

# Varijantna rješenja osiguranja građevne jame

---

**Rukavina, Barbara**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:515178>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Barbara Rukavina**

**Varijantna rješenja osiguranja građevne jame**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij građevinarstva  
Smjer: Geotehnika  
Podzemne građevine i tuneli**

**Barbara Rukavina  
JMBAG: 0114029403**

**Varijantna rješenja osiguranja građevne jame**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

## ZAHVALA

*Na samom početku ovog rada želim zahvaliti mentorici izv. prof. dr. sc. Sanji Dugonjić Jovančević i komentoru dr. sc. Mirku Grošiću na prenesenom znanju, savjetima i uloženom vremenu tijekom izrade diplomskog rada.*

*Također se želim zahvaliti tvrtki Geotech d.o.o. na ovom iskustvu i na ustupljenoj projektnoj dokumentaciji kao i svim djelatnicima koji su mi uljepšali svaki radni dan proveden s njima tijekom pisanja rada. Osobito se zahvaljujem Marku Šperandi i Dori Belošević na stručnim savjetima.*

*Zahvaljujem se mojim prijateljima i kolegama uz koje mi je diplomski studij ostao u sjećanju kao najljepši period života.*

*Posebno se zahvaljujem mojim roditeljima i mom Marijanu na neizmjernej podršci tijekom cijelog perioda studiranja. Hvala mojoj cijeloj obitelji koja je svaki položeni i nepoloženi ispit proživljavala na jednak način kao ja i uvijek bila potpora u svemu.*



## IZJAVA

Diplomski rad sam izradila samostalno, u suradnji s mentoricom izv. prof. dr. sc. Sanjom Dugonjić Jovančević i komentorom dr. sc. Mirkom Grošićem i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Barbara Rukavina

U Rijeci, 4. rujna 2023.

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta Unaprjeđenje modela stjecanja stručnih kompetencija učenjem uz rad kroz izradu diplomskog rada (GraDiS)

Voditeljica projekta – izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Šifra projekta – A3-21-6

Financijer projekta – Sveučilište u Rijeci – programska linija UNIRI CLASS A3

Pravna nadležnost – Sveučilište u Rijeci

U Rijeci, 30.08.2023.

Mentor

---

Komentor

---

# Varijantna rješenja osiguranja građevne jame

## Sažetak

Izbor zaštite građevne jame od izuzetne je važnosti kako bi se osigurala sigurnost radnika, susjednih objekata i okoline tijekom izgradnje. Ovisno o specifičnim uvjetima gradilišta, geološkim uvjetima podloge, dubini jame i obližnjoj infrastrukturi, odabir pravilne metode zaštite građevne jame može biti ključan. Prilikom odabira metode zaštite građevne jame, potrebno je uzeti u obzir geotehničke karakteristike tla, dubinu jame, uvjete okoline, zahtjeve projekta, pravne i sigurnosne aspekte te ekonomsku izvedivost. Obično se provode konkretne analize kako bi se odabrala najprikladnija metoda zaštite jame za određeni projekt. Diplomski rad daje uvid u nekoliko varijantnih rješenja osiguranja građevne jame za koje je napravljen proračun temeljen na numeričkoj analizi, odnosno metodi konačnih elemenata. Varijantna rješenja čine čelične talpe, pilotska stijena i armiranobetonska dijafragma. Za sva su varijantna rješenja kreirani modeli u programskom paketu PLAXIS 2D, provedene analize naprezanja i deformacija i analize stabilnosti.

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

# Various solutions for excavation pit stabilization

## Abstract

The selection of excavation support for a construction pit is of utmost importance to ensure the safety of workers, adjacent structures and the environment during construction. Depending on the specific construction site conditions, geological substrate conditions, pit depth, and nearby infrastructure, choosing the appropriate method of excavation support can be crucial. When selecting the excavation support method, geotechnical characteristics of the soil, pit depth, environmental conditions, project requirements, legal and safety aspects, as well as economic feasibility, need to be taken into account. Typically, detailed analyses are conducted to determine the most suitable excavation support method for a given project. This thesis provides insight into several solutions for securing the excavation pit, for which numerical analysis based on the finite element method has been performed. The alternative solutions include steel sheet piles, pile walls and reinforced concrete diaphragm walls. Models were created for all alternative solutions using the PLAXIS 2D software, and analyses of stresses, deformations, and stability were conducted.

**Keywords:** excavation pit, numerical modelling, finite element method, steel sheet piles, pile wall, diaphragm walls, PLAXIS 2D

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	PODZEMNA GRADNJA I GRAĐEVNE JAME U TLU.....	3
2.1.	Općenito o podzemnoj gradnji i vrste podzemnih građevina.....	3
2.2.	Općenito o građevnim jamama .....	5
2.3.	Metode iskopa građevne jame.....	7
2.4.	Metode osiguranja građevnih jama.....	9
2.4.1.	Čelične talpe .....	10
2.4.2.	Pilotske stijene.....	11
2.4.3.	Armiranobetonske dijafragme.....	13
2.4.4.	Štapna i geotehnička sidra .....	14
2.4.5.	Razupore.....	16
2.4.6.	Top – down metoda .....	17
2.5.	Regulacija vode u građevnoj jami .....	18
3.	REGULATIVA I METODE PRORAČUNA.....	21
3.1.	Eurokod 7 .....	21
3.2.	Metoda konačnih elemenata .....	25
3.3.	PLAXIS 2D.....	26
4.	PROJEKTIRANJE NOVE GRADSKO KNJIŽNICE PAROMLIN U ZAGREBU .....	28
4.1.	Povijesni značaj.....	28
4.2.	Projekt nove knjižnice Paromlin .....	30
4.3.	Geotehničke značajke lokacije.....	33
4.3.1.	Opis lokacije .....	33
4.3.2.	Opis istraživačkih radova.....	35
4.3.3.	Geološke i geotehničke značajke lokacije .....	37
4.3.4.	Laboratorijska ispitivanja .....	40
4.3.5.	Podzemna voda.....	41
4.3.6.	Geotehnička kategorija .....	41
4.4.	Prijedlog osiguranja građevne jame .....	42
5.	PRORAČUNSKI MODELI I PRORAČUN .....	43
5.1.	Geotehnički model.....	44
5.2.	Karakteristične i proračunske vrijednosti parametara.....	45
5.2.1.	Proračun graničnog stanja uporabljivosti .....	45
5.2.2.	Proračun graničnog stanja nosivosti.....	49
5.3.	Faze izvedbe .....	51
5.4.	Pregled provedenih proračuna .....	52

5.5.	Proračun građevne jame – Tip 1.....	55
5.5.1.	Tip 1-1.....	55
5.5.2.	Tip 1-2.....	56
5.5.3.	Tip 1-3.....	57
5.6.	Proračun građevne jame – Tip 2.....	57
5.6.1.	Tip 2-1.....	57
5.6.2.	Tip 2-2.....	58
5.6.3.	Tip 2-3.....	58
5.7.	Proračun građevne jame – Tip 3.....	59
5.7.1.	Tip 3-1.....	59
6.	REZULTATI I USPOREDBA REZULTATA.....	60
6.1.	Rezultati proračuna – Tip 1.....	60
6.1.1.	Tip 1-1.....	60
6.1.2.	Tip 1-2.....	65
6.1.3.	Tip 1-3.....	69
6.2.	Rezultati proračuna – Tip 2.....	74
6.2.1.	Tip 2-1.....	74
6.2.2.	Tip 2-2.....	78
6.2.3.	Tip 2-3.....	83
6.3.	Rezultati proračuna – Tip 3.....	87
6.3.1.	Tip 3-1.....	87
6.4.	Usporedba rezultata.....	92
6.5.	Odabir projektnog rješenja.....	95
7.	DISKUSIJA I ZAKLJUČAK.....	97
	LITERATURA.....	99

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Podjela podzemnih građevina s obzirom na namjenu [1]	4
Tablica 2: Podjela podzemnih građevina s obzirom na zahtijevanu sigurnost [1]	4
Tablica 3: Rubni uvjeti i uvjeti izvođenja građevne jame [5]	6
Tablica 4: Uvjeti rada i metode izvođenja građevnih jama [8]	7
Tablica 5: Parcijalni faktori za djelovanja i učinke djelovanja prema projektnom pristupu 3 [9]	24
Tablica 6: Parcijalni faktori za parametre tla i stijena prema projektnom pristupu 3 [9]	24
Tablica 7: Geotehničke jedinice [33]	37
Tablica 8: Parametri tla dobiveni laboratorijskim ispitivanjem [34]	40
Tablica 9: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-1 [33]	46
Tablica 10: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-2 [33]	46
Tablica 11: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-4 [33]	47
Tablica 12: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-5 [33]	47
Tablica 13: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-6 [33]	48
Tablica 14: Karakteristične vrijednosti kuta trenja i kohezije u geotehničkom modelu	48
Tablica 15: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-1 [33]	49
Tablica 16: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-2 [33]	49
Tablica 17: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-4 [33]	49
Tablica 18: „Redukcija vrijednosti parametara za GJ-5 [33]	49
Tablica 19: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-6 [33]	50
Tablica 20: Proračunske vrijednosti kuta trenja i kohezije u geotehničkom modelu	50
Tablica 21: Pregled i opis varijantnih rješenja	52
Tablica 22: Parametri geotehničkog kabelskog sidra - slobodna dionica [33]	53
Tablica 23: Parametri geotehničkog kabelskog sidra - sidrišna dionica [33]	54
Tablica 24: Specifikacije Larssen čeličnih talpi [35]	55
Tablica 25: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 43 (Tip 1-1)	56
Tablica 26: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 430 (Tip 1-2)	56
Tablica 27: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 605 (Tip 1-3)	57
Tablica 28: Vrijednosti parametara pilotske stijene promjera $\varphi 800$ (Tip 2-1, Tip 2-2)	58
Tablica 29: Vrijednosti parametara pilotske stijene promjera $\varphi 600$ (Tip 2-3)	59
Tablica 30: Vrijednosti parametara AB dijafragme (Tip 3-1)	59
Tablica 31: Usporedba rezultata provedenih analiza stabilnosti (Fs)	92
Tablica 32: Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija ( $\Sigma Pux$ )	93
Tablica 33: Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSU (Mmin i Mmax)	94
Tablica 34: Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSN (Mmin i Mmax)	95

## POPIS SLIKA

Slika 1: Presjek podzemne garaže [3]	4
Slika 2: Duboka građevna jama [6]	5
Slika 3: Plitka građevna jama [10]	9
Slika 4: Presjek Larssen čeličnih talpi [14]	10
Slika 5: Redoslijed ugradnje čeličnih talpi u tlo [11]	11
Slika 6: Pilotska stijena [15]	12
Slika 7: Tlocrt tangentne pilotske stijene (gore) i sekantne pilotske stijene (dolje) [11]	12
Slika 8: Armiranobetonska dijafragma [16]	13
Slika 9: Faze izvedbe armiranobetonske dijafragme [11]	14
Slika 10: Geotehničko sidro od čelične užadi [9]	15
Slika 11: Dijagonalno postavljene razupore [17]	16
Slika 12: Redoslijed izgradnje top - down metodom [18]	17
Slika 13: Osiguranje građevne jame top - down metodom [18]	18
Slika 14: Načini postavljanja crpki u odnosu na građevnu jamu [9]	19
Slika 15: Snižavanje podzemne vode izvedbom bunara izvan građevne jame [9]	20
Slika 16: Osiguranje odvodnje oborinske vode [9]	20
Slika 17: Oblici globalnog sloma tla i kliznih ploha [11]	24
Slika 18: Generiranje mreže konačnih elemenata u softveru PLAXIS 2D	27
Slika 19: Postojeće stanje konstrukcije Paromlina [30]	29
Slika 20: Tlocrt Paromlina u postojećem stanju [30]	30
Slika 21: Projektirani izgled nove Gradske knjižnice Paromlin [32]	31
Slika 22: 3D model nove Gradske knjižnice Paromlin [32]	31
Slika 23: Projektirani izgled nove Gradske knjižnice Paromlin - uklapanje s postojećom zgradom [32]	32
Slika 24: Presjek nove Gradske knjižnice Paromlin kroz sve nadzemne i podzemne etaže [32]	32
Slika 25: Tlocrt garaže nove Gradske knjižnice Paromlin [32]	33
Slika 26: Prikaz šireg područja centra grada Zagreba s označenom istraživanom lokacijom [33]	34
Slika 27: Pogled iz zraka na postojeće objekte i parkiralište kompleksa Paromlin [33]	34
Slika 28: Položaji izvedenih sondažnih jama i istraživačkih bušotina (crveno) – tlocrt [34]	36
Slika 29: Položaji izvedenih sondažnih jama i istraživačkih bušotina (crveno) – presjek [34]	36
Slika 30: Isječak iz Osnovne geološke karte (OGK) s označenom predmetnom lokacijom [33]	37
Slika 31: Log bušotine - prikaz nabačaja (crveno) i krute gline (plavo) [34]	38



Slika 32: Log bušotine - prikaz pijeska [34]	38
Slika 33: Log bušotine - prikaz šljunka [34]	39
Slika 34: Log bušotine - prikaz gornjeg horizonta tvrde gline [34]	39
Slika 35: Log bušotine - prikaz donjeg horizonta tvrde gline [34]	40
Slika 36: Situacija građevne jame s označenim mjerodavnim poprečnim presjekom 8-8'	43
Slika 37: Geotehnički profil u presjeku 8-8'	45
Slika 38: Mjerodavan poprečni presjek 8-8'	51
Slika 39: Proračunski model u softveru PLAXIS 2D	53
Slika 40: Čelične talpe Larssen 43 [35]	55
Slika 41: Čelične talpe Larssen 430 [35]	56
Slika 42: Čelične talpe Larssen 605 [35]	57
Slika 43: Ukupni pomaci modela za Tip 1-1	61
Slika 44: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-1	61
Slika 45: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-1	62
Slika 46: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSU)	62
Slika 47: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSU)	63
Slika 48: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSN)	63
Slika 49: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSN)	64
Slika 50: Klizna ploha dobivena za Tip 1-1	64
Slika 51: Ukupni pomaci modela za Tip 1-2	65
Slika 52: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-2	66
Slika 53: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-2	66
Slika 54: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSU)	67
Slika 55: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSU)	67
Slika 56: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSN)	68
Slika 57: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSN)	68
Slika 58: Klizna ploha dobivena za Tip 1-2	69
Slika 59: Ukupni pomaci modela za Tip 1-3	70
Slika 60: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-3	70
Slika 61: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-3	71
Slika 62: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSU)	71
Slika 63: Poprečne sile u čeličnim talpama varijantnog rješenja 3 (GSU)	72
Slika 64: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSN)	72
Slika 65: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSN)	73
Slika 66: Klizna ploha dobivena za Tip 1-3	73
Slika 67: Ukupni pomaci modela za Tip 2-1	74

Slika 68: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-1	75
Slika 69: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-1	75
Slika 70: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSU)	76
Slika 71: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSU)	76
Slika 72: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSN)	77
Slika 73: Poprečne sile pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSN)	77
Slika 74: Klizna ploha dobivena za Tip 2-1	78
Slika 75: Ukupni pomaci modela za Tip 2-2	79
Slika 76: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-2	79
Slika 77: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-2	80
Slika 78: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)	80
Slika 79: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)	81
Slika 80: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)	81
Slika 81: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)	82
Slika 82: Klizna ploha dobivena za Tip 2-2	82
Slika 83: Ukupni pomaci modela za Tip 2-3	83
Slika 84: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-3	84
Slika 85: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-3	84
Slika 86: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSU)	85
Slika 87: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSU)	85
Slika 88: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSN)	86
Slika 89: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSN)	86
Slika 90: Klizna ploha dobivena za Tip 2-3	87
Slika 91: Ukupni pomaci modela za Tip 3-1	88
Slika 92: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 3-1	88
Slika 93: Ukupni pomaci AB dijafragme u x smjeru za Tip 3-1	89
Slika 94: Momenti savijanja u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSU)	89
Slika 95: Poprečne sile u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSU)	90
Slika 96: Momenti savijanja u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSN)	90
Slika 97: Poprečne sile u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSN)	91
Slika 98: Klizna ploha dobivena za Tip 3-1	91

## 1. UVOD

Ideja o podzemnoj gradnji je čovjeku poznata još od prapovijesti, počevši od prvih tunela za navodnjavanje u Babilonu i tunela za akvadukte u Rimu, preko rudnika ugljena u Egiptu pa sve do rudnika soli u Austriji. U novije doba, razvoj industrije i prometa doprinijeli su razvoju podzemne gradnje koja dobiva svoju višestruku primjenu, što potvrđuju i mnogobrojne podzemne željeznice, tuneli, ali i javni prostori [1] [2].

Nadzemna suvremena gradnja je u proteklih nekoliko desetljeća doživjela svoj vrhunac, posebice u urbanim sredinama i velikim gradovima. Razlog tome stoji u širenju gradova i sve većom potrebom za dodatnim prostorom, što ide u korak s razvojem i napredovanjem tehnologije. Iz tog razloga, sve se više počinje iskorištavati podzemni prostor za izgradnju, pa se u današnje vrijeme može gotovo poistovjetiti s izgradnjom nad zemljom. Gotovo sve što je moguće izgraditi nad zemljom, čovjek je uspio izgraditi i pod zemljom, poput građevina društvenog i komercijalnog sadržaja, parkirališta, muzeja, crkvi, olimpijskih dvorana, i sveučilišta. Može se reći da je razvoj podzemne gradnje u gradovima postao simbol modernog [1].

Za podzemnu izgradnju nekih od spomenutih građevina ili građevina za koju su predviđene podzemne etaže, neophodna je izgradnja građevne jame. One su važan element u gradnji koji omogućuje izgradnju konstrukcije ispod površine terena na siguran način, ukoliko je sama građevna jama izvedena na pravilan način uz ispravno osiguranje njezinog pokosa [1]. U gusto naseljenim sredinama i gradskim jezgrama izgradnja potpornih građevina za osiguranje građevnih jama dolazi do punog izražaja, posebice uz prisustvo raznolike tehnologije, metoda podupiranja i ideja pojedinog projektanta, ali i izvođača [6]. Upravo iz tog razloga, projektiranje građevne jame predstavlja veliki izazov u građevinarstvu te nosi za sobom rizik pri izvođenju [1].

U ovom radu prikazati će se nekoliko varijantnih rješenja zaštite građevne jame pomoću najčešće korištenih konstrukcija poput dijafragme, pilotske stijene i čeličnih talpi. U prvom dijelu rada (Poglavlje 2) biti će riječi općenito o podzemnoj gradnji i građevnim jamama te će se поближе pojasniti načini zaštite pokosa građevne jame i

regulacije odvodnje. U nastavku (Poglavlje 3) su opisane metode proračuna za privremenu građevnu jamu korištenjem metode konačnih elemenata i softvera PLAXIS, uz neizostavne projektne pristupe, geotehničke kategorije i granična stanja. Poglavlje 4 opisuje predmetni projekt izgradnje građevne jame za izgradnju podzemnih etaža nove knjižnice u Zagrebu te su u njemu sadržane sve geotehničke i geološke značajke lokacije, odnosno parametri tla utvrđeni istražnim radovima. Projektne vrijednosti parametara korištene za proračun kao i sam proračun pomoću softvera PLAXIS 2D prikazani su u Poglavlju 5. Numeričkom 2D analizom dobivena su rješenja za svaku pojedinu varijantu. Poglavlje 6 daje usporedbu rezultata i odabir najpovoljnije mjere zaštite uz obrazloženje. Za kraj, u Poglavlju 7 je prikazano odabrano varijantno rješenje kao najprihvatljivija mjera zaštite i uvjeti izvedbe.

## 2. PODZEMNA GRADNJA I GRAĐEVNE JAME U TLU

### 2.1. Općenito o podzemnoj gradnji i vrste podzemnih građevina

Podzemna gradnja je proces gradnje infrastrukture i objekata ispod zemljine površine. Ova vrsta gradnje može biti korisna za razne svrhe, posebice za objekte javne primjene. Sve se više velikih svjetskih gradova okreće podzemnoj izgradnji javnih objekata uz politiku boljeg planiranja. Osim nedostatka prostora, argumenti za podzemnu gradnju mogu biti i očuvanje okoliša i poboljšanje kvalitete života. S ekonomskog aspekta, podzemna gradnja je poželjna u slučajevima povećanja cijena zemljišta uslijed urbanizacije i rasta populacije. Uz to, prednost je svakako i manja količina poslova održavanja u podzemlju, ušteda energije te duži vijek korištenja podzemnih konstrukcija. Ono što značajno može utjecati na podzemnu gradnju je cijena same izgradnje koja može biti i do 50% skuplja u podzemlju, a ono što najvećim dijelom utječe na spomenutu cijenu i troškove izgradnje su geološki i geotehnički uvjeti na lokaciji prema kojima je potrebno izvesti istražne radove, geotehničke modele, a naposljetku i monitoring. Što se okolišnih uvjeta tiče, podzemnom izgradnjom se potiče nastanak i širenje zelenih površina u gradovima te smanjenje buke [1].

Iako podzemna gradnja ima niz prednosti, vrlo je zahtjevna za izvedbu zbog karakteristika materijala, opterećenja i sigurnosti. U nadzemnoj gradnji, kvaliteta materijala je kontrolirana testiranjem proizvoda ili kontrola kvalitete, dok je u podzemnoj gradnji materijal promjenjiv u svakoj točki i parametri nisu poznati u potpunosti. Slično se događa i s opterećenjem koje je u nadzemnoj gradnji poznato i na kojeg je konstrukcija dimenzionirana, dok su u podzemnoj gradnji opterećenja uglavnom pretpostavljena. Iz sigurnosnog aspekta, u nadzemnoj je gradnji jednostavnije odrediti pouzdanost konstrukcije i faktor sigurnosti nego u podzemnoj gradnji [2].

Kada se općenito govori o podzemnoj gradnji, razlikuju se dvije kategorije podzemnih objekata: podzemne građevine i tuneli. Tuneli se definiraju kao linijski objekti sa značajno većom duljinom od njihove širine i visine. Podzemne građevine su sve ostale građevine takvog tipa bez značajnih razlika u dimenzijama. U nastavku su u Tablicama

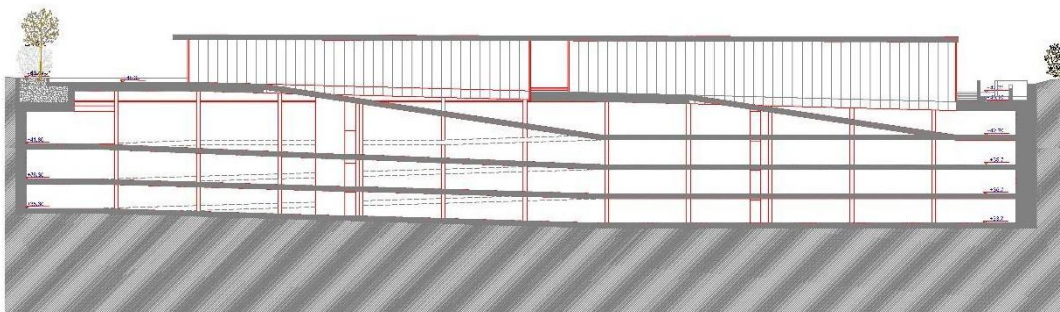
1 i 2 prikazane podjele podzemnih građevina s obzirom na namjenu i zahtijevanu sigurnost [1]. Na Slici 1 prikazana je podzemna garaža kao jedna od najprisutnijih zahtijevanih podzemnih građevina u današnjem vremenu.

Tablica 1: Podjela podzemnih građevina s obzirom na namjenu [1]

Podjela podzemnih građevina s obzirom na namjenu	
1	Podzemne građevine za skladištenje radioaktivnog otpada
2	Skloništa, skladišta, garaže, sportski i kulturni sadržaji itd.
3	Električne strojarnice
4	Podzemne građevine za skladištenje plina i tekućina

Tablica 2: Podjela podzemnih građevina s obzirom na zahtijevanu sigurnost [1]

Podjela podzemnih građevina s obzirom na zahtijevanu sigurnost	
A	Privremeni rudarski otvori
B	Vertikalna okna
C	Stalne rudarske prostorije, hidrotehnički tuneli, pilot tuneli, tuneli kod razrade profila za veće iskope
D	Skladišta, postrojenja za tretman vode, manje značajni cestovni i željeznički tuneli, prilazni tuneli itd.
E	Skladišta nafte, strojarnice, glavni cestovni i željeznički tuneli, skloništa, portali, raskrižja
F	Podzemne nuklearne centrale, željezničke postaje, sportski i javni objekti, tvornice i sl.



Slika 1: Presjek podzemne garaže [3]

Svaki od navedenih oblika podzemnih građevina za sobom nosi zasebne rizike i uvjete izgradnje. Međutim, mogu se izdvojiti i neki zajednički rizici podzemne gradnje pa se tako mogu istaknuti uvjeti u tlu, režim podzemne vode i promjena režima, onečišćenje na velikim dubinama te povećanje troškova [1].

## 2.2. Općenito o građevnim jamama

Građevna jama (Slika 2) je prostor potreban za izvedbu temelja, dijela podzemne građevine ili cijele građevine koji mora biti siguran za rad i pristupačan ljudima i strojevima [4]. Kao privremena konstrukcija za izgradnju podzemne građevine, ona mora omogućiti rad u suhom i rad na siguran način, što nas vodi do dva osnovna izazova pri projektiranju građevnih jama, a to su stabilizacija stijenskih pokosa i pitanje odvodnje. Za izvođenje podzemnih etaža neophodna je izvedba građevne jame, no kako bi se bilo koja konstrukcija izvela na siguran i pravilan način, postoji niz preduvjeta i međukoraka koje je potrebno ispuniti i poštivati tijekom cijele gradnje. Pritom valja naglasiti adekvatno osiguranje pokosa građevne jame od aktivnog pritiska tla, pritiska vode, susjednih građevina i prometnog i drugog pokretnog opterećenja [5].



Slika 2: Duboka građevna jama [6]

S inženjerskog pogleda, izgradnja građevne jame predstavlja veliki graditeljski izazov, ali i rizik, posebice ako je riječ o izgradnji neposredno uz postojeće građevine i komunalne infrastrukture, što nije rijedak slučaj u urbanim sredinama [5]. Ukoliko se

tome pridoda i činjenica da su postojeće građevine stariji objekti povijesnog značaja, faktor rizika je još veći [7]. Neposredna izgradnja uz postojeći objekt može izazvati oštećenja na istom, ometati njegovo normalno funkcioniranje ili dovesti do većih problema. Dodatnu pažnju prilikom izgradnje treba posvetiti ukoliko neki dio ili svi dijelovi građevne jame ostaju trajni dio buduće građevine u podzemlju, što je čest slučaj s obzirom na sve zahtjevnije uvjete građenja [8].

Tijekom izvođenja i projektiranja građevne jame potrebno je uzeti u obzir kompleksne rubne uvjete i uvjete izvođenja, a neki od najčešćih su dani u Tablici 3 [5].

*Tablica 3: Rubni uvjeti i uvjeti izvođenja građevne jame [5]*

<b>Rubni uvjeti i uvjeti izvođenja</b>	
1	Vrsta tla
2	Razina podzemne vode
3	Granica čestice
4	Postojeće zgrade
5	Podzemne i nadzemne djelatnosti
6	Prometna infrastruktura
7	Različita dubina iskopa

Iz svih rubnih uvjeta pojedine građevne jame proizlaze i mnogobrojni zahtjevi koje građevna jama, pored minimalnog utjecaja na postojeće građevine, mora ispuniti. Neki od najvažnijih zahtjeva su: nesmetano izvođenje radnji koje su prethodile izgradnji građevne jame u njenoj neposrednoj blizini, optimalno korištenje tlocrtnih granica, uklapanje temelja u cjelokupnu građevinu, minimalni otklon za plitke i duboke iskope, sukladnost sa zahtjevima zaštite okoliša, efikasna izgradnja uz optimalno korištenje materijala te briga o zbrinjavanju otpada i monitoring, uz ostale individualne zahtjeve koje pojedina građevna jama ima [5].

Kako bi se građevna jama izvela na suh i siguran način, u većini slučajeva će se upotrijebiti jedna ili kombinacija dviju ili više metoda zaštite građevne jame: izvedba potporne konstrukcije, dodatno horizontalno ojačanje, brtvljene dna, zaštita od uzgona, zaštita postojećih objekata [8]. Prije izvedbe građevne jame s nekom od



metodom zaštite neophodno je provjeriti uvjete u kojima bi se ona izvela. Ako se utvrdi više nepovoljnih uvjeta poput velike dubine iskopa, visoke razine podzemne vode, tla male čvrstoće i prisustvo susjednih građevina, građevna jama se smatra geotehničkom građevinom za koju nužno izraditi projekt. Projekt je u pravilu strukturiran u dva dijela: osiguranje građevne jame od urušavanja okolnog tla ili stijene i zaštita od podzemne i oborinske vode [9]. U nastavku rada su prikazane metode iskopa i najčešći načini osiguranja građevne jame te regulacija vode.

### 2.3. Metode iskopa građevne jame

Metode iskopa građevne jame u današnje vrijeme idu u korak s napretkom tehnologije pa se može reći da su metode zaista nebrojive. Prema Nonveilleru (1979.), sve moguće načine izgradnje građevnih jama nije moguće opisati [9]. Ipak, iznio je osnovne uvjete rada i metode izvođenja kao glavne smjernice za sve dosadašnje projekte, prikazane u Tablici 4.

Tablica 4: Uvjeti rada i metode izvođenja građevnih jama [8]

Položaj vode	Vrsta tla	Uvjeti rada		Način odvodnje
		Neograničeni	Ograničeni	
Razina vode ispod temeljne plohe	koherentno	iskop bez ograničenja	uspravne stijenske iskopa	crpljenje kišnice iz jame
	bilo koje	iskop s privremeno stabilnim pokosom	podgrada i/ili zagatna stijenka	crpljenje kišnice iz jame
Plitko ispod površine tla	koherentno, šljunak	iskop s privremeno stabilnim pokosom uz moguće strujanje niz kosinu	podgrada i/ili zagatna stijenka	crpljenje kišnice i procjedne vode iz jame
	pijesak	iskop s privremeno stabilnim pokosom	podgrada i/ili zagatna stijenka	crpljenje iz bunara u ili oko jame
			podgrada i/ili zagatna stijenka (koje sprječavaju hidraulički slom tla)	crpljenje iz jame
			podgrada i/ili zagatna stijenka (uz iskop pod vodom)	
			smrzavanje	

U širem pogledu, odabir optimalne metode iskopa građevne jame ovisi o brojnim čimbenicima i utjecajima na terenu. Primarni čimbenik je zasigurno osobina materijala tla u kojem se gradi, zatim razina podzemne vode u tlu i njezin odnos prema planiranome dnu građevne jame, sama dubina građenja, a potom i rubni uvjeti, odnosno geometrija i dubina temeljenja svih susjednih građevina te položaj postojeće prometne i komunalne infrastrukture. Uz sve navedeno, potrebno je voditi brigu i o hidrološkim i hidrauličkim uvjetima na lokaciji te o dostupnosti metode izvedbe sukladno procijenjenom trajanju radova te troškovima i sigurnosti izvedbe [8]. Odabir metode iskopa građevne jame direktno je vezan uz vrstu tla. Pokos se najčešće izvodi pod određenim kutom pa tako i sam nagib pokosa ovisi o vrsti tla [5].

Ukoliko se radi o plitkoj građevnoj jami, poput one na Slici 3 koja se izvodi za potrebe izvedbe plitkih temelja ili kanala, istu je moguće izvesti bez zaštite uz odgovarajući kut nagiba pokosa ovisno o vrsti materijala u kojem se gradi [8]. Što je materijal rahliji, to je kut nagiba manji pa će se tako za nevezano i vrlo slabo vezano tlo najčešće koristiti kut od  $45^\circ$  sa ili bez bermi. Čvrsto i polučvrsto koherentno tlo imati će nagib pokosa oko  $60^\circ$ , a za meku stijenu je moguće koristiti i do  $80^\circ$ . U čvrstoj stijeni nagib ima kut od  $90^\circ$ , odnosno pokos je u potpunosti uspravan. Postoje i određene iznimke u gradnji pa spomenuti kutovi nagiba nisu uvijek mjerodavni. Ukoliko se građevna jama u prekonsolidiranim koherentnim tlima može izvesti brzo, a s njom i podzemni dijelovi objekta, pokos se može izvesti uspravno bez podgrade do određene dubine. U suprotnom je vertikalne bočne strane iskopa potrebno podgraditi ili poduprijeti [5]. U praksi se nerijetko upotrebljavala i metoda proračuna kritične dubine koja je proporcionalna koheziji, odnosno obrnuto proporcionalna kutu trenja. Iskop jame, čija bi se dubina pokazala manjom od kritične, vršio se bez razupiranja, odnosno bez dodatne zaštite. Za sve ostale slučajeve u kojima je dubina jame veća od kritične može doći do pojave pukotina u vlačnoj zoni i u konačnici do sloma, odnosno urušavanja. U tim je slučajevima zaštita pokosa potpornim konstrukcijama neizbježna [8].



Slika 3: Plitka građevna jama [10]

Ako je riječ o dubokoj građevnoj jami (Slika 2), odnosno o dubokom iskopu, u praksi se on vrši u etažama ovisno o mjestima pridržavanja stijenci sidrenjem ili razupiranjem. Sve građevne jame koje se izvode u nekoherentnom materijalu ili u koherentnom materijalu s velikom dubinom potrebno je podgrađivati i pridržavati nekom potpornom konstrukcijom. Prema Terzaghiju i Pecku (1967.), sve građevne jame s dubinom većom od 6 metara smatraju se dubokim građevnim jamama koje je neophodno podgrađivati zbog opće sigurnosti [9]. U tom slučaju na pokosu građevne jame, ovisno o odabranoj metodi osiguranja istog, treba biti predviđena nosivost u svakom presjeku. Pritom se naglasak stavlja na čvrstoću betona ili čelika, dimenzioniranje razupora za preuzimanje tlačnih sila i dimenzioniranje sidara za preuzimanje vlačnih sila [11]. Više o metodama osiguranja građevnih jama prikazano je u nastavku.

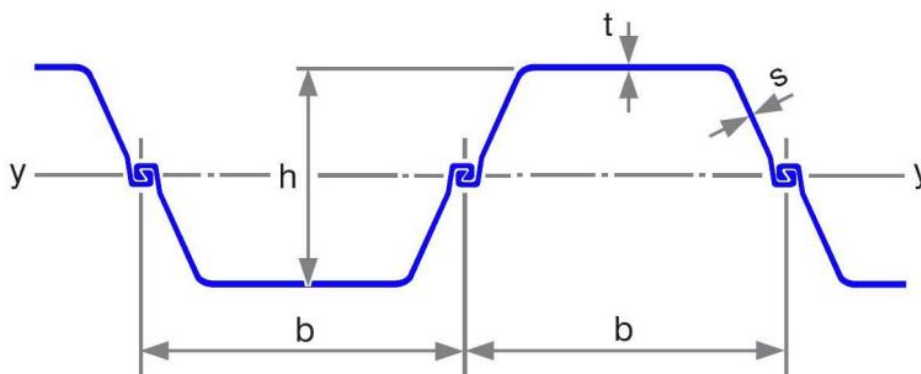
#### **2.4. Metode osiguranja građevnih jama**

Osiguranje zidova građevne jame predviđa izvedbu zaštitne, odnosno potporne konstrukcije koja mora osigurati stabilnost bokova građevne jame i spriječiti pomake koji potencijalno mogu izazvati oštećenja susjednih objekata te omogućiti crpljenje oborinske i podzemne vode [5]. Potporne konstrukcije se izvode najčešće od

armiranog betona i čelika s mogućnošću kontrole kvalitete [12]. Smatraju se geotehničkim građevinama jer primarno preuzimaju opterećenje od tla. One mogu biti trajne i konstruktivno uklopljene u buduću građevinu ili privremene, pri čemu treba osigurati neku drugu konstrukciju koja će kasnije preuzeti opterećenje tla [9]. Rad se bazira isključivo na rješenjima primjenjivim u tlu u kojem potporna konstrukcija predstavlja osnovni nosivi element, s naglaskom na složene, dublje građevne jame u ograničenom prostoru u kojima prevladava osiguranje pokosa armiranobetonskim dijafragmama, pilotskim stijenama i čeličnim talpama [9] [12]. Takva rješenja najčešće zahtijevaju i ugradnju sidara ili razupora uslijed velikih bočnih pritisaka, kako bi se dodatno smanjio utjecaj horizontalnih sila [8] [13].

