

# Projektiranje i izvedba tunela novom austrijskom tunelskom metodom (NATM)

---

**Bunoza, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:157:791406>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



*image not found or type unknown*

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Ana Bunoza**

**Projektiranje i izvedba tunela novom austrijskom tunelskom metodom  
(NATM)**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Geotehnika  
Podzemne građevine i tuneli**

**Ana Bunoza  
JMBAG: 0114031146**

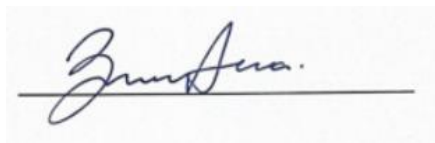
**Projektiranje i izvedba tunela novom austrijskom tunelskom metodom  
(NATM)**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom 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.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Zvezdana", is written over a horizontal line. The signature is cursive and stylized.

U Rijeci, 17.09.2024.

## **ZAHVALA**

Htjela bi se zahvaliti svome mentoru, prof. dr. sc. Željku Arbanasu, na iznimnoj pomoći oko literature te na vodstvu tijekom cijelog procesa izrade diplomskog rada. Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na neizmjerne podršci i vjeri da uz sve izazove mogu uspješno izvršiti i ovaj korak u svom obrazovanju.

## SAŽETAK

Ovim diplomski radom obradit će se tema o Novoj austrijskoj metodi tunelogradnje ili bolje rečeno o konceptu ili filozofiji tunelogradnje. Kako bi ušli u temu rada prvo ćemo proći općenite značajke, nazive i termine koji se u tunelogradnji koriste i kako je to sve počelo. Nadalje će biti obrađeni načini izvedbe iskopa kao i spomenuta mehanizacija koja to omogućava te ukratko tradicionalne metode izvedbe tunela. Sve to kako bi se jasnije mogla dočarati bitnost Nove austrijske metode kod koje će biti obrađeni načini na koji se provodi, prednosti i mane te da bi naposljetku prijemnu NATM-a prikazali na primjeru tunela „Kamenice“.

Ključne riječi: tunelogradnja, iskop, primarna podgrada, NATM

## **SUMMARY**

This thesis will deal with the topic of the New Austrian method of tunneling, or rather, the concept or philosophy of tunneling. In order to get into the topic of the work, we will first go over the general features, names and terms used in tunnel construction and how it all started. Furthermore, the methods of excavation will be covered, as well as the mentioned mechanization that makes it possible, and briefly the traditional methods of tunnel construction. All this in order to more clearly convey the essence of the New Austrian method, where the methods of implementation, advantages and disadvantages will be discussed, and finally, the reception of NATM will be shown on the example of the "Kamenice" tunnel.

Key words: tunnel construction, excavation, primary subgrade, NATM

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O TUNELIMA.....	3
2.1. Projektiranje tunela.....	8
2.1.1. Geotehnička istraživanja.....	9
2.2.2 Prethodna istraživanja.....	9
2.2.3 Istraživanja tijekom gradnje.....	10
2.2.4 Tipovi i metode geotehničkih radova.....	10
3. METODE IZGRADNJE TUNELA.....	11
3.1. Strojni iskop.....	11
3.1.1. Strojovi za iskop u punom profilu.....	15
3.1.2. Strojovi s pokretnom glavom.....	18
3.1.3. Vertikalni iskop okna.....	19
3.1.4. Bušenje okna s površine.....	20
3.2. Klasične metode izgradnje tunela.....	20
3.2.1. Stara austrijska metoda.....	21
3.2.2. Belgijska metoda.....	22
3.2.3. Talijanska metoda.....	22
3.2.4. Njemačka metoda.....	22
4. NOVA AUSTRIJSKA METODA -NATM.....	24
4.1. Osnovna načela tunelogradnje prema NATM-u.....	25
4.1.1. Osnovni principi.....	26
4.1.2. Nosivi prsten.....	37
5. IZVEDBA TUNELA PRIMJENOM NATM-a.....	40
5.1. Primarna podgrada.....	41
5.1.1. Sidra.....	42
5.1.2. Mlazni beton.....	46
5.1.3. Čelični lukovi.....	48
5.2. Poprečni presjeci.....	48
5.3. Prednosti i nedostaci NATM-a.....	50
6. PRIMJER PRIMJENE METODE NATM NA TUNELU KAMENICE.....	52
6.1. Opis stijenske mase.....	53
6.2. Modul deformabilnosti stijenskih masa.....	53
6.3. Klasifikacija stijenske mase.....	54



6.4 Stabilizacija podzemnog iskopa.....	55
6.5 Analiza podzemnog otvora nakon iskopa u II i IV kategoriji stijenske mase .....	61
6.5.1. Razvoj vertikalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase .....	62
6.5.2. Razvoj horizontalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase .....	66
6.5.3. Razvoj deformacija oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase..	70
6.5.4. Razvoj vertikalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase .....	73
6.5.5. Razvoj horizontalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase .....	76
6.5.6. Razvoj deformacija oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase	79
7. ZAKLJUČAK.....	83
8. LITERATURA .....	85
9. GRAFIČKI PRILOZI .....	87

Slika 1 Poprečni presjek tunela [4] .....	5
Slika 2. Uzdužni presjek tunela [4].....	6
Slika 3 :(a) Krtica; (b) Stroj s pokretnom glavom; (c) vertikalni iskop okna; (d) bušenje okna sa površine [3] .....	12
Slika 4 Zatvoreni štit [3] .....	13
Slika 5 Vrste otvorenog štita[3] .....	14
Slika 6 Princip iskopa tunela pod zaštitom štita [3].....	15
Slika 7 Stroj bez štita [3].....	17
Slika 8: Shema iskopa tunela u segmentima[4] .....	19
Slika 9: Vertikalni iskop okna[3].....	19
Slika 10: Bušenje okna sa površine [3].....	20
Slika 11: Stara austrijska metoda-redoslijed izvedbe radova [3].....	21
Slika 12: Belgijska metoda-redoslijed izvedbe radova[9] .....	22
Slika 13: Njemačka metoda - redoslijed radova [10].....	23
Slika 14: Stijenska masa kao glavna nosiva komponenta tunela[8] .....	26
Slika 15: održavanje čvrstoće stijenske mase [8] .....	27
Slika 16: izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [8] .....	27
Slika 17: Kontrola deformacije stijenske mase [8] .....	28
Slika 18: Kontrola deformacije stijenske mase[8].....	28
Slika 19: Pravovremeno ugrađena podgrada [8].....	29
Slika 20: Ovisnost kvalitete stijenske mase i podgrađivanja [8] .....	29
Slika 21: Laboratorijska i in situ ispitivanja i promatranja [8] .....	30
Slika 22: upotreba mlaznog betona [8] .....	30
Slika 23: upotreba tankostijene podgrade [8] .....	31
Slika 24: Pojačanje podgrade [8] .....	31
Slika 25:Mjerenje pomaka konture tunela [8] .....	32
Slika 26: Statičko razmatranje tunela [8].....	32
Slika 27: Zatvaranje prstena tunela[8] .....	33
Slika 28: Pravovremeno zatvaranje prstena smanjuje nepoželjno savijanje u smjeru osi tunela [8] .....	33
Slika 29: Napredovanje u punom profilu [8] .....	34
Slika 30: Stabilizacija veze stijenska masa – podgrada [8] .....	34
Slika 31: Zaobljeni poprečni profil [8] .....	35
Slika 32: Izvedba tanke sekundarne obloge[8] .....	35
Slika 33:Stabilizacija stijenske mase [8].....	36
Slika 34: Kontrola stabilnosti primarne i sekundarne podgrade[8] .....	36
Slika 35: Drenaža izvedena u tunelu[8] .....	37
Slika 36: Heimova hipoteza[13] .....	38
Slika 37: Pritisak na podgradu nakon neke dubine postaje zanemariv [10] .....	38
Slika 38: Golserova definicija nosivog prstena [19].....	39
Slika 39: Aktivno(lijevo) i pasivno (desno) sidro[4] .....	42
Slika 40: sidro s mehaničkim usidrenjem [3] .....	43
Slika 41: Injektirano sidro [3] .....	44
Slika 42: Injektirani kabel [3] .....	44
Slika 43: Samobušivo sidro [3].....	45
Slika 44: Split Set sidro [3].....	45

Slika 45: Swellex sidro .....	46
Slika 46: Suhi postupak [3].....	47
Slika 47: Mokri postupak [3].....	47
Slika 48: Varena čelična mreža i žičano pletivo [3] .....	48
Slika 49: Iskop u tri faze (lijevo) i iskop u pet faza (desno)[8] .....	49
Slika 50: Iskop u dvije faze [4].....	50
Slika 51: Osnovni podgradni sklop tip II [21] .....	56
Slika 52: Osnovni podgradni sklop tip III [21].....	57
Slika 53: Osnovni podgradni sklop tip IV [21].....	58
Slika 54: Osnovni podgradni sklop tip IV [21].....	59
Slika 55: Osnovni podgradni sklop tip V [21].....	59
Slika 56: Osnovni podgradni sklop tip Va [21] .....	60
Slika 57: Osnovni podgradni sklop tip Va [21] .....	61
Slika 58: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost) .....	63
Slika 59: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost).....	63
Slika 60: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost).....	64
Slika 61: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost).....	65
Slika 62: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost) .....	65
Slika 63: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za gornju graničnu vrijednost) .....	66
Slika 64: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost) .....	67
Slika 65: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost).....	67
Slika 66: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost).....	68
Slika 67: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost).....	68
Slika 68: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost) .....	69
Slika 69: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za gornju graničnu vrijednost) .....	69
Slika 70: Deformacije u II kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost) .....	70
Slika 71: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost).....	71
Slika 72: Deformacije oko podzemnog otvora za iskopu u II kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost).....	71
Slika 73: : Deformacije u II kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost) .....	72

Slika 74: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost) .....	72
Slika 75: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost).....	73
Slika 76: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi IV kategorije za in situ stanje materijala .....	74
Slika 77: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon prve faze iskopa.....	74
Slika 78: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u kaloti tunela.....	75
Slika 79: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon druge faze iskopa.....	75
Slika 80: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop IV kategorije stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela .....	76
Slika 81: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi IV kategorije za in situ stanje materijala ....	77
Slika 82: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop IV kategorije stijenske mase nakon izvedbe prve faze iskopa .....	77
Slika 83: Horizontalna naprezanja za podzemni otvor za iskop IV kategorije stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u kalotu tunela.....	78
Slika 84: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za IV kategoriju stijenske mase nakon druge faze iskopa .....	78
Slika 85: Horizontalno naprezanje oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela .....	79
Slika 86: Deformacije u IV kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala.....	80
Slika 87: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon prve faze iskopa .....	80
Slika 88: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade u kaloti tunela.....	81
Slika 89: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop IV kategoriji stijenske mase nakon druge faze iskopa .....	81
Slika 90: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela.....	82

## 1. UVOD

Kad se priča o počecima iskopavanja neke vrste tunela odlazi se skroz u daleka vremena drevnih civilizacija koje su kako bi zaštitile svoje zalihe hrane ili svoje potomke kopali utočišta. Kasnije se to pretvorilo u iskopavanje u svrhu pronalaženja raznih minerala i kovina, ponajviše u Egiptu, Malti, Austriji. Kako je prolazilo vrijeme tuneli su sve više dobivali na vrijednosti i počeli su se koristiti u različite svrhe, oni površinski su služili za transport, vodoopskrbu ili odvodnju dok su se pod površinski ispočetka koristili za vojsku i vodoopskrbu [1].

Nekada je tunel bio sredstvo kojim se skraćuje put ili savladava nekakva prirodna prepreka, a da bi to bilo izvedivo potrebno je u izvedbu uložiti puno znanja, a danas uz ovo se on koristi i kako bi se nadomjestio nedostatak prostora te se na neki način očuvao okoliš. Kako su ambicije rasle tako je rasla i težina uvjeta u kojem je potrebno izgraditi tunel [2,3].

Srećom povećanje cestovnog, željezničkog pa čak i pomorskog prometa, te razvitak gradova, njegove vodoopskrbe i odvodnje praćeno je inovacijama u tunelogradnji. Postepeno se razvijaju eksplozivni, električni detonatori, mlazni beton, stijenska sidra, strojevi za iskop tunela – TBM, monitoring koji pospešuju uspjehe kvalitetno izvedenog tunela, a u svemu tome veliku ulogu imaju inženjeri sa područja građevine, rudarstva te geolozi [2,1].

U tunelogradnji postoje veliki rizici s kojim se izvođači i investitori susreću jer je izgradnja jako zahtjevna i uključeni su ljudski životi prvenstveno. Od rizika još se susreću sa onim financijskim jer je stijena nepredvidiva, te lako može doći do dodatnih troškova ukoliko se naiđe na neki problem koji nije uočen tijekom analiziranja stijenske mase. Razvitkom tehnologije i ti rizici će se moći smanjiti jer će analize biti preciznije, izgradnja će biti brža i efikasnija te će se i sam proces izgradnje skratiti što će uvelike zadovoljiti učesnike u projektu [1].

Kod izvedbe tunela bitno je dobro odrediti vanjska i unutarnja naprezanja stijenske mase i poprečni presjek samog tunela jer o ovim smjernicama ovisi kojom metodom će se pristupiti izgradnji tunela. Ono što se pokušava postići novim metodama je to da se ojača stijenska masa koja bi kao takva na sebe mogla preuzeti veliki dio opterećenja [4].

Preko različitih tradicionalnih i suvremenih metoda koje se mogu koristiti za izgradnju tunela, Nova austrijska metoda (NATM) se izdvojila kao najjednostavnijom i najčešće korištenom metodom. Njezina osnovna ideja je projektiranje uz pomoć opservacijskih metoda, odnosno ona se razvila na iskustvima starih metoda. Koncept se nalazi u tome da tlo ili stijena koji okružuju podzemni otvor postaje dio nosive konstrukcije kroz aktivaciju nosivog prstena [4].

O učestalosti primjene ove metode i iskazano povjerenje istoj govori činjenica da je većina današnjih tunela izvedena upravo prema principima NATM-a. U ovom radi govorit će se o principima gradnje, pozitivnim i negativnim stranama metode, njenim dostignućima te će se sve objediniti na primjeru tunela Kamenice.

## 2. OPĆENITO O TUNELIMA

Tunel se može definirati kao podzemni objekt koji služi za savladavanje prepreka u terenu te za osiguranje tehničkih elemenata cesta na kojoj se projektiraju i grade. Tunel se izvodi u obliku cijevi i otvoren je na jednom i drugom kraju, horizontalno je postavljen uz iznimku blagog nagiba. Ono zašto se izvodi je kako bi se kroz njih mogla provesti prometnica, željeznica, vodni tok ili kanal i na taj način povezati inače nepovezane dvije strane. Tuneli se uz mostove ubrajaju među najzahtjevnije inženjerske objekte [5,3].

Povijest tunela seže daleko prije nego je ikakva povijest i zabilježena. Čovjek je od prvog dana razvio potrebu kopanja zemlje. Iz početka su to bile samo površinske rupe koje su služile kao spremište hrane, također su mu bili potrebne kovine i minerali koje je kod iskopa pronalazi. Kad je ponestalo minerala i kovina na površini jedini logičan slijed je bio iste potražiti ispod zemlje. Tako je i bilo i sve se dublje kopala te je od potrebe za iskopom kovina i minerala što je činio, dok se nije razvila potreba za iskorištavanjem te „rupe“ za transport, vodu, kanalizaciju, obranu... Upravo u tome se nalazi i razlika između miniranja čija je glavna zadaća iskop nekakve materije i tunela koji služi za transport, vodoopskrbu, kanalizaciju, obranu [6].

Razvoj vojske je pratio razvoj građevinarstva te je dolaskom dinamita izgradnja tunela dobila veliku potporu kod samog izbijanja materijala u svrhu iskopa tunela [6].

Izgradnju tunela najbolje je podijeliti u dvije skupine: projektiranje i izgradnju. Inženjer koji radi na projektu izrade tunela mora biti u bliskoj suradnji sa samim izvođačem. Njih posebno zanimaju geotehničke karakteristike stijenske mase u kojoj se izbodi tunel, potrebno je projektirati tunel koji je praktičan jer gradnja tunela je izrazito skupa pa nema mjesta velikim pogreškama, potrebno je znanje o metodama iskopa da bi se iskop proveo u djelo, put podzemne vode, te potrebna tehnika podgrađivanja [6].

Na našu žalost opasnosti od posla ispod zemlje su uvijek postojale i vjerujem da se i postojati još mnogo godina jer uz svu tehnologiju danas još uvijek se svakodnevno može pročitati o nekoj novoj nesreći [6].

Bitna stavka kod podzemne gradnje je iskustvo ljudi na terenu jer za razliku od površinske gradnje di sve uvijek vidiš crno na bijelo kod podzemne gradnje ti uvjeti se u principu uvijek pretpostavljaju pa to isto može biti uzrok velikog broja nesreći [6].

Razlikuju se prema namjeni pa tako mogu biti prometni tuneli koji služe za cestovni, pješački, brodski promet i tuneli mješovite namjene, zatim imamo hidrotehničke tunele koji su vodovodni, melioracijski, kanalizacijski, tuneli u sklopu hidrocentrala. Nadalje, komunalni tuneli za smještaj telefonskih vodova, toplovoda, plinovoda, elektrovoda, te podzemne građevine za smještaj radioaktivnog otpada, skladišta, garaže, podzemna skloništa, strojarnice [3].

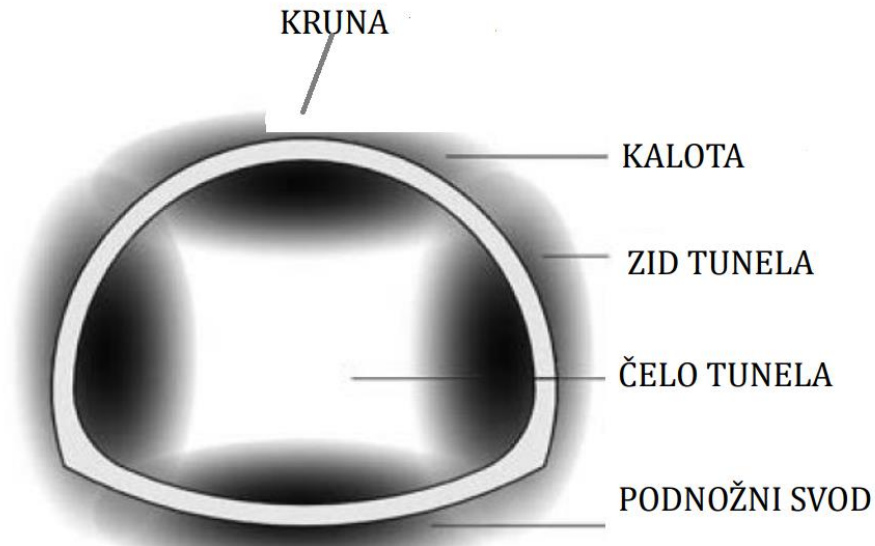
Dok su u prošlosti tuneli služili isključivo za savladavanje prepreka, danas se oni grade i radi nedostatka prostora prvenstveno u urbanim područjima te aspekt očuvanja okoliša koji je naglašen i u manje naseljenim područjima. Svaki novi tunel može se reći da izvedbom postaje sve zahtjevniji jer sami uvjeti u kojima se gradi postaju teži, tuneli ulaze u masive i mijenjaju na taj način režime podzemnih voda te samu stijenu [3].

Postoje visoki rizici u tunelogradnji kako oni humani tako i oni financijski upravo radi uvjeta u tlu. Tuneli koji posebno pate od visokih rizika su oni koji su izrazito dugi ili i iznad sebe imaju debeli nadsloj, a razlog tome su veliki troškovi prethodnih istraživanja koje na sebe preuzimaju investitori i izvođači. Ono što je isključivo impresivno su dimenzije koje su postignute u tunelogradnji, a dva značajna kriterija koja se gledaju su duljina i veličina poprečnog presjeka [3].

Poprečni presjek tunela sa svojim dijelovima (slika 1.):

- 1) Kruna – najviša točka
- 2) Kalota – gornji dio tunela koji je zakrivljen
- 3) Zid – lijeva i desna bočna strana
- 4) Čelo – neiskopani dio tunela
- 5) Podnožni svod – konstrukcija u obliku luka koja premošćuje i zatvara podzemni otvor ispod kolničke konstrukcije [4]





Slika 1 Poprečni presjek tunela [4]

Ovisno o zahtjevima smještajnog prostora, troškovima iskopa i podgrađivanja, ventiliranju, smanjenju momenta savijanja u podgradnim elementima izabire se oblik poprečnog presjeka.

Projektirani poprečni presjek mora ispuniti uvjet stabilnosti podzemnog iskopa [4]

Zbroj površine konstrukcije i površine svijetlog otvora je ukupna površina poprečnog presjeka iz čega slijedi jednačba (1):

$$F = F_k + F_s \quad (1)$$

Gdje je:

$F$  – površina poprečnog presjeka ( $m^2$ )

$F_k$  – podgradna konstrukcija ( $m^2$ )

$F_s$  – površina svijetlog profila ( $m^2$ )

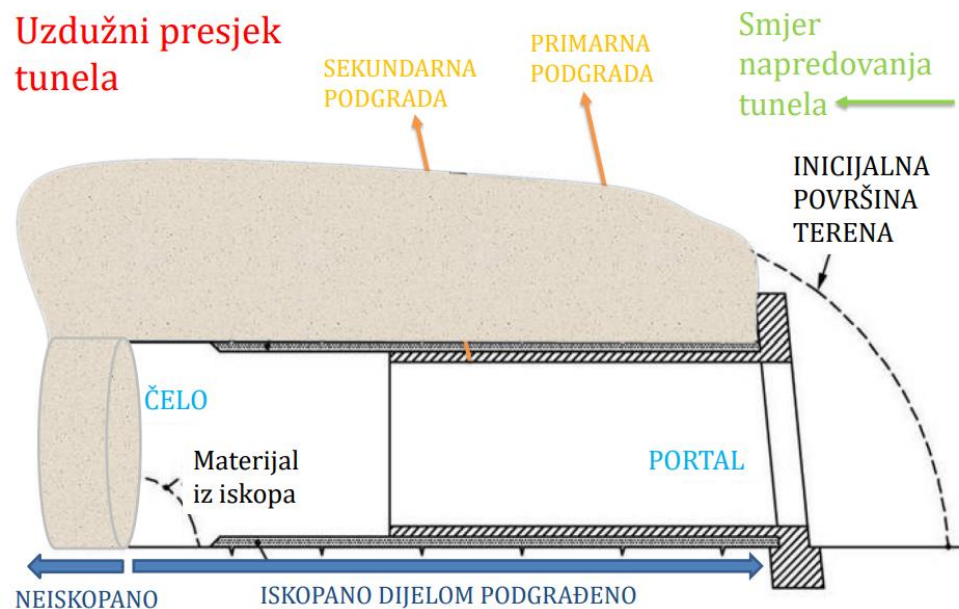
Svijetli profil tunela mora zadovoljavati oblik i dimenzije takve da se osiguran slobodan profil za standardne dimenzije vozila kod prometnih tunela ili nesmetano obavljanje drugih funkcionalnih potreba u tunelu ovisno o vrsti prometnog objekta i namjeni te smještaj opreme.[7]

Podjela prema poprečnom profilu:

- 1) Tunelske cijevi: do 5 m<sup>2</sup>
- 2) Tunelske hodnike: 5-12 m<sup>2</sup>
- 3) Tunele malog profila: 12 – 27 m<sup>2</sup>
- 4) Tunele srednjeg profila: 27 – 56 m<sup>2</sup>
- 5) Tunele velikog profila: > 56 m<sup>2</sup>

Uzdužni poprečni presjek sa svojim dijelovima (slika 2.):

- 1) Čelo
- 2) Primarna podgrada – za vrijeme ili odmah nakon iskopa radi osiguravanja sigurnih radnih uvjeta
- 3) Sekundarna podgrada – od armiranog betona nakon završetka primarne
- 4) Portal [1]



Slika 2. Uzdužni presjek tunela [4]

Ovisno o uvjetima koji se sagledavaju postoje razne klasifikacije tunela i uz spomenutu klasifikaciju prema namjeni te prema poprečnom profilu razlikujemo tunele i prema dužini, broju voznih traka, uvjetima u kojim se gradi, obliku tunelske osi i dr [5].

Podjela prema dužini:

- 1) Vrlo kratki – do 50 m
- 2) Kratki – 50 – 500 m
- 3) Srednji – 500 – 2200 m
- 4) Dugi – 2200 – 4000 m
- 5) Vrlo dugi - > 4000 m [5]

Podjela s obzirom na broj voznih traka:

- 1) Tunel s jednim trakom
- 2) Tunel s dvije trake
- 3) Tunel s više traka [5]

Podjela s obzirom na uvjete gradnje:

- 1) Laki tuneli – izvedba u kamenu – nije potrebna podgrada
- 2) Teški tuneli – izvedba u trošnoj stijeni podložnoj raspadanju
- 3) Vrlo teški tuneli – izvedba u zemlji – potrebno zahtjevno podgrađivanje [5]

Podjela s obzirom na oblik tunelske osi:

- 1) U pravcu
- 2) U pravcu s krivinom
- 3) Kružni
- 4) Helikoidalni [5]

Podjela s obzirom na način izgradnje:

- 1) Tuneli izgrađeni podzemnim iskopom sa čela tunela
- 2) Tuneli izgrađeni u otvorenom iskopu
- 3) Tuneli izgrađeni u postupku potiskivanja podgrade [3]

Podjela s obzirom na podgradu:

- 1) Nepodgrađeni tuneli
- 2) Tuneli podgrađeni samo u svodu

### 3) Potpuno podgrađeni tuneli

#### 2.1. Projektiranje tunela

Ono što je bitno znati da u izradi projektne dokumentacije tunela sudjeluje više različitih tehničkih struka i više usmjerenja građevinarstva odnosno da je to multidisciplinarni zadatak. Proteže se od struke prometnog ustrojenja koja pokriva osnove trasiranja tunela i tlocrtno i visinski, poprečne profile tunelske cijevi, preglednost, brzinu i prometno opterećenje, zatim je potrebno i izvođačko usmjerenje za proračun i projekte sekundarne betonske obloge i armature u tunelu. Da bi se napravio hidraulički proračun i projekt odvodnje u tunelu, drenaža tunela kao i projekt hidrantske mreže potrebno je hidrotehničko usmjerenje, a za klasifikaciju stijenske mase, određivanje vrijednosti relevantnih geotehničkih parametara, određivanja načina iskopa, izvedbe i monitoring imamo geotehničko usmjerenje [3,4].

Kao i kod svakog projektiranja ili izvođenja važno je voditi se nekim zakonima, regulativama. Postoje domaće zakonske regulative koje iza sebe imaju problematiku, a to da se većina iste može smatrati zastarjelom tj, nisu pokriveni svi aspekti projektiranja, pa je potrebno se osloniti na Europske direktive [3].

Ulazni parametri za projektiranje tunela su tip i rang prometnice (autocesta, brza cesta, željeznička pruga...), broj i širina kolnika/kolosijeka, normalni poprečni presjek prometnice i projektna brzina za tunel [3].

Kod tunelogradnje projektant nema opciju izbora materijala u kojem će se graditi tunel već mora prihvatiti ono što mu je dato. Samim time na tunelogradnju se gleda kao visokorizičnom kako financijski tako i radi ljudskih života. Upravo iz tog razloga tunel kao građevinu potrebno je svrstati u geotehničku kategoriju 3 Eurocode 7 (European prestandard ENV 1997-1), odnosno u vrlo velike ili neuobičajene konstrukcije, gdje postoje veći rizici nego inače. Također treći geološki razred uključuje neuobičajene ili izuzetno teške uvjete opterećenja i temeljnog tla te konstrukcije u područjima visoke izloženosti potresima [3].

### **2.1.1. Geotehnička istraživanja**

Cilj geotehničkog istraživanja je saznati u kojim uvjetima je tlo ili stijena kroz koju će prolaziti tunel na način da se odredi stanje i podrijetlo stijene odnosno tla. Istraživanjem osim geoloških i geotehničkih značajki tla i/ili stijene doznaje se i prisutnost podzemne vode, podzemnih plinova, prisutnost zagađenja te utjecaj tunela na okoliš. Program istraživanja mora biti planiran da bi odredio lokacije bušotina i ostalih istraživačkih metoda. Izdanci dobiveni iz bušotina daju približnu geološku sliku materijala u kojem se buši [6]

Geološka istraživanja je potrebno detaljno i u cijelosti provesti kako se kasnije ne bi pojavili problemi i krene se bušiti krivim instrumentima i izazovu se stanja tla ili stijene koja su nepovoljna i koja treba sanirati te dolazi do nepotrebnih troškova [6].

Informacije koje je potrebno prikupiti su:

- ❖ Geotehnički profil – klasifikacija karakteristika osnovnog tipa stijene te struktura istih
- ❖ Hidrogeološka svojstva
- ❖ Mogući rizici

### **2.2.2 Prethodna istraživanja**

Proces tunelogradnje zahtjeva stalno prikupljanje informacija, a rezultati moraju bit prikazani u izvještaju. Preko prvih do glavnih istraživanja i na kraju za vrijeme i nakon izvođenja radova [3].

Da bi projekt mogao krenuti u izradu potrebno je provesti početna i glavna istraživanja [3].

Razrada geoloških karata i terenskog kartiranja, hidroloških, hidrogeoloških karata, karata mineralnih sirovina, karata rizika, satelitske snimke i sl. dio su početnih istraživanja. Nadalje, ovdje spada i analiza iskustva stečenih građenjem susjednih građevina te određivanje geotehničkih profila i parametara na osniva rijetke mreže istražnih radova [3].

Početna istraživanja obuhvaćaju zonu i izvan same zone utjecaja, a otkrivaju nam važna svojstva tla i pomažu kod definiranja tipa i količine glavnih istraživanja te procjenu utjecaja projekta na uvjete u tlu [3].

Glavna istraživanja provode se unutar površine koju projekt zahvaća i njima se dobivaju informacije potrebne za projektiranje i dimenzioniranje, izradu dokumentacije, proračune, izvođene i procjenu utjecajan na okolne građevine [3].

### ***2.2.3 Istraživanja tijekom gradnje***

Tijekom građenja se provjeravaju rezultati prethodnih istraživanja uz pomoć terenskih i laboratorijskih ispitivanja. S obzirom na metodu građenja i tlu, obuhvaćaju:

- ❖ Inženjerskogeološko snimanje čela i izradu uzdužnog profila,
- ❖ Mjerenje pomaka konture tunela i točaka u stijenskoj masi,
- ❖ Geotehnička istraživanja
- ❖ Nivo podzemne vode
- ❖ Vibracije u tlu i objektu
- ❖ Mjerenje naprezanja na kontaktu obloge i tla ili elementima za stabiliziranje iskopa[3]

### ***2.2.4 Tipovi i metode geotehničkih radova***

Geotehničkim istražnim radovima:

- ❖ Definiiraju se metode građenja
- ❖ Definiira se način dimenzioniranja podgrade
- ❖ Procjenjuje se utjecaj metode građenja i konstrukcije na okolinu [3]

Postoje brojne nacionalne, europske i međunarodne norme (ISO) te preporuke međunarodnih udruga (ISMR – International Society for Rock Mechanics, ITA – International Tunnelling Association, IAEG – International Association of Engineering Geology)u kojima su opisane metode terenskih i laboratorijskih istraživanja [3].

### 3. METODE IZGRADNJE TUNELA

Postoje dvije vrste tehnika kod vršenja podzemnog iskopa, a to je iskop radi oblikovanja podzemnog prostora te iskop radi dobivanja minerala ili lomljenog kamena. Razlika je u tome da kod iskopa radi oblikovanja podzemnog otvora potrebno je čim manje utjecati odnosno oštetiti stijensku masu iskopanog prostora i u njegovoj okolini dok se kod drugog navedenog iskopa na takve stvari ne pazi i nisu uopće bitne. Za iskop se koriste različite metode, a za izbor najbolje metode potrebno je znati sve od toga kakva je stijenska masa u kojoj se izvodi tunel pa do dimenzija tunela, dostupne opreme i radne snage jer je od iznimne važnosti izabrati najučinkovitiju metodu za najbolje rezultate [3,6].

Dvije su metode iskopa koje se razlikuju, a to je klasična metoda iskopa u kojoj se iskop vrši miniranjem, bagerima i sl. te alternativa tim klasičnim metodama, a to je upravo iskop stijenske mase strojevima [3].

Također je prisutna podjela metoda iskopa tunela na klasičnu i suvremenu kad se uz iskop govori i o stabilizaciji istoga odnosno podgrađivanju. Ovdje odabir metode zavisi o svojstvima materijala u kojima se iskop izvodi, a osnovnu razliku čini uloga podgrade. Kod klasičnih metoda funkcija primarne podgrade je bila privremeno rješenje, npr. drvo, kod podupiranje stijenske mase dok se nije zamijenila trajnom oblogom od kamena ili kamenih blokova. No kako se tada iskop nije vršio velikom brzinom i do krajnjeg izgleda podgrade prolazilo bi puno vremena dolazilo je do slabljenja stijenske mase i zadebljanja podgrade. Srećom uočene nepravilnosti i nedostaci takvog podgrađivanja dovele su do toga da se razviju suvremene metode koje koriste podgradu od trajnog materijala i koja je koristila snagu same stijenske mase [3].

