DOI: 10.5592/CO/HG.2026.34

PROJEKT ZAŠTITE ISKOPA GRAĐEVINSKE JAME NA ČRNOMERCU

IVAN VUJIĆ [1], ANTONIA MIRČETA [1], LOVORKA LIBRIĆ [1] , MEHO SAŠA KOVAČEVIĆ [1]

[1] *Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Hrvatska*

Sažetak

U radu se prikazuje cjelovit postupak projektiranja privremene zaštite građevne jame, polazeći od geotehničkih terenskih i laboratorijskih istraživanja. Na temelju prikupljenih podataka izrađen je geotehnički model tla te su određene karakteristične i proračunske vrijednosti parametara potrebnih za proračun. Razmotrene su varijantne mjere stabilizacije jame, a odabrano je optimalno rješenje prema kriterijima sigurnosti, izvedivosti i ekonomičnosti. Za kritične faze provedene su analize globalne stabilnosti te naponsko-deformacijske analize, čime je ocijenjena nosivost i uporabivost sustava. U skladu s rezultatima dimenzionirani su elementi potporne konstrukcije, uz definirane konstruktivne zahtjeve i faze izvođenja.

Ključne riječi

potporne građevine, pilotna stijena, geotehnička sidra, građevna jama, analiza stabilnosti

1 Uvod

Duboki iskopi građevinskih jama u urbanim sredinama projektiraju se i izvode uz ograničen prostor, blizinu postojećih objekata i instalacija te prisutna površinska opterećenja, primjerice prometovanje vozila. Ponašanje tla i potpornog sustava pritom ovisi o geološkim i hidrogeološkim uvjetima utvrđenima istražnim radovima, fizikalnim i mehaničkim svojstvima materijala (osobito parametrima posmične čvrstoće tla), vanjskim opterećenjima poput prometa i susjednih građevina te procesima koji s vremenom mogu promijeniti početno stanje (Harabinova i sur., 2026). Zbog toga je bitno ograničiti bočne pomake potpornog sustava i pomake tla kako bi se smanjio utjecaj na okolnu izgrađenu infrastrukturu. Ponašanje potpornih konstrukcija ovisi o krutosti zida, fazama iskopa, razini prednapinjanja sidara te o uvjetima u tlu i njihovoj interpretaciji (Clough i sur., 1990; Moormann, 2004). Za potrebe urbanih iskopa često se odabiru kruti potporni sustavi, primjerice armiranobetonska pilotna stijena stabilizirana geotehničkim sidrima. U takvim rješenjima važna je usklađenost projektiranih pretpostavki s fazama izvedbe te kontrola površinskih opterećenja uz rub građevinske jame, jer ona povećavaju zahtjeve na potpornu konstrukciju i mogu utjecati na stabilnost tla te pomake i naprezanja potpornog sustava.

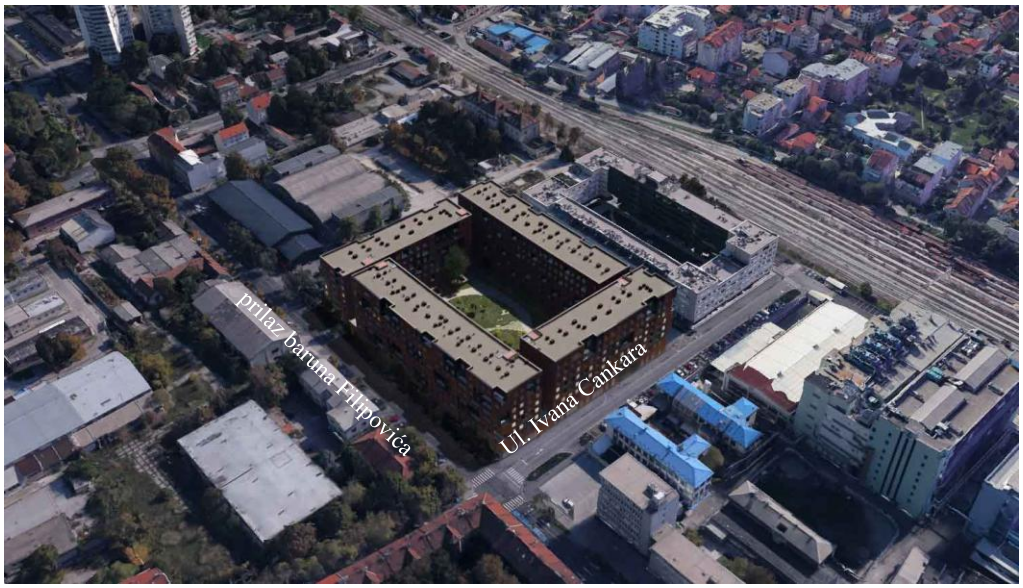
Ovaj rad prikazuje zaštitu iskopa građevinske jame na lokaciji Črnomerec u Zagrebu. Građevina je projektirana s dvije podzemne etaže, prizemljem i sedam odnosno osam nadzemnih etaža. Tlocrtne dimenzije građevine su približno 115 × 85 metara.

