

Analiza stabilnosti iskopa podgrađenih kosim pilotima

Šepac, Zvonimir

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:143370>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Zvonimir Šepac

Analiza stabilnosti iskopa poduprtog kosim pilotima

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Zvonimir Šepac

Analiza stabilnosti iskopa poduprtog kosim pilotima

DIPLOMSKI RAD

Meho-Saša Kovačević prof. dr. sc.

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Zvonimir Šepac

**The stability of excavation supported by
inclined piles**

MASTER THESIS

Meho-Saša Kovačević prof. dr. sc.

Zagreb, 2024.

SAŽETAK

Analiza stabilnosti svakog iskopa usmjerena je na pronalaženje optimalnog rješenja koje osigurava dosljednu stabilnost objekta uz odabir prikladne tehnologije izvedbe, posebno u urbanim uvjetima gdje je prostor često ograničen. U današnje vrijeme, u urbanim sredinama sve je izraženiji zahtjev za očuvanjem prostora budući da tradicionalna rješenja koja koriste duga geotehnička sidra često stvaraju velike prepreke. Korištenje kombinacije kosih i vertikalnih pilota može značajno smanjiti prostor potreban za konstrukciju. Metoda konačnih elemenata omogućuje detaljnu analizu statičke otpornosti ovakvog sustava. Iako je ova metoda ranije korištena u lučkim pristaništima, nije bila primjenjivana za iskope građevinskih jama. Ovdje ćemo pokazati da je ovaj sustav ne samo statički stabilan, već i racionalan u usporedbi s drugim metodama za zaštitu iskopenih područja.

Ključne riječi: kosi pilot, vertikalni pilot, spreg, vlačna nosivost pilota, kut nagiba

SUMMARY

The stability analysis of each excavation leads to finding the optimal solution regarding the literal stability of the object itself, along with the selection of appropriate construction technology due to the demands of urban conditions in terms of space. Nowadays, the spatial requirement in urban environments is particularly pronounced, considering that most previous solutions, due to the use of long geotechnical anchors, create significant obstacles in urban settings. The solution involving the use of a combination of inclined and vertical piles reduces the spatial footprint of the construction several times over. The finite element method of calculation allows for a comprehensive assessment of the static resistance of such a system, and despite it being used in the past for port piers, it has not been used for the excavation of construction pits. This will demonstrate that it is not only statically stable but also very rational in comparison to others in protecting the excavation of construction pits.

Keywords: inclined pile, vertical pile, coupling, tensile capacity of piles, inclination angle

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	i
SUMMARY.....	ii
SADRŽAJ.....	iii
1 UVOD.....	1
2 METODE I TEHNIKE RADA.....	2
3 ZAŠTITE GRAĐEVNIH JAMA.....	3
4 TEHNIČKI OPIS.....	5
5 TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE.....	6
5.1 Program kontrole i osiguranja kvalitete.....	6
5.1.1 Kontrola kvalitete betona.....	7
5.2 Bušenje beskonačnim pužem.....	8
5.3 Mlazno injektirani stupnjaci.....	9
5.4 Naglavna greda.....	11
6 ISTRAŽNI RADOVI.....	13
6.1 Laboratorijski istražni radovi.....	14
6.2 Terenski istražni radovi.....	17
7 DEFINIRANJE PARAMETARA TLA.....	19
7.1 Geotehnička sredina 1.....	19
7.2 Geotehnička sredina 2.....	23
7.3 Geotehnička sredina 3.....	26
7.4 Sumarna tablica parametara.....	27
8 PRORAČUN.....	29
8.1 Dotok vode u građevnu jamu.....	29
8.2 Hidraulička stabilnost.....	30
8.3 Naponsko deformacijske analize.....	31
8.3.1 Parametri elemenata konstrukcije.....	32
8.3.2 Modelski dokaz.....	33
9 DIMENZIONIRANJE.....	38
9.1 Armiranobetonski vertikalni piloti $\phi 60$	38
9.1.1 Rezne sile.....	38
9.1.2 Karakteristike materijala.....	38
9.1.3 Proračun armature kružnog poprečnog presjeka.....	39
9.2 Kosi pilot $\phi 40$ sa IPE180 profilom.....	40

9.2.1	Rezne sile.....	40
9.2.2	Karakteristike IPE180 profila	40
9.2.3	Klasifikacija poprečnog presjeka	40
9.2.4	Otpornost poprečnog presjeka.....	42
9.3	Naglavna greda.....	42
10	ISKAZ PROCIJENJENIH TROŠKOVA GRADNJE.....	43
11	ZAKLJUČAK.....	44
	POPIS LITERATURE	45
	POPIS SLIKA.....	46
	POPIS TABLICA	47
	PRILOZI	48

1 UVOD

Ovaj rad bavi se analizom stabilnosti iskopenih jama koje su osigurane korištenjem vertikalnih i kosih pilota spojenih naglavnom gredom. Cilj je istražiti efikasnost kosih pilota u održavanju stabilnosti iskopenih jama, posebno u urbanim sredinama gdje su prostorna ograničenja često prisutna.

Značaj ove teme proizlazi iz sve veće potrebe za izgradnjom u gusto naseljenim urbanim područjima, gdje prostorni uvjeti često ograničavaju tradicionalne metode osiguravanja stabilnosti iskopa. Duga geotehnička sidra često stvaraju velike prepreke u takvim sredinama, čineći nužnim traženje alternativnih rješenja koja su jednako učinkovita, ali manje prostorno zahtjevna. Korištenje kosih pilota nudi potencijalno rješenje ovih problema, smanjujući prostornu zauzetost i omogućujući efikasniju upotrebu dostupnog prostora.

Motivacija za odabir ove teme proizlazi iz interesa za geotehničko inženjerstvo i želje da se istraže inovativna rješenja koja mogu poboljšati sigurnost i efikasnost gradnje u urbanim sredinama. Osim toga, razumijevanje i primjena metoda kao što su kosi piloti mogu značajno doprinijeti održivom razvoju i optimizaciji gradnje u područjima s ograničenim prostorom. Ovaj rad teži doprinosu ovom polju pružanjem dubljeg uvida u prednosti i izazove korištenja kosih pilota za stabilizaciju iskopa.

2 METODE I TEHNIKE RADA

U razradi teme koristiti će se kombinacija numeričkih simulacija i eksperimentalnih podataka. Metode koje će biti korištene uključuju istraživanje postojećih teorijskih modela stabilnosti iskopa. Numeričkim simulacijama, odnosno korištenjem metode konačnih elemenata provest će se detaljne simulacije kako bi se procijenila stabilnost iskopa. Ova metoda omogućava detaljnu analizu složenih geometrija i materijala, pružajući uvid u raspodjelu naprezanja i deformacija unutar sistema. Za izradu numeričkih modela koristiti će se softverski alat Plaxis. Softverski alat Plaxis omogućava simulaciju stvarnog ponašanja iskopa i pilota pod različitim uvjetima opterećenja i tla.

Istraživačke aktivnosti uključivat će prikupljanje i pregled relevantne literature kao što su znanstveni radovi, tehnički izvještaji i studije slučaja koje se koriste u stabilizaciji iskopa.

Analiziranjem i obradom rezultata simulacija i eksperimentalnih podataka procijenit će se efikasnost kosih pilota u stabilizaciji iskopa. Rezultati će biti prezentirani u vidu grafova, tabela i dijagrama. Kroz ove aktivnosti nastojat će se pružiti sveobuhvatan uvid u stabilnost iskopa poduprtog kosim pilotima, čime će se omogućiti razvoj učinkovitijih i racionalnijih inženjerskih rješenja za izazove u urbanim građevinskim projektima.

3 ZAŠTITE GRAĐEVNIH JAMA

Zaštita građevne jame je važan dio procesa građenja i zahtijeva temeljito planiranje, stručne geotehničke analize i primjenu odgovarajućih potpornih i odvodnih sustava. Omogućuje zaštitu radnika i zaštitu opreme te sprječava obrušavanje zemlje, odnosno osigurava stabilnost okolnih struktura.

Faktori kao što je dubina građevne jame, vrsta tla, nivo podzemne vode i infrastruktura u okolini građevne jame određuju metodu zaštite građevne jame. Najstarija metoda je iskopavanje jame sa kosinama umjesto vertikalnih zidova, tehnički najjednostavnija metoda ali zahtjeva veći prostor. Drugi način zaštite je gradnja potpornih konstrukcija koje služe kao potporne stijenke.

Potporne konstrukcije koje čine piloti, različitih izvedba kao što su bušeni piloti ili zabijani piloti, često se upotrebljavaju za podršku i stabilizaciju građevnih jama u slabijim tlima. Potporne konstrukcije mogu biti trajne u obliku pilota ili dijafragmi ili privremene konstrukcije tipa berlinski zid.



Slika 1. Zaštita građevne jame izvedbom dijafragme (izvor: Geokod Zagreb).

U Hrvatskoj graditeljskoj praksi kao vertikalni element konstrukcije najčešće se izvode bušeni piloti ili zabijeni čelični profili i talpe (žmurje), armirano betonske dijafragme te mlazno injektirani stupovi, a za preuzimanje horizontalnih djelovanja koriste se sidra ili ankeri. Iskopi se i oblažu postavljanjem mreža, geotekstilima i torkretom odnosno prskanim mlaznim betonom.



Slika 2. Zaštita građevne jame izvedbom talpi (izvor: Geotech, Rijeka)

Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i ograničenja, te se često koristi kombinacija različitih tehnika kako bi se postigla optimalna zaštita građevne jame.



Slika 3. Zaštita građevne jame izvedbom pilotske stijene (izvor: Geotech, Rijeka)



Slika 4. Zaštita građevne jame izvedbom berlinskog zida (izvor: Square, Egypt)

4 TEHNIČKI OPIS

Za izradu diplomskog rada, analiza stabilnosti iskopa poduprtog kosim pilotima prikazat će se na predmetnoj lokaciji prikazanoj na slici 5. Lokacija se nalazi na Radničkoj cesti uz samu prometnicu, dva i pol kilometra prije Domovinskog mosta. Zahvat se izvodi unutar katastarske čestice u vlasništvu Grada Zagreba (katastarska čestica 2265/14, katastarska općina Žitnjak).



Slika 5. Lokacija građevne jame

Površina građevinske čestice iznosi 1221 m². Kolni i pješački pristup na parcelu osiguran je s javne prometnice na sjevero-istočnom dijelu parcele (Radnička ulica). Građevna jama je pravokutnog oblika dimenzija stranica 15.3 × 12.6 metara, a dubina iskopa je 9.55 metara. Obzirom na relativno ograničen prostor, radi blizine javne prometnice sa sjevero-istočne i parkirališta sa sjevero-zapadne strane parcele te uzimajući u obzir karakteristike temeljnog tla i uvjete podzemne vode, odabrano je rješenje zaštite građevne jame sustavom vertikalnih i kosih pilota.

Sustav vertikalnih i kosih pilota u ranijoj praksi nije često korišten. Umjesto horizontalnih sidra stavljanjem pilota pod optimalnim kutem 15° ili 20° u odnosu na vertikalnu ravninu očekuje se njegov doprinos stabilnosti konstrukcije sprega kosih i vertikalnih pilota. Kao vertikalni element izvest će se pilot promjera 60 cm dužine 13 m, armiran rebrastom armaturom. Kosi pilot promjera 40 cm i duljine 13 m, armiran čeličnim IPE180 profilom,

povezat će se sa vertikalnim pilotom preko naglavne grede dimenzija presjeka 70/80 cm. Naponsko deformacijskim analizama će se obraditi odabrana konstrukcija.

Obzirom na prisutnost podzemne vode već na dubini od 6 m nužno je osigurati i nepropusnu barijeru tako da će se izvesti mlazno injektirani stupnjaci između vertikalnih pilota.

5 TEHNIČKI UVJETI IZVEDBE

Na predmetnoj lokaciji na površini terena nalazi se i betonska ploča debljine 0.1 m, ispod koje je glinoviti šljunak sa pijeskom i nasip. Površinski sloj betona uklonit će se zajedno sa nasipom i šljunkom do dubine od 1.0 m. Geotehnički zahvat, odnosno pilotska stijena izvodit će se sa kote 108 mnv. Piloti se izvode jednom od tehnologija koja garantira potpuni geometrijski i materijalni integritet pilota predviđen projektom.

5.1 Program kontrole i osiguranja kvalitete

Tijekom cijelog procesa građenja potrebno je kontinuirano voditi evidenciju o svim kontrolnim ispitivanjima materijala koji se ugrađuju u građevinu. Ova evidencija mora biti ažurna i potpuna, a na kraju projekta potrebno je sastaviti detaljno izvješće o pogodnosti ugrađenih materijala, u skladu s projektom, ovim programom, te relevantnim pravilnicima, normama i standardima. Ovakva dokumentacija osigurava transparentnost i dosljednost u pogledu kvalitete korištenih materijala te omogućava brzu identifikaciju potencijalnih problema ili odstupanja.

Izvješće o pogodnosti ugrađenih materijala mora uključivati sljedeće ključne elemente:

- Naziv materijala te laboratorijsku oznaku uzorka, količinu uzetih uzoraka i njihovu namjenu. Uz to, potrebno je jasno navesti mjesto i vrijeme uzimanja uzorka, kao i detalje o izvršenim ispitivanjima.
- Podaci o proizvođaču materijala i investitoru, kao i podaci o građevini za koju su uzorci uzeti ili za koju je ispitivanje provedeno. Ovi podaci omogućavaju praćenje porijekla i kontrolu kvalitete kroz cijeli lanac opskrbe.
- Rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja, koji moraju biti prikazani na jasan i razumljiv način, uključujući sva izdanja uvjerenja i ocjene kvalitete materijala.
- Ocjena kvalitete materijala i stručno mišljenje o njegovoj prikladnosti (uporabljivosti) za korištenje na određenoj građevini. Također, potrebno je navesti rok do kojeg

izvješće vrijedi, kako bi se osigurala pravovremena ponovna procjena materijala ako je potrebno.

Svi uzorci i rezultati ispitivanja moraju biti zabilježeni u laboratorijsku i gradilišnu dokumentaciju, poput građevinskog dnevnika i građevinske knjige. Proizvođač je obavezan uz svaku isporuku proizvoda ili poluproizvoda priložiti rezultate tekućih ispitivanja koji se odnose na isporučene količine. Materijali koji podliježu obaveznom atestiranju moraju biti popraćeni atestnom dokumentacijom, u skladu s važećim propisima. Sva izvješća, atesti i ostali dokazi o kvaliteti materijala moraju odmah nakon dobivanja biti dostavljeni nadzornom inženjeru, koji na temelju tih podataka može propisati eventualne daljnje kontrolne mjere ili korektivne radnje u izvedbi.

5.1.1 Kontrola kvalitete betona

Proizvođač građevinskih proizvoda u potpunosti odgovara za njihovu kvalitetu, te je obavezan provoditi početno ispitivanje i kontinuiranu internu kontrolu proizvodnje. Interna kontrola proizvodnje obuhvaća sve aktivnosti potrebne za osiguranje i održavanje kvalitete betona u skladu s definiranim tehničkim zahtjevima, normama i standardima.

Kontrola uključuje provjere:

- Ispravnosti opreme i instrumenata koji se koriste u proizvodnji.
- Kvalitete osnovnih materijala (agregata, cementa, aditiva, vode) koji se koriste u izradi betona.
- Karakteristika svježeg i očvrslog betona, uključujući konzistenciju, čvrstoću i otpornost na različite vanjske utjecaje.

Proizvođač mora u okviru ovog procesa obaviti sljedeće ključne zadatke:

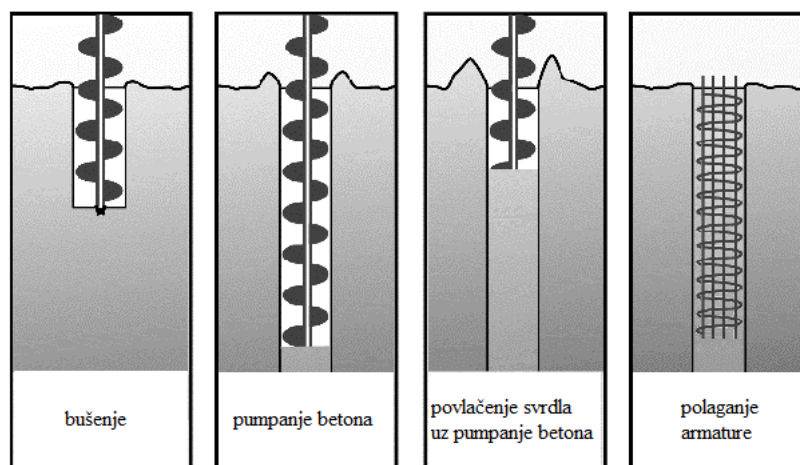
- Organizacija laboratorija i uspostava stalne tvorničke kontrole proizvodnje. Laboratorij mora biti opremljen za provođenje potrebnih ispitivanja betona, a kontrola proizvodnje mora biti sustavna i redovita.
- Imenovanje odgovorne osobe koja će biti zadužena za sve radnje u postupku ocjenjivanja sukladnosti građevinskog proizvoda. Ova osoba mora osigurati da se svi postupci kontrole kvalitete provode u skladu s propisima.
- Uspostava sustava pisanih uputa i procedura, uključujući priručnike, radne upute i zapise, kako bi se osigurala dosljednost i kvaliteta u svim fazama proizvodnje. Ove

upute moraju biti jasno definirane i lako dostupne svim zaposlenicima koji sudjeluju u proizvodnji.