#### 2.4.1. Čelične talpe

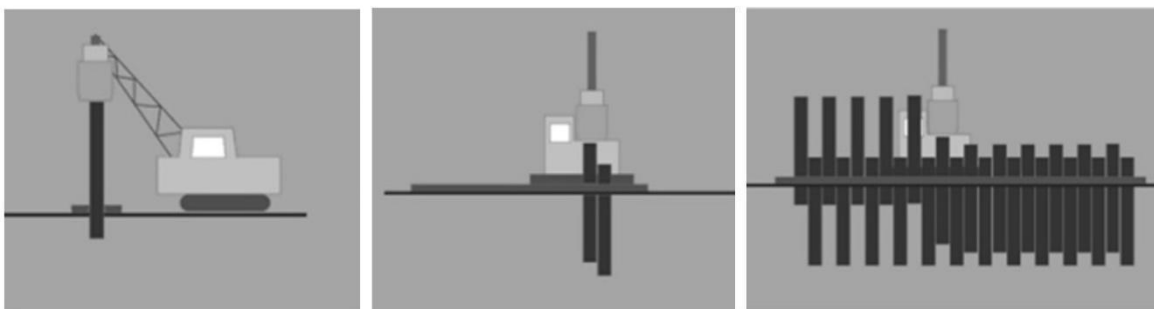
Čelične talpe su dugi, uski i tanki čelični elementi izrađeni od valjanog čelika, s posebno oblikovanim rubovima koji omogućuju spajanje u zidove. Ti oblikovani rubovi se nazivaju bravama. Postoji širok izbor različitih talpi dostupnih na tržištu, s različitim namjenama i svojstvima [11], no jedan od najpoznatijih proizvođača u svijetu je Larssen. Presjek jedne Larssen talpe prikazan je na Slici 4 zajedno sa svim dimenzijama.



Slika 4: Presjek Larssen čeličnih talpi [14]

Talpe se koriste za osiguranje plićih iskopa u tlu u kojem prevladavaju pijesci, meke do polučvrste gline, morski i riječni mulj te slični materijali [9]. Izvedba niza talpi za formiranje potporne stijene omogućuje izgradnju bez potrebe za prethodnim iskopom

tla. Svaka pojedina talpa se postavlja u tlo zabijanjem ili vibriranjem [11]. Na Slici 5 je prikazan proces ugradnje čeličnih talpi u tlo prema standardnom redoslijedu: zabijanje prve talpe, ugradnja druge talpe uz prvu, čija brava joj služi kao vodilica i ugradnja svih ostalih talpi u nizu.



Slika 5: Redoslijed ugradnje čeličnih talpi u tlo [11]

Prednost upotrebe čeličnih talpi posebno se ističe kod privremenih zaštita građevinskih jama. Nakon završetka jame i izgradnje buduće građevine, čelične talpe se mogu ukloniti i ponovno upotrijebiti. Također je moguće produžiti čelične talpe varenjem na licu mjesta, što omogućuje izgradnju vrlo dubokih potpornih konstrukcija [11].

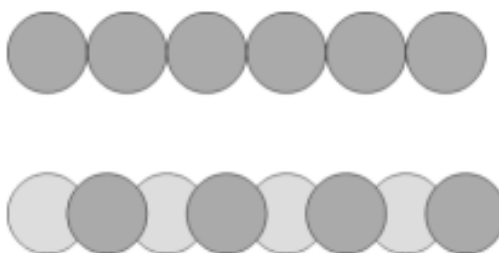
#### **2.4.2. Pilotske stijene**

Piloti su kružni, štapni elementi namijenjeni temeljenju građevina u tlima slabe nosivosti s ciljem prijenosa vertikalnih i horizontalnih opterećenja u dublje slojeve tla. Izvode se pomoću bušotine promjera budućeg pilota u koju se upušta armaturni koš, a zatim se betonira „kontraktor“ postupkom [11]. Ukoliko se piloti izvedu neposredno jedan pored drugoga, oblikuje se potporna konstrukcija koja se naziva pilotska stijena [15], prikazana na Slici 6.



Slika 6: Pilotska stijena [15]

Ona se može izvesti na dva načina: kao neprekidni niz armiranobetonskih pilota koji se međusobno dodiruju (tangiraju) ili kao parni i neparni piloti koji se međusobno preklapaju. U drugom slučaju se najprije izvode neparni piloti koji nisu armirani, izvedeni s manjim udjelom bentonita kako bi bili mekši, a potom se izvode parni armirani piloti na način da zasijecaju neparne [11]. Dakle, može se reći kako postoji tangentska i sekantna pilotska stijena [15]. Na Slici 7 su prikazani tlocrti tangente pilotske stijene (gore) i sekantne pilotske stijene (dolje).



Slika 7: Tlocrt tangentske pilotske stijene (gore) i sekantne pilotske stijene (dolje) [11]

Pilotska stijena s pilotima koji se tangiraju najčešće se izvodi kada iskop dijafragme, čiji opis slijedi u nastavku, iz nekog razloga nije moguć. Najčešći zahtjev ove potporne konstrukcije kojeg ona treba ispuniti je vodonepropusnost pa se u tom slučaju kombiniraju oba načina izvedbe. Ukoliko vodonepropusnost nije jedan od zahtjeva, piloti se mogu izvesti i na određenom razmaku [9]. Pilotska stijena može biti privremena ili trajna potporna konstrukcija u tlu [15].



### 2.4.3. Armiranobetonske dijafragme

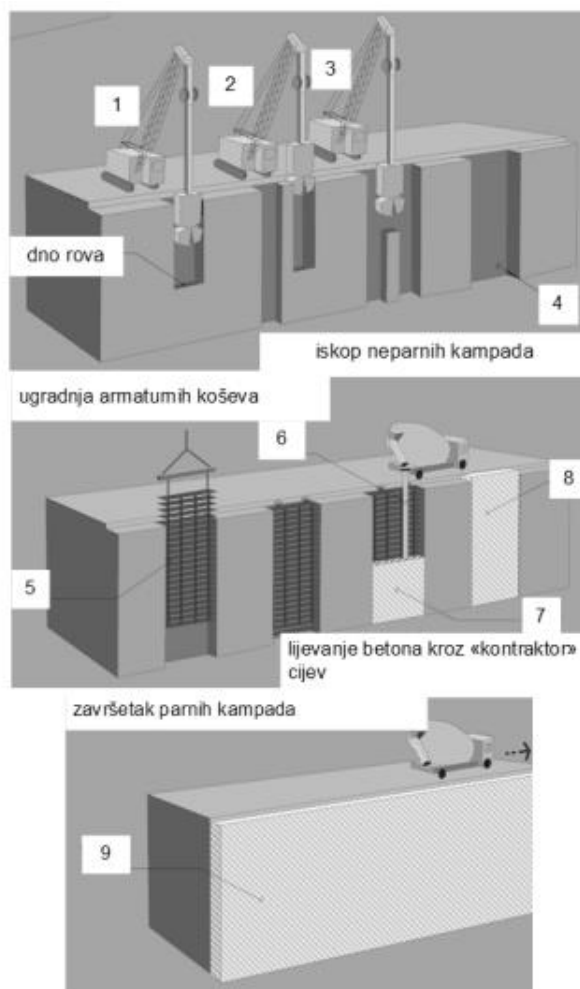
Armiranobetonska dijafragma (Slika 8) je strukturni element čija je glavna zadaća prenijeti horizontalne sile i opterećenja u dubokim građevnim jamama. Može se reći kako je to neprekinuti, kampadno izrađeni zid od armiranog betona, s količinom armature koja je potrebna za sigurno odupiranje aktivnom pritisku tla i hidrostatskom tlaku [8] [9].



Slika 8: Armiranobetonska dijafragma [16]

Armiranobetonske dijafragme su vodonepropusne i imaju visoku učinkovitost brtvljenja u građevnim jamama s visokim razinama podzemne vode. One mogu biti trajne potporne konstrukcije u tlu, odnosno mogu postati sastavni konstruktivni dijelovi budućih građevina [16]. U urbaniziranim područjima se sve više prepoznaje prednost korištenja kontinuirane dijafragme. Ona omogućuje građevinske radove bez prekida prometa, s minimalnim smetnjama za okolne stanovnike i uz smanjenje buke koja se generira na gradilištu, što je posebno važno u gusto naseljenim područjima [8]. Svemu tome pogoduje sam način izvedbe dijafragmi. Prije samog početka iskopa, u tlu se izvodi uvodni kanal. Zatim dolazi do iskopa rova u kampadama čija širina određuje debljinu buduće dijafragme. Uobičajena širina se kreće od 0,5 do 1,2 m. Kako bi se tijekom iskopa rova spriječilo urušavanje okolnog tla, iskop se puni isplakom, odnosno

mješavinom vode i bentonita [11]. Potom slijedi ugradnja armaturnih koševa, a u konačnici i betoniranja kontraktor postupkom [9]. Na Slici 9 su prikazane faze izvedbe armiranobetonske dijafragme: iskop nepranih kampada (1, 2, 3), iskopana kampada (4), ugradnja armaturnog koša (5), betoniranje kontraktor postupkom (6), dio buduće dijafragme (7), završena kampada (8), završena dijafragma (9).



Slika 9: Faze izvedbe armiranobetonske dijafragme [11]

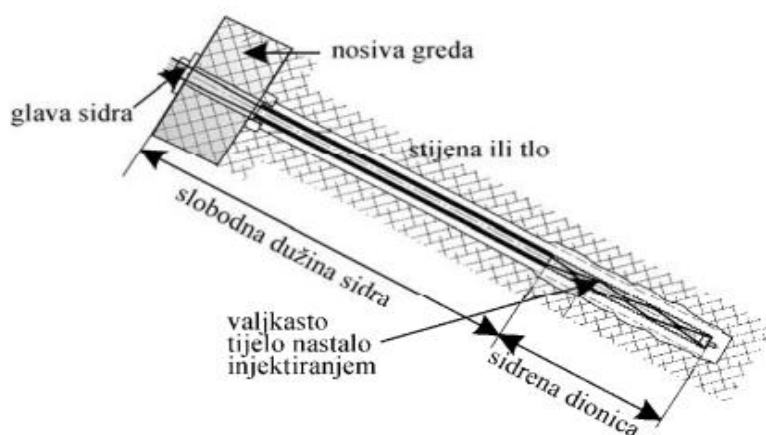
#### 2.4.4. Štapna i geotehnička sidra

Sidra su linijski geotehnički elementi koji se ugrađuju u tlo ili stijenu s ciljem prenošenja pritiska s površine ili nestabilnih dijelova pokosa u dublje i stabilne slojeve. Osnovna funkcija im je prenošenje vlačnih naprezanja u tlu te su na taj način projektirana [9]. Općenito se dijele na aktivna i pasivna, pri čemu je kod aktivnih prisutna sila prednapinjanja što aktivira samo sidro, a pasivna se aktiviraju pomacima



stijenske mase [4]. Štapna sidra se s obzirom na prijenos opterećenja dijele na ona koja prenose opterećenje trenjem duž injektirane sidrišne dionice i ona koja točkasto prenose silu u dublje slojeve stijene ili nosivog tla. S obzirom na duljinu sidara koja je vrlo varijabilna i ovisi o samoj namjeni istih, mogu se razlikovati kratka i duga štapna sidra. Kratka sidra imaju duljinu od 0,5 do 2,0 m te se koriste za pridržanja površinskih slojeva i zaštitne mreže. Duga štapna sidra imaju duljinu veću od 2,0 m i koriste se za sidrenje u dubljenim slojevima tla, najčešće iza klizne plohe [9]. Prema načinu sidrenja mogu se izdvojiti mehanički usidrena, injektirana, pletena i trenjem usidrena štapna sidra [4].

Geotehnička sidra se primjenjuju za pridržanje potporne konstrukcije i za prijenos opterećenja s ležaja na potpornoj konstrukciji u dublje slojeve stijene ili nosivog tla preko sidrišne dionice, injektirane na određenoj dužini [9]. Njegovi osnovni dijelovi prikazani su na Slici 10.



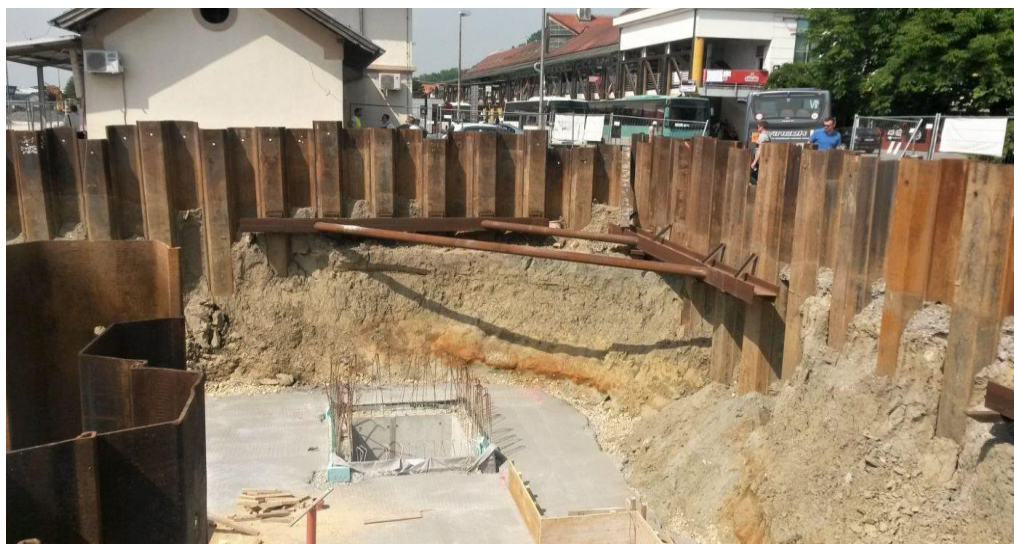
Slika 10: Geotehničko sidro od čelične užadi [9]

Slobodna dionica, koja dopušta određene deformacije, nalazi se između same konstrukcije i sidrišne dionice. Deformacija je neophodna za ostvarenje aktivnog potiska tla. Ukoliko deformacija zbog prisustva okolnih objekata nije moguća, sidro se priteže na određenu silu (sila se unosi u sidreni sklop i aktivira se sidro), što znači da se u njega unosi dio sile prije preuzimanja punog opterećenja [9].

U slučaju kada sidra nije moguće izvesti u slabijim tlima ili kada su susjedni objekti u neposrednoj blizini iskopa građevne jame, koriste se razupore koje se postavljaju ispred same potporne konstrukcije [5].

#### **2.4.5. Razupore**

Razupore su horizontalni ili kosi elementi, obično od čeličnih profila, čija je zadaća spriječiti pomake tla i osigurati stabilnost konstrukcija te preuzeti i prenijeti dio opterećenja s potporne konstrukcije u dublje slojeve. Postavljaju se između dvije susjedne ili nasuprotne stijenke građevne jame. Ukoliko su stijenke dovoljno blizu, razupore je moguće postaviti okomito na dvije suprotne stijenke. U suprotnom se postavljaju dijagonalno na uglovima [9], kako je prikazano na Slici 11.

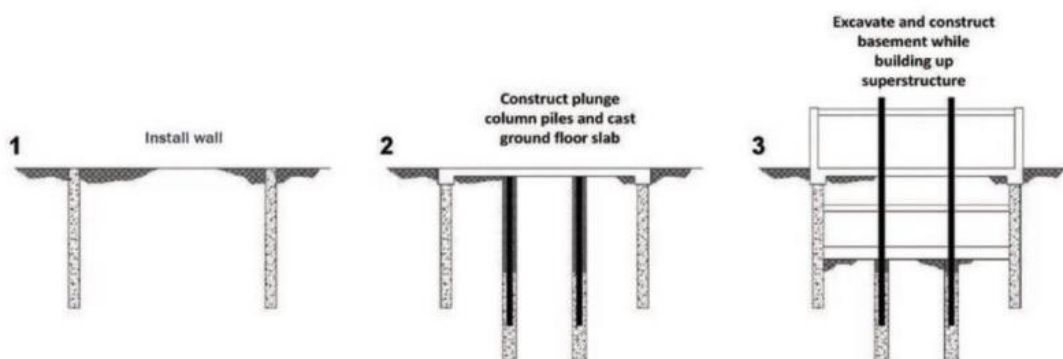


Slika 11: Dijagonalno postavljene razupore [17]

Prilikom projektiranja uz ovu metodu osiguranja građevne jame, razupore se tretiraju kao stupovi koje je potrebno dimenzionirati na nosivost na tlak i na izvijanje. Pod uvjetom da iz nekog razloga sidrenje i razupiranje nije moguće izvesti, sve se češće koristi top – down metoda iskopa građevne jame u skućenom prostoru, opisana u nastavku [9].

### 2.4.6. Top – down metoda

Građevinski objekti s podzemnim etažama najčešće se grade po završetku iskopa i to redom od podzemnih etaža prema nadzemnim, odnosno odozdo prema gore. U projektima s ograničenim vremenom izgradnje ili u uvjetima kada se izgradnja planira u gusto naseljenim gradskim prostorima, top – down metoda je najpovoljnije rješenje. Ona zahtijeva upotrebu potporne konstrukcije i trajne unutarnje konstrukcije koja će u procesu izgradnje služiti u svrhu privremenog razupiranja [18]. Detaljnije, izgradnja započinje izvedbom potporne konstrukcije, najčešće armiranobetonske dijafragme, koja čini trajni dio buduće podzemne građevine. Nakon toga se izvode stupovi, pa se započinje s iskopom odozgo prema dolje, po etažama. Po završetku iskopa jedne etaže izvode se konstruktivni dijelovi i međukatne konstrukcije koje preuzimaju ulogu razupora [9]. Kroz otvor etaže je potrebno omogućiti dovoljno prostora za prolaz strojeva za iskop sljedeće etaže za iduću fazu iskopa nakon koje ponovno slijedi izvedba iduće međukatne konstrukcije. Postupak se ponavlja sve do dostizanja željene dubine [18]. Redoslijed izgradnje prikazan je i na Slici 12.



Slika 12: Redoslijed izgradnje top - down metodom [18]

Najveća prednost ove metode izvedbe je mogućnost izgradnje podzemnog i nadzemnog dijela građevine istovremeno što dodatno smanjuje konačno vrijeme izgradnje međutim, povećava njezine ukupne troškove. Metoda se iz tih razloga najčešće koristi za izvedbu građevnih jama s dubokim iskopima u kojima sidra i/ili razupore nije moguće izvesti, a očekuju se veliki pomaci okolnog tla. Također, preporuča se korištenje top – down metode ukoliko se radi o visokim građevinama s dubokim podzemnim dijelom javne namjene, kao što su podzemne željeznice i

parkirališta [18]. Primjer izvedbe građevne jame top – down metodom u središtu grada prikazan je na Slici 13.



Slika 13: Osiguranje građevne jame top - down metodom [18]

### 2.5. Regulacija vode u građevnoj jami

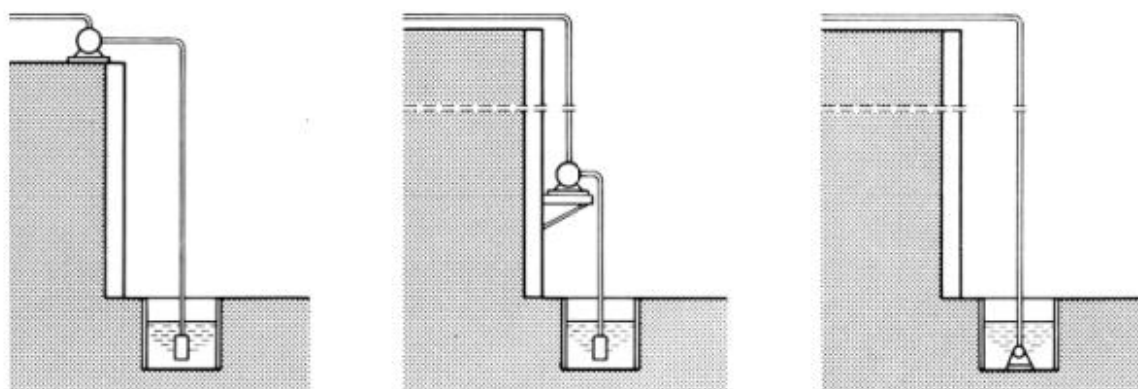
Kako je ranije spomenuto, prilikom izvedbe građevne jame je potrebno riješiti dva osnovna problema: izraditi stabilne pokose građevne jame i riješiti problem podzemne vode ako je razina temeljenja ispod razine podzemne vode kako bi se omogućio rad u suhom. Visoka razina podzemne vode može izazvati brojne probleme na gradilištu poput smanjenja posmične čvrstoće temeljnog tla, povećanja aktivnog pritiska tla, sloma tla ili konstrukcija uz djelovanje uzgona te sloma zidova potporne konstrukcije. Iz navedenih razloga, podzemnu vodu je potrebno crpiti ili se njezin dotok može spriječiti izvedbom nepropusne barijere, odnosno nepropusne potporne konstrukcije. Obično se koristi jedan od načina regulacije vode ili njihova kombinacija u slučajevima sa značajnom količinom podzemne vode. Odabir načina regulacije vode ovisi o značajkama tla i vodopropusnosti, te o samim bokovima i dnu građevne jame [8].

Crpljenje podzemne vode osigurava crpna stanica, uz stalno ili povremeno crpljenje ovisno o veličini same jame, veličini dotoka vode, vrsti temeljnog tla i osjetljivosti radova. Posebnu pažnju treba obratiti na mogući hidraulički slom tla i prodor vode. S

napredovanjem iskopa, potrebno je postepeno snižavati razinu podzemne vode crpljenjem iz građevne jame ili oko nje [8].

### a) Crpljenje podzemne vode iz građevne jame

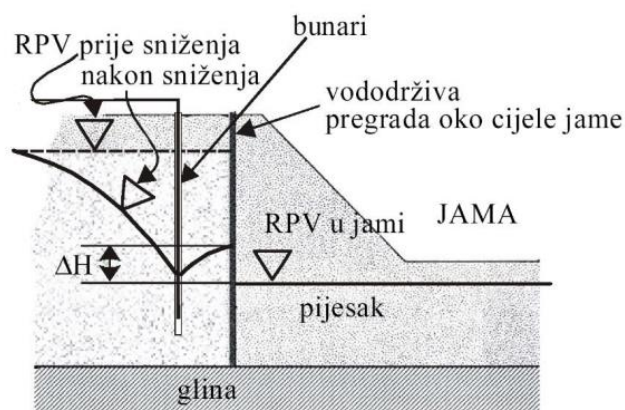
Crpljenje podzemne vode iz građevne jame može se omogućiti izvedbom vodonepropusnih i neprekinutih potpornih građevina poput čeličnih talpi, pilotskih stijena i armiranobetonskih dijafragmi. Njihova uloga je oduprijeti se hidrostatskom tlaku i spriječiti dotok vode. Razina podzemne vode na taj način postepeno pada na dno građevne jame u svakoj fazi iskopa i prilagođenim padovima dna se prikuplja u sabirnim jarcima ili drenovima. Prikupljena vode se zatim po potrebi crpi iz građevne jame uz pomoć crpki. Na Slici 14 redom su prikazani načini postavljanja crpki: crpka na rubu jame, crpka u jami i crpljenje iz sabirnog bunara [9].



Slika 14: Načini postavljanja crpki u odnosu na građevnu jamu [9]

### b) Crpljenje podzemne vode oko građevne jame

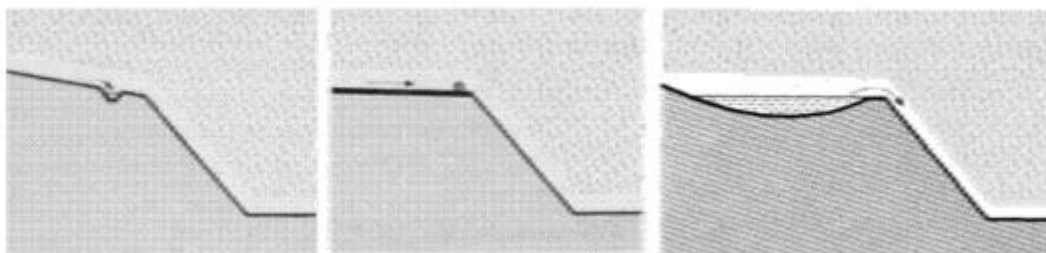
Ukoliko izvedena potporna građevina nedovoljno dobro sprječava dotok podzemne vode u građevnu jamu, potrebno je crpljenje omogućiti s vanjske strane te građevine, odnosno oko građevne jame. Načini na koje je to moguće izvesti su: sustavom bunara, elektroosmozom i iglo filterima [8]. Navedenom kombinacijom se smanjuje razlika visina vodnog stupca, a time i hidrostatski tlak na stijenke potporne građevine. Time se u konačnici znatno se smanjuje dotok vode u građevnu jamu [9]. Na Slici 15 je prikazano snižavanje podzemne vode izvedbom bunara s vanjske strane.



Slika 15: Snižavanje podzemne vode izvedbom bunara izvan građevne jame [9]

U slučajevima kada spomenuti načini crpljenja, odnosno snižavanja razine podzemne vode nisu dovoljni s obzirom na velike dotoke i vodopropusan materijal, dno građevne jame je poželjno brtviti. Najčešća metoda brtvljena je metoda mlaznog injektiranja [5].

Problem oborinske vode značajno je manji od podzemne vode, pa se njezina odvodnja najčešće osigurava odvodnim jarcima, zaštitnim zečjim nasipima ili pomoću bazena za prikupljanje vode [9], redom prikazanih na Slici 16.



Slika 16: Osiguranje odvodnje oborinske vode [9]

Prije odabira načina odvodnje oborinske vode svakako valja provesti hidrološku analizu, odnosno utvrditi režim kiša na području građenja ovisno o godišnjem dobu, razine podzemne vode i konfiguraciju terena na širem području. Najučinkovitiji način odvodnje oborinske vode je pomoću sakupljača vode koji podrazumijeva sustav kanala i drenažnih cijevi s blagim padom dna prema mjestu sakupljanja. Sakupljena voda se se pumpa izvan građevne jame, najčešće u obližnju kanalizaciju [8].



### 3. REGULATIVA I METODE PRORAČUNA

Prema Zakonu o gradnji, članak 7, objavljenom u Narodnim novinama 2019. godine, „Svaka građevina, ovisno o svojoj namjeni, mora biti projektirana i izgrađena na način da tijekom svog trajanja ispunjava temeljne zahtjeve za građevinu te druge zahtjeve, odnosno uvjete propisane ovim Zakonom i posebnim propisima koji utječu na ispunjavanje temeljnog zahtjeva za građevinu ili na drugi način uvjetuju gradnju građevina ili utječu na građevne i druge proizvode koji se ugrađuju u građevinu“ [19]. Kako bi građevina ispunila sve uvjete propisane Zakonom o gradnji, njezino projektiranje se odvija poštujući tehničke norme i europske standarde. U tu svrhu razvijen je Eurokod koji sadrži objedinjene europske norme za proračun različitih vrsta građevinskih konstrukcija [20]. Čini ga ukupno 10 normi, od kojih je Eurokod 7 (EN 1997) za projektiranje u geotehnici najvažniji i bitno je pridonio izradi ovog rada.

#### 3.1. Eurokod 7

Hrvatska norma Eurokoda 7 se sastoji od dva dijela, odnosno od “Geotehničkog projektiranja – 1. dio: Opća pravila” (HRN EN 1997-1) i od “Geotehničkog projektiranja – 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla” (HRN EN 1997-2). Prvi dio služi kao podloga za geotehničko projektiranje budući da sadrži parametre tla i karakteristične i projektne vrijednosti koji su ključni pri postavljanju problema na početku projektiranja. Osim toga, sadrži i brojna pravila za projektiranje geotehničkih konstrukcija. Drugi dio opisuje istraživanje tla i njegovo uzorkovanje, mjerenje podzemne vode i terensko ispitivanje. Također, opisuje i laboratorijsko ispitivanje tla te izvještaj o istraživanju kao rezultat prethodnog ispitivanja koji čini podlogu za početak projektiranja na predmetnoj lokaciji [20].

Cilj geotehničkih istražnih radova je utvrditi sve ili što je više moguće uvjeta tla, stijene i podzemne vode, odnosno njihove značajke. EN 1997-2 razlikuje preliminarne istražne radove, istražne radove za projektiranje i kontrolne istražne radove. Općenito, može se reći da se svi geotehnički istražni radovi sastoje od uzimanja uzoraka na terenu, sondažnih radova, geofizičkih mjerenja, laboratorijskog ispitivanja te inženjersko geoloških radova. Skup podataka o geotehničkim značajkama na lokaciji

prikazuje se geotehničkim podlogama koje se objedinjuju u geotehničkom elaboratu i daju pregled svih spomenutih radova, na lokaciji i u laboratoriju. Geotehnički elaborate, dakle, daje pregled svih rezultata ispitivanja, ali ne definira parametre za proračun pa je za njihov odabir vrlo važno iskustvo projektanta geotehničkog projekta [5].

Eurokod zahtijeva ispunjavanje brojnih zahtjeva prilikom izgradnje, ali i korištenja pojedine građevine, poput nosivosti, uporabivosti, trajnosti, otpornosti na požar, robusnosti i pouzdanosti. Osim unaprijed definiranih pravila i zahtjeva koje sama konstrukcija mora zadovoljiti, podrazumijeva se i da projektant ima odgovarajuću klasifikaciju, znanje i iskustvo za odabir najpovoljnije konstrukcije, da će građenje biti nadzirano i da će se provoditi kontrola kvalitete [20].

Prema EN 1997-1 razlikuje se nekoliko načina geotehničkog projektiranja. Najrašireniji pristup je projektiranje na osnovi proračuna, posebice za geotehničke kategorije 2 i 3 koje su opisane u nastavku rada, kojim se utvrđuje jesu li dosegnuta granična stanja uporabivosti i nosivosti. Proračun se vrši pomoću analitičkih, polu-empirijskih i numeričkih modela s tri osnovne varijable: karakteristike materijala, djelovanja i geometrije. Ukoliko na pojedinoj lokaciji postoji dokumentacija u sličim ili istim geotehničkim uvjetima sa sličnim geotehničkim ponašanjem i konstrukcijama te na temelju toga postoji tzv. "usporedivo iskustvo", može se upotrijebiti projektiranje na osnovi propisanih mjera koje u pojedinim situacijama može biti i pogodije od projektiranja na osnovi proračuna. Pomoću ove metode se može izbjeći pojava graničnog stanja uz kombinaciju konzervativnih projektnih pravila i striktne kontrole izvedbe radova [20]. Rješenje onih najsloženijih problema je ovom metodom moguće dobiti zbog vrlo brzog razvitka računalnih softvera koji koriste analitičke metode u proračunu [21]. Projektiranje na osnovi pokusa nije toliko rašireno pa se modelsko ispitivanje provodi kao potvrda projekta geotehničke konstrukcije izrađenog na osnovi proračuna ili propisanih mjera. S obzirom na navedene metode, neizostavno je spomenuti i projektiranje na osnovi opservacije koje danas postaje sve raširenije iako Eurokod 7 slabo određuje način na koji se ona provodi. Pritom je ipak potrebno utvrditi granice mogućeg i trenutnog ponašanja na lokaciji, izraditi program praćenja ponašanja i utvrditi plan u slučaju da ponašanje prekorači dopuštene granice. Uz sve



navedene metode važnu ulogu imaju kontrola za vrijeme i nakon gradnje i monitoring te održavanje na odgovarajući način, koje također opisuje Eurokod 7 [20].

Eurokod 7 je geotehničke konstrukcije klasificirao prema rizicima u tri kategorije, kako bi se racionalizirao opseg istražnih radova i složenost postupka dokazivanja stabilnosti i uporabivosti:

- Geotehnička kategorija 1, koju čine male i jednostavne strukture, uz povoljne uvjete u tlu bez iskopa ispod razine podzemne vode.
- Geotehnička kategorija 2, koju čine potporne građevine koje pridržavaju tlo ili sprječavaju prodor vode (rutinski geotehnički zahtjevi), bez iznimnog rizika ili teških uvjeta opterećenja.
- Geotehnička kategorija 3, u koju je moguće svrstati sve građevine ili dijelove građevina koje ne ulaze u prve dvije kategorije, vrlo velikih i neuobičajenih struktura koje je potrebno izvesti u iznimno teškim uvjetima rada [21].

Tijekom razvoja Eurokoda 7 neke su države izrazile želju usvojiti pristup u kojem se faktoriziraju opterećenja i materijalne karakteristike, a druge pristup u kojem se faktorizira opterećenje i otpornost. Dogovoreno je da svaka od zemalja može kroz svoj Nacionalni aneks usvojiti jedan ili više predloženih projektnih pristupa od dana tri pristupa. Projektni pristupi se uglavnom razlikuju po fazi proračuna u kojoj će se primijeniti parcijalni faktori: na ulazne podatke (djelovanja i svojstva materijala) ili na rezultate proračuna (učinke djelovanja i otpornosti) [20]. U Republici Hrvatskoj je na snazi Projektni pristup 3, za sve segmente proračunskih analiza [5]. Kod Projektnog pristupa 3 pouzdanost se provjerava tako da se parcijalni faktori primjenjuju na strukturalna djelovanja i materijalne značajke istovremeno, dok se geotehnička djelovanja i otpornost ostavljaju nefaktorizirana [20]. Parcijalni faktori koji se primjenjuju u Projektnom pristupu 3 dani su Tablicom 5 za djelovanja i učinke djelovanja te Tablicom 6 za parametre tla u nastavku. Za proračune kosina i sveukupne stabilnosti, djelovanja na tlo (npr. opterećenje prometa) tretiraju se kao geotehnička djelovanja uz uporabu skupine koeficijenata opterećenja A2.

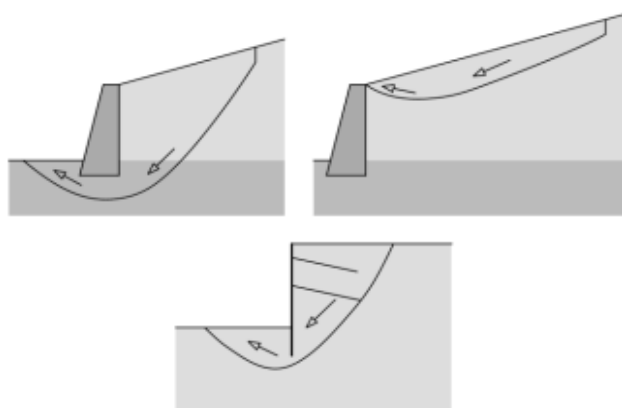
Tablica 5: Parcijalni faktori za djelovanja i učinke djelovanja prema projektom pristupu 3 [9]

DJELOVANJE		SIMBOL	SKUPINA	
			A1	A2
Stalno	nepovoljno	$\gamma_{G;sup}$	1,35	1,00
	povoljno	$\gamma_{G;inf}$	1,00	1,00
Promjenjivo	nepovoljno	$\gamma_Q$	1,50	1,30
	povoljno	$\gamma_Q$	0,00	0,00

Tablica 6: Parcijalni faktori za parametre tla i stijena prema projektom pristupu 3 [9]

PARAMETRI TLA	SIMBOL	SKUPINA	
		M1	M2
Kut unutarnjeg trenja	$\gamma_{\varphi'}$	1,00	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Nedrenirana posmična čvrstoća	$\gamma_{cu}$	1,00	1,40
Jednoosna tlačna čvrstoća	$\gamma_{qu}$	1,00	1,40
Gustoća težine	$\gamma_{\gamma}$	1,00	1,40

Granično stanje nosivosti izuzetno je važno provjeriti kako bi se izbjegao globalni slom tla iza, ispod i ispred potporne konstrukcije, prikazan na Slici 17 te kako bi se utvrdio faktor sigurnosti [11].



Slika 17: Oblici globalnog sloma tla i kliznih ploha [11]

Pri projektiranju potpornih konstrukcija koriste se različite metode proračuna: metoda granične ravnoteže, metoda bočne reakcije tla i pseudo konačnih elemenata, metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika i empirijske metode [17]. Za izračun pomaka tla i konstrukcije te momenata savijanja i poprečnih sila najčešće se,

posebice u razvijenim softverima, koristi metoda konačnih elemenata, opisana u nastavku rada.

### 3.2. Metoda konačnih elemenata

Numeričkim modelima se nastoji doći do prihvatljivih rješenja za sve složene geotehničke probleme. Na samom početku je potrebno usvojiti rubne uvjete i karakteristike materijala te predvidjeti njihovo ponašanje u svim fazama izvođenja kako bi se, što je više moguće, simuliralo stvarno stanje na terenu [22].

