

3D analiza stabilnosti tunela Grič

Mance, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:723757>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Ivan Mance

3D analiza stabilnosti tunela Grič

Diplomski rad

Rijeka, 2021.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI

Sveučilišni diplomski studij
Geotehnika
Podzemne građevine i tuneli

Ivan Mance
JMBAG: 0114025009

3D analiza stabilnosti tunela Grič

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2021

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema diplomskog rada

3D ANALIZA STABILNOSTI TUNELA GRIČ

3D STABILITY ANALYSIS OF THE GRIČ TUNNEL

Kandidat: **IVAN MANCE**

Kolegij: **PODZEMNE GRAĐEVINE I TUNELI**

Diplomski rad broj: **G-2021-41**

Zadatak:

Rad se bazira na izradi jednog segmenta 3D modela tunela Grič u Rocscience, RS3 softveru. Cilj rada je na realnoj podlozi i uvjetima u kojima je tunel izveden analizirati naprezanja i deformacije tijekom iskopa, s posebnim naglaskom na ponašanje materijala u području neiskopanog dijela tunela gdje je moguće očekivati prednost u odnosu na 2D model izrađen u RS2 softveru. Model se bazira na poprečnom presjeku s najvećim nadslojem, unutar jedne od geoteničkih jedinica na trasi tunela. Analizom će se pokušati potvrditi teorijska saznanja i očekivanja konvergencije tunela te kontrola pomaka konture iskopa ugradnjom primarnog sklopa podgrade.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.

Komentor:

dr. sc. Josip Peranić,
mag. ing. aedif.

Mentorica:

izv. prof. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i komentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Ivan Mance

U Rijeci, 20. rujna 2021.

ZAHVALA

Zahvajujem se mentorici izv.prof.dr.sc. Sanji Jovančević Dugonjić i komentoru dr.sc. Josipu Peraniću na savjetima i strpljivosti te svestranoj pomoći koja mi je bila potrebna za dovršetak ovog diplomskog rada.

Sažetak

Cilj diplomskog rada je izrada 2D i 3D modela tunela Grič. Modeli su izrađeni na poprečnom presjeku desne cijevi tunela dobivenog odabirom najnepovoljnijeg profila s najvećim nadslojem materijala. Materijali su istih parametara čvrstoće preuzetih iz istražnih radova prema projektu Tunela Grič. Oba modela izrađena su na istom poprečnom presjeku i s istim materijalom kako bi se simulirali isti *in situ* uvjeti. Provedena je numerička analiza oba modela u računalnim programima tvrtke Rocscience, za 2D model u programu RS2 i za 3D model u programu RS3. Dobiveni rezultati oba modela su međusobno uspoređeni.

Ključne riječi: numeričko modeliranje, stijenska masa, primarna podgrada, konvergencija, rubni uvjeti, diskretizacija

Summary

The objective of master thesis is to create 2D and 3D models of the tunnel Grič. The models are made on the cross section of the right tunnel pipe obtained by selecting most unfavorable profile with the largest layer of material. Materials are of the same strength parameters taken from geological survey according to Tunel Grič project. Both models are made on the same cross section and with same material to simulate *in situ* conditions. Numerical analysis was performed for both models in Rocscience software, for the 2D model in RS2 and for the 3D model in RS3. The obtained results of the both models were compared with each other.

Key words: numerical modeling, rock mass, primary support, convergence, boundary conditions, discretization

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. NUMERIČKO MODELIRANJE U TUNELGRADNJI	3
2.1. Općenito o numeričkom modeliranju.....	3
2.2. Usporedba 2D i 3D modela.....	4
2.3. Metoda konačnih razlika i Metoda konačnih elemenata.....	5
2.4. Metoda graničnih elemenata.....	5
2.5. Metoda diskretnih elemenata	6
3. ROCSCIENCE RS3.....	8
3.1. Uvodno o Rocscience RS3	8
3.2. RS3 vodič za brzi početak	8
3.2.1. Uvod	8
3.2.2. Započinjanje modela	9
3.2.3. Definiranje materijala.....	11
3.2.4. Kreiranje geometrije	13
3.2.5. Iskop.....	13
3.2.6. Izrada faza iskopa.....	18
3.2.7. Dodavanje opterećenja	19
3.2.8. Postavljanje rubnih uvjeta.....	20
3.2.9. Definiranje mreže.....	21
3.2.10. Računski rezultati.....	22
3.2.11. Tumačenje rezultata.....	23
4. ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI STIJENSKE MASE.....	28
4.1. Hoek-Brown kriterij čvrstoće	28
4.1.1. Opći oblik Hoek-Brown kriterija čvrstoće	29
4.1.2. Jednoosna tlačna čvrstoća σ_{ci}	31
4.1.3. Određivanje vrijednosti konstante m_i	33
4.1.4. GSI klasifikacija.....	35
4.1.5. Faktor poremećenja D.....	36
4.1.6. Deformabilnost stijenske mase	37

4.2. Mohr-Coulomb-ov kriterij posmične čvrstoće.....	40
5. TEHNIKE STABILIZACIJE TUNELA	42
5.1. Armiranje stijenske mase	42
5.2. Primarna i sekundarna podgrada	43
5.3. Stijenska sidra.....	43
5.4. Štapna sidra	44
5.4.1. Mehanički usidrena štapna sidra.....	44
5.4.2. Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti	45
5.4.3. Trenjem usidrena štapna sidra	47
5.5. Mlazni beton	49
5.5.1. Suhi postupak.....	49
5.5.2. Mokri postupak	50
5.5.3. Armiranje mlaznog betona.....	51
6. TUNEL GRIČ	53
6.1. Opis lokacije.....	53
6.2. Geotehnički istražni radovi	53
6.3. Geološki opis masiva.....	54
6.4. Zoniranje stijenske mase duž trase tunela na geotehničke jedinice	55
6.5. Određivanje prognoza tipova primarnih sklopova.....	57
7. ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE STIJENSKE MASE NA LOKACIJI	61
7.1. Analize parametara čvrstoće.....	61
7.2. Procjena deformabilnosti.....	62
7.3. Geostatička naprezanja.....	63
8. 3D ANALIZE TUNELA GRIČ	64
8.1. Izrada 3D numeričkog modela	64
8.1.1. Definiranje materijala.....	64
8.1.2. Kreiranje geometrije	65
8.1.3. Izrada tunela.....	66
8.1.4. Ugradnja tunela u geometriju	69
8.1.5. Postavljanje rubnih uvjeta.....	71
8.1.6. Definiranje mreže.....	72
8.1.7. Proračun modela	73

8.2 Rezultati.....	74
8.2.1. Geostatička naprezanja.....	74
8.2.2. Pomaci modela	79
8.2.3. Kapacitet sidra.....	88
9. PROGRAM GEOTEHNIČKOG PRAĆENJA TUNELA TIJEKOM IZVEDBE	92
9.1. Geotehnička opažanja.....	92
9.2. Mjerenje pomaka	92
9.2.1. Mjerenje pomaka konture iskopa (konvergencija)	93
9.2.2. Mjerenje pomaka unutar stijenske mase	94
9.2.3. Klizni deformetar.....	94
9.3. Opažanja naprezanja u mlaznom betonu i betonskoj oblozi.....	95
9.4. Opažanje sidara	95
9.5. Primjena na tunelu Grič.....	95
9.5.1. Kontrolna mjerenja.....	95
9.5.2. Podgradna mjerenja	96
9.5.3. Procedura verifikacije stabilnosti podzemnog iskopa	97
10. ZAKLJUČAK.....	98
11. LITERATURA.....	100

Popis slika i tablica:

Popis slika	Stranica
<i>Slika 1. Postavke mjernih jedinica unutar Project settingsa [8].....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2. Postavke faza unutar Project settingsa [8]</i>	<i>10</i>
<i>Slika 3. Postavke podzemne vode unutar Project settingsa [8]</i>	<i>10</i>
<i>Slika 4. Postavke Display optiona [8]</i>	<i>11</i>
<i>Slika 5. Svojstva tla [8]</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6. Svojstva betona [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 7. Postavke kutova unutar Create external prozora [8].....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 8. Postavke za kreiranje tunela [8]</i>	<i>13</i>
<i>Slika 9. Prikaz modela sa izvedenim tunelom [8].....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 10. Postavke za kreiranje kruga temelja [8].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 11. Prikaz modela sa izvedenim tunelom i temeljem [8].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 12. Postavke za iskop temelja [8].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 13. Prikaz problem interakcije između vanjskog volumena s tunelom i temeljem [8]</i>	<i>17</i>
<i>Slika 14. Postavke za Divide All Parameters [8].....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 15. Prikaz 3D modela sa izvedenim tunelom i temeljem [8].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 16. Faze izrade tunela i temelja [8]</i>	<i>18</i>
<i>Slika 17. Prikaz prozora za dodavanje površinskog opterećenja [8]</i>	<i>19</i>
<i>Slika 18. Prikaz prozora za dodavanje polja naprezanj [8]</i>	<i>20</i>
<i>Slika 19. Prikaz ograničenog modela [8].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 20. Prikaz postavki mreže [8]</i>	<i>21</i>
<i>Slika 21. Prikaz proračuna rezultata za izrađeni model [8]</i>	<i>22</i>

<i>Slika 22. Prikaz padajućeg izbornika [8].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 23. Prikaz odabira koordinata ravnine [8]</i>	<i>23</i>
<i>Slika 24. Prikaz odabira konturnih opcija [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 25. Prikaz vertikalnih efektivnih naprezanja za fazu 4 [8].....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 26. Prikaz vertikalnih efektivnih naprezanja za fazu 5 [8].....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 27. Prikaz ukupnih pomaka za faze 2- 5 [8]</i>	<i>26</i>
<i>Slika 28. Prikaz ukupnih pomaka po dubini za faze 2 i 5 [8]</i>	<i>27</i>
<i>Slika 29. Prikaz primjenjivosti H-B kriterija čvrstoće, prema [10]</i>	<i>28</i>
<i>Slika 30. PLT ispitivanje a.) na uzorku izabranom s površine b.) na uzorku dobivenom iz bušotine [11]</i>	<i>31</i>
<i>Slika 31. Utjecaj veličine uzorka na čvrstoću stijenske mase [11]</i>	<i>33</i>
<i>Slika 32. Preporuke za odabir vrijednosti faktore poremećenja [9].....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 33. Usporedba između rezultata dobivenih terenskim ispitivanjima i deformacijskih modula procijenjenih različitim empirijskim metodama, [15].....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 34.. Odnosi između većih i manjih glavnih naprezanja za Hoek-Brown i ekvivalentni Mohr-Coulomb kriterij čvrstoće [9, 13]</i>	<i>41</i>
<i>Slika 35. Prikaz armiranja (lijevo) i podupiranja (desno) [16].....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 36. Primarna podgrada (lijevo) i sekundarna podgrada (desno) [16].....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 37. Aktivno (lijevo) i pasivno (desno) sidro [16]</i>	<i>44</i>
<i>Slika 38. Mehanički usidreno štapno sidro [17]</i>	<i>45</i>
<i>Slika 39. Injektirano štapno sidro [17]</i>	<i>45</i>
<i>Slika 40. Samobušivo štapno sidro [17].....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 41. Standardno pleteno sidro od čeličnih niti niti; a) Standardni tip, b) Garford bulb, c) Nutcase i d) Birdcage [17].....</i>	<i>47</i>

<i>Slika 42. Trenjem usidreno štapno sidro (Split Set) [17]</i>	48
<i>Slika 43. Trenjem usidreno štapno sidro (Swellex) [17]</i>	49
<i>Slika 44. Skica tipičnog sustava za suhi postupak ugradnje mlaznog betona, prema [18]</i>	50
<i>Slika 45. Skica tipičnog sustava za mokri postupak ugradnje mlaznog betona, prema [18]</i>	50
<i>Slika 46. Ponašanje armiranog i nearmiranog betona [16]</i>	51
<i>Slika 47. Prikaz različitih tipova čeličnih vlakana [18]</i>	51
<i>Slika 48. Prikaz varene čelične mreže (lijevo) i žičanog pletiva (desno) [16]</i>	52
<i>Slika 49. Prikaz portala desne cijevi tunela Grič, smjer Zagreb-Split [20]</i>	53
<i>Slika 50. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 1 desne cijevi tunela [21]</i>	55
<i>Slika 51. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 2 desne cijevi tunela [21]</i>	56
<i>Slika 52. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 3 desne cijevi tunela [21]</i>	56
<i>Slika 53. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 4 desne cijevi tunela [21]</i>	57
<i>Slika 54. Proračun čvrstoće stijenske mase u RocData</i>	62
<i>Slika 55. Dimenzije poprečnog presjeka za promatrani profil</i>	65
<i>Slika 56. Dobivena 3D geometrija</i>	66
<i>Slika 57. Poprečni presjek iskopa tunela</i>	67
<i>Slika 58. Poprečni presjek iskopa tunela podijeljen u dva dijela</i>	67
<i>Slika 59. Tunel izrađen u Tunnel Designer-u</i>	69
<i>Slika 60. Vrijednosti udaljenosti X i Z</i>	69
<i>Slika 61. Prikaz 3D modela ugrađenog i neiskopanog tunela</i>	70
<i>Slika 62. Prikaz rubnih uvjeta na modelu</i>	71
<i>Slika 63. Prikaz diskretiziranog modela</i>	72
<i>Slika 64. Prikaz rezultata izrađenog modela</i>	73

<i>Slika 65. Geostatička vertikalna naprezanja na 2D modelu.....</i>	<i>74</i>
<i>Slika 66. Geostatička vertikalna naprezanja na 3D modelu.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 67. Geostatička horizontalna naprezanja na 2D modelu.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 68. Geostatička horizontalna naprezanja na 3D modelu.....</i>	<i>76</i>
<i>Slika 69. Vertikalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 2D modelu</i>	<i>77</i>
<i>Slika 70. Vertikalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 3D modelu</i>	<i>77</i>
<i>Slika 71. Horizontalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 2D modelu.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 72. Horizontalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 3D modelu.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 73. Radijalni pomak u okolini čela [16].....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 74. Prividni tlak podgrade nepodgrađenog tunela [16]</i>	<i>80</i>
<i>Slika 75. Karakteristična krivulja stijenske mase [16].....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 76. Mjerenje konvergencije u tunelu [16]</i>	<i>81</i>
<i>Slika 77. Položaj točke na kaloti tunela u odnosu na koju se mjere pomaci.....</i>	<i>82</i>
<i>Slika 78. Vertikalni pomaci kalote za sve faze na 2D modelu.....</i>	<i>82</i>
<i>Slika 79. Položaj točke na kaloti tunela u odnosu na koju se mjere pomaci.....</i>	<i>83</i>
<i>Slika 80. Vertikalni pomaci kalote za sve faze na 3D modelu.....</i>	<i>84</i>
<i>Slika 81. Horizontalni pomaci kalote za sve faze na 3D modelu.....</i>	<i>85</i>
<i>Slika 82. Položaj mjernog profila na 2D modelu.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 83. Vertikalni pomaci površine na 2D modelu.....</i>	<i>86</i>
<i>Slika 84. Položaj mjernog profila na 3D modelu.....</i>	<i>87</i>
<i>Slika 85. Vertikalni pomaci površine na 3D modelu.....</i>	<i>87</i>
<i>Slika 86. Pozicije sidara na 2D modelu.....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 87. Sile u sidru sa strane za 2D model.....</i>	<i>88</i>
<i>Slika 88. Sile u sidru na svodu za 2D model.....</i>	<i>89</i>

<i>Slika 89. Pozicija sidra na svodu u 3D modelu.....</i>	<i>89</i>
<i>Slika 90. Pozicija sidra sa strane u 3D modelu</i>	<i>90</i>
<i>Slika 91. Sile u sidru sa strane za 3D model.....</i>	<i>90</i>
<i>Slika 92. Sile u sidru na svodu za 2D model.....</i>	<i>91</i>

Popis tablica**Stranica**

<i>Tablica 1. Svojstva materijala za tlo i beton, [8].....</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 2. Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase [11].....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 3. Tablica za odabir vrijednosti m_i za intaktnu stijenu ovisno o geološkom porijeklu [11]</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 4. Tablica za odabir vrijednosti MR za intaktnu stijenu ovisno o geološkom porijeklu [9].....</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 5. Tablica za RMR klasifikaciju [22]</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 6. Preporuke za iskop i trajno podgrađivanje prema RMR klasifikaciji, prema [22]</i>	<i>60</i>
<i>Tablica 7. Parametri čvrstoće za intaktnu stijensku masu geotehnike jedinice 3, [21]</i>	<i>61</i>

1. UVOD

Ljudi su od davnina ulazili u podzemlja. Najprije su koristili prirodne špiljske prostore, a potom su sami kopali podzemne prostorije za stanovanje, rudarenje i druge potrebe. S vremenom su uvjeti građenja tunela i podzemnih građevina postajali sve teži zbog kopanja u sve složenijim situacijama (ispod gusto naseljenih gradova, ispod rijeka, jezera i mora).

Velikom i brzom razvoju tehnika gradnje podzemnih objekata pridonijele su razne inovacije od druge polovice 19. stoljeća do danas. Neke od njih su razvoj eksploziva (1867.), električni detonatori (1867.), strojevi za iskop tunela TBM (1881.), stijenska sidra (1918.), mlazni beton (1942.), Nova Austrijska Tunelska Metoda - NATM (1950.), itd. Razvojem velikog broja uređaja za opažanje pomaka i naprezanja u stijenskoj masi (monitoring), te računalnih tehnika (numeričko modeliranje), smanjena je opasnost od nezgoda tokom građenja. Gradnja tunela je brža i sigurnija.

Tuneli su podzemni objekti za savladavanje terenskih prepreka i za osiguranje tehničkih elemenata ceste na kojoj se projektiraju i grade. Različiti tipovi mehanizama sloma tla i stijena, u rasponu od jednostavnih do vrlo složenih, mogu se pojaviti s podzemnim iskopom pod kombiniranim utjecajem geologije, naprezanja *in situ* i geotehničkih uvjeta. Najbolje je te probleme proučavati softverskim alatima za numeričko modeliranje.

Numerički modeli su pojednostavljeni prikaz stvarnih uvjeta i temelje se na relevantnoj teoriji i znanju te pojednostavljenjima koji se baziraju na pretpostavkama. Modeli ne predstavljaju u potpunosti stvarno stanje, ali imaju za cilj što bolje ga opisati. Osnovni zadatak numeričkog modeliranja je analizirati ponašanje geološkog materijala i građevina pod različitim uvjetima opterećenja. Razvojem tehnologije računala sve se više istiskuju 2D modeli u korist 3D modela.

Tuneli se pretežno izvode u stijenskom materijalu različitih karakteristika (parametara čvrstoće i deformabilnosti). Stijena kao materijal je heterogena, anizotropna i diskontinuirana te samim tim procjena njenih karakteristika pretpostavlja osnovni problem kod provođenja numeričkih analiza osiguranja stabilnosti podzemnih otvora. Za određivanje čvrstoće stijenske mase koriste se empirijski izrazi razvijani i modificirani tijekom godina, kod stijena jedan od najkorištenijih izraza je Hoek-Brownov kriterij

čvrstoće. Za dobivanje potrebnih parametara za unos u Hoek-Brown kriterij čvrstoće potrebno je provesti istražne radove na lokaciji tunela kako bi se mogla provesti laboratorijska ispitivanja na dobivenim uzorcima intaktne stijene.

Osnovni zadatak podgradnog sustava je pripomoći stijenskoj masi da nosi samu sebe (poboljšanje stijenske mase). Sustavi podgrađivanja i štapna sidra često se koriste u kombinaciji radi postizanja najboljeg mogućeg utjecaja na stabilizaciju stijenske mase. Primarna podgrada primjenjuje se za vrijeme ili odmah nakon iskopa kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom kasnijeg iskopa te inicirao proces mobilizacije i konzervacije čvrstoće stijenske mase tako da ona postane samonosiva. Najčešće sadrži sljedeće konstruktivne elemente: stijenska sidra, kablove, armirani mlazni beton, čelične lukove, itd. Svaka dodatna podgrada primijenjena u kasnijoj fazi naziva se sekundarnom.

Ovim radom obuhvaćene su osnove numeričkog modeliranja, upute za izradu jednostavnog 3D modela, metode određivanja parametara čvrstoće i deformabilnosti za stijensku masu te vrste podgrađivanja za poboljšanje stabilnosti i održanje samonosivosti stijenske mase pri iskopu i eksploataciji tunela. Na primjeru tunela Grič prema istoimenom projektu dane su osnovne informacije kao što su lokacija, istražni radovi provedeni za projekt i zoniranje stijenske mase na geotehničke jedinice kako bi se mogli napraviti 2D i 3D modeli na temelju dobivenih informacija. Za potrebe rada odabran je profil desne cijevi tunela sa najnepovoljnijom pozicijom (najvećim nadslojem) za koji su izrađeni 2D i 3D modeli. Ovaj rad ima za cilj prikazati prednosti 3D modeliranja u odnosu na 2D modeliranje usporedbom dobivenih rezultata za isti poprečni presjek s istom geologijom. Na samom kraju rada dane su osnovne mjere geotehničkog praćenja tunela uz primjenu na tunelu Grič.

2. NUMERIČKO MODELIRANJE U TUNELOGRADNJI

2.1. Općenito o numeričkom modeliranju

Numeričko modeliranje se u građevinarstvu koristi kao jedan od alata koji omogućuje inženjerima da procjene ponašanje materijala pod utjecajem opterećenja unutar različitih inženjerskih građevina i zahvata. Prilikom podzemnog iskopa dolazi do različitih tipova i mehanizama sloma tla i stijene, u rasponu od jednostavnih do vrlo složenih; uslijed utjecaja geologije, *in situ* naprezanja i geotehničkih uvjeta na terenu [1,2].

Numerički modeli imaju za cilj stvoriti dovoljno prihvatljiva rješenja za složene geomehaničke probleme dijeljenjem domena u manje ekvivalentne sustave, međusobno povezivanje elemenata i određivanje približnih rješenja. Modeli ne predstavljaju u potpunosti stvarno stanje, ali pokušavaju ga u najvećoj mogućoj mjeri prikazati usvajanjem rubnih uvjeta i karakteristika geotehničkih materijala i građevina/iskopa te predviđanjem njihovog ponašanja u različitim fazama i uvjetima izvođenja radova. Numeričko modeliranje pomaže inženjerima u predviđanju deformacija, a u konačnici i stjecanje uvida u mogući način sloma i područja u kojem se slom može pojaviti. Ovakav pristup projektiranju, koji se dodatno potvrđuje mjerenjima na terenu omogućuje geotehničkim stručnjacima razvoj dizajna i rješenja [2].

Numeričko modeliranje u stijenskoj masi može se podijeliti u tri kategorije [2]:

1. Metoda kontinuuma
2. Metoda diskontinuuma
3. Hibridna metoda kontinuuma/diskontinuuma

Metode kontinuuma pretpostavljaju da je kontinuitet svih točaka u problemskoj domeni uvijek očuvan. Kao rezultat toga, čak i kad su diskretizirane na elemente, ove metode osiguravaju kontinuitet među elementima. Neke od najpopularnijih metoda kontinuuma su Metoda konačnih elemenata (MKE), metoda konačnih razlika (MKR), te metoda graničnih elemenata (MGE), [2].

Metode diskontinuuma tretiraju pojedine elemente kao zasebne, ali međusobno povezane. Dok se metode kontinuuma usredotočuju na deformacije sustava, metode diskontinuuma

obično ciljaju na kruta gibanja tijela (obično velika kretanja) pojedinih elemenata. Najpopularnija metoda diskontinuumata je metoda diskretnih elemenata (MDE) [2].

Hibridne metode koriste kombinacije prethodno navedenih metoda kako bi se uklonile nepoželjne karakteristike uz zadržavanje što više prednosti. Vjerno numeričko modeliranje u stijenskoj masi zahtijeva zapravo modeliranje kontinuuma i diskontinuumata, po samoj prirodi materijala. Na primjer, pri modeliranju nekog podzemnog iskopa većina nelinearnosti dogoditi će se blizu granice iskopa. U tom slučaju stijenska masa blizu polja mogla bi se modelirati korištenjem metode konačnih elemenata (MKE), koja je zatim na svojim vanjskim granicama povezana s modelom graničnih elemenata (MGE), tako da se granični dalekog polja točno modeliraju, [3].

2.2. Usporedba 2D i 3D modela

Iako je stvarni svijet 3D, to ne znači da 3D model mora biti uvijek korišten. Jedna od glavnih prednosti 2D modela je njegova jednostavnost i brzina izvedbe, te dovoljno točni rezultati naprezanja i pomaka.

Prednost 3D modela je u tome da jednom kada se unese geometrija, te ugradi tunel može se biti puno fleksibilniji sa rezultatima za svaki fazu izvedbe tunela (unatoč sporijoj izvedbi u usporedbi sa 2D modelima). Moguće je postaviti ravninu na bilo koju poziciju u modelu te dobiti rezultate naprezanja i deformacija. Također je moguće exportati 2D model iz 3D modela, za usporedbu rezultata.

Ukoliko modeliramo tunel, glavna prednost 3D modela je prikaz konvergencije s napredovanjem iskopa. Konvergencija je pomak konture iskopa uslijed puzanja stijenske mase (te djelomično uslijed djelovanja izazvanih iskopom kada je iskop u blizini promatranog presjeka). Upravo iz tog razloga 3D modeliranje je jako korisno za usporedbu radijalnih pomaka u modelu sa stvarnim pomacima. U tunelogradnji se koristi pristup aktivnog projektiranja gdje se tijekom iskopa i ugradnje podgrade vrše mjerenja pomaka u stvarnom vremenu kako bi se moglo reagirati u slučaju značajnijeg prekoračenja pomaka dobivenih u modelu. Više o aktivnom projektiranju (metodi opažanja) i uređajima za praćenje pomaka u 9-tom poglavlju.

U posljednjih nekoliko godina dolazi do trenda rasta korištenja 3D softvera uslijed napretka u tehnologiji računala odnosno povećanjem brzine procesora, većom količinom RAM-a, te većim prostorom za pohranu podataka. S napredovanjem u tehnologiji, dužina izrade i proračuna 3D modela se smanjuje, te samim time upotreba 3D modela postaje opravdanije s obzirom na korištene resurse i dobivene rezultate iz realnijih modela stvarnih geotehničkih uvjeta.

2.3. Metoda konačnih razlika i Metoda konačnih elemenata

U praksi se MKR i MKE obično ne razlikuju jedna od druge stoga se one mogu tretirati kao ista metoda. Unutar MKE fizički problem modeliran je numerički dijeljenjem cijelog područja problema na elemente, elementi su povezani čvorovima čime formiraju mrežu konačnih elemenata. MKE je prikladna za rješavanje problema koja uključuju heterogena ili nelinearna svojstva materijala, budući da svaki element izričito modelira odziv sadržanog materijala. Ograničavajući čimbenici MKE su računalni resursi (radi većih modela) te je potrebno duže vrijeme za proračun rezultata, vrijeme, prikupljanje odgovarajućih ulaznih podataka, itd. Metoda može uzeti u obzir složene *in situ* uvjete naprezanja, linearno i nelinearno ponašanje naprezanja-deformacija, više materijala i potpornih sustava, nizove iskopa i izgradnje, uvjete podzemnih voda i mješavinu rubnih uvjeta, između ostalih čimbenika [2,3].

Programi zasnovani na MKR i MKE:

- Phase (MKE/2D)
- FLAC (MKR/2D)
- FLAC3D (MKR/3D)
- RS3 (MKE/3D)

2.4. Metoda graničnih elemenata

MGE je nazvan po tome što se granice problema diskretiziraju u elemente. Granice uključuju geometrijske entitete kao što su površina iskopa, slobodne površine za plitke probleme, diskontinuiteti i materijalna sučelja za probleme s više materijala. Kako se

diskretiziraju samo granice, veličine modela su manje te je tako i njihov proračune znatno kraći. MGE se može podijeliti u dvije grupe [2,3]:

- Metode izravnih graničnih elemenata
- Metode neizravnih graničnih elemenata

Metoda izravnih graničnih elemenata koristi se za rješavanje izravno nepoznatih naprezanja i/ili pomake iz navedenih rubnih uvjeta, ali ograničena je samo na jednostavne probleme [2,3].

Metoda neizravnih graničnih elemenata koristi se za pronalazak skupa fiktivnih naprezanja koja zadovoljavaju propisane uvjete. Zatim se dobivena naprezanja koriste za izračun stvarnih naprezanja i pomaka u stijenskoj masi [2.3].

Glavna prednost MGE je činjenica da bilježi utjecaj iskopavanja u beskonačnost, tj. naprezanja dalekog polja nisu pod utjecajem stvaranja iskopa, dok kod drugih modela uvjeti naprezanja i pomaka dalekog polja moraju se na neki način aproksimirati (to se uglavnom postiže skraćivanjem područja problema i prepravljanjem vanjskih granica). Radi toga on je pogodan za probleme koji uključuju linearno elastične, homogene domene materijala; on nudi veliku prednost pravilnog modeliranja rubnih uvjeta dalekog polja i ograničavanja pogrešaka diskretizacije na granice problema. On osigurava da se naprezanja i pomaci neprestano mijenjaju u području problema, a problemi se izračunavaju mnogo brže od ostalih numeričkih metoda [2].

Programi zasnovani na MGE:

- Final (2D)
- Examine 3D (3D)

2.5. Metoda diskretnih elemenata

U MDE stijenska masa se predstavlja kao skup diskretnih blokova koji mogu biti deformabilni ili nedeformabilni. Svaki blok je zasebno tijelo koji može stupiti u interakciju s na mjestima kontakta sa okolnim blokovima. Pukotine i diskontinuiteti su prikazani kao veze izdvojenih tijela. Metoda je primjenjiva ukoliko su pomaci spoja puno znatniji od deformacije bloka. To ima dodatnu prednost u tome što se mogu pojaviti proizvoljno veliki

relativni pomaci na kontaktu, situacija koja se općenito ne može pratiti u kodovima konačnih elemenata [3,4].

S razvojem tehnologije ova metoda postaje jako učinkovita za proračunavanje inženjerskih problema u zrnatim i diskontinuiranim materijalima, kao što je mehanika stijena. Metoda može biti zahtjevna za proračunavanje te je potrebno smanjiti dužinu simuliranja ili količinu blokova korištenih za modeliranje [5].

Programi zasnovani na MDE:

- UDEC (2D)
- 3DEC (3D)

3. ROCSCIENCE RS3

3.1. Uvodno o Rocscience RS3

Za potrebe izrade ovog rada korišteni su programi RS2 i RS3, tvrtke Rocscience. Rocscience je osnovan godine 1996. kao izdvojena tvrtka Sveučilišta u Torontu kako bi se bavila sa povećanom distribucijom softvera širom svijeta. Početak razvijanja i distribuiranja softvera započela je Rock Engineering Group na Sveučilištu u Torontu 1987. godine, ispunjavajući potrebu za pouzdanijim i jednostavnijim alatima za 2D i 3D analize te dizajn. Prvi programi rađeni su pod vodstvom dr. Evert Hoeka i dr. John Currana te raznih diplomiranih studenata tijekom godina. Danas je Rocscience jedan od vodećih lidera u razvoju 2D i 3D softvera za građevinske, rudarske i geotehničke inženjere [6].

RS3 je 3D program za analiziranje, temeljen na metodi konačnih elemenata. Primjenjuje se za modeliranje padina, projektiranje tunela, površinske i podzemne iskope, dizajniranje temelja, konsolidaciju, procjeđivanje podzemne vode, itd. Primjenjiv je za tla i stijene. 3D model može biti izrađen pomoću CAD alata ili uvozom 3D datoteka poput DXF. Unutar RS3 moguća je izrada faza iskopa, ugradnja ojačanja (poput sidara), postavljanje opterećenja te svi ostali elementi modeliranja. Po završetku izračuna analize mogući je prikaz 2D i 3D rezultata unutar RS3, kao što su pomaci, porni pritisci, naprezanja, deformacije, itd. Korisnik može prikazati rezultate u bilo kojoj ravnini, po bilo kojim linijama i konturama iskopa. Rezultati i slike se mogu izvesti za daljnju uporabu [7].

3.2. RS3 vodič za brzi početak

3.2.1. Uvod

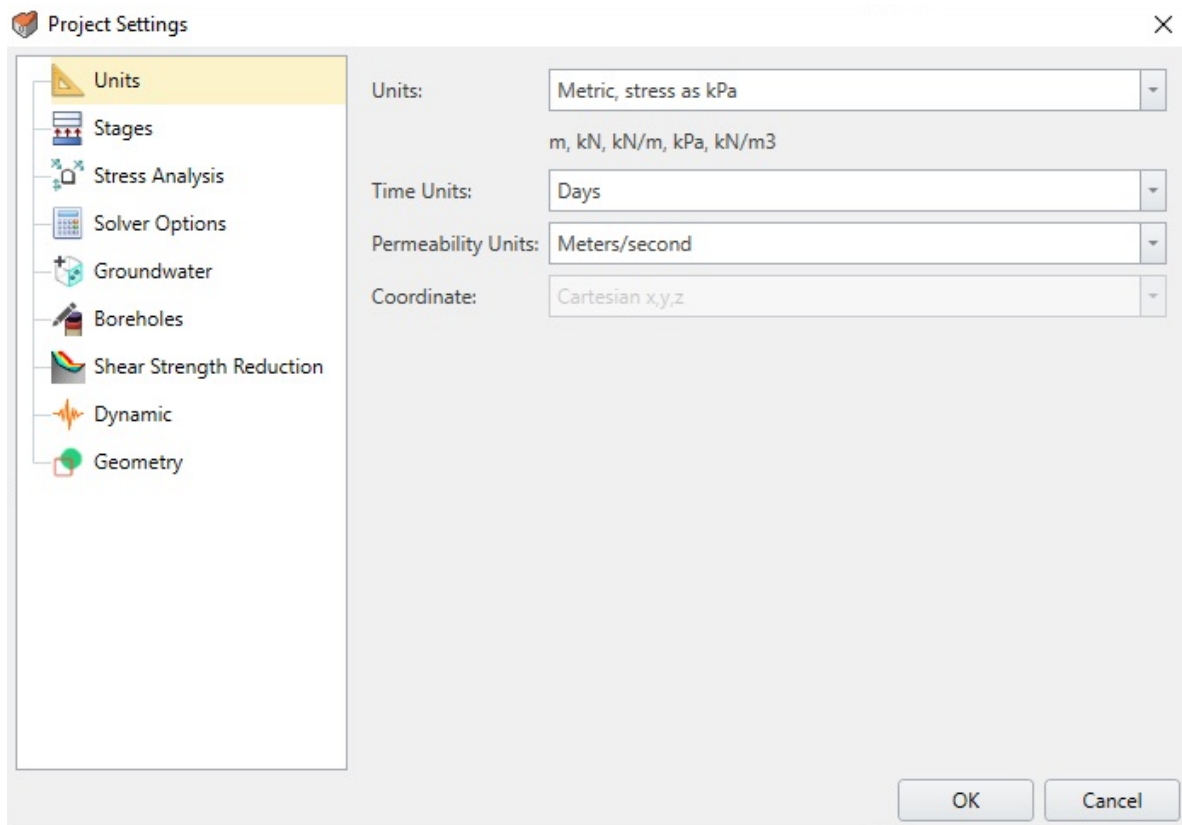
Ovim vodičem predstavljene su neke od osnovnih značajki RS3 programa. Model analizira učinak opterećenja temelja u blizini nagnutog podzemnog tunela. U modelu se prvo izvodi tunel, a zatim se iskopa plitki temelj koji je se u slijedećoj fazi ispuni betonom. Zadnja faza uključuje opterećenje na temelj [8].

Sve datoteke vodiča instalirane su sa RS3 te se mogu pristupiti odabirom **File>Recent>Tutorials** datoteke iz glavnog izbornika unutar RS3 programa. Završeni model ovog vodiča može se pronaći u datoteci **Quick Start .rs3model** [8].

3.2.2. Započinjanje modela

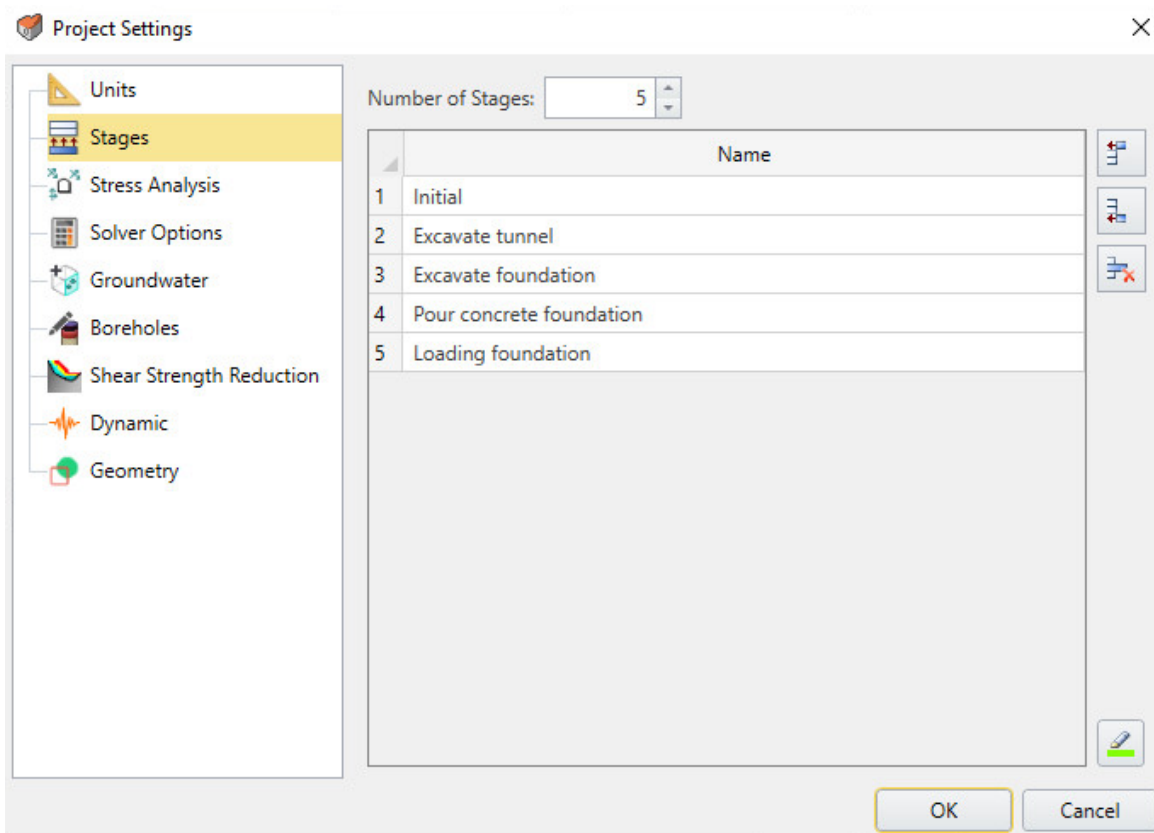
Prvo je potrebno pokrenuti RS3. Nakon pokretanja programa može se vidjeti radni prozor prazne stranice s padajućim izbornicima i alatnim trakama na vrhu [8].

