

Deterministička i probalistička analiza karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade

Brkić, Ana-Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:115853>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana-Marija Brkić

**DETERMINISTIČKA I PROBABILISTIČKA
ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA
STIJENSKE MASE I PODGRADE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ana-Marija Brkić

**DETERMINISTIČKA I PROBABILISTIČKA
ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA
STIJENSKE MASE I PODGRADE**

DIPLOMSKI RAD

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ana-Marija Brkić

**DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC
ANALYSIS OF CHARACTERISTIC CURVES OF
ROCK MASS AND SUPPORT**

MASTER THESIS

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Librić

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

ZAHVALE

Ovim putem želim izraziti duboku zahvalnost svima koji su me podržavali i pomagali tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Prije svega, hvala mentorici izv. prof. dr. sc. Lovorki Librić čije su mentorstvo i stručnost bili ključni za uspjeh ovog rada.

Najiskrenije zahvaljujem svojim roditeljima, koji su mi tijekom cijelog školovanja i studija pružali neizmjernu ljubav, potporu i razumijevanje. Bez njihove stalne motivacije, strpljenja i vjerovanja u mene, ne bih bila u mogućnosti postići ovo što sam danas.

Posebnu zahvalnost dugujem svom bratu za njegovu tehničku pomoć i podršku. Njegovo znanje i savjeti u trenucima kada su mi bili najpotrebniji uvelike su mi olakšali studiranje.

Na kraju, hvala svim prijateljima koji su me bodrili i vjerovali u mene kroz cijeli ovaj proces.

SAŽETAK

Rad se bavi tunelogradnjom, s naglaskom na usporedbu klasičnih metoda i modernih tehnologija u izgradnji tunela, kao što su Nova austrijska tunelska metoda (NATM) i Norveška metoda tunelogradnje. Cilj rada je prikazati važnost primarnog podgradnog sustava u osiguravanju stabilnosti i sigurnosti tunela prije postavljanja sekundarne obloge. Teorijsko-metodološki okvir uključuje analizu interakcije između stijenske mase i podgradnog sustava kroz karakteristične krivulje koje pomažu inženjerima da bolje razumiju kako podgradni sustav utječe na stijensku masu. Duncan Fama metoda koristi se za određivanje karakteristične krivulje stijenske mase na temelju parametara tunela i stijenske mase. U radu se također provode determinističke i probabilističke analize stabilnosti tunela, bez podgradnog sustava i s primjenom podgradnog sustava od sidara i mlaznog betona. Zaključci rada naglašavaju važnost razumijevanja interakcije između stijenske mase i podgrade kako bi se optimizirala sigurnost i stabilnost tunela, uz primjenu suvremenih metoda tunelogradnje.

Ključne riječi: tunelogradnja; karakteristična krivulja; stijenska masa; podgrada Duncan Fama; parametarska analiza; deterministička analiza; probabilistička analiza

SUMMARY

The paper discusses tunnel construction, focusing on the comparison between classical methods and modern technologies, such as the New Austrian Tunneling Method (NATM) and the Norwegian Tunneling Method. The aim is to highlight the importance of the primary support system in ensuring tunnel stability and safety before the installation of the secondary lining. The theoretical and methodological framework includes an analysis of the interaction between the rock mass and the support system through characteristic curves, helping engineers understand how the support system affects the rock mass. The Duncan Fama method is used to determine the characteristic rock mass curve based on tunnel and rock mass parameters. The paper also conducts deterministic and probabilistic stability analyses of the tunnel, both without a support system and with a support system consisting of anchors and shotcrete. The conclusions emphasize the importance of understanding the interaction between the rock mass and the support system to optimize the safety and stability of tunnels, along with the use of modern tunneling methods.

Key words: tunnel construction; characteristic curve; rock mass; support; Duncan Fama; parametric analysis; deterministic analysis; probabilistic analysis

SADRŽAJ

ZAHVALE	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	1
2. METODE I TEHNIKE RADA	2
3. OPĆENITO O TUNELOGRADNJI.....	3
3.1. Klasične metode tunelogradnje.....	3
3.2. Nova austrijska tunelska metoda (NATM).....	4
3.3. Norveška metoda tunelogradnje (NMT).....	6
3.4. Primarni podgradni sustav.....	7
3.4.1. Stijenska masa.....	7
3.4.2. Mlazni beton	7
3.4.3. Čelične mreže	9
3.4.4. Čelični lukovi	10
3.4.5. Štapna sidra.....	11
3.5. Sekundarna obloga	12
3.6. Tehnologija izvedbe tunela.....	12
3.6.1. Iskop miniranjem.....	13
3.6.2. Strojni iskop	14
3.6.3. Metoda iskopa i zatrpavanja	15
4. KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE.....	17
4.1. Karakteristična krivulja stijenske mase.....	20
4.2. Karakteristična krivulja podgrade	22
4.3. RocSupport	25
4.3.1. Deterministička analiza	26
4.3.2. Probabilistička analiza.....	28
4.4. Duncan Fama metoda.....	31
5. PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE	36

5.1.	Analiza bez podgrade.....	36
5.2.	Analiza s podgradom.....	44
6.	PARAMETARSKA DETERMINISTIČKA ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE.....	53
6.1.	Utjecaj sidara na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade.....	55
6.1.1.	Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće	55
6.1.2.	Stijenska masa manje krutosti i čvrstoće	57
6.2.	Utjecaj mlaznog betona.....	59
6.2.1.	Stijenska masa veće krutosti	59
6.2.2.	Stijenska masa manje krutosti i čvrstoće	61
7.	PROBABILISTIČKA ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE	64
7.1.	Analiza bez podgrade.....	65
7.2.	Analiza s podgradom.....	68
7.3.	Analiza s podgradom manje nosivosti.....	76
8.	ZAKLJUČAK.....	81
	POPIS LITERATURE	82
	POPIS SLIKA.....	84
	POPIS TABLICA.....	87
	POPIS OZNAKA.....	88

1. UVOD

Tunelogradnja predstavlja jedan od najzahtjevnijih i najsloženijih dijelova građevinarstva, koji obuhvaća širok spektar tehničkih i inženjerskih izazova. Razvoj tunela zahtijeva temeljito razumijevanje geomehanike stijenskog masiva, naprezanja koja nastaju tijekom iskopa te sposobnost projektiranja i ugradnje podgradnih sustava koji osiguravaju stabilnost i sigurnost. Upravo iz tog razloga, postoji stalna potreba za inovacijama u tehnikama tunelogradnje.

Tradicionalne metode izgradnje tunela, iako u upotrebi i danas, često se susreću s ograničenjima kada se primjenjuju u složenijim geološkim uvjetima, osobito u slabijim stijenjskim masama. Razvoj suvremenih tehnologija kao što su Nova austrijska tunelska metoda i Norveška metoda tunelogradnje, donio je značajna poboljšanja. Ove metode omogućuju dinamičniji pristup tunelogradnji, gdje se stabilnost tunela postiže interakcijom između stijenske mase i podgradnog sustava.

Primarni podgradni sustav, koji uključuje sidra, čelične lukove i mlazni beton, ima ključnu ulogu u osiguravanju stabilnosti tunela neposredno nakon iskopa. Podgrada se postavlja prije postavljanja sekundarne obloge te je stoga od velike važnosti u ranijim fazama izgradnje tunela. Razumijevanje kako stijenska masa reagira na različite tipove podgrade omogućuje inženjerima preciznije projektiranje i smanjuje rizik od kolapsa.

Kako bi se to postiglo, koriste se različiti alati i metode za analizu stabilnosti tunela. U ovom radu analizira se primjena Duncan Fama metode za analizu interakcije stijenske mase i podgrade, koja kroz karakteristične krivulje stijenske mase pomaže u predviđanju ponašanja stijene tijekom iskopa. Ove krivulje omogućuju inženjerima da prilagode podgradni sustav specifičnim geološkim uvjetima.

Provedene su determinističke i probabilističke analize stabilnosti tunela u različitim uvjetima. Rezultati ovih analiza pridonose boljem razumijevanju interakcije između stijenske mase i podgrade, kao i optimizaciji podgradnog sustava za povećanje sigurnosti i dugovječnosti tunela. Cilj nije samo opisati teorijske aspekte tunelogradnje i sustava podgrade, već i kroz praktične primjere demonstrirati kako napredne analize mogu unaprijediti procese projektiranja i izgradnje tunela u složenim geološkim uvjetima.

2. METODE I TEHNIKE RADA

U ovom radu korištene su metoda modeliranja i metoda simulacije, koje su ključne za razumijevanje složenih geomehaničkih procesa i interakcija između stijenskih masa i podgradnih sustava. Modeliranje i simulacija omogućuju kreiranje matematičkih i računalnih prikaza stvarnih situacija, što inženjerima pomaže u analizi različitih scenarija i donošenju optimalnih inženjerskih rješenja.

Metoda modeliranja

Modeliranje je odabrano kako bi se stvorio apstraktni prikaz tunela unutar stijenske mase, što omogućuje analizu različitih faktora koji utječu na stabilnost i sigurnost tunela. U ovom radu korišteno je matematičko modeliranje, koje se temelji na empirijskim izrazima. Glavni matematički modeli koji su korišteni su Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće i Hoek-Brownov kriterij čvrstoće. Ovi kriteriji su ključni za opisivanje ponašanja stijenskih masa pod različitim opterećenjima i naprezanjima te su korišteni za izračunavanje karakterističnih krivulja stijenske mase, što je nužno za definiranje sigurnosnih mjera u procesu tunelogradnje.

Metoda simulacije

Simulacija je tehnika koja omogućuje prikaz stvarnih fizičkih uvjeta unutar modela. U ovom radu korišteno je računalno modeliranje putem specijaliziranih softverskih alata kao što su RocSupport i RSData. Softver RocSupport omogućuje detaljno modeliranje interakcije stijenske mase i podgradnog sustava. Ovaj alat koristi Duncan Fama metodu, koja omogućuje izračun karakterističnih krivulja stijenske mase na temelju specifičnih parametara tunela i stijenskih svojstava. Na temelju ovih simulacija, mogu se provesti determinističke i probabilističke analize stabilnosti, što daje jasan uvid u optimalne podgradne sustave koji najbolje odgovaraju uvjetima na terenu. Softver RSData korišten je za dobivanje određenih vrijednosti parametara stijenske mase, što omogućuje precizniju kalibraciju modela.

3. OPĆENITO O TUNELOGRADNJI

Tunelogradnja predstavlja dio građevinarstva koji se bavi projektiranjem, iskopom i izgradnjom tunela. Tunelom smatramo podzemnu građevinu koja osigurava podzemni ili podmorski prostor za prolaz ljudi ili transport materijala. Podzemni tunel iskopan je kroz okolno tlo, zemlju ili stijenu, a podmorski tunel položen je ispod vode. Tunel je najčešće u potpunosti zatvoren osim na krajevima gdje se nalaze otvori za izlaz na površinu. Ovi podzemni prostori izvedeni su ljudskom djelatnošću bez uklanjanja nadsloja stijene ili tla s niveletom koja ne odstupa značajnije od horizontale. Tunel je relativno dugačka i uska građevina kod koje je duljina često mnogo puta veća od dvostrukog promjera tunela, odnosno građevina malih dimenzija poprečnog presjeka u odnosu na dužinu.

Svaki projekt tunela mora započeti sveobuhvatnim istraživanjem tla ili stijene te prikupljanjem uzoraka što u konačnici umanjuje rizik od susreta s nepredviđenim uvjetima. Na taj se način može izraditi detaljan plan izbora tehnologije izvedbe tunela i metoda za iskop te podupiranja tla ili stijene.

Izvedbom tunela mijenja se stanje naprezanja u stijenskoj masi u okolini podzemnog otvora. Dolazi do preraspodjele naprezanja u okolini otvora gdje se aktivira funkcija nosivosti stijenske mase te ona preuzima na sebe dio dodatnih naprezanja kako bi održala stabilnost otvora. Izvedbom odgovarajuće tunelske podgrade preuzima se dio dodatnih naprezanja koje stijenska masa ne može preuzeti na sebe. Osnovni ciljevi pri izvedbi tunela su stvaranje što manje poremećaja tijekom iskopa te korištenje nosivosti stijenske mase uz dodavanje što manje podgrade [1].

3.1. Klasične metode tunelogradnje

Iz rudarskih načina iskopavanja i podgrađivanja tijekom 19. i 20. stoljeća razvijene su klasične metode iskopa tunela. Iskop se vršio strojno ili ručno, a odvoz iskopanog materijala upotrebom uskotračnih parnih strojeva. Kao privremena podupora stijenske mase za vrijeme izvedbe koristila se drvena građa zbog jednostavne obrade i relativno duktilnog loma. Za oblogu je korišten kamen i zidanje opekom, a kasnije su se koristili i beton lijevan u oplati te betonski blokovi. Ostaci drvene građe često bi ostali između stijenske mase i obloge radi straha od urušavanja stijene te su tako s vremenom propadali i istrunuli čime su nastale šupljine uzrokujući velike deformacije.

Neki principi klasičnih metoda u uporabi su i danas kao što je na primjer razrada profila i kopanje u fazama prilikom iskopa u lošim uvjetima, a sve s ciljem bolje kontrole nad deformacijama. Prvo se izvodi potkop, odnosno manji dio profila tunela nakon čega se profil tunela proširuje. Potkop omogućuje povoljniju preraspodjelu naprezanja, a za vrijeme izvedbe koristi se kao transportni prolaz za odvoz iskopanog materijala i dovoz materijala za podgradu. Potkope je poželjno raditi u čvrstim stijenama jer se na taj način formira više radnih mjesta za proširenje profila tunela. Međutim, kod tla i mekših stijena nije poželjno prebrzo napredovanje potkopa zbog povećanja pritiska na podgradu nakon kontakta materijala sa zrakom. Iz tog razloga iskop se širi na puni profil odmah nakon izvođenja potkopa.

Među najpoznatije metode spadaju talijanska, njemačka, belgijska, austrijska i engleska metoda. Najznačajnija razlika između ovih metoda jest redoslijed iskopa dijelova profila tunela te redoslijed izvođenja tunelske obloge. Za talijansku, njemačku i belgijsku metodu karakterističan je djelomičan iskop profila tunela te izvođenje tunelske obloge nakon čega slijedi iskop sljedećeg dijela. Za austrijsku i englesku metodu karakterističan je cjelokupni iskop profila tunela uz podgrađivanje drvenom građom nakon čega slijedi izvođenje tunelske obloge [1].

3.2. Nova austrijska tunelska metoda (NATM)

Nova austrijska tunelska metoda (eng. *New Austrian Tunnelling Method - NATM*) je metoda koja se koristi za izgradnju tunela, razvijena u Austriji tijekom 1960-ih godina. Imenovao ju je Rabcewicz 1962. godine na XIII. geomehaničkom kolokviju u Salzburgu, a prepoznatljivost stječe 1964. godine objavom Rabcewiczovog članka *The New Austrian Tunnelling Method* u časopisu *Water Power* [2-4].

NATM primjenjuje se u lošijim stijenskim masama koje nemaju dominantne grupe diskontinuiteta. Ono što NATM želi postići jest usklađivanje tehnologije izvedbe s procesima koji nastaju u stijenskoj masi tijekom izgradnje tunela. Ideja je postići optimalnu sigurnost i ekonomičnost za vrijeme izgradnje tunela iskorištavanjem funkcije nosivosti stijenske mase.

Bitna razlika u odnosu na klasične metode tunelogradnje je to što NATM ne predstavlja skup tehnika iskopa i podgrađivanja već se na nju gleda kao filozofiju ili opći pristup tunelogradnji. Glavni razlog pojave problema u primjeni i tumačenju NATM je u nerazumijevanju NATM čiji korijen leži u nepoznavanju geomehanike i nepostojanju definirane sheme napredovanja. Nadalje je nabrojeno sedam najvažnijih smjernica NATM [1].

Održavanje čvrstoće stijenske mase

Stijenska masa predstavlja glavni nosivi građevinski materijal čiju je prvobitnu čvrstoću nužno održati pa sukladno s time treba spriječiti svako razrahljenje koje izaziva gubitak čvrstoće. Uspjeh se pronalazi u pažljivom iskopu i pravovremenoj ugradnji primarne podgrade koja omogućava da se dio dodatnih naprezanja nastalih iskopom preuzme preko stijenske mase.

Upotreba mlaznog betona

Osiguranje iskopa pri velikim deformacijama i razrahljenju postiže se primjenom mlaznog betona odmah nakon iskopa te eventualnim ojačanjem štapnim sidrima. Upotrebom mlaznog betona osiguran je potpuni kontakt između stijenske mase i podgrade.

Mjerenja i opažanja deformacija stijenske mase

Mjerenje pomaka, odnosno deformacija stijenske mase određuje vrijeme i način podgrađivanja. Kako bi se onemogućio gubitak čvrstoće i mobilizirao zaštitni prsten potrebno je upravljati deformacijama. Ono što se želi postići je da se primarna podgrada izvede niti prerano niti prekasno ugradnjom ne prekrute i ne preslabe podgrade.

Popustljiva tanka podgrada

Kako bi se izbjeglo preuzimanje većih momenata savijanja i pojave loma, podgrada treba biti tankostijena i sukladno s tim savitljiva. Ako se radi o lošijoj stijenskoj masi, dodatno se podgrađivanje ostvaruje ugradnjom sidara, tunelskih lukova te armaturnih mreža.

Zatvaranje prstena izvedbom podnožnog svoda

Iz statičkog pogleda tunel možemo gledati kao debelostijenu cijev od nosećeg prstena stijenske mase i podgrade. U stijenskim masama lošije kvalitete vrijeme zatvaranje prstena ima posebno značenje jer određuje ponašanje stijene. Odmicanje od kalote tunela izlaže podgradu velikom djelovanju savijanja, a stijensku masu velikim opterećenjima te produljuje vrijeme zatvaranja prstena.

Napredovanje u punom profilu

Poželjno je napredovanje u punom profilu umjesto napredovanje razradom iskopa kako bi se izbjegle dodatne komplikacije, mnoge promjene i preraspodjela naprezanja oko iskopa te oštećenje stijenske mase. Međutim, napredovanje u punom profilu primjenjivo je samo u stijenama bolje kvalitete.

Zaobljeni poprečni presjeci

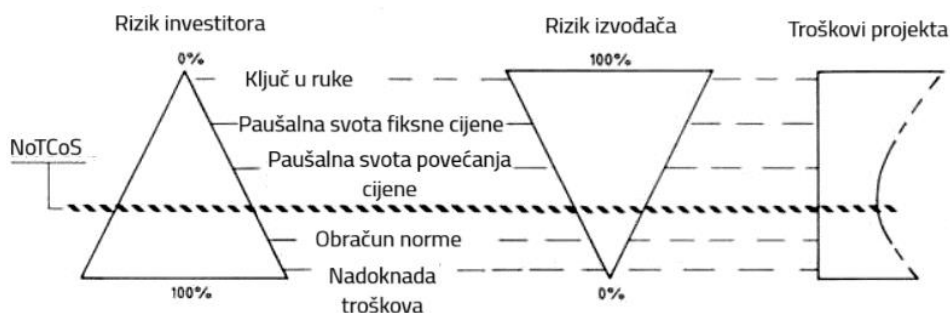
Teži se zaobljenim poprečnim presjecima te izbjegavanju oštarih kutova na profilu kako bi se spriječila koncentracija naprezanja koja u konačnici dovodi do sloma podgrade [1].

3.3. Norveška metoda tunelogradnje (NMT)

Norveška metoda tunelogradnje (eng. *Norwegian Method Of Tunnelling - NMT*) ime je dobila kada je Nick Barton u kolovozu 1992. objavio istoimeni članak u časopisu *World Tunnelling* [5]. Prethodno tome Barton u studenom 1991. objavljuje članak *Geotehnički projekt* (eng. *Geotechnical Design*) gdje su predstavljeni norveški pristup i filozofija projektiranja podzemnih iskopa. Primjena mokrog postupka u izvedbi mlaznog betona uvodi se početkom 1970-ih, a primjena mikroarmiranog mlaznog betona s čeličnim vlaknima uvedena je 1978. godine koji 1980-ih u potpunosti zamjenjuje čelične zavarene mreže. Norveški geotehnički institut (eng. *Norwegian Geotechnical Institute - NGI*) u Oslu stoji kao glavni nositelj razvoja NMT.

Ova se metoda primjenjuje u raspucanoj stijenskoj masi gdje dominiraju ispucanost te prekoprofilni iskop. Kao metode iskopa koriste se bušenje i miniranje ili strojni iskop upotrebom krtica u čvrstim stijenama. Za podgradni sustav koriste se sidra i mikroarmirani mlazni beton, a kod vrlo loše stijenske mase mlazni beton armiranim rebrastim čelikom. Privremena podgrada određena je rasponom i namjenom tunela, ujedno je dio trajne podgrade te se uglavnom sastoji od sidara i mikroarmiranog mlaznog betona upotrebom mokrog postupka [1].

Norveški sustav ugovaranja tunela (eng. *Norwegian Tunnelling Contract System - NoTCoS*) je sustav koji se temelji na podjeli rizika i dobroj suradnji između investitora, izvođača te konzultanta što u konačnici rezultira smanjenjem troškova projekta. Grafički prikaz NoTCoS sustava dan je na slici 1. [5].



Slika 1.: NoTCoS (Izvor: [5])

3.4. Primarni podgradni sustav

Kako bi se osigurali sigurni radni uvjeti tijekom iskopa i pokrenuo proces mobiliziranja čvrstoće stijenske mase ugrađuje se primarna podgrada. Primarna podgrada ne predstavlja konstrukciju koja sama preuzima opterećenje od stijenske mase, nego u interakciji s njom predstavlja primarni podgradni sustav.

Ugradba primarne podgrade vrši se za vrijeme iskopa ili odmah nakon iskopa. Kada se radi o iskopu miniranjem, podgrada se ugrađuje nakon miniranja i uklanjanja nestabilnih blokova nakon čega slijedi iduća serija miniranja. Kada se radi o iskopu tunela NATM ili NTM metodom, podgrada se ugrađuje nakon iskopa pojedine faze tunela te se daljnji iskop može obaviti tek kada je prethodni dio podgrađen.

Korak napredovanja nazivamo duljinu tunela na kojoj još nije ugrađena primarna podgrada. Primarni podgradni sustav sastoji se od pet elemenata, a to su stijenska masa, mlazni beton, čelične mreže, čelični lukovi i štapna sidra [1].

3.4.1. Stijenska masa

Stijenska masa jedan je od glavnih elemenata primarne podgrade upravo zato što se sama tunelogradnja zasniva na prirodnom fenomenu aktiviranja funkcije nosivosti stijenske mase. Iz tog razloga potrebno je poznavati mehanička svojstva stijenske mase, promjenu stanja naprezanja tijekom izvedbe radova, inženjerska svojstva intaktne stijene, prisustvo diskontinuiteta u stijenskoj masi, klasifikacije stijenske mase te krutost i čvrstoću stijenske mase [1].

3.4.2. Mlazni beton

Mlazni beton koristi se kao element podgradnog sustava za sprečavanje rahljenja stijenske mase. Naime, njime se zatvaraju pukotine u stijeni čime se sprječava progresivni slom te ispadanje blokova iz zidova i kalote tunela. Također sprječava bubrenje i ljuštenje u stijenskim masama osjetljivim na promjene vlažnosti.

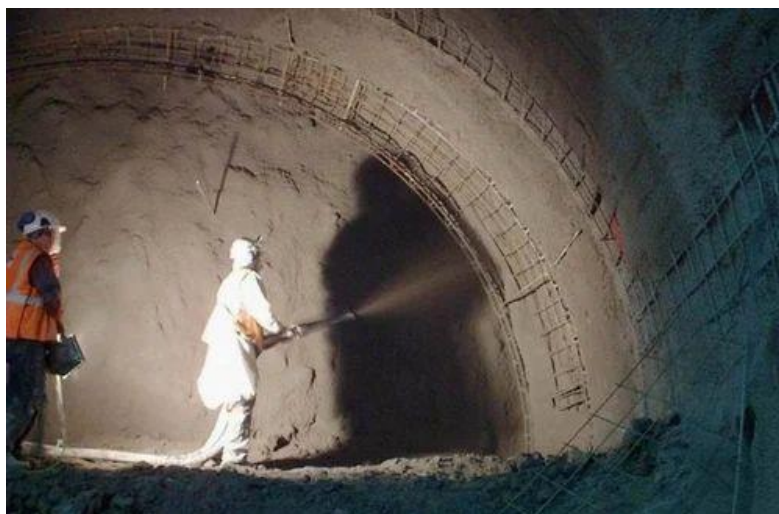
Nakon što mlazni beton očvrstne, veže se za stijensku masu i na taj način poboljšava njena mehanička svojstva i sprječava smanjenje njene čvrstoće. Konačna stabilnost podgrade raste s čvrstoćom mlaznog betona.

Osim klasičnog nearmiranog mlaznog betona koji je mješavina cementa, agregata, vode i dodataka, u primjeni je i mikroarmirani mlazni beton armiran čeličnim ili polipropilenskim vlaknima. Pukotine u betonu nastaju nakon što naprezanja dosegnu vlačnu čvrstoću betona

te se na tim mjestima beton relaksira dok vlakna preuzimaju naprezanja. Primjenom mikroarmiranog mlaznog betona dolazi do značajne postpukotinske nosivosti.

Mlazni beton nanosi se pod velikim pritiskom suhim ili mokrim postupkom. Kod suhog postupka se zračnim putem mješavina agregata i cementa dovodi kroz gumeno crijevo na mlaznicu. Voda se posebnim crijevom dovodi do mješavine, a dodaci se dodaju u mješavinu neposredno prije ubacivanja mješavine u stroj za ugradnju mlaznog betona. Kod mokrog postupka mješavina cementa, agregata i vode napravi se u miješalici za beton te se takav gotov beton doprema u posudi pod tlakom. Iz te posude beton se zračnim putem ili pumpama za beton odvodi gumenim crijevima na mlaznicu.

