Professional paper UDK: 624.13(497.5 Zagreb)
https://doi.org/10.32762/zr.27.1.2

OSIGURANJE ISKOPA GRAĐEVNE JAME GRADSKE KNJIŽNICE PAROMLIN U ZAGREBU

EXCAVATION PROTECTION OF THE PAROMLIN CITY LIBRARY CONSTRUCTION PIT IN ZAGREB

Barbara Rukavina*, Mirko Grošić, Sanja Dugonjić Jovančević***

Sažetak

Izbor zaštite građevne jame od izuzetne je važnosti kako bi se osigurala sigurnost radnika, susjednih objekata i okoline tijekom izgradnje. Specifični uvjeti gradilišta, geološki uvjeti, dubina jame i obližnja infrastruktura ključni su za odabir metode zaštite građevne jame. Rad daje uvid u nekoliko varijantnih rješenja osiguranja dubokog iskopa građevne jame gradske knjižnice Paromlin u Zagrebu, za koje je napravljen proračun u programskom paketu PLAXIS 2D, koji se temelji na numeričkoj analizi, odnosno metodi konačnih elemenata, uzimajući u obzir geotehničke karakteristike tla utvrđene istražnim radovima, dubinu jame, uvjete okoline, zahtjeve projekta, pravne i sigurnosne aspekte te ekonomsku izvedivost. Kako bi se odabrala najprikladnija metoda zaštite jame, proveden je proračun za sedam varijantnih rješenja na mjerodavnom poprečnom presjeku, a koja se mogu svrstati u tri tipa zaštite građevne jame: zaštita čeličnim talpama, izvedbom pilotske stijene, te izvedbom armiranobetonske dijafragme.

Ključne riječi: *građevna jama, numeričko modeliranje, metoda konačnih elemenata, čelične talpe, pilotska stijena, dijafragma, PLAXIS 2D*

Abstract

The choice for the construction pit protection is extremely important in order to ensure the safety of workers, neighboring buildings and the environment during construction. The specific conditions of the construction site, geological conditions, the depth of the pit and the nearby infrastructure are crucial for the selection of the stabilization method of the construction pit. The paper provides an insight into several variant solutions for securing the construction pit of the Paromlin city

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
** Geotech d.o.o., Ciottina 21, 51000 Rijeka
E-mail: {barbara.rukavina, sanja.dugonjic}@gradri.uniri.hr, mirko.grosic@geotech.hr

Rad zaprimljen: 2.6.2024. Rad prihvaćen: 8.10.2024.

library in Zagreb, for which a calculation was made in the PLAXIS 2D software package based on numerical analysis, i.e. the finite element method, taking into account the geotechnical characteristics of the soil determined by investigation work, the depth of the pit, environmental conditions, project requirements, legal and safety aspects, and economic feasibility. In order to choose the most suitable method of pit stabilization, a calculation was carried out for seven variant solutions on the relevant cross-section, all of which can be classified into three types of the construction pit protection: steel sheet piles, pilot rock design, and reinforced concrete diaphragm design.

Key words: *construction pit, numerical modeling, finite element method, steel sheet piles, pilot rock, diaphragm, PLAXIS 2D*

1. Uvod

Podzemna gradnja obuhvaća izgradnju infrastrukture i objekata ispod zemljine površine. Rast industrije i prometa u novije je doba potaknuo daljnji razvoj podzemne gradnje, što se očituje kroz brojne primjere gradnje podzemnih željeznica, tunela i javnih prostora. Štoviše, može se reći da je razvoj podzemne gradnje postao simbol modernog. Osim što rješava problem nedostatka prostora, podzemna gradnja može doprinijeti očuvanju okoliša i poboljšanju kvalitete života [1]. S druge strane, suvremena nadzemna gradnja doživjela je vrhunac u proteklih nekoliko desetljeća, osobito u urbanim sredinama.

Podzemne građevine dijele se u dvije kategorije: tuneli i podzemne građevine. Tuneli su linijski objekti s duljinom znatno većom od širine i visine, dok su podzemne građevine svi ostali objekti bez značajnih razlika u dimenzijama. Obje kategorije nose specifične rizike i uvjete izgradnje, koji uključuju parametre materijala, režim podzemnih voda, onečišćenje na velikim dubinama i povećanje troškova [1].

Građevna jama je nužan element koji omogućuje sigurno izvođenje podzemnih i nadzemnih konstrukcija s podzemnim etažama. U gusto naseljenim urbanim sredinama, tehničko rješenje za osiguranje građevnih jama ključan je element u procesu njihove izvedbe. Građevna jama, kao privremena konstrukcija, mora omogućiti rad u suhim i sigurnim uvjetima, što zahtijeva stabilizaciju pokosa i učinkovitu odvodnju. Njezino projektiranje i izvođenje predstavlja izazov i rizik, osobito u urbanim sredinama gdje se gradi blizu postojećih, često povijesnih objekata. Prilikom projektiranja potrebno je uzeti u obzir kompleksnost uvjeta u tlu, razinu podzemne vode, granice čestice, postojeće zgrade, te prometnu infrastrukturu. Složenost geotehničkih uvjeta očituje se prvenstveno u heterogenosti materijala u kojem se izvode radovi, ali i nemogućnosti da u potpunosti odredimo značajke tog materijala. Za sigurno izvođenje

građevne jame koriste se različite metode zaštite, uključujući potporne konstrukcije, horizontalna ojačanja , brtvljenje dna i zaštitu od uzgona [3].

