

# Utjecaj elemenata podgradnog sustava na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

---

Mešić, Ajra

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:237:322304>

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

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

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ajra Mešić

**UTJECAJ ELEMENATA PODGRADNOG  
SUSTAVA NA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE  
STIJENSKE MASE I PODGRADE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Ajra Mešić

**UTJECAJ ELEMENATA PODGRADNOG  
SUSTAVA NA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE  
STIJENSKE MASE I PODGRADE**

DIPLOMSKI RAD

prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ajra Mešić

**THE INFLUENCE OF THE SUPPORT SYSTEM  
ELEMENTS ON THE CHARACTERISTIC  
CURVES OF THE ROCK MASS AND SUPPORT**

MASTER THESIS

prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević

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:

*Ajra Mešić*



## 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:

*Ajra Mešić*

---

## ZAHVALE

*Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Mehi Saši Kovačeviću na nesebičnom dijeljenju znanja, stručnoj pomoći i savjetima koji su mi omogućili uspješan završetak ovog diplomskog rada.*

*Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima, čija su ljubav, podrška i vjera u mene bili moja najveća snaga kroz sve godine mog obrazovanja. Ovaj uspjeh je i vaš!*



---

## SAŽETAK

U radu je istražen utjecaj elemenata primarnog podgradnog sustava na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade. Proučena je metoda Vrakas i Anagnostou, koja nudi inovativno rješenje za određivanje karakterističnih krivulja u uvjetima velikih deformacija. Rezultat metode su bezdimenzionalni dijagrami koji pokrivaju širok raspon praktično relevantnih parametara, pružajući precizne smjernice za inženjerske projekte u zahtjevnim geotehničkim okruženjima. U praktičnom dijelu rada, metodom Vrakas i Anagnostou u softveru RocSupport, analizirane su karakteristične krivulje stijenske mase s podgradom i bez podgrade, s primjenom na tunel Gotthard. Provedena je i parametarska analiza kako bi se istražio utjecaj pojedinih elemenata podgradnog sustava na karakteristične krivulje. Rezultati pokazuju da metoda omogućava učinkovitu optimizaciju podgradnog sustava tunela, posebno u uvjetima stiskanja tla ("squeezing ground"), gdje su brze procjene i inženjerske odluke ključne za sigurnost i ekonomičnost projekta.

**Ključne riječi:** primarni podgradni sustav; karakteristična krivulja stijenske mase; karakteristična krivulja podgrade; Vrakas i Anagnostou; deterministička analiza; parametarska analiza

---

## SUMMARY

The thesis explores the impact of primary support system elements on the characteristic curves of rock mass and support. The study examines the Vrakas and Anagnostou method, which offers an innovative solution for determining characteristic curves under conditions of large deformations. The method results in dimensionless diagrams that cover a wide range of practically relevant parameters, providing precise guidelines for engineering projects in demanding geotechnical environments. In the practical part of the thesis, using the Vrakas and Anagnostou method within the RocSupport software, characteristic curves of the rock mass with and without support were analyzed, using the Gotthard Tunnel as a case study. A parametric analysis was also conducted to explore the influence of individual support system elements on the characteristic curves. The results show that the method enables efficient optimization of the tunnel support system, especially in "squeezing ground" conditions, where rapid assessments and engineering decisions are critical for the safety and cost-effectiveness of the project.

**Key words:** primary lining; ground response curve; characteristic curve of support; Vrakas and Anagnostou; deterministic analysis; parametric analysis

---

## SADRŽAJ

ZAHVALE .....	i
SAŽETAK .....	ii
SUMMARY .....	iii
SADRŽAJ .....	iv
1. UVOD .....	6
2. METODE I TEHNIKE RADA .....	7
3. TUNELOGRADNJA .....	8
4. PRIMARNI PODGRADNI SUSTAV .....	9
4.1. Opterećenje primarnog podgradnog sustava.....	10
4.2. Dimenzioniranje primarnog podgradnog sustava .....	11
5. ELEMENTI PRIMARNOG PODGRADNOG SUSTAVA.....	12
5.1. Stijenska masa .....	13
5.2. Mlazni beton .....	13
5.2.1. Mikroarmirani mlazni beton .....	16
5.2.2. Mlazni beton s makrosintetičkim vlaknima.....	17
5.3. Čelične mreže .....	18
5.4. Čelični lukovi .....	19
5.5. Štapna sidra.....	20
6. KARAKTERISTIČNA KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE .....	23
7. PRIKAZ VRAKAS I ANAGNOSTOU METODE ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE .....	26
7.1. Teorijske osnove metode.....	29
7.2. Kinematička razmatranja .....	31
7.3. Elastično ponašanje.....	32
7.4. Elastoplastično ponašanje .....	32
7.4.1. Cilindrični otvori bez izvanravninskog naprezanja.....	32
7.4.2. Cilindrični otvori s izvanravninskim naprezanjem .....	35
7.5. Pregled rješenja.....	37
8. PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE BEZ PODGRADE .....	39

---

8.1.	Gotthard Base tunel.....	40
8.1.1.	Deterministička analiza .....	41
8.1.2.	Parametri.....	43
8.1.3.	Rezultati.....	43
8.1.4.	Analitički proračun – provjera rezultata.....	45
<b>9.</b>	<b>PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE S PODGRADOM .....</b>	<b>47</b>
9.1.	Parametri i rezultati.....	47
9.2.	Analitički proračun – provjera rezultata.....	52
<b>10.</b>	<b>PARAMETARSKA ANALIZA UTJECAJA MLAZNOG BETONA, SIDARA I ČELIČNIH LUKOVA NA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE.....</b>	<b>54</b>
10.1.	Utjecaj sidara na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade.....	56
10.1.1.	Tunel Gotthard .....	56
10.1.2.	Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće .....	62
10.2.	Utjecaj mlaznog betona na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade..	67
10.2.1.	Tunel Gotthard .....	67
10.2.2.	Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće .....	71
10.3.	Utjecaj čeličnih lukova na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade.....	73
10.3.1.	Tunel Gotthard .....	73
10.3.2.	Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće .....	79
<b>11.</b>	<b>ZAKLJUČAK.....</b>	<b>84</b>
	<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>85</b>
	<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>88</b>
	<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>91</b>

---

## 1. UVOD

Izgradnja podzemnih objekata, kao što su tuneli, jedan je od najsloženijih aspekata modernog inženjerstva, gdje stabilnost i sigurnost konstrukcije uvelike ovise o pravilnom odabiru podgradnog sustava. Primarni podgradni sustav ima ključnu ulogu u održavanju stabilnosti tunelskih otvora, osobito u situacijama kada stijenska masa pokazuje tendenciju stiskanja prema unutra, što je tipično za tzv. "squeezing ground" uvjete. U takvim uvjetima, bez adekvatne podgrade, dolazi do prekomjernog deformiranja stijenske mase, što može rezultirati opasnim urušavanjem konstrukcije. Stoga je od ključne važnosti razviti metode koje omogućuju precizno određivanje količine i vrsta podgradnih elemenata potrebnih za osiguranje stabilnosti tunela.

U ovom diplomskom radu fokus je stavljen na metodu Vrakas i Anagnostou, koja nudi inovativan pristup određivanju karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade. Metoda je posebno važna za procjenu ponašanja stijenske mase u uvjetima velikih deformacija, gdje se kroz eksplicitno rješenje obuhvaća rasterećenje cilindričnih otvora u beskonačnom, linearno-elastičnom i savršeno plastičnom mediju koji slijedi Mohr-Coulombov kriterij sloma. Ova metoda predstavlja korak naprijed u geotehničkom inženjerstvu jer pruža konkretne smjernice kroz bezdimenzionalne dijagrame, što inženjerima omogućuje brzu i pouzdanu procjenu podgradnih sustava u kompleksnim geotehničkim uvjetima.