Pored navedenih mjera, proizvođač je obavezan pratiti i analizirati sve rezultate ispitivanja te po potrebi poduzeti korektivne mjere kako bi se osiguralo da beton ispunjava sve tehničke specifikacije. Svako odstupanje od propisanih standarda mora se odmah dokumentirati, a nadzornoj službi dostaviti izvješće s prijedlogom korektivnih mjera.

5.2 Bušenje beskonačnim pužem

Za izvedbu vertikalnih i kosih pilota koristiti će se CFA tehnologija bušenja. Radi se o vrsti bušaće metode koja se koristi za izradu dubokih temelja, odnosno pilota. U postupku nije potrebna zaštitna kolona jer je stabilnost bušotine osigurana pužem. Nakon što se izbuši do tražene dubine, kroz središnju cijev puža utiskuje se beton uz istovremeno izvlačenje puža. Nakon što se završi betoniranje ugrađuje se armaturni koš vibriranjem ili utiskivanjem u svježi beton.



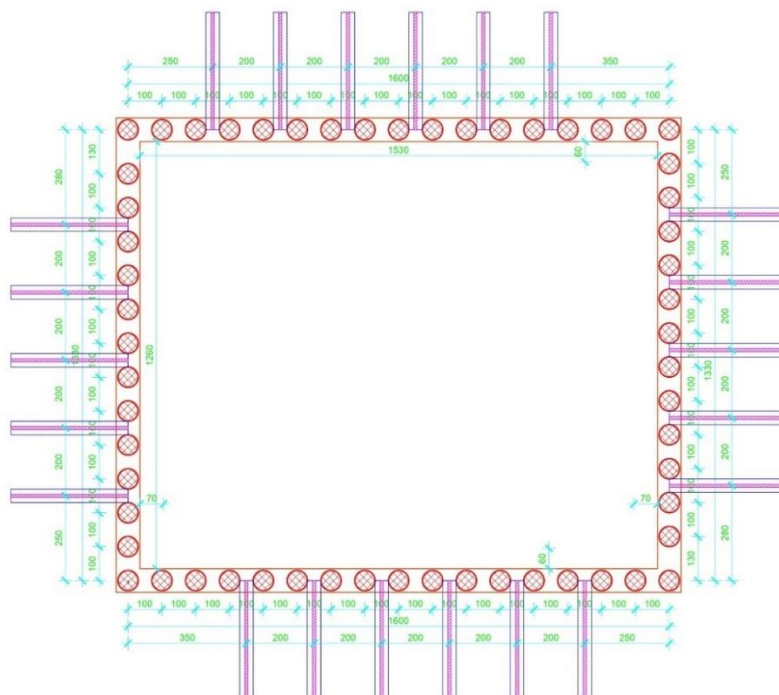
Slika 6. Koraci izvedbe CFA pilota

Piloti izvedeni CFA metodom imaju nekoliko prednosti u odnosu na druge vrste dubokih temelja. Mogu se brzo i učinkovito instalirati u različitim uvjetima tla, uključujući kohezivna tla i mekane stijene. Kao metoda izgradnje pilota je prikladna u pijesku, šljunku i glinama. Izvođenje CFA pilota podrazumijeva ekološke prednosti, uzrokuju male vibracije i nisku buku što ih čini pogodnima za urbana područja, a nije ni potrebna privremena potpora zidova bušotine pomoću bentonitne suspenzije.

Najčešći promjeri pilota izvedenih CFA tehnologijom koji se izrađuju su 30, 45, 60 i 75 cm, čak i do 120 cm, a dubinski se izvode do 30 metara.



Slika 7. Situacija izvođenja pilota CFA tehnologijom



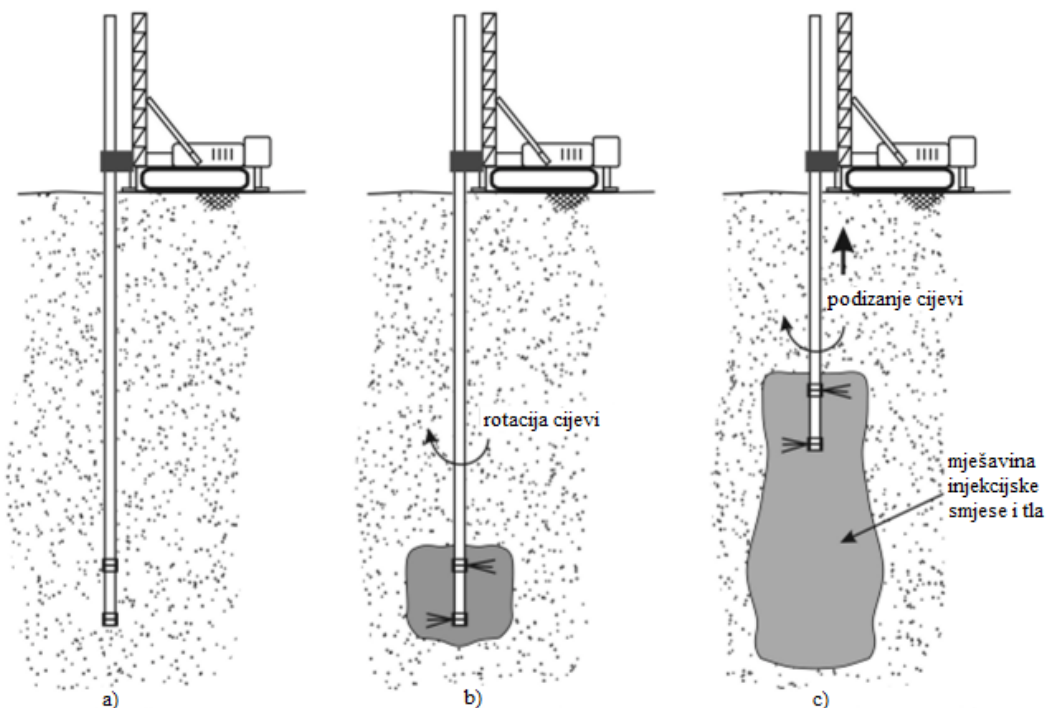
Slika 8. Pozicije izvođenja CFA pilota po obodu jame

5.3 Mlazno injektirani stupnjaci

Nepropusna barijera osigurat će se izvedbom mlazno injektiranih stupnjaka (jet grouting). Jet grouting je metoda ojačanja tla kod koje se traženi volumen tla pretvara u zemljani mort dok se razbija struktura tla pomoću visoko energetskog mlaza fluida.

Posljedica postupka je stvaranje mješavine injekcijske smjese i tla koja se naziva „soilcrete“. Višak teče uz stijenke bušotine na površinu. Metoda izvođenja i vrsta tla određuju promjer djelovanja mlaza. Jet grouting je primjenjiv u svim vrstama tla a za prodor kroz beton i zidove koriste se posebne bušaće krune.

Struktura tla razara se pomoću visoko energetskog tekućeg mlaza, a istovremeno čestice tla se miješaju s cementnom suspenzijom čime takva tijela mogu doseći gustoću od 1900 kg/m³. Za potrebe vodonepropusnosti dodaju se određene suspenzije i do 5% bentonita. Obzirom na potrebe primjene i na vrstu tla koriste se najčešće jednofluidni, dvofluidni i trofluidni sustav mlaznog injektiranja.



Slika 9. Shema provođenja mlaznog injektiranja: a) spužtanje cijevi bušenjem na traženu dubinu, b) početak injektiranja, c) podizanje cijevi i formiranje stupnjaka (Cashman 2022)

Istražnim radovima u predmetnom radu utvrđena je razina podzemne vode na dubini 6 metara od površine terena. Obzirom na definiranu razinu podzemne vode, mlazno injektirani stupnjaci za izradu vodonepropusnog zida građevne jame, izvode se sa dubine od 6 m između vertikalnih pilota kako je i prikazano u prilogu. Predviđeni promjer stupnjaka (valjka koji čini osnovno tlo pomiješano sa cementnom injekcijskom smjesom) je 80 cm i ta veličina se smatra konzervativnom pretpostavkom.

Prije početka radova na izvedbi mlazno injektiranih stupnjaka potrebno je organizirati pregled postojećih objekata u blizini zahvata a posebnu pažnju treba posvetiti stanju instalacija u okolini gradilišta ako ih ima kako ne bi došlo do njihovog oštećenja. Projektni parametri dani su na osnovi podataka o sastavu i karakteristikama tla i prema potrebnoj kvaliteti stupnjaka.

Tlak injektiranja iznosi otprilike 400 bara dok utrošak suhe tvari injekcijske smjese po m³ je 350 kg. Vodocementni faktor je izabran 1:1. Broj mlaznica ovisno o korištenoj opremi za rad varira između 2 do 4, u ovom slučaju odabrano sa 2 mlaznice promjera 2 mm.

Kada se radi sa kontinuiranim podizanjem pribora, a ne u inkrementima, kao i vrijeme trajanja injektiranja na nekoj razini određuje se ovisno o opremi koja se koristi za provedbu mlaznog injektiranja. U slučaju da se koristi oprema koja radi po principu podizanja pribora u inkrementima uvjet rada je da imamo najmanje dva puna okreta pribora na svakom horizontu.

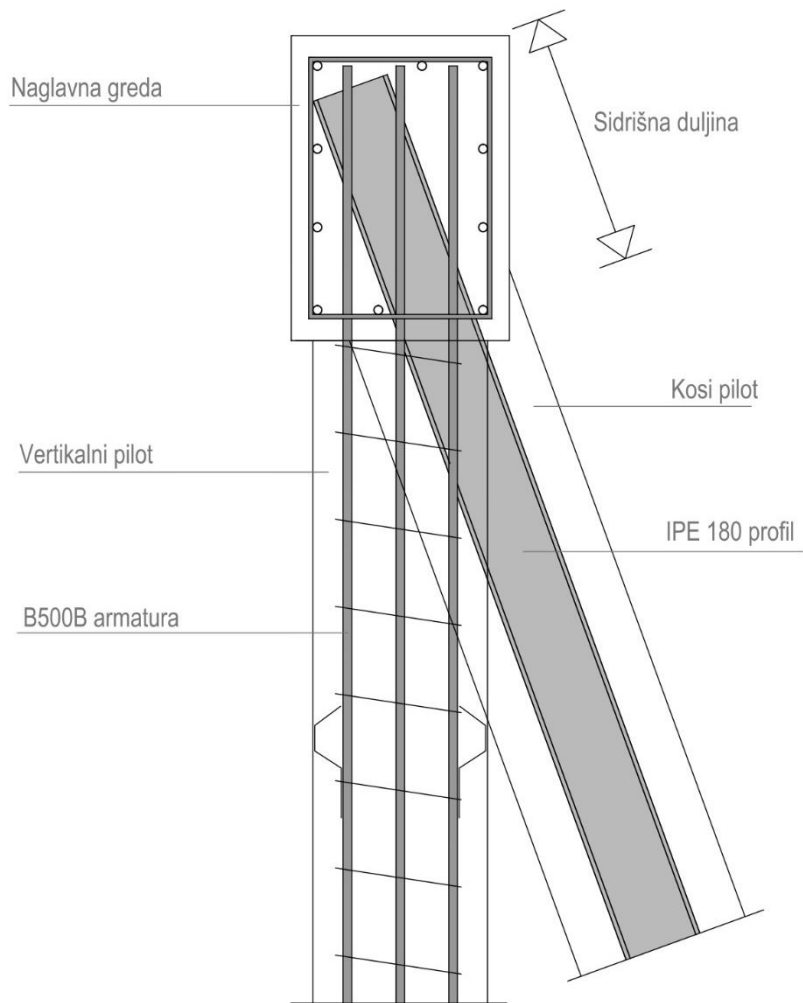
Navedeni podaci o vremenu i načinu izvedbe mlazno injektiranih stupnjaka dani su prema teoretskim izračunima.

Visina podizanja pribora je 8 cm i trajanje injektiranja na svakoj razini 30 sekundi.

5.4 Naglavna greda

Naglavnom gredom međusobno se povezuju vertikalni i kosi piloti u jednu kontinuiranu zaštitnu konstrukciju. Naglavnom gredom raspodjeljuju se naprezanja i deformacije konstrukcije pa je bitan element otpornosti i stabilnosti.

Za izradu grede, u dvostranoj oplati koristiti će se beton razreda C30/37 i armatura B500B. Spoj naglavne grede sa vertikalnim i kosim pilotima prikazan je na slici 10.

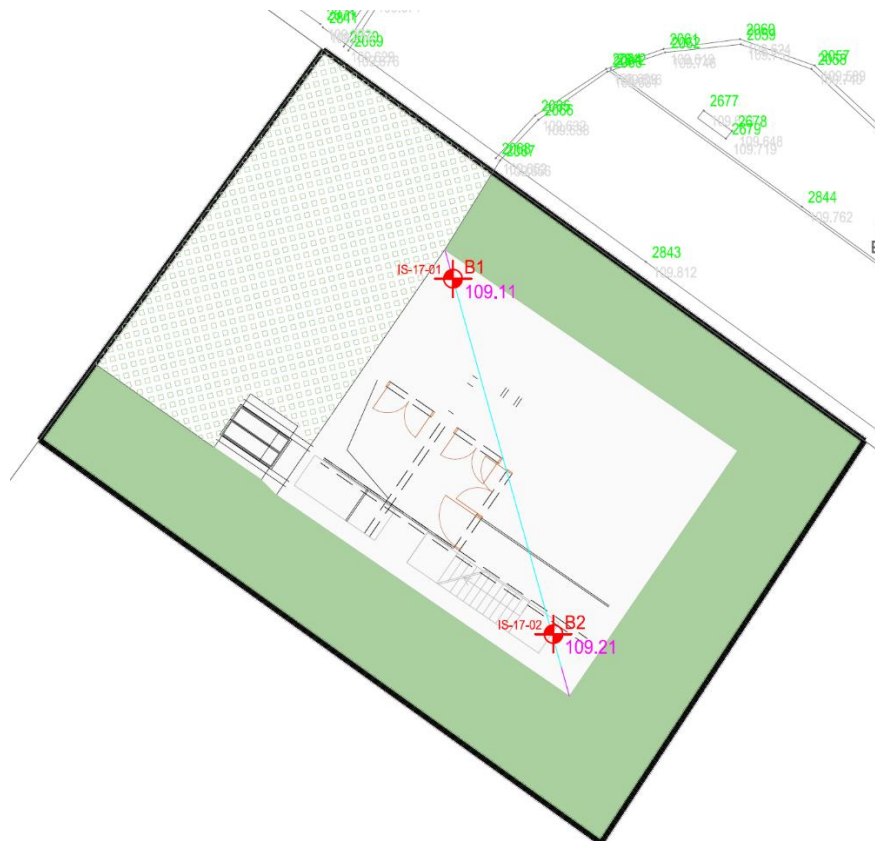


Slika 10. Spoj vertikalnog i kosog pilota u naglavnoj gredi

6 ISTRAŽNI RADOVI

Na temelju provedenih geotehničkih terenskih i laboratorijskih istražnih radova dobiveni su podaci o sastavu temeljnog tla i fizikalno-mehanička svojstva tla te podaci o pojavi i razini podzemne vode na lokaciji zahvata.

U sklopu istražnih radova izvedene su dvije istražne bušotine dubina 15 (B1) i 20 (B2) metara mjereno sa površine terena. Istražna bušenja su provedena do dubine od 15 do 20 metara jer je bilo nužno dobiti podatke o temeljnom tlu za potrebe izrade projekta građevne jame koja je dubine 9.55 metara.



Slika 11. Lokacija bušotina na terenu

6.1 Laboratorijski istražni radovi

U dvije istražne bušotine uzeti su uzorci tla za laboratorijska ispitivanja. U bušotini B1 uzeta su 4 poremećena uzorka na kojima je određen granulometrijski sastav, dijagram plastičnosti i granice konzistencije. Isto je određeno i u bušotini B2 uz prvi uzeti neporemećeni uzorak na kojem su provedena i laboratorijska ispitivanja u edometru te pokus izravnog smicanja (neporemećeni uzorak izvađen sa dubine od 1.2-1.5m., bušotina B2)

Na temelju laboratorijskih pokusa na neporemećenom uzorku određeni su parametri čvrstoće (izravni posmik) i krutosti (edometar).

Edometarskim pokusom na neporemećenom uzorku dobiveni su rezultati u obliku modula kompresije za pojedine inkremente naprezanja kako je prikazano u tablici 1.

