećanoj za sigurnosni dodatak. Visinska razlika krune i praga ustave (dna oteretnog kanala) iznosi 10 m. Dužina ustave iznosi 42,85 m. U srednjem dijelu ustava ima pet ispusnih otvora dimenzija 4,50 x 4,50 m kontrolirana tablastim zapornicama.



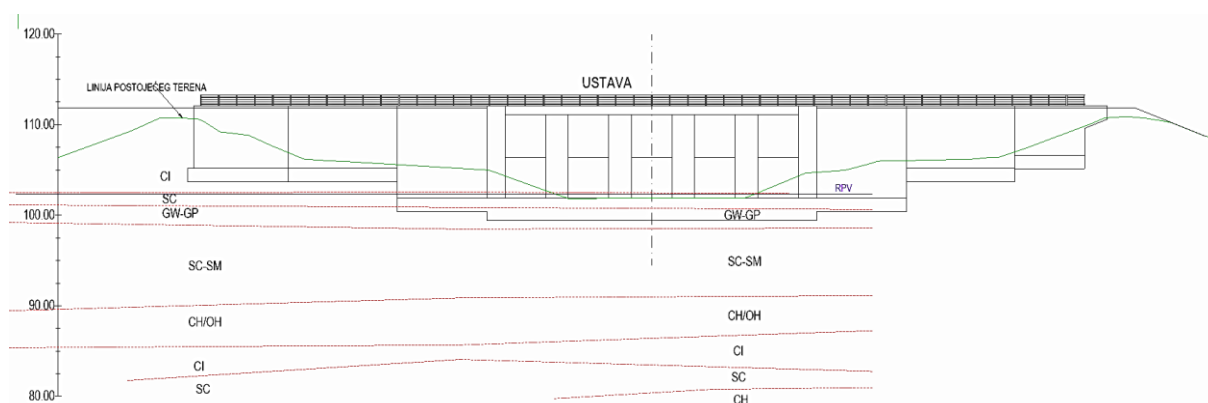
Slika 2. Ustava Šišljavić – pogled s uzvodne strane

1.1 Uvjeti u temeljnom tlu

Za potrebe projekta provedeni su geotehnički istražni radovi koji su služili kao osnova za geotehničko projektiranje ustave.

Temeljno tlo u podlozi ispod dna postojećeg kanala sastoji se od sloja propusnih šljunaka i pijesaka do dubine oko 11 m, zatim organske, visoko plastične gline debljine sloja oko 4,5 m te izmjene krućih aluvijalnih naslaga (SC, CI, CH) u dubljoj podlozi.

Shematski prikaz sastava temeljnog tla u poprečnom smjeru kanala, sa konturom buduće građevine ustave prikazan je na slici 3.



Slika 3. Sastav temeljnog tla na poprečnom presjeku kanala

Podzemna voda nalazi se u razini postojećeg dna kanala, odnosno varira ovisno o hidrološkim uvjetima unutar sezone, no direktno je povezana sa vodostajima rijeke Kupe.

Postojeći nasip oteretnog kanala Kupa – Kupa građen je lokalnih glinenih materijala te je stabilan i vodotijesan pri prolascima vodnog vala kroz kanal.

2 Geotehnički i hidrotehnički izazovi

Za izgradnju ustave Šišljavić potrebno je formirati građevinsku jamu unutar prostora postojećeg oteretnog kanala te osigurati uvjete za temeljenje ustave i svih njenih elemenata: armirano betonskog centralnog dijela sa tablastim zapornicama, slapišta, bočnih krilnih zidova te platoa s upravljačkom kućicom i parkiralištem.

Unutar građevne jame predviđaju se visoke razine podzemne vode i propusni površinski slojevi temeljnog tla, što zahtijeva mjere za osiguranje vodotijesnosti i crpljenje vode iz jame. Dodatni izazov predstavlja činjenica da je kanal Kupa – Kupa oteretni kanal kojim, u uvjetima vodnih valova rijeke Kupe proteče znatna količina vodnog vala. Nerealno je i ekonomski neopravdano štititi građevinsku jamu u svim hidrološkim uvjetima, stoga je potrebno predvidjeti mogućnost „potapanja“ građevne jame i prijenos dijela vodnog vala kroz kanal za najviše vodostaje (100-godišnji i 1000-godišnji protoci).