Ključni elementi primarnog podgradnog sustava koji se analiziraju u ovom radu uključuju stijensku masu, sidra, čelične lukove i mlazni beton. Svaki od tih elemenata ima specifičan utjecaj na ponašanje stijenske mase i podgrade, te je od velike važnosti razumjeti njihovu interakciju kako bi se osigurala optimalna stabilnost tunela. Uz teorijsku analizu, rad uključuje i primjer praktične primjene metode na slučaju Gotthard tunela, jednog od najzahtjevnijih tunelskih projekata na svijetu. Korištenjem softvera RocSupport, analizirane su karakteristične krivulje s podgradom i bez podgrade, što omogućuje detaljno razumijevanje kako primarni podgradni sustav doprinosi cjelokupnoj stabilnosti konstrukcije.

Parametarska analiza provedena u radu omogućuje uvid u to kako različiti elementi primarnog podgradnog sustava utječu na karakteristične krivulje, te time pruža korisne smjernice za optimizaciju dizajna podgradnih sustava. Ova metoda pruža praktičan alat za projektiranje koji može značajno smanjiti rizike povezane s prekomjernim deformacijama i kolapsom tunela, što je ključno za sigurno i uspješno izvođenje podzemnih radova.

---

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

U ovom radu primijenjene su različite metode i tehnike kako bi se analiziralo ponašanje stijenske mase i podgradnog sustava tunela. Ključne metode korištene u istraživanju su metoda modeliranja, metoda simulacije i metoda Vrakas i Anagnostou za određivanje karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade.

Metoda modeliranja korištena je za kreiranje geotehničkog modela tunela i okoline. Modeliranje je omogućilo simulaciju interakcije između stijenske mase i elemenata podgradnog sustava, pri čemu su uzeti u obzir stvarni parametri stijenske mase i podgradnog sustava tunela Gotthard. RocSupport softver korišten je kao ključni alat za izradu tih modela, jer omogućuje detaljnu analizu interakcije između stijenske mase i primarne podgrade. Metoda simulacije primijenjena je za simulaciju ponašanja stijenske mase i podgradnog sustava pod različitim uvjetima opterećenja. Simulacija je omogućila predviđanje deformacija, stiskanja i drugih mehaničkih ponašanja stijenske mase, s ciljem optimizacije podgradnog sustava tunela. RocSupport je omogućio precizno modeliranje karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade. Metoda Vrakas i Anagnostou korištena je za određivanje karakterističnih krivulja stijenske mase u uvjetima velikih deformacija. Ova metoda pruža eksplicitno rješenje za određivanje tih krivulja, uzimajući u obzir rasterećenje cilindričnih otvora u beskonačnom, linearno-elastičnom i savršeno plastičnom mediju, prema Mohr-Coulombovom kriteriju sloma. Kombinacija ove metode i softvera RocSupport omogućila je detaljno analiziranje i vizualiziranje krivulja za različite parametre. Korištenjem stvarnog primjera Gotthard tunela, istraživanje se temelji na stvarnim inženjerskim podacima, čime se osigurava relevantnost rezultata u kontekstu praktičnih primjena. Softverski alat RocSupport pružio je platformu za analiziranje i simuliranje karakterističnih krivulja, kao i za provođenje parametarske analize utjecaja pojedinih elemenata podgradnog sustava na stabilnost tunela.

Provedene su sljedeće istraživačke aktivnosti:

1. Analiza geotehničkih parametara stijenske mase i elemenata primarne podgrade.
2. Kreiranje i simulacija karakterističnih krivulja stijenske mase s i bez podgradnog sustava, koristeći metodu Vrakas i Anagnostou.
3. Parametarska analiza utjecaja pojedinih elemenata podgradnog sustava na ponašanje stijenske mase i podgrade.

Ova kombinacija metoda omogućila je sveobuhvatnu analizu interakcije stijenske mase i podgradnog sustava, pružajući smjernice za optimizaciju dizajna tunelskih konstrukcija u složenim geotehničkim uvjetima.

---

### 3. TUNELOGRADNJA

Prema povijesnim zapisima, arheološkim istraživanjima i drugim izvorima, dokazano je da su drevni narodi, pa čak i njihovi prethodnici, već tada bili upoznati s tehnikama gradnje podzemnih objekata. Podzemne građevine koje su izgradili Asirci, Egipćani, Grci, Rimljani i druge civilizacije ostavljaju dojam svojom monumentalnošću i inovativnim pristupima, osobito kada se uzme u obzir ograničena tehnologija i alati kojima su tada raspolagali. Klasične metode gradnje tunela, razvijene tijekom 19. i prve polovice 20. stoljeća, proizašle su iz rudarskih tehnika iskopavanja i osiguravanja tunelskih prolaza, zbog čega su poznate i kao rudarske metode. Među najpoznatijim klasičnim metodama su njemačka, belgijska, talijanska, engleska i austrijska [1].

Kako bi se neutralizirali poremećaji prirodne ravnoteže uzrokovani iskopavanjem i osigurala stabilnost tunelske strukture, potrebno je brzo ponovno uspostaviti ravnotežu. U klasičnim metodama gradnje, ovaj cilj se postizao izradom masivnih svodnih konstrukcija velikih dimenzija, s posebnim naglaskom na brzinu izgradnje, kako bi se minimizirale deformacije i pritisci unutar stijenske mase [2].

Danas se većina podzemnih građevinskih projekata, osobito tunela u srednjoj Europi, izvodi djelomično ili u potpunosti prema principima Nove austrijske tunelske metode (NATM) [3]. Ova metoda, razvijena u 20. stoljeću, predstavlja rezultat dugogodišnjeg znanstvenog istraživanja i primjene spoznaja iz mehanike stijena. NATM je donijela revolucionaran pristup u izgradnji tunela, čime je značajno unaprijeđena tunelogradnja. Razvoj ove filozofije i koncepta započeo je 1948. godine kada je Rabcewicz patentirao upotrebu dvostruke betonske podgrade kao ključnog elementa tunelske konstrukcije [1].

---

#### 4. PRIMARNI PODGRADNI SUSTAV

Obloga se definira kao konstrukcijski element koji nije izravno izložen statičkom opterećenju, a njezina osnovna funkcija je oblikovanje željenog prostora u podzemnim građevinama te sprječavanje oštećenja okolnog tla pod utjecajem vanjskih čimbenika poput atmosferskih prilika. U suvremenoj tunelogradnji, koja se temelji na načelima Nove austrijske tunelske metode (NATM), obloga se sastoji od dva dijela: nosivog dijela, koji je u stalnom kontaktu sa stijenskom masom i na koji se postavlja hidroizolacija, te dopunskog dijela – zasvođene konstrukcije koja služi kao završna obloga. Ova dvoslojna struktura uključuje vanjski (nosivi) i unutarnji (dopunski) sloj [2].

Vanjska nosiva konstrukcija, koja ima ključnu statičku ulogu, privremeno osigurava stabilnost tunela, kontrolira deformacije stijenske mase unutar dopuštenih granica i omogućuje odgovarajuće uvjete za pravilno funkcioniranje unutarnje (dopunske) konstrukcije [2,3]. Ova primarna konstrukcija, često nazvana primarnim podgradnim sustavom ili oblogom, razlikuje se od tradicionalne podgrade. Dok je klasična podgrada, obično izrađena od drveta, bila privremena i služila do izgradnje trajne konstrukcije, suvremena podgrada izrađuje se od visokokvalitetnih materijala s dugim vijekom trajanja, te se koristi kao trajna i glavna nosiva konstrukcija [2].

Suvremena tunelska konstrukcija tako uključuje primarnu i sekundarnu podgradu te visoko učinkovitu hidroizolaciju koja se postavlja između njih [2].