Objekt je izveden u tri faze. U prvoj fazi izvedena je zaštita građevinske jame. Druga faza obuhvaća izgradnju podzemnih etaža te dviju stambeno-poslovnih lamela visine osam nadzemnih etaža, dok se u trećoj fazi vrši izvođenje dviju poslovnih lamela u dvorišnom dijelu parcele, svaka visine sedam nadzemnih etaža.

Ukupna dubina iskopa iznosi 7,55 m, pri čemu se u gornjoj zoni izvodi široki iskop visine 2 metra, a u donjoj zoni vertikalni iskop visine 5,55 metara zaštićen sidrenom armiranobetonskom pilotnom stijenom. Zaštitna konstrukcija izvedena je kao armiranobetonska sidrena pilotna stijena promjera 600 mm i dubine 9,8 m, koja se dodatno sidri geotehničkim prednapetim sidrima duljine 12 m. Promatrana konstrukcija privremenog je

karaktera i osigurava stabilnost okolnog tla i susjednih objekata tijekom izvođenja podzemnih dijelova građevine.

Cilj je prikazati odabrano rješenje zaštite i geotehničke uvjete te analizirati stabilnost i ponašanje sustava kroz faze izvedbe, uz razmatranje utjecaja prometnog opterećenja (Vujic, 2025). Na slici 1. prikazana je pozicija stambeno-poslovne građevine koja je predmet ovog rada.



Slika 1. Pozicija stambeno-poslovne građevine (MEŠIĆ COM d.o.o., 2023)

2 Geotehnički istražni radovi i određivanje parametara tla

Za potrebu izrade projektne dokumentacije obavljeni su geotehnički istražni radovi kako bi se dobio uvid u sastav i mehaničke karakteristike temeljnog tla. Izvedene su tri istražne bušotine dubine 15 metara uz kontinuirano jezgrovanje s popratnim odgovarajućim laboratorijskim ispitivanjima.

Tijekom istražnih geotehničkih radova utvrđeno je da se nivo podzemne vode nalazi na koti +113,35 m.n.m. Dobiveni rezultati istraživanja omogućili su definiranje mehaničkih svojstava tla nužnih za izradu proračuna stabilnosti, čvrstoće i deformabilnosti tla tijekom gradnje i eksploatacije objekta (Puljak i sur., 2021).

Proračunski parametri tla predstavljaju ključne ulazne veličine za analize nosivosti, stabilnosti i uporabivosti. Usvojeni su parametri iz in-situ ispitivanja i laboratorijskih pokusa provedenih na predmetnoj lokaciji. Skup prikupljenih podataka dobivenih : SPT udarcima, priručnom krilnom sondom,ispitivanje priručnim penetrometrom, granulometrija, granice plastičnosti, prirodna vlažnost, gustoća i izravni posmik omogućuju dosljedno povezivanje uslojenosti s mehaničkim svojstvima nužnim za numeričko modeliranje (Vujic, 2025). Vrijednosti parametara za koherentne slojeve dobiveni su ispitivanjem priručnim penetrometrom i priručnom krilnom sondom te laboratorijskim ispitivanjem na izravni posmik na neporemećenim uzorcima.

Obzirom na provedene istražne radove i laboratorijske isitivanja odabrana su dva karakteristična presjeka modela tla: presjek A-A i presjek B-B. Za odabrane karakteristične presjeke modela tla prikazane su odabrane proračunske vrijednosti parametara tla po slojevima materijala tablicom 1 i 2.

Tablica 1. Proračunske vrijednosti parametara tla, presjek A-A

Sloj	Debljina sloja	Simbol	Opis tla	Parametri tla
1.	0,0 m - 3,5 m	N	Nasip od gline, šljunka i građevinskog otpada	γ_p = 18,0 kN/m³ c_p = 4,0 kPa; φ_p = 17,6° M_v = 6000 kN/m²
2.	3,5 m - 5,7 m	CH	Glina s prahom, visoke plastičnosti, lako gnječivog konzistentnog stanja, smeđe sive boje	γ_p = 18,0 kN/m³ c_p = 4,0 kPa; φ_p = 19° M_v = 5500 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s
3.	5,7 m - 6,9 m	CL	Glina s pijeskom, niske plastičnosti, lako do teško gnječivog konzistentnog stanja, smeđe sive boje	γ_p = 18,0 kN/m³ c_p = 6,4 kPa; φ_p = 16,8° M_v = 4500 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s
4.	6,9 m - 8,4 m	SC	Pijesak, zaglinjeni, srednje zbijeni s proslojcima lapora, smeđe sive boje	γ_p = 19,0 kN/m³ c_p = 1,6 kPa; φ_p = 14,4° M_v = 7500 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
5.	8,4 m - 13,5 m	GP	Šljunak, slabo graduiran, malo zaglinjen, srednje zbijen, smeđe boje	γ_p = 20,0 kN/m³ c_p = 0,0 kPa; φ_p = 25,6° M_v = 25000 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s
6.	13,5 m - 15 m	SW-SM	Pijesak s prahom, zbijeni, sive do sivo plave boje	γ_p = 20,0 kN/m³ c_p = 0,8 kPa; φ_p = 26,4° M_v = 25000 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s