Izazov za temeljenje građevine predstavlja sloj organske gline u podlozi ispod šljunka. Izvedba ustave na plitkim temeljima, bez poboljšanja temeljnog tla izložena je riziku nejednolikog i dugotrajnog konsolidacijskog slijeganja betonskog dijela ustave. Također, šljunčano temeljno tlo u podlozi ispod betonskog dijela građevine predstavlja potencijalni problem hidrauličke stabilnosti i funkcionalnosti ustave zbog procjeđivanja kroz temeljno tlo.

Bokovi ustave omeđeni su armirano betonskim potpornim zidovima, koji osiguravaju nasuti plato u bokovima.

Za postojeće uvjete u temeljnom tlu potrebno je osigurati stabilnost zidova i bokova ustave.

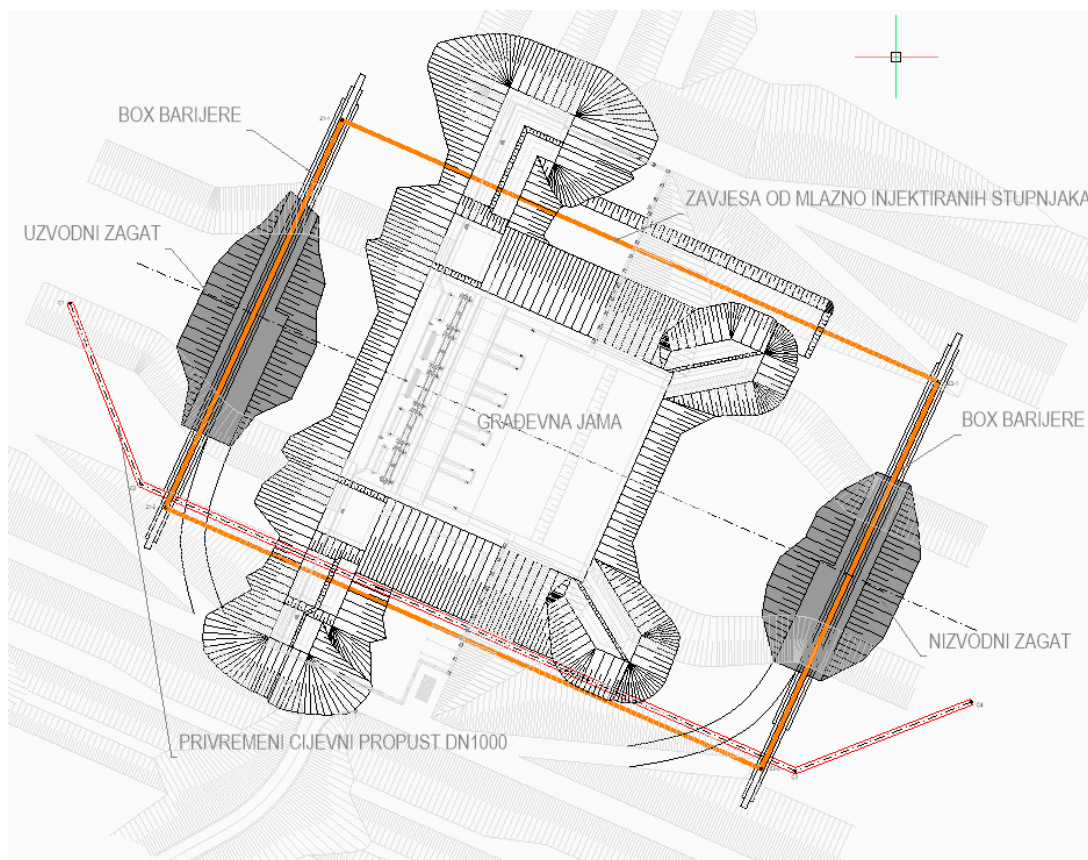
Sumarno, geotehnički izazovi izgradnje predmetne ustave na kanalu sastoje se od:

- zaštite građevne jame ustave u uvjetima funkcioniranja oteretnog kanala Kupa-Kupa,
- temeljenja masivne betonske ustave na aluvijalnom tlu te izvedba vodonepropusne zavjese,
- temeljenja krilnih potpornih zidova i nasipnih platoa u bokovima ustave.

3 Metode i tehnologija izvedbe

Odabrana tehnologija izvedbe i koncept zaštite građevne jame i temeljenja ustave Šišljavić rezultat su sinteze geotehničkih uvjeta lokacije, hidrauličkih ograničenja te zahtjeva funkcionalnosti i trajnosti.