U ovome radu prikazano je nekoliko varijantnih rješenja zaštite dubokog iskopa građevne jame nove knjižnice Paromlin u Zagrebu korištenjem tipičnih konstrukcija poput dijafragme, pilotske stijene i čeličnih talpi i variranjem njihovih dimenzija. Osim višestrukih načina zaštite pokosa građevne jame, opisana je i metoda proračuna (numerička 2D analiza) privremene građevne jame [2].

Predmetna lokacija građevinskog izvedbenog projekta smještena je u zgradi Paromlin, važnom spomeniku industrijske arhitekture izgrađenom početkom 20. stoljeća u središtu Zagreba, između Glavnog željezničkog kolodvora na sjeveru i Koncertne dvorane Vatroslava Lisinskog na jugu. Paromlin je jedan od ključnih hrvatskih industrijskih kompleksa s početka industrijske revolucije, projektiran od strane istaknutih arhitekata. Iako je djelomično zadržao svoj originalni izgled, 1988. je bio zahvaćen velikim požarom, što je ozbiljno ugrozilo njegov opstanak.

2. Metode osiguranja građevnih jama

Osiguranje pokosa građevne jame uključuje izvedbu zaštitne konstrukcije koja stabilizira bokove jame i sprječava pomake koji mogu oštetiti susjedne objekte, omogućujući crpljenje oborinske i podzemne vode. Potporne konstrukcije, najčešće od armiranog betona i čelika, preuzimaju opterećenje od tla. U složenim, dubokim jamama s ograničenim prostorom koriste se armiranobetonske dijafragme, pilotske stijene i čelične talpe [4]. Ove konstrukcije često zahtijevaju i upotrebu sidara ili razupora za preuzimanje horizontalnih sila [5].

Čelične talpe su dugi, tanki čelični elementi s rubovima koji omogućuju njihovo spajanje u zidove. Koriste se za osiguranje plićih iskopa u pijesku, glini i mulju, bez potrebe za prethodnim iskopom tla. Postavljaju se zabijanjem ili vibriranjem, a mogu se ponovo koristiti i produžiti varenjem za dublje konstrukcije [6].

Piloti su najčešće kružni elementi za temeljenje građevina u tlima slabe nosivosti, koji prenose opterećenja u dublje slojeve tla. Izvode se bušenjem, postavljanjem armaturnog koša i betoniranjem. Kada se postave jedan uz drugi, formiraju pilotsku stijenu,koja može biti tangentna (piloti se dodiruju) ili sekantna (piloti se preklapaju). Pilotska stijena može biti privremena ili trajna potporna konstrukcija, često zahtijevajući vodonepropusnost [6].

Armiranobetonska dijafragma, odnosno neprekinuti kampadno izrađeni zid od armiranog betona konstruktivni je element koji prenosi horizontalne sile u dubokim građevnim jamama. Vodonepropusna je i učinkovita u jamama s visokim razinama podzemne vode. Izvodi se na način da se najprije iskopa rov koji se potom puni isplakom, a zatim se postavlja armaturni koš i betonira [4]. Najveće prednosti dijafragmi i pilotske stijene uključuju minimalne smetnje za okolne stanovnike, smanjenje buke i mogućnost rada bez prekida prometa, što je u urbanim područjima ključno [5] [6].

3. Regulativa i metode proračuna

Kako bi građevina ispunila sve uvjete Zakona o gradnji, projektiranje se provodi prema tehničkim normama i europskim standardima. Eurokod sadrži 10 normi za različite građevinske konstrukcije [7], a projektiranje u geotehnici provodi se prema Eurokodu 7 (EN 1997). Svaka zemlja može kroz Nacionalni aneks usvojiti jedan ili više projektnih pristupa. U Hrvatskoj je na snazi Projektni pristup 3, koji primjenjuje parcijalne faktore na djelovanja i materijalne značajke, dok se geotehnička djelovanja i otpornost faktoriziraju s faktorom 1,0. Redukcija se odnosi na parametre φ' (kut trenja) i c' (kohezija) koristeći parcijalne faktore sigurnosti $\gamma_{\varphi}' = 1{,}25$ i $\gamma_c' = 1{,}25$, te na stalno nepovoljno djelovanje q (promjenjivo prometno opterećenje) koristeći parcijalni faktor sigurnosti $\gamma_{G;sup} = 1{,}30$ sukladno normi HRN EN 1997-1.

Pri projektiranju je obavezno provjeriti granično stanje uporabljivosti (dalje u tekstu: GSU) i granično stanje nosivosti (dalje u tekstu: GSN) kako bi se izbjegao slom tla oko potporne konstrukcije [6]. Za projektiranje potpornih konstrukcija koriste se različite metode proračuna, no najčešća je metoda konačnih elemenata za izračun pomaka tla, momenata savijanja i poprečnih sila [2]. Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na diskretizaciji kontinuuma s konačnim brojem elemenata [8]. Točke diskretiziranog modela se povezuju elementima i na taj način tvore mrežu konačnih elemenata [9]. Potom se izvode jednadžbe ravnoteže za proračunski model pri čemu su, preko globalne matrice krutosti, vanjske sile koje djeluju u čvorovima konačnih elemenata povezane sa stupnjevima slobode [10].