#### 3.1. Strojni iskop

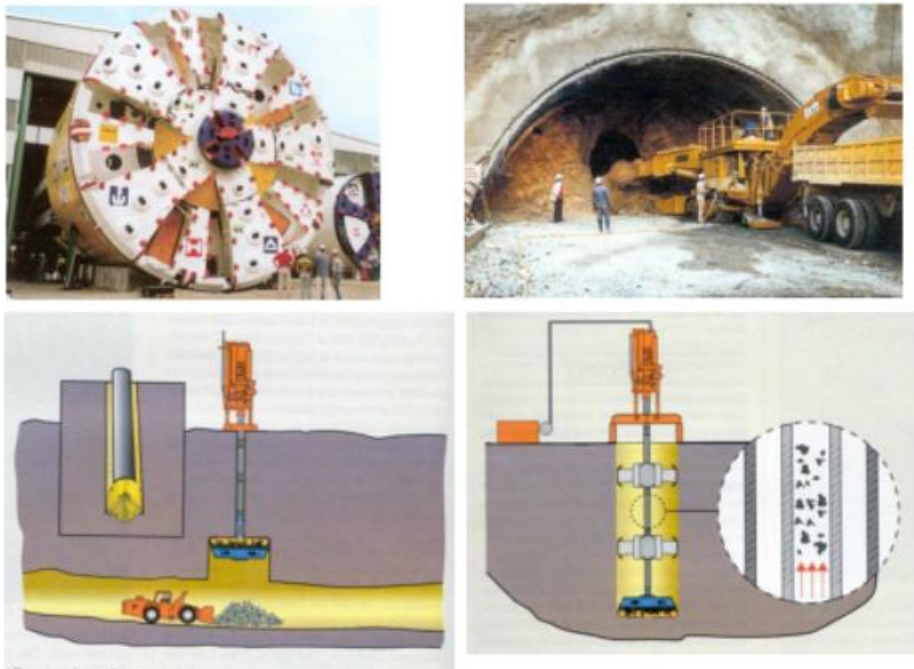
Strojni iskop, TBM se u literaturi može naći kao objašnjenje za:

- ❖ Sve strojeve koji se koriste u iskopu tunela neovisno jesu li to strojevi za iskop tunela u punom profilu ili strojevi s pokretnom glavom
- ❖ Strojeve za iskop tunela u punom profilu u svim geološkim materijalima

- ❖ Strojeve za iskop tunela u punom profilu, ali se koriste samo u stijenskoj masi [3,4].

Strojevi se mogu podijeliti na (slika 3):

- ❖ Krtice odnosno strojeve koji se koriste za iskop u punom profilu
- ❖ Strojeve s pokretnom glavom
- ❖ Vertikalni iskop okna
- ❖ Bušenje okna sa površine [3]



Slika 3 : (a) Krtica; (b) Stroj s pokretnom glavom; (c) vertikalni iskop okna; (d) bušenje okna sa površine [3]

Ukoliko se iskop tunela vrši u teškim geotehničkim uvjetima i stabilnost nepodgrađenog tunela je teško osigurati koristi se štit koji ima promjer tunela i oblika je čeličnog cilindra te se pod njegovom zaštitom vrši siguran iskop. Materijal u kojem se kopa vidljiv je samo na čelu tunela jer se konačna obloga tunela ugrađuje ispod štita, a to su perefabricirani betonski elementi. Jedino ako su u pitanju mikrotuneli onda se obloga ugrađuje na licu mjesta, a materijal je beton.



U ovisnosti o tome hoće li stroj vršiti iskop pod zaštitom štita ili ne mogu se podijeliti jednostavno na:

- ❖ Strojevi sa štitom
- ❖ Strojevi bez štita [3,4]

Upotreba štita uvelike ovisi kako je već i spomenuto o materijalu u kojem će se vršiti iskop stoga ih je moguće razvrstati u strojeve koji služe za iskop u stijeni i oni koji služe za iskop u tlu [3,4].

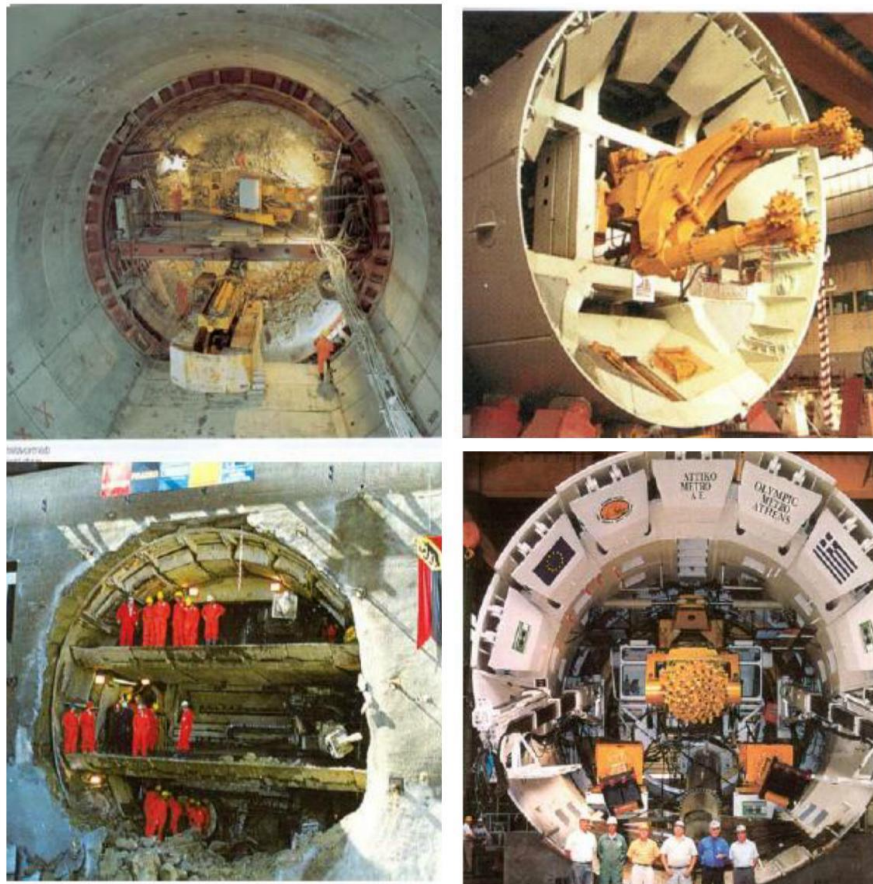
Ono što je zanimljivo za spomenuti je da se prvi štiti koristio već 1823. godine za iskop prolaza ispod rijeke Temze u Londonu samo što mu je poprečni presjek bio kvadratnog oblika [3].

Štit može biti otvoren ili zatvoren. Kad se govori o zatvorenom tipu štita on se koristi samo za potrebe iskopa tunela u punom profilu i tada je on sastavni dio konstrukcije stroja. Rotirajuća rezna glava koja se nalazi na čelu štita vrši iskop dok se stabilnost čela osigurava suspenzijom od bentonita kojom se prostor između rezne glave popunjava (Slika 4)[3].



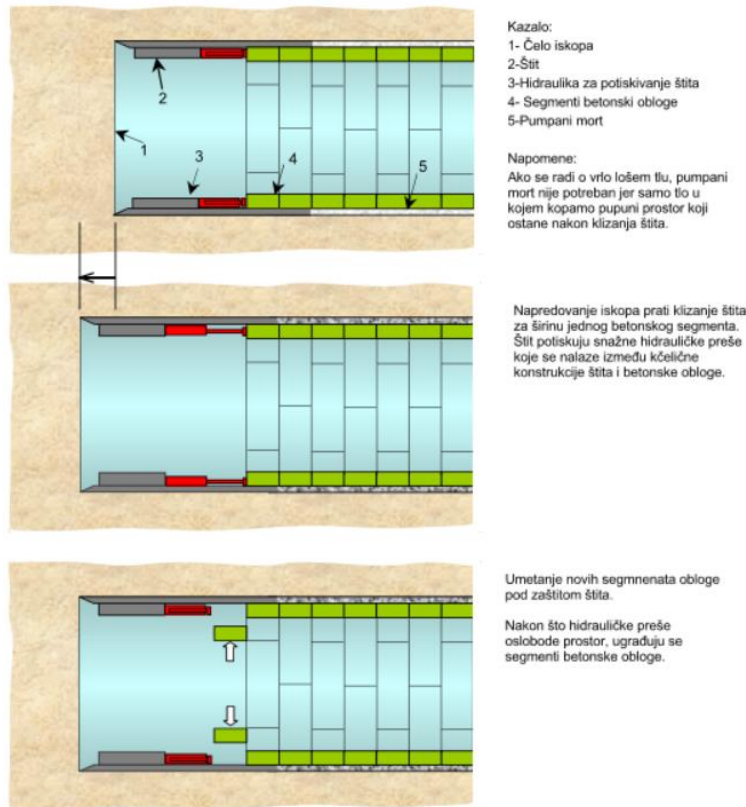
*Slika 4 Zatvoreni štit [3]*

Drugi tip štita je otvoreni štit i pod tim se podrazumijeva da je štit otvoren prema čelu iskopa te se ovdje iskop izvodi ručni ili strojno odnosno bagerima, glodačima, sekundarnim miniranjem i sl. Ukoliko se tijekom izvedbe iskopa pojavi problem prodora podzemne vode stabilnost štita se postiže komprimiranim zrakom te se takav princip štita može usporediti s kesonima za iskop ispod razine vode. Ostali načini stabilizacije čela kod otvorenih štitova postiže se metalnim/čeličnim pločama ili ostavljanjem rampe (Slika 5)[3].



*Slika 5 Vrste otvorenog štita[3]*

Postavlja se pitanje kada i zašto koristiti strojeve sa štitom, a odgovor je omogućavanje sigurnih radnih uvjeta u kod intenzivno ispucale stijenske mase. Pod štit se ugrađuju predfabricirani betonski elementi koji čine podgradu, a sam princip iskopa tunela pod zaštitom štita prikazan je na slici 6 [4].



Slika 6 Princip iskopa tunela pod zaštitom štita [3]

### 3.1.1. Strojevi za iskop u punom profilu

S iskopom u punom profilu započelo se već 1882. godine u pokušaju izgradnje tunela ispod La Mancha, ali nakon što je iskopano svega 1,5 km tunela s engleske strane izgradnja je okončana jer su se javili mnogi problemi kojih tada nisu bili rješivi. No, dogodio se veliki napredak u svijetu koji je omogućio da se taj tunel zajedno s mnogim drugim izvede do kraja i u potpunosti. Iskop u punom profilu dnevno može napredovati 150m, na tjedan i do 500m, dok na mjesečnoj razini to dođe do 2 km ili čak 15 km na godinu, ali cijeli taj napredak mogu zaustaviti loši i nepovoljni geološki uvjeti [3].

Zamisao da se iskop u punom profilu može biti isključivo kružnog poprečnog presjeka je u potpunosti netočna te postoje strojevi koji kopaju eliptični poprečni presjek, a moguće je i kombinirati više strojeva u jednu cjelinu da se dobiju različiti oblici [3].

Kod iskopa tunela sve se najviše vrti oko materijala u kojem se tunel kopa, sama konstrukcija stroja ovisi o geološkim, geotehničkim i hidrogeološkim uvjetima u tlu, a ekonomski faktor i učinkovitost iskopa najbolje se postiže na način da se konstrukcija stroja prilagodi upravo uvjetima na toj konkretnoj lokaciji. S toga se strojevi dijele u dvije skupine i to one za iskop u stijeni i za iskop u tlu, a nekakav kalup u kojem mediju koristiti štit i na koji način prikazano je tablicom 1 [3,4].

*Tablica 1: Usporedba materije u kojoj se kopa i vrste štita*

Medij u kojem se kopa	Vrsta štita
Stijena	Štit za iskop stijenske mase
Glina i prah, pijesak, šljunak	Štit kod koga je čelo iskopa stabilizirano bentonitnom suspenzijom
Glina i prah	Štit kod kojeg se stabilizira čelo iskopa materijalom iz iskopa
Sve vrste tla (sa blokovima stijene)	Štit za iskop različitih geoloških formacija

Za iskop čvrste stijene koriste se strojevi sa jednim ili dva štita odnosno strojevi bez štita ovisno o tome kakva su geotehnička svojstva stijenske mase (slika 7). Ono što stvara problem tj. kritična aktivnost kod ovakvih strojeva je sam iskop, razaranje stijene dok je stabilnost manji problem [3].

Sam proces iskopa, razaranja stijene započinje rotacijom glave stroja koja na sebi ima diskove. Također stroj ima razupirače preko kojih dolazi do reakcije potisnoj sili, a oni svoj kontakt sa stijenom ostvaruju preko bokova tunela. Kontura iskopa u ovom slučaju stabilizira se kako bi se klasično stabilizirao tunel (sidra, armirani mlazni beton) [3].



*Slika 7 Stroj bez štita [3]*

U Hrvatskoj je korišten stroj bez štita za iskop tunela za dovoz pitke vode na Brač i izgradnja je trajala od 1971-1976. godine, te za tunel HE Zakućac 2.

Teški geotehnički uvjeti, tlo izrazito niske čvrstoće u većini slučajeva sa velikim dotokom vode, često su svakodnevica kod iskopa tunela. U ovakvim uvjetima jako je teško osigurati stabilnost čela i ovdje je sigurnost čela predstavlja glavni problem pa iz tog razloga ovi strojevi za iskop tunela u punom profilu redovito imaju štiti [3].

Strojevi u teškim geološkim uvjetima koriste različite vrste štita, a to su:

- ❖ Hidroštit – gdje se za stabilizaciju čela iskopa koristi bentonitna suspenzija
- ❖ Štit kod kojeg se za stabilizaciju čela iskopa koristi iskopano tlo
- ❖ Štit za iskop različitih geoloških formacija [3]

Tehnologija koja za stabilizaciju čela iskopa koristi bentonitnu suspenziju danas je od velike koristi, a prvi su je počeli koristiti Japanci 1974. godine. Proces odvoza iskopanog tla izvodi se hidrauličkim putem pumpanjem mješavine bentonitne suspenzije i tla. Suspenzija se izdvaja iz iskopanog materijala i sprema se za kasniju ponovnu uporabu. Bentonit uz dodatak vode i aditiva



čini bentonitnu suspenziju koja se u praksi najčešće naziva isplakom, a bentonit je prirodna mješavina minerala. Problem kod korištenja ovakvog stroja je kontrola količine iskopa [3].

Nakon Hidroštita još jedna tehnologija koja je u praksu uvedena od strane Japanaca je EPB odnosno štit kod kojeg iskopano tlo služi za stabilizaciju čela iskopa. Razlog zašto su upravo oni uveli ovu tehnologiju u praksu su specifična vulkanska tla koja su homogena i imaju sitne čestice što omogućuje korištenje ovog tla bez dodatne pripreme što nije slučaj i u Europi pa je ovdje primjena manja [3].

Zadnja vrsta štita kojeg treba spomenuti su oni koji se koriste u promjenjivim geološkim uvjetima. Ovi štitovi uglavnom su namijenjeni iskopu u tlu, a ne u stijeni iako bi trebao prolaziti kroz sve geološke materijale koji se nađu na putu iskopu tunela. Konstrukcija je ista kao kod hidroštita samo je dodatno opremljen čeljustima koja drobe blokove stijene [3].

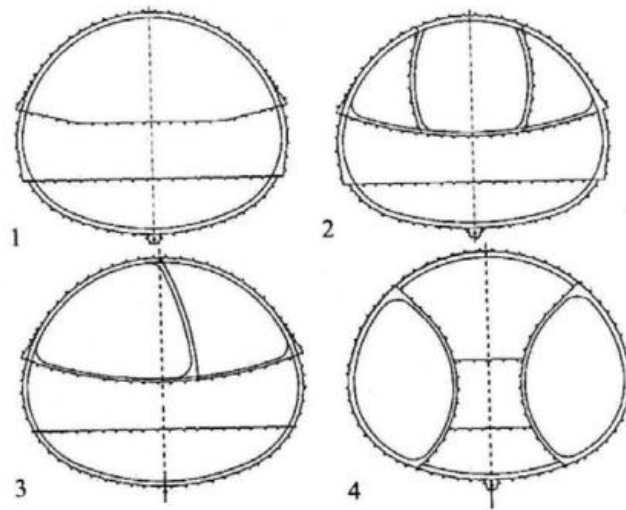
### ***3.1.2. Strojevi s pokretnom glavom***

Strojevi s pokretnom glavom svoje rezače imaju na rotirajućoj glavi koja ima mogućnost slobodnog kretanja po profilu tunela u kojem se vrši iskop. Veliki dio mogućnosti slobodnog kretanja proizlazi iz toga da je ovaj stroj dosta manji ako se uspoređuje sa strojem za iskop u punom profilu, jeftiniji i fleksibilniji za korištenje. Alat za rezanje stijene se razlikuje, a iz toga proizlazi podjela ovih strojeva na glodače i strojeve s diskovima na pokretnoj glavi. Stijenska masa u kojoj se oni koriste najčešće ima srednju čvrstoću ili se radi o ispucanoj stijenskoj masi [3].

Glodače je moguće montirati na ruku bagera, a inače imaju na glavi zube kojima razaraju stijenu tijekom rotacije [3].

Stroj s diskovima na pokretnoj glavi može se okarakterizirati kao spoj stroja za iskop u punom profilu prema kojem ima rezni alat, ali je za razliku od krtica puno pokretljiviji što bi bila karakteristika glodača. Za potrebe potkovičastog poprečnog koristit će se upravo ovi strojevi [3].

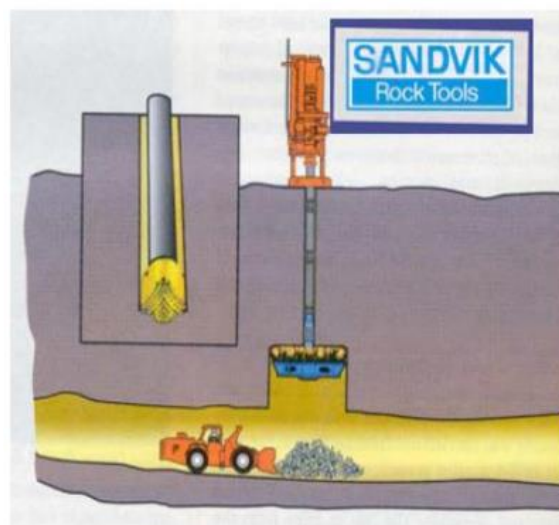
Ovim strojevima se iskopi vrše u segmentima, a neke od shema prikazane su na slici 8 [3,4].



Slika 8: Shema iskopa tunela u segmentima[4]

### 3.1.3. Vertikalni iskop okna

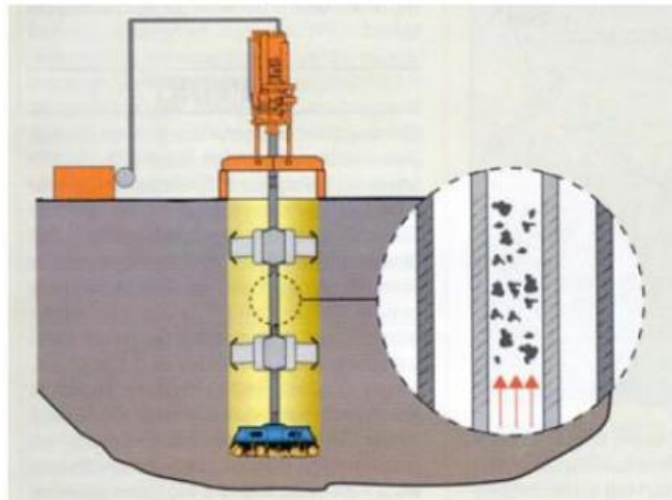
Za tunele malih promjera ili kod iskopa okna koristi se ovaj način iskopa, gdje se iz podzemne prostorije vrši iskop prema površini ili prema nekoj drugoj prostorije bitno je samo da je na višem nivou. Iskopu prethodi pilot bušotina za smještaj osovine kojom se rotira rezna glava dok materijal iz iskopa pada na niži nivo (slika9) [3,4].



Slika 9: Vertikalni iskop okna[3]

### 3.1.4. Bušenje okna s površine

Stroj je gotovo isti kao i kod vertikalnog iskopa okna samo je razlika u smjeru kretanja stroja za vrijeme iskopa što bi i ovom slučaju bilo prema dolje. Kod ove tehnologije se iskopani materijal transportira uz pomoć zraka kroz osovinu.(Slika10)[3,4].



Slika 10: Bušenje okna sa površine [3]

### 3.2. Klasične metode izgradnje tunela

Baza klasičnim metodama izgradnje tunela je jedan ili više prokopa gdje se prvo izvodi jedan prokop, najčešće trapeznog obila do  $10 \text{ m}^2$ . U počecima se za podgradu koristilo drvo i to sve do polovine prošlog stoljeća, a zatim se krenulo sa stabilizacijom tunela čeličnom podgradom dok se u konačnici nije počela koristiti konačna podgrada koja je bila zidana ili betonska [3,8].

Klasične metode građenja se razlikuju prema načinu i redoslijedu otvaranja profila, te formiranju konstruktivnog sistema.

Postoji više klasičnih metoda, a neke osnovne bi bile:

1. Stara austrijska metoda,
2. Belgijska metoda
3. Talijanska metoda i
4. Njemačka metoda



### 3.2.1. Stara austrijska metoda

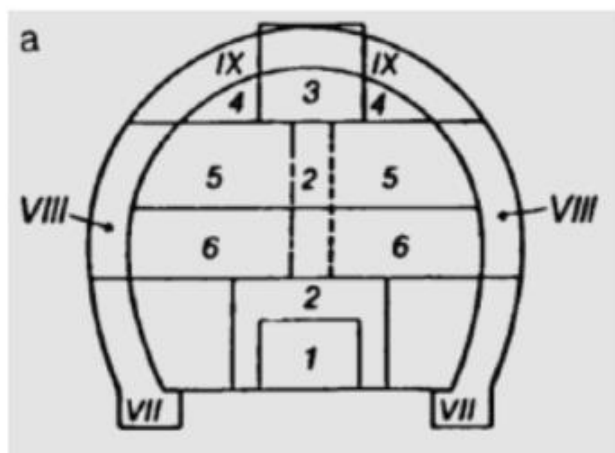
Glavna karakteristika ove metode je iskop koji započinje donjim potkopom. Smjernim potkopom trapeznog profila započinje proces iskopavanja te se svakih 20 metara osigura vertikalni proboj čija je funkcija preuzimanje iskopanog materijala iz gornjeg u donji prokop. Zatim se potkop bočno proširuje u smjeru od gore prema donje te se na taj način otvori cijeli profil, a stijena se u potpunosti oslobodi od pograda i započinje proces stavljanja oplata, a cijeli proces je prikazan slikom 11. Obloga je najčešće betonirana ili zidana kamenim ili predfabriciranim betonskim blokovima [4,9].

Prednosti metode:

- ❖ Izvedba istražnog tunela koji može poslužiti kao drenaža
- ❖ Povećanje broja iskopnih lokacija
- ❖ Način iskopa uvjetuje finalni oblik [4]

Nedostaci:

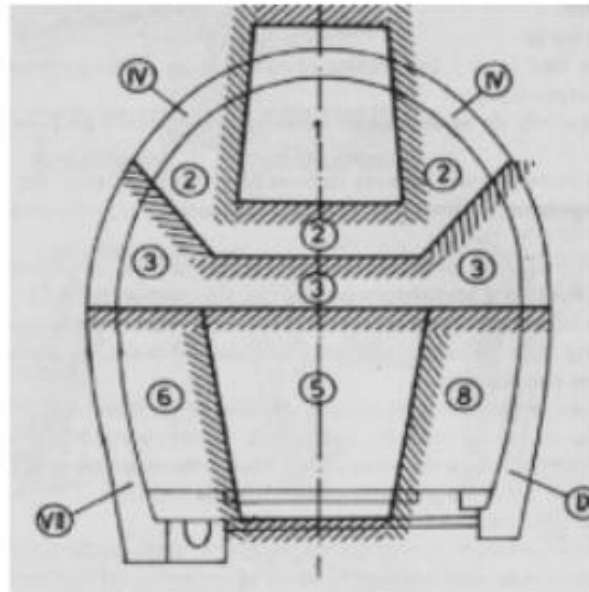
- ❖ Drvene razupore ograničavaju uvjete izvedbe
- ❖ Pojava slijeganja radi premještanja razupora
- ❖ Stijenska masa je podložna pomacima ukoliko je poduprta drvenom građom
- ❖ Sporo napredovanje tunela [4]



Slika 11: Stara austrijska metoda-redoslijed izvedbe radova [3]

### 3.2.2. *Belgijska metoda*

Za razliku od stare austrijske metode kod ove metode se iskop vrši gornjim potkopom i zatim se prelazi na proširenje bokova. Neposredno nakon iskopavanja gornjeg dijela profila izvodi se kalota obloge duž cijele širine, zatim se iskopava srednji dio profila na dolje. Nakon što se donji dio iskopa na punu širinu dovršavaju se bokovi te se nakon toga uklanja podgrada kao zadnji korak. Ukoliko je potrebno izvodi se i podnožni svod.(slika 12) [9].



Slika 12: Belgijska metoda-redoslijed izvedbe radova[9]

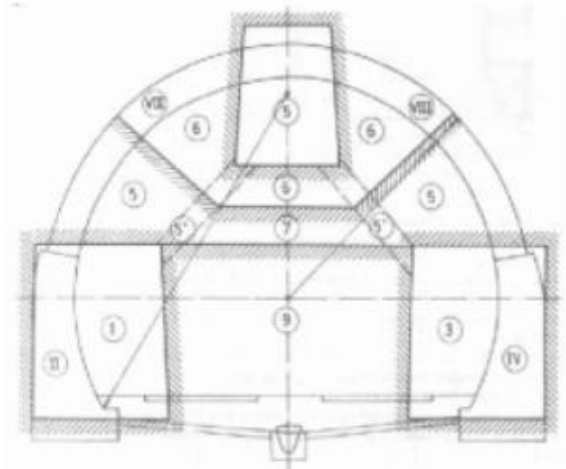
### 3.2.3. *Talijanska metoda*

Kod ove metode zamjenjuje se slab stijenski materijal i izvodi se suhozid koji preuzima opterećenje masiva te smanjuje opterećenje obloge. Ova metoda je pogodna za savladavanje teških geoloških stanja uz prisustvo vode. Ime je dobila tijekom izgradnje tunela u Apeninima [9].

### 3.2.4. *Njemačka metoda*

Popularan naziv ove metode je metoda trećeg iskopa i svoju primjenu je pronašla u većim profilima podzemnih prostorija i kod teških uvjeta građenja. Radi uštede materijala kod ove

metode kalota iskopa i oplata za konačnu oblogu oslanjaju se na centralnu jezgru. Tek nakon što je izveden svod konačne obloge iskopava se centralna jezgra (Slika 13) [9].



*Slika 13: Njemačka metoda - redosljed radova [10]*

U današnje vrijeme primjena klasičnih metoda je uglavnom jako ograničavajuća jer je spora, a veliki su troškovi izvođenja. Međutim ove metode su bile potrebne za analize i proučavanja te se na osnovi stečenih iskustava razvile nove suvremene metode izgradnje tunela [11].

Sva geološka i geofizička istraživanja dovela su do razvitka novih disciplina kao što je mehanika tla i stijena što je naposljetku dovelo do velikog razvoja tunela. Nove geološke prilike, novi zahtjevi za različite površine poprečnog presjeka te nova mehanizacija omogućile su razvoj većeg broja suvremenih metoda izgradnje tunela, a ona najpoznatija i koja je najrelevantnija za Republiku Hrvatsku s obzirom da su svi tuneli građeni upravo prema njenom principu je Nova austrijska metoda – NATM koja će posebno biti obrađena ovim radom.

#### 4. NOVA AUSTRIJSKA METODA -NATM

NATM je razvijena na iskustvima primjene starih metoda, a razvili su je austrijski stručnjaci za tunele, von Rabcewicz, Muller, Pacher. Ključna stvar je bila formulacija da se novo ravnotežno stanje dostiže fleksibilnom primarnom podgradom, kontrolira se terenskim opažanjima.

Od 1948. do 1963. NATM je kroz teorijske studije i kroz stalna praktična iskustva sve više sazrijevala te je sve više bila korištena, a njezini principi su ostali isti [3].

Prvi veliki tunel izgrađen u potpunosti prema principima Nove austrijske metode bio je u razdoblju od 1956 do 1958 u Venezueli, dok je prva primjena ove metode u mekoj sredini urbanog područja bila 1968. u Frankfurtu na Majni i bila je uspješna [3].

Kao i kod svakog noviteta NATM je naišla na brojne skeptike koji nisu vjerovali da se tanka podgrada od mlaznog betona i sidra može suprotstaviti opterećenju stijenske mase, što jasno ukazuje na manjak znanja kod tadašnjih inženjera [3].

Ono što NATM ne može je opisati se shemom iskopa i stalnim podgradnim sustavom kao i metode kojoj su joj prethodile jer sama metoda nije vezana za proceduru iskopa i podgrađivanje već s principima opažanja [3].

Za razliku od uobičajenog pristupa projektiranju koje podrazumijeva gotov projekt prije samog početka izgradnje i jasan proračun koji nije namijenjen nikakvim promjenama već se provodi za najnepovoljnije uvjete koji se pojavljuju u tlu ili stijeni kod metode opažanja izgradnja započinje s inicijalnim projektom koji se temelji na uvjetima u tlu su vrlo optimistični, a sam proces projektiranja se nastavlja tokom izgradnje. Projekt je pogodan promjenama i prilagođavanju [3].

Smanjivanje pojavljivanja jednoosnog ili dvoosnog stanja naprezanja u stijenskoj masi i zadržavanje višeosnog ili troosnog naprezanja u svakom koraku izgradnje je cilj NATM-a [6].

#### 4.1.Osnovna načela tunelogradnje prema NATM-u

Ono što NATM ne može je opisati se shemom iskopa i stalnim podgradnim sustavom kao i metode kojoj su joj prethodile jer sama metoda nije vezana za proceduru iskopa i podgrađivanje već s principima opažanja [3].

NATM se može okarakterizirati kao filozofija tunelogradnje gdje tlo ili stijena u okolici podzemnog otvora postaju dio nosive konstrukcije aktivacijom nosivog prstena. Jednostavnije rečeno, stijena ili tlo sudjeluju u preuzimanju naprezanja skupa sa primarnom podgradom i na taj način skupa čine stabilnu konstrukciju. Bitno je promatrati stijensku masu kao dio nosivog elementa podgrade, a ekonomična primarna podgrada joj omogućuje da se malo deformira [3,6].

Jako je bitno dobro istražiti i prikupiti potrebne podatke o materijalu u kojem će se vršiti izgradnja i na temelju toga izraditi projekte za svaku vrstu materijala na koji se naišlo tijekom istraživanja te se nakon što je izgradnja započela uvjeti koji su prisutni kod iskopa se uspoređuju sa onim uvjetima za koje je projekt izrađen. Slijedi promatranje ponašanje materijala tijekom iskopa i prihvaćanje odnosno ne prihvaćanje deformacija i pomaka do kojih dolazi tijekom procesa. Ukoliko se ustanovi da deformacije i pomaci koje se dešavaju nisu prihvatljive te da podgrada nije zadovoljavajuća odmah dolazi do promjene načina izvođenja radova [6].

Bitno je naglasiti da kod NATM sustav podgrade nije samo konstrukcija već je to i proces koji traje u vremenu [8].

Imperativ je na stvaranju sigurne podzemne šupljine, a to osigurava konstrukcija podgradnog sustava koja stijensku masu oko izbijenog otvora tunela pretvara u samonosivu konstrukciju. Ujedno je potreban višefazni iskop kod iskopa u slabijem materijalu duž trase tunela. Više fazni iskop se provodi na način da se razrade profili na kalotni dio, srednji dio, donji prokop i bočni prokop u ovisnosti o raspoloživoj tehnologiji i tehnici te o geološkim uvjetima u kojima se iskop vrši [8].

Nova austrijska metoda je opisana s 22 principa, a njih je moguće grupirati u 5 osnovnih grupa:

- ❖ Stijenska masa je osnovna komponenta nosivosti
- ❖ Čvrstoća stijenske mase mora biti održana (razrahljenja nisu poželjna)
- ❖ Zaobljeni poprečni profil ( izbjegavanje koncentracije naprezanja)
- ❖ Tanki i fleksibilni podgradi
- ❖ In situ mjerenja [4]

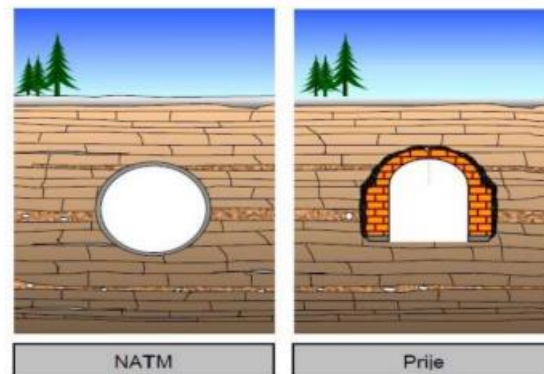
Načela NATM-a su ujedno i temeljna načela suvremenog načina izgradnje tunela.

#### *4.1.1. Osnovni principi*

Suradnja Rabczewicza, Pachera i Mullera, koji se ujedno smatraju i očevima ove metode, rezultirala je donošenjem tih 22 principa koji će biti prikazani u nastavku [3].

### **1. Stijenska masa je glavna nosiva komponenta tunela**

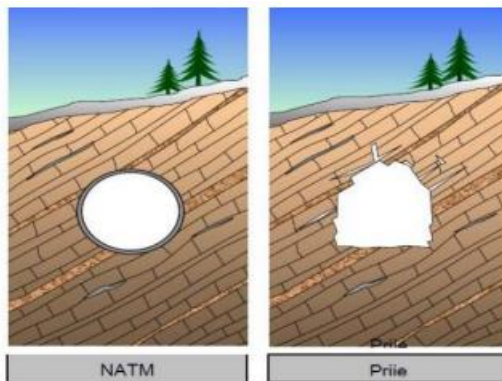
Primarna i sekundarna podgrada služe za uspostavljanje nosivog prstena u stijenskoj masi (slika 14)[3].