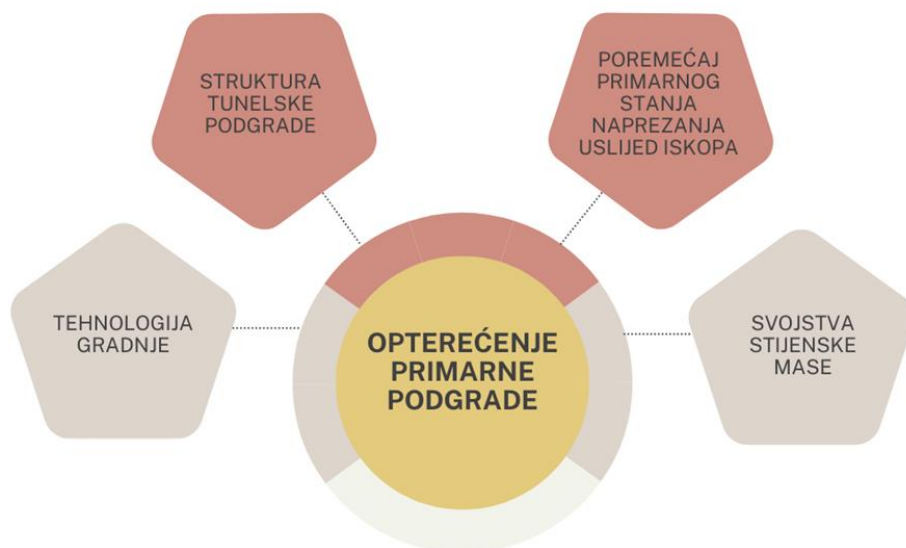
Primarni podgradni sustav omogućuje djelomično oslobađanje početnih naprezanja u stijenskoj masi u obliku radijalnih deformacija, što rezultira boljom iskorištenosti posmične čvrstoće stijenske mase i osigurava optimalno opterećenje sekundarnog podgradnog sustava. Na taj način, primarni podgradni sustav efikasno koristi potencijal stabilnosti stijenske mase. Pravilna izvedba primarnog podgradnog sustava oblikuje nosivi prsten u stijenskoj masi. Ključno je da karakteristike primarnog podgradnog sustava adekvatno odgovore na reološke procese unutar stijenske mase, omogućujući određene deformacije dok sprječavaju razvoj kritičnih deformacija koje bi mogle uzrokovati oštećenje i popuštanje stijenske mase [4, 5].



---

#### 4.1. Opterećenje primarnog podgradnog sustava

Opterećenje primarnog podgradnog sustava određeno je interakcijom podgrade s okolnim tlom ili stijenskom masom, a ta interakcija ovisi o mnogim čimbenicima. Prije početka iskopa i izgradnje tunelske podgrade, stijenska masa ima svoje ravnotežno stanje deformacija i naprezanja. Izgradnjom tunela, pomenuto ravnotežno stanje se mijenja. Svrha primarnog podgradnog sustava je upravo u tom trenutku omogućiti određenu količinu radijalne deformacije u iskopu, kako bi se smanjilo konačno opterećenje na podgradu. Čimbenici koji utječu na opterećenje primarnog podgradnog sustava prikazani su na slici 1., koja prikazuje složenost opterećenja primarnog podgradnog sustava i utjecaj mnogih varijabli [3].



Slika 1.: Čimbenici koji utječu na opterećenje primarnog podgradnog sustava

---

## 4.2. Dimenzioniranje primarnog podgradnog sustava

Primarni podgradni sustav dimenzionira se u ovisnosti o svim kritičnim kombinacijama unutarnjih sila koje se mogu pojaviti u vremenskom razdoblju od izgradnje primarnog podgradnog sustava do postavljanja sekundarnog podgradnog sustava [3]. Česta je konstatacija da vjerovatno niti jedna druga konstrukcija nije opterećena toliko teško odredivim faktorima koji utječu na njezinu stabilnost kao primarni podgradni sustav podzemnih građevina [6].

Eurokod 7, kraće EC7 [7] je norma koja definira metode dokazivanja stabilnosti geotehničkih konstrukcija i služi kao temelj za razmatranje koncepcije statičkog proračuna podgrade [6]. Budući da se EC7 ne bavi detaljno tunnelskim konstrukcijama kao takvim nego utvrđuje projektne pristupe za uzimanje u obzir omjera nesigurnosti tipičnih ulaznih parametara u proračunima strukturne čvrstoće geotehničkih struktura, veliki dio izgradnje tunela je praćenje ponašanja stijenske mase u stvarnom vremenu. Kod primjene NATM-a, primarni podgradni sustav se kontinuirano nadzire, a na temelju usporedbe predviđanja sa stvarnim ponašanjem prilagođava se u sljedećoj fazi izgradnje (prema principu metode promatranja) [3].

Prilikom iskopa tunela prema NATM metodi, primarni podgradni sustav postavlja se nakon svake faze iskopa (obrade profila), a daljnji iskop se nastavlja tek kada je primarni podgradni sustav postavljen na prethodnom dijelu. Duljina tunela koja ostaje nepoduprta prije ugradnje primarnog podgradnog sustava naziva se 'korak napredovanja' [1].

---

## 5. ELEMENTI PRIMARNOG PODGRADNOG SUSTAVA

Standardni strukturni elementi primarnog podgradnog sustava uključuju:

- stijensku masu,
- mlazni beton,
- čelične mreže,
- čelične lukove i
- štapna sidra [1].

Struktura izrađena od mlaznog betona i čeličnih mreža/lukova razlikuje se od konvencionalnih armirano-betonskih struktura u pogledu sastava i karakteristika opterećenja. Još jedna značajna razlika je veličina i vremenski utjecaj opterećenja. Dok je konvencionalna armirano-betonska konstrukcija opterećena tek nakon što se beton stvrdne, primarni podgradni sustav u podzemnoj gradnji preuzima opterećenje odmah nakon nanošenja mlaznog betona kada se koriste NATM načela [8].



Slika 2.: Izvedena primarna podgrada (Izvor:[9])

---

## 5.1. Stijenska masa

Budući da uspješnost inženjerskih zahvata u stijenskoj masi ovisi o stupnju poznavanja promjene stanja naprezanja, za stijensku masu se kaže da je najvažniji dio primarnog podgradnog sustava. Ono što značajno mijenja mehanička svojstva stijenske mase su diskontinuiteti. Diskontinuirana stijenska masa pokazuje smanjenu čvrstoću i krutost te znatno veću propusnost zbog čega je ključno definirati, opisati i izmjeriti svojstva diskontinuiteta koji oblikuju strukturu stijenske mase [1].

Iznimno važnu ulogu u tunelogradnji imaju i klasifikacije stijenske mase. Jednostavne su i razumljive, uključuju najznačajnija svojstva stijenske mase i na osnovu njih se izrađuju preporuke za projektiranje ali i određivanje parametara krutosti i čvrstoće stijenske mase [1].