Mlazni beton nanosi se odozdo prema gore, ručno ili strojno na površinu iskopa velikim brzinama kako bi se postigla zadovoljavajuća zbijenost koja osigurava veću čvrstoću i bolje vezanje kao što je prikazano na slikama 2 i 3. Potrebno je obaviti odgovarajuće pripreme opreme kojom će se mlazni beton ugraditi te podloge na koju će se mlazni beton nanositi (uklanjanje trošnih i labavih dijelova, drenaža/blokada prodora vode, zapunjavanje većih pukotina, pravilno navlažiti podlogu) [1].



Slika 2.: Ručno nanošenje mlaznog betona (Izvor: [6])



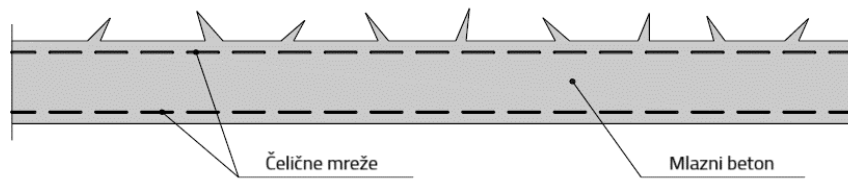
Slika 3.: Strojno nanošenje mlaznog betona (Izvor: [7])

3.4.3. Čelične mreže

Čelične mreže povisuju žilavost mlaznog betona te se zato upotrebljavaju za njegovo armiranje. Čelične mreže ugrađuju se na način da što više prate nepravilnosti površine iskopa ili prethodnih slojeva mlaznog betona. Mreže se postavljaju tako da ne bi došlo do njihovog pomicanja ili vibracija tijekom ugradnje mlaznog betona te moraju biti prekrivene s minimalno 2 cm mlaznog betona. Čelične mreže u tunelogradnji prikazane su na slici 4. Dvostruka mreža sa slike 5. primjenjuje se u slučaju kada debljina mlaznog betona prelazi 25 cm [1].



Slika 4.: Čelične mreže (Izvor: [8])

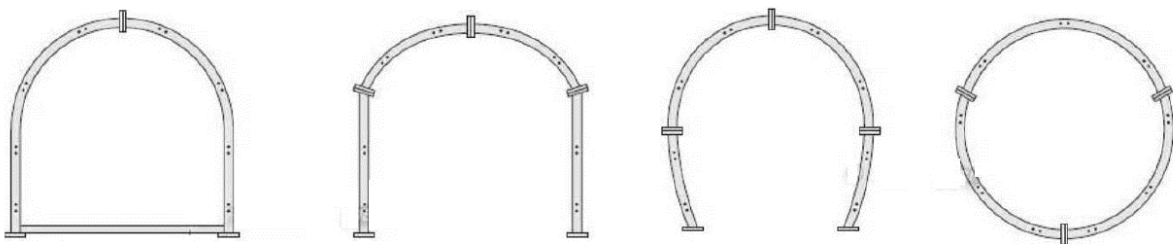


Slika 5.: Dvostruka čelična mreža u mlaznom betonu (Izvor: [1])

3.4.4. Čelični lukovi

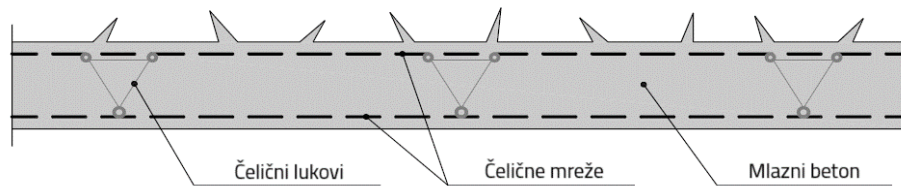
Čelični lukovi postavljaju se okomito na os tunela te na taj način podupiru iskop te sprječavaju drobljenje stijene u kombinaciji s armiranim mlaznim betonom, a koriste se u stijenskim masama lošije kvalitete. Danas su u upotrebi valjani i rešetkasti čelični lukovi.

Valjani čelični lukovi primjenjuju se u izrazito teškim uvjetima gradnje, a čine ih mehanički spojeni predgotovljeni elementi koji zahtijevaju kontinuitet. S obzirom da se formiraju odozdo prema gore potrebno je osigurati dobro temeljenje lukova te bočnu krutost. Na slici 6. prikazani su različiti oblici spojenih valjanih čeličnih lukova [1].



Slika 6.: Valjani čelični lukovi (Izvor: [1])

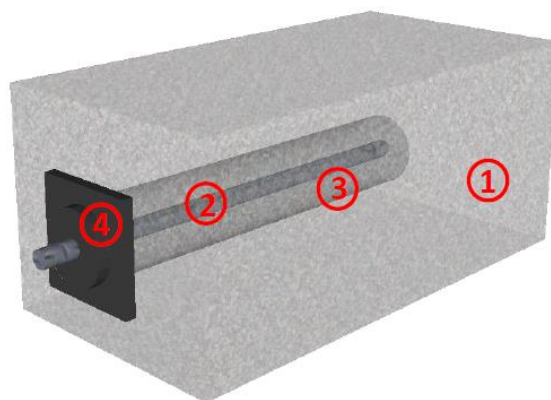
Rešetkasti čelični lukovi izvedeni su od šipki povezanih u trokutasti raspored kao što prikazuje slika 7., a primjenjuju se za rano preuzimanje opterećenja. Izvode se kako bi odgovarali obliku tunelskog otvora, a nakon ugradnje prostor između rešetki ispunjava mlazni beton. Njihova primarna funkcija je kao privremeni podgradni element koji omogućava siguran rad na čelu tunela prije ugradnje mlaznog betona i njegovog dostizanja pune čvrstoće. Ubetoniranje rešetkastih čeličnih lukova u mlazni beton koristi se kako bi se ostvario kontakt stijenske mase i cijele duljine luka [1].



Slika 7.: Rešetkasti čelični lukovi (Izvor: [1])

3.4.5. Štapna sidra

Najvažniji element primarnog podgradnog sustava jesu štapna sidra koja se ugrađuju u radijalne bušotine u kaloti i zidovima. Štapna sidra sastoje se od četiri elementa kao sa slike 8.: stijenska masa (1), čelična šipka (2), unutarnja veza stijenske mase i čelične šipke - injekcijska smjesa (3) te vanjska veza stijenske mase i čelične šipke (4) [9].



Slika 8.: Elementi sidra (Izvor: [9])

Promjena dužine i razmaka sidara značajno utječe na čvrstoću i krutost cijele primarne podgrade. U kombinaciji s armiranim ili mikroarmiranim mlaznim betonom omogućeno je aktiviranje funkcije nosivosti stijenske mase pri izvedbi iskopa. U ovisnosti od kvalitete stijene, veličini i obliku poprečnog presjeka te koraku napredovanja određuje se broj, dužina, nosivost i raspored sidara.

Razlikujemo aktivna (prednapeta) i pasivna (štapna) sidra. Pasivna sidra aktiviraju se pomacima stijenske mase, dok se kod aktivnih sidara unosi sila prednapinjanja. Sidra daju dodatni unutrašnji pritisak na granicu iskopa te bolje karakteristike stijenske mase,

formiraju nosivi svod, povezuju slojeve uz povećanje posmične čvrstoće u diskontinuitetima i pridržavaju nestabilne blokove [1].

Uloga pojedinačnog sidrenja je stabilizacija, odnosno sanacija lokalne nestabilnosti i smanjenje mogućnosti geoloških odvala stijenske mase. Uloga sistematskog sidrenja je ojačanje, odnosno održavanje ili povećanje čvrstoće stijenske mase uz ravnomjernu raspodjelu opterećenja oko iskopa [9].

3.5. Sekundarna obloga

Nakon završetka primarne podgrade izvodi se sekundarna obloga od lijevanog armiranog betona. Mjerenja deformacija u sekundarnim oblogama pokazuju znatne priraste naprezanja i deformacija za vrijeme eksploatacije. Kao jedan od glavnih sudionika na stanje naprezanja i deformacija izdvaja se vlastita težina sekundarne obloge čije se opterećenje javlja odmah nakon očvršćivanja betona. Ovdje ubrajamo težinu armiranog betona te težinu ventilatora ovješanih u svodu tunela [1].

Skupljanje i puzanje betona, kao i deformacije betona nastale zbog temperaturnih promjena utječu na stanje naprezanja i deformacija sekundarne obloge, ali to nema značajan utjecaj na stanje naprezanja primarnog podgradnog sustava i okolne stijenske mase. Za razliku od toga, opterećenje nastalo podizanjem razine podzemne vode oko tunela ima utjecaj i na primarni podgradni sustav i na sekundarnu oblogu.

Šupljine u svodu tunela između primarne podgrade i sekundarne obloge nastaju zbog deformacija sekundarne obloge izazvanih vlastitom težinom i skupljanjem betona. Kao rješenje provodi se injektiranje šupljina kako bi se ponovno uspostavio kontakt. Najveće opterećenje na sekundarnu oblogu predstavlja gubitak mehaničkih karakteristika primarnog podgradnog sustava [1].

3.6. Tehnologija izvedbe tunela

Izvedba tunela, bilo to miniranjem ili strojno, unosi vibracije te rastresa stijensku masu, odnosno utječe na mehanička svojstva stijene te dolazi do smanjenja krutosti i čvrstoće stijenske mase uz povećanje razlomljenosti. U ovisnosti od dužine tunela, obliku i veličini poprečnog presjeka te svojstvima stijenske mase odabire se tehnologija izvedbe [1].

3.6.1. Iskop miniranjem

Iskop miniranjem sastoji se od nekoliko koraka, a to su bušenje bušotina i postavljanje eksploziva, detoniranje eksploziva i ventilacija plinova, odstranjivanje miniranog dijela te potencijalnih nestabilnih blokova u kaloti i zidovima te konačno ugradnja podgradnog sustava [1].

Eksplozija mora biti kontrolirana kako bi se očuvala kvaliteta okolne stijenske mase, a dobili pogodno usitnjeni stijenski dijelovi. Nakon detonacije eksploziva, dolazi do oštrog impulsa na zidove bušotina koji lomi stijenu te nastaju nove pukotine i proširuju se već postojeći diskontinuiteti. Ključno je odrediti pravilan razmak i raster bušotina, količinu eksploziva te vremenski redosljed detonacija.

Iako je iskop miniranjem moguće provesti u cijelom profilu ili u više dijelova, preferira se iskop u više dijelova zbog lakše kontrole vibracija, prevelikog poprečnog presjeka tunela te loših uvjeta tla koji uzrokuju potencijalnu nestabilnost nepodgrađenih dijelova.

Specifično punjenje i faktor bušenja najvažniji su parametri iskopa miniranjem jer su indikatori ekonomičnosti i omogućuju usporedbu više solucija miniranja. Masa eksploziva u kilogramima po kubičnom metru minirane stijene predstavlja specifično punjenje, a ukupna dužina bušotine po kubičnom metru minirane stijene predstavlja faktor bušenja [1].

Glavni nedostaci miniranja su robusnost, mala preciznost izvedbe, velike vibracije te moguća oštećenja okolnih objekata. Da bi se postigla što pravilnija kontura iskopa i što manje oštećenje okolne stijene, u uporabi je konturno miniranje (eng. *contour blasting*) koje sadrži dvije metode: predminiranje (eng. *presplitting*) i glatko miniranje (eng. *smooth-wall blasting*).

Kod predminiranja prvo se miniranjem napravi pukotina po konturi projektirane plohe iskopa, a odmah nakon toga slijedi miniranje preostalog dijela stijenske mase. Na taj je način stijenska masa izvan plohe iskopa odvojena i zaštićena od utjecaja miniranja. Predminiranje primjenjivo je na površini ili blizu površine terena, a rjeđe se koristi u podzemlju.

Za razliku od predminiranja, glatko miniranje pogodno je za podzemne iskope. Prvi je korak grubo miniranje većeg središnjeg dijela tunela, zbog čega se pojavljuju velika tangencijalna naprezanja na planiranoj konturi tunela. Odmah nakon toga detoniraju se konturne bušotine [1].

3.6.2. Strojni iskop

Za strojni iskop koriste se strojevi za sukcesivni iskop ili strojevi za iskop cijelog tunela. U strojeve za sukcesivni iskop ubrajamo bagere s hidrauličkim čekićem i strojeve s glodačima ili diskovima na pokretnoj glavi, a vrše iskop u punom profilu ili po fazama. Bageri s hidrauličkim čekićem koriste se za iskop stijenske mase loše kvalitete, a sami čekić služi za precizniji iskop uz malo oštećenje stijene. Strojevi s glodačima na pokretnoj glavi koriste se za iskop stijenske mase srednje i loše kvalitete. Moguće ih je koristiti i u čvrstim stijenama, ali češća je uporaba strojeva s diskovima na pokretnoj glavi.

U strojeve za iskop tunela u punom profilu ubrajamo takozvane krtice (eng. *Tunnel Boring Machine - TBM*) prikazane na slici 9. TBM pogodan je za iskop u tlu i stijenskim masama svih kvaliteta. Iskop se vrši s jednom ili više rotirajućih reznih glava koje se nalaze na čelu krtice, čime se dobivaju različiti oblici poprečnog presjeka [1].



Slika 9.: Krtica – TBM (Izvor: [10])

Neke od prednosti primjene TBM strojeva su: veća sigurnost u radu, manja oštećenja stijenske mase, iskop s istovremenom ugradnjom, automatizirano daljinsko upravljanje, veća brzina napredovanja iskopa te mehanizam koji iza sebe postavlja prefabricirane betonske i armiranobetonske elemente kao oblogu.

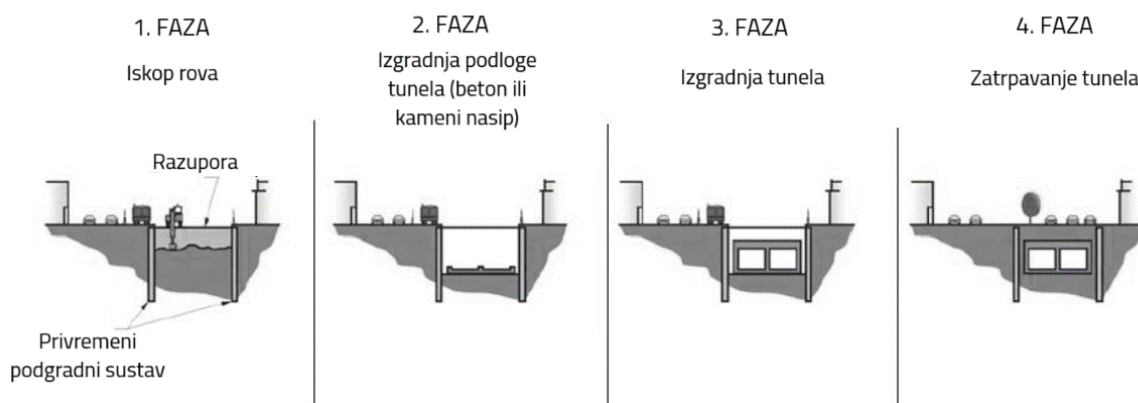
Međutim postoje i nedostaci, a to su veći troškovi, dulje vrijeme mobilizacije, mogućnost iskopa samo kružnih poprečnih presjeka te ograničena fleksibilnost u težim geološkim uvjetima.

Štit je čelični cilindar jednakog promjera kao i tunel, a služi kao zaštita pri iskopu nepodgrađenog tunela. Može biti jednostruki ili dvostruki te otvoren ili zatvoren. Otvoren štit na čelu ima bagere s hidrauličkim čekićem ili rotirajuće teleskopske glodače, a zatvoren štit rotirajuću reznu glavu. Krtice bez štita koriste se u kompaktnim čvrstim stijenama, a krtice sa štitom u raspucalim stijenama loše kvalitete [1].

3.6.3. Metoda iskopa i zatrpavanja

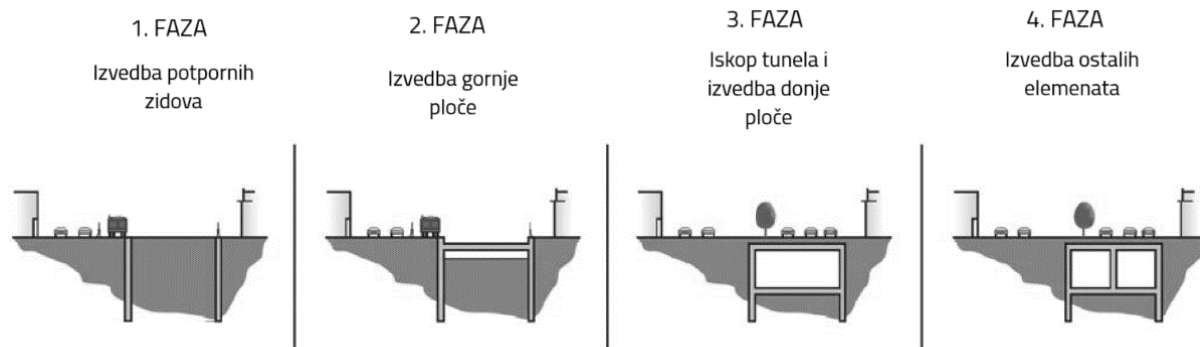
Metoda iskopa i zatrpavanja (eng. *Cut And Cover*) koristi se za tunele na malim dubinama, odnosno u zonama malog nadsloja. Kod ove metode stijenska masa ne koristi se kao glavni strukturni element već ona čini opterećenje na podgradu. Razlikujemo dvije varijante ove metode, odozdo prema gore (eng. *bottom-up*) i odozgo prema dolje (eng. *top-down*).

Kod *bottom-up* metode prvo se radi zaštićeni vertikalni iskop građevne jame nakon čega slijedi izvođenje konstrukcije tunela i konačno se iskop zatrpava. Postupak izvođenja po fazama prikazan je na slici 10. Konačna konstrukcija tunela izvedena je prije zatrpavanja te je neovisna o zaštitnom sustavu [11].



Slika 10.: Bottom-up metoda (Izvor: [11])

Kod *top-down* metode prvo se rade zidovi tunela, a često uz sustav sekantnih pilota kao zaštita. Nakon toga slijedi izrada krovnog dijela koji se povezuje na zidove. Konačno, radi se iskop tunela i izvode se donja ploča i eventualni pregradni zidovi tunela. Postupak izvođenja po fazama prikazan je na slici 11 [11].

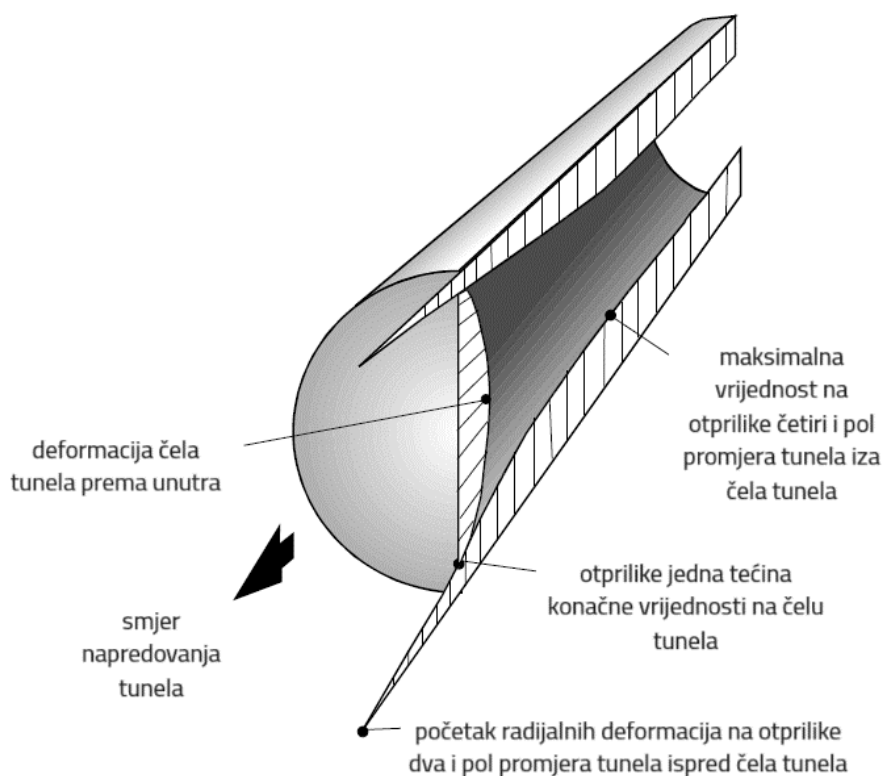


Slika 11.: Top-down metoda (Izvor: [11])

4. KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

Tijekom iskopa tunela dolazi do deformacija stijenske mase, a tu pojavu nazivamo konvergencijom tunela. Krivulja konvergencije tunela dobiva se mjerenjem konvergencije za vrijeme i nakon izvedbe tunela. Kako iskop napreduje dolazi do brzog povećanja konvergencije, a do njenog smanjenja dolazi s približavanjem ravnoteži [12].

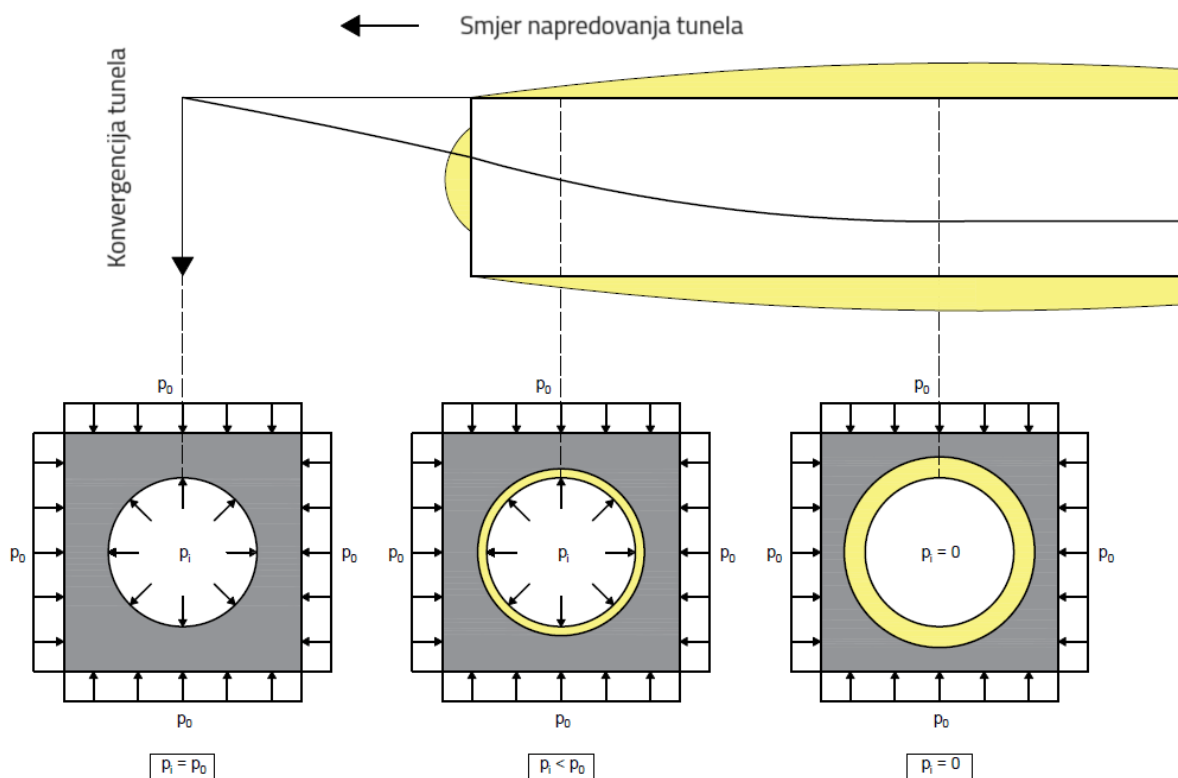
Valja prvo raspraviti o deformacijama koje nastaju u blizini čela napredujućeg nepodgrađenog tunela. Na slici 12. možemo primijetiti da radijalne deformacije počinju na otprilike dva i pol promjera tunela ispred čela tunela. Također, dostižu otprilike jednu trećinu svoje konačne vrijednosti na čelu tunela, dok svoju maksimalnu vrijednost dostižu na otprilike četiri i pol promjera tunela iza čela tunela.



Slika 12.: Radijalne deformacije u stijenskoj masi oko napredujućeg tunela (Izvor: [13])

Bitno je spomenuti da čak i nepodgrađeni tunel pruža prividni podgradni pritisak koji osigurava stabilnost koja omogućava dovoljno vremena za postavljanje podgradnog sustava.

Na slici 13. vidljivo je da je na otprilike dva i pol promjera tunela ispred čela, prividni podgradni pritisak jednak in-situ naprezanju $p_i = p_0$. Na čelu tunela prividni podgradni pritisak p_i jednak je otprilike jednoj četvrtini in-situ naprezanja p_0 te se on postepeno smanjuje na nulu na određenoj udaljenosti iza čela tunela. Žuto obojani dio predstavlja zonu plastifikacije oko tunelskog otvora.



Slika 13.: Vrijednosti podgradnog pritiska u odnosu na čelo napredujućeg tunela (Izvor:

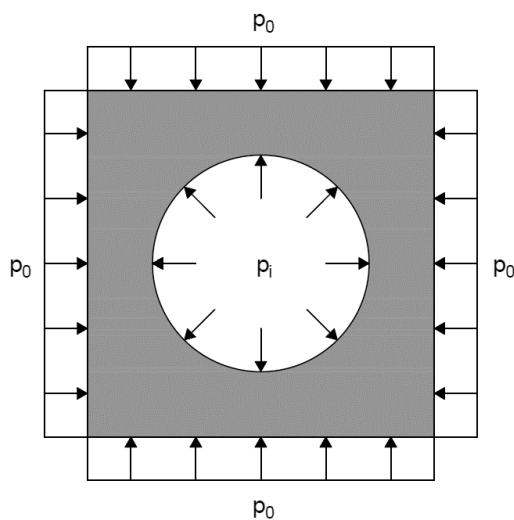
[14])

Slom zone plastifikacije stijenske mase koja okružuje tunel ne znači nužno rušenje tunela. Taj dio i dalje ima značajnu čvrstoću i ako je debljina zone plastifikacije mala u usporedbi s polumjerom tunela, jedini znakovi sloma su nekoliko novih pukotina uz manju količinu rahljenja. S druge strane, kada se formira velika zona plastifikacije i dođe do velikih pomaka zidova tunela, dolazi do ozbiljnog rahljenja te u konačnici do rušenja nepodgrađenog tunela. Podgradni sustav ugrađuje se kako bi kontrolirao unutarnje pomake zidova, ali on ne može spriječiti slom stijenske mase koja je podložna značajnom prednaprezanju [14].