Tablica 2. Proračunske vrijednosti parametara tla, presjek B-B

Sloj	Debljina sloja	Simbol	Opis tla	Parametri tla
1.	0,0 m - 10,0 m	Cl	Glina s pijeskom, niske plastičnosti, lako do teško, gnječivog konzistentnog stanja, smeđe sive boje	γp = 18,0 kN/m³ cp = 6,4 kPa; φp = 16,8° M_v = 4500 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-}8$ m/s
2.	10,0 m 15,0 m	GP	Šljunak, slabo graduiran, malo zaglinjen, srednje zbijen, smeđe boje	γp = 20,0 kN/m³ cp = 0,0 kPa; φp = 25,6° M_v = 25000 kN/m² $k_x = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s

3 Numeričke analize

U geotehničkom projektiranju zaštite građevinske jame, u skladu sa smjernicama normi HRN EN 1997-1:2024, HRN EN 1997-2:2024 i HRN EN 1997-3:2025 te pripadajućih hrvatskih nacionalnih dodataka, provode se provjere graničnih stanja nosivosti (ULS) i graničnih stanja uporabivosti (SLS). Granična stanja nosivosti odnose se na mogućnost sloma ili gubitka stabilnosti sustava tlo–konstrukcija, dok se granična stanja uporabivosti odnose na ograničavanje deformacija i pomaka na razine prihvatljive za okolne objekte i infrastrukturu. Kod dubokih iskopa u urbanim uvjetima, uz globalnu stabilnost, posebno je važno kontrolirati bočne pomake potpornog sustava i slijeganja terena.

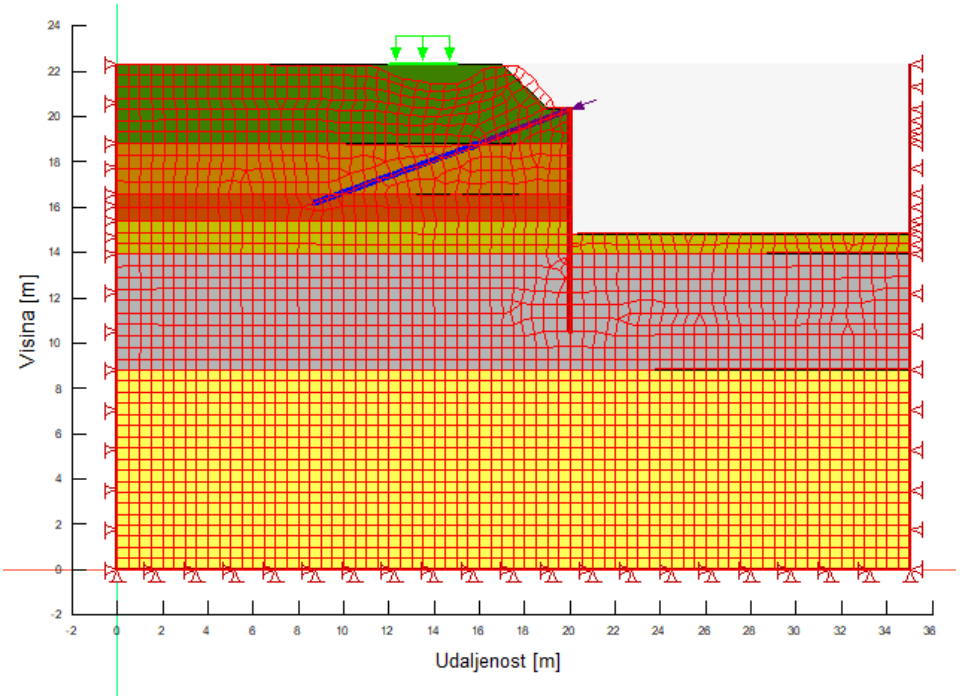
Numeričke analize u ovom radu provest će se u softverskom paketu GeoStudio, pri čemu će se za analizu naprezanja i deformacija koristiti modul SIGMA/W, a za analizu stabilnosti modul SLOPE/W.
SIGMA/W je modul unutar GeoStudio paketa namijenjen analizi naprezanja i deformacija u tlu i stijeni. Temelji se na metodi konačnih elemenata (FEM) i koristi se za simulaciju ponašanja tla pod različitim vrstama opterećenja, uključujući faznu gradnju, iskope, nasipavanja i druge geotehničke procese (Seequent Limited, 2022a). Rezultati SIGMA/W analize (naprezanja i porni tlakovi) mogu se koristiti kao realniji početni uvjeti u analizi stabilnosti u modulu SLOPE/W (Seequent Limited, 2022a).