## 5.2. Mlazni beton

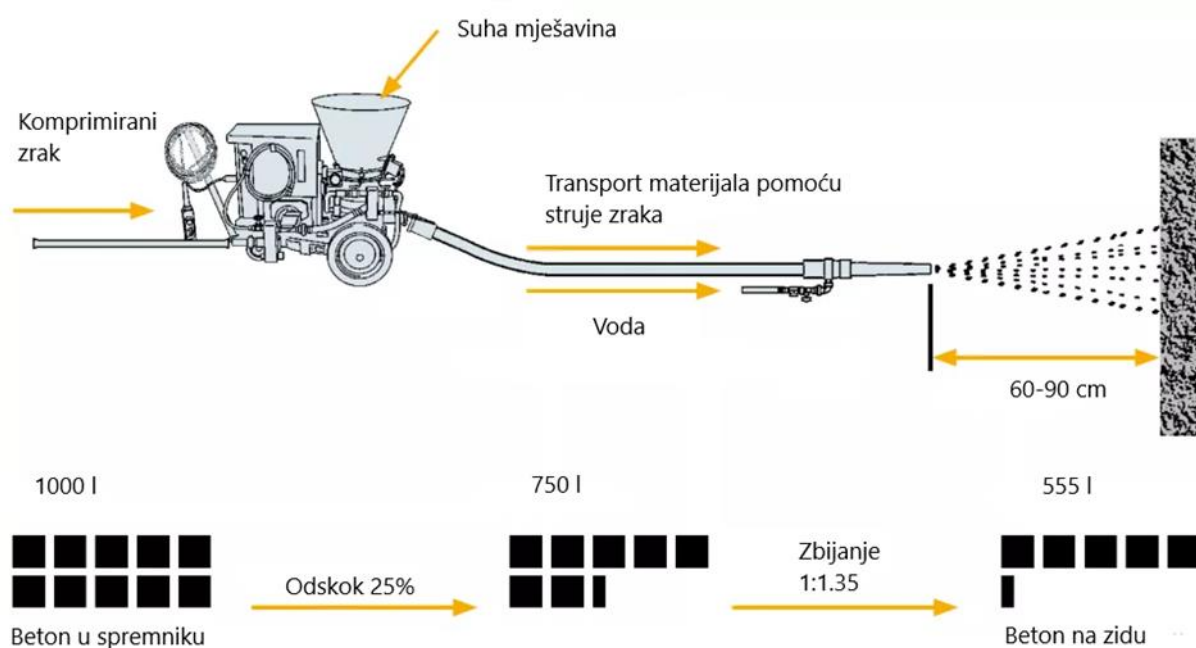
Mlazni beton se definira kao beton koji se ugrađuje kroz posebne mlaznice pomoću struje zraka pod visokim tlakom. Velikom brzinom i energijom se nanosi na podlogu pri čemu se kompaktira i prijanja uz istu [10]. Element je podgrade koji povezuje komponente stijenske mase, čime doprinosi poboljšanju ukupnih mehaničkih osobina stijene [1,2].

Primjena mlaznog betona kao glavne opcije za primarni podgradni sustav u tunelima, zahvaljujući popularizaciji NATM-a, postala je vrlo rasprostranjena. Njegova pristupačna cijena, brza i jednostavna ugradnja te dugotrajnost čine ga najpoželjnim izborom među svim vrstama podgrade u novim metodama tuneliranja [11].

Mlazni beton je mješavina cementa, agregata, vode i dodataka, poput tradicionalnog lijevanog betona. Sadržaj i čvrstoća cementa imaju značajan utjecaj na svojstva mlaznog betona, budući da se povećanjem količine cementa smanjuje odskok materijala. Količina cementa u mlaznom betonu obično je nešto veća nego u tradicionalnom lijevanom betonu. U mlaznom betonu, najčešće se koriste portlandski cementi [1]. Iako je dosta tog kod mlaznog betona i tradicionalnog lijevanog betona jednako, postoje i bitne razlike. Kod mlaznog betona postupak betoniranja, transport i ugradnja je sve jedna operacija, dok su kod tradicionalnog postupka betoniranja to sve zasebne faze. Nadalje, oblik „gotovom proizvodu“ pri tradicionalnom betoniranju daje unaprijed pripremljena oplata, a mlazni beton poprima oblik površine na koju se nanosi [2].

Postoje dva tipa ugradnje mlaznog betona: suhi i mokri postupak.

Kako je prikazano na slici 3., suha mješavina agregata i cementa se dovodi se kroz gumeno crijevo na mlaznicu pod tlakom zraka. Komprimirani zrak se obično uvodi kroz rotirajuću bačvu kako bi prenosio materijale u kontinuiranom toku kroz crijevo za isporuku. Na mlaznici se posebnim crijevom dovodi voda, kako bi mješavina bila blago navlažena (sadržaj vlage mora biti stabilan, ne veći od 7%). Na ovaj način se smanjuje količina prašine. Komprimirani zrak se uvodi kroz rotirajuću bačvu ili zdjelu za hranjenje kako bi prenosio materijale u kontinuiranom toku kroz crijevo za isporuku [1,11 ].

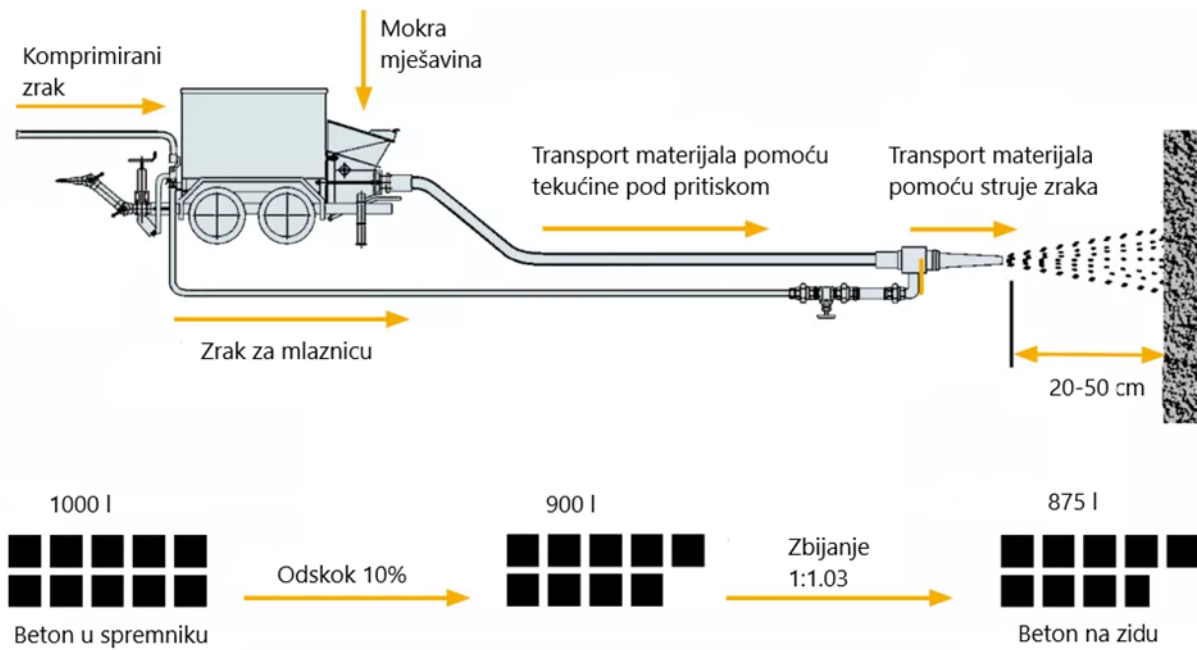


Slika 3.: Suhi postupak

Neke od prednosti korištenja suhog postupka:

- dobra prionljivost na podlogu,
- jednostavan i siguran rad,
- komponente se ne trebaju prethodno miješati,
- predstoj nije potreban,
- životni vijek opreme je dug,
- dobro podnosi učestale prekide u radovima [1].

U slučaju mokrog postupka, mješavina agregata, cementa i vode se prije isporuke u jedinicu za pumpanje, miješa u miješalici za beton. Mješavina se potom hidraulički isporučuje gumenim crijevima do mlaznice gdje se dodaje stlačeni zrak kako bi se postigao traženi pritisak za projiciranje na površinu stijene. Postupak je detaljno opisan na slici 4. [1, 11].



Slika 4.: Mokri postupak

Neke od prednosti korištenja mokrog postupka:

- smanjena emisija prašine,
- stabilna konzistencija smjese,
- jednostavna završna obrada,
- prikladno za rad u skučenom radnom prostoru,
- smanjen odskok i gubitak materijala,
- minimalna potreba za zaštitom okolnog područja,
- mogućnost ručne ugradnje mlaznog betona [1].

---

### 5.2.1. Mikroarmirani mlazni beton

Umjesto običnog mlaznog betona, za izgradnju primarnog podgradnog sustava može se koristiti mikroarmirani mlazni beton (MAMB) s dodanim čeličnim ili polipropilenskim vlaknima [1].