Četiri su glavne pretpostavke pojednostavljenih proračuna karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade. Analizira se kružni otvor polumjera r_0 , prirodno stanje naprezanja p_0 oko

otvora je hidrostatsko, podgradni pritisak p_i jednolik je po cijelom unutrašnjem rubu otvora. Četvrta pretpostavka kaže da je stijenska masa homogena i izotropna u zoni iskopa, da se u neporemećenom stanju ponaša idealno elastično dok su joj svojstva opisana modulom elastičnosti E i Poissonovim koeficijentom ν , a nakon prekoračenja čvrstoće ponaša se idealno plastično [12].

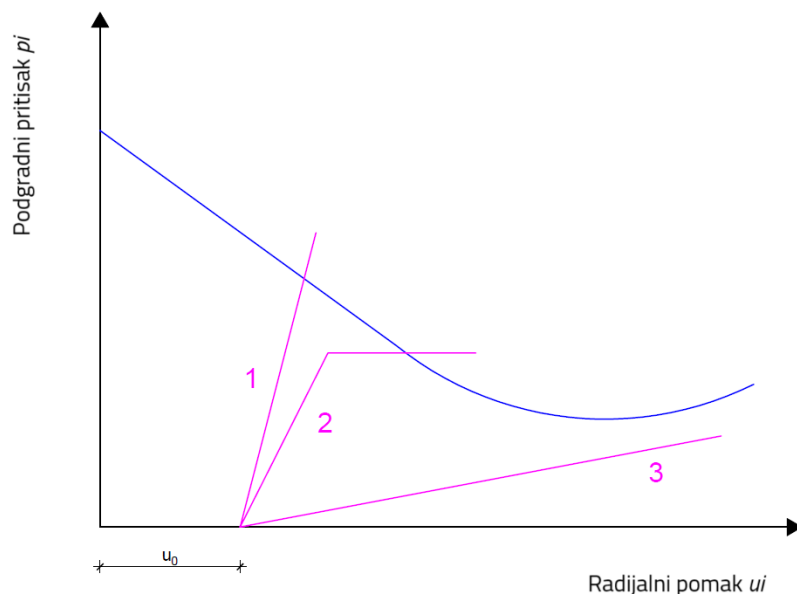
Na slici 14. oznakom p_i prikazano je naprezanje kojim podgrada djeluje na stijensku masu, odnosno naprezanje koje podgrada preuzima na sebe, a oznakom p_0 prirodno naprezanje u stijenskoj masi na mjestu podzemnog otvora prije iskopa.



Slika 14.: Podgradni pritisak i prirodno stanje naprezanje stijenske mase

Ugradnja podgrade slijedi nakon iskopa te se ona u potpunom kontaktu sa stijenskom masom deformira elastično. Karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade predstavljaju odnos između podgradnog pritiska p_i i radijalnog pomaka u_i potrebnog da se uspostavi ravnoteža na rubu podzemnog otvora. Ravnoteža je postignuta kada krivulja podgrade presiječe krivulju stijenske mase [12].

Na slici 15. prikazana je krivulja stijenske mase (plavo) u interakciji s tri podgrade različitih krutosti (ljubičasto). Krivulja 1 predstavlja krutu podgradu koja siječe krivulju stijenske mase prerano s čime je mobilizirani pritisak velik. Krivulja 2 predstavlja popustljivu podgradu koja siječe krivulju stijenske mase nakon što je postignuta vršna čvrstoća podgrade. Krivulja 3 predstavlja mekanu podgradu koja siječe krivulju stijenske mase prekasno ili ju ne siječe s čime su ostvareni preveliki radijalni pomaci.



Slika 15.: Karakteristična krivulja stijenske mase u interakciji s karakterističnim krivuljama podgrade različitih krutosti (Izvor: [12])

Na grafu karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade potrebno je odrediti početni pomak stijenske mase pri kojem se postavlja podgrada u_0 te pomak pri kojem se postiže ravnoteža. Pomak u_0 ovisi o udaljenosti od čela iskopa na kojoj se podgrada počinje postavljati, o vremenu koje je proteklo od trenutka iskopa do početka postavljanja podgrade i o vremenu potrebnom da se postigne čvrstoća postavljene podgrade. Za odabir pomaka pri kojem se postiže ravnoteža prihvatljiva je veličina pri kojoj ne dolazi do većih lomova u podgradi, a ta se vrijednost približno kreće između 0.5 % i 1.0 % promjera tunelskog otvora [12].

4.1. Karakteristična krivulja stijenske mase

Karakteristična krivulja stijenske mase povezuje unutarnji podgradni pritisak s deformacijom tunela. Iskopom podzemnog otvora dolazi do preraspodjele naprezanja unutar stijenske mase te se ona deformira kako se smanjuje podgradni pritisak. Na početku se stijenska masa deformira elastično uz povratne deformacije te je početni dio krivulje linearan i prati Hookov zakon. Daljnjim povećanjem deformacija, stijenska masa deformira se plastično, krivulja postaje nelinearna, a deformacije nepovratne.

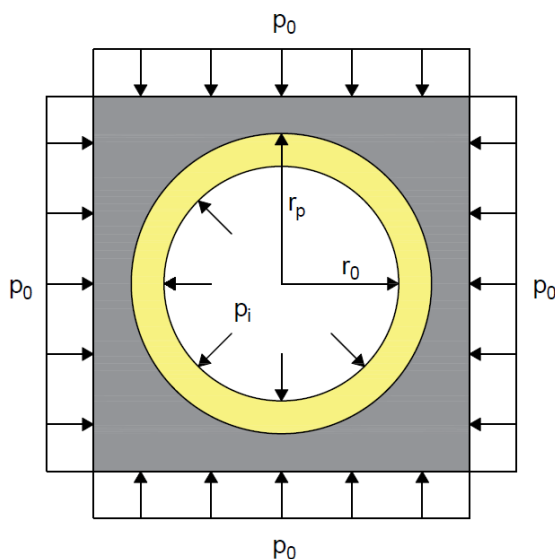
Pretpostavimo da je kružni tunel polumjera r_0 podvrgnut hidrostatskom in-situ naprezanju p_0 i uniformnom unutarnjem podgradnom pritisku p_i , kao što je prikazano na slici 14.

Za zadani polumjer tunela r_0 i in-situ naprezanje p_0 , oblik karakteristične krivulje stijenske mase ovisi o pretpostavljenom kriteriju čvrstoće stijenske mase kao i o specifičnim karakteristikama stijenske mase.

Kritični podgradni pritisak p_{cr} definiran je početkom nastajanja zone plastifikacije oko otvora tunela. Naime on predstavlja granicu između elastičnog i plastičnog ponašanja stijenske mase.

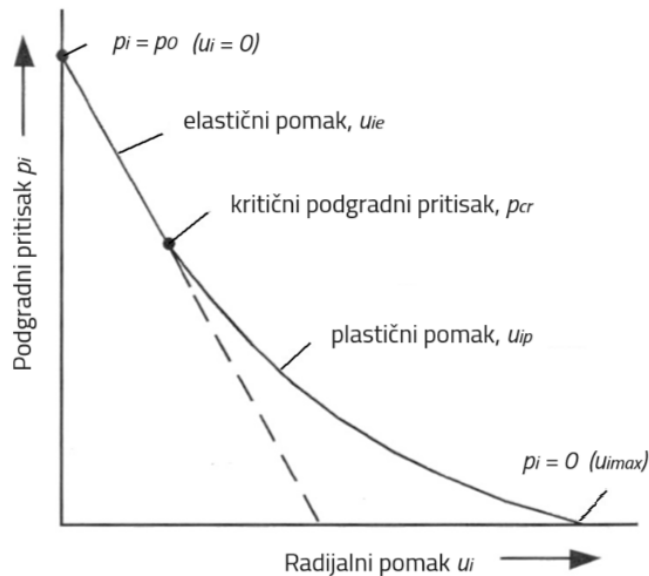
Ako je unutarnji podgradni pritisak p_i veći od kritičnog podgradnog pritiska p_{cr} ne dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela elastično.

Ako je unutarnji podgradni pritisak p_i manji od kritičnog podgradnog pritiska p_{cr} dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela plastično. Formira se zona plastifikacije polumjera r_p kao što je prikazano na slici 16.



Slika 16.: Formiranje zone plastifikacije

Na slici 17. prikazani su elastični i plastični pomak u odnosu na kritični podgradni pritisak. Elastični pomak u_{ie} javlja se za vrijednosti podgradnog pritiska $p_0 > p_i > p_{cr}$, a plastični pomak u_{ip} za vrijednosti podgradnog pritiska $p_i < p_{cr}$. Radijalni pomak u_i jednak nuli kada je podgradni pritisak jednak hidrostatskom naprezanju ($p_i = p_0$), a svoju maksimalnu vrijednost poprima kada je podgradni pritisak jednak nuli ($p_i = 0$).



Slika 17.: Elastični pomak, plastični pomak i kritični podgradni pritisak (Izvor: [15])

4.2. Karakteristična krivulja podgrade

Karakteristična krivulja podgrade povezuje unutarnji podgradni pritisak s deformacijom tunela. Krivulja ovisi o pomaku zida tunela koji se dogodio prije postavljanja podgrade te krutosti i nosivosti podgradnog sustava. Prisjetimo se da se određena količina deformacija događa ispred čela napredujućeg tunela. Na samom čelu tunela, događa se otprilike jedna trećina ukupne deformacije i ta je deformacija nepovratna. Osim toga, gotovo uvijek postoji faza u ciklusu iskopavanja u kojoj postoji razmak između čela i najbližeg ugrađenog elementa podgrade. Zbog toga se događaju dodatne deformacije prije nego što podgrada postane učinkovita.

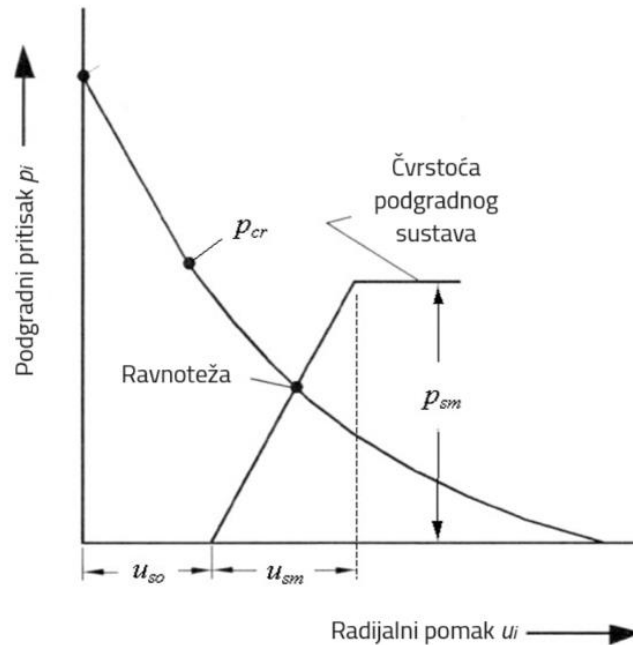
Ugradnja podgrade slijedi nakon iskopa te se ona u potpunom kontaktu sa stijenskom masom deformira elastično. Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja podgrade, krutosti K i uvjet da je unutarnji podgradni pritisak p_i manji od nosivosti podgradnog sustava p_{max} , osnovni oblik karakteristične krivulje podgrade određen je izrazom (1).

$$u_i = u_0 \cdot \frac{p_i \cdot r_0}{K} \quad (1)$$

gdje je u_0 početni pomak ruba otvora do trenutka postavljanja podgrade.

Na slici 18. prikazan je primjer karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade. Najveći elastični pomak podgrade označen je s u_{sm} , a čvrstoća podgrade s p_{sm} . Ravnoteža je

postignuta kada krivulja podgrade presiječe krivulju stijenske mase, a vrijednost podgradnog pritiska u toj točki odgovara mobiliziranom podgradnom pritisku p_{eq} .



Slika 18.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s označenom vrijednosti ravnoteže (Izvor: [15])

Sidra

Nosivost p_{max} i krutost K sidara [16] određeni su izrazima (2) i (3):

$$p_{max} = \frac{T_{bf}}{s_l \cdot s_c} \quad (2)$$

$$K = \frac{E_b \cdot \pi \cdot d_b^2}{4 \cdot l \cdot s_l \cdot s_c} \quad (3)$$

gdje je:

- T_{bf} sila u sidru [MN]
- s_l uzdužni razmak sidara [m]
- s_c poprečni razmak sidara [m]
- E_b Youngov modul elastičnosti sidra [MPa]
- d_b promjer sidra [mm]
- l slobodna duljina sidra [m].

Čelični lukovi

Nosivost p_{max} i krutost K [16] čeličnih lukova određeni su izrazima (4) i (5):

$$p_{max} = \frac{A_s \cdot \sigma_{ys}}{s_l \cdot r_0} \quad (4)$$

$$K = \frac{E_s \cdot A_s}{s_l \cdot r_0^2} \quad (5)$$

gdje je:

- A_s površina poprečnog presjeka čelika [mm²]
- σ_{ys} čvrstoća čelika [MPa]
- s_l razmak čeličnih lukova duž osi tunela [m]
- r_0 polumjer tunela [m]
- E_s Youngov modul elastičnosti čelika [MPa].

Mlazni beton

Nosivost p_{max} i krutost K [16] mlaznog betona određeni su izrazima (6) i (7):

$$p_{max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \cdot \left[1 - \frac{(r_0 - t_c)^2}{r_0^2} \right] \quad (6)$$

$$K = \frac{E_c \cdot (r_0^2 - (r_0 - t_c)^2)}{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (r_0 - t_c) \cdot r_0^2} \quad (7)$$

gdje je:

- σ_{cc} jednoosna tlačna čvrstoća mlaznog betona [MPa]
- r_0 polumjer tunela [m]
- t_c debljina mlaznog betona [mm]
- E_c Youngov modul elastičnosti mlaznog betona [MPa]
- ν Poissonov koeficijent za mlazni beton.

4.3. RocSupport

RocSupport je brz i jednostavan program za procjenu deformacija kružnih tunela u slabim stijenskim masivima i vizualizaciju interakcije tunela s različitim sustavima podgrade. Analiza u RocSupportu često se naziva analizom interakcije između stijenske mase i podgrade ili analizom konvergencije i ograničenja. Ova se analiza temelji na konceptu karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade dobivenih iz analitičkog rješenja za kružni tunel u elasto-plastičnoj stijenskoj masi pod hidrostatskim naprezanjem [17].

RocSupport u svojim analizama koristi ranije spomenute četiri pretpostavke pojednostavljenih proračuna karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade. Međutim, pretpostavka da je podgradni pritisak p_i jednolik po cijelom unutrašnjem rubu otvora treba se pažljivo razmotriti kada se dobiveni rezultati iz RocSupporta uspoređuju sa stvarnim ponašanjem tunela. Ta pretpostavka podrazumijeva da mlazni beton i betonske obloge čine zatvoreni prsten, čelični lukovi čine potpune krugove te da su sidra postavljena u pravilnom uzorku koji potpuno okružuje tunel.

Budući da to u stvarnosti nije slučaj, rezultati iz RocSupporta davat će niže vrijednosti nosivosti podgrade i veće vrijednosti deformacija. Idealizirani model u analizi RocSupporta nije namijenjen kao zamjena za konačno rješenje i analizu podgrade tunela. Takvo što zahtijeva numeričku analizu kao što je npr. metoda konačnih elemenata [17].

Međutim, mnogo se može izvući o interakciji tunela u slabom stijenskom masivu s različitim podgradnim sustavima koristeći parametarske analize RocSupporta u kojima se ocjenjuju različite kombinacije in-situ naprezanja, čvrstoće stijenske mase i karakteristike podgrade. Iako ne postoje jasno definirana pravila za izvođenje podgrade i obloge tunela, tijekom posljednjih godina razvile su se tri opće metode.

Prva metoda uključuje rješenja u zatvorenom obliku koja se temelji na izračunu opsega zone plastifikacije u stijenskoj masi koja okružuje tunel i pritisku podgrade potrebnog za kontrolu zone plastifikacije i deformacija tunela. Druga metoda uključuje numeričke analize progresivnog sloma stijenske mase koja okružuje tunel te interakcije privremene podgrade i konačne obloge sa stijenskom masom. Treća metoda je empirijska koja se temelji na opažanjima deformacija tunela i kontroli tih deformacija ugradnjom različitih sustava podgrade. S obzirom da RocSupport provodi analizu interakcije stijenske mase i podgrade, spada u prvu metodu rješenja. Bez obzira na svoja ograničenja, analiza interakcije stijenske mase i podgrade u kombinaciji s numeričkim analizama daje uvid u mehaniku podgrade te smjernice za konačno rješenje [17].

U RocSupportu, krutost i nosivost podgradnog sustava izraženi su preko maksimalnog podgradnog pritiska p_{max} (eng. *maximum support pressure*) i maksimalne deformacije podgrade ε_{max} (eng. *maximum support strain*). S obzirom da se nosivost podgrade jednostavno modelira kao ekvivalentni unutarnji pritisak, ojačanje sidrima ne može se opravdati. Međutim, dobiveni polumjer zone plastifikacije može se koristiti kao smjernica za duljinu sidara jer znamo da ona trebaju biti usidrena u nepromijenjenoj stijenskoj masi.

Metode rješenja

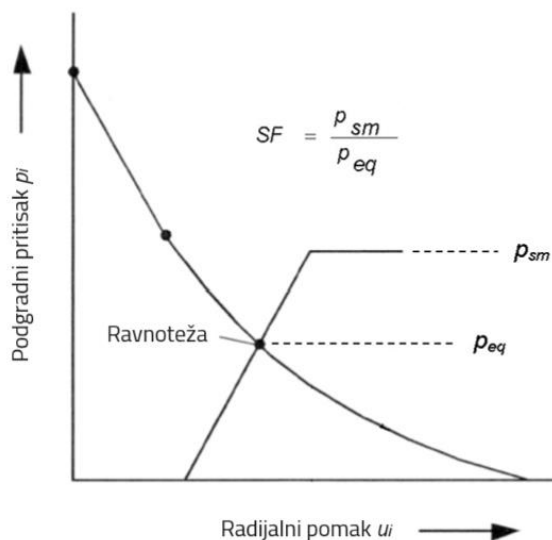
Sve metode dostupne u RocSupportu su rješenja u zatvorenom obliku i pretpostavljaju kružni tunel pri hidrostatskom naprezanju, a pažnja je usmjerena izračunu veličine zone plastifikacije i obliku karakteristične krivulje stijenske mase za različite pretpostavke čvrstoće stijenske mase u napredujućem tunelu. Glavna razlika među metodama je odabir kriterija čvrstoće stijenske mase i hoće li stijenska masa dilatirati ili neće. U RocSupportu dostupne su sljedeće metode: Duncan Fama (1993), Carranza-Torres (2004), Vrakas i Anagnostou (2014), Lee i Pietruszczak (2008), Barbosa (2009) i Vrakas (2016).

4.3.1. Deterministička analiza

Deterministička analiza pretpostavlja da su svi ulazni parametri poznati, odnosno odabiru se konzervativne vrijednosti parametara za predviđanje ponašanja stijenske mase i učinkovitosti podgradnog sustava. To rezultira jedinstvenim rješenjima za krivulju stijenske mase, polumjer zone plastifikacije, ravnotežni podgradni pritisak i faktor sigurnosti podgrade. Nedostatak determinističke analize je što ne uzima u obzir nesigurnosti i varijabilnosti parametara tijekom vremena ili u različitim situacijama.

Kao jedan od rezultata dobiva se faktor sigurnosti FS čija vrijednost može biti veća i manja od 1,0. Faktor sigurnosti veći od 1,0 označava da je podgrada ugrađena pravovremeno, odnosno da krivulja podgrade siječe krivulju stijenske mase prije dostizanja vršne čvrstoće podgrade kao na slici 19. U slučaju kad je faktor sigurnosti veći od 1,0 on predstavlja omjer između maksimalnog podgradnog pritiska, odnosno vršne čvrstoće podgrade p_{sm} i ravnotežnog podgradnog pritiska p_{eq} te je definiran izrazom (8).

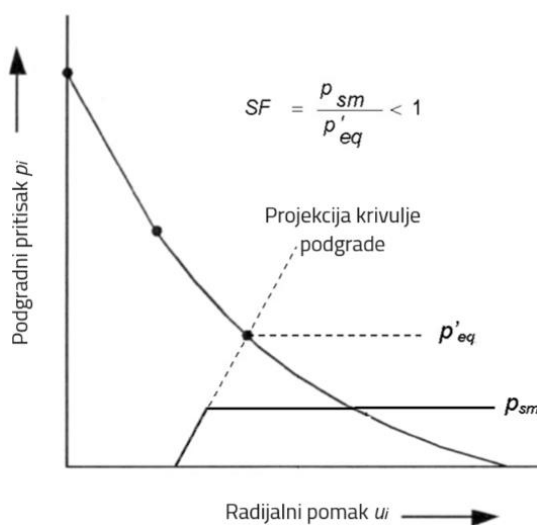
$$FS = \frac{p_{sm}}{p_{eq}} \quad (8)$$



Slika 19.: Faktor sigurnosti veći od 1,0 (Izvor: [15])

Do slučaja da je faktor sigurnosti manji od 1,0 dolazi kada krivulja podgrade siječe krivulju stijenske mase nakon što je postignuta vršna čvrstoća podgrade p_{sm} , odnosno nakon što je premašena elastična granica podgrade. Projektirana vrijednost ravnotežnog podgradnog pritiska p'_{eq} dobiva se projekcijom krivulje podgrade sve dok ona ne presijeca krivulju stijenske mase kao što je prikazano na slici 20. Faktor sigurnosti predstavlja omjer između maksimalnog podgradnog pritiska p_{sm} i projektirane vrijednosti ravnotežnog podgradnog pritiska p'_{eq} te je definiran izrazom (9).

$$FS = \frac{p_{sm}}{p'_{eq}} \quad (9)$$



Slika 20.: Faktor sigurnosti manji od 1,0 (Izvor: [15])

4.3.2. Probabilistička analiza

Probabilistička analiza pretpostavlja da su svi ulazni parametri slučajne varijable, odnosno ne mogu se predvidjeti sa sigurnošću, već samo s određenom vjerojatnošću. Ova analiza pruža sveobuhvatnije razumijevanje rizika i pouzdanosti u projektima podzemnih iskopa. Također omogućava optimizaciju podgradnog sustava uzimajući u obzir široki raspon mogućih scenarija i vjerojatnost događaja. Nedostatak probabilističke analize predstavlja vremenska i računska zahtjevnost te točnost ulaznih parametara koji nisu uvijek dostupni.

U RocSupportu korisnik unosi statističku distribuciju za bilo koji ili sve parametre tunela i stijenske mase (polumjer tunela, in-situ naprezanja, Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, kohezija, jednoosna tlačna čvrstoća, kut unutarnjeg trenja, kut dilatacije), dok su parametri podgrade fiksne vrijednosti.

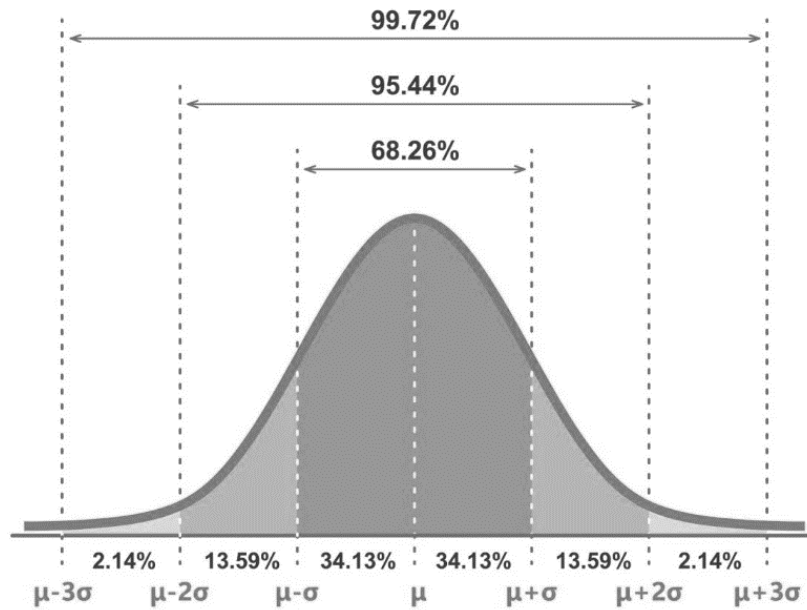
Dostupno je sedam statističkih distribucija: normalna, uniformna, trokutasta, beta, eksponencijalna, lognormalna i gama. Statistička distribucija koja je najčešće u uporabi je normalna distribucija poznatija i kao Gaussova krivulja prikazana na slici 21. Normalna distribucija ima simetričnu krivulju u obliku zvona, a najviša točka krivulje odgovara srednjoj vrijednosti raspodjele μ . Standardna devijacija σ mjeri disperziju podataka oko srednje vrijednosti. Veća standardna devijacija ukazuje na veću raspršenost, a manja ukazuje na skupljanje bliže prema srednjoj vrijednosti.