3.1 Zaštita građevne jame za izgradnju ustave



Slika 4. Tlocrt građevne jame ustave Šišljavić

Zaštita građevne jame i građenje u suhom se osigurava izgradnjom dva privremena zagata trapeznog oblika u samom kanalu Kupa-Kupa uzvodno i nizvodno od ustave. Zagati se izvedu od kamenog materijala te obloge od rip-rap materijala.

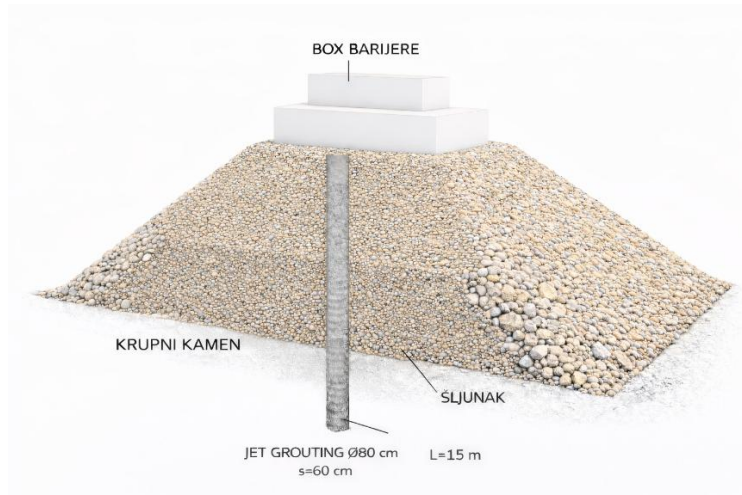
Vodonepropusnost zagata se osigurava zavjesom od mlazno injektiranih stupnjaka promjera 80 cm duljine 15,0 m. Stupnjaci se izvedu oko cijele ustave tako da zatvaraju prostor građevne jame. Stranice zavjese okomito na kanal dugačke su 75,0 m, a stranice paralelno sa kanalom su dužine 110,0 m.

Na zagate se postavljaju box barijere kako bi se zagati nadvisili do kote 108,0 m n.m, a omogućili u kritičnim slučajevima rušenje istih i kontrolirano propuštanje vodnog vala. Box barijere se postavljaju u 3 reda. Boksevi

se pune glinenim materijalom kako bi osiguravali vodonepropusnost. Box barijere se postavljaju u punoj širini poprečnog profila kanala sve do nasipa koji nadvisuju kotu od 108,0 m n.m.

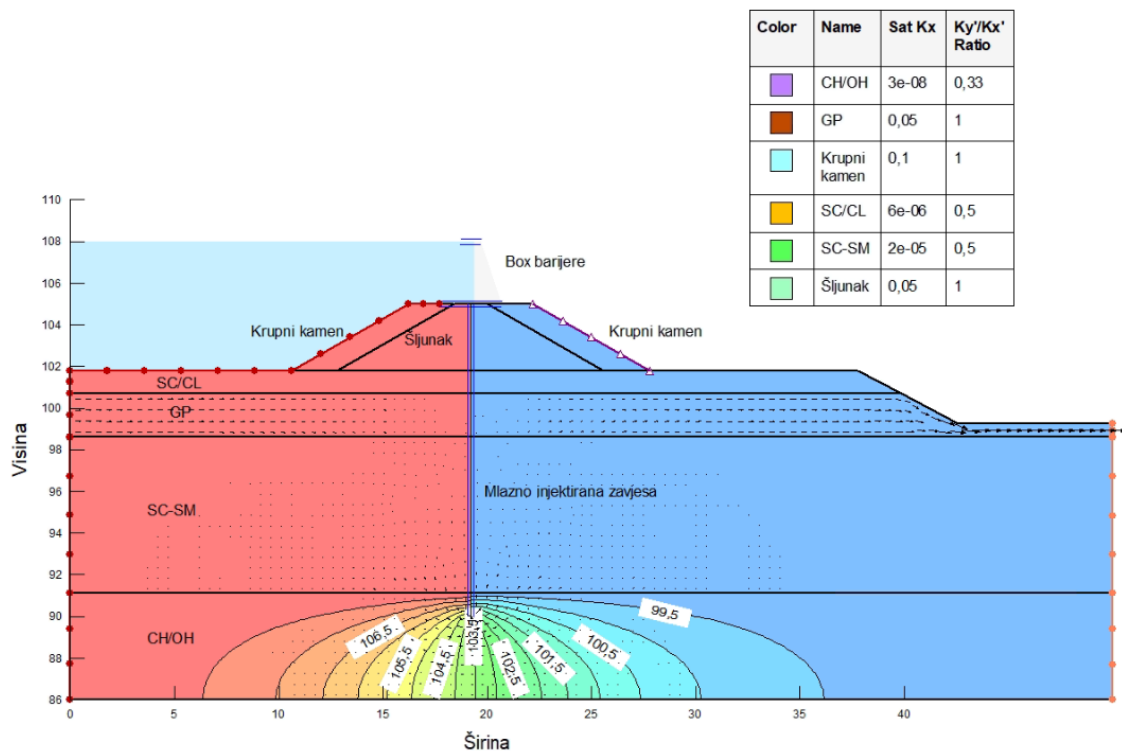
Kako bi se omogućio propust vode kroz kanal za vrijeme građenja, ugrađuje se privremeni cijevni propust DN1000 u desnoj inundaciji kanala s niveletom na 101,8 m n.m. Cijev je duljine cca 167 m te izlazi na drugoj strani vodonepropusne zavjese.