Mikroarmirani mlazni beton sadrži diskontinuiranu armaturu u obliku vlakana koja su ravnomjerno raspoređena u betonskoj smjesi i velikom se brzinom nanosi na podlogu. Pomenuta vlakna stvaraju prostornu matricu koja osigurava trodimenzionalnost armature, stabilizirajući stijensku masu uz minimalne rizike [12].

Mnoge su prednosti primjene MAMB-a sa čeličnim vlaknima:

- manje je debljine zbog čega je potreban manji utrošak mlaznog betona (za razliku od potrebe za pokrivanje armaturnih mreža mlaznim betonom min. 10 cm),
- budući da se ne koristi armaturna mreža, nije potrebna skela,
- bolje prianja uz podlogu – iskop,
- rad s MAMB je dosta sigurniji za razliku od korištenja armaturnih mreža koje se postavljaju u uvjetima nepotpune stabilizacije iskopa,
- brži je korak napredovanja [13, 14].

U Hrvatskoj je, tijekom izgradnje poznatog tunela Sv. Rok rađeno istraživanje koje je u cilju imalo spoznati razlike mehaničkih karakteristika između klasičnog mlaznog betona i MAMB s čeličnim vlaknima. Iz dobivenih rezultata istraživanja koje je provodio Institut IGH iz Zagreba zaključeno je da su tlačne čvrstoće dvije ranije pomenute vrste betona praktično jednake, dok su čvrstoće na savijanje oko 15% veće kod armiranog mlaznog betona sa čeličnim vlaknima. Jedan od zaključaka je i da bi se prema cijenama iz troškovnika za tunel Sv. Rok uporabom čeličnih vlakana u mlaznom betonu umjesto armaturne mreže u II kategorije tunela postigla ušteda od 37%, dok bi ta ušteda u III kategoriji tunela bila visokih 61% pritom ne uzimajući u obzir i višestruku uštedu u vremenu. Ove dvije kategorije tunela su u obe tunelske cijevi zastupljene više od 90% [15].

---

### 5.2.2. Mlazni beton s makrosintetičkim vlaknima

Najnovija tehnološka dostignuća osim upotrebe čeličnih vlakana, podrazumijevaju i makrosintetička vlakna kao osnovnu armaturu mlaznog betona [12].

Osim uobičajenih prednosti koje se postižu upotrebom vlakana za armiranje mlaznog betona, primjena makrosintetičkih vlakana donosi i dodatne koristi specifične za sintetička vlakna:

- gumene cijevi pomoću kojih se nanosi mlazni beton se ne oštećuju,
- olakšan je rad na terenu budući da se na m<sup>3</sup> betona dodaje 5-6 puta manje sintetičkih u odnosu na čelična vlakna,
- imaju dobru mogućnost homogeniziranja u betonskoj smjesi i smanjena je vjerojatnost stvaranja gruda,
- kemijski su inertna,
- hidrofobna su,
- ne posjeduju niti magnetna svojstva niti provodljivost,
- nisu korozivna [12].

Tijekom svibnja i lipnja 2009. godine na probnoj dionici tunela Puljani na spojnoj cesti čvor Ploče – Luka Ploče Institut IGH Zagreb proveo je ispitivanje karakteristika MAMB-a s makrosintetičkim vlaknima za primjenu u mlaznom betonu za izradu primarnog podgradnog sustava. Isptivanje je pokazalo da se uporabom ovog tipa vlakana postiže povećana nosivost uslijed velikih deformacija betona i da je vjerojatnost pojave pukotina manja. Jedna od olakšavajućih okolnosti je i ta da se ovakav beton može uspješno ugrađivati s opremom za obični mlazni beton [12].

Naposlijetku bitno je spomenuti da ugrađeni mlazni beton po ugradnji djeluje kao popustljiva podgrada, a razlog tome je nizak modul elastičnosti i čvrstoće. Kako čvrstoća mlaznog betona raste, time raste i konačna stabilnost podgrade. Mlazni beton apsorbira tangencijalna naprezanja koja dosežu vršne vrijednosti na rubu otvora. Stijenska masa ostaje u približno početnom svom neporemećenom stanju, što je rezultat interakcije između mlaznog betona i stijenskih blokova. Kod mlaznog betona s čeličnim vlaknima se uočava značajna postpukotinska nosivost, dok kod klasičnog betona nema dodatne deformacije nego nastaje krti lom [1].



---

### 5.3. Čelične mreže

Poput vlakna u mikroarmiranom mlaznom betonu, čelične mreže doprinose povećanju žilavosti betonske strukture zbog čega se i koriste za armiranje istog. Prilikom njihove ugradnje, potrebno je paziti da se postavljaju na način da što preciznije prate konture iskopa ili prethodno nanesenih slojeva mlaznog betona. Važno je da budu stabilne i nepomične tijekom ugradnje mlaznog betona, kako ne bi došlo do njihovog pomicanja ili vibracija. Minimalni sloj betona koji je potreban da ih pokrije je 2 cm. U slučaju da mlazni beton ima debljinu koja prelazi 25 cm, koristi se dvostruka čelična mreža [1].



Slika 5.: Nanošenje mlaznog betona nakon postavljenih čeličnih mreža (Izvor:[16])

---

## 5.4. Čelični lukovi

Zbog svoje velike čvrstoće i krutosti, čelični lukovi su naširoko korišteni kao element primarnog podgradnog sustava [17]. Zajedno s mlaznim betonom u stijenskoj masi lošije kvalitete odmah nakon postavljanja (okomito na os tunela) mogu preuzeti opterećenje okolne stijenske mase i učinkovito kontrolirati njene deformacije [17, 1].

Gledajući kroz povijest, prvo su se koristili drveni elementi, zatim su drvene elemente zamijenili valjani čelični lukovi, dok se danas sve više koriste rešetkasti lukovi. Rešetkasti lukovi se izrađuju od čeličnih šipki vezanih u trokutasti raspored i najčešće se formiraju odozdo prema gore. Ono na što treba posebno obratiti pažnju je da se osigura kontinuitet, posebno na mjestu gdje se nalaze spojevi [1].

Mehanizam djelovanja čeličnih lukova je uglavnom sljedeći:

1. Visoka čvrstoća i velika krutost: Ova dva svojstva osiguravaju da mogu odmah nakon ugradnje preuzeti opterećenje od okolne stijene.
2. Potpora u slabim stijenskim masama: U područjima koja imaju tendenciju ispadanja nestabilnih blokova, stijenska masa često ima loša mehanička svojstva što otežava formiranje učinkovitog nosivog luka. U tom slučaju čelični lukovi služe kao privremeni podgradni element koji ograničava deformaciju tunela u radijalnom smjeru. Također, mogu promijeniti stanje naprezanja blizu lica iskopa u troosno stanje naprezanja, što poboljšava nosivost okolne stijene.
3. Integracija s mlaznim betonom i sidrima: Zajedno s mlaznim betonom i sidrima, čelični lukovi tvore jedinstvenu strukturu. Na ovaj način u potpunosti se iskorištava krutost i žilavost cijelog sustava formirajući kontinuirani nosivi luk duž osi tunela [17].



Slika 6.: Čelični lukovi (Izvor: [18])

## 5.5. Štapna sidra

Ključni element primarnog podgradnog sustava su štapna sidra. Prilagođavanjem njihove duljine i razmaka, značajno se može utjecati na krutost i čvrstoću cijelog primarnog podgradnog sustava. Tijekom izvedbe podzemnog iskopa, kombinacijom štapnih sidara s armiranim ili mikroarmiranim mlaznim betonom omogućava se aktivacija nosivosti i mobilizacija čvrstoće stijenske mase [1].