Danas se za proračun potpornih konstrukcija često koriste računalni softveri. PLAXIS 2D je softver za analizu deformacija i stabilnosti u geotehnici, koji koristi metodu konačnih elemenata. Izračunava faktor sigurnosti smanjenjem parametara čvrstoće i provjerava granična stanja. Omogućuje modeliranje geometrije, elemenata i opterećenja za svaku fazu radova [11].

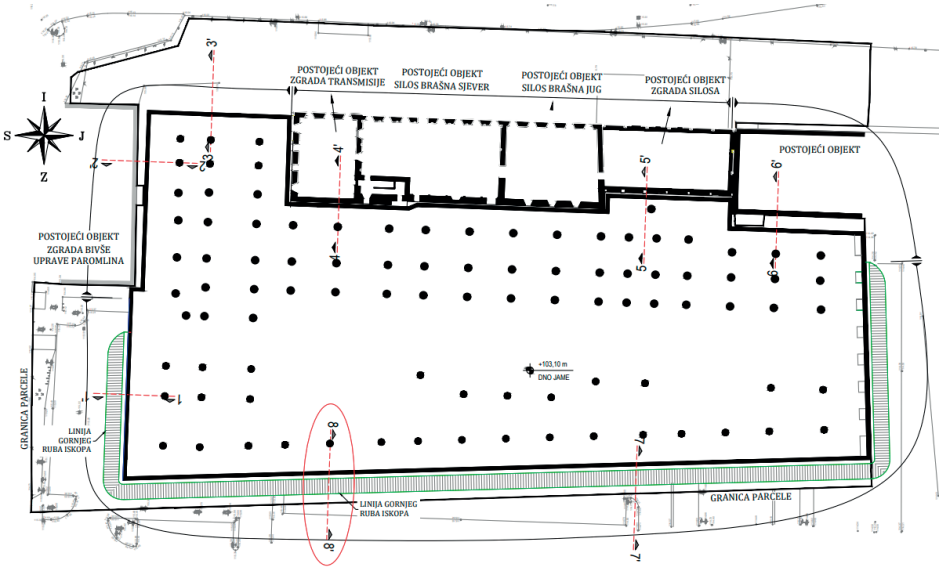
4. Projektiranje nove gradske knjižnice Paromlin u Zagrebu

U nastavku su prikazane ključne značajke i informacije za projektiranja građevne jame za izgradnju podzemnih etaža nove gradske knjižnice Paromlin u Zagrebu. Ukratko su opisani ključni elementi geotehničkog projektiranja te je prikazana korištena metoda proračuna i usvajanje propisanih mjera [2]. Budući da se radi o zaštićenom spomeniku kulture, sam proces obnove dugotrajan je i zahtjevan. Kompleks se sastoji od nekoliko zgrada, uključujući paromlinsku zgradu, zgradu transmisije, zgradu skladišta i zgradu silosa [12]. Trenutno stanje kompleksa prikazano je na Slici 1.

Slika 1. Postojeće stanje konstrukcije Paromlina [12]

Nakon nekoliko neuspješnih natječaja za prenamjenu prostora, odlučeno je da će se na lokaciji postojećeg parkirališta i objekta Paromlin izgraditi nova zgrada gradske knjižnice grada Zagreba s dvije podzemne i nekoliko nadzemnih etaža. Postojeći objekti Paromlina bit će prenamijenjeni u administrativne svrhe [13]. Vizualizacija prenamijenjene lokacije i predviđeni izgled nove gradske knjižnice prikazani su na Slici 2, dok je na Slici 3 prikazana situacija građevne jame.

Slika 2. Projektirani izgled nove Gradske knjižnice Paromlin - uklapanje s postojećom zgradom [3]



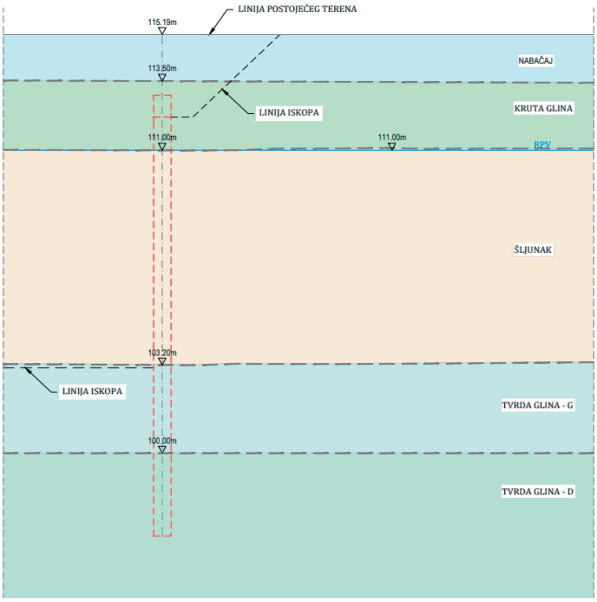
Slika 3. Situacija građevne jame s označenim mjerodavnim poprečnim presjekom 8-8'