*Slika 14: Stijenska masa kao glavna nosiva komponenta tunela[8]*

## 2. Održavanje prvobitne čvrstoće stijenske mase

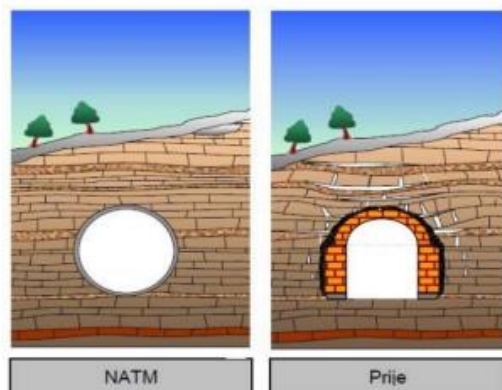
Potrebno je sačuvati originalnu čvrstoću stijenske mase jer je ona glavni nosivi element tunela (slika 15)[3].



Slika 15: održavanje čvrstoće stijenske mase [8]

## 3. Razrahljenje stijenske mase je potrebno izbjegavati

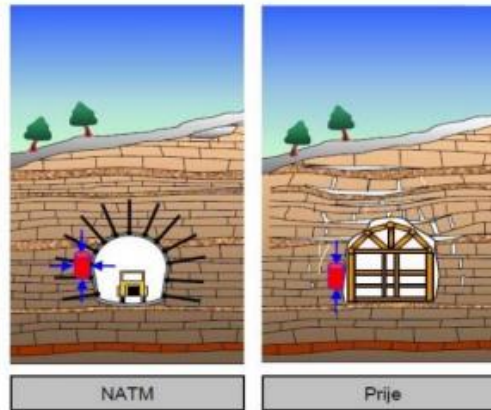
Niža čvrstoća tla, do koje dolazi jer je razrahljenje stijenske mase rezultiralo gubitkom čvrstoće stijenske mase, uzrokuje jače opterećenje podgrade (slika 16)[3].



Slika 16: izbjegavanje razrahljenja stijenske mase [8]

#### 4. Potrebno spriječiti jednoosno i dvoosno stanje naprezanja

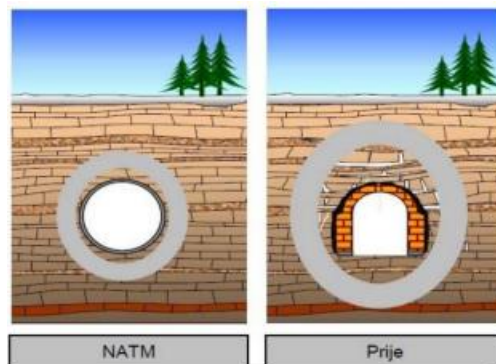
Stijena u okolini iskopa mora biti u troosnom stanju naprezanja iz razloga jer joj je čvrstoća u tom stanju, a ne u jednoosnom ili dvoosnom (slika 17) [8].



Slika 17: Kontrola deformacije stijenske mase [8]

#### 5. Kontrola deformacija stijenske mase

Bitno je deformacije stijenske mase u okolini tunela kontrolirati, a ne sprječavati. Pomacima konture iskopa prema otvoru mobilizira se zaštitni prsten i onemogućuje se gubitak čvrstoće odnosno spriječeno je razrahljenje. Bolja kontrola deformacija znači veća sigurnost i ekonomičnost građenja (slika 18)[3,12].

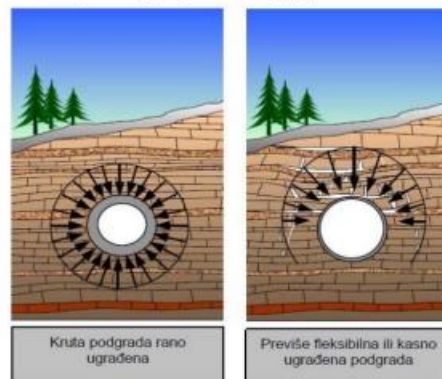


Slika 18: Kontrola deformacije stijenske mase[8]



## 6. Pravovremeno ugrađena podgrada

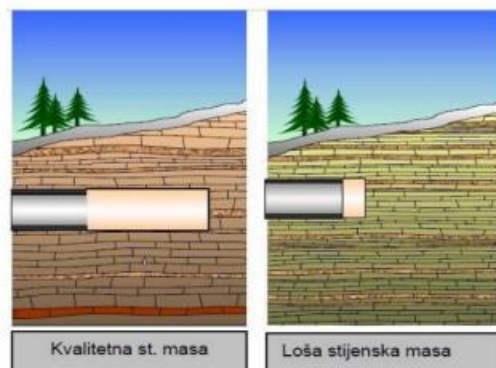
Podgradu se ne smije ugraditi ni prerano niti prekasno te ne smije biti ni previše kruta ni previše fleksibilna. Ukoliko se podgrada ugradi previše rano i pritom je kruta doći će do visokih napreznja. S druge strane kasno ugrađena ili previše fleksibilna podgrada dovest će do razrahljenja stijenske mase radi kojeg će doći do visokih napreznja na podgradi (slika 19)[3,12].



Slika 19: Pravovremeno ugrađena podgrada [8]

## 7. Točna procjena vremenskog čimbenika

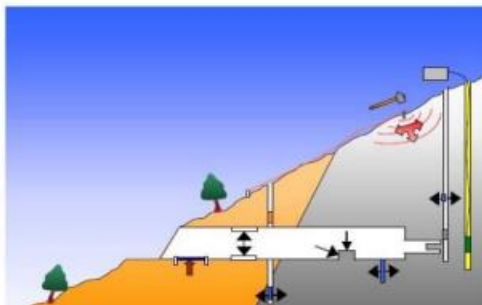
Bitan faktor ukoliko želimo pravovremeno ugraditi podgradu. Kod stijenske mase visok kvalitete tunel može neko vrijeme biti nepodgrađen dok kod loše kvalitete materijala nije slučaj te je potrebno odmah podgraditi (slika 20)[3].



Slika 20: Ovisnost kvalitete stijenske mase i podgrađivanja [8]

## 8. Rezultati laboratorijskih i terenskih ispitivanja i opažanja

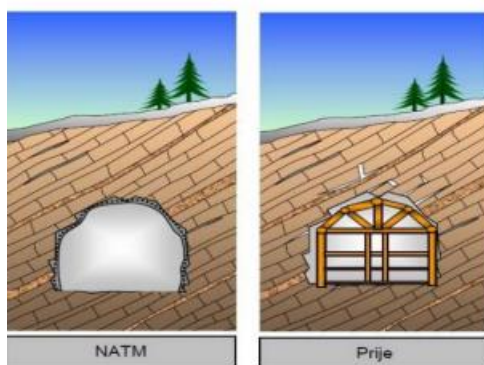
Za procjenu vremenskog čimbenika potrebna su prethodna laboratorijska ispitivanja i in situ mjerenja pomaka u tunelu (slika 21)[3,12].



Slika 21: Laboratorijska i in situ ispitivanja i promatranja [8]

## 9. Zamjena drvene podgrade mlaznim betonom

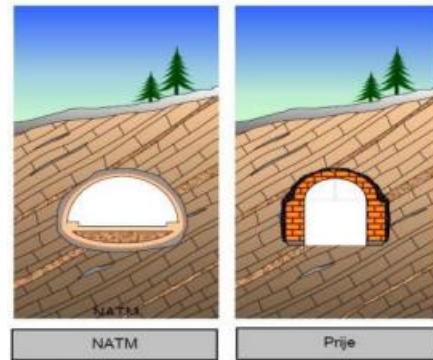
Mlazni beton je koristan kod sprječavanja većih deformacija i razrahljenja stijenske mase također sprječava ispadanje blokova stijene i pojavu progresivnog sloma (slika 22)[3,12].



Slika 22: upotreba mlaznog betona [8]

## 10. Tankostijena primarna i sekundarna podgrada

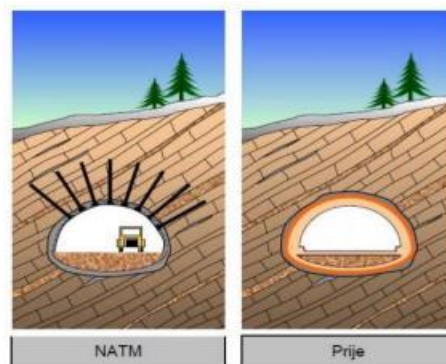
Tankostijena podgrada je savitljiva pa se izbjegavaju pojave većih momenata (slika 23)[3].



Slika 23: upotreba tankostijene podgrade [8]

## 11. Pojačanje podgrade

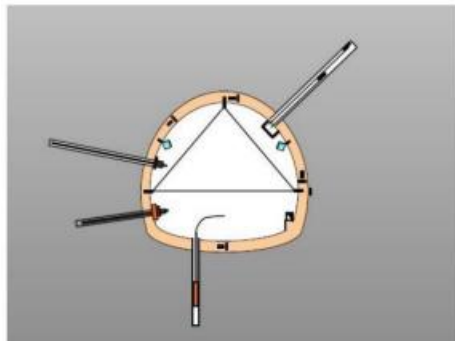
Rješenje problema stabilnosti može se riješiti pojačanjem podgrade nikako podebljanjem. Podgrada se pojačava armaturnim mrežama, tunelskim lukovima ili sidrima (slika 24)[3].



Slika 24: Pojačanje podgrade [8]

## 12. Vrijeme i način ugradnje sekundarne podgrade

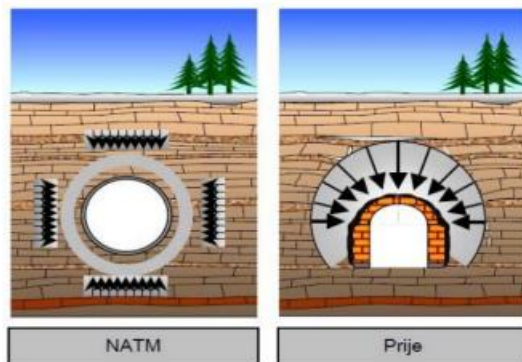
Vrijeme i način ugradnje određuje se prema rezultatima mjerenja pomaka prema rezultatima mjerenja (Slika 25) [3].



Slika 25: Mjerenje pomaka konture tunela [8]

## 13. Statičko razmatranje tunela

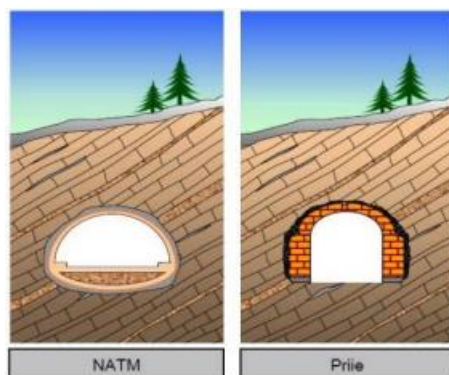
Statički se tunel razmatra kao cijev, koja se sastoji od nosivog prstena masiva i podgrade. (slika 26)[3].



Slika 26: Statičko razmatranje tunela [8]

## 14. Zatvaranje prstena

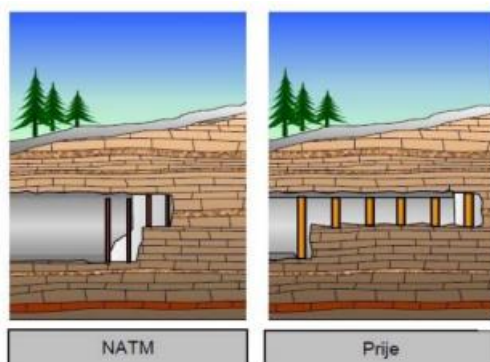
Zatvaranje prstena - pravovremeno zatvaranje prstena bitno utječe na tunnel kao statičku cijev (slika 27)[3].



Slika 27: Zatvaranje prstena tunela[8]

## 15. Pravovremeno zatvaranje podgradnog prstena

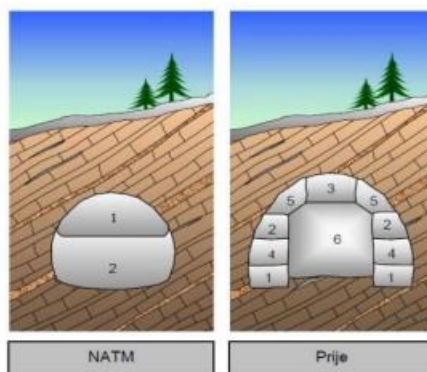
Ako se podgradni prsten izvodi u etapama potrebno vrijeme između ugradnje prve i posljednje faze treba biti čim kraće. Prostor koji je dugo otvoren ima posljedice vezane uz velika naprezanja u već ugrađenim dijelovima prstena (slika 28)[3].



Slika 28: Pravovremeno zatvaranje prstena smanjuje nepoželjno savijanje u smjeru osi tunela [8]

## 16. Istovremeno kopanje cijelog profila tunela

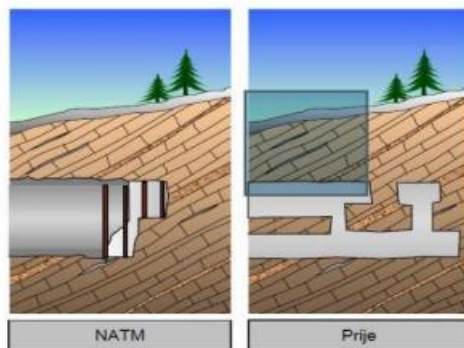
Kopanje punog profila tunela istovremeno ima prednost nad pojedinačnim kopanjem jer se smanjuju oštećenja na stijenskoj masi i komplikacije pri izvedbi su svedene na minimum. Nije poželjno kopanje s vremenskim pomakom jer dolazi do promjene napreznja u okolici iskopa, ali u teškim geotehničkim uvjetima to može biti jedina opcija (slika 29)[3,12].



Slika 29: Napredovanje u punom profilu [8]

## 17. Sigurnost građevine

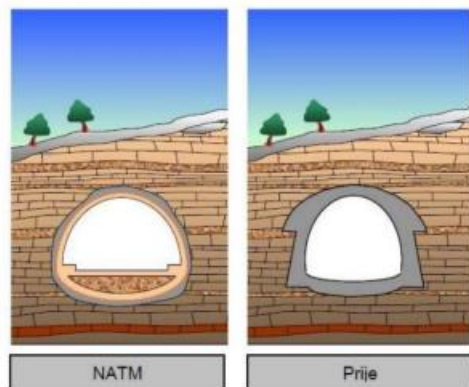
Način na koji se napreduje presudan je za sigurnost građevine. Procesom stabilizacije stijenska masa – podgrada upravlja se mijenjanjem dužine napredovanja, vremena podgrađivanja, zatvaranja nosivog prstena, dužine kalote i stijenskog pritiska (slika 30)[3,12].



Slika 30: Stabilizacija veze stijenska masa – podgrada [8]

## 18. Zaobljeni poprečni profil tunela

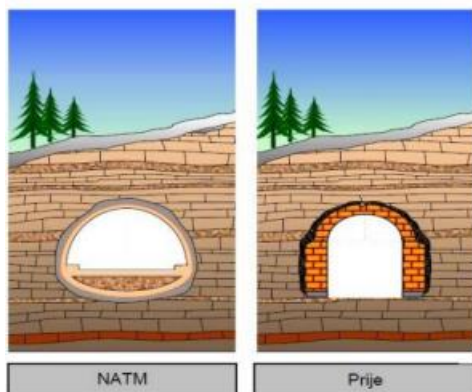
Kako bi se spriječila koncentracija naprezanja koja ne pogoduje stabilnosti stijenske mase već ju i razara potrebno je izbjegavati nastanak kutova i težiti poprečnom profilu koji je zaobljen (slika31)[3,12].



Slika 31: Zaobljeni poprečni profil [8]

## 19. Tanki sekundarna obloga

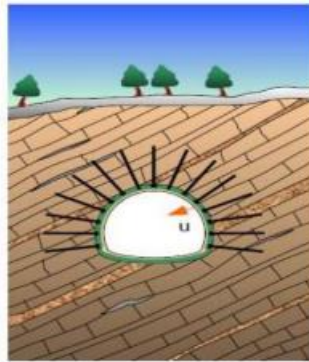
Sekundarna obloga ima ulogu u hidrodinamici podzemnog iskopa. Te je poželjno da ona bude tanka za bolju učinkovitost. (slika 32)[3].



Slika 32: Izvedba tanke sekundarne obloge[8]

## 20. Stabilizacija stijenske mase

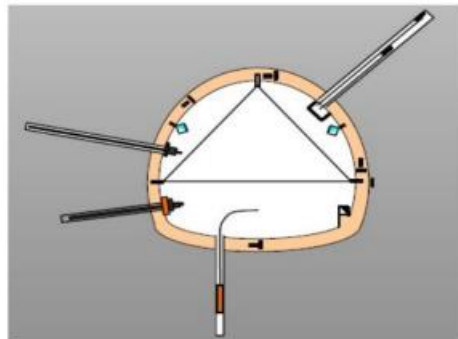
Primarnom podgradom stijenska masa mora imati značajnu stabilnost jer se sekundarna podgrada koristi samo za povećanje te stabilnosti. Sidra, armirani ili nearmirani mlazni beton, čelični lukovi, cijevni kišobran i sl. čine primarnu podgradu. Sekundarna podgrada načinjena je od betonske obloge tunela koju je moguće armirati, a između ove dvije podgrade ugrađuje se hidroizolacija (slika 33)[3].



Slika 33: Stabilizacija stijenske mase [8]

## 21. Dimenzioniranje i kontrola stabilnosti primarne i sekundarne podgrade

Opažanjem i eksploatacijom tunela provodi se dimenzioniranje i kontrola stabilnosti podgrade. Način provođenja obuhvaća mjerenja naprezanja u sekundarnoj podgradi i mlaznom betonu, mjerenja na kontaktu stijenske mase s mlaznim betonom te pomake konture iskopa tunela i pomake unutar stijenske mase (slika 34)[3].

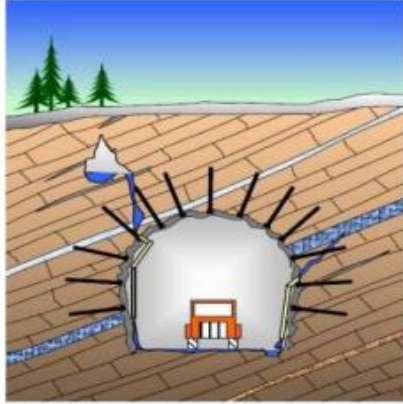


Slika 34: Kontrola stabilnosti primarne i sekundarne podgrade[8]



## 22. Izvedba drenaže

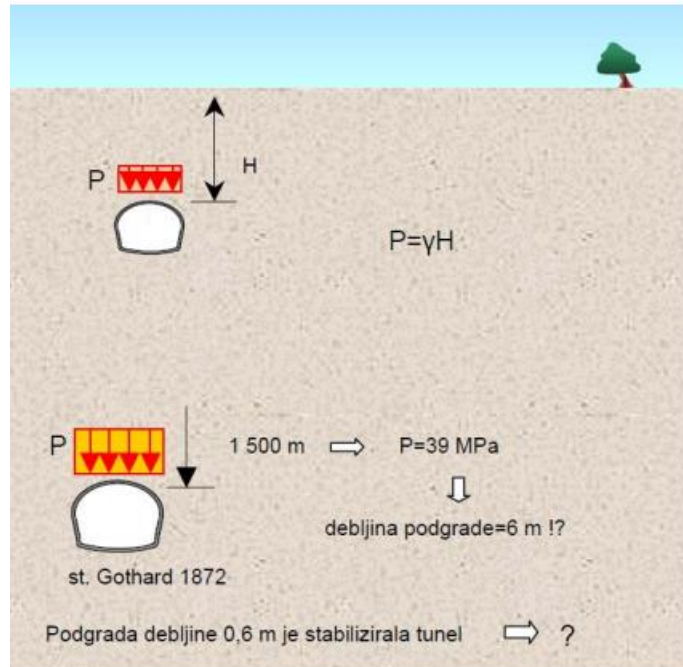
Hidrostatski tlak i strujanje vode dodatno opterećuju podgradu iz tog razloga je stijensku masu potrebno drenirati što će vodi omogućiti dotok vode u tunel, a nikako nije poželjno te izvore na konturi tunela blokirati jer takvo rješenje može eskalirati u veći problem (slika 35)[3].



*Slika 35: Drenaža izvedena u tunelu[8]*

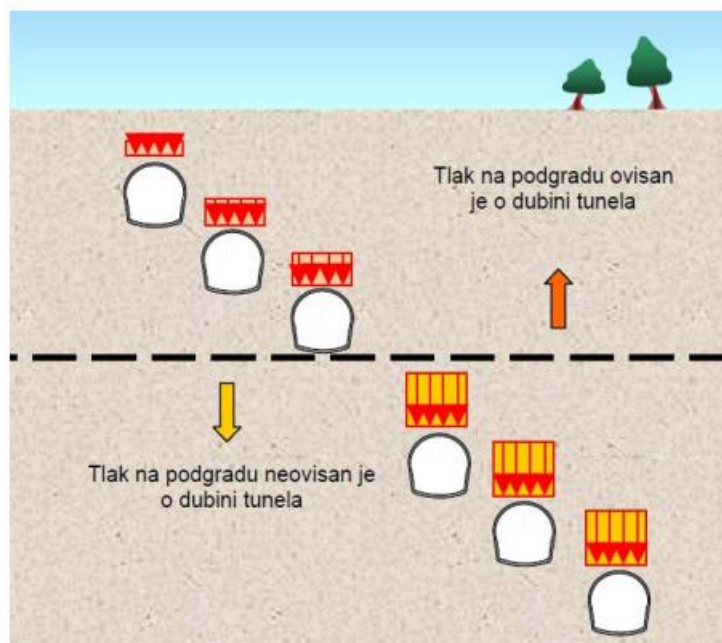
### 4.1.2. Nosivi prsten

Zaštitnu zonu oko tunela odnosno tako zvani nosivi prsten teško je definirati i upravo je to bio razlog njegovog promatranja kroz različite hipoteze. Heimov je dao hipotezu prema kojoj tlak na podgradu linearno s dubinom tunela, no to bi značilo da bi za izvedbu stabilizacije tunela na velikoj dubini bila potrebna hipoteza od nekoliko metara što se u praksi nije pokazalo kao istinito (Slika 36)[3,13].



Slika 36: Heimova hipoteza[13]

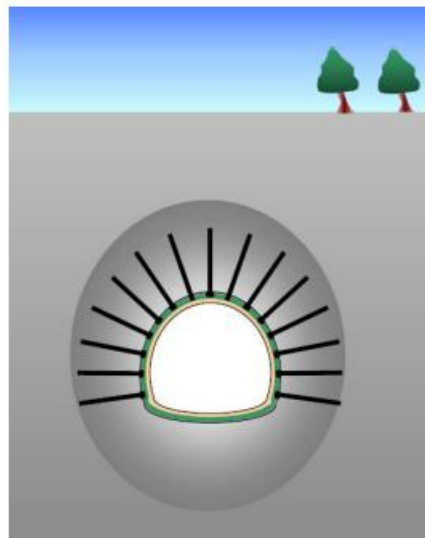
1879. godine Ritter je primijetio da nakon što se prođe određena dubina utjecaj mase gornjih naslaga postaje zanemariv ili je puno manji na opterećenje stijenske mase koja djeluje na podgradu tunela (slika 37)[3,14].



Slika 37: Pritisak na podgradu nakon neke dubine postaje zanemariv [10]

Engesser nakon tri godine definira lučno djelovanje iznad podzemne prostorije u tlu bez kohezije što je jasno definiralo vezu deformacija stijenske mase s pritiskom na podgradu. O zaštitnoj zoni oko tunela govori Wiesman koji tvrdi da stijenska masa preuzima opterećenja koja je trpila iskopana stijena te da podgrada ne bi trebala biti dimenzionirana na način da preuzima na sebe sva naprezanja izazvana iskopom već da ta naprezanja preuzima na sebe zaštitna zona, zona u kojoj je došlo do preraspodjele naprezanja. Mohr i Maillart također govore o povezanosti deformacija stijenske mase i pritiska na podgradu kao i o zaštitnim zonama [3,15,16,17].

No, nakon svih navedenih hipoteza onu najjasniju, a pritom i najjednostavniju definiciju nosivog prstena kao je Golser 1996. godine. On je rekao da je nosivi prsten zona u okolici tunela u kojoj je došlo do značajne preraspodjele naprezanja. Zona nosivog prstena uključuje zone elastičnog i plastičnog ponašanje te armirane zone, a širi se od periferije iskopa kako je prikazano slikom 38, [3,19].



*Slika 38: Golserova definicija nosivog prstena [19]*

## 5. IZVEDBA TUNELA PRIMJENOM NATM-a

NATM je primjenjiv u izvedbi u tlu i u stijeni koje imaju jednoosnu tlačnu čvrstoću (UCS) do 40MPa i za presjeke tunela do 60 m<sup>2</sup> ili više. Napredovanja u tunelu u smislu iskopa tunela vrše se bušenjem ili miniranjem [1].

Tijekom iskopa promatra se i mjeri ponašanje okolne stijene koja se promatra kao nosivi dio podgrade, a promjene se primjećuju u obliku deformacija i tlakova podgrade [7].

Iskop i podgrađivanje se provodi u fazama, dijelovima koje je moguće kontrolirati kako ne bi došlo do neželjenih djelovanja i situacija. Zato svaki dio koje se iskopa potrebno je osigurati prije početka iskopa sljedećeg dijela. Kako napredovati s iskopom u tunelu raspoređeno je prostorno i vremenske na kalotu, središnji dio i podnožni svod [4].

Koraci koji se slijede tijekom izvedbe tunela prema NATM-u:

- ❖ Iskop
- ❖ Stabilizacija dijela iskopa ako je potrebno
- ❖ Materijal se odvozi
- ❖ Lučni nosači se postavljaju zajedno s prvim slojem mrežne armature, a zatim se nanosi mlazni beton
- ❖ Drugi sloj podgrade u obliku sidra i novi sloj mlaznog betona
- ❖ Dodatna sidra
- ❖ Sekundarna podgrada

Izvedba drugog sloja podgrade u obliku sidra ili kasnija ugradnja dodatnih sidara je dana kao mogućnost bolje i veće stabilizacije nije nužno provoditi za svaki iskop. Bitno je dobro procijeniti uvijete u tlu tijekom iskopa te sukladno tome donijeti odluke o potrebnoj stabilizaciji [4].

Za podgrađivanje prilikom izvedbe tunela koriste se stijenska sidra i mlazni beton, a sve ovisi o kategoriji iskopa i armaturnim mrežama. Kad mlazni beton ne dobije određenu čvrstoću da bi se osigurao pravilan oblik koriste se čelični lukovi kao privremena obloga [10].

Da je NATM dobra metoda najbolje potvrđuje mehanika stijena tunela koja ima oblogu izvedenu prema staroj i novoj metodi te njihovom usporedbom može se uočiti da kod stare metode prilikom izvedbe dolazi do razrahljenja stijena i pukotina odnosno popuštanjem različitih dijelova podgrade. S druge strane kod nove metode podgradni sustav izveden od mlaznog betona na stijenu skupa sa odgovarajućim sidrima nakon miniranja, uspješno smanjuje tlakove u stijeni te njezino razrahljenje, a sama stijena se pretvara u samonosivi luk [10].

### **5.1.Primarna podgrada**

Opis procedure i materijala koji se koriste kako bi se poboljšala stabilnost stijenske mase ili održavanje samonosivosti stijenske mase u okolini podzemnog iskopa naziva se podgradom. Primarna uloga podgrade je aktivacija nosivog prstena odnosno poboljšanje čvrstoće stijenske mase i inicijativa da ona postane samonosiva [3].

Primarna podgrada se ugrađuje neposredno nakon iskopa cijelog ili dijela profila tunela da bi osigurala stabilnost poduprte stijene ili tla tijekom napredovanja iskopa. Što će se koristiti u svrhu stabilizacije određuju uvjeti u kojima se ona izvodi, konkretno rečeno podaci o ravninama diskontinuiteta, njihovoj orijentaciji, ispuni, pojavljivanju podzemne vode te dimenzijama blokova omogućuju određivanje rasporeda i dimenzija podgradnih elemenata. Ukoliko se podgrađivanje izvodi u teškim geološkim uvjetima koriste se i armirane mreže, rešetkasti čelični lukovi ili neki od posebnih načina, npr. cijevni krov, zaštita kalote [10].

Sve se vrti oko stabilizacije okolnog prostora iskopa, a to podrazumijeva kombiniranu primjenu armiranja i podupiranja stijenske mase u svrhu postizanja ravnoteže. Razlika između armiranja i podupiranja je u tome što se kod armiranja stijenske mase inženjerski elementi ugrađuju u stijensku masu, a kod podupiranja se ugrađuju unutar iskopa. Armirati je potrebno do kontinuirane stijene,

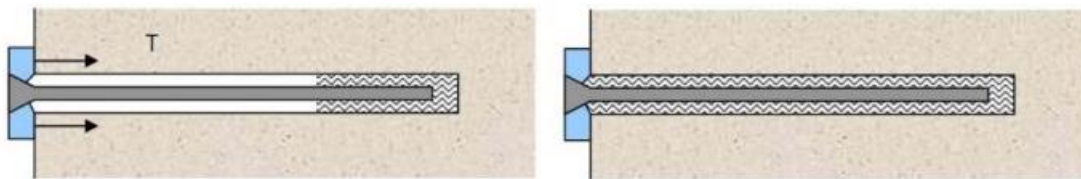
a ne samo njezine diskontinuitete jer se na taj način popravljaju sveukupna svojstva stijene što rezultira i boljim ponašanjem u okolini iskopa [4].

Konstruktivni elementi:

- ❖ Stijenska sidra (aktivna ili pasivna)
- ❖ Kablovi
- ❖ Armirani mlazni beton
- ❖ Čelični lukovi
- ❖ Cijevni kišobran

### 5.1.1. Sidra

Stijensko sidro se koristi da bi se poboljšale karakteristike stijene oko iskopa i jedan je od elemenata za armiranje. Sastoji se od punog ili cijevnog čeličnog profila koji se ugrađuje sa ili bez prednaprezanja u stijensku masu. Često se koriste jer im je spektar primjene širok, za gotovo sve terenske uvjete osim onih u ekstremno slabom i mekom tlu. Moguće ih je klasificirati s obzirom na to dali se prilikom ugradnje prednapinju pa se nazivaju još i aktivna ili se ne prednapinju pa se nazivaju pasivnim stijenskim sidrima kako prikazuje slika 39 [4].



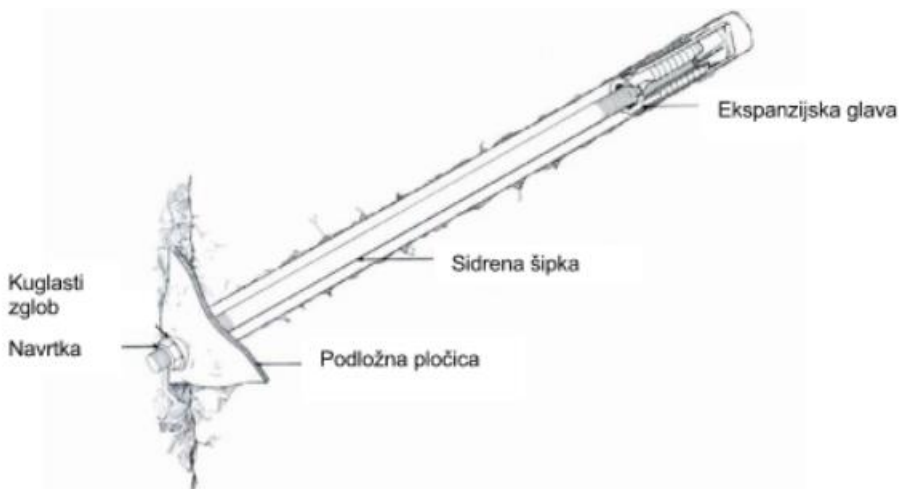
Slika 39: Aktivno(lijevo) i pasivno (desno) sidro[4]

Štapna sidra osiguravaju stabilnost iskopa, a opterećenje se prenosi preko dijelova konstrukcije sidra izvan stijenske mase i preko vanjskih sila prelazi na stijensku masu. Ona dodatno mobiliziraju i ojačavaju čvrstoću stijenske mase [10].

Za postizanje optimalnog podgradnog sustava za stabilizaciju stijenske mase najbolje se pokazala kombinacija štapnih sidra i mreža i/ili mlazni beton ojačan mrežom. Velika prednost ovih sidra je

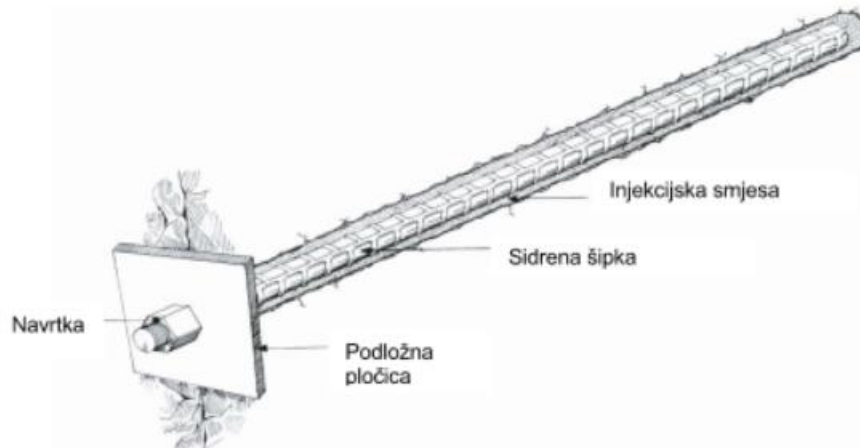
njena moguća upotreba za bilo koju geometriju iskopa, mala cijena, jednostavna, a brza. Čine ju ravne čelične šipke punog ili šupljeg profila koje s jedne strane se sidre u stijenu, a s druge postoji pločica i matica. Razlikuju se mehanički usidrena štapna sidra, injektirana štapna sidra i pletena sidra od čeličnih niti, trenjem usidrenih štapna sidra [3].