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se temelji na diskretizaciji kontinuuma s beskonačnim brojem točaka, pomoću koje je moguće riješiti parcijalne diferencijalne jednačbe [23]. Točke diskretiziranog modela se povezuju elementima i na taj način tvore mrežu konačnih elemenata [24]. Potom se izvode jednačbe ravnoteže za proračunski model pri čemu su, preko globalne matrice krutosti, vanjske sile koje djeluju u čvorovima konačnih elemenata povezane sa stupnjevima slobode [25]. Redoslijed rješavanja matematičkog problema metodom konačnih elemenata može se svesti na nekoliko koraka [26]:

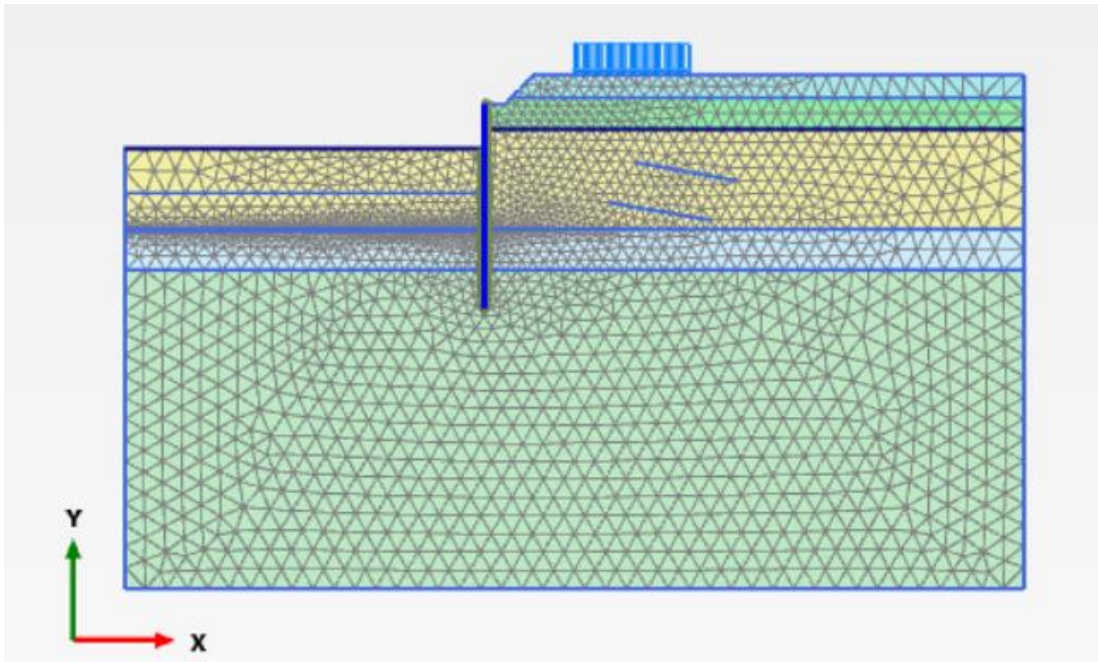
1. Diskretizacija i odabir elemenata,
2. Odabir funkcije oblika za štapni, gredni ili ravninski oblik,
3. Definiranje konstitutivne matrice krutosti,
4. Određivanje jednačbi elemenata i dobivanje globalne matrice krutosti,
5. Definiranje rubnih uvjeta i povezivanje elemenata,
6. Određivanje pomaka kao primarne nepoznanice,
7. Određivanje naprezanja i deformacija kao sekundarne nepoznanice.

U odnosu na stvarno ponašanje konstrukcije, mogu se razlikovati dvije pogreške: pogreška modela i pogreška diskretizacije. Kvalitetnijim prikazom modela konstrukcije smanjiti će se pogreška modela, a upotrebom finije mreže ili povećanjem stupnjeva slobode smanjiti će se pogreška diskretizacije [24]. Unatoč tome, ova numerička metoda ima brojne prednosti pa se može istaknuti relativno brzo kreiranje modela koji ne mora biti u prirodnom mjerilu i mogućnost promjene parametara i rubnih uvjeta [27].

### 3.3. PLAXIS 2D

Kako je prethodno spomenuto, u današnje vrijeme se sve više koriste razni računalni softveri za proračun potpornih konstrukcija. Većina njih se temelji na dvodimenzionalnom modeliranju u kojem je pretpostavljeno da se presjek duž osi okomite na presjek nastavlja u beskonačnost [28].

PLAXIS 2D je vrlo jednostavan softver za proračun analiza deformacija i stabilnosti u geotecnici korištenjem metode konačnih elemenata. Njegova osnovna zadaća je izračunati faktor sigurnosti u analizi stabilnosti iterativnom redukcijom parametara čvrstoće (strength reduction, eng) i provjeriti prelazi li građevina bilo koje od graničnih stanja. Uz brzo i efikasno kreiranje modela konačnih elemenata, PLAXIS koristi logičan geotehnički tijek rada i izvođenja radova u fazama, pa je tako za svaku pojedinu fazu moguće modelirati geometriju, tipove strukturnih elemenata i opterećenje [29]. Nakon kreiranja modela i prije provedbe analiza i proračuna, potrebno je generirati mrežu konačnih elemenata. Najčešće je to mreža trokutnih oblika s određenim brojem čvorova po elementu. Uz pretpostavku da će na nekom mjestu u modelu doći do povećanje koncentracije naprezanja, mreža se na tom mjestu može dodatno progustiti. Najčešće su to područja oko potporne konstrukcije i ispod opterećenja [36]. Na Slici 18 prikazana je mreža konačnih elemenata u softveru PLAXIS 2D.



Slika 18: Generiranje mreže konačnih elemenata u softveru PLAXIS 2D

PLAXIS nudi vrlo precizno modeliranje ponašanja različitih tipova tla i stijena što u konačnici omogućuje realističnu procjenu pomaka i naprezanja. Ima vrlo široku primjenu u projektima iskopa, nasipa i temeljenja te je kao takav odabran i za izradu ovog rada [29].

## **4. PROJEKTIRANJE NOVE GRADSKE KNJIŽNICE PAROMLIN U ZAGREBU**

U ovom poglavlju su prikazane sve stavke iz prethodnih poglavlja na konkretnom primjeru aktualnog projekta izgradnje građevne jame u koju će se smjestiti podzemne etaže nove gradske knjižnice Paromlin u gradu Zagrebu. Opisani su ključni elementi geotehničkog projektiranja poput geološkog i hidrološkog okruženja lokacije i njezine okoline te njezin povijesni razvoj, uvjeti i ponašanje tla, uvjeti podzemne vode te korištenje proračuna i usvajanje propisanih mjera.

### **4.1. Povijesni značaj**

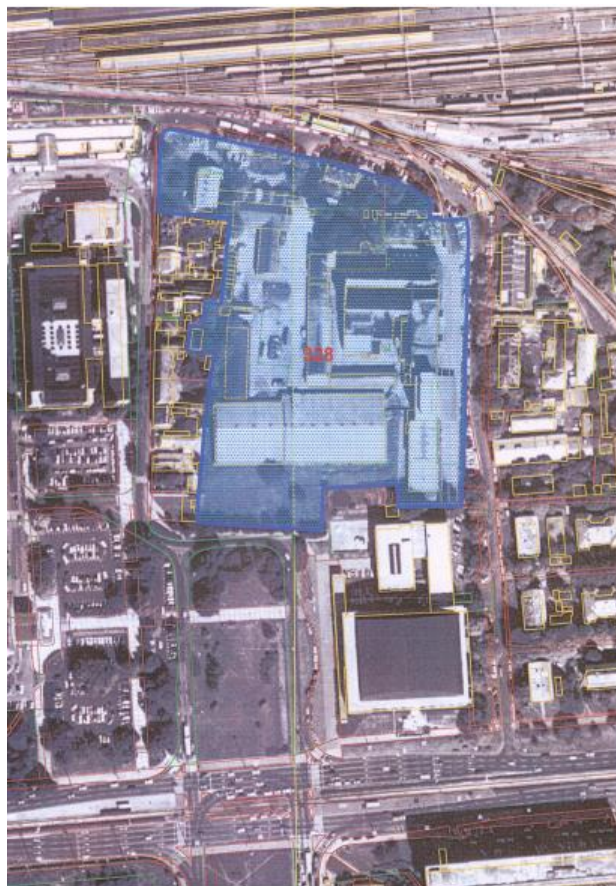
Predmetna lokacija građevinskog izvedbenog projekta koja je ujedno poslužila i za izradu ovog diplomskog rada smještena je u samom centru glavnoga grada Zagreba. Riječ je o Paromlinu, jednom od najvažnijih zagrebačkih spomenika industrijske arhitekture, izgrađenom početkom 20. stoljeća u blizini Glavnog kolodvora. On je ujedno i jedan od najvažnijih hrvatskih industrijskih kompleksa s početka industrijalizacije, osmišljen od strane više istaknutih hrvatskih arhitekata. Predstavlja zaštićeno kulturno dobro te upravo iz tog razloga predstavlja i dodatni izazov u obnovi i sanaciji [30].

Povijest Paromlina seže sve do davne 1862. godine kada je pokrenuta ideja o njegovoj izgradnji, a njegova izgradnja je započela 1906. godine u periodu kada je razvoj industrije bio u punom jeku diljem Hrvatske. U konačnici je izgrađen 1908. godine i uz svoju razvijenu arhitekturu i konstruktivni sustav počinje se isticati i sve uspješnijim izvozom brašna izvan granica tadašnje Austro-Ugarske. Naime, prilikom izgradnje ovog kompleksa parnih mlinova krajem 19., odnosno početkom 20. stoljeća, prvi puta se upotrijebila armiranobetonska konstrukcija koja je djelomično zamijenila do tada vodeću metalnu konstrukciju. Cijeli kompleks čini nekoliko objekata: paromlinska zgrada, zgrada transmisije, zgrada skladišta i zgrada silosa. Između dva svjetska rata izgrađena su dodatna pomoćna skladišta pa se može zaključiti kako cijeli kompleks poprima svoj konačni oblik. Takav izgled djelomično je zadržan do danas, no 1988. je

Paromlinu zaprijetio veliki požar koji je značajno ugrozio daljnje postojanje ovog kompleksa. Rasprava oko njegovog opstanka trajala je dulji niz godina, uz glavno pitanje o rušenju cijelog kompleksa ili potpunoj obnovi. Značajnu ulogu donosi činjenica da se radi o zaštićenom spomeniku kulture zbog čega je cijeli proces obnove značajno otežan i dugotrajan. Unatoč svim izdanim natječajima za sanaciju i prenamjenu prostora, Paromlin nije dočekaio svoju obnovu unutar 2 desetljeća nakon požara pa je tako 2013. godine došlo do urušavanja južnog, sjevernog i zapadnog zida glavne zgrade. Ipak, upravo je taj požar bio prekretnica nakon kojeg se šira javnost sve više usmjeravala na rješavanje ovog problema [30]. Na Slici 19 prikazano je trenutno stanje kompleksa na jugoistočnoj strani, a na Slici 20 tlocrtno je prikazan cijeli obuhvat od čak 30 900 m<sup>2</sup>.



Slika 19: Postojeće stanje konstrukcije Paromlina [30]



Slika 20: Tlocrt Paromlina u postojećem stanju [30]

#### 4.2. Projekt nove knjižnice Paromlin

Nakon niza neuspješnih natječaja za prenamjenu prostora, na lokaciji postojećeg parkirališta i objekta Paromlin naposljetku je predviđena izgradnja nove zgrade gradske knjižnice grada Zagreba. Knjižnica bi na ovoj lokaciji pridonijela razvitku grada i društva te kao takva pokazala primjer svim ostalim budućim obnovama i rekonstrukcijama zaštićenih objekata. Zapušteni javni prostor prenamijeniti će se u skladan kompleks knjižnice koji bi zaštićene dijelove starog Paromlina spojio s modernim i suvremenim, uz sve tehnološke trendove [31].

Projektom je predviđena izgradnja nove gradske knjižnice na prostoru sadašnjeg parkirališta s dvije podzemne etaže i nekoliko nadzemnih etaža u kojima je predviđen smještaj javnog sadržaja i podzemne garaže, dok će se postojeći objekti Paromlina prenamijeniti za administrativni sadržaj [32]. U nastavku je na Slikama 21–25



prikazana vizualizacija prenamijenjene lokacije i predviđeni izgled nove gradske knjižnice.



Slika 21: Projektirani izgled nove Gradske knjižnice Paromlin [32]



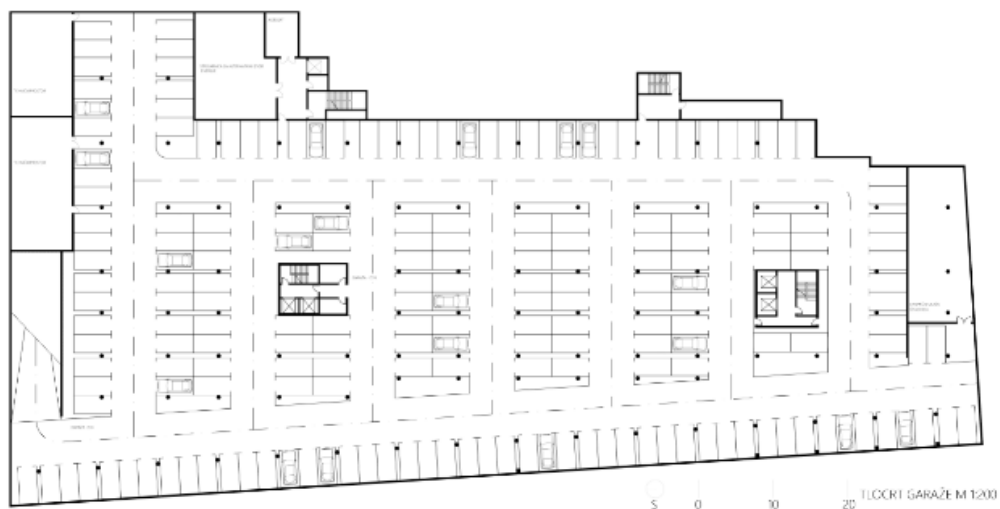
Slika 22: 3D model nove Gradske knjižnice Paromlin [32]



Slika 23: Projektirani izgled nove Gradske knjižnice Paromlin - uklapanje s postojećom zgradom [32]



Slika 24: Presjek nove Gradske knjižnice Paromlin kroz sve nadzemne i podzemne etaže [32]



Slika 25: Tlocrt garaže nove Gradske knjižnice Paromlin [32]

Kako je ranije spomenuto, Paromlin je smješten u samom “srcu” urbaniziranog Zagreba, okružen brojim postojećim objektima. Upravo iz tog razloga se prilikom projektiranja ovog kompleksa težilo ka izgradnji podzemnih etaža radi potpune iskoristivosti prostora, stoga se u tu svrhu izrađuje glavni projekt osiguranja građevne jame.

### 4.3. Geotehničke značajke lokacije

Inženjerskogeološke i geotehničke značajke predmetne lokacije sadržane su u geotehničkom elaboratu PR 19-171-01 koji je prethodio izradi građevinskog projekta te su opisane u nastavku [34].

#### 4.3.1. Opis lokacije

Predmetna lokacija smještena je na lokaciji nekadašnjeg tvorničkog kompleksa Paromlin u centru grada Zagreba, između Glavnog željezničkog kolodvora na sjeveru i koncertne dvorane Vatroslav Lisinski na jugu. Omeđena je Koturaškom ulicom prema sjeveru, Trnjanskom cestom prema istoku, Paromlinskom cestom prema zapadu te Trgom Stjepana Radića prema jugu. Lokacija obuhvata se sastoji od zaravnjenog terena i izgrađenog terena u vidu postojećih objekata nekadašnjeg tvorničkog kompleksa



Paromlin te asfaltiranog parkirališnog platoa. Nadmorske visine terena se kreću cca od 114,0-116,0 m n.m. [33]. Prikaz šireg područja centra grada Zagreba s označenom istraživanom lokacijom sadržan je na Slici 26, a 3D pogled na postojeće objekte i parkiralište kompleksa Paromlin na Slici 27.



Slika 26: Prikaz šireg područja centra grada Zagreba s označenom istraživanom lokacijom [33]



Slika 27: Pogled iz zraka na postojeće objekte i parkiralište kompleksa Paromlin [33]

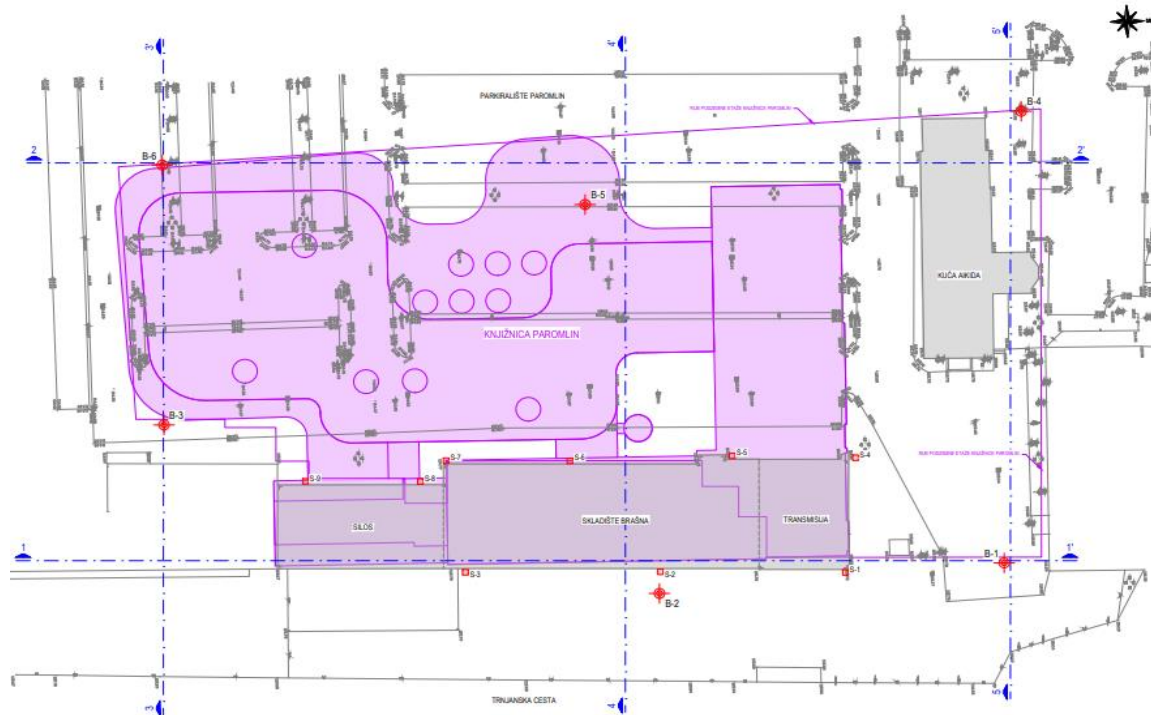
Trenutno se kompleks sastoji od zgrade transmisije, skladišta brašna i silosa duž istočnog ruba obuhvata te od postojećeg parkirališta. Na poziciji postojećeg parkirališta Paromlin te ispod dijela rekonstruirane zgrade transmisije, predviđena je

izgradnja tri podzemne etaže, dok je iznad parkirališnog platoa predviđena izgradnja novog objekta između postojećih građevina Paromlina, a koja će iste povezivati [33].

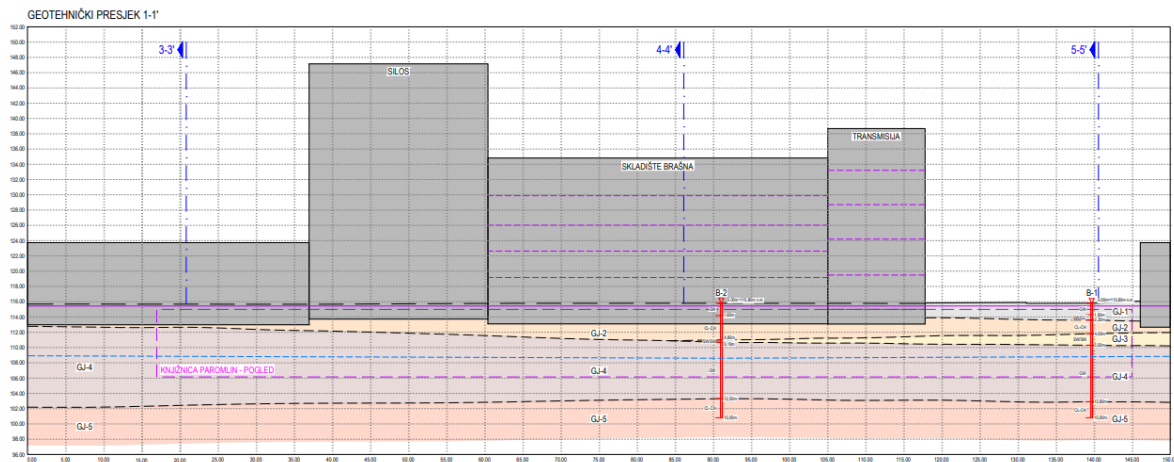
#### **4.3.2. Opis istraživačkih radova**

Istražni radovi prethode bilo kojem geostatičkom proračunu i dimenzioniranju [9]. Za potrebu izrade projekta osiguranja građevne jame provedeni su inženjerskogeološki i geotehnički istražni radovi koji su se sastojali od iskopa sondažnih jama, istraživačkog rotacijskog bušenja, inženjerskogeološkog kartiranja terena, determinacije bušćih jezgri i sondažnih jama, laboratorijskog ispitivanja, obrade podataka ranijih istraživanja i korelacije s novim podacima [33].

Za potrebe utvrđivanja dimenzija i oblika postojećih temelja te vrste temeljnog tla ispod postojećih građevina transmisije, skladišta brašna i silosa, izvedeno je devet sondažnih jama, pojedinačnih dubina od 1,30 m do 3,00 m. Sondažne jame su izvedene strojnim iskopom uz vanjski dio nosive konstrukcije postojećih zgrada do temeljne podloge ili do najveće izvedive dubine iskopa. Također, izvedeno je i šest istraživačkih rotacijskih bušotina pojedinačnih duljina 15,0 m, odnosno ukupne duljine 90,0 m. Bušotine su poslužile za utvrđivanje geotehničkih značajki lokacije i temeljnog tla [33]. Položaji izvedenih sondažnih jama i istraživačkih bušotina prikazani su na dva primjera: na tlocrtu (Slika 28) i presjeku (Slika 29).



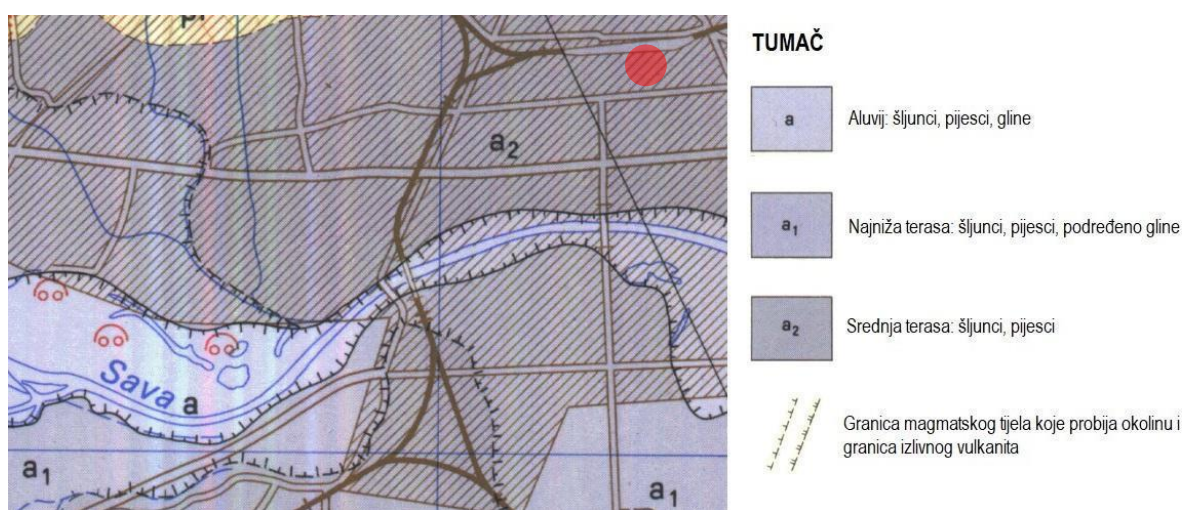
Slika 28: Položaji izvedenih sondažnih jama i istraživačkih bušotina (crveno) – tlocrt [34]



Slika 29: Položaji izvedenih sondažnih jama i istraživačkih bušotina (crveno) – presjek [34]

### 4.3.3. Geološke i geotehničke značajke lokacije

Prema dostupnim podacima, predmetno područje pripada strukturnoj jedinici Zagrebačka depresija, kao sastavni dio tektonske jedinice Savska potolina. Savsku potolinu karakteriziraju nanosi aluvijalnih sedimenata u tektonski formirani nizinski prostor krajem pleistocena i početkom holocena. U kasnijem razvoju Savske potoline, istovremeno sa sedimentacijom aluvijalnih sedimenata, odvijale su se erozija i premještanje već istaloženih aluvijalnih sedimenata [33]. Na Slici 30 prikazan je isječak iz Osnovne geološke karte (OGK) s označenom predmetnom lokacijom.



Slika 30: Isječak iz Osnovne geološke karte (OGK) s označenom predmetnom lokacijom [33]

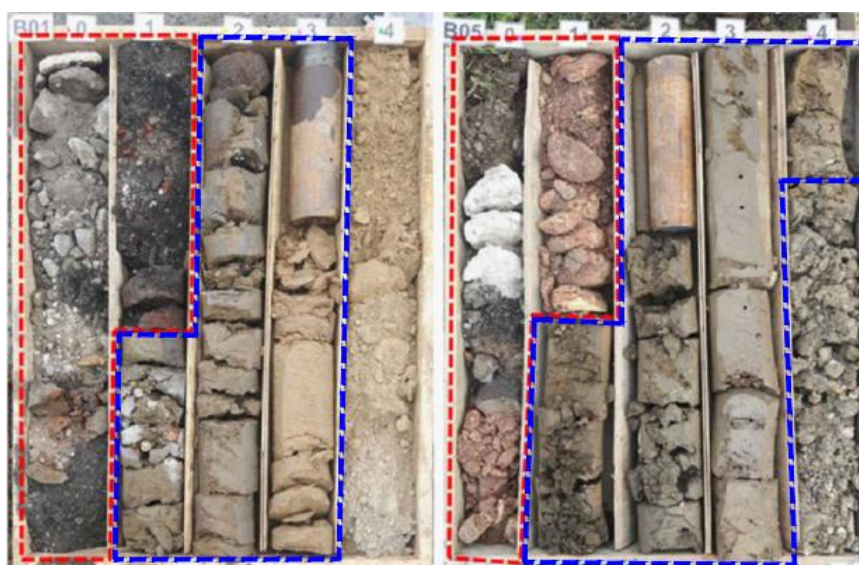
Geotehničkim pregledom lokacije ustanovljeno je da je geotehnički profil na lokaciji sastavljen od pet geotehničkih jedinica prikazanih u Tablici 7 u nastavku [33].

Tablica 7: Geotehničke jedinice [33]

Geotehnička jedinica	Opis
GJ-1	<b>Nabačaj:</b> dobro graduirani glinoviti šljunak
GJ-2	<b>Kruta glina:</b> homogena prahovita glina niske do visoke plastičnosti, krute konzistencije
GJ-3	<b>Pijesak:</b> dobro graduirani prahoviti pijesak, srednje zbijenosti
GJ-4	<b>Šljunak:</b> dobro graduirani šljunak, s oblucima, srednje do vrlo dobre zbijenosti
GJ-5	<b>Tvrda glina:</b> prahovita glina niske do visoke plastičnosti, tvrde konzistencije, s primjesama šljunka i pijeska



Provedenim istraživačkim radovima je utvrđena debljina nabačaja od 0,70 do 2,60 m, debljina krute gline od 1,30 do 3,20 m, pijeska od 0,30 do 1,50 m, šljunka od 7,40 do 9,90 m i tvrde gline od 11,90 do 12,90 m. Glina je utvrđena u dva horizonta, gornjem i donjem. Gornji i donji horizont karakteriziraju homogene prahovite gline niske do visoke plastičnosti. Temeljem dobivenih rezultata ispitivanja standardnim prodiranjem utvrđena je kruta konzistencija gornjeg horizonta i tvrda konzistencija donjeg horizonta. Na Slikama 31–35 prikazane su jezgre bušotina i granice geotehničkih jedinica [34].

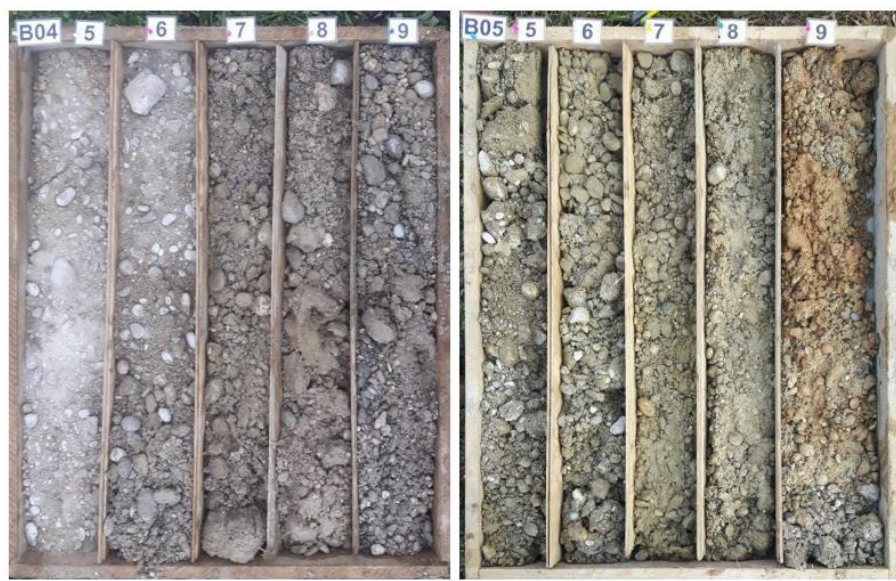


Slika 31: Log bušotine - prikaz nabačaja (crveno) i krute gline (plavo) [34]



Slika 32: Log bušotine - prikaz pijeska [34]





Slika 33: Log bušotine - prikaz šljunka [34]



Slika 34: Log bušotine - prikaz gornjeg horizonta tvrde gline [34]



Slika 35: Log bušotine - prikaz donjeg horizonta tvrde gline [34]

#### 4.3.4. Laboratorijska ispitivanja

Laboratorijska ispitivanja obuhvaćaju geomehanička ispitivanja uzoraka tla uzetih iz jezgri bušotina. Ispitivanja su provedena na poremećenim i neporemećenim uzorcima tla prema propisanim procedurama ovlaštenog laboratorija u okviru kojih su propisani standardi kao i načini prikazivanja laboratorijskih rezultata [33]. Nadalje, sva ispitivanja provedena su prema smjernicama iz norme HRN EN 1997-2:2012 „Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla“ [34]. U Tablici 8 sadržani su svi ustanovljeni intervali parametara za svaku geotehničku jedinicu.

Tablica 8: Parametri tla dobiveni laboratorijskim ispitivanjem [34]

Geotehnička jedinica	Kut unutarnjeg trenja, $\phi$	Kohezija, $c$	Zapreminska težina, $\gamma$	Uronjena zapreminska težina, $\gamma'$
GJ-1 (Nabačaj)	30,0 - 32,5°	0,0 - 5,0 kN/m <sup>2</sup>	17,0 - 19,0 kN/m <sup>3</sup>	9,5 - 11,5 kN/m <sup>3</sup>
GJ-2 (Kruta glina)	25,0 - 27,5°	12,5 - 15,0 kN/m <sup>2</sup>	18,5 - 19,5 kN/m <sup>3</sup>	8,5 - 9,5 kN/m <sup>3</sup>
GJ-3 (Pijesak)	30,0 - 32,5°	0,0 - 2,0 kN/m <sup>2</sup>	17,5 - 18,5 kN/m <sup>3</sup>	10,0 - 11,0 kN/m <sup>3</sup>
GJ-4 (Šljunak)	32,5 - 37,5°	0,0 kN/m <sup>2</sup>	18,0 - 20,0 kN/m <sup>3</sup>	10,5 - 12,5 kN/m <sup>3</sup>
GJ-5 (Tvrda glina)	20,0 - 25,0°	20,0 - 25,0 kN/m <sup>2</sup>	20,0 - 21,0 kN/m <sup>3</sup>	10,0 - 11,0 kN/m <sup>3</sup>

#### **4.3.5. Podzemna voda**

Temeljem podataka dobivenih istražnim radovima, stalna razina podzemne vode (RPV) na predmetnoj lokaciji utvrđena je na dubinama od 5,50 m do 7,20 m od površine terena, odnosno na nadmorskim visinama od cca 108,40 m n.m. do 109,50 m n.m., a uvjetovana je oborinskim razdobljima i razinom vodostaja u sklopu postojećih korita okolnih uređenih odvodnih kanala i rijeke Save. Međutim, najbliži piezometri u krugu od oko 500 do 800 m od koncertne dvorane „Vatroslav Lisinski“ u proteklih 30 godina bilježe razinu podzemne vode na -3,2 do -3,8 m ispod kote terena, stoga je u proračunima usvojena razina podzemne vode na koti +111,0 m.n.m., odnosno na vrhu sloja šljunka (GJ-4).

Za vrijeme izvedbe radova iskopa razina podzemne vode mora biti uvijek ispod razine iskopa što se postiže kontinuiranim crpljenjem vode iz građevne jame. Obavezno održavanje razine vode ispod kote temeljenja osigurava objekt u odnosu na uzgon tijekom građenja [33].

#### **4.3.6. Geotehnička kategorija**

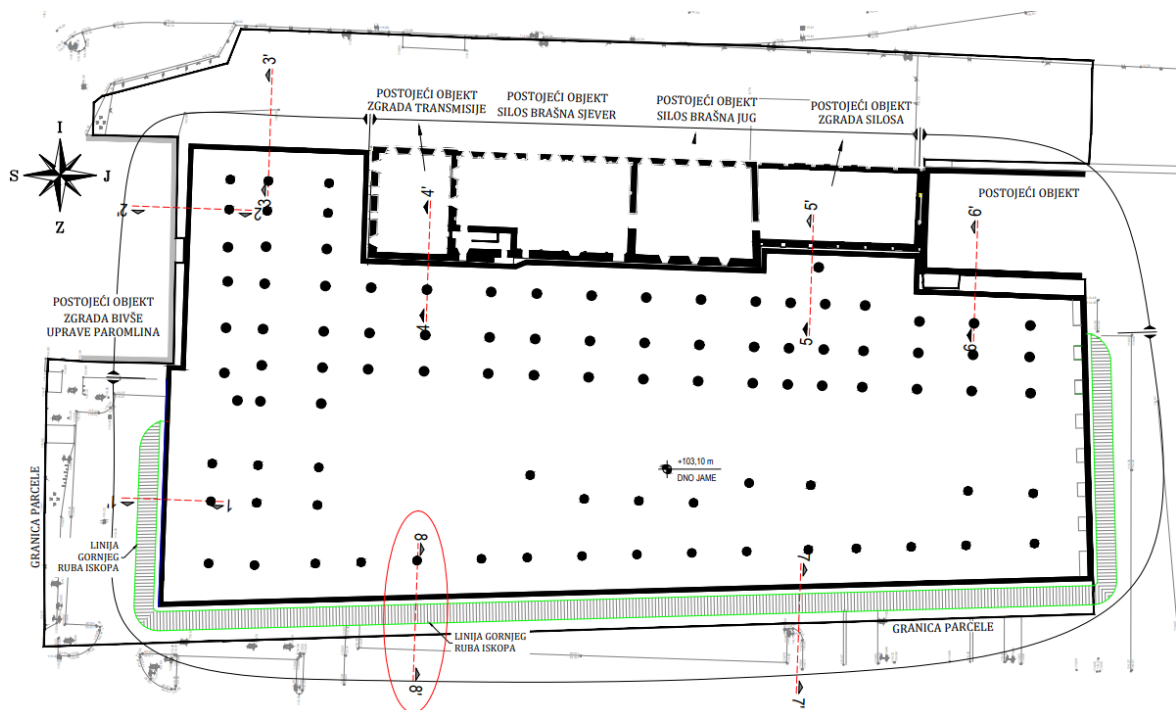
Osiguranje građevne jame svrstano je u geotehničku kategoriju 2 budući da ona obuhvaća uobičajene tipove konstrukcija bez pretjeranog rizika ili izuzetno teških uvjeta u temeljnom tlu ili uvjeta opterećenja. U ovom slučaju, konstrukcija zahtijeva brojčane geotehničke podatke i proračune kako bi se osiguralo da će bitni zahtjevi biti zadovoljeni, uz mogućnost upotrebe rutinskih postupaka za terenske i laboratorijske pokuse, kao i za projektiranje i izvedbu [33].

#### **4.4. Prijedlog osiguranja građevne jame**

Projektom je predviđena zaštita iskopa izvedbom privremene građevne jame. U svrhu ograničenja pomaka i osiguranja stabilnosti pokosa i okolnih građevina na istočnoj strani kompleksa (zgrade transmisije, skladišta brašna i silosa te zgrada bivše uprave Paromlina) potrebno je osmisliti prihvatljivo rješenje i odabrati potpornu konstrukciju koja će zadovoljiti sve uvjete na lokaciji. 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.

## 5. PRORAČUNSKI MODELI I PRORAČUN

Izvedba građevne jame može se podijeliti u dvije zone obuhvata: istočnu i zapadnu. Za razliku od zapadne zone, istočna zona obuhvata uključuje niz kompleksnih rubnih uvjeta, odnosno postojeće zaštićene objekte za koje je neophodno provesti analizu opterećenja zidova i stupova na temelje. Radi pojednostavljenja proračunskog modela, za izradu ovog rada odabrana je zapadna zona obuhvata bez kompleksnih rubnih uvjeta, odnosno poprečni presjek 8-8' koji je mjerodavan i za ostale geotehničke uvjete (Slika 36).