SLOPE/W je program iz GeoStudio paketa namijenjen analizi stabilnosti kosina, pokosa i iskopa u tlu i stijeni. Program se temelji na metodi granične ravnoteže (LEM), pri čemu se faktor sigurnosti određuje kao omjer raspoloživih otpornih sila i aktivnih sila koje potiču klizanje . Teren se u pravilu razmatra kroz niz lamela duž potencijalne klizne plohe, a dostupne su razne standardne metode koje se razlikuju u pretpostavkama o međudjelovanju lamela te uvjetima ravnoteže sila i/ili momenata (Seequent Limited, 2022b). Cilj proračuna je pronaći kritičnu kliznu plohu s najmanjim faktorom sigurnosti. U ovom radu primijenjena je metoda Morgenstern-Price, a klizna ploha je zadana kao entry–exit, gdje se pretraživanje potencijalnih ploha provodi između zadanih ulaznih i izlaznih točaka kako bi se pronašla ona s najmanjim faktorom sigurnosti.

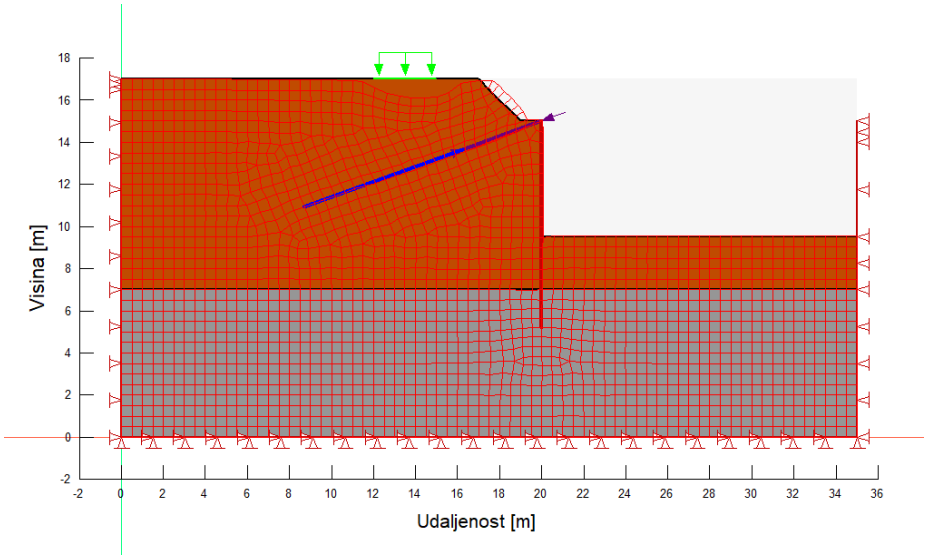
Numeričkim analizama u SIGMA/W i SLOPE/W modeliran je sljedeći program faznih iskopa:

1. Široki iskop na kotu +121,50 m. n. m. i izvedba AB pilota
2. Iskop na kotu +120,50 m. n. m. i izvedba geotehničkih sidara
3. Iskop na kotu +116,10 m. n. m., dno iskopa, presjek A-A (slika 2) i presjek B-B (slika 3)