Funkcija gustoće vjerojatnosti opisuje vjerojatnost da će slučajna varijabla poprimiti određenu vrijednost unutar kontinuiranog skupa mogućih vrijednosti. Područje ispod krivulje funkcije gustoće vjerojatnosti između dvije vrijednosti daje vjerojatnost da će varijabla biti unutar tog intervala. Slučajna varijabla x s funkcijom gustoće prema izrazu (10):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, x \in R \quad (10)$$

ima normalnu distribuciju s parametrima $\mu \in R$ i $\sigma > 0$.

Empirijsko pravilo, poznato kao 3-sigma pravilo ili 68-95-99 pravilo govori nam da se otprilike 68,26 % podataka nalazi unutar ± 1 standardne devijacije od srednje vrijednosti, 95,44 % nalazi se unutar ± 2 standardne devijacije od srednje vrijednosti, a 99,72 % nalazi se unutar ± 3 standardne devijacije od srednje vrijednosti.



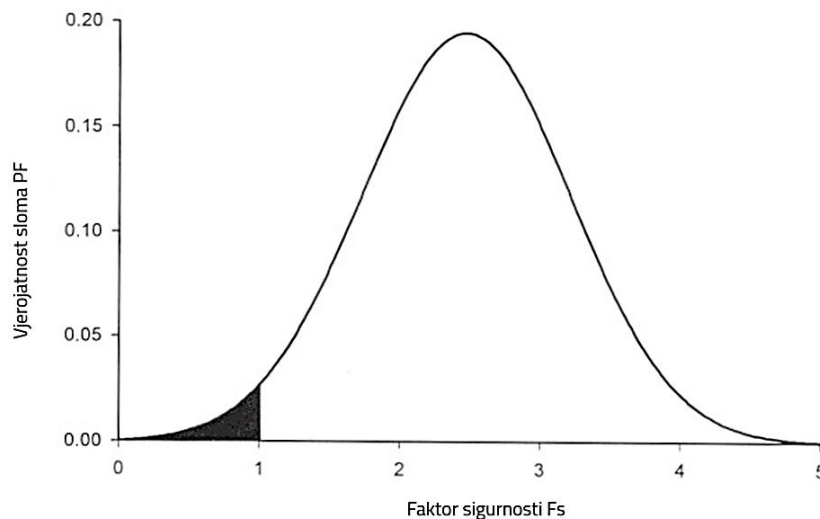
Slika 21.: Normalna distribucija

Koristeći Monte Carlo ili Latin Hypercube uzorkovanje, RocSupport uzorkuje ulazne distribucije i provodi analizu za određeni broj uzoraka koje je korisnik definirao. Na taj se način kao rezultat dobiva statistička distribucija svih izlaznih varijabli (faktor sigurnosti, konvergencija tunela, pomak zida, polumjer zone plastifikacije) za razliku od determinističke analize gdje je rezultat jedinstveno rješenje.

Kao jedan od rezultata dobiva se distribucija faktora sigurnosti iz koje se može izračunati vjerojatnost sloma (eng. *Probability of Failure - PF*). Vjerojatnost sloma predstavlja omjer broja nezadovoljavajućih analiza s faktorom sigurnosti manjim od 1,0 i ukupnog broja provedenih analiza prema izrazu (11).

$$PF = \frac{\text{broj nezadovoljavajućih analiza}}{\text{ukupan broj provedenih analiza}} \quad (11)$$

Vjerojatnost sloma na slici 22. je crno obojano područje ispod distribucije vjerojatnosti faktora sigurnosti podijeljeno s ukupnom površinom ispod krivulje.



Slika 22.: Distribucija vjerojatnosti faktora sigurnosti i vjerojatnosti sloma (Izvor: [15])

Monte Carlo simulacija

Monte Carlo je relativno jednostavna metoda, efikasna pri velikom broju nezavisnih varijabli s različitim distribucijama i izrazito nelinearnim procesima. Slučajnim odabirom formira se uzorak s vrijednostima definiranog područja. Veličina uzorka i broj simulacija ovise o zahtijevanoj razini pouzdanosti i broju slučajnih varijabli. Provodi se velik broj simulacija koje daju velik broj determinističkih faktora sigurnosti što povećava vjerojatnost dobivanja nezadovoljavajućeg faktora [18].

Latin Hypercube uzorkovanje

Latin Hypercube je metoda optimizacije uzorkovanja koja umanjuje zahtjevnost i povećava pouzdanost za isti broj ponavljanja. Za razliku od jednostavnog slučajnog uzorkovanja koje ne pokriva cijeli raspon mogućih vrijednosti ravnomjerno, Latin Hypercube uzorkovanje osigurava da se svaki parametar uzorkuje sustavno kroz svoj raspon. Ova metoda daje usporedive rezultate s Monte Carlo metodom, ali s manjim brojem uzoraka. Raspon svake slučajne varijable podijeli se na n intervala jednakih vjerojatnosti, ovisno o broju željenih simulacija. Svaki parametar se uzorkuje kroz cijeli raspon čime je osigurano da su svi dijelovi zastupljeni u uzorku. Slučajnim odabirom dobiva se po jedna vrijednost svake varijable na svakom intervalu. Grupiranje vrijednosti varijabla uniformnim slučajnim odabirom radi se na način da se svaka vrijednost pojavi samo jedanput [18].

Prednost Latin Hypercube uzorkovanja pronalazi se u tome da osigurava ravnomjernije pokrivanje prostora ulaznih parametara u usporedbi sa slučajnim uzorkovanjem čime je povećana točnost same analize. Osim toga zahtijeva manje uzoraka za postizanje dobre pokrivenosti čime je računski učinkovit [18].

4.4. Duncan Fama metoda

U svome radu, *Numeričko modeliranje popuštajućih zona u slaboj stijenskoj masi* [16] (eng. *Numerical Modeling of Yield Zones in Weak Rock*), Duncan Fama uspoređuje dvije teorije plastičnosti, inkrementalnu teoriju plastičnosti i deformacijsku teoriju plastičnosti. Usporedba se temelji na redukciji naprezanja na granici iskopa stijenske mase. Prije iskopa, naprezanje na granici iskopa je u ravnoteži s in-situ naprežanjem stijenske mase te ga je potrebno smanjiti na nulu ili približno nulu.

Deformacijska teorija plastičnosti opisuje linearno elastični nehomogeni materijal, koristi iste rubne uvjete kao i problem linearne elastičnosti, a naprezanja su opisana Mohr-Coulombovim ili Hoek-Brownovim kriterijem čvrstoće. Tamo gdje je došlo do popuštanja materijala, odnosno gdje je premašena čvrstoća, naprezanja i deformacije ne mogu se više opisati Hookovim zakonom, već je konačna inducirana deformacija povezana s razlikom konačnih i početnih naprezanja konstitucijskom jednadžbom [19].

Kod inkrementalne teorije plastičnosti, rubna naprezanja smanjuju se u inkrementima dok stijenska masa oko otvora ne popusti. Daljnji inkrementi distribuiraju se na susjedne dijelove koji isto popuštaju. Inkrementi deformacija i inkrementi naprezanja povezani su konstitucijskim jednadžbama. Za razliku od deformacijske teorije plastičnosti koja opisuje konačno stanje materijala te se rubna naprezanja nameću odjednom, inkrementalna teorija plastičnosti prati put opterećenja i rasterećenja [19].

Koristeći Duncan Fama metodu modeliraju se zone popuštanja u slabim stijenskim masama na relativno jednostavan način. Kao izvrsna aproksimacija deformacijske teorije plastičnosti, stijenska masa modelira se kao homogeni materijal s nižom krutosti od intaktne stijene i reducira joj se vrijednost in-situ naprezanja [19].

Duncan Fama metoda pretpostavlja kružni tunel polumjera r_0 podvrgnut hidrostatskom in-situ naprežanju p_0 i uniformnom unutarnjem podgradnom pritisku p_i . Ponašanje okolne stijenske mase bazira se na Mohr-Coulombovom kriteriju čvrstoće te se na taj način određuje krivulja stijenske mase i polumjer zone plastifikacije r_p .

Prema tome treba definirati jednoosnu tlačnu čvrstoću σ_{cm} ili koheziju c , kut unutarnjeg trenja φ i kut dilatacije ψ stijenske mase. Međutim, Mohr-Coulombovi parametri kao i Youngov modul elastičnosti E nisu lako dostupni parametri pa se mogu definirati preko Hoek-Brownovih parametara: geološki indeks čvrstoće *GSI* (eng. *Geological Strength Index*), parametar m_i , faktor poremećenosti D i jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene σ_{ci} .

Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće

Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće [19] definiran je izrazom (12):

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k \cdot \sigma_3 \quad (12)$$

gdje je:

- σ_1 veće glavno naprezanje
- σ_3 manje glavno naprezanje
- σ_{cm} jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase
- k parametar definiran kutom unutarnjeg trenja φ preko izraza (13).

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (13)$$

Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase σ_{cm} [19] definirana je izrazom (14).

$$\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (14)$$

Sukladno s gore navedenim izrazima Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće može se pisati preko izraza (15).

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sigma_3 \quad (15)$$

Kohezija c [19] definirana je izrazom (16).

$$c = \frac{\sigma_{cm} \cdot \tan \varphi}{k - 1} \quad (16)$$

Jednoosna vlačna čvrstoća stijenske mase σ_t [19] definirana je izrazom (17).

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (17)$$

Kritični podgradni pritisak p_{cr} [19, 20] definiran je izrazom (18).

$$p_{cr} = \frac{2 \cdot p_0 - \sigma_{cm}}{1 + k} \quad (18)$$

Ako je podgradni pritisak p_i veći od kritičnog podgradnog pritiska p_{cr} [19, 20], ne dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela elastično, a radijalni elastični pomak u_{ie} određen je izrazom (19).

$$u_{ie} = \frac{r_0 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot (p_0 - p_i) \quad (19)$$

Ako je podgradni pritisak p_i manji od kritičnog podgradnog pritiska p_{cr} [19, 20], dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela plastično, a polumjer zone plastifikacije r_p i radijalni plastični pomak u_{ip} određeni su izrazima (20) i (21).

$$r_p = r_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(p_0 + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)}{(k+1) \cdot \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (20)$$

$$u_{ip} = \frac{r_0 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_0 - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_0 - p_i) \right] \quad (21)$$

Konvergencija tunela c predstavlja omjer radijalnog pomaka u_i i polumjera tunela r_0 , dakle vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0} = \frac{(1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_0 - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_0 - p_i) \right] \quad (22)$$

Opći Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

Opći Hoek-Brownov kriterij čvrstoće stijenske mase [21] definiran je izrazom (23):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (23)$$

gdje je:

- σ_1 veće glavno naprezanje
- σ_3 manje glavno naprezanje
- σ_{ci} jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene
- m_b reducirani parametar stijenske mase
- s i a empirijske konstante stijenske mase

Za određivanje vrijednosti konstanti m_b , s i a koriste se geološki indeks čvrstoće GSI i faktor poremećenosti D [21] pa su ovi parametri definirani izrazima (24), (25) i (26).

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (24)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (25)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (26)$$

Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase σ_c [21] definirana je za $\sigma_3 = 0$ izrazom (27).

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (27)$$

Jednoosna vlačna čvrstoća stijenske mase σ_t [21] definirana je za $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$ izrazom (28).

$$\sigma_t = \frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b} \quad (28)$$

Povezanost Mohr-Coulombovog i Općeg Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće

Za određivanje kohezije c i kuta unutarnjeg trenja φ koriste se konstante m_b , s i a te naprezanje σ_{3n} [21] čiju vrijednost dobivamo iz izraza (29).

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (29)$$

Kohezija c [21] definirana je izrazom (30).

$$c = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1})}/((1+a)(2+a))} \quad (30)$$

Kut unutarnjeg trenja φ [21] definiran je izrazom (31).

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (31)$$

Youngov modul elastičnosti E često nije dobro poznat i lako mjerljiv parametar, stoga postoje empirijski odnosi za procjenu modula elastičnosti stijenske mase. Najčešće korištena tri kriterija procjene krutosti stijenske mase su pojednostavljeni Hoek i Diederichsov kriterij, generalizirani Hoek i Diederichsov kriterij te Hoek, Carranza-Torres, Corkum kriterij. Ova tri kriterija temelje se na GSI klasifikaciji stijenske mase i općem Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće stijenske mase.

Pojednostavljeni Hoek i Diederichsov kriterij

Modul elastičnosti dobiva se u MPa preko geološkog indeksa čvrstoće GSI i faktora poremećenosti D [22] korištenjem izraza (32).

$$E = 100000 \cdot \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{75+25 \cdot D - GSI}{11}}} \right) \quad (32)$$

Generalizirani Hoek i Diederichsov kriterij

Modul elastičnosti dobiva se u MPa preko geološkog indeksa čvrstoće GSI , faktora poremećenosti D i modula elastičnosti intaktne stijene E_i [22] korištenjem izraza (33).

$$E = E_i \cdot \left(0,02 \cdot \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15 \cdot D - GSI}{11}}} \right) \quad (33)$$

Hoek, Carranza-Torres, Corkum kriterij

Modul elastičnosti dobiva se u GPa preko geološkog indeksa čvrstoće GSI , faktora poremećenosti D i jednoosne tlačne čvrstoće intaktne stijene σ_{ci} [21] korištenjem izraza (34) i (35).

Ako je $\sigma_{ci} \leq 100 MPa$ vrijedi izraz (34).

$$E = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (34)$$

Ako je $\sigma_{ci} > 100 MPa$ vrijedi izraz (35).

$$E = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (35)$$

5. PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

U ovom primjeru koristit će se Duncan Fama metoda za određivanje karakteristične krivulje stijenske mase. Tunel će se provesti kroz determinističku analizu bez podgrade i s podgradom u RocSupportu. Također koristi se RSData radi dobivanja potrebnih parametara.

5.1. Analiza bez podgrade

RSData

Model je tunel polumjera $r_0 = 6,0$ m, visine nadsloja $H = 60$ m, zapreminske težine $\gamma = 0,027$ MN/m³, a čvrstoća intaktne stijene data je preko Hoek-Brownovih parametara: jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene $\sigma_{ci} = 7$ MPa, parametar $m_i = 10$ i geološki indeks čvrstoće $GSI = 15$. Ulazne vrijednosti parametara intaktne stijene i tunela date su u tablici 1.

Tablica 1.: Ulazne vrijednosti parametara u RSData

Parametar	Vrijednost
Polumjer tunela [m]	6,0
Visina nadsloja [m]	60
Zapreminska težina [MN/m ³]	0,027
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene [MPa]	7
Parametar m_i	10
Geološki indeks čvrstoće	15
Faktor poremećenosti	0
Poissonov koeficijent	0,3

Zadani parametri uneseni su u RSData gdje je za čvrstoću stijene korišten opći Hoek-Brownov kriterij čvrstoće, a za krutost Hoek, Carranza-Torres, Corkum kriterij. U skladu s tim Youngov modul elastičnosti E dobiven je iz izraza (34) za $\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}$.

$$E = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$$

$$E = \left(1 - \frac{0}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{7}{100}} \cdot 10^{\frac{15-10}{40}}$$

$$E = 0,3528 \text{ GPa}$$

$$E = 352,8 \text{ MPa}$$

Kao izlazne vrijednosti Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće dobivene su konstante $m_b = 0,48$, $s = 7,91 \cdot 10^{-5}$ i $a = 0,561$, jednoosna vlačna čvrstoća stijenske mase $\sigma_t = 0,001 \text{ MPa}$, jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase $\sigma_c = 0,035 \text{ MPa}$, globalna čvrstoća $\sigma_{cm} = 0,469 \text{ MPa}$ te maksimalno glavno naprezanje $\sigma_{3max} = 0,707 \text{ MPa}$. Korištenjem izraza (29) iz σ_{3max} dobiva se naprezanje σ_{3n} koje nam je kasnije potrebno za proračun.

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

$$\sigma_{3n} = \frac{0,707}{7}$$

$$\sigma_{3n} = 0,101 \text{ MPa}$$

Dobiveni su i Mohr-Coulombovi parametri, kohezija $c = 0,089 \text{ MPa}$ i kut unutarnjeg trenja $\varphi = 25,639^\circ$. Izlazne vrijednosti parametara stijenske mase i tunela date su u tablici 2.

Tablica 2.: Izlazne vrijednosti parametara u RSDati

Parametar	Vrijednost
Youngov modul elastičnosti [MPa]	352,817
Konstanta m_b	0,48
Konstanta s	$7,91 \times 10^{-5}$
Konstanta a	0,561
Vlačna čvrstoća stijenske mase [MPa]	0,001
Tlačna čvrstoća stijenske mase [MPa]	0,035
Globalna čvrstoća stijenske mase [MPa]	0,469
Maksimalno glavno naprezanje [MPa]	0,707
Kohezija [MPa]	0,089
Kut unutarnjeg trenja [°]	25,639

Opći Hoek-Brownov kriterij čvrstoće

Dobivene vrijednosti parametara mogu se provjeriti preko izraza (24), (25), (26), (27), (28), (30) i (31) za opći Hoek-Brownov kriterij čvrstoće.

- Parametar m_b

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$m_b = 10 \cdot e^{\frac{15-100}{28-14 \cdot 0}}$$

$$m_b = 0,4804$$

- Konstanta s

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$s = e^{\frac{15-100}{9-3 \cdot 0}}$$

$$s = 7,9128 \cdot 10^{-5}$$

- Konstanta a

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

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

$$a = 0,5611$$

- Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase σ_c

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a$$

$$\sigma_c = 7 \cdot (7,9128 \cdot 10^{-5})^{0,5611}$$

$$\sigma_c = 0,0349 \text{ MPa}$$

- Jednoosna vlačna čvrstoća stijenske mase σ_t

$$\sigma_t = \frac{s \cdot \sigma_{ci}}{m_b}$$

$$\sigma_t = \frac{7,9128 \cdot 10^{-5} \cdot 7}{0,4804}$$

$$\sigma_t = 0,001 \text{ MPa}$$

- Kohezija c

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1 + 2a)s + (1 - a)m_b \sigma_{3n}] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1 + a)(2 + a) \sqrt{1 + (6am_b(s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}) / ((1 + a)(2 + a))}}$$

$$= \frac{7[(1 + 2 \cdot 0,5611) \cdot 7,9128 \cdot 10^{-5} + (1 - 0,5611) \cdot 0,4804 \cdot 0,101](7,9128 \cdot 10^{-5} + 0,4804 \cdot 0,101)^{0,5611-1}}{(1 + 0,5611)(2 + 0,5611) \sqrt{1 + (6 \cdot 0,5611 \cdot 0,4804 \cdot (7,9128 \cdot 10^{-5} + 0,4804 \cdot 0,101)^{0,5611-1}) / ((1 + 0,5611)(2 + 0,5611))}}$$

$$c = 0,0892 \text{ MPa}$$

- Kut unutarnjeg trenja φ

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

$$= \sin^{-1} \left[\frac{6 \cdot 0,5611 \cdot 0,4804 \cdot (7,9128 \cdot 10^{-5} + 0,4804 \cdot 0,101)^{0,5611-1}}{2(1 + 0,5611)(2 + 0,5611) + 6 \cdot 0,5611 \cdot 0,4804 \cdot (7,9128 \cdot 10^{-5} + 0,4804 \cdot 0,101)^{0,5611-1}} \right]$$

$$\varphi = 25,64^\circ$$

RocSupport

In-situ naprezanje p_0 dobiva se iz umnoška zapreminske težine i visine nadsloja.

$$p_0 = \gamma \cdot H$$
$$p_0 = 0,027 \cdot 60$$
$$p_0 = 1,62 \text{ MPa}$$

Kao što je ranije spomenuto Duncan Fama u svojoj metodi koristi Mohr-Coulombove parametre za stijensku masu. Međutim, ako su oni nedostupni mogu se dobiti preko Hoek-Brownovih parametara. Ulazne vrijednosti parametara tunela i intaktne stijene te izlazne vrijednosti parametara stijenske mase date su u tablicama 3. i 4.

Tablica 3.: Ulazne vrijednosti parametara u RocSupportu

Parametar	Vrijednost
Polumjer tunela [m]	6,0
Visina nadsloja [m]	60
Zapreminska težina [MN/m^3]	0,027
Jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene [MPa]	7
Parametar m_i	10
Geološki indeks čvrstoće	15
Faktor poremećenosti	0
Poissonov koeficijent	0,3

Tablica 4.: Izlazne vrijednosti parametara u RocSupportu

Parametar	Vrijednost
Youngov modul elastičnosti [MPa]	352,817
Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase [MPa]	0,46927
Kohezija [MPa]	0,147873
Kut unutarnjeg trenja [$^\circ$]	25,6394

Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće

Dobivene vrijednosti parametara mogu se provjeriti preko izraza (13), (14), (16) i (18) za Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće.

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$k = \frac{1 + \sin(25,64)}{1 - \sin(25,64)}$$

$$k = 2,5256$$

- Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase σ_{cm}

$$\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot 0,147873 \cdot \cos(25,64)}{1 - \sin(25,64)}$$

$$\sigma_{cm} = 0,47 \text{ MPa}$$

- Kohezija c

$$c = \frac{\sigma_{cm} \cdot \tan \varphi}{k - 1}$$

$$c = \frac{0,47 \cdot \tan(25,64)}{2,5256 - 1}$$

$$c = 0,14787 \text{ MPa}$$

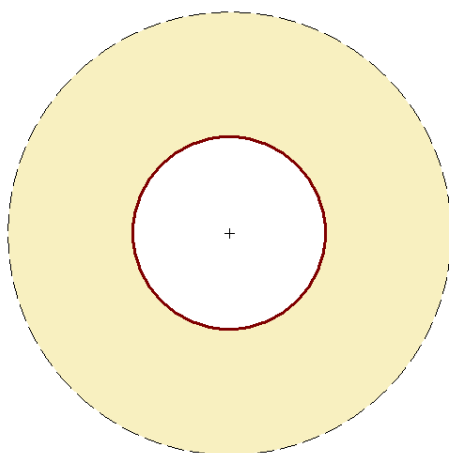
- Kritični podgradni pritisak p_{cr}

$$p_{cr} = \frac{2 \cdot p_0 - \sigma_{cm}}{1 + k}$$

$$p_{cr} = \frac{2 \cdot 1,62 - 0,47}{1 + 2,5256}$$

$$p_{cr} = 0,7857 \text{ MPa}$$

RocSupport daje grafički prikaz tunela i karakterističnu krivulju stijenske mase s pripadnom konvergencijom i pomakom zidova tunela. Na slici 23. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 13,77 m.



Slika 23.: Zona plastifikacije za determinističku analizu bez podgrade

Na slikama 24. i 25. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase. Konvergencija tunela iznosi $c = 2,03 \%$, a pomak $u_i = 121,56$ mm. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{121,56}{6000}$$

$$c = 0,02026$$

$$c = 2,03 \%$$

Mobilizirani podgradni pritisak iznosi $p_i = 0$ MPa te je on manji od kritičnog podgradnog pritiska $p_{cr} = 0,79$ MPa . Dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela plastično, a polumjer zone plastifikacije r_p i plastični pomak u_{ip} određeni su izrazima (20) i (21).

$$r_p = r_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(p_0 + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)}{(k+1) \cdot \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

$$r_p = 6 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(1,62 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)}{(2,53+1) \cdot \left(0 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{2,53-1}}$$

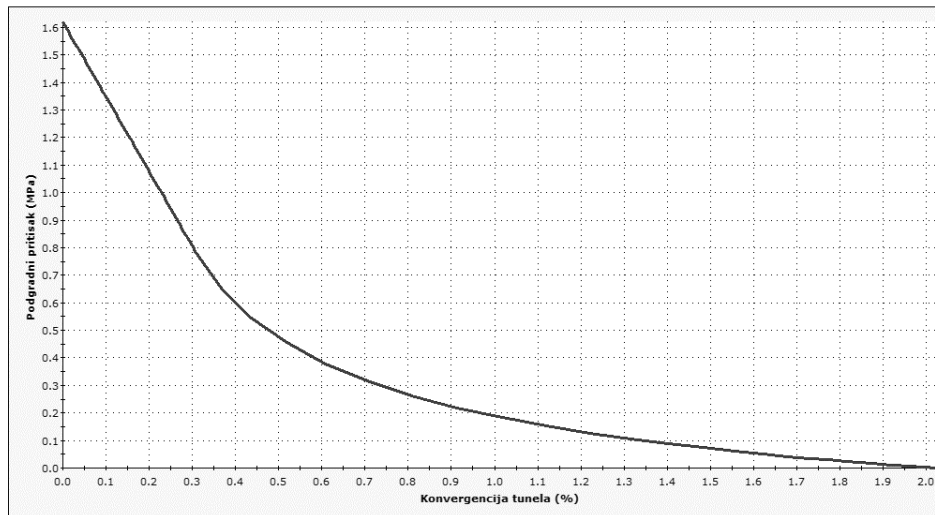
$$r_p = 13,77 \text{ m}$$

$$u_{ip} = \frac{r_0 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_0 - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_0 - p_i) \right]$$

$$u_{ip} = \frac{6000 \cdot (1 + 0,3)}{352,8} \cdot \left[2 \cdot (1 - 0,3) \cdot (1,62 - 0,79) \cdot \left(\frac{13770}{6000}\right)^2 - (1 - 2 \cdot 0,3) \cdot (1,62 - 0) \right]$$

$$u_{ip} = 121,56 \text{ mm}$$

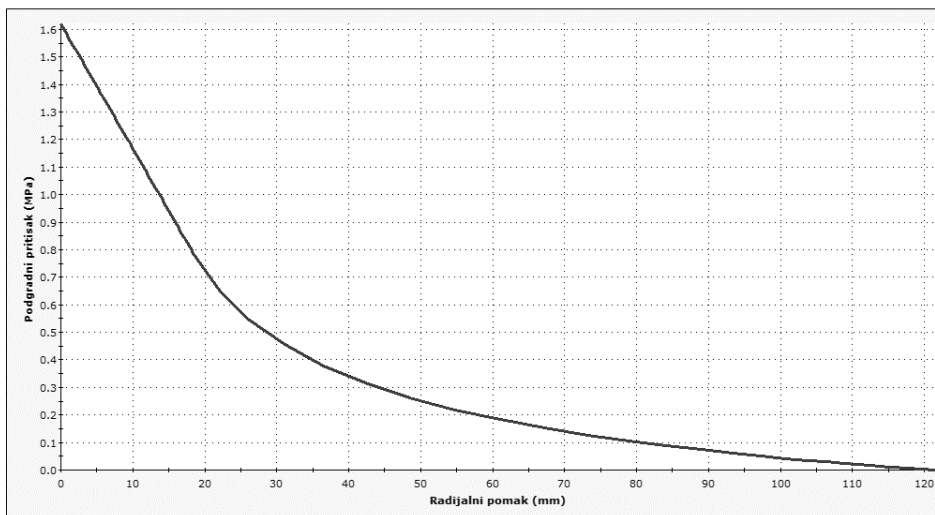
Karakteristična krivulja stijenske mase



Konacna konvergencija: 2.03%

Slika 24.: Konvergencija za determinističku analizu bez podgrade

Karakteristična krivulja stijenske mase



Konacni radijalni pomak: 121.56mm

Slika 25.: Radijalni pomak za determinističku analizu bez podgrade

5.2. Analiza s podgradom

S obzirom da konvergencija iznosi 2,03 %, stijenska masa pripada kategoriji B prema tablici 5. [23]. Kako bi se smanjila konvergencija te pomak zidova ugrađuje se podgradni sustav od sidara i mlaznog betona.