4.1 Geotehničke značajke lokacije

Inženjerskogeološke i geotehničke značajke lokacije opisane su u geotehničkom elaboratu [14]. Istražni radovi su uključivali iskop sondažnih jama, rotacijsko bušenje (šest istraživačkih rotacijskih bušotina pojedinačnih duljina 15,0 m, odnosno ukupne duljine 90,0 m), inženjerskogeološko kartiranje terena, determinacije bušećih jezgri i sondažnih jama, laboratorijska ispitivanja, te utvrđivanje dimenzija i oblika postojećih temelja i vrste temeljnog tla. Lokacija pripada strukturnoj jedinici Zagrebačka depresija, koju karakteriziraju nanosi

aluvijalnih sedimenata. Geotehnički profil uključuje pet geotehničkih jedinica (nabačaj, kruta glina, pijesak, šljunak, tvrda glina), a njihovi parametri dobiveni su laboratorijskim ispitivanjima. Stalna razina podzemne vode utvrđena je na dubinama od oko 3,20 m do 3,80 m [15]. Geotehničke jedinice su u generaliziranom geotehničkom profilu (Slika 4) raspoređene na sljedeći način [2]:

- GJ-1 (nabačaj), od +115,19 do +113,50 m.n.m.
- GJ-2 (kruta glina), od +113,50 do +111,00 m.n.m.
- GJ-4 (šljunak), od +111,00 do +103,20 m.n.m.
- GJ-5 (tvrda glina – G), od +103,20 do +100,00 m.n.m.
- GJ-6 (tvrda glina – D), od +100,00 do +75,00 m.n.m.



Slika 4. Geotehnički profil na mjerodavnom presjeku [2]

Zaštita iskopa obuhvaća privremenu građevnu jamu (geotehnička kategorija 2 prema, prema EN 1997), a prijedlog osiguranja građevne jame odnosi se na nekoliko varijantnih rješenja koja obuhvaćaju izvedbu čeličnih talpi, pilotske stijene i armiranobetonske dijafragme, uz dodatno ojačanje geotehničkim sidrima [2].

5. Proračunski modeli i proračun

Pomoću parametara tla dobivenih istražnim radovima i odabranim parametrima konstrukcija kreiran je proračunski model u programskom paketu PLAXIS 2D. Proračun uključuje sedam varijantnih rješenja na

mjerodavnom poprečnom presjeku bez kompleksnih rubnih uvjeta, koja se mogu svrstati u 3 tipa zaštite građevne jame.

Cilj je proračunom dokazati mehaničku otpornost i stabilnost građevne jame s ugrađenim elementima zaštite. Analiza naprezanja i deformacija provedena je s karakterističnim vrijednostima parametara dobivenih za GSU kako bi se dobili pomaci. Potom je provedena analiza stabilnosti modela za kritičnu, posljednju fazu proračuna, s proračunskim vrijednostima parametara dobivenih za GSN. Rezultat ove analize su momenti savijanja i poprečne sile duž potporne konstrukcije te faktor sigurnosti i izgled klizne plohe u modelu. S obzirom da se radi o privremenoj građevnoj jami, proračuni potresne otpornosti nisu provedeni [2].

5.2 Karakteristične i proračunske vrijednosti parametara

5.2.1 Proračun GSU

Intervali parametara za svaku geotehničku jedinicu dobiveni su laboratorijskim ispitivanjem na poremećenim i neporemećenim uzorcima tla, a konačna vrijednost odabrana je iskustveno. U Tablici 1 nalaze se karakteristične vrijednosti parametara korištene za analizu naprezanja i deformacija u softveru PLAXIS. Usvojen je „Hardening Soil“ model i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od q_k=10,0 kN/m² [2].

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti parametara u modelu [2]

Geotehnička jedinica	Kut unutarnjeg trenja, φ_k (°)	Kohezija, c_k (kN/m²)	Moduli deformabilnosti (kN/m²)	
GJ-1	32	4	E_{50}^{ref}	20,00e3
			E_{oed}^{ref}	20,00e3
			E_{ur}^{ref}	20,00e3
GJ-2	25	14	E_{50}^{ref}	10,00e3
			E_{oed}^{ref}	10,00e3
			E_{ur}^{ref}	30,00e3
GJ-4	35	1	E_{50}^{ref}	60,00e3
			E_{oed}^{ref}	60,00e3
			E_{ur}^{ref}	180,00e3
GJ-5	23	25	E_{50}^{ref}	80,00e3
			E_{oed}^{ref}	80,00e3
			E_{ur}^{ref}	240,00e3
GJ-6	28	25	E_{50}^{ref}	80,00e3
			E_{oed}^{ref}	80,00e3
			E_{ur}^{ref}	240,00e3

5.2.2 Proračun graničnog stanja nosivosti

Kako bi se provela analiza stabilnosti, karakteristični parametri se reduciraju na proračunske vrijednosti prema projektnom pristupu 3. U Tablici 2 prikazane su reducirane vrijednosti parametara za svaku geotehničku jedinicu, kako je ranije opisano u Poglavlju 3.

Vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja u ovom dijelu proračuna iznosi q_{ed}=13,0 kN/m^2 [1].