3.1 Rezultati analize naprezanja i deformacija

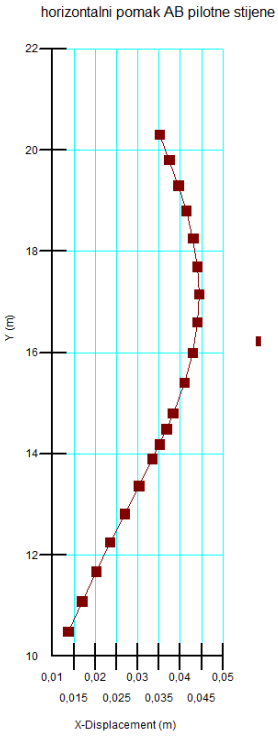


Slika 2. Iskop na kotu +116,10 m. n. m., dno iskopa, presjek A-A

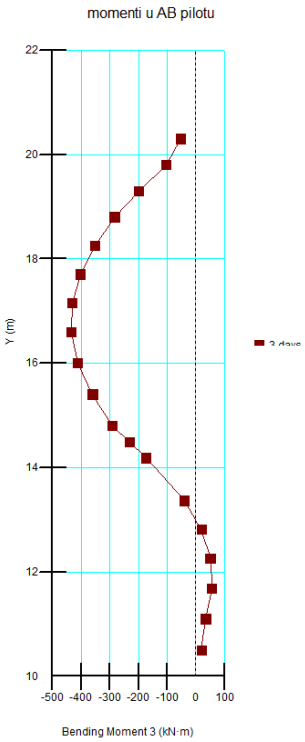


Slika 3. Iskop na kotu +116,10 m. n. m., dno iskopa, presjek B-B

Na temelju rezultata naponsko-deformacijske analize prikazanih slikama 4 i 5 i tablicom 3 za presjek A-A te slikama 6 i 7 i tablicom 4 za presjek B-B dimenzioniraju se elementi sustava zaštite građevinske jame te se uočava da štapna sidra i armiranobetonska pilotna stijena preuzimaju opterećenja od tla i stabiliziraju ga. Utjecaj sidara zamjećuje se u 2. fazi iskopa gdje se maksimalni horizontalni pomak AB pilotne stijene smanjuje u odnosu na horizontalni pomak 1. faze iskopa, što je očekivano za prednapeta sidra. Maksimalni horizontalni pomak AB pilotne stijene u presjeku A-A iznosi 0,0442 metara , dok u presjeku B-B iznosi 0,0707 metara. Obje vrijednosti smatraju se prihvatljivima. Veći horizontalni pomaci pojavljuju se u presjeku B-B gdje se cijeli iskop izvodi u koherentnom tlu manje krutosti. Presjek A-A čine više slojeva materijala različitih svojstava, uključujući sloj pijeska i šljunka veće krutosti, što povoljnije utječe na deformacijsko ponašanje tla i potpornog sustava. Sukladno tome, u presjeku B-B se uz veće horizontalne pomake javljaju veće rezne sile i momenti savijanja u AB pilotnoj stijeni.



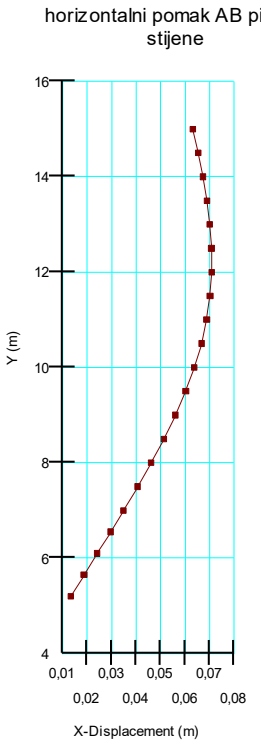
Slika 4. Horizontalni pomak AB pilotne stijene, presjek A-A



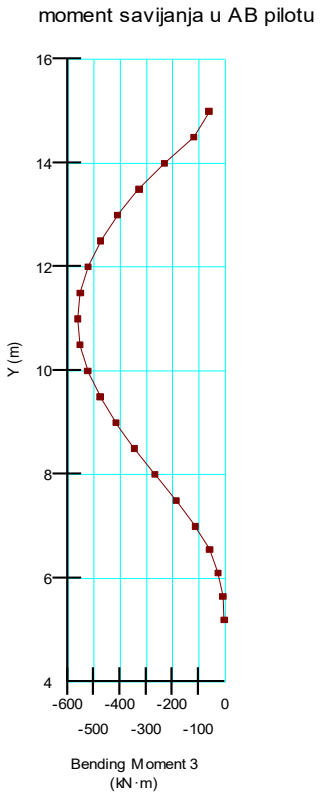
Slika 5. Moment savijanja u AB pilotu, presjek A-A

Tablica 3. Rezultati naponsko-deformacijske analize za presjek A-A

	Oznaka	faza	faza	faza	Mjerna jedinica
Maksimalni horizontalni pomak AB pilotne stijene	u(x)	0,0132	0,0081	0,0442	m
Maksimalni moment savijanja u AB pilotu	M	53,27	179,27	434,29	kNm/m
Maksimalna poprečna sila u AB pilotu	F	23,24	125,49	215,53	kN/m
Maksimalna udzužna sila u AB pilotu	N	-10,59	-43,00	-191,98	kN/m
Maksimalna sila u sidru	Fcs	/	150,00	249,15	kN/m



