

IZAZOVI PROJEKTIRANJA I IZVEDBE GRADEVNIH JAMA U ŠLJUNČANIM DEPOZITIMA U ZAGREBU

ANTONIA MIRČETA ¹, MARIO BAČIĆ ¹, DANIJELA JURIC KAĆUNIĆ ¹, MLADEN CVETKOVIĆ ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku, Hrvatska

Sažetak

Projektiranje i izvedba dubokih građevnih jama u šljunčanim aluvijalnim depozitima zagrebačke prisavske ravnice, u uvjetima intenzivne urbanizacije grada Zagreb, predstavlja geotehnički izazov u pogledu osiguranja stabilnosti iskopa, kontrole deformacija i zaštite od podzemne vode. Projektiranje građevnih jama provodi se u skladu s normom HRN EN 1990 i nizom normi HRN EN 1997 koje obuhvaćaju načela geotehničkog projektiranja. Izvedba mjera zaštite dana je u tehničkim smjericama Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama koji propisuju tehničke zahtjeve za potporne konstrukcije i kontrolu podzemne vode. U radu je dana usporedna analiza rješenja zaštite dubokih građevnih jama IS-17 i IS-18, približno jednakih dimenzija, ali različitih hidrogeoloških uvjeta. Prikazani su rezultati numeričkih analiza procjeđivanja, stabilnosti na uzgon i osjetljivosti sustava zaštite na promjenu razine podzemne vode. Na lokaciji IS-17 primijenjen je sustav talpi s razuporama i brtvljenje dna mlaznim injektiranjem, dok je na IS-18 primijenjen sustav talpi s razuporama i kontroliranim crpljenjem. Prikazana metodologija projektiranja, potvrđena na primjerima dviju građevnih jama, pokazuje da kombinacija krutih potpornih sustava, brtvljenja dna ili kontroliranog crpljenja te kontinuiranog geotehničkog monitoringa omogućava sigurno i ekonomično izvođenje dubokih iskopa. Rad naglašava važnost integriranog projektantskog pristupa prilagođenog lokalnim hidrogeološkim uvjetima.

Ključne riječi

prisavska ravnica, šljunčani depoziti, grad Zagreb, građevna jama, podzemna voda, potporne konstrukcije, geotehnički monitoring

1 Uvod

Grad Zagreb posljednjih godina bilježi izrazito intenzivnu građevinsku aktivnost, što potvrđuju podaci o porastu broja izdanih građevinskih dozvola, povećanom obujmu stanogradnje te provedbi projekata urbane obnove i infrastrukturnog razvoja. U takvim uvjetima sve je češća izvedba dubokih temeljenja i građevnih jama u gusto izgrađenim urbanim sredinama, što zahtijeva primjenu posebnih tehničkih mjera radi zaštite susjednih objekata i infrastrukture. Ograničen prostor i blizina postojećih građevina nameću projektiranje rješenja uz kontrolu deformacija, pomaka potpornih konstrukcija i dotoka podzemne vode kako bi se utjecaji iskopa sveli na prihvatljivu razinu.

Posebnu složenost predstavljaju geotehnički uvjeti zagrebačke prisavske ravnice, gdje se pri dubljim iskopima zahvaćaju aluvijalni šljunčani i pjeskoviti depoziti visoke vodopropusnosti i izražene heterogenosti. Iako su takvi sedimenti općenito povoljni s aspekta nosivosti i deformacijskih svojstava, njihova velika propusnost i prisutnost podzemne vode otežavaju osiguranje stabilnosti iskopa. U takvim uvjetima često dolazi do intenzivnog dotoka podzemne vode u građevnu jamu, što može uzrokovati eroziju, ispiranje sitnih frakcija te pojave hidrauličkog sloma ili procjeđivanja kroz dno iskopa. Stoga je pri projektiranju potrebno posvetiti

posebnu pozornost analizi hidrogeoloških uvjeta, modeliranju strujanja podzemne vode te izboru odgovarajućih sustava zaštite i odvodnje.

Projektiranje građevnih jama regulirano je normativnim okvirom koji definira načela sigurnosti, uporabljivosti i pouzdanosti konstrukcija. Temeljni dokument predstavlja HRN EN 1990:2023 Eurokod – Osnove projektiranja konstrukcija, koji utvrđuje opća načela proračuna i verifikacije konstrukcija, dok se geotehničko projektiranje provodi prema nizu normi HRN EN 1997 - Eurokod 7, koje obuhvaćaju opća pravila projektiranja, određivanje svojstava tla na temelju geotehničkih istraživanja te posebna pravila za projektiranje i provjeru geotehničkih konstrukcija. Uz normativne zahtjeve, tehničke smjernice za izvedbu zemljanih radova, zaštitu građevnih jama i organizaciju gradilišta definirane su u Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama, OTU 2024.

Navedena metodologija projektiranja i izvedbe prikazana je na primjerima dviju dubokih građevnih jama na različitim lokacijama u Zagrebu, gdje su različiti lokalni uvjeti tla i podzemne vode uvjetovali primjenu različitih sustava zaštite od dotjecanja podzemne vode radi osiguranja stabilnosti iskopa i izvođenja radova u suhim uvjetima. Analiza tih primjera omogućuje usporedbu učinkovitosti primijenjenih tehničkih rješenja te ističe važnost prilagodbe projektantskog pristupa specifičnim geotehničkim i hidrogeološkim uvjetima lokacije.