Nakon završetka radova na izgradnji ustave Šišljavić cijev i zagati se uklanjaju.



Slika 5. Presjek kroz privremeni zagat na kanalu

Provedenim analizama procjeđivanja za pojavu velikih voda u kanalu Kupa-Kupa potvrđena je hidrotehnička stabilnost projektiranog zagata i zaštita građevinske jame od podzemnih voda.



Slika 6. Analiza procjeđivanja za uzvodni zagat – raspodjela hidrauličkih potencijala

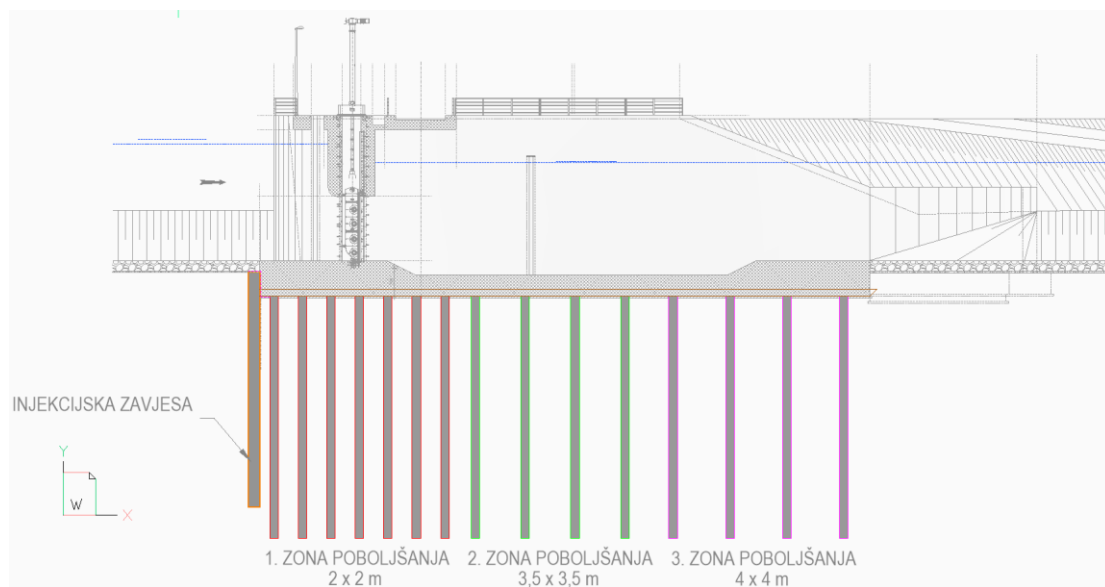
3.2 Temeljenje ustave

Ustava se temelji na AB temeljnoj ploči. Analizama slijeganja betonskog dijela ustave, podijeljenog u zone obzirom na stupanj vertikalnog opterećenja (mase), određeni su rasteri poboljšanja temeljnog tla (tablica 1). Cilj poboljšanja bio je umanjiti ukupna i diferencijalna slijeganja ustave prijenosom vertikalnih opterećenja iz temeljnih ploča preko mlazno injektiranih stupnjaka u kruće, nosive slojeve temeljnog tla u podlozi. Na taj se način izbjegao prijenos opterećenja na sloj organskih i visokoplastičnih gлина u temeljnom tlu, što je za posljedicu moglo imati povećana i dugotrajna konsolidacijska slijeganja.