Slika 6. Horizontalni pomak AB pilotne stijene, presjek B-B



Slika 7. Moment savijanja u AB pilotu, presjek B-B

Tablica 4. Rezultati naponsko-deformacijske analize za presjek B-B

	Oznaka	faza	faza	faza	Mjerna jedinica
Maksimalni horizontalni pomak AB pilotne stijene	u(x)	0,0187	0,0133	0,0707	m
Maksimalni moment savijanja u AB pilotu	M	30,27	201,16	562,85	kNm/m
Maksimalna poprečna sila u AB pilotu	F	23,01	127,22	246,15	kN/m
Maksimalna udzužna sila u AB pilotu	N	-32,17	-40,45	-203,34	kN/m
Maksimalna sila u sidru	Fcs	/	150,00	278,00	kN/m

3.2 Rezultati analize stabilnosti

Na temelju rezultata naponsko-deformacijske analize dimenzionira se pilotna stijena te je proveden proračun stabilnosti iskopa u SLOPE/W.

Definiranje posmične otpornosti pilotne stijene:
Proračunska posmična nosivost elementa je zbroj dvaju doprinosa: doprinosa betona i doprinosa čelične posmične armature (SkyCiv Engineering, 2022).

C 30/37
$f'c = 20$ N/mm²
$\lambda = 1$
$A_p = 282\,743$ mm²
Površina poprečne armature:
$A\varphi = 78{,}53$ mm²
Reznost = 2 ⇒ $A_v = 2 \times 78{,}53 = 157{,}06$ mm²
B500/550
$f_{y,t} = 434{,}78$ N/mm²
Razmak s = 250 mm
Efektivna širina $d = 0{,}8 \times 600 = 480$ mm
Koeficijent redukcije $\varphi = 0{,}75$
Doprinos betona:

$$Vc = 0{,}17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{(f'c)} \cdot Ap \tag{1}$$

$$Vc = 0{,}17 \cdot 1 \cdot \sqrt{20} \cdot 282743 = 214\,959 \text{ N} \approx 214{,}96 \text{ kN} \tag{2}$$

Doprinos armature:

$$Vs,1 = \frac{Av \cdot fy,t \cdot d}{S} \tag{3}$$

$$Vs,1 = \frac{157{,}06 \cdot 434{,}78 \cdot 480}{250} = 131\,110 \text{ N} \approx 131{,}11 \text{ kN} \tag{4}$$

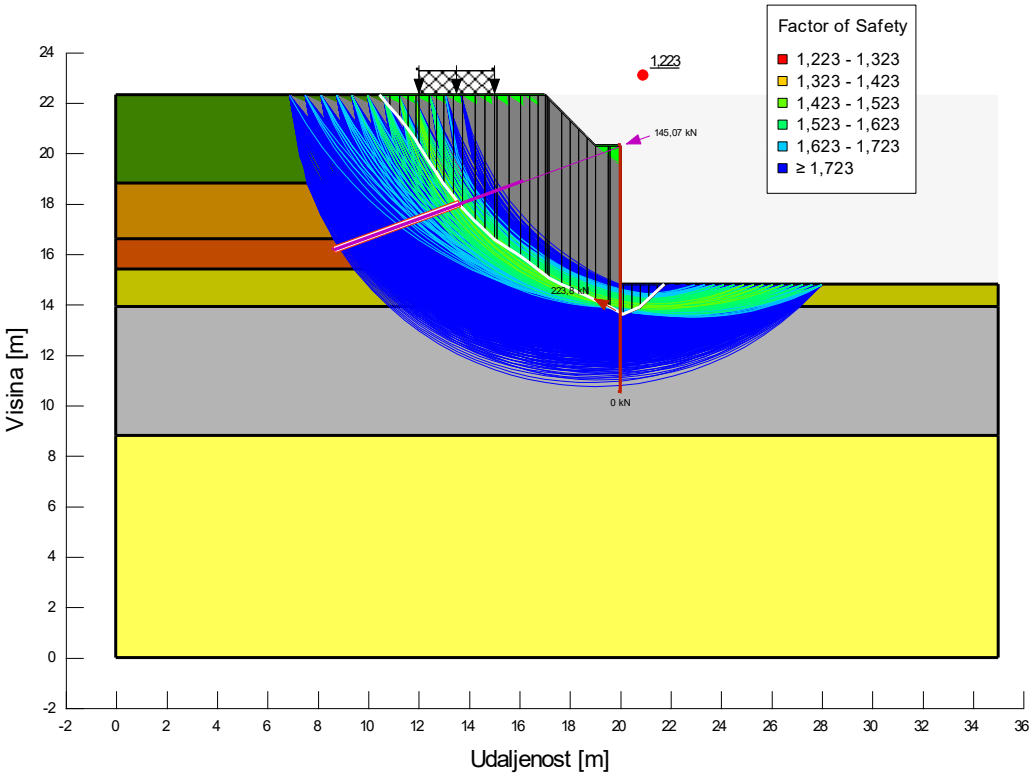
Ili

$$Vs,2 \leq 0{,}066 \cdot \sqrt{(f'c)} \cdot Ap \tag{5}$$

$$Vs,2 = 0{,}066 \cdot \sqrt{20} \cdot 282\,743 = 83\,450 \text{ N} \approx 83{,}45 \text{ kN} \rightarrow \text{mjerodavno} \tag{6}$$