2 Geotehničke i projektne osnove zaštite građevnih jama

2.1 Geološki i hidrogeološki aspekt šljunčanih depozita grada Zagreba

Šljunčani depoziti na području grada Zagreb predstavljaju vrijedan građevinski materijal koji se eksploatira u više aktivnih šljunčara, a istodobno čine i ključni dio zagrebačkog vodonosnog sustava s najvećim zalihama pitke podzemne vode. Upravo zbog njihove gospodarske i hidrogeološke važnosti, ali i složenih inženjerskogeoloških svojstava, aluvijalne naslage rijeke Save bile su predmet brojnih istraživanja te su ih detaljno proučavali različiti autori (Sremac, 2024). Kvartarne naslage zapadnog i istočnog dijela zagrebačke aluvijalne ravnice prikazane su na Osnovnoj geološkoj karti, list Zagreb (Šikić, Basch i Šimunić, 1972), te list Ivanić Grad (Basch, 1983). Na području Zagreba kvartarni sedimenti prekrivaju gotovo cjelokupni nizinski prostor savske doline te su izgrađeni pretežito od aluvijalnih šljunčano-pjeskovitih naslaga promjenjive granulacije (Šikić, Basch i Šimunić, 1972).

Kvartarne naslage dijele se na pleistocenske i holocenske, pri čemu su u holocenu izdvojeni aluvijalni nanos druge i prve savske terase, proluvijalni sedimenti te recentni aluvij riječnog toka Save. Geomorfološki oblici riječnih terasa rezultat su izmjene akumulacijskih i erozijskih faza riječnog sustava tijekom holocena. Aluvijalni nanos druge savske terase (a_2) kontinuirano se pruža duž toka Save kroz Zagreb, a izgrađen je od izmjene krupnozrnatih šljunaka i pijesaka, pri čemu se udio pijeska povećava nizvodno, uz istodobno smanjenje veličine zrna. Naslage karakterizira prevladavanje šljunka s rijetkim i tankim slojevima pijeska, a debljina im u zagrebačkoj depresiji iznosi približno 10–20 m ((Borčić i ostali, 1968). Aluvijalni nanos prve savske terase (a_1) razvijen je duž cijelog toka Save te predstavlja mlađu fazu taloženja nakon erozijskog usijecanja riječnog korita. Građen je pretežito od krupnozrnatog šljunka s primjesama pijeska, dok su slojevi čistog pijeska tanji i rjeđi. Debljina naslaga najčešće iznosi 10–25 m, a lokalno doseže i do 45 m (Kovačević i Capar, 1972), pri čemu se materijal ove terase intenzivno eksploatira kao građevinski agregat. Recentni aluvij Save (a) obuhvaća sedimente uz aktivno korito koji su podložni plavljenju tijekom visokih vodostaja, a karakterizira ga dominacija krupnozrnatog pijeska uz manji udio šljunka.

Rijeka Sava erodirala je svoje korito unutar šljunčanog horizonta, zbog čega je u izravnoj hidrauličkoj povezanosti s lokalnim vodonosnikom. Ovisno o prevladavajućim hidrogeološkim uvjetima, može djelovati kao drenažni element podzemnih voda ili kao njihov izvor napajanja (Slišković, 1999).

2.2 Projektiranje prema europskim smjernicama

Norma HRN EN 1990 definira osnovna načela i zahtjeve za sigurnost, uporabljivost, trajnost i pouzdanost konstrukcija te daje temelj za njihov proračun i provjeru u okviru Eurokod normi.

Niz normi HRN EN 1997 (Eurokod 7) nadovezuje se na EN 1990 i obuhvaća pravila za geotehničko projektiranje: opća načela proračuna i verifikacije geotehničkih konstrukcija (EN 1997-1), određivanje svojstava tla i planiranje geotehničkih istražnih radova (EN 1997-2), te posebna pravila za projektiranje i provjeru pojedinih tipova geotehničkih konstrukcija (EN 1997-3).

Projektiranje prema Eurokodu temelji se na metodi parcijalnih koeficijenata, ali je dopuštena i primjena drugih pristupa, poput propisanih pravila, ispitivanja te opservacijske metode. Posebno se HRN EN 1997-1 primjenjuje zajedno s dijelovima HRN EN 1997-2 i HRN EN 1997-3, koji daju dodatna pravila za projektiranje, verifikaciju i geotehničko istraživanje tla.

Norma HRN EN 1997-3 obuhvaća načela projektiranja pokosa, usjeka, nasipa, plitkih i dubokih temelja, potpornih konstrukcija, armiranog i čavlanog tla te mjera poboljšanja tla. Također propisuje zahtjeve za potporne elemente (sidra, elemente ojačanja, stijenska sidra i sustave površinske zaštite) te za mjere kontrole podzemne vode, uključujući smanjenje propusnosti, snižavanje razine podzemne vode i primjenu vodonepropusnih barijera.

2.3 Tehničke smjernice za izvođenje radova na zaštiti građevnih jama

Pri projektiranju i izvođenju građevnih jama važan referentni dokument predstavljaju Opći tehnički uvjeti za radove na cestama – OTU 2024, službene tehničke smjernice društva Hrvatske ceste d.o.o. (HAC, 2024). Dokument definira minimalne zahtjeve kvalitete za materijale, proizvode i izvođenje radova te predstavlja osnovu za projektiranje, ugovaranje i provedbu stručnog nadzora.

Za izvedbu građevnih jama posebno su relevantna poglavlja 4-07 i 4-08. Poglavlje 4-07 obrađuje zaštitu iskopa s vertikalnim stijenkama u ograničenim urbanim uvjetima primjenom tankih potpornih konstrukcija koje se izvode prije iskopa, poput armiranobetonskih dijafragmi, pilotnih stijena, čeličnog žmurja i drugih sustava dubokog temeljenja. Poglavlje 4-08 odnosi se na zaštitu od djelovanja podzemne vode, što je osobito važno u šljunčanim, visoko propusnim naslagama zagrebačkog vodonosnika. Propisuju se dvije osnovne skupine mjera: (1) presretanje i uklanjanje vode (drenažni sustavi, iglofilteri, bunari, elektroosmoza) te (2) izolacija iskopa od dotjecanja vode primjenom vodonepropusnih zavjesa, injektiranja, žmurja, zamrzavanja tla i sličnih rješenja. U složenim hidrogeološkim uvjetima često je nužna kombinacija više metoda, osobito kada zahvat obuhvaća plitke i duboke vodonosne slojeve. Dodatno, poglavlje 4-08.2 propisuje tehničke uvjete za zaštitu od uzgona primjenom vlačno opterećenih sidara, mikropilota ili mlazno injektiranih stupnjaka, što je u uvjetima visokih razina podzemne vode jedan od ključnih projektantskih izazova.