Tlo ispod ustave poboljšava se mlazno injektiranim stupnjacima duljine 14 m promjera 60 cm, kako bi poboljšalo temeljno tlo i opterećenja prenijela u kruće slojeve, ispod stišljivih organskih gлина.

Stupnjaci su raspoređeni na 3 zone ispod temeljne ploče sa različitim rasterima. Zone su raspodijeljene u odnosu na opterećenja tako da:

- Prva zona širine 13,6 m (ispod zapornica – uzvodni dio ustave), raster stupnjaka 2,0 x 2,0 m,
- Druga zona širine 13,6 m (središnji dio ustave), raster stupnjaka 3,5 x 3,5 m,
- Treća zona širine 15,6 m (na nizvodnom dijelu ustave), raster stupnjaka 4,0 x 4,0 m.



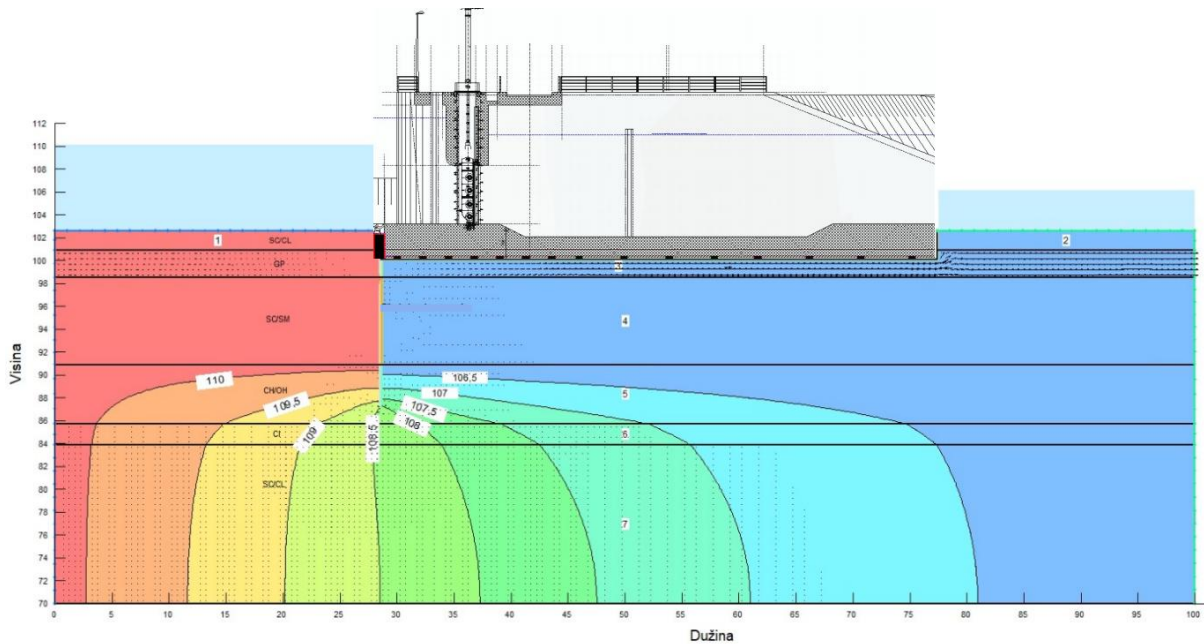
Slika 7. Uzdužni presjek poboljšanja temeljnog tla za temeljenje ustave

Tablica 1. Proračunska slijeganja ispod temeljne ploče ustave i platoa sa i bez poboljšanja tla

Zona ustave	Raster poboljšanja	Srednje vertikalno opterećenje (kN/m ²)	Slijeganje bez poboljšanja (cm)	Slijeganje sa poboljšanjem (cm)
Zona 1	2 x 2 m	205,0	23,8	4,9
Zona 2	3,5 x 3,5 m	135,0	13,9	4,4
Zona 3	4 x 4 m	90,0	9,1	3,2

Temeljno tlo ispod ustave sastoji se od šljunka i pijesaka. Kako bi se spriječilo procjeđivanje vode ispod ustave i eventualno ispiranje materijala izvodi se vodonepropusna zavjesa. Izvodi se izvodi neposredno uz temeljnu ploču ustave i krilnih zidova s uzvodne strane. Donja kota zavjese je konstantna na dubini od 84,60 m n.m. Gornja kota zavjese je varijabilna i ovisi o koti dna temeljene ploče ustave odnosno koti dna temeljne ploče krilnih zidova. Vodonepropusna zavjesa izvodi se od mlazno injektiranih stupnjaka promjera 80 cm. Stupnjaci se izvode na osnom razmaku od 60 cm.