Prvi korak je konfiguriranje glavnih parametara (mjernih jedinica) za analizu unutar RS3, za to se koristi **Project settings**. Project settings-u se pristupa odabirom **Analysis>Project settings** iz glavnog izbornika (ili kraticom CTRL+J). Pod karticom **Units** potrebno je postaviti jedinice **Metric, stress as kPa**. Ovaj korak prikazan je Slikom 1. [8].



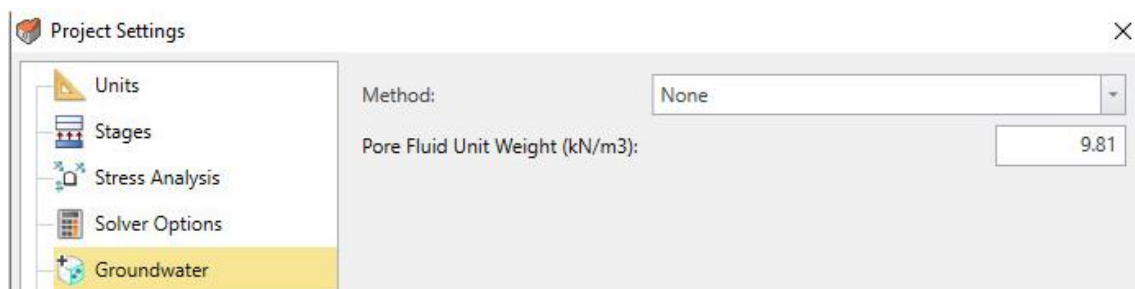
Slika 1. Postavke mjernih jedinica unutar Project settings [8]

Drugi korak unutar Project settings je odabir na karticu **Stages**. Potrebno je odabrati broj faza (5) s odgovarajućim imenima prikazani Slikom 2. Imena su bitna kako bi se mogao primijeniti odgovarajući postupak za svaku fazu tokom daljnje izrade modela [8].



Slika 2. Postavke faza unutar Project settings [8]

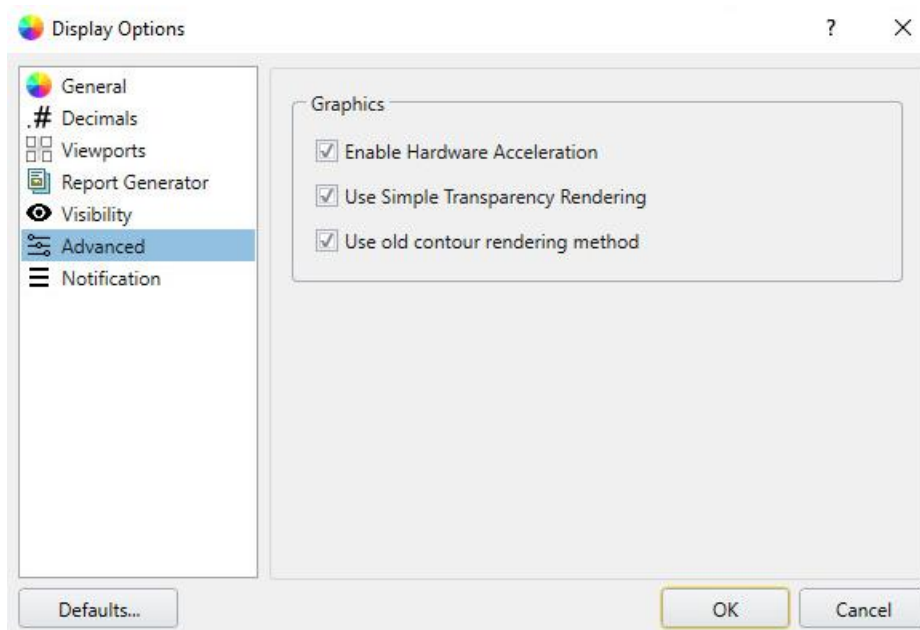
Trećim korakom se definira da nema utjecaja podzemne vode. Odabirom unutar Project settings na karticu **Groundwater** potrebno je odabrati Method kao **None**. Težinu pornog fluida ostaviti na početnoj vrijednosti od $9,81 \text{ kN/m}^3$ (Slika 3.) [8].



Slika 3. Postavke podzemne vode unutar Project settings [8]

Za potvrdu unesenih promjena potrebno je kliknuti na **OK**.

Kako bi se ubrzalo prikazivanje rezultata može se koristiti stara metoda prikazivanja kontura. Odabirom **View>Display Options** na glavnom izborniku potrebno je provjeriti jesu li sve tri opcije odabrane (Slika 4.) [8].



Slika 4. Postavke Display option [8]

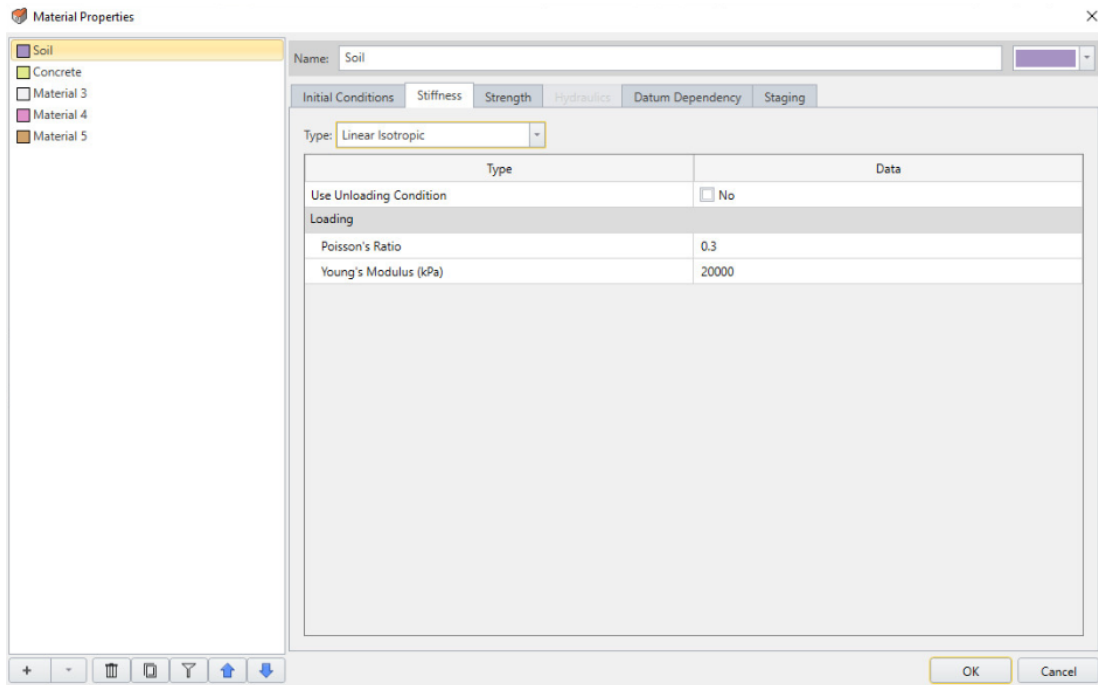
3.2.3. Definiranje materijala

Kako bi se materijal definirao potrebno je na glavnom izborniku odabrati **Materials>Define materials**. Tablicom 1 dani su parametri (svojstva) za tlo i beton. Program prema zadanim postavkama bilo koju površinu (tijelo) definira kao materijal 1 (osim iskopa) [8].

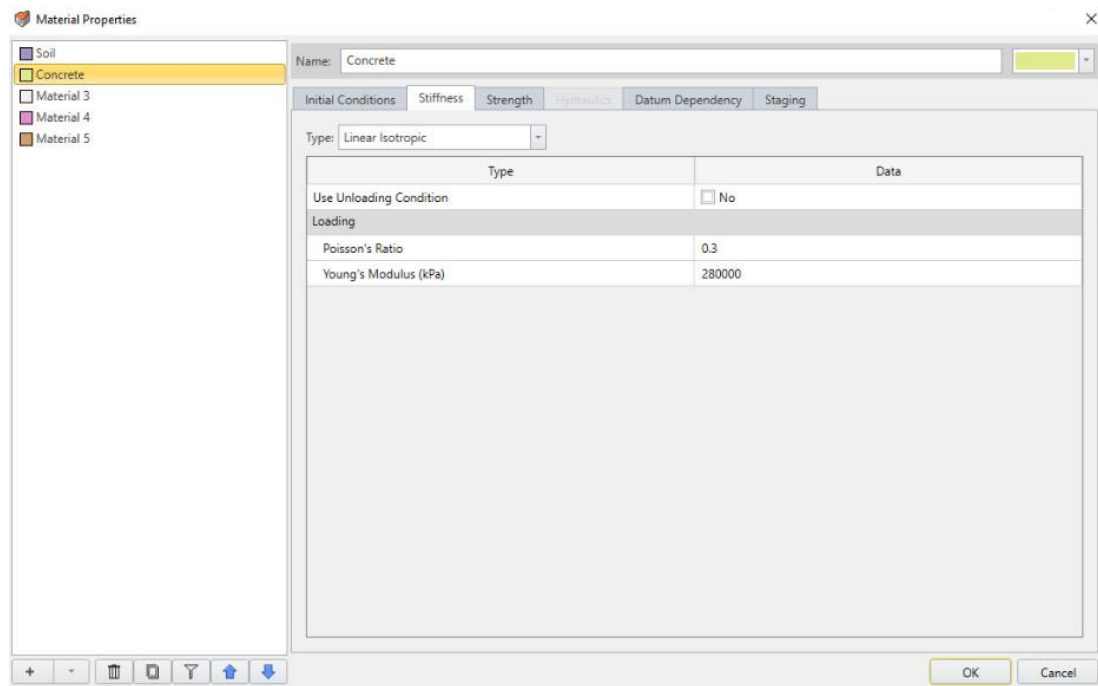
Tablica 1. Svojstva materijala za tlo i beton [8]

	Ime	Početno opterećenje	Jed. Težina (kN/m ³)	Young-ov modul (kPa)	Poisson-ov koeficijent
Materijal 1	Soil	Field stress & body force	20	20000	0,3
Materijal 2	Concrete	Body force only	27	280000	0,3

Slikom 5. prikazana su unesena svojstva za tlo, a Slikom 6. prikazana su unesena svojstva za beton.



Slika 5. Svojstva tla [8]

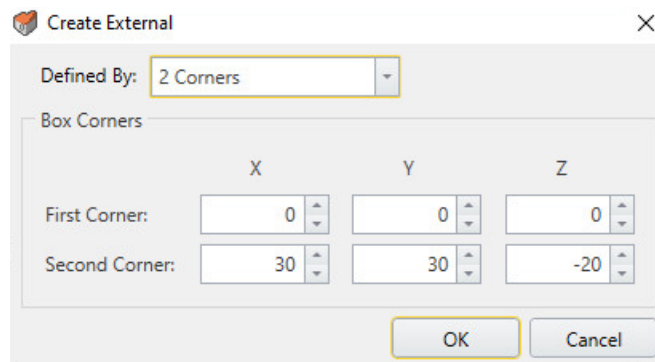


Slika 6. Svojstva betona [8]

Za potvrdu unesenih promjena potrebno je kliknuti na **OK**.

3.2.4. Kreiranje geometrije

Prije kreiranja geometrije bitno je provjeriti ako je odabrana kartica **Geology** na vrhu zaslona. Odabirom **Geometry>Create External Box** na glavnom izborniku otvara se prozor u koji se za prvi kut unosi $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ te za drugi kut $(x, y, z) = (30, 30, -20)$, zatim potvrditi unos pritiskom na **OK** (Slika 7.) [8].



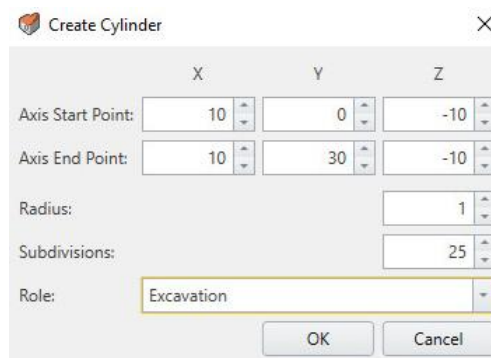
Slika 7. Postavke kutova unutar Create external prozora [8]

Nakon što je geometrija kreirana, unutar prozora (Visibility Tree) lijevo od modela odabrati volumen **External** i preimenovati ga u **Soil** (tlo) pomoću properties panela. [8].

3.2.5. Iskop

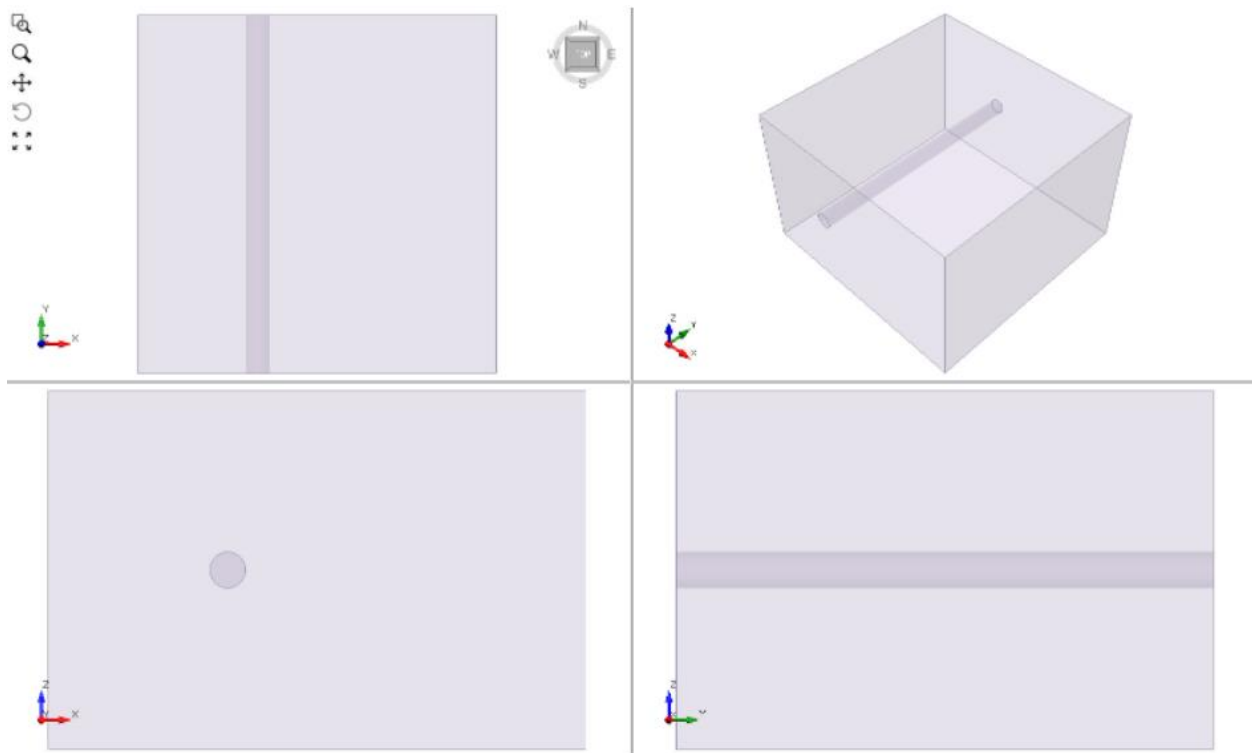
3.2.5.1. Kreiranje cilindra za podzemni tunel

Na vrhu zaslona potrebno je promijeniti karticu na **Excavation**. Prvi korak je odabir cilindra za podzemni tunel odabirom **Geometry>3D Primitive Geometry>Cylinder** na glavnom izborniku. Potrebno je unesti slijedeće vrijednosti: početak osi $(x, y, z) = (10, 0, -10)$, kraj osi $(x, y, z) = (10, 30, -10)$, radijus = 1 i podjelu = 25 (Slika 8.) [8].



Slika 8. Postavke za kreiranje tunela [8]

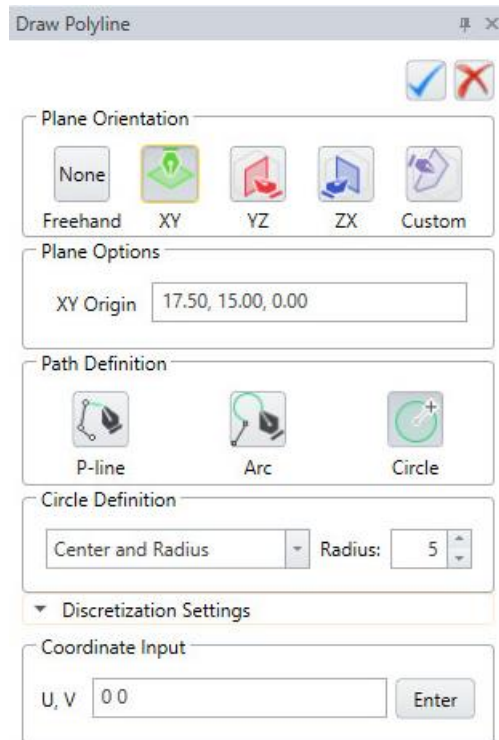
Potvrdom unosa pritiskom na **OK** dobije se model prikazan Slikom 9.



Slika 9. Prikaz modela sa izvedenim tunelom [8]

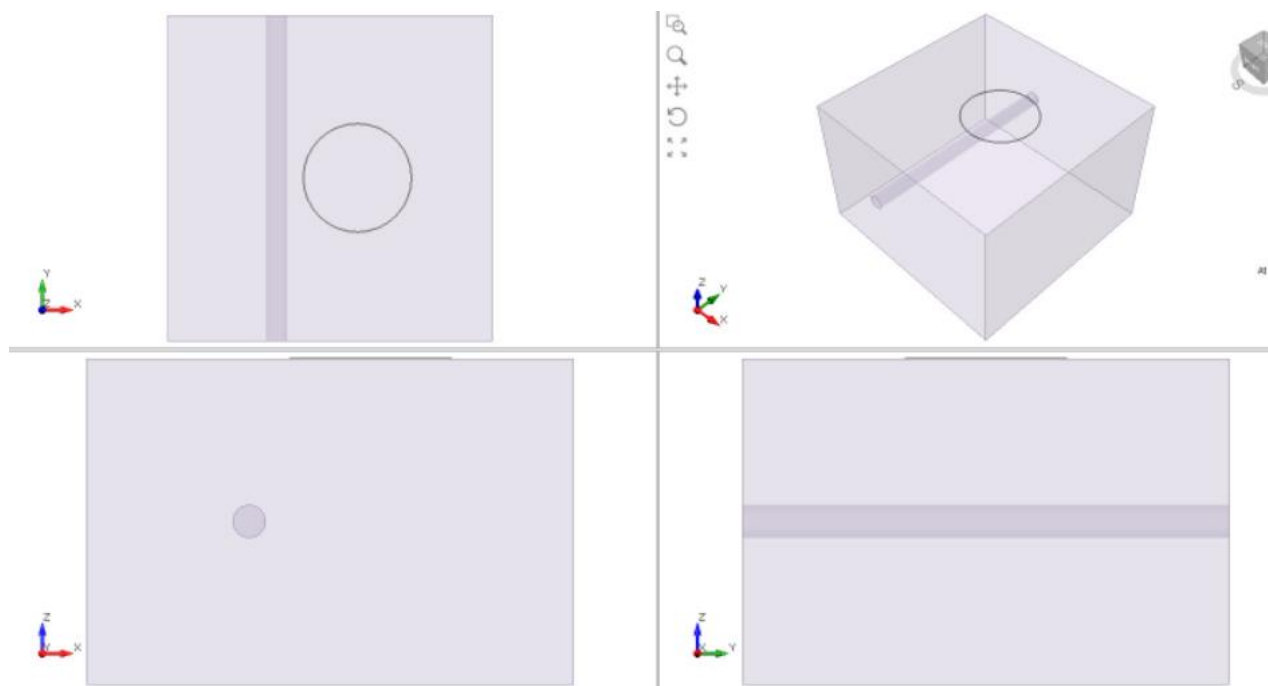
3.2.5.2. Istiskivanje kruga za temelj

Slijedeći korak je izrada istisnutog kruga kao temelja, iako je moguće ponoviti prethodni korak za izradu tunela (korištenjem cilindra), napraviti će se alternativna metoda. Odabirom **Geometry>Polyline Tools>Draw Polyline** na glavnom izborniku. Potrebno je unesti slijedeće: Select Plane Orientation = **XY**, XY Origin (x, y, z) = **(17.5, 15, 0)**, Path Definition = **Circle**, Circle Definition = **Centre and radius**, radius = **5**, Coordinate input U, V = **(0, 0) [Enter]** (obavezno stisnuti enter). Završetkom unosa podataka stisnuti plavu kvačicu na vrhu prozora za potvrdu unosa (Slika 10.) [8].



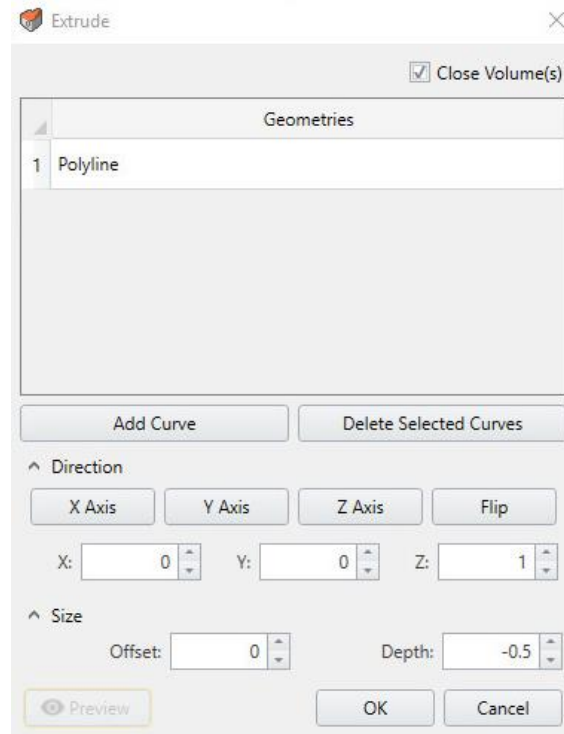
Slika 10. Postavke za kreiranje kruga temelja [8]

Unosom podataka dobije samo krug temelja na površini modela, Slika 11.



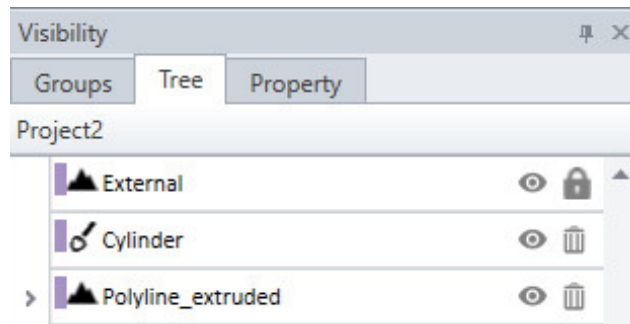
Slika 11. Prikaz modela sa izvedenim tunelom i temeljem [8]

Prije slijedećeg koraka potrebno je u lijevom prozoru Visibility odabrati **Polyline**. Odabirom **Geometry>Extrude/Sweep/Loft Tools>Extrude** ili odabirom ikone **Extrude** na alatnoj traci otvara se prozor prikazan Slikom 12. Potrebno je unesti slijedeće: Keep Direction $(x, y, z) = (0, 0, 1)$, i promijeniti dubinu na Depth = **-0,5**, zatim potvrditi unos pritiskom na **OK**, [8].



Slika 12. Postavke za iskop temelja [8]

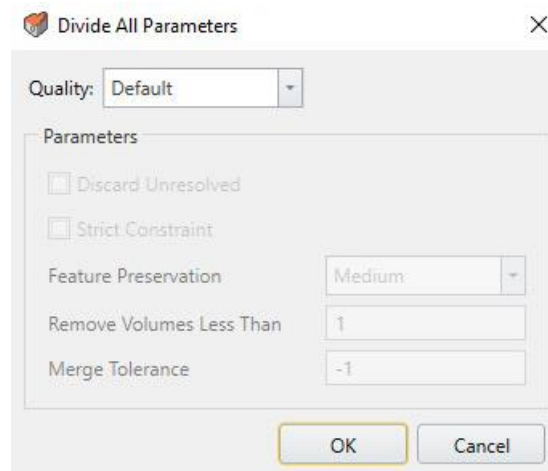
Slikom 13. može se uočiti da je External layer zaključan unutar Visibility tree-a. To je zato što je sloj definiran kao vanjski volumen i geometrija se ne može mijenjati. Cilindar i istisnuti krug su geometrijski objekti koji nisu u interakciji sa vanjskim volumenom. Kako bi se moglo nastaviti sa izradom modela potrebno je upotrijebiti funkciju **Divide all Geometry** da bi se geometrijski objekti pretvorili u podvolumene na glavnom modelu [8].



Slika 13. Prikaz problem interakcije između vanjskog volumena s tunelom i temeljem [8]

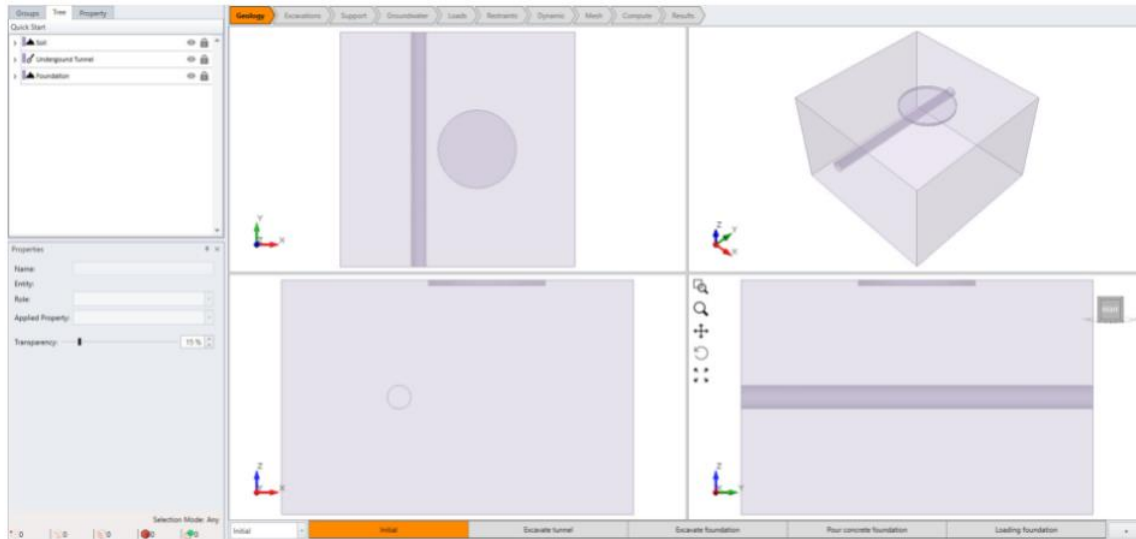
3.2.5.3. Podjela cijele geometrije

Odabirom **Geometry>3D Boolean>Divide All Geometry** otvara se prozor u kojem je postaviti Quality na **Default** (Slika 14.). Default opcija je zadovoljavajuća za većinu modela, ali postoje slučajevi kod kojih je nužna promjena postavke za uspješno presijecanje svake geometrije s vanjskom granicom. Unos potvrditi pritiskom na **OK**, [8].



Slika 14. Postavke za Divide All Parameters [8]

Zaključno ovime dobije se model prikazan Slikom 15.



Slika 15. Prikaz 3D modela sa izvedenim tunelom i temeljem [8]

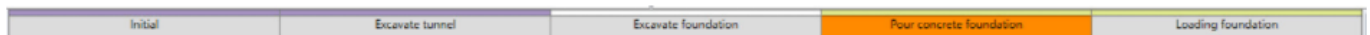
3.2.6. Izrada faza iskopa

3.2.6.1. Faze iskopa tunela

Iskop tunela započinje sa **Stage 2** (fazom 2), što znači da je faza 1 **Soil** (tlo). Odabirom faze 2 potrebno je odabrati tunel pritiskom na **Cylinder** na lijevoj strani unutar Visibility tree-a. Druga faza se već zove **Excavate tunnel**, ime tunela (cylinder) preimenovati u **Underground tunnel** i unutar properties panela promijeniti materijal pod Applied Property na **No material** [8].

3.2.6.2. Faze izrade temelja

Temelj se iskapa u fazi 3 s ugradnjom betona u fazi 4. Fazu 3 već je imenovana **Excavate foundation**. Na lijevoj strani u visibility tree-u kliknuti na temelj, imenovati ga **Foundation**, te u properties panelu ispod promijeniti materijal pod Applied Property na **No material**, Četvrtu fazu već je imenovana **Pour concrete foundation**, nakon toga potrebno je unutar visibility tree-a kliknuti na **Foundation** i ispod u properties panelu promijeniti materijal pod Applied Property na **Concrete**. Faze iskopa trebale bi biti prikazane kao na Slici 16. [8].

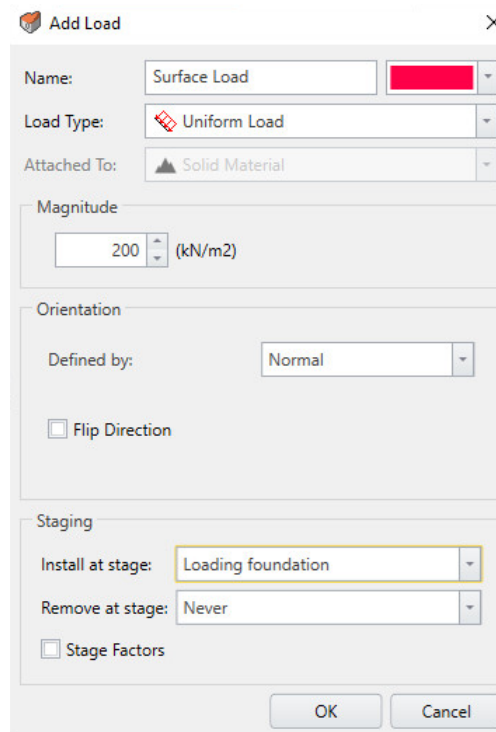


Slika 16. Faze izrade tunela i temelja [8]

3.2.7. Dodavanje opterećenja

3.2.7.1. Dodavanje površinskog opterećenja na model

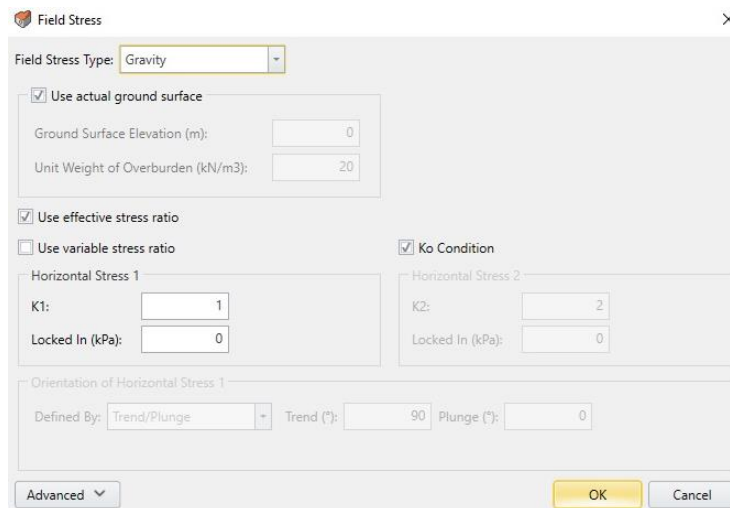
Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Loads**. Odabirati **Loading>Add Loads to Selected** na glavnom izborniku. Unutar novog prozora potrebno je odabrati: Magnitude = **200** i Install at stage = **Loading foundation**, ostatak treba ostati na **Default**. Ovime će se korisniku omogućiti da primjeni ravnomjerno opterećenje na područje interesa, potvrditi unos pritiskom na **OK** (Slika 17.) [8].



Slika 17. Prikaz prozora za dodavanje površinskog opterećenja [8]

3.2.7.2. Dodavanje polja naprezanja

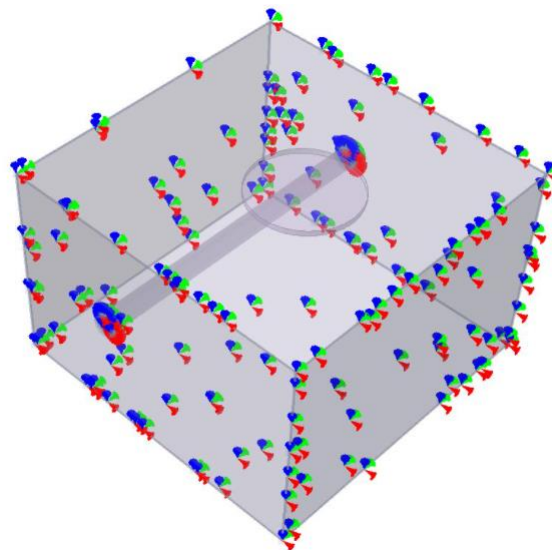
Odabrati **Loading>Field Stress** na glavnom izborniku. Sve opcije ostaviti prema zadanim postavkama i potvrditi unos pritiskom na **OK** (Slika 18.), [8].



Slika 18. Prikaz prozora za dodavanje polja naprezanja [8]

3.2.8. Postavljanje rubnih uvjeta

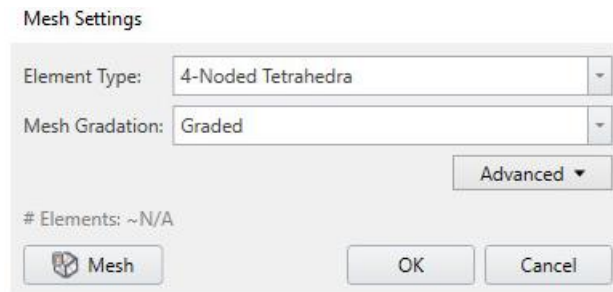
Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Restraints**. Odabirati **Restraints>Auto Restrain (Surface)** na glavnom izborniku (Slika 19.) [8].



Slika 19. Prikaz ograničenog modela [8]

3.2.9. Definiranje mreže

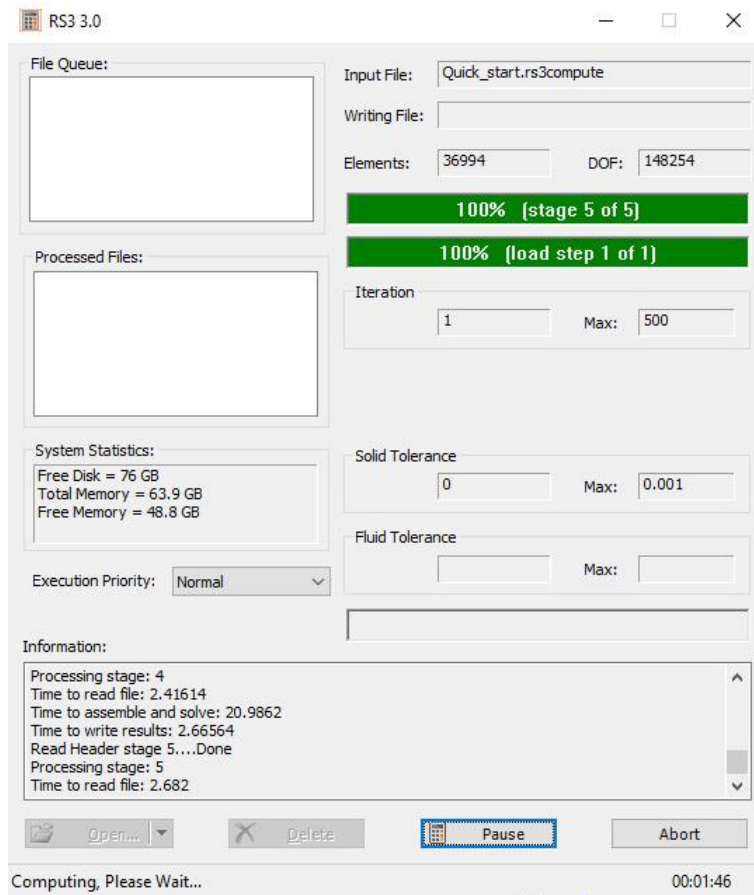
Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Mesh**. Za ovaj tutorial je korištena zadana postavka. Odabrati **Mesh>Mesh settings** na glavnom izborniku. Unutar novog prozora potrebno je odabrati: Enter element type = **4-Noded Tetrahedra**, Mesh Gradation = **Graded**. Pritiskom na **Mesh** model se diskretizira. Potvrditi unos pritiskom na **OK** (Slika 20.), [8].



Slika 20. Prikaz postavki mreže [8]

3.2.10. Računski rezultati

Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Compute**. Prije proračuna potrebno je spremiti dosadašnji rad odabirom na **File>Save As**. Nakon spremanja file-a potrebno je spremiti izračunatu datoteku odabirom **File>Save Compute File**. Nakon ovoga može se prijeći na proračun rezultat odabirom **Compute>Compute** na glavnom izborniku. Proračun ovisno o kompleksnosti modela može uzeti par minuta pa i mnogo duže. Proračun rezultata prikazan je Slikom 21. [8].

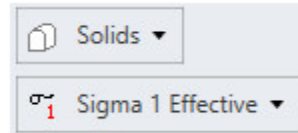


Slika 21. Prikaz proračuna rezultata za izrađeni model [8]

3.2.11. Tumačenje rezultata

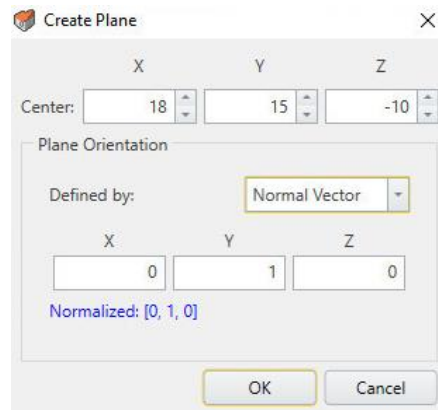
3.2.11.1. Prikaz rezultata

Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Results**. Odabrati **Interpret>Refresh All Results** na glavnom izborniku. Iako nije bilo prethodnih rezultata sa ovog modela dobra je praksa osvježiti rezultat prije nego se pogleda nova kontura. U gornjem desnom kutu kartice rezultata trebala bi biti vidljiva dva padajuća izbornika prikazana Slikom 22. [8].