Sidra s mehaničkim usidrenjem odnosno s ekspanzijskom glavom koja se konusno širi rotacijom sidra te dolazi do utiskivanja elementa glave u zid bušotine su najčešći oblik štapnih sidra. (Slika 40) Razlog česte uporabe ovih sidara je što su jeftina, kreću djelovati odmah nakon ugradnje i područje djelovanja im je srednje tvrda i tvrda stijenska masa. Mana ovih sidara je što se ne mogu koristiti u jako tvrdoj stijeni te ukoliko se koriste kao trajno rješenje armiranja moraju biti nakon ugradnje injektirana radi zaštite od korozije [3].

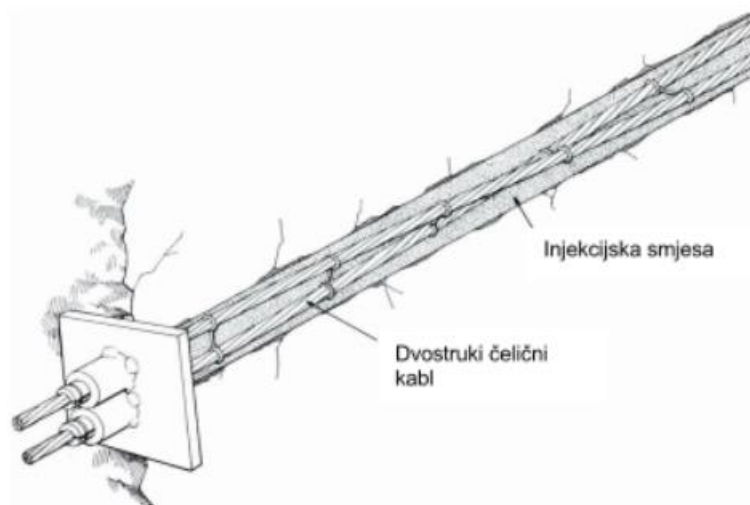


Slika 40: sidro s mehaničkim usidrenjem [3]

Slijedeći tip sidra su injektirana štapna sidra (slika 41) i pletena sidra od čeličnih niti (slika 42) koji se ugrađuju u bušotine ispunjene cementnom smjesom ili smjesom od umjetnih smola, a koriste se kao trajno ojačanje stijenske mase. Ono što je potrebno izvesti kod injektiranog sidra je u bušotinu prije postavljanja sidra staviti injekcijsku smjesu, a zatim sidro utisnuti pneumatskim čekićem. Nedostaci ovih sidara je što se potpuna nosivost postiže tek kroz par dana [3].



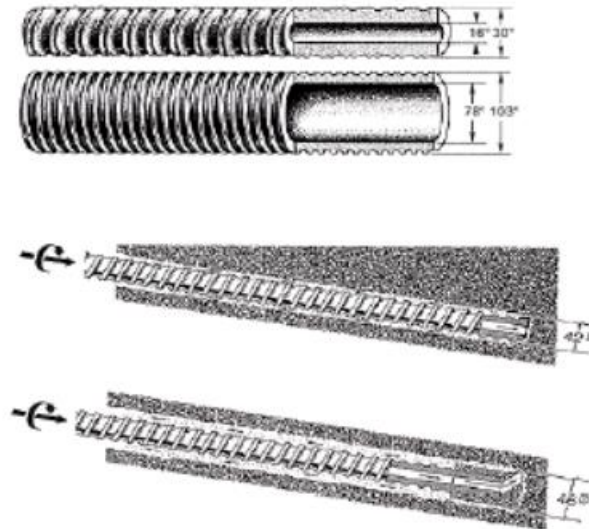
Slika 41: Injektirano sidro [3]



Slika 42: Injektirani kabl [3]

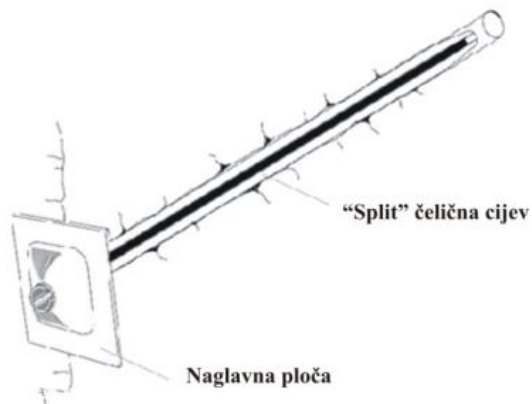
Samobušiva injektirana sidra su ujedno i sidrena šipka i bušeća šipka, a funkcioniraju na način da po završetku bušenja kroz sidrenu šipku se izvrši injektiranje prostora između šipke i stijenke bušotine. Kod ovih sidra umjesto bušeće šipke koriste se elementi samobušivog sidra koji se proizvode u sekcijama i po potrebi nastavljaju spojnica. Svoju upotrebu su pronašla u jako oštećenim stijenskim masama.(slika 43)[3].





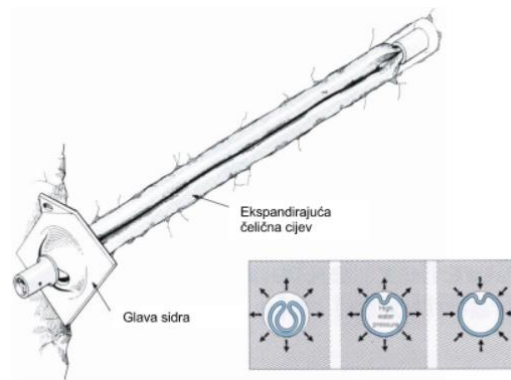
Slika 43: Samobušivo sidro [3]

Najnovija dostignuća korištena u svrhu ojačanja stijenske mase su trenjem usidrena štapna sidra. Dvije su vrste ovakvih sidara, Split Set sidra (slika 44) i Swellex sidra (slika 45) i obje djeluju na način da se opterećenje ostvaruje trenjem uslijed radijalne sile koja djeluje na zidove bušotine. Split Set metoda ugradnje mehanički utiskuje sidra u bušotinu dok je promjer cijevi sidra veći od promjera bušotine. Slično kao i kod sidra s mehaničkim usidrenjem ne mogu se koristiti kao trajna sidra bez posebne antikorozivne zaštite [10].



Slika 44: Split Set sidro [3]

Swellex sidro nosi trenjem i uklještenjem u zidove bušotine ( slika 45). princip rada je da se ugrađena cijev proširuje i to hidrauličkim pritiskom unutar cijevi. Prednosti ove metode su to da je ugradnja toliko jednostavna, djeluju odmah nakon ugradnje, korisna je u različitim stijenskim masama . s duge strane sidra su relativno skupa, potrebno ih je zaštititi od korozije [3].



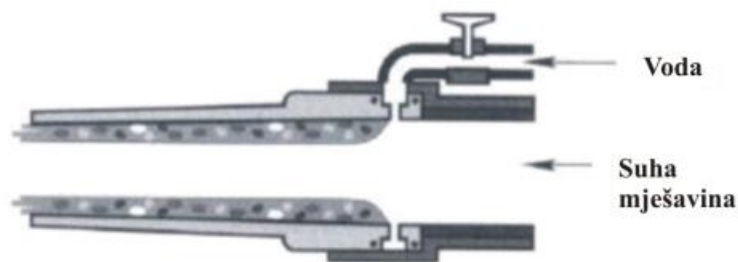
Slika 45: Swellex sidro

### 5.1.2. Mlazni beton

Uloga mlaznog betona je prijenos točkastog opterećenja sidara na širu površinu stijenske mase. Cement, pijesak i sitni agregat se ugrađuju pod pritiskom i dinamički zbijaju uslijed velikih brzina nabacivanja na podlogu. Takav beton može biti i u većini slučajeva i je dio podgradnog sustava [4].

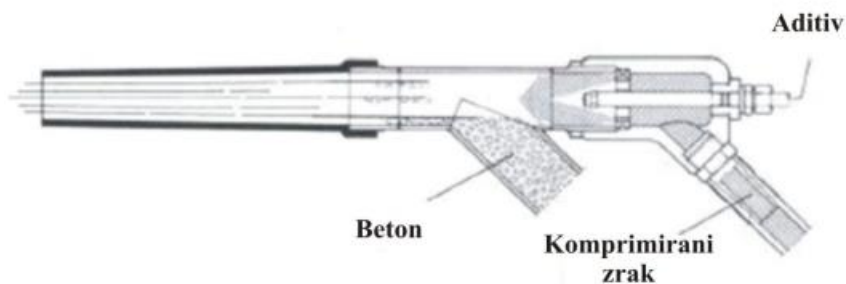
Primjenjuju se dva različita postupka izvedbe mlaznog betona , a to su upravo suhi (slika 46) i mokri postupak (slika 47) [4].

Kod procesa suhog nabacivanja voda i aditivi se dodaju tek prije samog izlaska iz mlaznice. Strojevi za suho nabacivanje rade na principu da suhi sastojak se ubacuje u lijevak stroja iz kojeg se uz pomoć cijevi s komprimiranim zrakom smjesta istiskuje i vodi do vrha cijevi gdje se netom prije izlaska doda voda i ubrzivač vezivanja [7].



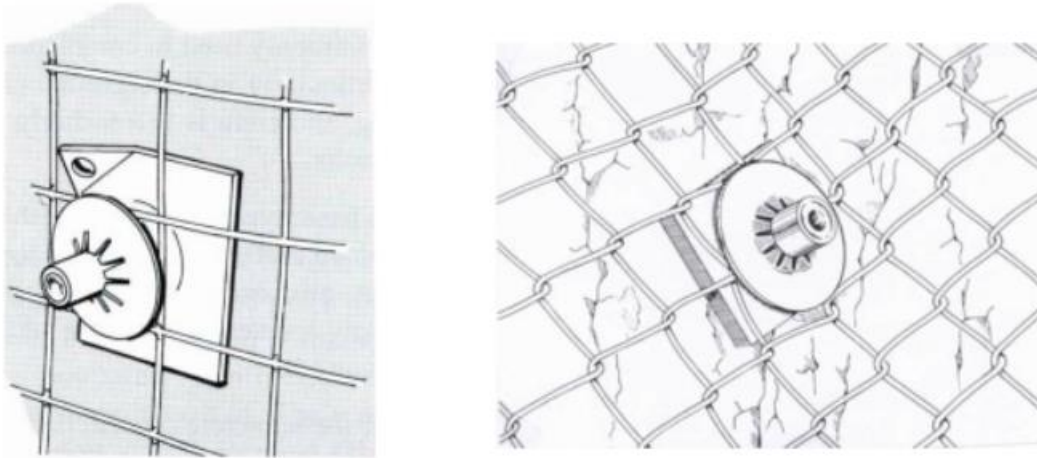
Slika 46: Suhi postupak [3]

Mokri postupak nešto je drugačiji te se može reci da je bolji i efikasniji odabir od suhog postupka. U ovom postupku u sam stroj se ubacuje već gotova i spremna smjesa koja se preko mlaznica nanosi na potrebno područje. U stroju su dva rotora od kojih jedan utiskuje gotovu smjesu u cijev, a drugi omogućava da smjesa putuje kroz cijev, na vrhu se nalazi mlaznica kojom se strojno manipulira rukom koja je ugrađena na vozilo za nabacivanje. Ovaj način nabacivanja mlaznog betona sa daljine je neusporedivo sigurnije i efikasnije [7].



Slika 47: Mokri postupak [3]

Podgrada tunelskih otvora mora biti duktilna kako bi podnijela deformacije otvora. Kad se govori o mlaznom nearmiranom betonu zaključak je da je on krh i da za posljedicu ima krh lom. Iz tog razloga da ne bi došlo do krhoga loma podgrade i poboljšala se prilagodljivost potrebno ga je armirati. Mlazni beton se armira varenim čeličnim mrežama i žičanim pletivom (slika 48)[10].



*Slika 48: Varena čelična mreža i žičano pletivo [3]*

### **5.1.3. Čelični lukovi**

Primjena čeličnih lukova je u teškim geotehničkim uvjetima kada je potrebno postići veliku nosivost podgrade. Luk se sastoji od segmenata povezanih bravama u cjeloviti luk koji prati konturu iskopa tunela. Razlikuju se dva načina izvedbe, kao čelični nosači različitih poprečnih presjeka ili kao rešetkasti čelični lukovi. Kod većih tunela puni čelični profili ne smatraju se elementom podgrade već se zbog svoje vitkosti smatraju jednim elementom u sustavu koji čine: armirani mlazni beton i sidra. Rešetkasti čelični lukovi ispunjeni mlaznim betonom imaju veću nosivost od čeličnih lukova punog profila jer im je poprečni presjek veći [3].

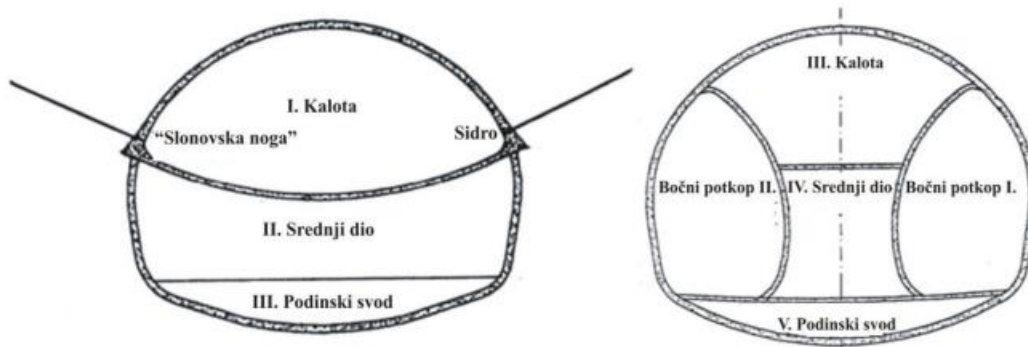
## **5.2. Poprečni presjeci**

Sloboda pri mijenjaju poprečnih profila, brzina mobilizacije konstrukcije i jednostavnost u preklapanju podzemnih prostorija su najvažnije prednosti NATM-a i razlog zašto je ova metoda toliko u upotrebi. Ono što se prijemnom NATM-a može je promijeniti oblik poprečnog presjeka ili njegovu veličinu i uz to se prilagoditi posebnim zahtjevima [7].

NATM omogućava da se u čvrstoj stijeni može otvoriti cijelo čelo tunela sve to radi dobro planiranja i opažanja. Radi održavanja sigurnosti i optimizacije podgrađivanja, miniranja i bušenja,

iskopi se mogu provoditi u nekoliko faza ili u punom profilu. Kakav će biti iskop ovisi o geotehničkim i geološkim uvjetima na terenu te koliko se često oni mijenjaju. Ukoliko dolazi do čestih promjena po dužini trase tunela uvjetuje se primjena višefaznog iskopa tunela. Ako je tlo ili stijena slabih karakteristika srednji dio i podni svod potrebno je izvesti na razmaku ne većem od jednog tunelskog promjera radi bržeg zatvaranja podgradnog prstena i kako bi se novo stanje ravnoteže što prije uspostavilo i spriječila pojava većih konvergencija [7].

Najprimjenjivaniji načini višefaznog iskopa su iskop u tri faze i iskop u pet faza kako je prikazano i na slici 49. Kod iskopa u tri faze imalo iskop kalote, srednjeg dijela pa zatim slijedi iskop podnožni svoda što se razlikuje od iskopa u pet faza kod kojeg započinje iskop lijevim bočnim prokopom, zatim desnim bočnim prokopom nakon čega slijedi kalota, srednji dio i podnožni svod [8].



Slika 49: Iskop u tri faze (lijevo) i iskop u pet faza (desno)[8]

Prisutan je i često zastupljen i iskop u dvije faze gdje se prvo izvodi kalota, a potom srednji dio tunela kako je prikazano na slici 50 [4].



*Slika 50: Iskop u dvije faze [4]*

Prema standardu postavljenom od strane Nove austrijske metode za tunelogradnju, stabilnost nepodgrađenog iskopa definira se kao vrijeme u kojem je nepokrivena površina stijene stabilna bez podgrade. Upravo je vrijeme stabilnosti nepodgrađenog raspona i mjerodavni kriterij za procjenu stabilnosti. Faktori koji utječu na vrijeme su: kvaliteta stijene, veličina poprečnog presjeka i dužina napredovanja po ciklusu [10].

Standard za kategorizaciju i klasifikaciju stijene opisuje stabilnosti, gubitak čvrstoće i deformaciju te ju svrstava u jedan od tri glavna tipa i nekoliko podtipova formacije.

Tri glavna tipa formacije stijene su :

- ❖ Stabilna ili nepodgrađena stijena
- ❖ Nestabilna stijena
- ❖ Stijena koja stvara pritisak

### **5.3. Prednosti i nedostaci NATM-a**

S obzirom na zahtjevnost izvedbe tunela i samog rada u takvim uvjetima te kako je izvedba svakog tunela odvojeni proces i ne mogu se kriteriji nekog tunela primjenjivati u novom tunelu ukazuje na razinu kompleksnosti o kojoj se radi. Iako se pokazala jednom od najboljih metoda izvedbe tunela NATM ima svoj prednosti i mane [9].

Prednosti NATM:

- ❖ Primjenjivost u širokom rasponu geotehničkih uvjeta ili tla
- ❖ Visoka ekonomičnost optimizacije potrebnih podgradnih elemenata
- ❖ Brzo i jednostavno prilagođavanje na različite poprečne presjeke
- ❖ Ekonomična primjena na kraće ugovorene odsjeke
- ❖ Laka kombinacija s TBM iskopom
- ❖ Mala investicija s brzom amortizacijom

Nedostaci NATM:

- ❖ Mali napredak po ciklusu bez mjesta za puno povećanja
- ❖ Obrazovanje mora ispuniti visoke zahtjeve
- ❖ Smanjena mogućnost automatizacije
- ❖ Podjela rizika za investitora i izvođača nailazi na komplikacije
- ❖ Uz dodatne mjere je moguća primjena u uvjetima podzemne vode
- ❖ Kvaliteta izvedbe i materijala mora ispunjavati najviše kriterije

## 6. PRIMJER PRIMJENE METODE NATM NA TUNELU KAMENICE

Tunel Kamenice je dvotračni tunel dužine 499 metara koji prolazi kroz istoimeno brdo na Pelješcu te je izgrađen u sklopu izgradnje pristupne ceste Pelješkom mostu [20].

Iskop tunela izvodio se miniranjem i napredovalo se otprilike 10 metara po danu. Podzemni iskop se odvijao dvosmjerno od stacionaže 7+550,00 te od stacionaže 8+040,00 s druge strane. Najveći nadsloj tunela iznosi oko 55 metara te se nalazi na km 7+860,00 [21].

Na razini glavnog projekta izrađen je geotehnički projekt tunela Kamenice koji je imao cilj:

- Definiranje tipa tunela u odnosu na ponašanje podzemnog otvora pri iskopu i stabilizaciji iskopa,
- Zoniranje stijenske mase na geotehničke jedinice duž trase tunela,
- Određivanje parametara svake geotehničke jedinici radi rješavanja problema stabilizacije podzemnog iskopa,
- Definiranje moguće tehnologije izvođenja tunela,
- Određivanje svih mjera na stabilizaciji iskopa tunela,
- Definiranje geotehničkog praćenja tunela tijekom izvedbe,
- Definiranje kontrole i osiguranja kvalitete [21]

Prevedeni su istražni radovi na tunelu Kamenice koji su se sastojali od inženjerskogeološkog kartiranja, geofizičkih istražnih radova, istražnog bušenja te laboratorijskog ispitivanja uzoraka stijenskog materijala koji su dobiveni iz tri bušotine MPT 1,2 i 3 pojedinačnih dubila 15,50 i 15 metara [21].

Stijenski masiv u kojem je izveden tunel „Kamenice“ građen je od: rudistnih vapnenaca ( $V_2^{2,3}$ ) mikritnih i rekristaliziranih, dobro uslojenih s proslojcnima kasnodijagenetskih dolomitnih vapnenaca i vapnenačkih dolomita, gornjokredne, turonske i senonske starosti, svijetlo sive, sivosmeđe i svijetlo smeđe boje odnosno izdvojena je jedna litostratigrafska jedinica u rudistnim vapnencima i jedan strukturni blok A duž trase tunela [21].



Kako bi se odredili relevantni geotehnički parametri stijenske mase korišteni su rezultati laboratorijskog ispitivanja stijenskih materijala na uzorcima dobivenim iz istražnih bušotina te rezultati klasifikacije stijenskih masa duž trase tunela [21].

### **6.1. Opis stijenske mase**

Nakon provedbe analiza i obrade svih laboratorijskih ispitivanja za osnovni stijenski materijal usvojene su vrijednosti parametara:  $m_i = 12$ ,  $\sigma_c = 80-170$  MPa,  $\rho = 2.68$  Mg/m<sup>3</sup>,  $E = 38.6$  GPa [21]

Nadalje, analize su se provodile za gornju i donju graničnu vrijednost osnovne stijenske mase II/III kategorije, te za jače okršenu stijensku masu IV kategorije, a čvrstoća stijenskih masa za rudistne vapence određena je na osnovi empirijskog zakona čvrstoće [21].

#### **Geotehnička jedinica 1:**

#### **Rudistni vapnenac V, K<sub>2</sub><sup>2,3</sup>**

#### **osnovna stijenska masa II/III kategorije**

donje granične vrijednosti

$$GSI = 59, \sigma_c = 80 \text{ MPa}, m_b = 2.826, s = 0.0105, a = 0.503$$

gornje granične vrijednosti

$$GSI = 72, \sigma_c = 170 \text{ MPa}, m_b = 4.495, s = 0.0446, a = 0.501$$

#### **jače okršena stijenska masa IV kategorije**

prosječne vrijednosti (pretpostavljeno)

$$GSI = 40, \sigma_c = 80 \text{ MPa}, m_b = 1.434, s = 0.0013, a = 0.511 [21]$$

### **6.2. Modul deformabilnosti stijenskih masa**

Za određivanje modula deformabilnosti koristila se empirijska procjena modula stijenske mase prema formuli u nastavku (2) :

$$E_m = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad (2)$$

Gdje je:

$E_m$  – modul deformacije stijenske mase

$E_i$  – modul elastičnosti intaktne stijene

$D$  – faktor poremećenosti

Za proračun su usvojene sljedeće vrijednosti:

**Geotehnička jedinica 1:**

**Rudistni vapnenac V,  $K_2^{2,3}$**

**osnovna stijenska masa II/III kategorije**

donje granične vrijednosti

$E = 19$  GPa

gornje granične vrijednosti

$E = 30$  GPa

**jače okršena stijenska masa IV kategorije**

prosječne vrijednosti

$E = 6$  GPa [21]

### 6.3. Klasifikacija stijenske mase

Za klasifikaciju stijenske mase koristila se Geomehanička klasifikacija i Q sustav, te iskustva i modificiranje navedenih klasifikacija. Geotehnička jedinica 1 je prema Geomehaničkoj klasifikaciji svrstana u kategoriju II/III. Čak 250 metara tunela odnosno 51 % pripada II kategoriji, slijedi ju III kategorija koja pokriva 159 metara odnosno 32 %, zatim IV kategorija 32 metra i 7 % te zadnje je V kategorija u koju su svrstani portalni dijelovi sa 49 metara i 10% tunela [21].

Dobiveni rezultati na temelju Geomehaničke klasifikacije su:

- Za osnovnu stijensku masu kategorije II/III, RMR = 52- 65
- Za jače okršenu stijensku masu kategorije IV, RMR = 30 (pretpostavljeno)
- Za rasjedne i oslabljene zone stijenske mase kategorije V, RMR = 10 (pretpostavljeno)[21]

Naredni Q sustav klasifikacije dobio je rezultate:

- Za osnovnu stijensku masu kategorije II/III, Q = 2,19 -15 (slaba do dobra stijenska masa)
- Za jače okršenu stijensku masu kategorije IV, Q = 0,211 (vrlo slaba stijenska masa – pretpostavljeno)
- Za rasjedne i oslabljene zone stijenske mase kategorije V, Q = 0,023 (ekstremno slaba stijenska masa – pretpostavljeno) [21]

Obje klasifikacije daju svoje sustavno rješenje napredovanja tunela i podgrađivanje, te se one u principu ne razlikuju previše već daju rješenja podgrađivanja sa sustavnim sidrenjem, mlaznim betonom i čeličnom žicom [21].

#### **6.4 Stabilizacija podzemnog iskopa**

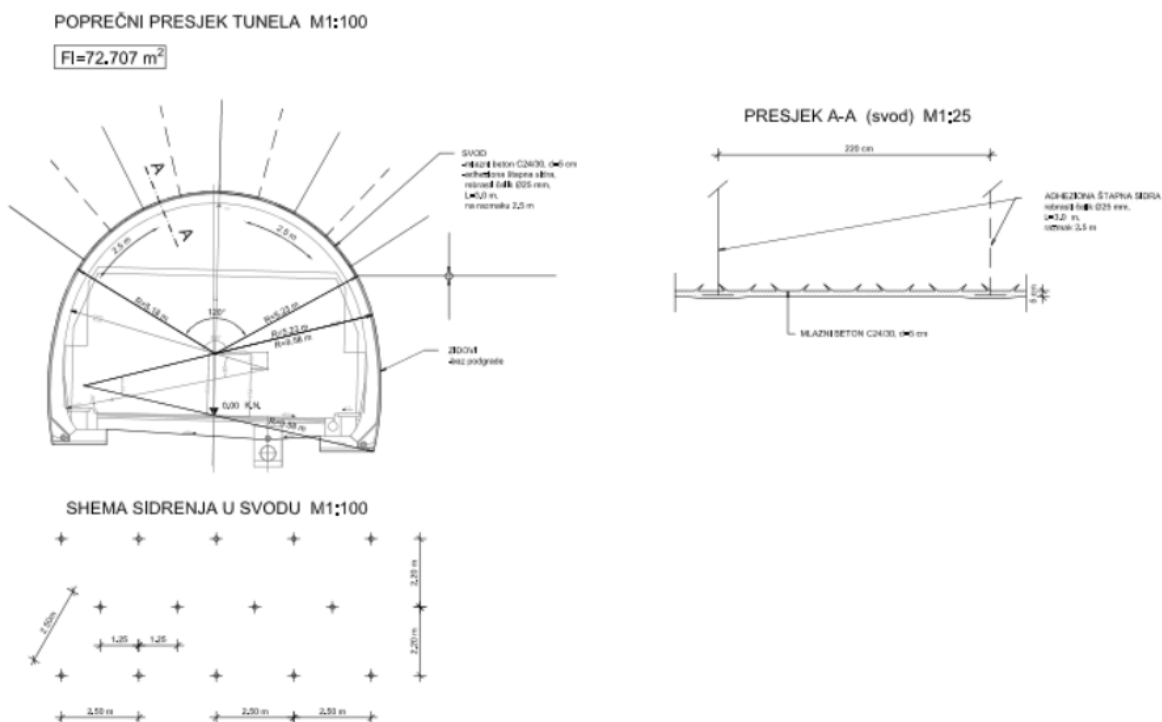
Nakon svih provedenih analiza: stabilizacije podzemnih iskopa empirijskim i racionalnim pristupom, te skupljenim iskustvom izabrala se tehnologija izvođenja i dimenzionirani podgradni sustavi uvažavajući preporuke svih mjera na iskopu i stabilizaciji podzemnog iskopa cestovnog tunela Kamenice [21].

Još jedna bitna stavka je provođenje Programa geotehničkog praćenja tunela tijekom izvedbe čiji je cilj definirati stvarni model stijenskih masa duž trase tunela. Na taj način moguće je postići kontrolu nad svim procesima koji se odvijaju tijekom iskop i stabilizacije iskopa te svesti na minimum mogućnost urušavanja [21].

Izabrane mjere stabilizacije se temelje na pretpostavci da se iskop izvodi bušenjem i nekom od metoda konturnog miniranja. Mjere stabilizacije navedene su za podgradni sklop tipa II do tipa Va i sve je prikazano na nacrtu 1601 koji će bit prikazan slikama 51 -57 [21].

### Osnovni podgradni sklop tip II:

- Za svod se koristi mlazni beton C24/30 debljine 5 cm te sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik Ø 25 mm, duljine 3.0 m, na razmaku 2.5 m) dok su zidovi bez podgrade
- Pri iskopu su dozvoljena maksimalna naprezanja i iskop je u punom profilu. Za RMR=61 nepodgrađeni raspon od 10 metara biti će stabilan 20 dana tako da ugradnja podgrade nimalo ne utječe na daljnje napredovanje tunela. Ukoliko dođe do lokalne pojave nestabilnih blokova problem se rješava pojedinačnim sidrenjem [21].

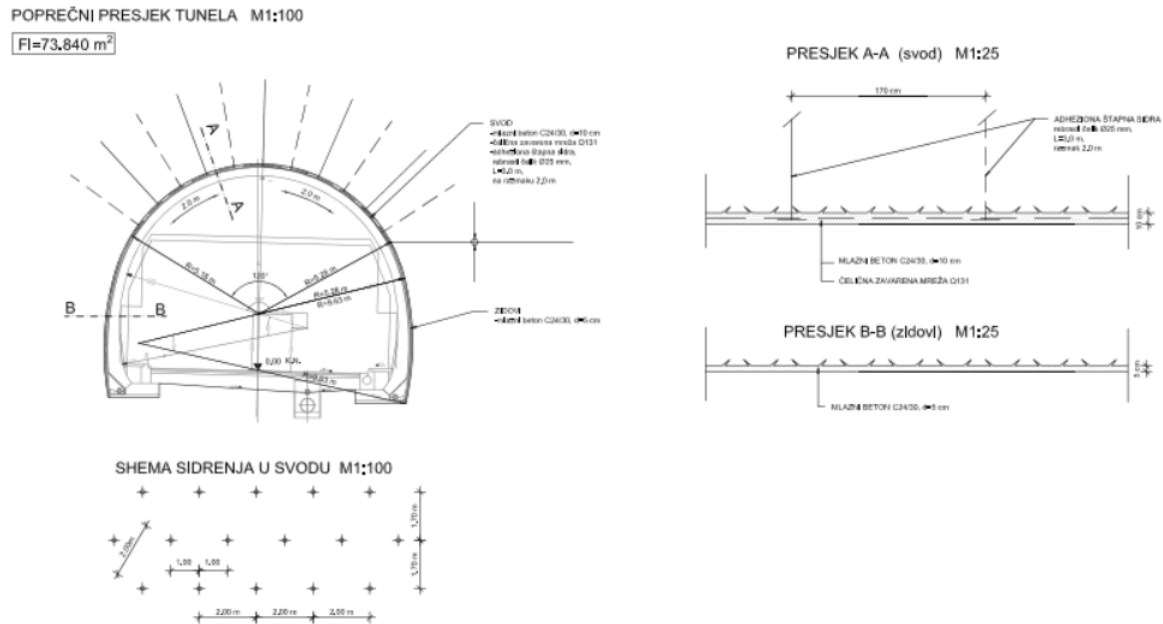


Slika 51: Osnovni podgradni sklop tip II [21]

### Osnovni podgradni sklop tip III:

- Za svod se i ovdje koristi mlazni beton C24/30 ovaj puta u debljini od 10 cm, čelična mreža Q131, te sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik Ø 25 mm, duljine 3.0 m, na razmaku 2.0 m) i mlazni beton C24/30 debljine 5 cm za zidove.
- Kad se izvodi iskop u punom profilu onda je napredovanje do 3 metra, dok se pri iskopu u dvije faze dozvoljeno maksimalno napredovanje.

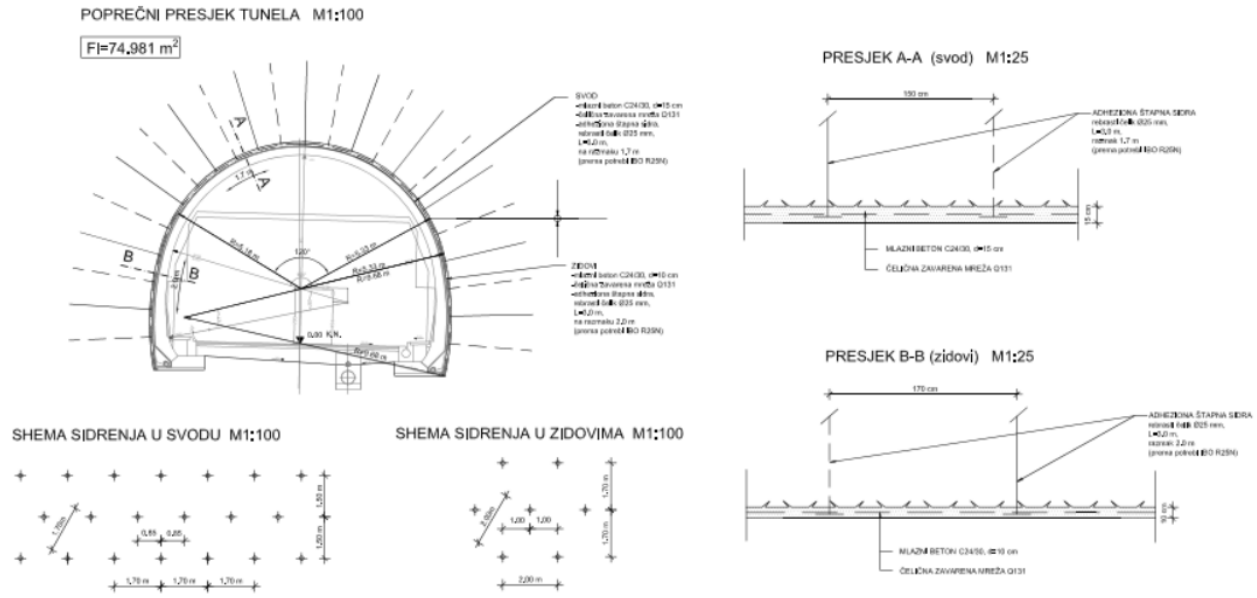
- U ovom slučaju za  $RMR = 41$  nepodgrađeni raspon od 4 metra biti će stabilan svega nekih 36 sati pa je podgrađivanje potrebno izvesti nanošenjem sloja mlaznog betona neposredno nakon svakog napredovanja i dovršiti 10 m od čela iskopa [21].