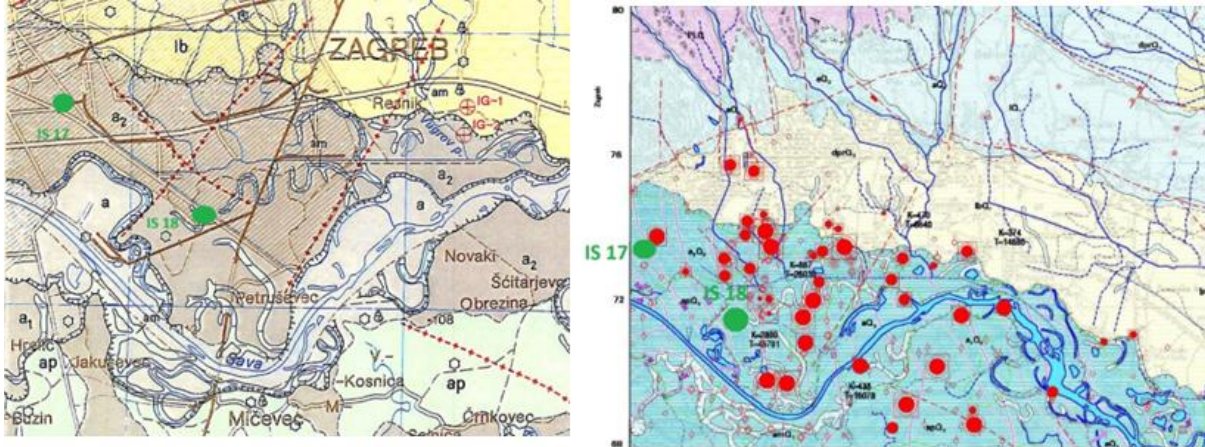
3 Primjeri zaštite dubokih građevnih jama u Zagrebu

Primjeri zaštite dubokih građevnih jama, s posebnim osvrtom na mjere sprječavanja dotoka podzemne vode, prikazani su u sklopu projekta buduće tramvajske pruge koja će povezivati Trg Eugena Kvaternika i Veliku Kosnicu u Gradu Zagrebu. Projekt je planiran u četiri faze, pri čemu je prvom fazom obuhvaćena izgradnja ispravljačkih stanica IS-17 i IS-18 (slika 1).

Za potrebe izrade projekta zaštite građevne jame provedene su analize procjeđivanja, uključujući provjeru strujne slike, hidrauličkih gradijenata i pornih tlakova, kao i analize stabilnosti te dimenzioniranje elemenata sustava zaštite građevne jame. U ovom radu naglasak je stavljen na analize procjeđivanja.

3.1 Zaštita građevne jame ispravljačke stanice IS 17

Prvi primjer zaštite duboke građevne jame odnosi se na izgradnju ispravljačke stanice IS-17 u Ulici grada Vukovara, u blizini križanja s Heinzelovom ulicom.



Slika 1 Izvod iz Osnovne geološke karte Republike Hrvatske, list Ivanić Grad, Izvod iz osnovne hidrogeološke karte, list Ivanić Grad, s naznačenim lokacijama građevnih jama ispravljačkih stanica IS 17 i IS 18

Građevna jama objekta je pravokutnog oblika dimenzija stranica $15,3 \times 12,6$ m, a dubina iskopa iznosi 9,55 m. S obzirom na relativno ograničen prostor, blizina javne prometnice sa južne i parkiralište sa sjeverne strane parcele, te uzimajući u obzir karakteristike temeljnog tla i prisutnost podzemne vode, odabrano je rješenje zaštite građevne jame čeličnim talpama duljine 16 metara sa sustavom razupora na dvije razine, uz dodatno brtvljenje dna građevne jame izvođenjem mlazno injektiranih stupnjaka zbog velike vodopropusnosti temeljnog tla. Stupnjaci se izvode dvofluidnim postupkom, promjer stupnjaka iznosi 1,5 m, na trokutastom rasteru od 0,9 m, što osigurava preklapanje od 0,6 m. U cilju praćenja kontrole kvalitete izvedbe kao i verifikacije projektnog rješenja predviđen je program mjerenja i opažanja koji uključuje inklinometarska mjerenja i mjerenja pomaka geodetskim reperima.

3.1.1 Geotehnički istražni radovi

U sklopu istražnih radova izvedene su tri istražne bušotine dubine 15 metara (B1 i B2) i 20 metara (B3). Terenskom identifikacijom i klasifikacijom te laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da se na području zahvata profil tla sastoji od dvije geotehničke sredine.

Prva geotehnička sredina – glinoviti pijesak (SC), proteže se do dubine od približno 2,5–3,0 m, te pokazuje određene varijacije u sastavu tla po lokacijama bušotina. Na bušotini B1 prevladava srednje zbijen, dobro graduiran glinoviti pijesak s proslojcima glinovitog šljunka ili pjeskovite gline niske plastičnosti. U zoni bušotine B3 prisutna je glina niske plastičnosti, čvrstog konzistentnog stanja, dok se oko bušotine B2 javlja glina visoke plastičnosti s pijeskom. Laboratorijskim ispitivanjima određeni su parametri čvrstoće i deformabilnosti: kohezija iznosi 5–8 kPa, kut unutarnjeg trenja 26–29°, a modul stižljivosti 3–4 MPa. Vrijednosti SPT-a kreću se od 14 do preko 50, što upućuje na promjenjivu zbijenost i nosivost tla u površinskom sloju.