Tablica 1. Moduli kompresije za inkremente naprezanja

Modul kompresije za naprezanje od 50 kPa, M_{k50} (MPa):	1.8
Modul kompresije za naprezanje od 100 kPa, M_{k100} (MPa):	2.9
Modul kompresije za naprezanje od 200 kPa, M_{k200} (MPa):	4.3
Modul kompresije za naprezanje od 400 kPa, M_{k400} (MPa):	7.1

Na istom neporemećenom uzorku proveden je i pokus izravnog posmika čiji rezultati su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati pokusa izravnog posmika

Normalno naprezanje σ (kPa)	100	200	400
Maksimalno posmično naprezanje τ (kPa):	71.69	146.89	282.03
Horizontalni pomak (mm):	4.40	5.54	4.96

Na poremećenim uzorcima koherentnih materijala Fall cone testom za određivanje granice tečenja dobivena je vrijednost indeksa plastičnosti i indeksa konzistencije u bušotini B1(na dubinama 4.7-5.0 m i 9.7-10.0 m) te u bušotini B2 (na dubinama 1.2-1.5 m i 5.7-6.0 m).

Dalje prikazani su rezultati na temelju kojih su izračunati indeksi plastičnosti i indeks konzistencije:

Tablica 3. Rezultati određivanja granica konzistencije (B1 dubina 4.7-5.0m)

Granica tečenja W_L (%):	32.04
Granica plastičnosti W_p (%):	19.55
Prirodna vlažnost W_o (%):	27.85
Indeks plastičnosti I_p (%):	12.50
Indeks konzistencije I_c	0.34

Tablica 4. Rezultati određivanja granica konzistencije (B1 dubina 9.7-10.0m)

Granica tečenja W_L (%):	28.23
Granica plastičnosti W_p (%):	18.18
Prirodna vlažnost W_o (%):	25.40
Indeks plastičnosti I_p (%):	10.05
Indeks konzistencije I_c	0.28

Tablica 5. Rezultati određivanja granica konzistencije (B2 dubina 1.2-1.5m)

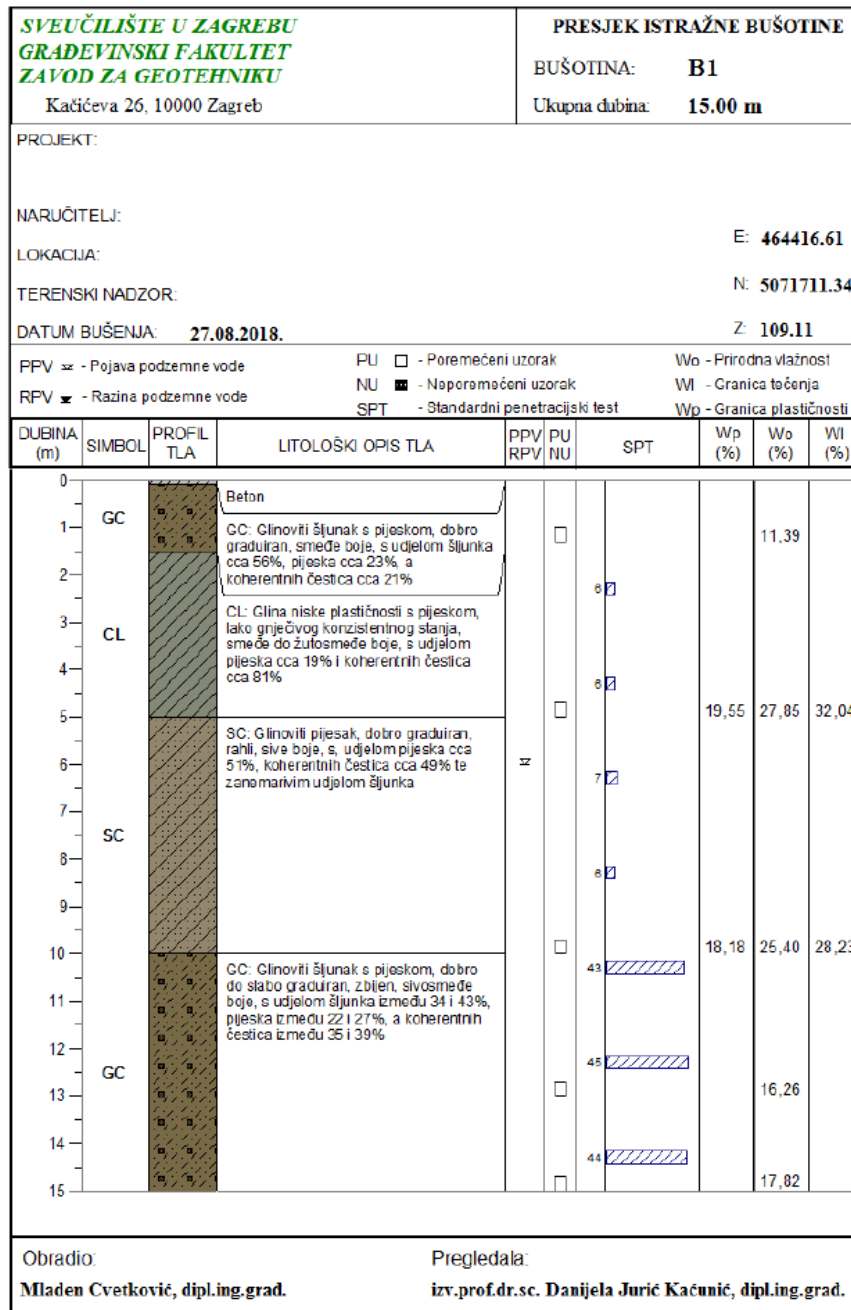
Granica tečenja W_L (%):	24.76
Granica plastičnosti W_p (%):	17.98
Prirodna vlažnost W_o (%):	19.09
Indeks plastičnosti I_p (%):	6.79
Indeks konzistencije I_c	0.84

Tablica 6. rezultati određivanja granica konzistencije (B2 dubina 5.7-6.0m).

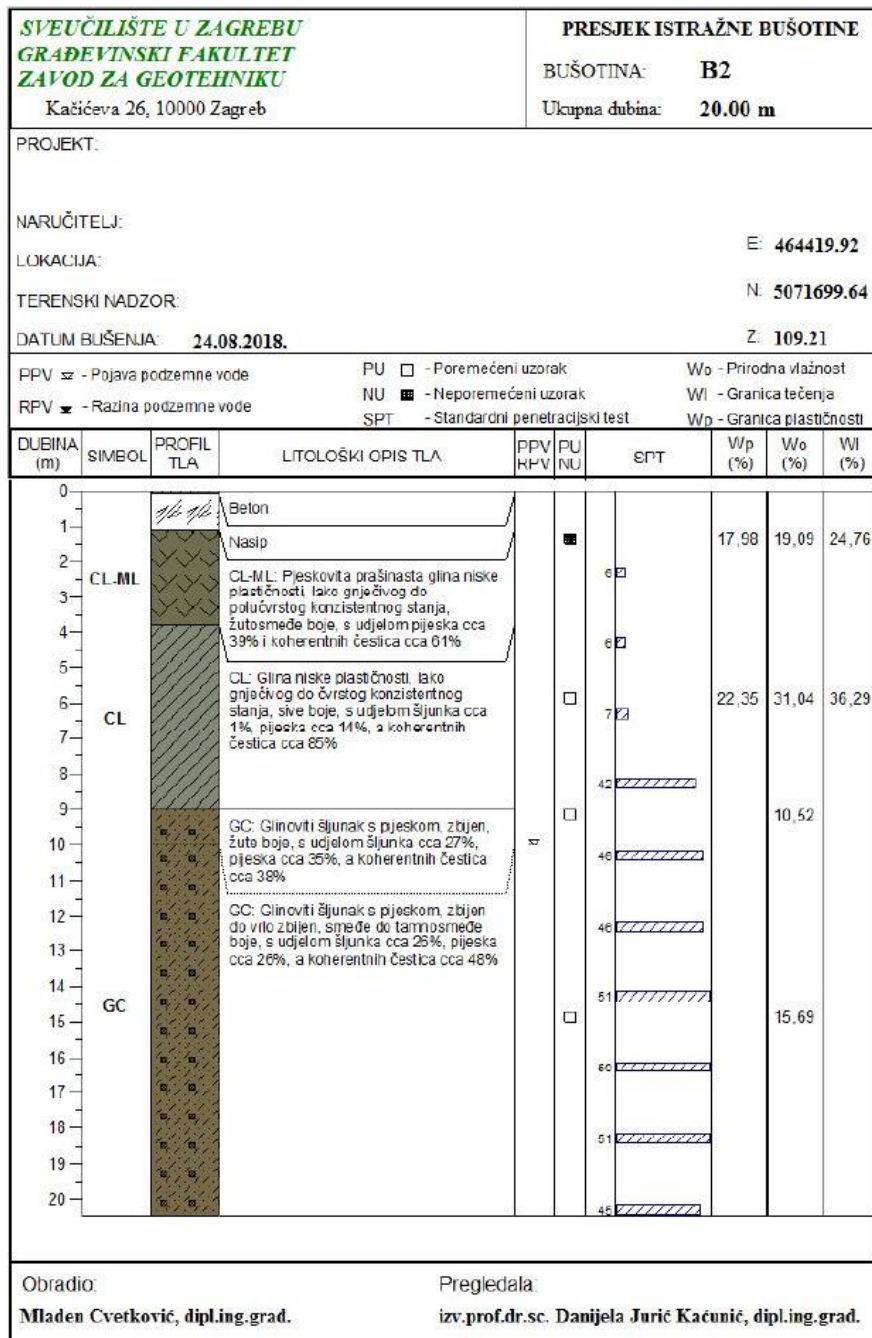
Granica tečenja W_L (%):	36.29
Granica plastičnosti W_p (%):	22.35
Prirodna vlažnost W_o (%):	31.04
Indeks plastičnosti I_p (%):	13.94
Indeks konzistencije I_c	0.38

6.2 Terenski istražni radovi

U sklopu terenskih istražnih radova proveden je standardni penetracijski test. SPT pokusom ispituje se gustoća, čvrstoća i krutost tla. Rezultati SPT ispitivanja su konzistentni po dubini.



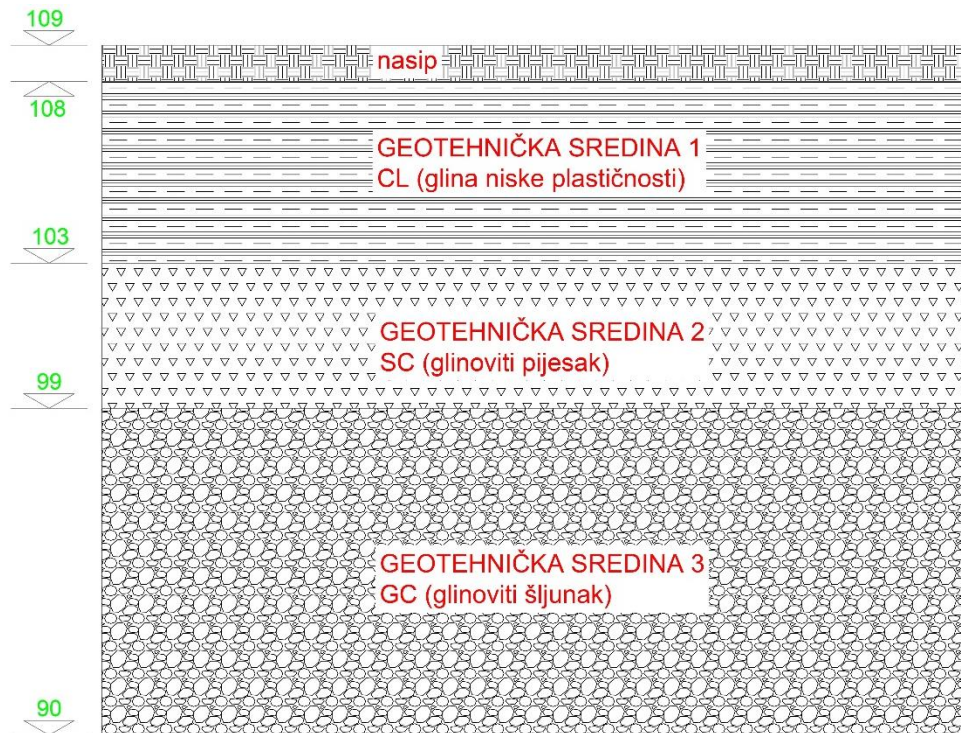
Slika 12. Presjek istražne bušotine B1



Slika 13. Presjek istražne bušotine B2

7 DEFINIRANJE PARAMETARA TLA

Na temelju istražnih radova odabrane su sljedeće geotehničke sredine.



Slika 14. Odabrane geotehničke sredine

7.1 Geotehnička sredina 1

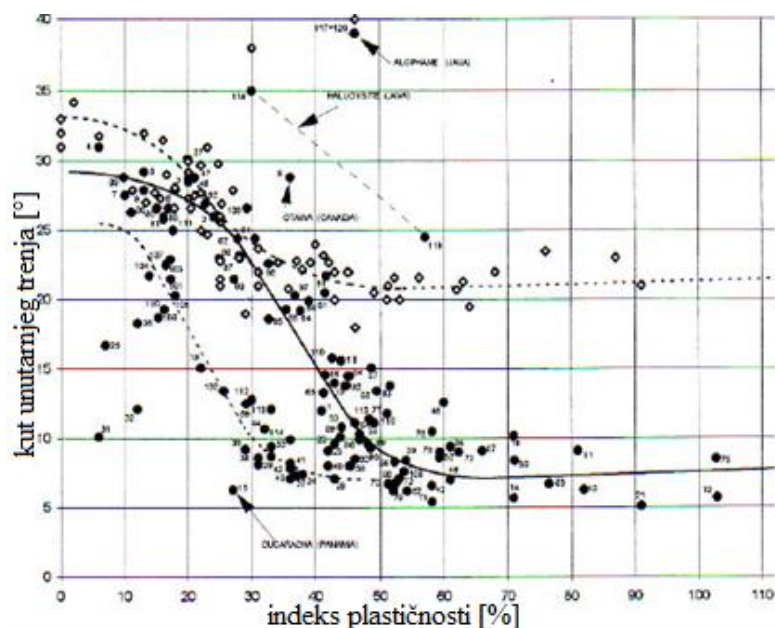
Sa uređenog platoa sa kote 108 mnv. do otprilike 6 metara dubine prevladava koherentni materijal (glina niske plastičnosti).

Rezultati SPT ispitivanja su konzistentni po dubini. Vrijednosti SPT ispitivanja do dubine od 6 metara iskopa u bušotinama B1 (6,6,7,6) i B2 (6,6,7), prema njima procjenjuje se gustoća tla odnosno zapreminska težina iz tablice 7.

Tablica 7. Procjena gustoće tla ovisno o izmjerenom broju udaraca SPT-a

vrsta materijala	N ₆₀	opis	gustoća tla [t/m ³]	
			saturirano	suho
pijesak	0 – 4	vrlo rahli	1,7 – 1,8	1,3 – 1,4
	4 – 10	rahli	1,8 – 1,9	1,4 – 1,5
	10 – 30	srednje zbijen	1,9 – 2,1	1,5 – 1,8
	30 – 50	zbijen	2,0 – 2,2	1,7 – 2,0
	> 50	vrlo zbijen	2,2 – 2,3	2,0 – 2,2
glina	0 – 4	vrlo meka	1,6 – 1,7	0,9 – 1,1
	4 – 8	meka	1,7 – 1,9	1,1 – 1,4
	8 – 15	srednje meka	1,8 – 2,2	1,3 – 1,9
	15 – 30	kruta	1,9 – 2,3	1,8 – 1,9
	30 – 60	vrlo kruta		
	> 60	'čvrsta'		

Procijenjena je saturirana gustoća tla i suha gustoća tla od meke gline koja iznosi 19 kN/m³, odnosno suha gustoća 14 kN/m³. Na temelju prethodno dobivenih laboratorijskih podataka iz dijagrama određen je kut unutarnjeg trenja tla na dubini od 1.0 – 6.0 m. Iz dijagrama za vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja sa slike 15. sa laboratorijski dobivenim vrijednostima indeksa plastičnosti dobiven je vršni kut unutarnjeg trenja. U sredini dubine od 1.0 – 6.0 procijenjen je kut unutarnjeg trenja u vrijednosti 33°.