Geotehničke analize procjeđivanja kroz temeljno tlo ispod ustave u uvjetima izvedbe sa vodonepropusnom zavjesom potvrdile su hidrotehničku stabilnost ustave (Harr, 1962).



Slika 8. Analiza procjeđivanja ispod ustave sa zavjesom – raspodjela hidrauličkih potencijala

Između stupnjaka vodonepropusne zavjese i temeljne ploče ustave i temeljne ploče krilnih zidova postavlja se glinobetska membrana kako bi na kontaktu dvaju ploha ostvarila vodonepropusnost.

Bočni dijelovi ustave riješeni su kao armirano betonski krilni zidovi koji se ukopavaju u obale kanala i nasipe, a temeljna stopa iza zida zatrpava se kamenim materijalom. Uzvodni krilni zidovi ustave podijeljeni su na 3 tipa prema geometriji zidova. Zidovi se temelje na tlu poboljšanom mlazno injektiranim stupnjacima na rasteru od 3,0 x 3,0 m sa različitim duljinama stupnjaka.

Iza krilnih zidova ustave izvodi se nasip od kamenog materijala do kote od 111,85 m n.m koji služi kao pristup ustavi i parkiralište. Kako bi se umanjila dugotrajna konsolidacijska slijeganja nasipa platoa ustave, projektirano je da se sloj temeljnog tla, koji se sastoji od visoko plastične i organske gline poboljša mlaznim injektiranjem u debljini sloja (oko 5,5 m) u rasteru 2 x 2 m.

4 Zaključak

Projekt Ustave Šišljavić predstavlja ključnu komponentu strateškog sustava zaštite od poplava karlovačkog područja, čija će realizacija značajno doprinijeti sigurnosti i kvaliteti života u regiji. Analiza glavnog projekta, kao temeljne tehničke dokumentacije, pruža jasan uvid u metodologiju i pristup potreban za vođenje ovakvih kapitalnih infrastrukturnih zahvata.

Projekt je vođen visoko strukturiranim, sustavnim i multidisciplinarnim pristupom. Razdvajanje projekta na osam specijaliziranih strukovnih cjelina, uz primjenu suvremenih alata poput BIM-a, svjedoči o dubokoj tehničkoj složenosti. Istovremeno, detaljna evidencija regulatornih odobrenja, posebnih uvjeta i primijenjenih zakona naglašava ogroman administrativni i pravni napor koji stoji iza tehničke realizacije.

Jedan od tehničkih i tehnoloških preduvjeta realizacije ovako složenog projekta su geotehnička rješenja i zahvati za građevine. Izvedba zaštite građevinske jame i temeljenja hidrotehničkog objekta kao što je ustava u oteretnom kanalu zahtijeva, osim razumijevanja složene geotehničke problematike, razumijevanje i

usklađivanje sa hidrotehničkim zahtjevima i specifičnostima objekta te cijeli niz organizacijskih i gradilišnih zahtjeva, kao preduvjeta uspješnih rješenja. Na ovakvom primjeru jasno je vidljiva neodvojivost hidrotehnike i geotehnike te tijesna suradnja projektanata „specijalista“ u svojim područjima.

Literatura

Braja Das, B.M. (2010) Principles of Foundation Engineering. 7th edn. Stamford, CT: Cengage Learning.

Glavni projekt „Ustava Šišljavić“ (projekt br.: O89.04, 8 mapa, Gl. Projektant: Nenad Hećek, Zagreb, 02.12.2024.).

Harr, M.E. (1962) Groundwater and Seepage. New York: McGraw-Hill.

Odluka o proglašenju projekta »Projekt zaštite od poplava grada Karlovca« strateškim investicijskim projektom Republike Hrvatske (Narodne novine br. 111/2008, preuzeto 26.10.2025.).

Poulos, H.G. (2001) ‘Pile group settlement estimation – research to practice’, Geotechnical and Geological Engineering, 19, pp. 365–387.