Tablica 2. Proračunske vrijednosti parametara u geotehničkom modelu [2]

Geotehnička jedinica	**Kut unutarnjeg trenja, φ_d** (°)	**Kohezija, c_d** (kN/m^2)
GJ-1	25,6	3,2
GJ-2	20,0	11,2
GJ-4	28,0	0,8
GJ-5	18,4	20,0
GJ-6	22,4	20,0

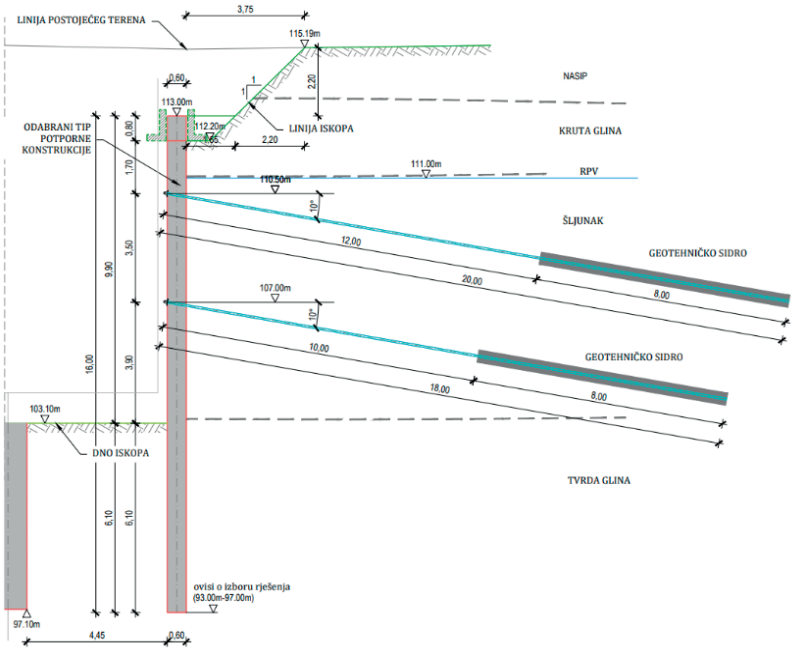
5.3 Faze izvedbe

Cilj je na mjerodavnom poprečnom presjeku građevne jame dubine 12m, prikazanom na Slici 5, smjestiti odgovarajuću potpornu konstrukciju i proračunima doći do prihvatljivog rješenja.

Proračun građevne jame, neovisno o izboru potporne konstrukcije kao varijantnog rješenja, napravljen je za sljedeće faze radova:

- **početna (in situ) faza:** proračun početnog stanja uz razinu podzemne vode na +111,00 m.n.m.
- **faza 1:** resetiranje pomaka
- **faza 2:** iskop do kote +113,00 m.n.m., aktiviranje potporne konstrukcije i opterećenja
- **faza 3:** iskop do dubine od 1,0 m ispod prvog reda sidara (kota +109,50 m.n.m.) i snižavanje RPV ispred potporne konstrukcije na kotu iskopa od +109,50 m.n.m.
- **faza 4:** izvedba prvog reda geotehničkih sidara (kota +110,50 m.n.m.) i prednapinjanje na silu od 450,0 kN
- **faza 5:** iskop do dubine od 1,0 m ispod drugog reda sidara (kota +106,00 m.n.m.) i snižavanje RPV ispred potporne konstrukcije na kotu iskopa od +106,00 m.n.m.
- **faza 6:** izvedba drugog reda geotehničkih sidara (kota +107,00 m.n.m.) i prednapinjanje na silu od 550,0 kN

- **faza 7:** iskop do dna građevne jame (kota +103,10 m.n.m.) i snižavanje RPV ispred potporne konstrukcije na kotu iskopa od +103,10 m.n.m. [2]



Slika 5. Mjerodavan poprečni presjek [2]

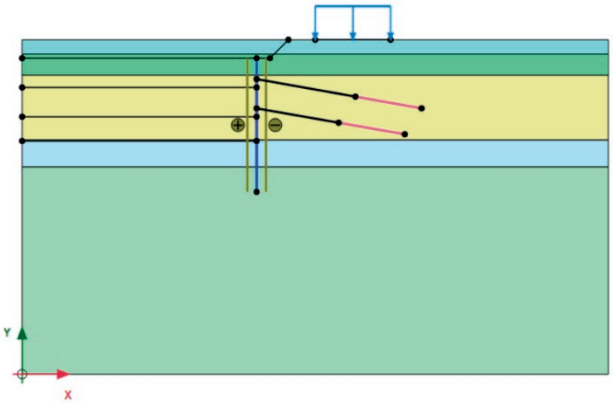
5.4 Pregled provedenih proračuna

Proračun objedinjuje ukupno sedam varijantnih rješenja osiguranja građevne jame, prikazanih u Tablici 3.

Tablica 3. Pregled i opis varijantnih rješenja [2]

Potporna konstrukcija	Tip varijantnog rješenja		Opis
Čelične talpe	Tip 1	Tip 1-1	Čelične talpe tipa Larssen 43 duljine d=16 m
		Tip 1-2	Čelične talpe tipa Larssen 430 duljine d=16 m
		Tip 1-3	Čelične talpe tipa Larssen 605 duljine d=16 m
Pilotska stijena	Tip 2	Tip 2-1	Pilotska stijena promjera ϕ800 i duljine d=20 m
		Tip 2-2	Pilotska stijena promjera ϕ800 i duljine d=16 m
		Tip 2-3	Pilotska stijena promjera ϕ600 i duljine d=16 m
AB dijafragma	Tip 3	Tip 3-1	AB dijafragma debljine D=0,6 m i duljine d=16 m

Na Slici 6 prikazan je osnovni proračunski model u softveru PLAXIS 2D. Svakom proračunskom modelu su zajednički spomenuti parametri tla na istom presjeku, razina podzemne vode na koti +111,00 m.n.m., promjenjivo prometno opterećenje iza građevne jame q=10,0 kN/m^2 i geotehnička sidra koja se ugrađuju na kotama +110,50 m.n.m. i +107,00 m.n.m. [2]