Slika 22. Prikaz padajućeg izbornika [8]

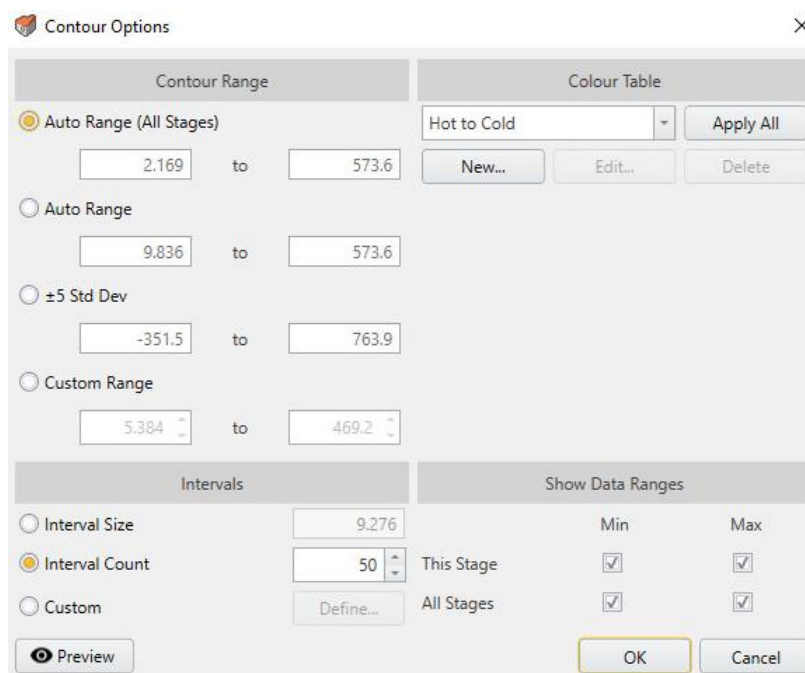
Potrebno je uključiti vanjske konture kako bi se vidjeli neki od rezultata. Odabrati **Interpret>Show Excavation Contour** na glavnom izborniku, također je potrebno odabrati **Interpret>Show data on Plane>XZ plane**. Unutar prozora potrebno je odabrati ravninu sa koordinatama $(x, y, z) = (18, 15, -10)$. Potvrditi unos pritiskom na **OK** (Slika 23.) [8].



Slika 23. Prikaz odabira koordinata ravnine [8]

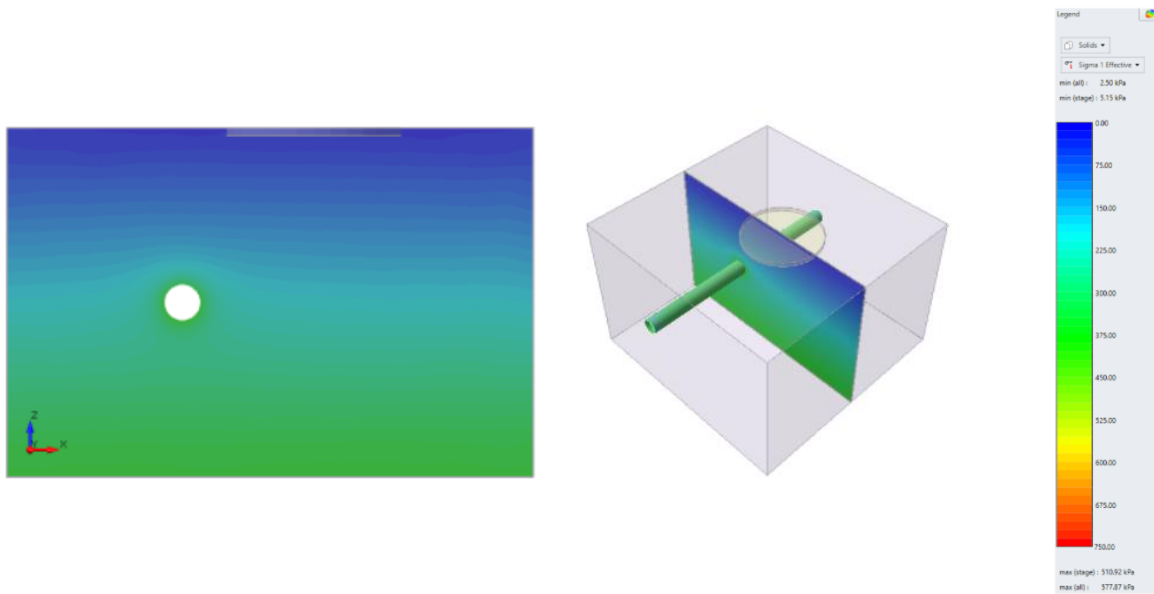
3.2.11.2. Prikaz rezultata glavnog opterećenja

Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Results**. U desnom prozoru osigurati da je Element = **Solids**, i ostaviti tip podataka kao što je u početnim postavkama. (Slika 22.). Kako bi se vizualno usporedili rezultati svake faze izvedbe modela, boja kontura je standardizirana u svim fazama. Odabrati **Interpret>Contour Legend>Contour Options** u glavnom izborniku. Unutar prozora potrebno je odabrati **Auto Range (All Stages)** kao što je prikazano Slikom 24. Unos potvrditi pritiskom na **OK** [8].

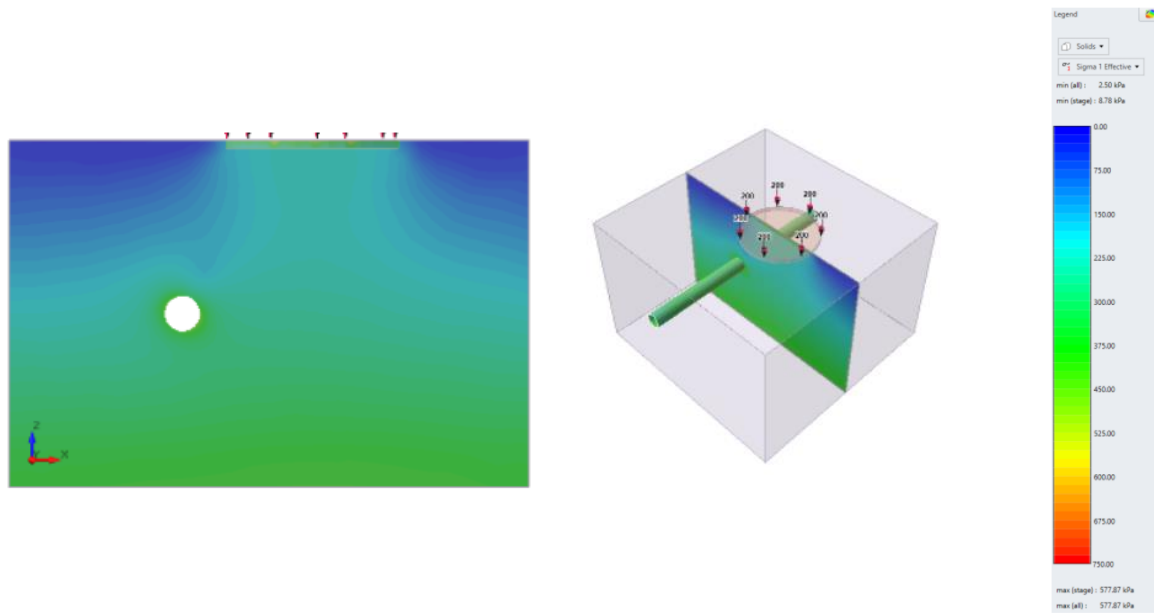


Slika 24. Prikaz odabira konturnih opcija [8]

Slikom 25. prikazani su rezultati vertikalnih efektivnih naprežanja za fazu 4 (ugrađen beton u temelj). Slikom 26. prikazani su rezultati vertikalnih efektivnih naprežanja za fazu 5 (opterećenje na temelju). Na Slici 25. i 26., na lijevoj slici nalazi se 2D prikaz rezultata, na sredini se nalazi 3D prikaz na kojem se vidi položaj ravnine na modelu i na desnoj strani je prikazana legenda za vertikalna efektivna naprežanja po dubini.



Slika 25. Prikaz vertikalnih efektivnih napreznja za fazu 4 [8]

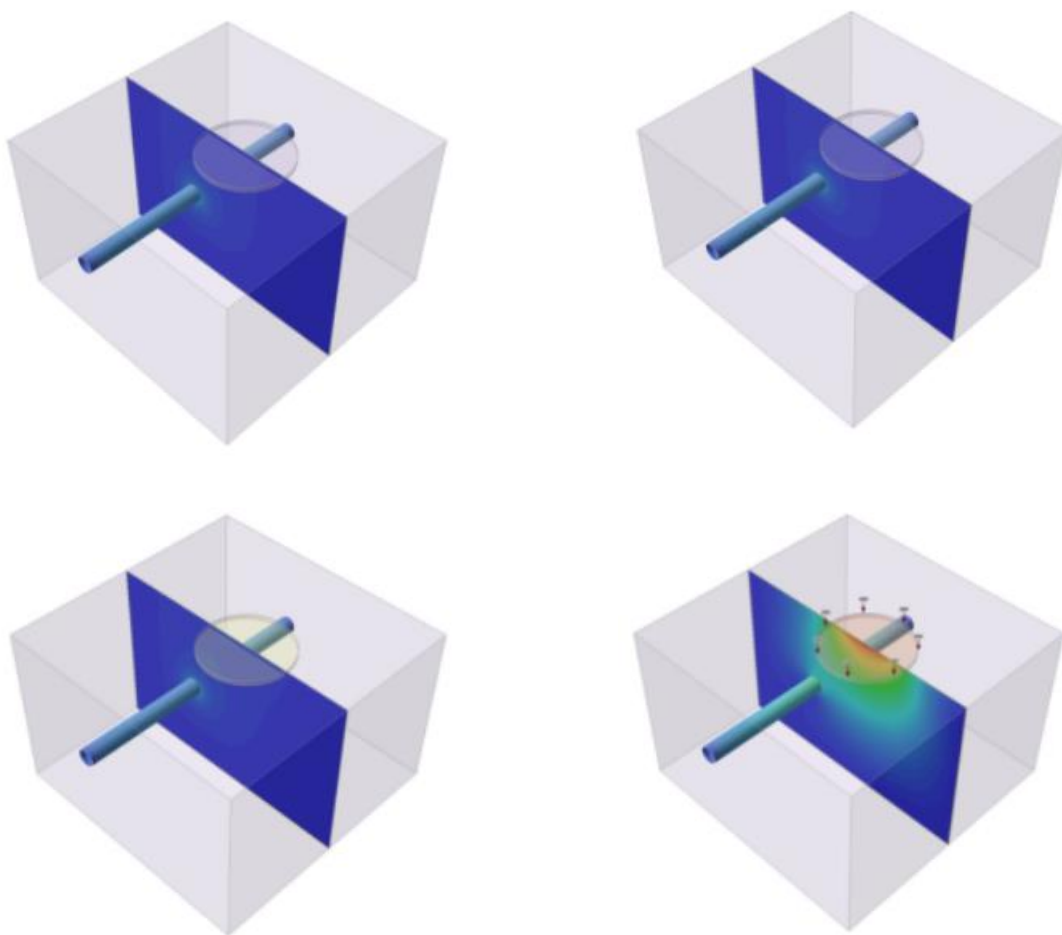


Slika 26. Prikaz vertikalnih efektivnih napreznja za fazu 5 [8]

3.2.11.3. Prikaz ukupnih pomaka

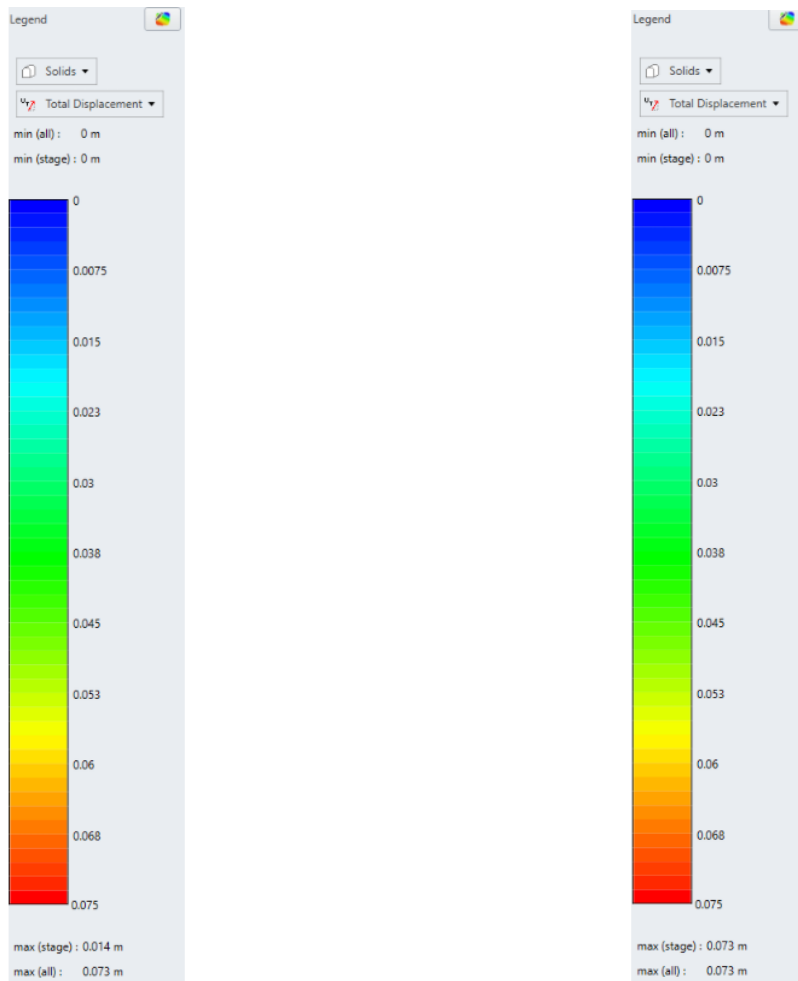
Na vrhu zaslona potrebno je odabrati karticu **Results**. U desnom prozoru osigurati da je Element = **Solids**, i tip podataka promijeniti na **Total displacement**. Kao i kod glavnog napreznja koristiti će se **Auto range (All Stages)**, prikazano Slikom 24. [8].

Slikom 27. prikazana su ukupna napreznja sa svakom novom fazom, gornja lijeva slika predstavlja fazu 2, desno od nje faza 3, dolje lijevo faza 4 i na kraju faza 5 dolje desno. Može se prepoznati da dolazi do najvećih pomaka sa dodavanjem opterećenja u fazi 5.



Slika 27. Prikaz ukupnih pomaka za faze 2- 5 [8]

Slikom 28. prikazana je legenda za ukupne pomake po dubini, u drugoj fazi (lijeva slika) najveći pomak iznosio je 0,015 m dok je u petoj fazi (desna slika) on iznosio 0,073 m.

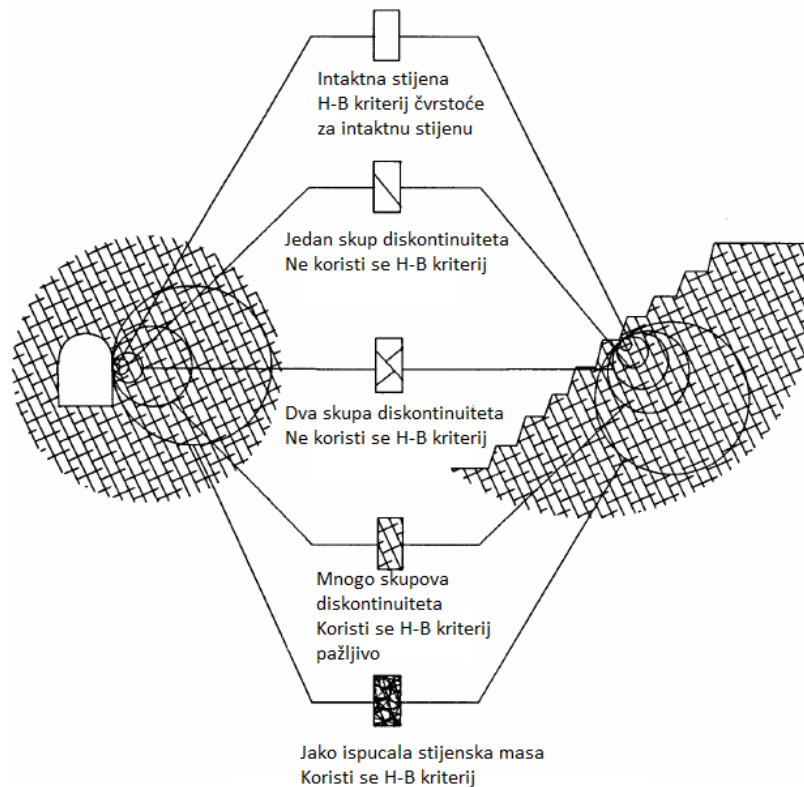


Slika 28. Prikaz ukupnih pomaka po dubini za faze 2 i 5 [8]

4. ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE I DEFORMABILNOSTI STIJSKE MASE

4.1. Hoek-Brown kriterij čvrstoće

Hoek-Brown (H-B) kriterij čvrstoće koristi se za definiranje parametara čvrstoće stijenske mase pri rješavanju inženjerskih problema. Kriterij je godinama mijenjan kako bi bio primjenjiv na problemima koji nisu bili uzeti u obzir u originalnom obliku. H-B kriterij je primjenjiv u intaktnoj stijeni ili u znatno raspucanoj stijenskoj masi, za koje se može usvojiti da se ponašaju homogeno i izotropno. Slikom 29. prikazan je raspon primjenjivosti H-B kriterija čvrstoće [9].



Slika 29. Prikaz primjenjivosti H-B kriterija čvrstoće, prema [10]

4.1.1. Opći oblik Hoek-Brown kriterija čvrstoće

H-B kriterij čvrstoće razvijao se godinama, od originalnog oblika, modificiranog pa sve do općeg oblika koji će biti detaljnije spomenut u ovom dijelu. Godine 1995. Hoek, Kaiser i Bawden predložili su opći oblik H-B kriterija čvrstoće stijenske mase koji je definiran izrazom (1), [9]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(\frac{m_b * \sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

gdje je:

σ'_1 - veće efektivno glavno naprezanje pri slomu,

σ'_3 - manje efektivno glavno naprezanje pri slomu,

m_b - vrijednost konstante m za stijensku masu,

s, a - konstante ovisne o karakteristikama stijenske mase,

σ_c - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijenske mase.

Za intaktnu stijensku masu vrijedi da je $s = 1$ i $a = 0,5$, uvrštavanjem vrijednosti u jednadžbu (1) ona poprima oblik [9]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(\frac{m_i * \sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (2)$$

gdje je:

m_i - vrijednost konstante m za intaktnu stijensku masu,

σ_{ci} - jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijenske mase.

U prošlosti su se vrijednosti parametara m_b , s i a izračunavali u ovisnosti o vrijednosti GSI (jedan set formula za $GSI > 25$, drugi za $GSI < 25$), ali Hoek 2002. godine uvodi faktor poremećenja D te samim time novu formulaciju koja se više ne oslanja na raspon vrijednosti GSI [9]. Dani su slijedeći izrazi:

$$m_b = m_i * \exp \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \quad (3)$$

$$s = \exp \frac{GSI-100}{9-3D} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (5)$$

gdje je:

D – faktor poremećenja

GSI – vrijednost geološkog indeksa čvrstoće

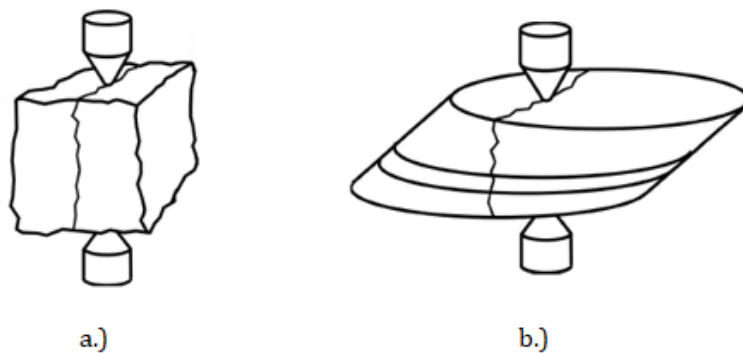
Kako bi H-B kriterij bio upotrebljiv potrebno je odrediti slijedeća svojstva stijenske mase, a to su [9]:

- Jednoosna tlačna čvrstoća σ_{ci} intaktne stijenske mase
- Vrijednost H-B konstante m_i intaktne stijenske mase
- Vrijednost GSI za stijensku masu,
- Faktor poremećenja D za stijensku masu,
- Deformabilnosti E stijenske mase.

4.1.2. Jednoosna tlačna čvrstoća σ_{ci}

Jednoosna tlačna čvrstoća određuje se ispitivanjem uzoraka stijenske mase. Kako bi se dobile vrijednosti σ_{ci} i m_i ispitivanja se provode sa ćelijskim pritiskom u rasponu od $0 < \sigma'_3 < 0,5 \sigma_{ci}$ kako bi ispitivanja bila dosljedna; sa napomenom da se svi uzorci ispituju sa istim ćelijskim pritiskom. Dobiveni uzorci stijenske mase trebaju biti kvalitetno skladišteni kako bi se sadržala *in situ* vlaga uzorka. Vlaga znatno utječe na smanjenje čvrstoće uzorka, te bi uzorci ostavljeni duži period vremena da se osuše doveli do varljivih rezultata. Ispitivanje se provodi na 5 ili više uzoraka [9].

U slučajevima kada je jako teško dobiti uzorak intaktne jezgre stijenske mase (kao za fliš), moguće je provesti PLT (Point Load Test) pokus ispitivanja manjih nepravilnih uzoraka stijenske mase (Slika 30.) [11].



Slika 30. PLT ispitivanje a.) na uzorku izabranom s površine b.) na uzorku dobivenom iz bušotine [11]

U slučajevima kada nije moguće dobiti uzorak za PLT pokus, jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene može se definirati terenskom procjenom prema Tablici 2..

Tablica 2. Terenska procjena jednoosne tlačne čvrstoće stijenske mase [11]

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, sandstone, schist
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Concrete, phyllite, schist, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rocksalt,
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock, shale
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

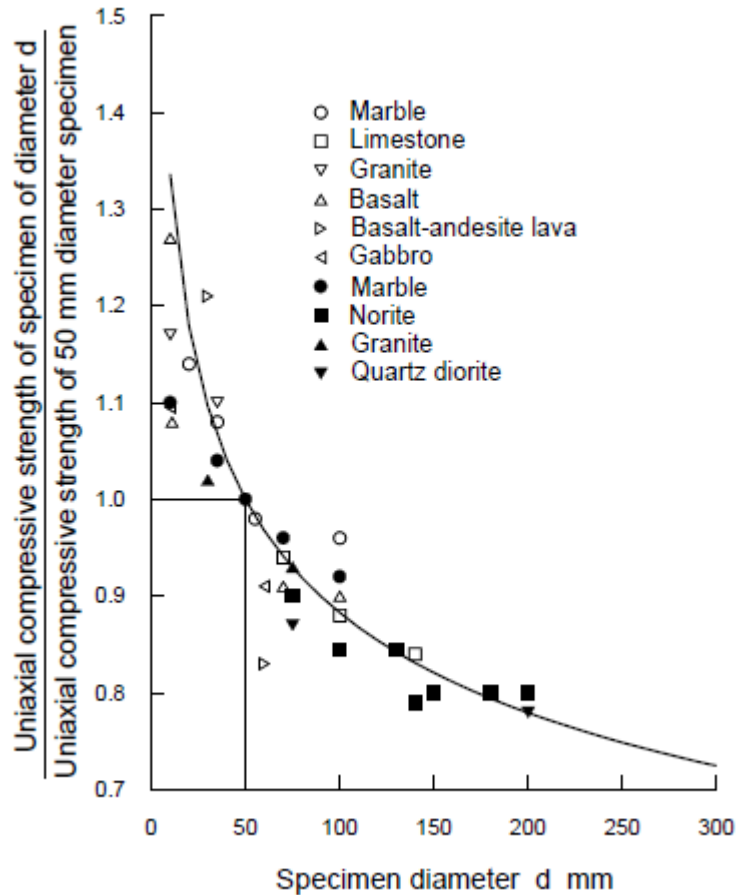
* Grade according to Brown (1981).

** Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Jedan od jako bitnih čimbenika za čvrstoću stijenske mase je veličina ispitanog uzorka, jer sa povećanjem veličine uzorka dolazi do smanjenja čvrstoće. Hoek i Brown su predložili formulu gdje su promjer uzorka d i njegova jednoosne tlačna čvrstoća σ_{cd} povezani sa uzorkom jednoosne tlačne čvrstoće σ_{c50} i promjera $d = 50$ slijedećom formulom (6) [9]:

$$\sigma_{cd} = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{d} \right)^{0,18} \quad (6)$$

Rezultati ispitivanja koristeći jednadžbu (6) prikazani su Slikom 31. gdje se jasno može vidjeti smanjenje čvrstoće sa povećanjem uzorka. Ovaj slučaj se može objasniti time da povećanjem uzoraka raste broj pukotina, uzorak je puno anizotropniji, te veća heterogenost materijala [9].



Slika 31. Utjecaj veličine uzorka na čvrstoću stijenske mase [11]

4.1.3. Određivanje vrijednosti konstante m_i

Vrijednost konstante m_i moguće je dobiti troosnim ispitivanjem na uzorku stijene ili na osnovi opisa kvalitete stijenske mase (geološkom porijeklu). Ovaj parametar ovisi o karakteristikama trenja minerala u intaktnom uzorku stijene, te ima značajan utjecaj na karakteristike stijene. U slučajevima kada ne postoji mogućnost troosnim ispitivanja uzorka stijenske mase vrijednost m_i može se uzeti iz tablice prikazane tablicom 3. [11].

Vrijednosti prikazane tablicom 3. dobivene su troosnim ispitivanjem na više intaktnih jezgri uzoraka stijenske mase, te ti brojevi predstavljaju prosjek dobivenih vrijednosti m_i . Vrijednost m_i jedan je od manje osjetljivih parametara za upotrebu u H-B kriteriju čvrstoće te samim tim uzimanje srednje vrijednosti iz tablice će biti dovoljno precizni za većinu praktičnih primjena [11].

Tablica 3. Tablica za odabir vrijednosti m_i za intaktnu stijenu ovisno o geološkom porijeklu [11]

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
Organic					Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
		Slightly foliated	Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated*			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5	Granodiorite (29 ± 3)	
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava	Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5		Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Volcanic breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

4.1.4. GSI klasifikacija

Određivanje svojstava stijenske mase jedno je od najvažnijih pitanja u projektiranju i izgradnji tunela u zonama rasjeda. *GSI* klasifikacija omogućuje određivanje najvažnijih parametara stijenske mase (m_b , s , a , E) prema svojstvima netaknute stijene i diskontinuitetima stijenske mase primjenom H-B kriterija čvrstoće. Sustav je kvantitativan, dobro opisan i daje razumne rezultate za blokovite stijenske mase [12].






GSI ne uključuje sve utjecajne čimbenike relevantne za karakterizaciju stijenske mase. Na primjer, ne uzima se u obzir anizotropija stijenske mase. Općenito, *GSI* sustav je primjenjiv u stijenskim masama gdje se mogu ocijeniti svojstva netaknute stijene i svojstva diskontinuiteta. Vrlo je važno nezavisno procijeniti parametre za netaknutu stijenu i diskontinuitete. *GSI* klasifikacija dostiže svoja ograničenja pojavom slabih smicanih stijenskih masa kada se netaknuta stijena i diskontinuiteti ne mogu zasebno opisati. U takvim uvjetima čvrstoću stijenske mase treba procjenjivati drugim metodama [12].

Velika prednost *GSI* sustava je mogućnost njegove gotovo neograničene primjene tijekom različitih faza projekta. Može se koristiti za karakterizaciju stijenske mase iz istražnih bušenja, kao neizravni ulazni parametar za numeričke analize, a također i tijekom iskopavanja. To rezultira kontinuiranom uporabom parametara s postupnim povećanjem kvalitete informacija o vrijednostima parametara tijekom razvoja projekta od prve faze istraživanja do izgradnje [12].

4.1.5. Faktor poremećenja D

Faktor poremećenja D ovisi o stupnju poremećenja nastalog u stijenskoj masi uslijed miniranja i relaksacije stanja naprezanja. Veličine faktora variraju od 0 do 1, on je 0 za neporemećene stijenske mase i 1 za vrlo poremećene stijenske mase. Slika 32. prikazuje tablicu za preporuku odabira vrijednosti faktora poremećenja [9].

Iskustva pri projektiranju velikih rudnika pokazala su da rezultati sa vrijednošću $D = 0$ donose previše optimistične rezultate, dok sa $D = 1$ se dobivaju realističniji rezultati [13].

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Slika 32. Preporuke za odabir vrijednosti faktore poremećenja [9]

4.1.6. Deformabilnost stijenske mase

Deformacija je odnos deformiranog i početnog stanja (bilo volumen ili dužina). Deformabilnost karakterizira modul koji opisuje odnos između primijenjenog opterećenja i rezultirajućeg naprezanja. Deformabilnost stijenske mase ovisi o stupnju raspucalosti, veličini promatranog problema, o veličini naprezanja, itd. [9, 14].

Deformabilnost se može odrediti terenskim ispitivanjima koja su jako pouzdana, ali su isto tako jako skupa i teška za izvođenje. Neka od terenskih ispitivanja su pokus opterećenja pločom, pokus radijalnog opterećenja, ispitivanje tlačnim jastucima, dr. Modul deformabilnosti se također posredno može odrediti iz laboratorijskih ispitivanja (ispitivanja u jednoosnom i troosnom uređaju). Najmanje precizna metoda određivanja je korištenjem empirijskih izraza kod kojih se deformabilnost stijenske mase dobiva na osnovi klasifikacije stijenske mase, ali je ona i daleko najbrža metoda [9, 13].

Godine 2006. Hoek i Diederichs su koristeći bazu podataka mjerenja modula deformacije stijenske mase iz Kine (i Tajvana), predložili slijedeći empirijski izraz (7) [9, 15]:

$$E_{rm}(MPa) = E_i \left\{ 0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60+15D-GSI)/11]}} \right\} \quad (7)$$

gdje je:

E_i – deformacijski modul intaktne stijenske mase

D - faktor poremećenosti stijenske mase.

Ukoliko vrijednost E_i nije moguće dobiti iz laboratorijskih ispitivanja onda ga je moguće dobiti koristeći konstantu MR . MR predstavlja smanjenje vrijednosti stijenske mase, predložio ga je Deere 1968. godine te je on daljnje modificiran od strane Palmstrom i Singh 2001. godine. Vrijednost je moguće dobiti koristeći se slijedećom jednadžbom (8) [9, 15]:

$$E_i = MR * \sigma_{ci} \quad (8)$$

Vrijednost MR dana je tablično (Tablica 4.), isto kao i kod konstante m_i vrijednost se uzima iz tablice ovisno o geološkom porijeklu stijenske mase. Vrijednosti E_i rijetko su dostupne pa čak i kada jesu nisu stopostotno pouzdani radi mogućeg oštećenja uzoraka. Oštećenje

uzorka stijenske mase puno više utječe na smanjenje modula deformacije nego na čvrstoću stijenske te je stoga ovaj način dobivanja vrijednosti E_i može smatrati pouzdanijim [9, 15].

Tablica 4. Tablica za odabir vrijednosti MR za intaktnu stijenu ovisno o geološkom porijeklu [9]

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300–400 Breccias 230–350	Sandstones 200–350	Siltstones 350–400 Greywackes 350	Claystones 200–300 Shales 150–250 ^a Marls 150–200
		Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400–600	Sparitic limestones 600–800	Micritic Limestones 800–1000
		Evaporites		Gypsum (350) ^b	Anhydrite (350) ^b	
		Organic				Chalk 1000+
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700–1000	Hornfels 400–700 Metasandstone 200–300	Quartzites 300–450	
	Slightly foliated		Migmatite 350–400	Amphibolites 400–500	Gneiss 300–750 ^a	
	Foliated ^a			Schists 250–1100 ^a	Phyllites/Mica Schist 300–800 ^a	Slates 400–600 ^a
Igneous	Plutonic	Light	Granite ^c 300–550 Granodiorite ^c 400–450	Diorite ^c 300–350		
		Dark	Gabbro 400–500 Norite 350–400	Dolerite 300–400		
	Hypabyssal			Porphyries (400) ^b	Diabase 300–350	Peridotite 250–300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300–500 Andesite 300–500	Dacite 350–450 Basalt 250–450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400–600	Volcanic breccia (500) ^b	Tuff 200–400	

^aHighly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.

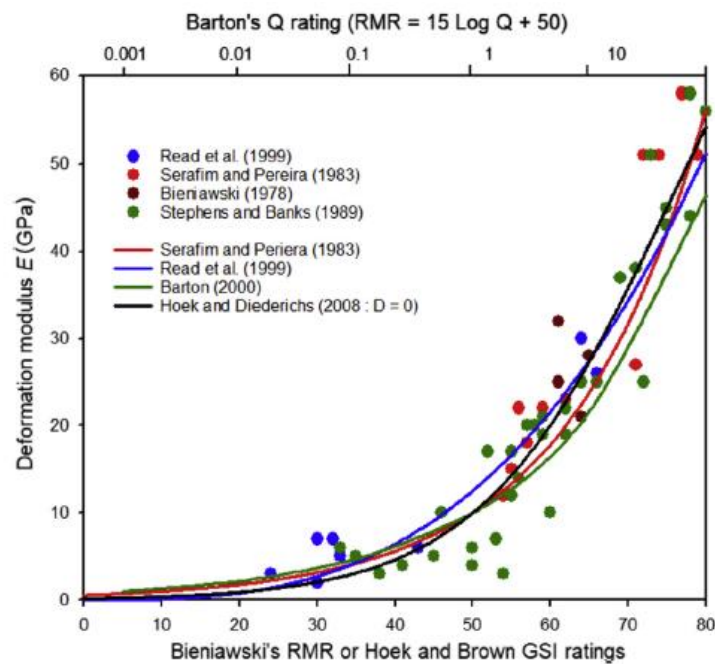
^bNo data available, estimated on the basis of geological logic.

^cFelsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

Ukoliko se ne može doći do nijednog podatka o vrijednostima intaktnog modula deformabilnosti E_i , Hoek i Diederichs (2006.) predložili su pojednostavljenu jednadžbu (9) za izračunavanje modula deformabilnosti gdje se koriste samo parametri GSI i D kao ulazni parametri [9].

$$E_{rm}(MPa) = 10^5 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right) \quad (9)$$

Slikom 33. dana je usporedba između procijenjenog modula deformabilnosti danog jednadžbom (9), te drugih metoda procjene modula deformabilnosti (Bieniawski (1978), Serafim i Pereira (1983), Stephens i Banks (1989), Read et al. (1999), te Barton (2002)), direktno sa dobivenim rezultatima terenskih ispitivanja. Generalni sporazum je da se sve spomenute metode mogu sa sigurnošću koristiti za procjenu modula deformabilnosti [15].



Slika 33. Usporedba između rezultata dobivenih terenskim ispitivanjima i deformacijskih modula procijenjenih različitim empirijskim metodama, [15]

4.2. Mohr-Coulomb-ov kriterij posmične čvrstoće

Mohr-Coulomb-ov kriterij čvrstoće je korišten u velikom broju geotehničkih softvera, te je ponekad potrebno odrediti ekvivalentne kutove trenja i koheziju za stijensku masu i raspone naprezanja. To se postiže uklapanjem prosječnog linearnog odnosa u krivulju generiranu jednadžbom (1) (opći oblik H-B kriterija čvrstoće) za raspon manjih vrijednosti glavnih naprezanja $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$ (Slika 34.). Proces uklapanja uključuje uravnoteženje gornjih i donjih područja Mohr-Coulomb anvelope, čime se dobiva prosječna vrijednost kohezije materijala c' i kuta unutarnjeg trenja materijala φ' prikazano jednadžbama (10) i (11) [9, 13]:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (10)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2s)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+}} \quad (11)$$

gdje je:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}}.$$

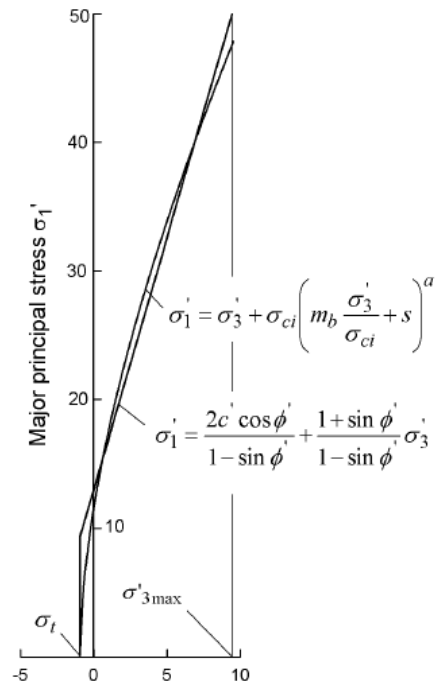
Potrebno je imati na umu da vrijednost σ'_{3max} , gornja granica ćelijskog pritiska nad kojim se razmatra odnos H-B i Mohr-Coulomb kriterija čvrstoće, treba biti određen za svaki pojedinačni slučaj [9, 13].

Mohr-Coulomb posmična čvrstoća τ , za zadano normalno naprezanje σ , dobiva se supstitucijom φ' i c' u slijedeću jednadžbu (12), [9]:

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (12)$$

Matematička veza između H-B i Mohr-Coulomb kriterija čvrstoće, u smislu većih i manjih glavnih naprezanja, moguće je izraziti slijedećom jednadžbom (13), [9, 13]:

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'} + \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \sigma'_3 \quad (13)$$

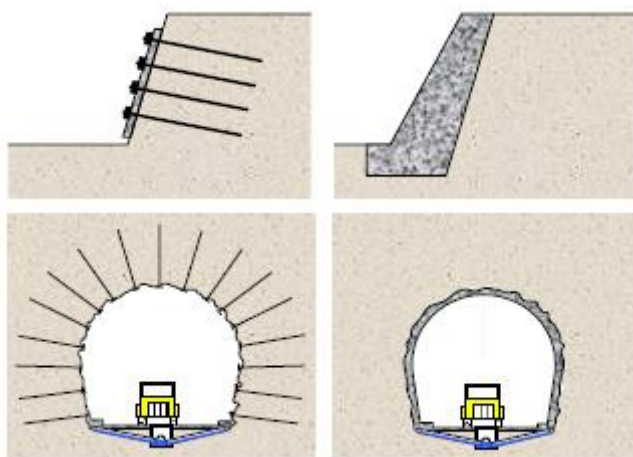


Slika 34.. Odnosi između većih i manjih glavnih napreznaja za H-B i ekvivalentni Mohr-Coulomb kriterij čvrstoće [9, 13]

5. TEHNIKE STABILIZACIJE TUNELA

Za stabiliziranje stijenske mase, bez obzira na mehanizam po kome se pomak dešava, primjenjuju se dvije vrste mjera koje se kombiniraju radi postizanja ravnotežnog stanja (Slika 35.) [16]:

- Armiranje stijenske mase - armiranjem se diskontinuirana stijenska masa počinje ponašati kao kontinuum.
- Podupiranje - elementi podgrade se ugrađuju u iskop sa svrhom da ograniče pomak konture iskopa na dopuštenu vrijednost.