Slika 36: Situacija građevne jame s označenim mjerodavnim poprečnim presjekom 8-8'

Pomoću parametara tla dobivenih istražnim radovima i odabranim parametrima konstrukcija kreiran je proračunski model u programskom paketu PLAXIS 2D v22 (Bentley Systems). Proračun uključuje 7 varijantnih rješenja na mjerodavnom poprečnom presjeku, koja se mogu svrstati u 3 tipa zaštite građevne jame:

- Tip 1 – privremena zaštita građevne jame čeličnim talpama
- Tip 2 – privremena zaštita građevne jame izvedbom pilotske stijene
- Tip 3 – privremena zaštita građevne jame izvedbom armiranobetonske (AB) dijafragme

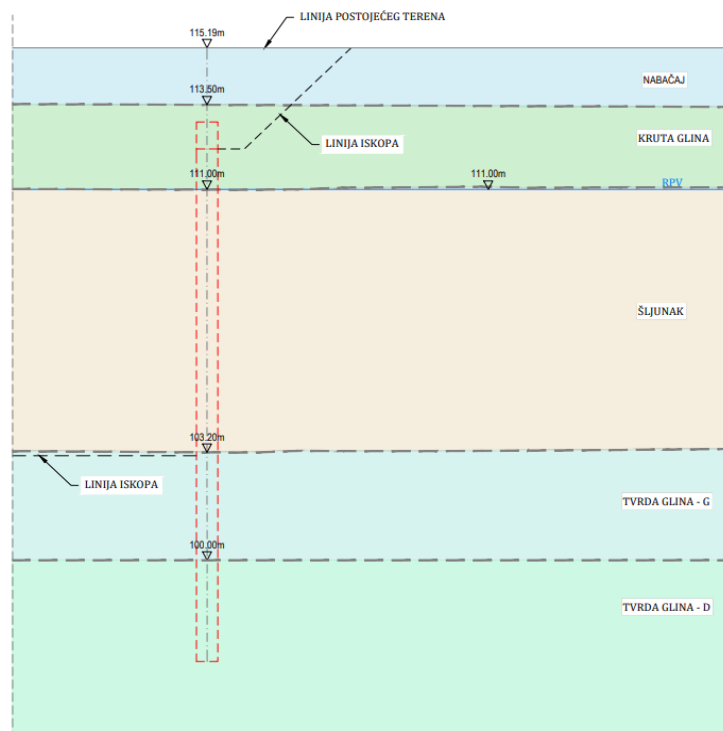
Proračunom je potrebno dokazati mehaničku otpornost i stabilnost građevne jame s ugrađenim elementima zaštite. Analiza naprezanja i deformacija provedena je s karakterističnim vrijednostima parametara dobivenih za granično stanje uporabivosti (GSU). Cilj ove analize je dobiti rezultate pomaka u modelu. Idući korak je provesti analizu stabilnosti modela za kritičnu, posljednju fazu proračuna. Ova analiza koristi proračunske vrijednosti parametara dobivene za granično stanje nosivosti (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.

### **5.1. Geotehnički model**

Dobiveni geotehnički profil je za potrebe proračuna generaliziran. Budući da je debljina GJ-3 (Pijesak) na mjestima zanemarivo mala, njegovi parametri nisu uzeti u obzir, a GJ-5 (Tvrda glina) je zbog svojih svojstava podijeljena u dvije geotehničke jedinice prema horizontima: GJ-5 (Tvrda glina-G) za gornji horizont i GJ-6 (Tvrda glina-D) za donji horizont.

Generalizirani geotehnički profil (Slika 37) na lokaciji sastoji se od sljedećih geotehničkih jedinica, raspoređenih po dubini:

- 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 37: Geotehnički profil u presjeku 8-8'


Proračunski modeli sastoje se od nekoliko osnovnih komponenti: slojeva tla, razine podzemne vode, dva reda geotehničkih sidara i opterećenja na površini terena te potporne konstrukcije. Također, može se reći kako se svaki model sastoji od konstantnih i promjenjivih parametara. Promjenjivi parametri odnose se isključivo na potpornu konstrukciju koja se kroz modele mijenja, dok ostali parametri ostaju nepromjenjivi.

## 5.2. Karakteristične i proračunske vrijednosti parametara


### 5.2.1. Proračun graničnog stanja uporabljivosti

Intervali parametara tla dobiveni istražnim radovima za svaku pojedinu geotehničku jedinicu svode se na konkretne vrijednosti, najčešće iskustveno i neposredno prije samog proračuna. U nastavku se nalaze odabrane karakteristične vrijednosti parametara koje su u radu korištene za analizu naprezanja i deformacija (Tablice 9, 10, 11, 12 i 13).

Tablica 9: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-1 [33]


Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Zapreminska težina	$\gamma_{\text{unsat}}$	19,00	kN/m <sup>3</sup>
Saturirana zapreminska težina	$\gamma_{\text{sat}}$	20,00	kN/m <sup>3</sup>
Kohezija	$c'$	4,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	32,00	°
Kut dilatacije	$\psi$	2,00	°
Moduli deformabilnosti	$E_{50}^{\text{ref}}$	20,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	20,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	60,00E3	kN/m <sup>2</sup>
EkspONENT	$m$	0,50	
Poissonov koeficijent	$\nu_{\text{ur}}$	0,20	
Koeficijent prekonsolidacije	OCR	1,0	
Koeficijent vodopropusnosti	$k$	0,01E-3	m/s
Stanje	dreniran o		
Boja			
Model: Hardening soil			

Tablica 10: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-2 [33]


Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Zapreminska težina	$\gamma_{\text{unsat}}$	19,50	kN/m <sup>3</sup>
Saturirana zapreminska težina	$\gamma_{\text{sat}}$	19,50	kN/m <sup>3</sup>
Kohezija	$c'$	14,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	25,00	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	°
Moduli deformabilnosti	$E_{50}^{\text{ref}}$	10,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	10,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	30,00E3	kN/m <sup>2</sup>
EkspONENT	$m$	0,50	
Poissonov koeficijent	$\nu_{\text{ur}}$	0,20	
Koeficijent prekonsolidacije	OCR	2,0	
Koeficijent vodopropusnosti	$k$	1,0E-9	m/s
Stanje	dreniran o		
Boja			
Model: Hardening soil			




Tablica 11: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-4 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Zapreminska težina	$\gamma_{\text{unsat}}$	20,00	kN/m <sup>3</sup>
Saturirana zapreminska težina	$\gamma_{\text{sat}}$	21,00	kN/m <sup>3</sup>
Kohezija	$c'$	1,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	35,00	°
Kut dilatacije	$\psi$	5,00	°
Moduli deformabilnosti	$E_{50}^{\text{ref}}$	60,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	60,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	180,00E3	kN/m <sup>2</sup>
EkspONENT	$m$	0,50	
Poissonov koeficijent	$\nu_{\text{ur}}$	0,20	
Koeficijent prekonsolidacije	OCR	1,0	
Koeficijent vodopropusnosti	$k$	1,0E-3	m/s
Stanje	dreniran o		
Boja			
Model: Hardening soil			

Tablica 12: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-5 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Zapreminska težina	$\gamma_{\text{unsat}}$	21,00	kN/m <sup>3</sup>
Saturirana zapreminska težina	$\gamma_{\text{sat}}$	21,00	kN/m <sup>3</sup>
Kohezija	$c'$	25,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	23,00	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	°
Moduli deformabilnosti	$E_{50}^{\text{ref}}$	80,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	80,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	240,00E3	kN/m <sup>2</sup>
EkspONENT	$m$	0,50	
Poissonov koeficijent	$\nu_{\text{ur}}$	0,20	
Koeficijent prekonsolidacije	OCR	3,0	
Koeficijent vodopropusnosti	$k$	1,0E-9	m/s
Stanje	drenirano		
Boja			
Model: Hardening soil			

Tablica 13: Karakteristične vrijednosti parametara za GJ-6 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Zapreminska težina	$\gamma_{\text{unsat}}$	21,00	kN/m <sup>3</sup>
Saturirana zapreminska težina	$\gamma_{\text{sat}}$	21,00	kN/m <sup>3</sup>
Kohezija	$c'$	25,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	28,00	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	°
Moduli deformabilnosti	$E_{50}^{\text{ref}}$	80,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	80,00E3	kN/m <sup>2</sup>
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	240,00E3	kN/m <sup>2</sup>
EkspONENT	$m$	0,50	
Poissonov koeficijent	$\nu_{\text{ur}}$	0,20	
Koeficijent prekonsolidacije	OCR	3,0	
Koeficijent vodopropusnosti	$k$	1,0E-9	m/s
Stanje	drenirano		
Boja			
Model: Hardening soil			

Karakteristične vrijednosti kuta unutarnjeg trenja i kohezije za svaku pojedinu geotehničku jedinicu, korištene kao ulazni podaci za proračun u softveru PLAXIS, sumirane su u Tablici 14.

Tablica 14: Karakteristične vrijednosti kuta trenja i kohezije u geotehničkom modelu

Geotehnička jedinica	Kut unutarnjeg trenja, $\varphi$	Kohezija, $c$
GJ-1 (Nabačaj)	32°	4 kN/m <sup>2</sup>
GJ-2 (Kruta glina)	25°	14 kN/m <sup>2</sup>
GJ-4 (Šljunak)	35°	1 kN/m <sup>2</sup>
GJ-5 (Tvrda glina-G)	23°	25 kN/m <sup>2</sup>
GJ-6 (Tvrda glina-D)	28°	25 kN/m <sup>2</sup>

Budući da je cijela zona obuhvata u materijalu tla, stavka „*Material model*“ u softveru PLAXIS, koja se odnosi na ponašanje materijala pod uvjetima opterećenja, postavljena je na „*Hardening soil*“. Usvojena je i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od  $q_k=10,0$  kN/m<sup>2</sup>.

### 5.2.2. Proračun graničnog stanja nosivosti

Karakteristični parametri se reduciraju na proračunske vrijednosti prema projektnom pristupu 3 kako bi se provela analiza stabilnosti. Redukcija se odnosi na parametre  $\varphi'$  i  $c'$  koristeći parcijalne faktore sigurnosti  $\gamma_{\varphi'} = 1,25$  i  $\gamma_{c'} = 1,25$  sukladno HRN EN 1997-1. U Tablicama 15, 16, 17, 18 i 19 prikazane su reducirane vrijednosti parametara za svaku geotehničku jedinicu.

Tablica 15: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-1 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Proračunska vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Kohezija	$c'$	4,00	3,20	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	32,00	26,56	°
Kut dilatacije	$\psi$	2,00	1,60	°

Tablica 16: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-2 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Proračunska vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Kohezija	$c'$	14,00	11,20	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	25,00	20,46	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	0,00	°

Tablica 17: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-4 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Proračunska vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Kohezija	$c'$	1,00	0,80	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	35,00	29,26	°
Kut dilatacije	$\psi$	5,00	4,00	°

Tablica 18: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-5 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Proračunska vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Kohezija	$c'$	25,00	20,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	23,00	18,76	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	0,00	°

Tablica 19: Redukcija vrijednosti parametara za GJ-6 [33]

Svojstvo	Simbol	Karakteristična vrijednost parametra	Proračunska vrijednost parametra	Mjerna jedinica
Kohezija	$c'$	25,00	20,00	kN/m <sup>2</sup>
Kut unutarnjeg trenja	$\varphi'$	28,00	23,04	°
Kut dilatacije	$\psi$	0,00	0,00	°

Sumirane proračunske vrijednosti za sve geotehničke jedinice prikazane su Tablicom 20.

Tablica 20: Proračunske vrijednosti kuta trenja i kohezije u geotehničkom modelu

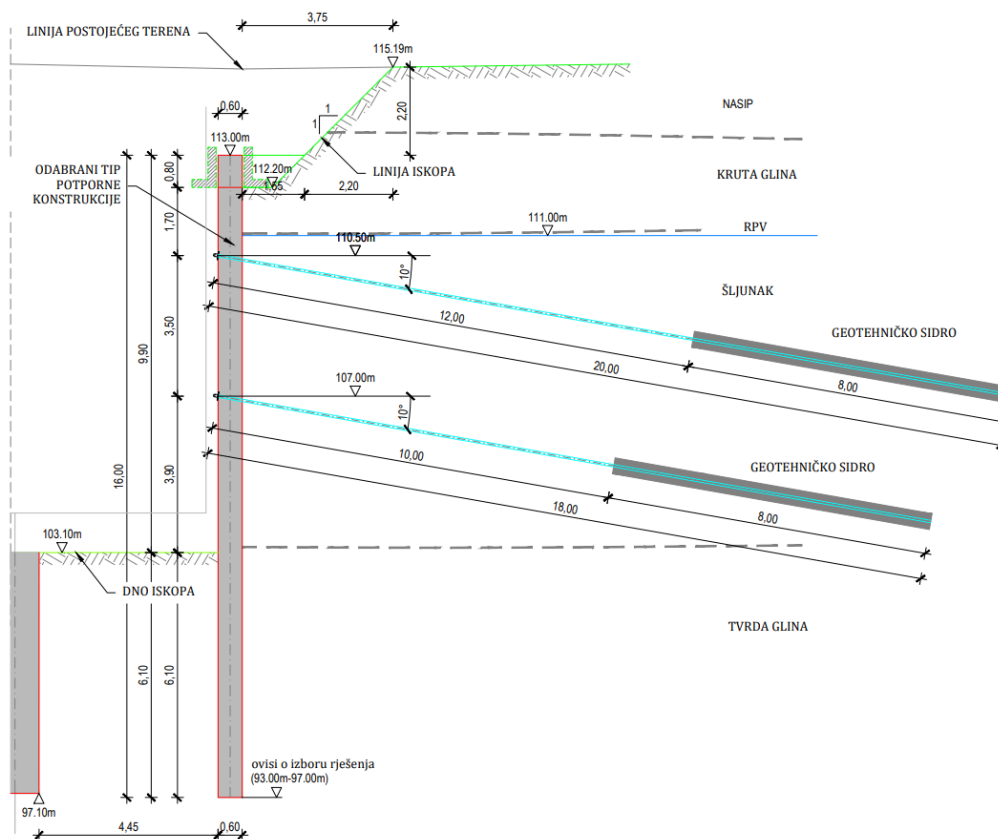
Geotehnička jedinica	Kut unutarnjeg trenja, $\varphi$	Kohezija, $c$
GJ-1 (Nabačaj)	25,6°	3,2 kN/m <sup>2</sup>
GJ-2 (Kruta glina)	20,0°	11,2 kN/m <sup>2</sup>
GJ-4 (Šljunak)	28,0°	0,8 kN/m <sup>2</sup>
GJ-5 (Tvrda glina-G)	18,4°	20,0 kN/m <sup>2</sup>
GJ-6 (Tvrda glina-D)	22,4°	20,0 kN/m <sup>2</sup>

Vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja je u ovom dijelu proračuna pomnožena s parcijalnim faktorom  $\gamma_Q=1,30$  pa iznosi  $q_{ed}=13,0$  kN/m<sup>2</sup>.

Karakteristike elemenata konstrukcije korištenih u proračunu dane su u idućim poglavljima. Sva tri tipa konstrukcija modelirana su kao „Plate“ elementi koji predstavljaju 2D modele tankih ploča i omogućuju simulaciju svih vrsta opterećenja kojima su inače podložni tanki strukturni elementi.

### 5.3. Faze izvedbe

Cilj je na mjerodavnom poprečnom presjeku, prikazanom na Slici 38, smjestiti odgovarajuću potpornu konstrukciju i proračunima doći do prihvatljivog rješenja.



Slika 38: Mjerodavan poprečni presjek 8-8'

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.

#### 5.4. Pregled provedenih proračuna

Privremena zaštita građevinske jame „Tip 1“ predviđa ugradnju čeličnih talpi tipa Larssen različitih poprečnih presjeka i krutosti. Prikazati će se ukupno tri moguća rješenja zaštite čeličnim talpama: Tip 1-1, Tip 1-2 i Tip 1-3.

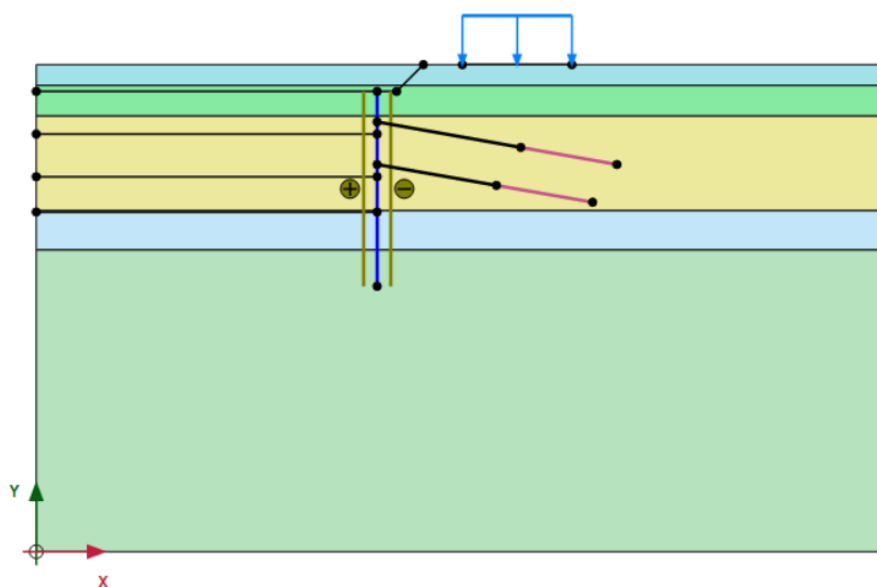
Privremena zaštita „Tip 2“ predviđa izvedbu tangentne pilotske stijene od betona razreda tlačne čvrstoće C30/37. Prikazati će se tri moguća rješenja zaštite pilotskom stijenom: Tip 2-1, Tip 2-2 i Tip 2-3. Svi tipovi bitno se razlikuju prema svojoj geometriji (promjer i duljina), koja utječe i na ostale parametre.

Privremena zaštita „Tip 3“ predviđa izvedbu armiranobetonske dijafragme od betona razreda tlačne čvrstoće C30/37 i prikazati će se kao Tip 3-1. Ovaj diplomski rad obrađuje ukupno 7 varijantnih osiguranja građevne jame za koje je dana Tablica 21 s opisom odabranih vrsta potpornih konstrukcija.

Tablica 21: Pregled i opis varijantnih rješenja

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 $\phi 800$ i duljine d=20 m
		Tip 2-2 Pilotska stijena promjera $\phi 800$ i duljine d=16 m
		Tip 2-3 Pilotska stijena promjera $\phi 600$ 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 39 prikazan je osnovni oblik proračunskog modela u softveru PLAXIS 2D. Svakom proračunskom modelu su zajednički spomenuti parametri tla na dijelu presjeka 8-8', razina podzemne vode na koti +111,00 m.n.m., promjenjivo prometno opterećenje iza građevne jame  $q=10,0 \text{ kN/m}^2$  i geotehnička sidra koja se ugrađuju na kotama +110,50 m.n.m. i +107,00 m.n.m.




Slika 39: Proračunski model u softveru PLAXIS 2D

Prvi red sidara na koti +110,50 m.n.m. se priteže na silu  $P_0=450,0 \text{ kN}$ , a drugi red sidara na koti +107,00 m.n.m. se priteže na silu  $P_0=550,0 \text{ kN}$ . Horizontalni razmak između sidara iznosi 2,5 m, a ostale vrijednosti parametara dane su Tablicama 22 i 23 [33].

Tablica 22: Parametri geotehničkog kabelskog sidra - slobodna dionica [33]

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA	1,46E+05	kN
Razmak	L <sub>spacing</sub>	2,5	m
Boja			

Tablica 23: Parametri geotehničkog kabelskog sidra - sidrišna dionica [33]

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Modul elastičnosti	E	2,07E+06	kN/m <sup>2</sup>
Razmak	L <sub>spacing</sub>	2,8	m
Promjer	D	0,3	m
Površina presjeka	A	0,07069	m <sup>2</sup>
Boja			



## 5.5. Proračun građevne jame – Tip 1

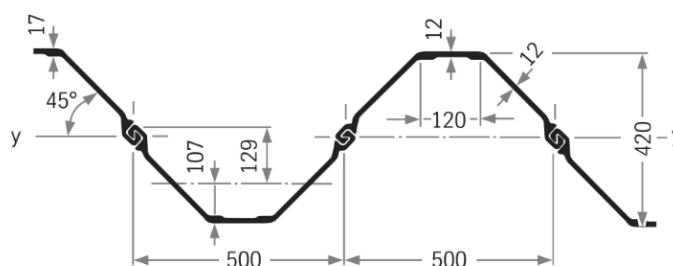
Za „Tip 1“ proračuna građevne jame provedena su ukupno 3 proračuna. Vrsta čeličnih talpi proizvoljno je odabrana s ciljanom što većom težinom i površinom poprečnog presjeka kako bi aksijalna krutost i krutost na savijanje bile što veće. Svi tipovi obuhvaćaju čelične talpe Larssen modula elastičnosti 210 GPa. Dostupne su u različitim veličinama i profilima, a duljine mogu biti prilagođene zavarivanjem prema potrebama projekta. Osnovne karakteristike Larssen čeličnih talpi, dane u Tablici 24, preuzete su iz kataloga [35] te su pomoću njih za potrebe proračuna dobivene krutosti EA i EI za sve tri varijante.

Tablica 24: Specifikacije Larssen čeličnih talpi [35]

Vrsta Larssen talpi	Moment otpora W [cm <sup>3</sup> ]	Vlastita težina w [kg/m]	Vlastita težina w [kN/m]	Površina poprečno g presjeka A [m <sup>2</sup> ]	Moment inercije I <sub>y</sub> [m <sup>4</sup> ]	EA [kN/m]	EI [kNm <sup>2</sup> /m]
Larssen 43	1660	166	1,628	0,0212	0,000349	4452000,00	73290,00
Larssen 430	6450	234,5	2,300	0,02994	0,002418	6287400,00	507780,00
Larssen 605	2020	139,2	1,365	0,01773	$\frac{0,000424}{2}$	3723300,00	89082,00

### 5.5.1. Tip 1-1

Tip 1-1 obuhvaća čelične talpe Larssen 43 (Slika 40) debljine stijenke 12,0 mm i duljine 16,0 m. Pobijaju se 6,1 m u tvrdu glinu i na taj način tvore nepropusnu barijeru. U Tablici 25 prikazani su dobiveni parametri potrebni za proračun ovog tipa.



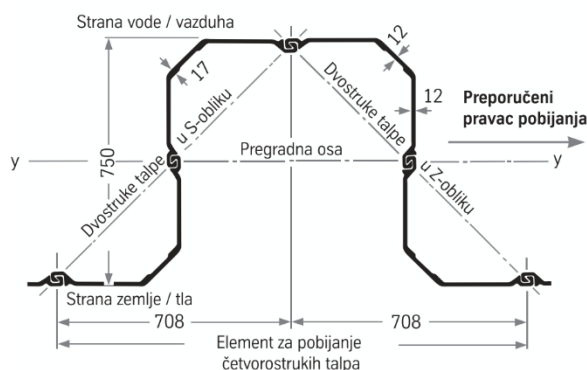
Slika 40: Čelične talpe Larssen 43 [35]

Tablica 25: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 43 (Tip 1-1)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	4,452E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	4,452E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	73,29E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,4445	m
Težina	w	1,628	kN/m/m
Boja			

### 5.5.2. Tip 1-2

Tip 1-2 obuhvaća čelične talpe Larssen 430 (Slika 41) čija duljina također iznosi 16,0 m, kao i debljina stijenke 12,0 mm. Pobijaju se 6,1 m u tvrdu glinu i na taj način tvore nepropusnu barijeru. U Tablici 26 sadržani su dobiveni parametri potrebni za proračun ovog tipa.



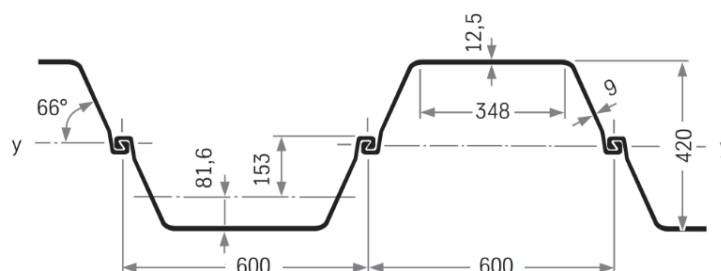
Slika 41: Čelične talpe Larssen 430 [35]

Tablica 26: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 430 (Tip 1-2)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	6,287E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	6,287E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	507,8E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,9844	m
Težina	w	2,30	kN/m/m
Boja			

### 5.5.3. Tip 1-3

Tip 1-3 obuhvaća čelične talpe Larssen 605 (Slika 42) duljine 16,0 m i debljina stijenke 12,5 mm. Kao i kod prethodna dva tipa, čelične talpe se pobijaju 6,1 m u tvrdu glinu. Dobiveni parametri za proračun prikazani su u Tablici 27.



Slika 42: Čelične talpe Larssen 605 [35]

Tablica 27: Vrijednosti parametara čeličnih talpi Larssen 605 (Tip 1-3)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	3,723E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	3,723E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	89,08E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,5358	m
Težina	w	1,365	kN/m/m
Boja			

## 5.6. Proračun građevne jame – Tip 2

Za „Tip 2“ proračuna građevne jame također su provedena ukupno 3 proračuna, prikazana u nastavku.

### 5.6.1. Tip 2-1

Tip 2-1 uključuje pilote promjera 0,8 m koji se međusobno tangiraju i na taj način tvore nepropusnu barijeru. Duljina pilota iznosi 20,0 m, a čak 50,5% (10,1 m) njihove duljine

je položeno u tvrdu glinu (GJ-5 i GJ-6) kako bi se osigurala dovoljna nosivost i stabilnost iste. U Tablici 28 su prikazane vrijednosti parametara korištenih u proračunu.

Tablica 28: Vrijednosti parametara pilotske stijene promjera  $\varphi 800$  (Tip 2-1, Tip 2-2)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	18,85E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	18,85E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	754,0E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,693	m
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,15	
Težina	w	3,142	kN/m/m
Boja			

### 5.6.2. Tip 2-2

Druga varijanta zaštite pilotskom stijenom odnosi se na Tip 2-2 i uključuje pilote istog promjera 0,8 m, no različite duljine. Duljina pilota je postavljena na 16,0 m poput dužine čeličnih talpi. U ovom slučaju je 38% (6,1 m) njihove duljine položeno u tvrdu glinu. Vrijednosti parametara za Tip 2-2 korištenih u proračunu jednake su prethodnima za Tip 2-1 zbog nepromijenjenog promjera pilota, prikazanih u Tablici 28.

### 5.6.3. Tip 2-3

Tip 2-3 uključuje pilote najmanjeg promjera i najmanje dužine. Radi bolje usporedbe rezultata, promjer pilota od 0,6 m se usklađuje s debljinom armiranobetonske dijafragme koja je opisana u idućem poglavlju. Duljina u ovom slučaju ostaje 16,0 m kao u prethodnoj varijanti, a time i postotak pilota koji je položen u tvrdu glinu. Vrijednosti parametara prikazane su u Tablici 29.

Tablica 29: Vrijednosti parametara pilotske stijene promjera  $\varphi 600$  (Tip 2-3)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	14,14E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	14,14E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	318,1E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,519	m
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,15	
Težina	w	2,356	kN/m/m
Boja			

## 5.7. Proračun građevne jame – Tip 3

### 5.7.1. Tip 3-1

Posljednja varijanta predstavlja AB dijafragmu debljine 0,6 m i duljine 16,0 m poput čeličnih talpi i dvije varijante zaštite pilotskom stijenom. U daljnjem tekstu, ova varijanta će biti prikazana kao Tip 3-1, a njezini parametri dani su Tablicom 30.

Tablica 30: Vrijednosti parametara AB dijafragme (Tip 3-1)

Svojstvo	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Aksijalna krutost	EA1	18,0E6	kN/m
Aksijalna krutost	EA2	18,0E6	kN/m
Krutost na savijanje	EI	540,0E3	kN m <sup>2</sup> /m
Ekvivalentna debljina	d	0,60	m
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,15	
Težina	w	3,00	kN/m/m
Boja			

## 6. REZULTATI I USPOREDBA REZULTATA

Analiza naprezanja i deformacija kao i analiza stabilnosti provedene su za sva prethodno opisana varijantna rješenja. Njima su dobivene vrijednosti pomaka tla, konstrukcija, momenata savijanja i poprečnih sila te položaj i izgled klizne plohe za kritičnu fazu. Kritičnom fazom se smatra posljednja, 7. faza, 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  $F_s=1,0$ .

Međusobno su sva varijantna rješenja uspoređena s obzirom na vrijednosti pomaka tla i konstrukcija u modelu, a potom i s obzirom na momente savijanja i poprečne sile koje se u odabranoj konstrukciji javljaju. Momenti savijanja i poprečne sile proračunate su za sva granična stanja (GSU i GSN) budući da se u praksi ista koriste za dimenzioniranje potporne konstrukcije.

U nastavku su prikazani rezultati proračuna za posljednju, mjerodavnu fazu.

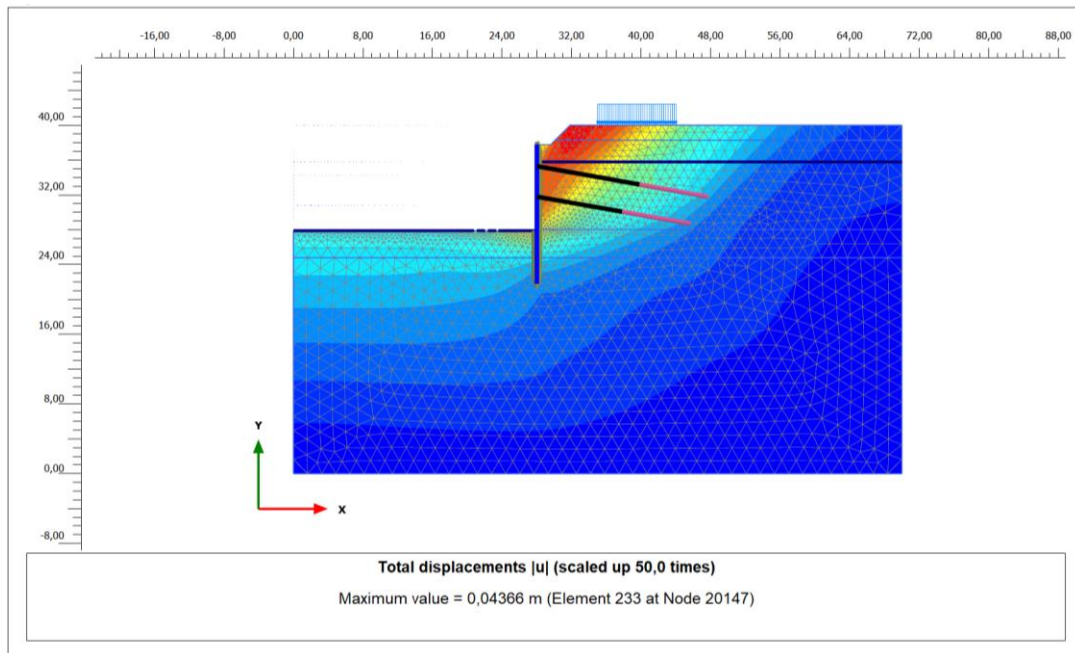
### 6.1. Rezultati proračuna – Tip 1

#### 6.1.1. Tip 1-1

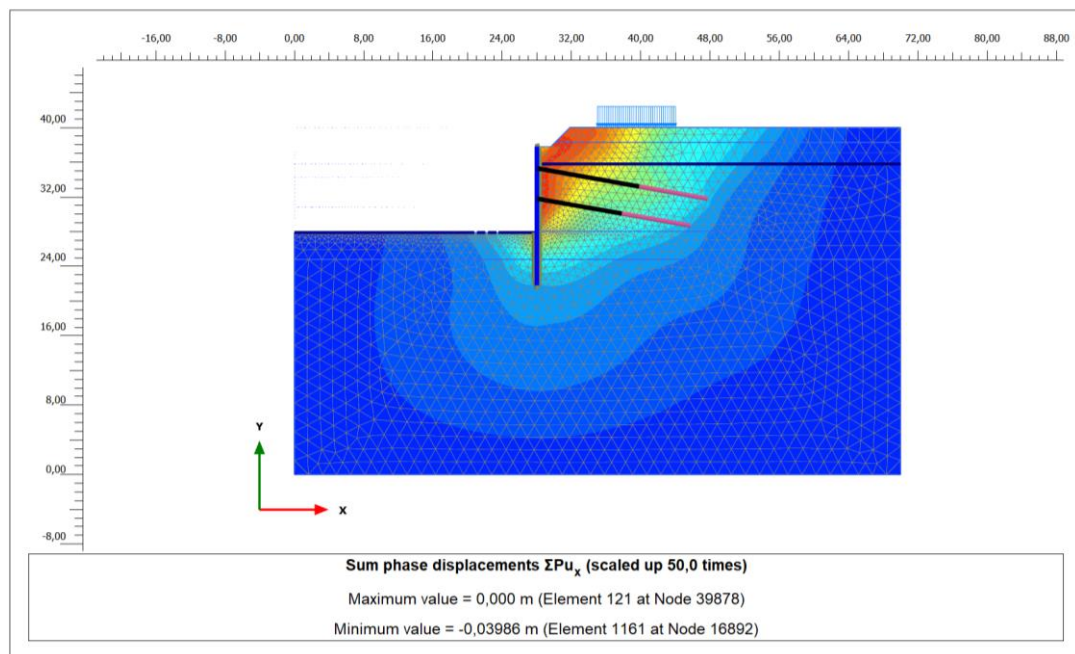
U analizi naprezanja i deformacija za Tip 1-1 korištene su projektom definirane karakteristične vrijednosti parametara tla, prikazanih u Poglavlju 5.2 i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od  $q_k=10,0 \text{ kN/m}^2$ . Rezultati analize su pomaci tla i konstrukcije. U nastavku su grafički prikazani ukupni pomaci u modelu, pomaci modela u x smjeru i ukupni pomaci čeličnih talpi Larssen 43 u x smjeru.

Na Slici 43 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|u|=0,04366 \text{ m}$ , odnosno 4,37 cm, dok su na Slici 44 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum P u_x=0,03986 \text{ m}$ , odnosno oko 4,0 cm. Prema Slici 45

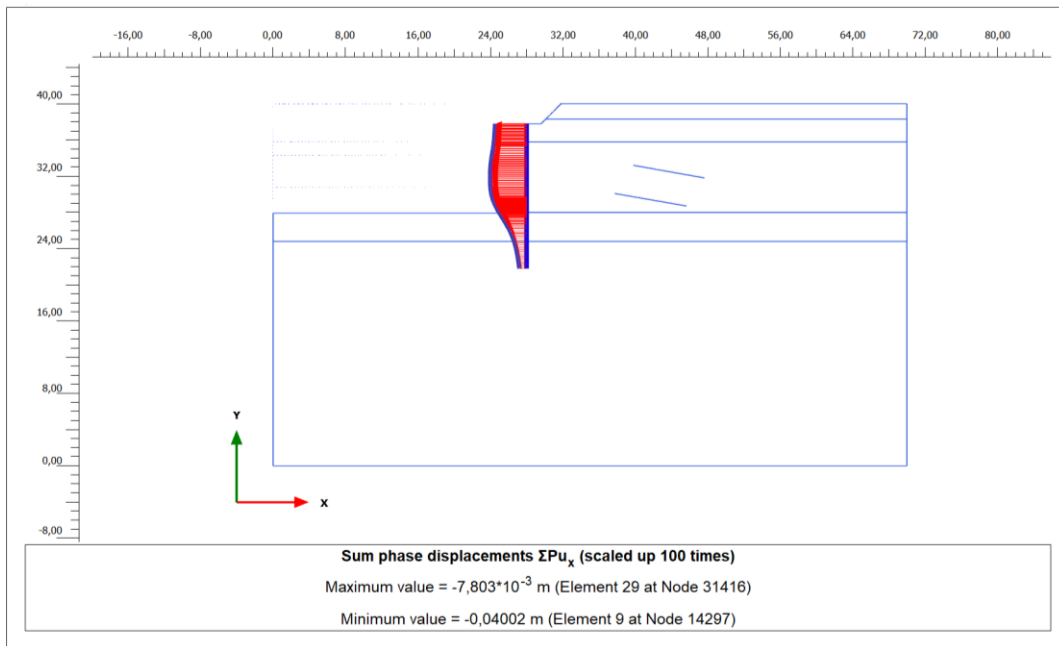
ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru dosežu vrijednost od čak  $\sum Pu_x = 0,0402$  m, što je oko 4,0 cm.