Slika 6. Proračunski model u softveru PLAXIS 2D [2]

6. Rezultati i usporedba rezultata

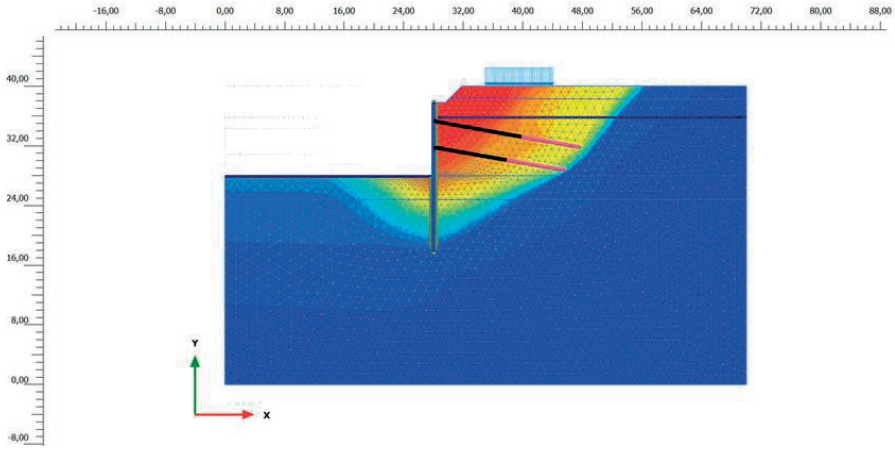
Analiza naprezanja i deformacija te analiza stabilnosti provedene su za sva varijantna rješenja. Njima su dobivene vrijednosti pomaka tla, konstrukcija, momenata savijanja i poprečnih sila te položaj i izgled klizne plohe za posljednju, 7. fazu iskopa, u kojoj se provodi iskop do dna građevne jame i snižavanje razine podzemne vode na kotu iskopa. Uz kliznu plohu u analizi stabilnosti, utvrđeni su i podaci o faktorima sigurnosti i ispunjavaju li kriterij stabilnosti u odnosu na graničnu vrijednost Fs=1,0 [2].

6.1 Usporedba rezultata

Analiza naprezanja i deformacija je za svaku pojedinu varijantu dala različite rezultate proračuna, dok su analizom stabilnosti utvrđeni slični rezultati za sva varijantna rješenja.

Klizne plohe su izgledom gotovo iste, prolaze kroz sve geotehničke jedinice i obuhvaćaju tlo iza potporne konstrukcije te dijelom dno iskopa zbog uzgona. Sva varijantna rješenja zadovoljila su analizu stabilnosti, odnosno faktor sigurnosti se pokazao većim od 1,0. Najveći faktor sigurnosti Fs=1,242 ima Tip 2-1 (Slika 7), odnosno pilotska stijena promjera ϕ800 i duljine d=20m, koji se međusobno tangiraju. Međutim,

ostale vrijednosti bitno se ne razlikuju od najveće te se stoga faktor sigurnosti ne smatra mjerodavnim kriterijem odabira najpovoljnije konstrukcije.



Slika 7. Klizna ploha dobivena za Tip 2-1 [2]

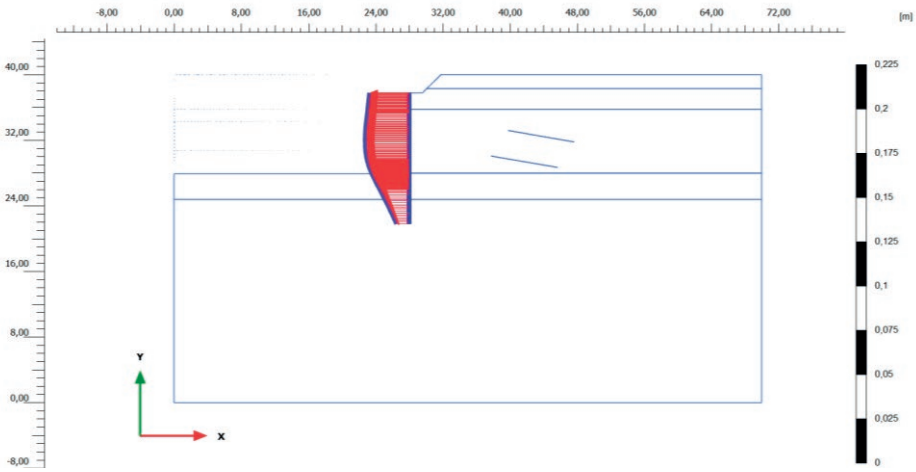
Analizom naprezanja i deformacija utvrđeni su ukupni horizontalni pomaci tla i konstrukcije. Najveći pomaci tla u svim modelima dogodili su se na gornjem dijelu obuhvata neposredno uz potpornu konstrukciju, a sami pomak konstrukcije također je najveći na njezinoj najvišoj koti. U Tablici 4 dan je prikaz pomaka konstrukcija za svaku pojedinu varijantu.