Slika 35. Prikaz armiranja (lijevo) i podupiranja (desno) [16]

5.1. Armiranje stijenske mase

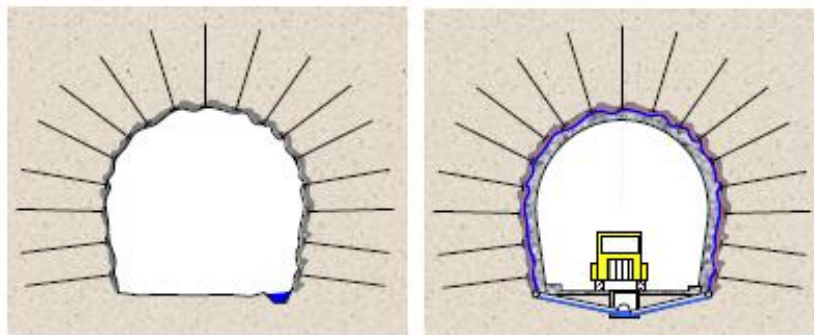
Armiranjem se inženjerski elementi ugrađuju u stijensku masu. Armiranjem kontinuirane stijenske mase popravljaju se njena opća svojstva i ponašanje u okolini iskopa. Armiranjem diskontinuirane stijenske mase se poboljšavaju njena mehanička i strukturna svojstva te sprječavaju veliki pomaci kompletnih blokova stijene, a najefikasnije je u jače deformabilnoj stijeni niske čvrstoće [16].

Ako se ugrađuje tanki sloj mlaznog betona, radi zaštite površine stijenske mase ili za sprječavanje ispadanja manjih blokova, on ne pripada elementima za podupiranje jer mu je nosivost beznačajna. U ovom slučaju mlazni beton se smatra elementom armiranja [16].

5.2. Primarna i sekundarna podgrada

Naziv podgrada često se koristi za opis procedura i materijala koje se koriste za poboljšanje stabilnosti i održavanje samonosivosti stijenske mase u blizini granica podzemnog iskopa tunela. [16].

Primarna podgrada ili armiranje primjenjuje se za vrijeme ili odmah nakon iskopa kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom kasnijeg iskopa te inicirao proces mobilizacije i konzervacije čvrstoće stijenske mase tako da ona postane samonosiva. Ona je jedan dio ukupne podgrade, ali nekada čini ukupnu podgradu. Svaka dodatna podgrada ili armiranje primijenjena u kasnijoj fazi naziva se sekundarnom (Slika 36.) [16].



Slika 36. Primarna podgrada (lijevo) i sekundarna podgrada (desno) [16]

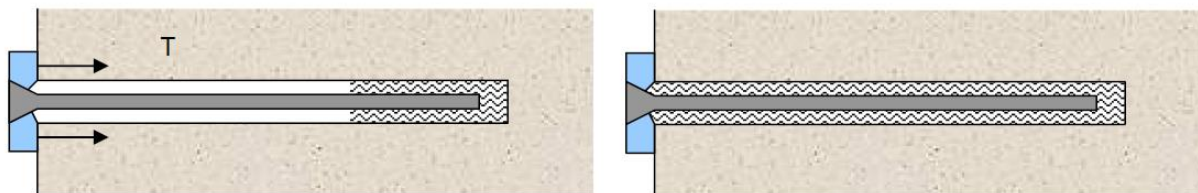
Primarna podgrada ili armiranje najčešće sadrže sljedeće konstruktivne elemente: stijenska sidra (aktivna i pasivna), kablove, armirani mlazni beton, čelične lukove (punog profila ili rešetkaste), cijevni kišobran (piperoof), beton u izrezanim zarezima [16].

Sekundarna podgrada najčešće sadrži sljedeće konstruktivne elemente: nearmirani ili armirani beton, prefabricirane betonske elemente, čelične segmente, dodatno armiranje. Ona ima funkciju pridržavanja hidroizolacije, a tunelu daje aerodinamički profil [16].

5.3. Stijenska sidra

Stijensko sidro je element za armiranje, a najčešće je izrađen od punog ili cijevnog čeličnog profila. Ovisno o tome da li se tijekom ugradnje prednapinje ili ne (Slika 37.), razlikujemo [16]:

- aktivno (prednapregnuto),
- pasivno (neprednapregnuto).



Slika 37. Aktivno (lijevo) i pasivno (desno) sidro [16]

Prednosti stijenskog sidra su da se može koristiti kod bilo koje geometrije iskopa, jednostavno i brzo se ugrađuje, relativno je jeftino, ugradnja može biti potpuno mehanizirana, raspored i duljina se može tijekom ugradnje mijenjati ovisno o lokalnim prilikama, jednostavno se kombinira s drugim načinima podgrađivanja (mlazni beton, čelična pletiva, betonske obloge i dr.) jednostavno se kombinira s drugim načinima podgrađivanja (mlazni beton, čelična pletiva, betonske obloge i dr.) [16].

5.4. Štapna sidra

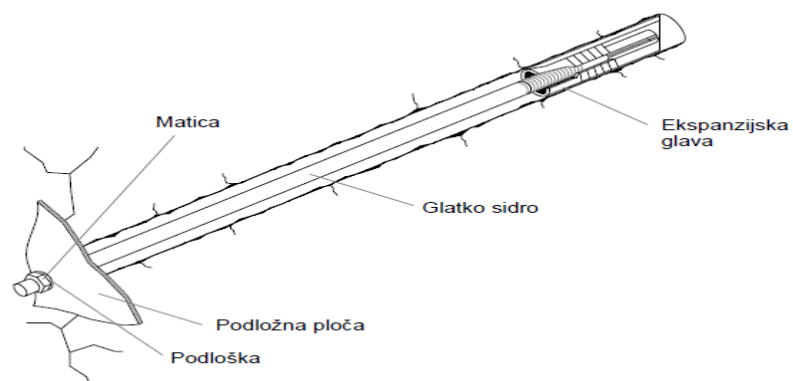
U projektiranju podgradnog sustava stijenske mase potrebno je odgovarajućim mjerama pomoći stijenskoj masi da nosi samu sebe. Kombinacija štapnih sidara te mreža i/ili mrežama ojačanog mlaznog betona predstavlja optimalni podgradni sustav za stabilizaciju stijenske mase, kako za privremene, tako i za trajne podgradne konstrukcije [17].

Danas se koriste različiti tipovi štapnih sidara s malim konstrukcijskim razlikama koji pripadaju istom konceptu u smislu prijenosa opterećenja. Prema načinu prijenosa sile sa sidra na stijensku masu i obrnuto, razlikuju se [16, 17]:

- mehanički usidrena štapna sidra,
- injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti,
- trenjem usidrena štapna sidra.

5.4.1. Mehanički usidrena štapna sidra

Štapna sidra s ekspanzijskom glavom su najčešći oblik mehanički usidrenih štapnih sidara (Slika 38.). Sidrenje se ostvaruje trenjem između ekspanzijske glave i zidova bušotine te uklještenjem glave u neravnine zidova bušotine. Uklještenje predstavlja značajniju komponentu u ukupnoj nosivosti sidra. Kada se koristi kao trajni sistem armiranja mora se, radi zaštite od korozije, injektirati nakon ugradnje [16, 17].

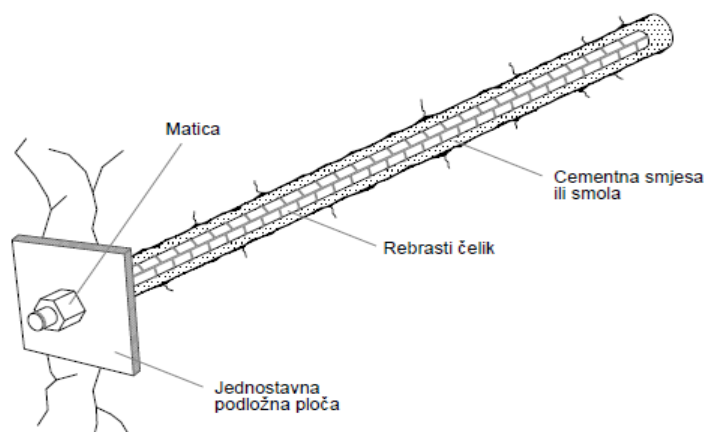


Slika 38. Mehanički usidreno štapno sidro [17]

Prednosti sidara s mehaničkim usidrenjem su niska cijena, djeluju odmah nakon ugradnje, mogućnost ugradnje u srednje tvrdoj i tvrdoj stijenskoj masi. Nedostaci su ograničena uporaba u vrlo tvrdoj stijeni, mogu izgubiti efikasnost armiranja uslijed vibracija izazvanih miniranjem [16].

5.4.2. Injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti

Ova sidra se ugrađuju u bušotine ispunjene cementnom smjesom ili smjesom od umjetnih smola (Slika 39.). Injektirana štapna sidra su u svijetu najčešće ojačanje stijenske mase. Materijal izrade najčešće je rebrasto obrađeni čelik koji se koristi u građevinarstvu ili odgovarajuće obrađeni presjeci čelika posebno proizvedeni za geotehnička sidra. [17].



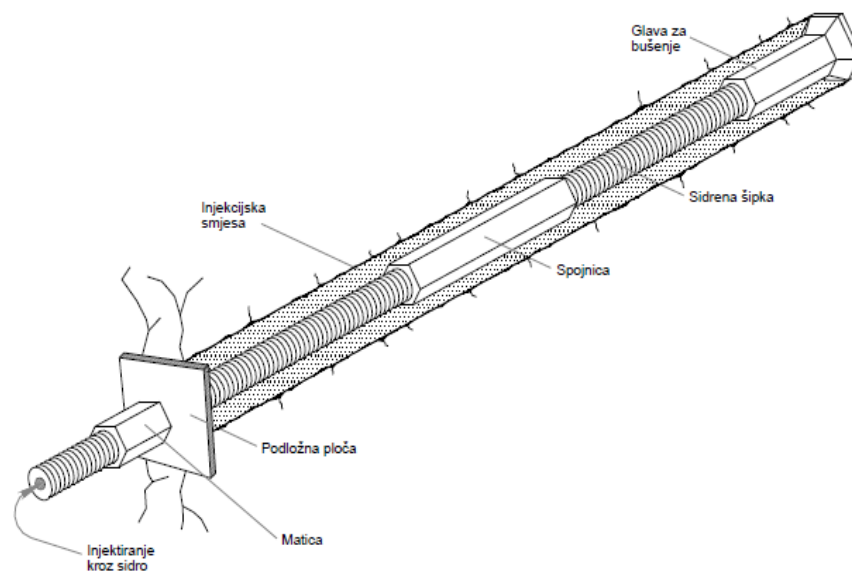
Slika 39. Injektirano štapno sidro [17]

Injektiranje sidara izvodi se na dva različita načina [17]:

- izvedena bušotina se zapuni injekcijskom smjesom, a potom se ugrađuje štapno sidro
- u izvedenu bušotinu ugrađuje se štapno sidro nakon čega se injektira prostor između sidra i zidova bušotine. Injektiranje se izvodi ili ugradnjom cijevi za injektiranje do dna bušotine i injektiranjem do povrata smjese na ušće bušotine ili ugradnjom pakera i injektiranjem od ušća bušotine do postizanja odgovarajućeg pritiska propisanog projektom.

Injektirana štapna sidra većinom se koriste kao pasivna sidra jer se tijekom izvedbe ne unose dodatna opterećenja koja bi se prenosila na stijensku masu. Aktiviraju se uslijed deformacija u stijenskoj masi kada ona preuzimaju dio naprezanja [17].

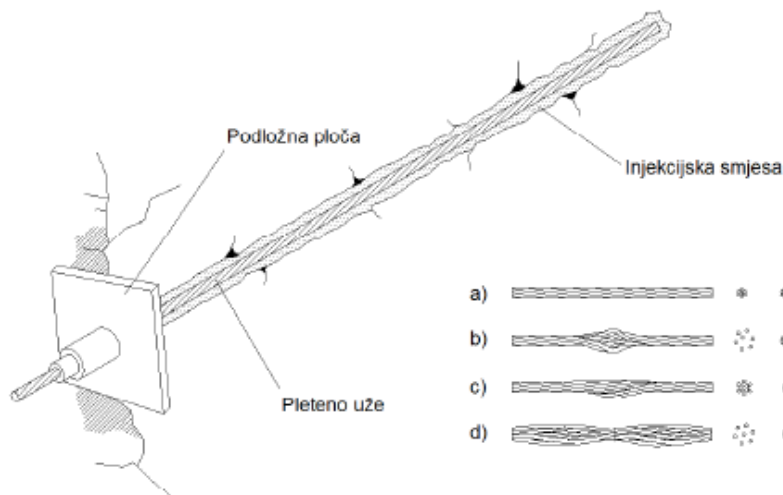
U posljednje vrijeme su u uporabi samobušiva štapna sidra (Slika 40.). Koriste se kao dio bušačkog sustava tako što se umjesto bušaće šipke koriste elementi samobušivog sidra koji na vrhu imaju odgovarajuću bušaću glavu. Elementi sidra proizvode se u sekcijama standardne dužine (2, 3 ili 4 m), a po potrebi se nastavljaju odgovarajućim spojnica. Bušenjem sidra odgovarajuće dužine završeno je i postavljanje sidra [17].



Slika 40. Samobušivo štapno sidro [17]

Prednosti samobušivih sidara su mogućnost ugradnje značajno dugih izvedbi te mogućnost ugradnje u jako oštećene stijenske mase. Kroz samobušivo štapno sidro moguće je injektirati samo određeni dio bušotine što omogućuje formiranje slobodnih dionica i unošenje odgovarajućih naprezanja u stijensku masu napinjanjem štapnog elementa [17].

Pletena sidra od visokokvalitetnog čelika, čime se postiže veća nosivost od krutih štapnih sidara, najviše se koriste u SAD-u i Australiji. Odlikuje ih velika specifična površina, ali i velika deformabilnost. Zbog česte upotrebe i velikog iskustva razvijeni su različiti tipovi pletenih sidara (Slika 41.). Modifikacije se sastoje u načinu pletenja čime se u određenim područjima povećava promjer sidara, ali i specifična površina poprečnog presjeka, a modificiraju se i oblici poprečnog presjeka pojedinih niti u pletivu [17].

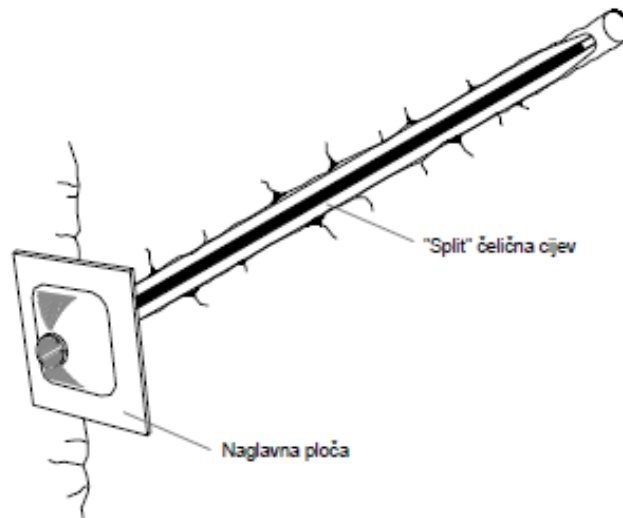


Slika 41. Standardno pleteno sidro od čeličnih niti niti; a) Standardni tip, b) Garford bulb, c) Nutcase i d) Birdcage [17]

5.4.3. Trenjem usidrena štapna sidra

Trenjem usidrena štapna sidra su najnovija dostignuća u tehnici ojačanja stijenske mase. Koriste se tipovi Split Set (Slika 42.) i Swellex (Slika 43.). Naglavna ploča se koristi radi osiguranja dijela stijenske mase na klizanje duž sidra [17].

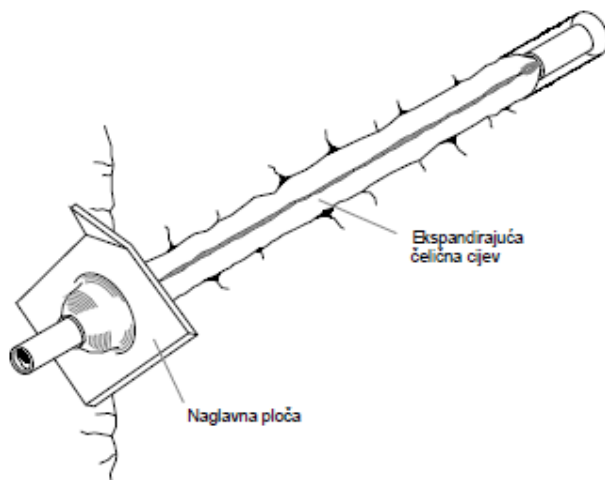
Kod Split Set sidara ugradnja se izvodi mehaničkim utiskivanjem sidra u bušotinu, pri čemu je promjer cijevi sidra veći od promjera bušotine. Sidro se pri tom može prilagoditi velikim pomacima bez sloma [17].



Slika 42. Trenjem usidreno štapno sidro (Split Set) [17]

Prednosti Split Set sidara su jednostavna ugradnja, jednostavna oprema za ugradnju, djeluju odmah nakon ugradnje, lagana primjena žičanog pletiva. Nedostaci su relativno visoka cijena, bušotina mora imati točan promjer, teškoće pri ugradnji duljih sidara, ne mogu se koristiti kao trajna sidra bez posebne antikorozivne zaštite [16].

Kod Swellex sidara ugradnja se izvodi proširivanjem ugrađene cijevi hidrauličkim pritiskom unutar cijevi, pri čemu se cijev skraćuje. Sidro može podnijeti velike deformacije stijenske mase. Najčešće se koristi za tunnelske primarne podgrade [17].



Slika 43. Trenjem usidreno štapno sidro (Swellex) [17]

Prednosti Swellex sidara su relativno jednostavna ugradnja, jednostavna oprema za ugradnju, trenutno preuzimanje opterećenja neposredno nakon ugradnje, mogu se koristiti u različitim stijenskim masama, lagana primjena žičanog pletiva. Nedostaci su relativno visoka cijena, potreba za visokotlačnom pumpom, ne mogu se koristiti za trajne konstrukcije bez posebne antikorozivne zaštite [16].

5.5. Mlazni beton

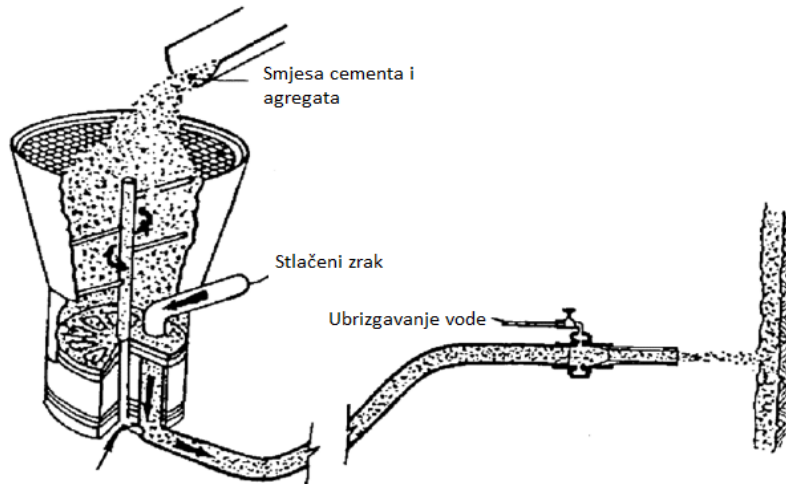
Mlazni beton nazivamo betone dobivene od cementa, pijeska i sitnog agregata koji se ugrađuju pod pritiskom zraka, a uslijed velikih brzina nabacivanja dinamički se zbijaju na podlogu. Razlikuju se dva postupka ugradnje mlaznog betona, a to su [18]:

- Suhi postupak
- Mokri postupak

Završni proizvod dobiven suhim ili mokrim postupkom vrlo je sličan. Odabir načina ugradnje donosi se za svako gradilište zasebno [18].

5.5.1. Suhi postupak

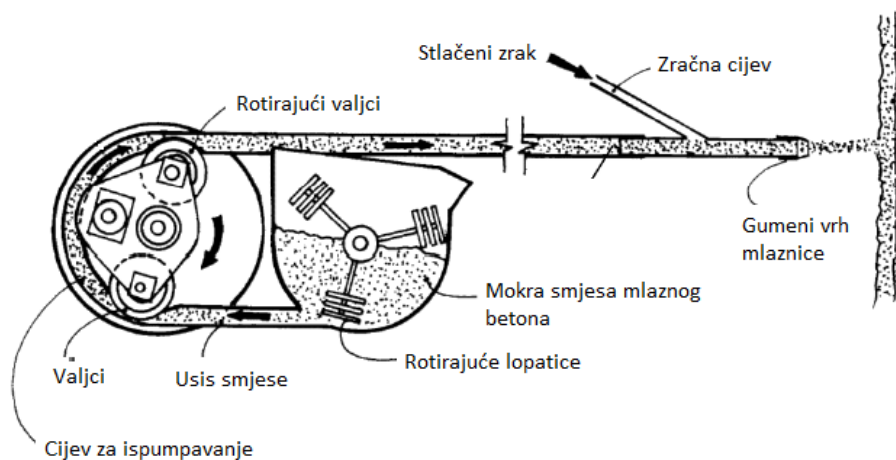
Kod suhog postupka (Slika 44.) se mješavina cementa i agregata, koju se može malo navlažiti radi smanjenja prašine, ubacuje u miješalicu uz neprestano miješanje. Smjesa se stlačenim zrakom dovodi do mlaznice gdje se dodaje voda, a potrebi i aditivi. Energiju prskanja daje stlačeni zrak kojim se smjesa transportira od miješalice do mlaznice [16, 18].



Slika 44. Skica tipičnog sustava za suhi postupak ugradnje mlaznog betona, prema [18]

5.5.2. Mokri postupak

Kod mokrog postupka (Slika 45.) se mješavina agregata, cementa i vode ubacuje u miješalicu za beton. Iz miješalice se gotov mlazni beton isporučuje pumpnom jedinicom u gumenim crijevima do mlaznice gdje se dodaje zrak za injektiranje materijala na površinu stijene. Energiju prskanja daje stlačen zrak koji se dodaje na mlaznici [16, 18].

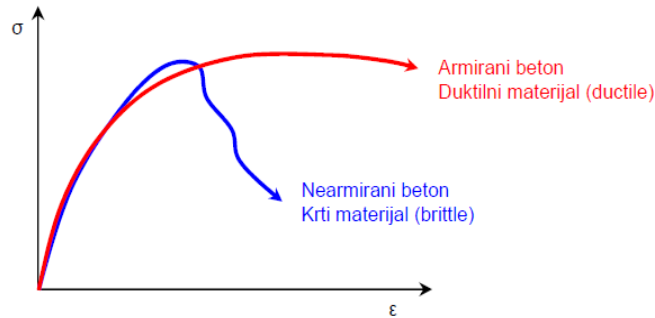


Slika 45. Skica tipičnog sustava za mokri postupak ugradnje mlaznog betona, prema [18]

Idealan je za primjenu u rudarstvu i građevini gdje okna ili dugi tuneli dopuštaju pristup većoj opremi i nesmetan rad dostavnim kamionima[18].

5.5.3. Armiranje mlaznog betona

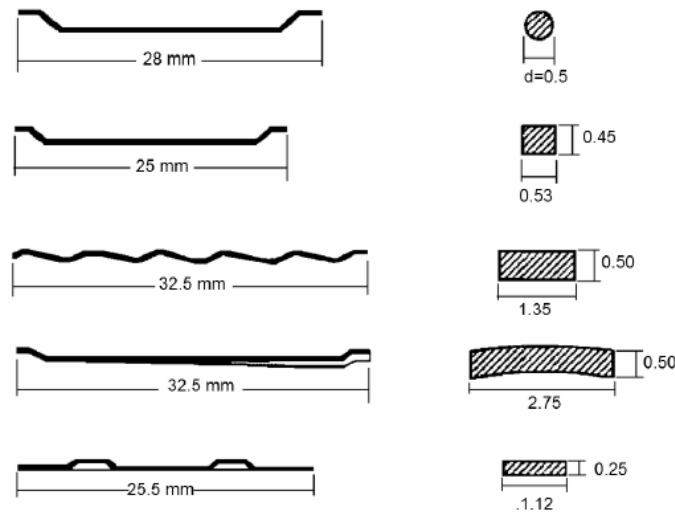
Nearmirani mlazni beton je kruti materijal pa bi se nakon određene deformacije tunelskog otvora pojavio kruti lom (nagli gubitak čvrstoće). Armiranjem se poboljšava prilagodljivost mlaznog betona deformacijama tunelskog otvora (Slika 46.) [16].



Slika 46. Ponašanje armiranog i nearmiranog betona [16]

5.5.3.1. Mikro armirani mlazni beton

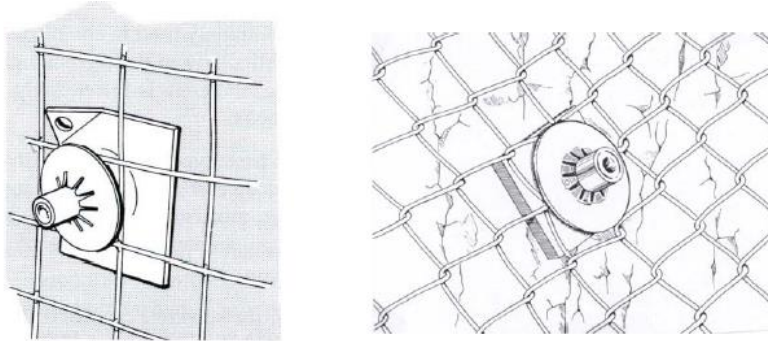
Armiranje betona čeličnim vlaknima raznih oblika koristi se od početka 70-ih godina dvadesetog stoljeća (Slika 47.). Takav mikro armirani beton se od tada upotrebljava kao zamjena za čelične varene mreže i žičana pletiva i u podzemlju i na površini. Mikro vlakna mogu biti i plastična (polipropilenska). Ugrađuje se i suhim i mokrim postupkom [16].



Slika 47. Prikaz različitih tipova čeličnih vlakana [18]

5.5.3.2. Mlazni beton armiran armaturnim mrežama

Mlazni beton armiran armaturnim mrežama (Slika 48.) još se uvijek često upotrebljava, a u ponekad je i poželjniji. Zavarena mreža često se koristi za stabilizaciji padina u stijeni vrlo loše kvalitete ili pri izgradnji podgrada za podzemni iskop kao stabilizacija površine ili ojačanje. Običan mlazni beton, koji se kasnije ugrađuje, služi kao dodatna potpora i za zaštitu mreže od korozije [18].



Slika 48. Prikaz varene čelične mreže (lijevo) i žičanog pletiva (desno) [16]

Prednost varenih mreža je da su općenito idealne za armiranje mlaznog betona i on bez problema prolazi kroz njih pa se ostvaruje dobar kontakt sa stijenom. Nedostatak je što se teško prilagođavaju neravnoj površini iskopa pa je potrošnja betona veća [16].

Prednost žičanih pletiva je što se lagano prilagođavaju na neravnoj površini iskopa, a to smanjuje potrošnju betona. Nedostaci se očituju u teškom prolazu betona kroz mrežu što za posljedicu ima slab kontakt betona i stijene te deformacija mreže pod težinom svježeg betona [16].

6. TUNEL GRIČ

6.1. Opis lokacije

Tunel Grič nalazi se na autocesti A1 Zagreb-Split, dionici Otočac-Lički Osik u blizini naselja Ličko Lešće. Tunel se sastoji od dvije dvotračne tunelske cijevi. Dužine cijevi uzete su prema projektu Tunel Grič, lijeva cijev je dužine 1185 m, dok je desna cijev 1235 m, s najvećim nadslojem od 60 m [19, 21].



Slika 49. Prikaz portala desne cijevi tunela Grič, smjer Zagreb-Split [20]

6.2. Geotehnički istražni radovi

Za potrebe projekta provedena su slijedeća istraživanja [21]:

- Inženjersko-geološko kartiranje
- Istražno bušenje
- Geofizički istražni radovi
- Laboratorijska ispitivanja uzoraka stijenskog materijala

Na trasi su izbušene četiri istražne bušotine SOL-8 (do dubine 30 m), SOL-9 (do dubine 35 m), SOL-10 (do dubine 55 m) i SOL-11 (do dubine 50 m). Dodatno je za potrebe glavnog

projekta izbušena istražna bušotina SOL-105 do dubine 70 m. Prilogom 2. i 3. prikazane su pozicije istražnih bušotina na uzdužnom presjeku desne cijevi prema projektu Tunel Grič [21].

Na uzorcima stijenske mase dobivenih istražnim bušenjem provedena su slijedeća laboratorijska ispitivanja [21]:

- Prostorna gustoća
- Jednoosna tlačna čvrstoća
- Modul elastičnosti
- Tlačna čvrstoća u troosnim uvjetima
- Brzina prostiranja elastičnih valova ultrazvučnom tehnikom niske frekvencije

6.3. Geološki opis masiva

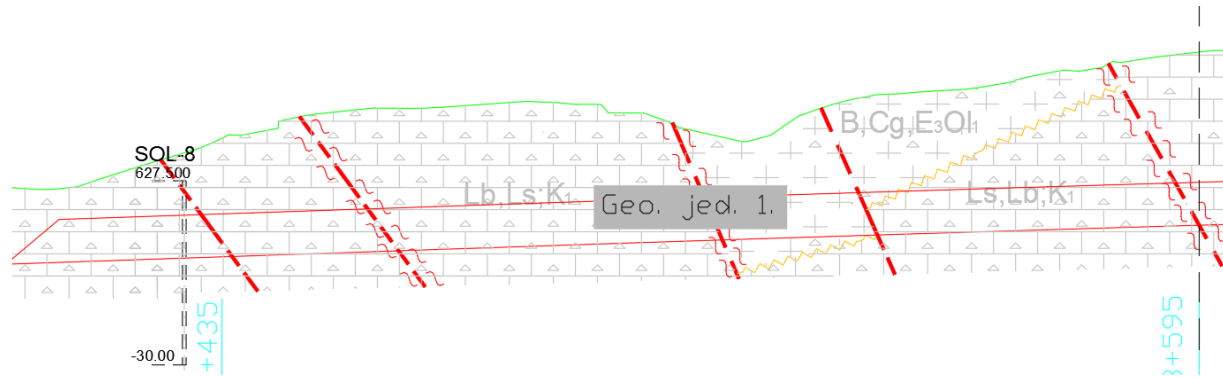
Najstarije stijene u području tunela pripadaju donjoj kredi (K1). Transgresivno na krednim naslagama nalaze se "Jelar" naslage (E30l) nazvane po brdu Jelar u Lici. Osnovne stijene su sivi do sivosmeđi masivni i debelo uslojeni vapnenci (K1) raspucani i razlomljeni tijekom mnogobrojnih tektonskih faza. "Jelar" naslage su predstavljene sedimentnim brečama (kršnik) i brečokonglomeratima u kojima su polimiktni nesortirani uglati do poluzaobljeni fragmenti stijena raznih veličina. Duž zastupljenih diskontinuiteta odvijali su se dijagenetski procesi koji su doveli do stvaranja tektogeno-dijagenetskih breča, koje se s vapnencima vrlo nepravilno izmjenjuju. Vezivo je detritično karbonatno i glinovito-karbonatno, a boja mu je obično crvenkasta. Odnos količine fragmenata i veziva je varijabilan [19].

Istraživano područje je u tektonskom pogledu vrlo komplicirane građe s brojnim rasjedima različite geneze i starosti. Najveći značaj imaju rasjedi smjera pružanja sjever-jug i istok-zapad. Uz njih su obično vezane i šire razlomljene zone. Površina terena u području tunela je izuzetno okršena. Ima puno vrtača različitih veličina sa strmim obroncima. Dno većih vrtača ispunjeno je crvenicom. Inženjersko-geološkim kartiranjem na površini su uočene jame manjih dimenzija [19].

6.4. Zoniranje stijenske mase duž trase tunela na geotehničke jedinice

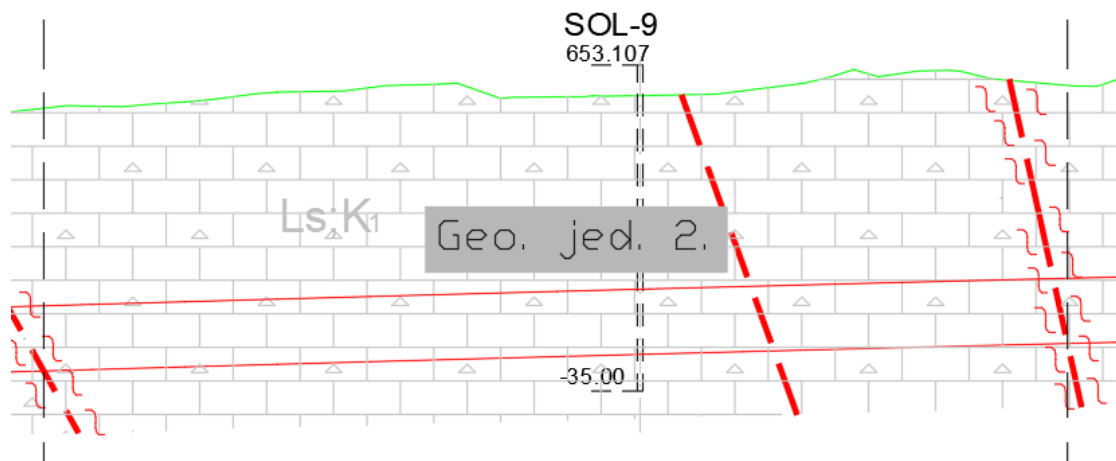
Na osnovni geološkog i inženjersko-geološkog kartiranja duž trase tunela Grič izdvojene su dvije litostratigrafske jedinice i šest tektonskih blokova (I - VI). Litostratigrafske jedinice u kombinaciji s tektonskim blokovima čine četiri geotehničke jedinice unutar kojih su geološke i geotehničke karakteristike bitne za problem stabilizacije podzemnog iskopa približno istovjetne [21].

Geotehnička jedinica 1 prostire se od stacionaže 13+420 do 13+595 metara za desnu cijev i od stacionaže 13+420 do 13+565 metara za lijevu cijev. Geotehničku jedinicu 1 čini litostratigrafska jedinica postsedimentacijske vapnenačke breče – donja kreda, te tektonski blokovi I i II (Slika 50.) [21].



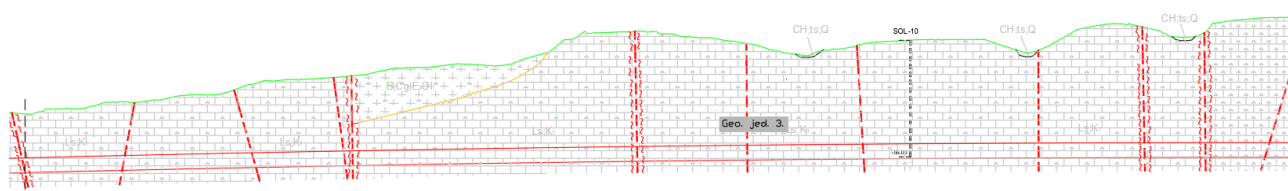
Slika 50. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 1 desne cijevi tunela [21]

Geotehnička jedinica 2 prostire se od stacionaže 13+595 do 13+705 metara za desnu cijev i od stacionaže 13+565 do 13+665 metara za lijevu cijev. Geotehničku jedinicu 2 čini litostratigrafska jedinica vapnenaca i postsedimentacijske vapnenačke breče – donja kreda, te tektonski blok II (Slika 51.) [21].



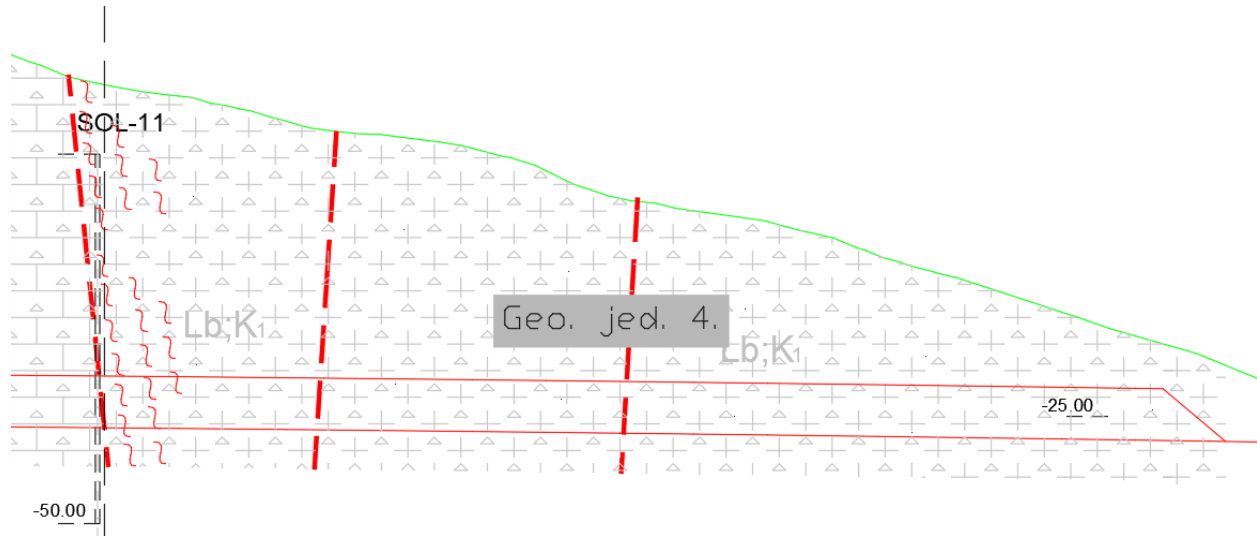
Slika 51. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 2 desne cijevi tunela [21]

Geotehnička jedinica 3 prostire se od stacionaže 13+705 do 14+510 metara za desnu cijev i od stacionaže 13+665 do 14+510 metara za lijevu cijev. Geotehničku jedinicu 3 čini litostratigrafska jedinica vapnenci i postsedimentacijske vapnenačke breče – donja kreda, te tektonski blokovi III, IV i V, (Slika 52.) [21].



Slika 52. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 3 desne cijevi tunela [21]

Geotehnička jedinica 4 prostire se od stacionaže 14+510 do 14+655 metara za desnu cijev i od stacionaže 14+510 do 14+630 metara za lijevu cijev. Geotehničku jedinicu 4 čini litostratigrafska jedinica postsedimentacijske vapnenačke breče i sporadično vapnenci – donja kreda, te tektonski blok VI (Slika 53.) [21].



Slika 53. Prikaz prostiranja geotehničke jedinice 4 desne cijevi tunela [21]

6.5. Određivanje prognoza tipova primarnih sklopova

Bieniawski je 1976. objavio detalje klasifikacije stijenske mase pod nazivom Geomehanička ili RMR klasifikacija. Sustav se usavršavao i mijenjao godinama analiziranjem rezultata primjene i provjere na većem broju projekata baziranih na RMR-u. Slijedećih šest parametara koristi se za klasifikaciju stijenske mase pomoću RMR klasifikacije [22]:

- Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase
- RQD indeks (Rock Quality Designation)
- Razmak diskontinuiteta
- Stanje diskontinuiteta
- Uvjeti podzemnih voda
- Orijentaciji diskontinuiteta

Tablicom 5. dan je prikaz posljednje verzije RMR klasifikacije razvijene 1989. godine. Pomoću ove tablice se određuje se vrijednost parametra RMR [22].