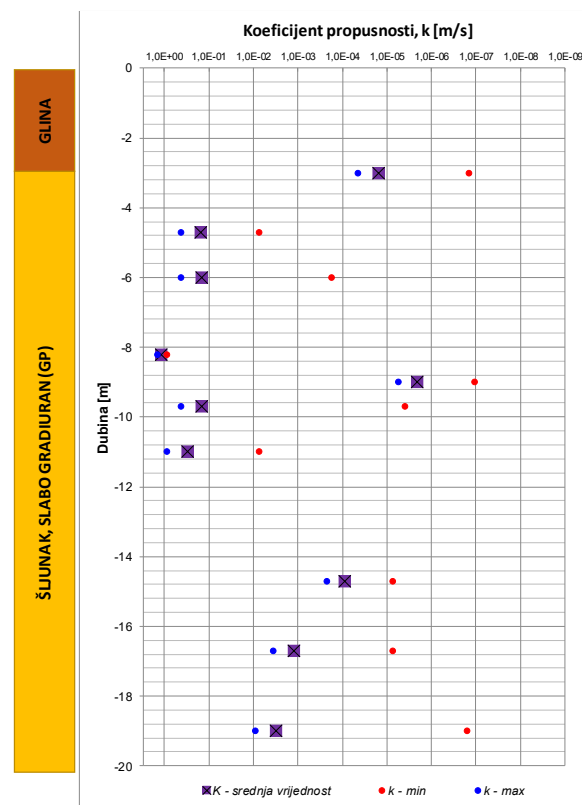
Druga geotehnička sredina - slabo graduirani šljunak / slabo graduirani šljunak s glinom / glinoviti šljunak (GP / GC) proteže se do konačne dubine istražnog bušenja i pretežito je građena od šljunčanih frakcija različitog udjela koherentnih čestica, s udjelom šljunka 70–97%, uz manji udio pijeska i sitnih čestica. Materijal je srednje zbijen do zbijen, lokalno i vrlo zbijen (zona B2). Na dubini od oko 14 m kod bušotine B2 zabilježena je leća gline niske plastičnosti. Parametri čvrstoće i relativne zbijenosti određeni su na temelju SPT ispitivanja, pri čemu se vrijednosti kreću od 13 do 55 udaraca, najčešće iznad 20, što potvrđuje dobru zbijenost sloja. Za

potrebe numeričkih analiza procijenjen je koeficijent propusnosti šljunka primjenom empirijskih metoda na temelju granulometrijskog sastava - USBR (1977), Hazen (1892), Beyer (1964). Dobiven je širok raspon vrijednosti, pri čemu slabo graduirani šljunak pokazuje veću propusnost u odnosu na zaglinjeni (slika 2). Najviše vrijednosti u pravilu daje USBR metoda, a najniže Beyerova metoda.

Na temelju provedenih istražnih radova i parametara određenih izravnim ispitivanjima ili korelacijama, u tablici 1 su dane karakteristične vrijednosti materijala tla na predmetnoj lokaciji.

Tablica 1 Karakteristične vrijednosti parametara materijala

Zona	Dubina [m]	γ_k [kN/m ³]	c_k [kPa]	ϕ_k [°]	E_k [kPa]	k_{min} [m/s]	k_{min} [m/s]	k_{min} [m/s]
Gornji sloj	0,0-2,5	18,0	4,8	26,5	2000	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-5}$
Donji sloj (k1)	2,5-14,0	19,0	0,0	37,3	11230	$3,8 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-1}$	$5,4 \times 10^{-1}$
Donji sloj (k2)	14,0-20,0					$5,0 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$



Slika 2 Vrijednosti koeficijenta propusnosti po dubini

3.1.2 Odabir projektne razine podzemne vode

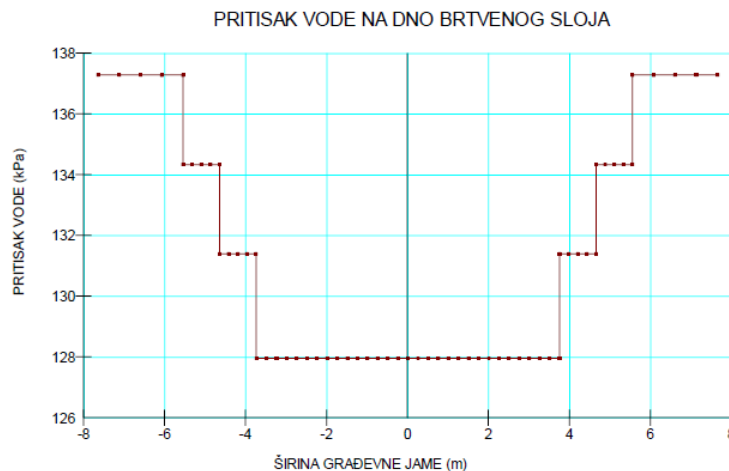
Na lokaciji je utvrđena razina podzemne vode na dubini od 8,0–8,5 m, neposredno iznad planiranog dna iskopa. Budući da su istraživanja provedena u proljetnom razdoblju te da razina podzemne vode u šljunčanom vodonosniku ovisi o vodostaju rijeke Save, moguće su sezonske oscilacije. Zbog nedostatka dugoročnih podataka, u proračunima su razmatrane nepovoljnije varijante s razinama podzemne vode u rasponu od kote terena do 8 m dubine (0, 4 i 8 m ispod površine terena), radi procjene potrebnih mjera zaštite građevne jame od povećanih dotoka podzemne vode.