Tablica 4. Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija (∑Pux) [2]

Konstrukcija	**Parametri**	**Varijantno rješenje**	**Ukupni horizontalni pomaci konstrukcije, $\sum Pu_x$** [cm]
Čelične talpe	Larssen 43, d=16 m	Tip 1-1	4,00
	Larssen 430, d=16 m	Tip 1-2	2,67
	Larssen 605, d=16 m	Tip 1-3	3,81
Pilotska stijena	ϕ800, d=20 m	Tip 2-1	2,34
	ϕ800, d=16 m	Tip 2-2	2,49
	ϕ600, d=16 m	Tip 2-3	2,90
AB dijafragma	D=600, d=16 m	Tip 3-1	2,61

Uspoređujući rezultate pomaka čeličnih talpi, može se uočiti kako njihov pomak znatno ovisi o odabranom profilu. Tako primjerice čelične talpe tipa Larssen 43 (Tip 1-1) imaju najmanji moment inercije i moment otpora te najmanje krutosti, a sukladno tome dosežu i najveći pomak od 4,00 cm u posljednjoj, kritičnoj fazi, što je za očekivati.

Rezultati pomaka pilotske stijene povoljniji su u odnosu na rezultate čeličnih talpi, no međusobno se razlikuju s obzirom na parametre na koje je izravno utjecala geometrija konstrukcije. Pilotska stijena s većim promjerom ϕ800 i najvećom duljinom od 20 m, a ujedno i najvećim krutostima (Tip 2-1), očekivano je pokazala najmanje pomake od 2,34 cm. Proračunom je utvrđeno kako se promjenom duljine pilota iz Tipa 2-1 u Tip 2-2, odnosno smanjenjem dubine polaganja pilota u tvrdu glinu povećava pomak same konstrukcije, a smanjenjem promjera pilota pomak postaje još veći [2]. S obzirom na prethodne rezultate, proračun proveden za AB dijafragmu (Tip 3-1), koja geometrijski odgovara pilotskoj stijeni Tip 2-3, pokazao je pomak konstrukcije od 2,61 cm (Slika 8).



Slika 8. Ukupni pomaci AB dijafragme u x smjeru za Tip 3-1 [2]

Uspoređujući rezultate pomaka svih varijantnih rješenja, najveći pomak konstrukcije $\sum Pu_x$=4,00 cm pokazao je Tip 1-1, odnosno čelične talpe tipa Larssen 43 s najmanjim krutostima. U nastavku su prikazane Tablice 5 i 6 koje sadrže minimalne i maksimalne vrijednosti momenata savijanja potporne konstrukcije za GSU i GSN [1].

U usporedbi s ostalim čeličnim talpama, Tip 1-2, koji je pokazao najmanje pomake, ujedno ima i najmanji i najveći moment savijanja po metru dužnom potporne konstrukcije. Najmanji i najveći moment savijanja

za GSU i GSN dosegla je pilotska stijena promjera ϕ800 i duljine 16 m, odnosno Tip 2-2 [2].

Tablica 5. Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSU [2]

Konstrukcija	**Parametri**	**Varijantno rješenje**	**Minimalni momenti savijanja, M_{min} [kNm/m']**	**Maksimalni momenti savijanja, M_{max} [kNm/m']**
Čelične talpe	Larssen 43, d=16 m	Tip 1-1	104,9	158,8
	Larssen 430, d=16 m	Tip 1-2	77,66	344,4
	Larssen 605, d=16 m	Tip 1-3	108,3	170,5
Pilotska stijena	ϕ800, d=20 m	Tip 2-1	187,4	378,5
	ϕ800, d=16 m	Tip 2-2	47,25	407,6
	ϕ600, d=16 m	Tip 2-3	102,1	285,8
AB dijafragma	D=600, d=16 m	Tip 3-1	71,45	358,8

Tablica 6. Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSN [2]

Konstrukcija	**Parametri**	**Varijantno rješenje**	**Minimalni momenti savijanja, M_{min}** [kNm/m']	**Maksimalni momenti savijanja, M_{max}** [kNm/m']
Čelične talpe	Larssen 43, d=16 m	Tip 1-1	145,1	248,0
	Larssen 430, d=16 m	Tip 1-2	66,05	524,5
	Larssen 605, d=16 m	Tip 1-3	142,5	268,3
Pilotska stijena	ϕ 800, d=20 m	Tip 2-1	284,2	499,3
	ϕ 800, d=16 m	Tip 2-2	43,43	599,3
	ϕ 600, d=16 m	Tip 2-3	90,14	454,4
AB dijafragma	D=600, d=16 m	Tip 3-1	58,64	542,9

6.2 Odabir projektnog rješenja

Za odabir projektnog rješenja u obzir su uzeti rezultati provedenih proračuna i njihova analiza. Pritom je potrebno voditi računa o stabilnosti geotehničke konstrukcije (faktor sigurnost), ukupnim pomacima konstrukcije i okolnih objekata te o nosivosti pojedinih elemenata unutar geotehničke konstrukcije koje je potrebno provjeriti (dimenzionirati). Osim svega navedenog, nužno je u obzir uzeti ograničenja tehnologije izvedbe, koja može biti uvjetovana geološkim prilikama, podzemnom vodom, geometrijskim uvjetima na gradilištu (blizina okolnih objekata, pristupni putevi itd.), ekonomskim uvjetima, potrebnom vremenu izvedbe radova itd.

S obzirom na sve navedeno, kao optimalna metoda odabrana je izvedba privremene građevne jame armiranobetonskom dijafragmom i sidrima. Neke od prednosti ove metode i geotehničke konstrukcije su:

- kruta konstrukcija koja sprječava veće horizontalne pomake i time osigurava stabilnost okolnih objekata
- nepropusnost konstrukcije i sprječavanje ulaska podzemne vode koja je prisutna svojom stalnom razinom
- optimalni odnos cijene i vremenskog trajanja radova.