Tablica 5. Tablica za RMR klasifikaciju [22]

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
		Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating	15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating	100 ← 81		80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number	I		II	III	IV	V			
Description	Very good rock		Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number	I		II	III	IV	V			
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span		1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400		300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)	> 45		35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)	< 1 m		1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating	6		4	2	1	0			
Separation (aperture)	None		< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating	6		5	4	1	0			
Roughness	Very rough		Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating	6		5	3	1	0			
Infilling (gouge)	None		Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating	6		4	2	2	0			
Weathering	Unweathered		Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Rating	6		5	3	1	0			
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike*				
Fair			Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Primjenom RMR klasifikacije, stijenska je masa podijeljena na niz pojedinačnih strukturnih regija, a svaka se regija klasificira zasebno. Granice strukturnih područja su u pravilu

određene značajnijim strukturnim pojavama kao što su rasjedi, zdrobljene zone ili promjene vrste stijenske mase. U nekim slučajevima, značajne promjene u razmaku ili karakteristikama diskontinuiteta unutar istog tipa stijene mogu zahtijevati podjelu stijenske mase na niz malih strukturnih područja [22].

Tablicom 2. dani se su vrijednosti prethodno navedenih 6 parametara. Svaki parametar ima svoj raspon bodova. Na kraju ocjenjivanja svi bodovi se sumiraju te se dobiva vrijednost RMR-a. Veći broj znači i bolju kvalitetu stijenske mase. U ovisnosti o brojevima Bienewski je predložio podjelu stijenske mase u 5 kategorija [22]:

- (I) Vrlo dobra stijenska masa (RMR: 81-100)
- (II) Dobra stijenska masa (RMR: 61-80)
- (III) Povoljna stijenska masa (RMR: 41-60)
- (IV) Slaba stijenska masa (RMR: 21-60)
- (V) Vrlo slaba stijenska masa (RMR: <20)

Bieniawski je 1989. objavio skup smjernica za iskop i trajno podgrađivanje tunela u stijeni za koje je utvrđena vrijednost RMR -a. Smjernice su prikazane Tablicom 6. Napomena da su ove smjernice objavljene za tunel u obliku potkove u rasponu od 10 m, izgrađen metodama bušenja i miniranja, u stijenskoj masi izloženoj okomitom naprezanju <25 MPa (ekvivalent dubini ispod površine <900 m) [22].

Tablica 6. Preporuke za iskop i trajno podgrađivanje prema RMR klasifikaciji, prema [22]

Kategorija stijenske mase	Iskop	Sidra	Mlazni beton	Čelični lukovi
I RMR: 81-100	U punom profilu, napredovanje 3m	Generalno nije potrebno potrebno nikakvo podgrađivanje, osim po potrebi		
II RMR: 61-80	U punom profilu, napredovanje 1-1.5 m; podgradu dovršiti 20 m od čela tunela	Pojedinačno sidrenje u svodu; sidra dužine 3 m na razmaku 2.5 m	Po potrebi u svodu 5 cm	
III RMR: 41-60	U dvije faze, napredovanje u svodu 1.5-3 m; podgradu započeti nakon svakog miniranja i dovršiti 10m od čela	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima; sidra dužine 4 m na razmaku 1.5-2 m	Mlazni beton debljine 5-10 cm u svodu i 3 cm na zidovima. Čelična mreža na svodu	
IV RMR: 21-40	U dvije faze, napredovanje u svodu 1-1.5 m; postavljanje podgrade istodobno s iskopom	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima; sidra dužine 4-5 m na razmaku 1-1.5 m	Mlazni beton debljine 10-15 cm u svodu i 10 cm na zidovima. Čelična mreža na svodu i zidovima	Prema potrebi laki do srednji čelični lukovi na razmaku 1.5 m
V RMR: <20	Razrada profila, napredovanje u svodu 0.5-1.5 m; postavljanje podgrade istodobno s iskopom	Sistematsko sidrenje u svodu i zidovima; sidra dužine 5.6 m na razmaku 1-1.5m; sidren podnožni svod	Mlazni beton debljine 15-20 cm u svodu i 15 cm na zidovima te 5cm na čelu; nanošenje mlaznog betona neposredno nakon iskopa. Čelična mreža na svodu i zidovima	Srednji do teški čelični lukovi na razmaku 0.75 m, s čeličnim platicama te predpobijanjem prema potrebi. Zatvoren podnožni svod

Ukoliko je vrijednost RMR-a na granici između dvije kategorije, savjetuje se da se uzmu lošiji uvjeti (niža kategorija od dvije). Ukoliko projekt napreduje bez problema uz stalni monitoring moguće je smanjiti zahtjeve podgradnje odnosno uzeti bolju kategoriju stijenske mase [22].

7. ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE STIJENSKE MASE NA LOKACIJI

Za potrebe ovog rada odabrana je najkritičnija pozicija presjeka za izradu numeričkog modela u desnoj cijevi, odnosno presjek sa najvećim nadslojem kako bi se simulirali najnepovoljniji uvjeti. Presjek se nalazi na stacionaži 14+306.00 metara sa visinom nadsloja $H = 59,12$ m. Položaj karakterističnog presjeka dan je u Prilogu 1. i 3.

Cjelokupni presjek se nalazi u geotehničkoj jedinici 3. Osnovnu stijensku masu čine vapnenci i vapnenačke breče u V tektonskom bloku. U nastavku će biti dana analiza parametara čvrstoće za ovaj specifični presjek.

7.1. Analize parametara čvrstoće

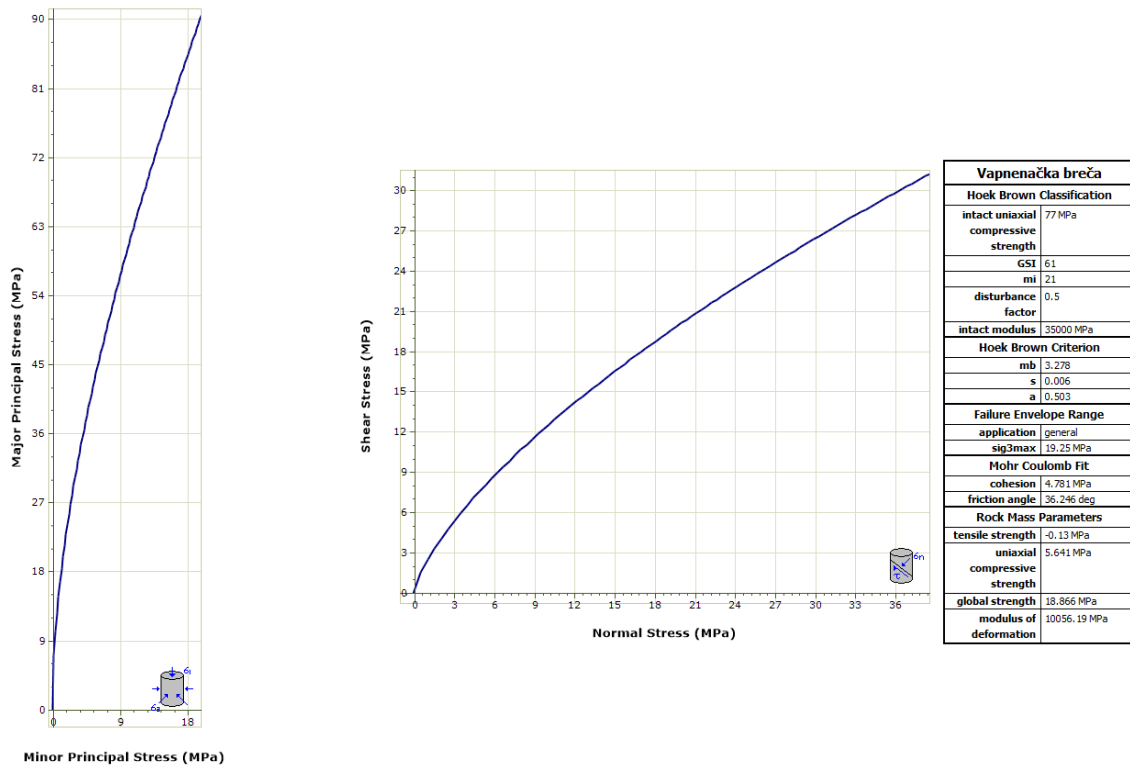
RocData je alat korišten u Rocscience programima koji se koristi na više načina za analizu parametara čvrstoće stijena i tala, te procjenu anvelope čvrstoće i drugih fizičkih parametara [23].

Na osnovu laboratorijskih ispitivanja za intaktnu stijensku masu geotehničke jedinice 3. usvojene su slijedeće vrijednosti relevantnih parametara dani Tablicom 7. [21]:

Tablica 7. Parametri čvrstoće za intaktnu stijensku masu geotehničke jedinice 3, [21]

m_i	σ_{ci}	E_i	D	GSI
21,0	77 [MPa]	35 [GPa]	0,5	61

Unosom parametara danih tablicom 7. u RocData dobivaju se parametri potrebni za proračun čvrstoće stijenske mase općim oblikom H-B zakona čvrstoće (Slika 54.) [21].



Slika 54. Proračun čvrstoće stijenske mase u RocData

7.2. Procjena deformabilnosti

Za procjenu deformabilnosti koristiti će se predložena Hoek i Diederichs (2006.) formula (7) za izračunavanje modula deformabilnosti dana u poglavlju 4.1.6., gdje se koriste parametri E_i , GSI i D kao ulazni parametri. Za intaktni modul elastičnosti $E_i = 35000$ MPa, faktor poremećenja $D = 0,5$ i geološki indeks čvrstoće $GSI = 61$ dobiva se slijedeća vrijednost prosječnog modula elastičnosti [9, 21]:

$$E_{rm} = 35000 \left\{ 0,02 + \frac{1 - 0,5/2}{1 + e^{[(60+15*0,5-61)/11]}} \right\} = 10056,19 MPa$$

7.3. Geostatička naprezanja

Ispitivanja geostatičkih naprezanja nisu bila predviđena u sklopu istražnih radova za tunel Grič. Rezultati istraživanja (Franklin, Hungr, 1978) pokazali su da je utjecaj odnosa horizontalnih i vertikalnih komponenti geostatičkih naprezanja na stabilnost tunela u stijenskim masama u praksi minimalan te isti nije bilo nužno točno odrediti [21].

Za potrebe numeričkog modeliranja vertikalna komponenta geostatičkih naprezanja procijenjena je izrazom (14):

$$\sigma_v = \gamma * H \quad (14)$$

Koeficijent odnosa horizontalnog i vertikalnog naprezanja k definiran je pojednostavljenim izrazom (15) dobivenim na osnovi elastostatičkog termalnog modela naprezanja zemljine kore (Sheorey 1994):

$$k = 0,25 * 7E \left(0,001 + \frac{1}{H} \right) \quad (15)$$

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (16)$$

Za visinu nadsloja $H = 59,12$ m, srednji modul elastičnosti $E = 10,06$ GPa i zapreminsku težinu $\gamma = 2680$ kg/m³ dobivaju se slijedeće vrijednosti geostatičkih naprezanja:

$$\sigma_v = 2680 * 59,12 = 158441,6 \text{ kg/m}^2 \approx 1,58 \text{ MPa}$$

$$k = 0,25 * 7 * 10,06 \left(0,001 + \frac{1}{59,12} \right) = 0,315$$

$$\sigma_h = 0,315 * 1,58 = 0,497 \approx 0,50 \text{ MPa}$$

8. 3D ANALIZE TUNELA GRIČ

8.1. Izrada 3D numeričkog modela

Prvi korak je konfiguriranje glavnih parametara (mjernih jedinica) za analizu unutar RS3, za to se koristi **Project settings**. Project settings-u se pristupa odabirom **Analysis>Project settings** iz glavnog izbornika. Pod karticom **Units** potrebno je postaviti jedinice **Metric, stress as kPa**.

Drugi korak unutar Project settingsa je odabir na karticu **Stages** i napraviti dvije početne faze **In situ** (prva faza) i **Početak iskopa** (Druga faza).

Trećim korakom se definira da nema utjecaja podzemne vode. Odabirom unutar Project settingsa na karticu **Groundwater** potrebno je odabrati Method kao **None**. Težinu pornog fluida ostaviti na početnoj vrijednosti od $9,81 \text{ kN/m}^3$.

8.1.1. Definiranje materijala

Kako bi se materijal definirao potrebno je na glavnom izborniku odabrati **Materials>Define materials**. Prvi korak je imenovati materijal u **Vapnenačka breča**. Unutar kartice Initial Conditions (početni uvjeti) potrebno je Initial Element Loading postaviti na **Body Force Only** te Unit weight (zapreminsku težinu) postaviti na $26,8 \text{ kN/m}^3$, prema rezultatima dobivenih laboratorijskih ispitivanjem za geotehničku jedinicu 3 [21].

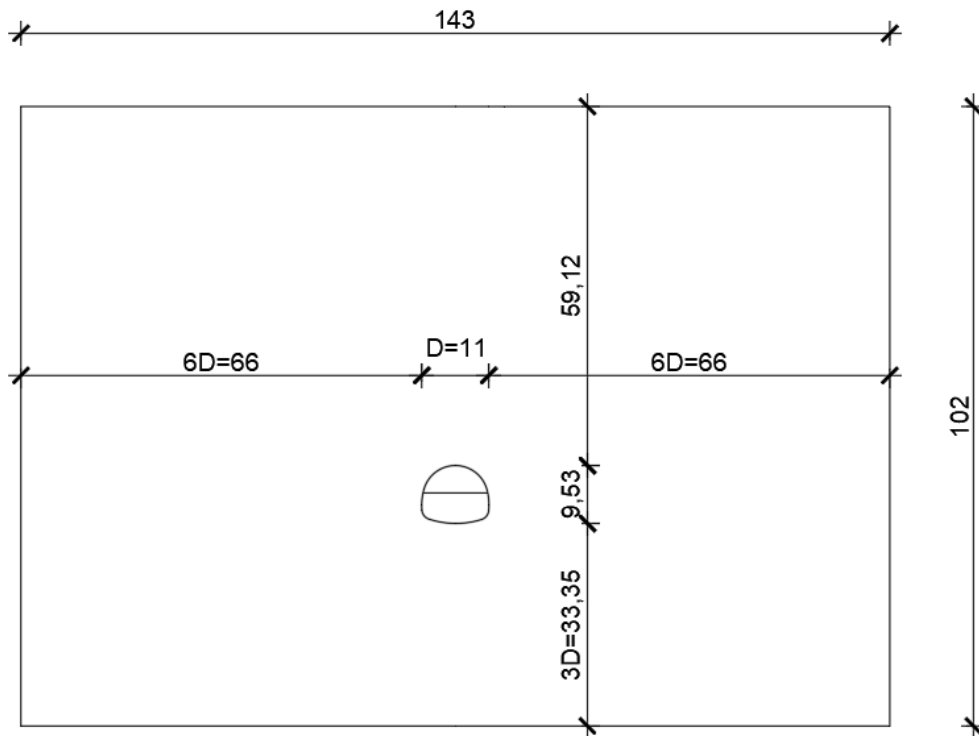
Zatim se unutar kartice Strength (čvrstoća), Failure Criterion postavlja na **Generalized Hoek-Brown**, Material Type na **Elastic**. Prema Tablici 7. unose se vrijednosti za jednoosnu tlačnu čvrstoću $UCS = 77 \text{ MPa}$, geološki indeks čvrstoće $GSI = 61$, vrijednost konstante m za intaktnu stijensku masu $m_i = 21$ i faktor poremećenja $D = 0,5$.

Zadnjim korakom se u kartici Stiffness (krutost) definira Poissonov koeficijent na $\nu = 0,24$, Estimation Method je potrebno postaviti na **Generalized Hoek-Brown** te se na kraju unosi intaktni modul elastičnosti $E_i = 35 \text{ GPa}$ prema Tablici 7.

Program prema zadanim postavkama bilo koju površinu (tijelo) definira kao materijal 1 (osim iskopa), samim time kreirana geometrija biti će u definiranom materijalu (vapnenačka breča).

8.1.2. Kreiranje geometrije

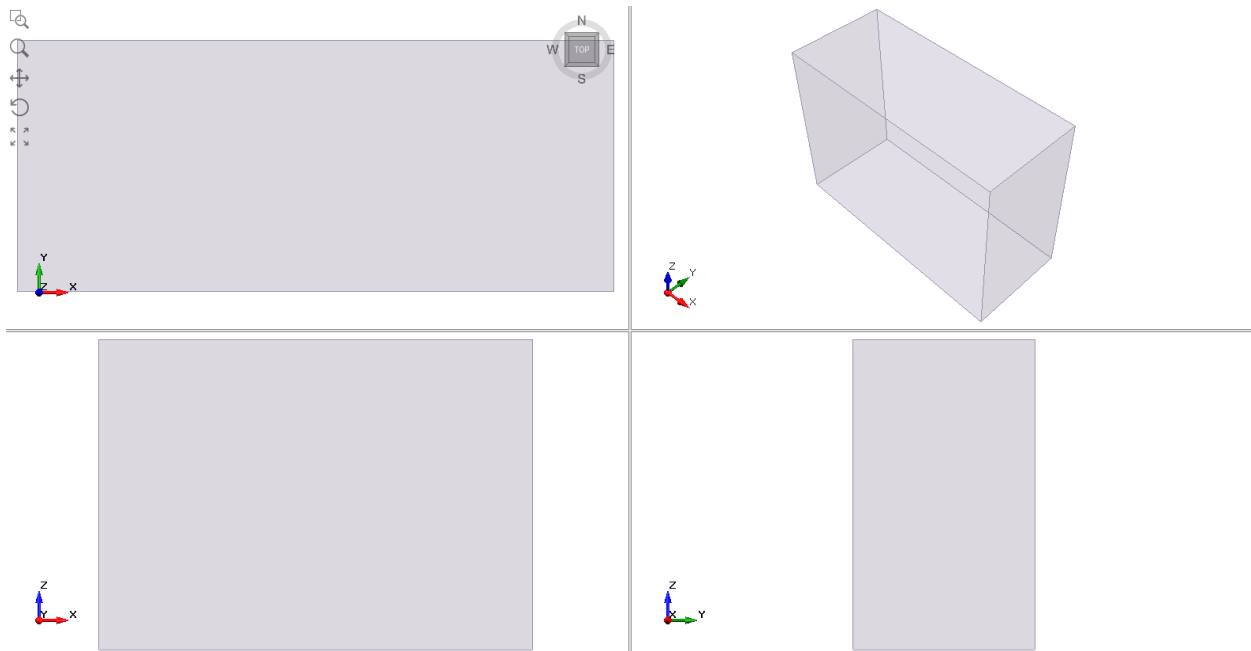
Prije kreiranja geometrije potrebno je odrediti njene dimenzije kako bi se dovoljno udaljili od rubnih uvjeta tj. kako rubni uvjeti ne bi imali preveliki utjecaj na rezultate. Dubina ispod tunela je generalno definirana kao $3D$, gdje je D širina profila iskopa tunela, te su udaljenosti lijevo i desno od iskopa tunela su u pravilu široke $6D$. (Slika 55.).



Slika 55. Dimenzije poprečnog presjeka za promatrani profil tunela Grič

Odabirom **Geometry>Create External Box** na glavnom izborniku otvara se prozor u koji se za prvi kut unosi $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ te za drugi kut $(x, y, z) = (143, 60, -102)$. Dužina modela od 60 metara i broj konačnih elemenata za diskretizaciju modela odabrani su na način da se optimizira utrošak vremena potrebnog za proračun modela u odnosu na preciznost rezultata proračuna.

Slika 56. prikazuje dobivenu 3D geometriju.

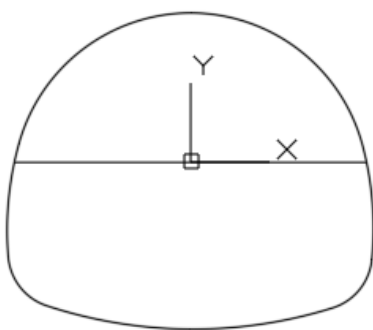


Slika 56. Dobivena 3D geometrija

8.1.3. Izrada tunela

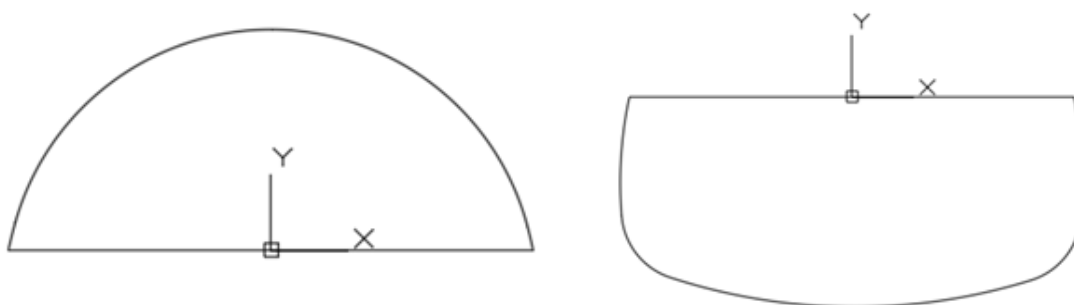
Promatrani profil nalazi se u geotehničkoj jedinici 3. s vrijednošću **RMR = 56** dobiveno prema projektu Tunel Grič [21]. Prema Bieniawskom (Tablica 6.) ovaj materijal je na granici II. i III. kategorije, ali će se uzeti niža kategorija (III. kategorija) kako bi proračun bio na strani sigurnosti. Iskop čela će se izvoditi u dvije faze s napredovanje od 1 m. Prva faza iskopa biti će iskop gornjeg dijela u svodu, te potom druga faza iskop donjeg dijela. Nakon iskopana 3 m ugrađivati će se sidra dužine 4 m na razmaku od 2 m po profilu. Ugradnja mlaznog betona nije obuhvaćena numeričkim modelom.

Iz projekta je preuzet poprečni profil iskopa tunela prikazan u Prilogu 4. Upotrebom *AutoCAD* programa preuzeti profil je postavljen u layer **EXCAVATION** (samo linija iskopa), a granicu prve i druge faze iskopa (horizontalna linija unutar iskopa) u layer **STAGE**. Ova imena layera trebaju biti ovako nazvana kako bi ih softver RS3 mogao prepoznati. Potom je cijeli profil postavljen u ishodište (koordinate 0,0) kako bi se cijev mogla točno pozicionirati unutar geometrije (Slika 57.).



Slika 57. Poprečni presjek iskopa tunela

Kako bi se mogao napraviti iskop u dvije faze potrebno je podijeliti presjek u gornji i donji dio (prvu i drugu fazu), zadržavajući zajedničko ishodište. Svaki dio je potrebno spremiti kao zasebnu **dxf** datoteku. (Slika 58.)



Slika 58. Poprečni presjek iskopa tunela podijeljen u dva dijela

U RS3 programu cjelokupna izrada tunela s iskopom, ugradnjom sidara i mlaznog betona se radi unutar modula Tunnel Designer. Prvi korak je ubacivanje gornjeg i donjeg poprečnog presjeka. Na glavnom izborniku odabrati **Tunnels>Tunnel Designer**. Na desnoj strani prozora potrebno je odabrati karticu **I/O**, te uvesti **dxf** datoteku za gornji poprečni presjek, te potom za donji. Po završetku uvoza Reference Point je potrebno postaviti na $(x, z) = (0.00, 0.00)$, te orijentaciju na **XZ** kako bi tunel bio pravilno pozicioniran unutar geometrije.

Odabirom na **Path** na lijevoj strani prozora može se definirati napredovanje iskopa Extrude i ono će iznositi **3 m**.

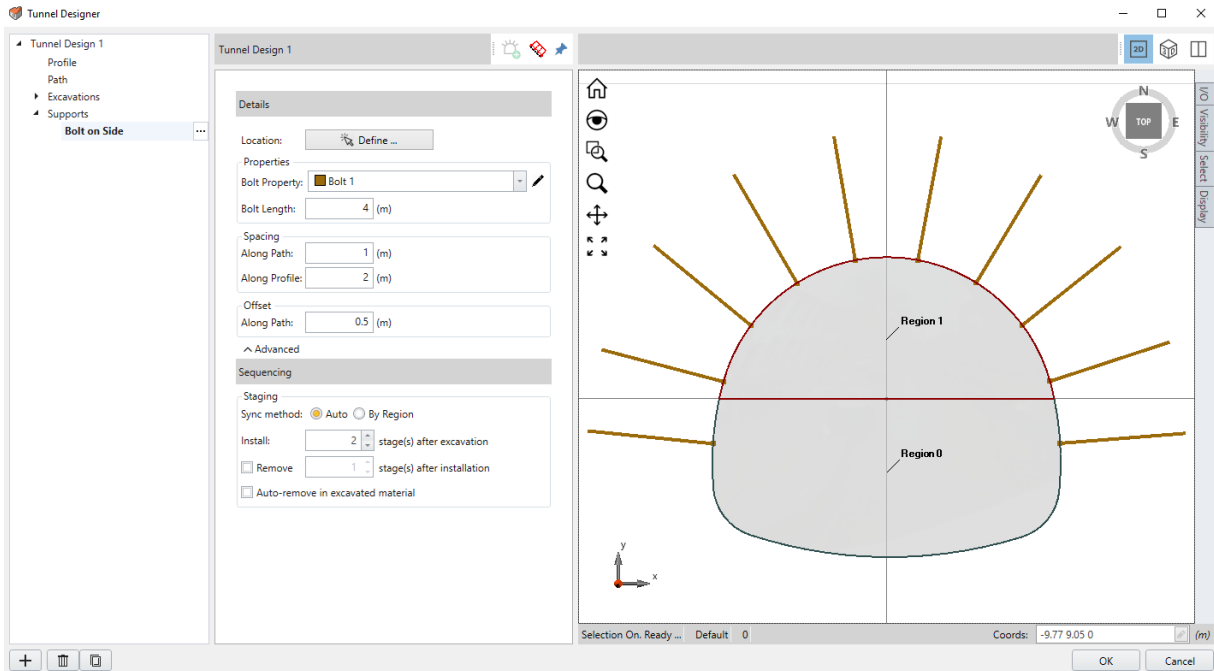
Odabirom na **Excavation>Region 1** potrebno je postaviti Initial material kao **Vapnenačka breča**, zatim odabrati Excavation sequence (sekvencu iskopa) i u njemu postaviti Sequence na **1 m**, Every **2 stages** i na kraju Stage offset **0**. Ovim postavkama se postiže da materijal u kojem se vrši iskop bude vapnenačka breča odnosno materijal geometrije. Iskop je sekvencijalan po 1 m dužine s početkom faze iskopa odgođen (offset) za 0 kako bi početak iskopa u svodu počeo prvi (odnosno bez odgode iskopa), kao što je i predviđeno.

Isti postupak se ponavlja za iskop donjeg dijela profila. Odabirom na **Excavation>Region 0** potrebno je postaviti Initial material kao **Vapnenačka breča**, zatim odabrati Excavation sequence i u njemu postaviti Sequence na **1 m**, Every **2 stages** i na kraju Stage offset **1**. Ovim postavkama se postiže da materijal u kojem se vrši iskop bude vapnenačka breča odnosno materijal geometrije. Iskop je sekvencijalan po 1 m dužine s početkom faze iskopa odgođen za jednu fazu kako bi iskop donjeg dijela profila bio poslije iskopa u svodu kao što je i predviđeno projektom. Iskop se izvodi u 6 faza kako bi se sidra ugrađivala nakon iskopana 3 m.

Slijedeći korak je definiranje svojstava sidara (Bolt 1) koja će se ugraditi na iskop, koristiti će se samobušiva mlazno injektirana štapna sidra (**Fully Bonded**) standardnih karakteristika osim što će im nosivost iznositi **190 kN**, te modul elastičnosti **210 GPa** prema projektu Tunel Grič [21].

Kako bi se dodala sidra u Tunnel designer-u potrebno je kliknuti **Support** na lijevoj strani prozora i odabrati tri točke, klikom na tri točke dobije se padajući izbornik te se odabire **Add Bolts on Perimeter**.

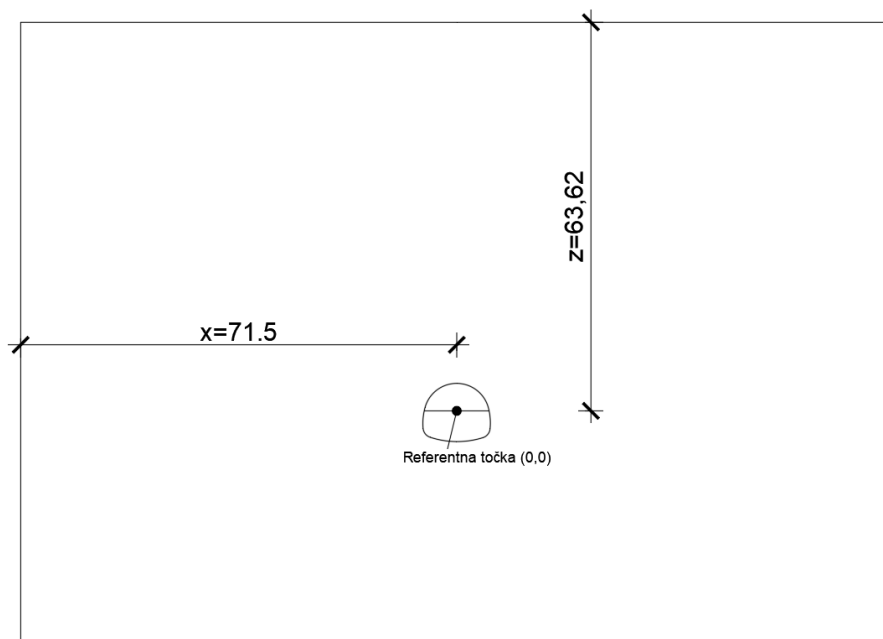
Zadnji korak je odabrati na lijevoj strani prozora **Support>Bolt on Side** te odabrati **Bolt 1**, definirati Bolt Length (dužinu) od **4 m**, Spacing (razmake) Along path (u prostoru) od **1 m**, Along profile (po profilu) od **2 m** i Offset Along path od **0,5 m**. Potom je potrebno Sequencing>Install postaviti na **6 stages after excavation**, ovime se postiže da se ugradnja sidara napravi nakon iskopanih 3 m. Lokacija sidara se definira na Location **Define** klikom po konturi iskopa. (Slika 59.).



Slika 59. Tunel izrađen u Tunnel Designer-u

8.1.4. Ugradnja tunela u geometriju

Prije početka ugradnje (ubacivanja) tunela u geometriju, potrebno je očitati udaljenost od X i Z kako bi se tunela precizno pozicionirao u geometriji. U prethodnom koraku tokom izrade tunela definirano je da se referentna točka nalazi na $(X, Z) = (0.00, 0.00)$ (Slika 60.).

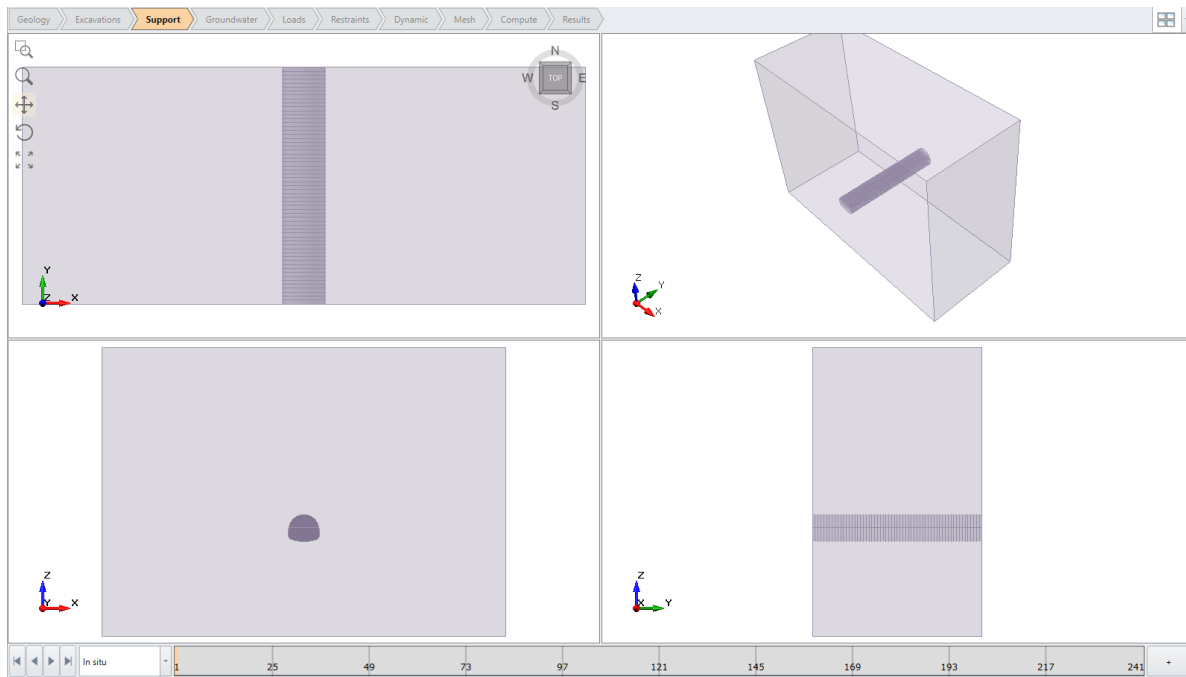


Slika 60. Vrijednosti udaljenosti X i Z

Odabirom na **Tunnels>Add a Tunnel** otvara se prozor za ubacivanje tunela. Tunnel se ostavlja prema zadanim postavkama na **Tunnel Design 1** jer je to i jedini dizajn napravljen. Pozicija tunela se definira na Location i unose se slijedeće vrijednosti $(X, Y, Z) = (71.5, 0, -63.62)$. Iskop tunela započinje u drugoj fazi odnosno fazi nazvanoj **Početak iskopa**.

X i Z će uvijek biti fiksne vrijednosti za ovaj model, jedino će se mijenjati Y u inkrementima od po 3 m, kako bi se napravio kontinuirani tunnel. Odnosno slijedeći korak je ubacivanje tunela sa vrijednostima $(X, Y, Z) = (71.5, 3, -63.62)$, pa korak poslije $(X, Y, Z) = (71.5, 6, -63.62)$ i tako sve dok se ne dosegne rub modela od $Y = 60 m$. Također je jako važno napomenuti da završetkom izrade svake faze tunela ($Y=0, 3, 9, \dots$) je potrebno dodati novu fazu iskopa (npr. početak iskopa 2) odabirom na + na dnu korisničkog sučelja. Razlog za dodavanje nove faze je kako bi se dovršila ugradnja sidara u prethodnoj fazi. Kada bi se tunnel samo nastavljao na zadnjoj fazi iskop gornjeg dijela čela i ugradnja donjeg reda sidara bi se događala u isto vrijeme.

Slikom 61. prikazan je ugrađen i neiskopan tunnel za cijelu dužinu u *in situ* fazi.



Slika 61. Prikaz 3D modela ugrađenog i neiskopanog segmenta tunela Grič

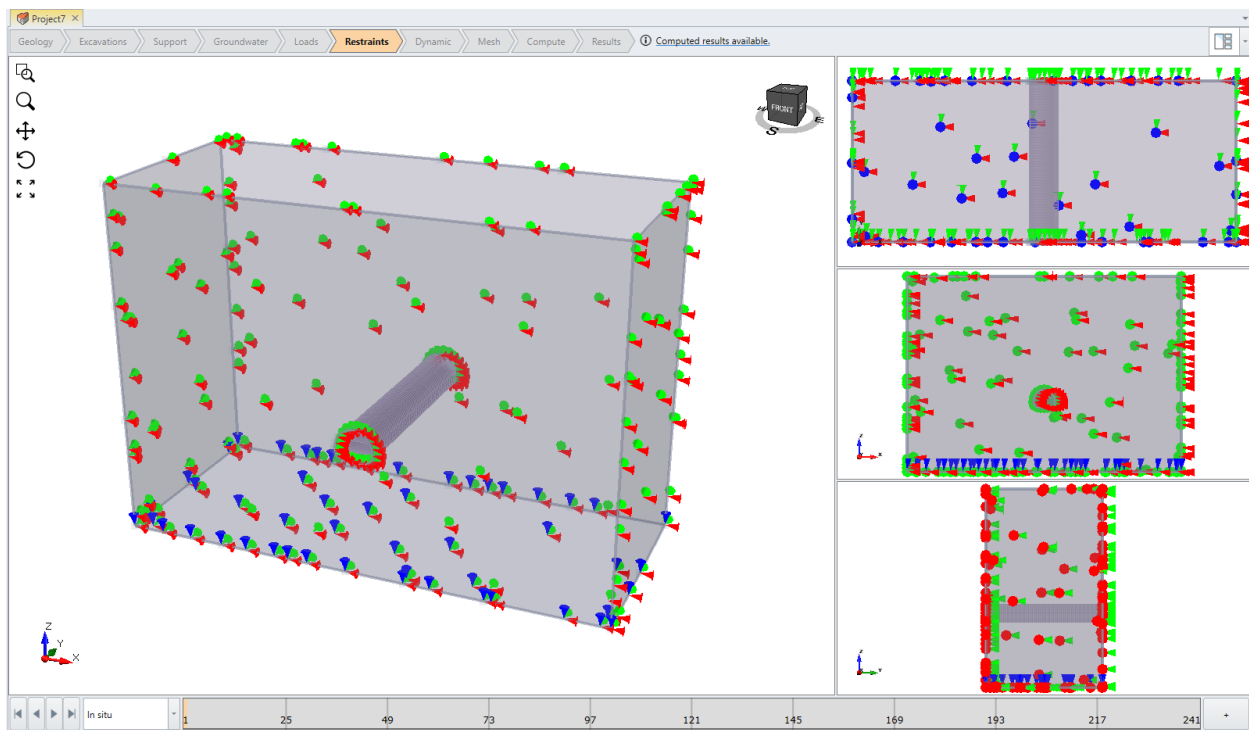
Završetkom ugradnje tunela potrebno je još samo razdijeliti svu geometriju odabirom na **Geometry>3D Boolean>Divide All Geometry**. Otvara se prozor u kojem je potrebno

postaviti Quality na **Low**. Default opcija je prezahtjevna za veličinu modela ovog rada i neće utjecati značajno na dobivene rezultate.

8.1.5. Postavljanje rubnih uvjeta

Kako bi se mogli postaviti rubni uvjeti potrebno je prvo na vrhu zaslona odabrati karticu **Restraints**, to će omogućiti prilagođeni odabir rubnih uvjeta. Površina treba ostati slobodna, dno geometrije nepomično (onemogućen pomak u sva tri smjera X, Y, Z), i 4 strane samo omogućen pomak u Z smjeru (X i Y onemogućeni). Prvo je potrebno odabrati plohu geometrije na koju će se postaviti novi rubni uvjet, to se postiže klikom na bilo koju od 5 navedenih ploha koje je potrebno ograničiti, Nakon što je odabrana ploha potrebno je odabirati **Restraints>Add Restraints/Displacements** na glavnom izborniku te **Restrain XY** za četiri bočne strane i **Restrain XYZ** za dno geometrije.