Slika 43: Ukupni pomaci modela za Tip 1-1

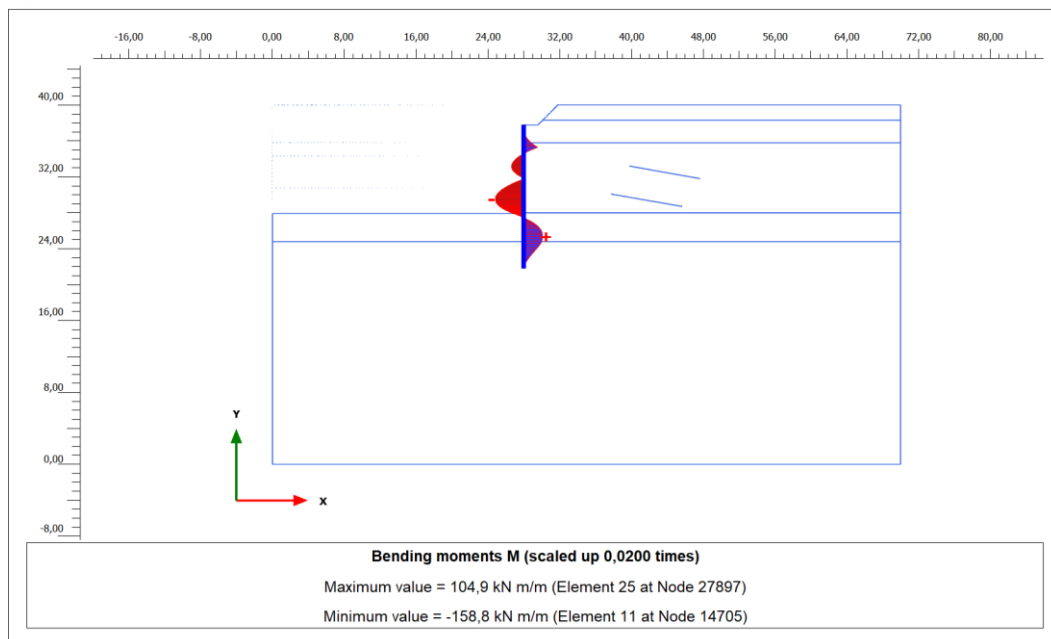


Slika 44: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-1



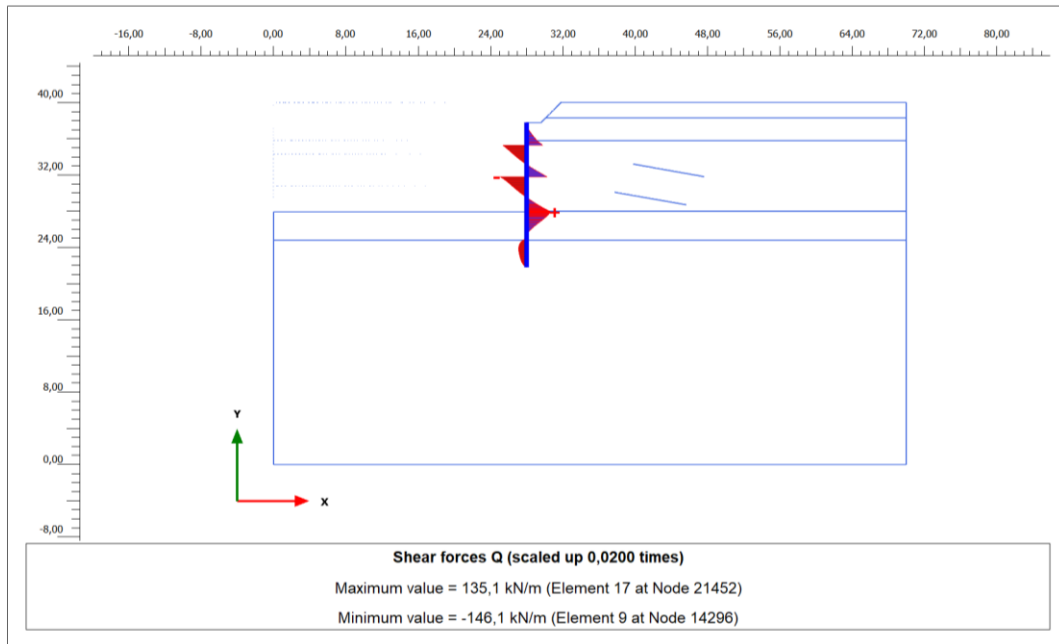
Slika 45: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-1

U nastavku (Slike 46 i 47) prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u čeličnim talpama dobiveni u sklopu ove analize korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla za GSU. Maksimalni moment u čeličnoj talpi Larssen 43 iznosi  $M_{\max} = 158,8 \text{ kNm/m}'$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max} = 146,1 \text{ kN/m}'$ .



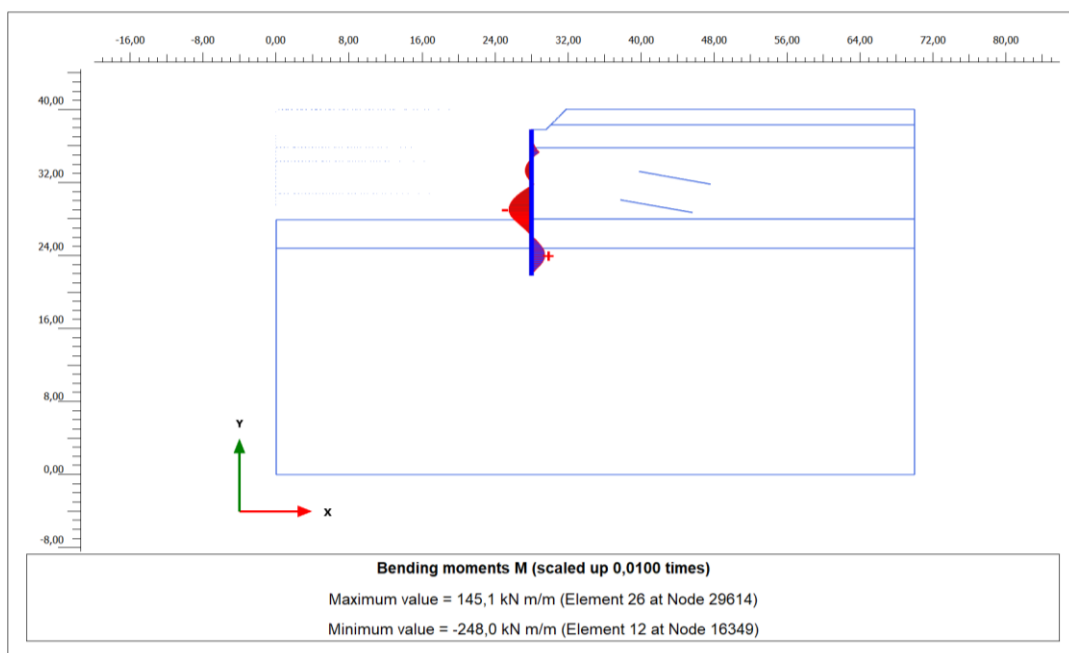
Slika 46: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSU)



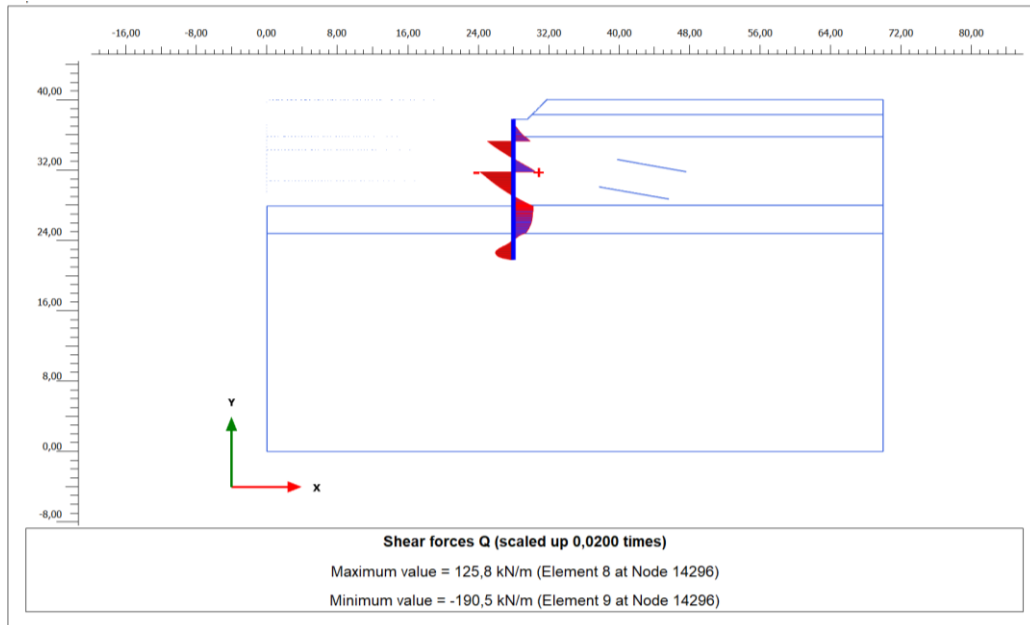


Slika 47: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSU)

Prema projektnom pristupu 3 (PP3), karakteristične vrijednosti su svedene na proračunske vrijednosti parametara tla i proračunom su dobiveni momenti savijanja i poprečne sile u čeličnim talpama za GSN, prikazani na Slikama 48 i 49. Maksimalni zabilježeni moment u čeličnoj talpi Larssen 43 iznosi  $M_{max}=248,0 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{max}=190,5 \text{ kN/m'}$ .

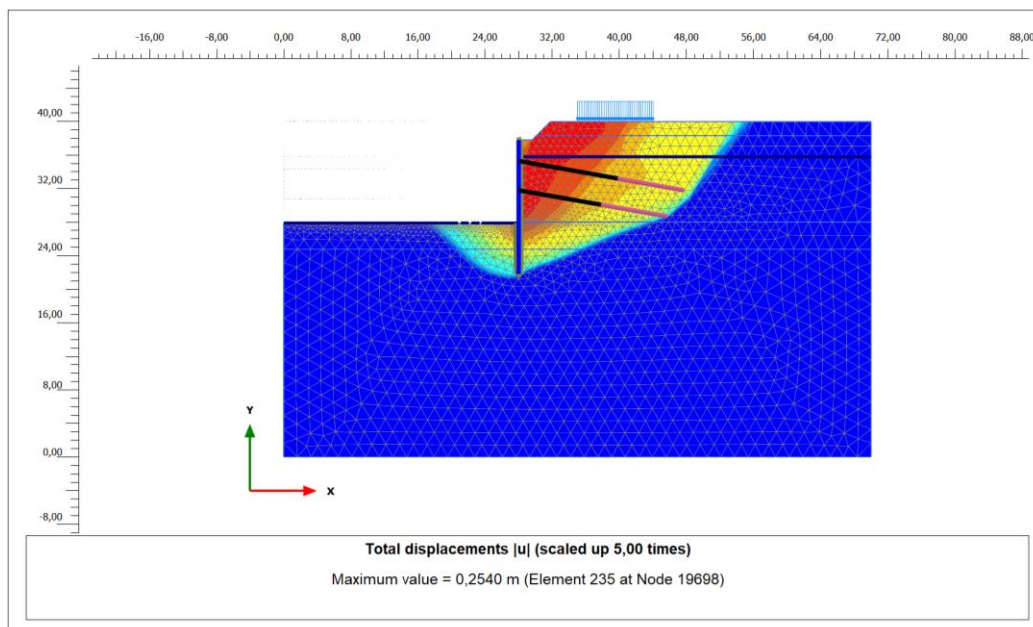


Slika 48: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSN)



Slika 49: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-1 (GSN)

Analiza stabilnosti je provedena s proračunskim vrijednostima parametara tla i prometnog opterećenja. Prema Slici 50, klizna ploha obuhvaća značajan dio okolnog tla i prolazi kroz sve geotehničke jedinice. Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi **Fs=1,148** i time zadovoljava uvjet stabilnosti.

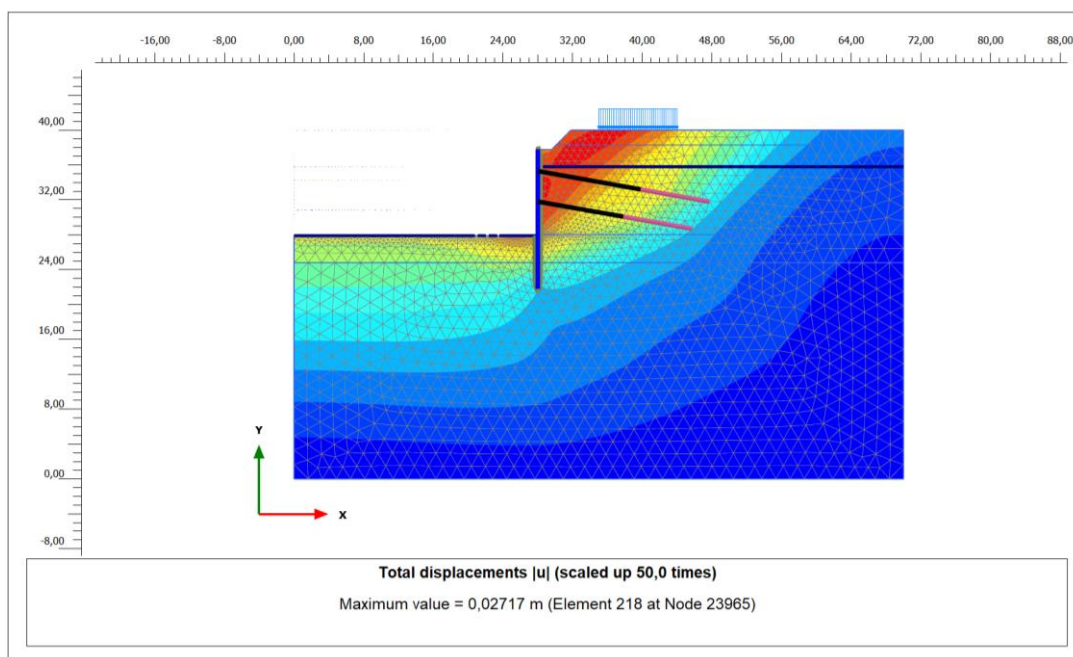


Slika 50: Klizna ploha dobivena za Tip 1-1

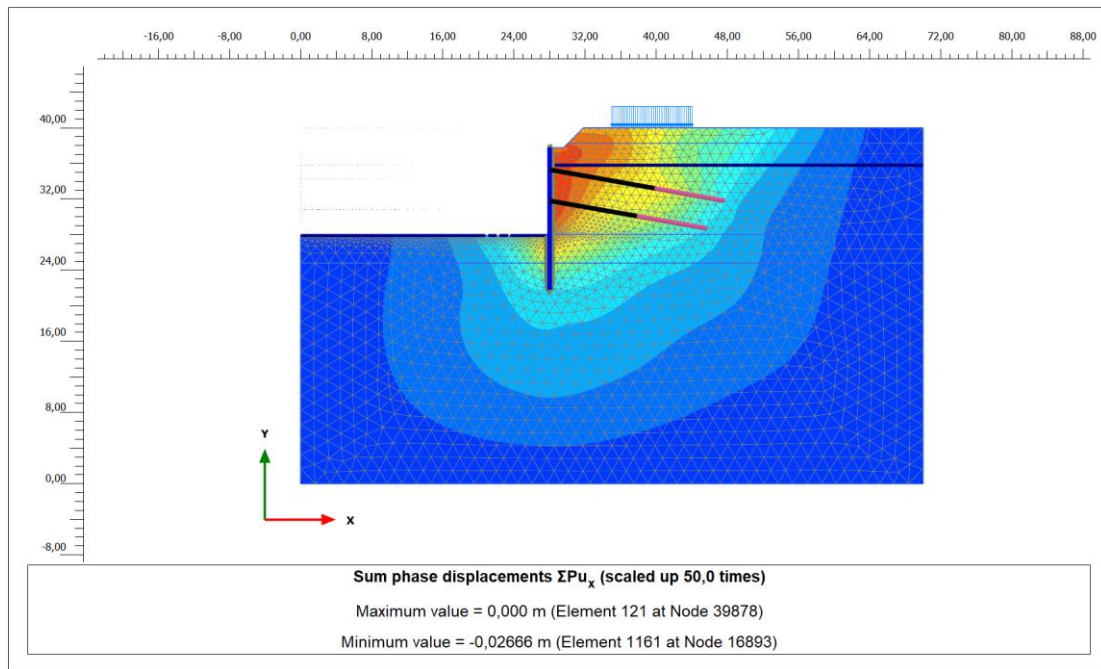
### 6.1.2. Tip 1-2

Kao i kod prethodne varijante, u analizi naprezanja i deformacija za Tip 1-2 korištene su projektom definirane karakteristične vrijednosti parametara tla (Poglavlje 5.2) i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od  $q_k=10,0 \text{ kN/m}^2$ . U nastavku su grafički prikazani ukupni pomaci u modelu, pomaci modela u x smjeru i ukupni pomaci čeličnih talpi Larssen 430 u x smjeru.

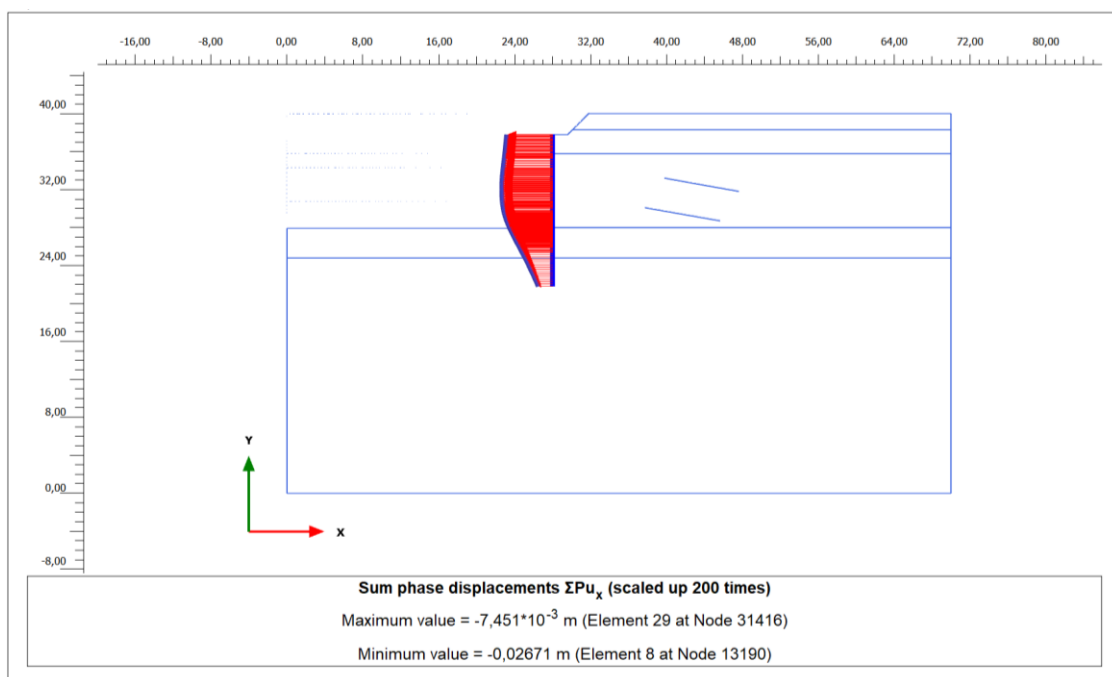
Na Slici 51 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|\mathbf{u}|=0,02717 \text{ m}$ , odnosno 2,72 cm, dok su na Slici 52 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum \mathbf{P}u_x=0,02666 \text{ m}$ , odnosno oko 2,67 cm. Prema Slici 53 ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru iznose čak  $\sum \mathbf{P}u_x=0,02671 \text{ m}$ , što je također oko 2,67 cm.



Slika 51: Ukupni pomaci modela za Tip 1-2

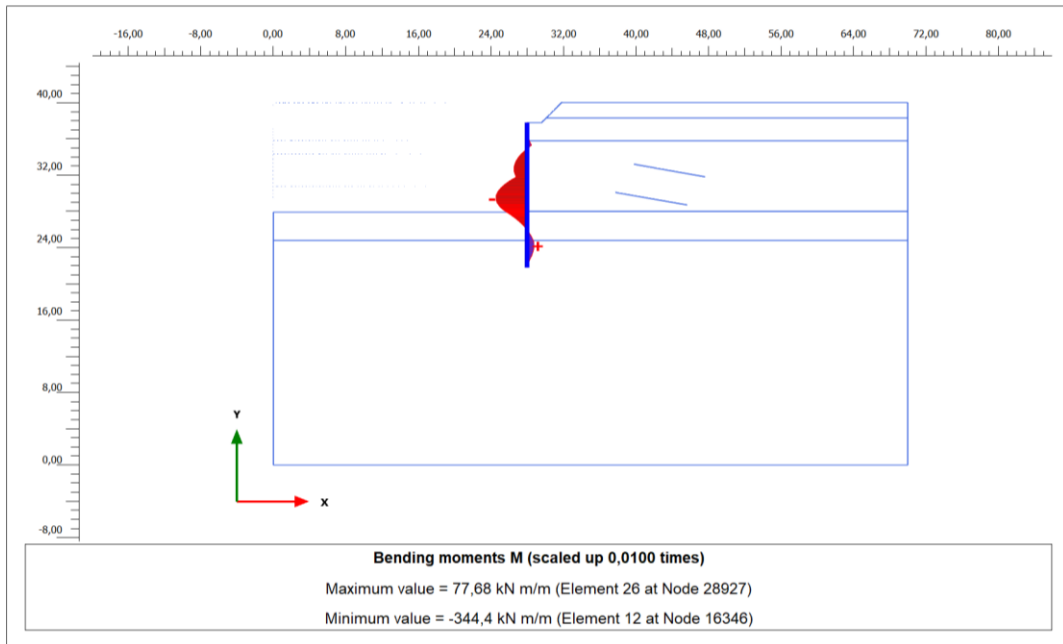


Slika 52: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-2

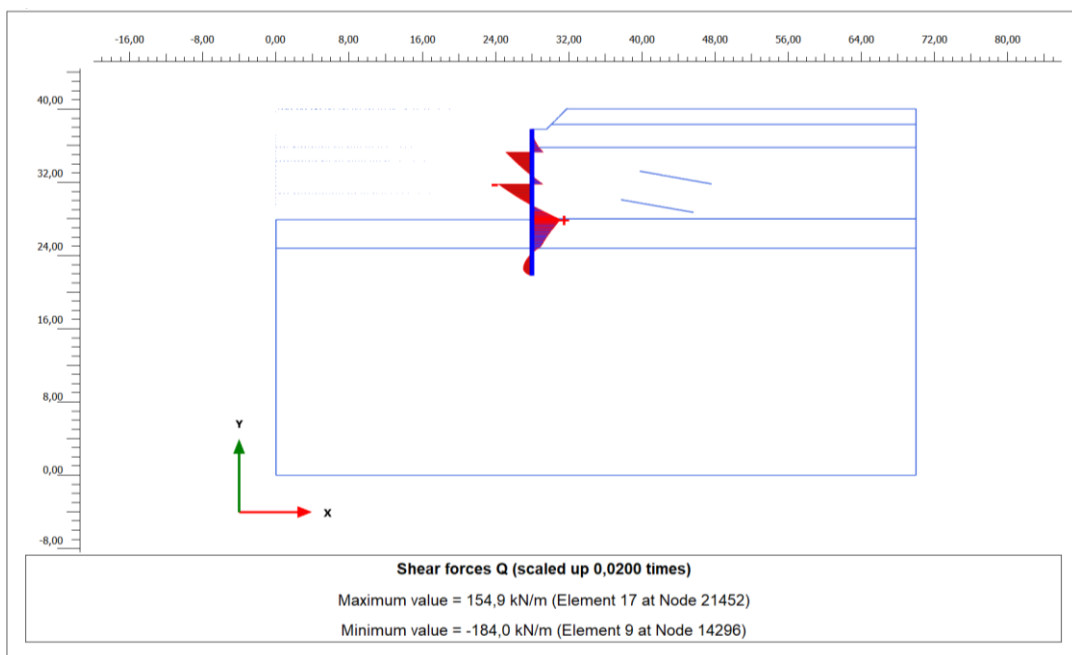


Slika 53: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-2

Na Slikama 54 i 55 u nastavku prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u čeličnim talpama dobiveni korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla za GSU. Maksimalni zabilježeni moment u čeličnoj talpi Larssen 430 iznosi  $M_{\max}=344,4$  **kNm/m'**, a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=184,0$  **kN/m'**.

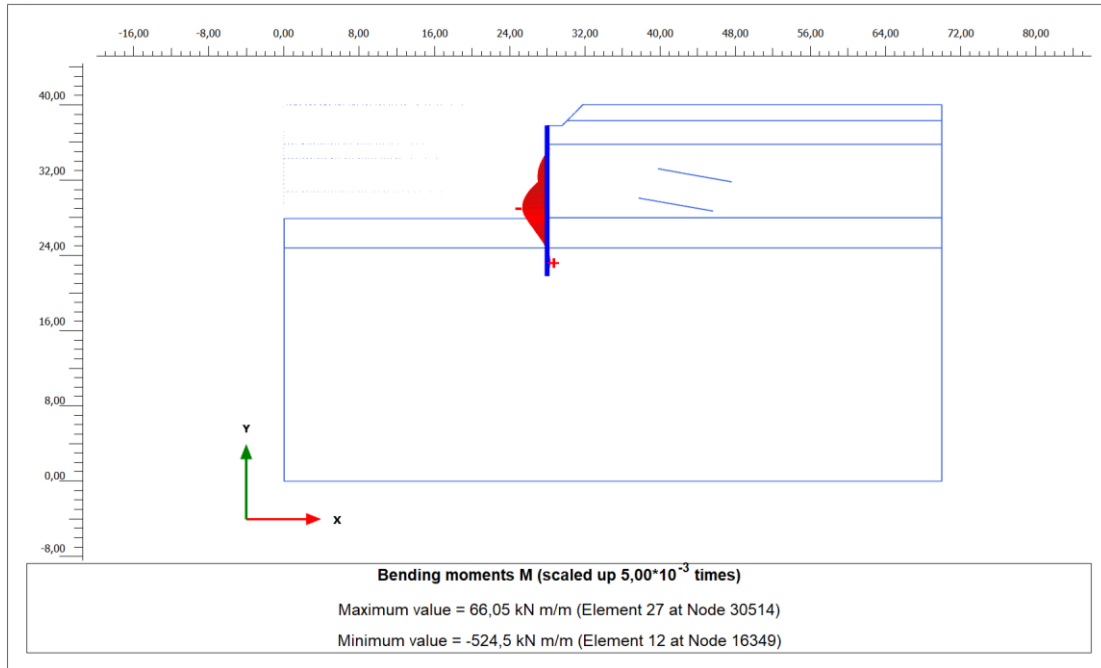


Slika 54: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSU)

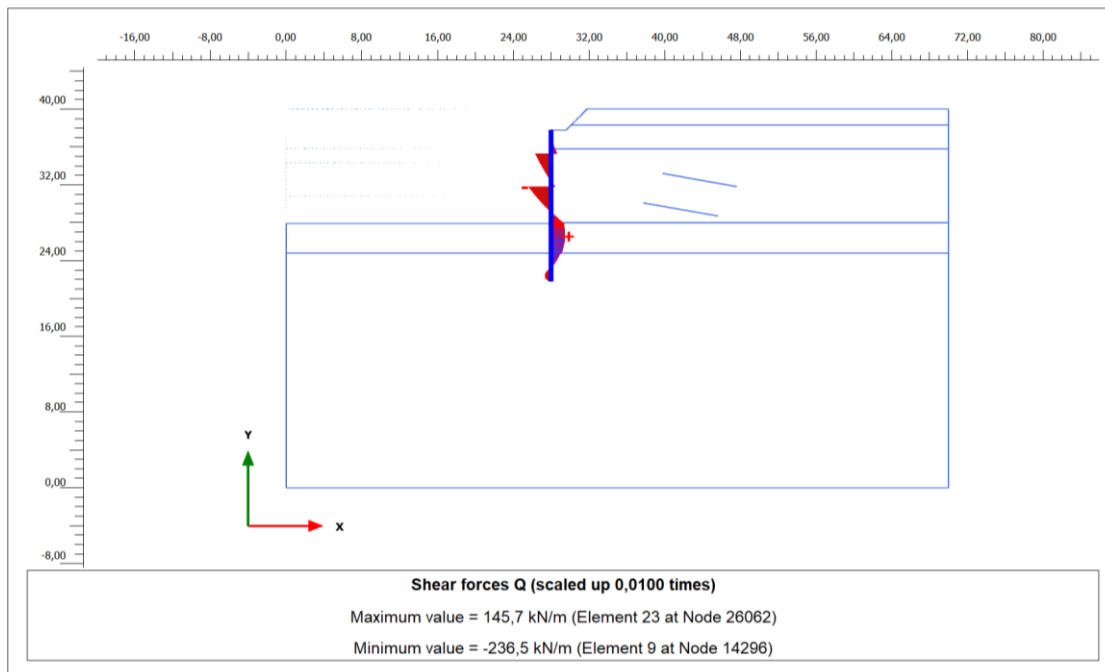


Slika 55: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSU)

Karakteristične vrijednosti su prema PP3 svedene na proračunske i dobiveni su momenti savijanja i poprečne sile u čeličnim talpama za GSN, prikazani na Slikama 56 i 57 . Maksimalni zabilježeni moment u čeličnoj talpi Larssen 430 iznosi  $M_{\max}=524,5$  **kNm/m'**, a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=236,5$  **kN/m'**.

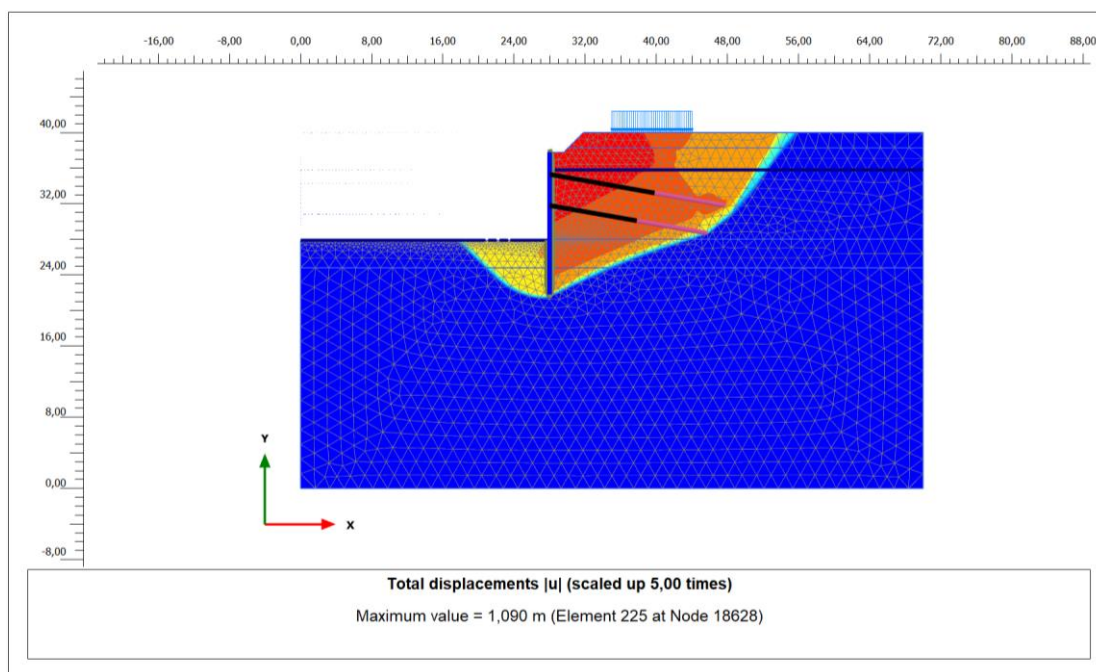


Slika 56: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSN)



Slika 57: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-2 (GSN)

Analiza stabilnosti je provedena s proračunskim vrijednostima parametara tla i prometnog opterećenja. Prema Slici 58, klizna ploha i u ovom slučaju obuhvaća značajan dio okolnog tla i prolazi kroz sve geotehničke jedinice. Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi  **$F_s=1,143$**  i time također zadovoljava uvjet stabilnosti.



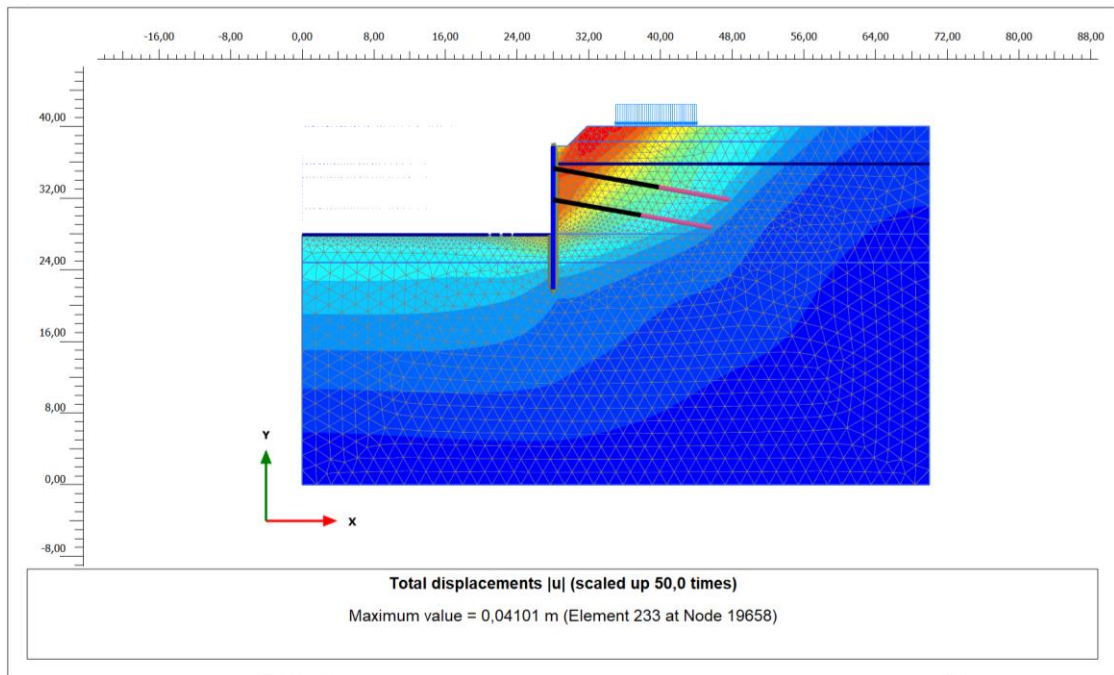
Slika 58: Klizna ploha dobivena za Tip 1-2

### 6.1.3. Tip 1-3

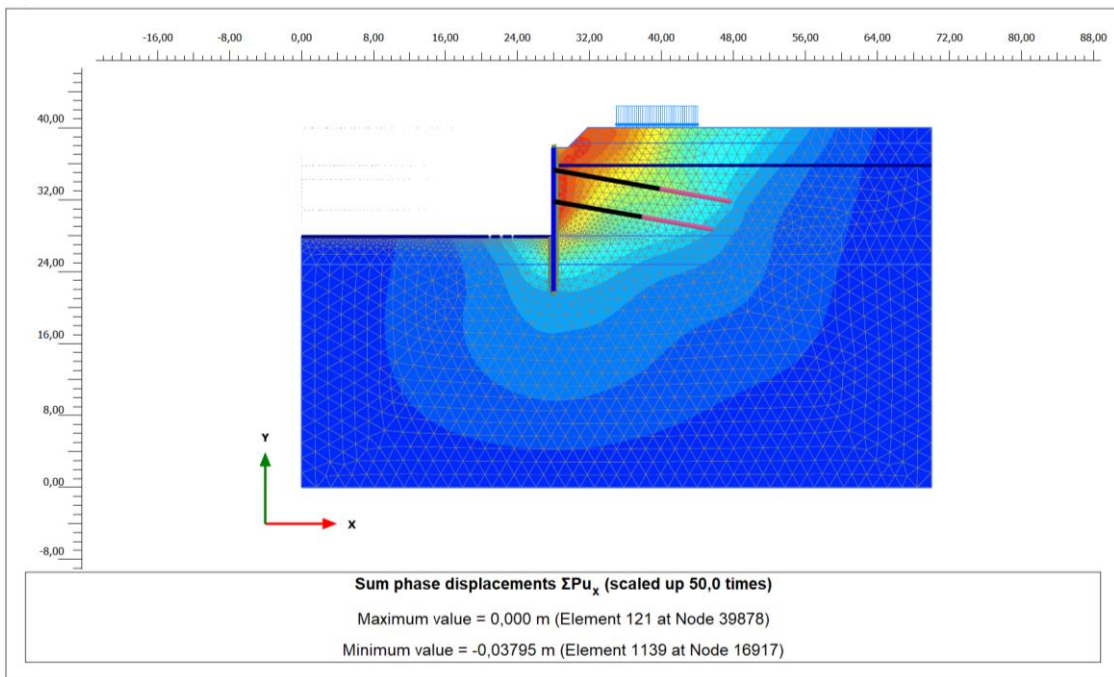
Kao i u prethodna dva slučaja, u analizi naprezanja i deformacija za Tip 1-3 korištene su projektom definirane karakteristične vrijednosti parametara tla prikazanih (Poglavlje 5.2) i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od  $q_k=10,0 \text{ kN/m}^2$ . U nastavku slijede grafički prikazi ukupnih pomaka u modelu, pomaka modela u x smjeru i ukupnih pomaka čeličnih talpi Larssen 605 u x smjeru.