3.1.3 Analiza procjeđivanja

Procjeđivanje je analizirano u modulu SEEP/W programa GeoStudio 2019, pri čemu rezultati obuhvaćaju

raspodjele pornih tlakova, dotoke vode u dno građevne jame i hidrauličke gradijente koji se javljaju pri strujanju vode kroz tlo. Rezultati analiza procjeđivanja u građevnu jamu pokazuju da, uslijed velike propusnosti donjeg šljunčanog sloja, dolazi do vrlo velikih dotoka u građevnu jamu: oko 4000 m³/dan pri razini podzemne vode na dubini od 8 m, odnosno do približno 25 000 m³/dan pri razini vode na koti terena.

Primjena brtvenog sloja izvedenog mlazno injektiranim stupnjacima značajno smanjuje dotok, na približno 0,5 m³/dan pri razini vode na 8 m dubine, odnosno na oko 3,3 m³/dan pri razini vode na površini terena. Time se potvrđuje tehnička i ekonomska opravdanost primjene mlaznog injektiranja za brtvljenje dna građevne jame. Provjera stabilnosti na uzgon brtvenog sloja, izvedenog od mlazno injektiranih stupnjaka debljine 4,5–5,45 m, pokazuje zadovoljavajuće vrijednosti za razinu podzemne vode na 2 m ispod površine terena. Pritisak vode na dno brtvenog sloja preuzet je iz analiza procjeđivanja, čime je u proračunu uzeto u obzir realno hidrauličko opterećenje u uvjetima razmatranih razina podzemne vode (slika 3).



Slika 3 Dijagram pritiska vode na dno brtvenog sloja za RPV=-2 m

3.1.4 Utjecaj hidrogeoloških uvjeta na rezultate geostatičkih proračuna

Zbog mogućih odstupanja slojeva u odnosu na pretpostavljeni geotehnički model tla provedena je analiza osjetljivosti na promjenu koeficijenta propusnosti na rezultate geostatičkih proračuna. Rezultati pokazuju da varijacije koeficijenta propusnosti imaju zanemariv utjecaj na rezultate proračuna. Promjena razine podzemne vode značajnije utječe na rezultate za raspon razine podzemne vode od površine terena do 4 m, dok varijacije između 4 i 8 m ne utječu značajno na rezultate. Na temelju navedenog, sustav zaštite građevne jame dimenzioniran je na razinu podzemne vode na dubini 2,0 m od kote terena (slika 4).

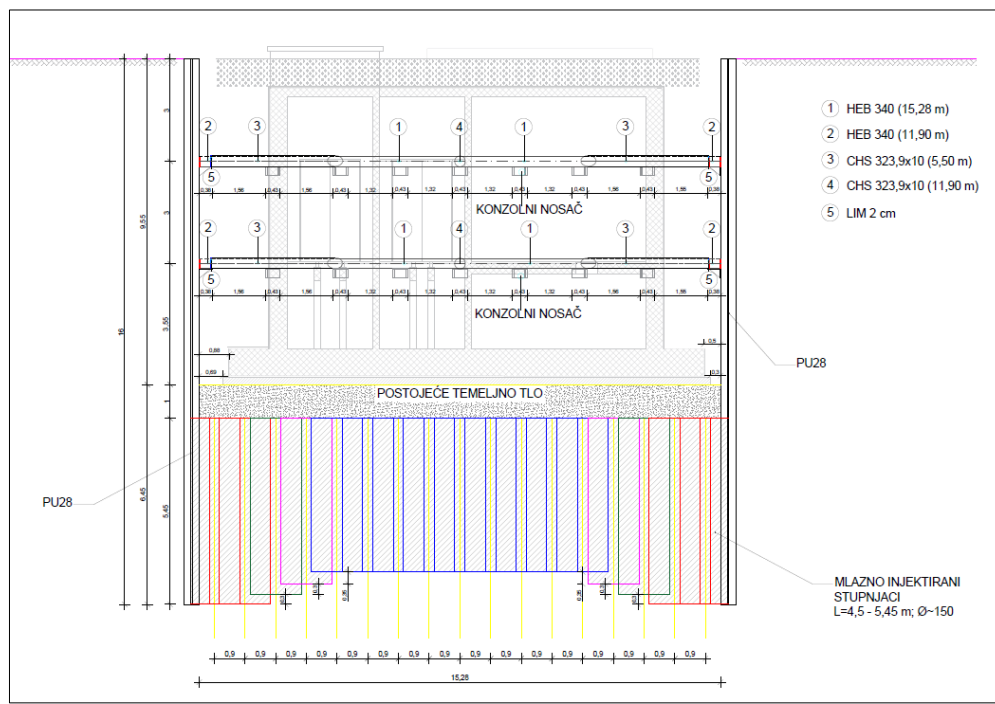
3.2 Geotehnički projekt zaštite građevne jame ispravljačke stanice IS 18

Drugi primjer zaštite duboke građevne jame odnosi se na izgradnju ispravljačke stanice IS-18 na Radničkoj cesti u Zagrebu. Građevna jama objekta je pravokutnog oblika dimenzija 15,3×12,6 metara, a dubina iskopa je 9,55 metara. Obzirom na relativno ograničen prostor, radi blizine javne prometnice sa sjeverno-istočne i parkirališta sa sjeverno-zapadne strane parcele, te uzimajući u obzir karakteristike temeljnog tla i uvjete podzemne vode, odabrano je rješenje zaštite građevne jame čeličnim talpama duljine 16 metara sa sustavom razupora na dvije razine uz crpljenje podzemne vode. U svrhu kontrole kvalitete izvedbe i verifikacije projektnog rješenja predviđen je program mjerenja i opažanja koji uključuje inklinometarska mjerenja te praćenje pomaka pomoću geodetskih repera.