Iako su slični rezultati (horizontalni pomaci) i kod pilotske stijene, u nastavku se navode neki od nedostataka ove metode i geotehničke konstrukcije:

- s obzirom na veliku dubinu i odabrani promjer pilota prilikom vertikalnog bušenja nemoguće je osigurati potpunu vertikalnost te s porastom dubine dolazi do otklona od vertikale, čime se smanjuje ili u potpunosti gubi efekt nepropusnosti, koji je jedan od ključnih uvjeta za izvedbu jame
- vremensko trajanje radova je duže u odnosu na odabranu metodu (velike količine bušenja za pilot)
- iako je količina materijala (armatura, beton) približno jednaka kao i za dijafragmu, zbog potrebnog duljeg trajanja radova, cijena izvedbe radova (trošak strojeva, ljudi i indirektnih troškova gradilišta) je veća.

Talpe kao geotehnička konstrukcija nisu detaljnije uzete u obzir zbog velikih horizontalnih pomaka i momenata u profilima. Osim toga, vrlo je zahtjevno pobijati talpe u ovom geološkom profilu i na ovim dubinama [2].

7. Zaključak

U urbaniziranim područjima, pri projektiranju i izgradnji dubokih građevnih jama unaprijed se predviđaju izazovi koji obično uključuju

potencijalni utjecaj na okolne građevine, prisustvo podzemne vode te projektiranje u tlu slabije nosivosti. Stoga je od ključne važnosti u fazi projektiranja pažljivo procijeniti moguće utjecaje.

Nakon provedenih proračuna sedam varijantnih rješenja osiguranja građevne jame za izgradnju nove gradske knjižnice Paromlin u Zagrebu, može se zaključiti kako su najveće deformacije konstrukcije, odnosno najveći pomaci konstrukcije u horizontalnom smjeru zabilježeni u njezinom središnjem dijelu, odnosno na potezu od vršnog dijela na površini terena do kote dna građevne jame. Čelične talpe su ostvarile gotovo dvostruko veće pomake u odnosu na pilotsku stijenu i armiranobetonsku dijafragmu, kao i znatno veće vrijednosti momenata savijanja (M_{min}). Pilotska stijena i armiranobetonska dijafragma su pokazale međusobno slične rezultate, no njihovo ponašanje u opisanim uvjetima sa stalnom razinom podzemne vode uvelike se razlikuje.

Vodeći se, prije svega, rezultatima proračuna (analiza deformacija i naprezanja) i uzimajući u obzir geološke uvjete u tlu, tehnologiju izvedbe, ekonomske aspekte i vrijeme potrebno za izvedbu radova, kao najpovoljnije varijantno rješenje osiguranja građevne jame, odabrana je armiranobetonska dijafragma. Njezinom izvedbom moguće je spriječiti veće horizontalne pomake i ulaz podzemne vode u građevnu jamu te osigurati stabilnost okolnih objekata. Uz sve navedeno, izvedbom armiranobetonske dijafragme osigurava se optimalan odnos cijene i vremenskog trajanja radova. Dakle, može se zaključiti kako je za odabir inženjerskog projektnog rješenja nezaobilazna provedba detaljnih proračuna i analize rezultata. Ipak, kako nisu sva varijantna rješenja izvediva u svim uvjetima, neka mogu biti neprihvatljiva [2].

Literatura

[1] Vrkljan, I. (2003) Podzemne građevine i tuneli. Nastavni materijali. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci.

[2] Rukavina, B. (2023) Varijantna rješenja osiguranja građevne jame. Diplomski rad. Građevinski fakultet u Rijeci.

[3] Vivoda Prodan, M. (2022) Materijali s predavanja (Merlin). Građevinski fakultet u Rijeci. https://moodle.srce.hr/2022-2023/ (Pristup 23. ožujak 2023.)

[4] Szavits Nossan, V. Mehanika tla i stijena: Potporne konstrukcije, Nastavni materijali. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

[5] Roje Bonacci, T. (2005) Potporne građevine i građevne jame. Nastavni materijali. Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu.

[6] Nonveiller, E. (1979) Mehanika tla i temeljenje građevina. Školska knjiga, Zagreb.

[7] Bond, A., Harris, A. (2008) Decoding Eurocode 7. Taylor & Francis Group, London.

[8] Jagodnik, V. (2021) Materijali s predavanja. Građevinski fakultet u Rijeci. https://moodle.srce.hr/2021-2022/ (Pristup 23. ožujak 2023.)

[9] Meštrović, M. (2020) Metoda konačnih elemenata, Nastavni materijali. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

[10] Sorić, J. (2004) Metoda konačnih elemenata, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb.

[11] Bentley.com (2023) Software PLAXIS 2D. https://www.bentley.com/ (Pristup 12. srpanj 2023.)

[12] Grad Zagreb, Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj Grada (2013) Paromlin 2013. Elaborat. Zagreb.

[13] Upi-2m.hr (2023) Gradska knjižnica Paromlin. https://upi-2m.hr/ (Pristup 10. srpanj 2023.)

[14] Geotech d.o.o. (2020) Knjižnica Paromlin. Geotehnički elaborat, Građevinski projekt – geotehnički dio, Rijeka.

[15] Geotech d.o.o. (2022) Nova zgrada Gradske knjižnice grada Zagreba. Projekt zaštite građevinske jame, građevinski projekt, Rijeka.