Na Slici 59 prikazani su ukupni pomaci modela s maksimalnim pomakom  **$|u|=0,04101 \text{ m}$** , odnosno 4,10 cm, dok su na Slici 60 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  **$\sum P u_x=0,03795 \text{ m}$** , odnosno oko 3,80 cm. Prema Slici 61 ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru dosežu vrijednost od  **$\sum P u_x=0,03808 \text{ m}$** , odnosno 3,81 cm.



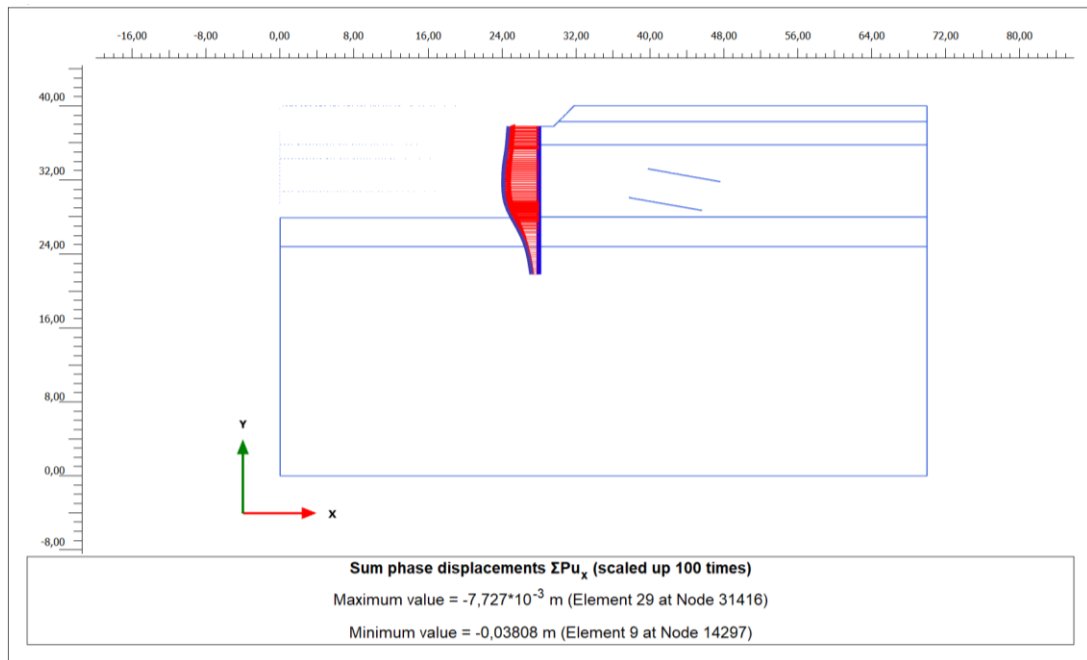


Slika 59: Ukupni pomaci modela za Tip 1-3



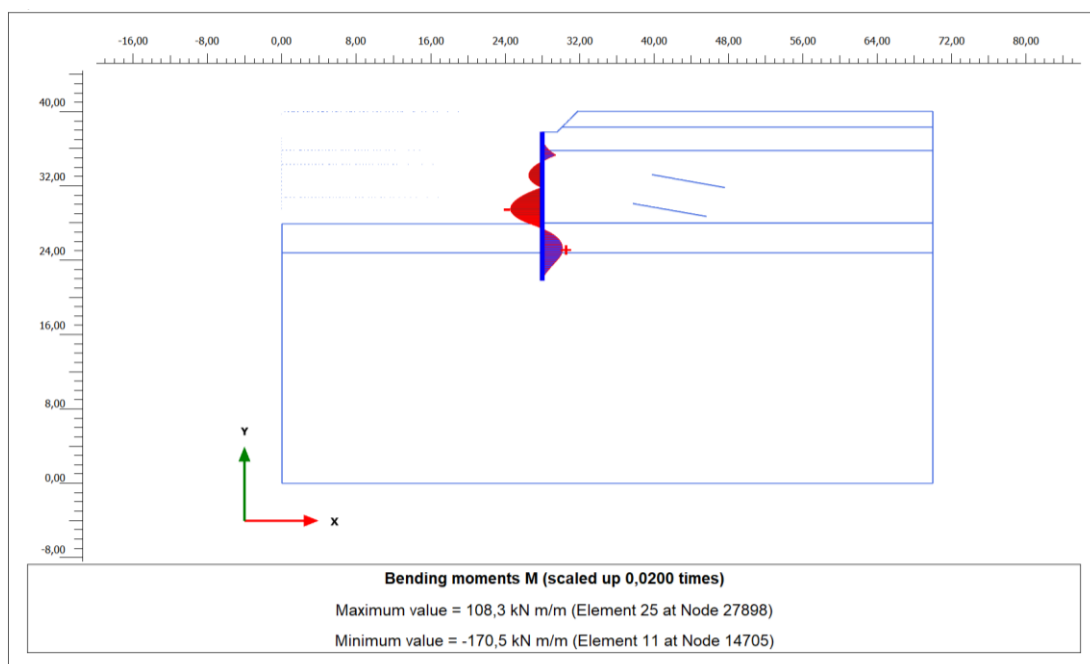
Slika 60: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 1-3



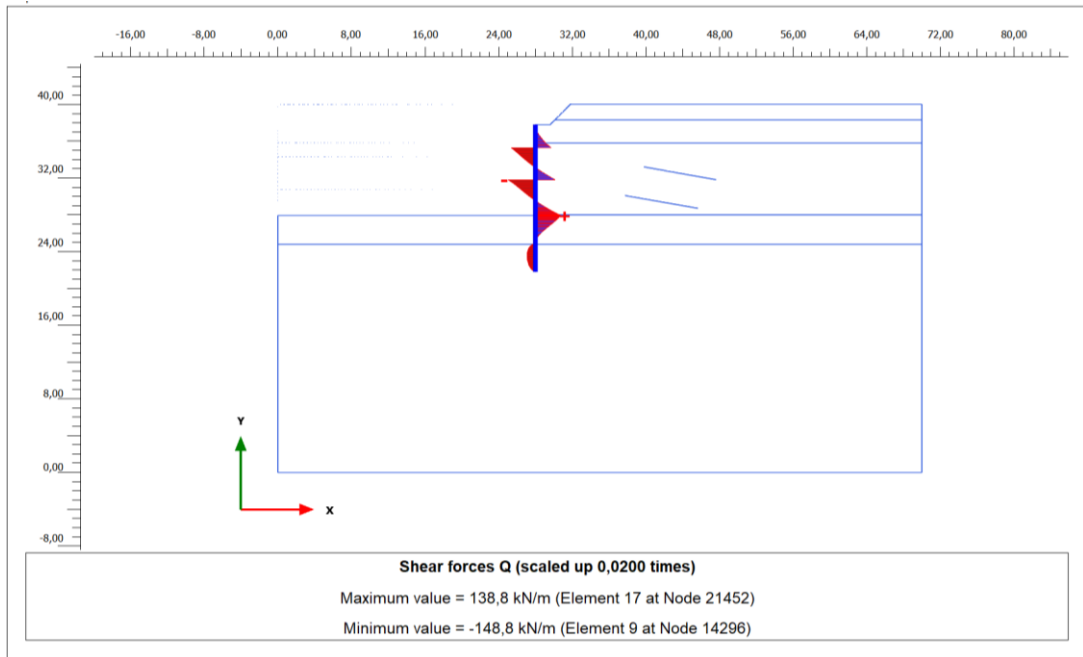


Slika 61: Ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru za Tip 1-3

U nastavku su na Slikama 62 i 63 prikazani momenti savijanja i poprečne sile u čeličnim talpama korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla za GSU. Maksimalni zabilježeni moment u čeličnoj talpi Larssen 605 iznosi  $M_{\max}=170,5 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=148,8 \text{ kN/m'}$ .

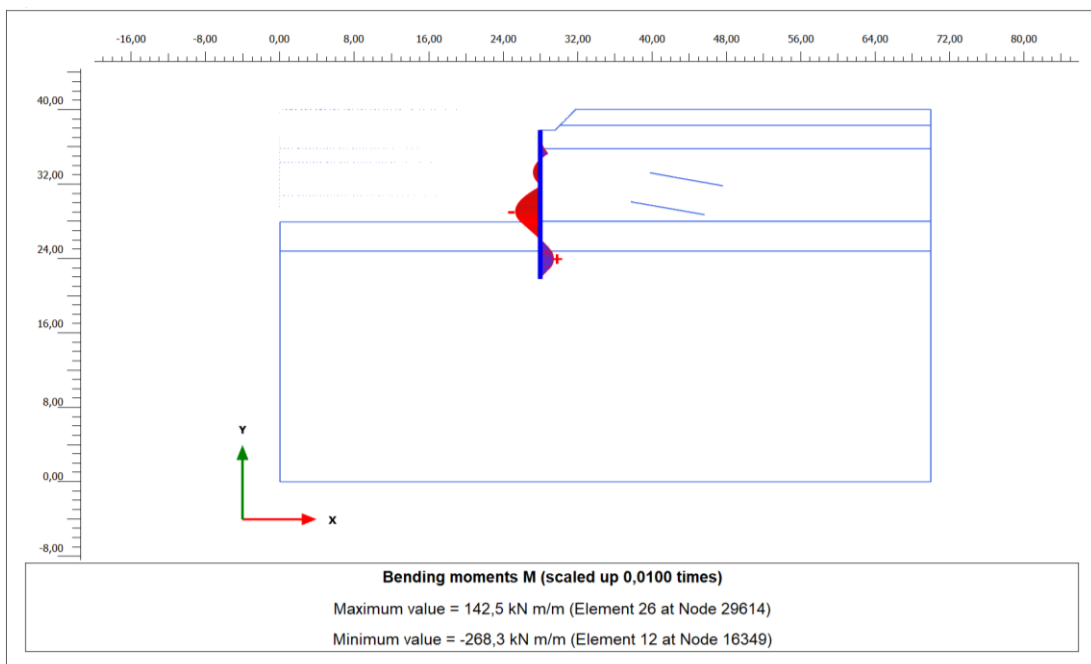


Slika 62: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSU)

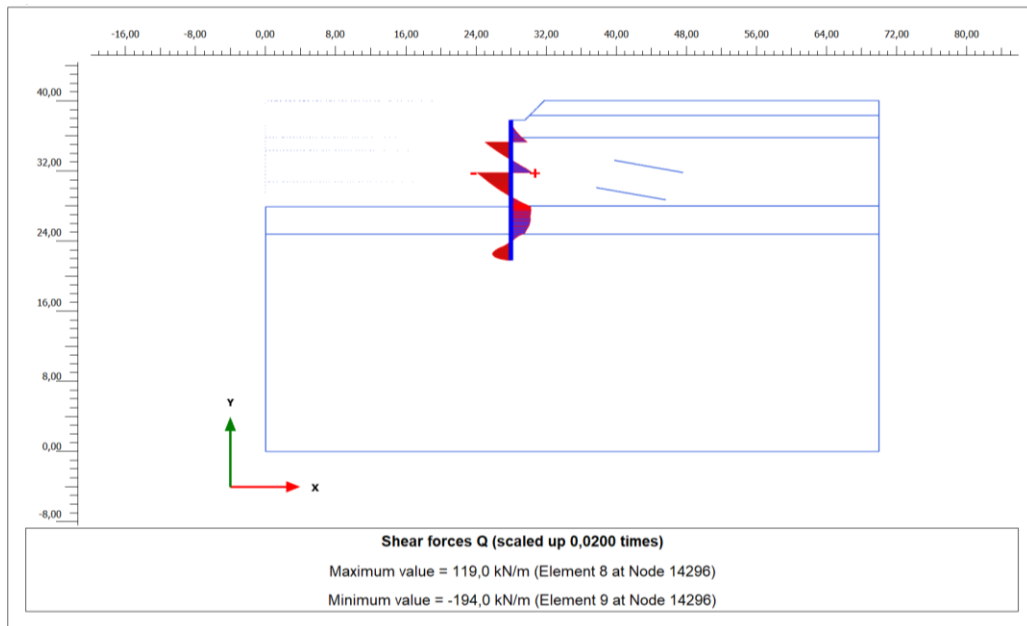


Slika 63: Poprečne sile u čeličnim talpama varijantnog rješenja 3 (GSU)

Idući korak je bio pomoću proračunskih vrijednosti parametara tla, kao i u prethodnim primjerima, dobiti vrijednosti momenata savijanja i poprečnih sila u čeličnim talpama za GSN (Slike 64 i 65). Maksimalni zabilježeni moment u čeličnoj talpi Larssen 605 iznosi  $M_{max}=268,3 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{max}=194,0 \text{ kN/m'}$ .

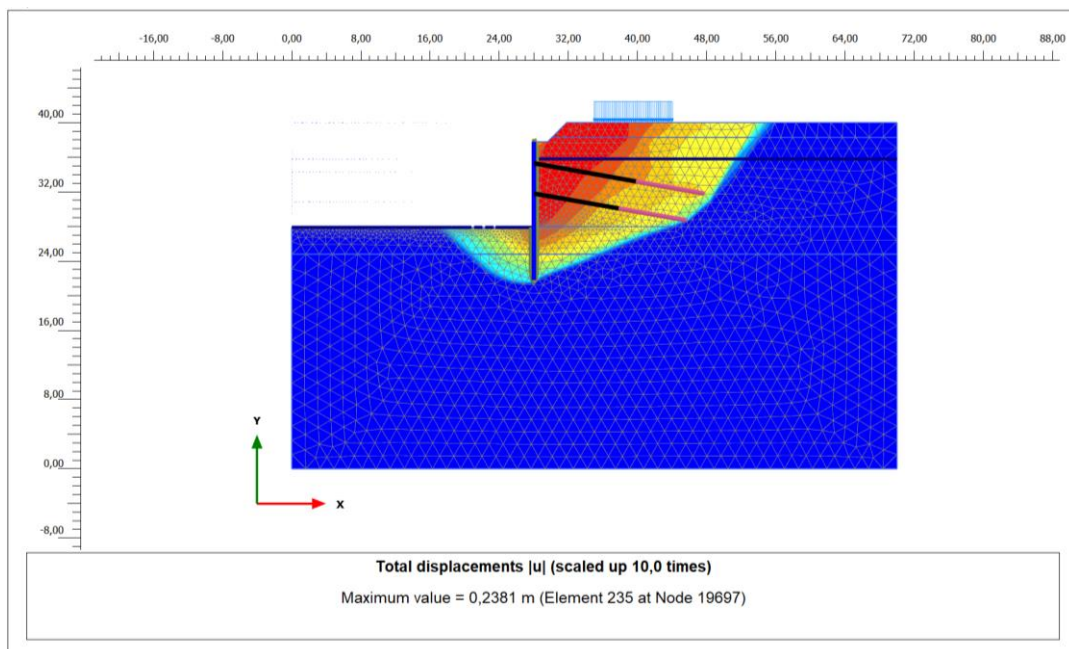


Slika 64: Momenti savijanja u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSN)



Slika 65: Poprečne sile u čeličnim talpama za Tip 1-3 (GSN)

Analiza stabilnosti, provedena s proračunskim vrijednostima parametara tla i prometnog opterećenja, pokazala je ponovno sličnu kliznu plohu kao kod prethodnih varijantnih rješenja čeličnih talpi (Slika 66). Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi **Fs=1,145** i time također zadovoljava uvjet stabilnosti.



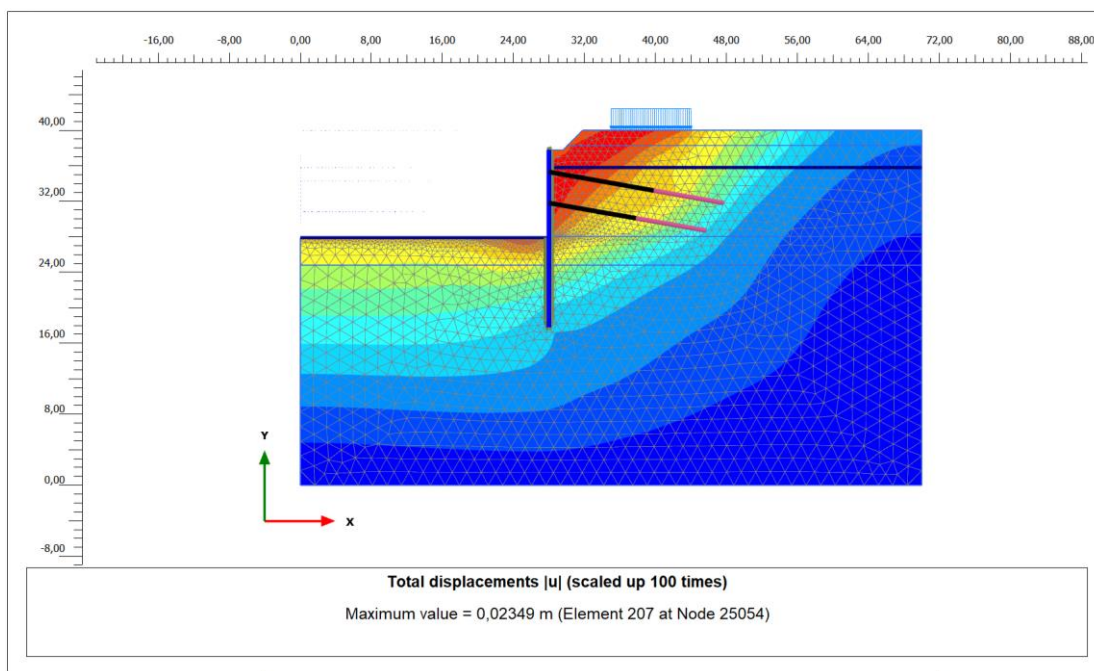
Slika 66: Klizna ploha dobivena za Tip 1-3

## 6.2. Rezultati proračuna - Tip 2

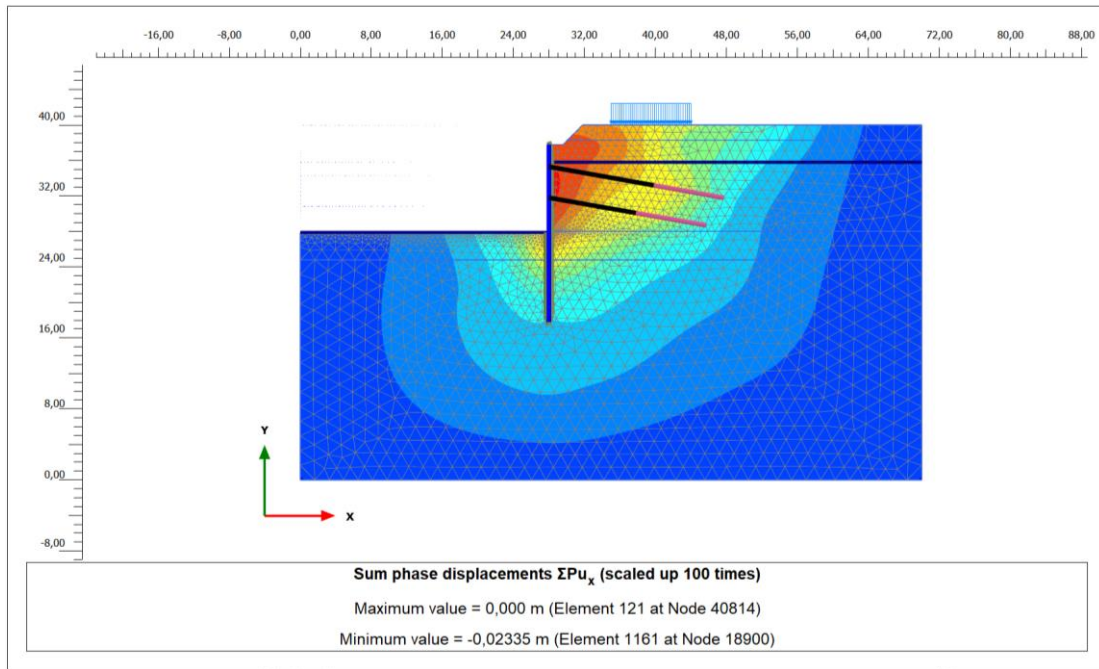
### 6.2.1. Tip 2-1

Kao i kod čeličnih talpi u Poglavlju 6.1, u ovoj analizi za predmetno varijantno rješenje korištene su karakteristične vrijednosti parametara iz Poglavlja 5.2. U nastavku su grafički prikazani ukupni pomaci u modelu, pomaci tla u x smjeru i ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru.

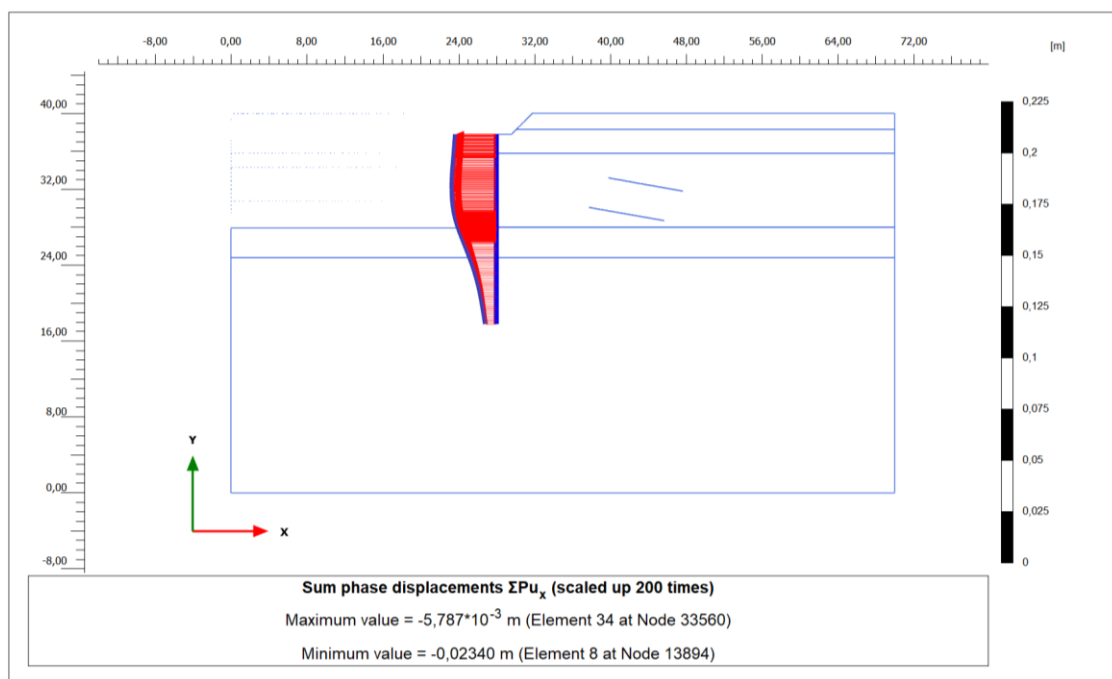
Na Slici 67 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|\mathbf{u}|=0,02349$  m, odnosno 2,35 cm, dok su na Slici 68 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum \mathbf{P}u_x=0,02335$  m, odnosno oko 2,34 cm. Prema Slici 69 ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru doseže vrijednost od  $\sum \mathbf{P}u_x=0,02340$  m, odnosno 2,34 cm.



Slika 67: Ukupni pomaci modela za Tip 2-1

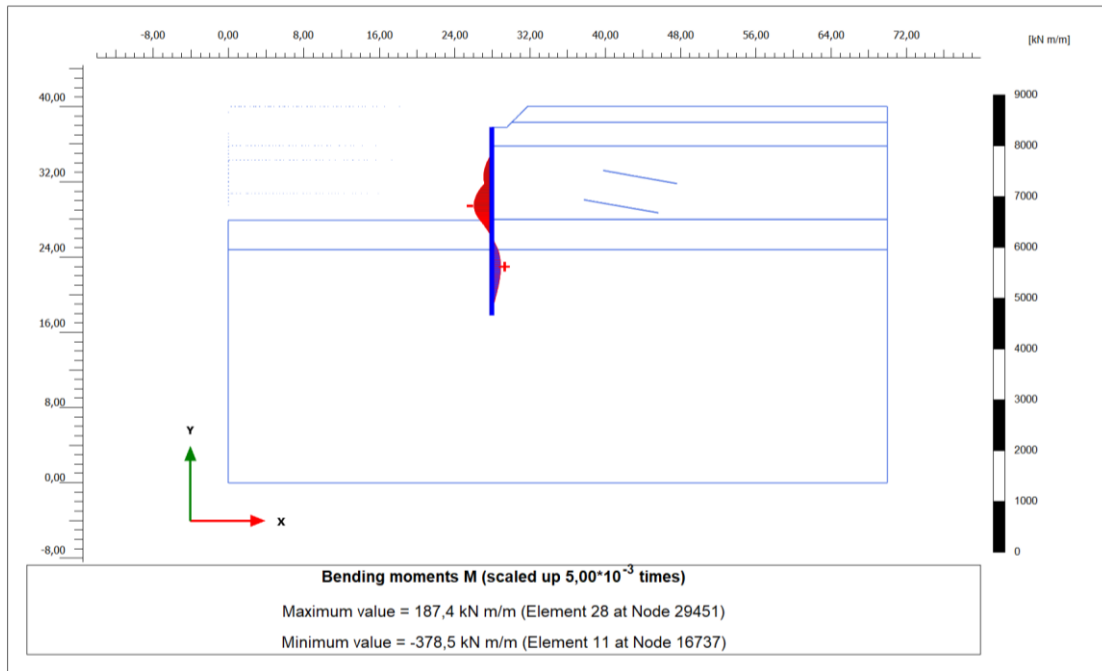


Slika 68: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-1

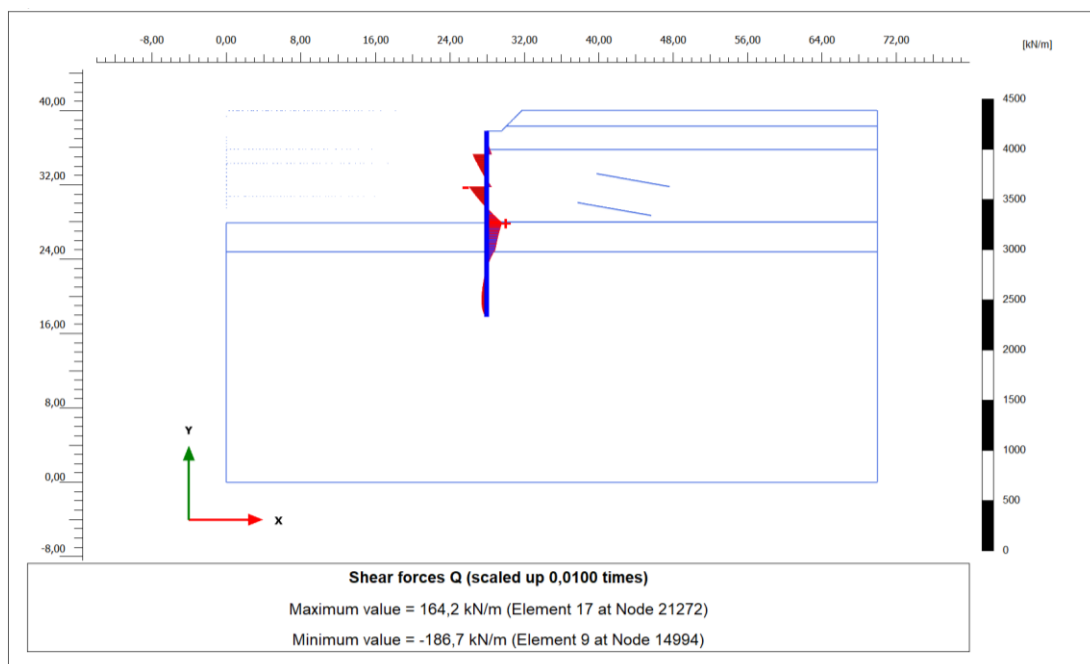


Slika 69: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-1

Na Slikama 70 i 71 prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni dobiveni korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla za GSU. Maksimalni zabilježeni moment u pilotskoj stijeni iznosi  $M_{\max}=378,5 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=186,7 \text{ kN/m'}$ .

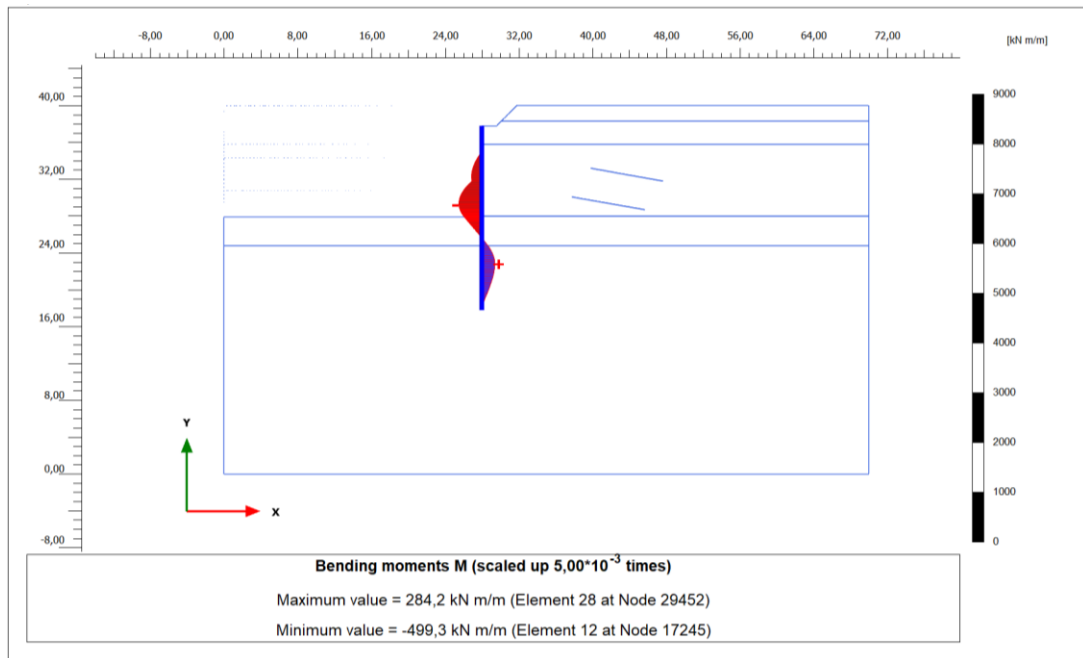


Slika 70: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSU)

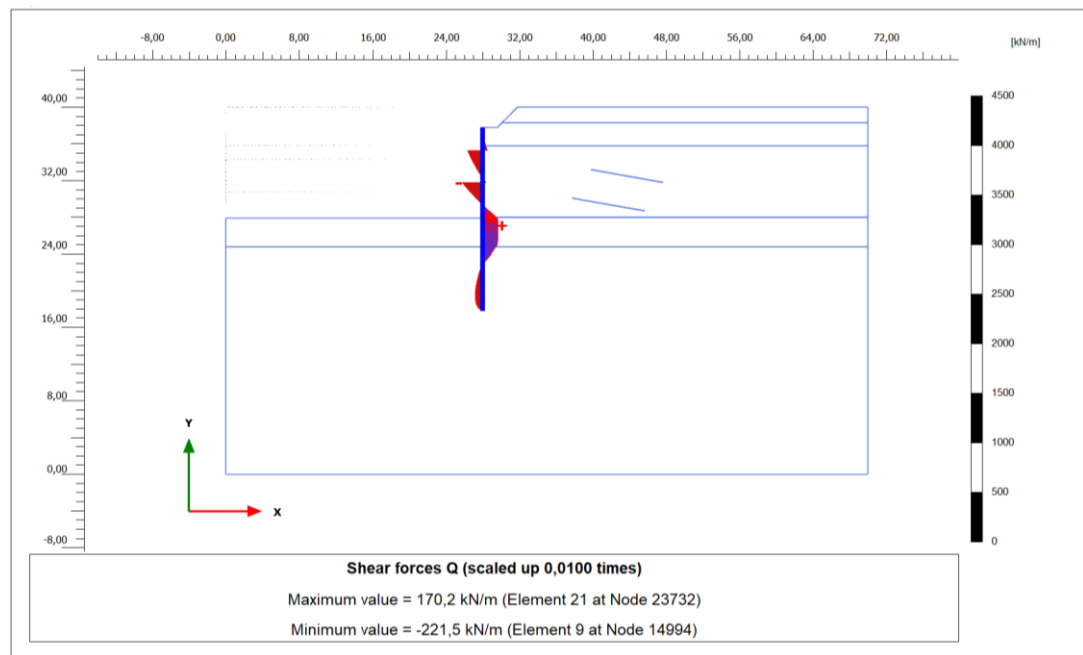


Slika 71: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSU)

Za GSN su ponovno korištene iste proračunske vrijednosti parametara tla i proračunom su dobiveni moment savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni (Slike 72 i 73). Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{\max}=499,3 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=221,5 \text{ kN/m'}$ .

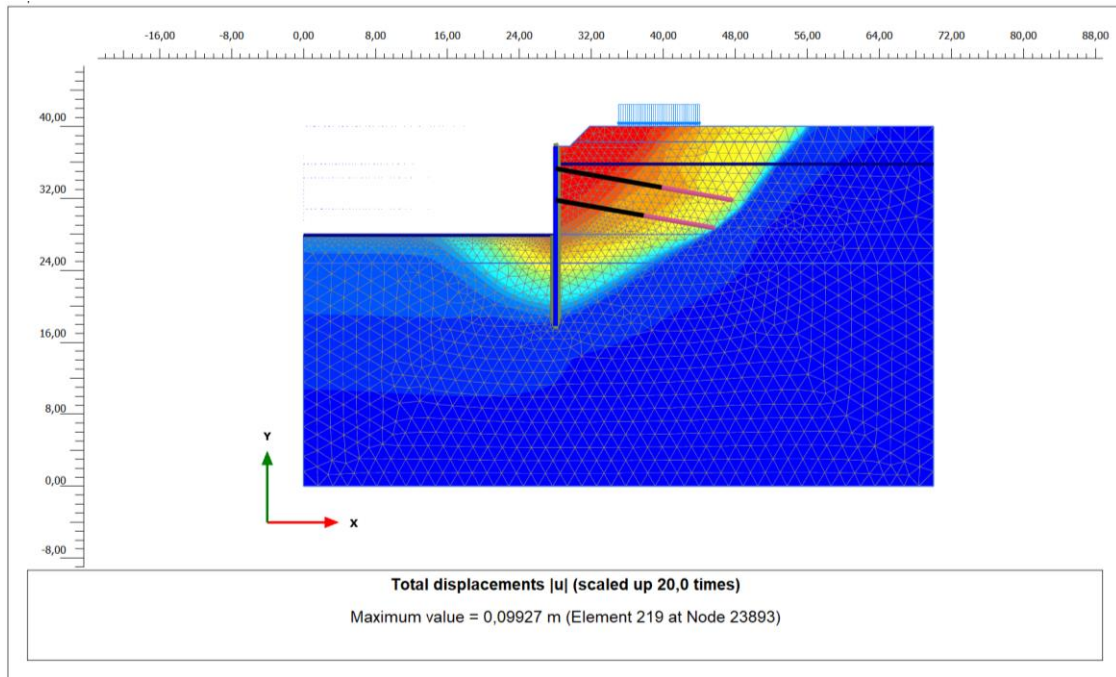


Slika 72: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSN)



Slika 73: Poprečne sile pilotskoj stijeni za Tip 2-1 (GSN)

Analiza stabilnosti je provedena s proračunskim vrijednostima parametara tla i prometnog opterećenja. Prema Slici 74, klizna ploha ponovno obuhvaća značajan dio okolnog tla. Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi  **$F_s=1,242$**  i time zadovoljava uvjet stabilnosti.