Slika 52: Osnovni podgradni sklop tip III [21]

#### Osnovni podgradni sklop tip IV:

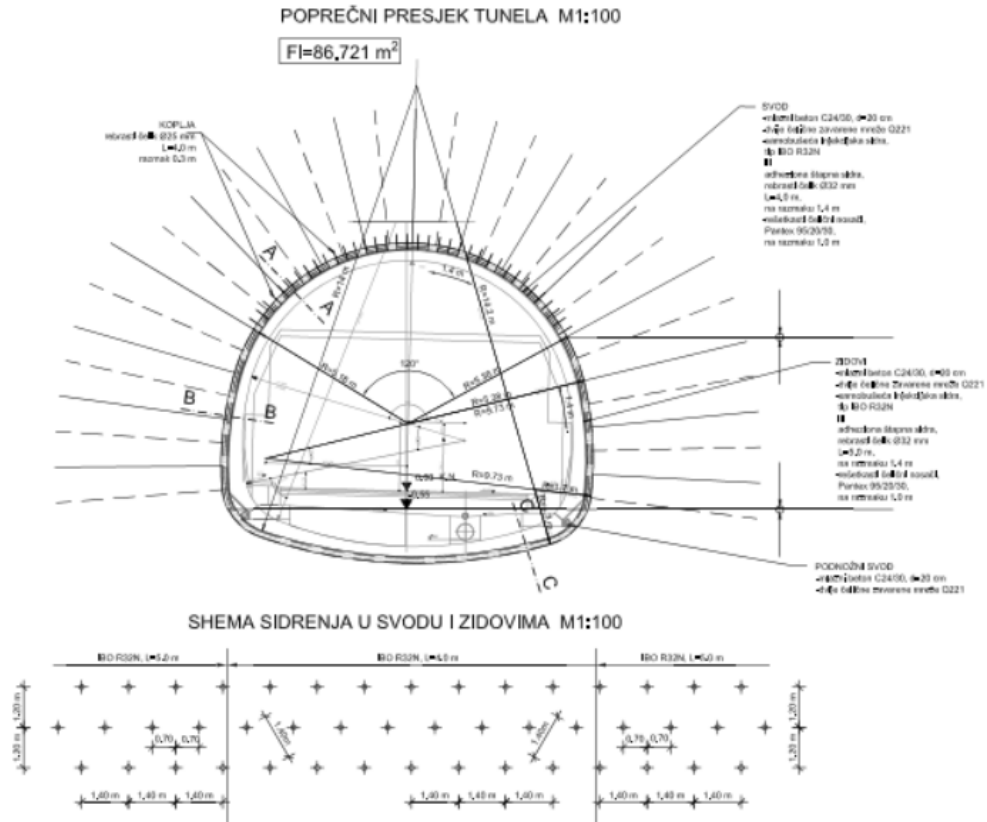
- U svodu se nanosi mlazni beton C24/30 u debljini od 15 cm, čelična zavarena mreža Q 131, sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik  $\varnothing 25$  mm, duljine 3.0 m, na razmaku 1.7 m), na zidove također ide mlazni beton C24/30 samo debljine 10 cm, sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik  $\varnothing 25$  mm, duljine 3.0 m, na razmaku 2.0 m)
- Iskop se izvodi u dvije faze s napredovanjima od 1 do 2 metra u prvoj fazi, a nepodgrađeni raspon je potrebno podgraditi odmah nakon iskopa i dovršiti nakon sljedećeg napredovanja.
- Ukoliko dođe do nezadovoljavanja kriterija stabilnosti podzemnog iskopa osnovni podgradni sklop je potrebno ojačati mlaznim betonom maksimalne debljine od 20 centimetara [21].



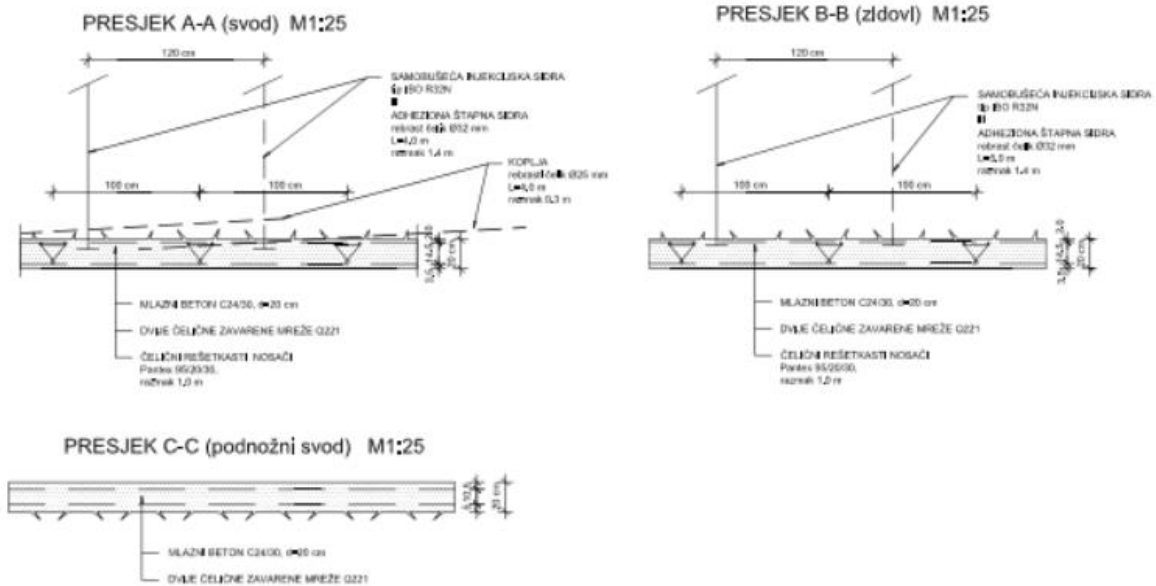
Slika 53: Osnovni podgradni sklop tip IV [21]

#### Osnovni podgradni sklop tip V:

- Ovdje se u svodu izvodi mlazni beton C24/30 debljine 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q 221, sistematsko sidrenje samobušivim injekcijskim sidrima (tip IBO R32N  $\varnothing 32/18.5$  mm, duljine 4.0 m, na razmaku 1.4 m) ili sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik  $\varnothing 32$  mm, duljine 4.0 m, na razmaku 1.4 m, rešetkasti čelični nosači, tip 95/20/30 (Pantex ili sl.) na razmaku 1.0 m).
- U zidovima se izvodi mlazni beton C24/30 debljine 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q 221, sistematsko sidrenje samobušivim injekcijskim sidrima (tip IBO R32N  $\varnothing 32/18.5$  mm, duljine 5.0 m, na razmaku 1.4 m) ili sistematsko sidrenje adhezijskim štapnim sidrima (rebrasti čelik  $\varnothing 32$  mm, duljine 5.0 m, na razmaku 1.4 m, rešetkasti čelični nosači, tip 95/20/30 (Pantex ili sl.) na razmaku 1.0 m).
- I u podnožnom svodu se izvodi mlazni beton C24/30 debljine 20 cm s dvije čelične zavarene mreže Q121.
- Ova stabilizacija koristi se za ugradnju u rasjednim i oslabljenim zonama te se iskop izvodi u tri faze uz napredovanje od 0.5 do 1 metar u prvoj fazi
- Kod ove kategorije obavezna su kontrolna mjerenja radi procjene stabilnosti otvora u svakoj fazi iskopa i podgrađivanja [21].



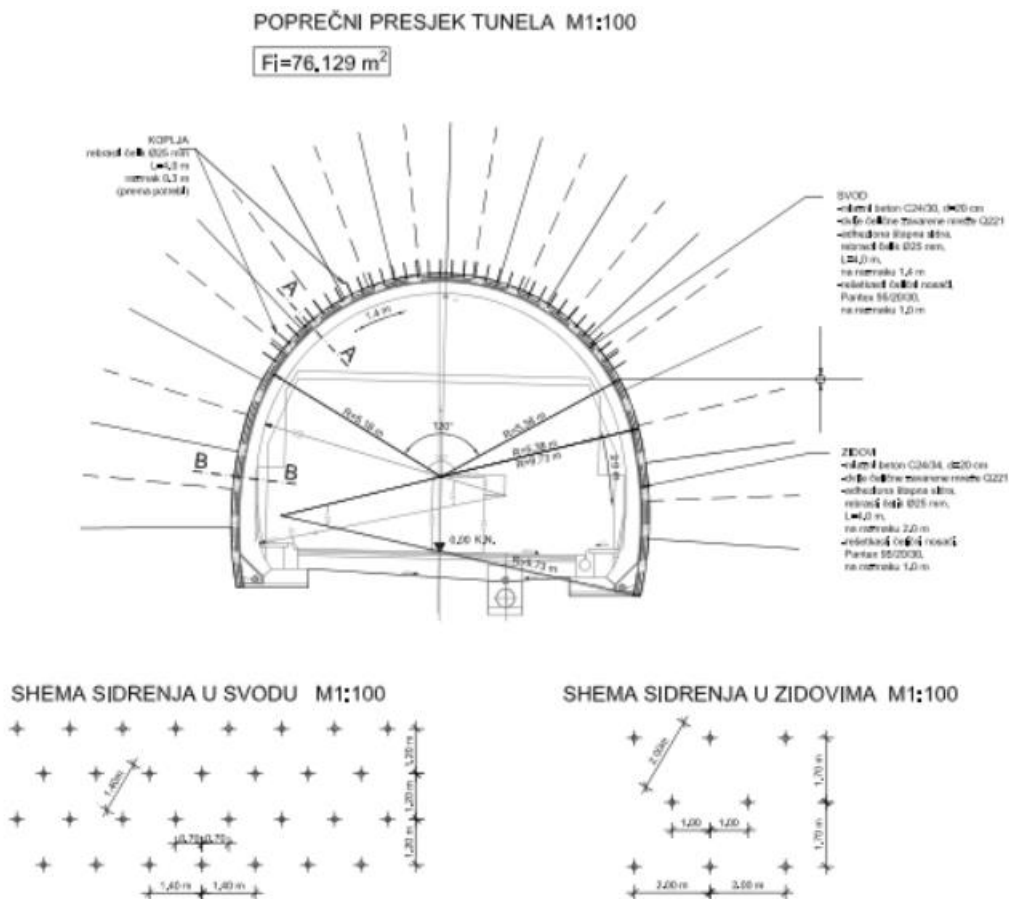
Slika 54: Osnovni podgradni sklop tip IV [21]



Slika 55: Osnovni podgradni sklop tip V [21]

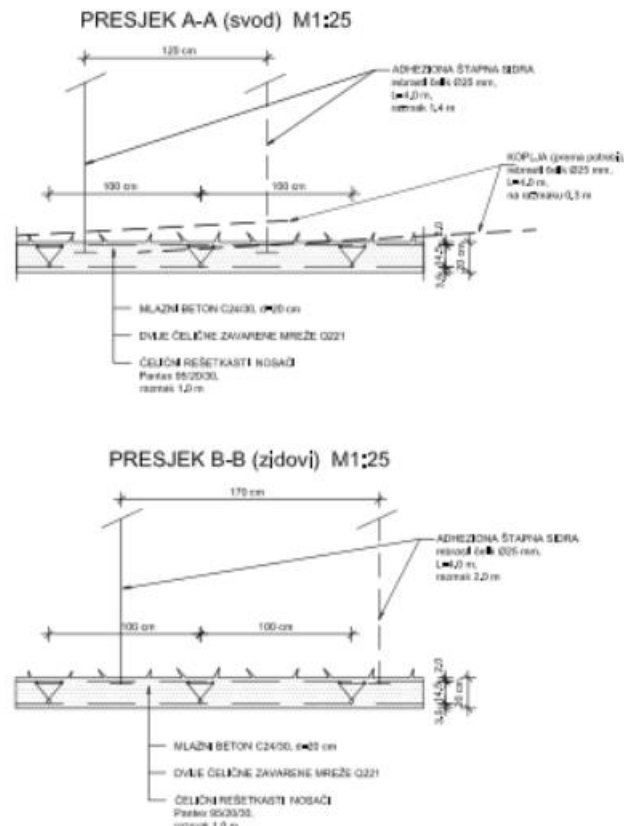
Osnovni podgradni sklop tip Va:

- U svodu se izvodi mlazni beton C24/30 debljine 20 cm, dvije čelične zavarene mreže Q 221, sistematsko sidrenje adhezijским štapnim sidrima (rebrasti čelik Ø 25 mm duljine 4.0 m, na razmaku 1.4 m), rešetkasti čelični nosači, tip 95/20/30 (Pantex ili sl.) na razmaku 1m
- Kod zidova se koristi jednaka podgrada kao i u svodu, jedina razlika je razmak između sidara koji je u ovom slučaju 2 m
- Predviđen je za ugradnju u zonama malog nadsloja odnosno za portalne zone, a iskop se izvodi u dvije faze uz dozvoljena napredovanja od 1 do 2 metra u prvoj fazi, dok je podgrađivanje potrebno provesti odmah nakon iskopa i dovršiti nakon sljedećeg napredovanja [21].



Slika 56: Osnovni podgradni sklop tip Va [21]





Slika 57: Osnovni podgradni sklop tip Va [21]

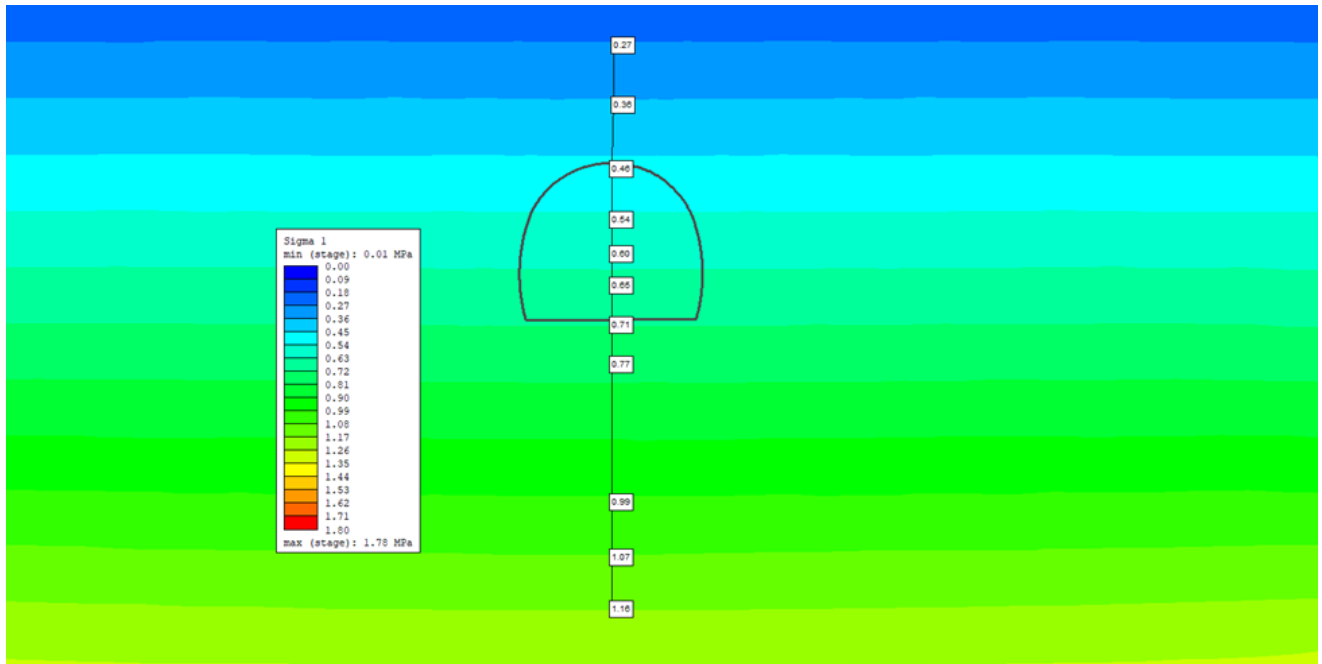
## 6.5 Analiza podzemnog otvora nakon iskopa u II i IV kategoriji stijenske mase

Za zadanu trasu, geometriju poprečnog presjeka tunela i predviđeni uzdužni profil, izrađen je proračunski model upotrebom računalnog programa Phase2 (Rocscience) koji implementira metodu konačnih elemenata. Proračunski model izrađen je za stacionažu 7+600,00 te su usvojene vanjske dimenzije 108 x 52 m kako bi se umanjio utjecaj rubnih uvjeta na rezultate analize. Na bočnim stranama koristili su se klizni oslonci, na dnu modela fiksni oslonci kao rubni uvjeti modela, dok je površina terena oslobođena oslonaca. Za metodi iskopa predviđeno je miniranje. Parametri čvrstoće stijenskih masa definirani su u točki 6.1. Analize su provedene za donje i gornje granične vrijednosti parametara sa usvojenim vrijednostima modula deformabilnosti koji su dani u točki 6.2. Komponente stanja naprezanja određene su za nadsloj od 17.12 metara.

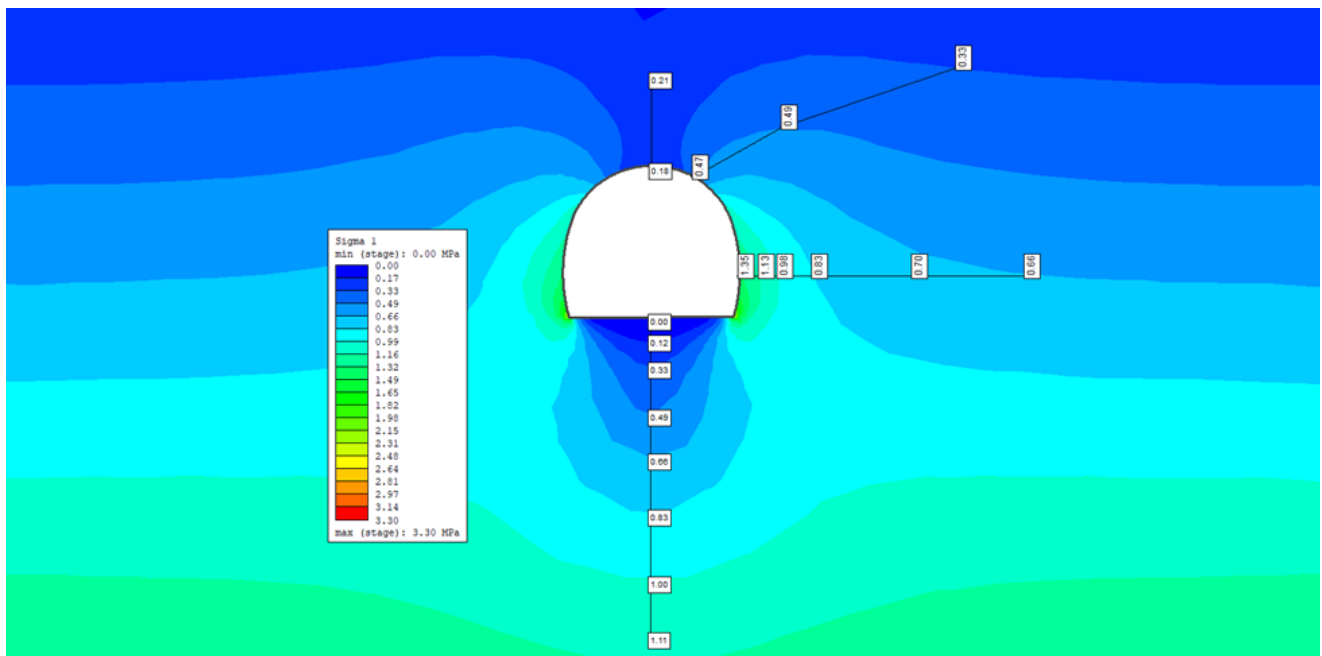
Iskop tunel za II kategoriju izveden je u punom profilu dok je iskop tunela za IV kategoriju izveden u dvije faze. Rezultati analize stanja vertikalnih i horizontalnih naprezanja, te ukupne deformacije bit će prikazani kroz niz slika sa kratkim komentarom. Podgrade su korištene u analizi one koje su i izbrane kod izvedbe tunela Kamenice.

### ***6.5.1. Razvoj vertikalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase***

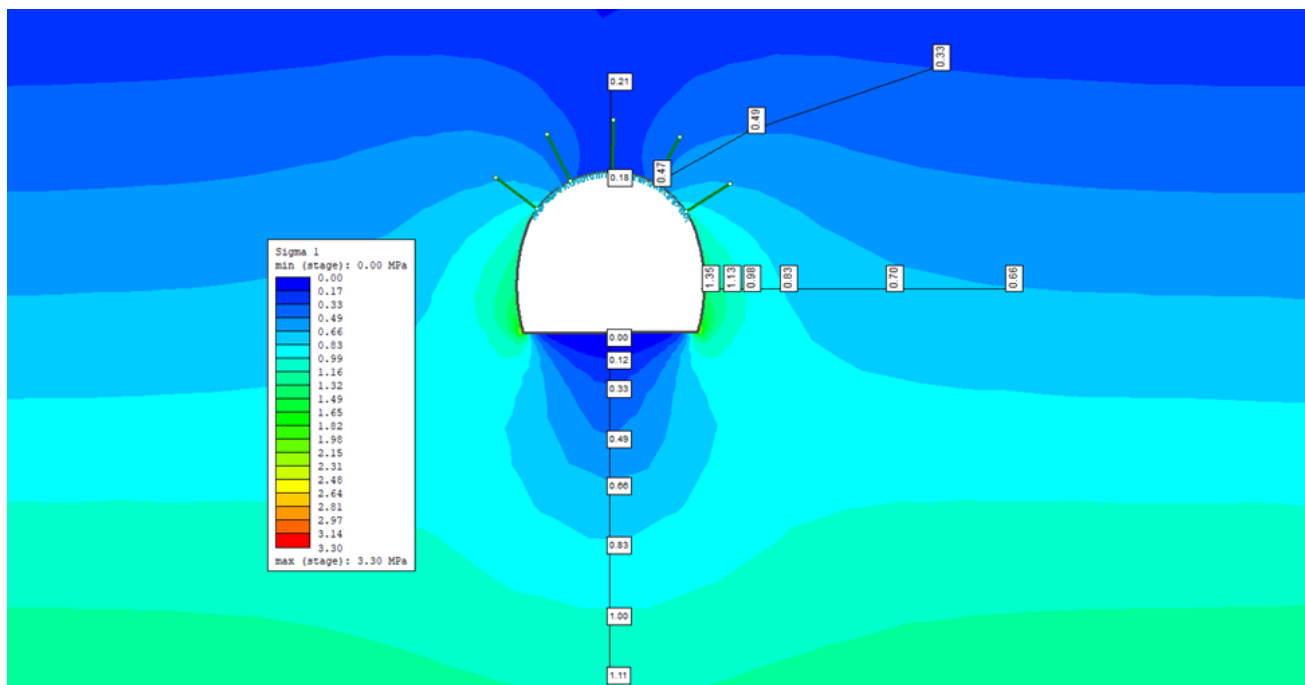
Vertikalna naprezanja prikazuju se kao sigma 1. kod in situ naprezanja rastu s dubinom te na kraju modela maksimalno naprezanje iznosi 1.78 MPa što je i prikazano na slici 58. Nakon faze iskopa maksimalna vertikalna naprezanja iznose 3.30 MPa (slika 59) što znači da imamo porast naprezanja za 85 %. Ugradnjom podgrade u ovom slučaju su u programu izabrana swellex sidra koja zamjenjuju ahdezijska sidra korištena u tunelu Kamenice, te mlazni beton odgovarajuće debljine od 5 cm, ali naprezanja se nisu promijenila (slika 60). Iako nakon ugradnje podgrade nije došlo do promjene naprezanja u usporedbi sa samim iskopom to nije utjecalo na tunel, te nije došlo do plastifikacije. Na slikama 61-63 prikazana su vertikalna naprezanja za gornje granične vrijednosti koje su gotovo jednake donjim graničnim vrijednostima koje su analizirane prethodnim tekstom.



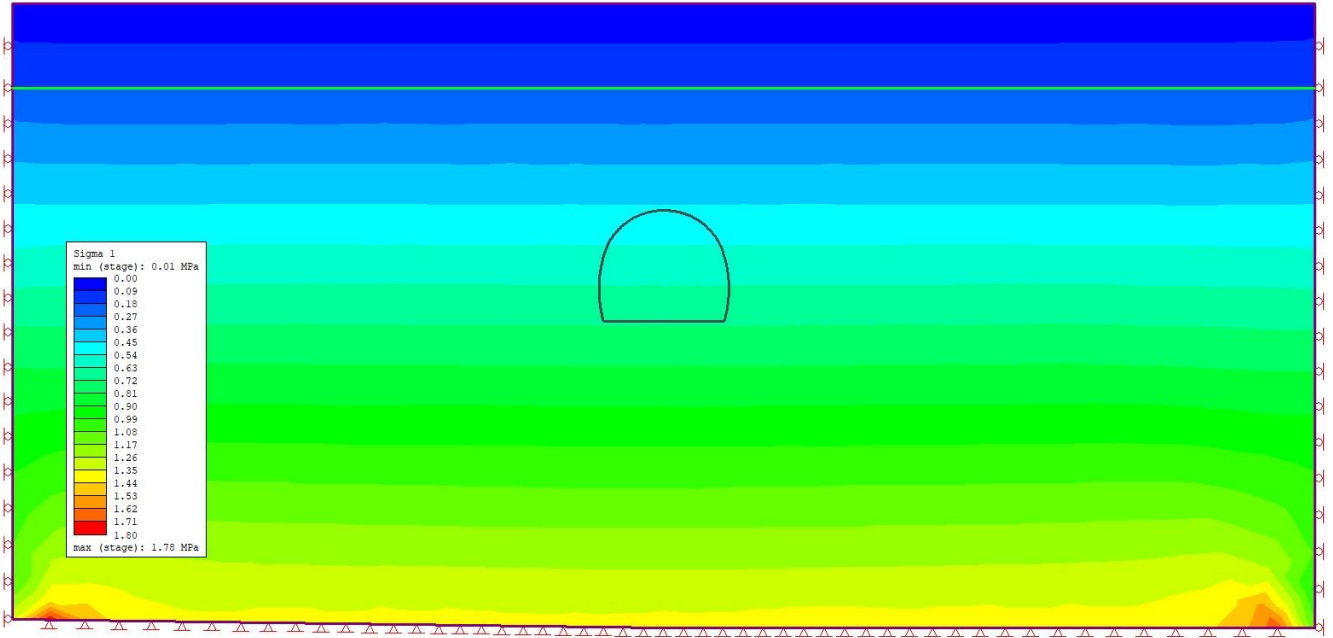
Slika 58: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost)



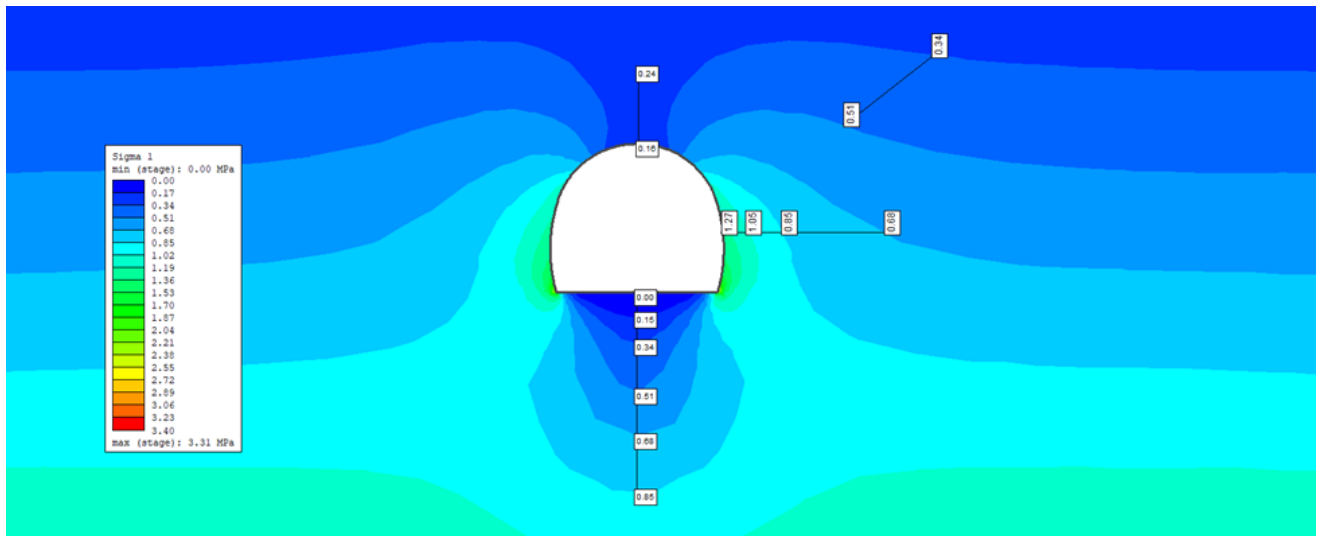
Slika 59: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost)



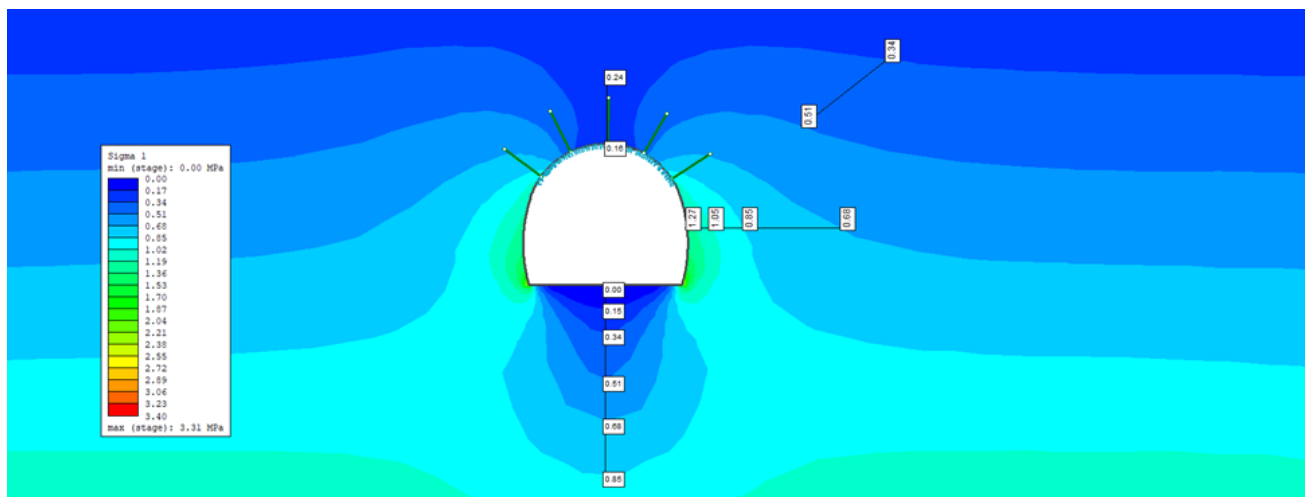
*Slika 60: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost)*



*Slika 61: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost)*



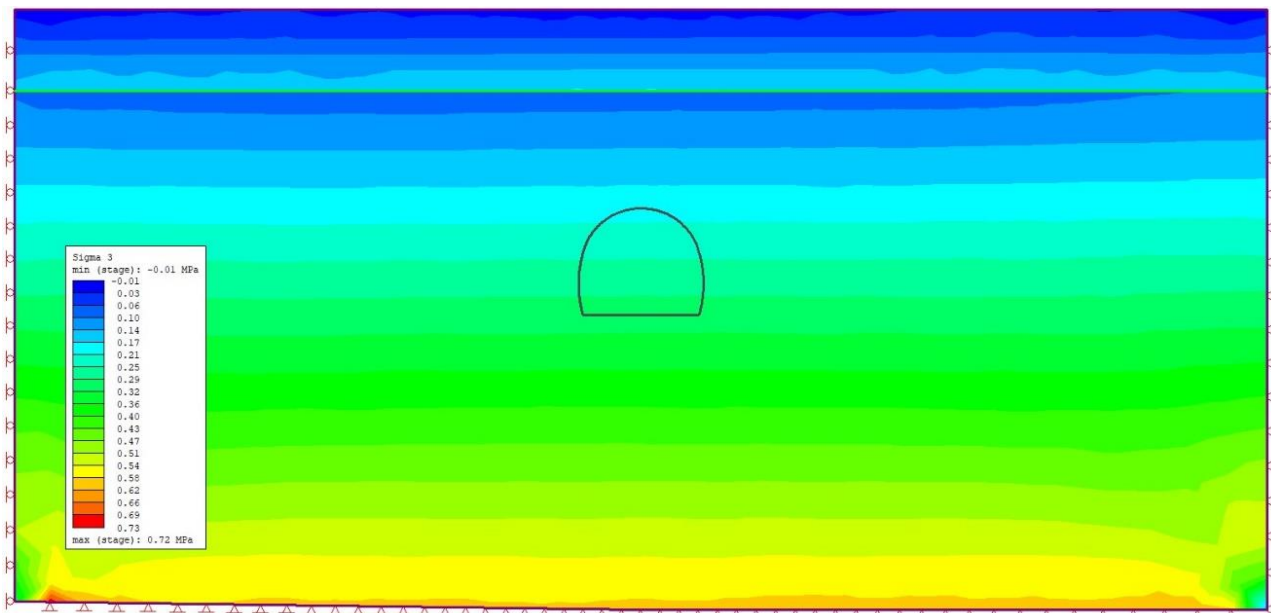
*Slika 62: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost)*



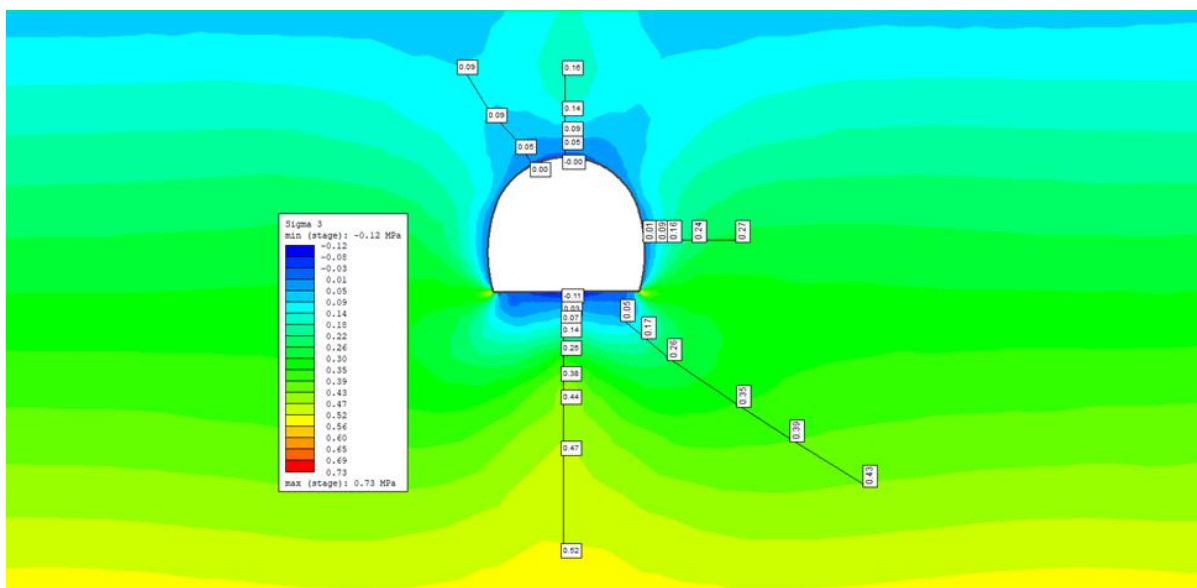
*Slika 63: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za gornju graničnu vrijednost)*

### **6.5.2. Razvoj horizontalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase**

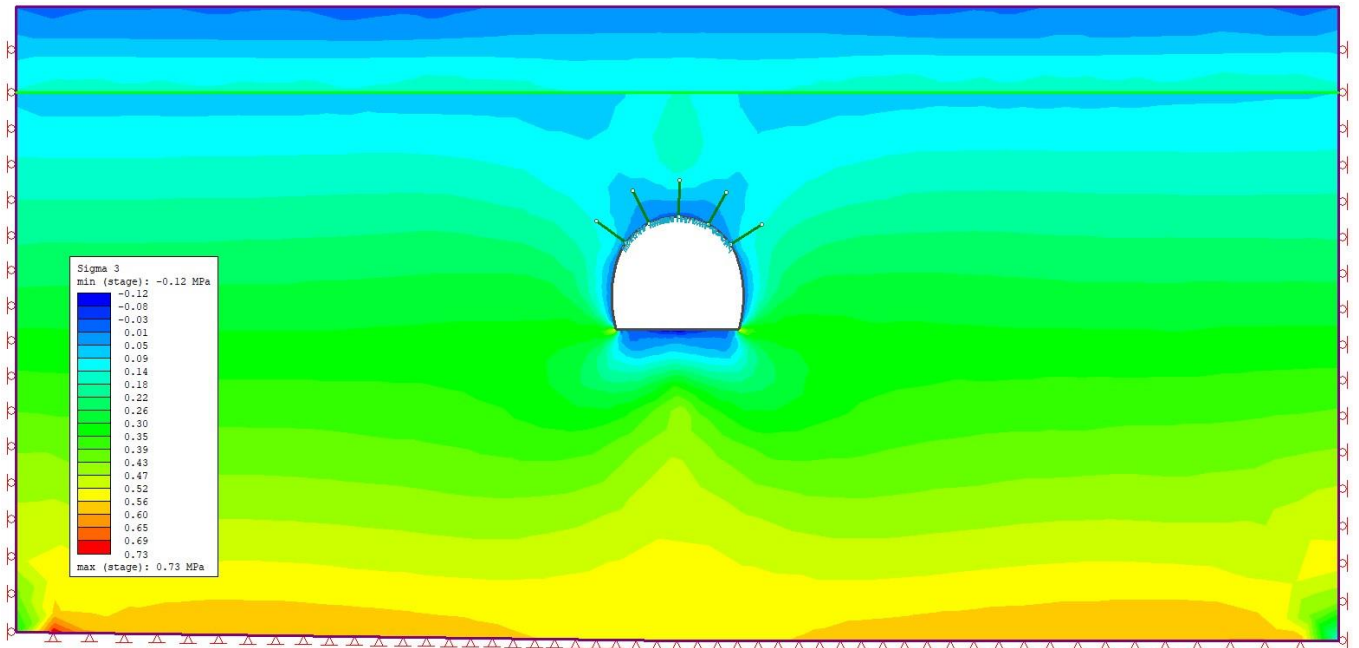
Horizontalna naprezanja se prikazuju kao sigma 3. Kod in situ stanja model ima maksimalno naprezanje od 0.72 Mpa što se vidi na slici 64 i to naprezanje se proteže u svim fazama, odnosno i u fazi iskopa i nakon ugradnje podgrade (slike 65 i 66). Promjene se najviše primijete u području kalote i podnog svoda. Kao i kod vertikalnog naprezanja gdje su vrijednosti za gornju i donju granicu bile jednake isti slučaj je i kod horizontalnih naprezanja, ona se ne razlikuju za donje i gornje granične vrijednosti koje su prikazane slikama od 67 do 69.



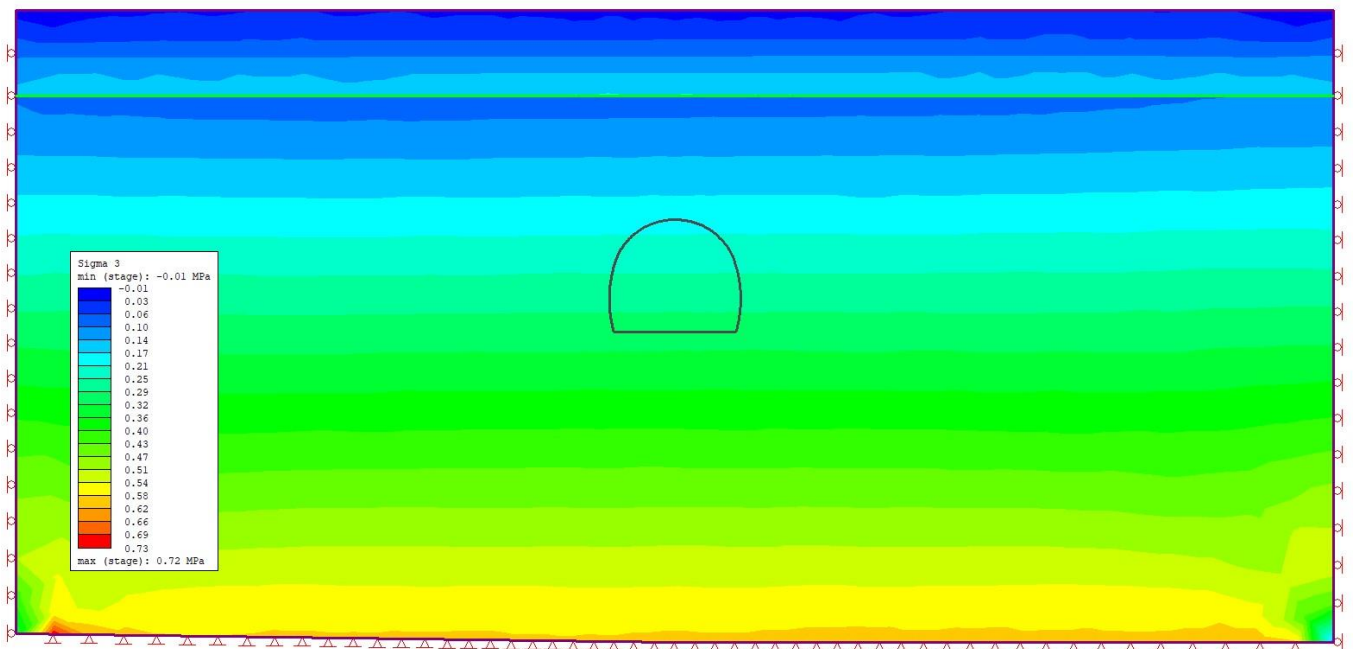
Slika 64: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost)



Slika 65: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost)

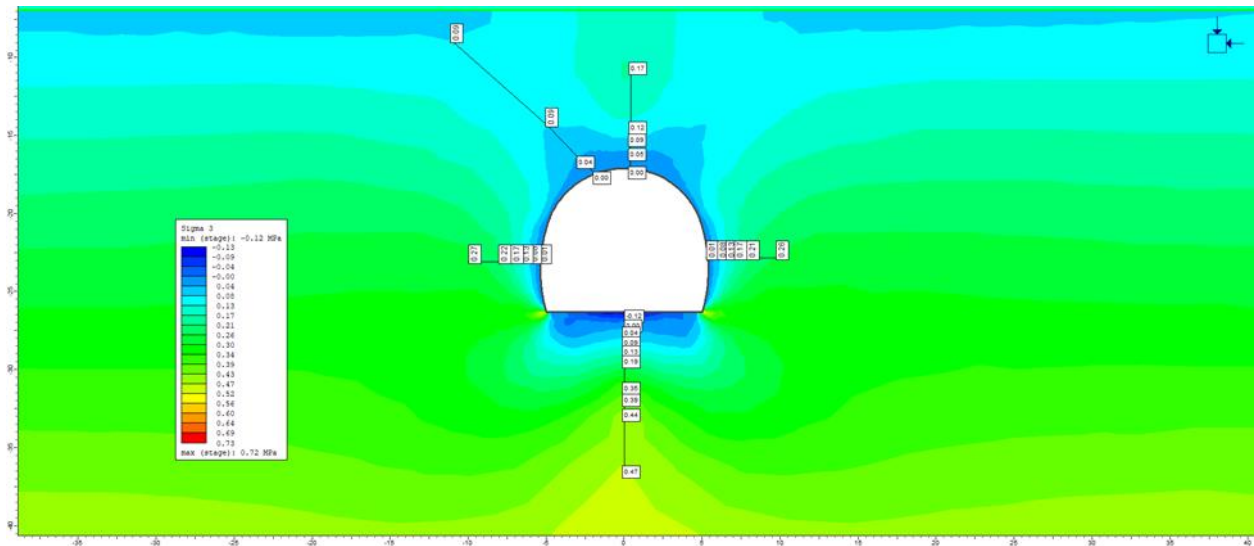


*Slika 66: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost)*

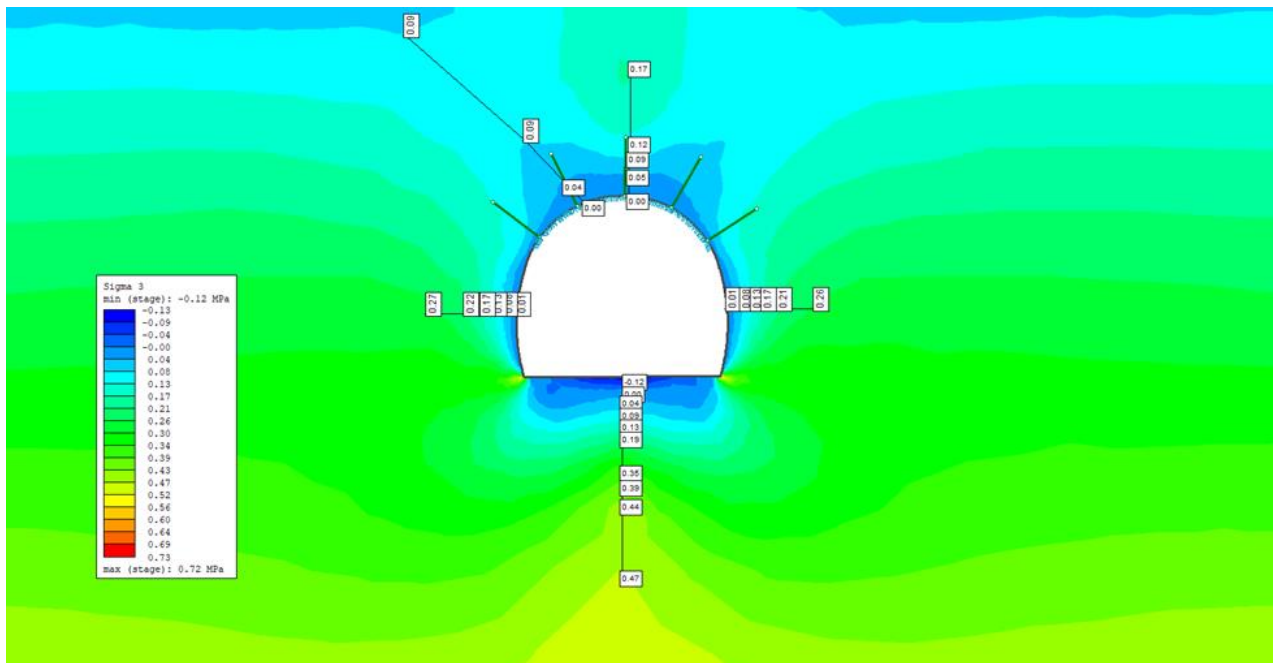


*Slika 67: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi II kategorije za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost)*





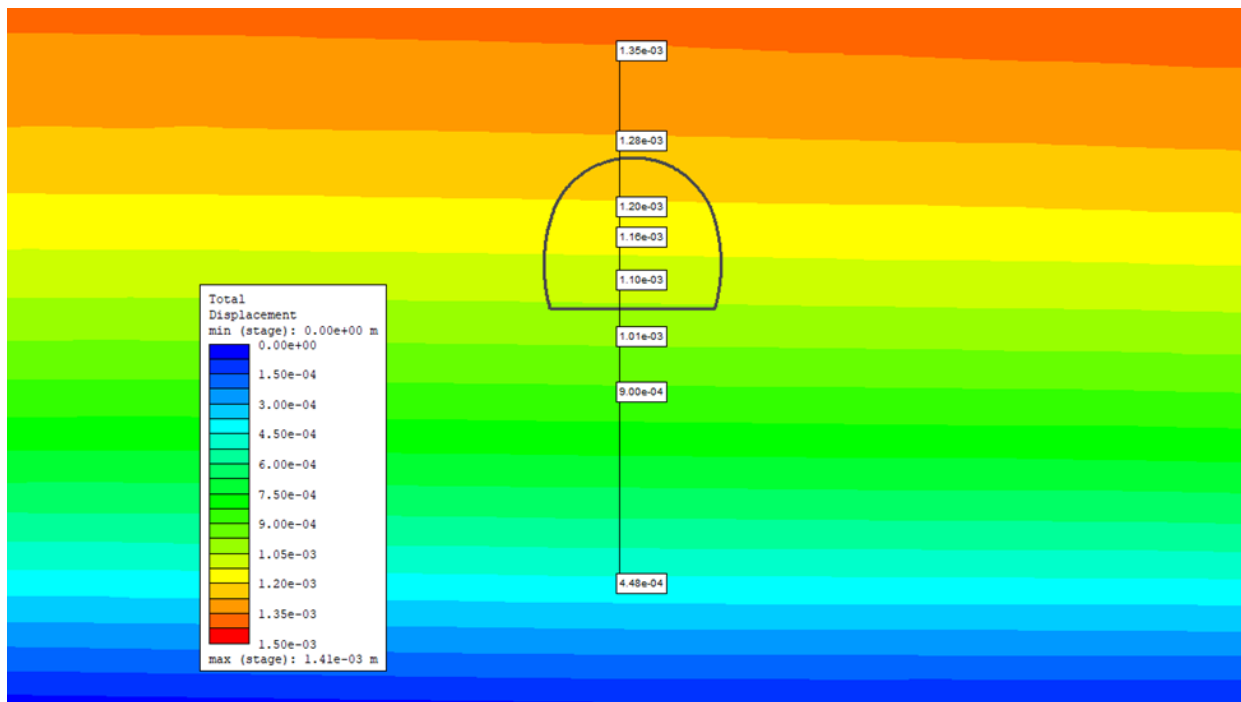
Slika 68: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost)



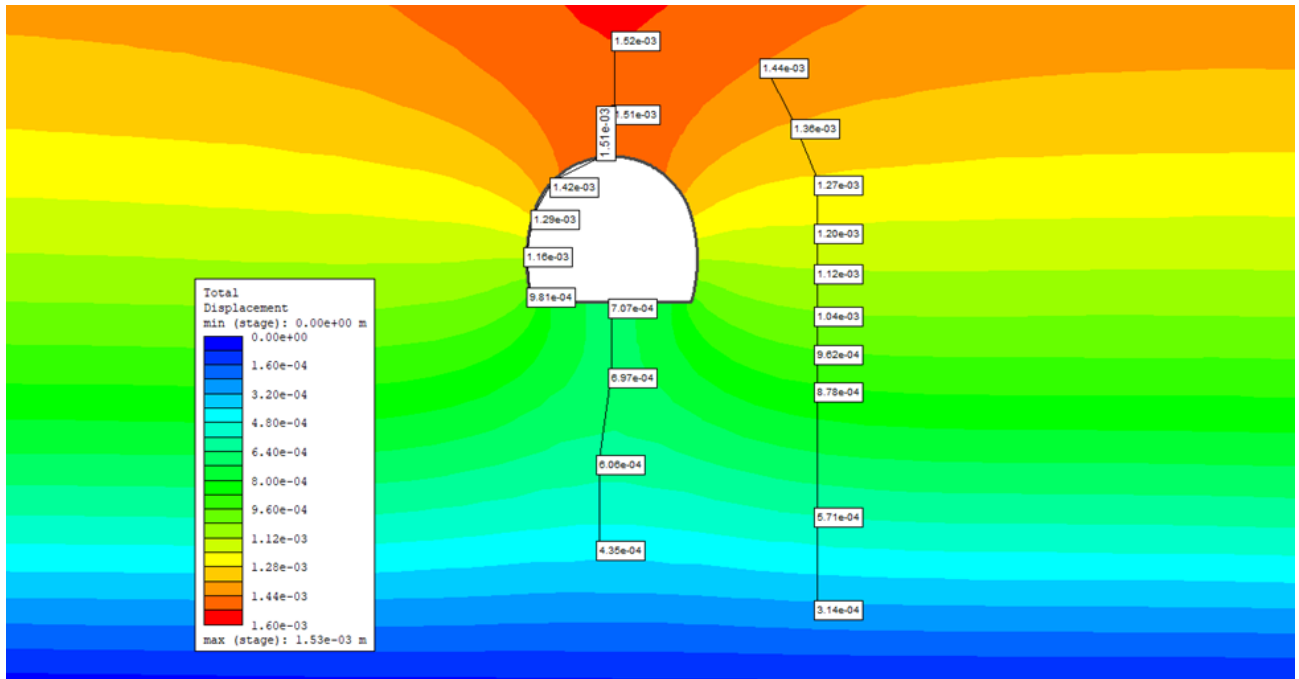
Slika 69: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade (za gornju graničnu vrijednost)

### 6.5.3. Razvoj deformacija oko podzemnog otvora za iskop u II kategoriji stijenske mase

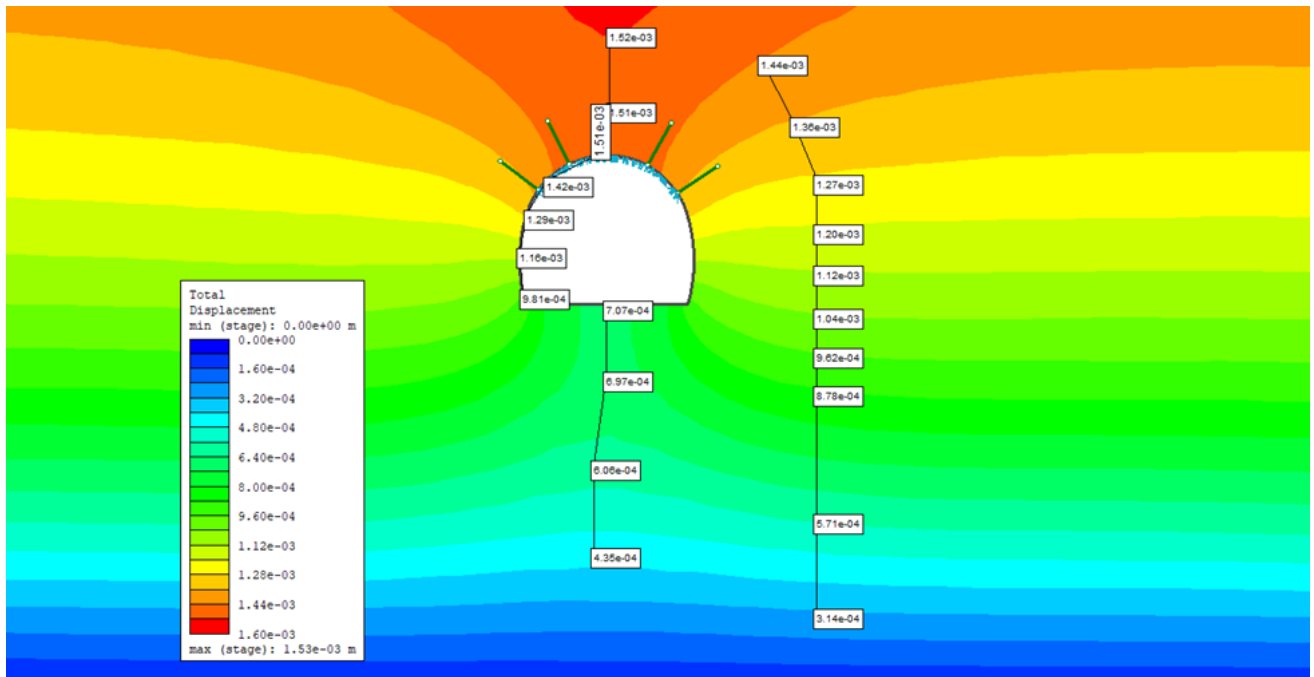
Deformacije su odziv naprezanja na stijensku masu što se može vidjeti iz rezultata analize. Maksimalne deformacije kod in situ modela iznose  $1.41 \times 10^{-3}$  m i na slici 70 se vidi kako pomaci rastu od kalote prema površini modela. Nakon što je izvršen iskop u kaloti tunela nekadašnja vrijednost od  $1.28 \times 10^{-3}$  m sada je postala  $1.53 \times 10^{-3}$  m odnosno pomak od 20% (slika 71) što je ujedno i maksimalna deformacija. U zidovima se očituju pomaci gledani od gore prema dolje redom u iznosu od  $1.29 \times 10^{-3}$  do  $9.81 \times 10^{-3}$  m tj. pomaci od 1.29 mm do 9.81 mm. Ugradnja podgrade (slika 72) nije doprinijela promjeni u vrijednostima pomaka stoga se može zaključiti da pomaci nisu značajni za tunel. Iako promjena kod vertikalnih i horizontalnih naprezanja nije bilo kad bi se usporedila donja i gornja granična vrijednost kod deformacija to nije slučaj. Za gornju graničnu vrijednost maksimalna vrijednost deformacije kod in situ je  $8.93 \times 10^{-4}$  (slika 73) što je ako usporedimo s donjom graničnom vrijednosti razlika od  $5.17 \times 10^{-4}$  m. Iskopom se najveće deformacije očitavaju iznad kalote tunela u iznosu od  $9.76 \times 10^{-4}$  m (slika 74). I ovog puta podgrada nije promijenila iznose pomaka pa se da zaključiti da pomaci ne utječu na stabilnost samog tunela (slika 75). Na kraju kad se sve sagleda pomaci su jako male vrijednosti koje su gotovo zanemarive.



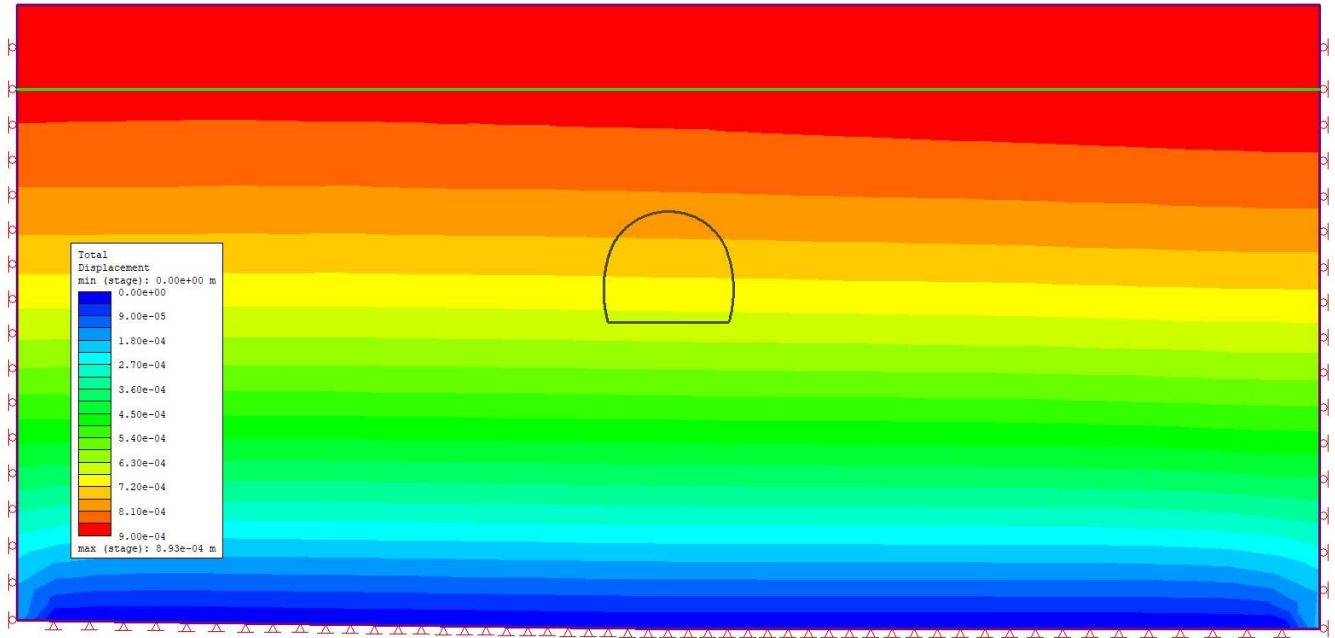
Slika 70: Deformacije u II kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala (za donju graničnu vrijednost)



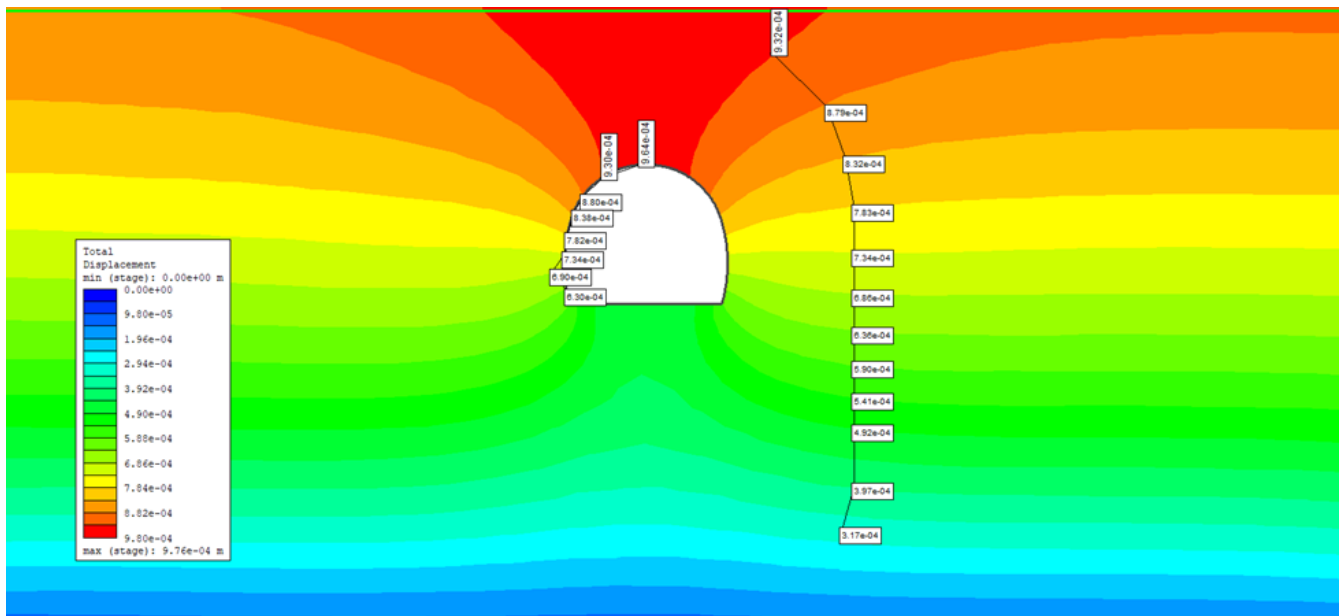
Slika 71: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za donju graničnu vrijednost)



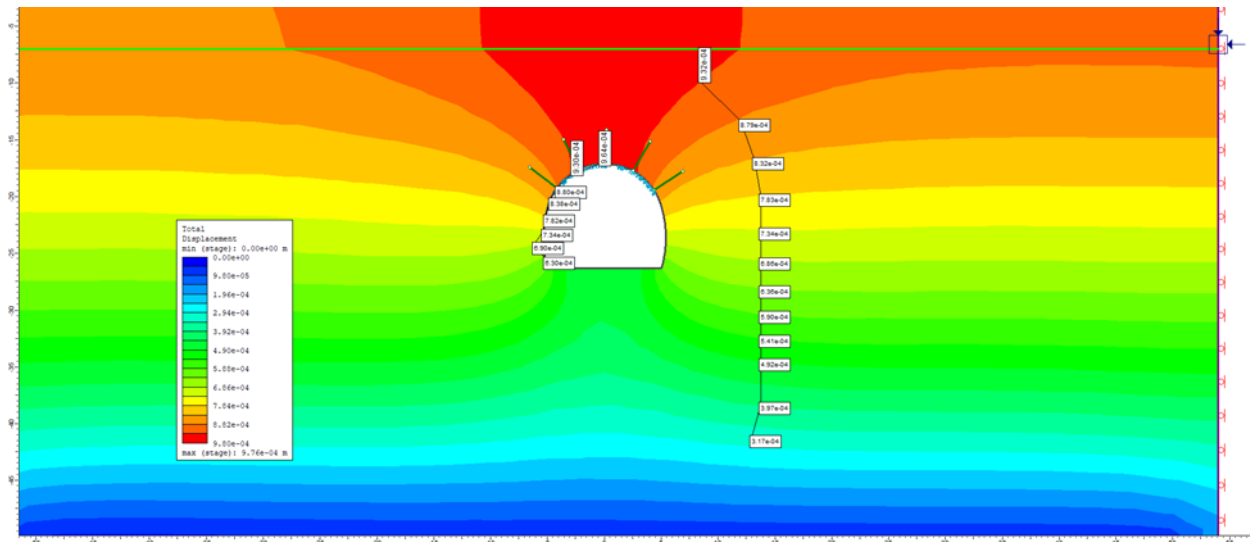
Slika 72: Deformacije oko podzemnog otvora za iskopu u II kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost)



Slika 73: : Deformacije u II kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala (za gornju graničnu vrijednost)



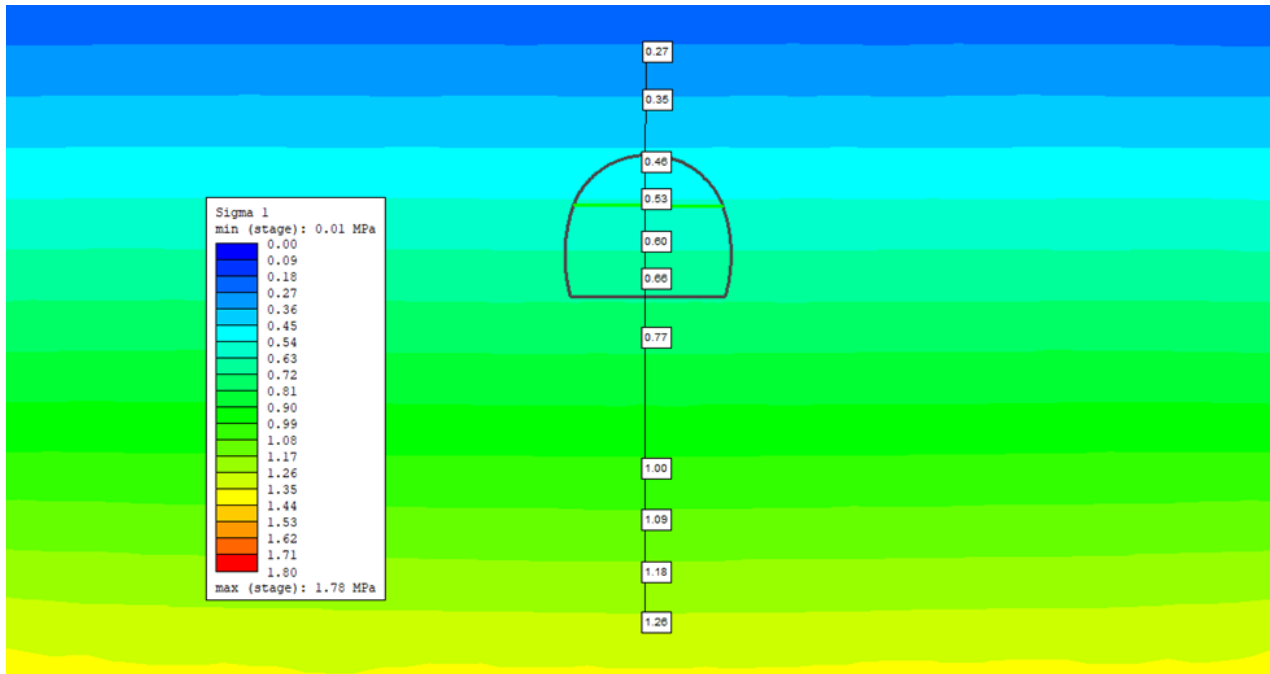
Slika 74: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon izvedenog iskopa u punom profilu (za gornju graničnu vrijednost)



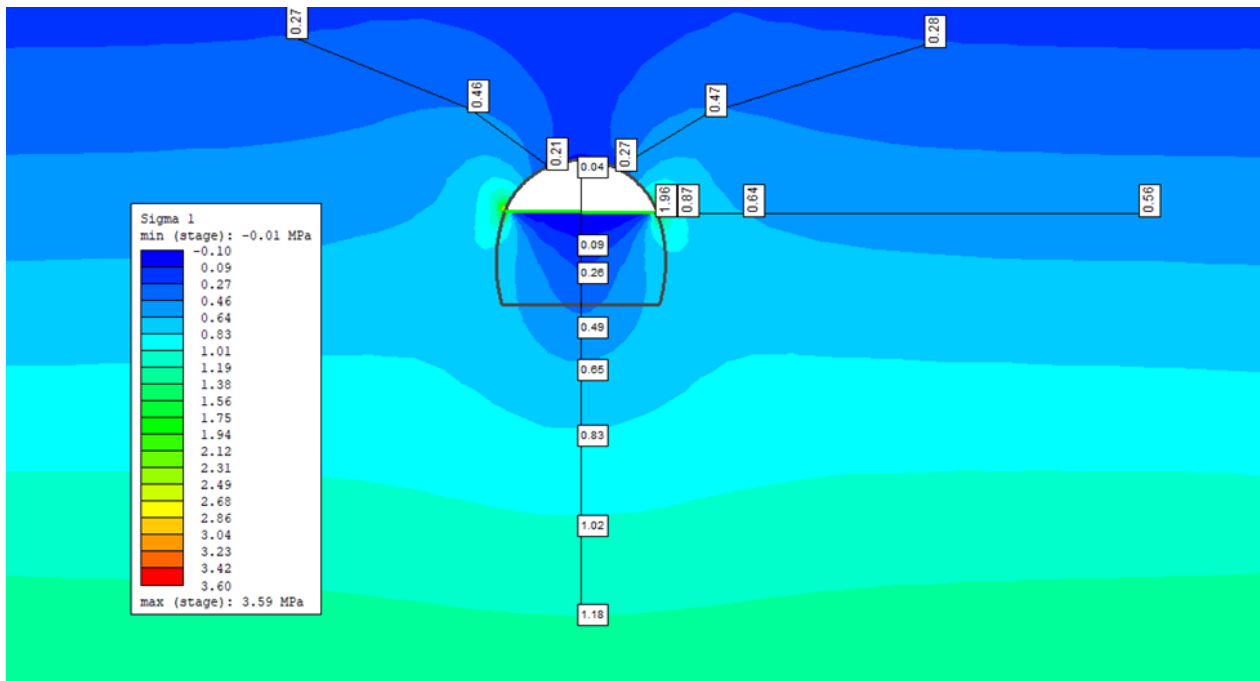
Slika 75: Deformacije oko podzemnog otvora za II kategoriju stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade (za donju graničnu vrijednost)

#### 6.5.4. Razvoj vertikalnih napreznaja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase

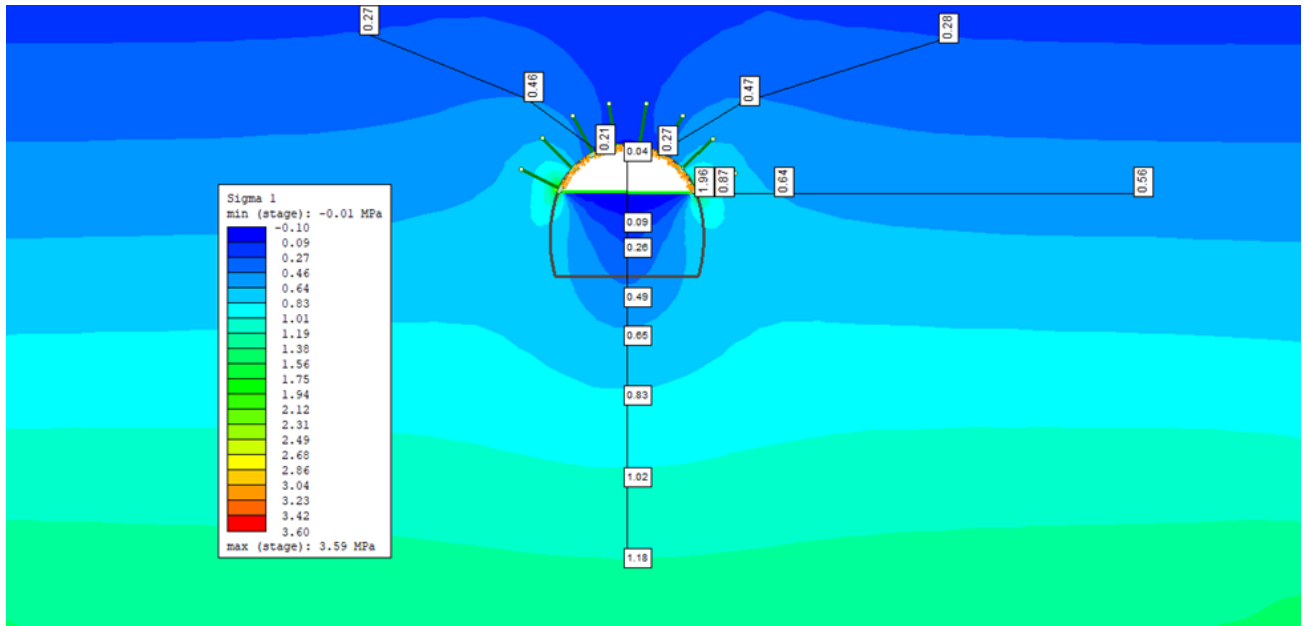
Za IV kategoriju jače okršenu stijenu vrijednosti su pretpostavljene. In situ vertikalna napreznaja rastu s dubinom, a maksimalno vertikalno napreznaje iznosi 1.78 MPa kako se može vidjeti i na slici 76. Kod ove kategorije preporuka je iskop u dvije faze pa tako kod prvog iskopa kalote (slika 77) maksimalno vertikalno napreznaje doseći će veličinu od 3.59 MPa, ali u vrhu kalote ono će iznositi 0.04MPa odnosno nema napreznaja. Podgrada kod prvog iskopa su mlazni beton u debljini od 15 cm, mreža Q131 te adhezijska sidra ( $\Phi=25\text{mm}$ ,  $d=3\text{m}$ , razmak 1,7m) (slika78). Nakon ugradnje podgrade vrijednosti vertikalnih napreznaja se ne mijenjaju. Slijedi drugi iskop (slika 79) ostatka tunela gdje se očituje maksimalna vrijednost napreznaja od 3.10Mpa što je manje napreznaje od 3.59 koje očitano kao maksimalno vertikalno napreznaje nakon iskopa prve faze. U kaloti se napreznaje povećalo na 0.18MPa što i dalje ne iznosi puno, dok u zidovima napreznaje iznosi 1.33 MPa. Podgrade se kod IV kategorije izvodi i u zidovima što je svakako novost u odnosu na II kategoriju te se sastoji od mlaznog betona, nešto manje debljine nego u svodu, 10 cm, mreže q131 i adhezijska sidra istih dimenzija, ali na razmaku od 2 metra (slika 80). Podgradom napreznaja u podzemnom iskopu ostaju nepromjenjiva. Ovdje se može vidjeti da dolazi do plastifikacije u zoni bočnih zidova.



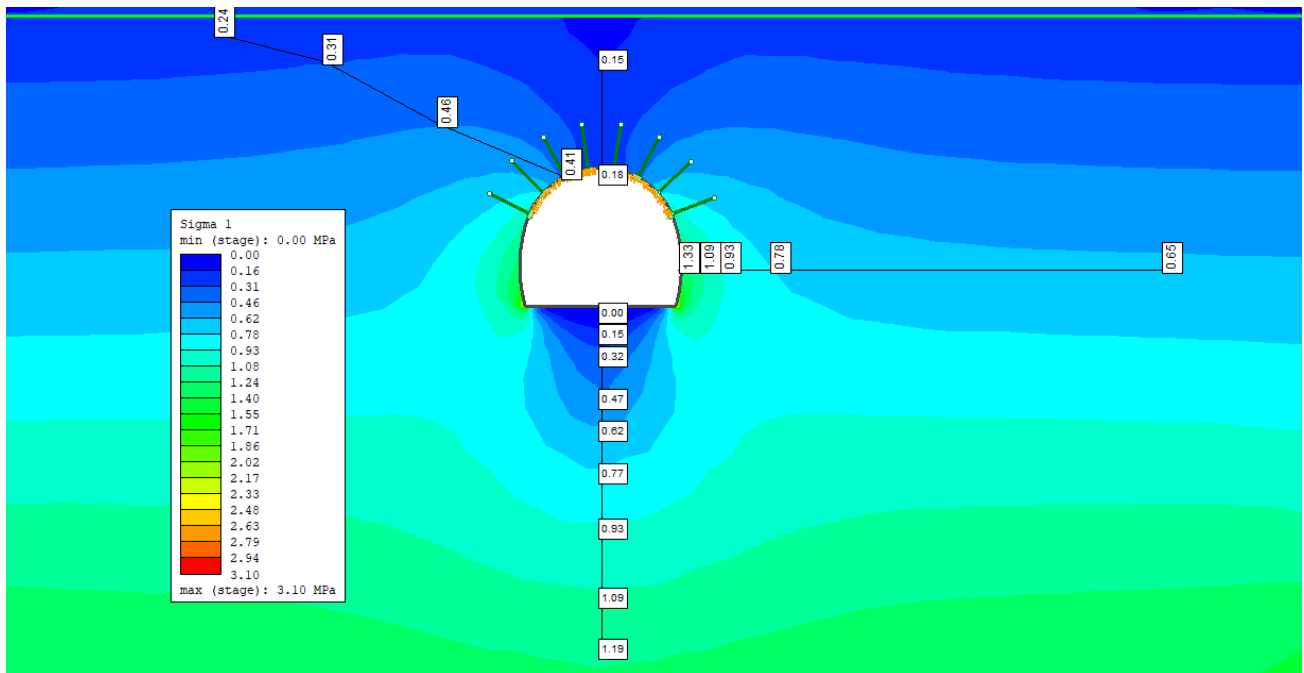
Slika 76: Vertikalna naprezanja u stijenskoj masi IV kategorije za in situ stanje materijala



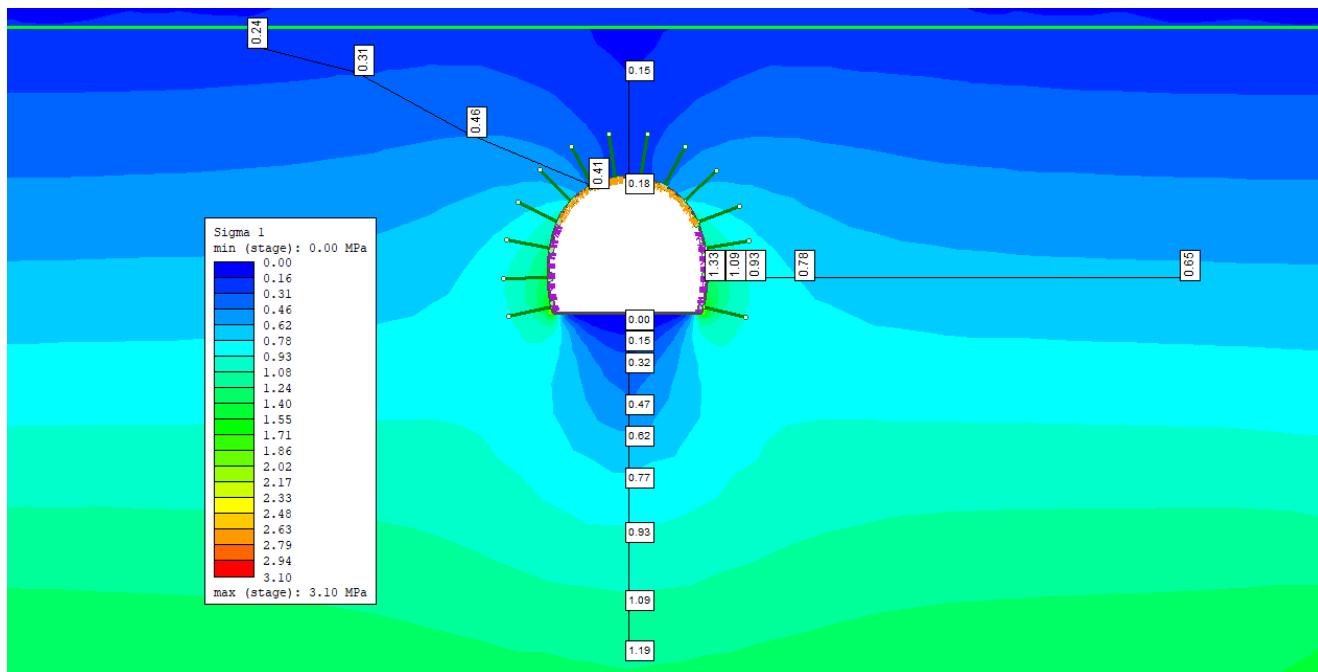
Slika 77: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon prve faze iskopa



Slika 78: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u kaloti tunela



Slika 79: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon druge faze iskopa

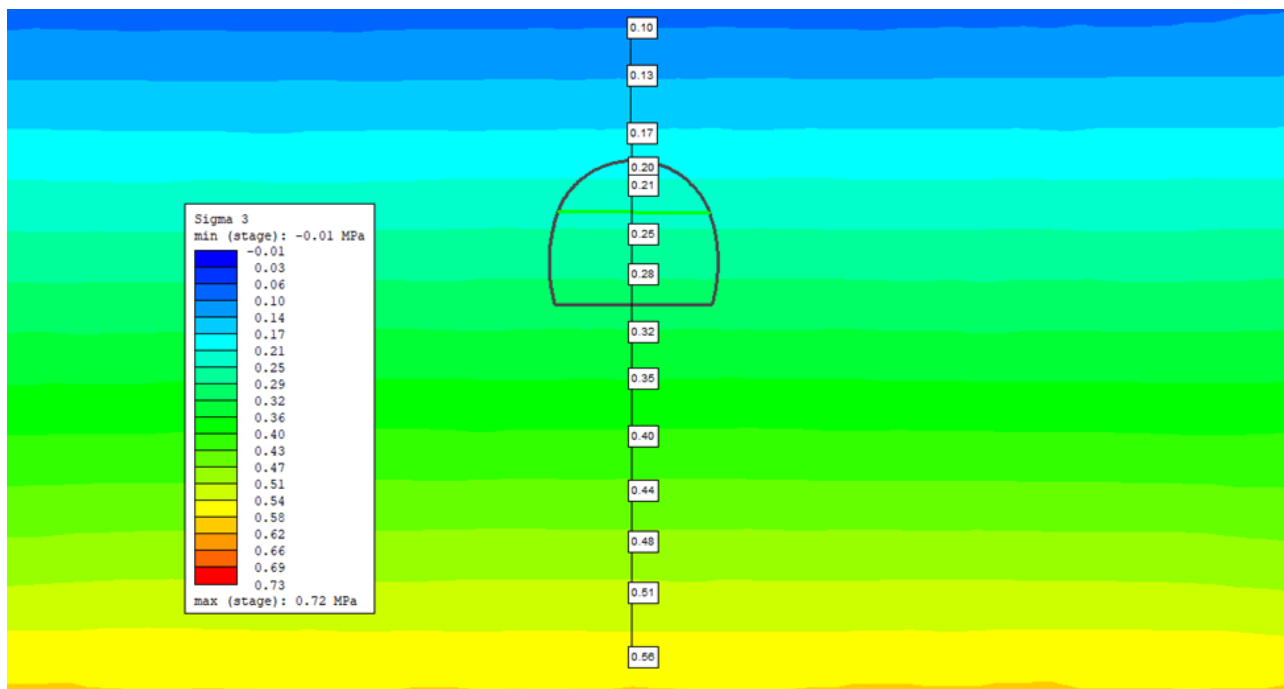


Slika 80: Vertikalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop IV kategorije stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela

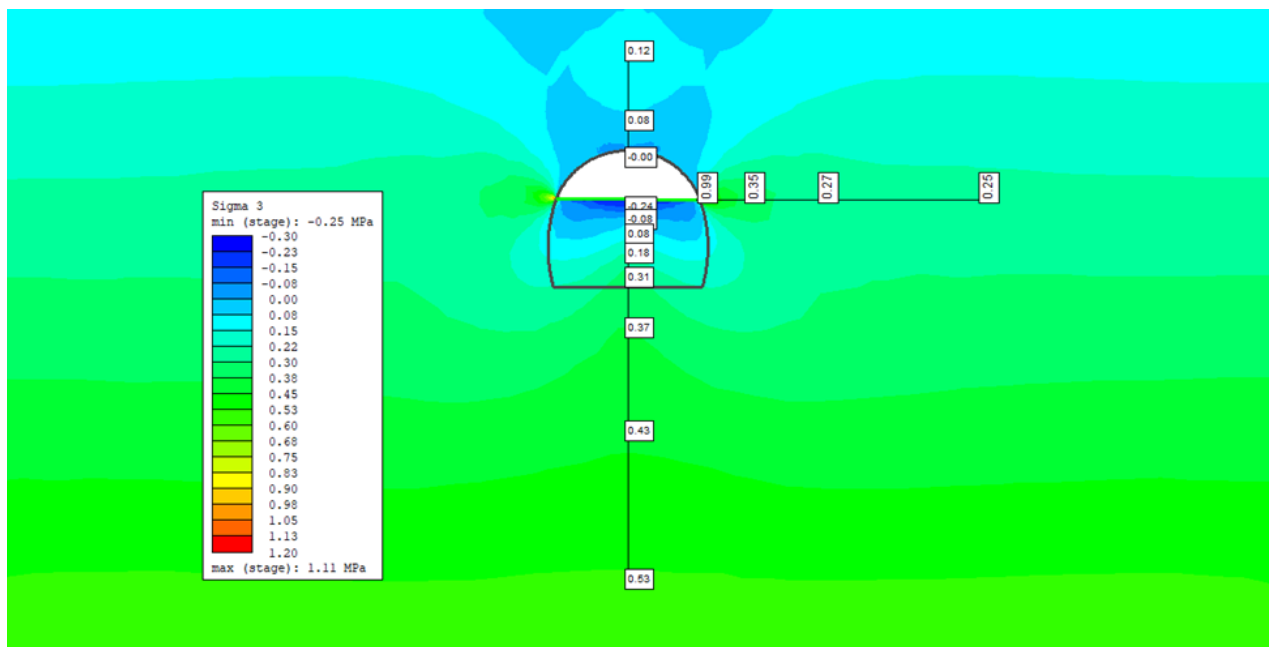
### 6.5.5. Razvoj horizontalnih naprezanja oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase

Horizontalna naprezanja u IV kategoriji imaju svoj maksimum kod in situ modela koji iznosi 0.72 MPa (slika 81) i od iskopa prve faze tunela razlikuje se za 0.39 MPa te ono iznosi u prvoj fazi iskopa 1.11 MPa (slika 82). Osim promjene u vrijednosti maksimalnih naprezanja vidimo da naprezanja u kaloti iznose 0.00 MPa odnosno nema horizontalnih naprezanja. Podgrada bitno ne utječe na vrijednosti horizontalnih naprezanja (slika 83). Slijedi druga faza iskopa tunela gdje se maksimalna naprezanja vraćaju na vrijednost koju su imali u in situ modelu od 0.72 MPa (slika 84). Kroz cijelu konturu iskopa prisutna su minimalna naprezanja i nakon ugradnje podgrade (slika 85).

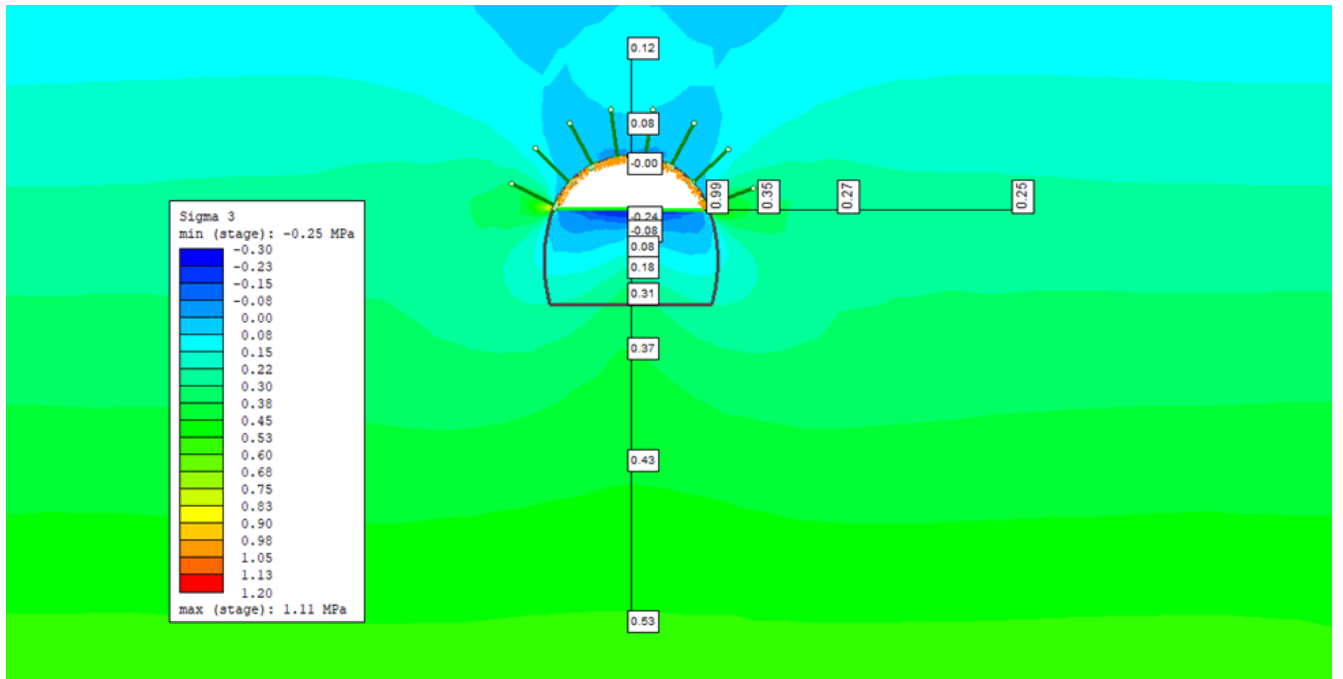




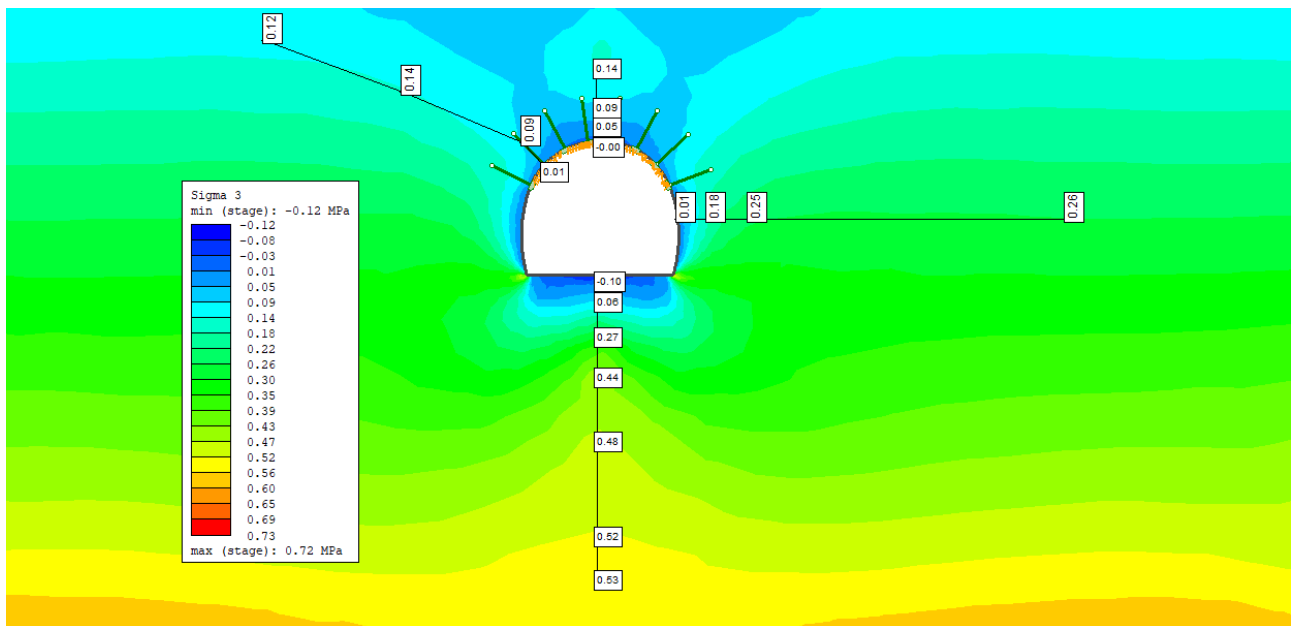
Slika 81: Horizontalna naprezanja u stijenskoj masi IV kategorije za in situ stanje materijala



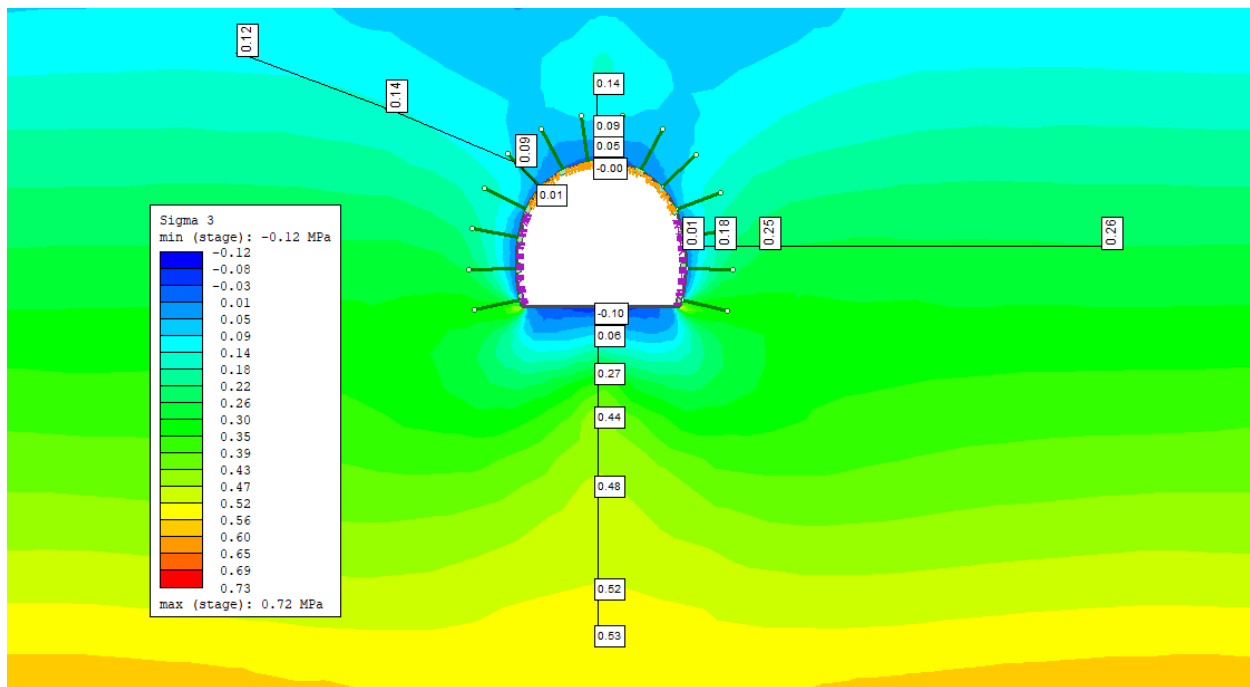
Slika 82: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za iskop IV kategorije stijenske mase nakon izvedbe prve faze iskopa



Slika 83: Horizontalna naprezanja za podzemni otvor za iskop IV kategorije stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u kalotu tunela



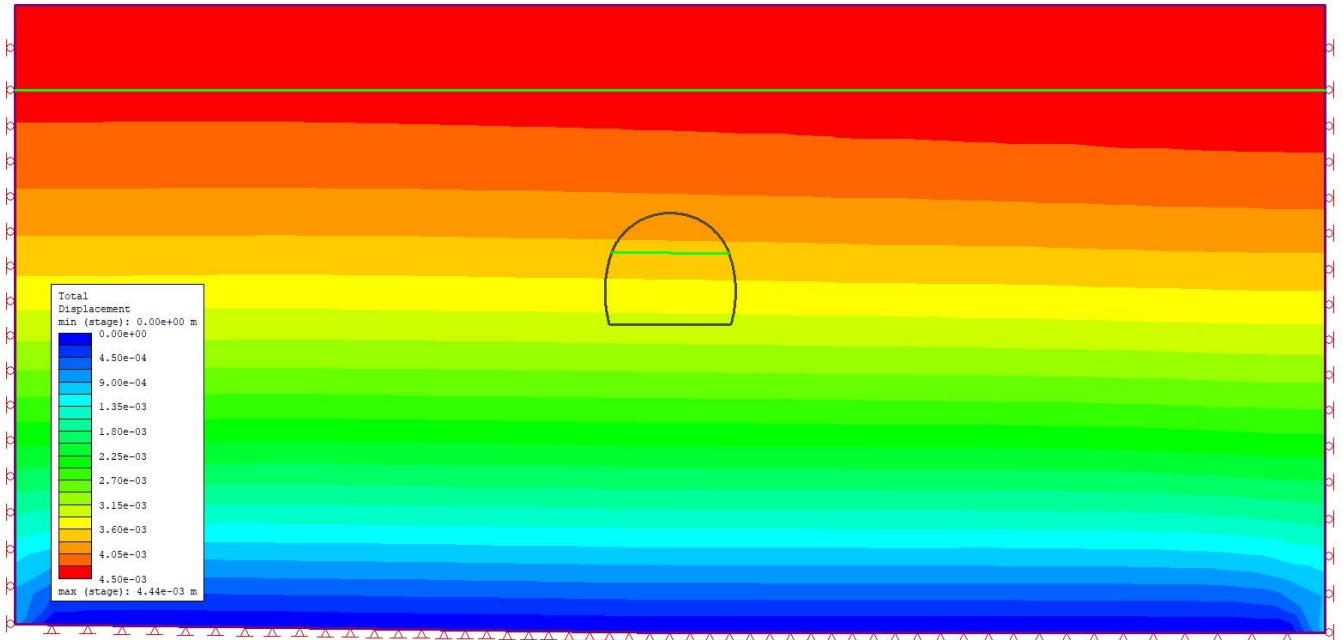
Slika 84: Horizontalna naprezanja oko podzemnog otvora za IV kategoriju stijenske mase nakon druge faze iskopa



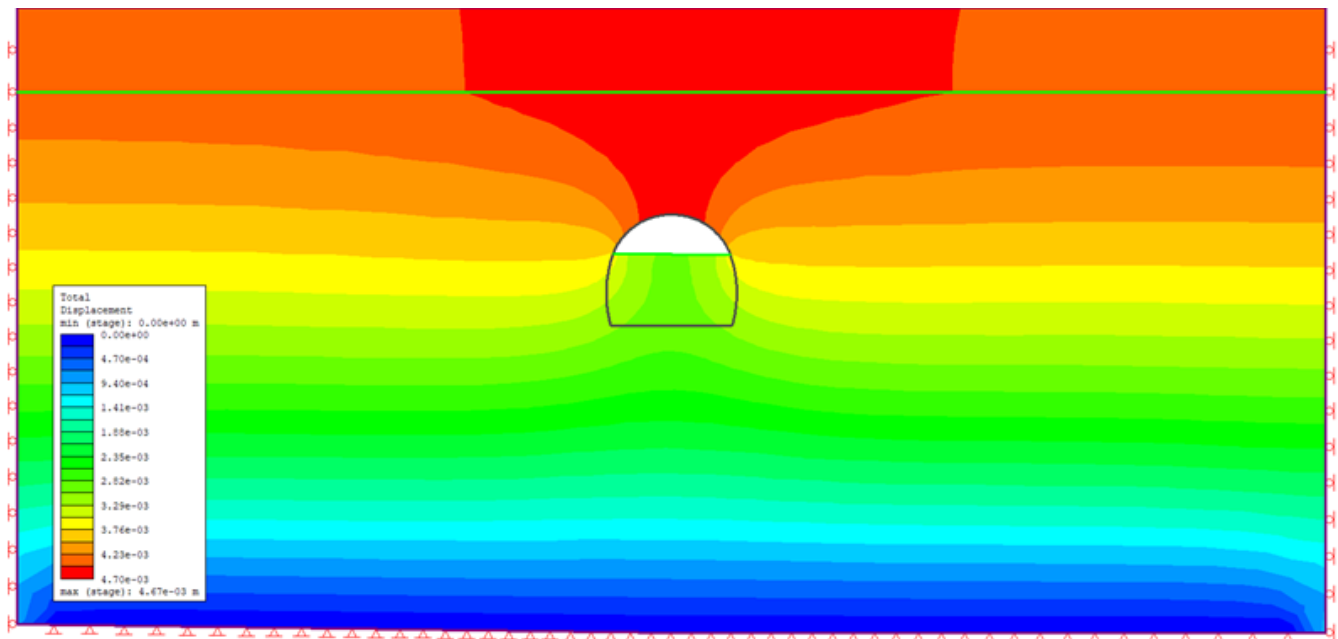
Slika 85: Horizontalno naprezanje oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela

### 6.5.6. Razvoj deformacija oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase

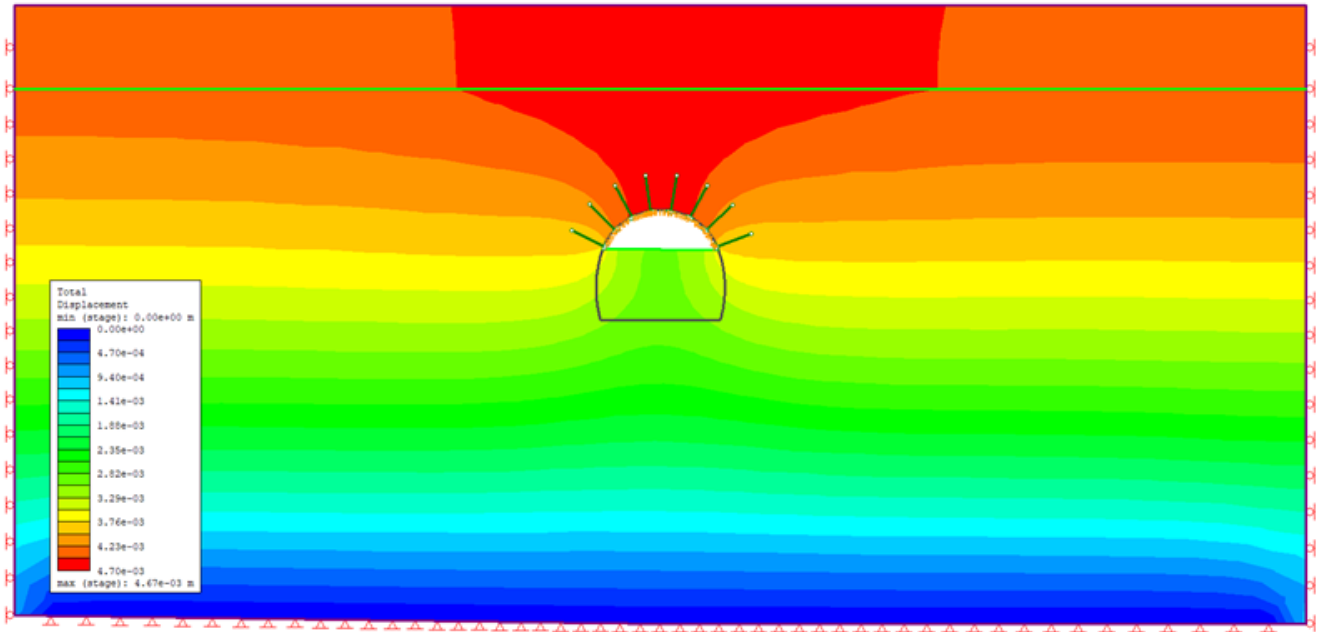
Vrijednost maksimalne deformacije kod IV kategorije za in situ stanje modela iznosi  $4.44 \times 10^{-3}$  m (slika 86) te je vidljivo da se pomaci dubinom smanjuju. Vrijednost maksimalnih deformacija tijekom prvog iskopa je  $4.67 \times 10^{-3}$  m i skoro pa se lokalizira iznad kalote tunela (slika 87), dok je nakon druge faze iskopa ta vrijednost  $4.76 \times 10^{-3}$  m (slika 89). U oba slučaja nakon ugradnje podgrade nema promjene u području vrijednosti maksimalnih deformacija (slika 88 i 90). Ako usporedimo sva tri stanja modela može se zaključiti da su najveći pomaci prisutni kod druge faze iskopa tunela.



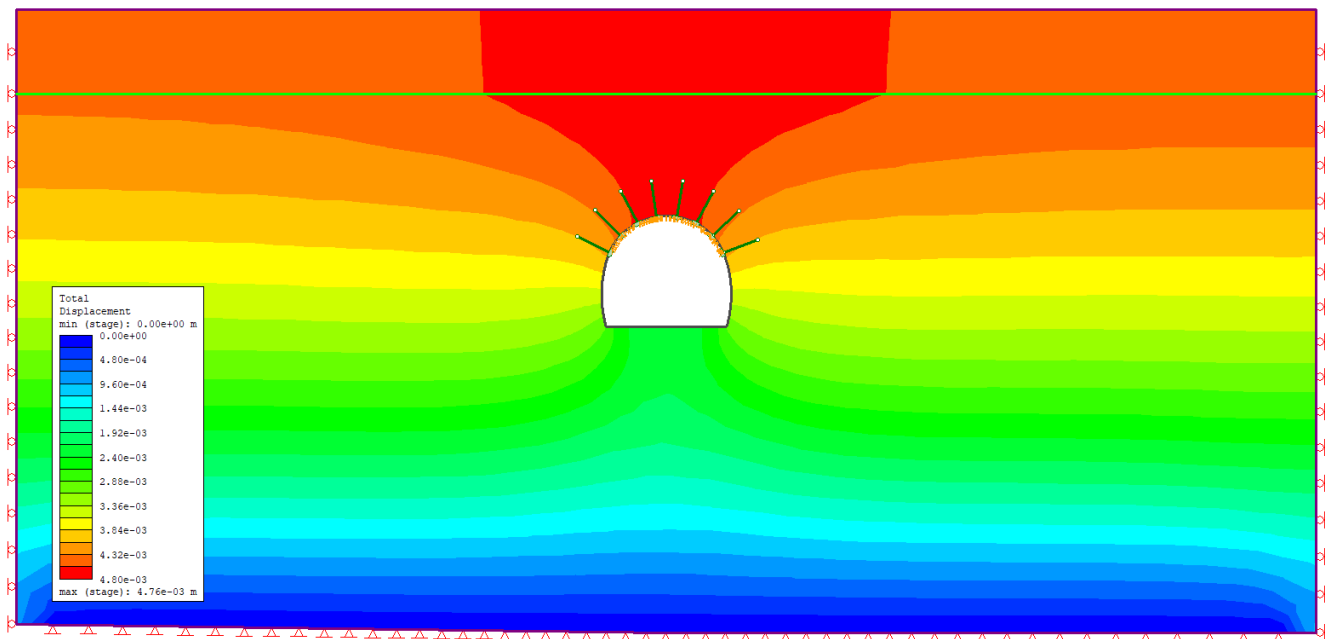
Slika 86: Deformacije u IV kategoriji stijenske mase za in situ stanje materijala



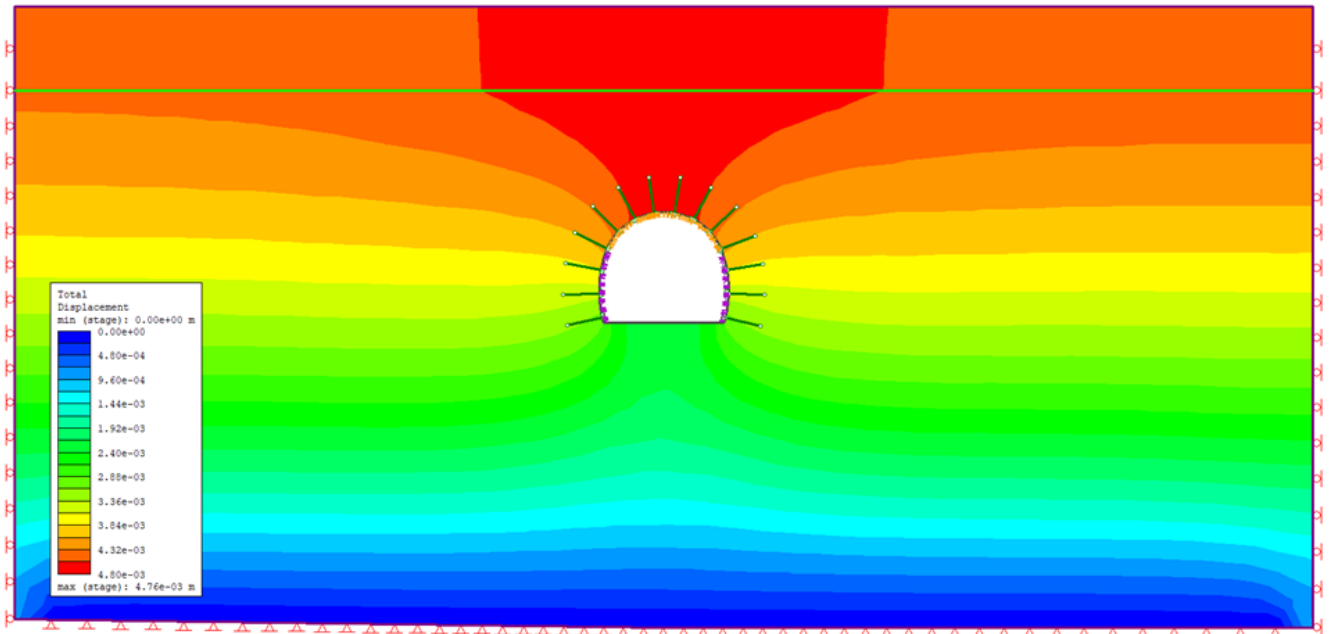
Slika 87: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon prve faze iskopa



*Slika 88: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon izvedbe primarne podgrade u kaloti tunela*



*Slika 89: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop IV kategoriji stijenske mase nakon druge faze iskopa*



*Slika 90: Deformacije oko podzemnog otvora za iskop u IV kategoriji stijenske mase nakon ugradnje primarne podgrade u zidove tunela*

## 7. ZAKLJUČAK

Koliko god to bilo zahtjevno i koliko kod znanja iziskuje mora se priznati da su pothvati u podzemlju i zanimljivi i neočekivani te svakako nisu za nekoga tko nije spreman na izazov. U današnje vrijeme kada izvedbama i ambicijama nema kraja još je postalo zahtjevnije baviti se podzemnim iskopima. Geologija terena je sve zahtjevnija, uvjeti su sve teži, ali mehanizacija je sve bolja i iskustva su veća. Tradicionalne metode gotovo više nitko ne koristi osim možda u iznimnim situacijama kada su jedini preostali izbor, ali je zato se s Novom austrijskom metodom može povezati skoro svaka izgradnja tunela. dobar primjer daje naša zemlja Republika Hrvatska u kojoj je svaki tunel upravo izveden prateći tu metodu. NATM osim što pruža efikasnost, ekonomičnost, optimalnosti, brzinu ona pruža i sigurnost što je jako veliki i bitan faktor kod tunelogradnje. Može se reći jedna od najvećih vrlina je praćenje ponašanja stijenske mase tijekom iskopa i napredovanja tunela što uvelike omogućava efikasno djelovanje kako bi se spriječila katastrofa. NATM iako ima svoje principe kojima se vodi i za koje je praksa potvrdila kako su uistinu ispravni, podložna je prilagodbi različitim inženjersko geološkim i geotehničkim osobinama stijene ili tla.

Kako je već i spomenuto da je većina tunela u Hrvatskoj izvedena prateći ovu metodu ni tunel Kamenice nije iznimka, te je on izveden u sklopu projekta „Izgradnje pristupnih cesta mostu Pelješac“. Metoda iskopa je bilo konturno miniranje, a od podgrade se koristio mlazni beton u debljini od 5 do 20 cm sve ovisno o geološkim značajkama, adhezijska štapna sidra te mreža Q131. Podgrađivalo se i napredovalo u skladu sa smjernicama. Nakon sprovedene analize može se zaključiti da su i naprezanja kako vertikalna tako i horizontalna kroz cijelu izvedbu tunela malih vrijednosti i kako ugradnja podgrade ne radi razliku u vrijednostima. Puno veća je razlika ukoliko se uspoređuju deformacije koje se događaju u II kategoriji i u IV kategoriji danog materijala. Uočava se kako iako se pomaci povećavaju nakon iskopa i u jednoj i u drugoj danoj kategoriji, kod II kategorije s  $1.41 \times 10^{-3}$  m povećava se na  $1.53 \times 10^{-3}$  m, dok se za IV kategoriju od  $4.44 \times 10^{-3}$  m što je maksimalna deformacija u in situ-u, preko vrijednosti pri prvom iskopu od  $4.67 \times 10^{-3}$  m dolazi se do zadnje deformacije nakon drugog iskopa od  $4.76 \times 10^{-3}$  m, vidimo da su puno većih veličina pomaci IV kategorije što se dalo i naslutiti s obzirom da se radi o stijenskoj masi manje čvrstoće.

Iako je NATM od prvog dana pa do dan danas praćena raznim kritikama, svakim danom svjedoćimo suprotno. Ono što je bitno je da nove generacije nastave gdje one stare stanu kod razvijanja Nove austrijske metode jer svakim novom investicijom i iskustvom ona se upotpunjuje.



## 8. LITERATURA

- [1] Tatiya, R., *Civil excavations and tunnelling – a practical guide*, Tohomas Telford Publishing, London, 2005.
- [2] *Tunel / Hrvatska enciklopedija* (<https://www.enciklopedija.hr/clanak/tunel>) pristup 29.8.2024.
- [3] Vrkljan, I., *Podzemne građevine i tuneli*, Interna skripta Građevinskog fakulteta u Rijeci, Rijeka, 2003.
- [4] Dugonjić Jovančević, S., *Podzemne građevine i tuneli: interna skripta*.  
Građevinski fakultet sveučilišta u Rijeci
- [5] Frgić, L., Gradiški, K., *Tunelogradnja*, Rudarsko -geološko – naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015. (<https://www.scribd.com/document/336062501/tunelogradnja-spojeno>)  
29.8.2024.
- [6] Hemphill B., G., *Practical Tunnel Construction*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [7] ] Hudec, M. , Kolić, D. , Hudec, S. , *Tuneli - iskop i primarna podgrada*, Hrvatska udruga za betonsko inženjerstvo, Zagreb, 2009.
- [8] Ivas, D. , *Opterećenje na tunelsku podgradu i primjena nove austrijske tunelske metode*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2019.  
(<https://zir.nsk.hr/islandora/object/rgn%3A1053/datastream/PDF/view>) pristup 30.8.2024.
- [9] Bošnjak, I. , *Nova austrijska tunelska metoda*, Završni rad, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2023.  
(<https://repository.gradri.uniri.hr/islandora/object/gradri%3A1554/datastream/PDF/view>) pristup  
30.8.2024.
- [10] Ilijaš, L., *Nova austrijska tunelska metoda, NATM*, Diplomski rad, Geotehnički fakultet sveučilišta u Zagrebu, Varaždin 2018. (<https://core.ac.uk/download/pdf/197487483.pdf>) pristup  
30.8.2024.
- [11] Krsnik, J., 1993., *Izrada podzemnih rudničkih prostorija i tunela*: interna skripta.  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
- [12] Kovačević, M., S., *Tunelogradnja*, Predavanje 13, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009.  
([https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI\\_13.predavanje\\_Tunelogradnja.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf)) pristup  
30.8.2024.

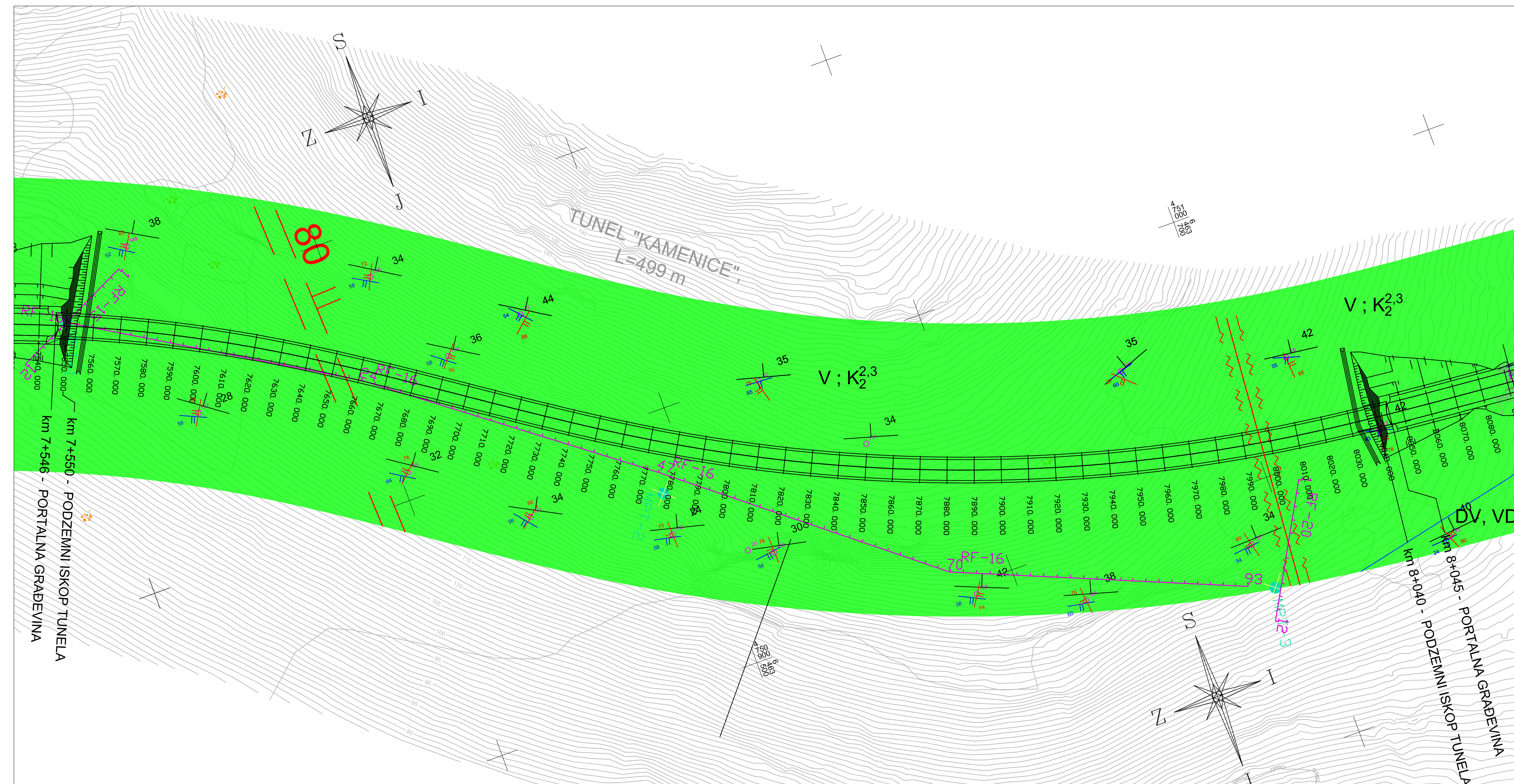
- [13] Grob., H.: Systematik der tunnelbauweisen, SIA Vortrag, 1975.
- [14] Ritter, W., Statik der Tunnelgewölbe, Berlin, 1879.
- [15] Engesser, F., Über den Erodruck gegen innere Stützwände (Tunnelwände), Deutsche Bauzeitung, 1882.
- [16] Wiesmann., E., Über Gebirgsdruck. In: Schweizerische Bauzeitung 60 (1912)
- [17] Mohr, F.,: Kraft und Verformung in der Gebirgsmechanik unter Tage. Deutsche Baugrundtagung, Köln, 1957.
- [18] Maillart, R.: Über Gebirgsdruck. Schweizerische Bauzeitung-Band 81. Nr – 14, 1923.
- [19] Golser, J., Controversial Views on NATM, Felsbau 14/96, 1996.
- [20] <https://povezanahrvatska.eu/vijesti/tunel-kamenice-ugledao-svjetlo-dana-ceste-na-peljescu-primakle-se-mostu/>
- [21] *Glavni građevinski projekt tunela Kamenice*, Institut IGH d.d., Zavod za geotehniku, Zagreb 2016./2018.

## **9. GRAFIČKI PRILOZI**


9.1. Situacija, M 1:1000 – preuzeto Institut IGH d.d.


9.2. Projektni uzdužni geotehnički profil – M 1:1000/1000 – preuzeto Institut IGH d.d.











### LEGENDA:


 prg , dr ; el ; Q - prahovita glina s fragmentima drobine stijene iz podloge u omjeru 70 : 30, smeđe boje ; rahlo do srednje zbijeno tlo, debljine do 1 m, u podlozi dolomit, vapnenački dolomit ili vapnenac  
KVARTAR - ELUVIJ

 V; K<sub>2,3</sub><sup>2,3</sup> - vapnenac dobro uslojen, svjetlo smeđe boje  
GORNJA KREDA- TURON, SENON

 DV, VD; K<sub>2,3</sub><sup>2,3</sup>, K<sub>3</sub><sup>3</sup> - dolomitni vapnenci i vapnenački dolomiti s proslojcima vapnenca i dolomita u vertikalnoj i lateralnoj izmjeni, dobro uslojeni, svjetlo sive ili sivosmeđe boje;  
GORNJA KREDA - TURON, SENON

-  geološka granica, normalna
-  položaj sloja s oznakom smjera i kuta nagiba
-  položaj diskontinuiteta OR iz strukture
-  položaj diskontinuiteta OB iz strukture
-  reversni rasjed, navlaka
-  zona pukotina, rasjed s oznakom smjera i kuta nagiba
-  rasjed s razlomljenom zonom
-  MPS-1
-  istraživačka bušotina
-  RF-02
-  profil geofizičkih istraživanja

IZAJENA BR.	OPIS	DATUM	POTPIS

INVESTITOR: HRVATSKE CESTE d.o.o. za upravljanje, građenje i održavanje državnih cesta 10000 ZAGREB, Vončinina 3	 INSTITUT IGH d.d.
---	--

VRSTA PROJEKTA (RAZINA I STRUKA): GLAVNI GRAĐEVINSKI PROJEKT	ZAJEDNIČKA OZNAKA PROJEKTA: GP 0245/05
---	---

GRAĐEVINA: PRISTUPNE CESTE MOSTU PELJEŠAC
--

MAPA: PELJ - GP - G 0160
-----------------------------

NAZIV MAPE: GEOTEHNIČKI PROJEKT TUNELA KAMENICE
--

SADRŽAJ: SITUACIJA
-----------------------

GLAVNI PROJEKTANT: DARKO SVIRIČ, dipl.ing.grad.	MJERILO: 1:1000
---	--------------------

PROJEKTANT: DONAT UŽAREVIĆ, dipl.ing.grad.	DATUM: travanj, 2014.
--	--------------------------

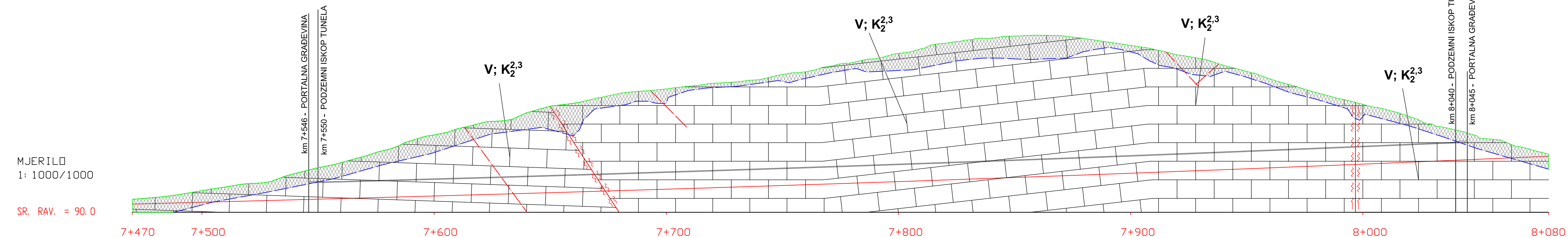
BROJ PROJEKTA: 4000-1232-2014
----------------------------------

SURADNICI: GORAN STOJKOVIĆ, struč.spec.ing.grad. dr.sc. RENATO BULJAN, dipl.ing.geol. VLATKO GULAM, dipl.ing.geol.	BROJ PRILOGA: 901
--	----------------------

OZNAKA DOKUMENTA: IGH-PELJ-GP-G0160-901
--



## TUNEL "KAMENICE" L=499 m

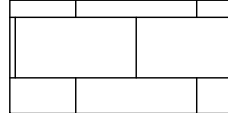
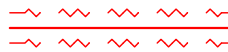






MJERILO  
1: 1000/1000


SR. RAV. = 90.0

KOTE NIVELETE	7470.00	95.62	-93.53	7480.00	-96.42	-93.80	7490.00	-97.60	-94.07	7500.00	-99.32	-94.33	7510.00	-100.88	-94.60	7520.00	-102.33	-94.87	7530.00	-103.36	-95.13	7540.00	-106.66	-95.40	7550.00	-109.19	-95.67	7560.00	-111.43	-95.93	7570.00	-114.14	-96.20	7580.00	-117.02	-96.47	7590.00	-120.83	-96.74	7600.00	-123.33	-97.02	7610.00	-125.94	-97.29	7620.00	-128.37	-97.58	7630.00	-129.42	-97.86	7640.00	-132.90	-98.15	7650.00	-135.72	-98.44	7660.00	-136.97	-98.74	7670.00	-139.16	-99.04	7680.00	-141.21	-99.34	7690.00	-142.25	-99.64	7700.00	-143.12	-99.95	7710.00	-144.30	-100.26	7720.00	-145.53	-100.58	7730.00	-146.14	-100.90	7740.00	-147.10	-101.22	7750.00	-149.31	-101.54	7760.00	-150.52	-101.87	7770.00	-152.76	-102.20	7780.00	-154.43	-102.54	7790.00	-156.16	-102.88	7800.00	-158.42	-103.22	7810.00	-160.48	-103.56	7820.00	-162.80	-103.91	7830.00	-164.21	-104.26	7840.00	-165.02	-104.62	7850.00	-165.90	-104.98	7860.00	-166.27	-105.34	7870.00	-166.03	-105.71	7880.00	-164.83	-106.07	7890.00	-163.35	-106.45	7900.00	-161.89	-106.82	7910.00	-160.18	-107.20	7920.00	-157.84	-107.58	7930.00	-156.23	-107.97	7940.00	-153.32	-108.36	7950.00	-150.67	-108.75	7960.00	-147.47	-109.14	7970.00	-144.55	-109.54	7980.00	-141.54	-109.94	7990.00	-138.92	-110.35	8000.00	-136.51	-110.76	8010.00	-134.23	-111.17	8020.00	-131.25	-111.58	8030.00	-127.99	-112.00	8040.00	-125.49	-112.42	8050.00	-122.12	-112.85	8060.00	-120.84	-113.28	8070.00	-117.73	-113.71
KOTE TERENA	7470.00	95.62	-93.53	7480.00	-96.42	-93.80	7490.00	-97.60	-94.07	7500.00	-99.32	-94.33	7510.00	-100.88	-94.60	7520.00	-102.33	-94.87	7530.00	-103.36	-95.13	7540.00	-106.66	-95.40	7550.00	-109.19	-95.67	7560.00	-111.43	-95.93	7570.00	-114.14	-96.20	7580.00	-117.02	-96.47	7590.00	-120.83	-96.74	7600.00	-123.33	-97.02	7610.00	-125.94	-97.29	7620.00	-128.37	-97.58	7630.00	-129.42	-97.86	7640.00	-132.90	-98.15	7650.00	-135.72	-98.44	7660.00	-136.97	-98.74	7670.00	-139.16	-99.04	7680.00	-141.21	-99.34	7690.00	-142.25	-99.64	7700.00	-143.12	-99.95	7710.00	-144.30	-100.26	7720.00	-145.53	-100.58	7730.00	-146.14	-100.90	7740.00	-147.10	-101.22	7750.00	-149.31	-101.54	7760.00	-150.52	-101.87	7770.00	-152.76	-102.20	7780.00	-154.43	-102.54	7790.00	-156.16	-102.88	7800.00	-158.42	-103.22	7810.00	-160.48	-103.56	7820.00	-162.80	-103.91	7830.00	-164.21	-104.26	7840.00	-165.02	-104.62	7850.00	-165.90	-104.98	7860.00	-166.27	-105.34	7870.00	-166.03	-105.71	7880.00	-164.83	-106.07	7890.00	-163.35	-106.45	7900.00	-161.89	-106.82	7910.00	-160.18	-107.20	7920.00	-157.84	-107.58	7930.00	-156.23	-107.97	7940.00	-153.32	-108.36	7950.00	-150.67	-108.75	7960.00	-147.47	-109.14	7970.00	-144.55	-109.54	7980.00	-141.54	-109.94	7990.00	-138.92	-110.35	8000.00	-136.51	-110.76	8010.00	-134.23	-111.17	8020.00	-131.25	-111.58	8030.00	-127.99	-112.00	8040.00	-125.49	-112.42	8050.00	-122.12	-112.85	8060.00	-120.84	-113.28	8070.00	-117.73	-113.71
STACIONAZA	7470.00	95.62	-93.53	7480.00	-96.42	-93.80	7490.00	-97.60	-94.07	7500.00	-99.32	-94.33	7510.00	-100.88	-94.60	7520.00	-102.33	-94.87	7530.00	-103.36	-95.13	7540.00	-106.66	-95.40	7550.00	-109.19	-95.67	7560.00	-111.43	-95.93	7570.00	-114.14	-96.20	7580.00	-117.02	-96.47	7590.00	-120.83	-96.74	7600.00	-123.33	-97.02	7610.00	-125.94	-97.29	7620.00	-128.37	-97.58	7630.00	-129.42	-97.86	7640.00	-132.90	-98.15	7650.00	-135.72	-98.44	7660.00	-136.97	-98.74	7670.00	-139.16	-99.04	7680.00	-141.21	-99.34	7690.00	-142.25	-99.64	7700.00	-143.12	-99.95	7710.00	-144.30	-100.26	7720.00	-145.53	-100.58	7730.00	-146.14	-100.90	7740.00	-147.10	-101.22	7750.00	-149.31	-101.54	7760.00	-150.52	-101.87	7770.00	-152.76	-102.20	7780.00	-154.43	-102.54	7790.00	-156.16	-102.88	7800.00	-158.42	-103.22	7810.00	-160.48	-103.56	7820.00	-162.80	-103.91	7830.00	-164.21	-104.26	7840.00	-165.02	-104.62	7850.00	-165.90	-104.98	7860.00	-166.27	-105.34	7870.00	-166.03	-105.71	7880.00	-164.83	-106.07	7890.00	-163.35	-106.45	7900.00	-161.89	-106.82	7910.00	-160.18	-107.20	7920.00	-157.84	-107.58	7930.00	-156.23	-107.97	7940.00	-153.32	-108.36	7950.00	-150.67	-108.75	7960.00	-147.47	-109.14	7970.00	-144.55	-109.54	7980.00	-141.54	-109.94	7990.00	-138.92	-110.35	8000.00	-136.51	-110.76	8010.00	-134.23	-111.17	8020.00	-131.25	-111.58	8030.00	-127.99	-112.00	8040.00	-125.49	-112.42	8050.00	-122.12	-112.85	8060.00	-120.84	-113.28	8070.00	-117.73	-113.71
LITOSTRATIGRAFSKA JEDINICA	RUDISTNI VAPNENAC V; K <sub>2,3</sub>																																																																																																																																																																																						
STRUKTURNI BLOK	A																																																																																																																																																																																						
GEOTEHNIČKA JEDINICA	1																																																																																																																																																																																						
GSI	MALI NADSLOJ																								MALI NADSLOJ																																																																																																																																																														
RMR	H ≤ B																								H ≤ B																																																																																																																																																														
KATEGORIZACIJA STIJENSKE MASE	II / III (55% II KAT; 35% III KAT; 7% IV KAT; 3% V KAT)																																																																																																																																																																																						
Q	2.19 - 15																																																																																																																																																																																						
KATEGORIJA PODGRADE	23/17 - 14/0 (5/3- 3/0)																																																																																																																																																																																						
TIP PODGRADNOG SKLOPA	50% TIP V; 50% TIP Va																								50% TIP V; 50% TIP Va																																																																																																																																																														

### LEGENDA:

-  Vapnenac, dobro uslojen, sivosmeđe boje  
GORNJA KREDA - TUROM, SENON V; K<sub>2,3</sub>
-  Rasjed sa razlomljenom zonom
-  Rasjed utvrđen geofizičkim istraživačkim radovima
-  Niveleta tunela
-  granica utvrđena geofizičkim istraživačkim radovima
-  Površinska i gornja zona trošenja (prema seizmičkom refrakcijskom profilu)

IZAJENA BR.	OPIS	DATUM	POTPIS

INVESTITOR: HRVATSKE CESTE d.o.o. za upravljanje, građenje i održavanje državnih cesta 10000 ZAGREB, Vončinina 3		 INSTITUT IGH d.d.	
VRSTA PROJEKTA (RAZINA I STRUKA): GLAVNI GRAĐEVINSKI PROJEKT		ZAJEDNIČKA OZNAKA PROJEKTA: GP 0245/05	
GRADEVINA: PRISTUPNE CESTE MOSTU PELJEŠAC			
MAPA: PELJ - GP - G 0160			
NAZIV MAPE: GEOTEHNIČKI PROJEKT TUNELA KAMENICE			
SADRŽAJ: PROJEKTNI UZDUŽNI GEOTEHNIČKI PROFIL			
GLAVNI PROJEKTANT: DARKO SVIRAČ, dipl.ing.grad.	MJERILO: 1:1000/1000		
PROJEKTANT: DONAT UŽAREVIĆ, dipl.ing.grad.	DATUM: travanj, 2014.		
	BROJ PROJEKTA: 4000-1232-2014		
SURADNICI: GORAN STOJKOVIĆ, struč.spec.ing.grad.	BROJ PRILOGA: 1001		
OZNAKA DOKUMENTA: IGH-PELJ-GP-G0160-1001			