3.2.1 Geotehnički istražni radovi

U sklopu istražnih radova izvedene su dvije bušotine dubine 15 m (B1) i 20 m (B2). Tijekom bušenja provedeni

su SPT pokusi, inženjerski opis i identifikacija jezgre te uzorkovanje tla, a na uzorcima su u laboratoriju određeni prirodna vlažnost, klasifikacijska svojstva (Atterbergove granice i granulometrijski sastav) te parametri posmične čvrstoće i stišljivosti.



Slika 4 Rješenje zaštite građevne jame ispravljačke stanice IS-17

Temeljem rezultata istražnih radova utvrđeno je da se geotehnički profil tla na području zahvata sastoji od dvije geotehničke sredine. Prva geotehnička sredina - gline i glinoviti pijesci i šljunci, od površine do približno 8–10 m (uz izuzetak prvog sloja zaglinjenog šljunka), sadrže 49–85 % koherentnih čestica, s 6-7 udaraca SPT-a. Gornji sloj se dijeli na 2 podsloja jednakih mehaničkih karakteristika, ali različitih koeficijenata propusnosti. Druga geotehnička sredina - glinoviti šljunci, od 9 m do dubine bušenja s udjelom koherentnih čestica od 35 do 48 %, s 42–51 udaraca SPT-a.

Na temelju provedenih istražnih radova te parametara utvrđenih izravnim ispitivanjima ili primjenom odgovarajućih korelacija, u tablici 2 prikazane su karakteristične vrijednosti svojstava tla na predmetnoj lokaciji.

Tablica 2 Karakteristične vrijednosti parametara materijala

Zona	Dubina [m]	γ_k [kN/m ³]	c_k [kPa]	ϕ_k [°]	E_k [kPa]	k_{min} [m/s]	k_{min} [m/s]	k_{min} [m/s]
Gornji sloj (k1)	0,0-5,0	18,0	4,0	28,0	6800	$1,0 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-7}$
Gornji sloj (k2)	5,0-9,0	18,0	4,0	28,0	6800	$5,0 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-8}$
Donji sloj	9,0-20,0	19,0	1,0	36,0	19600	$3,5 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$

3.2.2 Odabir projektne razine podzemne vode

Na lokaciji je utvrđena razina podzemne vode na dubinama od 6 do 10 m od površine terena. Budući da su istražni radovi provedeni u kolovozu i razina vode varira tijekom godine ovisno o vodostaju rijeke Save, za proračune su razmatrane razine podzemne vode na površini terena te na 2, 4 i 6 m dubine, kako bi se procijenio njihov utjecaj na naponsko-deformacijske analize i analize procjeđivanja.

3.2.3 Analiza procjeđivanja

Za dobivanje raspodjele pornih tlakova, dotoka vode u dno građevne jame i kritičnih gradijenata povezanih sa

strujanjem vode kroz tlo, provedene su analize procjeđivanja programom GeoStudio 2019, modul SEEP/W. Zbog sezonskih oscilacija razine podzemne vode u šljunčanom vodonosniku, povezanih s vodostajem rijeke Save, u proračunima su razmatrane razine podzemne vode od 0 do 6 m ispod površine terena. Analize procjeđivanja provedene su za minimalnu, srednju i maksimalnu vrijednost koeficijenta propusnosti za svaki sloj.

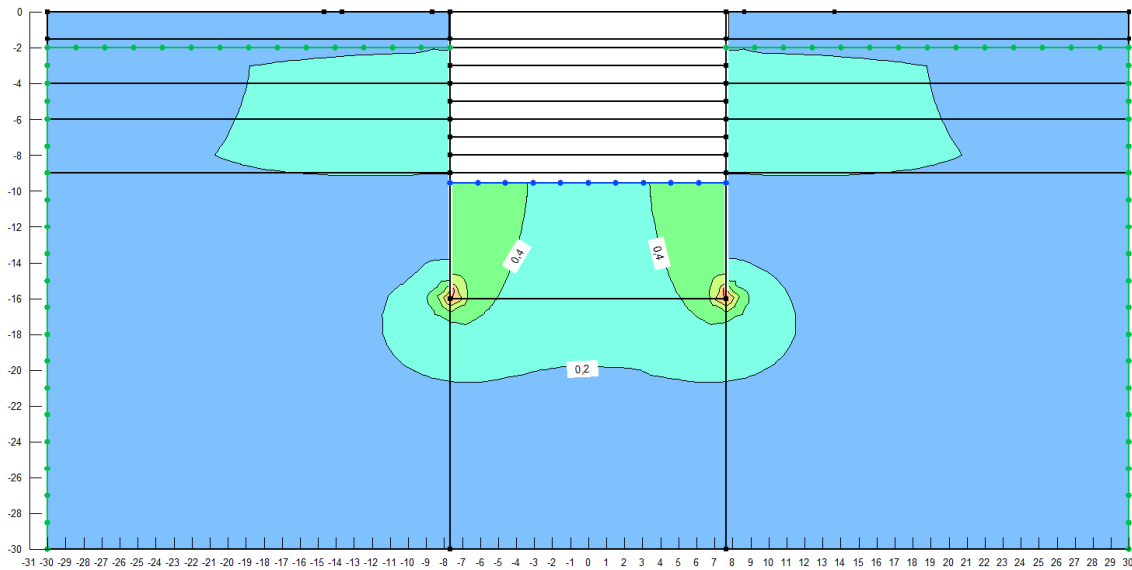
Maksimalni dotok vode u građevnu jamu, pri najvećoj propusnosti tla i najvišoj razini podzemne vode, iznosi približno 2,1 m³/dan. Pri srednjoj vrijednosti propusnosti procijenjeni dotok iznosi oko 0,8 m³/dan, dok se pri minimalnoj propusnosti očekuje dotok od približno 0,3 m³/dan. U proračunskim uvjetima procijenjeni dotoci vode u jamu ovise o razini podzemne vode. Pri razini podzemne vode na dubini od 2 m očekivani dotok iznosi od 0,25 do 1,65 m³/dan. Ako se razina podzemne vode nalazi na dubini od 4 m, procijenjeni dotok kreće se u rasponu od 0,2 do 1,3 m³/dan, dok se pri razini podzemne vode na dubini od 6 m očekuje dotok između 0,1 i 0,8 m³/dan. Dobiveni rezultati omogućuju procjenu dotoka vode u različitim hidrogeološkim uvjetima te služe kao podloga za planiranje odgovarajućih mjera crpljenja podzemne vode.