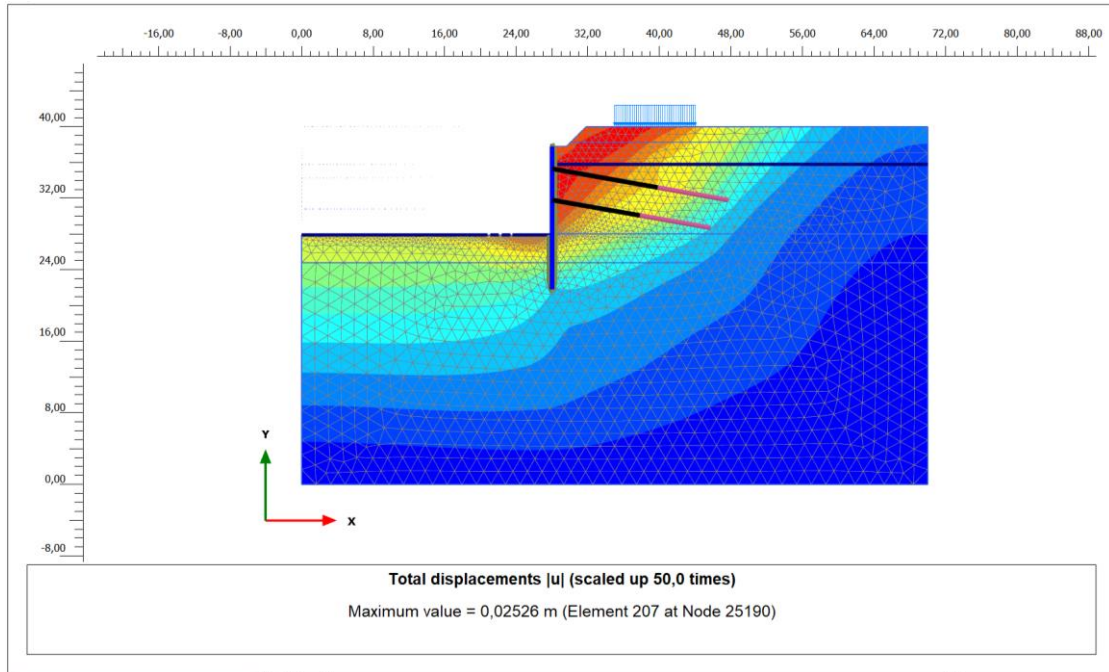
Slika 74: Klizna ploha dobivena za Tip 2-1

### 6.2.2. Tip 2-2

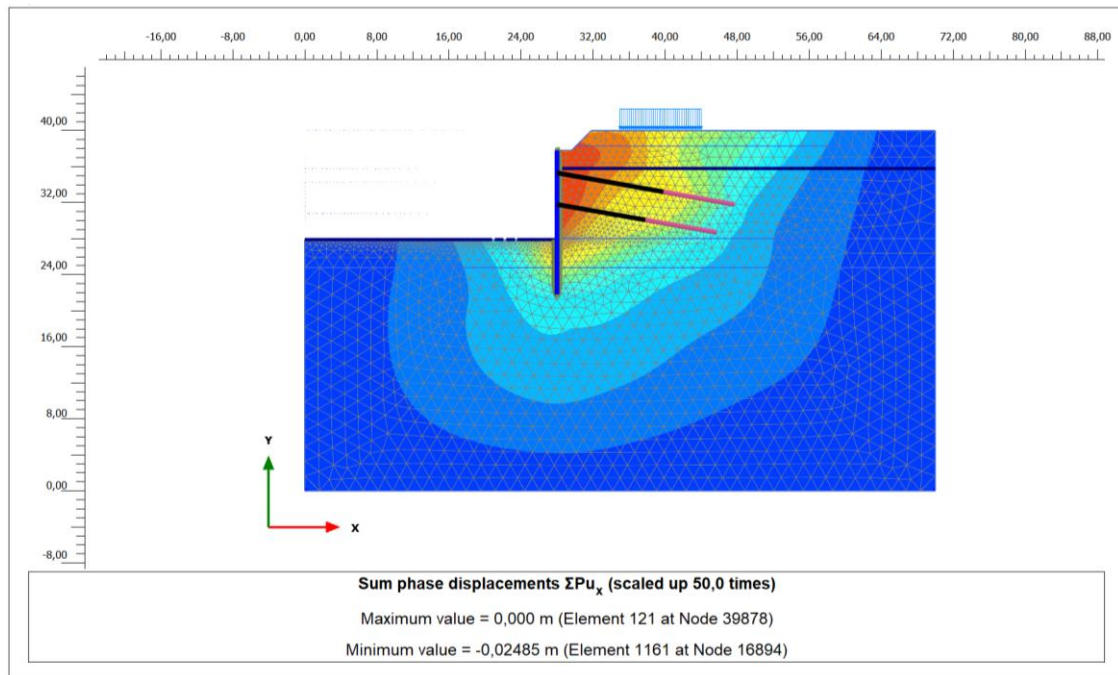
Rezultati analize su ukupni pomaci u modelu, pomaci tla u x smjeru i ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru.

Na Slici 75 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|u|=0,02526$  m, odnosno 2,53 cm, dok su na Slici 76 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum Pu_x=0,02485$  m, odnosno oko 2,49 cm. Prema Slici 77 ukupni pomaci čeličnih talpi u x smjeru dosežu vrijednost od  $\sum Pu_x=0,02485$  m, odnosno 2,49 cm.

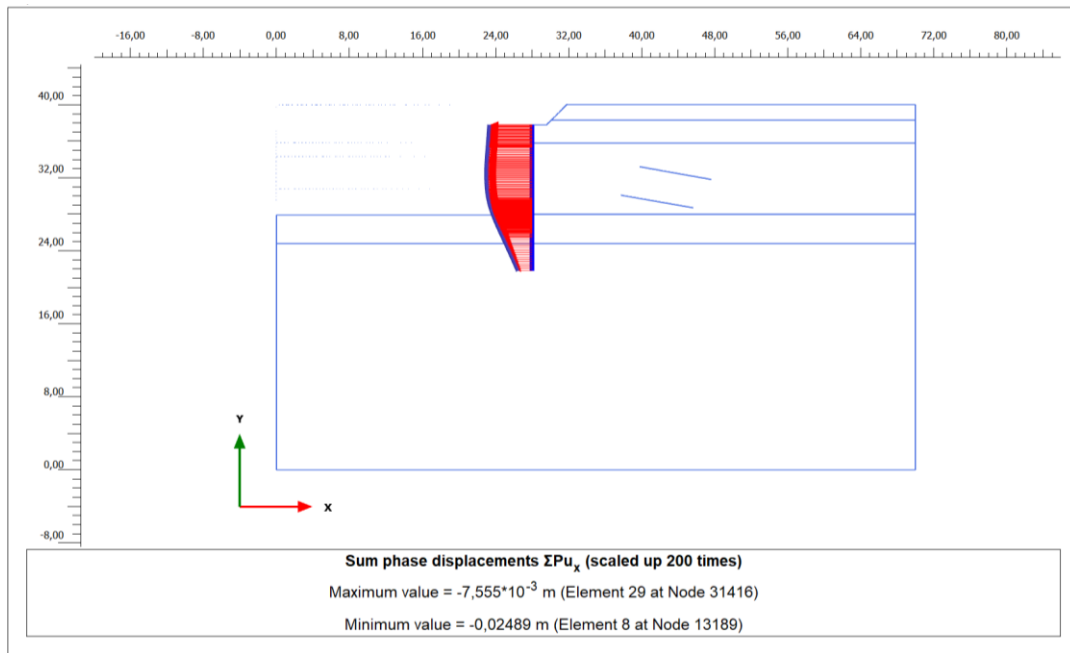




Slika 75: Ukupni pomaci modela za Tip 2-2

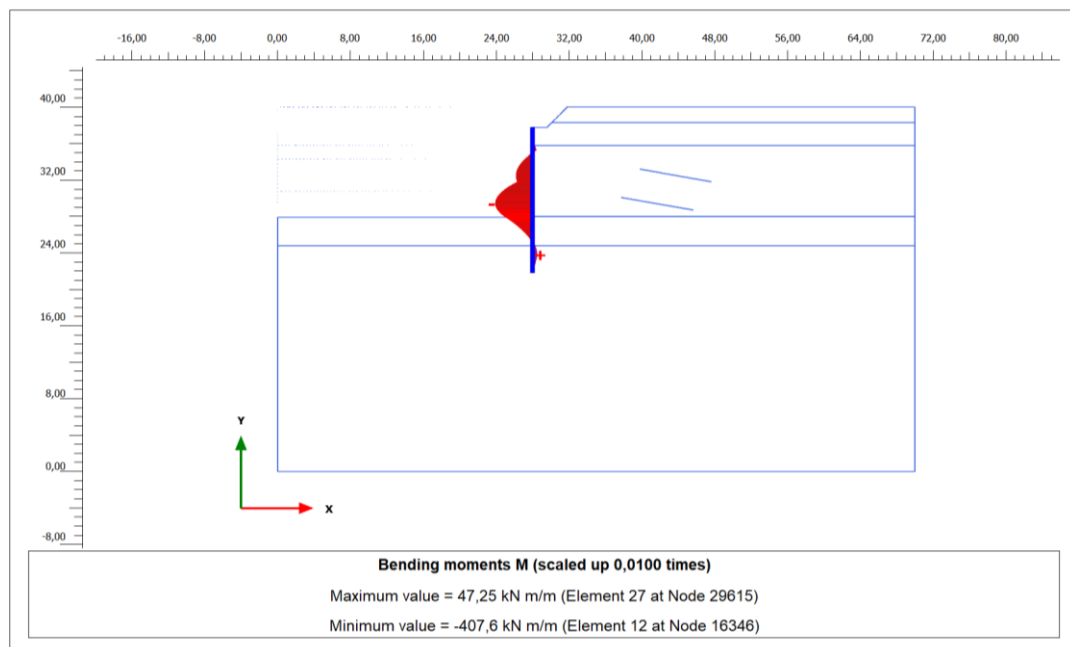


Slika 76: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-2

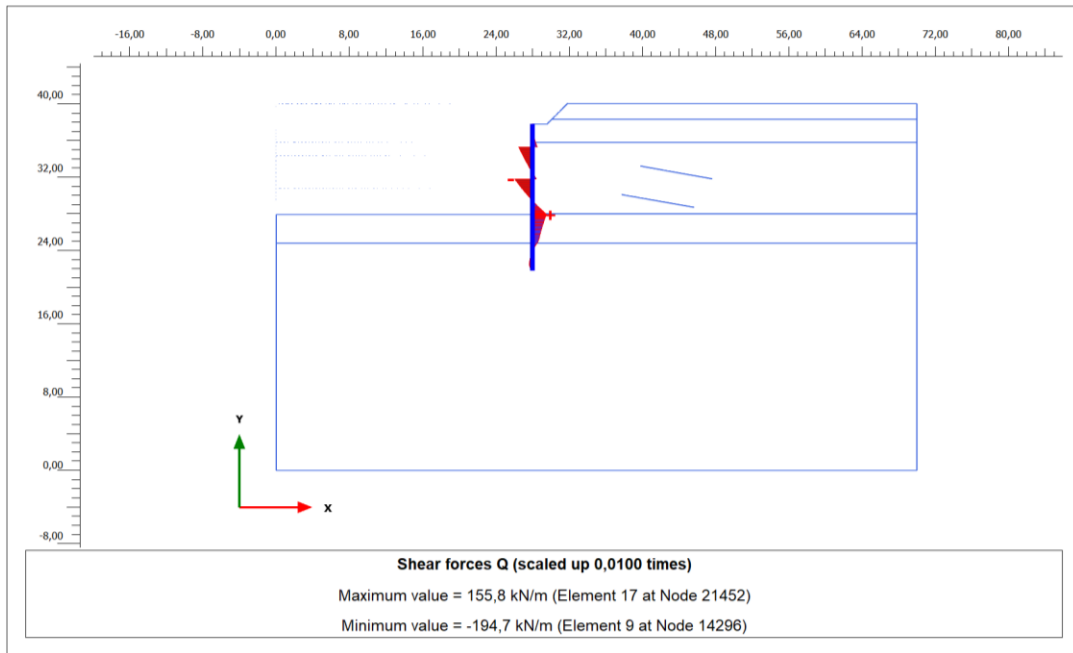


Slika 77: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-2

U nastavku (Slike 78 i 79) prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni za GSU. Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{\max}=407,6 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=194,7 \text{ kN/m'}$ .

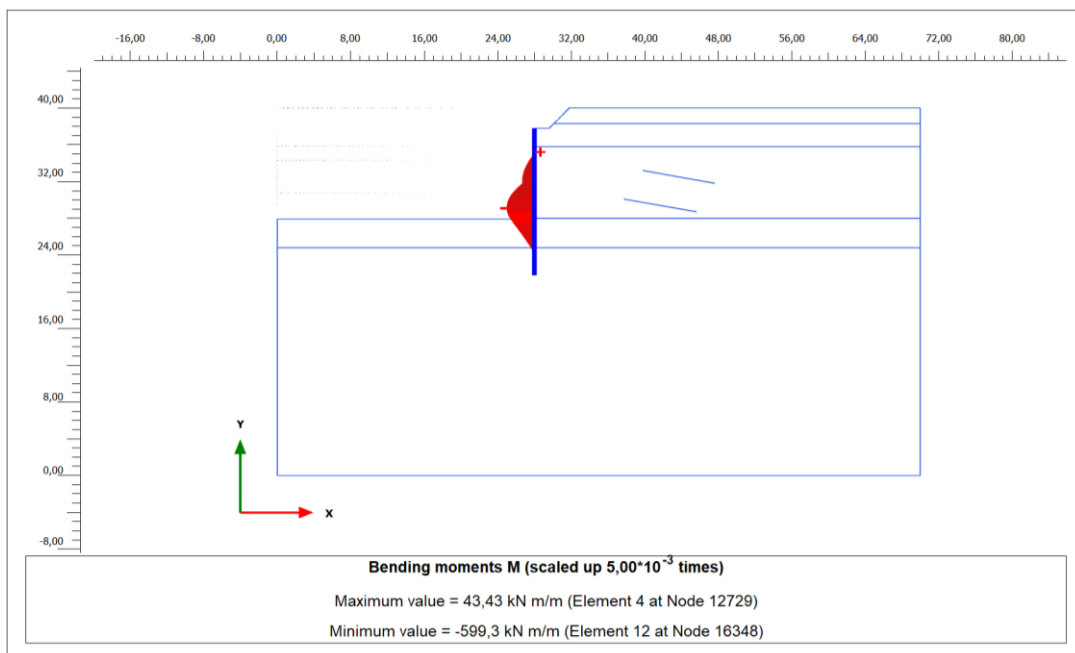


Slika 78: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)

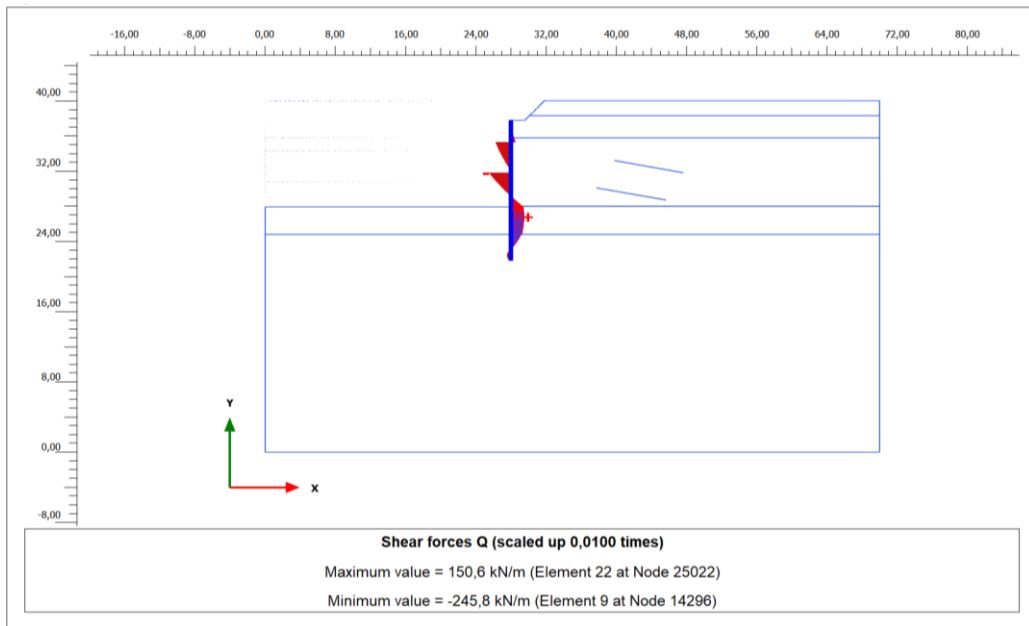


Slika 79: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)

Proračunske vrijednosti parametara tla korištene su za proračun GSN i dobiveni su momenti savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni (Slike 80 i 81). Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{\max}=599,3 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=245,8 \text{ kN/m'}$ .

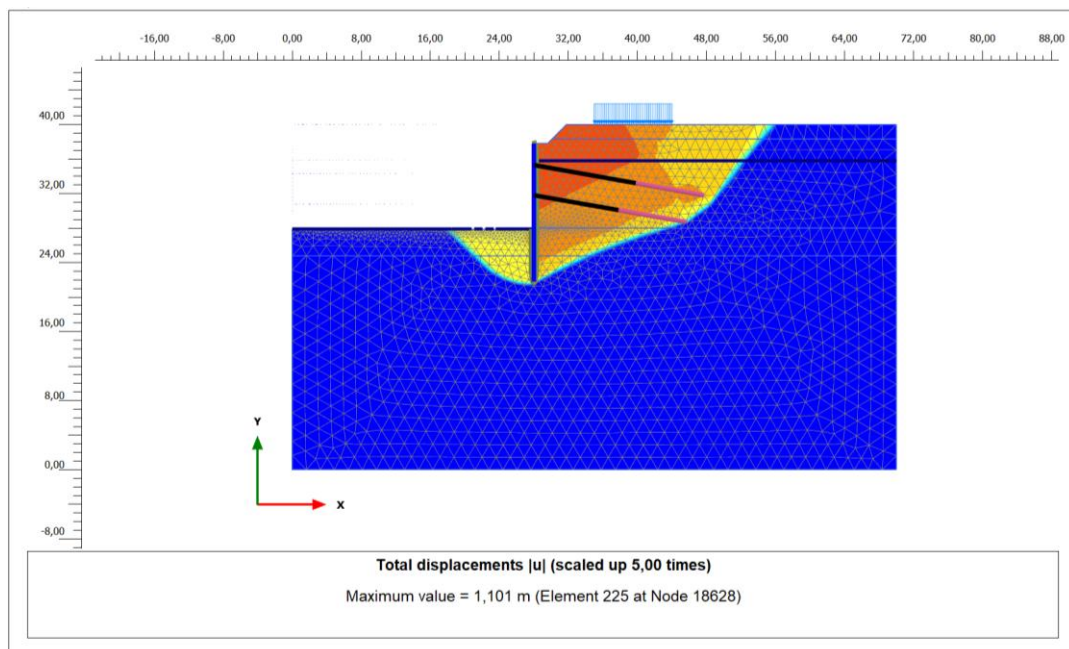


Slika 80: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)



Slika 81: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-2 (GSU)

Analiza stabilnosti, provedena s proračunskim vrijednostima parametara tla i prometnog opterećenja, je pokazala ponovno vrlo sličnu kliznu plohu kao kod čeličnih talpi prikazanu na Slici 82. Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi  $F_s=1,142$  i time zadovoljava uvjet stabilnosti.

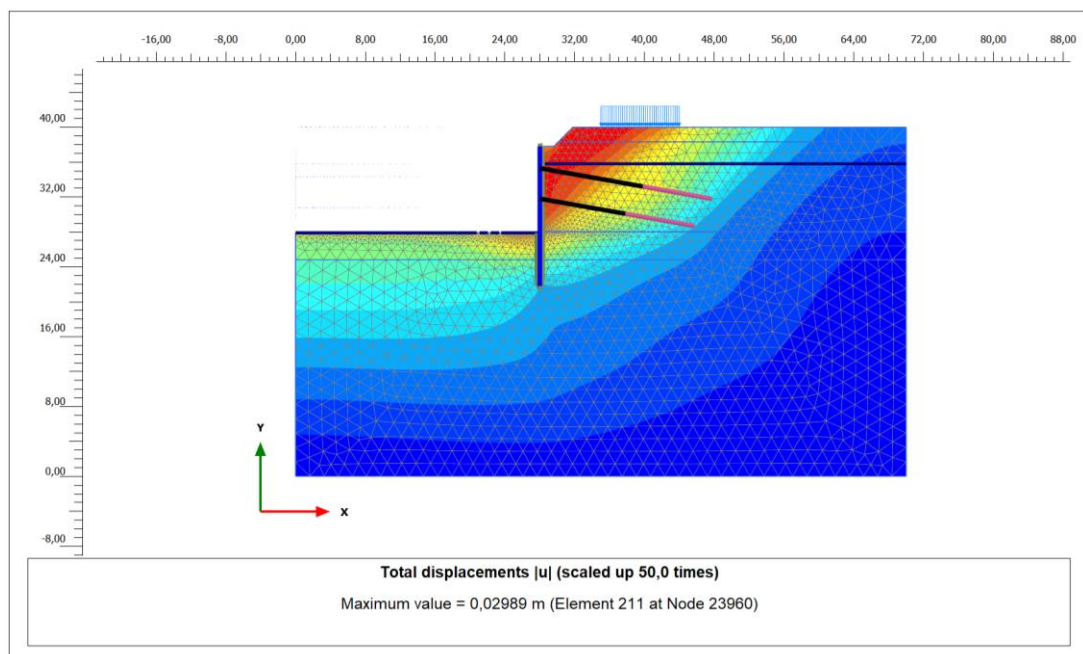


Slika 82: Klizna ploha dobivena za Tip 2-2

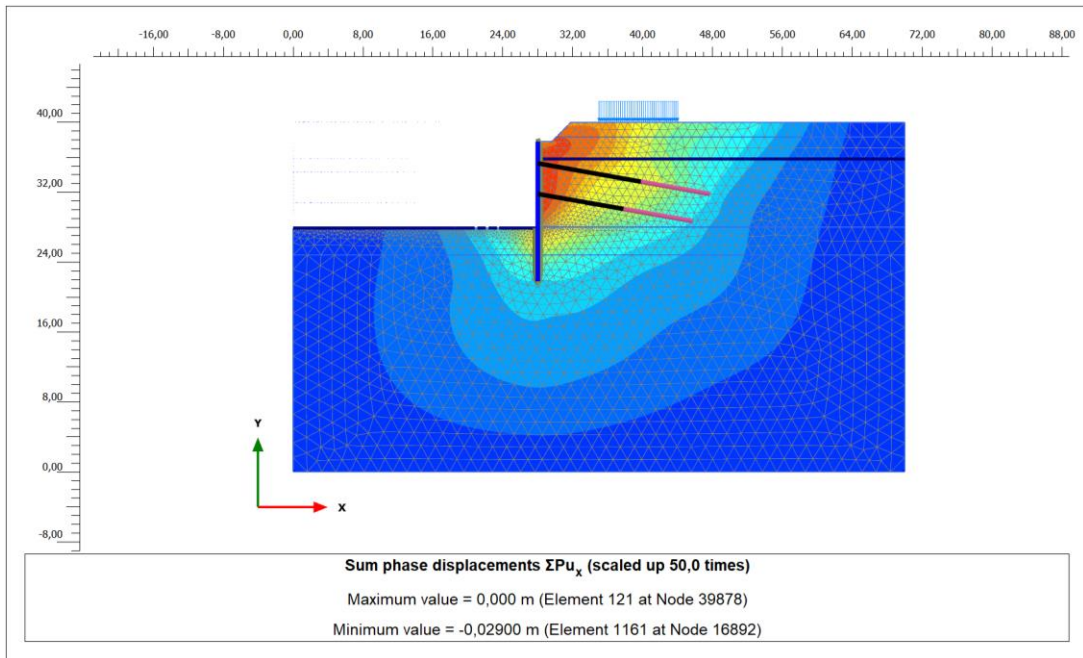
### 6.2.3. Tip 2-3

U ovom potpoglavlju grafički su prikazani ukupni pomaci u modelu, pomaci tla u x smjeru i ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru.

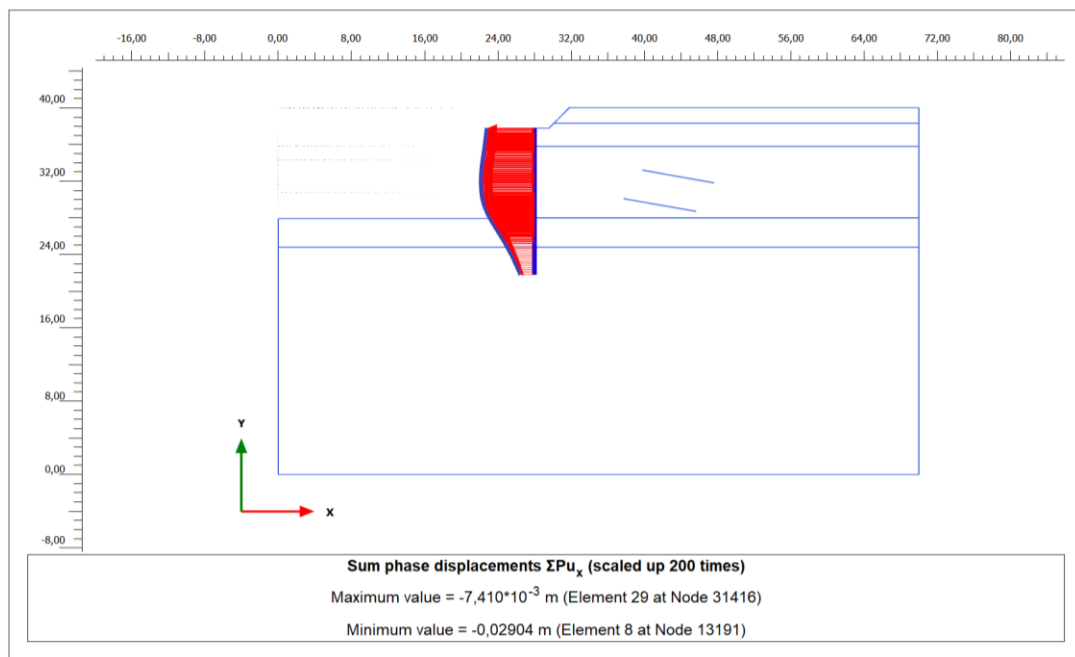
Na Slici 83 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|u|=0,02989$  m, odnosno 2,99 cm, dok su na Slici 84 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum Pu_x=0,02900$  m, odnosno 2,90 cm. Prema Slici 85 ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru doseže vrijednost od  $\sum Pu_x=0,02904$  m, odnosno oko 2,90 cm.



Slika 83: Ukupni pomaci modela za Tip 2-3

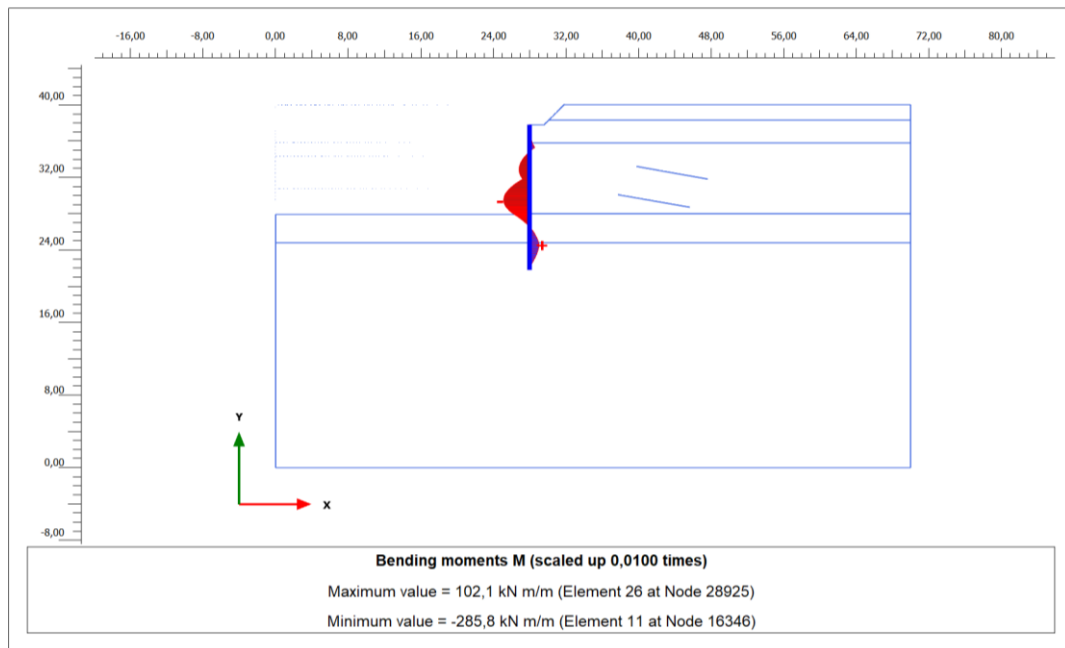


Slika 84: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 2-3

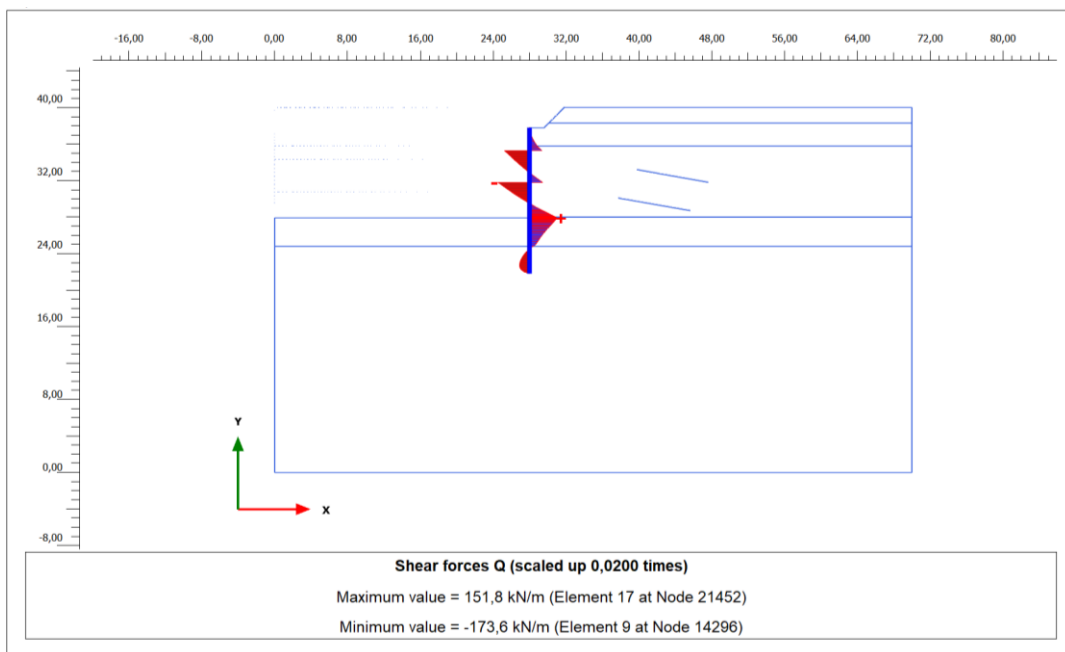


Slika 85: Ukupni pomaci pilotske stijene u x smjeru za Tip 2-3

U nastavku (Slike 86 i 87) prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni korištenjem karakterističnih vrijednosti parametara tla za GSU. Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{\max}=285,8 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=173,6 \text{ kN/m'}$ .

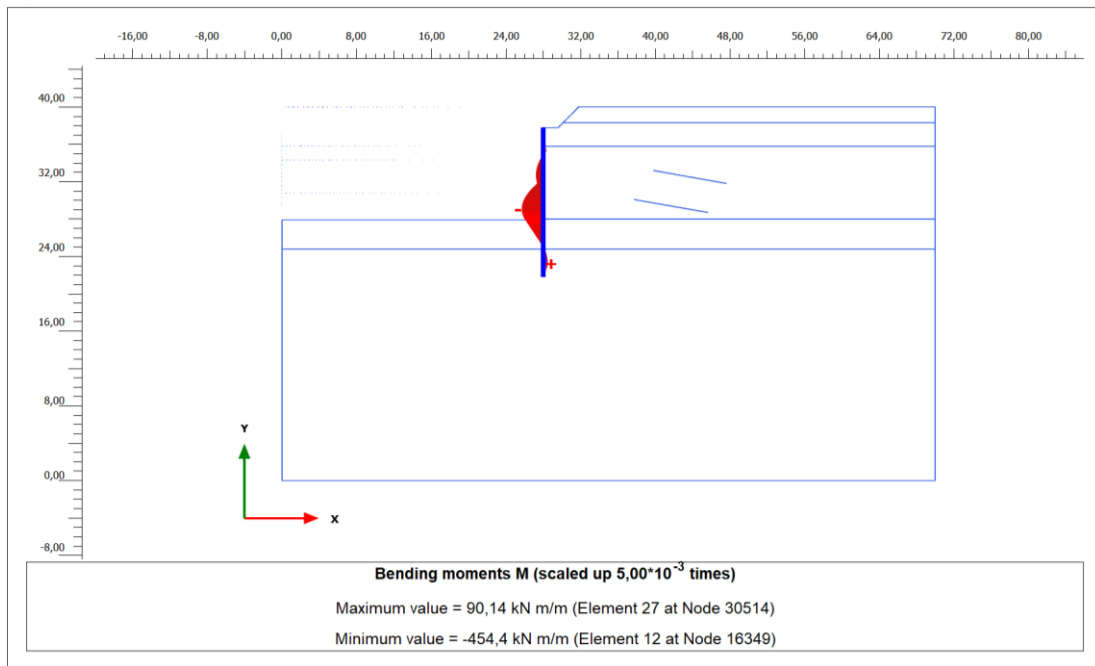


Slika 86: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSU)

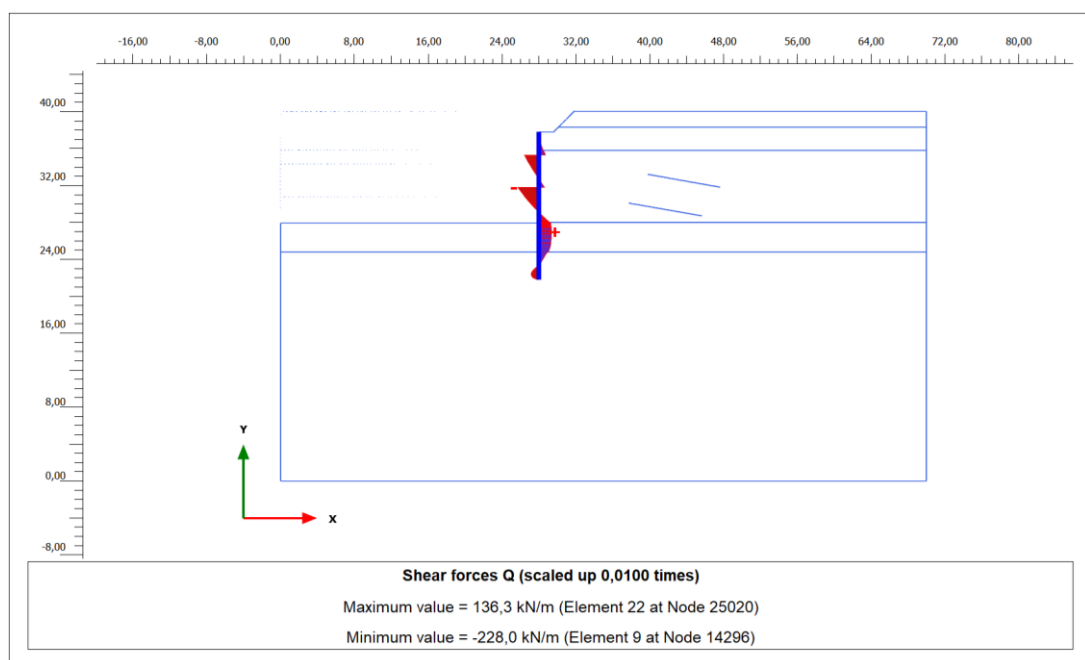


Slika 87: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSU)

Za GSN su korištene iste proračunske vrijednosti parametara tla i proračunom su dobiveni moment savijanja i poprečne sile u pilotskoj stijeni (Slike 88 i 89). Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{\max}=454,4 \text{ kNm/m'}$ , a maksimalna poprečna sila  $Q_{\max}=228,0 \text{ kN/m'}$ .