Tablica 5.: Prijedlog podgradnog sustava za određenu deformaciju (Izvor: [23])

Kategorija	Deformacija [%]	Geotehnički problem	Podgradni sustav
B	1 – 2,5	Metoda konvergencije koristi se za predviđanje formiranja zone plastifikacije oko tunela te za analizu interakcije progresivnog razvoja zone plastifikacije i različitih podgradnih sustava.	Manji problemi obično se rješavaju ugradnjom sidara i mlaznog betona, a moguće je i dodavanje čeličnih lukova za dodatnu sigurnosti.

Podgradni sustav od sidara

Karakteristike sidra date su u tablici 6. Nosivost sidara dobiva se preko izraza (2).

$$p_{max,sidra} = \frac{T_{bf}}{s_l \cdot s_c}$$

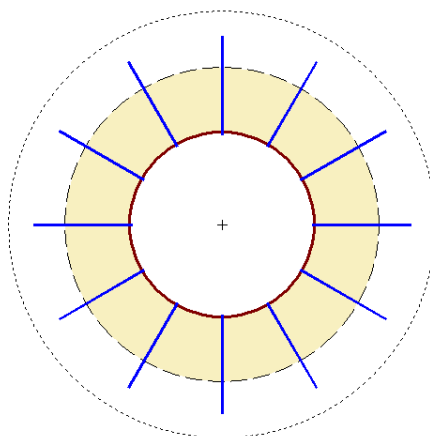
$$p_{max,sidra} = \frac{0,354}{1,0 \cdot 1,0}$$

$$p_{max,sidra} = 0,354 \text{ MPa}$$

Tablica 6.: Karakteristike sidra za determinističku analizu

Promjer sidra [mm]	34
Sila u sidru [MN]	0,354
Youngov modul elastičnosti [MPa]	207 000
Uzdužni razmak [m]	1,0
Poprečni razmak [m]	1,0
Udaljenost od čela [m]	3,0
Nosivost [MPa]	0,354
Maksimalna deformacija [%]	0,2

Na slici 26. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 10,13 m, a iscrtkana linija predstavlja polumjer zone plastifikacije prije dodavanja podgrade od 13,77 m. Plave linije predstavljaju ugrađena sidra.



Slika 26.: Zona plastifikacije za determinističku analizu s podgradom od sidara

Na slikama 27. i 28. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase, a ljubičasta karakterističnu krivulju podgrade. Na sjecištu krivulja iščitava se konvergencija tunela $c = 1,01 \%$ te pomak $u_i = 60,85 \text{ mm}$. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{60,85}{6000}$$

$$c = 0,0101$$

$$c = 1,01 \%$$

Konvergencija na čelu tunela iznosi $c = 0,48 \%$, a pomak $u_i = 28,72$ mm. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{28,72}{6000}$$

$$c = 0,00478$$

$$c = 0,48 \%$$

Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade iznosi $c = 0,91 \%$, a pomak $u_i = 54,61$ mm. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{54,61}{6000}$$

$$c = 0,0091$$

$$c = 0,91 \%$$

Mobilizirani podgradni pritisak iznosi $p_i = 0,1827$ MPa te je on manji od kritičnog podgradnog pritiska $p_{cr} = 0,79$ MPa. Dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela plastično, a polumjer zone plastifikacije r_p i plastični pomak u_{ip} određeni su izrazima (20) i (21).

$$r_p = r_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(p_0 + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)}{(k+1) \cdot \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

$$r_p = 6 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(1,62 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)}{(2,53+1) \cdot \left(0,1827 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{2,53-1}}$$

$$r_p = 10,13 \text{ m}$$

$$u_{ip} = \frac{r_0 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_0 - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_0 - p_i) \right]$$

$$u_{ip} = \frac{6000 \cdot (1 + 0,3)}{352,8} \cdot \left[2 \cdot (1 - 0,3) \cdot (1,62 - 0,79) \cdot \left(\frac{10130}{6000}\right)^2 - (1 - 2 \cdot 0,3) \cdot (1,62 - 0,1827) \right]$$

$$u_{ip} = 60,85 \text{ mm}$$

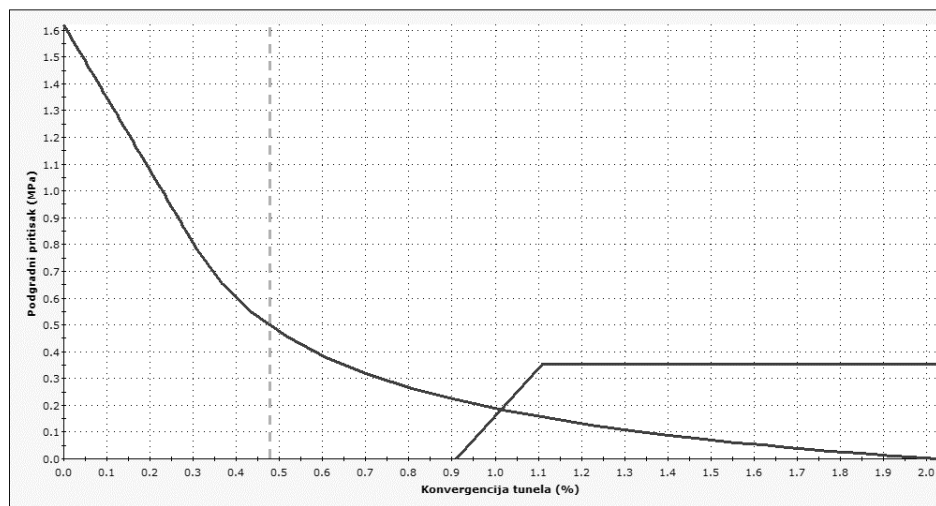
Osim toga kao jedna od izlaznih vrijednosti determinističke analize dobiven je faktor sigurnosti $FS = 1,92$. Faktor sigurnosti određen je omjerom maksimalnog podgradnog pritiska p_{max} i mobiliziranog podgradnog pritiska p_{eq} . Mobilizirani podgradni pritisak predstavlja ravnotežnu vrijednost, dakle njegova vrijednost iščita se iz grafa na sjecištu krivulja stijenske mase i podgrade te ta vrijednost iznosi $0,1827 \text{ MPa}$. Sukladno tome vrijedi izraz (8).

$$FS = \frac{p_{max}}{p_{eq}}$$

$$FS = \frac{0,354}{0,1827}$$

$$FS = 1,92$$

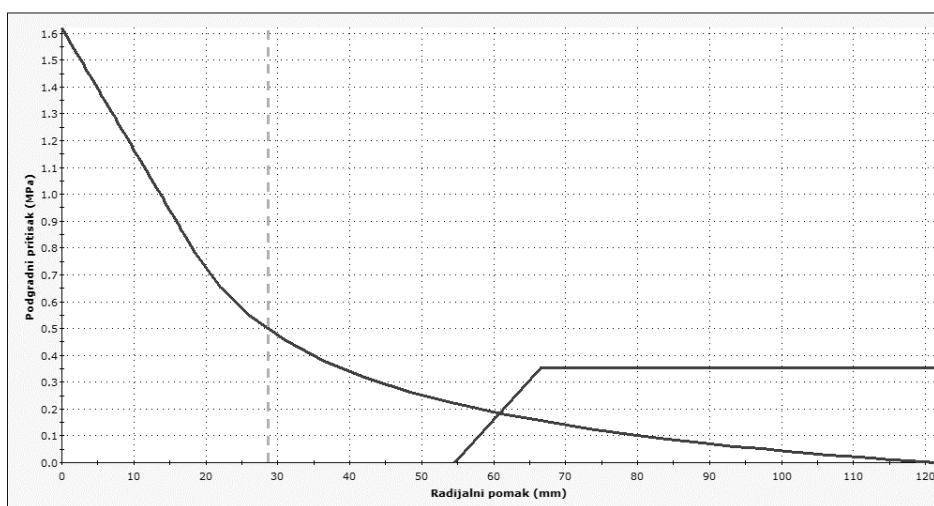
Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade



Konacna konvergencija: 1.01%, FS: 1.92
 Konvergencija na celu tunela: 0.48%, Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade: 0.91%

Slika 27.: Konvergencija za determinističku analizu s podgradom od sidara

Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade



Konacni radijalni pomakt: 60.85mm, FS: 1.92
 Radijalni pomak na celu tunela: 28.72mm, Radijalni pomak na mjestu ugradnje podgrade: 54.61mm

Slika 28.: Radijalni pomak za determinističku analizu s podgradom od sidara

Podgradni sustav od sidara i mlaznog betona

Karakteristike mlaznog betona date su u tablici 7. Nosivost mlaznog betona dobiva se preko izraza (6).

$$p_{max,mlazni\ beton} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \cdot \left[1 - \frac{(r_0 - t_c)^2}{r_0^2} \right]$$

$$p_{max,mlazni\ beton} = \frac{35}{2} \cdot \left[1 - \frac{(6000 - 50)^2}{6000^2} \right]$$

$$p_{max,mlazni\ beton} = 0,2905\ MPa$$

Tablica 7.: Karakteristike mlaznog betona za determinističku analizu

Debljina mlaznog betona [mm]	50
Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]	35
Youngov modul elastičnosti [MPa]	30 000
Poissonov koeficijent	0,3
Udaljenost od čela [m]	3,0
Nosivost [MPa]	0,2905
Maksimalna deformacija [%]	0,111

Maksimalni podgradni pritisak p_{max} predstavlja zbroj vrijednosti maksimalnog podgradnog pritiska za sidra i za mlazni beton, dakle vrijedi:

$$p_{max} = p_{max,sidra} + p_{max,mlazni\ beton}$$

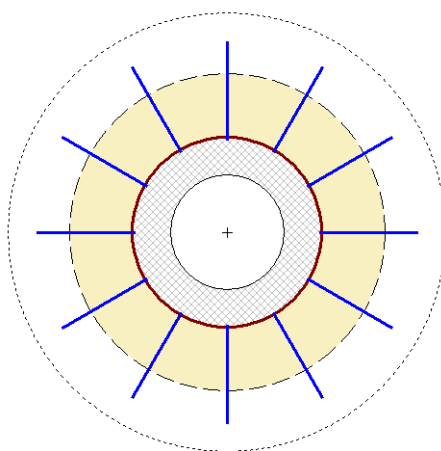
$$p_{max} = 0,354 + 0,2905$$

$$p_{max} = 0,6445\ MPa$$

Maksimalna deformacija podgrade od mlaznog betona $\varepsilon_{max,mlazni\ beton}$ iznosi 0,111 %, a vrijedi da se kao maksimalna vrijednost deformacije podgrade uzima veća vrijednost između sidara i mlaznog betona, dakle maksimalna deformacija podgrade iznosi 0,2 %.

$$\varepsilon_{max} = \max\{\varepsilon_{sidra}; \varepsilon_{max,mlazni\ beton}\} = \{0,2; 0,111\} = 0,2\ \%$$

Na slici 29. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 9,94 m, a iscrtkana linija predstavlja polumjer zone plastifikacije prije dodavanja podgrade od 13,77 m. Plave linije predstavljaju ugrađena sidra, a šrafirano sivo područje mlazni beton.



Slika 29.: Zona plastifikacije za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

Na slikama 30. i 31. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase, a ljubičasta karakterističnu krivulju podgrade. Na sjecištu krivulja iščitava se konvergencija tunela $c = 0,97\ \%$ te pomak $u_i = 58,3\ mm$. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{58,3}{6000}$$

$$c = 0,00971$$

$$c = 0,97 \%$$

Konvergencija na čelu tunela iznosi $c = 0,48 \%$, a pomak $u_i = 28,72$ mm. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{28,72}{6000}$$

$$c = 0,00478$$

$$c = 0,48 \%$$

Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade iznosi $c = 0,91 \%$, a pomak $u_i = 54,61$ mm. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{54,61}{6000}$$

$$c = 0,0091$$

$$c = 0,91 \%$$

Mobilizirani podgradni pritisak iznosi $p_i = 0,2$ MPa te je on manji od kritičnog podgradnog pritiska $p_{cr} = 0,79$ MPa. Dolazi do sloma te je ponašanje stijenske mase oko tunela plastično, a polumjer zone plastifikacije r_p i plastični pomak u_{ip} određeni su izrazima (20) i (21).

$$r_p = r_0 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(p_0 + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)}{(k+1) \cdot \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{(k-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

$$r_p = 6 \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(1,62 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)}{(2,53+1) \cdot \left(0,2 + \frac{0,47}{(2,53-1)} \right)} \right]^{\frac{1}{2,53-1}}$$

$$r_p = 9,94 \text{ m}$$

$$u_{ip} = \frac{r_0 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \left[2 \cdot (1 - \nu) \cdot (p_0 - p_{cr}) \cdot \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^2 - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (p_0 - p_i) \right]$$

$$u_{ip} = \frac{6000 \cdot (1 + 0,3)}{352,8} \cdot \left[2 \cdot (1 - 0,3) \cdot (1,62 - 0,79) \cdot \left(\frac{9940}{6000}\right)^2 - (1 - 2 \cdot 0,3) \cdot (1,62 - 0,2) \right]$$

$$u_{ip} = 58,3 \text{ mm}$$

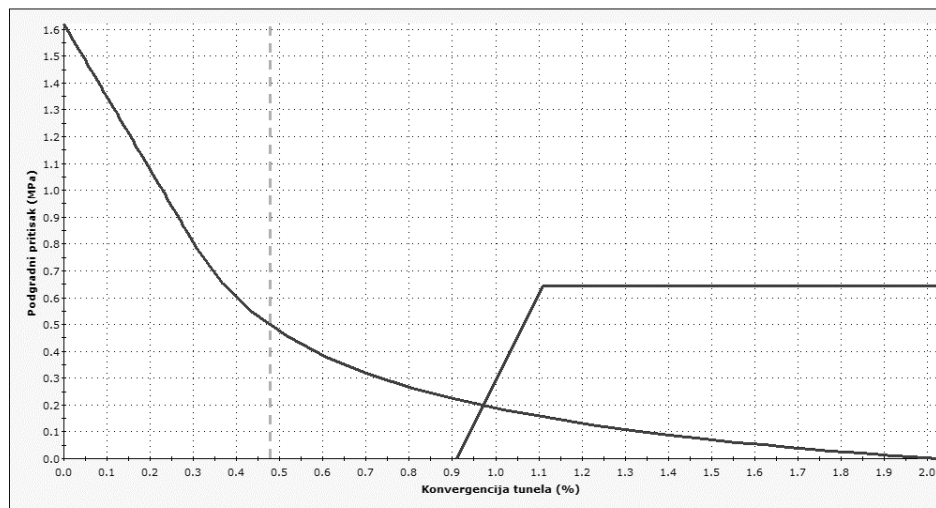
Osim toga kao jedna od izlaznih vrijednosti determinističke analize dobiven je faktor sigurnosti $FS = 3,25$. Faktor sigurnosti određen je omjerom maksimalnog podgradnog pritiska p_{max} i mobiliziranog podgradnog pritiska p_{eq} . Mobilizirani podgradni pritisak predstavlja ravnotežnu vrijednost, dakle njegova vrijednost iščita se iz grafa na sjecištu krivulja stijenske mase i podgrade te ta vrijednost iznosi $0,2 \text{ MPa}$. Sukladno tome vrijedi izraz (8).

$$FS = \frac{p_{max}}{p_{eq}}$$

$$FS = \frac{0,6445}{0,2}$$

$$FS = 3,25$$

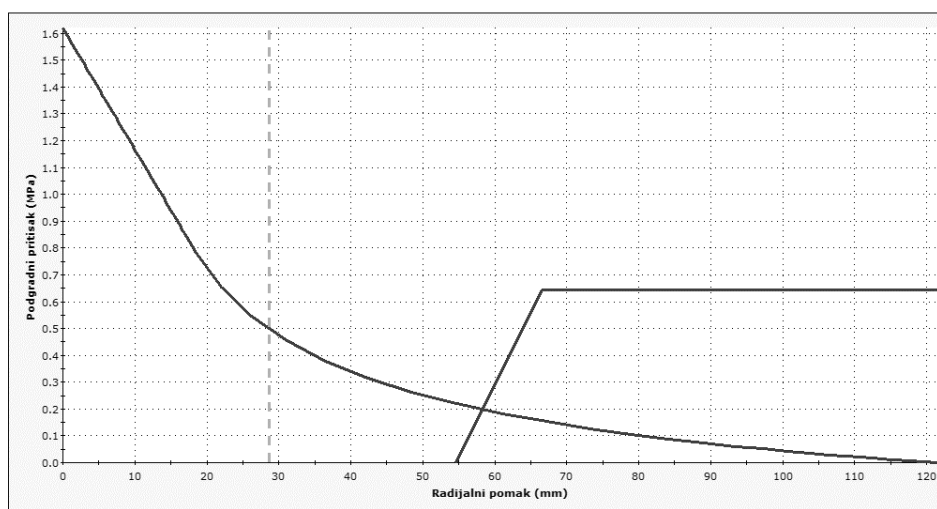
Karakteristicna krivulja stijenske mase i podgrade



Konacna konvergencija: 0.97%, FS: 3.25
 Konvergencija na celu tunela: 0.48%, Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade: 0.91%

Slika 30.: Konvergencija za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade



Konacni radijalni pomak: 58.3mm, FS: 3.25
 Radijalni pomak na celu tunela: 28.72mm, Radijalni pomak na mjestu ugradnje podgrade: 54.61mm

Slika 31.: Radijalni pomak za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

Tablica 8.: Izlazne vrijednosti za determinističku analizu bez podgrade i s podgradom

	Bez podgrade	Sidra	Sidra i mlazni beton
Polumjer zone plastifikacije [m]	13,77	10,13	9,94
Konvergencija tunela [%]	2,03	1,01	0,97
Pomak zidova [mm]	121,56	60,85	58,3
Maksimalni podgradni pritisak [MPa]	/	0,354	0,6445
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	/	0,1827	0,2
Faktor sigurnosti	/	1,92	3,25

Iz tablice 8. vidljivo je da dodavanje mlaznog betona nema prevelik utjecaj na vrijednosti polumjera zone plastifikacije, konvergencije tunela te mobilizirani podgradni pritisak. Razlog tome leži u sjecištu krivulja koje se nije značajno promijenilo u odnosu na sjecište krivulja gdje se kao podgrada nalaze samo sidra. S obzirom da je maksimalni podgradni pritisak podgradnog sustava od sidara i mlaznog betona skoro dvaput veći od maksimalnog podgradnog pritiska od samo sidara, faktor sigurnosti se značajno promijenio.

6. PARAMETARSKA DETERMINISTIČKA ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE

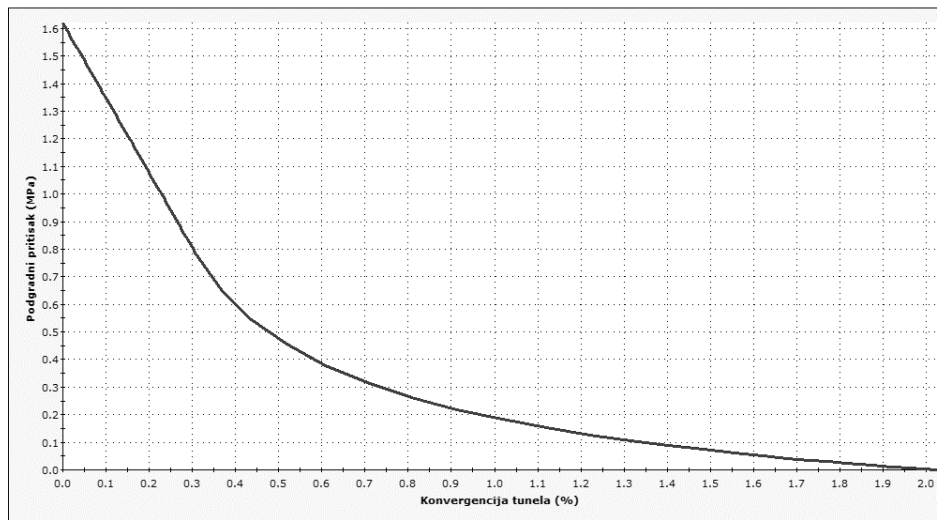
Parametarska analiza u geotehnici predstavlja proces ispitivanja utjecaja različitih parametara na ponašanje geotehničkih sustava. Cilj ove analize je identificirati ključne faktore koji utječu na stabilnost, deformaciju ili druge karakteristike tla i stijenskih masa u inženjerskim projektima. Provedena je parametarska deterministička analiza za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće te manje krutosti i čvrstoće, a vrijednosti parametara date su u tablici 9. Također, provedena je parametarska analiza za podgradni sustav, gdje su mijenjane karakteristike elemenata.

Tablica 9.: Ulazne vrijednosti parametarske determinističke analize

Parametar	Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće	Stijenska masa manje krutosti i čvrstoće
Polumjer tunela [m]	6,0	6,0
Visina nadsloja [m]	60	60
Zapreminska težina [MN/m ³]	0,027	0,027
Youngov modul elastičnosti [MPa]	352,817	50
Poissonov koeficijent	0,3	0,3
Kohezija [MPa]	0,147873	0,1
Kut unutarnjeg trenja [°]	25,6394	20

Na slikama 32. i 33. date su konvergencije stijena te je vidljivo da je sa smanjenjem krutosti i čvrstoće konvergencija veća. U tablici 10. vidljivo je da sa smanjenjem krutosti i čvrstoće rastu vrijednosti polumjera zone plastifikacije, konvergencije tunela te pomaka zidova.

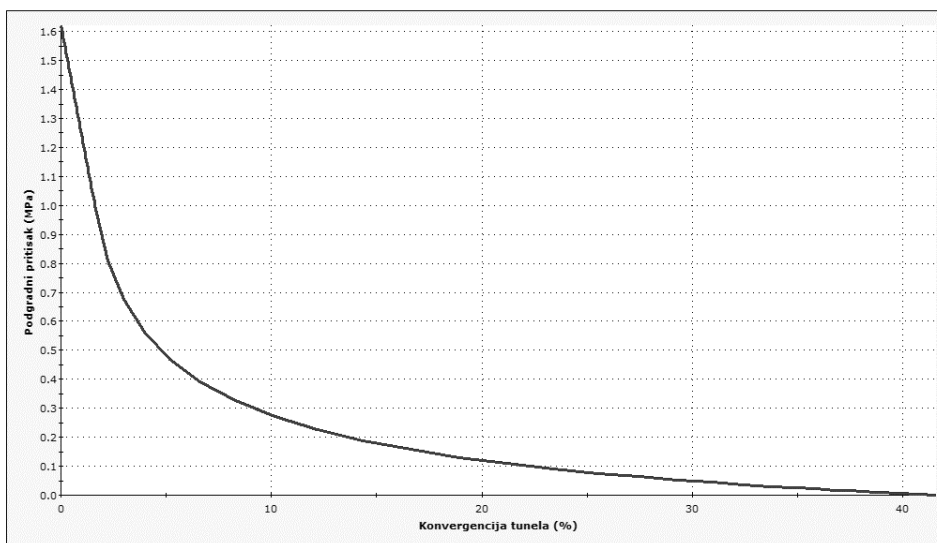
Karakteristična krivulja stijenske mase



Konacna konvergencija: 2.03%

Slika 32.: Konvergencija stijenske mase veće krutosti i čvrstoće

Karakteristična krivulja stijenske mase



Konacna konvergencija: 41.6 %

Slika 33.: Konvergencija stijenske mase manje krutosti i čvrstoće

Tablica 10.: Izlazne vrijednosti parametarske determinističke analize

	Stijenska masa veće krutosti	Stijenska masa manje krutosti
Polumjer zone plastifikacije [m]	13,77	25,7
Konvergencija tunela [%]	2,03	41,6
Pomak zidova [mm]	121,56	2495,89

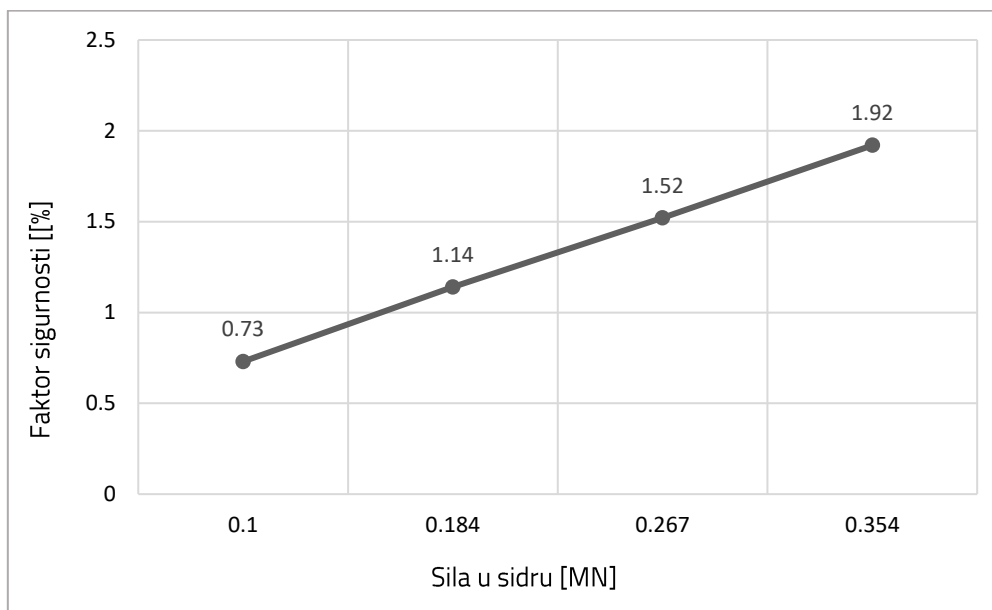
6.1. Utjecaj sidara na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

6.1.1. Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće

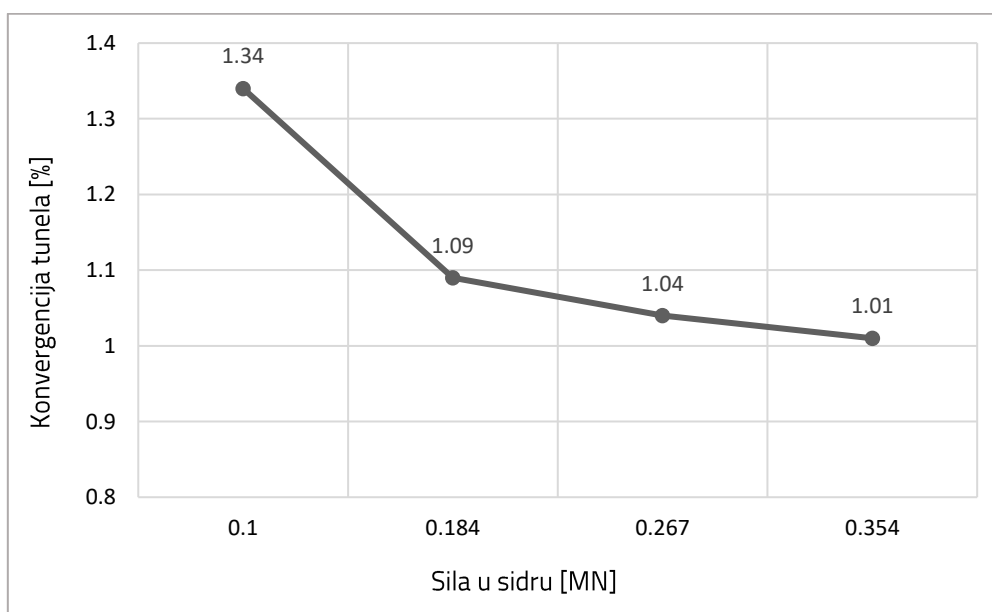
Testirana su sidra promjera 17, 19, 25 i 34 mm za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće te su izlazne vrijednosti date u tablici 11. Na slici 34. vidno je povećanje faktora sigurnosti uz povećanje sile u sidru, dok je na slikama 35. i 36. vidno smanjenje konvergencije tunela i pomaka zidova.

Tablica 11.: Izlazne vrijednosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće za različita sidra

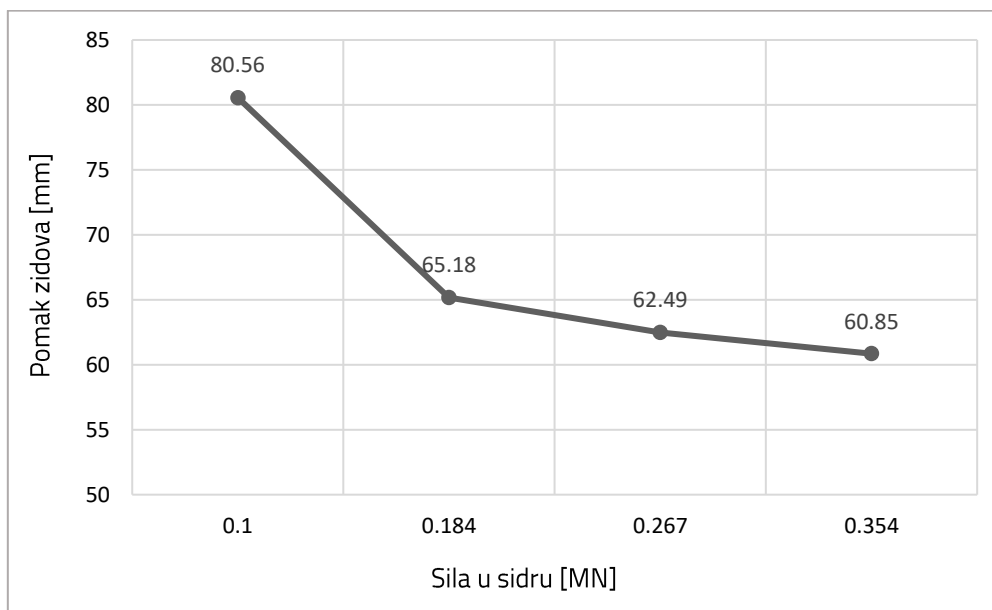
Promjer sidra [mm]	17	19	25	34
Sila u sidru [MN]	0,1	0,184	0,267	0,354
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,1	0,16	0,18	0,18
Konvergencija tunela [%]	1,34	1,09	1,04	1,01
Pomak zidova [mm]	80,56	65,18	62,49	60,85
Faktor sigurnosti	0,73	1,14	1,52	1,92



Slika 34.: Utjecaj sile u sidru na faktor sigurnosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće



Slika 35.: Utjecaj sile u sidru na konvergenciju tunela stijenske mase veće krutosti i čvrstoće



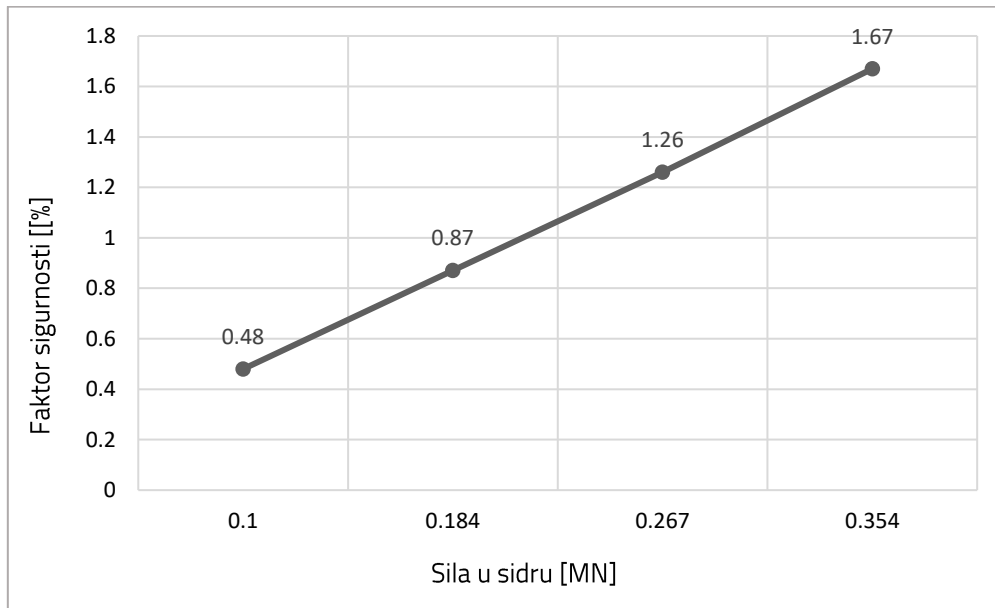
Slika 36.: Utjecaj sile u sidru na pomak zidova stijenske mase veće krutosti i čvrstoće

6.1.2. Stijenska masa manje krutosti i čvrstoće

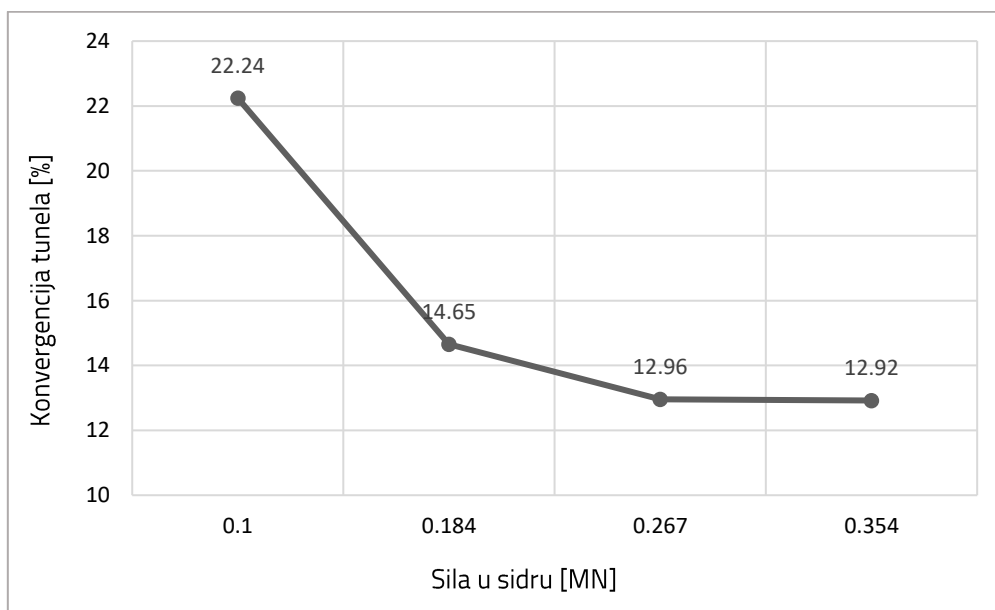
Testirana su sidra promjera 17, 19, 25 i 34 mm za stijensku masu manje krutosti i čvrstoće te su izlazne vrijednosti date u tablici 12. Na slici 37. vidno je povećanje faktora sigurnosti uz povećanje sile u sidru, dok je na slikama 38. i 39. vidno smanjenje konvergencije tunela i pomaka zidova.

Tablica 12.: Izlazne vrijednosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće za različita sidra

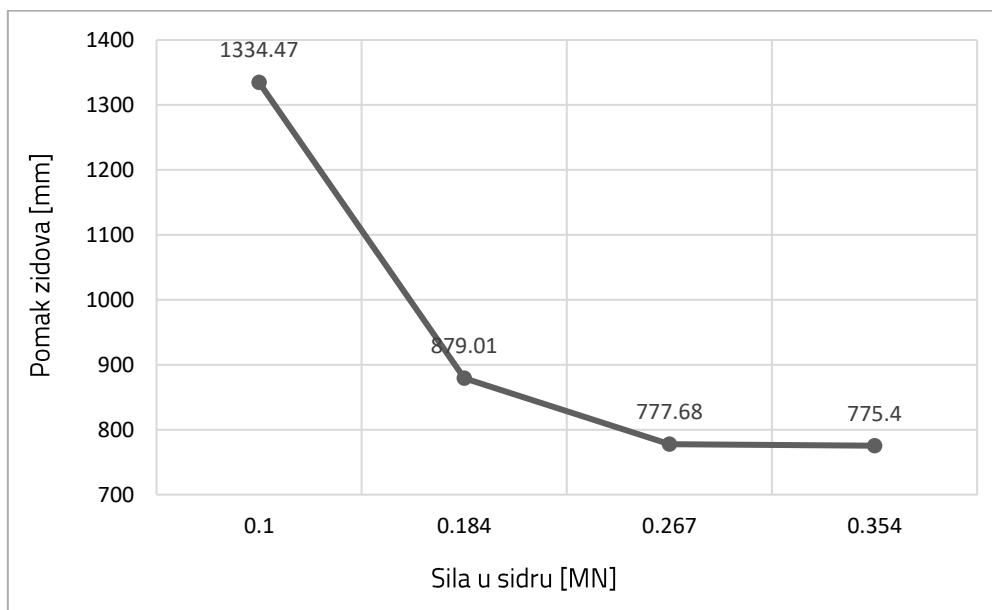
Promjer sidra [mm]	17	19	25	34
Sila u sidru [MN]	0,1	0,184	0,267	0,354
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,1	0,18	0,21	0,21
Konvergencija tunela [%]	22,24	14,65	12,96	12,92
Pomak zidova [mm]	1334,47	879,01	777,68	775,4
Faktor sigurnosti	0,48	0,87	1,26	1,67



Slika 37.: Utjecaj sile u sidru na faktor sigurnosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće



Slika 38.: Utjecaj sile u sidru na konvergenciju tunela stijenske mase manje krutosti i čvrstoće



Slika 39.: Utjecaj sile u sidru na pomak zidova stijenske mase manje krutosti i čvrstoće

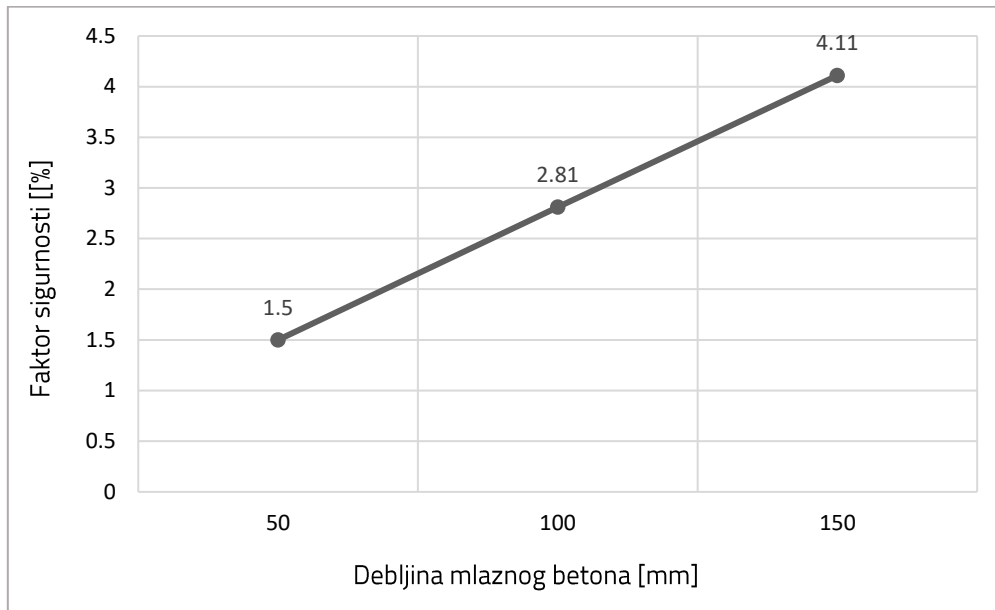
6.2. Utjecaj mlaznog betona

6.2.1. Stijenska masa veće krutosti

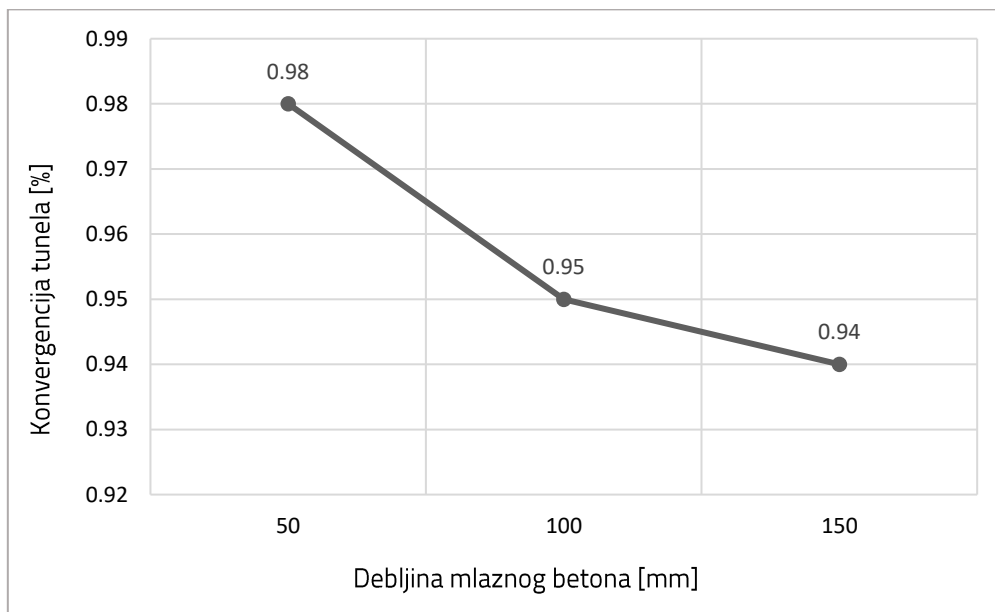
Testiran je mlazni beton debljine 50, 100 i 150 mm za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće te su izlazne vrijednosti date u tablici 13. Na slici 40. vidno je povećanje faktora sigurnosti uz povećanje debljine mlaznog betona, dok je na slikama 41. i 42. vidno smanjenje konvergencije tunela i pomaka zidova.

Tablica 13.: Izlazne vrijednosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće za različite debljine mlaznog betona

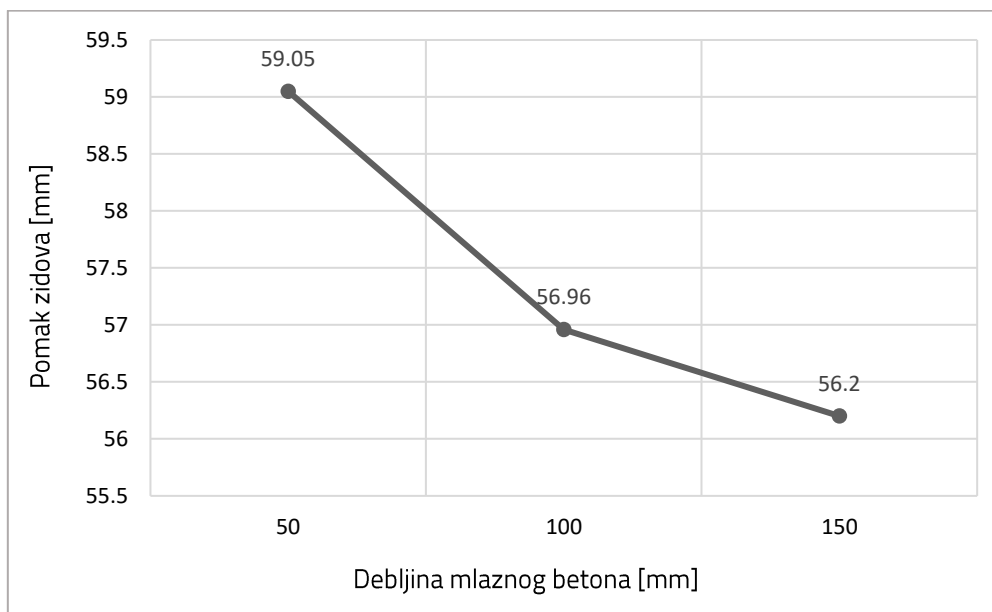
Debljina mlaznog betona [mm]	50	100	150
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,19	0,21	0,21
Konvergencija tunela [%]	0,98	0,95	0,94
Pomak zidova [mm]	59,05	56,96	56,2
Faktor sigurnosti	1,5	2,81	4,11



Slika 40.: Utjecaj debljine mlaznog betona na faktor sigurnosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće



Slika 41.: Utjecaj debljine mlaznog betona na konvergenciju tunela stijenske mase veće krutosti i čvrstoće



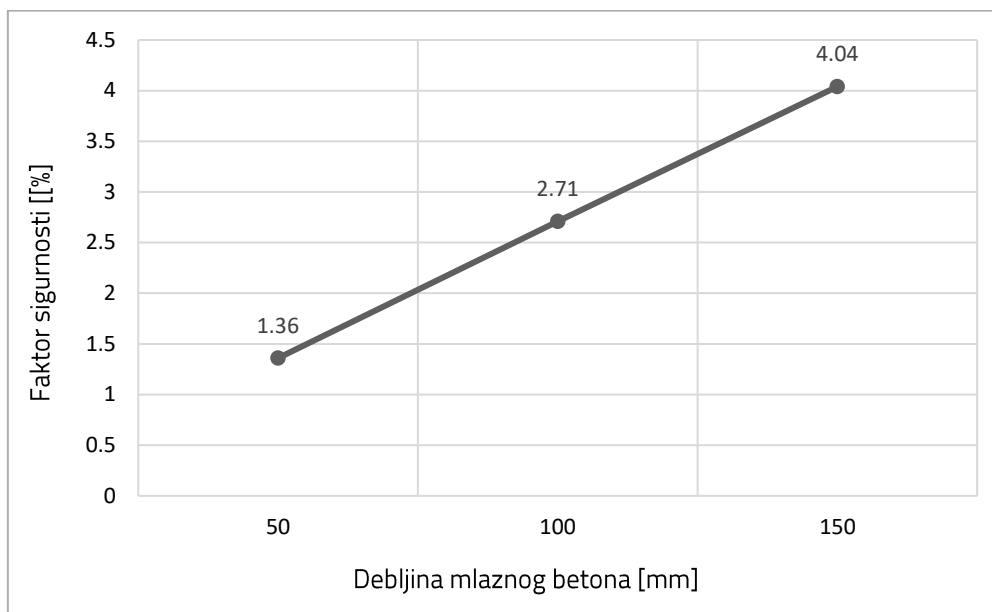
Slika 42.: Utjecaj debljine mlaznog betona na pomak zidova stijenske mase veće krutosti i čvrstoće

6.2.2. Stijenska masa manje krutosti i čvrstoće

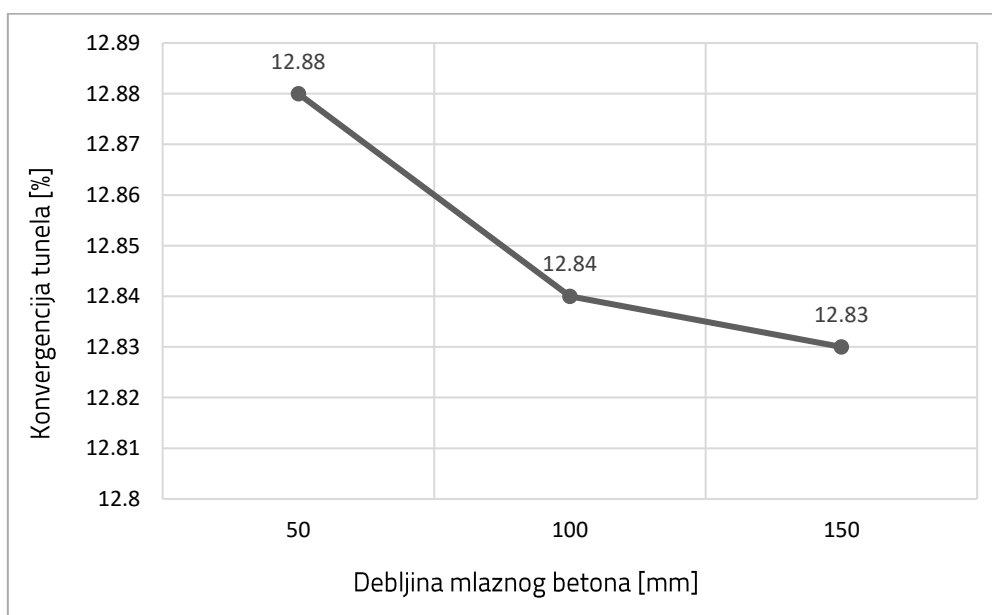
Testiran je mlazni beton debljine 50, 100 i 150 mm za stijensku masu manje krutosti i čvrstoće te su izlazne vrijednosti date u tablici 14. Na slici 43. vidno je povećanje faktora sigurnosti uz povećanje debljine mlaznog betona, dok je na slikama 44. i 45. vidno smanjenje konvergencije tunela i pomaka zidova.

Tablica 14.: Izlazne vrijednosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće za različite debljine mlaznog betona

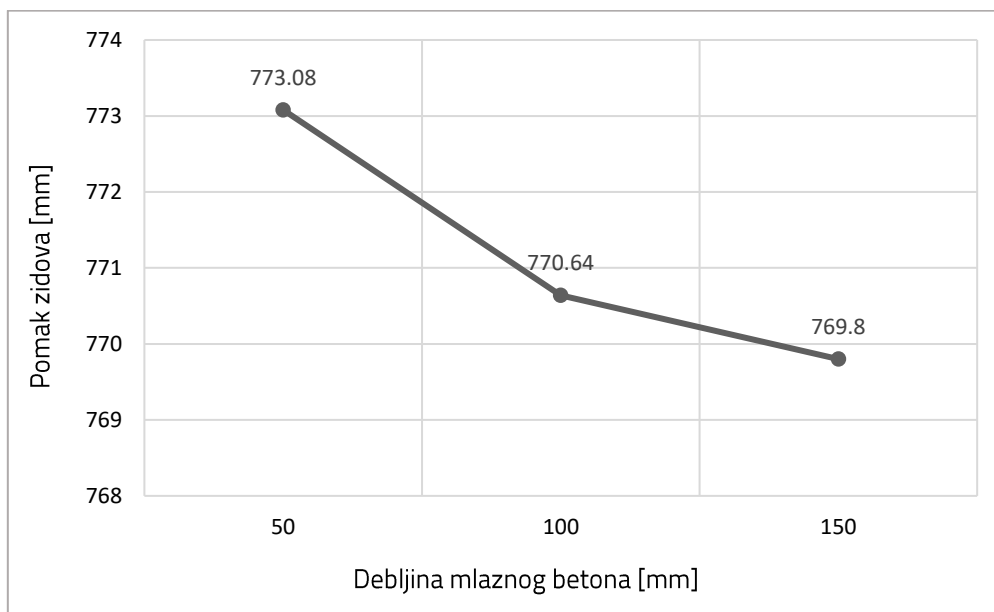
Debljina mlaznog betona [mm]	50	100	150
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,21	0,21	0,21
Konvergencija tunela [%]	12,88	12,84	12,83
Pomak zidova [mm]	773,08	770,64	769,8
Faktor sigurnosti	1,36	2,71	4,04



Slika 43.: Utjecaj debljine mlaznog betona na faktor sigurnosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće



Slika 44.: Utjecaj debljine mlaznog betona na konvergenciju tunela stijenske mase manje krutosti i čvrstoće



Slika 45.: Utjecaj debljine mlaznog betona na pomak zidova stijenske mase manje krutosti i čvrstoće

7. PROBABILISTIČKA ANALIZA KARAKTERISTIČNIH KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE

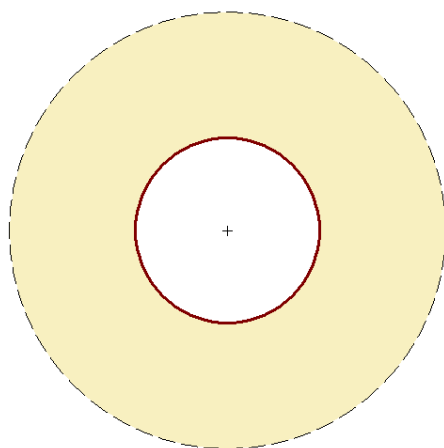
Provedena je probabilistička analiza za stijensku masu bez podgrade, stijensku masu s podgradnim sustavom od sidara i mlaznog betona te stijensku masu s podgradnim sustavom manje nosivosti. U ovom primjeru koristi se Latin Hypercube uzorkovanje na 10 000 uzoraka. Kako bi definirali parametre stijene kao slučajne varijable potrebna je srednja vrijednost, standardna devijacija te relativni minimum i maksimum za normalnu statističku distribuciju. Minimum i maksimum su relativne vrijednosti u odnosu na srednju vrijednost, a s obzirom da se radi o normalnoj statističkoj distribuciji vrijedi da njihova vrijednost odgovara tri puta većoj vrijednosti od standardne devijacije. Svi se parametri osim polumjera tunela mogu definirati putem statističke distribucije jer je on uvijek točno definiran parametar, a vrijednosti su date u tablici 15.

Tablica 15.: Ulazne vrijednosti parametara stijenske mase za probabilističku analizu

Parametar	Statistička distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Relativni minimum	Relativni maksimum
Polumjer tunela [m]	/	6,0	/	/	/
In-situ naprezanje [MPa]	Normalna	1,62	0,2	0,6	0,6
Youngov modul elastičnosti [MPa]	Normalna	353	50	150	150
Poissonov koeficijent	/	0,3	/	/	/
Tlačna čvrstoća [MPa]	Normalna	0,47	0,1	0,3	0,3
Kut unutarnjeg trenja [°]	Normalna	25,64	2	6	6

7.1. Analiza bez podgrade

RocSupport daje grafički prikaz tunela i karakterističnu krivulju stijenske mase s pripadnom konvergencijom i pomakom zidova tunela. Na slici 46. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 14,16 m.

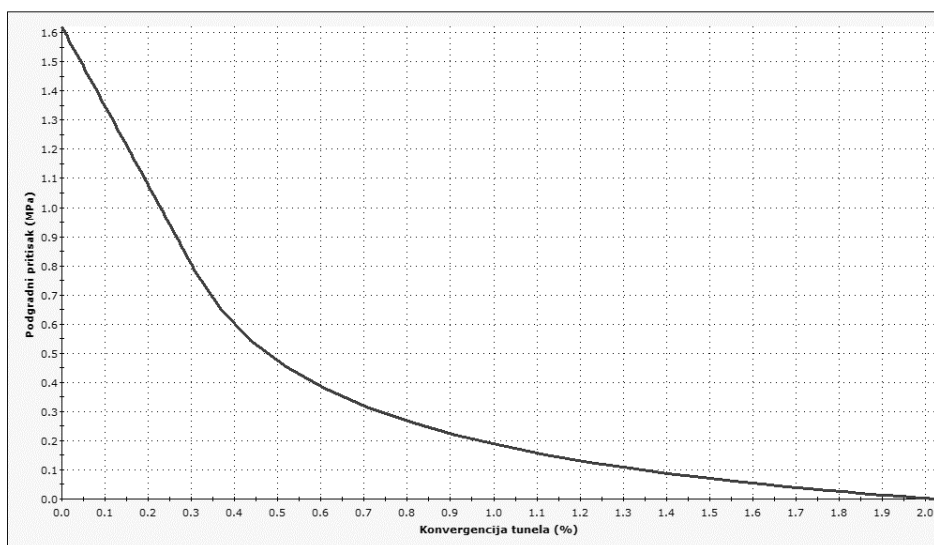


Slika 46.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu bez podgrade

Na slikama 47. i 48. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase. Konvergencija tunela iznosi $c = 2,27 \%$, a pomak $u_i = 136,02$ mm. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$
$$c = \frac{136,02}{6000}$$
$$c = 0,02267$$
$$c = 2,27 \%$$

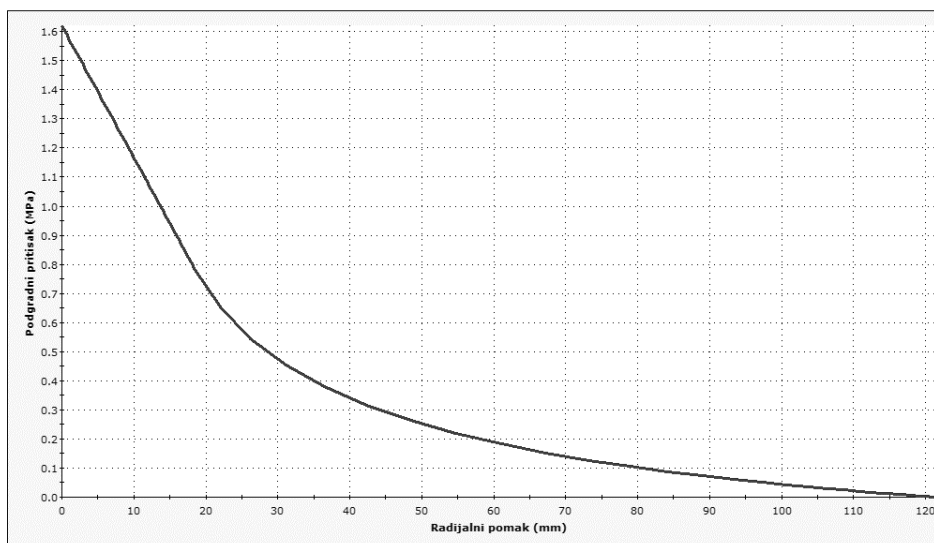
Karakteristicna krivulja stijenske mase



Konacna konvergencija (srednja vrijednost): 2.03 %, Konacna konvergencija (uzorkovana vrijednost): 2.27 %

Slika 47.: Konvergencija tunela za probabilističku analizu bez podgrade

Karakteristicna krivulja stijenske mase



Konacni radijalni pomak (srednja vrijednost): 121.56 mm, Konacni radijalni pomak (uzorkovana vrijednost): 136.02 mm

Slika 48.: Radijalni pomak za probabilističku analizu bez podgrade

U tablici 16. date su izlazne vrijednosti za in-situ naprezanje, Youngov modul elastičnosti, tlačnu čvrstoću stijenske mase te kut unutarnjeg trenja.

Tablica 16.: Izlazne vrijednosti parametara stijenske mase za probabilističku analizu

Parametar	Statistička distribucija	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
In-situ naprezanje [MPa]	Normalna	1,62	0,2	1,02	2,22
Youngov modul elastičnosti [MPa]	Normalna	353	50	203	503
Tlačna čvrstoća [MPa]	Normalna	0,47	0,1	0,17	0,77
Kut unutarnjeg trenja [°]	Normalna	25,64	2	19,64	31,64

U tablici 17. date su izlazne vrijednosti za polumjer zone plastifikacije, konvergenciju tunela te pomak zidova.

Tablica 17.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu bez podgrade

	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Polumjer zone plastifikacije [m]	14,16	2,43	8,93	31,12
Konvergencija tunela [%]	2,27	0,99	0,51	11,1
Pomak zidova [mm]	136,02	59,13	35,17	665,98

7.2. Analiza s podgradom

Vrijednosti ulaznih parametara podgradnog sustava odgovaraju vrijednostima iz determinističke analize prema tablicama 18. i 19.

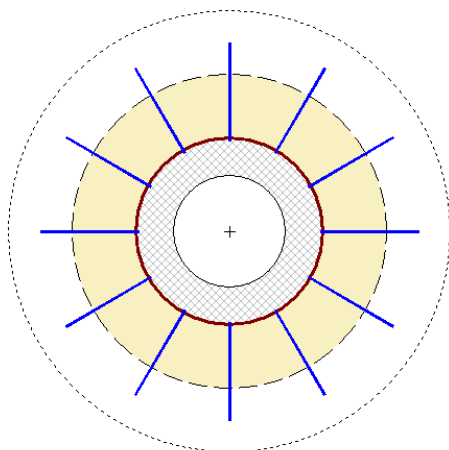
Tablica 18.: Karakteristike sidra za probabilističku analizu

Promjer sidra [mm]	34
Sila u sidru [MN]	0,354
Youngov modul elastičnosti [MPa]	207 000
Uzdužni razmak [m]	1,0
Poprečni razmak [m]	1,0
Udaljenost od čela [m]	3,0
Nosivost [MPa]	0,354
Maksimalna deformacija [%]	0,2

Tablica 19.: Karakteristike mlaznog betona za probabilističku analizu

Debljina mlaznog betona [mm]	50
Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]	35
Youngov modul elastičnosti [MPa]	30 000
Poissonov koeficijent	0,3
Udaljenost od čela [m]	3,0
Nosivost [MPa]	0,2905
Maksimalna deformacija [%]	0,111

Na slici 49. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 10,09 m, a iscrtkana linija predstavlja polumjer zone plastifikacije prije dodavanja podgrade od 14,16 m. Plave linije predstavljaju ugrađena sidra, a šrafirano sivo područje mlazni beton.



Slika 49.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

Na slikama 50. i 51. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase, a ljubičasta karakterističnu krivulju podgrade. Na sjecištu krivulja iščitava se konvergencija tunela $c = 1,04 \%$ te pomak $u_i = 62,35$ mm. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{62,35}{6000}$$

$$c = 0,01039$$

$$c = 1,04 \%$$

Konvergencija na čelu tunela iznosi $c = 0,48 \%$, a pomak $u_i = 28,72$ mm. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{28,72}{6000}$$

$$c = 0,00478$$

$$c = 0,48 \%$$

Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade iznosi $c = 0,91 \%$, a pomak $u_i = 54,61 \text{ mm}$. Sukladno tome vrijedi izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{54,61}{6000}$$

$$c = 0,0091$$

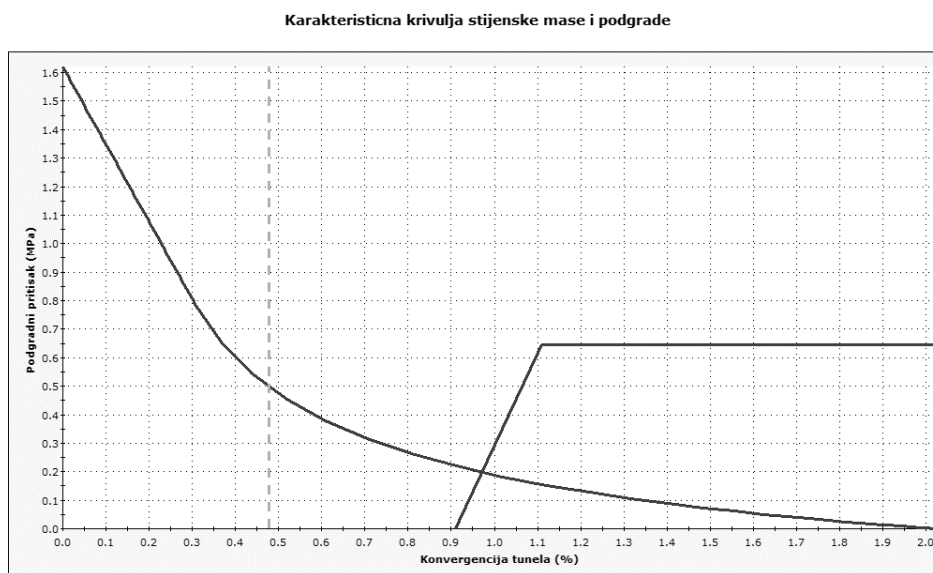
$$c = 0,91 \%$$

Osim toga kao jedna od izlaznih vrijednosti probabilističke analize dobiven je faktor sigurnosti FS koji iznosi 3,32. Faktor sigurnosti određen je omjerom maksimalnog podgradnog pritiska p_{max} i mobiliziranog podgradnog pritiska p_{eq} . Mobilizirani podgradni pritisak predstavlja ravnotežnu vrijednost, dakle njegova vrijednost iščita se iz grafa na sjecištu krivulja stijenske mase i podgrade te ta vrijednost iznosi $0,2 \text{ MPa}$. Sukladno tome vrijedi izraz (8).

$$FS = \frac{p_{max}}{p_{eq}}$$

$$FS = \frac{0,6445}{0,2}$$

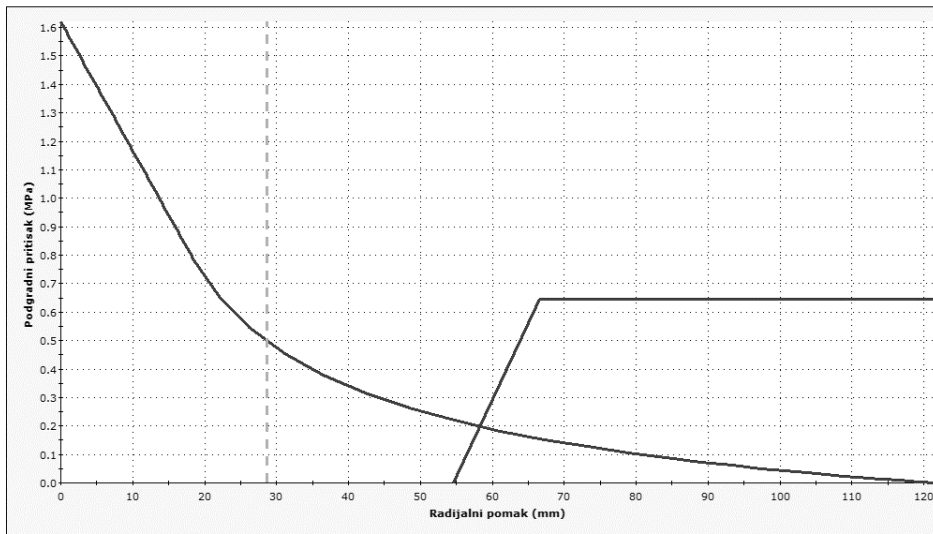
$$FS = 3,32$$



Konacna konvergencija (srednja vrijednost): 0.97 %, Konacna konvergencija (uzorkovana vrijednost): 1.04%, FS (srednja vrijednost): 3.25, FS (uzorkovana vrijednost): 3.32
 Konvergencija na celu tunela: 0.48 %, Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade: 0.91 %

Slika 50.: Konvergencija za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

Karakteristicna krivulja stijenske mase i podgrade



Konacni radijalni pomak (srednja vrijednost): 58.3 mm, Konacni radijalni pomak (uzorkovana vrijednost): 62.35 mm, FS (srednja vrijednost): 3.25, FS (uzorkovana vrijednost): 3.32
 Radijalni pomak na celu tunela: 28.72 mm, Radijalni pomak na mjestu ugradnje podgrade: 54.61 mm

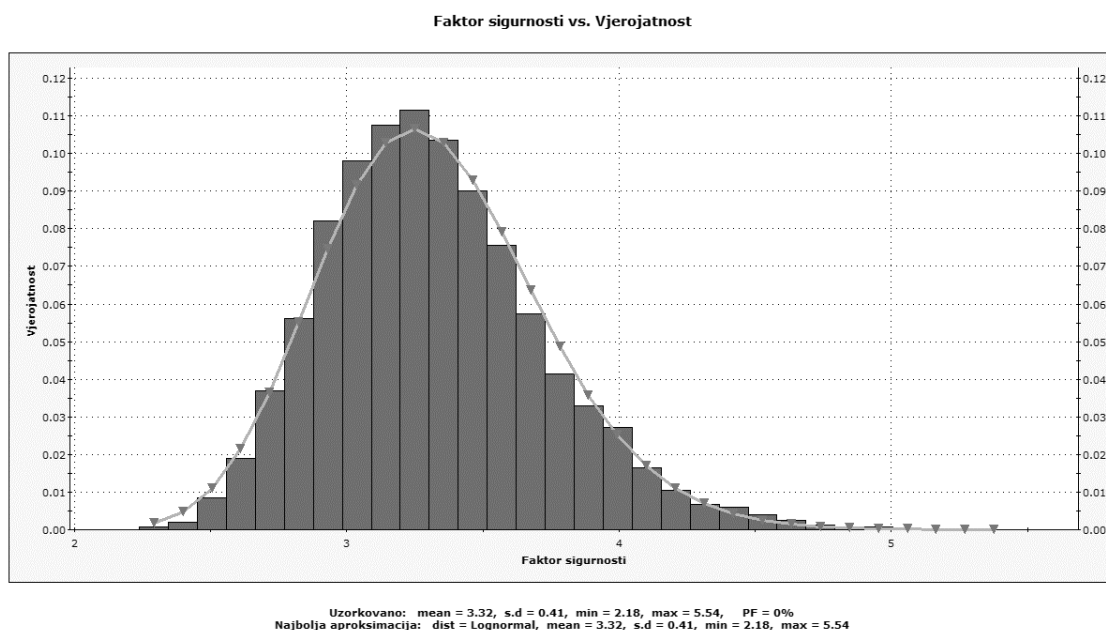
Slika 51.: Radijalni pomak za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona

U tablici 20. date su izlazne vrijednosti za polumjer zone plastifikacije, konvergenciju tunela, pomak zidova, mobilizirani podgradni pritisak te faktor sigurnosti.

Tablica 20.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu s podgradom

	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Polumjer zone plastifikacije [m]	10,09	1,14	7,27	17,76
Konvergencija tunela [%]	1,04	0,33	0,37	4,19
Pomak zidova [mm]	62,35	19,72	22,39	251,35
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,2	0,02	0,12	0,29
Faktor sigurnosti	3,32	0,41	2,18	5,54

Na slici 52. prikazan je histogram distribucije faktora sigurnosti gdje su plavim stupcima označene analize čiji je faktor sigurnosti veći od 1,0. S obzirom da nema nezadovoljavajućih analiza (s faktorom sigurnosti manjim od 1,0), vjerojatnost sloma PF jednaka je nuli.



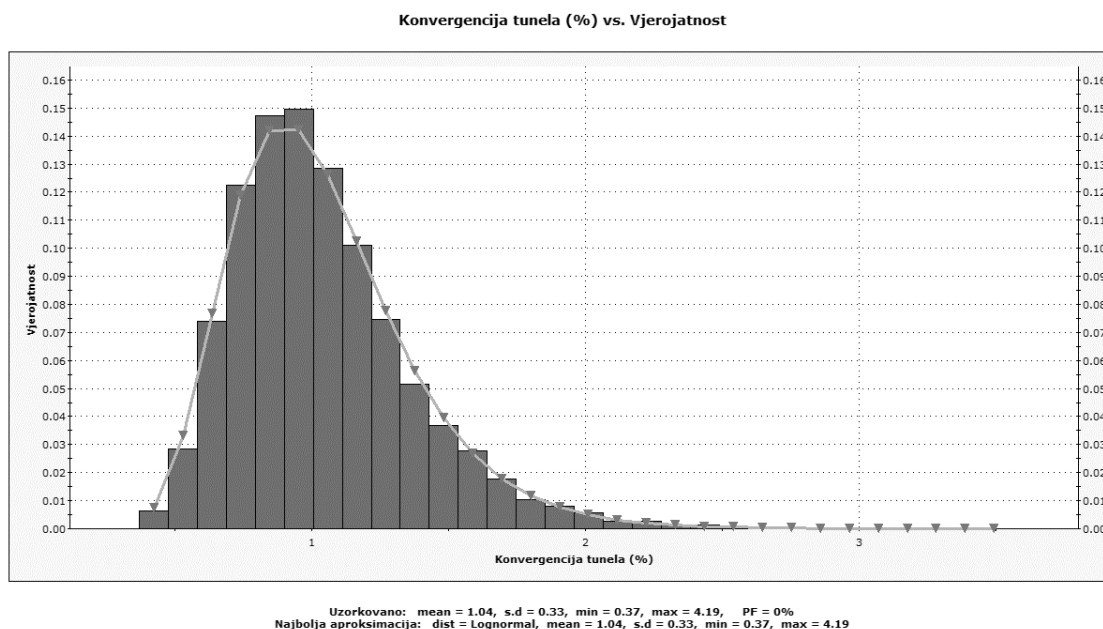
Slika 52.: Histogram distribucije vjerojatnosti faktora sigurnosti

Iz histograma sa slike 52. i tablice 21. vidljivo je da vjerojatnost pojave faktora sigurnosti raste do vrijednosti $FS = 3,32$ s vjerojatnošću 11,02 %, nakon čega pada, stoga je kao srednja vrijednost faktora sigurnosti uzeta vrijednost $FS = 3,32$.

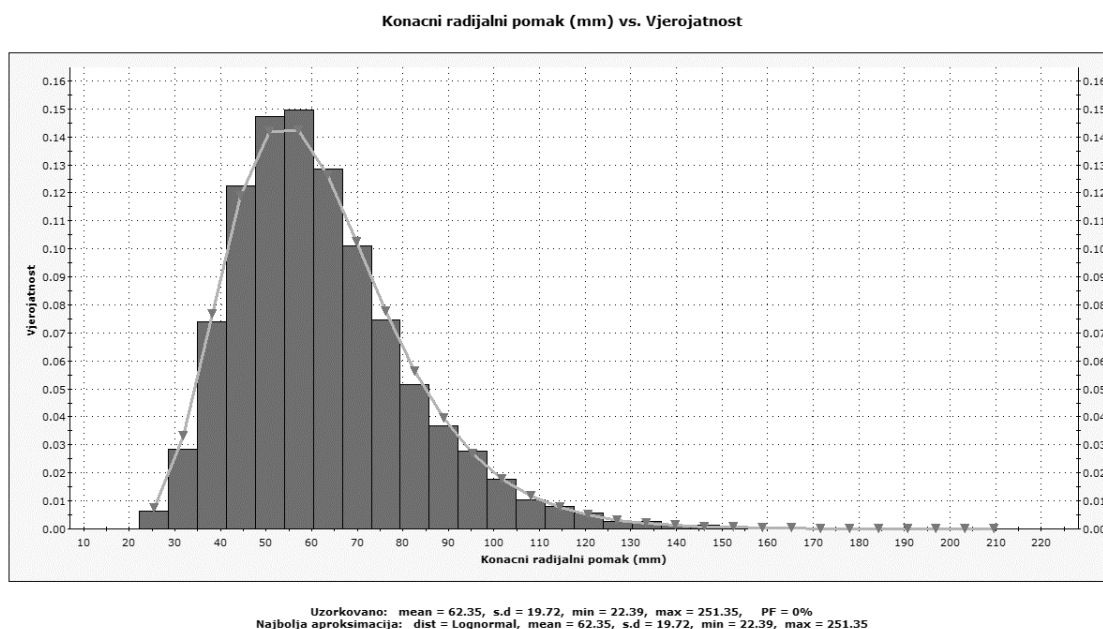
Tablica 21.: Vjerojatnost pojave faktora sigurnosti

Faktor sigurnosti	Vjerojatnost [%]
2,25	0,02
2,36	0,15
2,47	0,58
2,58	1,45
2,69	3,33
2,8	5,68
2,92	8,52
3,03	10,3
3,14	11,37
3,25	10,86
3,32	11,02
3,47	9,58
3,58	7,7
3,7	5,64
3,8	4,22
3,92	3,0
4,03	1,97
4,14	1,54
4,25	1,03
4,37	0,69
4,48	0,54
4,59	0,25
4,7	0,21
4,81	0,12

Na slikama 53. i 54. prikazani su histogrami distribucije konvergencije tunela i radijalnog pomaka.



Slika 53.: Histogram distribucije vjerojatnosti konvergencije tunela



Slika 54.: Histogram distribucije vjerojatnosti konačnog radijalnog pomaka

Iz histograma sa slika 53. i 54. i tablice 22. vidljivo je da vjerojatnost pojave konvergencije raste do vrijednosti $c = 1,04 \%$ s vjerojatnošću $14,75 \%$, nakon čega pada, stoga je kao srednja vrijednost konvergencije tunela uzeta vrijednost $c = 1,04 \%$ uz pomak zidova $u = 62,35 \text{ mm}$.

Tablica 22.: Vjerojatnost pojave konvergencije tunela i pomaka zidova

Konvergencija tunela [%]	Pomak zidova [mm]	Vjerojatnost [%]
0,42	25,22	0,5
0,52	31,41	2,47
0,63	37,6	6,72
0,73	43,79	11,69
0,83	49,98	13,35
0,94	56,17	14,4
1,04	62,35	14,75
1,14	68,56	10,3
1,25	74,75	7,54
1,35	80,94	5,51
1,45	87,13	3,97
1,56	93,32	2,92
1,66	99,51	1,85
1,76	105,7	1,33
1,86	111,89	0,86
1,97	118,08	0,6
2,07	124,28	0,38
2,17	130,47	0,2
2,28	136,66	0,19
2,38	142,85	0,14
2,48	149,04	0,1

7.3. Analiza s podgradom manje nosivosti

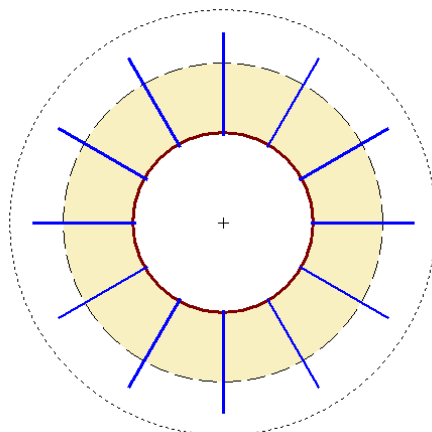
Konačna analiza predstavlja primjer s podgradnim sustavom manje nosivosti. Karakteristike sidra date su u tablici 23. Nosivost sidara dobiva se preko izraza (2).

$$p_{max,sidra} = \frac{T_{bf}}{s_l \cdot s_c}$$
$$p_{max,sidra} = \frac{0,184}{1,0 \cdot 1,0}$$
$$p_{max,sidra} = 0,184 \text{ MPa}$$

Tablica 23.: Karakteristike sidra za probabilističku analizu manje nosivosti

Promjer sidra [mm]	19
Sila u sidru [MN]	0,184
Youngov modul elastičnosti [MPa]	207 000
Uzdužni razmak [m]	1,0
Poprečni razmak [m]	1,0
Udaljenost od čela [m]	3,0
Nosivost [MPa]	0,184
Maksimalna deformacija [%]	0,2

Na slici 55. crvenom bojom označena je granica iskopa, odnosno tunel polumjera 6,0 m. Oko njega žutom bojom označena je zona plastifikacije polumjera 10,61 m, a iscrtkana linija predstavlja polumjer zone plastifikacije prije dodavanja podgrade od 14,16 m. Plave linije predstavljaju ugrađena sidra.



Slika 55.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti

Na slikama 56. i 57. vidljiv je grafički prikaz odnosa podgradnog pritiska u MPa i konvergencije tunela u postocima, odnosno pomaka zidova u mm . Plava linija predstavlja karakterističnu krivulju stijenske mase, a ljubičasta karakterističnu krivulju podgrade. Na sjecištu krivulja iščitava se konvergencija tunela $c = 1,16 \%$ te pomak $u_i = 69,65 \text{ mm}$. Ove se vrijednosti mogu provjeriti kroz izraz (22).

$$c = \frac{u_i}{r_0}$$

$$c = \frac{69,65}{6000}$$

$$c = 0,0116$$

$$c = 1,16 \%$$

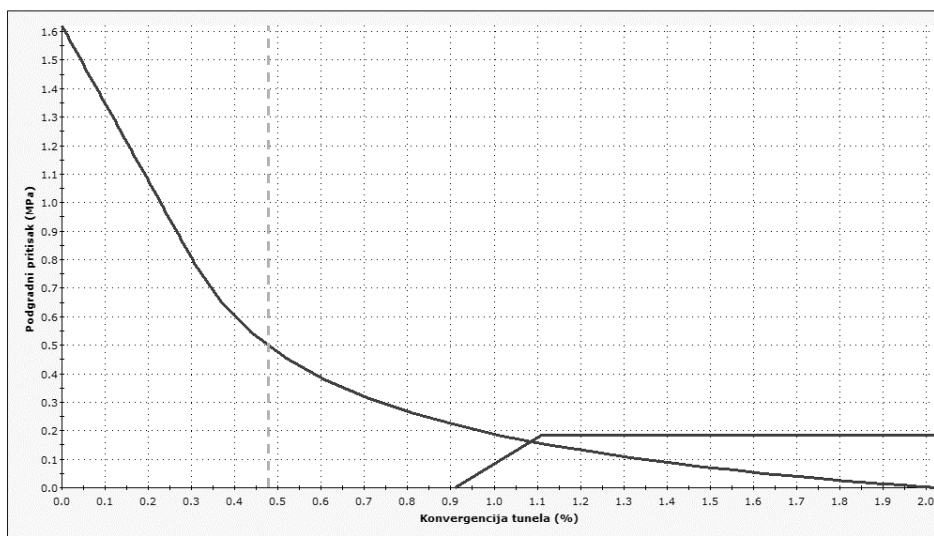
Osim toga kao jedna od izlaznih vrijednosti probabilističke analize dobiven je faktor sigurnosti FS koji iznosi 1,16. Faktor sigurnosti određen je omjerom maksimalnog podgradnog pritiska p_{max} i mobiliziranog podgradnog pritiska p_{eq} . Mobilizirani podgradni pritisak predstavlja ravnotežnu vrijednost, dakle njegova vrijednost iščita se iz grafa na sjecištu krivulja stijenske mase i podgrade te ta vrijednost iznosi 0,16 MPa . Sukladno tome vrijedi izraz (8).

$$FS = \frac{p_{max}}{p_{eq}}$$

$$FS = \frac{0,184}{0,16}$$

$$FS = 1,16$$

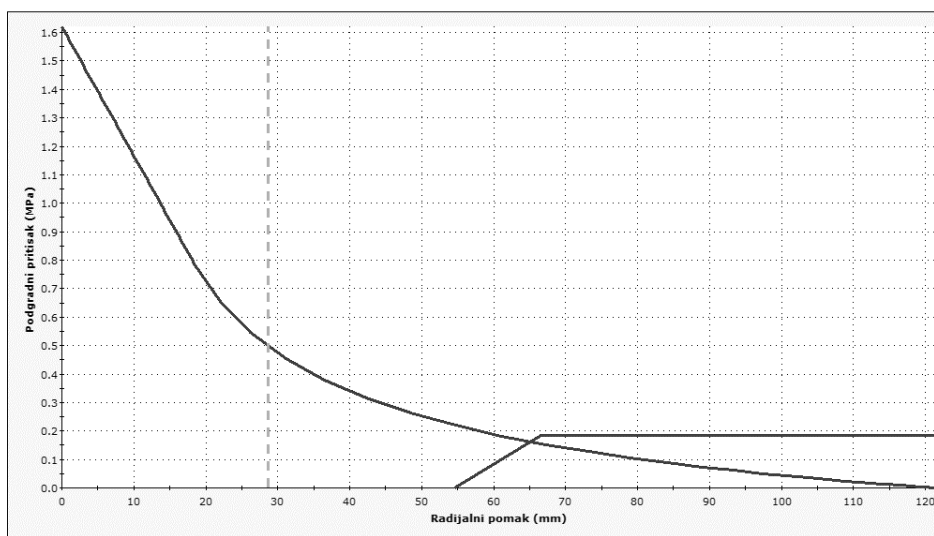
Karakteristicna krivulja stijenske mase i podgrade



Konacna konvergencija (srednja vrijednost): 1.09 %, Konacna konvergencija (uzorkovano): 1.16 %, FS (srednja vrijednost): 1.14, FS (uzorkovano): 1.16
Konvergencija na celu tunela: 0.48 %, Konvergencija na mjestu ugradnje podgrade: 0.91 %

Slika 56.: Konvergencija za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti

Karakteristicna krivulja stijenske mase i podgrade



Konacni radijalni pomak (srednja vrijednost): 65.18 mm, Konacni radijalni pomak (uzorkovano): 69.65 mm, FS (srednja vrijednost): 1.14, FS (uzorkovano): 1.16
Radijalni pomak na celu tunela: 28.72 mm, Radijalni pomak na mjestu ugradnje podgrade: 54.61 mm

Slika 57.: Radijalni pomak za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti

U tablici 24. date su izlazne vrijednosti za polumjer zone plastifikacije, konvergenciju tunela, pomak zidova, mobilizirani podgradni pritisak te faktor sigurnosti.

Tablica 24.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti

	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Polumjer zone plastifikacije [m]	10,61	1,14	7,27	17,76
Konvergencija tunela [%]	1,16	0,36	0,37	4,19
Pomak zidova [mm]	69,65	19,72	22,39	251,35
Mobilizirani podgradni pritisak [MPa]	0,16	0,02	0,12	0,29
Faktor sigurnosti	1,16	0,41	2,18	5,54

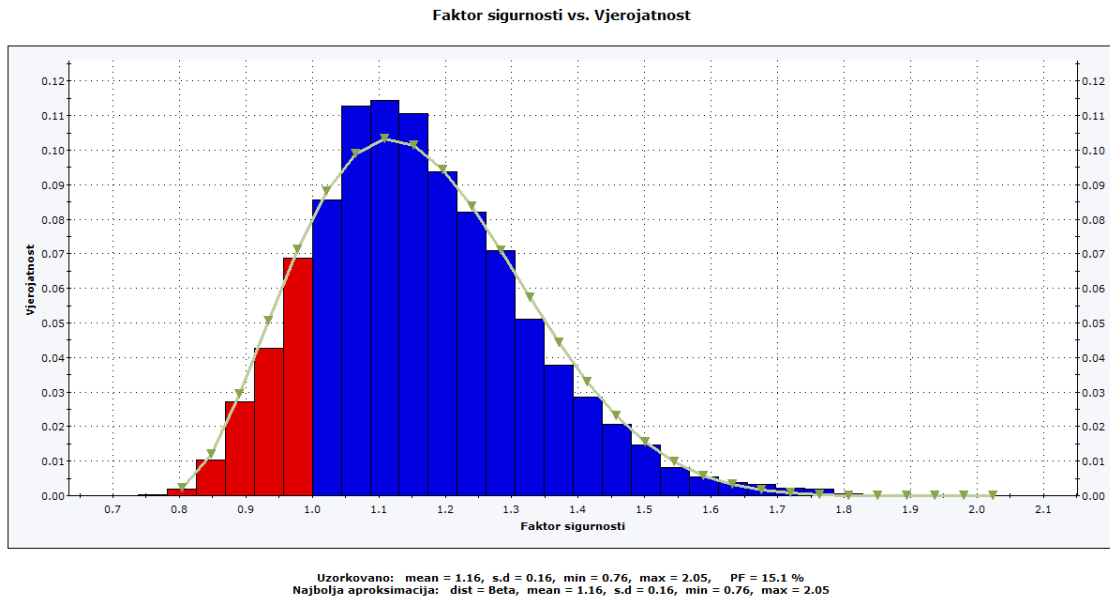
Na slici 58. prikazan je histogram distribucije faktora sigurnosti gdje su plavim stupcima označene analize čiji je faktor sigurnosti veći od 1,0, a crvenim stupcima analize čiji je faktor sigurnosti manji od 1,0. Ukupan broj analiza iznosi 10 000, a broj nezadovoljavajućih analiza 1510 pa se vjerojatnost sloma dobiva preko izraza (11).

$$PF = \frac{\text{broj nezadovoljavajućih analiza}}{\text{ukupan broj provedenih analiza}}$$

$$PF = \frac{1510}{10\ 000} \cdot 100 [\%]$$

$$PF = 15,1 \%$$

Kako bi se vjerojatnost sloma smanjila potrebno je ugraditi podgradni sustav veće nosivosti upotrebom sidara većeg promjera, na manjem uzdužnom i poprečnom razmaku ili dodati mlazni beton.



Slika 58.: Histogram distribucije vjerojatnosti faktora sigurnosti za podgradu manje nosivosti

8. ZAKLJUČAK

Radom je obuhvaćen sažeti pregled ključnih rezultata i analiza provedenih u kontekstu tunelogradnje u slabim stijenskim masama, s posebnim fokusom na interakciju stijenske mase i podgradnog sustava.

Kroz korištenje metoda matematičkog i računalnog modeliranja, detaljno su analizirani ključni parametri koji utječu na stabilnost tunela. Matematičko modeliranje temelji se na empirijskim izrazima Mohr-Coulombovog i Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće, dok je računalno modeliranje provedeno pomoću softverskih alata RocSupport i RSDData. RocSupport korišten je za modeliranje interakcije stijenske mase i podgradnog sustava koristeći Duncan Fama metodu za izračun karakterističnih krivulja stijenske mase.

Kroz determinističke i probabilističke analize, potvrđeno je da je primjena suvremenih podgradnih sustava, posebno kombinacija sidara i mlaznog betona, iznimno učinkovita u slabim stijenskim masama. Usporedbom s klasičnim metodama, zaključeno je da nove tehnike omogućuju bolju prilagodbu specifičnim geološkim uvjetima, smanjujući rizik od nestabilnosti i kolapsa tunela.

Rad je također dokazao da ispravan odabir podgradnog sustava ima ključnu ulogu u uspješnoj realizaciji tunelogradnje. Interakcija između stijenske mase i podgradnog sustava može značajno utjecati na dugoročnu stabilnost tunela, a razumijevanje tih interakcija omogućuje inženjerima da unaprijede metode projektiranja. Suvremene metode tunelogradnje, koje se oslanjaju na kontinuirano praćenje i prilagođavanje sustava potpore, potvrđene su kao superiorne u odnosu na tradicionalne pristupe.

Zaključno, kroz ovaj rad potvrđeno je da se inovativne tehnike tunelogradnje, u kombinaciji s naprednim softverskim alatima za modeliranje, mogu koristiti za precizno predviđanje i optimizaciju podgradnih sustava, čime se osigurava veća sigurnost i učinkovitost projekata tunelogradnje. Dokazana je važnost kombinacije matematičkih metoda, empirijskih podataka i računalnih simulacija za uspješno rješavanje inženjerskih izazova u kompleksnim geološkim uvjetima

POPIS LITERATURE

- [1] Kovačević M. S. *Mehanika stijena*. Sveučilište u Zagrebu. Građevinski fakultet. Zagreb; 2021.
- [2] Rabcewicz L. v. The New Austrian Tunnelling Method, Part one. *Water Power*. 1964;16(11): 453-457.
- [3] Rabcewicz L. v. The New Austrian Tunnelling Method, Part two. *Water Power*. 1964;16(12): 511-515.
- [4] Rabcewicz L. v. The New Austrian Tunnelling Method, Part three. *Water Power*. 1965;17(1): 19-24.
- [5] Barton N. R., Grimstad E., Aas G., Opsahl O. A., Bakken A., Pedersen L., Johansen E. D. Norwegian Method of Tunnelling. *World Tunnelling*. 1992;5(5): 231-235.
- [6] Bluey. Dostupno: <https://www.bluey.ie/solutions/tunnels-underground/geotechnical> [Pristupljeno: 12.7. 2024.]
- [7] BBT. Dostupno: <https://www.bbt-se.com/en/tunnel/tunnelling-methods/> [Pristupljeno: 12.7. 2024.]
- [8] Mapei. Dostupno: <https://www.mapei.com/hr/hr/projekti/project-detail/marinabaystationt226singapore> [Pristupljeno: 12.7. 2024.]
- [9] Podzemne građevine. Predavanje 05: Primarna podgrada, sekundarna obloga, hidroizolacija, ventilacija. 2023.
- [10] City Rail Link. Dostupno: <https://www.cityraillink.co.nz/newsletter-july-2022/final-journey-for-the-tbm-awaits> [Pristupljeno: 15.7. 2024.]
- [11] Podzemne građevine. Predavanje 10: Tehnologija izvedbe podzemnih građevina. 2023.
- [12] Podzemne građevine. Predavanje 07: Proračun stabilnosti podzemnih otvora. 2023.
- [13] Hoek, E. Tunnel support in weak rock. U: John, M., Mattle B. (urednici) *Proceedings of Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering*. Taipei, Taiwan: Public Construction Commission; 1998, str. 1-12.
- [14] Hoek E. Support for very weak rock associated with faults and shear zones. U: Thompson A.G. (urednici) *Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*. London: CRC Press; 1999, str. 19-22.

-
- [15] Hoek E., Kaiser P. K., Bawden W.F. *Support of Underground Excavation in Hard Rock*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema; 1995.
- [16] Carranza-Torres C., Diederichs M. Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. *Tunneling and Underground Space Technology*. 2009;24: 506-532.
- [17] Rocscience. RocSupport Introduction Manual. Dostupno: https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RocSupport/Introduction_Manual.pdf [Pristupljeno: 10.7. 2024.]
- [18] Primijenjena mehanika stijena, Predavanje 05: Analiza pouzdanosti u stijenskom inženjerstvu, 2023.
- [19] Duncan Fama, M.E. Numerical Modeling of Yield Zones in Weak Rock. *Comprehensive Rock Engineering*. 1993;2(3): 49-75.
- [20] Rahmannedjad R., Kargar A.R., Maazallahi V., Ghotbi-Ravandi E. Analytical analysis of ultimate ground pressure on tunnel support system. *Journal of Mining & Environment*. 2015;6(2): 151-157.
- [21] Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown Failure Criterion. *5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunneling Association of Canada Conference*. 2002. Toronto. str. 267-273.
- [22] Hoek E., Diederichs M.S. Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006;43(2): 203-215.
- [23] Hoek E., Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*. 2000;32(11): 45-51.

POPIS SLIKA

Slika 1.: NoTCoS (Izvor: [5])	6
Slika 2.: Ručno nanošenje mlaznog betona (Izvor: [6]).....	8
Slika 3.: Strojno nanošenje mlaznog betona (Izvor: [7]).....	9
Slika 4.: Čelične mreže (Izvor: [8]).....	9
Slika 5.: Dvostruka čelična mreža u mlaznom betonu (Izvor: [1]).....	10
Slika 6.: Valjani čelični lukovi (Izvor: [1]).....	10
Slika 7.: Rešetkasti čelični lukovi (Izvor: [1]).....	11
Slika 8.: Elementi sidra (Izvor: [9]).....	11
Slika 9.: Krtica – TBM (Izvor: [10]).....	14
Slika 10.: Bottom-up metoda (Izvor: [11]).....	15
Slika 11.: Top-down metoda (Izvor: [11]).....	16
Slika 12.: Radijalne deformacije u stijenskoj masi oko napredujućeg tunela (Izvor: [13])....	17
Slika 13.: Vrijednosti podgradnog pritiska u odnosu na čelo napredujućeg tunela (Izvor: [14])	18
Slika 14.: Podgradni pritisak i prirodno stanje naprezanje stijenske mase.....	19
Slika 15.: Karakteristična krivulja stijenske mase u interakciji s karakterističnim krivuljama podgrade različitih krutosti (Izvor: [12]).....	20
Slika 16.: Formiranje zone plastifikacije.....	21
Slika 17.: Elastični pomak, plastični pomak i kritični podgradni pritisak (Izvor: [15]).....	22
Slika 18.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s označenom vrijednosti ravnoteže (Izvor: [15]).....	23
Slika 19.: Faktor sigurnosti veći od 1,0 (Izvor: [15])	27
Slika 20.: Faktor sigurnosti manji od 1,0 (Izvor: [15])	27
Slika 21.: Normalna distribucija.....	29
Slika 22.: Distribucija vjerojatnosti faktora sigurnosti i vjerojatnosti sloma (Izvor: [15]).....	30
Slika 23.: Zona plastifikacije za determinističku analizu bez podgrade.....	42
Slika 24.: Konvergencija za determinističku analizu bez podgrade.....	43
Slika 25.: Radijalni pomak za determinističku analizu bez podgrade.....	43
Slika 26.: Zona plastifikacije za determinističku analizu s podgradom od sidara	45
Slika 27.: Konvergencija za determinističku analizu s podgradom od sidara.....	47
Slika 28.: Radijalni pomak za determinističku analizu s podgradom od sidara	48
Slika 29.: Zona plastifikacije za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona.....	49

Slika 30.: Konvergencija za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona	51
Slika 31.: Radijalni pomak za determinističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona	52
Slika 32.: Konvergencija stijenske mase veće krutosti i čvrstoće.....	54
Slika 33.: Konvergencija stijenske mase manje krutosti i čvrstoće.....	54
Slika 34.: Utjecaj sile u sidru na faktor sigurnosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće.	56
Slika 35.: Utjecaj sile u sidru na konvergenciju tunela stijenske mase veće krutosti i čvrstoće	56
Slika 36.: Utjecaj sile u sidru na pomak zidova stijenske mase veće krutosti i čvrstoće	57
Slika 37.: Utjecaj sile u sidru na faktor sigurnosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće	58
Slika 38.: Utjecaj sile u sidru na konvergenciju tunela stijenske mase manje krutosti i čvrstoće.....	58
Slika 39.: Utjecaj sile u sidru na pomak zidova stijenske mase manje krutosti i čvrstoće ...	59
Slika 40.: Utjecaj debljine mlaznog betona na faktor sigurnosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće.....	60
Slika 41.: Utjecaj debljine mlaznog betona na konvergenciju tunela stijenske mase veće krutosti i čvrstoće.....	60
Slika 42.: Utjecaj debljine mlaznog betona na pomak zidova stijenske mase veće krutosti i čvrstoće.....	61
Slika 43.: Utjecaj debljine mlaznog betona na faktor sigurnosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće.....	62
Slika 44.: Utjecaj debljine mlaznog betona na konvergenciju tunela stijenske mase manje krutosti i čvrstoće.....	62
Slika 45.: Utjecaj debljine mlaznog betona na pomak zidova stijenske mase manje krutosti i čvrstoće.....	63
Slika 46.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu bez podgrade.....	65
Slika 47.: Konvergencija tunela za probabilističku analizu bez podgrade.....	66
Slika 48.: Radijalni pomak za probabilističku analizu bez podgrade.....	66
Slika 49.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona	69
Slika 50.: Konvergencija za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona	70
Slika 51.: Radijalni pomak za probabilističku analizu s podgradom od sidara i mlaznog betona	71
Slika 52.: Histogram distribucije vjerojatnosti faktora sigurnosti	72

Slika 53.: Histogram distribucije vjerojatnosti konvergencije tunela.....	74
Slika 54.: Histogram distribucije vjerojatnosti konačnog radijalnog pomaka.....	74
Slika 55.: Zona plastifikacije za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti.....	77
Slika 56.: Konvergencija za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti	78
Slika 57.: Radijalni pomak za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti.....	78
Slika 58.: Histogram distribucije vjerojatnosti faktora sigurnosti za podgradu manje nosivosti.....	80

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Ulazne vrijednosti parametara u RSDati	36
Tablica 2.: Izlazne vrijednosti parametara u RSDati	38
Tablica 3.: Ulazne vrijednosti parametara u RocSupportu.....	40
Tablica 4.: Izlazne vrijednosti parametara u RocSupportu	40
Tablica 5.: Prijedlog podgradnog sustava za određenu deformaciju (Izvor: [23]).....	44
Tablica 6.: Karakteristike sidra za determinističku analizu.....	45
Tablica 7.: Karakteristike mlaznog betona za determinističku analizu	48
Tablica 8.: Izlazne vrijednosti za determinističku analizu bez podgrade i s podgradom	52
Tablica 9.: Ulazne vrijednosti parametarske determinističke analize.....	53
Tablica 10.: Izlazne vrijednosti parametarske determinističke analize.....	55
Tablica 11.: Izlazne vrijednosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće za različita sidra....	55
Tablica 12.: Izlazne vrijednosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće za različita sidra.	57
Tablica 13.: Izlazne vrijednosti stijenske mase veće krutosti i čvrstoće za različite debljine mlaznog betona.....	59
Tablica 14.: Izlazne vrijednosti stijenske mase manje krutosti i čvrstoće za različite debljine mlaznog betona.....	61
Tablica 15.: Ulazne vrijednosti parametara stijenske mase za probabilističku analizu	64
Tablica 16.: Izlazne vrijednosti parametara stijenske mase za probabilističku analizu	67
Tablica 17.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu bez podgrade.....	67
Tablica 18.: Karakteristike sidra za probabilističku analizu	68
Tablica 19.: Karakteristike mlaznog betona za probabilističku analizu.....	68
Tablica 20.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu s podgradom.....	71
Tablica 21.: Vjerojatnost pojave faktora sigurnosti.....	73
Tablica 22.: Vjerojatnost pojave konvergencije tunela i pomaka zidova.....	75
Tablica 23.: Karakteristike sidra za probabilističku analizu manje nosivosti	76
Tablica 24.: Izlazne vrijednosti za probabilističku analizu s podgradom manje nosivosti....	79

POPIS OZNAKA

a , empirijska konstanta stijenske mase

A_s , površina poprečnog presjeka čelika

c , kohezija stijenske mase

c , konvergencija tunela

d_b , promjer sidra

D , faktor poremećenosti stijenske mase

E , Youngov modul elastičnosti stijenske mase

E_b , Youngov modul elastičnosti sidra

E_c , Youngov modul elastičnosti mlaznog betona

E_i , modul elastičnosti intaktne stijene

E_s , Youngov modul elastičnosti čelika

GSI , geološki indeks čvrstoće

H , visina nadsloja

K , krutost podgrade

l , slobodna duljina sidra

m_b , parametar stijenske mase

m_i , parametar intaktne stijene

p_{cr} , kritični podgradni pritisak

p_{eq} , ravnotežni, mobilizirani podgradni pritisak

p'_{eq} , projektirana vrijednost ravnotežnog podgradnog pritiska

p_i , podgradni pritisak

$p_{max}; p_{sm}$, maksimalni podgradni pritisak, nosivost podgrade, vršna čvrstoća podgrade

p_0 , in-situ naprezanje, prirodno stanje naprezanja

PF , vjerojatnost sloma

r_0 , polumjer tunela
 r_p , polumjer zone plastifikacije
 s , empirijska konstanta stijenske mase
 s_l , uzdužni razmak sidara
 s_l , razmak čeličnih lukova duž osi tunela
 s_c , poprečni razmak sidara
 SF ; FS , faktor sigurnosti
 t_c , debljina mlaznog betona
 T_{bf} , sila u sidru
 u_i , radijalni pomak
 u_{ie} , radijalni elastični pomak
 u_{ip} , radijalni plastični pomak
 u_{sm} , najveći elastični pomak
 u_0 , početni pomak stijenske mase pri kojem se postavlja podgrada
 γ , zapreminska težina
 ε_{max} , maksimalna deformacija podgrade
 μ , srednja vrijednost raspodjele
 ν , Poissonov koeficijent
 σ , standardna devijacija
 σ_{cc} , jednoosna tlačna čvrstoća mlaznog betona
 σ_{cm} ; σ_c , jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase
 σ_{ci} , jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene
 σ_t , jednoosna vlačna čvrstoća stijenske mase
 σ_{ys} , čvrstoća čelika
 σ_1 , veće glavno naprezanje
 σ_3 , manje glavno naprezanje

φ , kut unutarnjeg trenja stijenske mase

ψ , kut dilatacije stijenske mase