Usljed dotoka, odnosno procjeđivanja vode u građevnu jamu, potrebno je kontrolirati vrijednosti hidrauličkog izlaznog gradijenta kako bi se spriječilo ispiranje čestica tla i mogući hidraulički slom temeljnog tla. Ukoliko su te vrijednosti veće od dopuštenih, može doći do hidrauličke nestabilnosti temeljnog tla, pojave erozije, ispiranja sitnih čestica te razrahljenja tla na dnu građevne jame. Takvi procesi mogu uzrokovati deformacije i narušavanje stabilnosti dna jame. Stoga je potrebno osigurati da izlazni hidraulički gradijenti budu manji od dopuštenih vrijednosti prikazanih u tablici 3 propisanih normom HRN U.C5.020/80 (HZN, 1980). Prema provedenim proračunima, izlazni hidraulički gradijent na području dna građevne jame iznosi približno 0,4 (slika 5). Iskop jame predviđen je u sloju glinovitih šljunaka. Za filterski nezaštićen krupnozrnati šljunak maksimalna dopuštena vrijednost izlaznog gradijenta iznosi 0,4, prema Pravilniku JUS U.C5.050. Stoga se može zaključiti da su dobivene vrijednosti na granici dopuštenih, ali i dalje unutar propisanih kriterija stabilnosti. Zaključno se može konstatirati da provedene analize procjeđivanja za projektne situacije pokazuju kako predviđeno rješenje zaštite građevne jame osigurava hidrauličku stabilnost građevine.

Na temelju navedenih podataka, sustav zaštite građevne jame dimenzioniran je za razinu podzemne vode na -2,0 m u odnosu na kotu terena (slika 6).

Tablica 3 Kriterij dopuštenih hidrauličkih izlaznih gradijenata za filterski nezaštićeni materijal

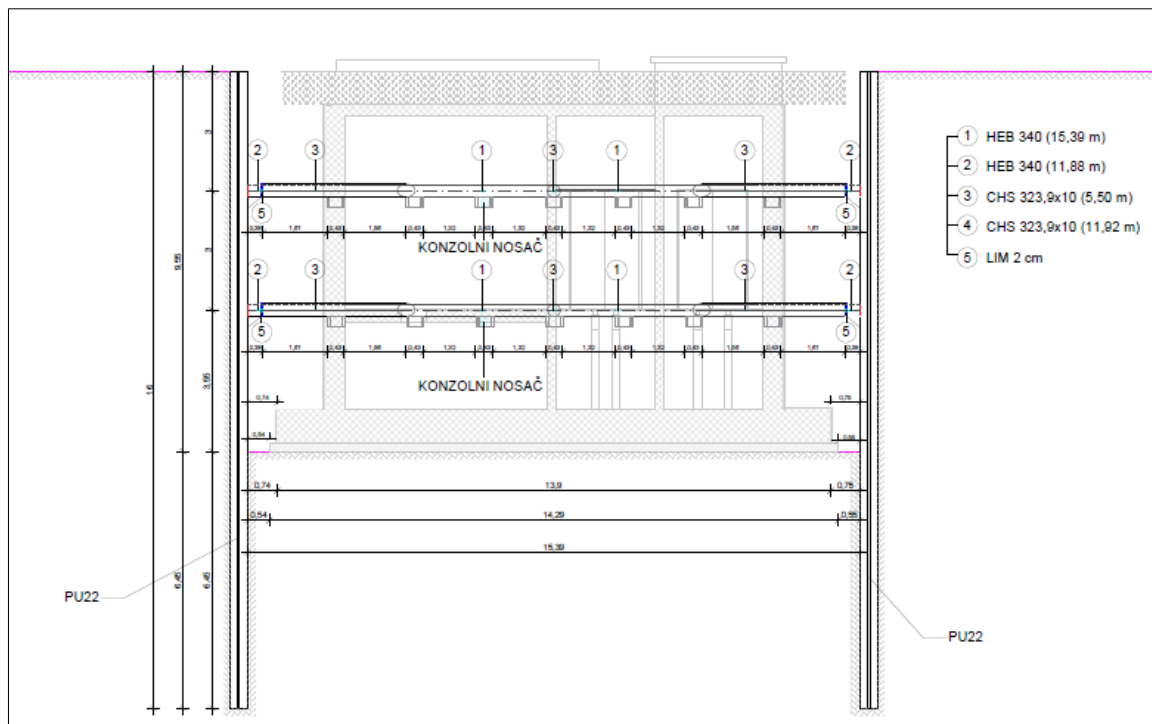
i_{SR}	Materijal
0,12	Sitnozrnati prašinski pijesak
0,14	Sitnozrnati pijesak $0,063 < d < 0,5$ mm
0,17	Srednjezrnati pijesak $0,5 < d < 2$ mm
0,20	Krupnozrnati pijesak $2 < d < 5$ mm
0,30	Srednjezrnati šljunak $10 < d < 20$ mm
0,40	Krupnozrnati šljunak $20 < d < 100$ mm
0,50	Zbijena glina $0,5 < I_c < 1,0$
0,65	Čvrsta glina $I_c > 1,0$