$$\Phi Vn = \varphi \cdot (Vc + Vs) \tag{7}$$

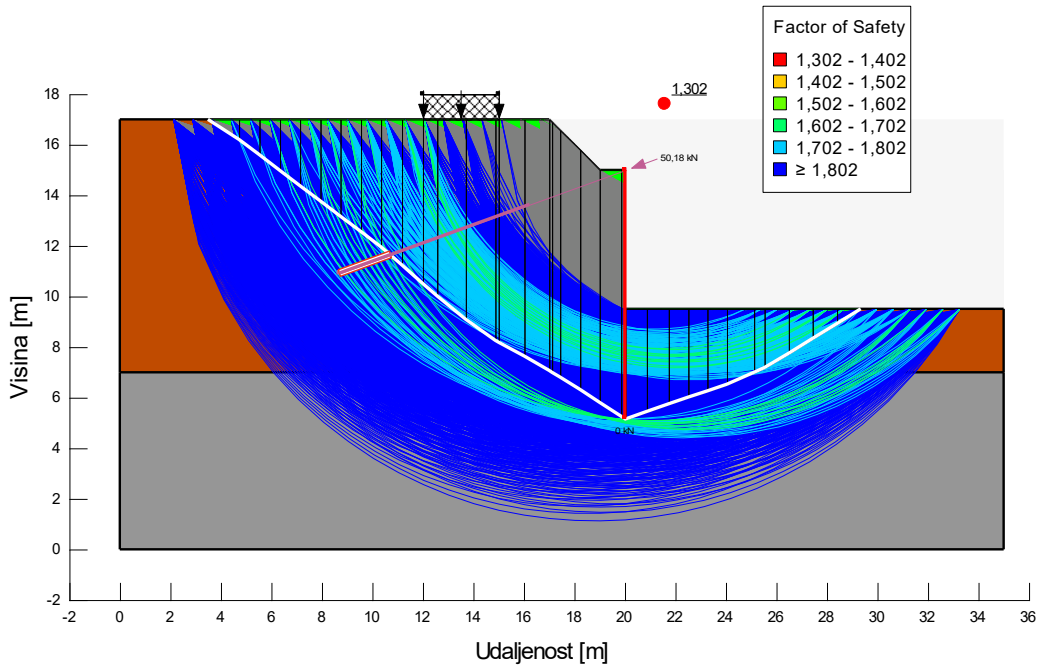
$$\Phi Vn = 0{,}75 \cdot (214{,}96 + 83{,}45) \text{ kN} = 223{,}8 \text{ kN} \rightarrow \text{Posmična otpornost pilotne stijene} \tag{8}$$



Slika 8. Analiza stabilnosti – cijeli iskop, na kotu +116,10 m. n. m., presjek A-A

Tablica 5. Rezultati analize stabilnosti za presjek A-A

		1.faza	2. faza	3. faza	1.faza
Faktor sigurnosti na klizanje po fazama iskopa	Fs	1,162	1,157	1,223	



Slika 9. Analiza stabilnosti – cijeli iskop na kotu +116,10 m. n. m., presjek B-B

Tablica 6. Rezultati analize stabilnosti za presjek B-B

	1.faza	2. faza	3. faza	1.faza
Faktor sigurnosti na klizanje po fazama iskopa	Fs	1,183	1,266	1,302

Rezultati analize stabilnosti za presjek A-A prikazani su slikom 8 i tablicom 5, dok su rezultati za presjek B-B prikazani slikom 9 i tablicom 6. Provedene analize stabilnosti daju zadovoljavajuće rezultate u svim fazama iskopa. Kritične klizne plohe daju faktor sigurnosti FS > 1, što potvrđuje da predviđeni sustav zaštite građevinske jame (armiranobetonska sidrena pilotna stijena) uspješno sprječava slom tla i osigurava stabilnost građevinske jame.

3.3 Program monitoringa

Osnovna svrha provedbe opažanja ponašanja konstrukcije, tla i susjednih objekata jest utvrđivanje stvarnog stanja konstrukcije i tla, kako bi se na temelju rezultata mjerenja pravodobno mogle poduzeti odgovarajuće mjere sanacije ili zaštite. Tehnička promatranja usmjerena su na prikupljanje relevantnih podataka pomoću kojih je moguće registrirati sva stanja i događaje koji bi mogli utjecati na sigurnost objekta i okolnog područja. Program opažanja ponašanja zaštitne konstrukcije, tla i susjednih objekata obuhvaća sljedeće aktivnosti: vizualna opažanja, mjerenje apsolutnih pomaka zaštitne konstrukcije pomoću geodetskih repera te mjerenje nagiba i horizontalnih pomaka zaštitne konstrukcije korištenjem ugrađenih inklinometara.