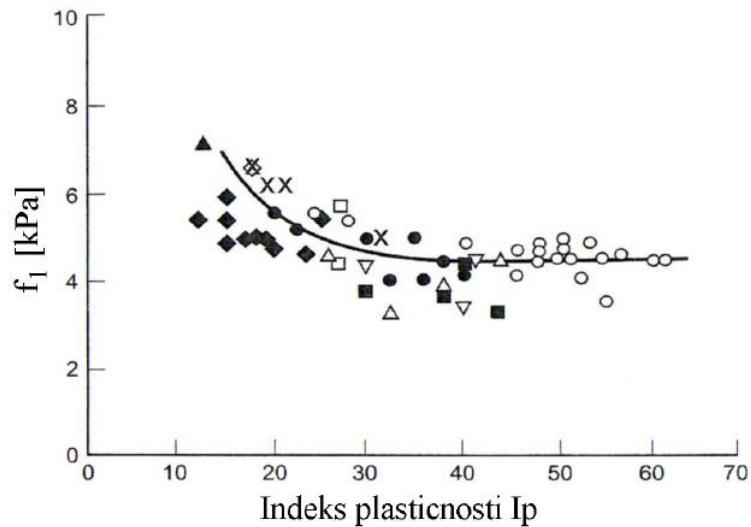


Slika 15. Vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja za sitnozrne materijale ovisno o indeksu plastičnosti (Ortolan Ž. 2009)

Efektivna kohezija odabrana je konzervativno obzirom na laboratorijski pokus izravnog smicanja, rezultati u tablici 2.

$$c_k = 10 \text{ kPa}$$

Nedrenirana čvrstoća u sloju gline na dubini od 1.0-6.0 m:

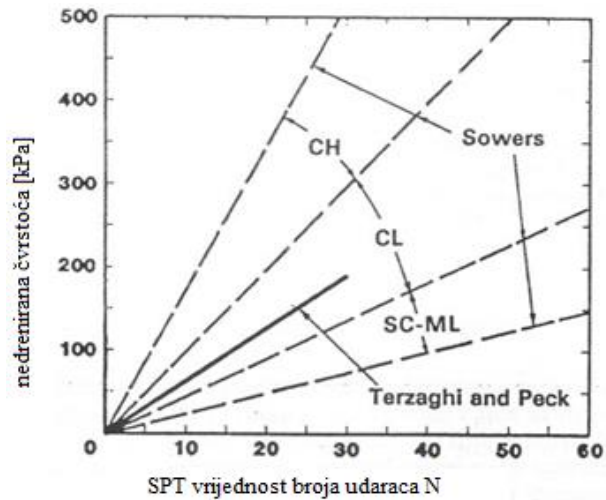


Slika 16. Preporuke za određivanje nedrenirane čvrstoće gline (Clayton 1995.)

$$f_1 = 7.5 \text{ kPa}$$

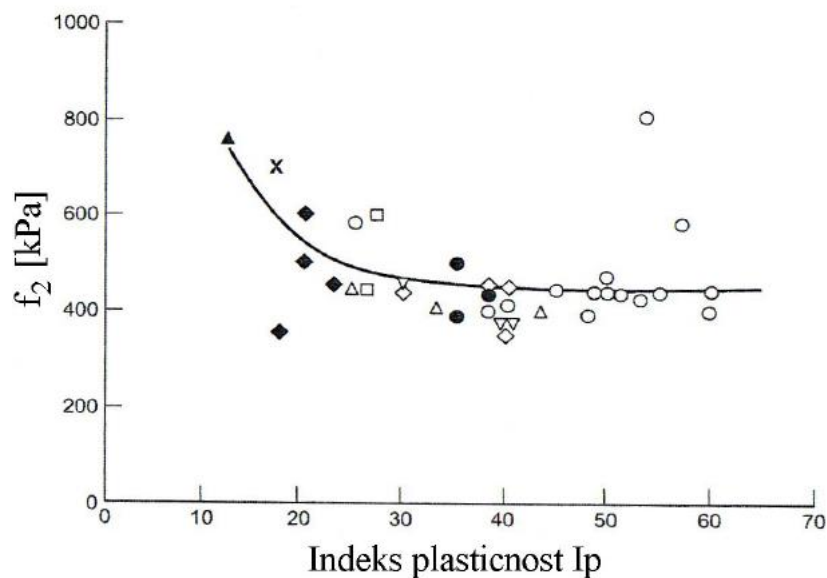
$$c_u = f_1 \cdot N = 7.5 \cdot 6.5 = 48.75 \text{ kPa}$$

Na dijagramu slike 11. za nedreniranu čvrstoću prema SPT pokusu odgovara područje gline niske plastičnosti.



Slika 17. Aproksimacija korelacije između nedrenirane čvrstoće i SPT (Terzaghi K. 1967)

Krutost, odnosno Youngov modul elastičnosti E iz preporuka za određivanje krutosti gline:



Slika 18. Preporuke za određivanje krutosti gline (Clayton 1995.)

Određeno prema indeksu plastičnosti definiranim laboratorijskim ispitivanjima:

$$f_2 = 1000 \text{ kPa}$$

$$E = f_2 \cdot N = 1000 \cdot 7 = 7000 \text{ kPa}$$

Preporuke za krutost gline u odnosu na pretpostavljenu nedreniranu čvrstoću gline:

$$c_u = 48.75 \text{ kPa}$$

$$I_p < 30$$

Za vrijednost indeksa plastičnosti manje od 30% koristi se izraz za krutost gline (Bowles 1997):

$$E_s = (500 \text{ do } 1500) \cdot c_u = 24\,375 \text{ kPa}$$

Generalna procjena u glinama (Bowles 1997):

$$K = 4200 - 142.54 \cdot I_p + 1.73 \cdot I_p^2 - 0.0071 \cdot I_p^3 = 2940$$

$$E_s = K \cdot c_u = 143\,325 \text{ kPa}$$

Odabrana krutost gline niske plastičnosti na dubini od 1.0 do 6.0 m:

$$E_s = 15\,000 \text{ kPa} = 15 \text{ Mpa}$$

7.2 Geotehnička sredina 2

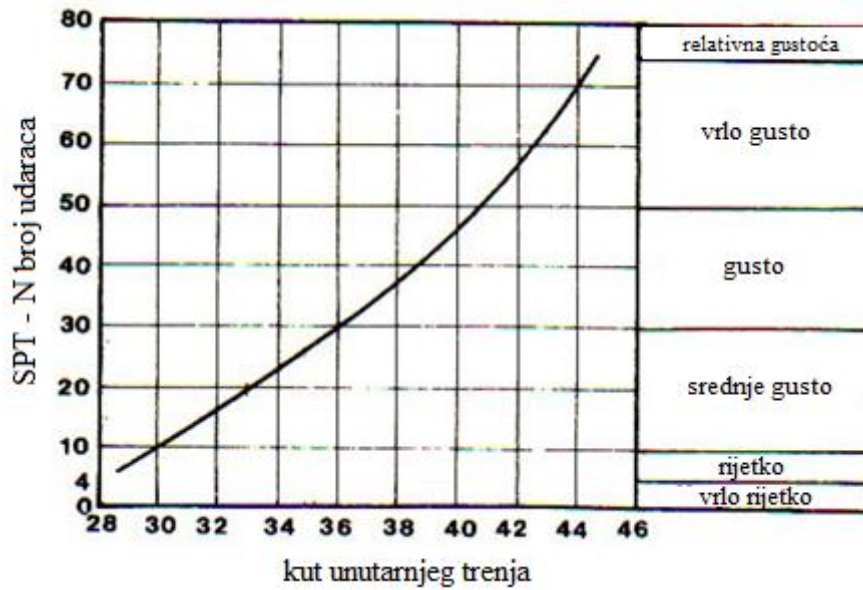
Na dubini od 6.0 m prema dnu iskopa građevne jame prevladava pijesak.

Na istoj dubini je i registrirana razina podzemne vode.

Vrijednosti SPT ispitivanja na dubini od 6 metara do 10 metara, iskopa u bušotinama B1 (7,8) i B2 (7), prema njima procjenjuje se gustoća tla odnosno zapreminska težina iz tablice 7.

Prema tablici 7. procijenjena je saturirana gustoća tla od zaglinjenog pijeska koja iznosi 19 kN/m^3 .

Preporuke za određivanje čvrstoće i krutosti krupnozrnatih tla :



Slika 19. Preporuke za određivanje čvrstoće, kut unutarnjeg trenja (Peck 1974)

U sredini dubine od 6.0 – 10.0 metara procijenjen je kut unutarnjeg trenja u vrijednosti 30°.

Preporuke za krutost pijeska u odnosu na N broj udaraca SPT pokusa:

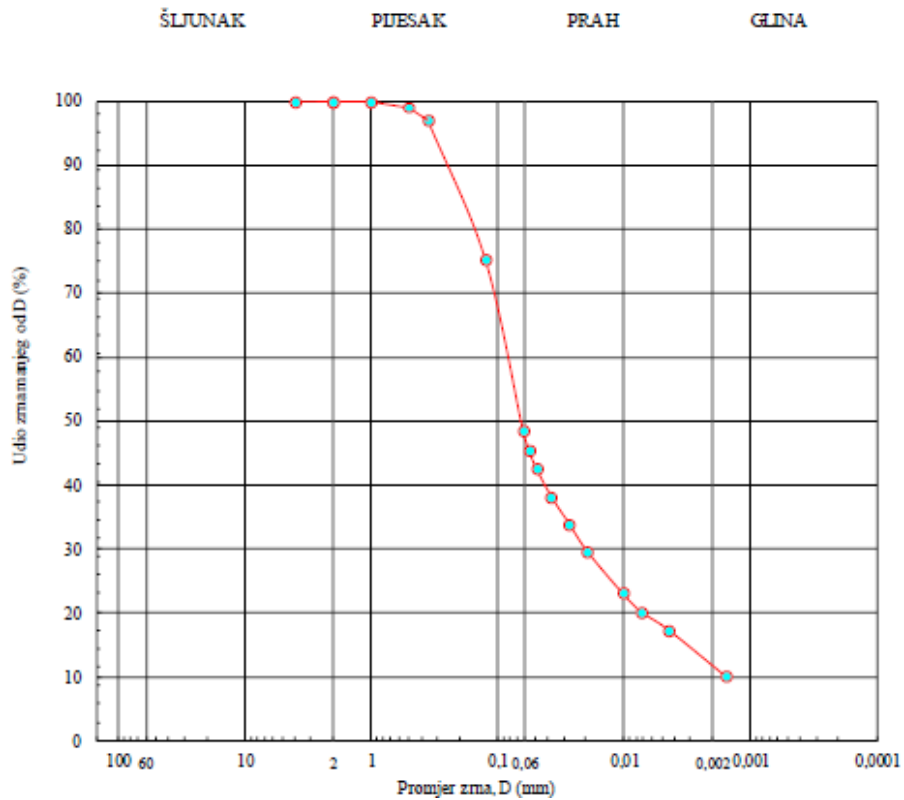
Izraz za krutost pijeska (Bowles 1997):

$$E_s = (2600 \text{ do } 2900) \cdot N = 2600 \cdot (8 + 15) = 20\,800 \text{ kPa}$$

Odabrana krutost pijeska na dubini od 6.0 do 10.0 m:

$$E_s = 15\,000 \text{ kPa} = 15 \text{ Mpa}$$

Određivanje koeficijenta propusnosti:



Slika 20. Granulometrijski sastav, dubina 9.7-10 m, B1 bušotina

Koeficijent propusnosti pijeska je određen prema izrazu koji se bazira na Poiseuille-ovom zakonu za protok kroz kapilare sa uniformnim presjekom:

$$k \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) = C_1 \cdot D_{10}^2$$

U izrazu D_{10} predstavlja efektivnu veličinu zrna u centimetrima, a koeficijent C_1 poprima vrijednosti između 100 i 150.

Tablica 8. Definirani koeficijenti propusnosti za pripadajuću sredinu

SLOJ	D_{10} [mm]	$k(\text{m/s})$	$k(\text{m/d})$
SC	0.0015	$2.7 \cdot 10^{-6}$	0.233

7.3 Geotehnička sredina 3

Na dubini od 10.0 m do 20 m prevladava zaglinjeni šljunak.

Vrijednosti SPT ispitivanja na dubini od 10 metara do 20 metara, iskopa u bušotinama B1 (43,45,44) i B2 (46,48,51,60,61,45)

Preporuke za određivanje čvrstoće i krutosti krupnozrnatih tla sa rezultatima SPT pokusa:

Iz slike 19. prema SPT N broju udaraca procjenjuje se kut unutarnjeg trenja od 40°.

Preporuke za krutost zaglinjenog šljunka u odnosu na N broj udaraca SPT pokusa (Bowles 1997):

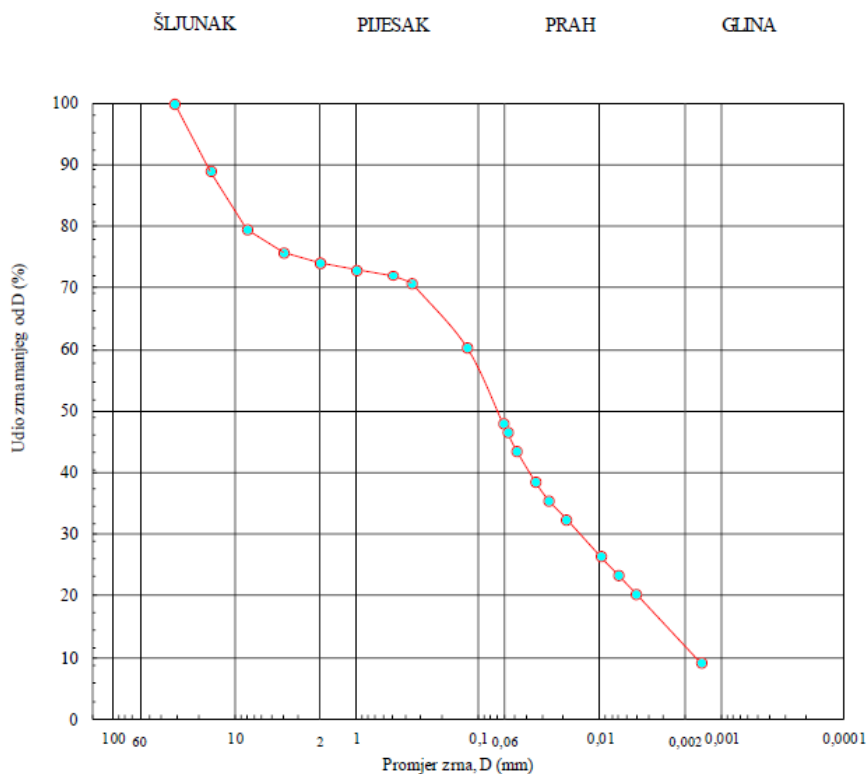
$$N > 15$$

$$E_s = 1200 \cdot (N + 6) = 1200 \cdot (45 + 6) = 61200 \text{ kPa}$$

Odabrana krutost zaglinjenog šljunka na dubini od 10 do 20 m:

$$E_s = 60\,000 \text{ kPa} = 60 \text{ Mpa}$$

Određivanje koeficijenta propusnosti:



Slika 21. Granulometrijski sastav, dubina 14.7-15 m, B2 bušotina

Koeficijent propusnosti šljunka je određen prema izrazu koji se bazira na Poiseuille-ovom zakonu za protok kroz kapilare sa uniformnim presjekom:

$$k \left(\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) = C_1 \cdot D_{10}^2$$

U izrazu D_{10} predstavlja efektivnu veličinu zrna u centimetrima, a koeficijent C_1 poprima vrijednosti između 100 i 150.

Tablica 9. Definirani koeficijenti propusnosti za pripadajuću sredinu

SLOJ	D_{10} [mm]	$k(\text{m/s})$	$k(\text{m/d})$
GC	0.0015	$2.7 \cdot 10^{-6}$	0.233

7.4 Sumarna tablica parametara

Odabrane karakteristične vrijednosti parametara:

Tablica 10. Karakteristične vrijednosti parametara tla

Slojevi	γ [kN/m ³]	φ_k [°]	c_k [kPa]	E_s [MPa]
NASIP 0.0-1.0 [m]	18	36	10	15
GS1-CL 1.0-6.0 [m]	19	33	10	15
GS2-SC 6.0-10.0 [m]	19	30	1	15
GS3-GC 10.0-20.0 [m]	20	40	1	60

Parcijalni faktori odabrani prema proračunskom pristupu 3.

Parcijalni faktor zapremine težine:

$$\gamma_\gamma = 1.0$$

Parcijalni faktor efektivne kohezije:

$$\gamma_{c'} = 1.25$$

Parcijalni faktor kuta unutarnjeg trenja:

$$\gamma_{\varphi} = 1.25$$

Proračunska vrijednost zapremine težine:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_k}{\gamma_{\gamma}} = \frac{\gamma_k}{1.0}$$

Proračunska vrijednost efektivne kohezije:

$$c_d = \frac{c_k}{\gamma_c} = \frac{c_k}{1.25}$$

Proračunska vrijednost kuta unutarnjeg trenja:

$$\tan \varphi_d = \frac{\tan \varphi_k}{\gamma_{\varphi}} = \frac{\tan \varphi_k}{1.25}$$

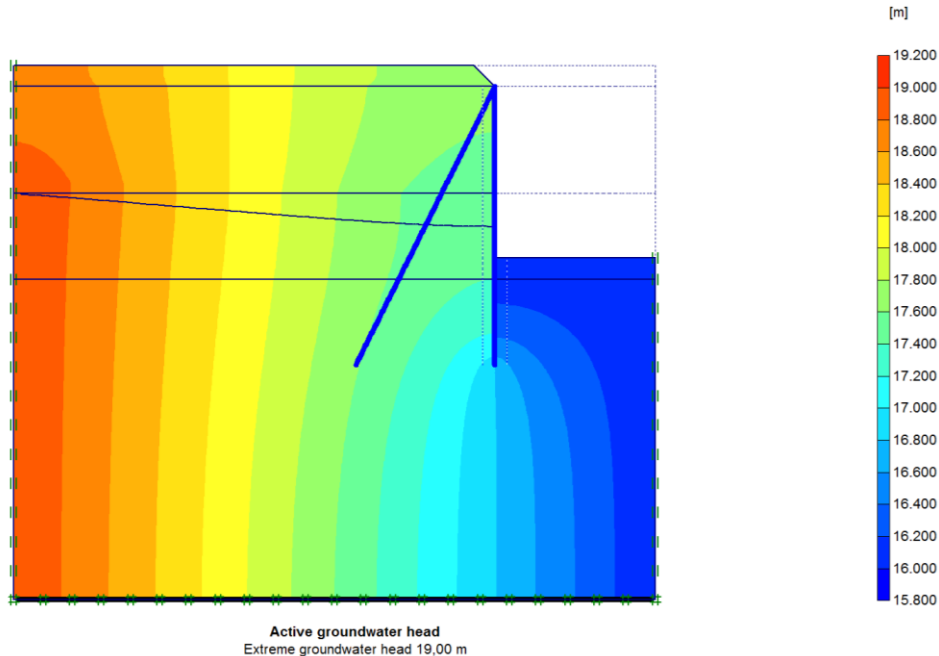
Određene proračunske vrijednosti parametara:

Tablica 11. Proračunske vrijednosti parametara tla

Slojevi	γ [kN/m ³]	φ_d [°]	c_d [kPa]	k [m/d]	E_s [MPa]
NASIP 0.0-1.0 [m]	18	30	8	-	15
GS1-CL 1.0-6.0 [m]	19	27	8	-	15
GS2-SC 6.0-10.0 [m]	19	24	1	0.233	15
GS3-GC 10.0-20.0 [m]	20	34	1	0.233	60

8 PRORAČUN

8.1 Dotok vode u građevnu jamu



Slika 22. Ekvipotencijale s odgovarajućim vrijednostima hidrauličkog potencijala

Dotok vode u građevnu jamu određuje se kao volumni protok u cijevi, odnosno brzina fluida pomnožena sa presjekom jame:

$$Q = v \cdot A = 0.0652 \cdot 192.78 = 12.57 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 0.145 \frac{1}{\text{s}} = 8.7 \text{ l/m}$$

Iz Darcyevog zakona određuje se brzina vode u tlu (napomena, ne predstavlja stvarnu brzinu kretanja čestica vode u tlu, v je srednja brzina procjeđivanja) kao umnožak koeficijenta propusnosti i hidrauličnog gradijenta:

$$v = k \cdot i = 0.233 \cdot 0.28 = 0.0652 \text{ m/d}$$

Hidraulički gradijent:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{3.5}{12.5} = 0.28$$

Radi dotoka vode u građevnu jamu potrebno je osigurati pumpu za vodu kapaciteta 10 litara u minuti.

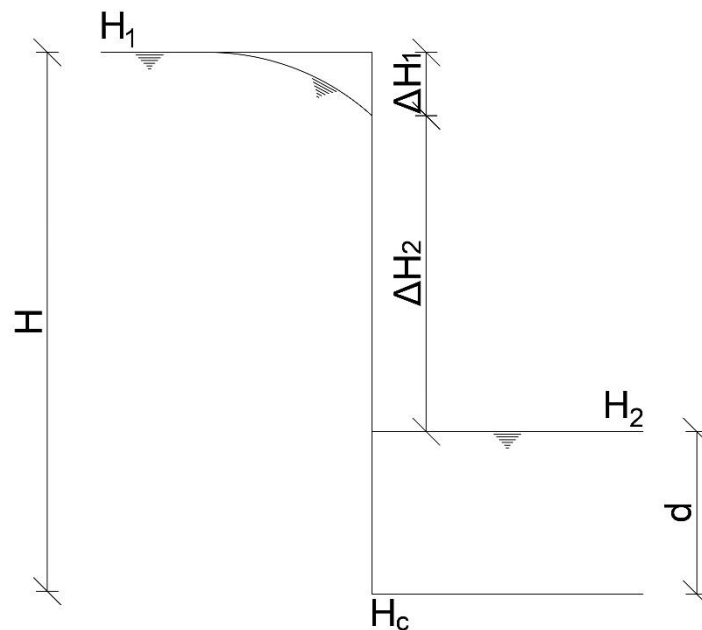
8.2 Hidraulička stabilnost

Hidrauličko izdizanje odnosno hidraulički slom je interna erozija tla uzrokovana hidrauličkim gradijentima (primjerice, hidraulički slom u pjeskovitom dnu građevne jame uslijed vertikalnog strujanja vode prema dnu jame, interna erozija pjeskovitog tla od strujanja vode u nasipu i stvaranje erozijskih kanala)

Hidraulička stabilnost dokazuje se izrazom:

$$u_{d,dst} < \sigma_{d,stb}$$

Proračunska vrijednost stabilizirajućeg pritiska mora biti manja od proračunske vrijednosti destabilizirajućeg pritiska.



Slika 23. Skica hidrauličkih potencijala

$$H_1 = 19 \text{ m}$$

$$H_2 = 15.8 \text{ m}$$

$$H_c = 16.8 \text{ m}$$

$$d = 4.5 \text{ m}$$

$$\Delta H_2 = H_c - H_2 = 16.8 - 15.8 = 1.0 \text{ m}$$

Stabilizirajuće djelovanje čini:

$$\sigma_{k,stb} = \gamma \cdot d + \gamma_w \cdot d = 20 \cdot 4.5 + 10 \cdot 4.5 = 135 \text{ kPa}$$

Destabilizirajuće djelovanje čini:

$$u_{k,dst} = \gamma_w \cdot \Delta H_2 + \gamma_w \cdot d = 10 \cdot 1 + 10 \cdot 4.5 = 55 \text{ kPa}$$

tablica 12. Parcijalni koeficijenti prema Eurokodu 7

(1) Parcijalni koeficijenti za djelovanja (γ_F)					
Djelovanja		simbol	EQU	UPL	HYD
trajna	nepovoljna (destabilizirajuća)	γ_G	1.1	1	1.35
	povoljna (stabilizirajuća)	γ_G	0.9	0.9	0.9
prolazna (povremena)	nepovoljna (destabilizirajuća)	γ_Q	1.5	1.5	1.5
	povoljna (stabilizirajuća)	γ_Q	0	0	0

Prema Eurocode 7 parcijalni koeficijenti za trajna destabilizirajuća djelovanja i trajna stabilizirajuća djelovanja:

$$\gamma_{G,dst} = 1.35$$

$$\gamma_{G,stab} = 0.9$$

Slijedi:

$$\gamma_{G,dst} \cdot (\gamma_w \cdot \Delta H_2 + \gamma_w \cdot d) < \gamma_{G,stab} \cdot (\gamma \cdot d + \gamma_w \cdot d)$$

$$1.35 \cdot 55 < 0.9 \cdot 135$$

$$74.25 \text{ kPa} < 121.5 \text{ kPa} \quad \text{ZADOVOLJAVA}$$

8.3 Naponsko deformacijske analize

Proračun se provodi po metodi konačnih elemenata uz računalni program Plaxis. Svi elementi krutosti konstrukcije kao i parametri tla ulaze u proračun sa konačnim proračunskim vrijednostima tako da rezultati izračuna naprezanja i deformacija predstavljaju se direktno usporedivim sa dozvoljenim.

Iskop građevne jame provoditi će se u tri faze. U prvoj fazi izvršiti će se široki iskop (kosina 1:1) do dubine od 1 m. Pri tome će se ukloniti sa same površine i sloj betona debljine 0.1 m. U istoj fazi uređen je radni plato, na koti 108 mnv sa kojeg se izvode vertikalni i kosi piloti i spajaju sa naglavnom gredom. U drugoj fazi iskop se vrši do dubine od 6 m, gdje je pretpostavljena razina podzemne vode. U trećoj fazi vrši se konačan iskop na dubinu od 9.5 m odnosno na kotu 99.5 mnv.

Proračunom je uzeto u obzir i opterećenje koje se može pojaviti uz samu jamu zbog mehanizacije te potencijalno opterećenje zbog prometa koji se odvija u blizini jame.

Kao konstitutivni model tla odabran je plaxis-ov hardening soil model. Model očvršćivanja tla je napredni model tla u Plaxisu koji se koristi za simulaciju ponašanja tla. Kao i kod Mohr-

Coulombovog modela granična stanja naprezanja opisuju se pomoću kuta trenja i kohezije, a krutost tla je puno preciznije opisana, koriste se tri različite ulazne krutosti.

8.3.1 Parametri elemenata konstrukcije

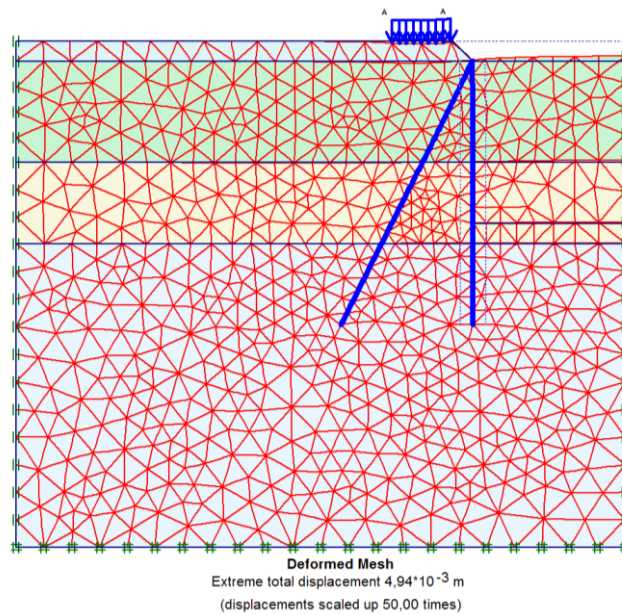
tablica 13. Parametri elemenata konstrukcije

Element	površina poprečnog presjeka A [m ²]	Modul elastičnosti [GPa]	Moment tromosti I [m ⁴]	Aksijalna krutost EA [kN]	Fleksijska krutost [kNm ²]
Vertikalni pilot $\Phi 60$	0.2827	30	0.006362	8481000	190860
Kosi pilot $\Phi 40$	0.1257	30	0.001257	1885500	18855

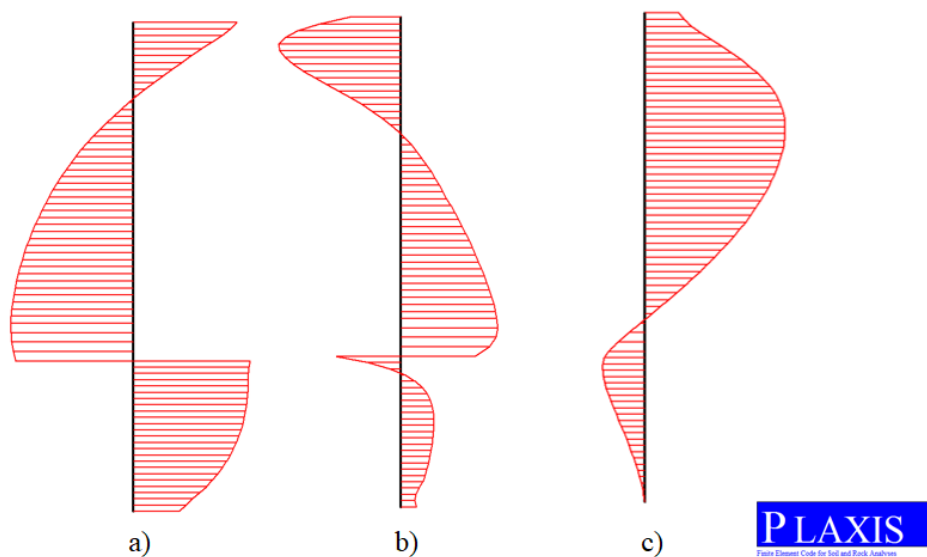
Kosi piloti promjera $\Phi 40$ cm, duljine 13 m armirani su sa čeličnim profilom IPE180 na osnovom razmaku od 2 m, a vertikalni piloti promjera $\Phi 60$ cm, duljine 13 m armirani sa rebrastom armaturom B500B na osnovom razmaku od 1.0 m. U tablici su unesene karakteristike u skladu sa osnim razmakom pilota. Odabrana vrijednost Poissonovog koeficijenta je 0.3.

8.3.2 Modelski dokaz

Faza 1:

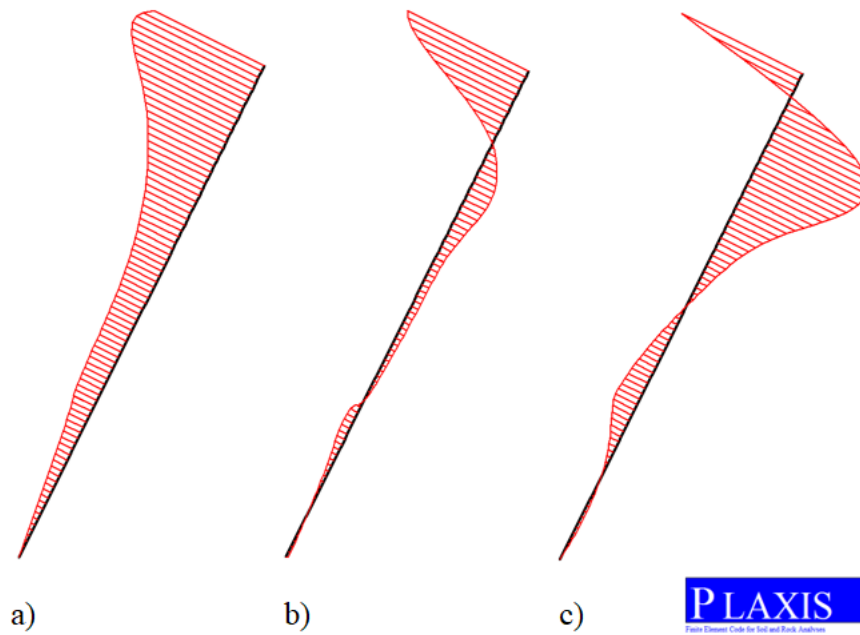


Slika 24. Deformabilnost modela u prvoj fazi



Slika 25. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

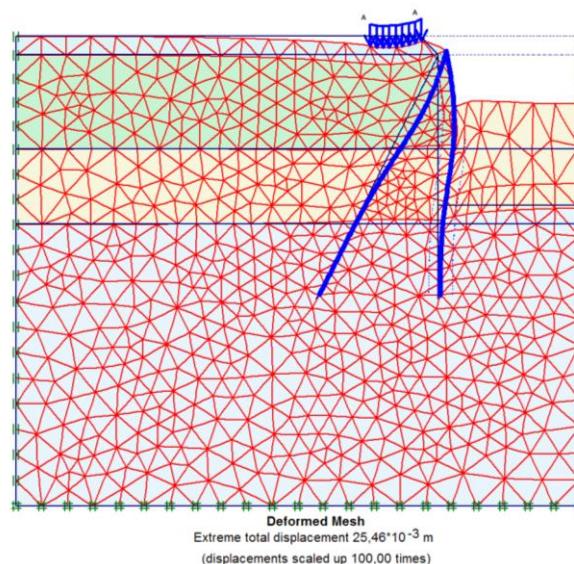
Prilikom iskopa u prvoj fazi I ugradnjom zaštitne konstrukcije ostvaruje se maksimalna deformacija od 2 mm. U vertikalnom pilotu maksimalna uzdužna sila je 16.38 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 6.07 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 14.70 kNm.



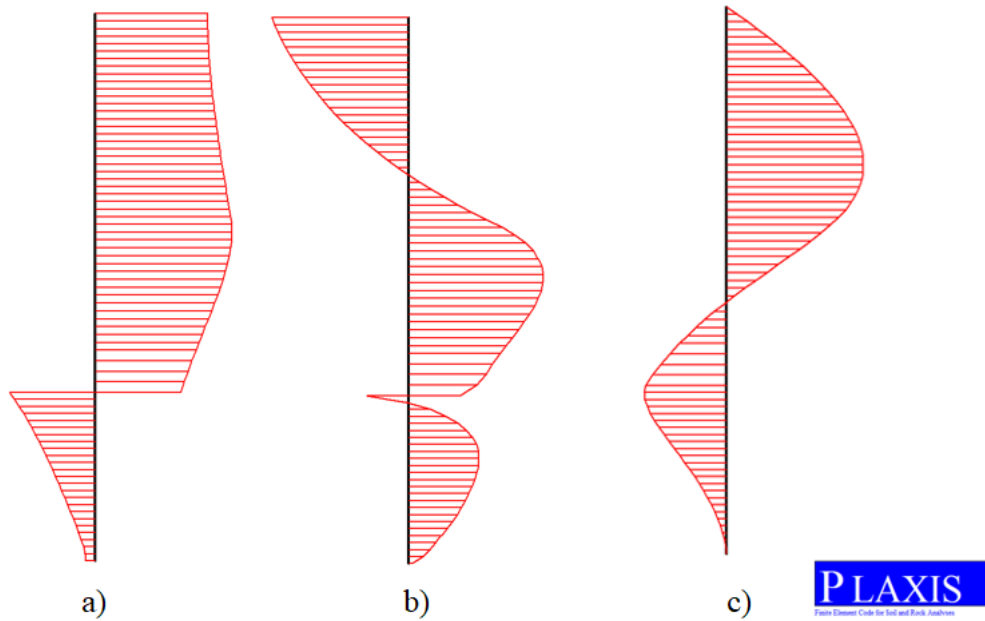
Slika 26. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

U kosom pilotu maksimalna uzdužna sila je 17.08 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 5.66 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 3.52 kNm.

FAZA 2:

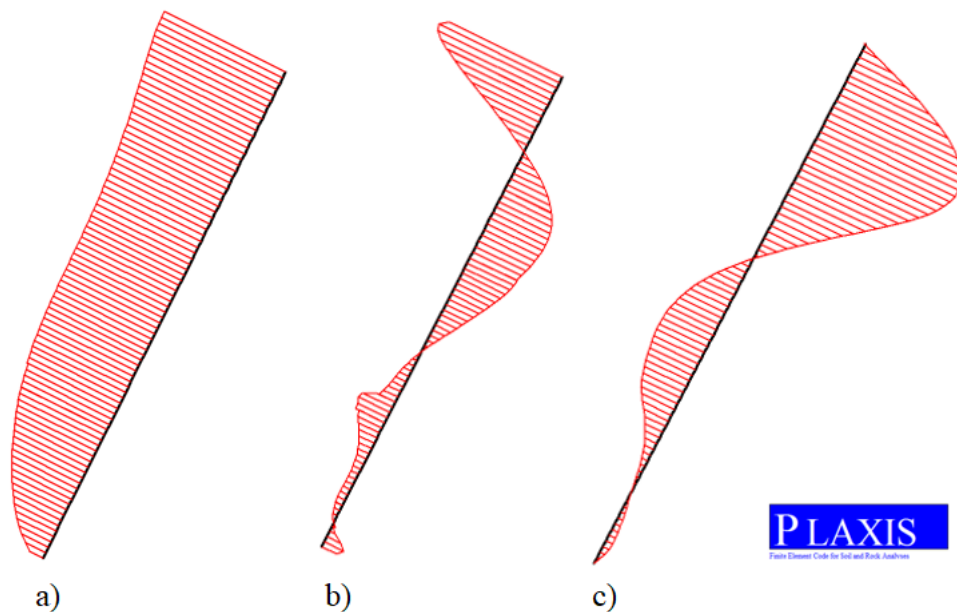


Slika 27. Deformabilnost modela u drugoj fazi



Slika 28. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

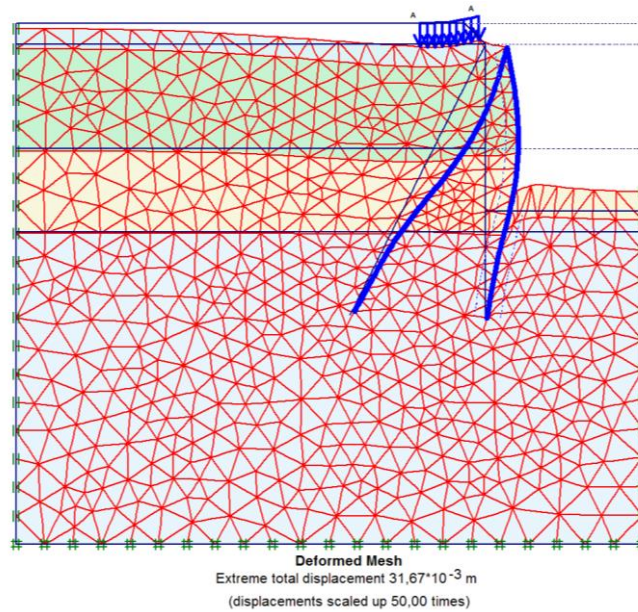
U drugoj fazi daljnim iskopom ostvaruje se maksimalna deformacija od 26 mm. U vertikalnom pilotu maksimalna uzdužna sila je 201.42 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 69.22 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 156.34 kNm.



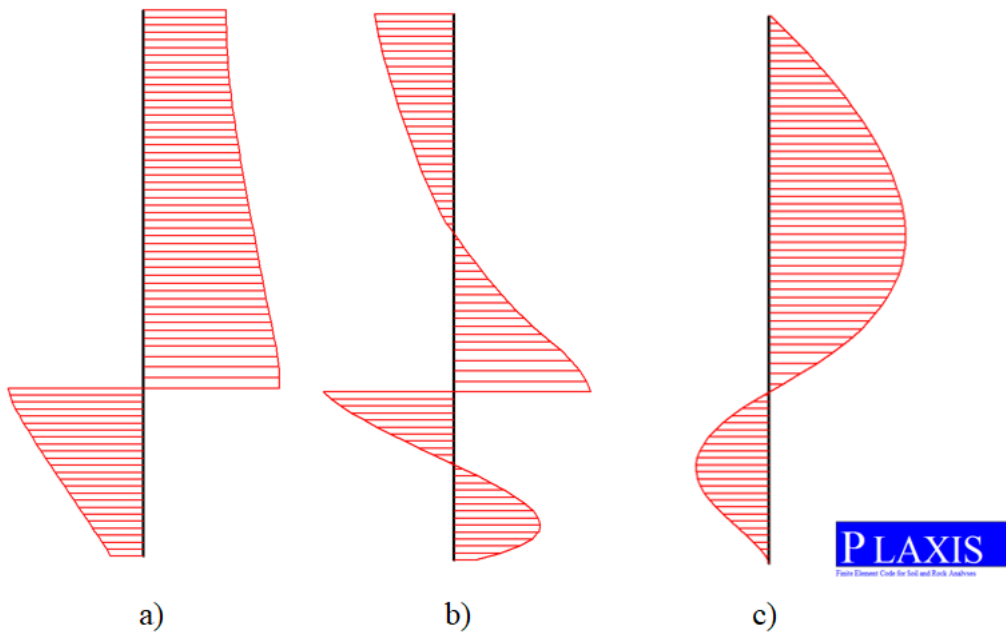
Slika 29. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

U kosom pilotu maksimalna uzdužna sila je 179.18 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 12.56 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 16.85 kNm.

FAZA 3:

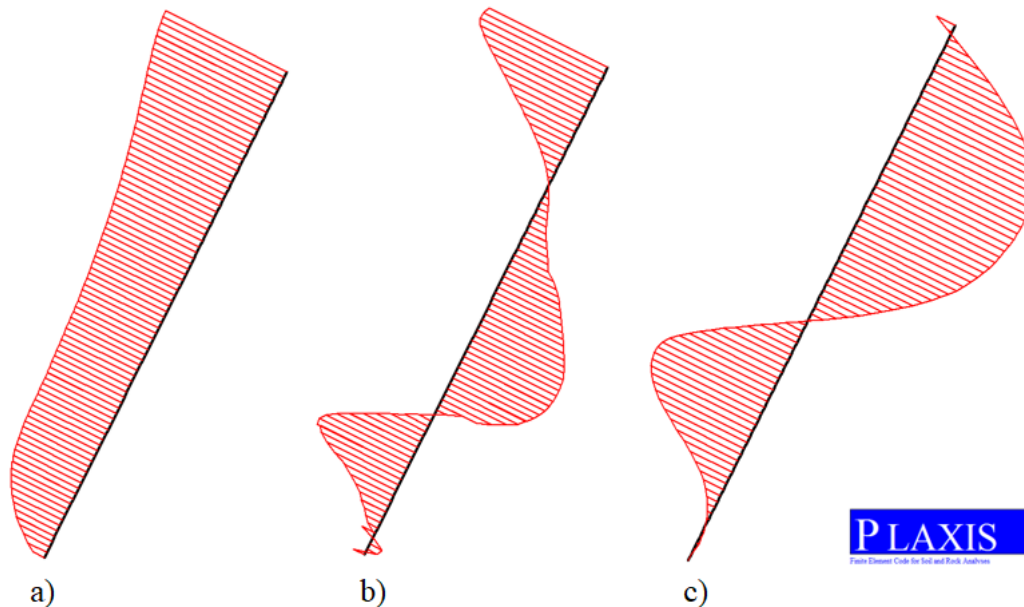


Slika 30. Deformabilnost modela u trećoj fazi



Slika 31. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

U trećoj fazi ostvaruje se maksimalna deformacija od 32 mm. U vertikalnom pilotu maksimalna uzdužna sila je 403.81 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 174.27 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 317.33 kNm.



Slika 32. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu: a) uzdužna sila, b) poprečna sila, c) moment savijanja

U kosom pilotu maksimalna uzdužna sila je 265.41 kN, maksimalna vrijednost poprečne sile je 20.25 kN, a maksimalni moment savijanja iznosi 32.87 kNm.

tablica 14. Sumarna tablica unutarnjih sila

FAZA	VERTIKALNI PILOT			KOSI PILOT		
	UZDUŽNA SILA [kN]	POPREČNA SILA [kN]	MOMENT SAVIJANJA [kNm]	UZDUŽNA SILA [kN]	POPREČNA SILA [kN]	MOMENT SAVIJANJA [kNm]
FAZA 1	16.38	6.07	14.70	17.08	5.66	3.52
FAZA 2	201.42	69.22	156.34	179.17	12.56	16.85
FAZA 3	403.81	174.27	317.33	265.41	20.25	32.87

9 DIMENZIONIRANJE

9.1 Armiranobetonski vertikalni piloti $\Phi 60$

Proračun pilota kružnog poprečnog presjeka kojim se određuje potrebna uzdužna armatura pilota. Piloti kružnog presjeka se uglavnom redovito armiraju spiralnom armaturom koju se može ali i ne mora uzeti u proračun nosivosti (Sorić Z. 2014)

9.1.1 Rezne sile

Maksimalna uzdužna sila u pilotu:

$$N_{\max} = 403.81 \text{ kN}$$

Proračunska vrijednost uzdužne sile u pilotu:

$$N_{\text{Ed}} = 1.35 \cdot N_{\max} = 1.35 \cdot 403.81 = 545.14 \text{ kN}$$

Maksimalni moment savijanja u pilotu:

$$M_{\max} = 317.33 \text{ kNm}$$

Proračunska vrijednost momenta savijanja u pilotu:

$$M_{\text{Ed}} = 1.35 \cdot M_{\max} = 1.35 \cdot 317.33 = 428.39 \text{ kNm}$$

Razmak vertikalnih pilota:

$$s = 1.0 \text{ m}$$

9.1.2 Karakteristike materijala

Razred betona:

C30/37

Koeficijent zbog dugotrajnih učinaka na tlačnu čvrstoću i nepovoljni učinci zbog načina opterećenja (HRN EN 1992-1-1):

$$\alpha_{\text{cc}} = 1.0$$

Karakteristična vrijednost tlačne čvrstoće betona:

$$f_{\text{ck}} = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Parcijalni koeficijent sigurnosti za beton:

$$\gamma_{\text{c}} = 1.5$$

Proračunska vrijednost tlačne čvrstoće betona:

$$f_{\text{cd}} = \alpha \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_{\text{c}}} = 1.0 \cdot \frac{30}{1.5} = 20 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Razred čelika:

B500B

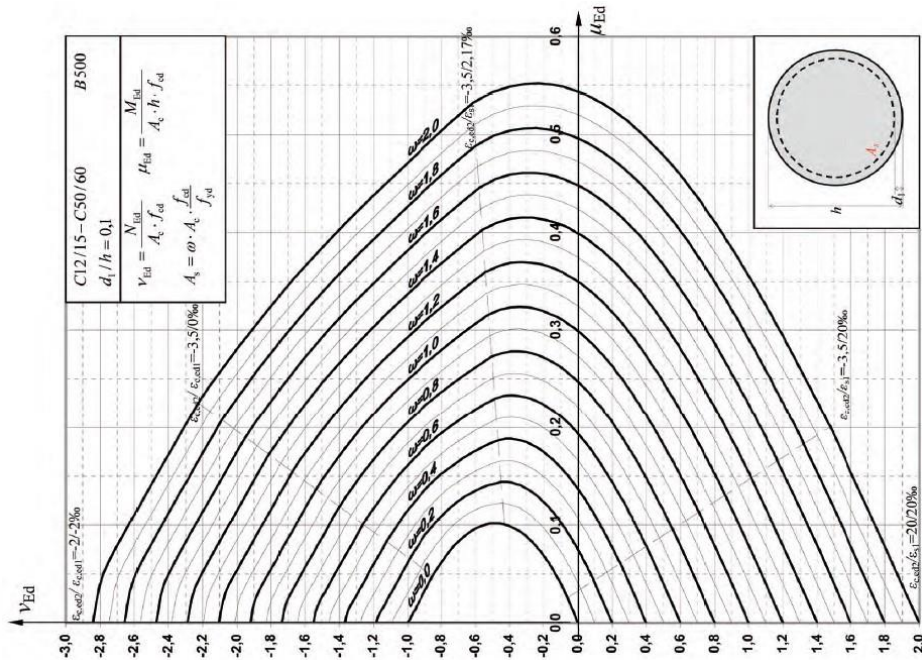
Parcijalni koeficijent sigurnosti za čelik:

$$\gamma_{\text{s}} = 1.15$$

Proračunska vrijednost granice popuštanja čelika za armiranje:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 43.478 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

9.1.3 Proračun armature kružnog poprečnog presjeka



Slika 33. Dijagram interakcije za beton razreda C30/37 (Sorić Z. 2014)

Ploština kružnog poprečnog presjeka:

$$A_c = r^2 \cdot \pi = 30^2 \cdot \pi = 2827.43 \text{ cm}^2 = 0.2827 \text{ m}^2$$

Visina poprečnog presjeka:

$$h = 2 \cdot r = 2 \cdot 30 = 60 \text{ cm}$$

Bezdimenzijska veličina proračunske uzdužne sile:

$$v_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = \frac{545.14}{0.2827 \cdot 20000} = 0.0964$$

Bezdimenzijska veličina proračunskog momenta savijanja:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{A_c \cdot h \cdot f_{cd}} = \frac{428.39}{0.2827 \cdot 0.6 \cdot 20000} = 0.126$$

Iz dijagrama interakcije sa slike 33. očitava se mehanički koeficijent armiranja.

Potrebna ukupna uzdužna armatura kružnog presjeka:

$$A_s = \omega \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} = 0.48 \cdot 0.2827 \cdot \frac{20000}{434780} = 0.0062 \text{ m}^2 = 62 \text{ cm}^2$$

ODABRANO: uzdužna armatura $8\Phi 32 = 64.34 \text{ cm}^2$

spiralana armatura $\Phi_{SS} = 8 \text{ mm}$

Maksimalni hod spirale:

$$s \leq \frac{D_S}{5} = \frac{h - 2c - \phi_{SS}}{5} = 55 \text{ cm}$$

$$s \leq 8 \text{ cm}$$

9.2 Kosi pilot $\phi 40$ sa IPE180 profilom

9.2.1 Rezne sile

Maksimalna uzdužna sila u pilotu:

$$N_{\max} = 265.41 \text{ kN/m'}$$

Proračunska vrijednost uzdužne sile u pilotu:

$$N_{Ed} = 1.35 \cdot N_{\max} = 1.35 \cdot 265.41 = 358.30 \text{ kN/m}$$

Maksimalni moment savijanja u pilotu:

$$M_{\max} = 32.81 \text{ kNm/m}$$

Proračunska vrijednost momenta savijanja u pilotu:

$$M_{Ed} = 1.35 \cdot M_{\max} = 1.35 \cdot 32.81 = 44.29 \text{ kNm/m}$$

Razmak kosih pilota:

$$s = 2.0 \text{ m}$$

9.2.2 Karakteristike IPE180 profila

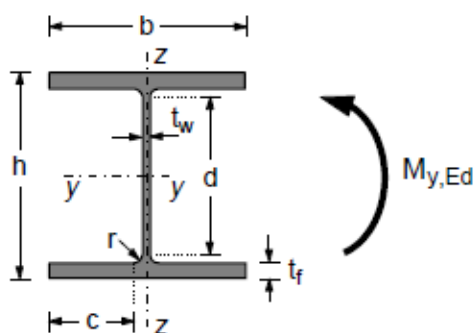
Kvaliteta čelika S355:

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

Modul elastičnosti čelika:

$$E = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

9.2.3 Klasifikacija poprečnog presjeka



Slika 34. Geometrijske i statičke veličine odabranog profila

Visina presjeka:

$$h = 180 \text{ mm}$$

Širina pojasnice:

$$b = 91 \text{ mm}$$

Površina poprečnog presjeka:

$$A = 23.95 \text{ cm}^2$$

Debljina pojasnice:

$$t_f = 10 \text{ mm}$$

Debljina hrpta:

$$t_w = 5.3 \text{ mm}$$

Radijus:

$$r = 9 \text{ mm}$$

Faktor ovisan o kvaliteti čelika:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0.81$$

Parcijalni faktor za otpornost poprečnog presjeka bilo koje klase:

$$\gamma_{MO} = 1.0$$

Plastični moment otpora:

$$W_{pl,y} = 166.4 \text{ cm}^3$$

Hrbat:

$$d = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 142 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon$$

$$26.79 \leq 58.32$$

Hrbat pripada klasi 1

Pojasnica:

$$c = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - r = 33.85 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon$$

$$3.39 \leq 7.29$$

Pojasnica pripada klasi 1

Poprečni presjek pripada klasi 1

9.2.4 Otpornost poprečnog presjeka

Za klasu presjeka 1 mjerodavna je plastična otpornost poprečnog presjeka na savijanje:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{166.4 \cdot 35.5}{1.0} = 5907.2 \text{ kNcm} = 59.072 \text{ kNm}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{49.84}{59.07} \leq 1$$

$$0.84 \leq 1$$

Poprečni presjek zadovoljava na savijanje.

Za klasu presjeka 1 mjerodavna je plastična otpornost poprečnog presjeka na vlačnu silu:

$$N_{t,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{23.95 \cdot 35.5}{1.0} = 850.23 \text{ kN}$$

Uvjet nosivosti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{716.6}{850.23} \leq 1$$

$$0.84 \leq 1$$

Poprečni presjek zadovoljava na vlačnu silu.

9.3 Naglavna greda

Naglavnom gredom međusobno se povezuju vertikalni i kosi piloti u jednu kontinuiranu zaštitnu konstrukciju. Naglavnom gredom raspodjeljuju se naprezanja i deformacije konstrukcije.

ODABRANO: uzdužna armatura 8 ϕ 20

poprečna armatura ϕ 10/20cm

10 ISKAZ PROCIJENJENIH TROŠKOVA GRADNJE

Iskaz procijenjenih troškova obuhvaća pripremne radove, izvedbu konstrukcije koju čine naglavna greda, vertikalni i kosi piloti, te nadzor radova.

tablica 15. Iskaz procijenjenih troškova

Pripremni radovi					
STAVKA	Opis rada	Jed. mjere	Količina	Jed. cijena	Uku. cijena
1	Geodetsko iskolčenje predviđenog zahvata.	komplet	1		
2	Priprema i uređenje terena za rad.	komplet	1		
3	Mobilizacija, doprema i instalacija postrojenja, doprema srojeva i ljudstva za izvođenje svih radova	komplet	1		
Izvedba konstrukcije					
4	Izrada armirano-betonskih vertikalnih pilota sa radnog platoa. Osni razmak je 100 cm, dužina 13 m.	m'	754		
5	Izrada kosih pilota armiranih sa IPE180, sa radnog platoa. Osni razmak je 200 cm, dužina 13 m.	m'	286		
6	Izvedba naglavne grede Obuhvaćeni su kompletni radovi na oplati, ugradnji betona i armature.	m ³	32.82		
7	Nabava, priprema i doprema IPE180 profila za kose pilote.	m'	286		

8	Nabava , izrada i doprema armaturnih koševa za vertikalne betonske pilote	kg	41826
9	Nabava , izrada i doprema armature za naglavnu gredu	kg	1894
10	Nabava, izrada i dovoz betona za sve armiranobetonske pilote uključivo i naglavnu gredu.	m ³	281.95
Nadzor radova			
11	Glavni nadzor	mjeseci	2
12	Projektantski nadzor	izlazak	5

11 ZAKLJUČAK

Osiguranje stabilnosti iskopa ne smije obuhvaćati samo zaštitu građevinske jame, već i sve ostale objekte koji se nalaze unutar područja statičkog utjecaja. Ovaj zahtjev zahtijeva specifičnost konstrukcije koja, prilikom izvođenja, neće oštetiti susjedni teren niti objekte na njemu. Također, neophodno je izbjeći ulazak stabilizacijske konstrukcije u tuđi imovinski posjed, što postaje sve teže u urbanim sredinama.

Kako bi se ovi zahtjevi ispunili, stabilizacijska konstrukcija mora osigurati ne samo nosivost, već i minimalnu deformabilnost, kako bi se eliminirao negativan utjecaj na susjedne objekte. Izbjegavanje ulaska u tuđi prostor moguće je postići samo značajnim smanjenjem prostornog zahvata u usporedbi s čestom praksom upotrebe geotehničkih sidara.

Ova analiza pokazuje da se sva tri zahtjeva mogu uspješno ispuniti primjenom kombinacije vertikalnih i kosih pilota. Iako je dobro poznata velika nosivost pilota, manje je poznato da se istom metodom mogu učinkovito riješiti i izazovi horizontalne stabilnosti. Također je prikazano da ova konstrukcija osigurava minimalne deformacije u usporedbi s drugim rješenjima.

POPIS LITERATURE

- Bowles, Joseph E. 1997. *Foundation analysis and design*. Peoria, Illinois: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cashman, Pat. 2022. *Groundwater Lowering in Construction*. CRC Press.
- Clayton, C.R.I. 1995. *The standard penetration test (SPT): methods and use*. CIRIA 129pp.
- Ortolan Ž., Ivšić T., Kavur B. 2009. »Applicability of the RNK-method for geotechnical 3D-modelling in soft rocks.« *Revue Française de Géotechnique*.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H. 1974. *Foundation Engineering, 2nd ed*. New York: John Wiley and Sons.
- Sorić Z., Kišiček T. 2014. *Betonske konstrukcije 1*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- Terzaghi K., Peck R.B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley.

POPIS SLIKA

Slika 1. Zaštita građevne jame izvedbom dijafragme (izvor: Geokod Zagreb).....	3
Slika 2. Zaštita građevne jame izvedbom talpi (izvor: Geotech, Rijeka).....	4
Slika 3. Zaštita građevne jame izvedbom pilotske stijene (izvor: Geotech, Rijeka).....	4
Slika 4. Zaštita građevne jame izvedbom berlinskog ziđa (izvor: Square, Egypt).....	4
Slika 5. Lokacija građevne jame.....	5
Slika 6. Koraci izvedbe CFA pilota.....	8
Slika 7. Situacija izvođenja pilota CFA tehnologijom.....	9
Slika 8. Pozicije izvođenja CFA pilota po obodu jame	9
Slika 9. Shema provođenja mlaznog injektiranja	10
Slika 10. Spoj vertikalnog i kosog pilota u naglavnoj gredi.....	12
Slika 11. Lokacija bušotina na terenu	13
Slika 12. Presjek istražne bušotine B1	17
Slika 13. Presjek istražne bušotine B2	18
Slika 14. Odabrane geotehničke sredine.....	19
Slika 15. Vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja za sitnozrne materijale	20
Slika 16. Preporuke za određivanje nedrenirane čvrstoće gline (Clayton 1995.).....	21
Slika 17. Aproksimacija korelacije između nedrenirane čvrstoće i SPT (Terzaghi K. 1967) .	22
Slika 18. Preporuke za određivanje krutosti gline (Clayton 1995.)	22
Slika 19. Preporuke za određivanje čvrstoće, kut unutarnjeg trenja (Peck 1974)	24
Slika 20. Granulometrijski sastav, dubina 9.7-10 m, B1 bušotina.....	25
Slika 21. Granulometrijski sastav, dubina 14.7-15 m, B2 bušotina	26
Slika 22. Ekvipotencijale s odgovarajućim vrijednostima hidrauličkog potencijala	29
Slika 23. Skica hidrauličkih potencijala	30
Slika 24. Deformabilnost modela u prvoj fazi.....	33
Slika 25. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu	33
Slika 26. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu:	34
Slika 27. Deformabilnost modela u drugoj fazi	34
Slika 28. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu:	35
Slika 29. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu:	35
Slika 30. Deformabilnost modela u trećoj fazi.....	36
Slika 31. Dijagrami unutarnjih sila u vertikalnom pilotu:	36
Slika 32. Dijagrami unutarnjih sila u kosom pilotu:	37
Slika 33. Dijagram interakcije za beton razreda C30/37 (Sorić Z. 2014).....	39
Slika 34. Geometrijske i statičke veličine odabranog profila.....	40

POPIS TABLICA

Tablica 1. Moduli kompresije za inkremente naprezanja.....	14
Tablica 2. Rezultati pokusa izravnog posmika.....	14
Tablica 3. Rezultati određivanja granica konzistencije (B1 dubina 4.7-5.0m).....	15
Tablica 4. Rezultati određivanja granica konzistencije (B1 dubina 9.7-10.0m).....	15
Tablica 5. Rezultati određivanja granica konzistencije (B2 dubina 1.2-1.5m).....	15
Tablica 6. rezultati određivanja granica konzistencije (B2 dubina 5.7-6.0m).....	16
Tablica 7. Procjena gustoće tla ovisno o izmjerenom broju udaraca SPT-a.....	20
Tablica 8. Definirani koeficijenti propusnosti za pripadajuću sredinu.....	25
Tablica 9. Definirani koeficijenti propusnosti za pripadajuću sredinu.....	27
Tablica 10. Karakteristične vrijednosti parametara tla.....	27
Tablica 11. Proračunske vrijednosti parametara tla.....	28
tablica 12. Parcijalni koeficijenti prema Eurokodu 7.....	31
tablica 13. Parametri elemenata konstrukcije.....	32
tablica 14. Sumarna tablica unutarnjih sila.....	37
tablica 15. Iskaz procijenjenih troškova.....	43

PRILOZI

Prilog 1 – Tlocrt

Prilog 2 – Presjek

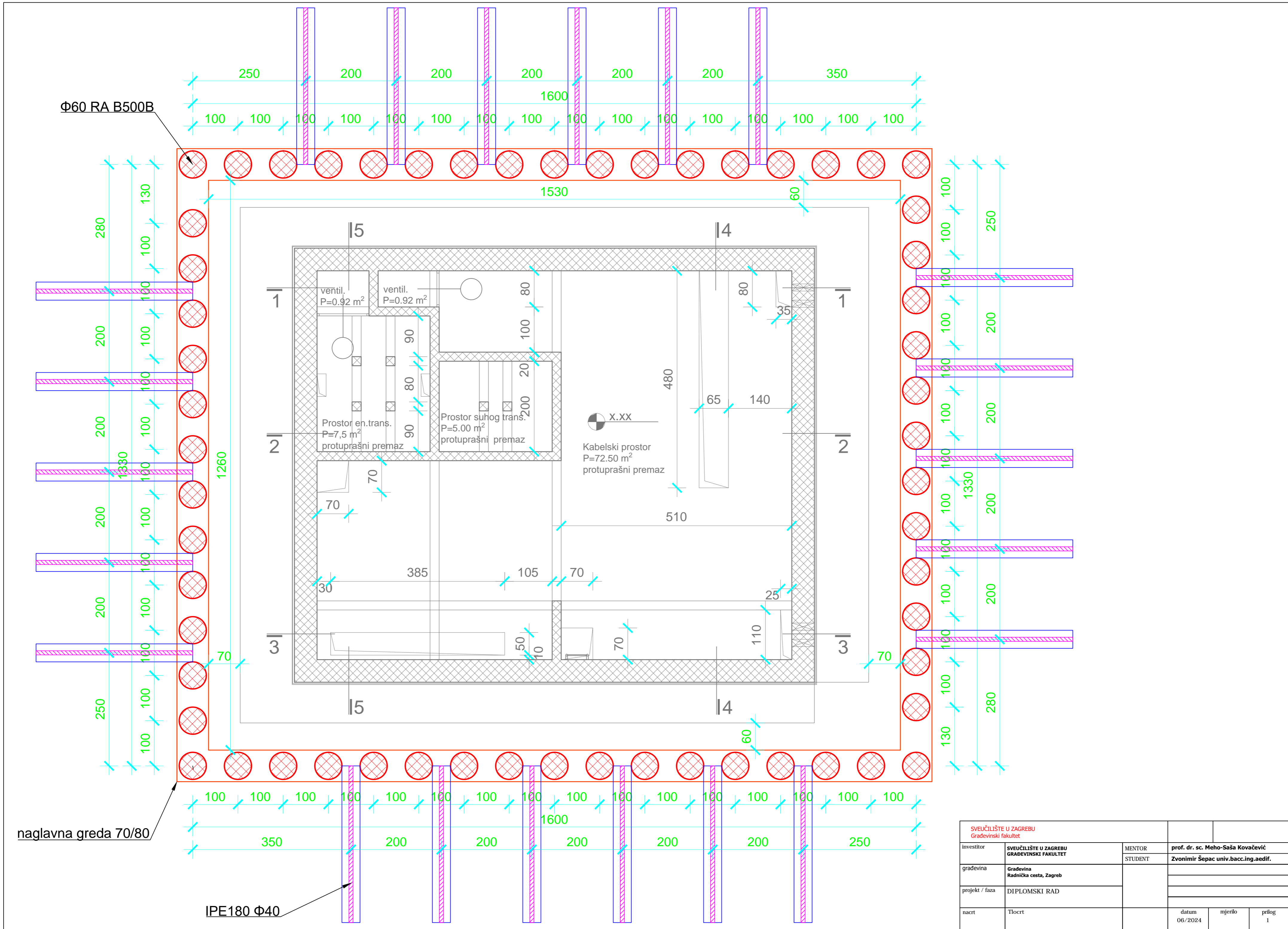
Prilog 3 – Tlocrt Jet Grouting

Prilog 4 – Presjek Jet Grouting

Prilog 5 – Armatura naglavne grede

Prilog 6 – Iskaz armature naglavne grede

Prilog 7 – Armatura vertikalnog pilota

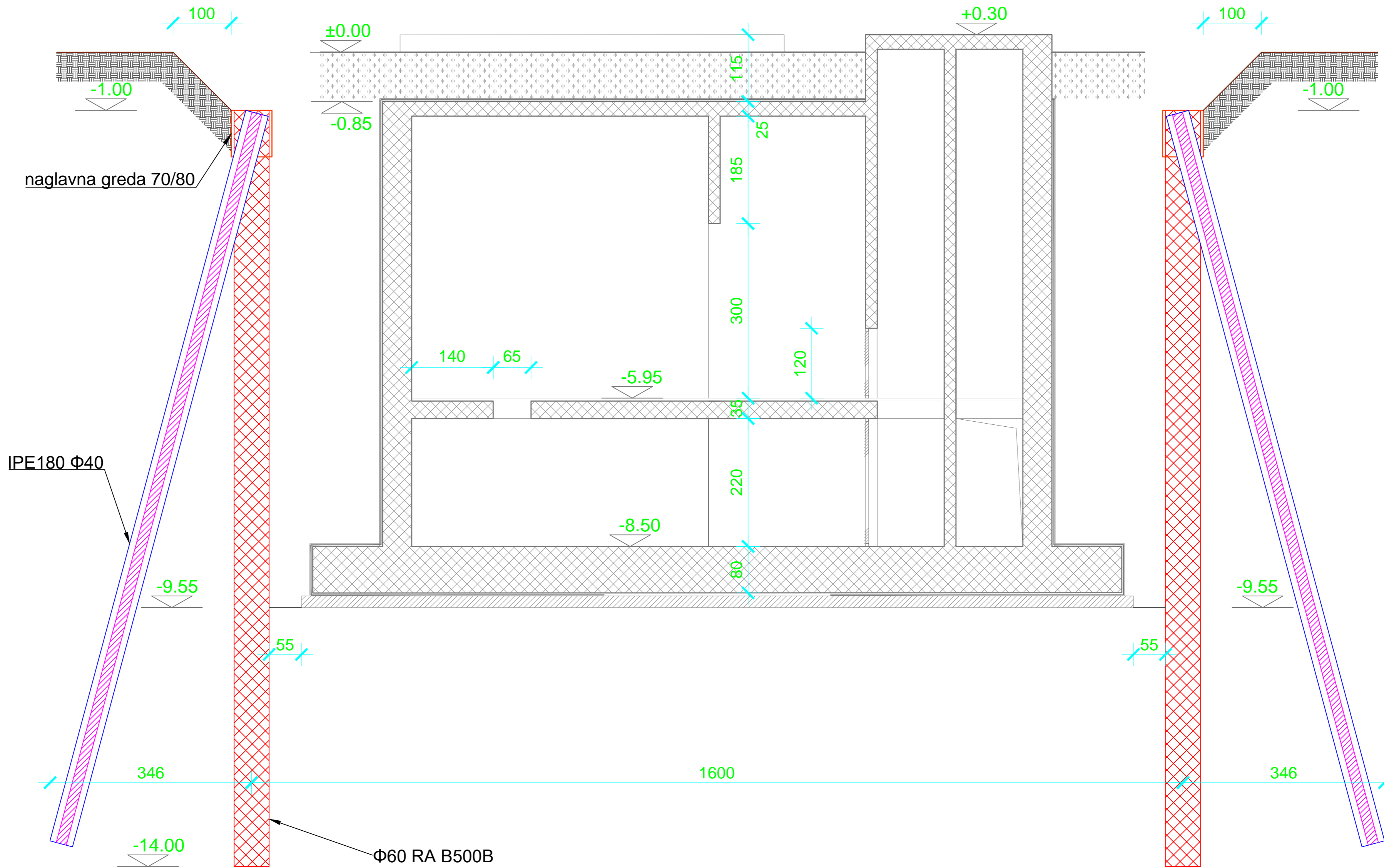


Φ60 RA B500B

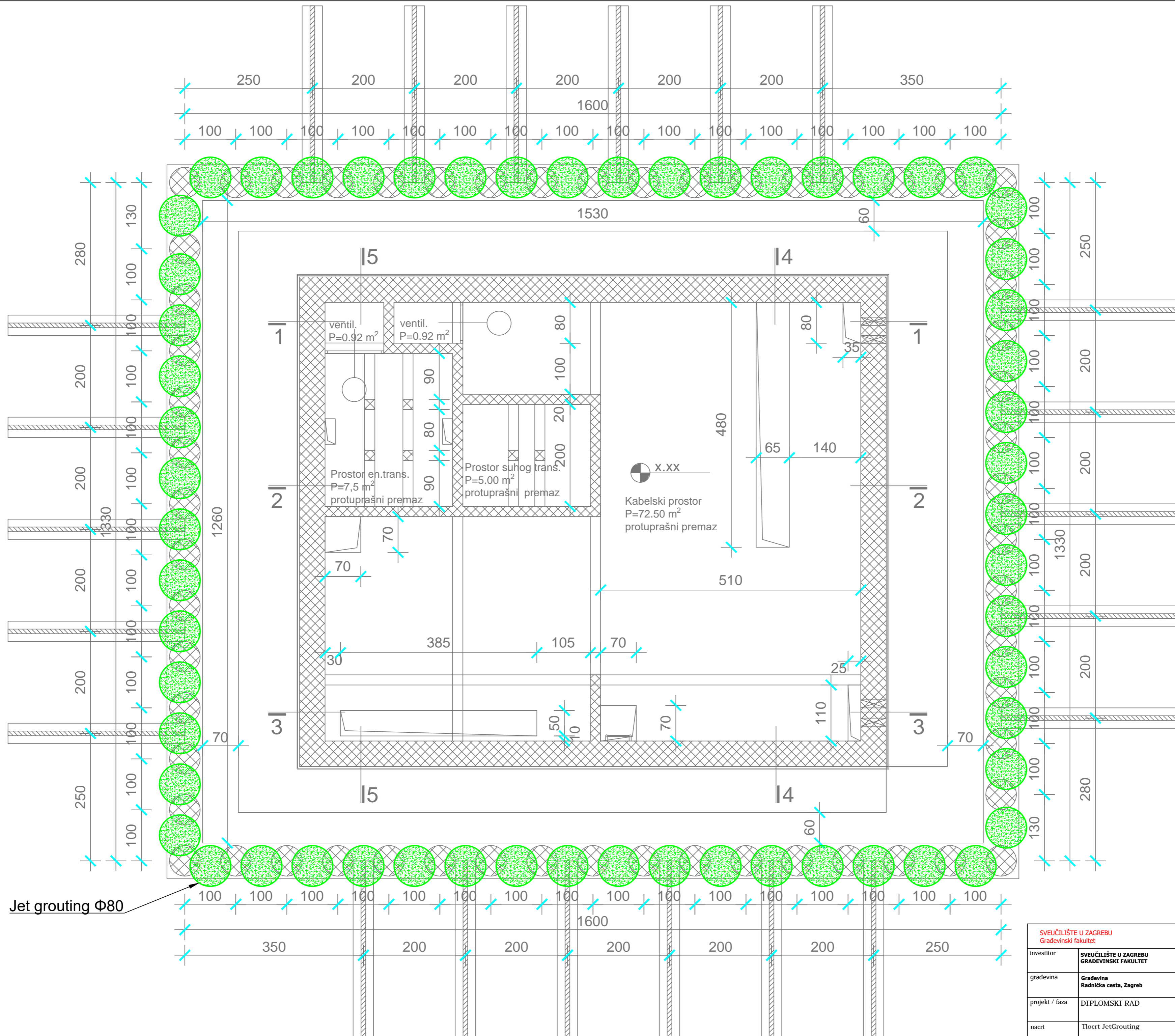
naglavna greda 70/80

IPE180 Φ40

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet			
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević
građevina	Građevina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD		
nacrtni	Tlocrt	datum	06/2024
		mjerilo	
		prilog	1

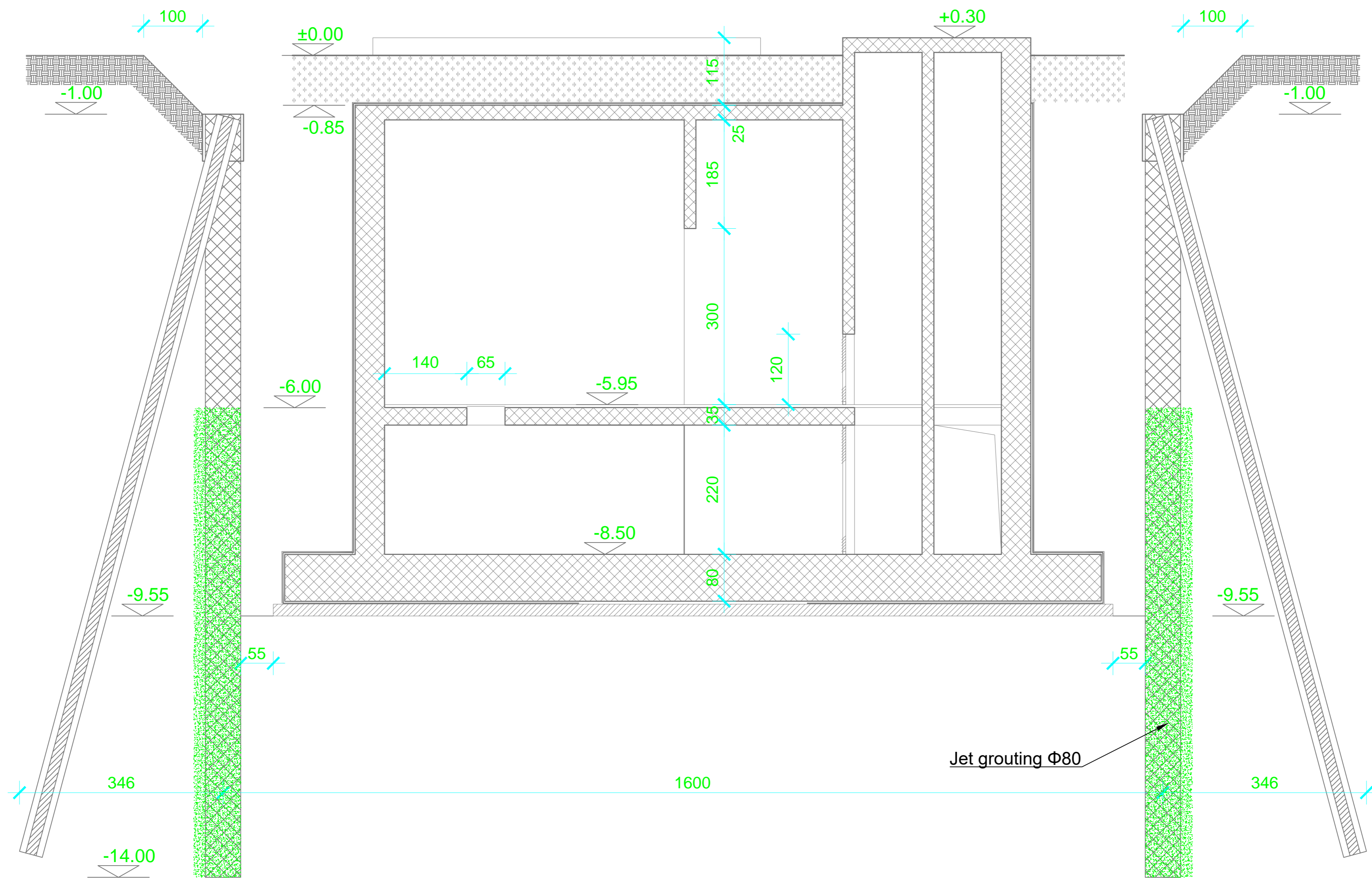


SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet			
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević
građevina	Gradovina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD		
nacrtni	Presjek A	datum	mjerilo
		06/2024	2



Jet grouting Ø80

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet			
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević
građevina	Gradjevina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD		
nacrt	Tlocrt JetGrouting	datum	06/2024
		mjerilo	
		prilog	3



Jet grouting $\Phi 80$

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet				
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević	
građevina	Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.	
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD			
nacrtni	Presjek JetGrouting		datum 06/2024	mjerilo 4

① vilice $\Phi 10/20$, L=276 cm, kom 77

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

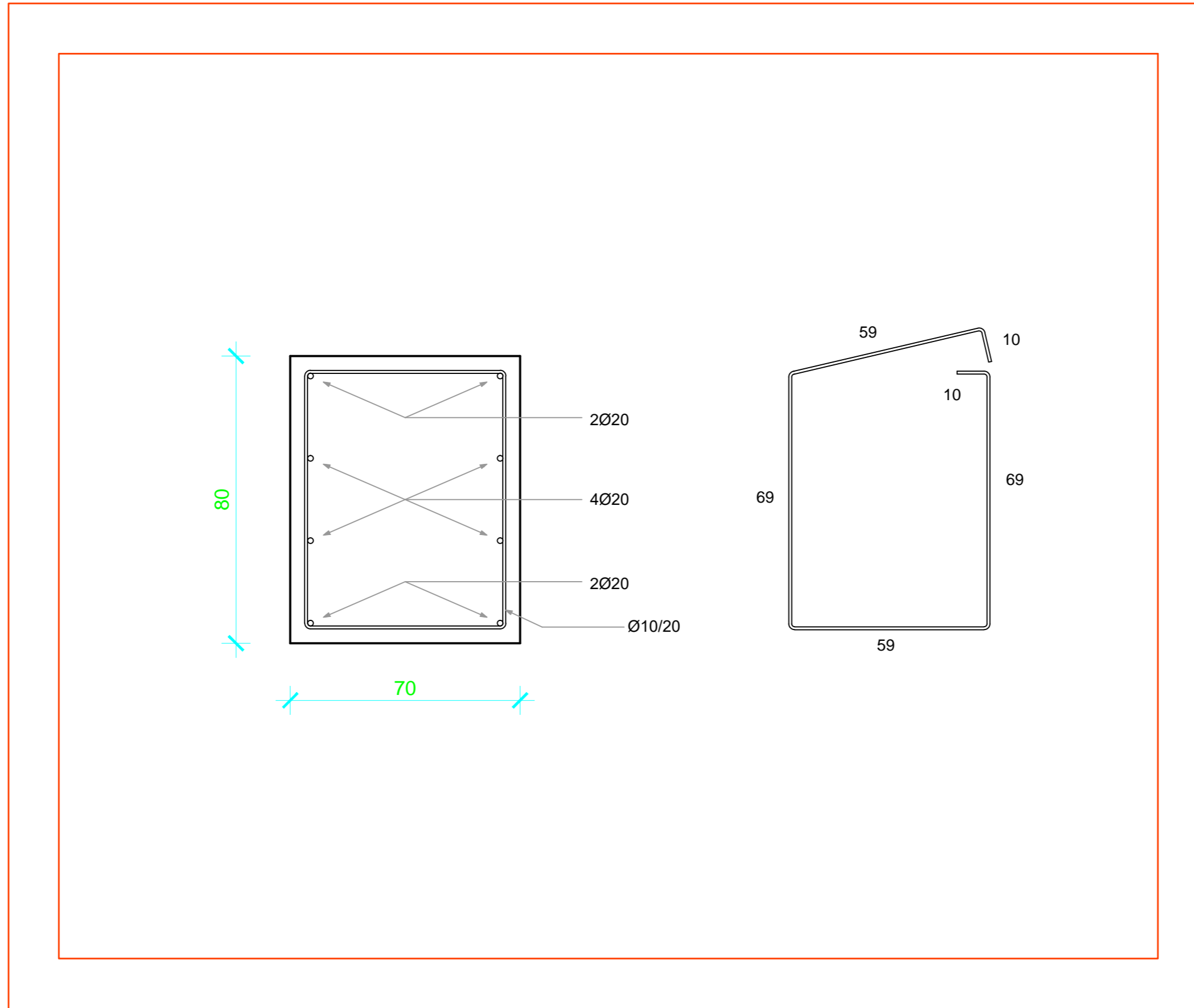
① vilice $\Phi 10/20$, L=276 cm, kom 64

② $\Phi 20$, L=800 cm, kom 4

③ $\Phi 20$, L=700 cm, kom 4

④ $\Phi 20$, L=600 cm, kom 4

② $\Phi 20$, L=800 cm, kom 4



④ $\Phi 20$, L=600 cm, kom 4

② $\Phi 20$, L=800 cm, kom 4

② $\Phi 20$, L=800 cm, kom 4

③ $\Phi 20$, L=700 cm, kom 4

① vilice $\Phi 10/20$, L=276 cm, kom 64

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

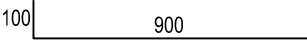
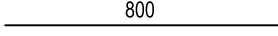
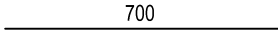
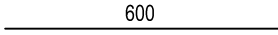
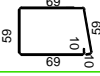
① $\Phi 20$, L=1000 cm, kom 4

① vilice $\Phi 10/20$, L=276 cm, kom 77

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet			
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević
građevina	Građevina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD		
nacrtni	Armatura naglavne grede	datum	mjerilo
		06/2024	5

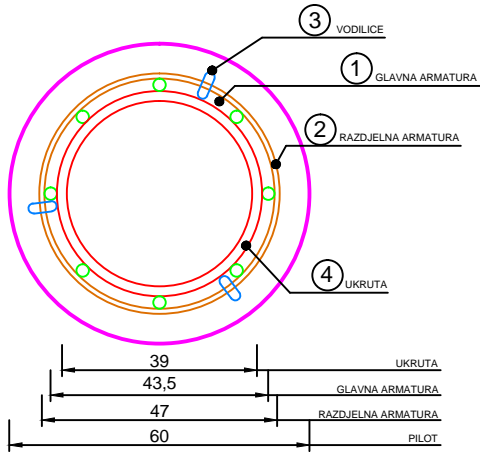
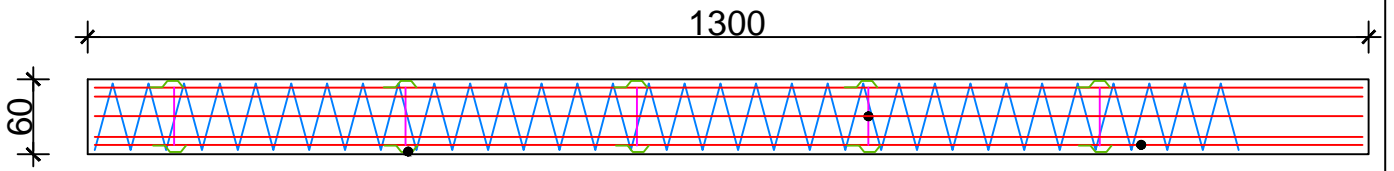
ISKAZ ARMATURE ZA NAGLAVNU GREDU

B500B

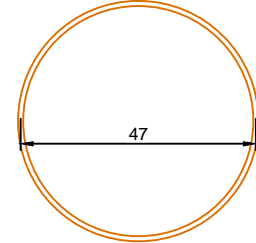
POZ	OBLIK	Ø (mm)	L (m)	KOM	Ø10	Ø20
①		20	10	32		320
②		20	8	16		128
③		20	7	8		56
④		20	6	8		48
⑤		10	2.76	282	779	
UKUPNO (m)					779	552
MASA (kg/m)					0,634	2,536
UKUPNO PO PROFILIMA (kg)					494	1400
SVEUKUPNO ZA NAGLAVNU GREDU (kg)					1894	

Preklop armature min 1m

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet			
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević
građevina	Građevina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD		
nacrtni	Iskaz armature naglavne grede	datum	06/2024
		mjerilo	
		prilog	6

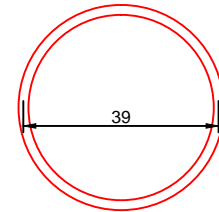
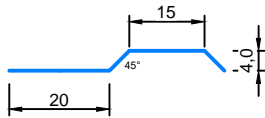


② RAZDJELNA Ø8/15, L=7657 cm, kom 1



④ UKRUTA Ø20/200, L=122.52 cm, kom 6

③ VODILICA Ø8/200, L=46.32cm, kom 18



ISKAZ ARMATURE VERTIKALNI PILOT							
B500B							
POZ	OBLIK	Ø (mm)	L (m)	KOM	Ø8	Ø20	Ø32
①	1290	32	12.90	8			103.2
②	7657	8	76.57	1	76.57		
③		8	0.463	18	8.33		
④	122.5	20	1.225	6		7.35	
UKUPNO (m)					84.9	7.35	103.2
MASA (kg/m)					0.405	2.536	6.474
UKUPNO PO PROFILIMA (kg)					34.38	18.64	668.12
SVEUKUPNO ZA "1" pilot (kg)					721.14		
UKUPNO PO PROFILIMA za 58 pilot (kg)					1994	1081	38751
SVEUKUPNO ZA 58 pilot (kg)					41826		

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU Građevinski fakultet				
investitor	SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GRAĐEVINSKI FAKULTET	MENTOR	prof. dr. sc. Meho-Saša Kovačević	
građevina	Građevina Radnička cesta, Zagreb	STUDENT	Zvonimir Šepac univ.bacc.ing.aedif.	
projekt / faza	DIPLOMSKI RAD			
nacrt	Armatura vertikalnog pilota		datum 06/2024	mjerilo prilog 7