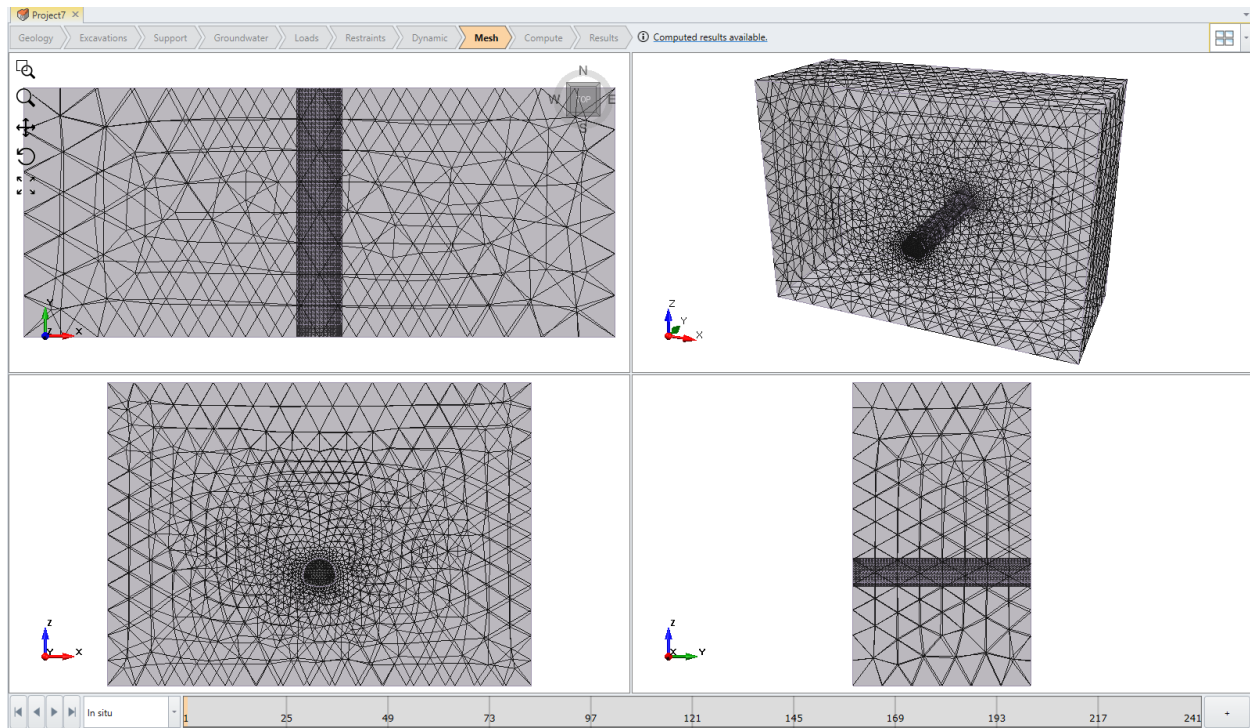
Slika 62. prikazuje dobiveni model s definiranim graničnim uvjetima.



Slika 62. Prikaz rubnih uvjeta na modelu tunela Grič

8.1.6. Definiranje mreže

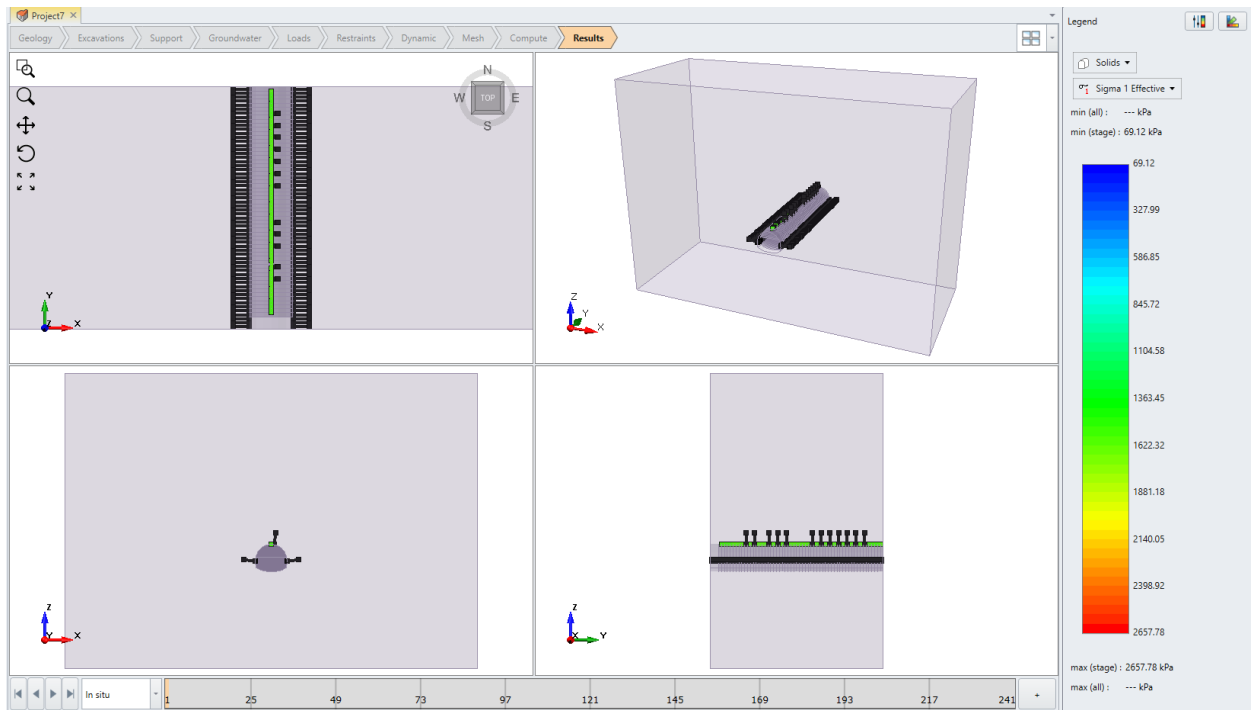
Odabrati **Mesh>Mesh settings** na glavnom izborniku. Unutar novog prozora potrebno je odabrati: Enter element type = **4-Noded Tetrahedra**, Mesh Gradation = **Graded**. Kako bi se kompenzirale niže postavke za Divide All geometry te kako bi se dobila potrebna gustoća mreže potrebno je progustiti mrežu pod Advanced i postaviti Gradation na **0,01** umjesto standardnih 0,5. Pritiskom na **Mesh** model se diskretizira. (Slika 63.).



Slika 63. Prikaz diskretiziranog modela tunela Grič

8.1.7. Proračun modela

Prije proračuna potrebno je spremiti dosadašnji rad odabirom na **File>Save As**. Nakon spremanja rada može se prijeći na proračun rezultat odabirom **Compute>Compute** na glavnom izborniku. Završetkom proračuna izrada modela je gotova te se može prijeći na analiziranje rezultata (Slika 64.).



Slika 64. Prikaz rezultata izrađenog modela tunela Grič

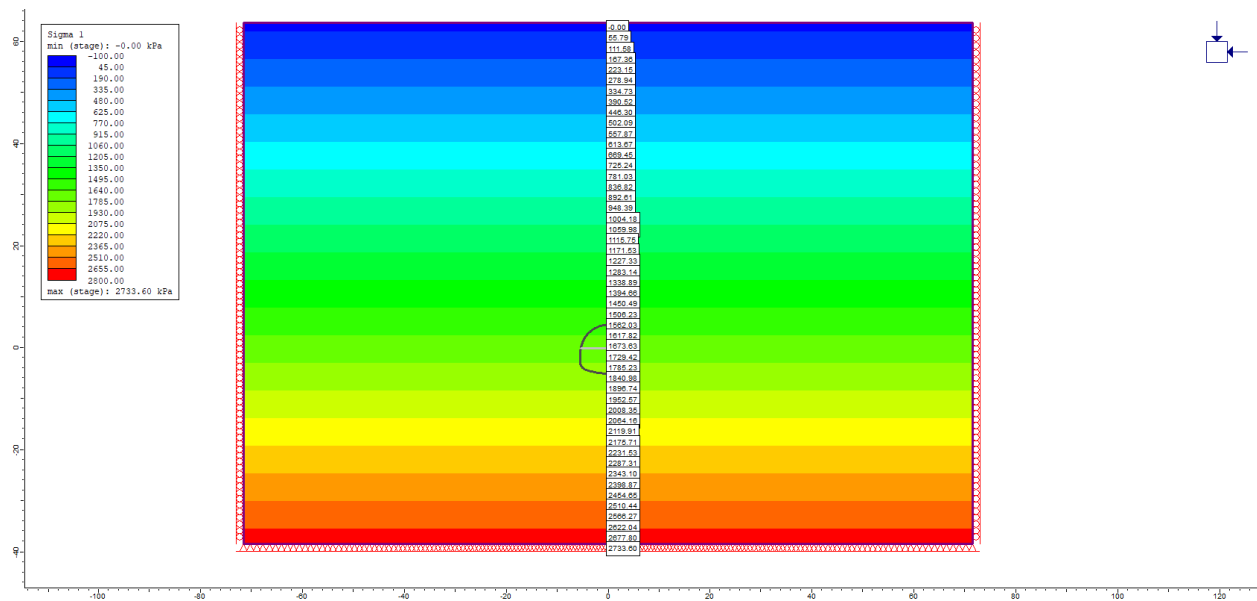
8.2 Rezultati

U ovom poglavlju će se usporediti rezultati dobiveni 3D modelom u RS3 i 2D modelom u RS2 softveru. Oba modela su napravljena na temelju istog poprečnog presjeka ranije spomenutog u poglavljima 7. i 8.1.2.

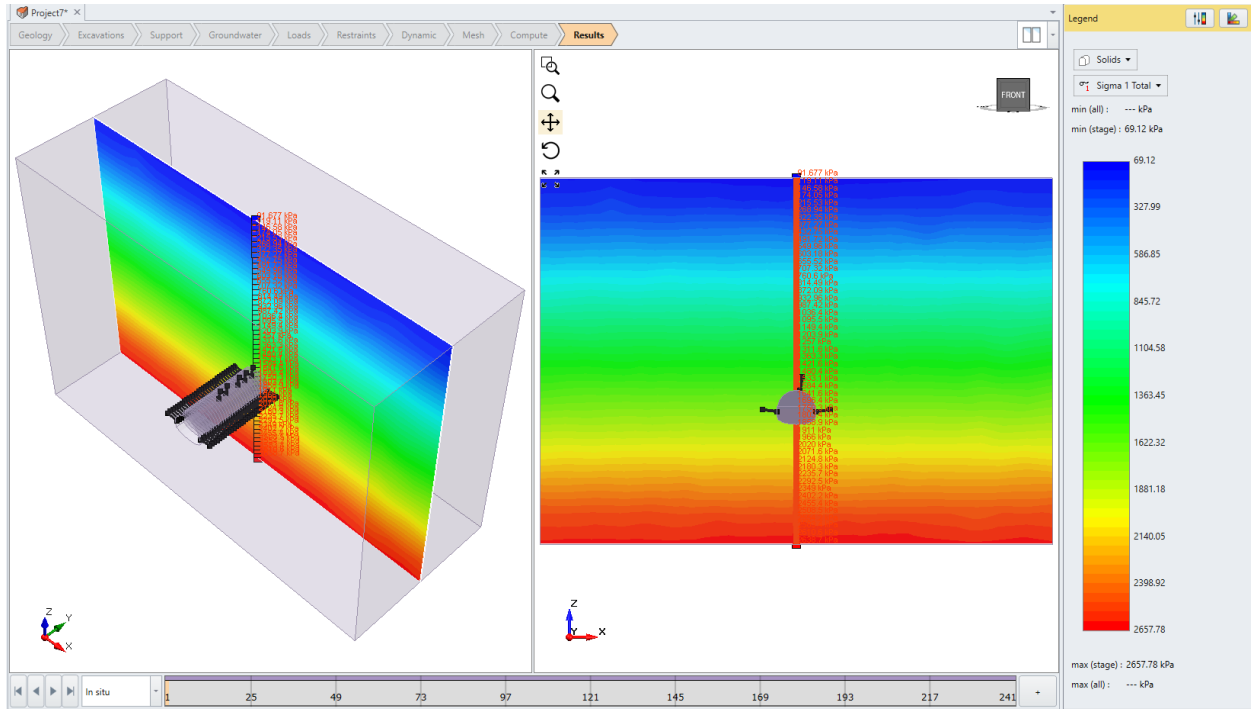
8.2.1. Geostatička naprezanja

8.2.1.1. Geostatička naprezanja u *in situ* fazi

U poglavlju 7.3. dane su vrijednosti horizontalnih i vertikalnih naprezanja u kaloti u *in situ* fazi. Vertikalna naprezanja iznose $\sigma_v \approx 1,58 \text{ MPa}$, dok su horizontalna $\sigma_h \approx 0,50 \text{ MPa}$. Slikama 65. i 66. dana su vertikalna naprezanja u *in situ* fazi za 2D, odnosno 3D model te ona u oba slučaja iznose jednako kao i po proračunu $\sigma_v = 1,58 \text{ MPa}$.

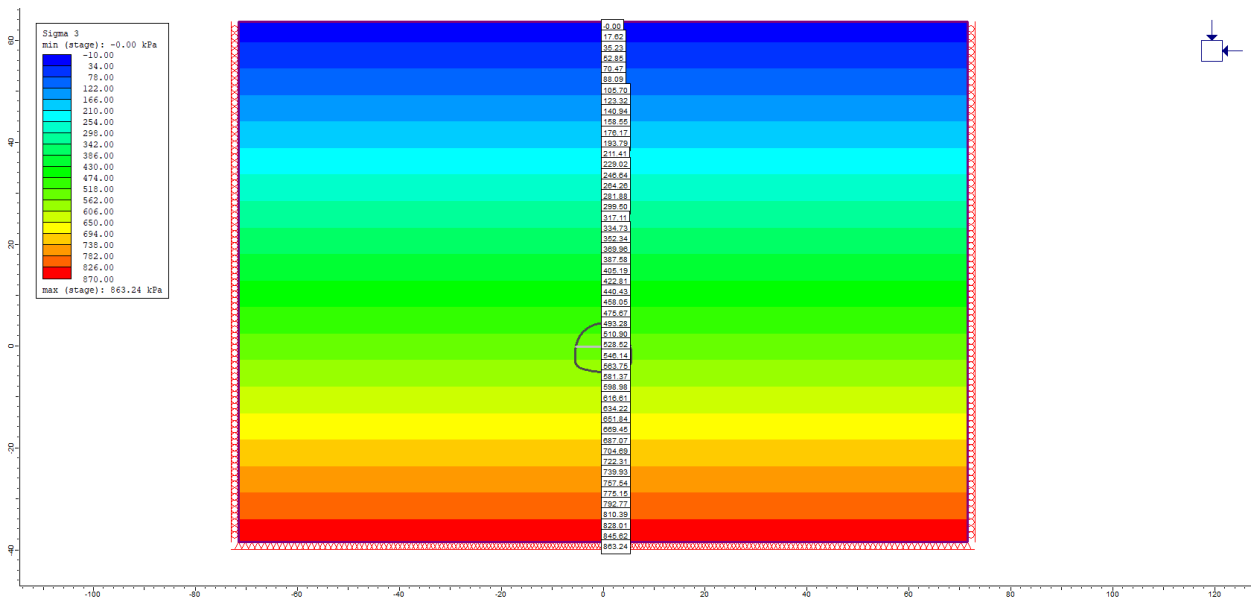


Slika 65. Geostatička vertikalna naprezanja na 2D modelu tunela Grič

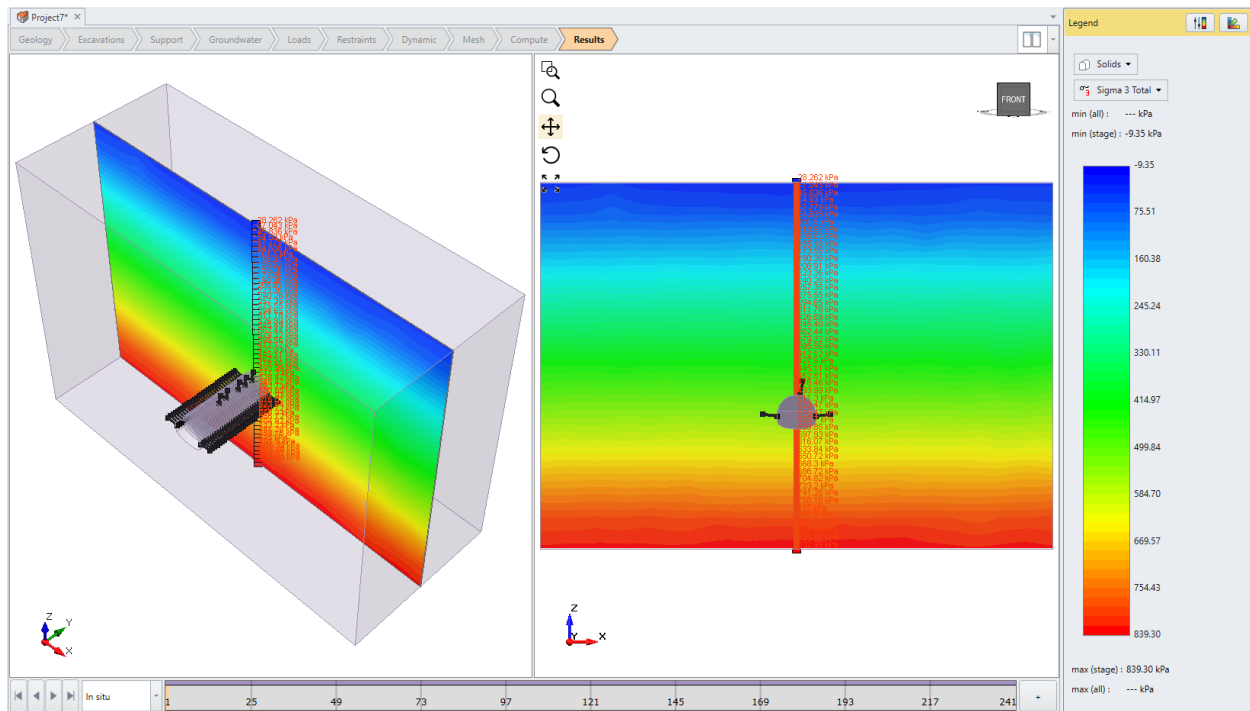


Slika 66. Geostatička vertikalna napreznja na 3D modelu

Kao i kod vertikalnih napreznja, na oba modela horizontalna napreznja u *in situ* fazi na kaloti tunela se podudaraju proračunu te oni iznose $\sigma_h = 0,50\text{MPa}$ (Slika 67. i 68.).



Slika 67. Geostatička horizontalna napreznja na 2D modelu

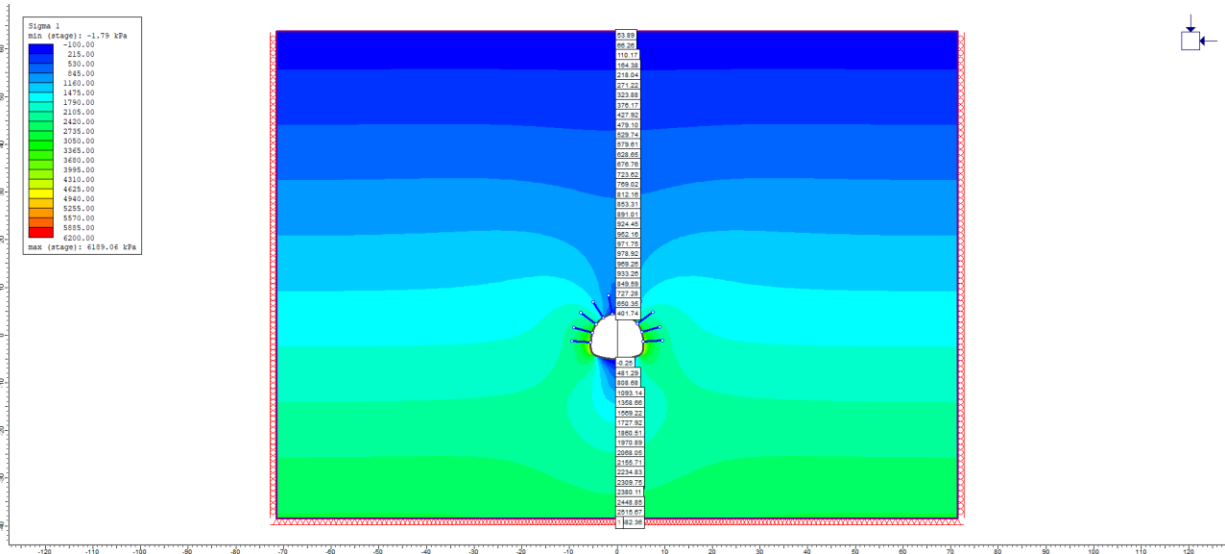


Slika 68. Geostatička horizontalna naprezanja na 3D modelu

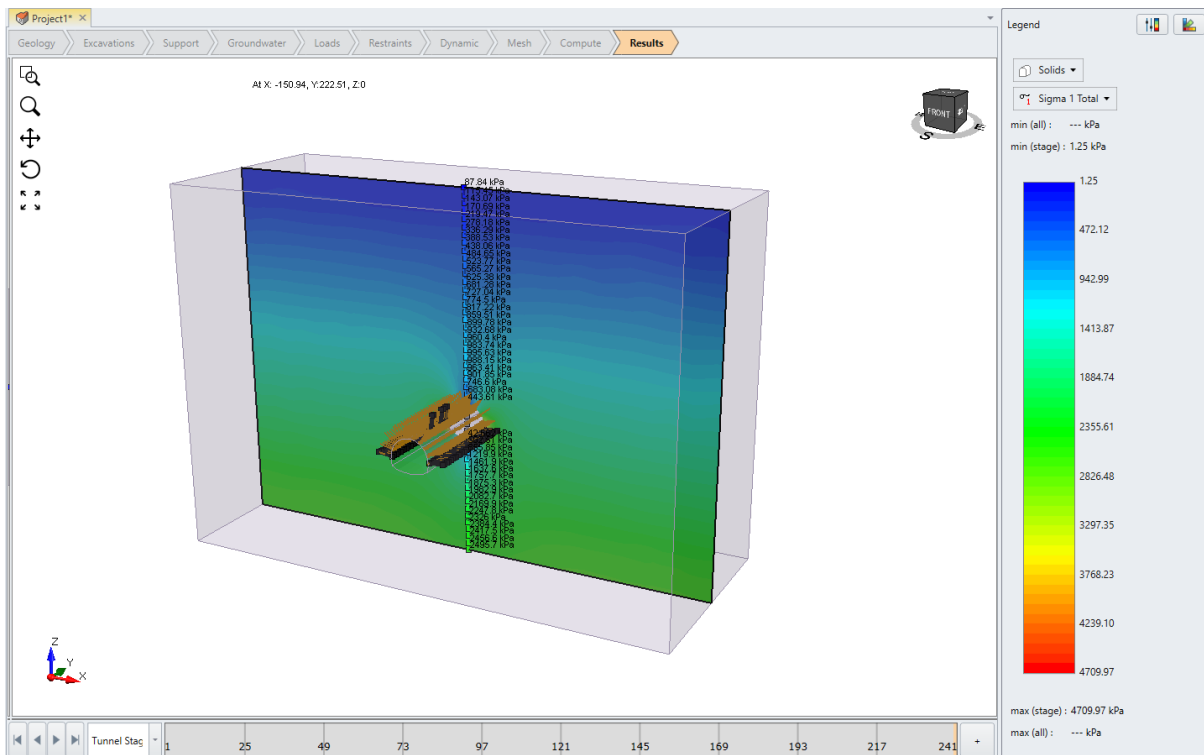
Kod 3D modela se može uočiti utjecaj veličine konačnih elemenata na konture naprezanja.

8.2.1.2. Naprezanja u zadnjoj fazi iskopa

Slikama 69. i 70. dane su vrijednosti vertikalnih naprezanja u zadnjoj fazi iskopa, a podrazumijevaju naprezanja sa iskopanim cijelim tunelom. U slučaju 3D modela naprezanja se mjere na sredini sustava (postavljanjem XZ ravnine na $Y = 30\text{ m}$).

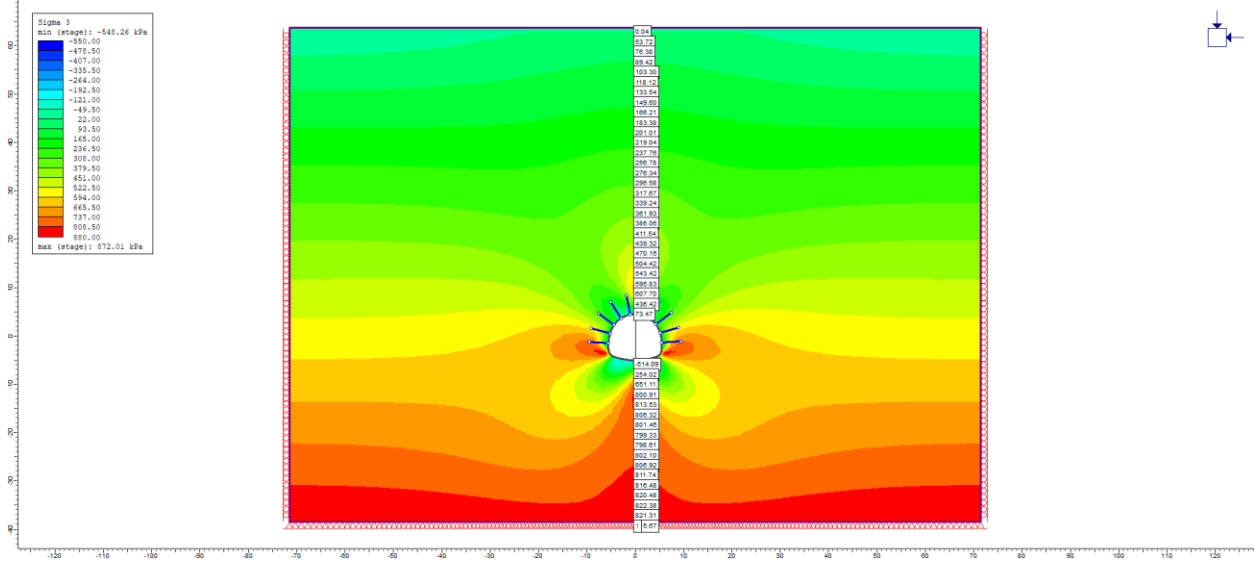


Slika 69. Vertikalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 2D modelu tunela Grič

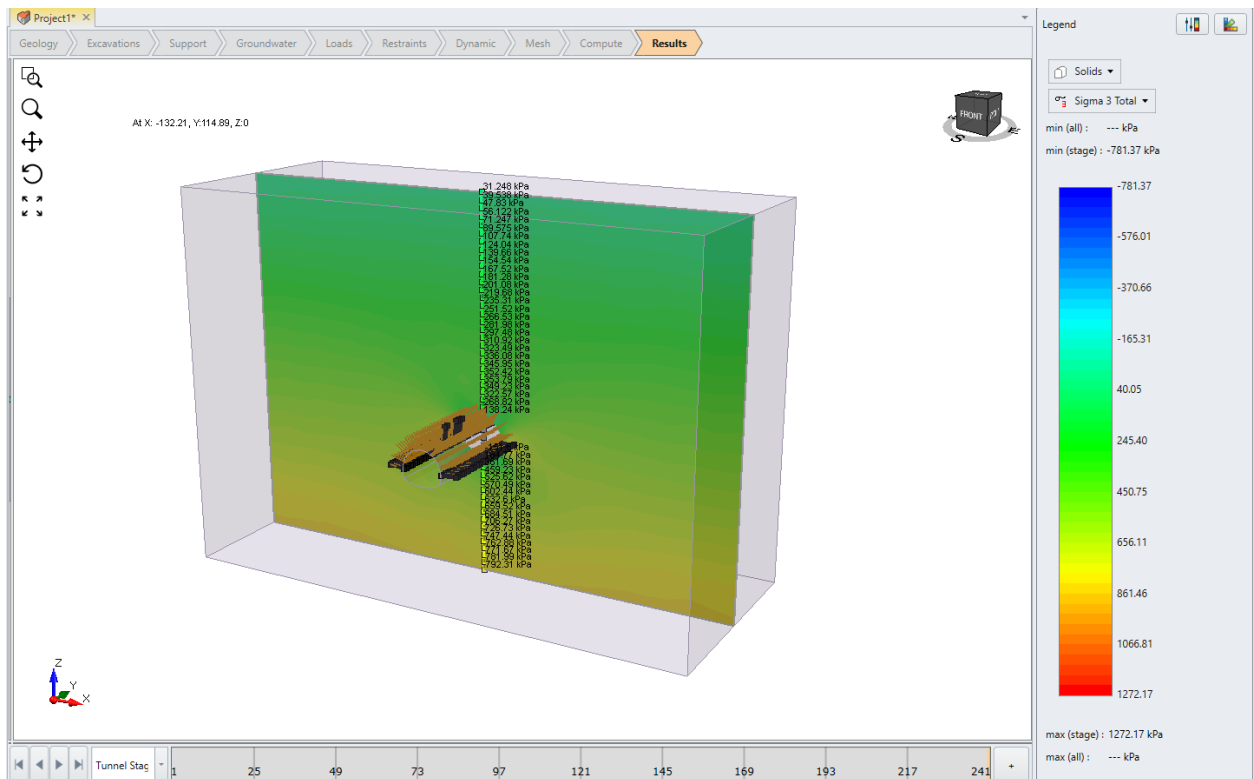


Slika 70. Vertikalna naprezanja u zadnjoj fazi iskopa na 3D modelu

Slikama 71. i 72. dane su vrijednosti horizontalnih napreznja u zadnjoj fazi iskopa (kada je iskopan cijeli tunel). U slučaju 3D modela napreznja se mjere na sredini sustava (postavljanjem XZ ravnine na $Y = 30\text{ m}$).



Slika 71. Horizontalna napreznja u zadnjoj fazi iskopa na 2D modelu



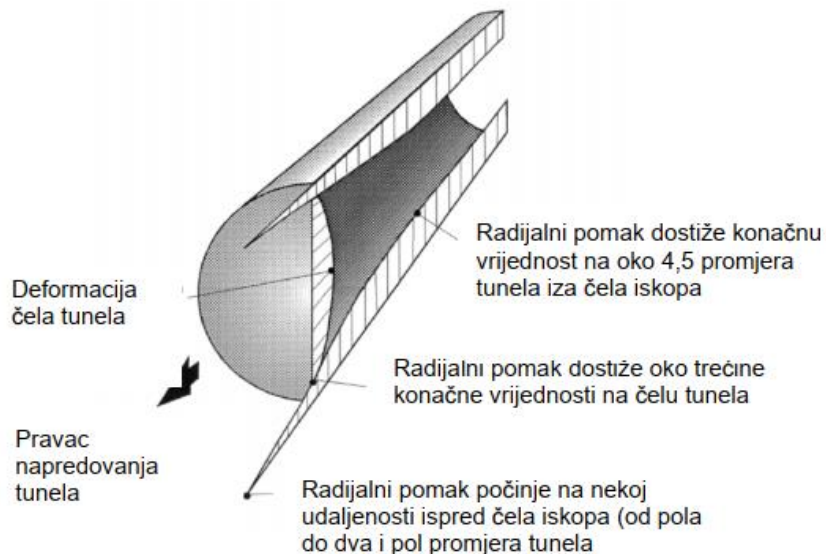
Slika 72. Horizontalna napreznja u zadnjoj fazi iskopa na 3D modelu

8.2.2. Pomaci modela

8.2.2.1. Karakteristična krivulja stijene i konvergentna krivulja

Praćenje pomaka (specifično radijalnog pomaka - konvergencije) i unutarnjeg tlaka podgrade jedan je od najvažnijih faktora procjene efikasnosti podgrade [16].

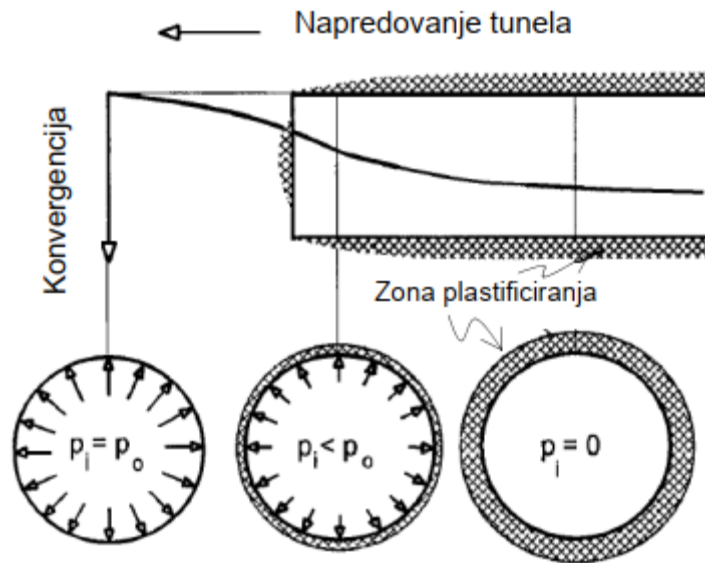
Praćenjem deformacija odnosno radijalnih pomaka može se primijetiti da pomaci započinju ispred čela iskopa (uglavnom na udaljenost od oko 2,5 promjera tunela), na čelu taj pomak dostiže oko trećine konačne vrijednosti, te on dostiže svoj maksimum na udaljenosti od oko 4,5 promjera tunela (Slika 73.).



Slika 73. Radijalni pomak u okolini čela [16]

Može se primijetiti da čelo kod nepodgrađenog tunela predstavlja prividni tlak podgrade, taj prividni tlak osigurava stabilnost iskopa u periodu od iskopa do ugradnje podgrade (Slika 74.). Prividni tlak je jednak primarnim naprezanjima ($p_i = p_o$) na udaljenosti od $\sim 2,5$ promjera tunela ispred čela iskopa (neiskopani dio). Prividni tlak jednak je četvrtini primarnih naprezanja na čelu iskopa i postepeno poprima vrijednost nula udaljavanjem iza čela iskopa. Plastificiranje stijenske mase u okolini iskopa ne znači nužno da će doći i do kolapsa tunela. Slomljeni materijal će imati još uvijek značajnu čvrstoću (rezidualna čvrstoća). Kada je zona plastificiranja mala u odnosu na promjer tunela može se pojaviti manji broj prslina i manji opseg ljuštenja. Velike zone plastificiranja će dovesti do velikih

pomaka konture iskopa i eventualno do kolapsa tunela. Primarna funkcija podgrade je kontrola pomaka konture iskopa, a ne sprječavanje lomova [16].

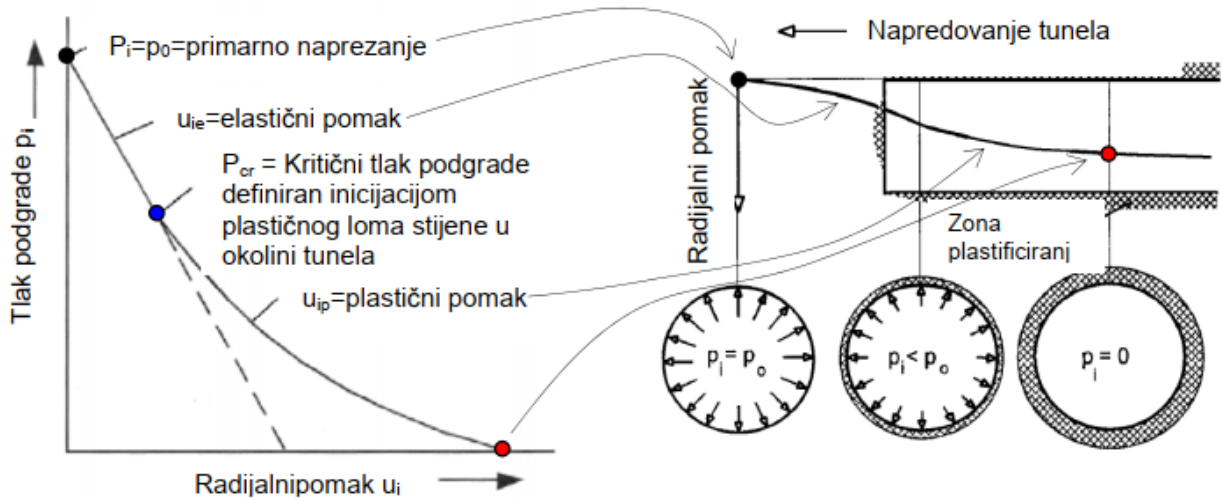


Slika 74. Prividni tlak podgrade nepodgrađenog tunela [16]

Karakteristična krivulja stijenske mase predstavlja odnos unutarnjeg tlaka podgrade i konvergencije tunela (radijalni pomak konture iskopa tunela). Za tunel kružnog poprečnog presjeka i polumjera r_0 iskopanog u određenoj stijenskoj masi gdje vlada primarno naprezanje p_o , te gdje na konturu iskopa djeluje jednoliki tlak podgrade p_i . Slom stijenske mase oko iskopa tunela nastati će kada je unutarnji tlak podgrade manji od kritičnog tlaka podgrade p_{cr} . Ukoliko je tlak podgrade veći od kritičnog tlaka podgrade onda neće doći do sloma stijenske mase te će se stijenska masa oko iskopa ponašati elastično. Jednadžbom (17) prikazan je radijalni elastični pomak konture iskopa tunela [16]:

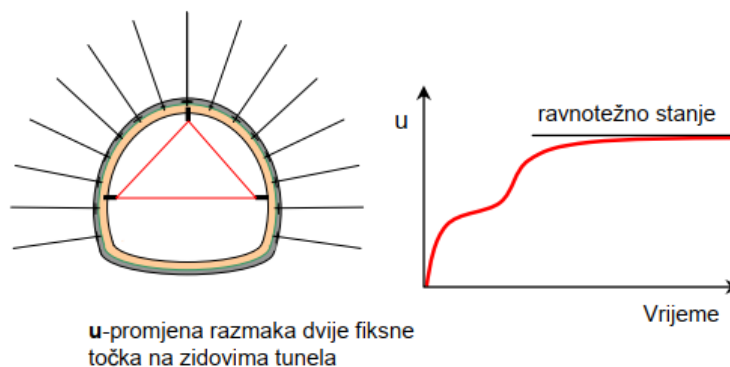
$$u_{ie} = \frac{r_0(1 + \nu)}{E}(p_o - p_i) \quad (17)$$

Kada je unutarnji tlak podgrade p_i manji od kritičnog tlaka podgrade p_{cr} , dogoditi će se slom stijenske mase i oblikovati će se plastificirana zona polumjera r_p u okolini tunela. Radijalni plastični pomak u_{ip} definiran je karakterističnom krivuljom između $p_i = p_{cr}$ i $p_i = 0$ (Slika 75.) [16].