Slika 5 Prikaz rezultata analize procjeđivanja – izolinije hidrauličkih gradijenata

3.2.4 Utjecaj hidrogeoloških uvjeta na rezultate geostatičkih proračuna

Radi mogućih odstupanja stvarne uslojenosti tla od pretpostavljenog geotehničkog modela provedena je analiza osjetljivosti geostatičkih proračuna na promjenu koeficijenta propusnosti, pri čemu je utvrđeno da varijacije ovog parametra imaju zanemariv utjecaj na rezultate. Najveći utjecaj promjene razine podzemne vode uočen je u zoni od površine do 2 m dubine, dok promjene razine podzemne vode između 2 i 6 m ne uzrokuju značajne promjene rezultata proračuna. Maksimalne razlike u reznim silama iznose približno 50 kN/m i 50 kNm/m. Na temelju navedenih rezultata sustav zaštite građevne jame dimenzioniran je za razinu podzemne vode na $-2,0$ m u odnosu na kotu terena (slika 6).



Slika 6 Rješenje zaštite građevne jame ispravljačke stanice IS-18

4 Zaključak

Iako je zagrebačka prisavska ravnica područje intenzivnih hidroloških, geoloških i geotehničkih istraživanja, složenost sedimentacijskih i erozijskih procesa uvjetovala je izrazitu prostornu varijabilnost tla, zbog čega geotehnički uvjeti značajno ovise o mikrolokaciji. Na području grada Zagreb projektiranje i izvedba dubokih građevnih jama u šljunčanim aluvijalnim naslagama stoga predstavlja složen zadatak u kojem su hidrogeološki odnosi, osobito hidraulička povezanost s rijekom Sava, često presudan čimbenik. Visoka vodopropusnost i heterogenost slojeva zahtijevaju provedbu detaljnih istražnih radova na lokaciji, primjenu numeričkih analiza te pažljivo dimenzioniranje sustava zaštite građevne jame.

Analiza primjera građevnih jama ispravljačkih stanica jednake dubine pokazuje da univerzalno projektno rješenje ne postoji. Na lokaciji IS-17, zbog vrlo propusnih slojeva i velikih dotoka podzemne vode, bilo je nužno brtvljenje dna mlaznim injektiranjem radi osiguranja stabilnosti na uzgon, dok je na lokaciji IS-18, uz lokalno manje propusne slojeve, primijenjeno crpljenje podzemne vode. Kao ključni parametar u proračunima pokazala se razina podzemne vode, koja značajno utječe na rezultate analiza procjeđivanja.

U uvjetima gusto izgrađenog urbanog prostora dodatni izazov predstavljaju ograničeni radni uvjeti i nužnost zaštite susjednih građevina i infrastrukture, što zahtijeva primjenu krutih potpornih konstrukcija i sustavnu kontrolu pomaka i deformacija. U takvim okolnostima norma HRN EN 1990 i niz normi HRN EN 1997 pružaju temeljni projektantski okvir za sigurno dimenzioniranje geotehničkih konstrukcija, dok Opći tehnički uvjeti za radove na cestama (OTU) osiguravaju smjernice za njihovu tehnički ispravnu i sigurnu izvedbu.

Literatura

- Basch, O. (1981) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000 List Ivanić Grad L33-81. Geološki zavod Zagreb, OOUR za geologiju i paleontologiju, (1969-1976); Savezni geološki zavod, Beograd.
- Borčić, D., Capar, A., Čakarun, I. et al. (1968). Prilog daljnjem poznavanju aluvijalnog vodonosnog horizonta na širem području Zagreba. Geološki vjesnik, 21, Zagreb.
- Geotehnički istražni radovi i izrada geotehničkih elaborata za potrebe ishođenja lokacijskih dozvola gradnje i rekonstrukcije cesta na području grada Zagreba: ispravljačka stanica IS-17 i tramvajska kabelska mreža. (2018) Centar Građevinskog fakulteta d.o.o., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku i GeoAqua d.o.o.; GEL-110-009/2018, svibanj 2018.
- Geotehnički istražni radovi i izrada geotehničkih elaborata za potrebe ishođenja lokacijskih dozvola gradnje i rekonstrukcije cesta na području grada Zagreba: ispravljačka stanica IS-18 i tramvajska kabelska mreža, Centar Građevinskog fakulteta d.o.o., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku i GeoAqua d.o.o.; GEL-110-016/2018, rujanj 2018.
- Hrvatske ceste d.o.o., 2024. Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga IV – Geotehnički radovi. Zagreb: Hrvatske ceste d.o.o.
- Hrvatski zavod za norme (HZN), 1980. HRN U.C5.020: Projektiranje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa – Tehnički uvjeti. Zagreb: Hrvatski zavod za norme.
- Kovačević, S. i Capar, A. (1972). Vodoistražni radovi u dolini Save kraj Samobora. U: Zbornik radova 2. Jugoslavenskog simpozija o hidrogeologiji i inženjerskoj geologiji, knj. 1. Beograd.
- Slišković, I. & Šarin, A. (1999) Osnovna hidrogeološka karta Republike Hrvatske 1:100 000, List Ivanić Grad. Institut za geološka istraživanja, Hrvatski geološki institut.
- Sremac, J. (2024) "Genesis of the upper Pleistocene gravel from the Abesinija pit SE from Zagreb (Croatia)", Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia, 130(3). doi: 10.54103/2039-4942/22533.
- Šikić, K., Basch, O. & Šimunić, A. (1972) Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000 List Zagreb L38-80. Institut za geološka istraživanja Zagreb.