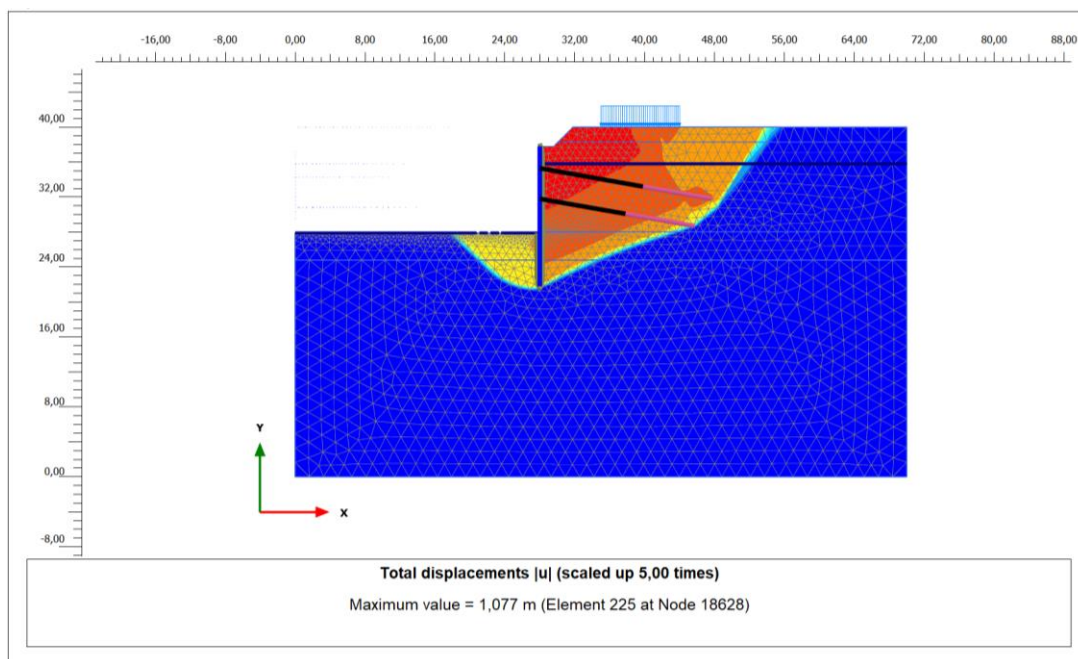
Slika 88: Momenti savijanja u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSN)



Slika 89: Poprečne sile u pilotskoj stijeni za Tip 2-3 (GSN)

Rezultat analize stabilnosti prikazan je na Slici 90. Faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi  **$F_s=1,142$**  i time zadovoljava uvjet stabilnosti.





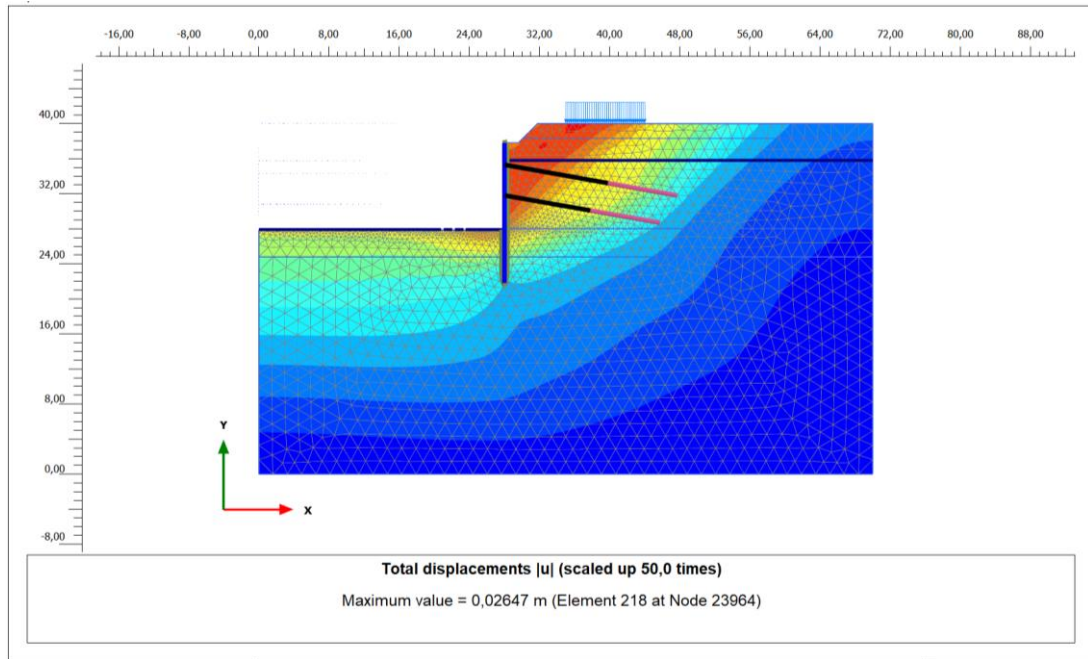
Slika 90: Klizna ploha dobivena za Tip 2-3

### 6.3. Rezultati proračuna – Tip 3

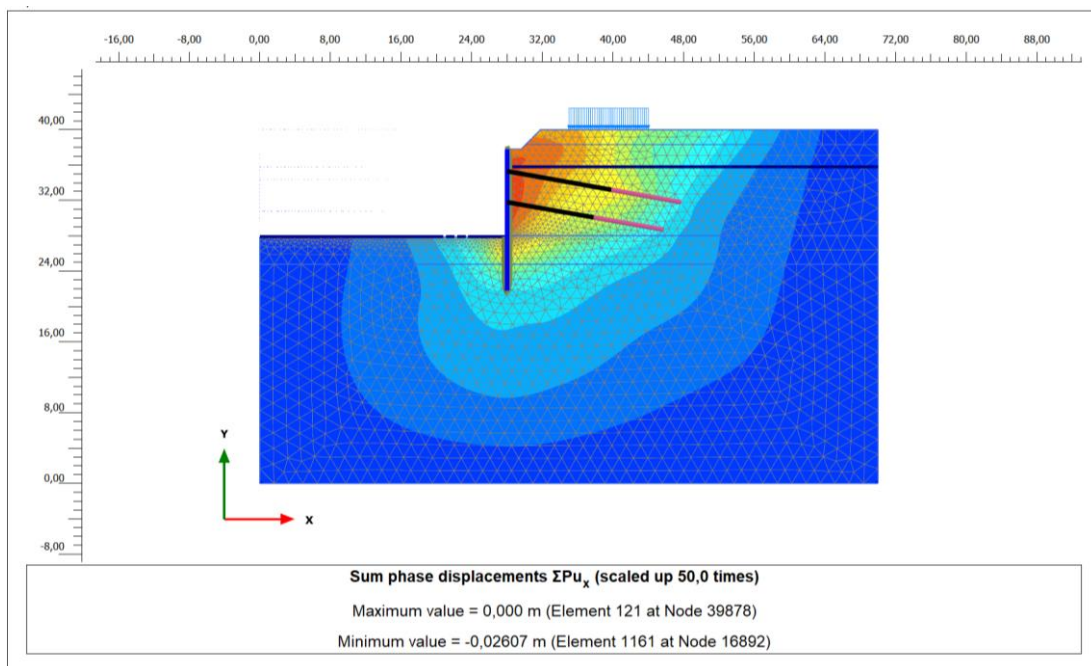
#### 6.3.1. Tip 3-1

Kao i u svim prethodnim varijantama, u analizi naprezanja i deformacija za Tip 3-1 korištene su projektom definirane karakteristične vrijednosti parametara tla prikazanih (Poglavlje 5.2) i karakteristična vrijednost promjenjivog prometnog opterećenja iza građevne jame od  $q_k=10,0 \text{ kN/m}^2$ . U nastavku su grafički prikazani ukupni pomaci u modelu, pomaci modela u x smjeru i ukupni pomaci AB dijafragme u x smjeru.

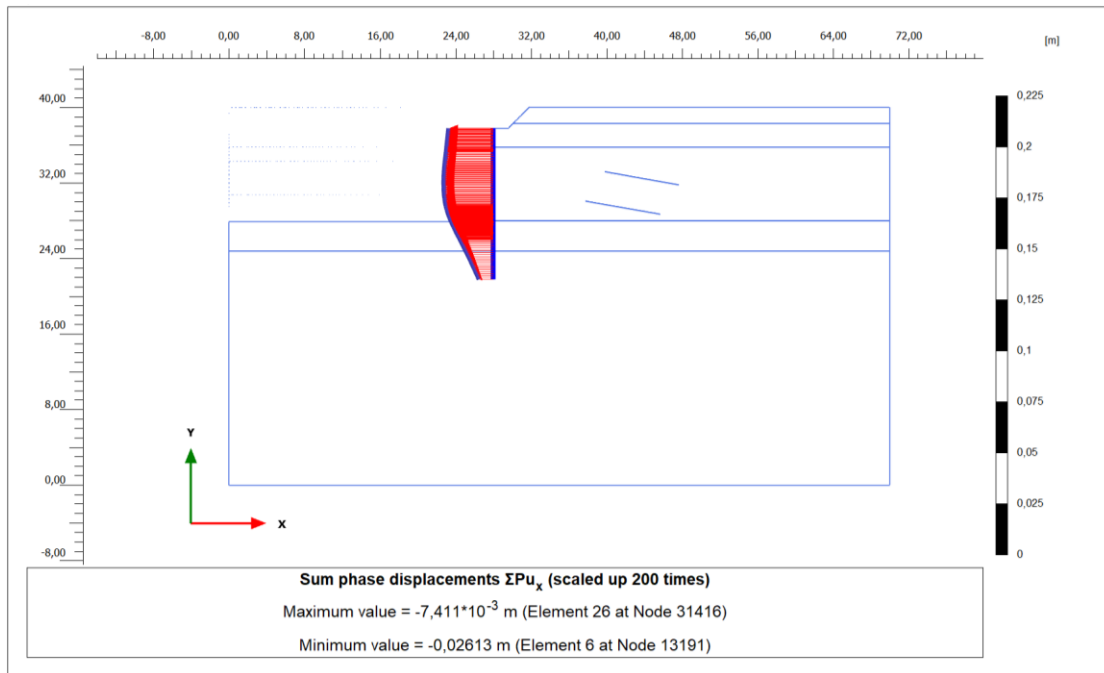
Na Slici 91 prikazani su ukupni pomaci modela pri čemu maksimalni pomak iznosi  $|u|=0,02647 \text{ m}$ , odnosno 2,65 cm, dok su na Slici 92 prikazani ukupni pomaci tla u x smjeru s najvećim pomakom  $\sum P u_x=0,02607 \text{ m}$ , odnosno 2,61 cm. Prema Slici 93 ukupni pomaci AB dijafragme u x smjeru dosežu vrijednost od  $\sum P u_x=0,02613 \text{ m}$ , što također iznosi 2,61 cm.



Slika 91: Ukupni pomaci modela za Tip 3-1

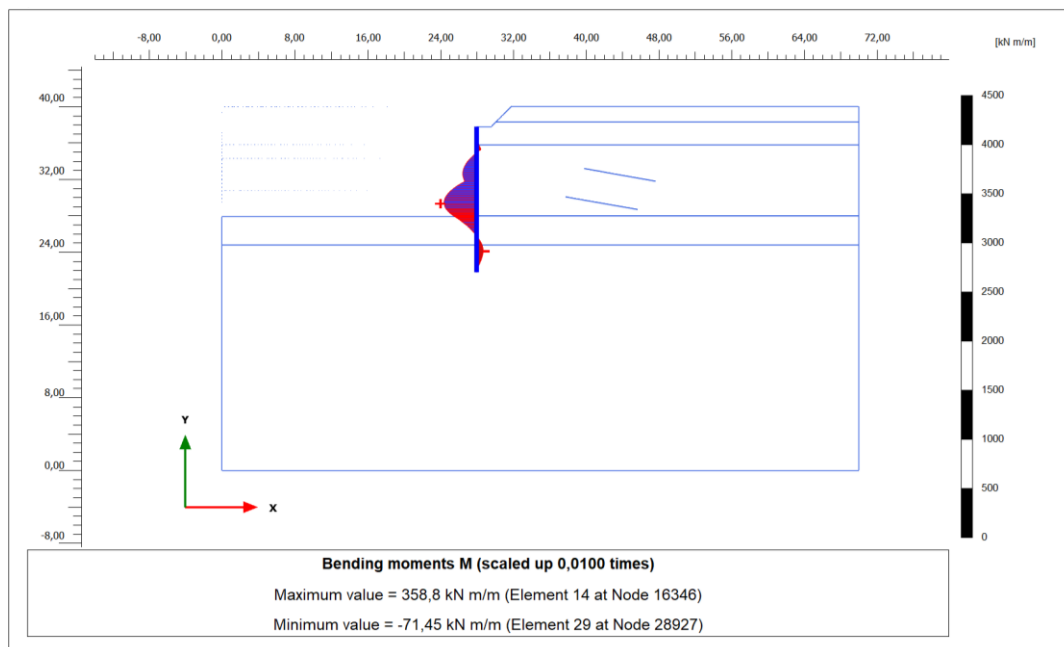


Slika 92: Ukupni pomaci tla u x smjeru za Tip 3-1

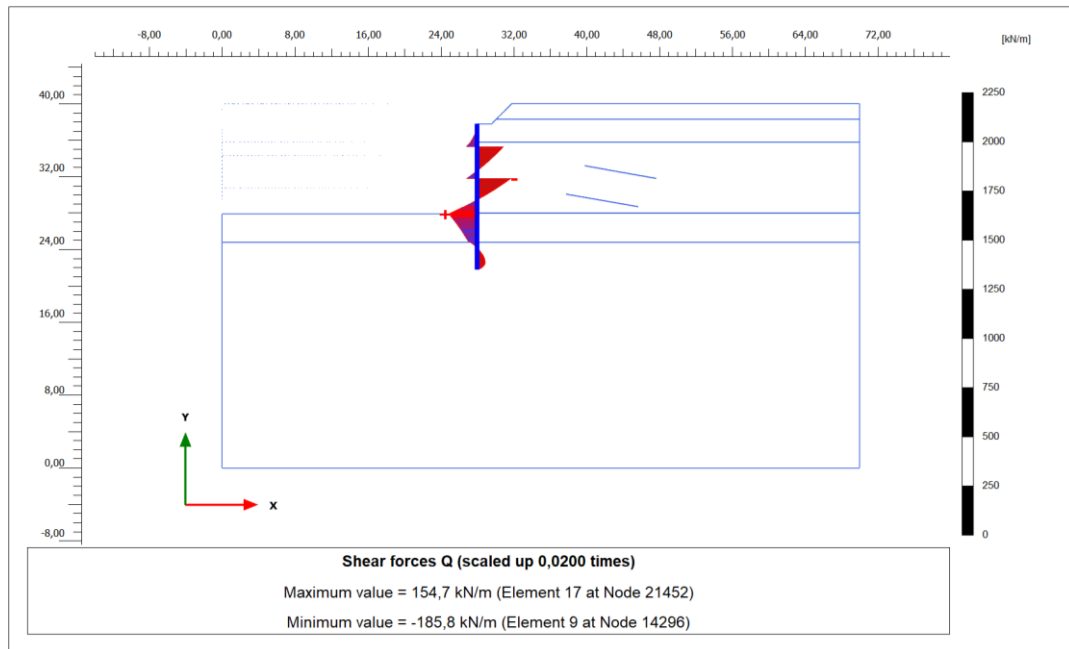


Slika 93: Ukupni pomaci AB dijafragme u x smjeru za Tip 3-1

Na Slikama 94 i 95 u nastavku prikazani su momenti savijanja i poprečne sile u AB dijafragmi dobiveni za GSU. Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{max}=358,8$  kNm/m', a maksimalna poprečna sila  $Q_{max}=185,8$  kN/m'.

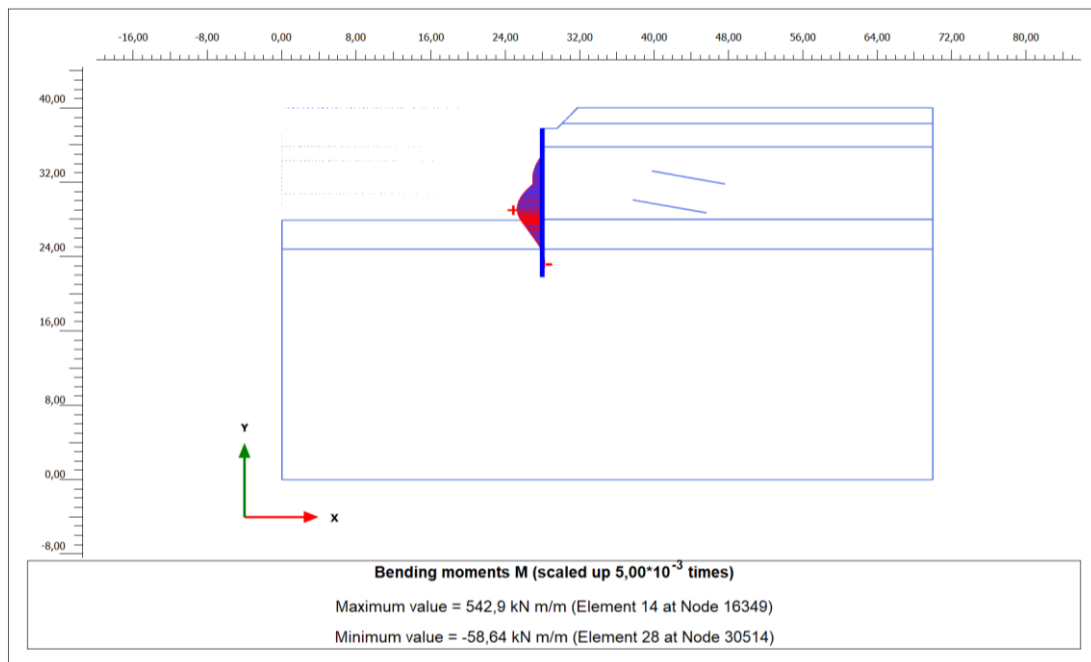


Slika 94: Momenti savijanja u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSU)

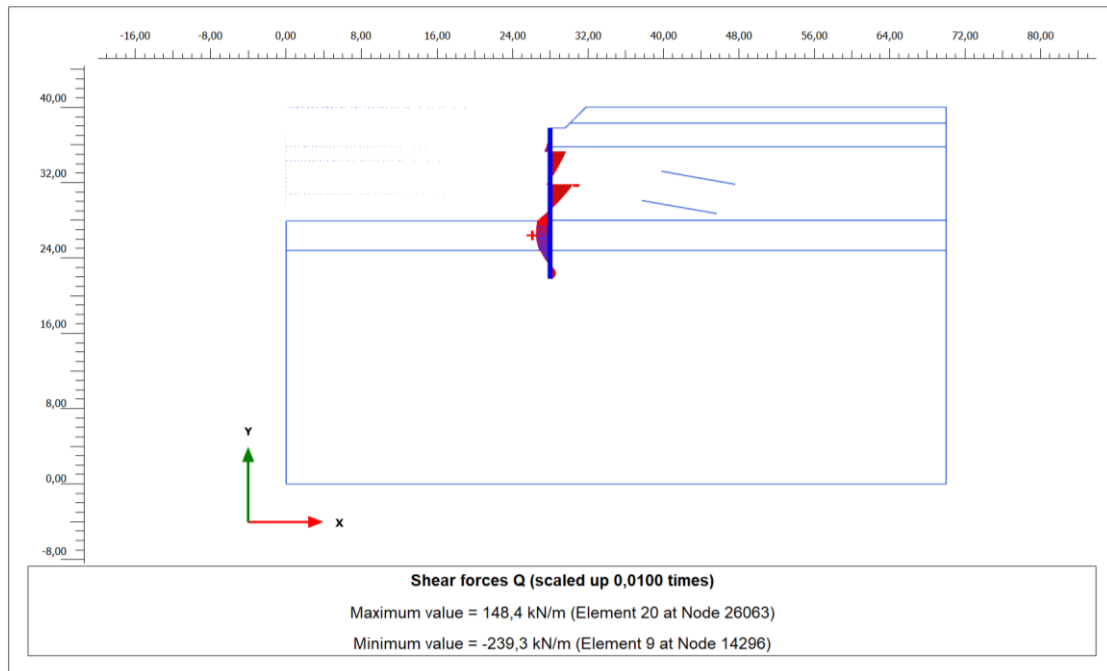


Slika 95: Poprečne sile u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSU)

Proračunom su dobiveni i momenti savijanja i poprečne sile u AB dijafragmi za GSN, prikazani na Slikama 96 i 97. Maksimalni zabilježeni moment iznosi  $M_{max}=542,9$  **kNm/m'**, a maksimalna poprečna sila  $Q_{max}=239,3$  **kN/m'**.

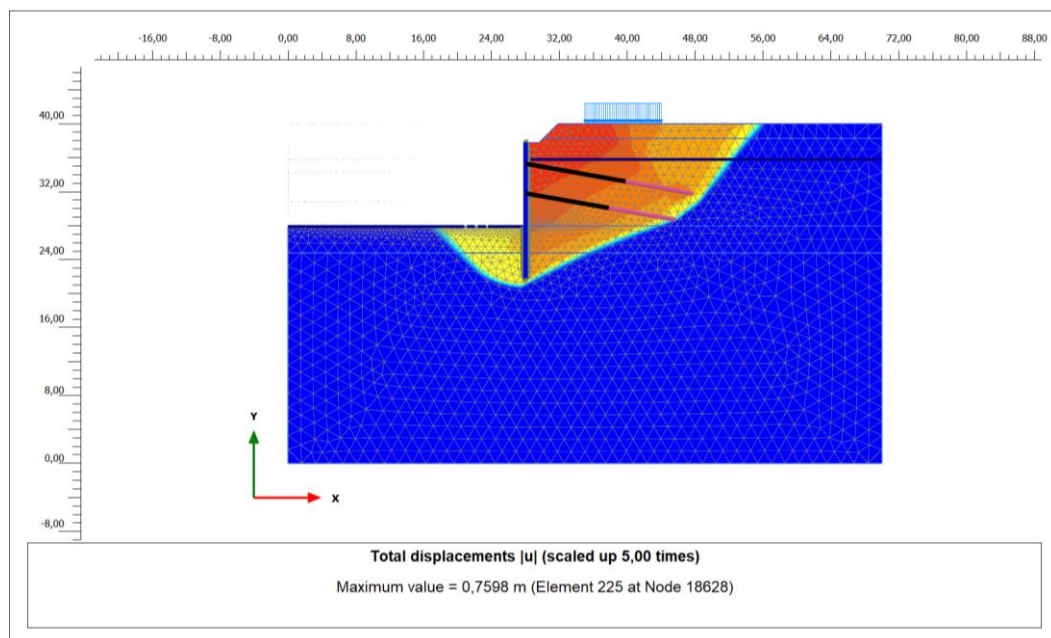


Slika 96: Momenti savijanja u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSN)



Slika 97: Poprečne sile u AB dijafragmi za Tip 3-1 (GSN)

Analiza stabilnosti je provedena na isti način kao za sve prethodne varijante. Na Slici 98 je prikazana klizna ploha, a faktor sigurnosti za ovu varijantu iznosi  $F_s=1,136$  i time zadovoljava uvjet stabilnosti.



Slika 98: Klizna ploha dobivena za Tip 3-1

#### 6.4. Usporedba rezultata

Analiza naprezanja i deformacija je za svaku pojedinu varijantu dala bitno različite rezultate proračuna, dok su se analizom stabilnosti utvrdili vrlo slični rezultati kod svih varijantnih rješenja.

Klizne plohe su izgledom gotovo iste, prolaze kroz sve geotehničke jedinice i obuhvaćaju tlo iza potporne konstrukcije i dijelom dno iskopa zbog uzgona kojeg programski paket PLAXIS prepoznaje iako je za potrebe izrade ovog proračuna njegov utjecaj zanemaren. Sva varijantna rješenja su zadovoljila analizu stabilnosti, odnosno faktor sigurnosti se pokazao većim od 1,0. Rezultati faktora sigurnosti za sve varijante prikazani su u Tablici 31. Najveći faktor sigurnosti  $F_s=1,242$  ima Tip 2-1, odnosno pilotska stijena promjera  $\varphi 800$  i dužine  $d=20\text{m}$ . Međutim, ostale vrijednosti bitno se ne razlikuju od najveće stoga se faktor sigurnosti neće uzeti kao mjerodavni kriterij odabira najpovoljnije konstrukcije.

Tablica 31: Usporedba rezultata provedenih analiza stabilnosti ( $F_s$ )

Konstrukcija	Parametri	Varijantno rješenje	Faktor sigurnosti
Čelične talpe	Larssen 43, $d=16\text{m}$	Tip 1-1	1,148
	Larssen 430, $d=16\text{m}$	Tip 1-2	1,143
	Larssen 605, $d=16\text{m}$	Tip 1-3	1,145
Pilotska stijena	$\varphi 800$ , $d=20\text{m}$	Tip 2-1	1,242
	$\varphi 800$ , $d=16\text{m}$	Tip 2-2	1,142
	$\varphi 600$ , $d=16\text{m}$	Tip 2-3	1,142
AB dijafragma	$D=600$ , $d=16\text{m}$	Tip 3-1	1,136

Analizom naprezanja i deformacija utvrđeni su ukupni pomaci tla i konstrukcije u x smjeru (horizontalni pomaci). Najveći pomaci tla u svim modelima dogodili su se na gornjem dijelu obuhvata neposredno uz potpurnu konstrukciju, a sami pomak konstrukcije također je najveći na njezinoj najvišoj koti. U svim varijantnim rješenjima

vrijednosti pomaka tla i vrijednosti pomaka konstrukcije su približno jednake, stoga se u nastavku kao mjerodavan rezultat i kriterij za usporedbu koristi vrijednost pomaka konstrukcije za svaku varijantu zasebno. U Tablici 32 dan je prikaz pomaka konstrukcija za svaku pojedinu varijantu. Pretežno veliki pomaci dogodili su se kod čeličnih talpi (Tip 1) te kod pilotske stijene (Tip 2-3).

Tablica 32: Usporedba rezultata analiza naprežanja i deformacija ( $\sum P_{ux}$ )

Konstrukcija	Parametri	Varijantno rješenje	Ukupni horizontalni pomaci konstrukcije, $\sum P_{ux}$ [cm]
Čelične talpe	Larssen 43, d=16m	Tip 1-1	4,00
	Larssen 430, d=16m	Tip 1-2	2,67
	Larssen 605, d=16m	Tip 1-3	3,81
Pilotska stijena	$\varphi 800$ , d=20m	Tip 2-1	2,34
	$\varphi 800$ , d=16m	Tip 2-2	2,49
	$\varphi 600$ , d=16m	Tip 2-3	2,90
AB dijafragma	D=600, d=16m	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. Talpe tipa Larssen 430 (Tip 1-2) dosežu nešto manji pomak od 3,81 cm, budući da su im momenti i krutosti veće. Najmanji pomak od 2,67 cm dosežu talpe tipa Larssen 605 (Tip 1-3) zbog najvećih momenata i krutosti u odnosu na ostale Larssen talpe.

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  $\varphi 800$  i najvećom duljinom od 20 m, a ujedno i najvećim krutostima (Tip 2-1), pokazala je najmanje pomake od 2,34 cm. Pilotska stijena promjera  $\varphi 800$  i nešto manje duljine od 16 m (Tip 2-2) dosegla je

pomak od 2,49 cm. Najveći pomak je dosegla pilotska stijena s najmanjim promjerom  $\varphi 600$  i najmanjom duljinom od 16 m (Tip 2-3), koji iznosi 2,90 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. Ukoliko se tome pridoda i smanjenje promjera pilota, pomak postaje još veći.

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. Ipak, pomak AB dijafragme manji je za 0,29 cm u odnosu na pomak pilotske stijene Tip 2-3.

Uspoređujući rezultate pomaka svih varijantnih rješenja, najveći pomak konstrukcije  $\sum P_{u_x}=4,00$  cm pokazao je Tip 1-1, odnosno čelične talpe tipa Larssen 43 s najmanjim krutostima.

U nastavku su prikazane Tablice 33 i 34 koje sadrže minimalne i maksimalne vrijednosti momenata savijanja potporne konstrukcije za GSU i GSN.

Tablica 33: Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSU ( $M_{min}$  i  $M_{max}$ )

Konstrukcija	Parametri	Varijantno rješenje	Minimalni momenti savijanja, $M_{min}$ [kNm/m']	Maksimalni momenti savijanja, $M_{max}$ [kNm/m']
Čelične talpe	Larssen 43, d=16m	Tip 1-1	104,9	158,8
	Larssen 430, d=16m	Tip 1-2	77,66	344,4
	Larssen 605, d=16m	Tip 1-3	108,3	170,5
Pilotska stijena	$\varphi 800$ , d=20m	Tip 2-1	187,4	378,5
	$\varphi 800$ , d=16m	Tip 2-2	47,25	407,6
	$\varphi 600$ , d=16m	Tip 2-3	102,1	285,8
AB dijafragma	D=600, d=16m	Tip 3-1	71,45	358,8



Tablica 34: Usporedba rezultata analiza naprezanja i deformacija za GSN ( $M_{min}$  i  $M_{max}$ )

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

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. Kod pilotske stijene, takve momente dosegno je Tip 2-2. AB dijafragma u Tipu 3-1 ima slične vrijednosti momenata kao prethodna dva istaknuta tipa.

Najmanji i najveći moment savijanja dosegula je pilotska stijena promjera  $\varnothing 800$  i duljine 16m, odnosno Tip 2-2. Za granično stanje uporabljivosti, minimalni moment iznosi  $M_{min}=47,25$  kNm/m', a maksimalni  $M_{max}=407,6$  kNm/m'. Za granično stanje nosivosti, vrijednost minimalnog momenta iznosi  $M_{min}=43,43$  kNm/m', a maksimalna doseže vrijednost  $M_{max}=599,3$  kNm/m'.

### 6.5. Odabir projektnog rješenja

Za odabir projektnog rješenja potrebno je uzeti u obzir rezultate provedenih proračuna te analizirati iste. Prilikom odabira je potrebno voditi računa o stabilnosti geotehničke konstrukcije (faktori sigurnosti), ukupnim pomacima konstrukcije i okolnih objekata te o nosivosti pojedinih elemenata unutar geotehničke konstrukcije (sidra, pilot ili dijafragma ili talpe) koje je potrebno provjeriti (dimenzionirati) u svakoj fazi izvedbe (iskopa) te u fazi korištenja (ukoliko se radi o trajnoj građevnoj jami).

Osim gore navedenih proračunskih uvjeta potrebno je voditi računa i o tehnologiji koja može ovisiti o geološkim uvjetima u tlu, podzemnoj vodi, geometrijskim uvjetima na gradilištu (blizina okolnih objekata, pristupni putevi itd.), ekonomskim uvjetima, potrebnom vremenu izvedbe radova itd.

S obzirom na sve navedeno, kao najoptimalnija 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 sa stalnom razinom,
- Optimalan 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, a 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.

## 7. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Projektiranje i ponašanje dubokih građevnih jama u izrazito urbaniziranim područjima uvijek je povezano s ozbiljnim problemima koji se uglavnom odnose na utjecaj na susjedne građevine koje se nalaze u neposrednoj blizini, utjecaj podzemne vode i projektiranje u slabo nosivom tlu općenito. Stoga je izuzetno važno već u fazi projektiranja odrediti raspon mogućih utjecaja [7]. Ovaj diplomski rad obuhvaća 7 varijantnih rješenja osiguranja građevne jame za izgradnju nove gradske knjižnice Paromlin u Zagrebu. Varijantna rješenja su definirana na jednom mjerodavnom presjeku te su podijeljena u 3 kategorije prema tipu potporne konstrukcije. Proračun je izvršen u programskom paketu PLAXIS 2D i napravljena je usporedba rezultata.

S obzirom na odabrane tipove potpornih konstrukcija, njihove profile, parametre i geometrijske karakteristike, proračuni su pokazali očekivane rezultate. Rezultati su prikazani za kritičnu, ujedno i posljednju fazu izvedbe. Najveće deformacije konstrukcije, odnosno najveći pomaci konstrukcije u horizontalnom smjeru zabilježeni su 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 se osigurava optimalan odnos cijene i vremenskog trajanja radova.

Za kraj, može se zaključiti kako za odabir inženjerskog projektnog rješenja najvažniju ulogu ima provedba detaljnih proračuna i analiza rezultata. Potrebno je provjeriti i

analizirati više projektnih rješenja i moguće tehnologije izvedbe. Uz proračun, vrlo je važno model promatrati iz šire perspektive te uzeti u obzir i ostale kriterije za odabir najpovoljnijeg rješenja (geološki uvjeti u tlu, vrijeme potrebno za izvedbu radova, geometrijski uvjeti na gradilištu, cijena radova te trenutno stanje na tržištu).

## LITERATURA

- [1] Vrkljan I., *Podzemne građevine i tuneli*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2003.
- [2] Dugonjić Jovančević S., *Merlin, Materijali s predavanja*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 3. listopada 2022. [Mrežno].  
Available: <https://moodle.srce.hr/2022-2023/> [Pristup 23. ožujak 2023.].
- [3] Grad Rijeka, *Garažna građevina na trgu braće Mažuranić – Idejni projekt*, rijeka.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.rijeka.hr/gradska-uprava/gradski-projekti> [Pristup 16. srpanj 2023.].
- [4] Belošević D., *2D i 3D proračun građevne jame*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [5] Vivoda Prodan M., *Merlin, Materijali s predavanja*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 3. listopada 2022. [Mrežno]. Available: <https://moodle.srce.hr/2022-2023/> [Pristup 23. ožujak 2023.].
- [6] Geotech.hr, *Osiguranje građevne jame – Roxanich Heritage Wine Hotel i vinski podrum*, Geotech.hr, 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 16. srpanj 2023.]
- [7] Horodecki G. A., Bolt A. F., Dembicki E., *Geotehnički problemi projektiranja i ponašanja građevnih jama*, strični rad, Građevinar 55, 2003.
- [8] Nonveiller E., *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [9] Roje Bonacci T., *Potporne građevine i građevne jame*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2005.
- [10] Ztgradnja.hr, *Iskopi i betonaže*, ztgradnja.hr, 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.ztgradnja.hr/> [Pristup 16. srpanj 2023.]
- [11] Szavits Nossan V., *Mehanika tla i stijena: Potporne konstrukcije*, Repozitorij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
- [12] Arbanas Ž., *Opservacijske metode pri projektiranju i izvođenju građevnih jama u stijenskoj masi u urbanim sredinama*, Geotehnika, Društvo za geotehniku u Bosni i Hercegovini, 2015.
- [13] Atik.hr, *Projekti zaštite iskopa građevinskih jama*, atik.hr, 2020. [Mrežno]. Available: <https://atik.hr/> [Pristup 12. srpanj 2023.]

- [14] Eviz.hr, *Oprema za graditeljstvo i armiračnice: Talpe, čelični profili Larsen*, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.eviz.hr/> [Pristup 12. srpanj 2023.]
- [15] Geotech.hr, *Pilotska stijena*, Geotech.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 16. srpanj 2023.]
- [16] Geotech.hr, *Izvedba armiranobetonskih dijafragmi*, Geotech.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 16. srpanj 2023.]
- [17] Geotech.hr, *Sile u razuporama u ugrađenim potpornim konstrukcijama*, Geotech.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 12. srpanj 2023.]
- [18] Geotech.hr, *Top down metoda izgradnje*, Geotech.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 12. srpanj 2023.]
- [19] NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19, *Zakon o gradnji*, 28.12.2019.
- [20] Bond A., Harris A., *Decoding Eurocode 7*, Taylor & Francis Group, London, 2008.
- [21] Gaba A., Hardy S., Doughty L., Powrie W., Selemetas D., *Guidance on embedded retaining wall design*, CIRIA C760, London, 2017.
- [22] Mance I., Dugonjić Jovančević S., Peranić J., *Prednosti korištenja 3D numeričkih modela u projektiranju tunela*, stručni rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2022.
- [23] Jagodnik V., *Merlin, Materijali s predavanja*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 4. listopada 2021. [Mrežno]. Available: <https://moodle.srce.hr/2021-2022/> [Pristup 23. ožujak 2023.]
- [24] Meštrović M., *Metoda konačnih elemenata*, Zagreb, 2020.
- [25] Sorić J., *Metoda konačnih elemenata*, Zagreb, 2003.
- [26] Desai C. S., Kundu T., *Introductory Finite Element Method*, Mechanical and Aerospace Engineering Series, Taylor & Francis, 2001.
- [27] J. Krahn, *Stress and deformation modeling with sigma-w*, Technical report, GEO-SLOPE International Ltd, Alberta, Canada, 2004.
- [28] Geotech.hr, *“Corner effect” u građevnoj jami – usporedba 2D i 3D analize*, Geotech.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.geotech.hr/> [Pristup 12. srpanj 2023.]
- [29] Bentley.com, *Software PLAXIS 2D*, Bentley.com, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.bentley.com/> [Pristup 12. srpanj 2023.]
- [30] Grad Zagreb, Gradski ured za strategijsko planiranje i razvoj Grada, *Paromlin 2013.*, elaborat, Zagreb, 2013.

- [31] Kgz.hr, *Gradska knjižnica Paromlin*, gkz.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.kgz.hr/> [Pristup 10. srpanj 2023.]
- [32] Upi-2m.hr, *Gradska knjižnica Paromlin*, upi-2m.hr, 2023. [Mrežno]. Available: <https://upi-2m.hr/> [Pristup 10. srpanj 2023.]
- [33] Geotech d.o.o., *Nova zgrada Gradske knjižnice grada Zagreba, Projekt zaštite građevinske jame*, građevinski projekt, Rijeka, 2022.
- [34] Geotech d.o.o., *Knjižnica Paromlin, geotehnički elaborat*, građevinski projekt – geotehnički dio, Rijeka, 2020.
- [35] Comterra.eu, *Larssen – profili*, comterra.eu [Mrežno]. Available: <https://www.comterra.eu/> [Pristup 24. ožujak 2023.]
- [36] Duvnjak F., *Glavni projekt zaštite građevne jame za objekt „Atlanske plovidbe“ na predjelu Gruž u Dubrovniku*, diplomski rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split, 2019.