Slika 75. Karakteristična krivulja stijenske mase [16]

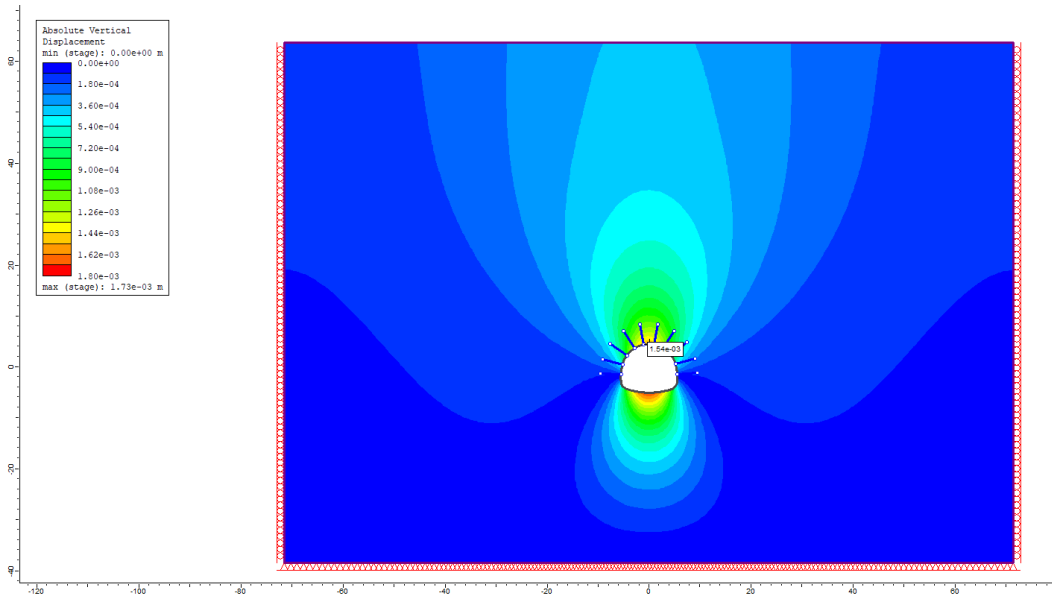
U praksi nije moguće odrediti točan oblik karakteristične stijenske mase, ali se zato mogu mjeriti pomaci iskopa (konvergencija). Karakteristična krivulja stijenske mase i konvergentna krivulja međusobno su povezane jer prikazuju isti fenomen na različite načine. Konvergencija se događa brzo nakon iskopa, a usporava se sa približavanjem ravnotežnog stanja podgrade i stijene. Ovo direktno vodi ka metodi opažanja (više o metodi opažanja u slijedećem poglavlju) u kojoj se mjerenjima pomaka kontrolira efikasnost ugrađene podgrade. Ako konvergencija pokazuje približavanje ravnotežnom stanju, može se zaključiti da podgrada zadovoljava. Ako konvergencija pokazuje stalni prirast pomaka, podgradu treba pojačati (Slika 76.) [16].



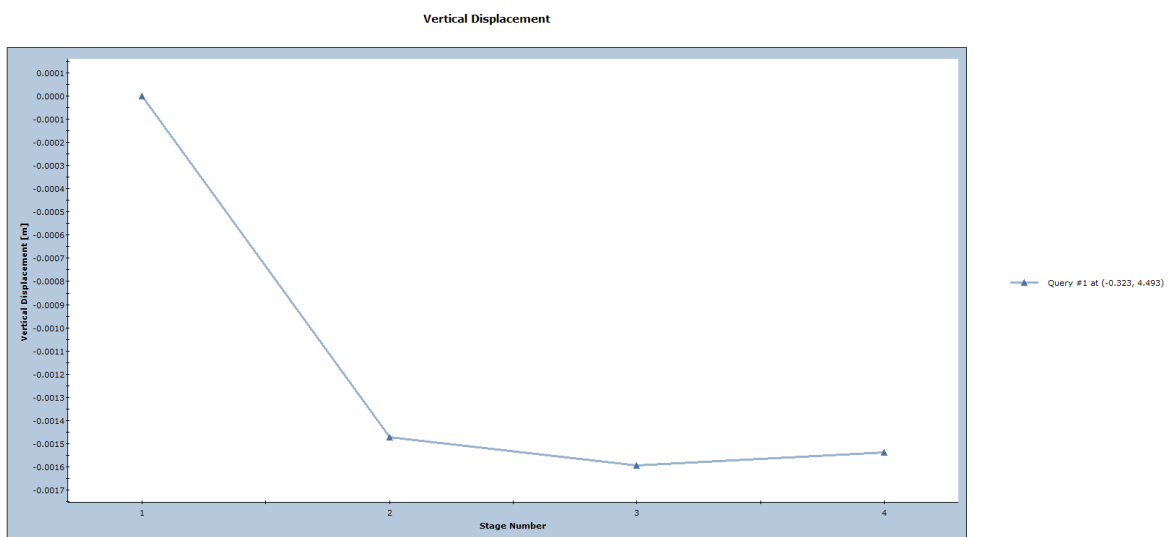
Slika 76. Mjerenje konvergencije u tunelu [16]

8.2.2.2. Krivulje pomaka u kaloti tunela

Krivulje pomaka u kaloti dobivaju se odabirom jedne točke u odnosu na koju se prikazuju promjene pomaka s napredovanjem iskopa (Slika 77. i 78.). Bitno je da se pomaci kod oba modela trebaju resetirati na 0 u *in situ* fazi, *in situ* faza podrazumijeva geostatičku distribuciju naprezanja uslijed težine slojeva, bez pomaka. Ovo se u modelu postiže vraćanjem ili referenciranjem.

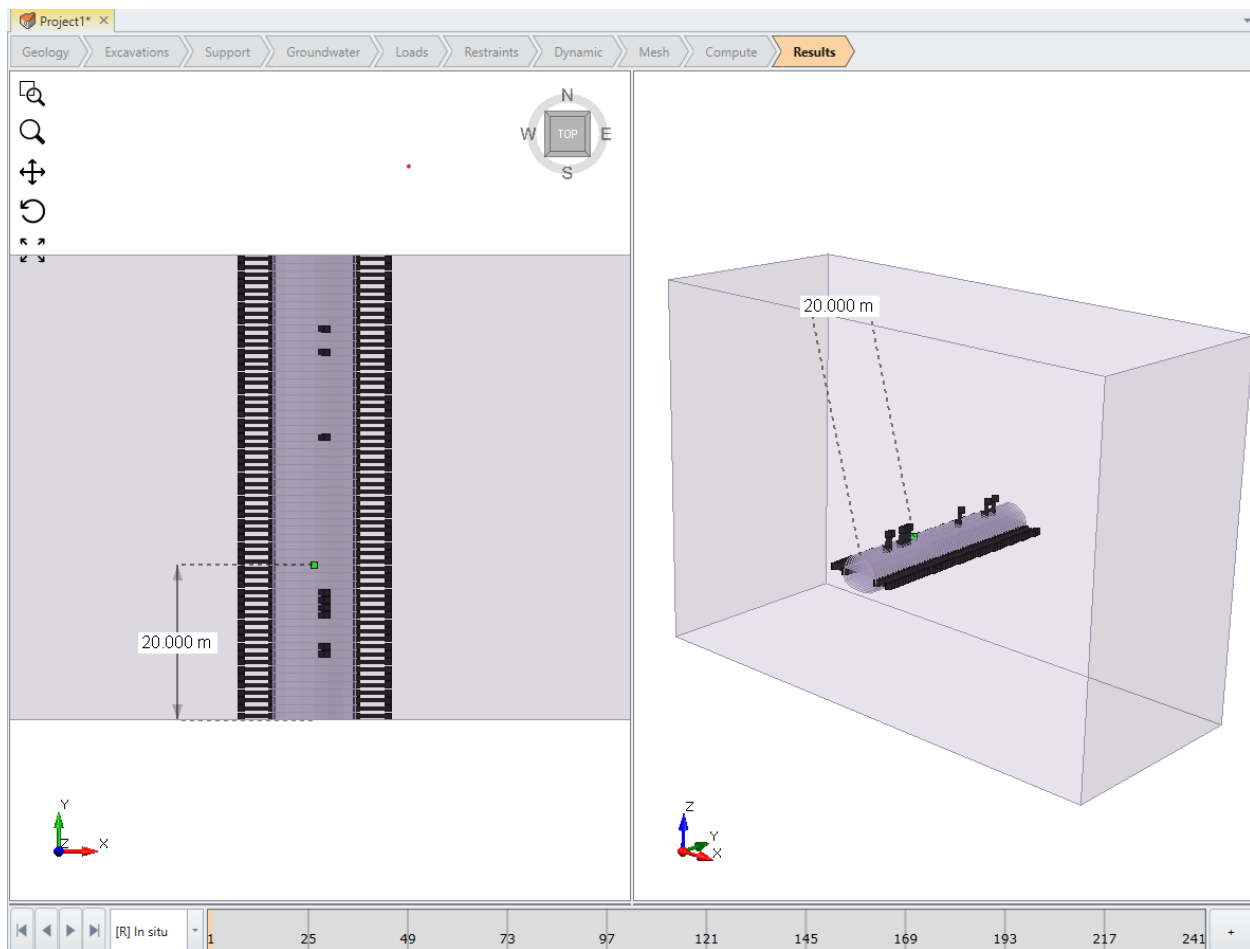


Slika 77. Položaj točke na kaloti tunela u odnosu na koju se mjere pomaci

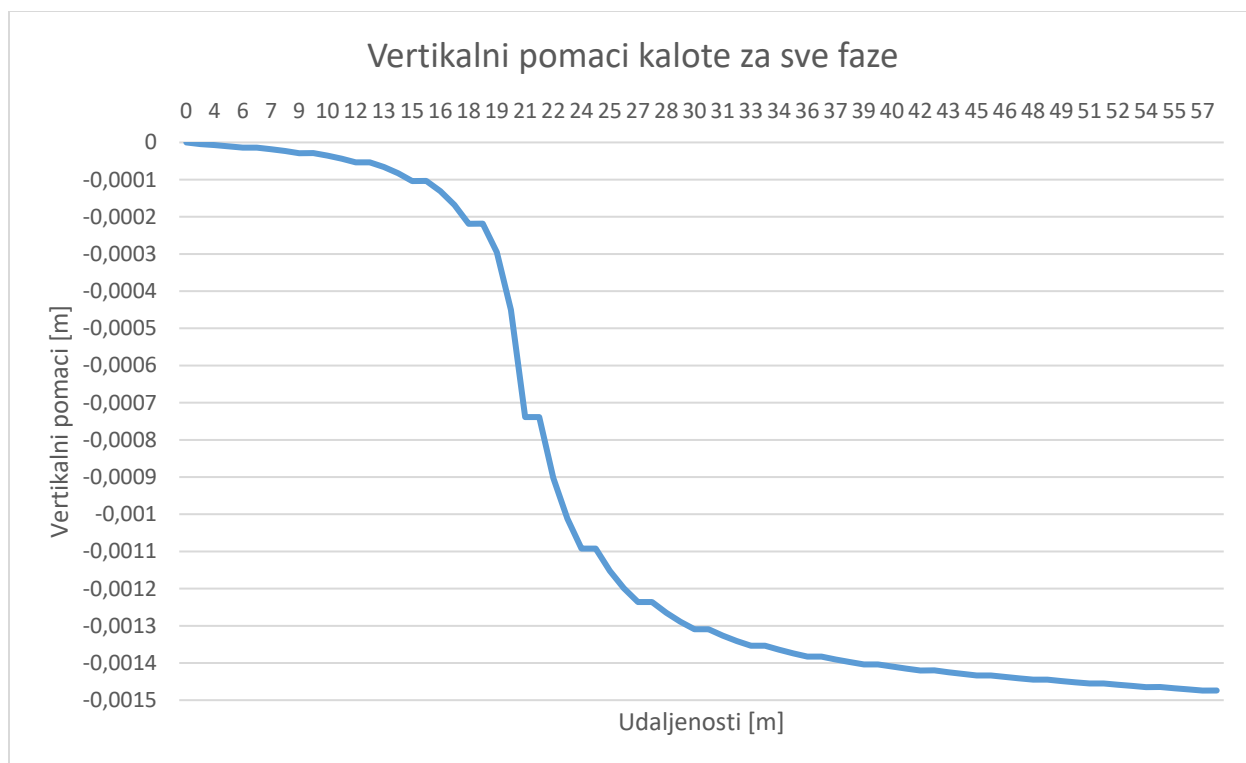


Slika 78. Vertikalni pomaci kalote za sve faze u 2D modelu

Za 3D model također je odabrana jedna točka. Ona se postavlja na kalotu tunela na udaljenosti od 20 od početka iskopa (Slika 79.). Točka se nalazi na 20 m kako bi se jasno mogao vidjeti rast radijalni pomak ispred točke (neiskopani dio) te nastavkom iskopa iza točke sve dok ne dostigne ravnotežno stanje (linija pomaka se polako dolazi u horizontalni položaj). Nakon postavljanja točke mjeri se pomak na toj točki za svaki iskopani metar tunela, te po završetku 3 m iskopa pomak s ugradnjom sidara. Prikazom ovih podataka dobiva se linija konvergencije (Slika 80.). Prikazane su horizontalne i vertikalne komponente pomaka.

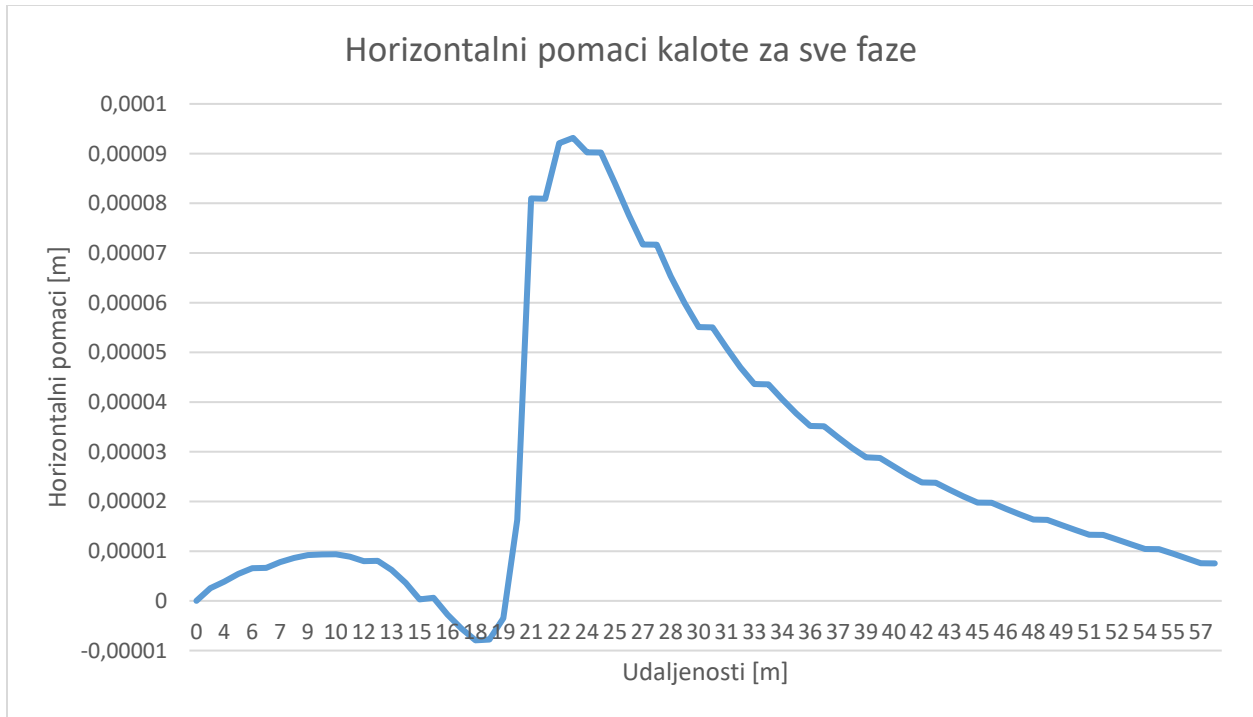


Slika 79. Položaj točke na kaloti tunela u odnosu na koju se mjere pomaci



Slika 80. Vertikalni pomaci kalote za sve faze na 3D modelu

Provjera konvergencije je glavna prednost 3D modela u odnosu na 2D. Može se jasno vidjeti formiranje radijalnih pomaka prije i poslije promatrane točke te utjecaj podgrade poslije svake faze iskopa. Iako je ovaj model dug 60 m, sa daljnjim produženjem modela ovaj pomak bi još malo rastao sve dok se ne dosegne ravnotežno stanje. Veličine maksimalnih pomaka kod oba modela su relativno blizu ($<0,1$ mm).

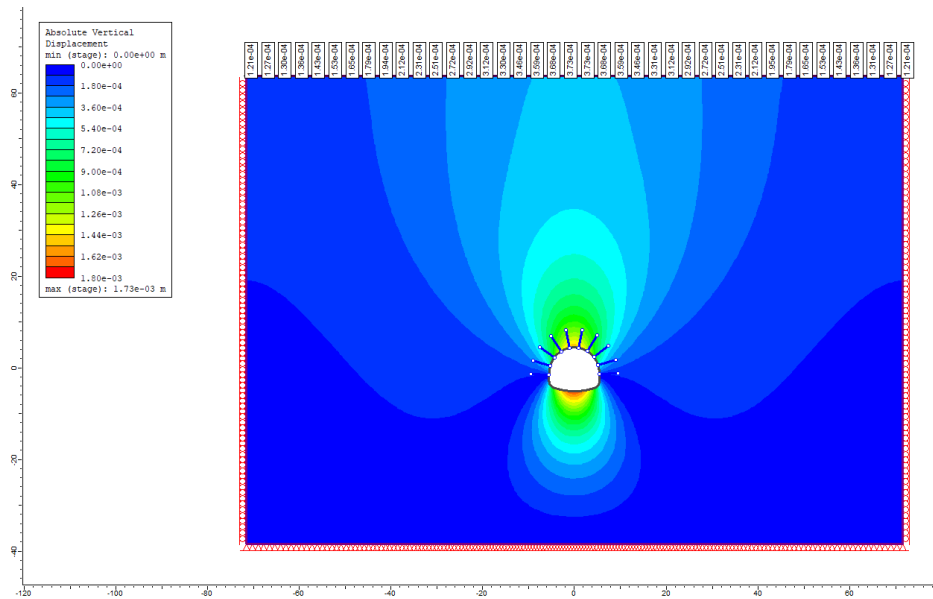


Slika 81. Horizontalni pomaci kalote za sve faze na 3D modelu

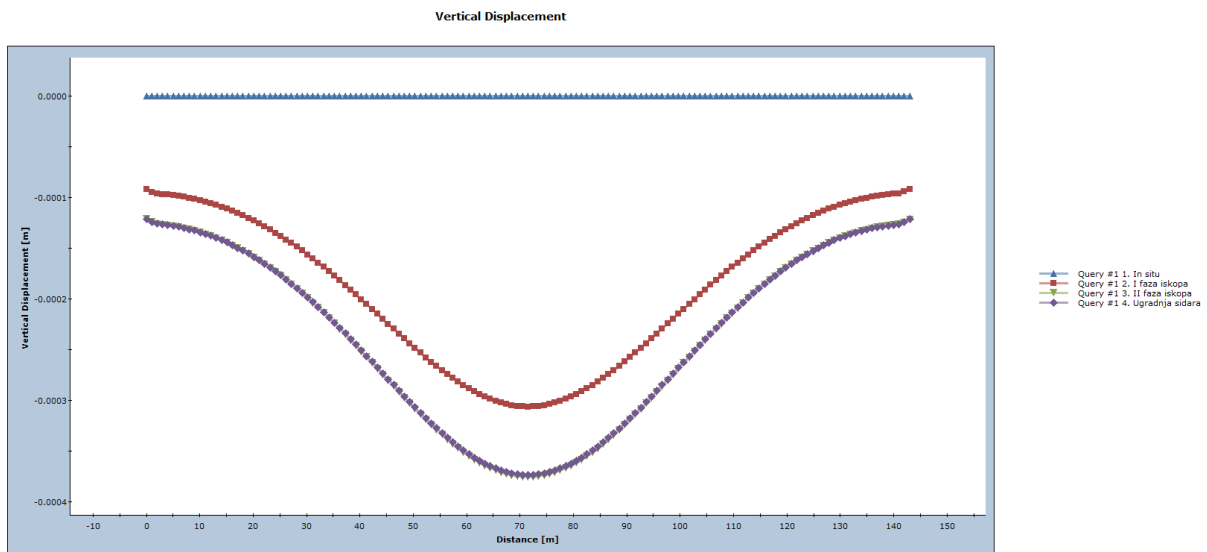
Horizontalne pomake u ravnini okomitoj na ravninu presjeka nije moguće dobiti na 2D modelu. Ovi pomaci su izrazito mali (<1 mm), ali daju uvid kako se točka pomiče prije nego iskop dođe do promatrane točke, te poslije (Slika 81.). Može se primijetiti da se točka u prvih 12 metara pomiče dalje od iskopa, te netom prije nego čelo iskopa dođe do točke počinje se pomicati prema iskopu. Neposredno prije nego što iskop dođe do točke promatranja pomak se naglo pomiče od iskopa zbog utjecaja samog strojnog iskopa. Poslije prolaza točke horizontalni pomaci polako opadaju. Maksimalni horizontalni pomak ne prelazi 0,01 mm. Važno je napomenuti da su se u radu analizirali vertikalni i horizontalni pomaci kako bi se direktno usporedili sa 2D modelom (vertikalni uglavnom). Budući da je vertikalna komponenta pomaka dominantna (za razred veličine veća od horizontalnog pomaka), nije prikazivan ukupni vektor pomaka.

8.2.2.3. Utjecaj iskopa na površinu terena

Za 2D model mjerni profil postavljen je na površinu modela te su rezultati prikazani za sve faze (Slika 82. i 83.).

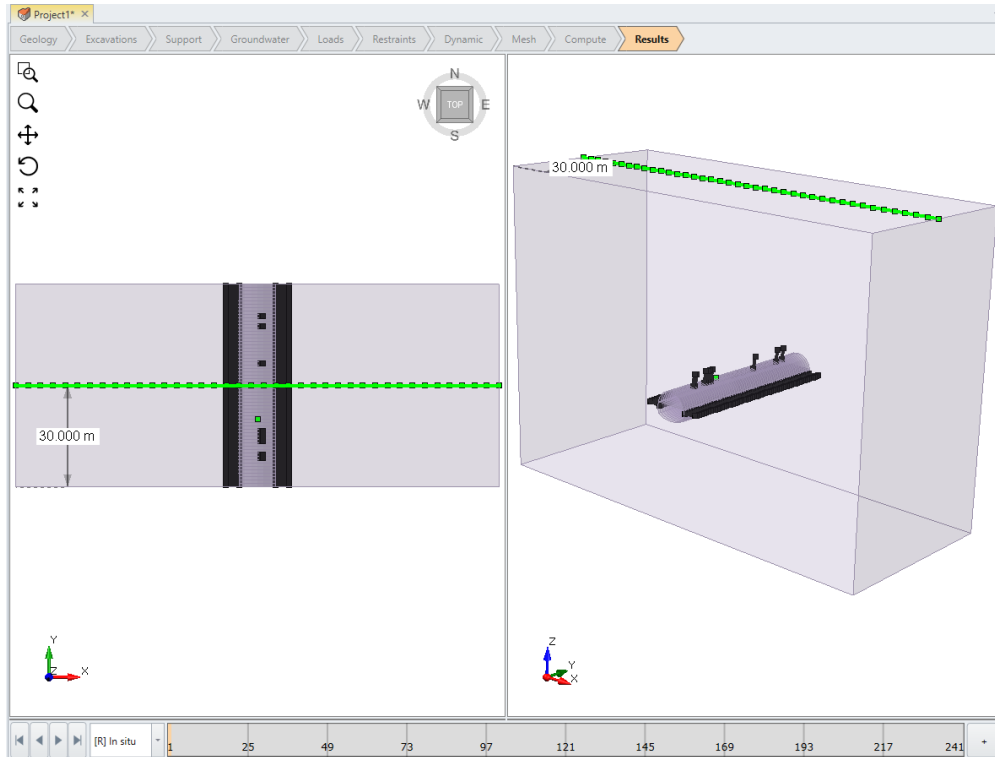


Slika 82. Položaj mjernog profila na 2D modelu

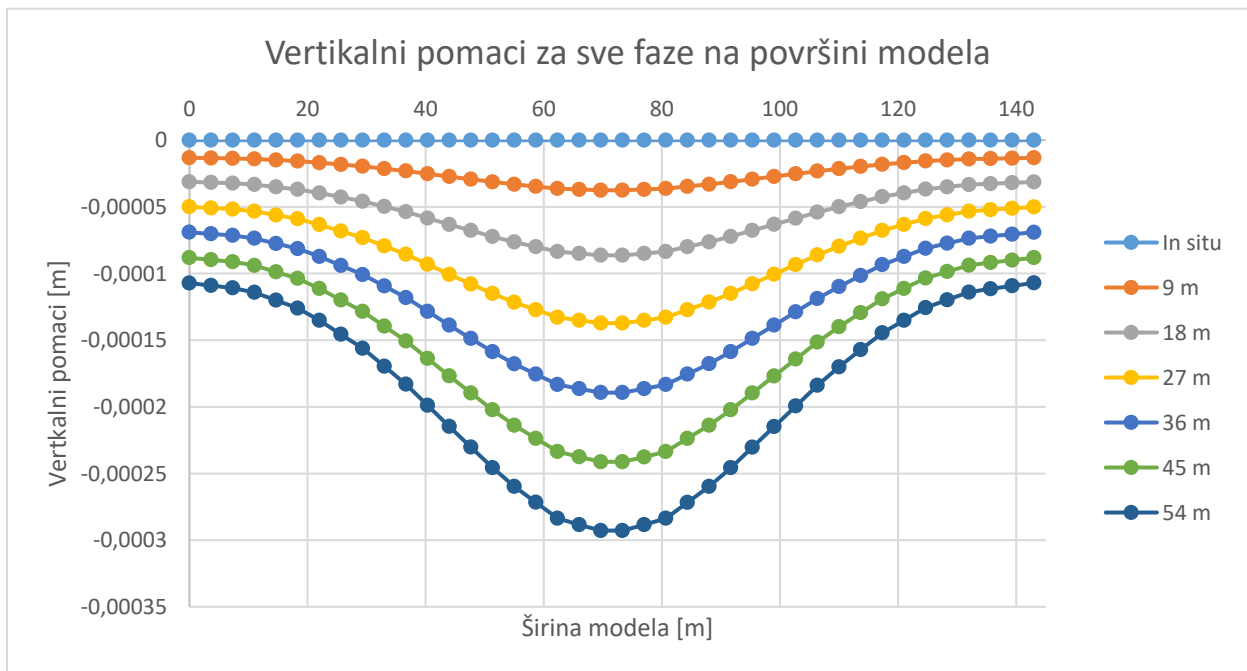


Slika 83. Vertikalni pomaci površine na 2D modelu

Kod 3D modela mjerni profil je postavljen također na površinu modela te $Y = 30 \text{ m}$ prema sredini (Slika 84.). Rezultati su prikazani za *in situ* fazu te svakih 9 m iskopa tunela (sa ugradnjom sidara) kako bi se dobio prirast pomaka sa iskopom tunela (Slika 85.).



Slika 84. Položaj mjernog profila na 3D modelu

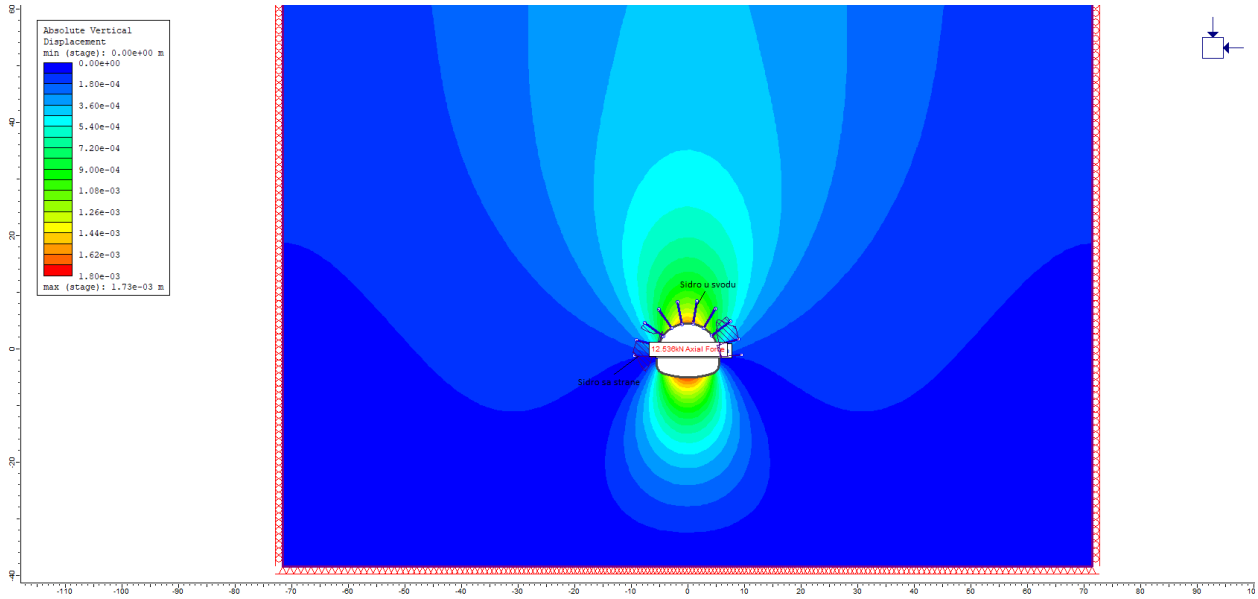


Slika 85. Vertikalni pomaci površine na 3D modelu

Može se primijetiti mala razlika u maksimalnim pomacima ($<0,0001$ m) između 2D i 3D modela koja može biti pripisana maloj dužini 3D modela.

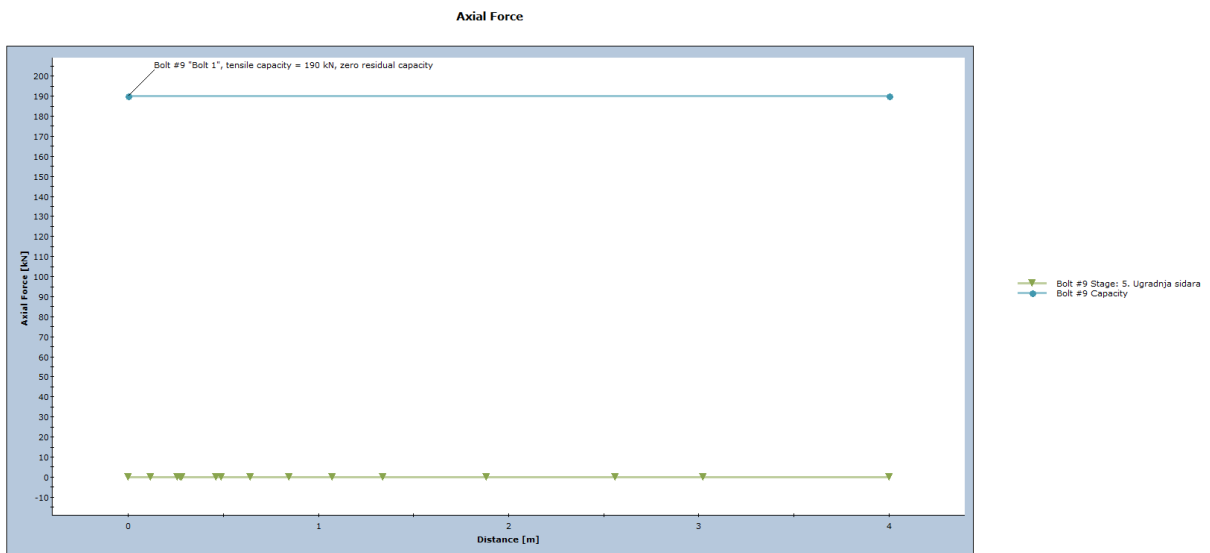
8.2.3. Kapacitet sidra

Slikom 86. dane su pozicije sidra za koja su prikazani rezultati u nastavku (praćena sidra su ista na oba modela).

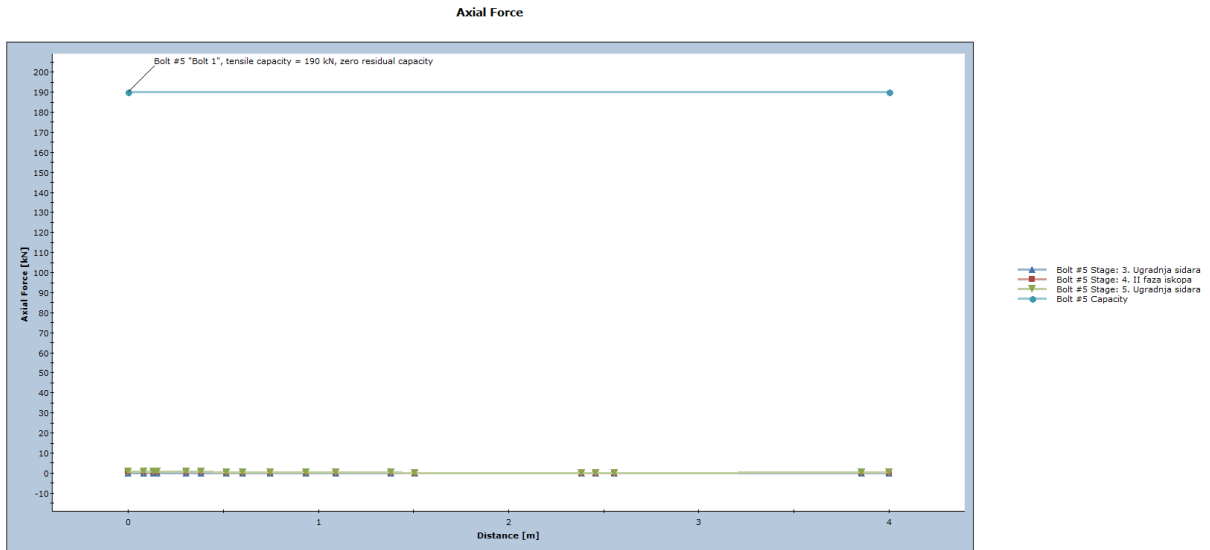


Slika 86. Pozicije sidara na 2D modelu

Prikazom sila u odabranim sidrima dobivaju se krivulje prikazane Slikama 87. i 88 koje pokazuju vrijednosti sila po dužini promatranih sidara.

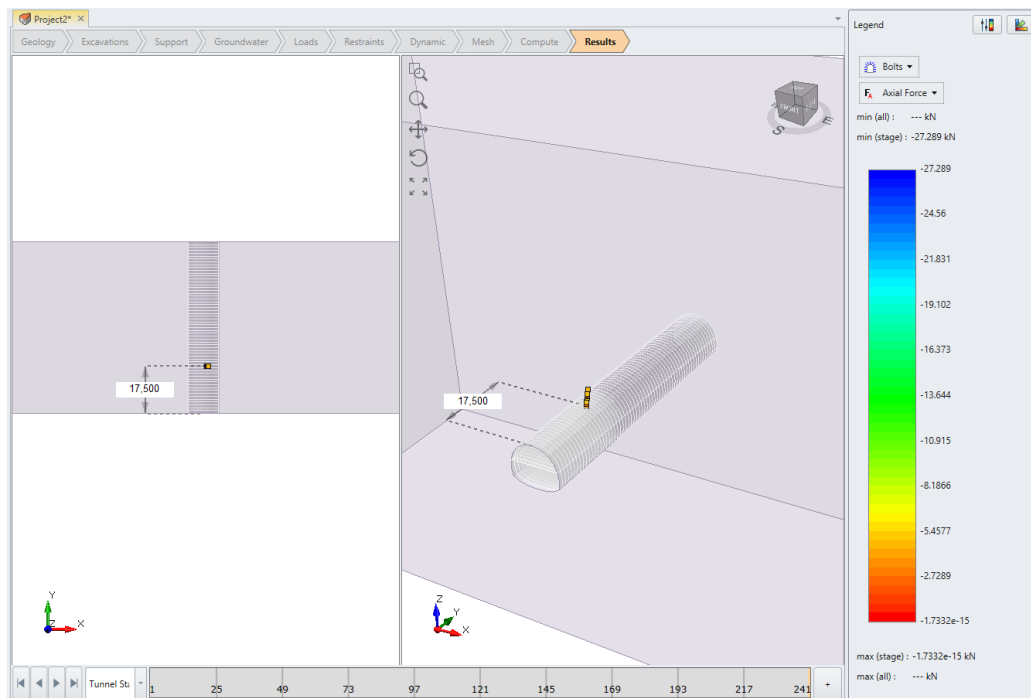


Slika 87. Sile u sidru sa strane za 2D model

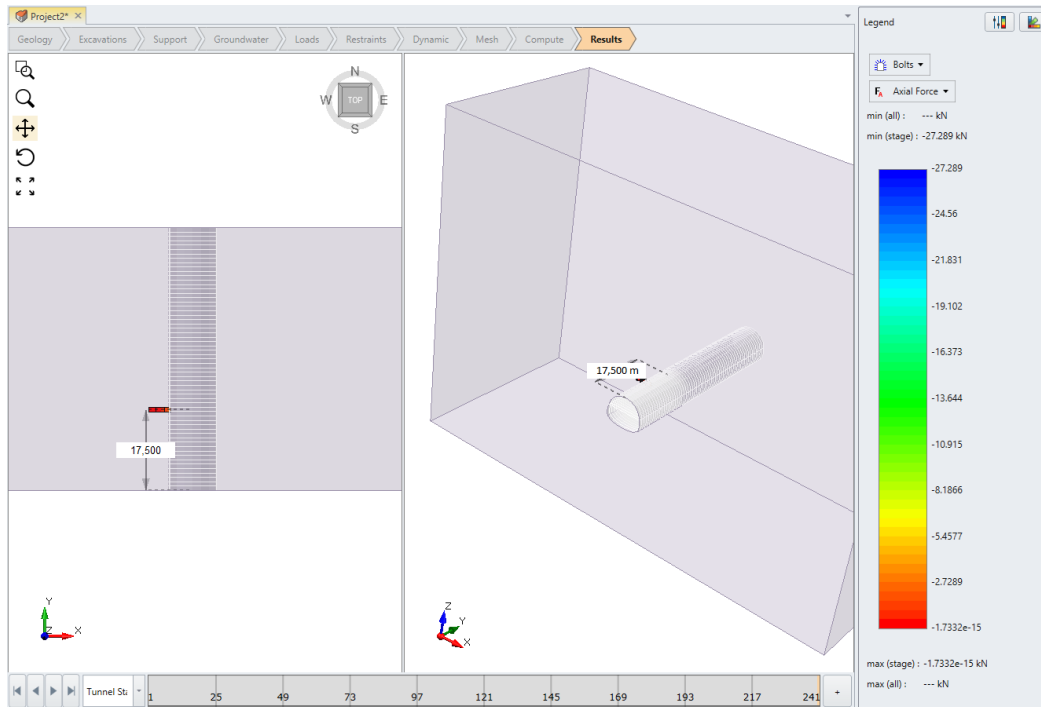


Slika 88. Sile u sidru na svodu za 2D model

Slikama 89. i 90. prikazane su pozicije promatranih sidara na 3D modelu. Oba promatrana sidra postavljena su na 17,5 m od početka iskopa.

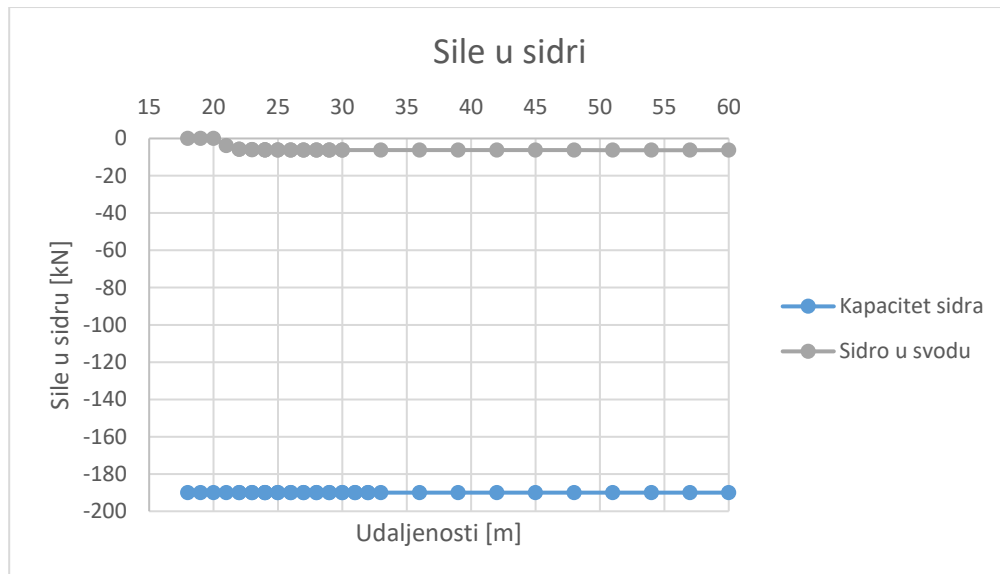


Slika 89. Pozicija sidra na svodu u 3D modelu

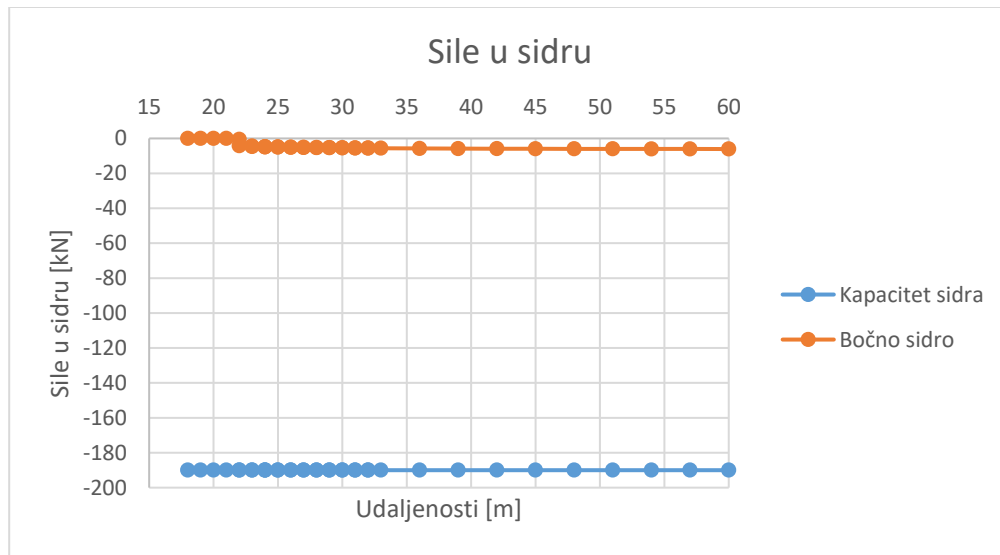


Slika 90. Pozicija sidra sa strane u 3D modelu

Prikazom sila u sidrima od ugradnje sidara do zadnje faze iskopa tunela dobivaju se krivulje prikazane Slikama 91. i 92. Pomak se u prvih 30 m promatrao poslije svake faze iskopa za svaki 1 m iskopa dok je prirast sile rastao. Nakon 30 m kada se prirast sile normalizirao promatrao se pomak za svaka 3 m iskopa.



Slika 91. Sile u sidru sa strane za 3D model



Slika 92. Sile u sidru na svodu za 2D model

Može se primijetiti na obje slike kako pomaci prije 21 m nisu dovoljno veliki da bi se sidra aktivirala (prividni tlak podgrade). Poslije aktivacije sidara sile rastu do ~30 m te nakon toga postaju konstantne (odnosno prirast sile je <5 N).

9. PROGRAM GEOTEHNIČKOG PRAĆENJA TUNELA TIJEKOM IZVEDBE

Tlo i stijenska masa su nehomogeni, anizotropni i prirodno napregnuti. Zato svaki geotehnički projekt sadrži niz nesigurnosti, a svaka aktivnost u ili na stijenskoj masi i tlu povezana je s rizikom i iznenađenjima. Istražnim radovima je, bez obzira na njihov opseg, nemoguće utvrditi sva značajna svojstva i stanja prirodnih materijala. Posljedica toga je da se pretpostavljena svojstva i stanja medija mogu značajno razlikovati od stvarnog stanja u prirodi. [16]

Svrha geotehničkih opažanja i mjerenja je verifikacija stabilnosti podzemnog iskopa u svim fazama gradnje tunela te optimizacija primijenjenih mjera na stabilizaciji iskopa. Geotehničar mora dobro poznavati principe i tehnike mjerenja. Potrebno je njegovo stalno prisustvo na gradilištu [16, 21].

9.1. Geotehnička opažanja

Zadatak geotehničkog opažanja je uočavanje moguće zone nestabilnosti. Ono obuhvaća određivanje ponašanja stijenske mase na čelu tunela, snimanje procesa građenja i dnevni pregled ugrađenih podgradnih sklopova i nepodgrađenih dionica [21].

Opažanja svake geotehničke građevine dijele se u dvije velike skupine [16]:

- Opažanja medija u kojem je građevina izvedena (tlo, stijena, voda, plinovi iz podzemlja),
- Opažanje elemenata za stabilizaciju iskopa (mlazni beton, sidra, betonska obloga i slično).

9.2. Mjerenje pomaka

U mjerenjima pomaka u podzemnim prostorima razlikuje se [16]:

- Mjerenje pomaka konture iskopa (konvergencija),
- Mjerenje pomaka unutar stijenske mase.

9.2.1. Mjerenje pomaka konture iskopa (konvergencija)

Pomaci stijenske mase najizraženiji u radijalnom pravcu u odnosu na konturu iskopa. Za mjerenje se koriste dvije tehnike [16]:

- Mjerenje promjene razmaka dviju točaka na konturi iskopa,
- Određivanje vektora pomaka točke na konturi iskopa.

Kod obje tehnike mjerne točke su grupirane u odabranim poprečnim profilima pa se tako dobije slika deformiranog poprečnog profila [16].

9.2.1.1. Mjerenje promjene razmaka dviju točaka na konturi iskopa (konvergencija)

Kod ovog mjerenja se ugradi više repera u odabranom poprečnom profilu između kojih se postavlja mjerna traka ili žica sa uređajem za precizno mjerenje promjene razmaka repera. Žica ili traka mora biti izrađena od materijala koji ne mijenjaju duljinu pri promjeni temperature (npr. invar) [16].

Prednosti ovog načina mjerenja su jednostavnost izvođenja, nije potrebna obučenost operatera te niska cijena opreme. Nedostaci su da se tijekom mjerenja prekida se promet tunelom, a ventilacija i propuh mogu stvarati poteškoće prilikom mjerenja [16].

9.2.1.2. Određivanje vektora pomaka točke na konturi iskopa

Za mjerenja se koriste geodetski instrumenti kojima se precizno mjere promjene položaja geodetskih markera ugrađenih po konturi iskopa. Spajanjem na računalo dobiju se dijagrami pomaka pojedinih markera s vremenom. Motorizirana totalna stanica može automatski mjeriti u x, y, i z pravcu, sa relativno visokom točnošću [16].

9.2.1.3. Prikaz rezultata mjerenja

Rezultati mjerenja se redovito prikazuju na dijagramima: pomak-vrijeme kao što je i prikazano na rezultatima u poglavlju 8.2.2. (Slike 76., 78., 80. i 81.). Za vrijeme mjerenja mora se voditi evidencija svih događanja koja mogu imati utjecaj na izmjerenu veličinu [16]:

- iskop nove faze,
- ugradnja podgrade (mlazni beton, sidra i slično),

9.2.2. Mjerenje pomaka unutar stijenske mase

Za mjerenje pomaka unutar stijenske mase koriste se [16]:

- Ekstenzometri,
- Inklinometri.

9.2.2.1. Ekstenzometri

Ekstenzometri uvijek mjere promjenu razmaka dviju točaka u pravcu bušotine. Prema konstrukciji i principu mjerenja, razlikuju se [16]:

- Štapni ekstenzometri -sastoje se od jedne ili više ekstenzometarskih šipki i isto toliko mjerila pomaka. Šipke se obično umeću u PVC cijevi koje ih štite od eventualnog zarušavanja bušotine,
- Žičani ekstenzometri,
- Ekstenzometri kod kojih se koristi prenosiva mjerna sonda za mjerenje razmaka fiksnih točaka.

9.2.2.2. Inklinometri

Inklinometar je uređaj koji mjeri pomake normalne na os cijevi kroz koju prolazi. Uređaj sadrži senzor koji mjeri odklon njegove osi od vertikale. Proizvode se kao vertikalni za mjerenja u približno vertikalnim cijevima i horizontalni kada se cijev postavlja vodoravno [16].

9.2.3. Klizni deformetar

Klizni deformetar radi mjerenjem promjene razmaka fiksnih točaka u cijevi koja je ugrađena u stijensku masu (tlo). Cijev u kojoj će se vršiti mjerenja sastoji se od segmenata duljine 1 m i spojeva. Spojevi su posebne konstrukcije i predstavljaju mjernu točku. Ovim načinom mjerenja dobije se slika o deformacijama tla na mjernoj bazi koja odgovara razmaku fiksnih točaka. Spojevi i cijev imaju teleskopsku vezu pa se cijev može prilagoditi pomacima u tlu. [16].

9.3. Opažanja naprezanja u mlaznom betonu i betonskoj oblozi

Mjerne ćelije su čelični limovi koji su zavareni po rubovima pa tako čine mali jastuk. Ugrađuju se u paru za mjerenje naprezanja u dva okomita pravca. Isti se tip ćelija koristi u mlaznom betonu (primarna podgrada) i u betonskoj oblozi (sekundarna podgrada) [16].

9.4. Opažanje sidara

Pri opažanju sidara obično se vrši [16]:

- Mjerenje sile na glavi sidra - svrha ovog mjerenja je utvrditi silu kojom stijenska masa na konturi iskopa djeluje na glavu sidra (podložnu pločicu i maticu),
- Mjerenje naprezanja uzduž sidra - mjerno sidro je posebne konstrukcije, a služi za mjerenje naprezanja u sidrenoj šipki tijekom djelovanja sidra.

9.5. Primjena na tunelu Grič

U tunelogradnji se mjerenja obično dijele u tri skupine [21]:

- Kontrolna mjerenja koja prate deformacije podzemnog iskopa u cilju osiguranja sigurnosti ljudi i objekta,
- Podgradna mjerenja koja prate razvoj ispucale (plastificirane) zone i ponašanje primarne podgrade u cilju optimizacije primarnog podgradnog sklopa,
- Mjerenja stabilnosti koja određuju opterećenje sekundarne betonske obloge u cilju dokaza stabilnosti tunela.

Prema projektu Tunel Grič, glede tipa tunela i problema koji se očekuju tijekom izvođenja radova, potrebno je provesti kontrolna i podgradna mjerenja [21].

9.5.1. Kontrolna mjerenja

Osnovu kontrolnih mjerenja čine optička trodimenzionalna mjerenja deformacija podzemnog iskopa. Kontrolni mjerni profil najčešće sadrži 5 mjernih točaka smještenih na rubu podzemnog iskopa. Mjerenja se provode elektronskim teodolitom s integriranim koaksijalnim sustavom mjerenja udaljenosti, a uključuju mjerenja slijeganja i provjeru položaja poprečnih profila tunela [21].

Prema projektu Tunel Grič u stijenskoj masi V kategorije i za stabilnost kritičnim mjestima (tektonske i rasjedne zone) previđena je ugradnja jednog kontrolnog mjernog profila na

svakih 10 m. U ostalim kategorijama stijenskih masa profili se trebaju ugrađivati na udaljenosti 50-100 m. U tunelu je predviđeno ugraditi oko 70 kontrolnih mjernih profila, mjesta ugradnje će odredit geotehničar tijekom izvođenja. Prvo mjerenje treba izvršiti unutar 24 h od iskopa. Kasnije bi učestalost mjerenja u prosjeku trebala biti [21]:

- Prvi tjedan jedanput dnevno,
- Nakon tjedan dana jedanput tjedno,
- Nakon prestanka pomaka kontrola svakih šest mjeseca do postavljanja betonske obloge.

Mjerenja moraju biti češća u slučaju povećanja deformacija, pojava koje ukazuju na nestabilnost podzemnog iskopa i nakon svakog daljnjeg građevinskog zahvata koji u zoni mjernog profila može izazvati nestabilnost otvora. U području svakog mjernog profila potrebno je snimiti proces iskopa i podgrađivanja i sve daljnje građevinske zahvate koji mogu utjecati na rezultate mjerenja [21].

9.5.2. Podgradna mjerenja

Svrha podgradnih mjerenja je verifikacija primijenjene metodologije iskopa i podgrađivanja kao i provjera rezultata numeričkog modela. Sastoje se od mjerenja pomaka tla oko podzemnog iskopa i mjerenja naprezanja u elementima podgradnog sklopa. [21].

Mjerenje naprezanja u elementima podgradnog sklopa sastoji se od mjerenja naprezanja i deformacija sidara i mjerenja naprezanja u mlaznom betonu i na kontaktu podgrade i okolnog medija. Za mjerenje naprezanja i deformacija sidara predviđena je ugradnja 6 mjernih sidara pojedinačne duljine 4 m u mjernom profilu. Mjerna sidra se ugrađuju što bliže čelu tunela, a mjerenja se vrše neprekidno, u razmacima do 12 h, a ovisе o građevinskim zahvatima u zoni mjernog profila do potpunog prestanka pomaka [21].

Mjerenje naprezanja na kontaktu tla i primarnog podgradnog sklopa i mjerenje naprezanja u mlaznom betonu vrši se tlačnim ćelijama. U mjernom profilu je predviđeno 7 mjernih mjesta s po dvije tlačne ćelije, odnosno ukupno 7 tlačnih ćelija mjernog područja do 50 bara za mjerenje radijalnih naprezanja između tla i podgrade i 7 tlačnih ćelija mjernog područja do 200 bara za mjerenje tangencijalnih naprezanja u podgradi od mlaznog betona. Mjerenja se vrše kontinuirano do potpunog prestanka promjena naprezanja [21].

9.5.3. Procedura verifikacije stabilnosti podzemnog iskopa

Procedura verifikacije stabilnosti podzemnog iskopa, odnosno II faza projektiranja provodi se tijekom gradnje tunela, a svrha joj je sigurno i ekonomično izvođenje tunela, što se postiže potpunom kontrolom nad ponašanjem podzemnog iskopa [21].

Nakon svakog napredovanja nužno je izvršiti inženjersko-geološko kartiranje iskopanog dijela tunela. Kod bitnih promjena geoloških i geotehničkih karakteristika stijenske mase duž trase tunela potrebno provoditi novu GSI klasifikaciju. Na osnovi rezultata klasificiranja potrebno je pri izvođenju primijeniti pripadajući tip podgradnog sklopa kao i sve ostale mjere na iskopu i stabilizaciji iskopa prema rješenjima u projektu [21].

Geotehničkim opažanjem potrebno je verificirati ili modificirati projektne preporuke glede dužine napredovanja, procijenjenog vremena stabilnosti nepodgrađenih raspona kao i vremena i redoslijeda izvođenja svih propisanih mjera na stabilizaciji podzemnog iskopa. Temeljem geotehničkih mjerenja i opažanja projektant geotehničar mora ustanoviti da li je došlo do stabilizacije podzemnog iskopa te da li se podzemni iskop ponaša u skladu s kriterijima danim u projektu [21].

Ako ponašanje podzemnog iskopa bitno odstupa od projektom postavljenih kriterija potrebno je na osnovi ispitivanja i povratnih analiza ispraviti ulazne parametre ili primijeniti odgovarajući računski model, te na osnovi rezultata modificirati sve potrebne mjere na stabilizaciji podzemnog iskopa. Nakon usklađenja računskog modela s ponašanjem podzemnog otvora moguće je na dužim dionicama s uniformnim geotehničkim karakteristikama stijenske mase pristupiti optimizaciji podgradnih sklopova. Optimizacija se postiže postepenom redukcijom podgradnog sklopa na početku dionice uz zadovoljavanje kriterija za verifikaciju stabilnosti podzemnog iskopa [21].

Projekt stabilizacije podzemnog iskopa II faze treba sadržavati rezultate svih navedenih postupaka i analiza što je osobito značajno u slučaju bilo kakvih problema sa stabilnošću ili održavanjem građevine u budućnosti [21].

10. ZAKLJUČAK

Diplomskim radom dana je teoretska osnova za izradu jednostavnog 3D numeričkog modela korištenjem RS3 programskog paketa. Prema projektu Tunel Grič odabran je kritični profil desne tunelske cijevi iz kojeg je dobiven karakteristični poprečni presjek s odgovarajućim ulaznim parametrima, na temelju kojeg su izrađeni 2D i 3D modeli. Numeričkom analizom modela dobiveni su i analizirani (uspoređeni) njihovi rezultati.

Iz dobivenih rezultata numeričke analize, očita je njihova sličnost. Rezultati geostatičkih naprezanja na vrhu kalote u oba modela se podudaraju s rezultatima dobivenim proračunom za istu točku. Za naprezanja u zadnjoj fazi iskopa mogu se primijetiti jako mala odstupanja rezultata između oba modela.

Prva velika prednost 3D modeliranja u odnosu na 2D modeliranje može se primijetiti kod analiziranja rezultata pomaka. 3D model ima mogućnost postavljanja fiksne točke te mjerenja njenih pomaka (pomaci u svim smjerovima te ukupni pomaci) u odnosu s napredovanje iskopa, dok je točka ispred ili iza čela iskopa. Ovime se mogu prikazati povećanja radijalnih pomaka iskopa u vremenu (krivulja konvergencije), odnosno s napredovanjem iskopa u fazama, te efikasnost ugrađene podgrade. Ako krivulja konvergencije prikazuje približavanje ravnotežnom stanju onda podgrada zadovoljava, a ako se pomaci ne smiruju već se nastavljaju povećavati onda je potrebno pojačati podgradu. Kasnije se monitoringom verificiraju rezultati numeričkog modela, te po potrebi modificiraju metodologija iskopa ili podgrađivanja.

Druga prednost je povezana s mogućnošću prikaza rezultata u odnosu na fiksnu točku s napredovanjem iskopa u ovom slučaju prirast sile na odabranim sidrima. Praćenjem sidara jasno se vidi prividni tlak podgrade nepodgrađenog dijela iskopa. Prividni tlak događa se u neposrednoj blizini čela iskopa gdje radijalni pomaci nisu dovoljno veliki da bi se sidra aktivirala, čime se osiguravaju sigurni radni uvjeti od iskopa do ugradnje podgrade.

Odabir između 2D i 3D modeliranja ovisio potrebama određenih projekata te vremenskom roku. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da se 2D modeli unatoč svojim ograničenjima u odnosu na 3D modele mogu uspješno koristiti za modeliranje tunela. 3D modeliranje jako je napredovalo posljednjih godina s razvojem računalne tehnologije te s

poboljšanjem samih numeričkih metoda. Trećom dimenzijom dobivaju se realniji modeli, pa samim time i realnija rješenja. Numerički modeli bez obzira na napredak, uvijek sadrže određene pretpostavke i pojednostavljenja, a stoga i nesigurnosti, te je potrebna opreznost pri korištenju i interpretaciji dobivenih rezultata. Inženjer koji izrađuje model treba imati dovoljno praktičnog iskustva pri korištenju određenog softvera, kako bi razumio njegova ograničenja.

Značajno je stoga da se u projektiranju i izgradnji tunela redovno koristi metoda opažanja, tj. monitoring tijekom izgradnje, te poboljšanje predviđene podgrade ukoliko je potrebno.

11. LITERATURA

- [1] Hussain, S., Ur Rehman, Z., Mohammad, N., Tahir, M., Shahzada, K., Khan, S. W., Salman, M., Khan, M., i Gul, A., *Numerical Modeling for Engineering Analysis and Designing of Optimum Support Systems for Headrace Tunnel*, Advances in Civil Engineering, vol. 2018, Article ID 7159873, 10 pages, 2018.
- [2] *3D Modelling of Underground Excavations with EX3 and RS3*, <https://www.rocscience.com/about/news-events/3d-modelling-of-underground-excavations-with-ex3-and-rs3>, pristup 04.07.2021.
- [3] Hoek, E., *Practical Rock Engineering Chapter 10 In Situ and Induced Stresses*, 2006.
- [4] Barla, G., i Barla, M. (2000). *Modeliranje kontinuuma i diskontinuuma u tunelogradnji*, Građevinar, 52(10.), str. 563-576. Preuzeto s <httpshrcak.srce.hr13074> (Datum pristupa 05.07.2021.)
- [5] *Discrete element method*, Preuzeto s https://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_element_method, pristup 06.07.2021.
- [6] *About Rocscience*, Preuzeto s <https://www.rocscience.com/about>, pristup 16.01.2021.
- [7] *Rocscience RS3*, Preuzeto s <https://www.rocscience.com/software/rs3>, pristup 16.01.2021.
- [8] *RS3 Quick Start Tutorial*, Preuzeto s https://www.rocscience.com/help/rs3/Tutorials/RS3_001_Quick_Start.htm, pristup 16.01.2021.
- [9] Hoek, E., *Practical Rock Engineering Chapter 11 Rock mass properties*, 2006.
- [10] Hoek, E., Brown, E. T., *Practical estimates of rock mass strength*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, Issue 8, December 1997, Pages 1165-1186
- [11] Marinos, P., Hoek, E., *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch*, Bull. Engg. Geol. Env. 60, 85-92, 2001

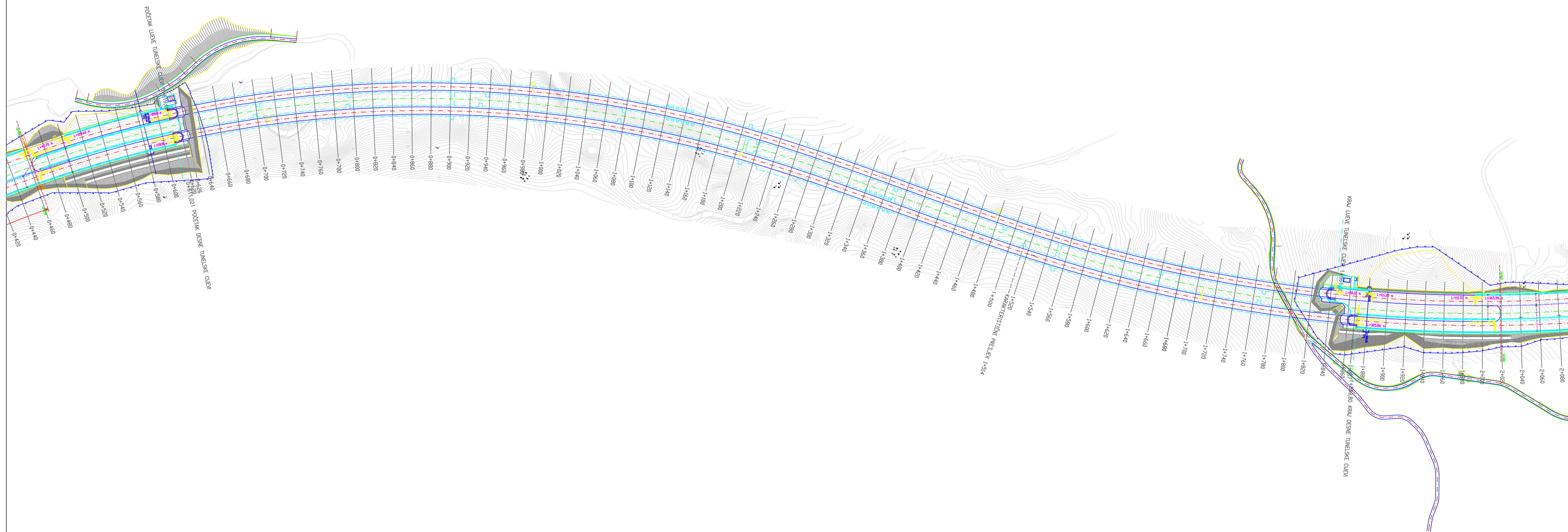
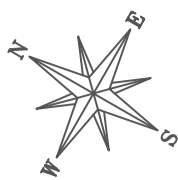
- [12] Goricki, A., Rachaniotis, N., Hoek, E.T., Marinos, P., Tsotsos, S., i Schubert, W., *Support Decision Criteria for Tunnels in Fault Zones*, Proceedings of the 55th Geomechanics Colloquium, Salsberg Published in *Felsbau*, 24/5, 2006.
- [13] Hoek, E., Carranza-Torres, C., i Corkum, B., *Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition*, Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 1, 267-273, 2002.
- [14] Palmström, A., Singh, R., *The deformation modulus of rock masses — comparisons between in situ tests and indirect estimates*, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 16, Issue 2, Pages 115-131, April 2001.
- [15] Hoek, E., Brown, E.T., *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 11, Issue 3, Pages 445-463, June 2019.
- [16] Vrkljan, I., *Podzemne građevine i tuneli*, Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, Institut građevinarstva Hrvatske d.d Zagreb, 2013.
- [17] Arbanas, Ž., *Projektiranje u stijenskim masama: Tečaj stručnog usavršavanja*, Rijeka: Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2008.
- [18] Hoek, E., *Practical Rock Engineering Chapter 15 Shotcrete support*, 2006.
- [19] Pollak, D., Vuić, V., Mitrović, G., *Inženjerskogeološke značajke područja tunela "Grič"*, Knjiga sažetaka – 3. Hrvatski geološki kongres, Pages 231-232, Opatija, 2005.
- [20] *Google karte*, Preuzeto s <https://www.google.hr/maps/@44.7845811,15.3393262,3a,75y,115.33h,100.27t/data=!3m6!1e1!3m4!1s98ijVBp-LcfoBN KprM6mw!2e0!7i13312!8i6656>, pristup 28.08.2021.
- [21] *Tunel Grič*, IGH d.d., knjiga: RPN 3B-1-B-Y-0140 TUNEL GRIČ , broj projekta: 2200-1-220624/00, prosinac 2000.
- [22] Hoek, E., *Practical Rock Engineering Chapter 3 Rock mass classification*, 2006.

[23] RocData - rock, soil and discontinuity strength analysis, Preuzeto s
[https://www.rocscience.com/help/rocddata/#t=rocddata%2FGetting Started.htm](https://www.rocscience.com/help/rocddata/#t=rocddata%2FGetting%20Started.htm), pristup
10.09.2021.

Prilozi

1. Situacija tunela Grič, prema [21]

M 1:2000

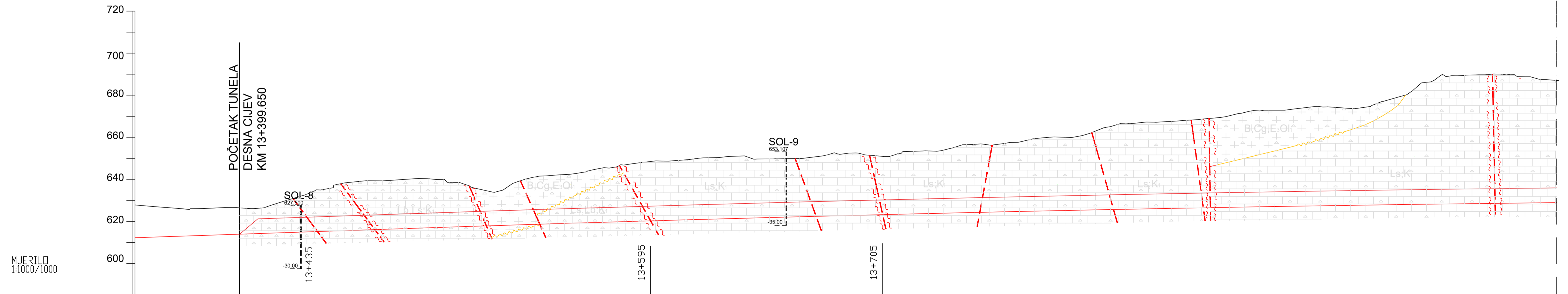


G GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI			
Diplomski rad 3D analiza stabilnosti tunela Grič		Sadržaj nacрта: Situacija tunela Grič, prema [21]	
Student: Ivan Mance		Kolegij: Podzemne građevine i tuneli	
Mentor: prof. dr. sc. Sanja Jovančević Dugonjić	Datum: IX. 2021.	Mjerilo: 1:2000	List: 1

2. Uzdužni presjek desne cijevi tunela Grič - prvi dio, prema [21]

M 1:2000

TUNEL "GRIČ" - DESNA CIJEV M 1:1000/1000
L=1258.780m



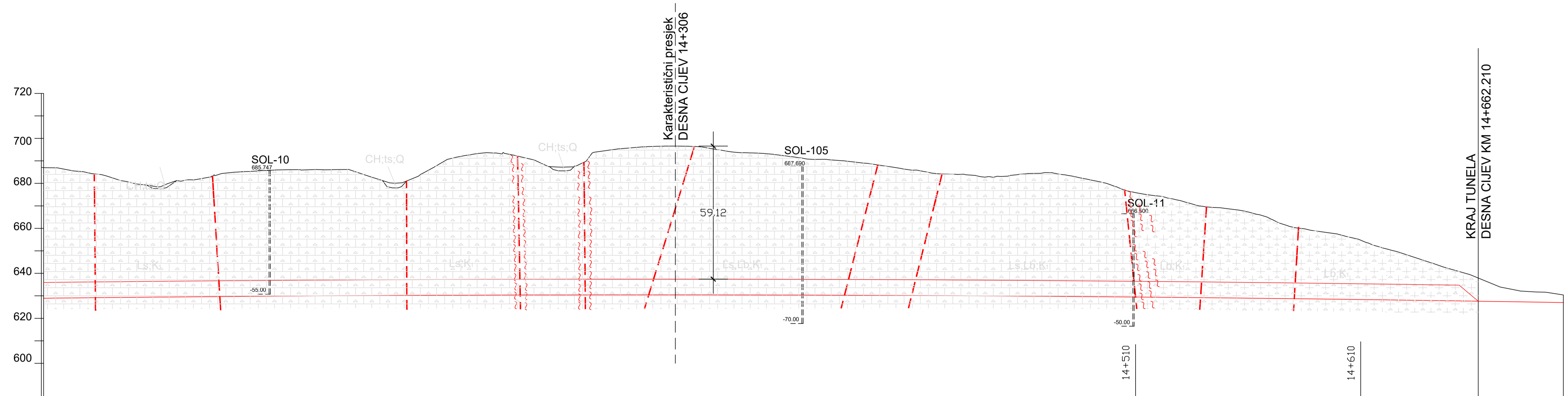
LITOLOŠKA JEDINICA/ LITHOLOGICAL UNIT		POSTDIJAGENETSKE VAPNENAČKE BREČE I U MANJIM MJERIM ZASTUPLJENI VAPNENCI (Lb,Ls,K1) i (Ls,Lb,K2)/ POSTDIAGENETIC LIMESTONE BRECCIA AND SPORADIC LIMESTONES	VAPNENCI (SPORADIČNO POSTDIJAGENETSKE BREČE) (Ls,K1)/ LIMESTONES AND SPORADIC POSTDIAGENETIC BRECCIA		
TEKTONSKI BLOK/ TECTONIC BLOCK		I	II	III	IV
GEOtehnička JEDINICA/ GEOtechnical UNIT		①	②	③	
GSI	MALI NADSLIJEZ/ SMALL OVERBURDEN	41-50	56-70	58-65	
KATEGORIJA STIJENSKE MASE/ ROCK MASS CATEGORY	V	IV (20% III KAT, 20% V KAT)	III (30% II KAT, 5% IV KAT, 5% V KAT)*	III (30% II KAT, 5% IV KAT, 5% V KAT)	

G GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI			
Diplomski rad 3D analiza stabilnosti tunela Grič		Sadržaj nacрта: Uzdužni presjek desne cijevi tunela Grič - prvi dio, prema [21]	
Student: Ivan Mance		Kolegij: Podzemne građevine i tuneli	
Mentor: prof. dr. sc. Sanja Jovančević Dugonjić	Datum: IX. 2021.	Mjerilo: 1:1000	List: 2

3. Uzdužni presjek desne cijevi tunela Grič - drugi dio, prema [21]

M 1:2000

TUNEL "GRIČ" - DESNA CIJEV M 1:1000/1000
L=1258.780m



LITOLOŠKA JEDINICA/ LITHOLOGICAL UNIT		VAPNENCI I VAPNENAČKE BREČE (Ls,Lb)Kd/ LIMESTONES AND LIMESTONE BRECCIA	POSTDIJAGENETSKE VAPNENAČKE BREČE (Lb)Kd/ POSTDIAGENETIC LIMESTONE BRECCIA
TEKTONSKI BLOK/ TECTONIC BLOCK	IV	V	VI
GEOtehnička JEDINICA/ GEOtechnical UNIT	③		④
GSI	58-65		28-39 MALI NADSLOJ/ SMALL OVERBURDER
KATEGORIJA STIJENSKE MASE/ ROCK MASS CATEGORY	III (30% II KAT, 5% IV KAT, 5% V KAT)		IV (30% III KAT, 20% V KAT) V

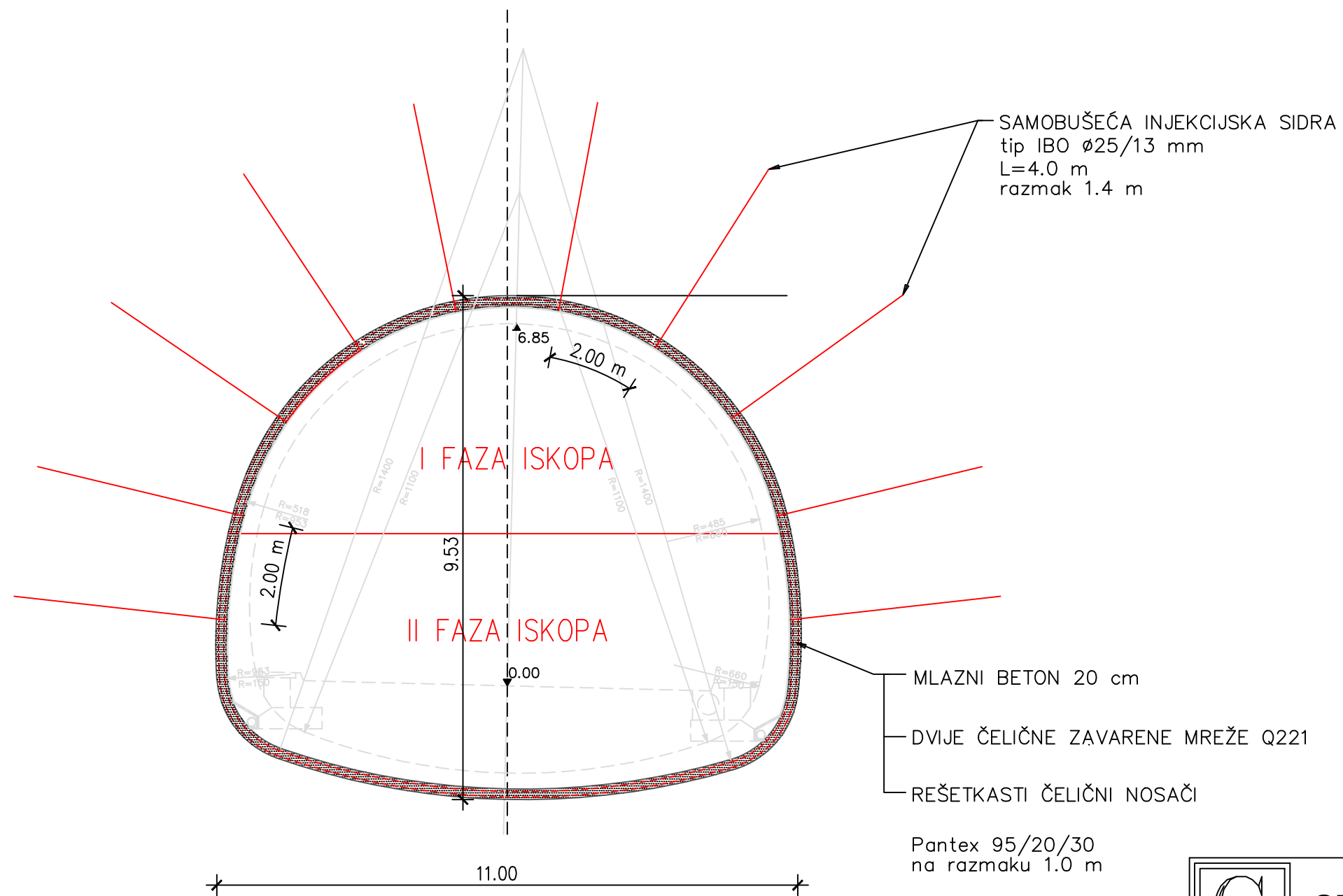
G GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI


Diplomski rad 3D analiza stabilnosti tunela Grič	Sadržaj nacрта: Uzdužni presjek desne cijevi tunela Grič - drugi dio, prema [21]
Student: Ivan Mance	Kolegij: Podzemne građevine i tuneli
Mentor: prof. dr. sc. Sanja Jovančević Dugonjić	Datum: IX. 2021.
	Mjerilo: 1:1000
	List: 3

4. Poprečni presjek tunela na karakterističnom profilu, prema [21]

M 1:100

POPREČNI PRESJEK TUNELA M 1:100



 GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U RIJECI			
Diplomski rad 3D analiza stabilnosti tunela Grič		Sadržaj nacрта: Poprečni presjek tunela na karakterističnom profilu, prema [21]	
Student: Ivan Mance		Kolegij: Podzemne građevine i tuneli	
Mentor: prof. dr. sc. Sanja Jovančević Dugonjić		Datum: IX. 2021.	Mjerilo: 1:100
		List: 4	