Geodetska i inklinometarska opažanja provode se tijekom iskopa građevne jame i izvođenja građevine unutar jame, pri čemu se dinamika mjerenja usklađuje s fazama izvođenja radova te se opažanja obvezno provode nakon završetka pojedinih faza iskopa. Ako rezultati monitoringa pokažu odstupanja od očekivanog ponašanja sustava tlo–konstrukcija, potrebno je pojačati učestalost mjerenja te, prema procjeni stručne osobe, pravodobno prilagoditi dinamiku radova i primijeniti odgovarajuće mjere zaštite.

4 Zaključak

Okolnosti lokacije, geometrija jame i zahtjev za sigurnim izvođenjem podzemnih etaža uvjetovali su primjenu privremene potporne konstrukcije koja osigurava stabilnost okolnog tla i susjednih objekata tijekom gradnje. Podatci dobiveni geotehničkim istražnim radovima i laboratorijskim pokusima omogućili su pouzdanu karakterizaciju uslojenosti i mehaničkog ponašanja tla potrebnu za numeričko modeliranje. Numeričke analize provedene su u GeoStudio paketu: geostatičke analize naprezanja i deformacija u SIGMA/W, a provjera globalne stabilnosti u SLOPE/W metodom granične ravnoteže (Morgenstern-Price), uz definiranje kliznih ploha tipa “entry and exit”. Izračunati faktori sigurnosti nakon iskopa iznose približno 1,25 u presjeku A-A i 1,30 u presjeku B-B, što potvrđuje stabilnost sustava u promatranim fazama. Maksimalni horizontalni pomaci pilotne stijene su reda veličine 4–7 cm (veći u presjeku B-B), a sile u konstrukcijskim elementima uzete su kao mjerodavne za dimenzioniranje sustava. Time su ispunjeni uvjeti nosivosti i uporabivosti. Nužna je dosljedna provedba programa opažanja tijekom svih faza iskopa, kako bi se na vrijeme uočila odstupanja i po potrebi prilagodila tehnologija i faze radova. Zaključno, u promatranim uvjetima provedeni proračuni potvrđuju da je odabrano rješenje sidrene armiranobetonske pilotne stijene prikladno zbog dovoljne krutosti sustava, ograničavanja horizontalnih pomaka tla tijekom faznog iskopa i osiguravanja sigurnog izvođenja podzemnih etaža.

Zahvala

Zahvala tvrtki Grasa d.o.o. na ustupljenoj projektnoj dokumentaciji.

Literatura

Clough, G.W. i O'Rourke, T.D. (1990) Construction induced movements of in situ walls, u: Lambe, P.C. i Hansen, L.A. (ur.), Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE, Geotechnical Special Publication No. 25, str. 439–470.

Harabinova, S., Kotrasova, K. i Panulinova, E. (2026) Comparison of Limit Equilibrium and Finite Element Method for Slope Stability Analysis, Buildings, 16(3), 577.

Mešić com d.o.o. (2025) MEŠIĆ COM – Gradnja i prodaja stanova – Zagreb. Dostupno na: https://www.mesic-com.hr/ (Preuzeto: 23. veljače 2026).

Moormann, C. (2004) 'Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database', Soils and Foundations, 44(1), str. 87–98.

Puljak S, Orehovec I. Geotehnički elaborat: geotehnički istražni radovi – stambeno-poslovna građevina, Prilaz baruna Filipovića, k.č. 3159/3, k.o. Črnomerec, Zagreb. Zagreb: ING-JET d.o.o.; 2021 velj. Izvješće br.: 004-2021.

Seequent Limited (2022a) Stress-Strain Modeling with GeoStudio. Dostupno na: https://files.seequent.com/GeoStudio/Manuals/Stress-Strain%20Modeling.pdf (Preuzeto: 24. veljače 2026).

Seequent Limited (2022b) Stability Modeling with GeoStudio. Dostupno na: https://files.seequent.com/GeoStudio/Manuals/Slope%20Stability%20Modeling.pdf (Preuzeto: 24. veljače 2026).

SkyCiv Engineering (2022) ACI 318 Concrete Pile Design. Dostupno na: https://skyciv.com/docs/skyciv-foundation/piles/aci-318-concrete-pile-design/ (Preuzeto: 23. veljače 2026)

Vujić, I. (2025) Projekt zaštite iskopa građevinske jame na Črnomercu, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb.