

Numeričko modeliranje gradske podzemne željeznice

Rebrović, Ivor

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:246937>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

NUMERIČKO MODELIRANJE GRADSKÉ PODZEMNE ŹELJEZNICE

Diplomski rad

Ivor Rebrović
R227

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/20-01/251
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 08.02.2021.

Ivor Rebrović, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/251, UR. BROJ: 251-70-11-20-1 od 10.11.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

NUMERIČKO MODELIRANJE GRADSKÉ PODZEMNE ŽELJEZNICE

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica

(potpis)

Prof. dr. sc. Biljana Kovačević
Zelić

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva
za završne i diplomske
ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)

NUMERIČKO MODELIRANJE GRADSKE PODZEMNE ŽELJEZNICE

IVOR REBROVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Glavni razlozi uvođenja podzemnog željezničkog sustava u urbanim gradskim sredinama su povećani broj stanovnika, opterećenost odnosno zagušenje cestovnih prometnica, povećanje vremena putovanja i povećanje koncentracije ispušnih plinova odnosno zagađenja okoliša. U gradu Zagrebu čiji se broj stanovnika približava jednom milijunu, već su odavno prepoznati svi prethodno navedeni problemi. Obzirom da se veći dio grada Zagreba nalazi u nizinskom području, moguće je sustav podzemne željeznice izgraditi jednostavnom metodom plitkog iskopa („cut and cover“). Cilj ovog diplomskog rada bio je pomoću numeričkog geotehničkog računalnog programa napraviti 2D analizu ponašanja modela tla za područje grada Zagreba i to u dva glavna smjera transporta (istok-zapad i sjever-jug). Svrha te analize bila je pobliže odrediti geotehničku odnosno geomehaničku podobnost zagrebačkog podzemlja za izgradnju sustava prijevoza podzemnom željeznicom.

Ključne riječi: gradska podzemna željeznica, „Cut and Cover“ metoda, numeričko modeliranje, građevna jama.

Diplomski rad sadrži: 92 stranice, 12 tablica, 76 slika i 7 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, redoviti profesor RGNF
doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
izv. prof. dr. sc. Petar Hrženjak, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 12. veljače 2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

NUMERICAL MODELLING OF THE URBAN SUBWAY STRUCTURES

IVOR REBROVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of Mining and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The main reasons for the introduction of the urban subway systems are the increased population, overloading or congestion of traffic roads, increased travel time and increased concentration of exhaust gases or environmental pollution. In the city of Zagreb, whose population is approaching one million, all of the above problems have long been recognized. Since most of the city of Zagreb is located in a lowland area, it is possible to build a subway system using a simple method of shallow excavation ("cut and cover method"). The aim of this graduate thesis was to use the numerical geotechnical computer program to perform a 2D analysis of the behavior of soil models for the city of Zagreb in two main transport directions (east-west and north-south). The purpose of this analysis was to closely determine the geotechnical or geomechanical suitability of the Zagreb underground for the construction of the subway transport system.

Keywords: urban city subway, "Cut and Cover" method, numerical modeling, shallow excavation.

Thesis contains: 92 pages, 12 tables, 76 figures and 7 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor

Reviewers: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Petar Hrženjak, Associate Professor

Defence date: February 12, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OSNOVNE KOMPONENTE IZRADE PODZEMNIH PROSTORIJA I TUNELA	3
2.1.	Geotehnički istražni radovi	3
2.2.	Geometrijski presjek tunela podzemne željeznice.....	4
2.2.1	Potkovičasti oblik	6
2.2.2	Kružni oblik.....	7
2.2.3	Svodni oblik.....	8
2.3.	Opterećenja koja djeluju na tunel	10
2.3.1.	Primarna (geološka) naprezanja	10
2.3.2.	Sekundarna naprezanja.....	13
2.4.	Djelovanje iskopa na stijensku masu	14
3.	IZRADA TUNELA U OTVORENOJ GRAĐEVNOJ JAMI	16
3.1.	Općenito o metodi.....	16
		17
3.2.	Projektiranje struktura podzemnih željeznica	17
3.3.	Faze „Cut and Cover“ metode.....	19
3.4.	„Top-Down“ metoda.....	22
4.	GEOLOGIJA ZAGREBAČKOG PODRUČJA	24
4.1.	Hidrogeološke značajke	26
4.2.	Geološke podloge	28
5.	TRASA ZAGREBAČKE PODZEMNE ŽELJEZNICE	37
5.1.	Prometni tokovi i zahtjevi prometa.....	37
5.2.	Smjer trase podzemne željeznice.....	38
6.	MODELIRANJE U „PLAXIS-U“	40
6.1.	Geometrija modela.....	41
6.2.	Parametri tala i strukturnih elemenata	43
6.3.	Faze proračuna.....	46
6.4.	Podzemna voda.....	48
7.	IZLAZNI REZULTATI MODELA	51
7.1.	Slučaj A.....	51
7.2.	Slučaj B	57
7.3.	Slučaj C	66
7.4.	Slučaj D.....	73
8.	ZAKLJUČAK	89
9.	POPIS LITERATURE:	91

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Poprečni presjek tunela (Ivas, 2019).....	4
Slika 2-2. Površina poprečnog presjeka tunela (Ivas, 2019)	5
Slika 2-3. Potkovičasti oblik tunela (Primorac, 2019)	7
Slika 2-4. Kružni oblik tunela (Primorac, 2019)	8
Slika 2-5. Tunel oblika svoda (Primorac, 2019).....	9
Slika 2-6. Komponente normalnih i posmičnih naprezanja (Dugonjić Jovančević, 2017).....	11
Slika 2-7. Komponente glavnih naprezanja koje djeluju na ravninu iskopa (Vrkljan, 2013) .	12
Slika 2-8. Primarno i sekundarno naprezanje oko tunelskog otovra (Vrkljan, 2013).....	13
Slika 2-9. Tri primarna efekta iskopa na stijensku masu (Vrkljan,2013)	15
Slika 3-1. Shematski prikaz "Cut and Cover" metode (Kaul,2010)	17
Slika 3-2. Građevna jama s izgrađenom konstrukcijom metro stanice (Kaul, 2010)	20
Slika 3-3. Izrada dijafragme s pokrovnom pločom i središnjim stupom (Kolić i Kolić, 2001)	21
Slika 3-4. Izgradnja stanice podzemne željeznice pomoću "Top-Down" metode (Kolić i Kolić, 2001)	23
Slika 4-1. Geološka karta šireg zagrebačkog područja, OGK List Zagreb, M 1:100 000 (Šikić i dr., 1972)	25
Slika 4-2. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006).....	27
Slika 4-3. Granice otjecanja/dotjecanja te rubne granice zagrebačkog vodonosnika (Bačani i Posavec, 2009).....	28
Slika 4-4. Geološki uzdužni profil na lokaciji Domovinskog mosta (Kolić i Kolić, 2001)....	29
Slika 4-5. Situacija hidrogeoloških profila.....	30
Slika 4-6. Prognozni geotehnički profil A-A' (1)	33
Slika 4-7. Prognozni geotehnički profil A-A' (2)	34
Slika 4-8. Prognozni geotehnički profil B-B'	35
Slika 4-9. Legenda za geotehničke profile	36
Slika 5-1. Konačno rješenje trase zagrebačke podzemne željeznice (Kolić i Kolić, 2001)	39
Slika 6-1. Geometrijski model 1	42
Slika 6-2. Geometrijski model 2	43
Slika 6-3. Hidraulički uvjeti modela 1	49
Slika 6-4. Hidraulički uvjeti modela 2	49
Slika 6-5. Presjek bušotine modela 2	50

Slika 7-1. Mreža konačnih elemenata (slučaj A).....	52
Slika 7-2. Deformirana mreža konačnih elemenata u prvoj fazi (slučaj A)	52
Slika 7-3. Deformirana mreža konačnih elemenata u drugoj fazi (slučaj A)	53
Slika 7-4. Deformirana mreža konačnih elemenata u trećoj fazi (slučaj A)	53
Slika 7-5. Ukupni pomak u trećoj fazi (slučaj A).....	54
Slika 7-6. Raspored točaka sloma u inicijalnoj fazi (slučaj A).....	55
Slika 7-7. Raspored točaka sloma u prvoj fazi (slučaj A).....	55
Slika 7-8. Raspored točaka sloma u drugoj fazi (slučaj A)	56
Slika 7-9. Raspored točaka sloma u trećoj fazi (slučaj A)	56
Slika 7-10. Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi (slučaj B).....	57
Slika 7-11. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj B).....	58
Slika 7-12. Ukupni pomaci u modelu u šestoj fazi (slučaj B)	60
Slika 7-13. Efektivna naprezanja u inicijalnoj fazi (slučaj B).....	61
Slika 7-14. Efektivna naprezanja u prvoj fazi (slučaj B)	62
Slika 7-15. Efektivna naprezanja u drugoj fazi (slučaj B)	62
Slika 7-16. Efektivna naprezanja u trećoj fazi (slučaj B).....	63
Slika 7-17. Efektivna naprezanja u četvrtoj fazi (slučaj B).....	64
Slika 7-18. Efektivna naprezanja u petoj fazi (slučaj B).....	64
Slika 7-19. Efektivna naprezanja u šestoj fazi (slučaj B).....	65
Slika 7-20. Mreža konačnih elemenata (slučaj C)	66
Slika 7-21. Deformirana mreža konačnih elemenata prve faze (slučaj C).....	67
Slika 7-22. Deformirana mreža konačnih elemenata druge faze (slučaj C)	67
Slika 7-23. Deformirana mreža konačnih elemenata treće faze (slučaj C)	68
Slika 7-24. Deformirana mreža konačnih elemenata četvrte faze (slučaj C)	69
Slika 7-25. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj C).....	69
Slika 7-26. Raspored točaka sloma u inicijalnoj fazi (slučaj C).....	70
Slika 7-27. Raspored točaka sloma u prvoj fazi (slučaj C)	71
Slika 7-28. Raspored točaka sloma u drugoj fazi (slučaj C)	71
Slika 7-29. Raspored točaka sloma u trećoj fazi (slučaj C).....	72
Slika 7-30. Raspored točaka sloma u četvrtoj fazi (slučaj C).....	72
Slika 7-31. Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi (slučaj D)	74
Slika 7-32. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj D).....	75
Slika 7-33. Ukupni pomak u modelu u šestoj fazi (slučaj D).....	77
Slika 7-34. Efektivna naprezanja u inicijalnoj fazi (slučaj D).....	78

Slika 7-35. Efektivna naprezanja u prvoj fazi (slučaj D)	79
Slika 7-36. Efektivna naprezanja u drugoj fazi (slučaj D)	79
Slika 7-37. Efektivna naprezanja u trećoj fazi (slučaj D).....	80
Slika 7-38. Efektivna naprezanja u četvrtoj fazi (slučaj D)	81
Slika 7-39. Efektivna naprezanja u petoj fazi (slučaj D).....	81
Slika 7-40. Efektivna naprezanja u šestoj fazi (slučaj D).....	82
Slika 7-41. Raspodjela pornih pritisaka u inicijalnoj fazi (slučaj D).....	83
Slika 7-42. Raspodjela pornih tlakova u prvoj fazi (slučaj D)	84
Slika 7-43. Raspodjela pornih tlakova u drugoj fazi (slučaj D)	84
Slika 7-44. Raspodjela pornih tlakova u trećoj fazi (slučaj D).....	85
Slika 7-45. Raspodjela pornih tlakova u četvrtoj fazi (slučaj D).....	86
Slika 7-46. Raspodjela pornih tlakova u petoj fazi (slučaj D).....	86
Slika 7-47. Raspodjela pornih tlakova u šestoj fazi (slučaj D).....	87

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Podaci o bušotinama.....	31
Tablica 6-1. Parametri materijala tla.....	43
Tablica 6-2. Parametri zidova dijafragme (građevne jame).....	44
Tablica 6-3. Parametri tunelske obloge.....	45
Tablica 6-4. Parametri štapnih sidara.....	45
Tablica 6-5. Parametri injektiranih sidara.....	45
Tablica 6-6. Parametri injekcijske smjese.....	45
Tablica 7-1. Iznos aksijalnih sila u sidrima u drugoj fazi (slučaj B)	59
Tablica 7-2. Iznos aksijalnih sila u sidrima u četvrtoj fazi (slučaj B)	59
Tablica 7-3. Iznos aksijalnih sila u mehaničkim sidrima u drugoj fazi (slučaj D).....	75
Tablica 7-4. Iznos aksijalnih sila u svim mehaničkim sidrima u četvrtoj fazi (slučaj D)....	76
Tablica 7-5. Iznos aksijalnih sila u svim injekcijskim sidrima u četvrtoj fazi (slučaj D)....	76

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SI JEDINICA

F – Ukupna površina poprečnog presjeka (m^2)

F_k – Površina podgradne konstrukcije (m^2)

F_s – Površina svijetlog profila tunela (m^2)

σ_h – Horizontalno naprezanje (N/m^2)

σ_v – Vertikalno naprezanje (N/m^2)

z – Dubina ispod površine terena (m)

k_0 – Koeficijent mirnog pritiska tla (/)

r – Radijus zakrivljenosti stropa tunela (m)

R – Radijus zakrivljenosti ostalih lučnih stranica tunela (m)

γ – Zapreminska (jedinična) težina stijene/tla (N/m^3)

γ_{unsat} – Jedinična težina nesaturiranog tla (N/m^3)

γ_{sat} – Jedinična težina saturiranog tla (N/m^3)

K – Koeficijent bočnog pritiska stijenske mase (/)

k – Hidraulička propusnost (m/s)

i – Hidraulički gradijent (/)

τ – Posmično naprezanje (N/m^2)

c – Kohezija (N/m^2)

φ – Kut unutarnjeg trenja ($^\circ$)

ν – Poissonov koeficijent (/)

E – Youngov modul elastičnosti (Pa)

Ψ – Kut dilatacije ($^\circ$)

EA – Krutost (N/m)

EI – Krutost na savijanje (N/m)

w – Težina (N)

L_s – Duljina (m)

D – Promjer (m)

$T_{skin,start,end,max}$ – Osni otpor na kontaktu smjese i plašta sidra (N/m)

F_{max} – Otpor na bazi injekcijske smjese (N)

1. UVOD

Napredak tehnologije, te ubrzani način života 21. stoljeća uvelike utječu na stalni rast brojnih europskih i svjetskih gradova, pa tako i grada Zagreba, glavnog grada Republike Hrvatske. Razvoj tehnike i tehnologije odražava se i na razvoj modernih podzemnih željezničkih sustava, koji su danas postali neizostavni dio velikih europskih odnosno svjetskih prijestolnica. Glavni razlozi uvođenja podzemnog željezničkog sustava su povećani broj stanovnika, opterećenost odnosno zagušenje cestovnih prometnica, povećanje vremena putovanja i povećanje koncentracije ispušnih plinova odnosno zagađenja okoliša. Ti razlozi služe kao glavna smjernica vodilja pri izboru i gradnji infrastrukture podzemne željeznice. Treba svakako napomenuti i ekonomski aspekt transporta podzemnom željeznicom. Sve veći globalni porast korištenja usluge podzemne željeznice potiče i razvoj različitih modela za izračun cijene prijevoznih usluga, odnosno različite pakete usluga, popuste i akcije, koje imaju svrhu omogućiti masovniju uporabu podzemne željeznice korisnicima različitih dobnih skupina. Po kriteriju broja stanovnika, općenito je prihvaćena donja granica od oko milijun stanovnika za uvođenje podzemnog željezničkog sustava u gradove. Međutim, svaki grad može prilagođavati kriterije i imati svojstven pristup izračunavanju potrebnog broja stanovnika za uvođenje takvog sustava javnog gradskog prijevoza. Primjerice, u svijetu postoje gradovi i s pola milijuna stanovnika koji imaju sustav podzemne željeznice, a postoje i gradovi s puno više stanovnika koji nemaju podzemni sustav prijevoza. Gledajući preporuke prometnih stručnjaka granica za uvođenje podzemnog željezničkog sustava danas se kreće od 750.000 do 2.000.000 stanovnika.

Obzirom da se veći dio grada Zagreba nalazi u nizinskom području, moguće je koristiti transportne sustave podzemne željeznice. Cilj ovog diplomskog rada je pomoću numeričkog geotehničkog računalnog programa napraviti 2D analizu ponašanja modela tla za područje grada Zagreba ispod kojeg bi se predložena trasa podzemne željeznice, tj. metroa trebala kretati u budućnosti. Svrha te analize je pobliže odrediti geotehničku odnosno geomehaničku podobnost zagrebačkog podzemlja za izgradnju sustava prijevoza podzemnom željeznicom. Općenito, postoje dva načina za izgradnju tunela podzemne željeznice. To su gradnja u otvorenoj građevnoj jami (*engl. Cut and Cover*), te klasična metoda tunelskog podzemnog iskopa (*engl. Deep tunnel*) metoda. Metoda koja će detaljnije biti opisana u ovom diplomskom radu, te za koju će se napraviti numerički proračuni pomoću računalnog programa Plaxis2D je metoda izrade tunela podzemne željeznice u otvorenoj građevnoj jami (*engl. Cut and Cover*).

U ovom diplomskom radu modeliranje u programu „*Plaxis*“ načinjeno je za dva modela. Oba modela imaju jednaku geometriju odnosno sadrže jednake stratigrafske slojeva tla, dobivene korištenjem podataka iz EGPV baze podataka. Modeli se razlikuju prema odabiru stabilizacijskih strukturnih elemenata, te predviđenim razinama podzemne vode. Uz pomoć dva navedena ulazna modela ukupno je napravljeno četiri različita slučaja ili scenarija izrade tunela podzemne željeznice u otvorenoj građevnoj jami (*engl. Cut and Cover*). Na taj način preliminarno je dobiven uvid u složenost i kompleksnost izvođenja ovakvog tipa zahvata u tlu. U poglavlju izlaznih rezultata uspoređeni su dobiveni izlazni podaci temeljem analize pomaka, deformacija, naprezanja, sila, mobilizirane posmične čvrstoće, porednih pritisaka i drugih podataka koje je moguće dobiti u programu „*Plaxis-2D*“.

2. OSNOVNE KOMPONENTE IZRADE PODZEMNIH PROSTORIJA I TUNELA

Da bi se razumjeli problemi koji uključuju proces projektiranja, te izgradnje obloge tunela podzemne željeznice potrebno je ispitati odgovarajuće koncepte o tome kako će se stijenska masa ili tlo koje okružuje tunel podzemne željeznice ponašati prije, tijekom, te nakon njegove izgradnje ili izgradnje više tunelskih cijevi ukoliko se radi o većem sustavu podzemnih željeznica ili stanicama podzemne željeznice. Glavni cilj takvih istraživanja je saznati veličinu deformacije koju će okolno tlo pretrpjeti, kao i način ponašanja tunelske obloge kao odgovora na deformacije u tlu ili stijenskoj masi. Korištenje podzemnih građevina poput tunela za podzemne željeznice, autocesta, skladištenje materijala, kanalizaciju i vodoopskrbu povećavaju se sve više u mnogim europskim i svjetskim državama. To ukazuje da sve više ljudi danas koristi neke od navedenih podzemnih građevina bilo za potrebe prijevoza ili neke slične aktivnosti. Stoga, sigurnost ovih objekata za vrijeme njihove upotrebe mora biti vrlo temeljito i kvalitetno ispitana, kako ne bi došlo do neželjenih nesreća, materijalnih gubitaka ili gubitaka ljudskih života.

Općenito se projektiranje tunela za potrebe podzemne željeznice može podijeliti u nekoliko faza. Prvi korak čini proučavanje i pregled koncepta postojećeg idejnog rješenja. Sljedeća faza je stvaranje generalnog koncepta na osnovi preliminarnih istraživanja, te ponovno projektiranje idejnog rješenja ukoliko je potrebno. Nakon toga slijedi pregled svih dostupnih geoloških podataka o širem području na kojem će se projekt izvoditi, a poglavito onih geoloških podataka koji definiraju geologiju područja kojim će se kretati potencijalna buduća trasa podzemne željeznice. U sljedećoj fazi cilj je razmatranje različitih mogućih uređenja tunela, te razmatranje mogućih metoda za njihovu izgradnju. U petoj fazi definira se željeni presjek tunela sa svim potrebnim elementima, a u šestoj fazi planira se projekt sigurnosnih izlaza kao i sustav ventilacije. U posljednjoj fazi procjenjuju se troškovi, te definira cjelokupni program izgradnje.

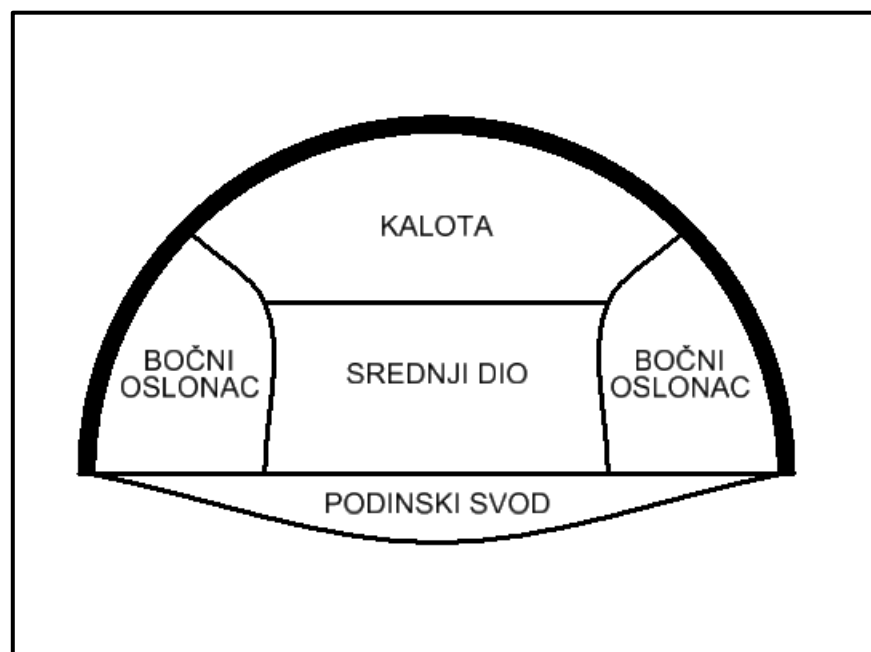
2.1. Geotehnički istražni radovi

Geotehnički istražni radovi prethode projektiranju i izradi tunela. Služe za odabir metode građenja, dimenzioniranje podgrade (privremene i konačne), te procjenu utjecaja metode građenja i konstrukcije na okoliš. Cilj geotehničkih istraživanja je opis svih svojstava tla,

stijena, podzemne vode i primarnog stanja naprezanja, koji su relevantni za projekt tunela, a vrsta i opseg istraživanja trebaju odgovarati veličini i svrsi tunela. Rezultate geotehničkih istraživanja treba pripremiti i grafički opremiti prema zahtjevima propisanih nacionalnih normi u okviru Eurokoda 7. Na kraju istraživanja rezultati se prikazuju u geotehničkom elaboratu i implementiraju u kasnije faze projektiranja.

2.2. Geometrijski presjek tunela podzemne željeznice

Riječ tunel vuče svoje korijenje iz engleskog govornog područja. Danas riječ tunel označava cijev koja ima ulaz i izlaz, pa se može reći da su tuneli podzemni objekti tj. inženjerske građevine, koje na obje strane izlaze na površinu. Služe uglavnom za transport ljudi i/ili materijala, te za provođenje vodovoda, kanalizacija, električnih kablova i slično. Poprečni presjek u odnosu na duljinu im je puno manji. U prošlosti su tuneli bili isključivo građeni radi savladavanja određenih reljefnih prepreka. Danas za gradnju tunela, a posebice za gradnju tunela za potrebe podzemne željeznice postoje dva nova argumenta. To su nedostatak prostora u urbanom području gradova, te očuvanje okoliša. Poprečni presjek svakog tunela sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova. Ti ključni dijelovi ili komponente vidljivi su na slici 2-1.



Slika 2-1. Poprečni presjek tunela (Ivas, 2019)

Poprečni presjek tunela u osnovi se sastoji od tunelske podgradne konstrukcije i svijetlog profila. Podinski svod, naznačen na slici 2-1, nije obavezni dio tunelske konstrukcije već se primjenjuje samo kod tunela položenih u lošije stijenske mase, tj. u one stijenske mase u kojima dolazi do izražaja veliko naprezanje, koje se pojavljuje u podini tunela ili kod stijena sklonih bujanju.

Jednadžba 2-1 prikazuje način izračuna ukupne površine poprečnog presjeka tunela:

$$F = F_k + F_s \quad (2-1.)$$

gdje su:

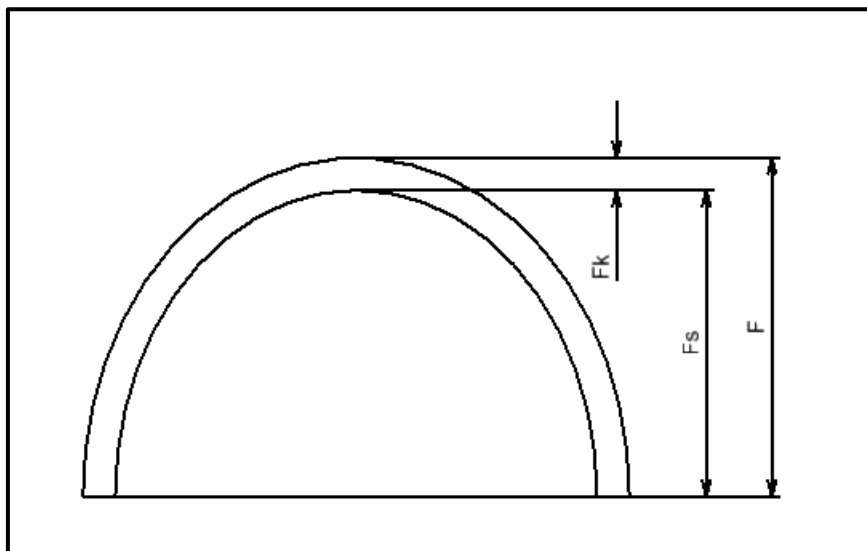
F – ukupna površina poprečnog presjeka (m^2)

F_k – površina podgradne konstrukcije (m^2)

F_s – površina svijetlog profila tunela (m^2)

Ta jednadžba je vrlo bitna, jer je pri projektiranju tunela podzemne željeznice potrebno osigurati dovoljno prostora unutar tunela za nesmetano prometovanje prijevoznih sredstava u jednom ili dva smjera, ali i smještaj svih ostalih popratnih komponenti.

Površina poprečnog presjeka prikazana je slikom 2-2.



Slika 2-2. Površina poprečnog presjeka tunela (Ivas, 2019)

Oblici tunela odgovaraju različitim namjenama i geotehničkoj sredini i uvjetima u kojima se tuneli grade. Od različitih vrsta presjeka, neki su međusobno više slični, neki se primjenjuju u većem rasponu veličina. U praksi se mogu izdvojiti sljedeći reprezentativni oblici tunela:

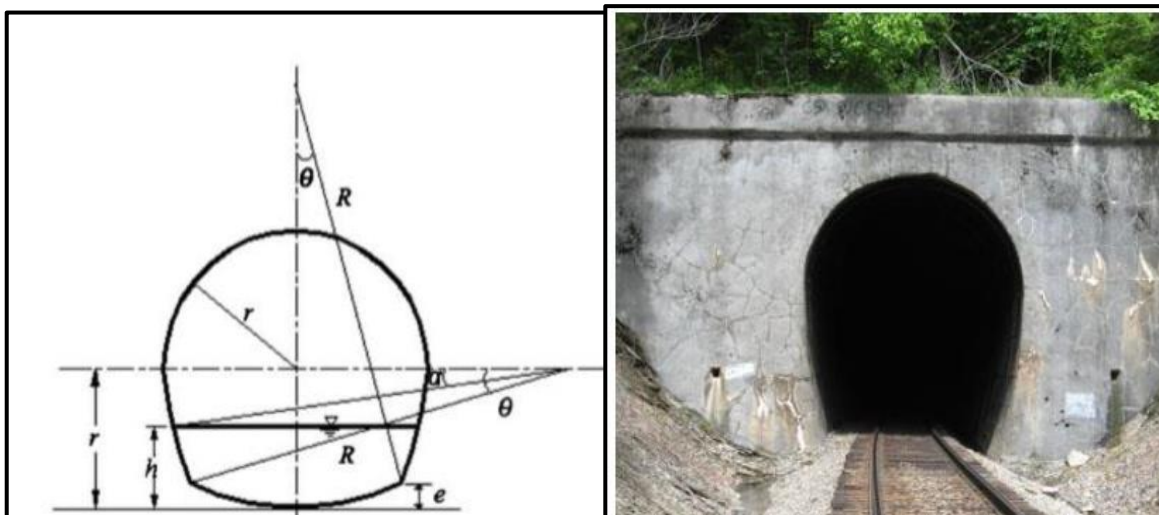
1. pravokutni oblik,
2. potkovičasti oblik,
3. ovalni oblik,
4. eliptični oblik,
5. kružni oblik i
6. svodni oblik (D oblik).

Pri projektiranju i izradi tunela podzemne željeznice najčešće se koriste samo tri od šest navedenih oblika: potkovičasti, kružni i svodni. Međutim, to nije pravilo, te oblik tunela ovisi o uvjetima gradnje i zahtjevima struke.

2.2.1 Potkovičasti oblik

Potkovičasti presjek tunela sastoji se od zaobljenog stropa, lučnih stranica bokova i ravnog dna. Zbog savijenih stranica tunela, koncentracija naprezanja svedena je na minimum. Dno tunela je s vanjske strane također lučnog oblika, no centar zakrivljenosti dovoljno je udaljen da se dno prilagođava radovima gradnje kao da je ravno, što pruža veliku potporu u izvođenju tokom probijanja tunela. Srednji dio stropa tunela najosjetljiviji je na urušavanje. Iskustveno je dokazano da se ovakav oblik tunela malo deformira. Potkovičasti oblik tunela pogodan je za stijensku masu s jako malo pukotina, meka tla te raspucale meke stjenovite sredine.

Presjek (slika 2-3) se sastoji od četiri segmentna luka, od kojih gornji luk ima radijus zakrivljenosti r , dok preostala tri imaju radijus zakrivljenosti R , a svaki luk ima svoj centar zakrivljenosti. Odnosi ovih dimenzija su različiti, ali radijus zakrivljenosti gornjeg dijela presjeka je uvijek manji od radijusa zakrivljenosti preostalih triju dijelova. Što je veličina radijusa r bliža veličini radijusa R , to ovaj presjek više nalikuje na obični kružni presjek. Potkovičasti presjek može se definirati parametrom t , gdje je t omjer radijusa zakrivljenosti stropa, r i radijusa zakrivljenosti ostalih triju lučnih stranica presjeka, R .



Slika 2-3. Potkovičasti oblik tunela (Primorac, 2019)

2.2.2 Kružni oblik

Presjeci kružnog oblika postali su jedan od najčešće korištenih presjeka, jer imaju najveću pogodnost u tome što daju dovoljan otpor vanjskom pritisku. Ravnomjernije raspodjeljuju i vanjska naprezanja i naprezanja nastala zbog fluida koje mogu sadržavati, te su u ovom drugom najbolji usporedno s ostalim tipovima presjeka. Iz tog razloga nerijetko se koriste u hidrotehničke svrhe.

Ovaj oblik neophodan je u nestabilnim tlima, uz prisustvo mekih glina i pijeska koji ne posjeduju kohezijska svojstva. Ovisno o svrsi klasifikacije, u ovu skupinu tunela spadaju i tuneli koji su otvoreni kao okrugli presjeci, izuzev ravnog dna, ili su iskopani punim kružnim presjekom te im je zbog svoje namjene naknadno poravnato dno. U takve tunele spadaju oni

iskopani tunelskim bušaćim strojevima (tzv. krtice). Na slici 2-4 prikaz je tunel kružnog oblika.



Slika 2-4. Kružni oblik tunela (Primorac, 2019)

2.2.3. Svodni oblik

Svodni oblik presjeka tunela najčešće je korišten presjek u izgradnji tunela za kolni, te željeznički prijevoz. U ovu skupinu presjeka spadaju svi tuneli koji približno nalikuju savršenom obliku svoda kakav je prikazan na slici 2-5, u pogledu sličnosti preraspodjele sekundarnih naprezanja nakon proboja cijevi, te završetka cijelog tunela. Ovaj oblik izvediv je i pri većim širinama i dubinama, ali u sedimentnim stijenama dobre kvalitete, masivnim magmatskim izdancima, te kompaktnim metamorfnim stijenama, gdje se očekuju velika naprezanja.



Slika 2-5. Tunel oblika svoda (Primorac, 2019)

2.3. Opterećenja koja djeluju na tunel

Vrkljan (2013) navodi da je ispod površine terena stijenska masa izložena naprezanjima. Naprezanja koja se javljaju kao posljedica tektonskih pokreta i kao posljedica mase ležećih naslaga nazivaju se primarna, geološka ili *in-situ* naprezanja. Kada se u stijenskoj masi izvrši iskop, bio to podzemni ili površinski iskop, u okolini iskopa dolazi do promjene primarnih naprezanja, pa ta izmijenjena naprezanja nazivamo sekundarnim ili dodatnim naprezanjima. Sekundarna naprezanja često premašuju čvrstoću stijenske mase što dovodi do nestabilnosti samog iskopa, pa je bitno poznavati veličinu i orijentaciju spomenutih naprezanja (geoloških i dodatnih).

Pri projektiranju tunela podzemne željeznice vrlo je bitno definirati sve vrste i oblike opterećenja kojima tunelska obloga, te sama podzemna konstrukcija može biti izložena. Na taj način je moguće definirati kvalitetnije ulazne podatke koji su potrebni za numeričku simulaciju interakcije između geološke sredine i tunela podzemne željeznice. Takav pristup u konačnici pruža bolje razumijevanje svih sila akcije i reakcije koje se događaju u interakciji između okolnog tla ili stijenske mase te građevine (tunela).

Opterećenja, odnosno naprezanja se dodatno u okviru gradnje podzemne željeznice mogu podijeliti na stalna, varijabilna, te slučajna. U stalna opterećenja koja mogu djelovati na neku konstrukciju spadaju sama težina tunelske konstrukcije, težina tla koje se nalazi iznad tunela, te pritisak vode ukoliko postoji vodno lice. U varijabilna opterećenja spada prvenstveno dinamičko opterećenje uzrokovano kretanjem vozila po prometnicama na površini ili pak kretanje vozila unutar tunelske konstrukcije. Slučajno opterećenje čine seizmički efekti koji su uzrokovani potresanjem tla, te ovise ponajviše o faktoru seizmičkog ubrzanja (α).

2.3.1. Primarna (geološka) naprezanja

Primarno (geološko) stanje naprezanja postoji u svim smjerovima, tj. u x, y i z smjeru Kartezijevog prostora. Uglavnom se računaju samo dvije komponente, a to su horizontalna i vertikalna komponenta. Općenito, primarna vertikalna naprezanja rastu linearno s dubinom, te se mogu odrediti iz izraza 2-2 :

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (2-2.)$$

gdje je:

σ_v - vertikalno naprezanje (kN/m²)

γ - zapreminska težina tla/stijene (kN/m³)

z - dubina ispod površine (m)

Određivanje horizontalnog naprezanja predstavlja nešto složeniji matematički problem. Obično se horizontalno naprezanje izražava u funkciji vertikalnog pomoću izraza 2-3 za tla te izrazom 2-4 za stijene.

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot k_0 = \gamma \cdot z \cdot k_0 \quad (2-3.)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K = \gamma \cdot z \cdot K \quad (2-4.)$$

gdje je:

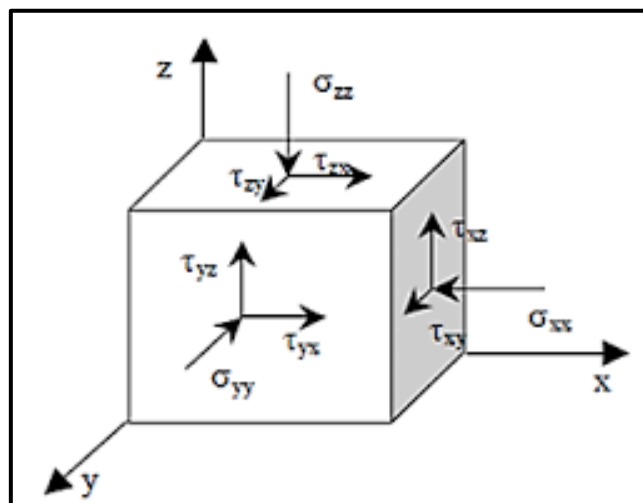
σ_v - horizontalno naprezanje (kN/m²)

k_0 – koeficijent mirnog pritiska tla

K – koeficijent bočnog pritiska stijenske mase

Horizontalna naprezanja najčešće su posljedica lokalne topografije i geoloških svojstava. Mjerenjima je pokazano da horizontalna naprezanja mogu imati vrlo visoke vrijednosti, te da mogu biti nekoliko puta veća od vertikalnih na nekim lokacijama. Na ovu pojavu mogu utjecati erozija, tektonske aktivnosti, anizotropija stijenske mase, lokalni efekti i drugi faktori.

Određivanjem primarnih ili *in-situ* naprezanja u stijenskoj masi dobivaju se podatci o stanju naprezanja, smjeru i veličini glavnih naprezanja, mehanizmu sloma, itd. Također, određivanjem primarnih naprezanja dobivamo i podatke o rubnim uvjetima za analize sekundarnih naprezanja, u fazi projektiranja, matematičkim, numeričkim ili fizičkim modelima prema Dugonjić Jovančević (2017). Razumijevanje koncepta naprezanja je osnova za razumijevanje mehanike stijena i tla. Naprezanje je tenzor drugog reda. Komponente posmičnih i normalnih naprezanja prikazane su na slici 2-6.

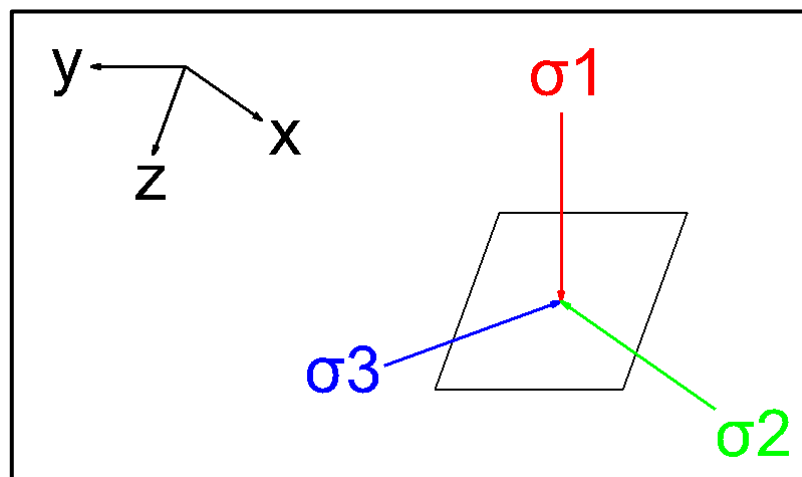


Slika 2-6. Komponente normalnih i posmičnih naprezanja (Dugonjić Jovančević, 2017)

Stanje naprezanja u određenoj točki je obično predstavljeno veličinom i orijentacijom glavnih naprezanja. Matricu naprezanja čini devet komponenti, ali stanje naprezanja u točki u prostoru opisano je sa šest komponenti. Matrica trodimenzionalnog stanja naprezanja prikazana je formulom 2-5.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2-5.)$$

Postoje izravne i neizravne metode mjerenja komponenti naprezanja. Za potpuno definiranje naprezanja u nekoj točki potrebno je izmjeriti šest komponenti tenzora naprezanja (tri normalne i tri posmične komponente) ili pak pravce, te veličine tri glavna naprezanja (σ_1 ; σ_2 ; σ_3). U ovom drugom slučaju, posmična naprezanja na svim ravninama u tim smjerovima jednake su nuli, pa je potrebno označiti orijentaciju glavnih naprezanja (slika 2-7). Sve površine iskopa su ravnine glavnih naprezanja odnosno nema posmičnih komponenti koje na njima djeluju.



Slika 2-7. Komponente glavnih naprezanja koje djeluju na ravninu iskopa (Vrkljan, 2013)

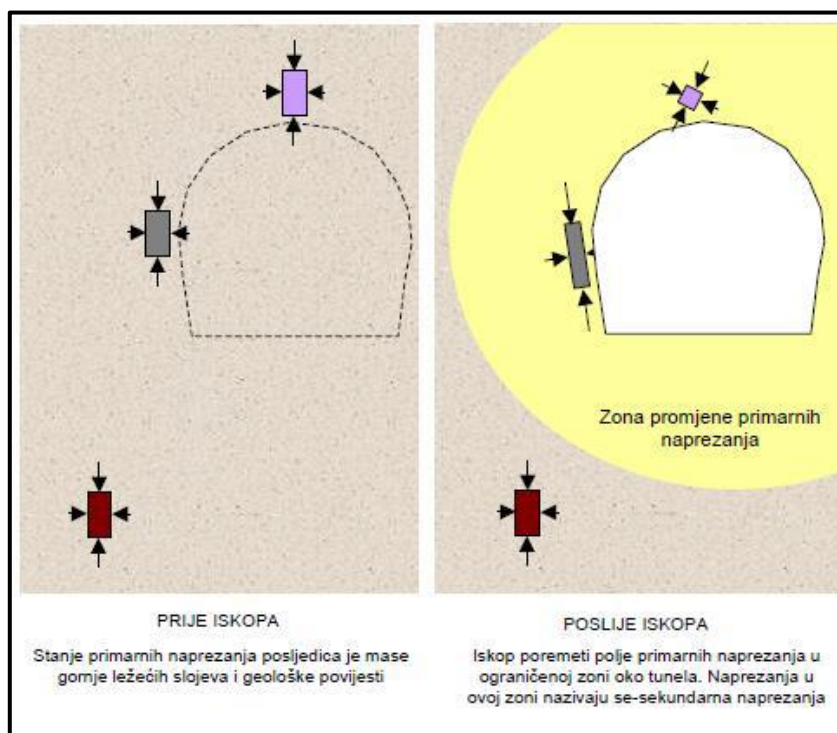
Normalna naprezanja (σ_{xx} ; σ_{yy} ; σ_{zz} ; σ_1 ; σ_2 ; σ_3) mogu se mjeriti izravno, dok se posmične komponente tenzora naprezanja ne mogu mjeriti, već se one izračunaju iz normalnih komponenti mjerenih u različitim pravcima (Vrkljan, 2013). Međunarodna udruga za mehaniku stijena (ISRM, 1987) preporuča četiri izravne metode, a to su:

1) Pokus tlačnim jastucima,

- 2) Pokus hidrauličkog frakturiranja,
- 3) USBM metoda (*engl. United States Bureau of Mines*) i
- 4) Određivanje naprezanja korištenjem CSIR ili CSIRO sonde.

2.3.2. Sekundarna naprezanja

Naprezanje koje vlada u stijenskoj masi prije nego se u njoj izvrši iskop, posljedica je mase gornje ležećih naslaga i geološke povijesti stijenske mase (primarna naprezanja). Polje primarnih naprezanja poremeti se nakon iskopa podzemnog prostora do neke udaljenosti od konture iskopa. Ova naprezanja se u literaturi obično nazivaju izazvanim naprezanjima ili sekundarnim naprezanjima. Na slici 2-8. prikazano je primarno i sekundarno stanje naprezanja oko tunelskog otvora.



Slika 2-8. Primarno i sekundarno naprezanje oko tunelskog otvora (Vrkljan, 2013)

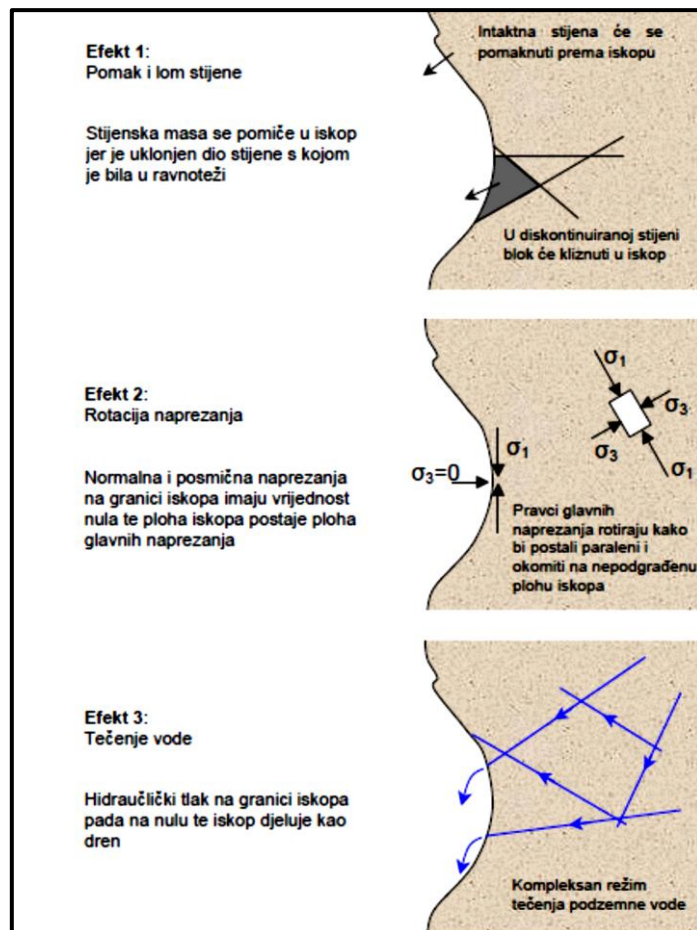
Da bi se razumjeli mehanizmi nestabilnosti uzrokovani visokim sekundarnim naprezanjima, neophodno je razumjeti osnovne koncepte naprezanja i čvrstoće. Nekada ova naprezanja mogu biti dovoljno visoka da premaše čvrstoću stijenske mase. U ovom slučaju, slom

stijenske mase dovodi do nestabilnosti konture iskopa što se očituje na različite načine ovisno o svojstvima stijenske mase i veličini sekundarnih naprezanja (Vrkljan, 2013).

2.4. Djelovanje iskopa na stijensku masu

Postoje tri primarna efekta iskopa u stijenskoj masi (slika 2-9):

1. Pomak granice iskopa zbog uklanjanja napregnute stijenske mase, što omogućuje pokrete okolne stijenske mase zbog novonastalog rasterećenja,
2. Nema normalnih i posmičnih naprezanja na nepodgrađenoj plohi iskopa te zbog toga granica iskopa mora biti ravnina glavnih naprezanja. Pri tome je glavno naprezanje, okomito na ravninu iskopa, jednako nuli. Općenito, iskop će izazvati glavnu preraspodjelu primarnih naprezanja, kako po veličini tako i po orijentaciji,
3. Na granicama iskopa tlak vode će pasti na nulu (točnije na atmosferski tlak). Iskop će djelovati kao dren te će voda iz stijenske mase teći prema iskopu sve do izjednačavanja potencijala.



Slika 2-9. Tri primarna efekta iskopa na stijensku masu (Vrkljan, 2013)

Napomena: Na slici 2-9 hidraulički tlak se odnosi na porni tlak.

Pomak stijenske mase može se dopustiti ili ograničiti mjerama za stabiliziranje. Projektom treba biti definiran značaj svakog oblika pomaka stijenske mase kao i veličina pomaka. Važno je znati koji od sljedećih mehanizama uzrokuje pomak:

- blok stijene se pokreće u iskop,
- stijenska masa se deformira kao cjelina (elastična deformacija),
- pomak je posljedica loma stijenske mase.

Moguće je da sva tri mehanizma djeluju istovremeno. Da bi se definirala strategija stabiliziranja potrebno je razumjeti ove mehanizme (Vrkljan, 2013).

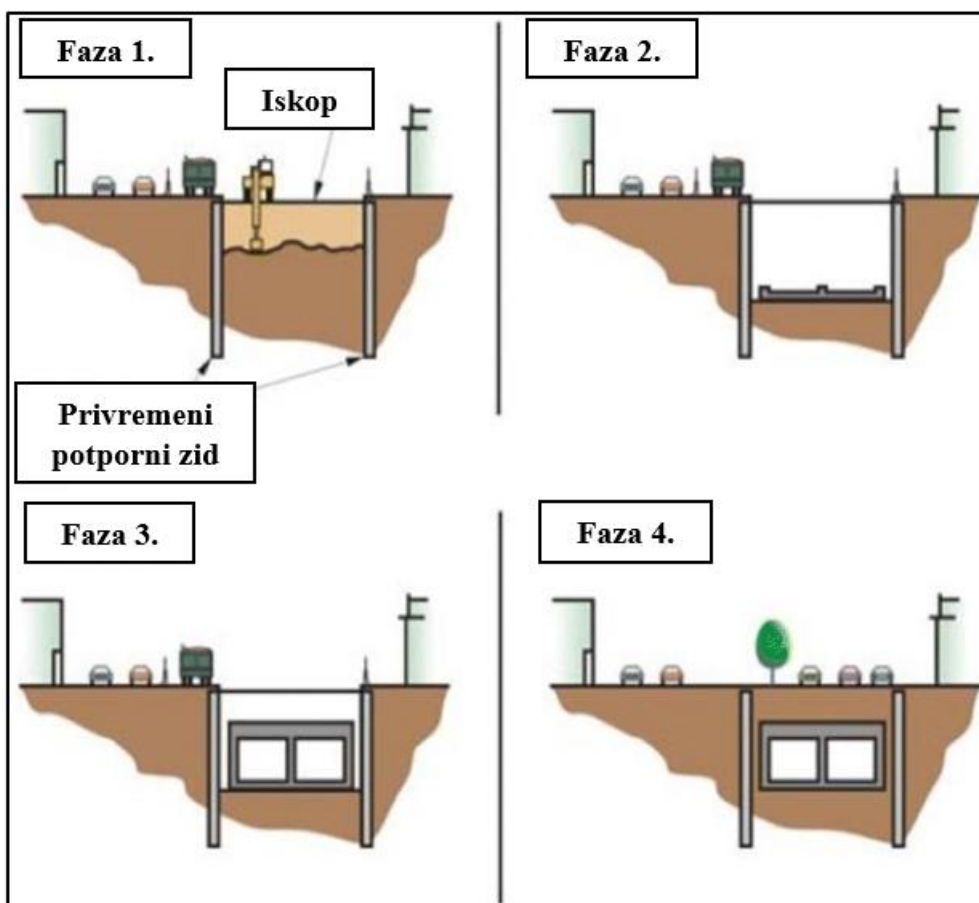
3. IZRADA TUNELA U OTVORENOJ GRAĐEVNOJ JAMI

3.1. Općenito o metodi

Izraz „*Cut and Cover*“ odnosno gradnja u otvorenoj građevnoj jami predstavlja skraćeni naziv tro-stupanjskog postupka ili metode izrade podzemne strukture. Prva se faza (*engl. Cut*) sastoji od izrade iskopa odgovarajuće veličine, tj. prostornog volumena kako bi se napravilo dovoljno mjesta za izradu podzemne konstrukcije (*engl. Construction*) u drugoj fazi procesa. U trećoj, završnoj fazi izgrađena se konstrukcija zasipava, zatrpava ili pokriva (*engl. Cover*) materijalom, koji je izvađen u prvoj fazi izrade navedene podzemne konstrukcije. Podzemna građevina izgrađena na navedeni način, koristeći sve tri faze procesa, iako ne nužno slijedeći uvijek ovakav redoslijed se obično naziva „*cut-and-cover*“ struktura. Strukture ili konstrukcije izrađene navedenom metodom su uglavnom višerazinski podrumi, duboki podzemni parkinzi za automobile, vodeni parkovi, pothodnici, propusti, crpne stanice, te stanice i tuneli podzemne željeznice. Od navedenog, strukture stanica podzemne željeznice daleko su najveći i najsloženiji elementi za projektiranje i konstrukciju navedenom metodom izrade. Konstrukcije izrađene metodom „*Cut and Cover*“ po definiciji su smještene pod zemljom. Stoga, princip njihovog projektiranja mora uključivati između ostalog i procjenu utjecaja sljedećih efekata, bitnih za izradu i upotrebu takvih konstrukcija:

- Bočni pritisci tla i hidrostatički pritisci na bočne zidove konstrukcije koji djeluju kao zadržavajući ili potporni elementi,
- Bočni pritisci na podni dio strukture koji djeluju kao horizontalni podupirači,
- Vertikalna opterećenja
- Seizmička opterećenja
- Uzgon uslijed pojave vodnog lica.

Veličina svih ovih efekata, pojedinačno i kumulativno, zajedno sa zadovoljavajućim zahtjevom stabilnosti, uporabljivosti, trajnosti i minimalnog održavanja zahtijeva određenu minimalnu čvrstoću strukturnih elemenata i konstrukcije kao cjeline. Iz navedenog je moguće zaključiti kako je armirani beton danas najčešće korišteni materijal pri izradi ovakvih konstrukcija. Shematski prikaz metode nalazi se na slici 3-1.



Slika 3-1. Shematski prikaz "Cut and Cover" metode (Kaul, 2010)

3.2. Projektiranje struktura podzemnih željeznica

Objekti podzemnih željeznica ili metroa uglavnom se nalaze u vrlo gusto izgrađenim urbanim sredinama i često u teškim geološkim uvjetima izgradnje. Ti utjecaji često imaju dominantan utjecaj na njihovo projektiranje. Proces projektiranja metro strukture je vrlo složen, ali široko utemeljen inženjerski proces. Sadrži mnogo više segmenata počevši od matematičke strukturne analize, izračuna rezultata naprezanja pa sve do procjene momenata savijanja, posmičnih i aksijalnih sila kao i proračun veličine, količine i raspodjele ojačanja potrebnih u raznim elementima konstrukcije. Osim što moraju biti zadovoljeni strukturni zahtjevi, kako u pogledu projektiranja tako i konstrukcije, sustav podzemne željeznice također mora biti projektiran tako da uzima u obzir i omogućuje smještaj postrojenja sa svim pripadajućim kanalima i kablovima, zahtjevima za signalizaciju i telekomunikacije, kao i raspodjelu pogonske snage, klimatizacijskih i sličnih sustava potrebnih za savršeno i sigurno funkcioniranje.

Projekt nadzemnih građevina uglavnom se temelji na dobro definiranim parametrima i utvrđenim načelima. Opterećenja se mogu točno izračunati i primjenjuju se na poznatim diskretnim mjestima i u definiranim smjerovima. Granični uvjeti, te odziv konstrukcije na primijenjena opterećenja i razne kombinacije opterećenja mogu se uspostaviti s razumnim stupnjem sigurnosti. U usporedbi s tim, projekt podzemne građevine općenito se mora temeljiti na parametrima, koji vjerojatno neće biti u istoj mjeri kvantificirani. Na primjer, ponašanje tla može varirati od linearnog, nelinearno-elastičnog do plastičnog. Povijest naprezanja (*engl. „in situ“*), anizotropija, heterogenost, drenažne karakteristike i promjena tlaka vode u porama na granici iskopa u raznim fazama gradnje također su neki od čimbenika koje je teško precizno kvantificirati. To čini analizu koja je općenito manje precizna u usporedbi s onom za nadzemne građevine. Precjenjivanje ili podcjenjivanje primijenjenih opterećenja, te precjenjivanje ili smanjenje posmične čvrstoće tla s vremenom ili promjenom naprezanja također može zakomplicirati proračune i otežati modeliranje interakcije objekta i tla/stijene. Osim toga, uzorci tla relativno su mali i potencijalno nedovoljno reprezentativni u odnosu na veličinu zahvata u tlu. Na tragu svih takvih nesigurnosti, projekt se uglavnom temelji na određenim idealizacijama i stupnju empirizma, koji sugerira na oslanjanje na prethodno iskustvo korišteno pri projektiranju i gradnji sličnih građevina u sličnim okruženjima.

Izgradnja građevine poput sustava podzemne željeznice neizbježno će poremetiti „in situ“ naprezanje i režim tlaka vode u postojećoj masi tla. U velikoj mjeri, ovaj poremećaj ovisi, između ostalog, o vrsti tla, veličini zrna i graduiranosti tla. U relativno dobro propusnim tlima, poput pijeska i šljunka, učinci različitih faza gradnje vjerojatno će biti neposredni, tj. uočljivi u vrlo kratkom vremenskom razdoblju. U slučaju sitnozrnih tla poput glina, uslijed slabe vodopropusnosti učinci različitih faza gradnje će biti ovisni o vremenu. U slučaju prisutnosti prahova navedeni učinci će biti kombinirani, tj. prevladavat će nedrenirani uvjeti u početku, a s protokom vremena u tlu će se postići drenirani uvjeti.

Početna naprezanja u tlu zabilježit će pad početnih vrijednosti zbog relaksacije tla tijekom iskopa u različitim fazama izgradnje, te zbog preraspodjele naprezanja. Nakon toga u tlu će doći do postupnog porasta vrijednosti naprezanja na vrijednosti približno jednake onima koje su postojale prije iskopa. Projektom se stoga mora pokazati da objekt može zadovoljavajuće podnijeti ovaj ciklus promjene naprezanja u tlu u kombinaciji sa svim ostalim opterećenjima, kao i slučajnim opterećenjima poput potresa koja bi mogla djelovati tijekom određenih faza gradnje, te operativnog vijeka konstrukcije.

Ovo potpodglavlje prikazuje samo kratki prikaz pojedinih bitnih parametara koji utječu na projektiranje, a naknadno i na izvedbu podzemnih objekata, kao što su sustavi podzemnih željeznica. U sljedećim poglavljima detaljnije će biti objašnjeni svi ključni elementi koji su potrebni za provedbu numeričke analize, kao što će biti prikazan i detaljniji opis faza „*Cut and Cover*“ metode.

3.3. Faze „*Cut and Cover*“ metode

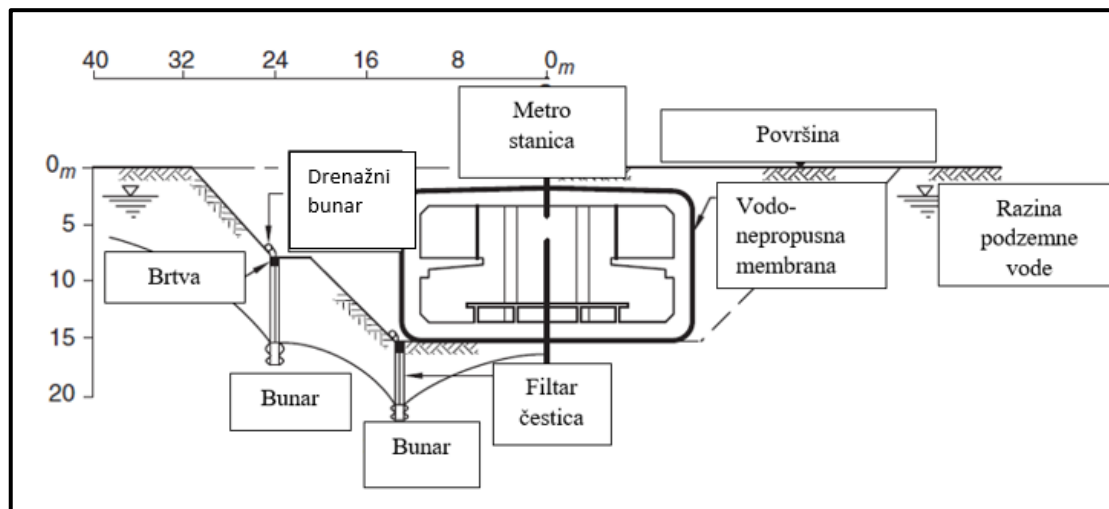
Izgradnja tipičnog „*Cut and Cover*“ objekta poput tunela ili stanice podzemne željeznice obuhvaća četiri glavna koraka ili faze. To su:

1. Početak radova na iskopu,
2. Ugradnja privremenih potpornih konstrukcija i napredak iskopa građevne jame,
3. Izgradnja objekata podzemne željeznice (stanica, tunel i sl.), kontrola razine podzemne vode,
4. Ispunjavanje građevne jame iskopanim materijalom.

Najprije se u tlu napravi građevna jama, koja je dovoljno velika i duboka za smještaj željenog objekta. Nadalje, kako bi se iskapanje i građevinske aktivnosti nastavile u suhom po potrebi se provodi drenaža građevne jame odnosno spuštanje razine vodnog lica. Vrlo je bitno da se što više vode uklanja iz tla i to po mogućnosti 2-3 metra ispod dna građevne jame. Na taj način sam proces iskopa postaje brži i jednostavniji. Odgovor tla na snižavanje razine podzemnih voda može biti od posebne važnosti u odabiru odgovarajuće metode gradnje. Također može biti osnova za procjenu utjecaja procesa izgradnje na okolno tlo i objekt. U tu svrhu, provođenje opsežnijih promatranja razine podzemnih voda prije početka daljnjih radova moglo bi donijeti neizmjerljivo korisne informacije i stoga je uvijek vrijedno razmatranja. Osim toga, kako bi se osiguralo da se građevinska aktivnost može sigurno provoditi, građevna jama mora biti adekvatno "stabilizirana" ili pravilno "zadržana". Izgradnja same konstrukcije, te vraćanje iskopanog materijala u svrhu postizanja početnog stanja tada mogu slijediti u skladu s priznatim načelima i prihvaćenim praksama. Iskopavanje i izgradnja metro strukture može se provesti unutar:

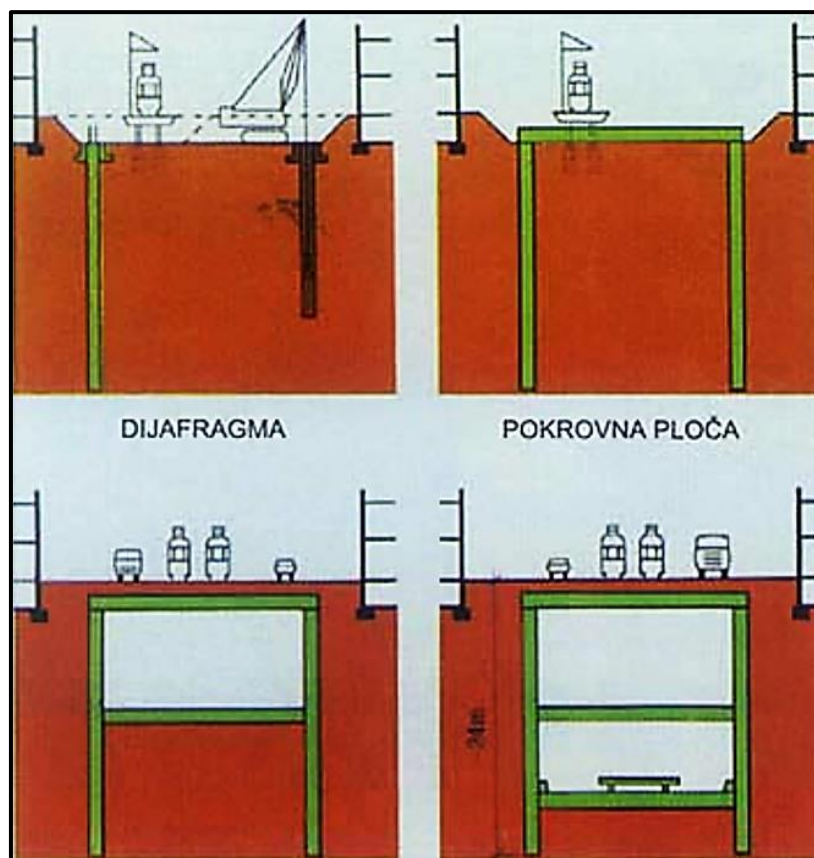
1. Široke građevne jame sa stabiliziranim etažama,
2. Građevne jame s okomitim stabiliziranim zidovima ili
3. Građevne jame s okomitim zidovima koji su stabilizirani pomoću dodatnih pridržavajućih elemenata (npr. sidra).

Slika 3-2. prikazuje jedan od navedenih načina iskopa građevne jame, dreniranje, osiguranje te izradu željene konstrukcije.



Slika 3-2. Građevna jama s izgrađenom konstrukcijom metro stanice (Kaul, 2010)

Iskop i izgradnja tipičnog objekta poput metro stanice općenito se odvija unutar prethodno ugrađene zagatne stijene koja čini perimetar građevne jame. Općenito, zagatne stijene mogu se podijeliti na slobodnostojeću ili usidrenu. Slobodnostojeća zagatna stijena se uglavnom koristi kod izvedbi plićih iskopa, dok se usidrena zagatna stijena koristi pri izvedbi dubljih iskopa kakav je primjerice iskop za potrebe izvedbe podzemne željeznice. Zagatna stijena pruža glavni sustav potpore tlu kako iskapanje napreduje prema dolje, te na taj način preuzima pritisak i osigurava stabilnost vertikalne stijene, a nekad služi i za zaštitu od podzemne vode. Ugradnja takvog zida tako predstavlja drugu od glavnih faza u procesu izgradnje metro konstrukcije „*Cut and cover*“ metodom. Slika 3-3 prikazuje primjer izrade dijafragme s pokrovnom pločom i središnjim stupom.



Slika 3-3. Izrada dijafragme s pokrovnom pločom i središnjim stupom (Kolić i Kolić, 2001)

Sljedeći korak pri konstruiranju sustava podzemne željeznice koristeći metodu „*Cut and Cover*“ je izgradnja tzv. privremene prometne trake. Kako se izgradnja sustava podzemne željeznice često izvodi ispod užih gradskih središta, tako je nakon iskopa građevnu jamu potrebno prekriti privremenom prometnom trakom. Cilj te pomoćne konstrukcije je omogućiti nesmetano odvijanje prometa gradskim ulicama, ali i zaštita okolnih zgrada i prolaznika od radova unutar građevne jame. Ukoliko je moguće promet se u što većem obujmu preusmjerava na alternativne pravce, kako bi ta privremena prometna traka bila izložena što manjem naprezanju uslijed prometovanja vozila po njoj.

Kako bi se provelo iskapanje i izgradnja radova na suhom, te kako bi se izbjegli prekomjerni pomaci u okolnom tlu i konstrukcijama, bitna je odgovarajuća kontrola podzemnih voda. To predstavlja treću glavnu fazu „*Cut and Cover*“ metode.

Iskop za izgradnju konstrukcije predstavlja četvrtu glavnu fazu procesa. U izgradnju privremene prometne trake uobičajeno je ugraditi dva pristupna okna dovoljne veličine koja omogućuje spuštanje potrebne opreme na mjesto za izvođenje iskopa. Kroz ta se okna

također uklanja iskopani materijal. Iskop se izvodi strojno bušenjem i miniranjem ili uz pomoć TBM-a, odnosno krtice.

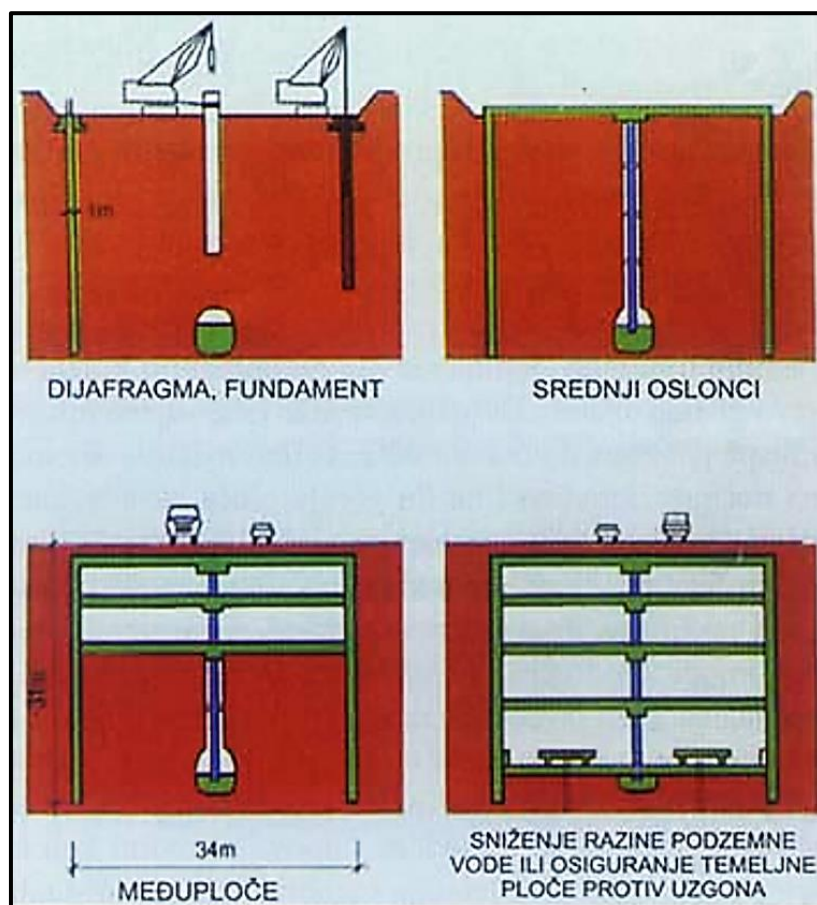
Izgradnja strukture (stanice ili tunela) predstavlja petu glavnu fazu procesa „*Cut and Cover*“ metode. Postoji nekoliko metoda na koji se željena konstrukcija može napraviti. Te metode su:

1. metoda odozdo prema gore („*Bottom-Up*“),
2. metoda odozgo prema dolje („*Top-Down*“),
3. kombinirana metoda,
4. kesonska metoda.

3.4. „Top-Down“ metoda

Razmatra li se tehnologiju izvedbe podzemnih i nadzemnih objekata kao dijelova sustava podzemne željeznice, mogu se usvojiti metode koje su u sličnim uvjetima primijenjene u srednjoj Europi, i to u gradovima Münchenu, Beču i Budimpešti. Stanice podzemne željeznice se u navedenim gradovima nalaze na dubinama od oko 15-20 m (gornji rub kolosijeka na platformi stanice), dok su u Budimpešti položene nešto niže u rasponu 20-35 metara. Ovako smještene stanice podzemne željeznice omogućuju izgradnju s površine i ta se metoda u posljednjih tridesetak godina razvila do oblika pri kojem se prvo izvode dijafragme, a nakon toga se otkapa površina do dubine od nekoliko metara. Zatim se betoniraju bočni zidovi te gornja ploča stanice, da bi se nakon toga zatrpala prethodno otkopana površina i pustilo promet po gornjoj ploči. Potom se svi radovi na stanici obavljaju podzemno. Ova metoda poznata je pod nazivom „*Top-Down*“ metoda ili u njemačkom govornom području „*Schlitzwand-Deckelbauweise*“. Optimalna je za izvedbu stanica u urbanim sredinama, u mekim tlima s problemima prodiranja vode, te je ujedno gospodarstveni najprihvatljivija varijanta. Postoje i neke varijante, npr. s redom stupova u sredini koji se temelje na uzdužnom temelju betoniranom u pilot-tunelu i koja se primjenjuje u slučaju većih potrebnih širina stanice (Kolić i Kolić, 2001). Slika 3-4. prikazuje primjer izgradnje stanice (postaje) podzemne željeznice „*Top-Down*“ metodom.

Iskop tunela između stanica obavlja se konvencionalnim metodama ili uporabom rotacijskih bušaćih strojeva. Kod konvencionalnih metoda ističe se kao najčešća primjena Nove austrijske tunelske metode (NATM).



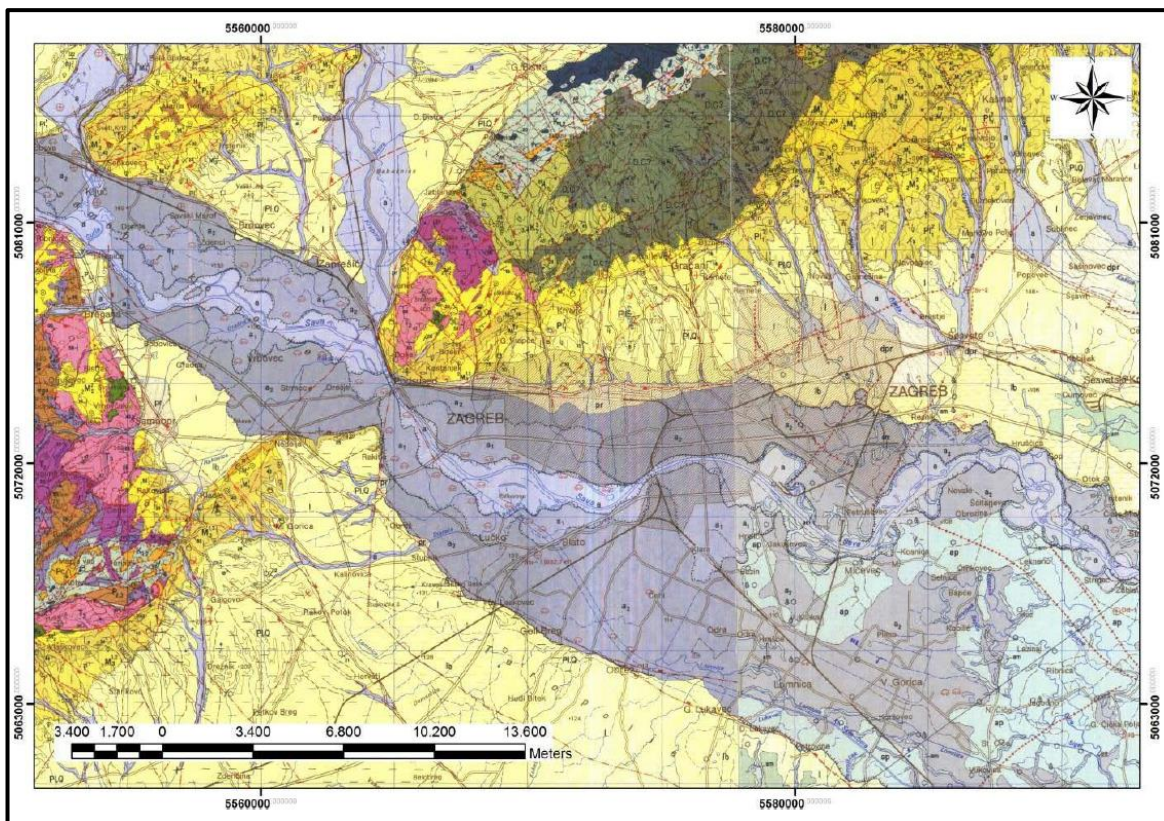
Slika 3-4. Izgradnja stanice podzemne željeznice pomoću "Top-Down" metode (Kolić i Kolić, 2001)

Slika 3-4. prikazuje jednu od mogućih načina izvođenja „Cut and Cover“ metode izrade podzemne željeznice. Ovakav način izvođenja počinje izgradnjom dijafragme i fundamenta. Kao što je prikazano slikom 3.4 prvo se izvodi iskop kako bi se dosegnula željena dubina za izradu fundamenta. Fundament predstavlja temelj na koji se veže srednji oslonac. Nakon što se napravi fundament i ugrade čelične talpe dijafragme počinje se s iskopom prvog sloja tla. Kada se sloj tla iskopa to željene dubine izrađuje se prva međuploča koji se oslanja na zidove dijafragme i središnji oslonac. Postupak se ponavlja sve dok se ne dostigne konačna dubina građevne jame. Izgrađene međuploče i središnji oslonac predstavljaju dodatno ukrućenje i nosivost zidova građevne jame. Ovakav način izvođenja iskopa predstavlja dodatnu sigurnost pri iskopu jer se smanjuje mogućnost urušavanja, ali zahtijeva momentalnu izgradnju cjelokupne infrastrukture zbog toga što međuploče onemogućuju rad dizalica i ostalih strojeva s površine.

4. GEOLOGIJA ZAGREBAČKOG PODRUČJA

Područje grada Zagreba vrlo je raznolikog geološkog sastava. Osim mnogobrojnih geoloških jedinica, područje Zagreba karakterizira i vrlo velik broj geoloških granica poput normalnih i reversnih rasjeda, navlačnih kontakata i sl. Cijela ta geološka slika uvelike utječe na konstruiranje sustava podzemne željeznice integriranog u zagrebačko podzemlje. Zagrebačko područje karakterizira još i njegov vodonosni sustav koji pokriva površinu od oko 350 km² od Podsuseda na zapadu pa do Rugvice na istoku, te od Medvednice na sjeveru do Vukomeričkih Gorica na jugu. Smjer pružanja vodonosnika je sjeverozapad – jugoistok u duljini od oko 30 km i s prosječnom širinom 10-15 km. Debljina aluvijalnih naslaga iznosi od 5-10 metara u zapadnim, pa sve do stotinjak metara u istočnim dijelovima sustava (Posavec, 2006). Same naslage su aluvijalnog i deluvijalnog odnosno proluvijalnog podrijetla. Nastale su u razdoblju kvartara, tj. epohi holocena. Navedene naslage su taložene u dolini rijeke Save, a nastale su nakupljanjem sedimenata transportiranog vodenim tokom. Sastoje se od krupnozrnatog prema sitnozrnatom sedimentu, pa se izmjenjuju slojevi šljunka, pijeska, prahova i glina, čija debljina značajno varira u pojedinim dijelovima. Zagrebački vodonosni sustav također je kvartarne starosti. Taložen je tijekom gornjeg i srednjeg pleistocena i holocena. To područje je tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena bilo jezersko i močvarno, a okolno gorje (Medvednica, Žumberak i sl.) bilo je kopno izloženo intenzivnoj eroziji i denudaciji. Početkom holocena, tektonski i klimatski procesi omogućili su prodor rijeke Save, čime je započeo transport materijala s područja Alpa (Velić i Durn, 1993). Intenzitet transporta materijala mijenjao se uslijed klimatskih promjena i to tako da je bio veći za vrijeme toplih i vlažnih razdoblja, dok se za vrijeme suhih i hladnih smanjivao.

Uz klimatske promjene, na proces taloženja utjecali su i tektonski procesi. Takvi uvjeti taloženja rezultirali su izrazitom heterogenosti i anizotropijom vodonosnika, te neujednačenom debljinom naslaga. Analizom litoloških podataka iz bušotina izdvojena su tri litofacijensa (Blašković i Dragičević, 1989). Stoga razlikujemo proluvijalni, aluvijalni i jezersko barski litofacijens. Slika 4-1 prikazuje geološku kartu šireg zagrebačkog područja.



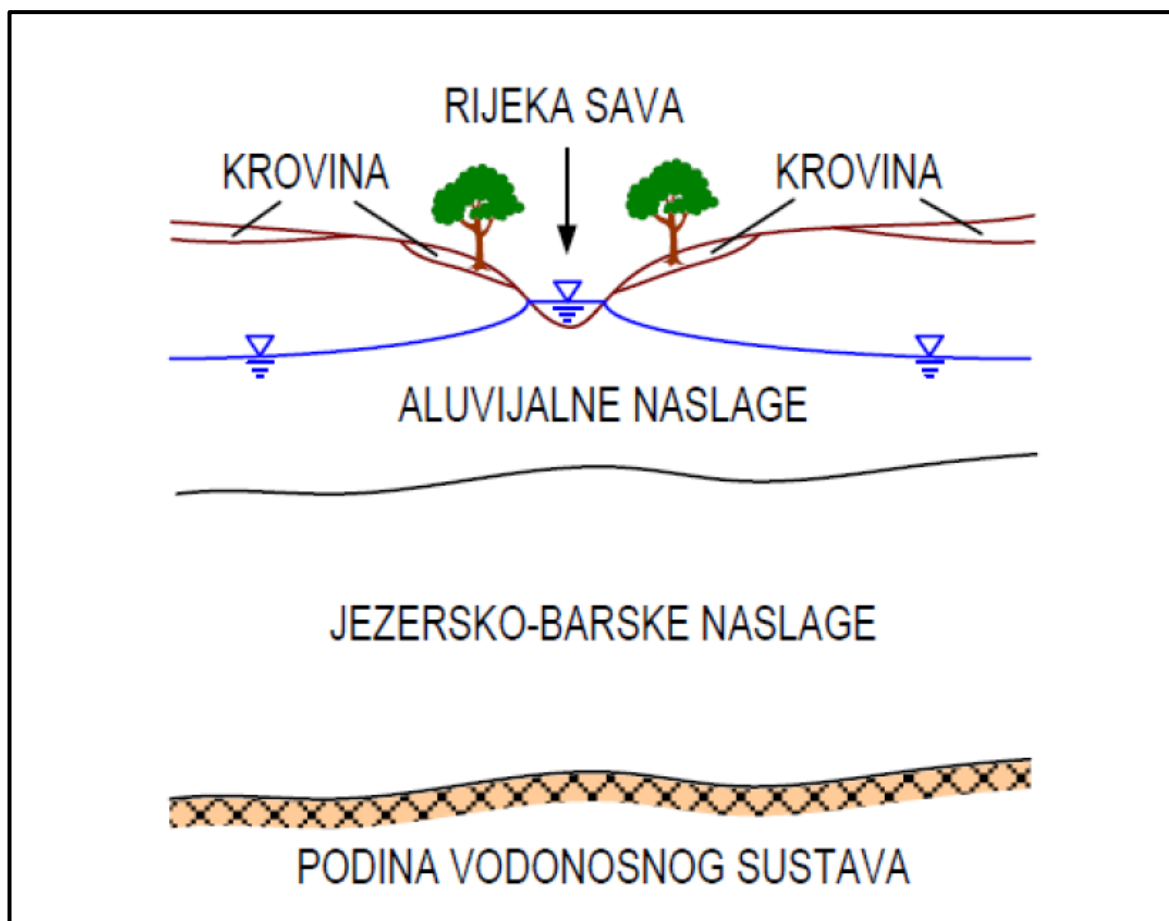
Slika 4-1. Geološka karta šireg zagrebačkog područja, OGK List Zagreb, M 1:100 000 (Šikić i dr., 1972)

Tumač oznaka: *a* – aluvij: šljunci, pijesci i gline; *pr* – proluvij: šljunci, pijesci, gline; *a1* – najniža terasa: šljunci, pijesci, podređeno gline; *a2* – srednja terasa: šljunci, pijesci; *a3* – najviša terasa: vapnenački konglomerati; *l* – kopneni beskarbonatni les: glinoviti silt; *lb* – barski les: siltozne gline; *Pl,Q* – šljunci, pijesci, gline (plioleistocen); *Pl12* – pijesci, pjeskoviti i glinoviti lapori, gline (gornji pont); *Pl11* – lapori, laporovite gline, podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati (donji pont); *2M31,2* – vapnoviti lapori, podređeno pijesci, pješčenjaci, šljunci i konglomerati (gornji panon); *1M31,2* – laporoviti vapnenci, vapnoviti lapori, podređeno pijesci i pješčenjaci (donji panon); *M31,2* – vapnoviti lapori, pijesci, pješčenjaci, konglomerati i breče (panon); *1M31* – vapnoviti, glinoviti i kremični lapori, laporoviti vapnenci i pješčenjaci (donji sarmat); *2M22* – organogeni i bioklastični vapnenci, pješčenjaci, vapnoviti i glinoviti lapori (gornji torton); *1M22* – vapnoviti lapori i pješčenjaci, bioklastični vapnenci (donji torton); *aqa* – dacito-andeziti; *11M21* – konglomerati, šljunci, pijesci, gline, ugljen (donji helvet); *Pc* – breče, konglomerati, pješčenjaci, lapori, grebenski i bioklastični vapnenci (paleocen); *3,4K23* – breče, konglomerati, vapnenci, lapori, pješčenjaci (kampan-mastriht); *K2* – breče, konglomerati, šejli, lapori, karbonatni klastiti, vapnenci, rožnjaci; *K1,2* – pješčenjaci, šejli,

vapnenci, rožnjaci (apt-turon); $\beta\beta$ – dijabazi i spiliti; v– gabri; J3 – vapnenci, silificirani vapnenci, rožnjaci; J1-2 – vapnenci, vapnenačke breče, silificirani vapnenci, rožnjaci, podređeno dolomiti; T,J – vapnenci, dolomitično vapnenci (retolijas); T3 – dolomiti, podređeno vapnenci, dolomitični vapnenci i šejli; T2 – dolomiti, podređeno vapnenci, lapori, rožnjaci, tufovi i tufiti; T1 – pješčenjaci, siliti, vapnenci, podređeno dolomiti i vapnoviti lapori; P,T – pješčenjaci, šejli, siliti, gips; P2,3 – brečokonglomerati, konglomerati, pješčenjaci, šejli silit, vapnenci, dolomiti, gips; P1? – mramori, mramorni škriljci, kvarc-sericitni i kvarc-kloritni škriljci; D,C? – ortometamorfiti; D.C – parametamorfiti.

4.1. Hidrogeološke značajke

Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik što znači da mu gornju granicu saturacije čini vodna ploha pod atmosferskim tlakom. Podinu vodonosnika čine slabo propusne naslage. Na shematskom profilu vodonosnika (slika 4-2) razlikuju se dva vodonosna sloja. U prvom sloju dominiraju aluvijalne naslage rijeke Save. Njihov sastav čini uglavnom srednje do fino zrnati šljunak i pijesak s proslojcima gline i praha. Drugi sloj je sastavljen od pretežito jezersko-barskih naslaga. Njih pak čine šljunak i pijesak s lećama silita i glina. Debljina prvog vodonosnog sloja kreće se od 5 do 10 metara na zapadu pa sve do 40 metara na istoku. Drugi vodonosni sloj u zapadnom dijelu je debljine približno 20 metara, dok je u istočnom dijelu debljine približno 60 metara. U krovini se nalaze pijesci debljine od oko 3 metra. U podini vodonosnog sloja nalaze se sivo-plave i sivo-zelene gline različitog stupnja plastičnosti. Osim gline u podini se javljanju i vapnene konkrecije, a registrirana je i pojava treseta.

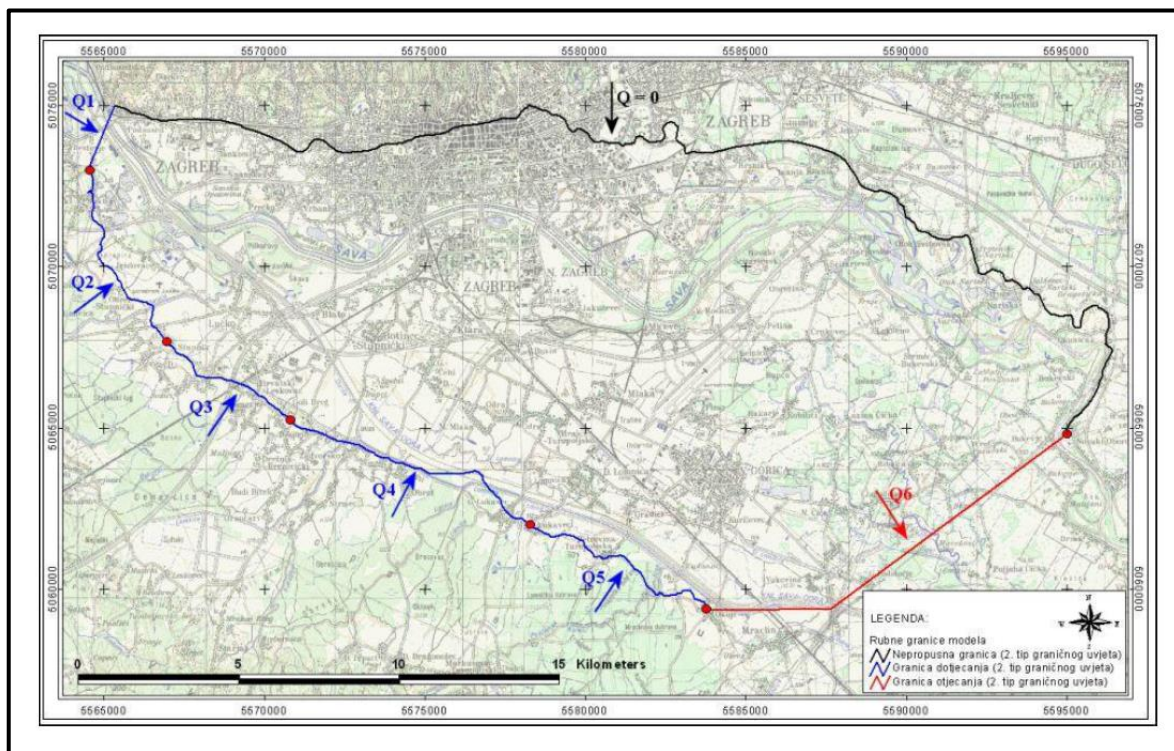


Slika 4-2. Shematski profil zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)

U hidrauličkom smislu, rubne granice vodonosnika čine: nepropusna granica na sjeveru, grana dotjecanja na zapadu, granica dotjecanja na jugu te granica otjecanja na istoku (slika 4-3). Generalni smjer toka podzemne vode je od zapada prema istoku odnosno jugoistoku. Prema Posavec (2006), napajanje vodonosnika se u najvećoj mjeri ostvaruje infiltracijom iz rijeke Save, infiltracijom oborina, infiltracijom iz vodoopskrbne i kanalizacijske mreže, te dotjecanjem iz susjednih vodonosnika poput samoborskog i vodonosnika Vukomeričkih Gorica. U ovisnosti o vrijednostima vodostaja rijeke Save, mijenja se i razina podzemne vode. Sava je svojim koritom usječena u aluvijalne holocenske naslage u kojima dominiraju šljunci izrazito visoke hidrauličke vodljivosti. U zapadnim predjelima vodonosnika hidraulička vodljivost je vrlo visoka i premašuje 3000 m/dan, dok u smjeru istoka opada čak do vrijednosti ispod 1000 m/dan (Uremović i Mihelčić, 2000). Transmisivnost vodonosnika doseže vrijednosti do približno 5000 m²/dan.

Analiza hidrogeoloških odnosa u zagrebačkom području upućuje na činjenicu kako bi izgradnju podzemnih struktura poput sustava podzemne željeznice trebalo planirati u

vrijeme srednjih i niskih vodostaja rijeke Save i ostalih pritoka, kako bi se izbjegle nepovoljne situacije koje dotok podzemne vode u prostor radova može izazvati. Također, podatke o hidrauličkoj vodljivosti i transmisivnosti treba uzeti u obzir pri planiranju potencijalne rute zagrebačke podzemne željeznice.

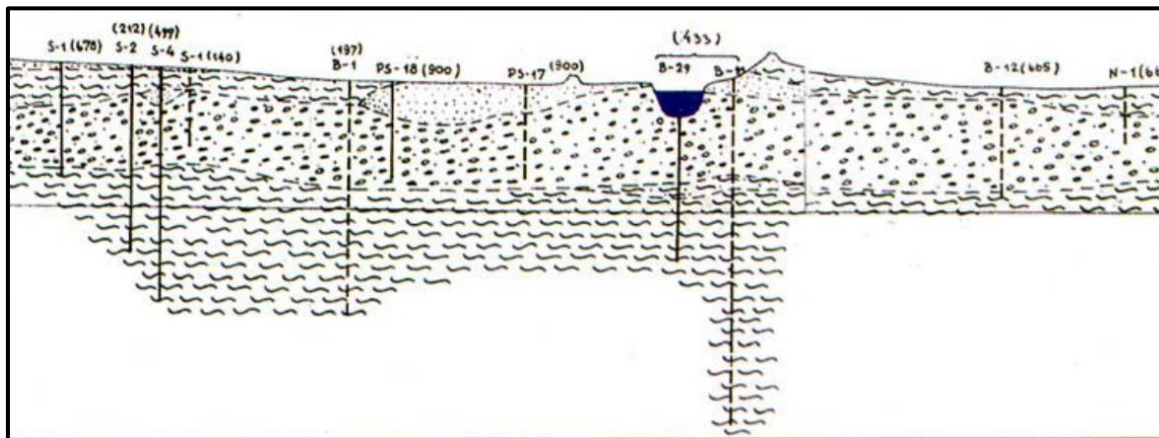


Slika 4-3. Granice otjecanja/dotjecanja te rubne granice zagrebačkog vodonosnika (Bačani i Posavec, 2009)

4.2. Geološke podloge

Obzirom na navedenu geološku građu područja Zagreba, ostaje pitanje na kojoj dubini bi trebalo locirati podzemni željeznički sustav, da bi imao što manje troškove i što veću sigurnost tijekom gradnje, ali i što bolju iskoristivost u operativnom dijelu. U odnosu na postojeće geološke presjeke Zagreba može se uočiti da se bazen ispod gorja Medvednice sastoji uglavnom od slojeva pijeska, šljunka, pjeskovitih i prahovitih šljunaka ili šljunkovitih glina uzmemo li u obzir područje Donjeg grada, korito rijeke Save, te nizinu Novog Zagreba. Vodno lice nalazi se u prosjeku svega 2-3 metra ispod površine, a na dubini od oko 8-12 metara nalaze se slojevi gline. Promatrani uzdužni geološki profili nalaze se na pravcu sjever-jug i prelaze trima pravcima: Trešnjevka-Sava-Remetinac-Botinec; Donji grad-Sava-Velesajam-Klara-Mala Mlaka; D. Bukovec-Maksimira-Sava-Zaprude-Hreljić-Buzin. Uzevši u obzir iskustva s drugih sličnih sustava podzemnih željeznica koji su razvijeni u nizinama uz rijeke (München, Budimpešta, Beč), zaključak je da bi bilo korisno spustiti uzdužnu os

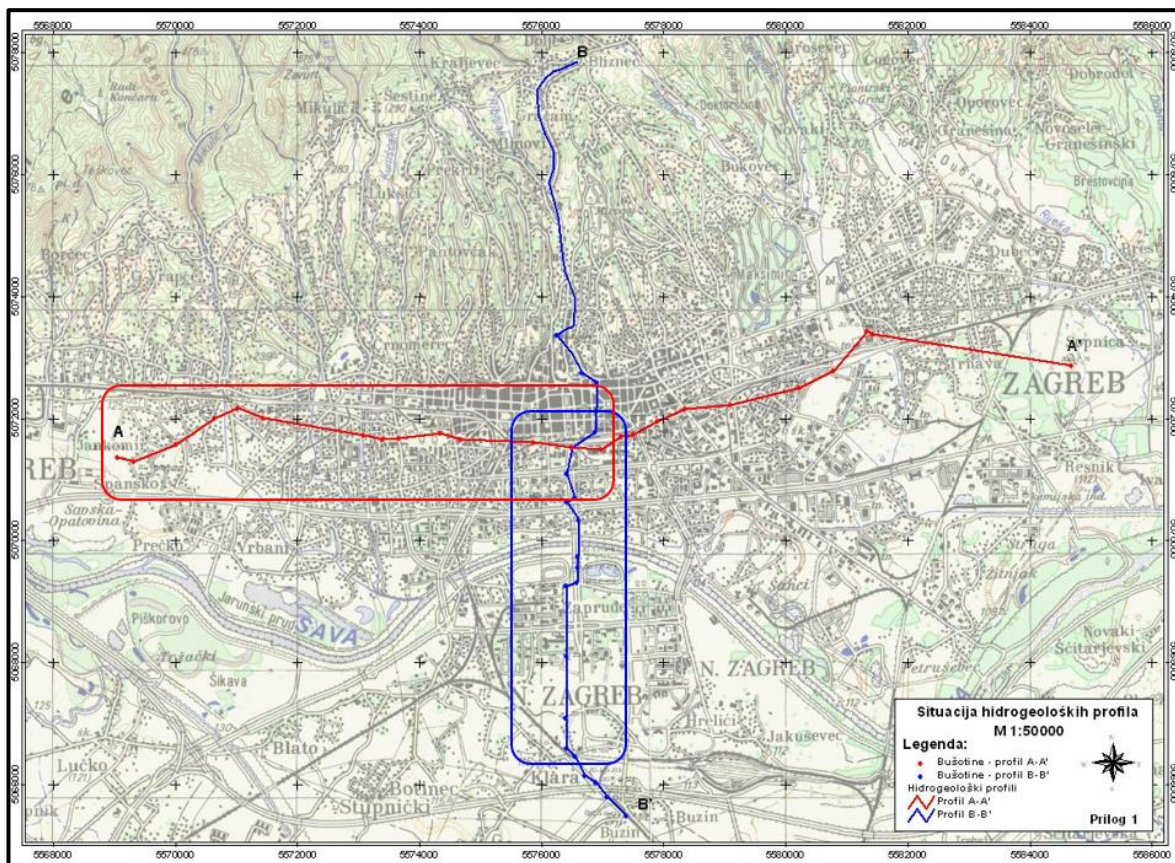
podzemne linije na dubinu 15-20 metara ispod površine u sloj gline (Kolić i Kolić 2001). Slika 4-4 prikazuje jedan od primjera uzdužnih geoloških profila na lokaciji novog (Domovinskog) mosta u gradu Zagrebu.



Slika 4-4. Geološki uzdužni profil na lokaciji Domovinskog mosta (Kolić i Kolić, 2001)

Postoji nekoliko razloga zbog kojih bi se trasa podzemne željeznice spustila na navedenu dubinu ispod površine terena. Prvi od razloga je jednostavnija izgradnja linije (trase) koja bi, nakon što se izgradi, prolazila kroz pretežito istovjetne naslage jedne geološke formacije. Pri tom bi kohezivnost gline bila olakšavajući faktor pri izvođenju takvog zahvata. Drugi od razloga je što predložena dubina smještaja podzemne željeznice omogućuje silazno-uzlaznu liniju vođenja trase tunela u uzdužnom smjeru između pojedinih stanica. Na taj način bi vlak pri izlazu iz stanice ponirao, a pred ulazom u sljedeću stanicu bi uzlazio te bi se tako iskoristili inercijski momenti koji bi omogućili štednju energije. Treći razlog zbog kojeg bi se cjelokupni sustav smjestio na navedenoj dubini je svakako taj što navedena dubina iskopa omogućuju još uvijek izvođenje stanica s površine, bočno podupiranje dijafragmama i pilotima, ali također i primjenu jedne od varijanti „*Cut and Cover*“ metode kao što je primjerice „*top-down*“ varijanta. Isto tako kao još jedan razlog možemo navesti i to da izgradnja tunela u naslagama gline ima sigurnosnu komponentu u manjoj propusnosti tla što rezultira manjim dotokom podzemne vode u prostor radova. To značajno smanjuje troškove odvodnje i povećava sigurnost izgradnje tunela bez obzira na primijenjenu metodu iskopa.

U svrhu izrade numeričkog modela za potrebe ovog diplomskog rada izrađeni su prognozni geotehnički profili. Podaci su zatraženi i ustupljeni iz projekta EGPV (Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama Hrvatske). Prognozni geotehnički profili izrađeni su u programu „*AUTOCAD*“. Geografski položaj navedenih profila iz EGPV baze podataka prikazan je na slici 4-5.



Slika 4-5. Situacija hidrogeoloških profila

Na priloženoj slici 4-5 istaknuta su dva dominantna pravca pružanja profila. To su pravac istok-zapad (A-A') naznačen crvenom bojom, te pravac sjever-jug (B-B') naznačen plavom bojom. Na tim pravcima su izvršeni geotehnički radovi bušenja s jezgrovanjem, te su dobiveni bušotinski profili zagrebačkog podzemlja. Podaci o pružanju i vrsti naslaga tla koji su ustanovljeni pregledom bušotinskih jezgara korišteni su pri izradi prognoznih geotehničkih profila u „*AUTOCAD-u*“. Izrađena su ukupno tri profila. Dva su izrađena u području naznačenom crvenim pravokutnikom na slici 4-5, a jedan je izrađen na području naznačenom plavim pravokutnikom na slici 4-5. Nadalje, tablicom 4-1 navedeni su podaci bušotina korištenih pri izradi profila.

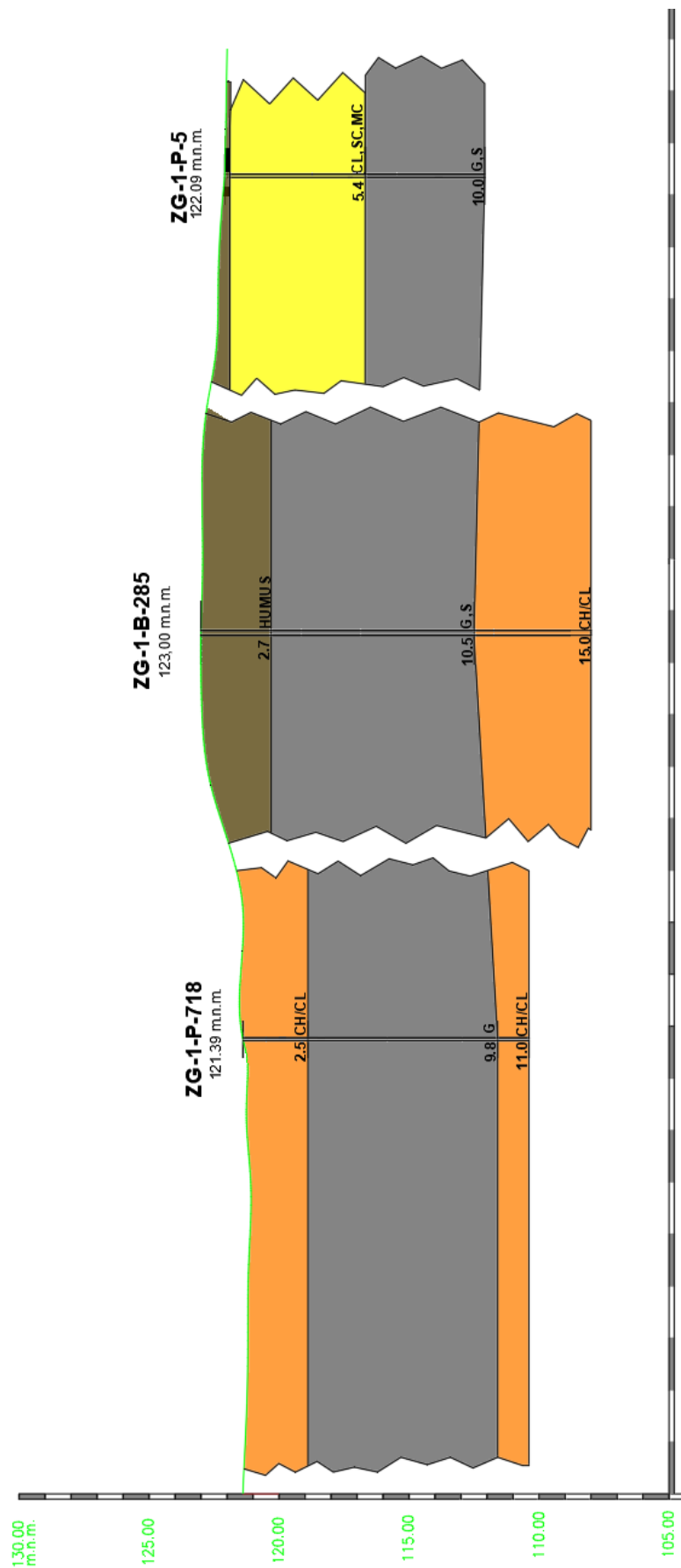
Tablica 4-1. Podaci o bušotinama

PROJEKT	IZVOĐAČ	ŠIFRA OBJEKTA	X (m)	Y (m)	DUBINA BUŠENJA (m)	KOTA TERENA (m.n.v.)	OZNAKA U ELABORATU
EGPV	RGNF	ZG-1-P-718	X:5569069,3	Y:5073576,76	11,00	121,39	PZO-23/VIII
EGPV	RGNF	ZG-1-B-285	X:5570650	Y:5074220	15,00	123,00	B-22
EGPV	RGNF	ZG-1-P-5	X:5571040	Y:5074395	10,00	122,09	PS-30
EGPV	RGNF	ZG-1-P-12	X:5576500	Y:5073745	10,00	115,09	PS-14
EGPV	RGNF	ZG-1-P-9	X:5574680	Y:5073880	10,00	118,60	PS-2
EGPV	RGNF	ZG-1-P-553	X:5573680	Y:5073900	15,00	121,00	S-6
EGPV	RGNF	ZG-1-B-310	X:5576430	Y:5070320	20,00	114,00	B-60

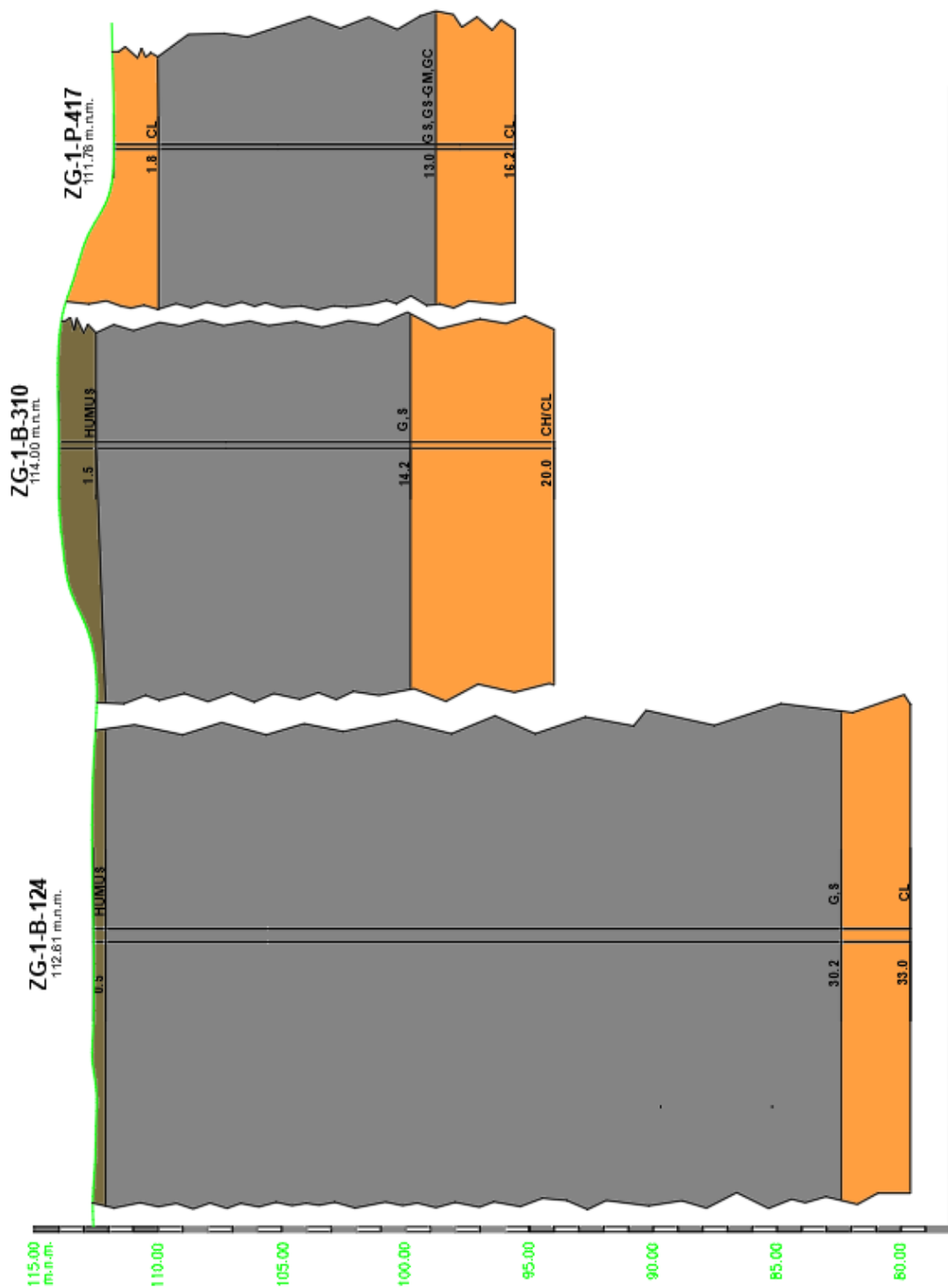
EGPV	RGNF	ZG-1-P- 417	X:5576602,05 Y:5071773,55	16, 20	111,78	PZ-2
EGPV	RGNF	ZG-1-B- 124	X:5576900 Y:5068250	33, 00	112,61	S-1

Izrađeni prognozni geotehnički profili prikazani su slikama 4-6, 4-7 i 4-8.

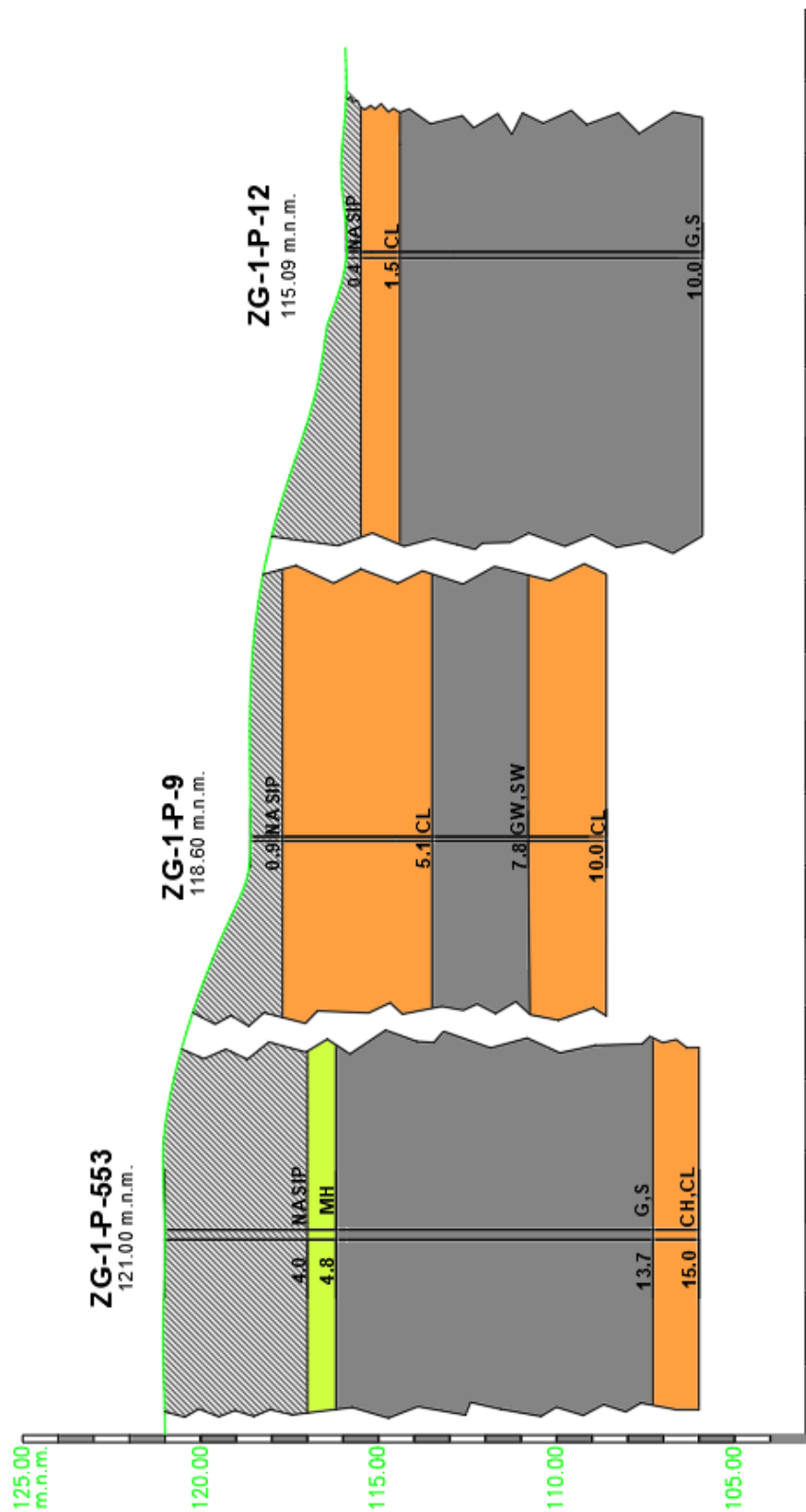
Geneza, oznaka, litološki tip, te geomehanički simboli IG jedinica na svim profilima su prikazani legendom na slici 4-9.



Slika 4-6. Prognozni geotehnički profil A-A' (1)



Slika 4-7. Prognozni geotehnički profil A-A' (2)

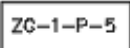
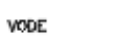


Slika 4-8. Prognozni geotehnički profil (B-B')

Prikazani prognozni geotehnički profili na slikama 4-6, 4-7 i 4-8 koriste se kao podloga pri definiranju stratigrafije slojeva tla numeričkog modela u „Plaxis-u“. Raspored slojeva u numeričkom modelu prati raspored slojeva dobiven kombinacijom rasporeda slojeva sa sva tri prikazana prognozna profila. Debljina slojeva u numeričkom modelu uzeta je proizvoljno obzirom da su napravljene samo preliminarne analize, a model se naknadno može prilagođavati realnim uvjetima u tlu, koji bi bili utvrđeni tijekom ciljanih istražnih radova na odabranoj trasi podzemne željeznice.

LEGENDA

GENEZA / STRATIGRAFSKI SIMBOL	OZNAKA	INŽENJERSKOGEOLOŠKI TIP	GEOMEH. SIMBOL	FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA
POKRIVAČ . POKRŠINSKE NASLAGE	UMJETNE NASLAGE	NASIP: mješavina građevnog materijala i krupnozrnatih tala	/	/
	KOLUVIJALNE NASLAGE	KOLUVIJ: Humus	Pl	/
PODLOGA . MATIČNO TLO	ALUVIJALNE NASLAGE	INŽENJERSKO TLO: Šljunak: dobro građirani, sitnozrnati, s prijesama pijeska te glinovitno–prahovitog veziva	GW, GM, GC	/
		INŽENJERSKO TLO: Pijesak: dobro građirani, sitnozrnati s primjesama šljunka te glinovitno–prahovitim vezivom	SW, SM, SC	/
	JEZERSKO– BARSKE NASLAGE	INŽENJERSKO TLO: Glina: sivo–žuta glina male i/ili visoke plastičnosti s primjesama pijeska	CH,CL	/
		INŽENJERSKO TLO: Glina: sivo–žuta glina, pjeskovita do prašinasta, niske plastičnosti	CL, SC, MC	/
		INŽENJERSKO TLO : Zaglinjeni prah	MH	/

	PREDPOSTAVLJENA GEOLOŠKA GRANICA		ZG–1–P–5		OZNAKA BUŠOTINE		LINIJA VODE
---	-------------------------------------	---	----------	--	-----------------	---	-------------

Slika 4-9. Legenda za geotehničke profile

5. TRASA ZAGREBAČKE PODZEMNE ŽELJEZNICE

Prve tehnički argumentirane razloge za izgradnju podzemne željeznice grada Zagreba nalazimo u stručnim izvorima starima ponegdje čak i pola stoljeća. Prometni zahtjevi sredine i njihov budući razvoj već su onda bili dovoljno jasni i predvidljivi, pa se tako ondašnja predviđanja ostvaruju danas u stvarnosti, i to kao prometna zagušljivost, nepostojanje parkirališnih mjesta, velika zagađenost i buka u središtu grada, mase ljudi pri svakodnevnom kretanju unutar gradske sredine u smjerovima sjever–jug i istok-zapad. Ondašnji autor tih studija je bio upoznat s uvjetima razvoja, tehnologijom izgradnje i konačnim rezultatima izgradnje podzemne željeznice u gradovima bivšeg SSSR-a, no ondašnja se argumentacija bez iznimaka može i danas upotrijebiti. Financiranje izgradnje zasnivalo se na načinu, koji je tada bio uobičajen (zajmom koji preuzima grad ili država). Taj model financiranja mogao bi se i danas primijeniti. Međutim, u posljednje se vrijeme u svijetu umjesto izravnog financiranja od strane lokalne ili državne uprave sve više primjenjuje financiranje od strane privatnih investitora. Takav model olakšava pronalaženje financijskih izvora i ubrzava izgradnju gradskih podzemnih željeznica (Kolić i Kolić, 2001).

5.1. Prometni tokovi i zahtjevi prometa

Pregled stanja predložen u studiji iz 2010. godine okarakterizirao je promet grada Zagreba kako slijedi (Zelena Akcija, 2010):

- 423 motorna vozila na 1000 stanovnika, što na grad s 806 000 stanovnika vodi brojki od oko 423.000 vozila na užem području grada,
- opće pomanjkanje parkirališnog prostora,
- intenzivan dnevni promet kroz gradsku jezgru,
- visok stupanj zagađenja ispušnim plinovima,
- izuzetno jako opterećenje bukom,
- veliki broj prometnih nesreća,
- veoma mala zastupljenost odgovarajućih biciklističkih traka i staza.

Smjernice koje su predložene za rješavanje postojeće prometne situacije u gradu Zagrebu uvelike su pokazale efikasnost, te rješavanje problema prometa u srednje- i zapadno-europskim gradovima. Te smjernice se odnose na (Zelena Akcija, 2010):

- podržavanje principa nemotoriziranog prometa,

- povećanje prometne sigurnosti
- središnji dio grada (Donji grad) bez automobila (samo vozila opskrbe te taksi vozila),
- osiguranje kretanja pojedinaca u središnjem dijelu grada bez vozila (uvođenje sustava podzemne željeznice),
- značajno smanjenje zagađivanja ispušnim plinovima osobnih vozila, te mjerenje stupnja zagađenosti zraka: CO₂, NO_x, SO₂, O₃,
- značajno smanjenje buke, koja je u središnjem dijelu grada uzrokovana prometom.

5.2. Smjer trase podzemne željeznice

Grad Zagreb prostire se uzdužno u smjeru istok-zapad, a taj smjer imaju i prirodne i prometne barijere, koje nalazimo na području grada: gorje Medvednica, glavna željeznička pruga koja prolazi kroz Glavni kolodvor, brza cesta koja prolazi sjeverno od Save (Ljubljanska avenija), tok rijeke Save, južna željeznička pruga koja prolazi preko ranžirnog kolodvora i cestovna obilaznica grada Zagreba. Prometne tokove u gradu karakterizira intenzivan promet u smjeru istok-zapad, ali i u smjeru sjever-jug koji veže Novi Zagreb s Donjim gradom. Intenzivan je i promet prema gradskoj jezgri iz prigradskih naselja Velike Gorice, Sesveta te Samobora, Zaprešića i Podsuseda. U takvom odnosu predložene su i prve linije podzemne željeznice, koje bi djelomično bile nadzemne a djelomično podzemne. Prvi stupanj, odnosno prvi dio prve linije podzemne željeznice predviđen je kao spoj dviju sredina koje se nalaze na tangenti sjever-jug: Donjeg grada i Novog Zagreba te produženje, te linije dalje prema zračnoj luci Franjo Tuđman i jednom od većih prigradskih naselja koje gravitira prema gradu, Velikoj Gorici. Južni dio linije do rijeke Save predviđen je kao nadzemna linija koja treba prijeći most (Domovinski) i neposredno nakon njega zaroniti pod površinu. Podzemni dio predviđen je po pravcu Draškovićeve ulice do jednog od budućih podzemnih čvorišta, Trga hrvatskih velikana.

Drugi stupanj razvoja predviđa zatvorenu kružnu liniju koja od Trga žrtava fašizma ide preko glavnoga gradskog trga dalje preko Trešnjevke prema novim područjima kao Jarun i vraća se, prelazeći ponovno Savu prema Dubrovačkoj aveniji u Novom Zagrebu i ide dalje prema postrojenju TE-TO, gdje se ponovno vraća prema središnjem dijelu grada i čvorištu pri Trgu hrvatskih velikana. Ova linija pojačava vezanost središnjeg dijela Donjega grada s novim naseljima, te snaži ponovno prometni smjer sjever-jug, ali isto tako veže zrakasto stari centar grada s lokalnim centrima u novim naseljima i jača lokalni promet južno od rijeke Save. Ova

linija može se raditi u dijelovima koji se mogu zasebno puštati u promet, a neki će dijelovi sigurno biti izvedeni nadzemno, kao što su prelasci rijeke.

Treći stupanj predviđa podzemno povezivanje prigradskih naselja na tangenti istok-zapad. Ovo će povezivanje sigurno biti potrebno, jer je urbaniziranost na površini velika, ulice i parkirališna mjesta nedovoljni su za motorna vozila, a zagađenost i buka su značajne.

Četvrti stupanj predviđen je kao produženje ogranaka linija prema gradskim naseljima kod kojih je udaljenost do prve stanice podzemne željeznice velika, ali isto tako može se predvidjeti da će se na pravcima ovih linija u budućnosti razviti i nova naselja (Kolić 2001; Kolić 2001).

Konačno rješenje trase zagrebačke podzemne željeznice prikazano je na slici 5-1.



Slika 5-1. Konačno rješenje trase zagrebačke podzemne željeznice (Kolić i Kolić, 2001)

Obzirom na ovdje navedene moguće buduće pravce zagrebačke podzemne željeznice valjao bi napomenuti na koje se pravce (trase) prikazane na slici 5-1 odnose prognozni geotehnički profili prikazani u prethodnom poglavlju ovog diplomskog rada. Od napravljena i prikazana tri prognozna geotehnička profila, A-A(1) i A-A(2) se odnose na trasu koja bi na slici 5-1 povezivala Podsused s centrom grada Zagreba. Prognozni geotehnički profil B-B se pak odnosi na trasu koja bi kako je na slici 5-1 prikazano povezivala centar Zagreba s područjem Novog Zagreba.

6. MODELIRANJE U „PLAXIS-U“

„Plaxis-2D“ je dvodimenzionalni računalni program posebne namjene baziran na metodi konačnih elemenata. Koristi se za analizu stanja naprezanja i deformacija, te stabilnosti i tečenja podzemne vode za razne vrste geotehničkih primjena. Realne situacije mogu se modelirati pomoću ravninskih ili osno-simetričnih modela. Program koristi grafičko sučelje, koje korisniku omogućuje brzo i efikasno definiranje geometrije i mreže konačnih elemenata modela. Programski paket „Plaxis“ kao pokretačku platformu najčešće koristi sustav „Windows“.

Metoda konačnih elemenata se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Konačni elementi su međusobno povezani u točkama na konturi elementa (trokuta) koje se nazivaju čvorovi. Elementi na osnovu kojih se generira model su trokutni s mogućnošću odabira elemenata sa 6 ili 15 točaka u kojima se izvršava interpolacija, te numerička integracija svakog pojedinog trokutnog elementa. Na taj način se određuje stanje naprezanja i deformacija u svakom elementu. Generiranje mreže trokutnih elemenata s 15 točaka pokazalo se kao veoma dobro jer tako generirani model omogućava i proračune veće točnosti, ali zahtijeva nešto više vremena potrebnog za izvršenje proračuna, te više memorijskog prostora računala. Nakon što računalo odnosno program izvede jednadžbe za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Pomoću izračunatih čvornih veličina tada je moguće primjenom teorijskih relacija odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanog sustava.

U programskom paketu raznih mogućnosti koje „Plaxis“ predstavlja, modele tla kao osnovu svake analize moguće je definirati na više načina. Mehaničko ponašanje tla može se modelirati korištenjem sljedećih modela: *Mohr-Coulomb-ov* model, model s ojačanjem tla (*Hardening Soil model*), model s ojačanjem tla za male promjene naprezanja i krutosti (*The Hardening Soil model with small-strain stiffness model*), *The UBC3D-PLM* model, model mekih tla (*The Soft Soil model*), elasto-plastični model s ojačanjem tla (*Modified Cam-Clay model*) i sl. U okviru numeričke analize izrađene u ovom diplomskom radu korišten je „*Mohr-Coulomb-ov*“ model ponašanja tla. Svaki od navedenih modela ponašanja tla unutar programa „Plaxis“ zahtijeva unos odgovarajućih parametara. Za definiranje ponašanje „*Mohr-Coulombovim*“ modelom nužno je definirati sljedeće parametre: modul elastičnosti (E), *Poisson-ov* koeficijent (ν), kohezija (c), kut unutarnjeg trenja(ϕ), te kut dilatancije(ψ).

Također potrebno je definirati i zapreminsku težinu (γ) saturiranog i nesaturiranog tla, te horizontalnu i vertikalnu propusnost (k) ukoliko se želi u proračunu prikazati utjecaj razine podzemne vode na ponašanje tla.

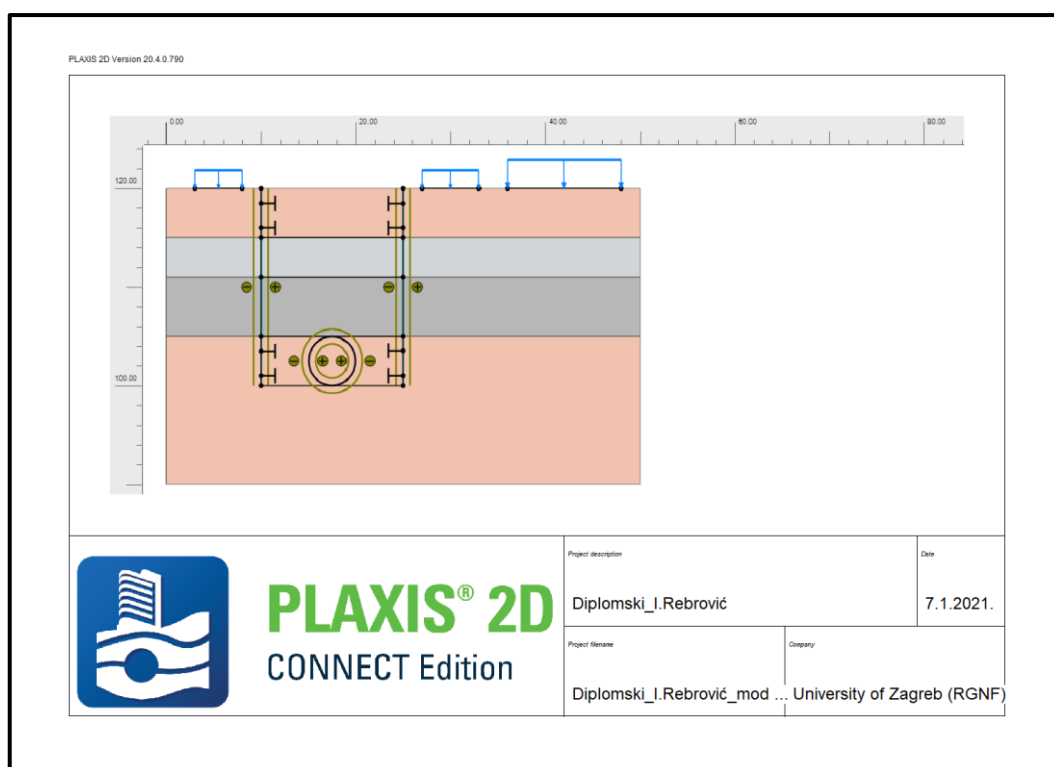
„*Mohr-Coulomb-ov*“ model predstavlja približni prikaz ponašanja tla ili stijena. Ovakav model ponašanja tla koristi se obično za preliminarne analize problema koji zahtjeva postupak modeliranja u numeričkim programima. Upravo takvu analizu predstavlja i model izrađen ovim diplomskim radom u kojem je prikazan način na koji bi se projekt podzemne željeznice mogao napraviti na području grada Zagreba na razini idejnog rješenja. Karakteristika ovog modela ponašanja tla je, da program na osnovi ulaznih parametara procjenjuje konstantnu prosječnu krutost svakog sloja ili krutost čiji se iznos linearno povećava s dubinom. Zbog te karakteristike proračuni su relativno brzi te se u kratkom roku dobiva prva procjena naprezanja i deformacija.

6.1. Geometrija modela

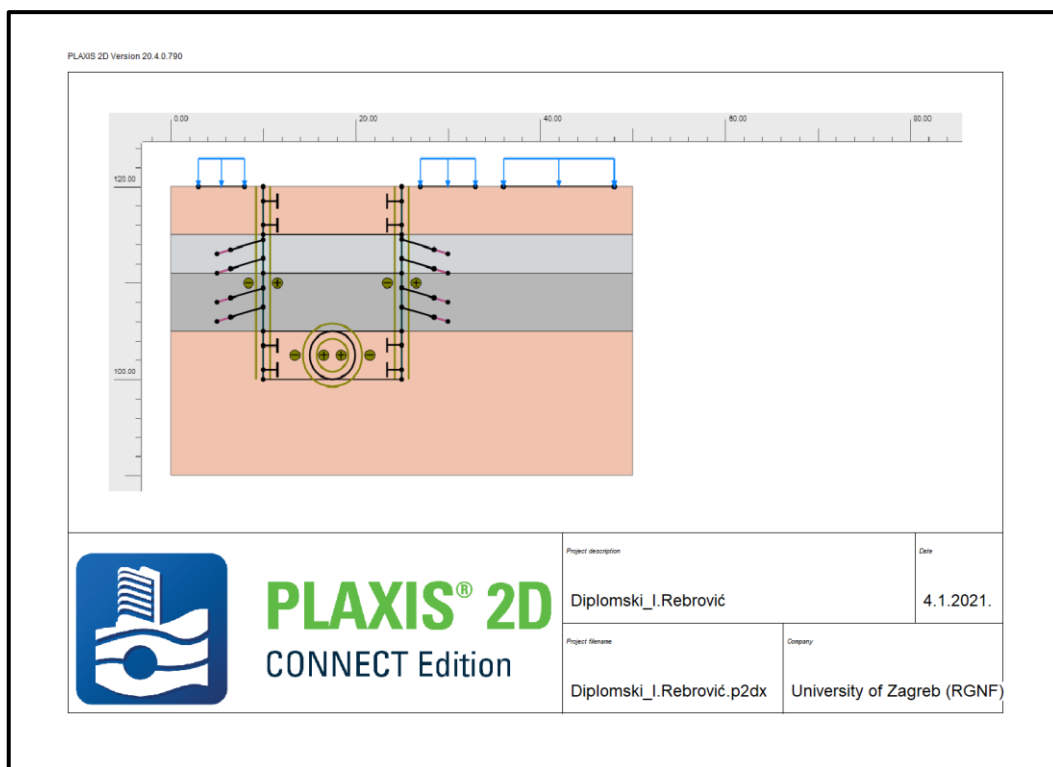
Da bi u programu „*Plaxis*“ bilo moguće izvršiti numeričku simulaciju nužno je najprije definirati geometriju modela i odgovarajuće parametre tla. Zadatkom predviđenim ovim diplomskim radom cilj je simulirati iskop građevne jame za potrebu izvedbe „*Cut and Cover*“ metode izrade podzemne željeznice. Stoga je model koji predstavlja građevnu jamu u programu *Plaxis* potrebno definirati na osnovu ravninskog stanja naprezanja zbog uniformiranog pravokutnog presjeka, tj. oblika građevne jame. Osim odabira oblika potrebno je definirati i elemente unutar modela pomoću kojih će biti izvršen proračun i generirana mreža elemenata, a na osnovu daljnjeg proračuna i simulacija faza iskopa građevne jame.

Dimenzije modela građevne jame korištene u ovom primjeru su 15×20 metara. Ovakav odabir dimenzija građevne jame pobliže opisuje širinu zagrebačkih ulica, te potrebnu dubinu za izvedbu podzemne željeznice. Modeli građevne jame, te tunela podzemne željeznice su smješteni u slojevima gline, pijeska te šljunka. Raspored slojeva uzet je iz izrađenih prognoznih inženjerskogeoloških profila pomoću ustupljenih podataka iz bušotina izvedenih na području grada Zagreba. Stoga, prema podacima iz istražnih bušotina iskop se odvija u modelu tla debljine 30 metara s tim da prvih 5 metara čini sloj gline, idućih 10 metara sloj pijeska / šljunka, te ostalih 15 metara čini još jedan sloj gline. Vanjska opterećenja, koja uglavnom čine okolne građevine, su smještena po 2 metra od zidova dijafragme koja predstavlja zidove građevne jame. Sam proces iskopa je prikazan po fazama. Dijafragma je

modelirana pomoću naredbe „*plate*“, a kontakt između zida i tla pomoću „*interface*“ elemenata „*Interface*“ element sadrži pozitivni i negativni pol koji definiraju i uzimaju u obzir trenje između čestica tla i zidova građevne jame odnosno dijafragme. Razupora je modelirana pomoću sidara s određenim dimenzijama i parametrima. Dva geometrijska modela korištena za numeričke analize u ovom diplomskom radu prikazana su na slikama 6.1 i 6.2. . Tablica 6.1. prikazuje parametre slojeva gline, pijeska i šljunka.



Slika 6-1. Geometrijski model 1



Slika 6-2. Geometrijski model 2

6.2. Parametri tala i strukturnih elemenata

U ovom poglavlju prikazani su parametri za sve vrste tala prikazanih na modelu (slika 6-1 i 6-2), kao i svojstva strukturnih elemenata: dijafragma, tunelska obloga, štapna i injektirana sidra. Obzirom da se u ovoj fazi ne raspolaže stvarnim, izmjerenim vrijednostima, parametri su izabrani iz raspoložive literature kao prosječne vrijednosti karakteristične za neku vrstu materijala. Tako su u tablici 6-1 navedeni parametri za glinu, pijesak i šljunak potrebni za definiranje mehaničkog ponašanja tla prema modelu Mohr-Coulombove plastičnosti.

Tablica 6-1. Parametri materijala tla

PARAMETAR	OZNAKA	Glina	Pijesak	Šljunak	JEDINICA
Model tla	Model	MC	MC	MC	-
Vrsta tla	Tip	nedrenirano	drenirano	drenirano	-
Jedinična težina tla (nesat.)	γ_{unsat}	15	20	22	kN/m ³

Jedinična težina tla (sat.)	γ_{sat}	18	22	24	kN/m ³
Horizontalna propusnost	k_x	$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-2}$	8,64	m/dan
Vertikalna propusnost	k_y	$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-2}$	8,64	m/dan
Young-ov modul elastičnosti	E_{ref}	7000	80000	100000	kN/m ²
Poisson-ov omjer	ν	0,3	0,2	0,2	-
Kohezija	c	98	74	20	kN/m ²
Kut unutarnjeg trenja	ϕ	24	30	35	°
Kut dilatancije	ψ	0	3,0	3,0	°

Tablica 6-2 prikazuje parametre zidova dijafragme, dok tablica 6-3 prikazuje parametre tunelske obloge.

Tablica 6-2. Parametri zidova dijafragme (građevne jame)

PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Model ponašanja	Tip	Elastični	-
Krutost	EA	$7,5 \cdot 10^6$	kN/m
Krutost na savijanje	EI	$1,0 \cdot 10^6$	kNm ² /m
Težina	w	10,0	kN/m/m
Poisson-ov omjer	ν	0,0	-

Tablica 6-3. Parametri tunelske obloge

PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Model ponašanja	Tip	Elastični	-
Krutost	EA	$14,0 \cdot 10^6$	kN/m
Krutost na savijanje	EI	$14,3 \cdot 10^4$	kNm ² /m
Težina	w	8,4	kN/m/m
Poisson-ov omjer	v	0,15	-

Nadalje, tablice 6-4 i 6-5 prikazuju parametre dvije vrste sidara korištenih za osiguranje dostatne nosivosti zidova građevne jame.

Tablica 6-4. Parametri štapnih sidara

PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Model ponašanja	Tip	Elastični	-
Krutost	EA	$2 \cdot 10^6$	kN
Duljina	Ls	5,0	m

Tablica 6-5. Parametri injektiranih sidara

PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Model ponašanja	Tip	Elastični	-
Krutost	EA	$5 \cdot 10^5$	kN
Duljina	Ls	5,0	m

Tablicom 6-6 prikazani su parametri injekcijske smjese koja osigurava sidrenje odnosno vezu sa materijalom tla. Na taj način injektirana štapna sidra osiguravaju dostatno trenje i preuzimaju naprezanja koja su prisutna kao posljedica iskopa građevne jame.

Tablica 6-6. Parametri injekcijske smjese

PARAMETAR	OZNAKA	VRIJEDNOST	JEDINICA
Model ponašanja	Tip	Elastični	-
Krutost	EA	$7,07 \cdot 10^6$	kN
Duljina	Ls	5,0	m
Promjer	D	0,3	m

Specifična težina	w	0,0	kN/m^3
Otpor na plaštu tj. kontaktu smjese i plašta sidra	$T_{\text{skin,start,max}}$ $T_{\text{skin,end,max}}$	400	kN/m
Otpor na bazi injekcijske smjese	F_{max}	0	kN
Faktor krutosti „interface-a“	-	0,50	-

Faktor krutosti u tablici 6-6 opisuje krutost tla u okolini postavljenog sidra obzirom na posmik ugrađenog sidra.

6.3. Faze proračuna

U ovom diplomskom radu prikazana su ukupno četiri odvojena proračuna. To su:

- slučaj A: Simulacija „*Cut and Cover*“ metode u suhom tlu bez stabilizacijskih elemenata
- slučaj B: Simulacija „*Cut and Cover*“ metode u suhom tlu sa stabilizacijskim elementima
- slučaj C: Simulacija „*Cut and Cover*“ metode u vodo-zasićenom tlu bez stabilizacijskih elemenata
- slučaj D: Simulacija „*Cut and Cover*“ metode u vodo-zasićenom tlu sa stabilizacijskim elementima.

Svi navedeni slučajevi proračuna sastoje se od po šest faza. Faze su:

- nulta (inicijalna) faza – geološko stanje naprezanja
- prva (1.) faza – prva faza iskopa, ugradnja sidara (samo slučaj B i D)
- druga (2.) faza – druga faza iskopa, ugradnja sidara (samo slučaj D)

- treća (3.) faza – treća faza iskopa, ugradnja sidara (samo slučaj D)
- četvrta (4.) faza – četvrta faza iskopa, ugradnja sidara (slučaj B i D)
- peta (5.) faza – izgradnja tunela, početak zatvaranja građevne jame
- šesta (6.) faza – završetak radova zatvaranja građevne jame.

Nulta (inicijalna) faza promatra neporemećeno stanje tla, bez utjecaja bilo kakvog iskopa, ali s aktivnim vanjskim opterećenjem na tlo. U prvoj fazi iskopa dolazi do instalacije zida dijafragme koji se sastoji od niza međusobno povezanih čeličnih talpi (žmurja). Također vrši se iskop prvog sloja tla do dubine 5 m ispod površine terena, te ugradnja mehaničkih sidara koja osiguravaju nosivost tla i sigurnost iskopa. U prvoj fazi kao i u inicijalnoj te svim ostalim fazama, na tlo djeluju i vanjska tipska opterećenja u iznosu od 350 kN i 550 kN. Odabir ovako velikih opterećenja posljedica je traženja maksimalnih granica pri kojima bi iskop u opisanim uvjetima teoretski bio moguć. Druga faza predstavlja iskop sloja pijeska do dubine od 9 metara ispod površine terena. U trećoj fazi vrši se iskop sloja šljunka do dubine 15 metara ispod površine terena, a u četvrtoj fazi se završava iskop građevne jame, jer se postiže tražena dubina iskopa. Dodatno se u četvrtoj fazi ugrađuju mehanička sidra kao u prvoj fazi. Peta faza predstavlja izgradnju tunelske cijevi promjera 5 metara, obloge od armiranog betona koja služi za kretanje vlakova podzemne željeznice. Nadalje, u navedenoj fazi se počinje vraćanje iskopanog materijala, da bi se šestom fazom simuliralo ponašanje tunelske obloge na dubini od 20 metara izgrađene „*Cut and Cover*“ metodom.

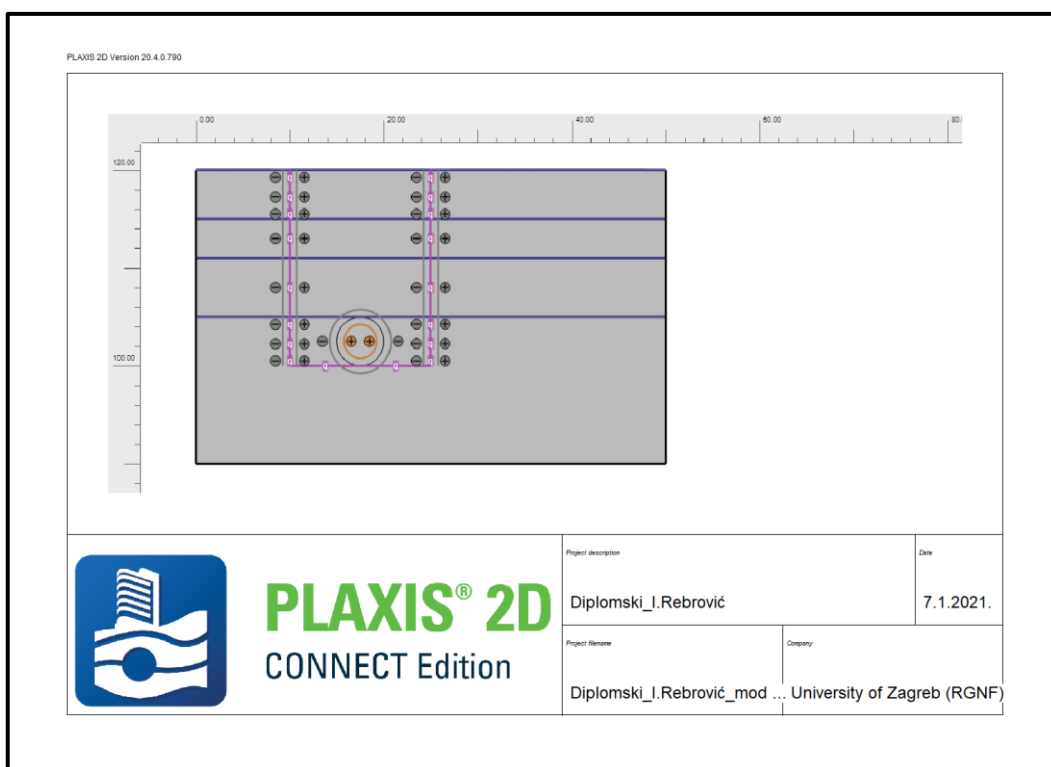
Drugi model se od prvog modela razlikuje u dva segmenta. Prvi je taj što se u drugom modelu u drugoj i trećoj fazi iskopa u slojeve pijeska i šljunka ugrađuju ukupno osam injektiranih sidara. Razlog ugradnje tih sidara je vrlo visoka razina podzemne vode, koja otežava iskop u drugom modelu, jer stvara dodatna naprezanja na zid građevne jame, te umanjuje nosivost tla. Upravo je utjecaj razine podzemne vode još jedna razlika prvog i drugog modela.

Kao što je već navedeno u okviru izvedbe ovog diplomskog rada izvedena su četiri odvojena slučaja označena slovima A, B, C i D. Slučajevima A i C simulira se proces izvedbe građevne jame i izgradnje tunelske obloge bez stabilizacijskih elemenata odnosno sidara. Rezultat takvog proračuna rezultira kolapsom odnosno urušavanjem građevne jame. Obzirom da je takav iskop nesiguran, bilo je potrebno predvidjeti ugradnju sidara koja kao stabilizacijski elementi osiguravaju dostatnu nosivost i sigurnost zahvata. To je obuhvaćeno modelima B i D, bez utjecaja vode i s modeliranom razinom podzemne vode na dubini od 5 metara ispod

površine terena. U poglavlju izlaznih rezultata su prikazane pojedine faze iz sva četiri provedena proračuna.

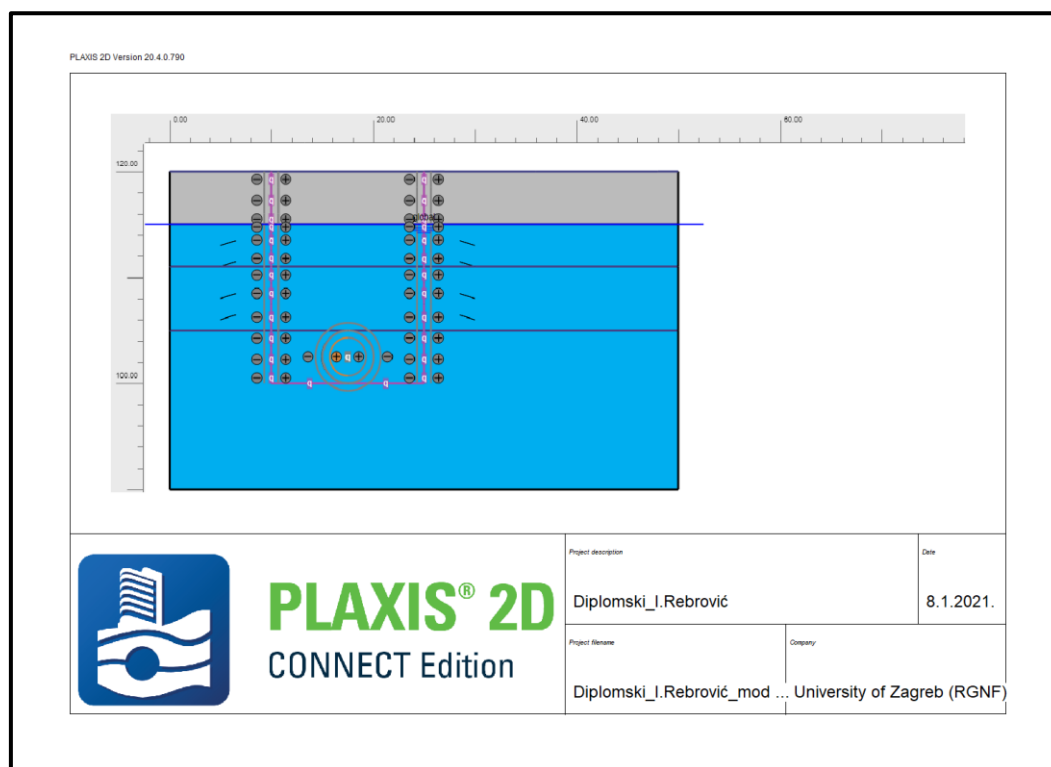
6.4. Podzemna voda

Podzemna voda prisutna je samo u proračunu drugog modela koji je definiran unutar ovog diplomskog rada. Da bi se u numeričkom proračunu unutar programa „*Plaxis*“ mogao uzeti u obzir utjecaj podzemne vode potrebno je pri definiranju slojeva tla definirati i željenu razinu podzemne vode odnosno vodnog lica u modelu. Razina podzemne vode unutar drugog modela postavljena je na dubini od svega 5 metara ispod površine terena. Ovako visoka razina vodnog lica odabrana je iz dva razloga. Prvi razlog je stratigrafija terena. Kako se model terena sastoji od dva sloja gline između kojih se nalaze slojevi pijeska i šljunka, odabrano je da se vodno lice nalazi na vrhu sloja pijeska koji je po hidrauličkim svojstvima propustan sloj isto kao i sloj šljunka ispod njega. Kako su ti slojevi propusni, tako se u njima se može očekivati i pojavu toka podzemne vode uslijed povećanja hidrauličkog gradijenta zbog iskopa građevne jame. S druge strane odabrana visina (5 m ispod površine terena) vodnog lica veže se na vodonosnik rijeke Save za slučaj vrlo visokog vodostaja kada bi se razina podzemne vode u tlu povećala i s udaljenošću od korita rijeka Save. Slikom 6.3. prikazani su hidraulički uvjeti u prvom modelu, a slikom 6.4. u drugom modelu.



Slika 6-3. Hidraulički uvjeti modela 1

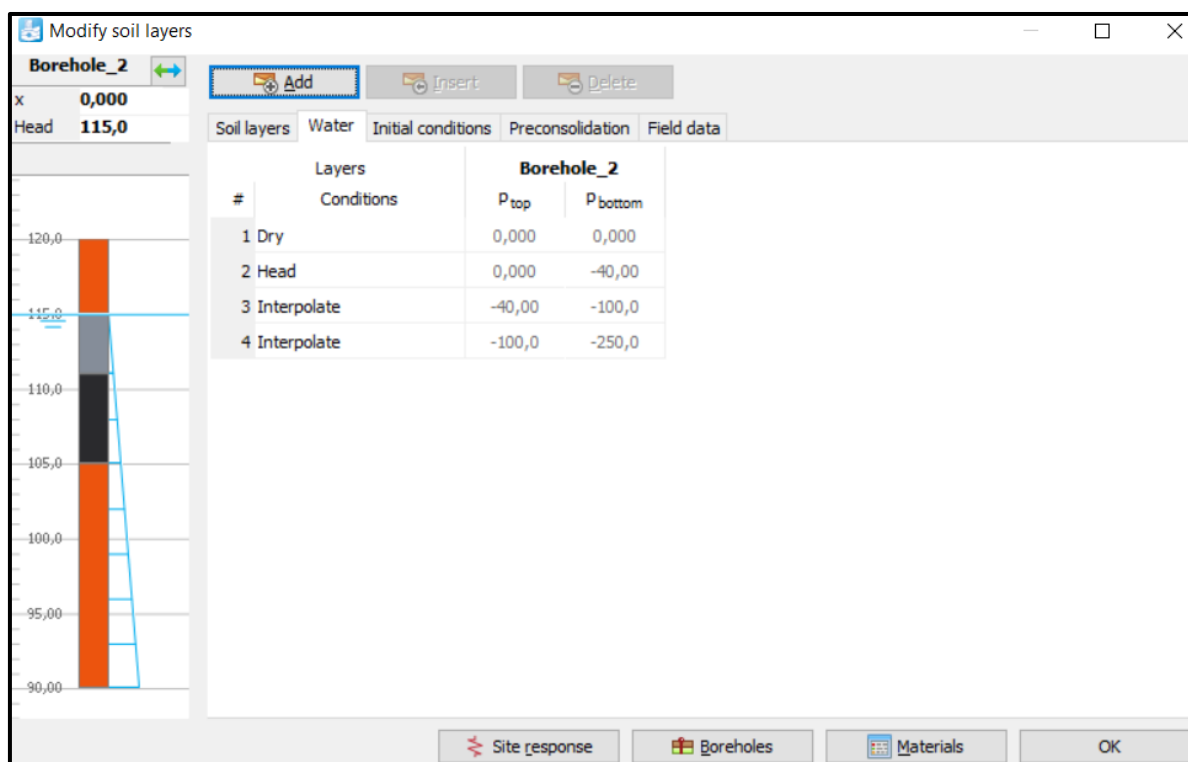
Iz slike 6-3 vidljivo je kako u prvom modelu nema utjecaja podzemne vode.



Slika 6-4. Hidraulički uvjeti modela 2

Iz slike 6-4 vidi se razina podzemne vode u drugom modelu. Osim razine podzemne vode vide se i definirane granice modela. Lijeva, desna i donja granica modela postavljene su kao potpuno zatvorene granice. To znači da kroz njih nema prolaska podzemne vode. Gornja granica modela definirana je kao propusna, tj. kroz nju je dopušten slobodan ulazak i izlazak vode. U ovom modelu potrebno je bilo i definirati hidrauličke uvjete zidova dijafragme. Oni su definirani na način da se dijafragma ponaša kao brtvena granica koja onemogućuje prolazak vode. Isti uvjeti vrijede i za tunelsku oblogu. Brtvena granica na dnu građevne jame ne sprječava procjeđivanje u potpunosti. Ovakav način definiranja hidrauličkih uvjeta na granicama modela omogućuju provedbu numeričkog proračuna pod utjecajem podzemne vode, te simuliranja podzemnog toka vode kroz propusne slojeve. Razlika u visini podzemne vode u pojedinim fazama proizlazi iz uvjeta iskopa, a to je uvjet da se prostor („cluster“) unutar građevne jame održava suhim tokom čitavog vremena izvođenja radova. Najniža razina podzemne vode tokom iskopa postiže se u četvrtoj fazi iskopa, a nakon toga se postupno vraća na početnu razinu.

Slika 6-5 prikazuje presjek bušotine drugog modela na kojoj se vidi raspored i iznos dodatnih naprezanja uzrokovanih razinom podzemne vode u bušotini.



Slika 6-5. Presjek bušotine modela 2

7. IZLAZNI REZULTATI MODELA

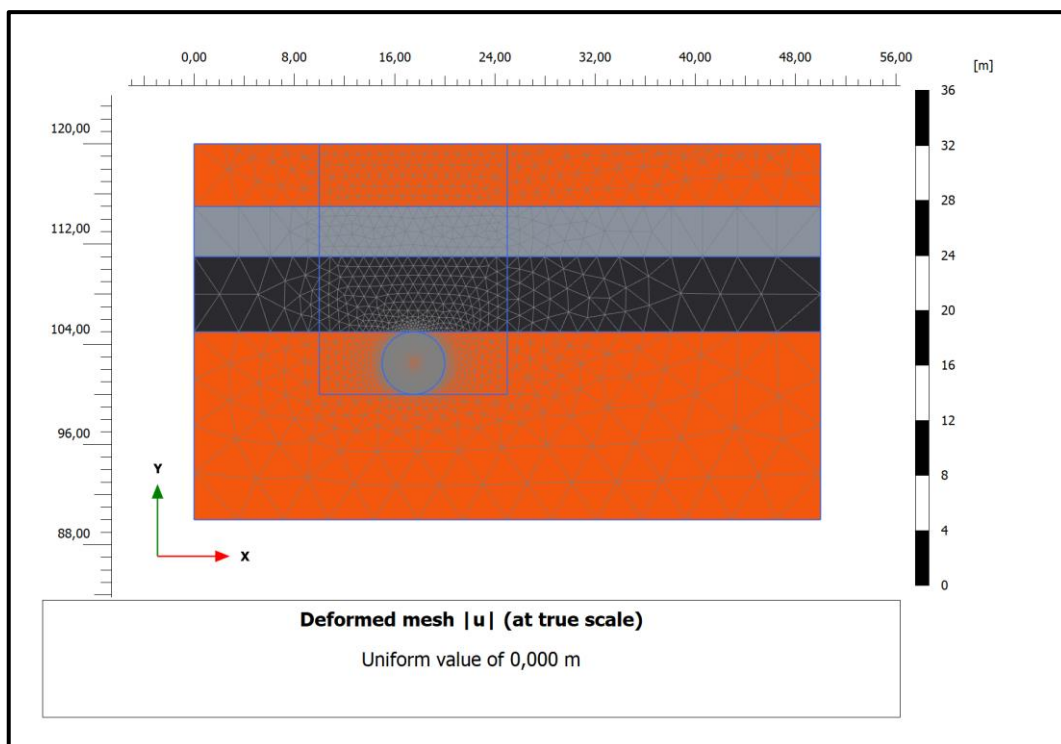
Ovim poglavljem prikazani su izlazni rezultati dobiveni provedenim proračunom u programu „*Plaxis*“. Redom su prikazani slučajevi od A do D koji se odnose na različite uvjete na osnovu kojih je provedena analiza na dva ulazna geometrijska modela:

- slučaj A – iskop otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih potpornih elemenata
- slučaj B – iskop otvorene građevne jame uz korištenje stabilizacijskih potpornih elemenata
- slučaj C – iskop otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih potpornih elemenata uz utjecaj podzemne vode
- slučaj D – iskop otvorene građevne jame uz korištenje stabilizacijskih potpornih elemenata, te uz utjecaj podzemne vode.

7.1. Slučaj A

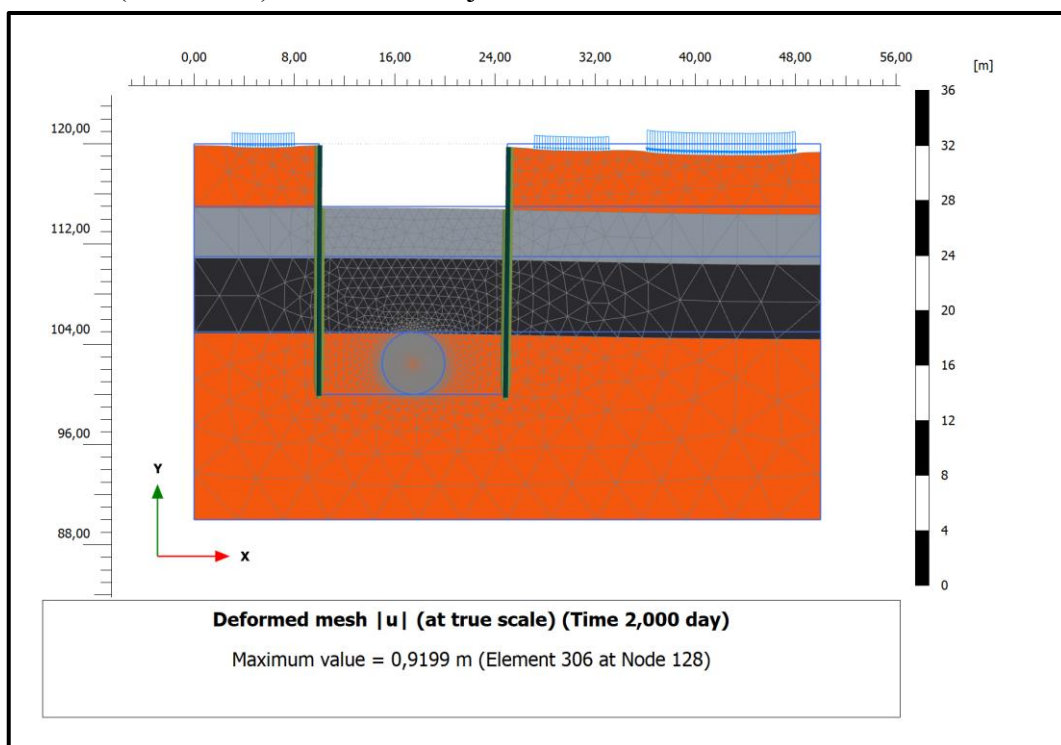
Slučaj A prikazuje izlazne rezultate dobivene modeliranjem prvog geometrijskog modela. U analizi je taj model simulirao iskop otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih potpornih elemenata. Faktor utjecaja podzemne vode u ovom slučaju nije uzet u obzir, tj. simuliran je iskop u suhom tlu. Cilj provedbe analize za slučaj A bio je utvrditi je li moguće izvesti iskop bez korištenja stabilizacijskih nosivih elemenata (sidara), do dubine potrebne za izradu trase podzemne željeznice. Proračun je pokazao da zbog utjecaja vanjskog opterećenja, ovakav pristup iskopu nije siguran, te je iskop rezultirao slomom u trećoj fazi (faze iskopa opisane su u 6. poglavlju).

Slikom 7-1 opisana je mreža konačnih elemenata, a slikama 7-2, 7-3 i 7-4 prikazano je ponašanje modela od prve do treće faza proračuna prikazom deformirane mreže konačnih elemenata. Pomaci prikazani unutar mreže konačnih elemenata nemaju fizikalno značenje već služe za jasniju definiciju položaja i kretanja sloma ili pomaka mase tla uslijed iskopa za potrebe izrade sustava podzemne željeznice. Ova postavka vrijedi za sve prikaze mreže konačnih elemenata u ovom radu.

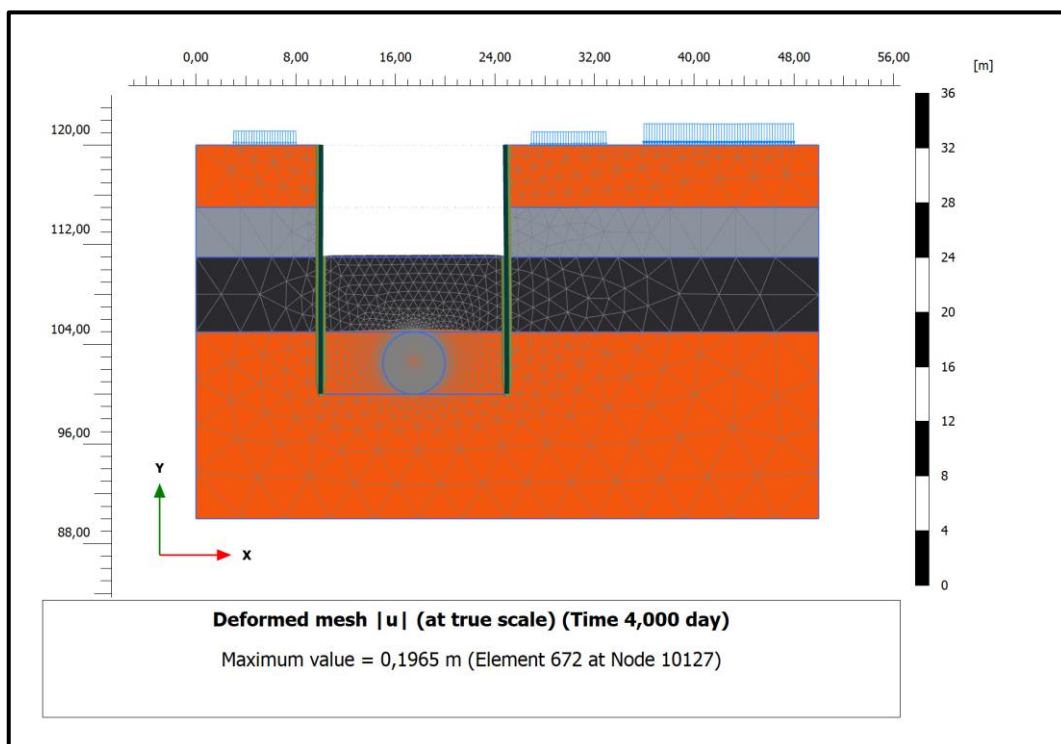


Slika 7-1. Mreža konačnih elemenata (slučaj A)

Slika 7-1 prikaz je mreže konačnih elemenata u kojem se prvi geometrijski model nalazi prije bilo kakvog zahvata u tlu. Prikazana mreža konačnih elemenata pokazuje podjelu kontinuuma (modela tla) na konačni broj elemenata.

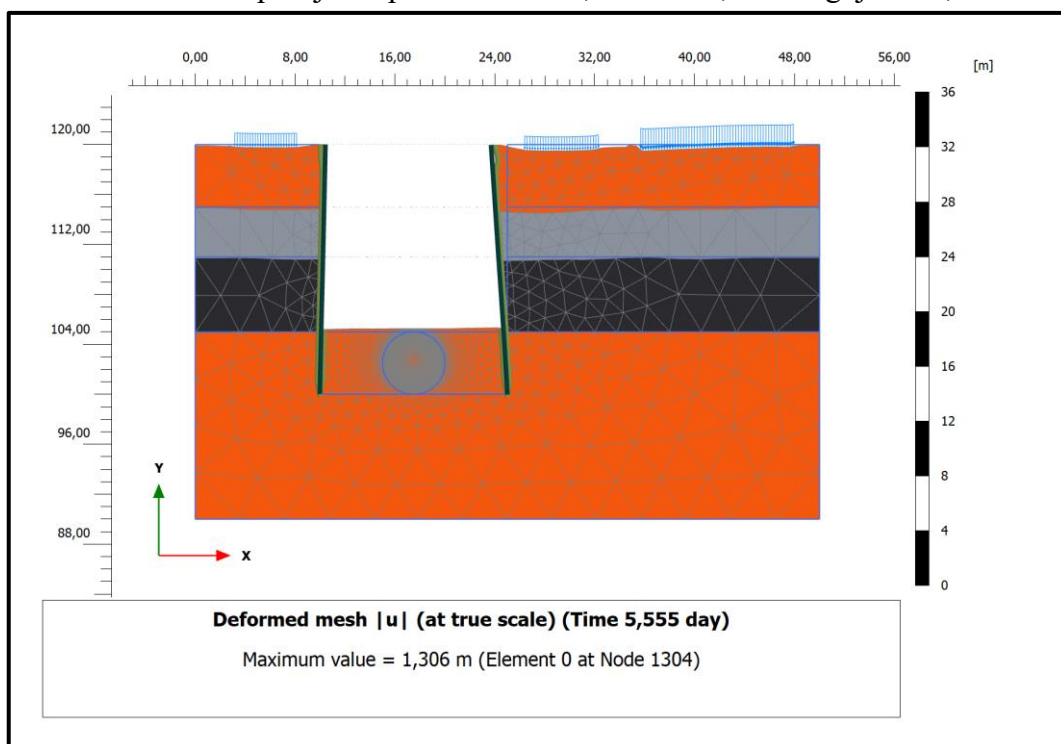


Slika 7-2. Deformirana mreža konačnih elemenata u prvoj fazi (slučaj A)



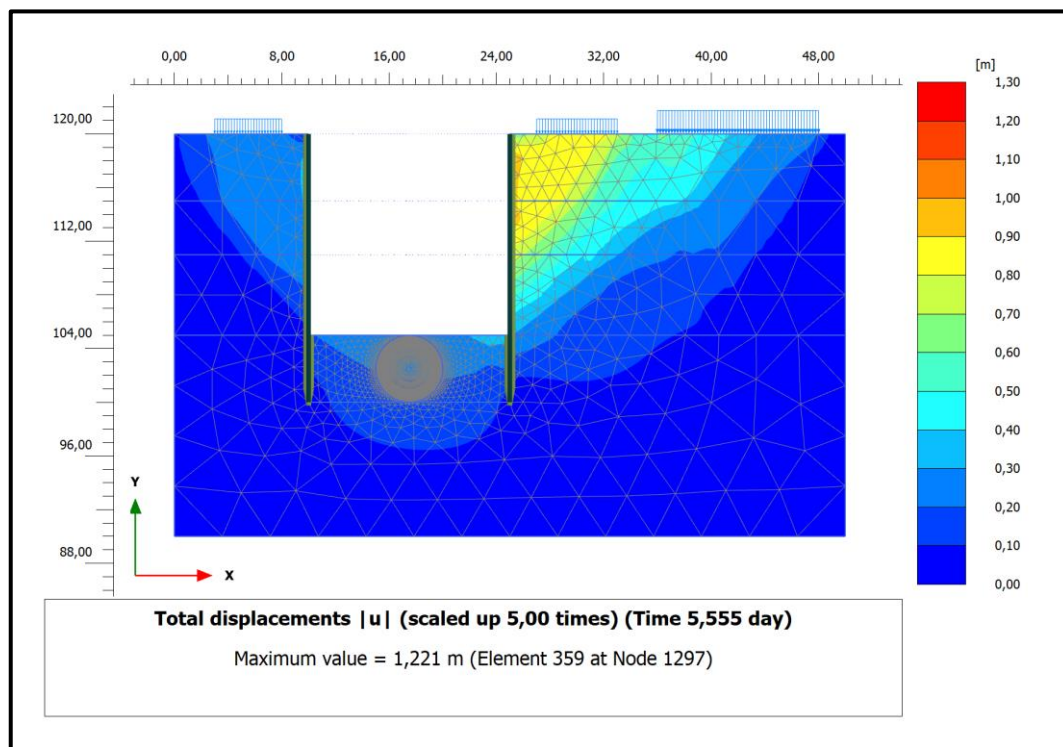
Slika 7-3. Deformirana mreža konačnih elemenata u drugoj fazi (slučaj A)

Na slikama 7-2 i 7-3 može se vidjeti kako napretkom iskopa otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih elemenata dovodi do povećanog pomaka deformirane mreže konačnih elemenata. U prvoj fazi pomak iznosi 0,919 metra, a u drugoj fazi 0,196 metara.



Slika 7-4. Deformirana mreža konačnih elemenata u trećoj fazi (slučaj A)

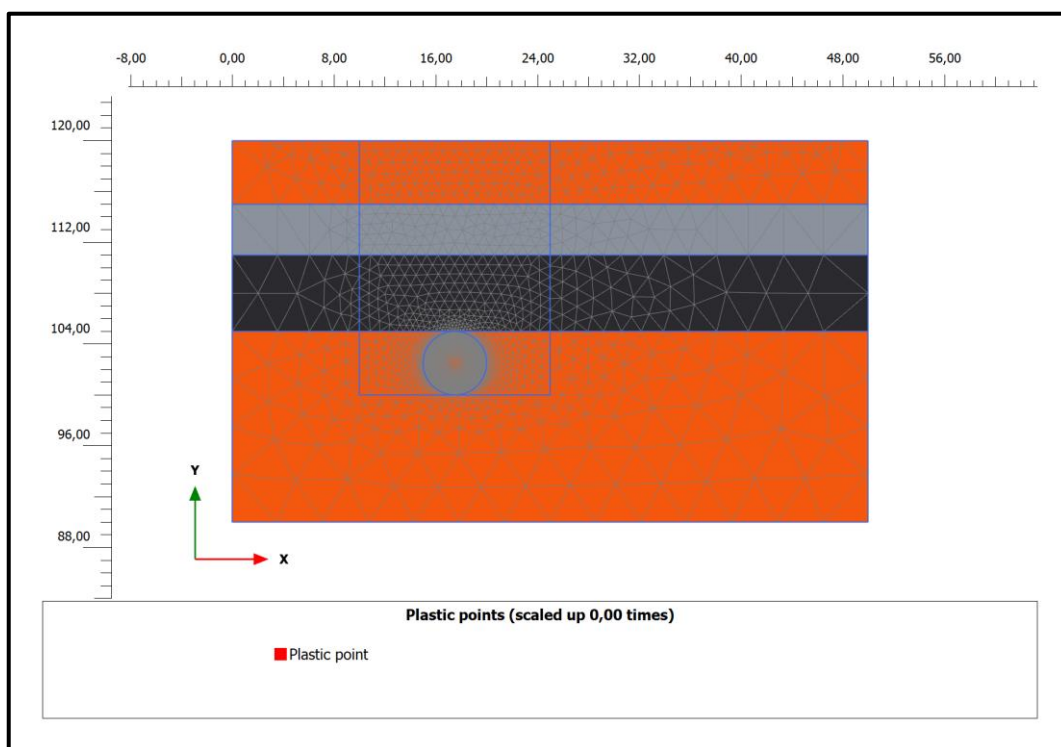
Kao što se može vidjeti na slici 7-4 maksimalni pomak u mreži konačnih elemenata od 1,306 metara zabilježen u trećoj fazi iskopa dovodi do potpunog kolapsa ili urušavanja otvorene građevne jame. Prikaz ukupnih pomaka u trećoj fazi predstavlja slika 7-5.



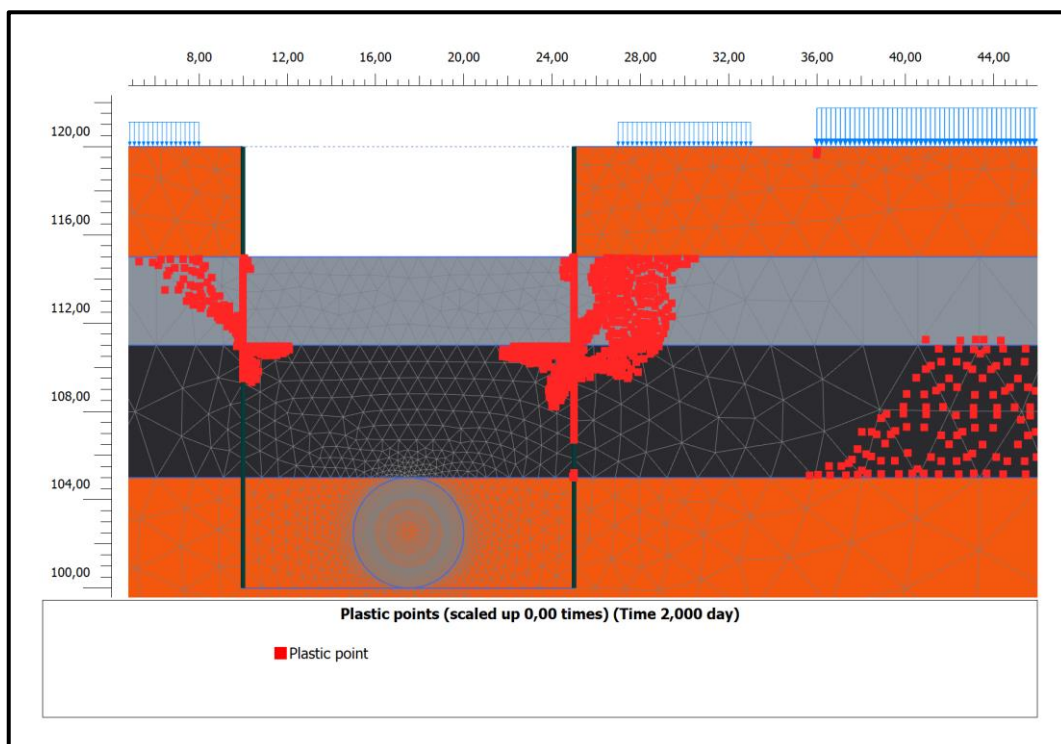
Slika 7-5. Ukupni pomak u trećoj fazi (slučaj A)

Ukupni pomak u modelu na slici 7-5 prikazan je pomoću sjenčanja. Ukupni pomak prema izračunu iznosi 1,221 metara. Najveći pomak zabilježen je na desnoj strani građevne jame te u tom području dolazi do kolapsa. Pomak na slici 7-5 je stvarni pomak koji se događa u tlu za razliku od deformirane mreže konačnih elemenata gdje se pomak odnosi samo na pomak mreže konačnih elemenata na osnovu kojih se provodi numerički proračun.

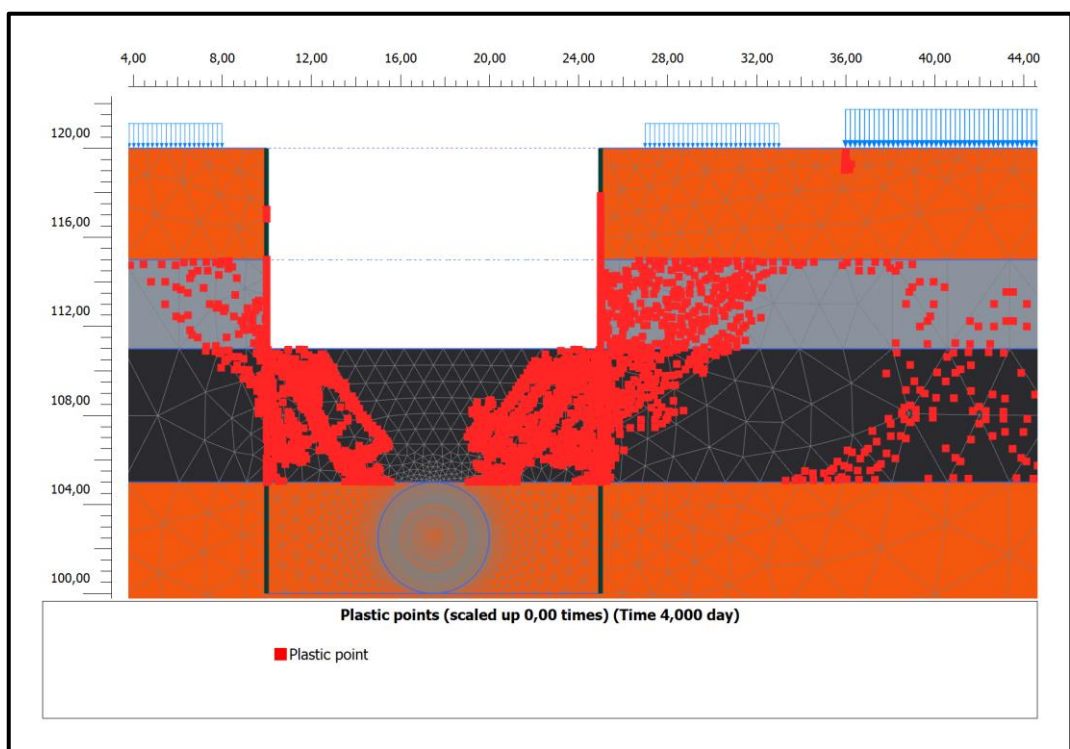
Slike 7-6, 7-7, 7-8 i 7-9 prikazuju raspored točaka sloma u modelu, tj. onih točaka u kojima dolazi do prekoračenja mobilizirane posmične čvrstoće. Napretkom iskopa otvorene građevne jame za slučaj A u svakoj idućoj fazi počevši od inicijalne, gdje tih točaka nema, dolazi do povećanja broja navedenih točaka. Kao rezultat povećanja broja takvih točaka dolazi do pojave nestabilnosti i urušavanja građevne jame. Pojava točaka sloma u sloju šljunka, koji predstavlja sloj tla definiran najboljim svojstvima, rezultat je pojave vlačnih naprezanja u pojedinim točkama tog materijala.



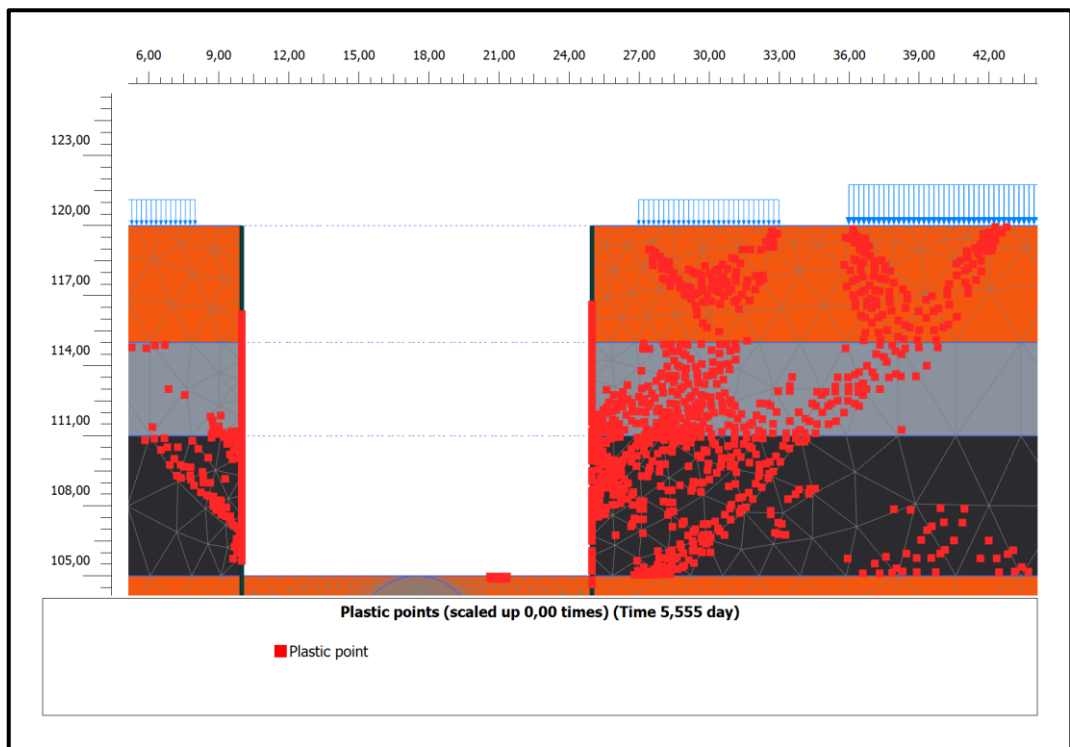
Slika 7-6. Raspored točaka sloma u inicijalnoj fazi (slučaj A)



Slika 7-7. Raspored točaka sloma u prvoj fazi (slučaj A)



Slika 7-8. Raspored točaka sloma u drugoj fazi (slučaj A)



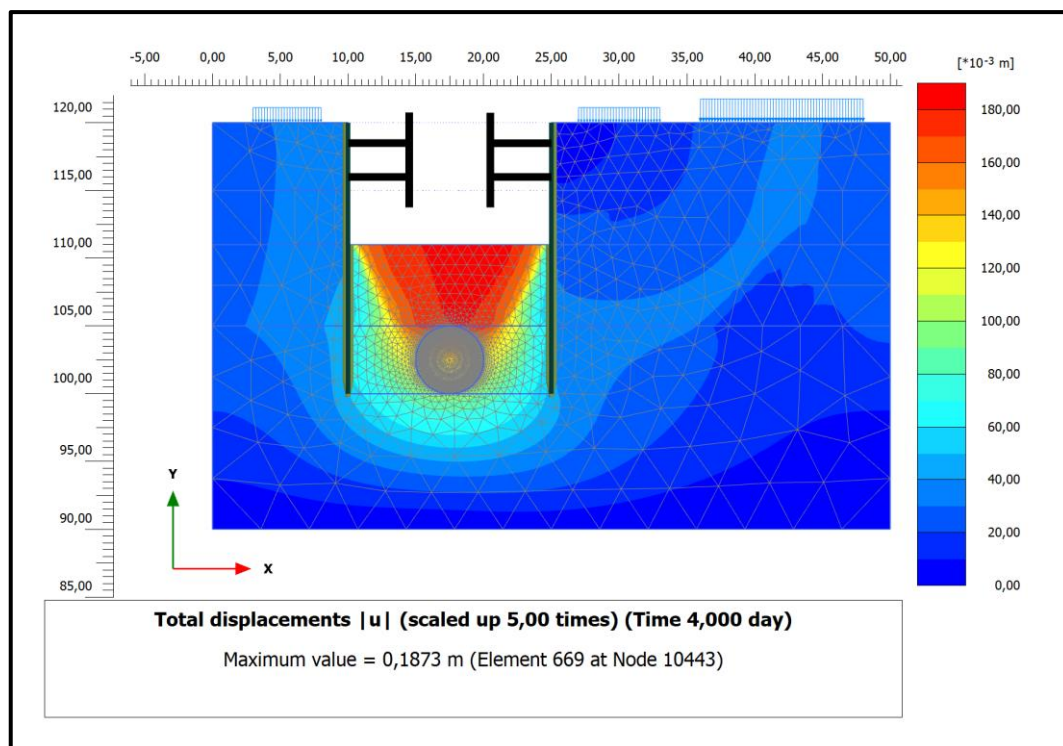
Slika 7-9. Raspored točaka sloma u trećoj fazi (slučaj A)

7.2. Slučaj B

Slučaj B prikazuje izlazne rezultate modela koji je dopunjeni model za slučaj A uz uključivanje sidara kao stabilizacijskih nosivih elemenata u proračun. Time je bilo moguće proračun dovesti do kraja kroz svih šest faza.

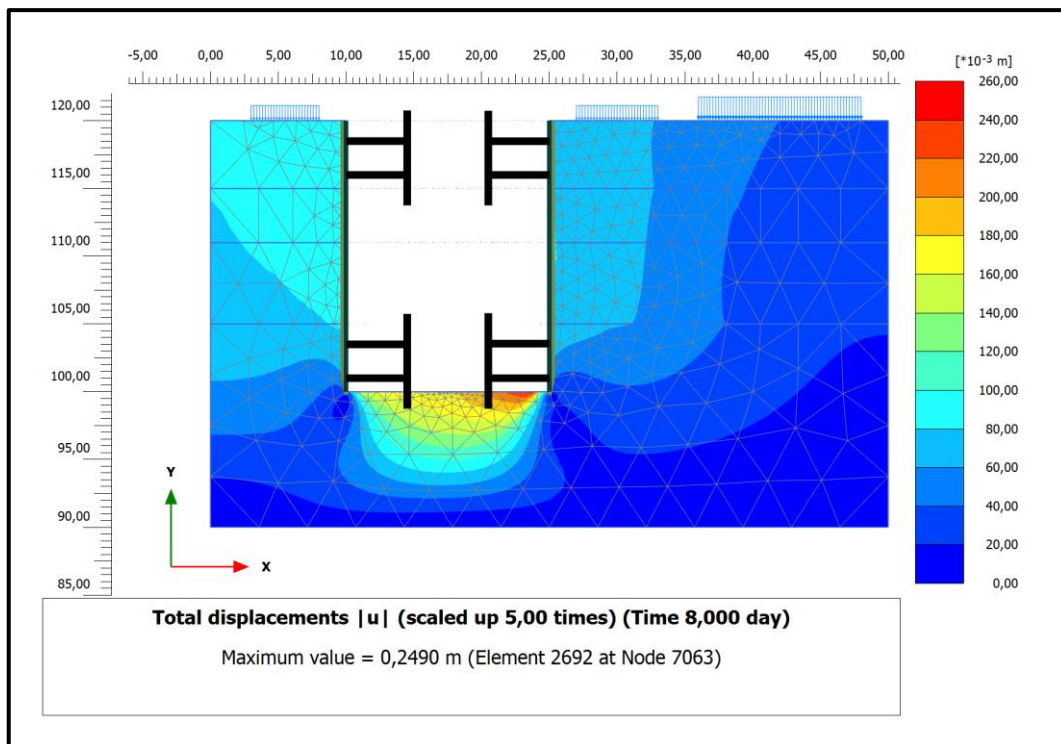
Zbog jednostavnosti prikaza i prevelike količine izlaznih rezultata, koje pruža analiza napravljena u „Plaxis-u“, ovdje su prikazani samo neki najbitniji segmenti potrebni za razumijevanje ponašanja modela podvrgnutog „Cut and Cover“ metodi iskopa.

Slike 7-10 i 7-11 prikazuju ukupne pomake unutar modela po fazama.



Slika 7-10. Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi (slučaj B)

Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi prikazan na slici 7-10 iznosi 0,187 metara. Područje najintenzivnijeg pomaka prikazano je crvenom bojom. Do pomaka dolazi zbog iskopa slojeva tla u otvorenoj građevnoj jami. Zbog iskopa dolazi do relaksacije u slojevima iza zida dijafragme te okolno tlo vrši pritisak na zid dijafragme. Međutim u drugoj fazi pomak nije prevelik, da bi utjecao na sigurnost iskopa. Dodatnu nosivost i sigurnost pružaju i ugrađena sidra u prvoj fazi iskopa.



Slika 7-11. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj B)

Slika 7-11 prikazuje završetak iskopa otvorene građevne jame. Nakon završetka iskopa slijedi izgradnja sustava podzemne željeznice. Ukupni pomak u modelu u ovoj fazi iznosi 0,249 metara što je u okviru dopuštenih vrijednosti prema numeričkom proračunu. Može se primijetiti da je razlika u pomaku u modelu između druge i četvrte faze svega 0,061 metara. Ovako mali iznos rezultat je upotrebe sidra kao nosivih elemenata.

Tablice 7-1 i 7-2 prikazuju iznos aksijalnih sila kojima su ugrađena sidra bila podvrgnuta tijekom analize.

Tablica 7-1. Iznos aksijalnih sila u sidrima u drugoj fazi (slučaj B)

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▼ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▼ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_5_1	1717	1	25,000	118,481	1466,853	0,000	1466,853	180,000	5,000
FixedEndAnchor_3_1	3883	1	25,000	116,000	-2667,815	-2667,815	469,115	180,000	5,000
FixedEndAnchor_2_1	4357	1	10,000	116,000	-511,127	-511,127	142,763	0,000	5,000
FixedEndAnchor_1_1	2823	1	10,000	118,496	-570,025	-825,418	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_7_1	6942	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_4_1	7615	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_6_1	7097	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_8_1	6569	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

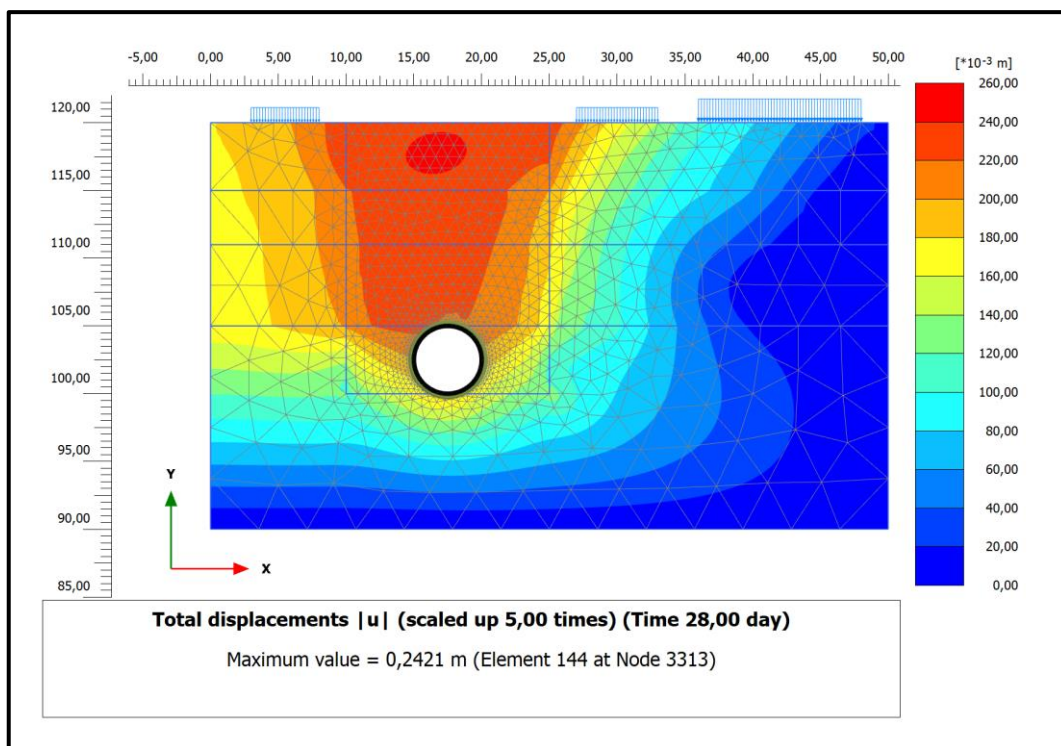
Iz tablice 7-1 vidljivo je kako se iznos aksijalnih sila u sidrima ugrađenim u drugoj fazi iskopa građevne jame kreće od 142,7 kN pa sve do 1466,8 kN. Ovakav raspored sila ovisan je o rasporedu i utjecaju vanjskih opterećenja. Sidra na desnoj strani zida građevne jame se nalaze pod većim opterećenjem nego ona na lijevoj strani.

Raspored aksijalnih sila u svim sidrima ugrađenim u prvom modelu vidljiv je u tablici 7-2. Iznos sila kreće se od 788,9 kN pa sve do 7833,9 kN.

Tablica 7-2. Iznos aksijalnih sila u sidrima u četvrtoj fazi (slučaj B)

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▲ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_1_1	2823	1	10,000	118,496	788,919	-825,418	788,919	0,000	5,000
FixedEndAnchor_5_1	1717	1	25,000	118,481	3162,498	0,000	3168,739	180,000	5,000
FixedEndAnchor_2_1	4357	1	10,000	116,000	-3323,723	-3323,723	142,763	0,000	5,000
FixedEndAnchor_3_1	3883	1	25,000	116,000	-7833,972	-7833,972	469,115	180,000	5,000
FixedEndAnchor_7_1	6942	1	25,000	103,543	-2278,407	-2278,407	0,000	180,000	5,000
FixedEndAnchor_4_1	7615	1	10,000	103,491	-2797,557	-2797,557	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_6_1	7097	1	10,000	101,000	-1667,014	-1667,014	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_8_1	6569	1	25,000	101,000	-2085,581	-2085,581	0,000	180,000	5,000

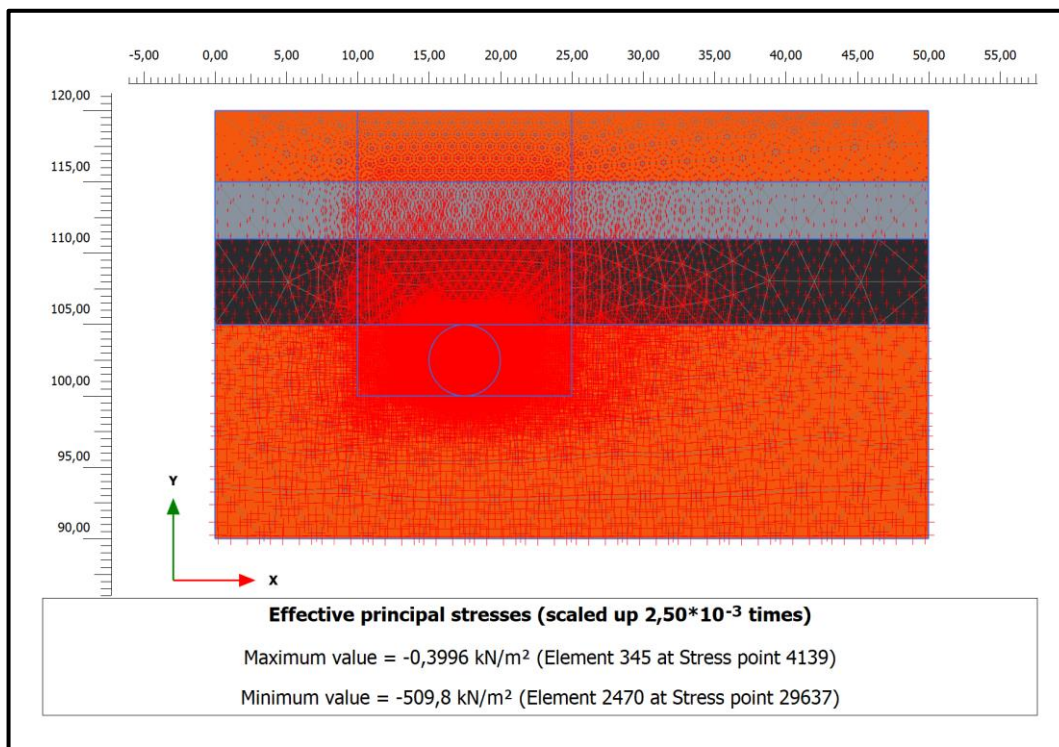
Slika 7-12 predstavlja ukupni pomak unutar modela u šestoj odnosno posljednjoj fazi provedene analize.



Slika 7-12. Ukupni pomaci u modelu u šestoj fazi (slučaj B)

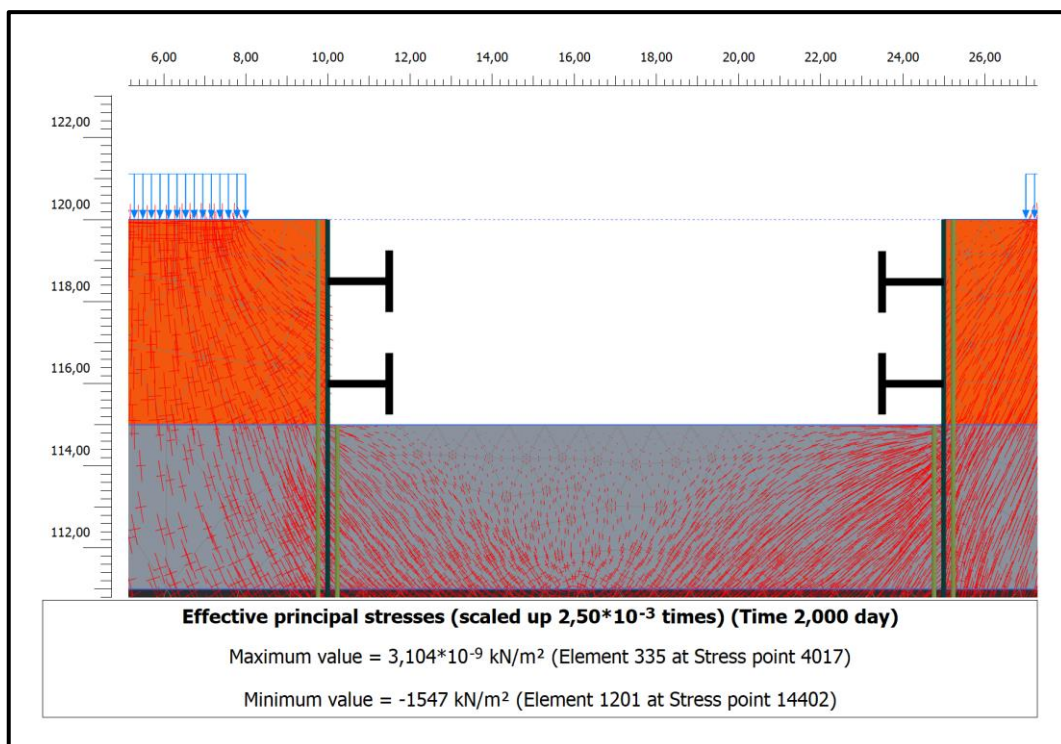
Slika 7-12 prikazuje pomak završne faze nakon izrade tunela podzemne željeznice. Građevna jama u ovoj fazi je zatvorena i tlo je vraćeno u prvotno stanje. Pomak u tlu prikazan slikom 7-12 rezultat je naknadnog pomaka u tlu zbog izrade podzemne prostorije (tunela), te zbog utjecaja vanjskih opterećenja. Iznos pomaka je 0,242 metara. Može se primijetiti kako se kalota tunela nalazi pod djelomičnim opterećenjem, a bokovi i dno tunela pod djelomičnim rasterećenjem uslijed djelovanja naprezanja od slojeva tla iznad i oko njih. Stvarni uvid u pomake po fazama predstavljaju inkrementalni pomaci. Ti podaci nisu prikazani grafički zbog prevelikog broja dostupnih izlaznih podataka. Iznos tih pomaka se kreće od 0,0 cm u inicijalnoj, 1,30 cm u prvoj, 0,06 cm u drugoj, 1,30 cm u trećoj, 7,0 cm u četvrtoj, 0,02 cm u petoj te 1,90 cm u šestoj fazi slučaja B. Takvi pomaci predstavljaju stvarno stanje pomaka u modelu tla. Njihov iznos je u granicama normale te ne utječu na stabilnost iskopa.

Slike od 7-13 do 7-19 prikazuju raspored efektivnih naprezanja unutar svih šest faze analize prvog modela slučaja B. Efektivna naprezanja su bitna iz razloga što pokazuju koji se dio ukupnog naprezanja u tlu prenosi preko čvrstih čestica tla odnosno skeleta tla. Kako u ovom slučaju nema utjecaja podzemne vode efektivna naprezanja jednaka su ukupnim.



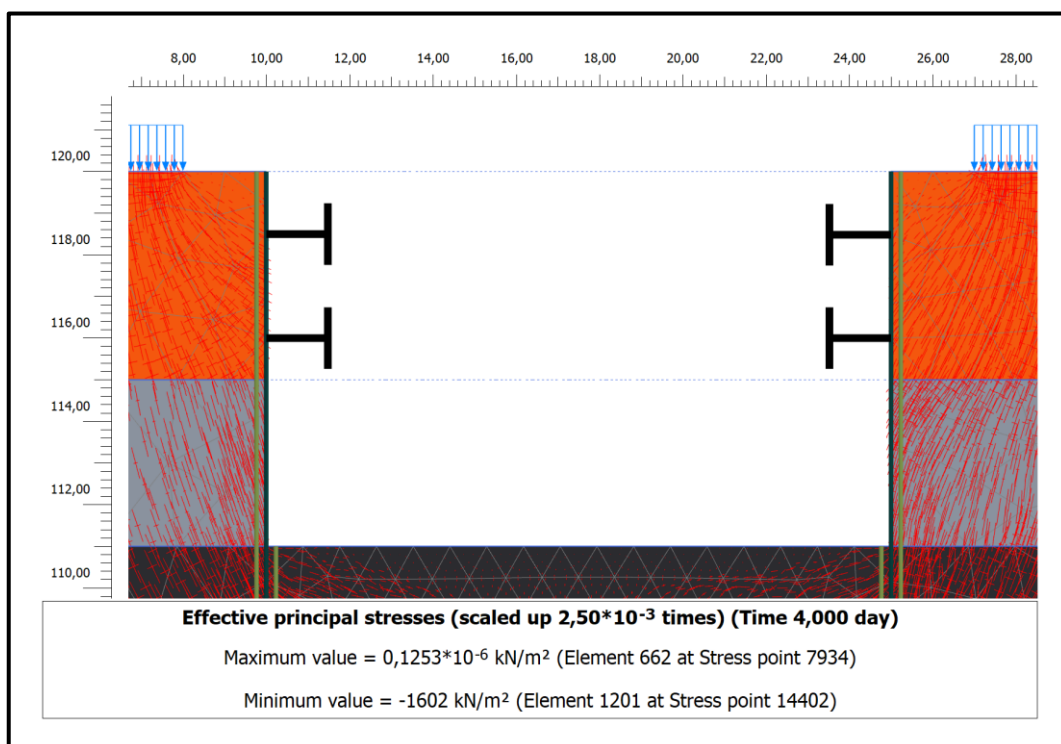
Slika 7-13. Efektivna naprezanja u inicijalnoj fazi (slučaj B)

Iz slike 7-13 vidljivo je kako se iznos efektivnih naprezanja u inicijalnoj fazi kreće od 0,399 kN/m² pa sve do 509,8 kN/m². Područja na slici označena crvenim križićima označuju raspodjelu efektivnih naprezanja.



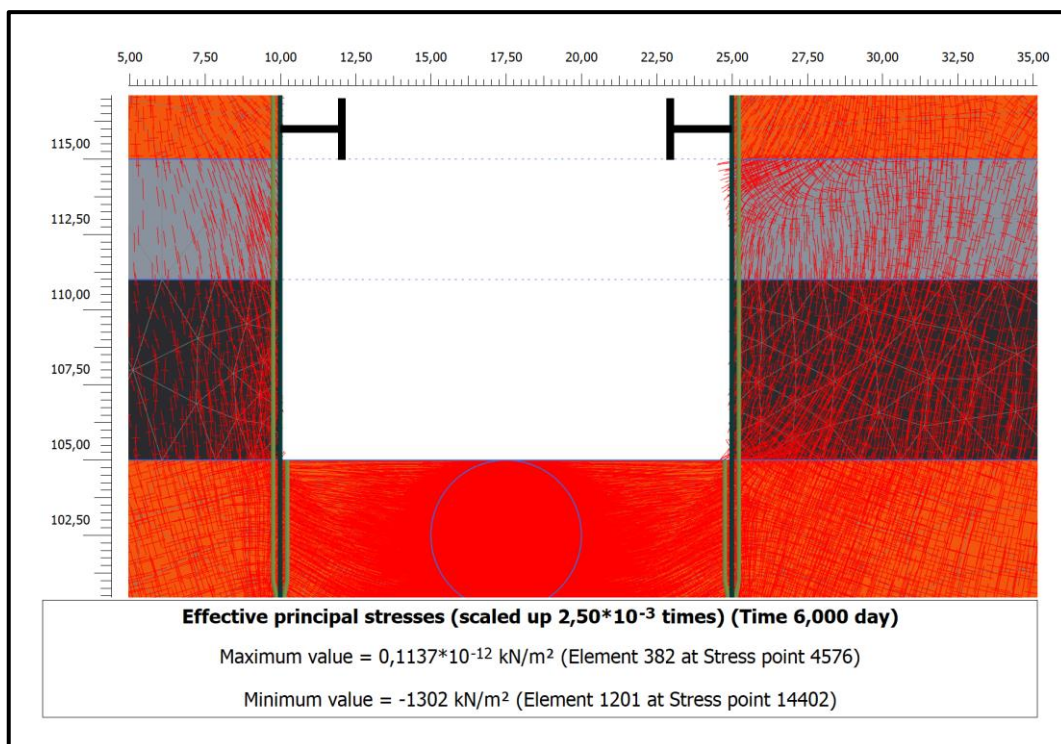
Slika 7-14. Efektivna naprezanja u prvoj fazi (slučaj B)

Iznos efektivnih naprezanja u prvoj fazi kreće se od $3,104 \times 10^{-9}$ kN/m² do 1547 kN/m².



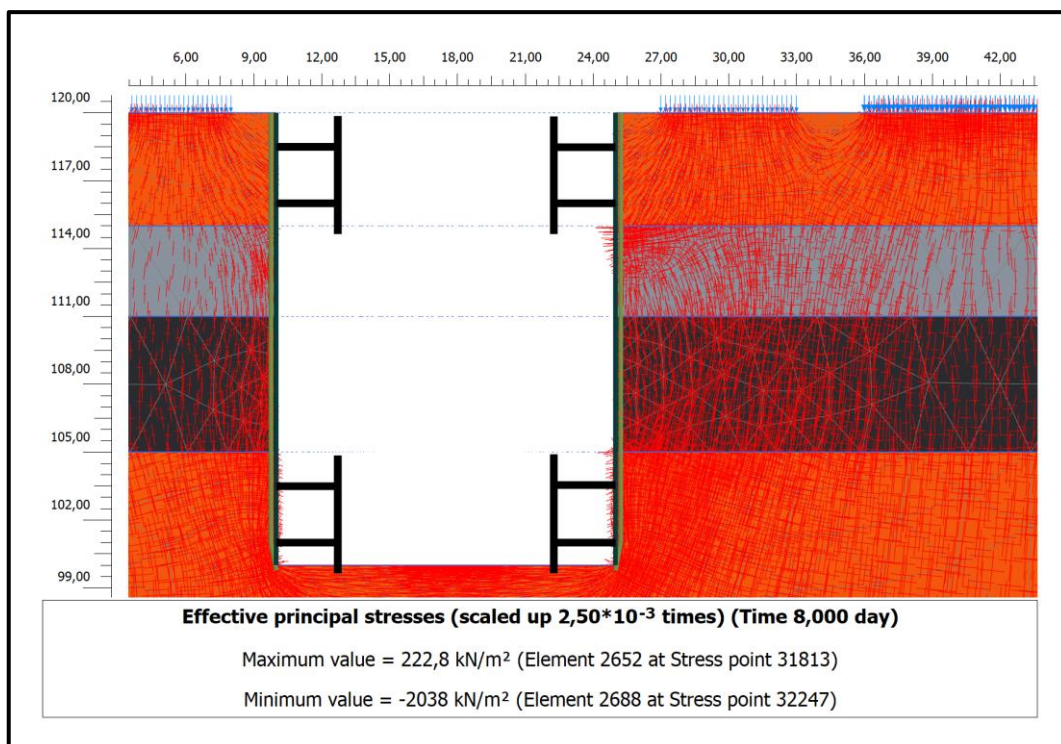
Slika 7-15. Efektivna naprezanja u drugoj fazi (slučaj B)

Iznos efektivnih naprezanja u ovoj fazi se kreće od $0,125 \times 10^{-6}$ kN/m² do 1602 kN/m².



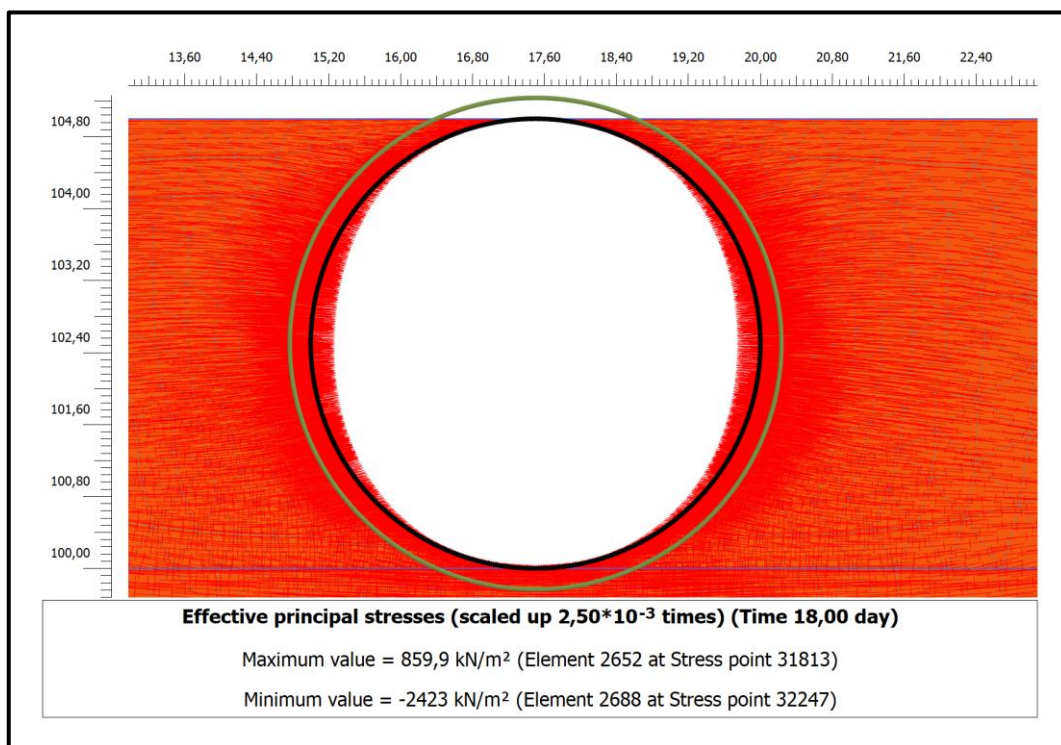
Slika 7-16. Efektivna naprezanja u trećoj fazi (slučaj B)

Iznos efektivnih naprezanja u trećoj fazi iskopa na slici 7-16 kreće se od $0,113 \times 10^{-12}$ kN/m² pa sve do 1302 kN/m². Područje najvećih efektivnih naprezanja u ovoj fazi nalazi se pri dnu građevne jame, tj. u sloju gline koji još nije iskopan. Isto tako intenzitet efektivnih naprezanja u tlu raste na dodiru čestica tla i zidova dijafragme uslijed ostvarivanja većeg kontaktnog trenja između njih.



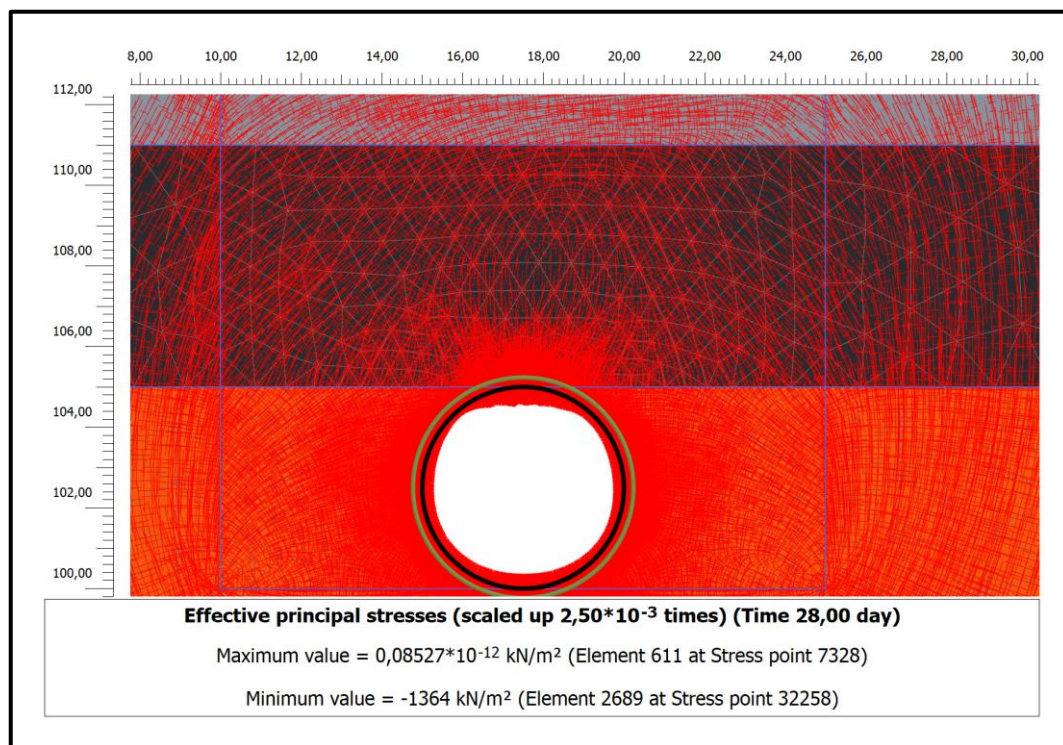
Slika 7-17. Efektivna naprezanja u četvrtoj fazi (slučaj B)

U četvrtoj fazi slučaja B iznos efektivnih naprezanja kreće se od 222,8 kN/m² do 2038 kN/m². Područja najvećeg intenziteta efektivnih naprezanja nalaze se oko dna građevne jame, oko zidova dijafragme te u tlu ispod mjesta djelovanja vanjskih opterećenja.



Slika 7-18. Efektivna naprezanja u petoj fazi (slučaj B)

Iznos efektivnih naprežanja u petoj fazi kreće se od $859,9 \text{ kN/m}^2$ do 2423 kN/m^2 . Na slici 7-18 izbliže je prikazana raspodjela efektivnih naprežanja u sloju tla nakon instalacije tunela podzemne željeznice. Iz slike se može vidjeti kako se najveća koncentracija odnosno intenzitet efektivnih naprežanja nalazi upravo oko tunelske obloge. To je posljedica kontaktnog trenja između čestica tla i materijala tunelske obloge.



Slika 7-19. Efektivna naprežanja u šestoj fazi (slučaj B)

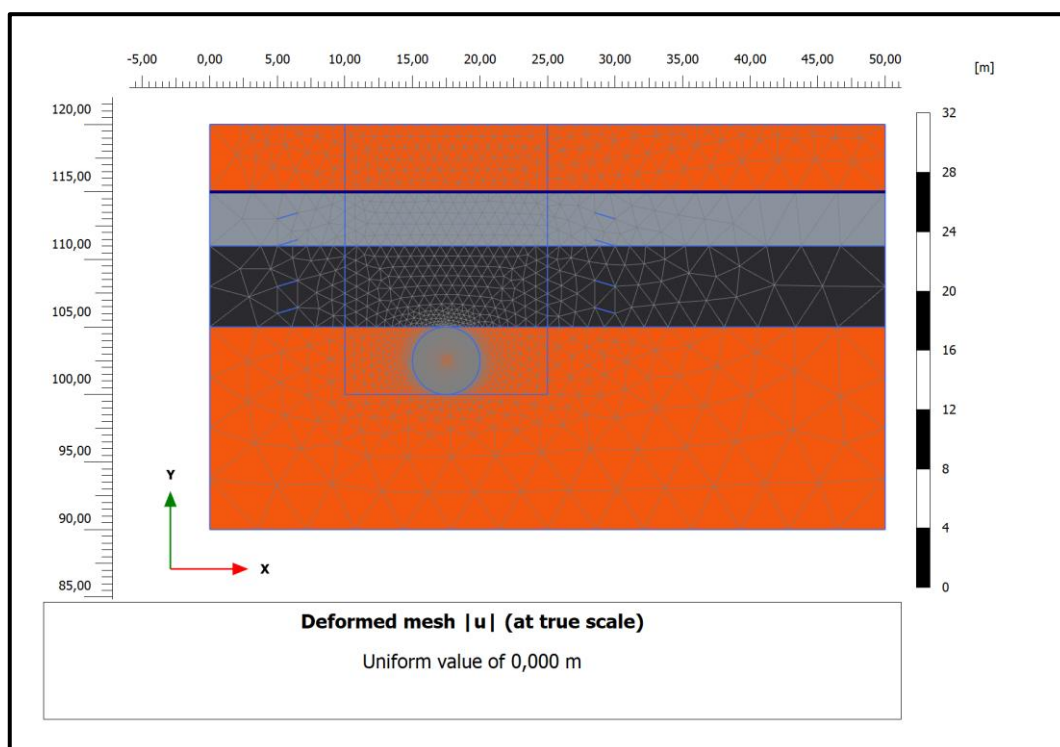
Slikom 7-19 prikazana je završna faza slučaja B. Iznos efektivnih naprežanja u navedenoj fazi kreće se od $0,085 \text{ kN/m}^2$ do 1364 kN/m^2 . U usporedbi s prethodnom petom fazom iznos efektivnih naprežanja se smanjuje. To je posljedica rasterećenja tunelske obloge uslijed završenog slijezanja slojeva tla iznad koji su u tlo vraćeni u procesu zatvaranja građevne jame.

Porni tlak je posebice važan ako u modelu tla postoji određena razina ili nivo podzemne vode. Ta razina podzemne vode utječe na zasićenost slojeva tla, a samim time i na nosivost te iznos efektivnih naprežanja u tlu. Kako u slučaju B nema utjecaja podzemne vode u tlu nema niti mogućnosti prikaza takovog izlaznog rezultata za slučaj B. Više o utjecaju podzemne vode može se vidjeti u slučaju D.

7.3. Slučaj C

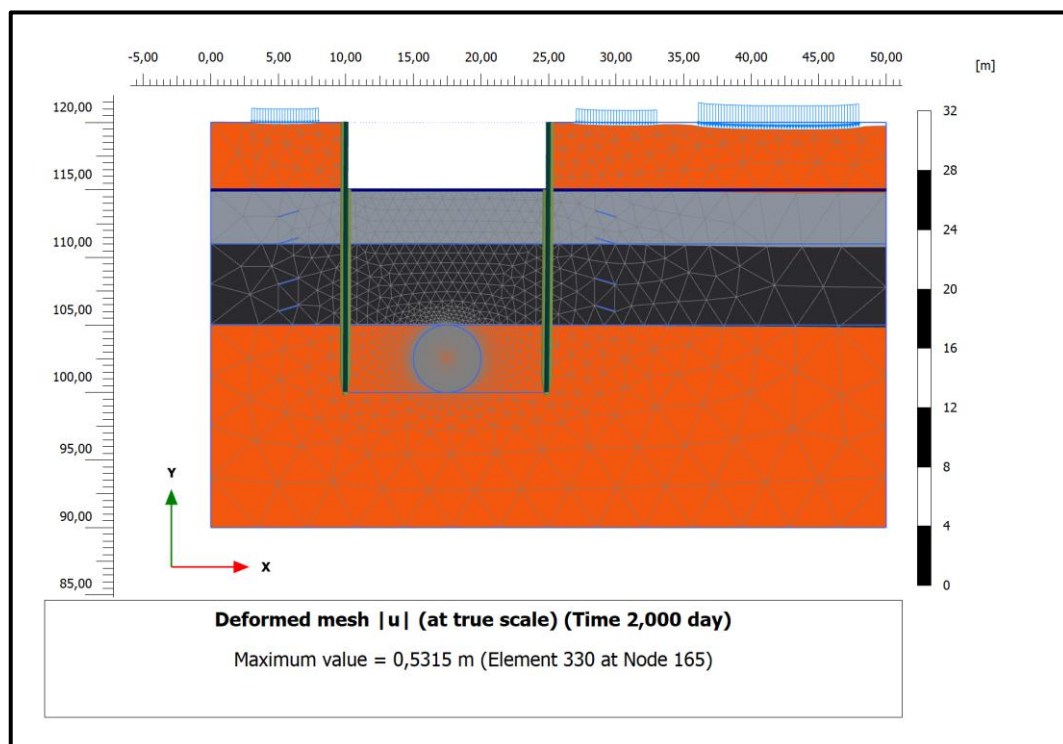
Slučaj C prikazuje izlazne rezultate dobivene modeliranjem drugog geometrijskog modela. U analizi je taj model kao i u slučaju A simulirao iskop otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih potpornih elemenata. Faktor utjecaja podzemne vode u ovom slučaju je uzet u obzir, tj. simuliran je iskop u uvjetima visoke razine podzemne vode. Razina podzemne vode se nalazi 5 metara ispod površine terena. Zbog utjecaja velikih vanjskih opterećenja, te dodatnog opterećenja od vode pokazalo se da ovakav pristup iskopu nije siguran, te je iskop rezultirao slomom na početku četvrte faze. Cilj slučaja C bio je ukazati na potrebu korištenja stabilizacijskih nosivih elemenata (sidara) kako bi se osigurao siguran i neometan iskop otvorene građevne jame za potrebe „*Cut and Cover*“ metode izrade podzemne željeznice.

Slika 7-20 prikazuje mrežu konačnih elemenata. Slike od 7-21 do 7-24 prikazuju ponašanje modela od inicijalne do četvrte faza proračuna prikazom deformirane mreže konačnih elemenata. Na slikama se može primijetiti naznačena plava linija koja označava liniju podzemne vode, tj. razinu vodnog lica u modelu.

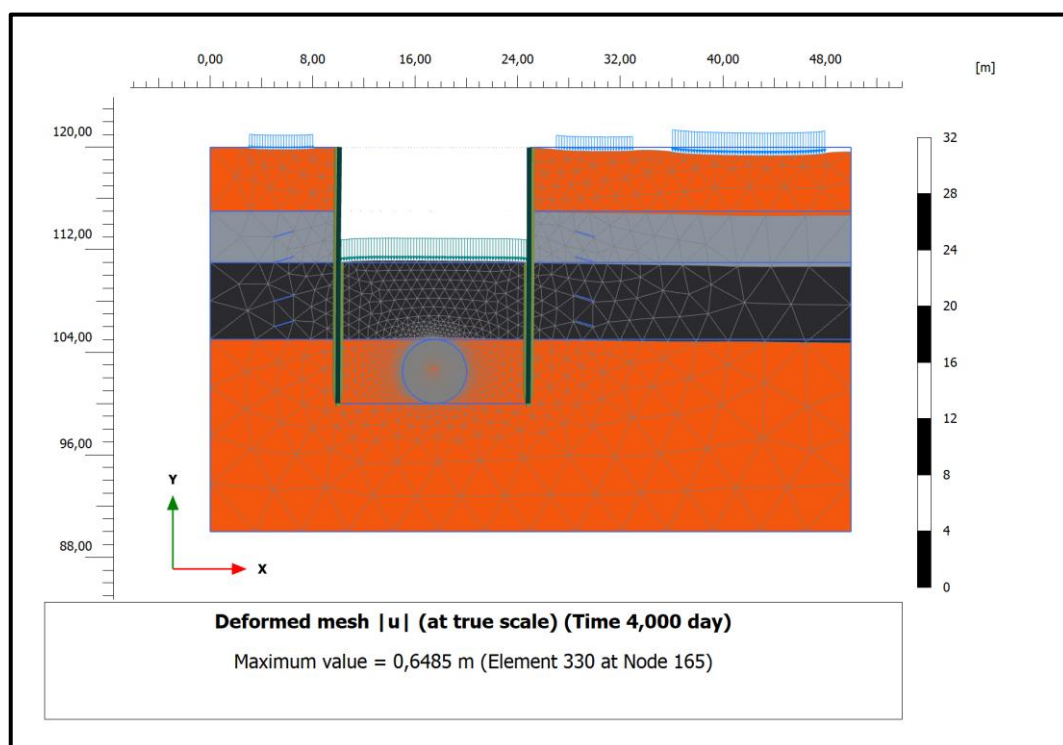


Slika 7-20. Mreža konačnih elemenata (slučaj C)

Slika 7-20 prikaz je mreže konačnih elemenata u kojem se drugi geometrijski model nalazi prije bilo kakvog zahvata u tlu.

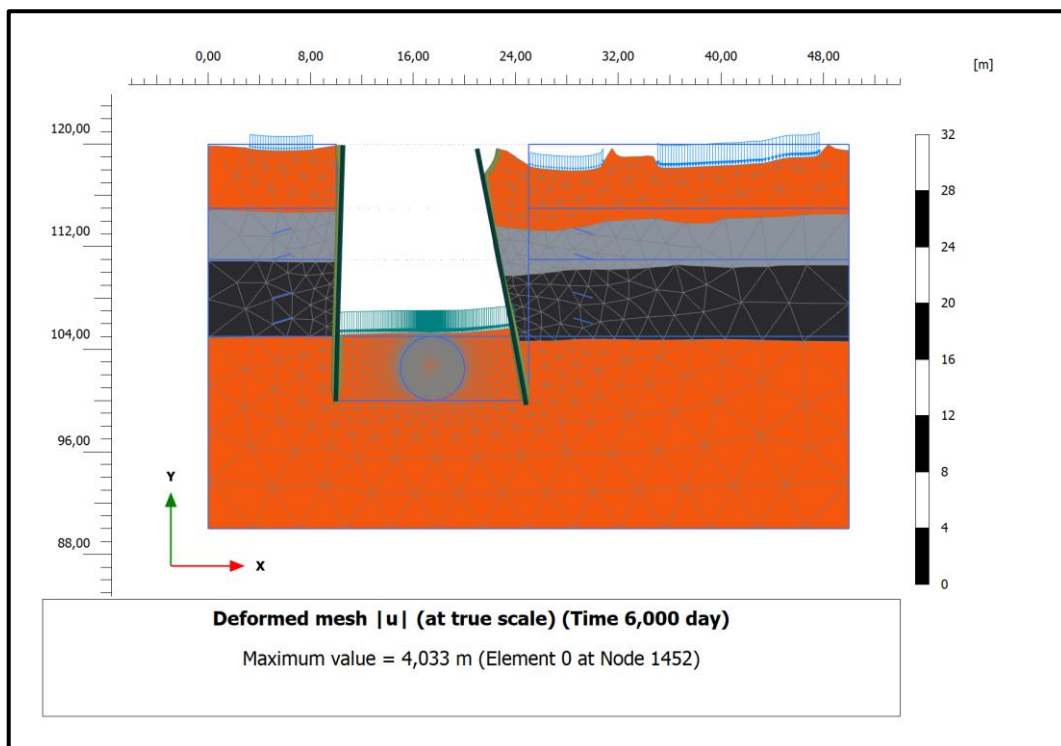


Slika 7-21. Deformirana mreža konačnih elemenata prve faze (slučaj C)



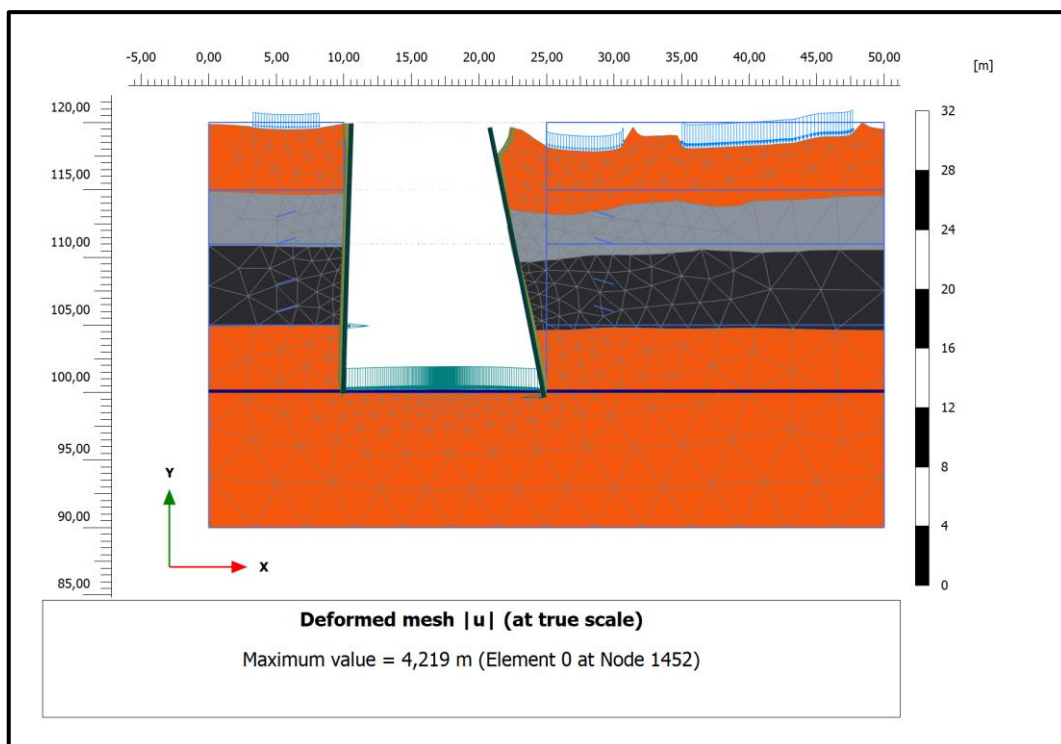
Slika 7-22. Deformirana mreža konačnih elemenata druge faze (slučaj C)

Na slikama 7-21 i 7-22 može se vidjeti kako napretkom iskopa otvorene građevne jame bez korištenja stabilizacijskih elemenata dovodi do povećanog pomaka mreže konačnih elemenata. U prvoj fazi pomak iznosi 0,531 metra, a u drugoj fazi 0,648 metara.



Slika 7-23. Deformirana mreža konačnih elemenata treće faze (slučaj C)

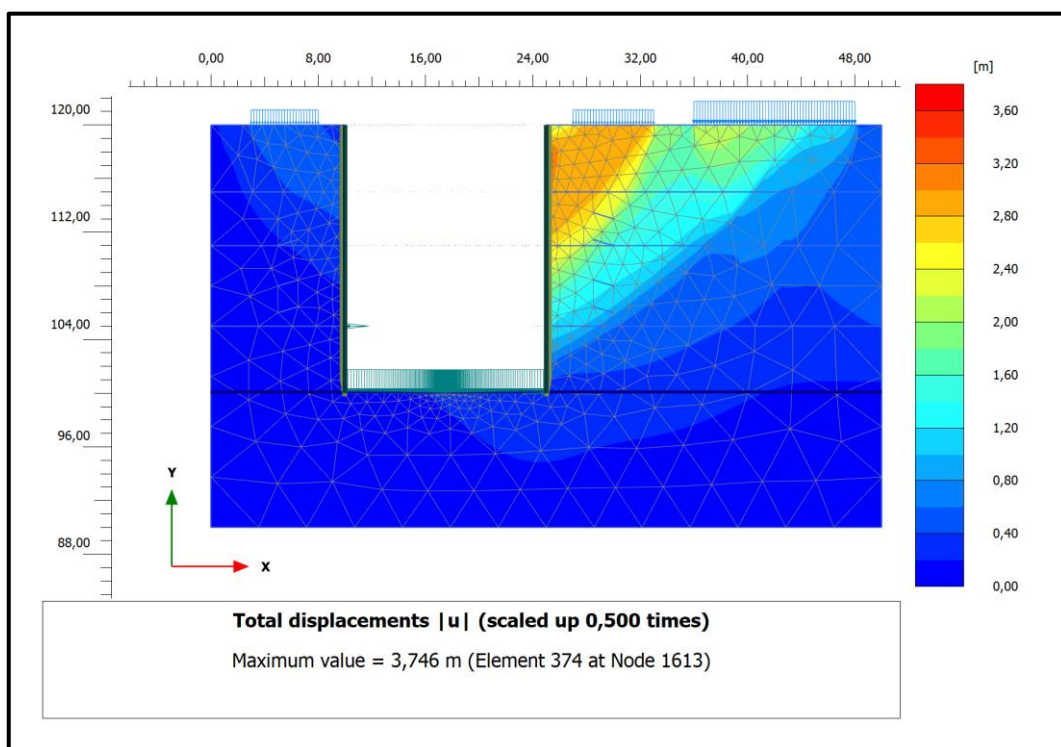
Pomak mreže konačnih elemenata u trećoj fazi analize slučaja C iznosi 4,033 metara. Ovaj veliki i vrlo izraženi pomak desnog zida dijafragme građevne jame rezultat je naprezanja u tlu te dodatnog naprezanja od djelovanja vode u modelu. Iako ovakav pomak zasigurno zaustavlja daljnji iskop građevne jame u stvarnom slučaju, slom modela se u analizi događa odmah na početku proračuna iduće fazi. Stvarni iznos pomaka kod kojeg dolazi do sloma dobivamo tek iz pregleda inkrementalnih pomaka koji ovdje nisu prikazani radi prevelikog broja dostupnih izlaznih podataka modela. Iznos inkrementalnog pomaka kod kojeg dolazi do kolapsa modela tla u „Plaxis-u“ u ovom slučaju iznosi 0,47 cm. Do kolapsa u slučaju C kao i u slučaju A dolazi još zbog pojave vlačnih naprezanja na desnoj strani građevne jame koja uzrokuju pojavu vlačne pukotine koja se formira od površine pa skroz do dna građevne jame. Ta vlačna pukotina uzrokuje kretanje mase tla, smanjenje (krutosti) čvrstoće tla ispod 0 te pritisak na zid dijafragme uslijed čega dolazi do kolapsa odnosno urušavanja.



Slika 7-24. Deformirana mreža konačnih elemenata četvrte faze (slučaj C)

Iznos pomaka deformirane mreže konačnih elemenata u četvrtoj fazi iznosi 4,219 metara. Pri toj vrijednosti dolazi do sloma numeričkog proračuna ovog modela.

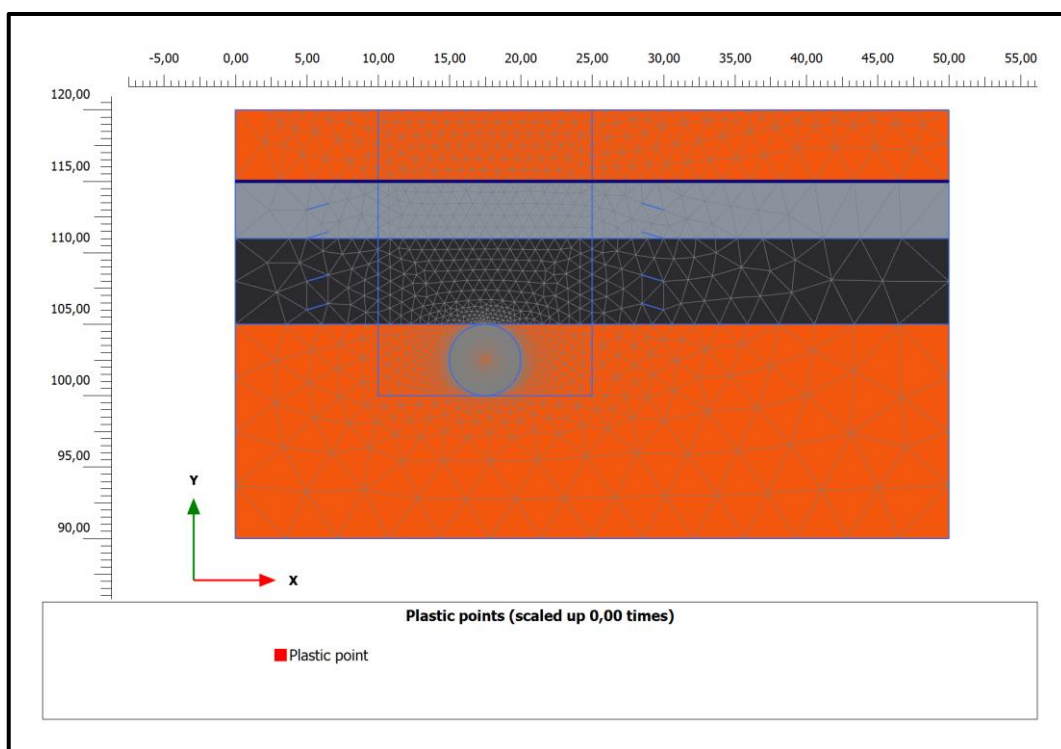
Ilustrativniji prikaz ukupnih pomaka u četvrtoj fazi slučaja C može se vidjeti na slici 7-25.



Slika 7-25. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj C)

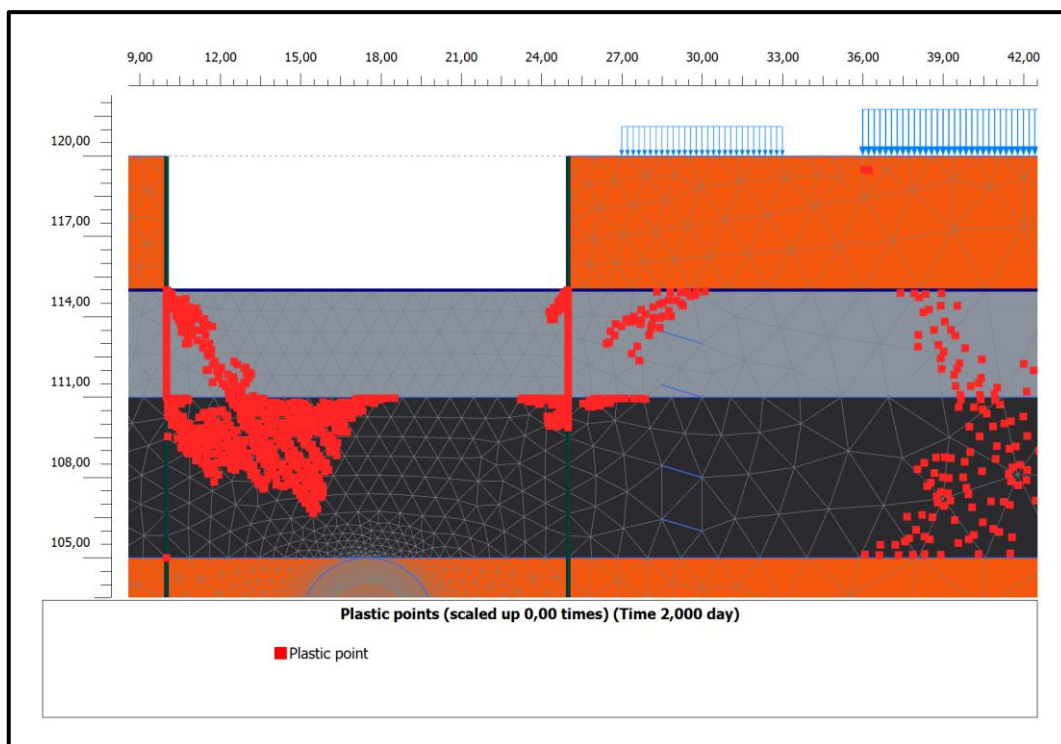
Prema slici 7-25 ukupni pomak u fazi sloma, tj. četvrtoj fazi analize slučaja C iznosi 3,746 metara. Iako se iznos ukupnog pomaka na slici 7-25 i iznos pomaka deformirane mreže konačnih elemenata na slici 7-24 razlikuje, područje pomaka je jednako te oba izlazna rezultata ukazuju na isto mjesto u građevnoj jami gdje dolazi do sloma.

Slike od 7-26 do 7-30 prikazuju raspored točaka sloma u modelu, tj. onih točaka u kojima dolazi do prekoračenja mobilizirane posmične čvrstoće. Napretkom iskopa otvorene građevne jame za slučaj C u svakoj idućoj fazi počevši od inicijalne, gdje tih točaka nema, dolazi do povećanja broja navedenih točaka, slično kao i u slučaju A. Kao rezultat povećanja broja takvih točaka dolazi do pojave nestabilnosti i urušavanja građevne jame.

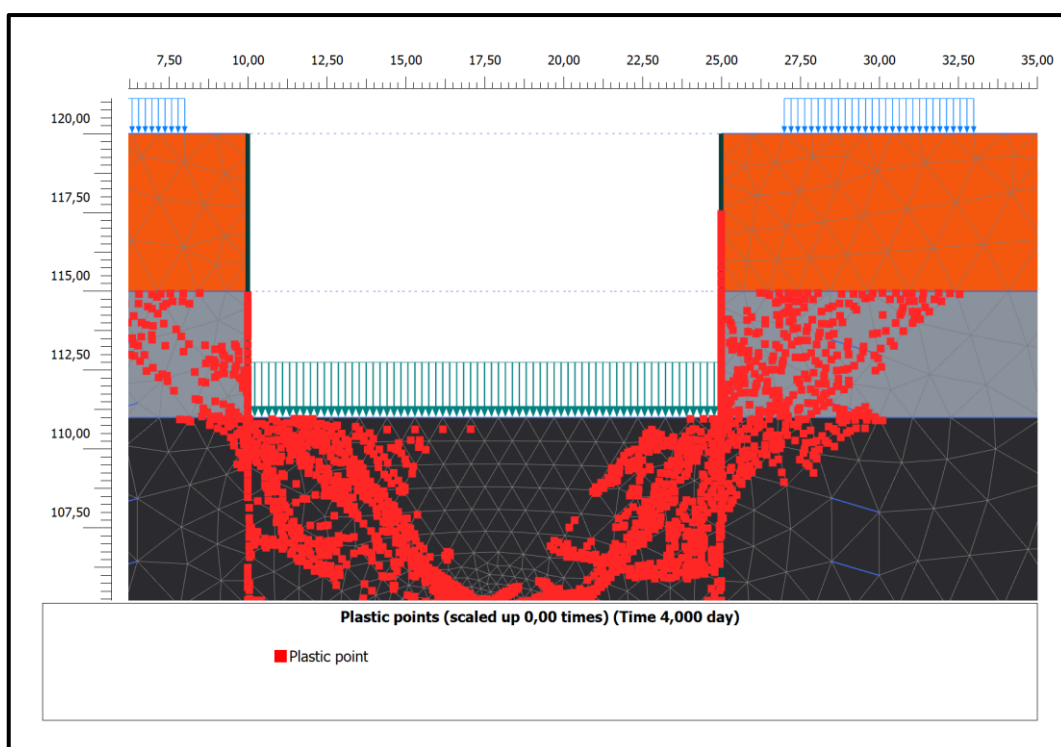


Slika 7-26. Raspored točaka sloma u inicijalnoj fazi (slučaj C)

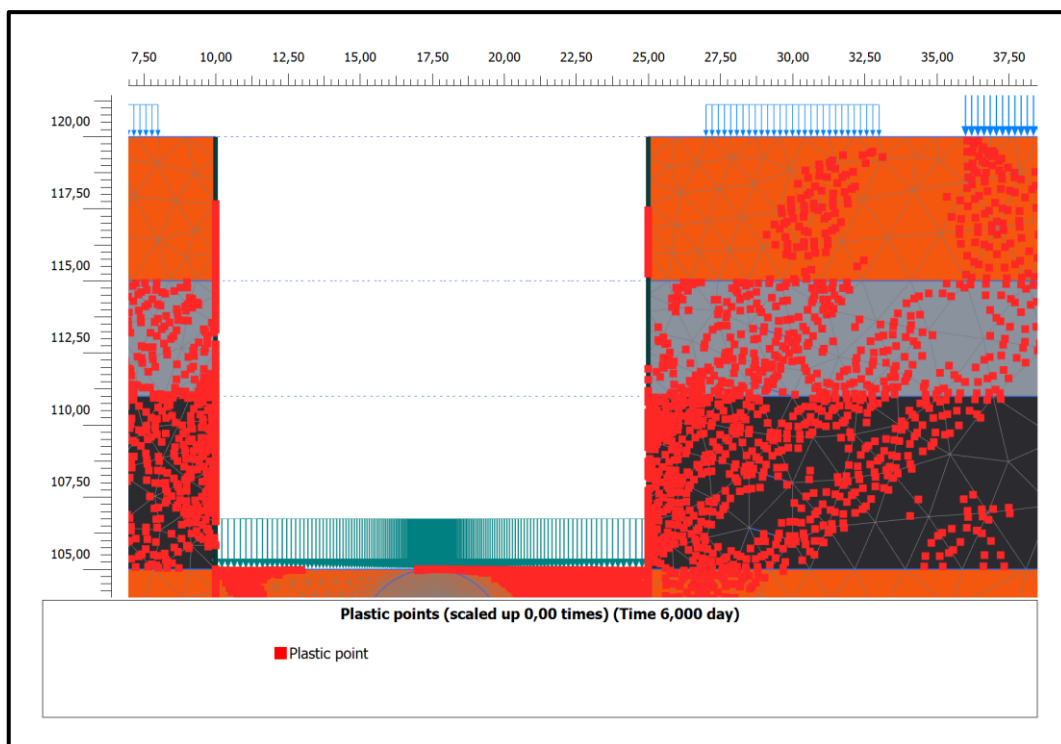
U inicijalnoj fazi slučaja C kao i u inicijalnoj fazi slučaja A nema pojave plastičnih točaka sloma, tj. točaka u kojima dolazi do prekoračenja posmične čvrstoće. Posljedica je to djelovanja samo geoloških naprezanja, te izostanak radova u tlu.



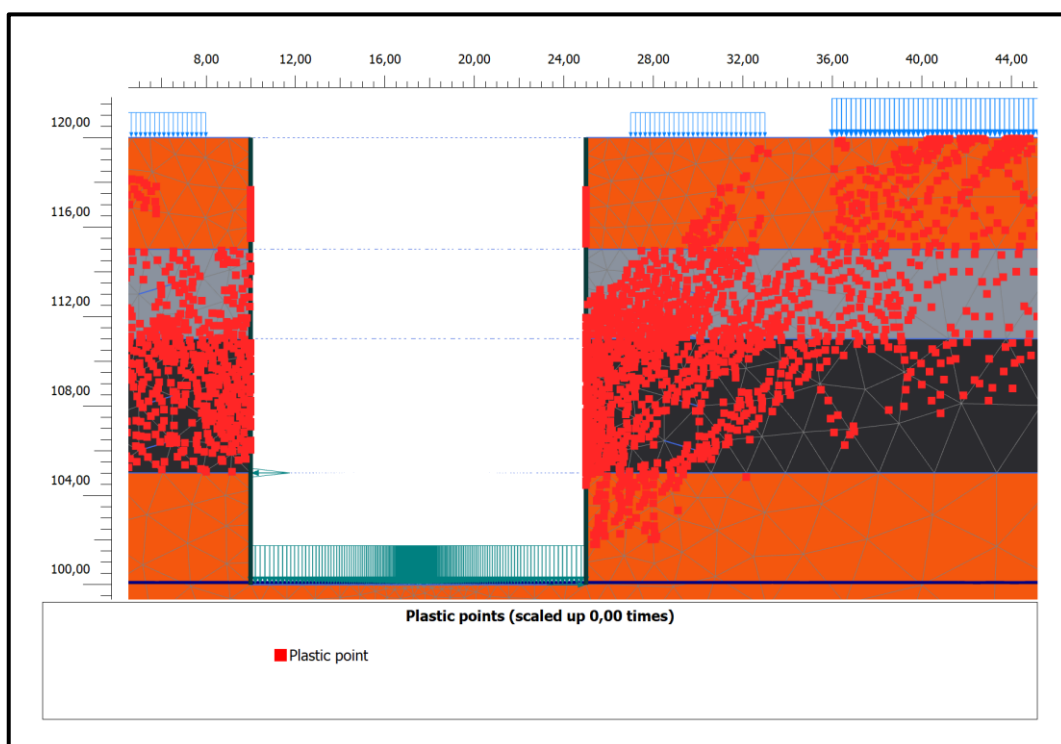
Slika 7-27. Raspored točaka sloma u prvoj fazi (slučaj C)



Slika 7-28. Raspored točaka sloma u drugoj fazi (slučaj C)



Slika 7-29. Raspored točaka sloma u trećoj fazi (slučaj C)



Slika 7-30. Raspored točaka sloma u četvrtoj fazi (slučaj C)

U usporedbi s točkama u kojima dolazi do prekoračenja mobilizirane posmične čvrstoće u slučaju A, u ovom slučaju odnosno slučaju C u pojedinim fazama kod više točaka u modelu

dolazi do prekoračenja navedene čvrstoće. Takvom odnosu pridonosi i dodatno naprezanje u tlu, koje je posljedica visoke razine podzemne vode.

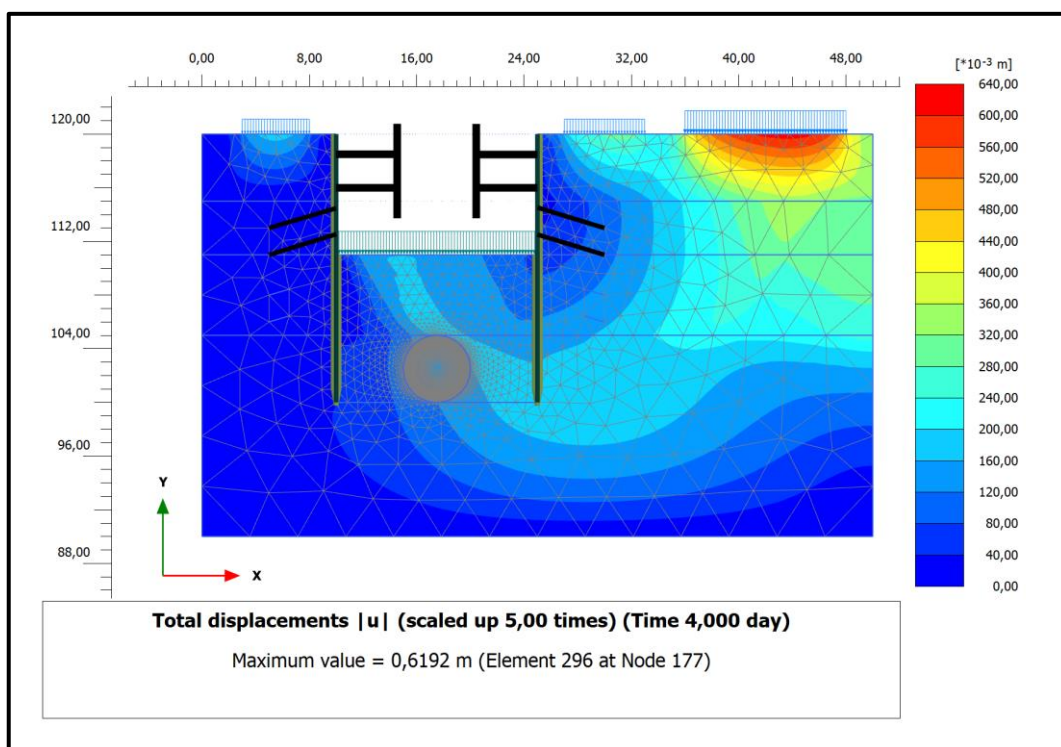
Zaključak je da utjecaj podzemne vode bez upotrebe sidara kao nosivih stabilizacijskih elemenata dovodi do vrlo velikih pomaka dijafragme, što rezultira urušavanjem iste u prostor iskopa.

7.4. Slučaj D

Slučaj D prikazuje izlazne rezultate modela koji je dopunjeni model za slučaj C uz uključivanje sidara kao stabilizacijskih nosivih elemenata u proračun. Time je bilo moguće proračun dovesti do kraja kroz svih 6 faza.

Zbog jednostavnosti prikaza i prevelike količine izlaznih rezultata koje pruža analiza napravljena u „*Plaxis-u*“ ovdje su prikazani samo neki najbitniji segmenti potrebni za razumijevanje ponašanja modela podvrgnutog „*Cut and Cover*“ metodi iskopa. Kako se u slučaju C koristi isti geometrijski model u slučaju D izlazni rezultati ponašanja deformirane mreže elemenata nisu ponovno prikazani.

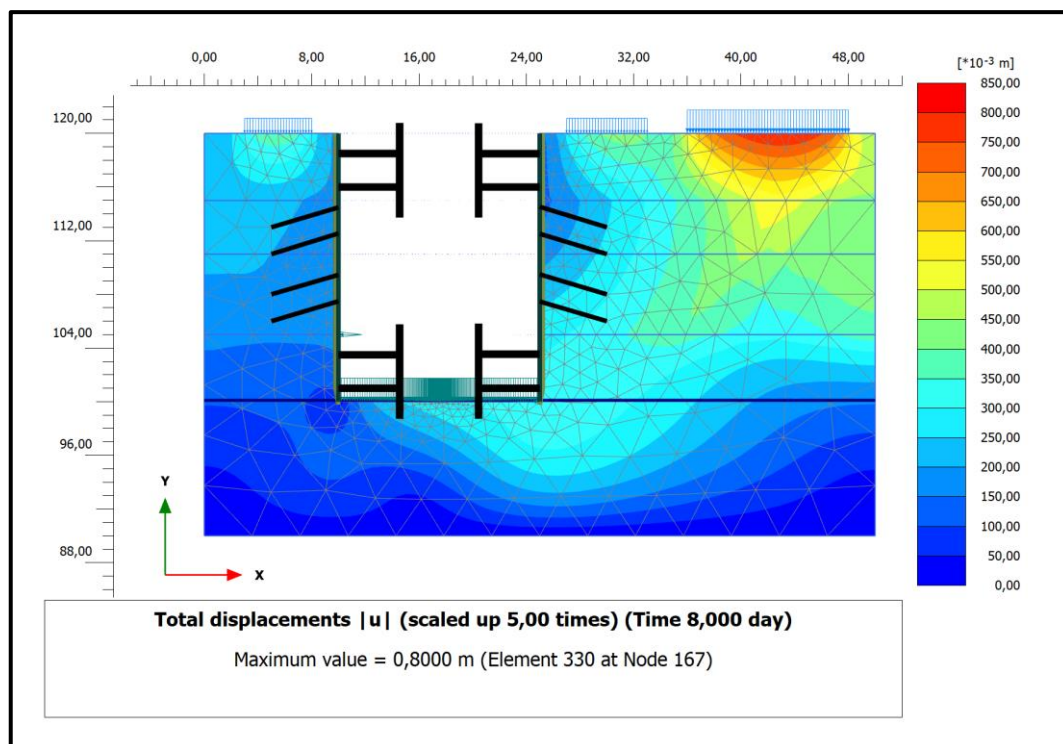
Slike 7-31 i 7-32 prikazuju ukupne pomake unutar modela u drugoj i četvrtoj fazi.



Slika 7-31. Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi(slučaj D)

Ukupni pomak u modelu u drugoj fazi prikazan na slici 7-31 iznosi 0,619 metara. Područje najintenzivnijeg pomaka prikazan je crvenom, a najmanjeg plavom bojom. Do pomaka dolazi zbog iskopa slojeva tla u otvorenoj građevnoj jami. Zbog iskopa dolazi do relaksacije u slojevima iza zida dijafragme, te okolno tlo vrši pritisak na zid dijafragme. Međutim u drugoj fazi pomak nije prevelik, da bi utjecao na sigurnost iskopa. Dodatnu nosivost i sigurnost pružaju ugrađena sidra u prvoj, ali i drugoj fazi iskopa.

Slika 7-32 prikazuje završetak iskopa otvorene građevne jame drugog modela.



Slika 7-32. Ukupni pomak u modelu u četvrtoj fazi (slučaj D)

Nakon završetka iskopa slijedi izgradnja sustava podzemne željeznice. Ukupni pomak u modelu u ovoj fazi iznosi 0,800 metara što je u okviru dopuštenih vrijednosti prema numeričkom proračunu. Može se primijetiti da je razlika u pomaku u modelu između druge i četvrte faze svega 0,180 metara. Ovako mali iznos rezultat je upotrebe dvije vrste sidra kao nosivih elemenata. Tablice 7-3 i 7-4 prikazuju aksijalne sile kojima su ugrađena mehanička i injekcijska sidra bila podvrgnuta tijekom analize u drugoj i četvrtoj fazi.

Tablica 7-3. Iznos aksijalnih sila u mehaničkim sidrima u drugoj fazi (slučaj D)

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N_{min} [kN]	N_{max} [kN]	Φ_z [°]	Length [m]
FixedEndAnchor_1_1	3063	1	10,000	118,496	-763,938	-931,652	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_5_1	1494	1	25,000	118,481	1652,659	0,000	1652,659	180,000	5,000
FixedEndAnchor_2_1	5770	1	10,000	116,000	-230,243	-230,243	1082,656	0,000	5,000
FixedEndAnchor_3_1	1915	1	25,000	116,000	-3446,867	-3446,867	0,000	180,000	5,000
FixedEndAnchor_7_1	5707	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_4_1	9310	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_6_1	11210	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
FixedEndAnchor_8_1	4814	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Iz tablice 7-3 vidljivo je kako se iznos aksijalnih sila u sidrima ugrađenim u drugoj fazi iskopa građevne jame kreće od 230,2 kN pa sve do 3446,8 kN. Ovakav raspored tih sila ovisan je o rasporedu i utjecaju vanjskih, ali i dodatnih opterećenja. Sidra na desnoj strani zida građevne jame se nalaze pod većim opterećenjem nego ona na lijevoj strani. Mehanička sidra u drugoj fazi slučaja D više su opterećena nego ista takva sidra u slučaju B. To je posljedica dodatnog naprezanja od vode.

Tablica 7-4. Iznos aksijalnih sila u svim mehaničkim sidrima u četvrtoj fazi (slučaj D)

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]	Φ _z ▲ [°]	Length ▲ [m]
FixedEndAnchor_1_1	3063	1	10,000	118,496	456,681	-931,652	456,681	0,000	5,000
FixedEndAnchor_5_1	1494	1	25,000	118,481	3806,038	0,000	3806,038	180,000	5,000
FixedEndAnchor_2_1	5770	1	10,000	116,000	-2622,629	-2622,629	1082,656	0,000	5,000
FixedEndAnchor_3_1	1915	1	25,000	116,000	-9424,579	-9424,579	0,000	180,000	5,000
FixedEndAnchor_7_1	5707	1	25,000	103,543	-2647,327	-2647,327	0,000	180,000	5,000
FixedEndAnchor_4_1	9310	1	10,000	103,491	-3159,870	-3159,870	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_6_1	11210	1	10,000	101,000	-2517,696	-2517,696	0,000	0,000	5,000
FixedEndAnchor_8_1	4814	1	25,000	101,000	-2648,605	-2648,605	0,000	180,000	5,000

Tablica 7-4 pruža pregled iznosa aksijalnih sila u svim mehaničkim sidrima ugrađenima u drugom modelu. Iznos sila u tim sidrima kreće se od minimalne sile od 456,6 kN pa sve do maksimalne sile od 9424,5 kN. Mehanička sidra u drugom modelu nalaze se opterećena 1600 kN većom silom nego ona u prvom modelu u slučaju B.

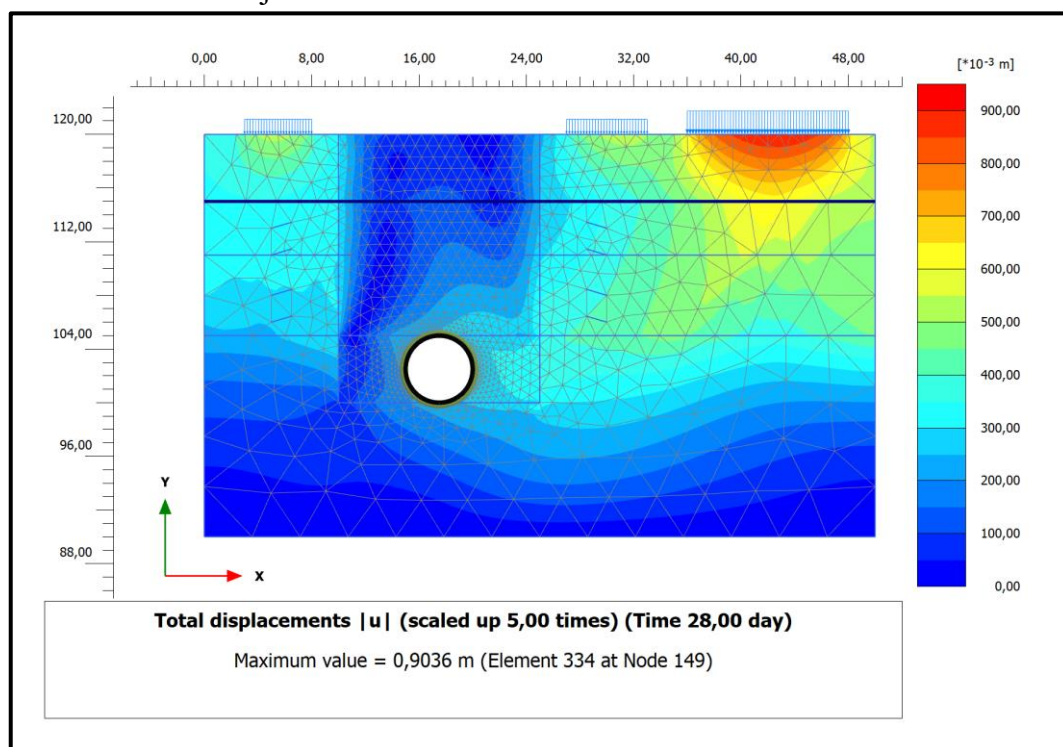
Tablica 7-5 prikazuje iznos aksijalnih sila koje preuzimaju na sebe injekcijska sidra postavljena u sloj pijeska i šljuka kao dodatno osiguranje otvorene građevne jame u drugom modelu. Tablica 7-5 odnosi se na četvrtu fazu iskopa.

Tablica 7-5. Iznos aksijalnih sila u svim injekcijskim sidrima u četvrtoj fazi (slučaj D)

Structural element ▲	Node ▲	Local number ▲	X ▲ [m]	Y ▲ [m]	N ▲ [kN]	N _{min} ▲ [kN]	N _{max} ▲ [kN]
NodeToNodeAnchor_3_1	2553	1	25,000	114,530	-216,777	-216,777	101,029
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	80462	2	30,000	113,000	-216,777	-216,777	101,029
NodeToNodeAnchor_1_1	6702	1	10,000	114,481	119,782	0,000	155,403
Element 2-2 (Node-to-node anchor)	80467	2	5,000	113,000	119,782	0,000	155,403
NodeToNodeAnchor_2_1	7924	1	10,000	112,543	83,046	0,000	98,021
Element 3-3 (Node-to-node anchor)	80472	2	5,000	111,000	83,046	0,000	98,021
NodeToNodeAnchor_4_1	4303	1	25,000	112,517	-82,664	-82,664	50,415
Element 4-4 (Node-to-node anchor)	80481	2	30,000	111,000	-82,664	-82,664	50,415
NodeToNodeAnchor_7_1	5345	1	25,000	109,488	65,884	0,000	80,585
Element 5-5 (Node-to-node anchor)	80490	2	30,000	108,000	65,884	0,000	80,585
NodeToNodeAnchor_5_1	9139	1	10,000	109,457	152,792	0,000	152,792
Element 6-6 (Node-to-node anchor)	80495	2	5,000	108,000	152,792	0,000	152,792
NodeToNodeAnchor_6_1	8882	1	10,000	107,489	205,854	0,000	205,854
Element 7-7 (Node-to-node anchor)	80500	2	5,000	106,000	205,854	0,000	205,854
NodeToNodeAnchor_8_1	5370	1	25,000	107,469	146,005	0,000	146,005
Element 8-8 (Node-to-node anchor)	80505	2	30,000	106,000	146,005	0,000	146,005

Tablica 7-5 prikazuje raspored aksijalnih sila kojima su izložena injekcijska sidra. Iznos tih sila kojim su opterećena injekcijska sidra kreće se od 65,8 kN pa sve do 216,7 kN. Međutim, injekcijska sidra svakako doprinose dodatnoj stabilnosti i sigurnosti iskopa otvorene građevne jame u drugom modelu.

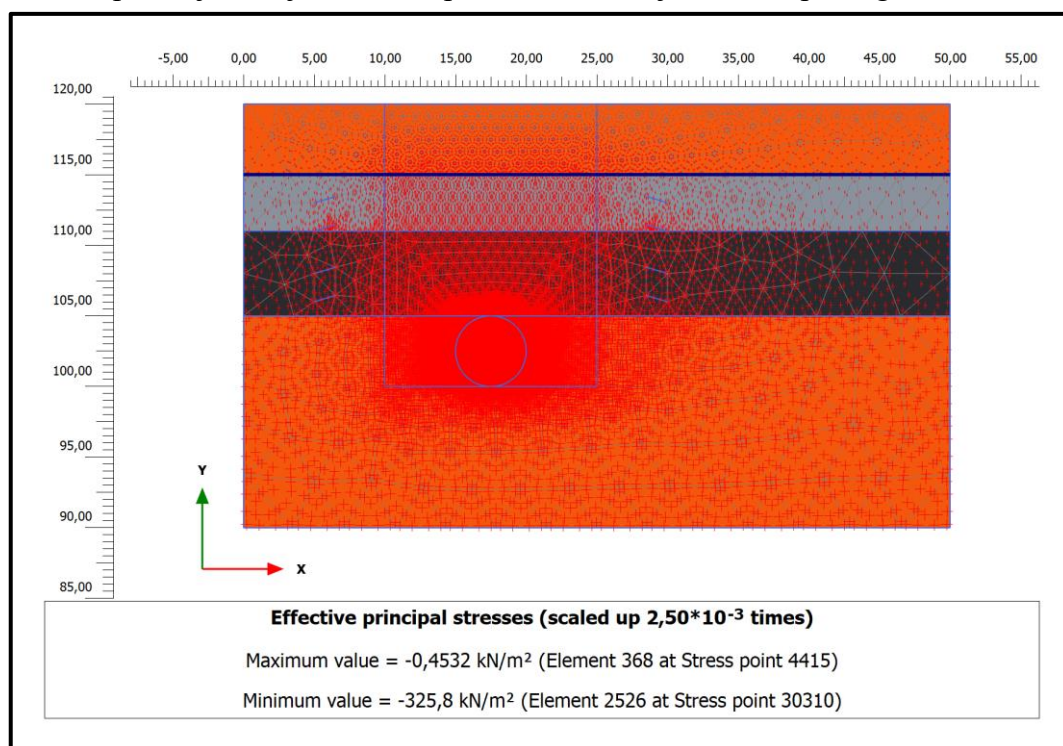
Slika 7-33 predstavlja ukupni pomak unutar modela u šestoj odnosno posljednjoj fazi provedene analize slučaja D.



Slika 7-33. Ukupni pomak u modelu u šestoj fazi (slučaj D)

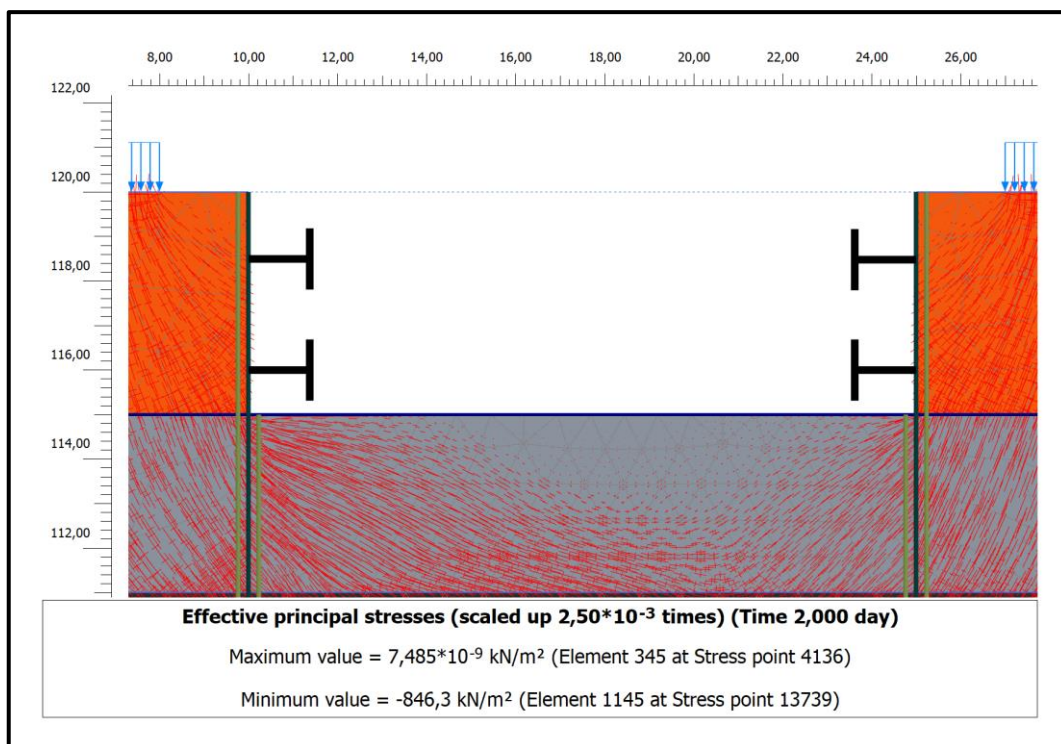
Slika 7-33 prikazuje pomak u završnoj fazi nakon izrade tunela podzemne željeznice. Građevna jama u ovoj fazi je zatvorena i tlo je vraćeno u prvotno stanje. Pomak u tlu prikazan slikom 7-33 rezultat je naknadnog pomaka u tlu zbog izrade podzemne prostorije (tunela) te zbog utjecaja vanjskih i dodatnih opterećenja. Iznos najvećeg pomaka je 0,903 metara. Može se primijetiti kako u tlu neposredno uz tunel ne dolazi do velikih pomaka. U odnosu na šestu fazu slučaja B gdje ukupni pomak u modelu iznosi 0,242 metara u ovom slučaju je pomak u šestoj fazi veći za 0,661 metara. Stvarni uvid u pomake po fazama predstavljaju inkrementalni pomaci. Iznos tih pomaka se kreće od 0,0 cm u inicijalnoj, 0,64 cm u prvoj, 0,06 cm u drugoj i trećoj, 4,40 cm u četvrtoj, 0,40 cm u petoj te 0,65 cm u šestoj fazi slučaja D. Takvi pomaci predstavljaju stvarno stanje pomaka u modelu tla. Njihov iznos je u granicama normale te ne utječu na stabilnost iskopa.

Iduće slike od 7-34 do 7-40 prikazuju raspored efektivnih naprezanja unutar svih šest faza analize drugog modela slučaja D. Kako u ovom slučaju ima utjecaja podzemne vode efektivna naprezanja nisu jednaka ukupnim već su manja za iznos pornog tlaka u skeletu tla.



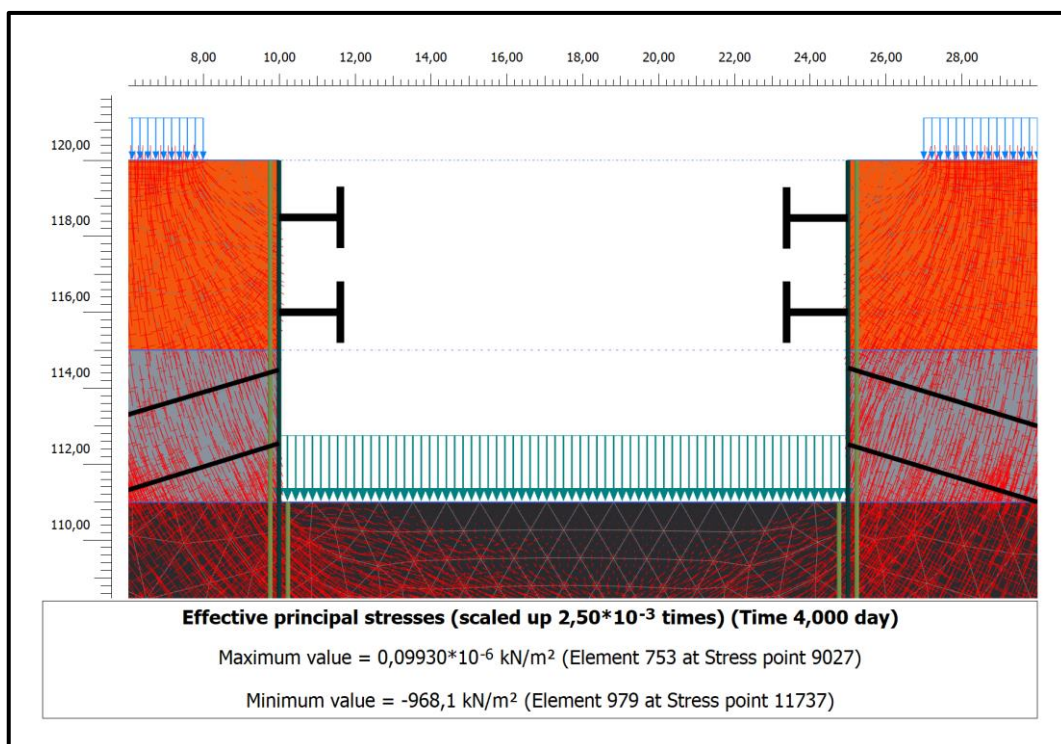
Slika 7-34. Efektivna naprezanja u inicijalnoj fazi (slučaj D)

Iz slike 7-34 vidljivo je kako se iznos efektivnih naprezanja u inicijalnoj fazi kreće od $0,453 \text{ kN/m}^2$ pa sve do $325,8 \text{ kN/m}^2$. Područja na slici označena crvenim križićima označuju raspodjelu efektivnih naprezanja. Iznos efektivnih naprezanja je u ovom slučaju je manji od iznosa efektivnih naprezanja u inicijalnoj fazi slučaja B. Razlog tome je utjecaj razine podzemne vode. Razlika efektivnih naprezanja između ove navedene dvije faze slučaja D i B iznosi 184 kN/m^2 .



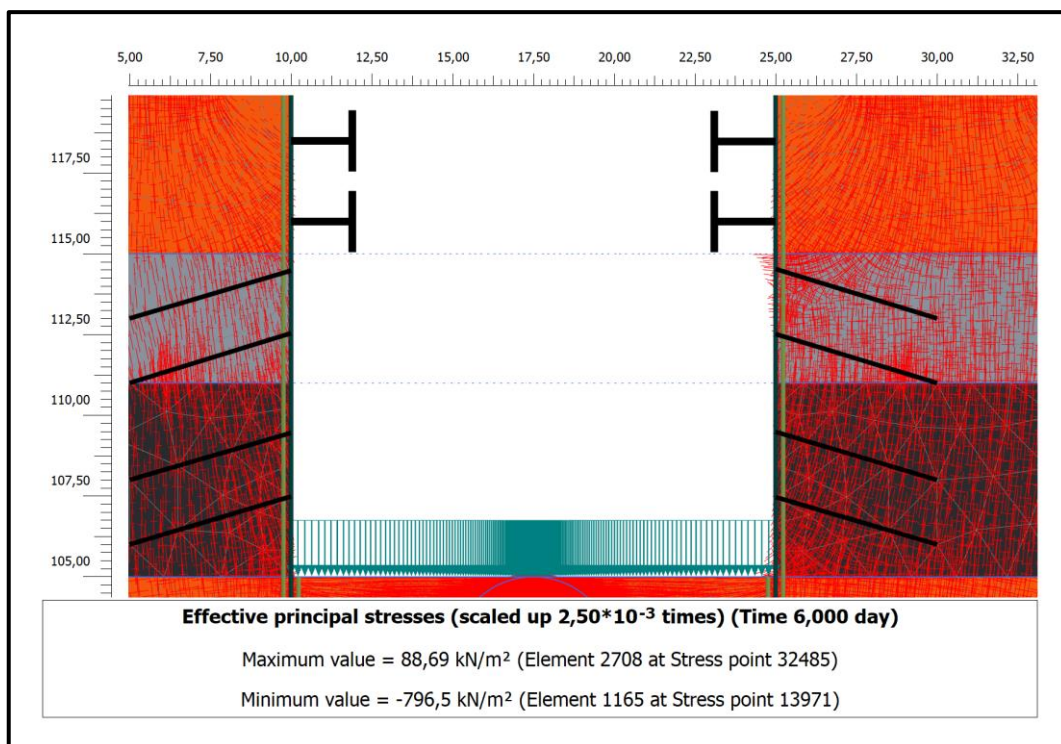
Slika 7-35. Efektivna naprezanja u prvoj fazi (slučaj D)

Iznos efektivnih naprezanja u prvoj fazi kreće se od $7,485 \times 10^{-9}$ kN/m² do 846,3 kN/m².



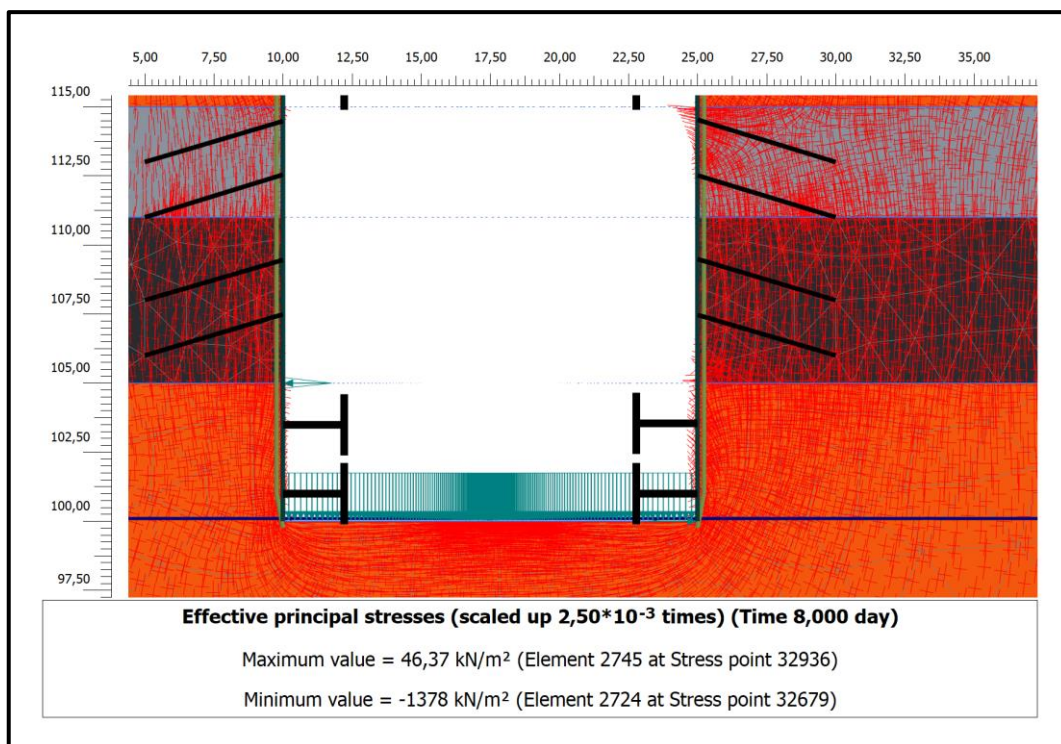
Slika 7-36. Efektivna naprezanja u drugoj fazi (slučaj D)

Iznos efektivnih naprezanja u drugoj fazi prikazanoj na slici 7-36 kreće se od $0,099 \times 10^{-6}$ kN/m² do 968,1 kN/m².



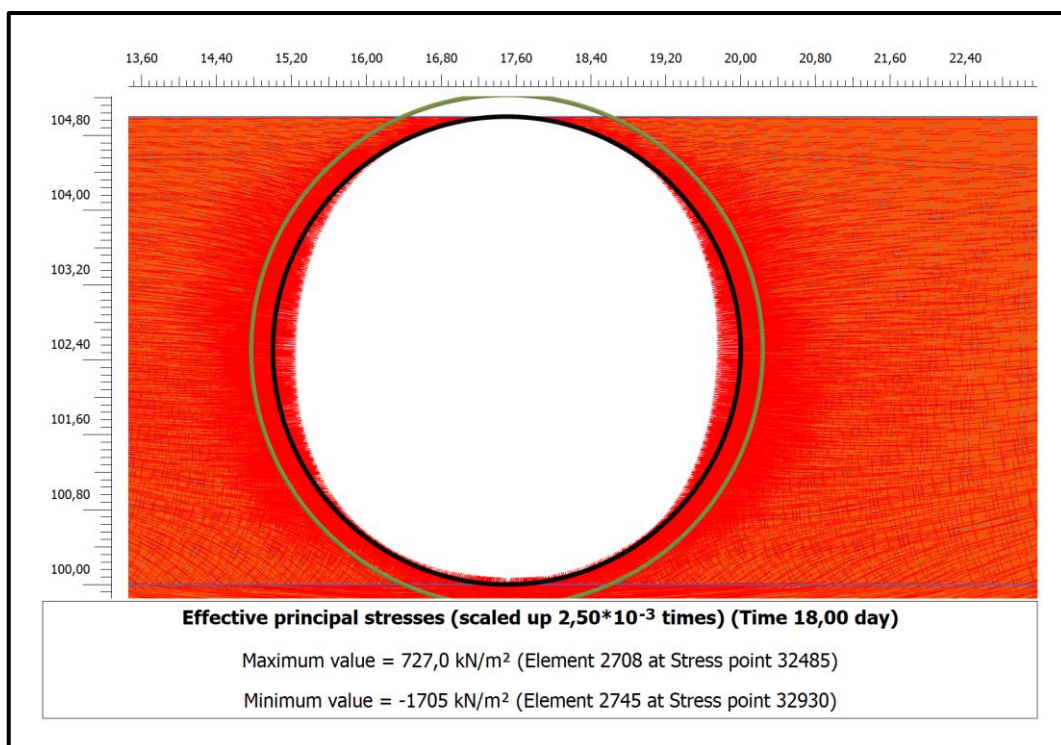
Slika 7-37. Efektivna naprezanja u trećoj fazi (slučaj D)

Iznos efektivnih naprezanja u trećoj fazi iskopa na slici 7-37 kreće se od 88,69 kN/m² pa sve do 796,5 kN/m². Područje najvećih efektivnih naprezanja u ovoj fazi nalazi se pri dnu građevne jame, tj. u sloju gline koji još nije iskopan. U usporedbi s istom fazom slučaja B u ovoj fazi iznos efektivnih naprezanja je manji za više od 500 kN/m². Taj iznos nije zanemariv i pokazatelj je koliko podzemna voda može utjecati na smanjenje naprezanja koje tlo može izdržati kada se nalazi u suhim uvjetima.



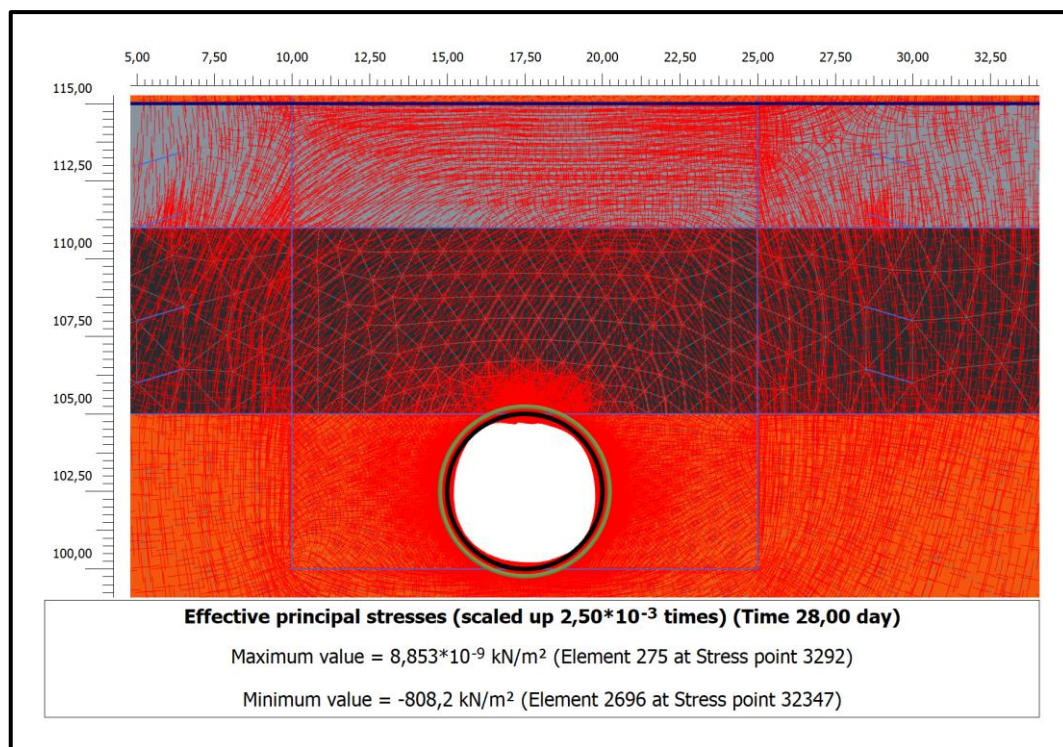
Slika 7-38. Efektivna naprezanja u četvrtoj fazi (slučaj D)

U četvrtoj fazi slučaja D iznos efektivnih naprezanja kreće se od 46,37 kN/m² do 1378 kN/m². Područja najvećeg intenziteta efektivnih naprezanja nalaze se oko dna građevne jame te oko zidova dijafragme.



Slika 7-39. Efektivna naprezanja u petoj fazi (slučaj D)

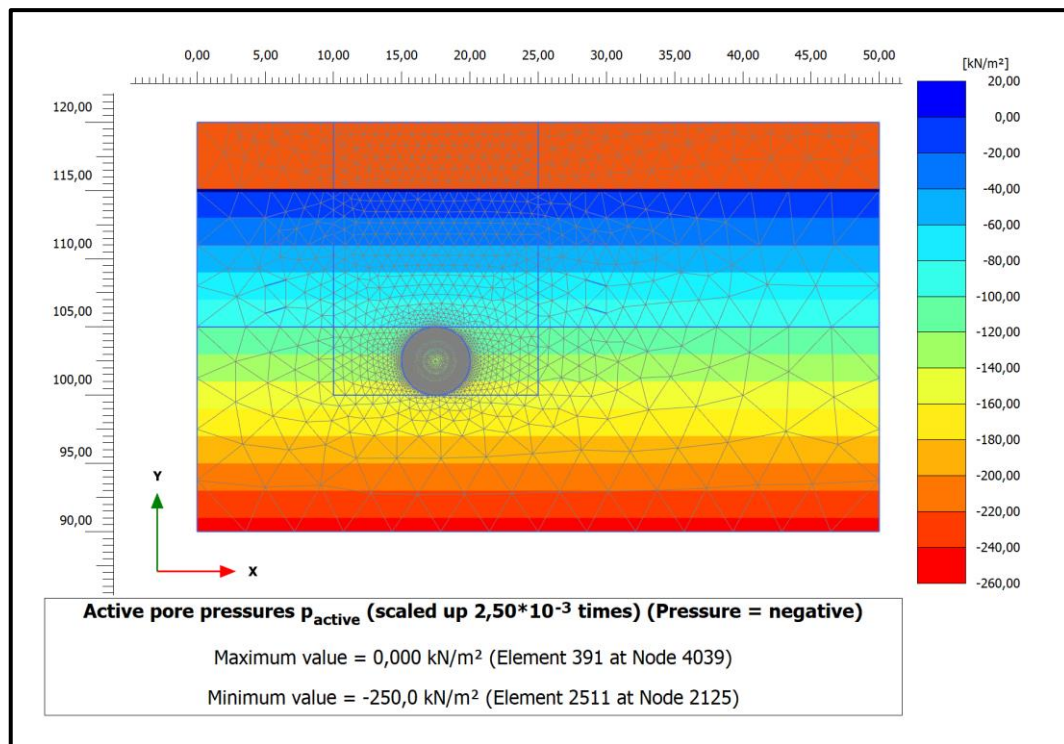
Iznos efektivnih naprezanja u petoj fazi kreće se od $727,0 \text{ kN/m}^2$ do 1705 kN/m^2 . Na slici 7-39 izbliže je prikazana raspodjela efektivnih naprezanja u sloju tla nakon instalacije tunela podzemne željeznice. Iz slike se može vidjeti kako se najveća koncentracija odnosno intenzitet efektivnih naprezanja nalazi upravo oko tunelske obloge. U usporedbi s istom fazom slučaja B i u ovoj fazi je iznos efektivnih naprezanja manji.



Slika 7-40. Efektivna naprezanja u šestoj fazi (slučaj D)

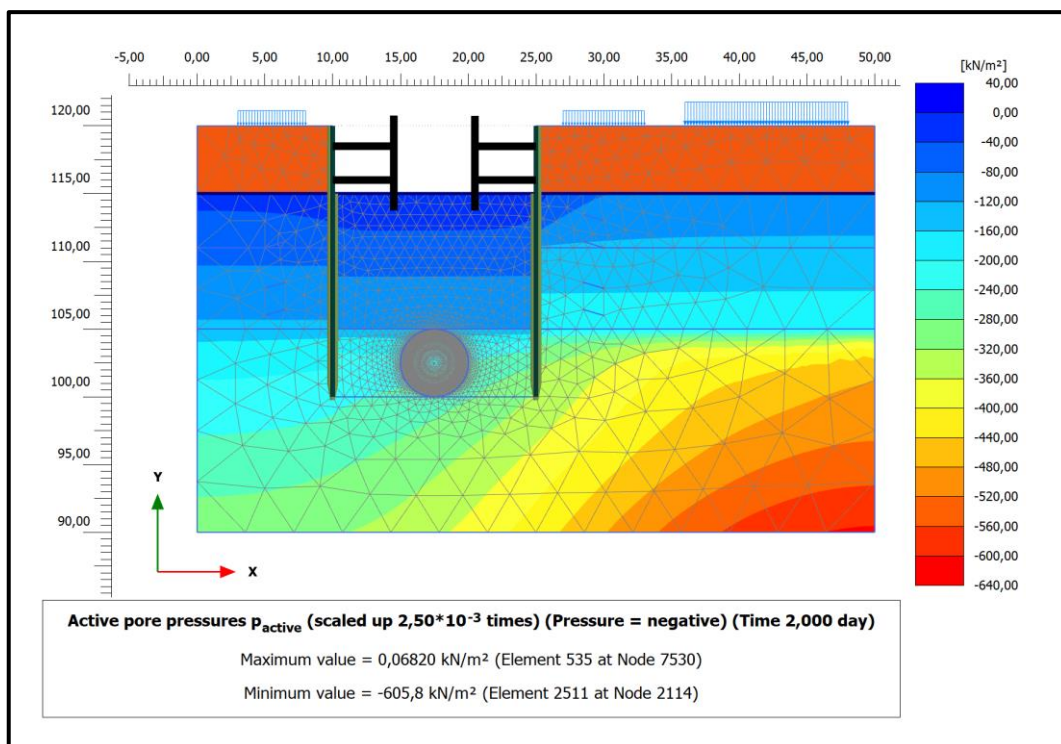
Slikom 7-40 prikazana je završna faza slučaja D. Iznos efektivnih naprezanja u navedenoj fazi kreće se od $8,853 \times 10^{-9} \text{ kN/m}^2$ do $808,2 \text{ kN/m}^2$. U usporedbi s prethodnom petom fazom slučaja D iznos efektivnih naprezanja se smanjuje.

Slikama od 7-41 do 7-47 prikazana je raspodjela pornih tlakova kroz svih šest faza slučaja D. Raspodjela pornih tlakova prikazana je za uvjete iskopa ovog modela gdje se razina podzemne vode u tlu spušta kako iskop napreduje prema dnu. To jest slike od 7-41 do 7-46 prikazuju konačnu disipaciju pornih tlakova. Takva raspodjela daje uvid u ponašanje dugoročne stabilnosti za ovakve vrste zahvata u tlu.



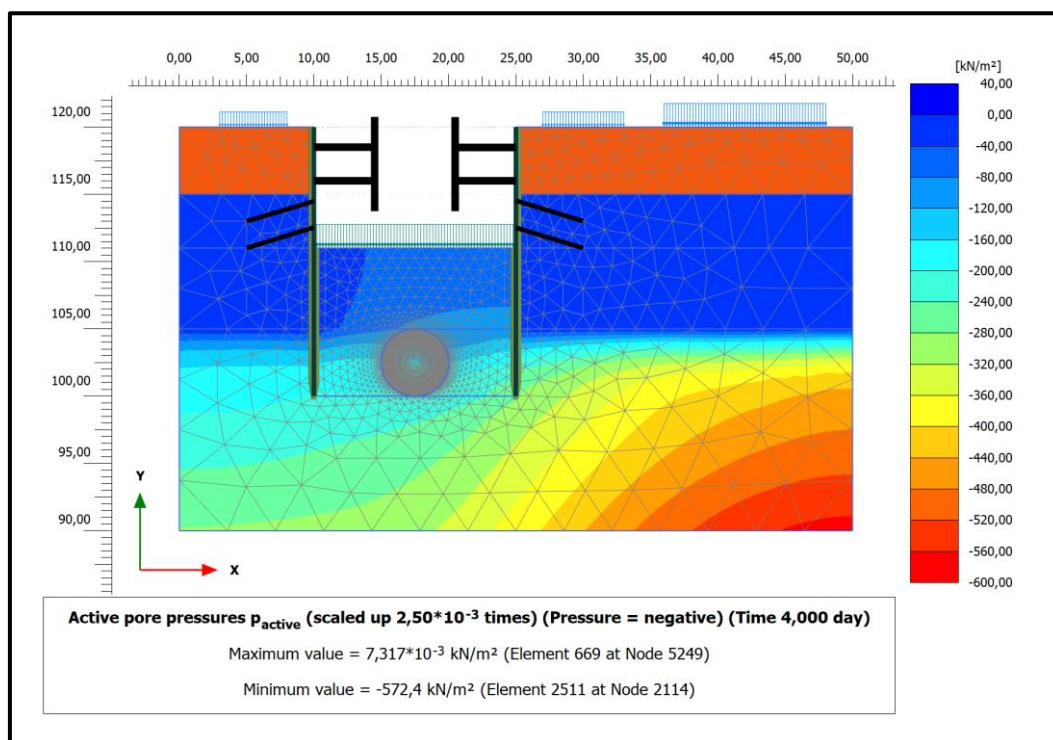
Slika 7-41. Raspodjela pornih pritisaka u inicijalnoj fazi (slučaj D)

Slika 7-41 donosi prikaz raspodjele pornih tlakova u inicijalnoj fazi analize drugog modela. Kao što se može vidjeti raspodjela pornih tlakova u toj fazi je linearna i povećava se s dubinom. Iznos pornih tlakova se kreće od 0,0 kN/m² pri vrhu linije vodnog lica do 250 kN/m² na dnu modela.



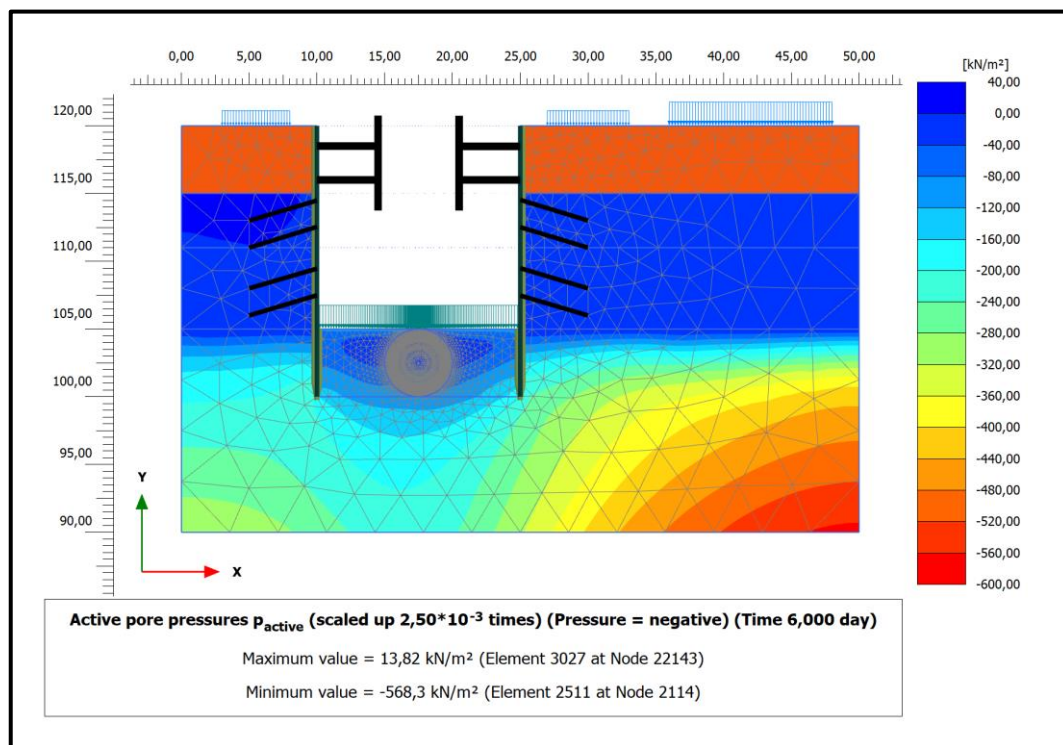
Slika 7-42. Raspodjela pornih tlakova u prvoj fazi (slučaj D)

U prikazanoj fazi na slici 7-42 iznos pornih tlakova se kreće od $0,068 \text{ kN/m}^2$ do $605,8 \text{ kN/m}^2$. Zidovi dijafragme nalaze se u zoni linearnog opterećenja koje blago raste prema dnu građevne jame. Takav raspored opterećenja omogućuje upotreba nosivih i stabilizacijskih elemenata.



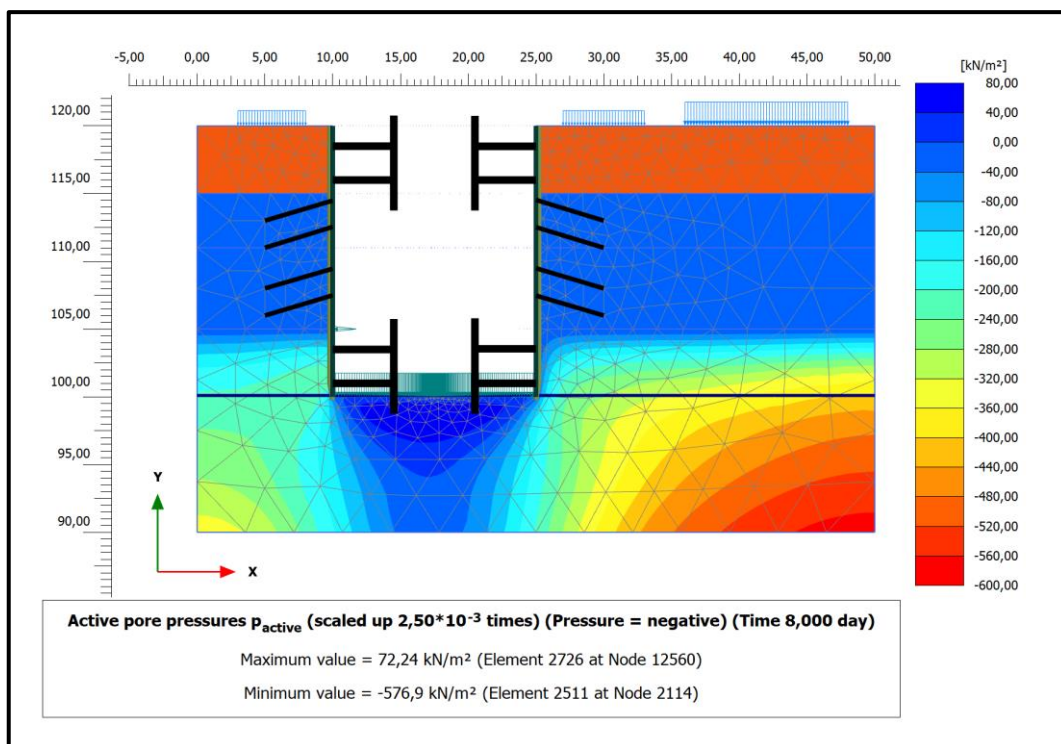
Slika 7-43. Raspodjela pornih tlakova u drugoj fazi (slučaj D)

Iznos pornih tlakova u drugoj fazi kreće se od $7,317 \times 10^{-3} \text{ kN/m}^2$ pa do $572,4 \text{ kN/m}^2$. Područje s najvećim iznosima se nalazi u krajnjem desnom rubu modela.



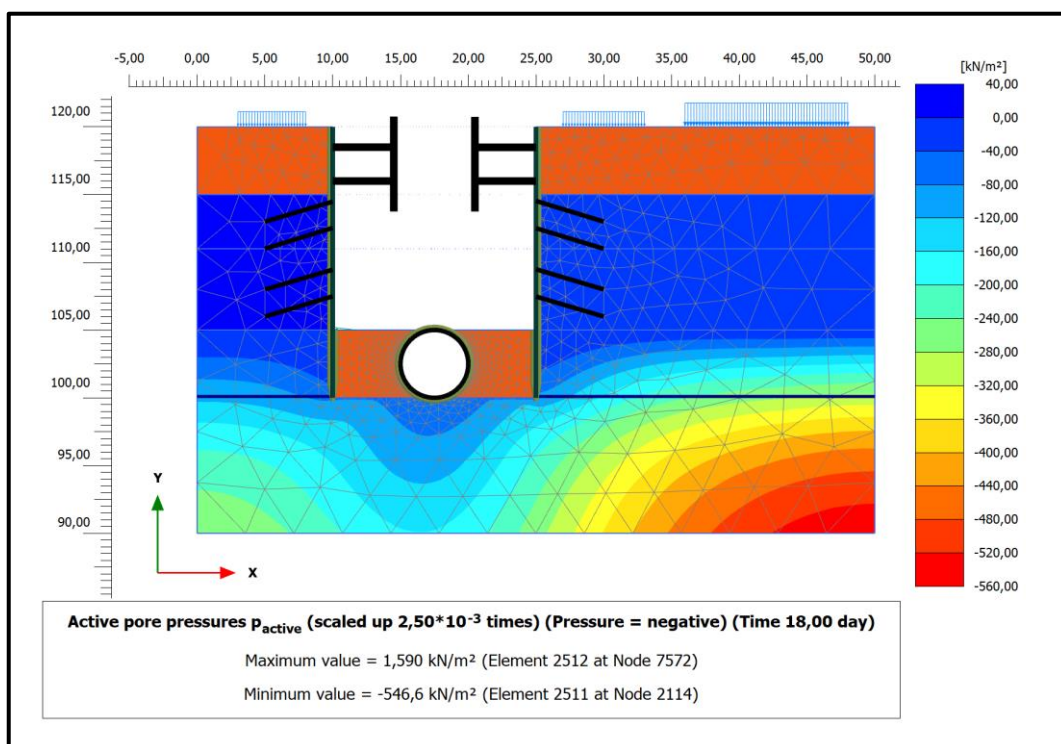
Slika 7-44. Raspodjela pornih tlakova u trećoj fazi (slučaj D)

Iznos pornih tlakova u trećoj fazi prikazanoj na slici 7-44 kreće se od $13,82 \text{ kN/m}^2$ do $568,3 \text{ kN/m}^2$. Raspodjela pornih tlakova u trećoj fazi slična je kao i u drugoj fazi na slici 7-43.



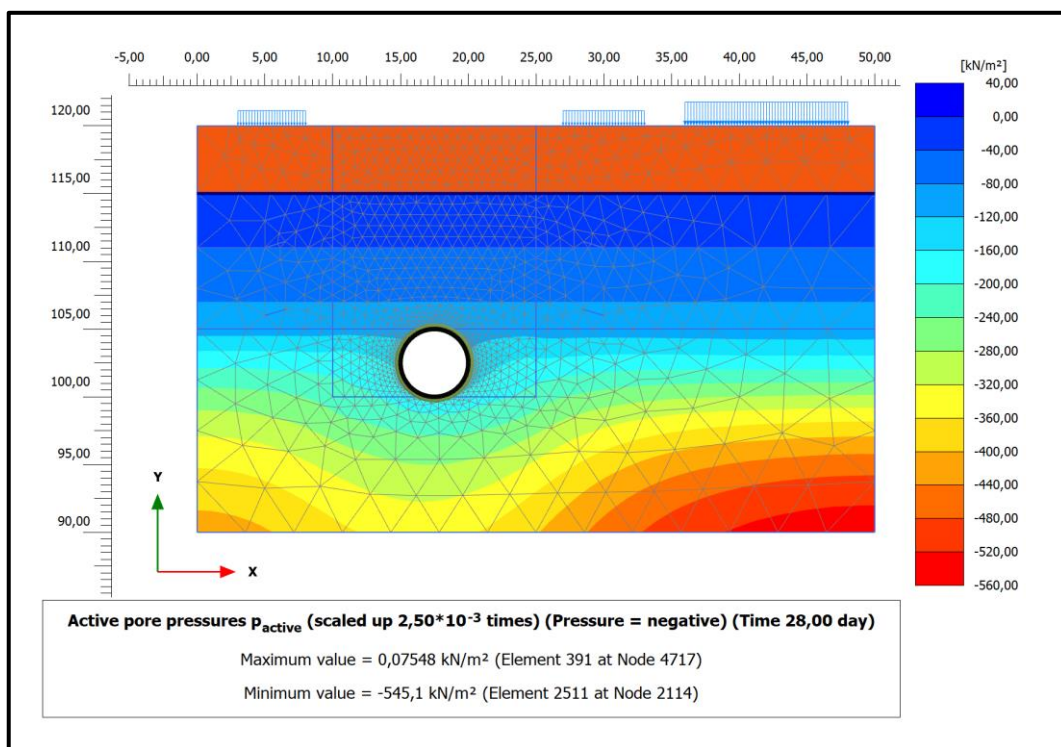
Slika 7-45. Raspodjela pornih tlakova u četvrtoj fazi (slučaj D)

Iznos pornih tlakova u četvrtoj fazi kreće se od 72,24 kN/m² do 576,9 kN/m². Na slici 7-45 može se vidjeti kako se svih sidara u modelu područje (tlo) oko u potpunosti iskopane građevne jame nalazi pod vrlo ujednačenim i relativno niskim iznosom pornih tlakova.



Slika 7-46. Raspodjela pornih tlakova u petoj fazi (slučaj D)

U petoj fazi iznos pornih tlakova kreće se od $1,590 \text{ kN/m}^2$ do $546,6 \text{ kN/m}^2$. U ovoj fazi prikazanoj na slici 7-46 nema utjecaja podzemne vode u sloju gline kod instalacije tunela u model. To je posljedica definiranja karakteristika zidova dijafragme koji su nepropusni dok je dno građevne jame propusno. Međutim u ovoj fazi je uzeta u obzir činjenica da se voda s područja dna građevne jame crpi u onolikoj mjeri da ista ostane suha tijekom instalacije tunela. Razina podzemne vode naznačena je plavom linijom na slici 7-46.



Slika 7-47. Raspodjela pornih tlakova u šestoj fazi (slučaj D)

Iznos pornih tlakova u šestoj fazi prikazanoj na slici 7-47 kreće se od $0,075 \text{ kN/m}^2$ do $545,1 \text{ kN/m}^2$. Područje s najvećim iznosom pornih tlakova nalazi se na donjem desnom rubu modela. Oko tunela podzemne željeznice raspodjela pornih tlakova je jednolika te u iznosu od 120 pa do 160 kN/m^2 . Razina podzemne vode u ovoj fazi je na istom mjestu kao i u inicijalnoj fazi. Međutim raspodjela pornih tlakova je različita zbog utjecaja vanjskih opterećenja, ali i instaliranog tunela podzemne željeznice.

Zaključno, numeričke analize napravljene za četiri slučaja pokazale su sljedeće:

- izrada podzemne željeznice iskopom bez podupiranja do dubine od 20 m nije moguća, jer su za slučaj A i C analize pokazale kolaps tla,

- uz primjenu nosivih i stabilizacijskih elemenata iskop je moguće napraviti bez sloma tla i prevelikih deformacija (slučaj B i D)
- utjecaj podzemne vode prikazan za slučaj C i D pokazuje kako podzemna voda utječe na smanjenje nosivosti tla i otežava uvjete iskopa.

Može se zaključiti kako je zahvat prikazan u izlaznim rezultatima ovog poglavlja sigurnije izvoditi uz pomoć nosivih stabilizacijskih elemenata i u uvjetima niskih vodostaja rijeke Save, tj. niskih razina podzemne vode u tlu.

8. ZAKLJUČAK

Zbog sve većeg broja vozila na gradskim prometnicama grada Zagreba, koje su tijekom izgradnje bile projektirane za puno manje prometno opterećenje, u zadnjih dvadesetak godina u gradu Zagrebu javlja se potreba za efikasnijim i jeftinijim rješenjima gradskih prometnih gužvi. Projekt izvedbe podzemne željeznice, opisan u ovom diplomskom radu, donio bi gradu Zagrebu rasterećenje prometnica, te brojne druge pogodnosti u smislu bržeg povezivanja gradskih i prigradskih naselja, smanjenje emisija CO₂, jeftinijeg gradskog prijevoza i slično.

U uvodu su opisane metode izrade gradskih podzemnih željeznica, numeričke metode proračuna stanja naprezanja i deformacija, te potrebni podatci o parametrima tla/stijena bitni za projektiranje i izvedbu podzemnih prostorija. U nastavku je detaljnije opisana geologija područja grada Zagreba, metoda izrade podzemne željeznice metodom širokog iskopa (*Cut and Cover method*), te izabrana trasa buduće podzemne željeznice, koja je korištena za kreiranje numeričkog modela. Izgradnja gradske podzemne željeznice metodom širokog iskopa (*Cut and Cover method*) uobičajena je metode izrade u već razvijenim urbanim sredinama. Obzirom na potrebe izgradnje u urbanim sredinama, ozbiljnost pristupa pri izradi otvorenih građevnih jama od neizmjerne je važnosti. U današnje vrijeme iskop dubokih otvorenih građevnih jama u urbanim sredinama predstavlja svojevrstan izazov, jer na iskop ne utječu samo materijali tla i podzemna voda, nego mogući utjecaj postojećih objekata kao dodatnog opterećenja i obrnuto utjecaj iskopa na postojeće, često starije objekte od kojih su neki i zaštićena kulturna baština.

Numeričko modeliranje provedeno je u računalnom programu „*Plaxis 2D*“. Numeričke analize napravljene su za dva modela i četiri scenarija izrade podzemne željeznice. Oba modela imaju istu geometrijsku diskretizaciju i sastoje se od istih slojeva tla dobivenih uz pomoć izrađenih i prikazanih prognoznih geotehničkih profila dobivenih na osnovu podataka iz EGPV baze podataka. Razlika između dva ulazna modela sastoji se u korištenju različitih stabilizacijskih elemenata i razine podzemne vode. U model je uključen i strukturni element tunela koji simulira tunel podzemne željeznice. Napravljene su ukupno četiri odvojene analize, čiji su rezultati prikazani u poglavlju izlaznih rezultata. Cilj praktičnog dijela je bio simulirati iskop otvorene građevne jame u kojoj bi se dio po dio izgradio sustav podzemne željeznice na području grada Zagreba. Na taj način željelo se utvrditi ponašanje

matične stijene/tla kroz koje tunel prolazi kao i opterećenje koje mora preuzeti tunelska obloga.

Modeli su pokazali da će izgradnja podzemne željeznice zahtijevati primjenu neke od mogućih metoda stabilizacije iskopa, obzirom da je u osnovnom modelu bez predviđenog sustava podupiranja došlo do kolapsa tla. Stoga su provedene i numeričke analize u kojima je predviđena izgradnja vertikalne stijenske pridržane geotehničkim sidrima, kao jednog od mogućih rješenja za izvedbu podzemne željeznice na malim dubinama iskopa i u rahlim materijalima.

Ovaj diplomski rad predstavlja samo preliminarni ili idejni proračun izvedbe buduće podzemne željeznice, obzirom da su korišteni podatci iz postojećih bušotina, a ne podatci iz istražnih radova koji bi pratili trasu buduće podzemne željeznice i uz ciljana terenska i laboratorijska ispitivanja materijala. Uz detaljno planiranje, izvedbu istražnih radova i modeliranje utemeljeno na tako prikupljenim podacima, moguće je dobro planirati, projektirati i izvesti buduću podzemnu željeznicu u Zagrebu, koja će biti dovoljno sigurna i ekonomski opravdana.

9. POPIS LITERATURE

1. BAČANI, A. i POSAVEC, K., 2009. Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta Velika Gorica. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
URL:<https://www.yumpu.com/xx/document/read/22046127/elaborat-zatitnih-zona-vodocrpilita-velika-gorica-grad-velika-gorica> (6.11.2020.)
2. DUGONJIĆ JOVANČEVIĆ, S., 2017., Inženjerska mehanika stijena: interna skripta. Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci.
URL:<https://qdoc.tips/skripta-inenjerska-mehanika-stijena-pdf-free.html> (6.11.2020.)
3. IVAS, D., 2019. Opterećenje na tunelsku podgradu i primjena nove austrijske tunelske metode. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko - naftni fakultet, Zagreb.
URL:<https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn%3A1053> (4.11.2020.)
4. KAUL, K., 2010. Cut-and-Cover Metro Structures Geo-Structural Design: An Integrated Approach, 1.izd. Abingdon: Spon Press.
5. KOLIĆ, D., KOLIĆ, V., 2001. Prihvatljivost podzemne željeznice u Zagrebu. Građevinar, 53(9), str. 563-571.
6. KOLIJI, A., 2014. Geotechnical Parameters.
URL: <http://www.geotesting.info/parameter/parameter.html> (23.11.2020.)
7. LESI, D. (2017): Podzemne željeznice u prometnim sustavima gradova. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb.
URL: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fpz:919> (2.11.2020.)
8. PLAXIS, 2016. Material Models. s.1.: Bentley Systems, Incorporated.
9. PLAXIS, 2019. Manual. s.1.: Bentley Systems, Incorporated.
10. PRIMORAC, N., 2019., Geometrijski oblik tunela; seminarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
11. ŠKUDAR, S., 2016. Hidraulička povezanost aluvijalnih i proluvijalnih naslaga zagrebačkog vodonosnika. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
URL:<https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:470> (10.11.2020.)
12. VRKLJAN, I., 2013, Podzemne građevine i tuneli. Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, Institut građevinarstva Hrvatske d.d Zagreb.

13. ZELENA AKCIJA, 2010. Analiza zagrebačkog prometnog sustava i preporuke za njegovo poboljšanje.

URL:www.odraz.hr/media/54296/analiza_zg_prometnog_sustava_i_preporuke_za_poboljsanje.pdf (5.11.2020.)