Stillborg, Tincelin i Fine su promatrali različite uloge štapnih sidara u pogledu ojačanja i stabiliziranja iskopa u stijenskoj masi. Martin Blanco je dao pregled svih istraživanja koje su ranije pomenuti radili. Zaključak je da uloga štapnog sidra može biti sljedeća:

1. Pобољшanje mehaničkih svojstava stijenske mase: ako su sidra postavljena u uslojenim ili lošim stijenama ona imaju tendenciju povezivanja slojeva. Štapna sidra dakle imaju ulogu armiranja stijenske mase.
2. Ograničavanje pomaka: uslijed povećanja opterećenja na štapno sidro, oko otvora iskopa se pojavljuje tzv. tlačna zona.
3. Stabilizacija raspucane stijenske mase: povećava se stabilnost stijenskog otvora na način da se sprječava ispadanje i klizanje pojedinih blokova [1].

---

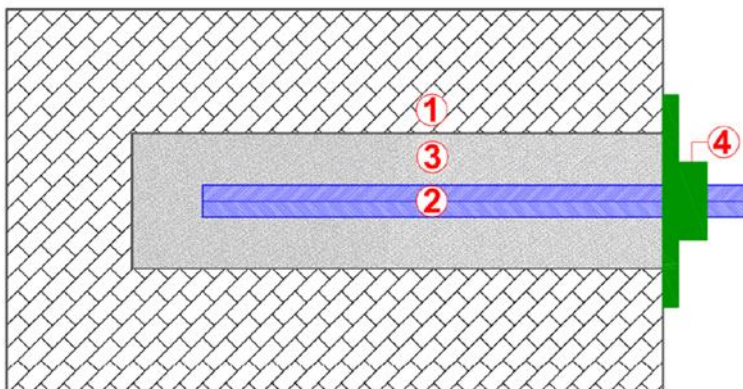
Podjela sidara:

1. aktivna sidra i
2. pasivna sidra.

Razlika između ova dva tipa sidara je u sili prednapinjanja. Aktivnim sidrima se unosi sila prednapinjanja, dok se kod pasivnih sidara prednapinjanje ne provodi, ona se aktiviraju tek uslijed pomaka stijenske mase. Najčešći naziv za pasivna sidra je štapna sidra.

Sustav ojačanja štapnim sidrima sastoji se od četiri osnovna elementa:

1. stijenska masa,
2. element sustava ojačanja – čelična šipka,
3. unutarnja veza elementa ojačanja i stijenske mase – injekcijska smjesa i
4. vanjska veza elemenata ojačanja i stijenske mase.



Slika 7.: Osnovni elementi štapnog sidra (Izvor: [1])

Prema načinu sidrenja, štapna sidra se mogu podijeliti na:

1. mehanički usidrena štapna sidra,
2. injektirana štapna sidra i
3. trenjem usidrena štapna sidra [19].

Prednosti korištenja štapnih sidara su brojne, neke koje su najznačajnije su sljedeće:

- svestrana primjena, prilagodljiva bilo kojoj geometriji iskopa,
- jednostavna i brza mogućnost uporabe,
- potpuno mehanizirana ugradnja,
- prihvatljiva cijena [1].



Slika 8.: Tunel s ugrađenim štapnim sidrima (Izvor: [20])



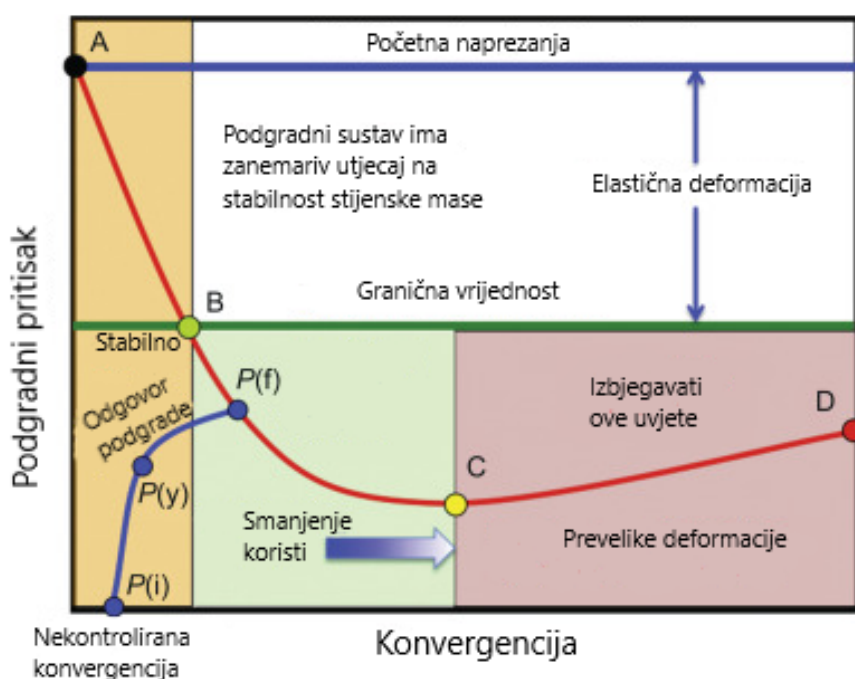
Slika 9.: Proces ugradnje štapnih sidara (Izvor: [21])

## 6. KARAKTERISTIČNA KRIVULJA STIJENSKE MASE I PODGRADE

Tijekom gradnje tunela dolazi do deformacije stijenske mase, u geotehničkom svijetu poznate kao konvergencija tunela. Praćenjem konvergencije za vrijeme i nakon gradnje moguće je odrediti tzv. krivulju konvergencije. U početku, s napredovanjem iskopa i konvergencija se odvija brzo, a kako se tunel približava ravnotežnom stanju i brzina konvergencije se postepeno smanjuje. Nakon iskopa, ugrađuje se primarni podgradni sustav koji se počinje elastično deformirati. U trenutku kad se krivulja primarnog podgradnog sustava presiječe s krivuljom stijenske mase kaže se da je uspostavljena ravnoteža [1].

Dakle, reakcija tla na iskop tunela opisuje se pomoću karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade [23]. Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade prikazuje odnos između radijalnog pomaka i podgradnog pritiska potrebnog da se uspostavi ravnoteža na rubu podzemnog otvora [1].

Koncept reakcije tla razvijen je kako bi se olakšao dizajn potpornih sustava u tuneliranju. Za određivanje krivulja reakcije tla u tunelima, važno je uzeti u obzir vrijeme ugradnje podgrade i njen intenzitet, što se postiže mjerenjem podgradnog pritiska i konvergencije otvora. Reakcija tla ovisi o svojstvima stijenske mase, uvjetima opterećenja, i otpornosti podgrade, koja je određena karakteristikama nosivosti i pomaka [22].



Slika 10.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade

---

Na slici 10. prikazana je karakteristična krivulja stijenske mase. U početnom stanju naprezanja, otpor stijenske mase uravnotežen je silama u okolnoj stijenskoj masi, što rezultira izostankom konvergencije (točka A). To stanje odgovara prirodnom naprezanju stijenske mase na mjestu podzemnog otvora prije iskopa. Iskopom dolazi do povećanja konvergencije. U početku je krivulja strma i gotovo linearna, što odražava elastični odgovor stijenske mase. Daljnim iskopom, krivulja reakcije stijenske mase postaje linearna i počinje se izravnavati što ukazuje na popuštanje stijene (točka B). Dosezanjem najniže točke krivulje (točka C) daljna konvergencija zahtijevala bi povećanje podgradnog pritiska do točke D [22].

Na slici 10. prikazana je i interakcija podgradnog sustava i stijenske mase. Točke  $P(i)$ ,  $P(y)$  i  $P(f)$  predstavljaju krivulju opterećenja i pomaka za podgradu koja je deformabilna. Nakon početne konvergencije, odnosno početnog pomaka ugrađuje se primarna podgrada [22]. Veoma je bitno odrediti točan početni pomak pri kojem se podgrada postavlja. Početni pomak stijenske mase u trenutku kada se podgrada počinje postavljati ovisi o nekoliko čimbenika:

- udaljenosti od čela iskopa na kojoj se podgrada počinje postavljati,
- vremenu koje je proteklo od trenutka iskopa do početka postavljanja podgrade, i
- vremenu potrebnom da postavljena podgrada postigne odgovarajuću čvrstoću [19].

Uobičajeno je prihvatiti vrijednost koja neće dovesti do značajnih oštećenja podgrade. Ta se vrijednost obično kreće između 0,5 i 1,0 promjera podzemnog otvora [24]. Prije nego presječe krivulju reakcije stijenske mase i postigne ravnotežni položaj, primarna podgrada se deformira ali uz dovoljno kapaciteta da presiječe krivulju u točki  $P(f)$ . Ako bi se primarna podgrada ugradila u trenutku kada krivulja stijenske mase presijeca krivulju podgrade u točki C (potrebna minimalna potpora za održavanje otvora), takav poduhvat ne bi bio u marginama sigurnosti jer su potrebna vrlo precizna saznanja o ponašanju tla. Točka B predstavlja „gornji prag“ trenutka ugradnje primarne podgrade. Krivulja reakcije stijenske mase u toj točki prelazi iz linearnog u nelinearni oblik i stijena se počinje deformirati [22].

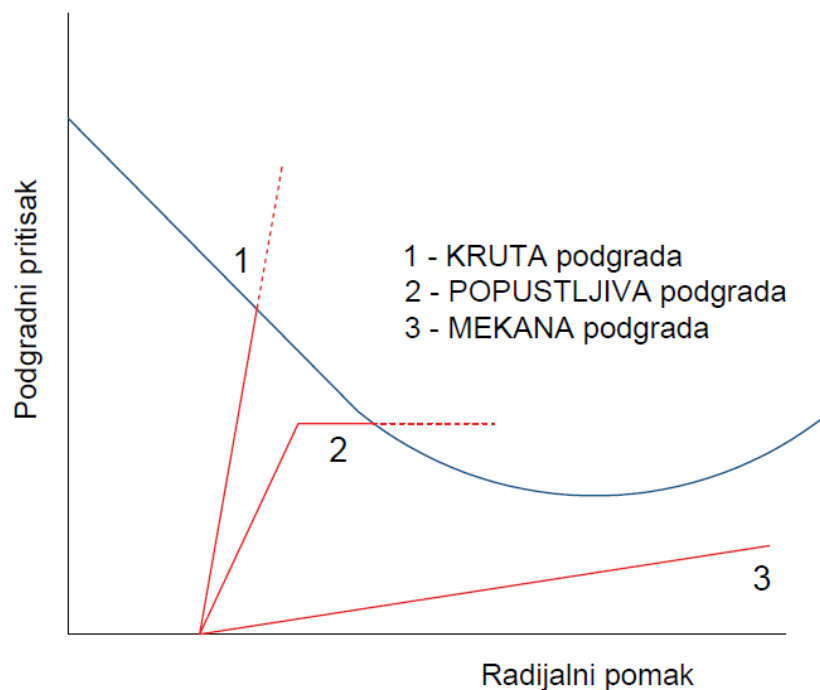
Jako je bitno razmotriti i količinu nekontrolirane kovergencije koja se može dogoditi, odnosno količinu konvergencije koju primarna podgrada ne može kontrolirati. Konvergencija koja se ostvaruje duž linearnog dijela krivulje stijenske mase u velikoj mjeri se ne može kontrolirati ugrađenom primarnom podgradom. Međutim, podgradni sustav mora biti projektiran na način da izdrži ovu konvergenciju i pritom zadrži dovoljno otpora kako bi se krivulja podgrade uspješno presjekla s krivuljom reakcije tla na predviđenoj točki [22].

---

Uzimajući u obzir sve prethodno navedeno, može se zaključiti da postoje tri tipa podgrade (Slika 11.) u ovisnosti o njenoj krutosti i to:

- krivulja krute podgrade,
- krivulja popustljive podgrade i
- krivulja mekane podgrade.

Prva navedena krivulja siječe krivulju stijenske mase 'prerano' i mobilizirani pritisak je visok, dok druga navedena krivulja siječe krivulju stijenske mase kada je već dosegnuta vršna čvrstoća podgrade, a treće navedena krivulja uopće ne siječe krivulju stijenske mase ili je siječe 'prekasno' pa su ostvareni pomaci preveliki.



Slika 10.: Tri tipa podgrade



---

## 7. PRIKAZ VRAKAS I ANAGNOSTOU METODE ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

U tunelima s dominantnim tlačnim silama mogu se pojaviti izrazito velike konvergencije, koje u nekim slučajevima prelaze i 10-20% radijusa iskopanog tunela. Međutim, većina postojećih formulacija za karakterističnu krivulju reakcije stijenske mase temelji se na teoriji malih pomaka. Uzevši to u obzir, Vrakas i Anagnostou predstavili su eksplicitno rješenje za karakterističnu krivulju stijenske mase kod velikih deformacija, pri čemu su obuhvatili rasterećenje cilindričnih ili sfernih otvora u beskonačnom, linearno-elastičnom i savršeno plastičnom mediju koji slijedi Mohr-Coulombov kriterij sloma. Posebno su uzeli u obzir neasocirano pravilo tečenja, gdje plastične deformacije ne prate uvijek smjer u kojem bi trebale ići. Ovo rješenje je prikazano kroz bezdimenzionalne dijagrame koji pokrivaju praktično relevantan raspon parametara, pružajući korisne smjernice za inženjerske projekte u kompleksnim geotehničkim uvjetima [23].

Osnovne karakteristike metode:

### **Analiza velikih deformacija**

Metoda se bavi problemima koji se javljaju kada tlo ili stijena oko tunela podliježe velikim deformacijama uslijed iskopavanja. Velike konvergencije često se susreću u podzemnim projektima koji kombiniraju veliku debljinu nadsloja i slaba svojstva tla [23].

### **Karakteristična krivulja stijenske mase**

Metoda koristi koncept karakteristične krivulje stijenske mase za procjenu interakcije između tla i podgrade tunela. Krivulja pokazuje kako se podgradni tlak mijenja s konvergencijom tunela, omogućujući inženjerima da optimiziraju dizajn podgrade [23].

### **Primjena u tzv. "squeezing ground" uvjetima**

Metoda je posebno korisna u uvjetima gdje je tlo ili stijena sklona velikim deformacijama, kao što su "squeezing ground" uvjeti. U takvim uvjetima, stijenska masa može značajno popuštati i stiskati se prema unutra nakon iskopavanja tunela, što može izazvati ozbiljne izazove u održavanju stabilnosti tunela [23].

---

## Zatvorena rješenja

Vrakas i Anagnostou razvili su analitička rješenja koja omogućuju izračunavanje naprezanja i deformacija oko tunela. Ta rješenja su korisna za brzu procjenu i mogu poslužiti kao referenca za složenije numeričke analize [23].

Kroz povijest se provlače brojne studije slučajeva koje se bave tuneliranjem u uvjetima tlačnog djelovanja, poput Gotthard tunela u Švicarskoj o kojem će kasnije biti riječ. U ekstremnim slučajevima, kao što je bio slučaj s tunelom Yacambu–Quibor u Venezueli, došlo je čak do potpunog zatvaranja otvora [23].



Slika 11.: a Gotthard Base tunel; b Lyon-Turin base tunel (Izvor: [25])

---

Tunel Yacambú-Quibor, promjera 5 metara i duljine 23.3 kilometra, projektiran je za prijenos vode kroz Ande, od brane Yacambú smještene u vlažnoj tropskoj regiji Orinoco, do polusušne, ali plodne doline Quibor u zapadnoj Venezueli. Iskop tunela prolazio je kroz silicificirane i grafitne filite, na dubinama do 1270 metara ispod površine, a gradnja je trajala čak 32 godine. Tijekom ovog dugog razdoblja, primijenjeno je nekoliko različitih metoda iskopa i različiti sustavi podgrade, sve dok se na kraju nije prešlo na fleksibilnu podgradu. Ova promjena omogućila je postizanje dogovora između naručitelja i izvođača da se tunel gradi isključivo kružnog presjeka. Na nekoliko dionica tunela došlo je do potpunog zatvaranja poprečnog presjeka. Analiza malih deformacija rezultirala je precijenjenom čvrstoćom stijene, jer je pokazala potpuno zatvaranje otvora (konvergencija veća od 80%) za koheziju od oko 1.3 MPa, dok je analiza koja uzima u obzir veće deformacije pokazala znatno manju koheziju od samo 0.35 MPa. Važno je napomenuti da grafitni filiti mogu prouzročiti ozbiljne probleme istiskivanja čak i na manjim dubinama nadsloja, već od 45 metara. Početna oštećenja uključivala su pucanje betonske podgrade, a nakon uklanjanja oštećenih dijelova betona, zabilježene su značajne deformacije čeličnih lukova. Unatoč postavljanju armiranih sidara kako bi se stabilizirao oštećeni dio, oštećenja su se proširila na svod tunela nakon što je oštećena podgrada uklonjena s dna tunela. Kako su oštećenja napredovala, uz deformacije od gotovo 1 metar, donesena je odluka o ponovnom iskopu i zamjeni podgrade [26, 28].



**Slika 12.:** Kolaps tunela Yacambú-Quibor (Izvor: [28])

---

## 7.1. Teorijske osnove metode

Razmatra se problem cilindričnog otvora radijusa  $a_0$ . Ključna pretpostavka koja olakšava matematičke dokaze u nastavku rada je da su elastične deformacije materijala zanemarivo male u odnosu na plastične deformacije. Naime jednoaksijalna tlačna čvrstoća mnogo je manja u usporedbi s elastičnom krutošću, primjerice Youngovim modulom  $E$ . Ovo implicira da su velike deformacije gotovo u potpunosti posljedica plastičnosti [26].

Matematičke jednadžbe formuliraju se koristeći cilindrične i polarne koordinate, pri čemu je ishodište smješteno u središtu otvora. Razmatraju se uvjeti ravninskog deformiranja u smjeru  $z$ . Tijekom iskopa su radijalno naprezanje  $\sigma_r$  i tangencijalno naprezanje  $\sigma_t$  manje i veće glavno naprezanje. Bitno je napomenuti da se radi o tzv. Cauchyjevim naprezanjima (sila po jedinici površine) i da je analiza u potpunosti izvedena na temelju Lagrangeove metode, fokusirajući se na gibanje svake pojedine materijalne točke [23, 29].

Tlo se pretpostavlja kao homogeno, izotropno i linearno elastično-savršeno plastično prema Mohr Coulombovom kriteriju čvrstoće [23]. Mohr Coulombov kriterij čvrstoće pripada linearnim kriterijima čvrstoće i široko je prihvaćen za opisivanje ponašanja tla i stijena (uključujući diskontinuitete). Temelji se na pretpostavci da je slom materijala kontroliran najvećim posmičnim naprezanjima, koja su u izravnoj vezi s normalnim naprezanjima. Ova ovisnost se grafički prikazuje pomoću Mohrove kružnice (Slika 13.), koja ilustrira stanje naprezanja pri slomu u odnosu na najveće i najmanje glavno naprezanje. Prema ovom kriteriju, posmična čvrstoća tla ili stijene sastoji se od dvije komponente: stalne kohezije i komponente trenja, koja ovisi o normalnom naprezanju [27].

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

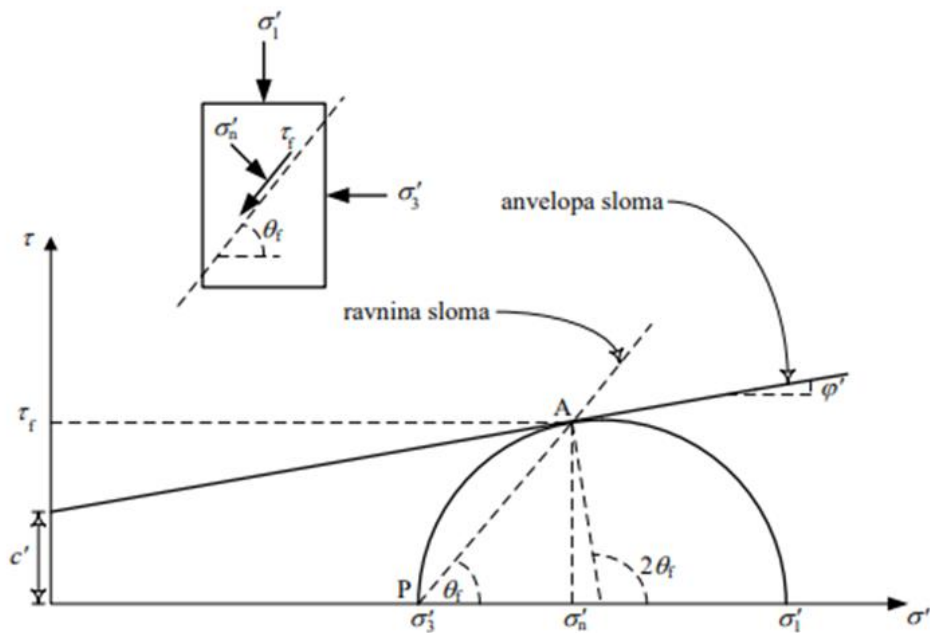
gdje je

$\tau_f$  – posmično naprezanje,

$c$  – kohezija,

$\sigma_n$  – normalno efektivno naprezanje,

$\varphi$  – kut unutarnjeg trenja.



Slika 13.: Mohr Coulombov kriterij sloma

U ovom slučaju Mohr Coulombov kriterij sloma može se izraziti kao:

$$\sigma_1 = m\sigma_3 + \sigma_D \quad (4)$$

gdje je

$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (5)$$

$\sigma_1, \sigma_3$  – najveće i najmanje glavno naprezanje,

$\varphi$  – kut trenja,

$\sigma_D$  – jednoosna tlačna čvrstoća.

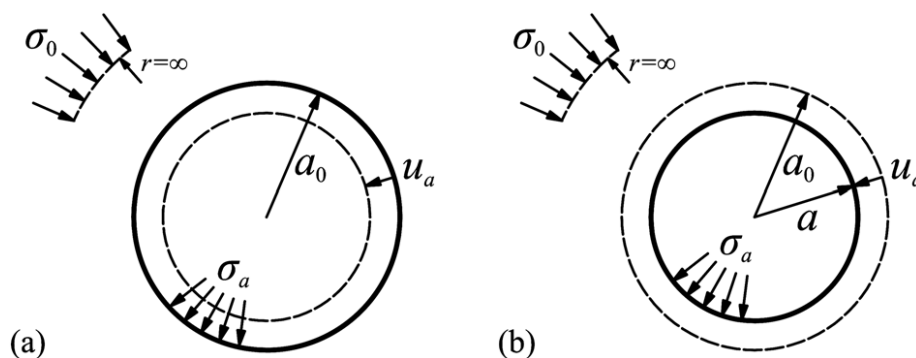
Jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_D$  jednaka je

$$\sigma_D = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

gdje c označava koheziju.

Tlačno naprezanje i deformacije se definiraju kao pozitivni u slučaju tlaka, a početna naprezanja su jednolika tj.  $\sigma_r = \sigma_t = \sigma_z = \sigma_0$  (radijalna, tangencijalna i aksijalna naprezanja). Pretpostavka jednolikog početnog stanja naprezanja omogućuje jednodimenzionalni opis problema u smislu radijalnog pomaka  $u$ . Podgradni pritisak  $\sigma_a$  počevši od svoje početne vrijednosti  $\sigma_0$  se postupno smanjuje, a naprezanja na beskonačnoj udaljenosti od otvora ostaju nakon iskopa nepromijenjena. Tijekom iskopa odnosno rasterećenja, polumjer otvora se smanjuje s početne vrijednosti  $a_0$  na trenutni polumjer  $a$ , dok se materijalna točka koja je imala početni položaj  $r_0$  (materijalna koordinata) sada nalazi na trenutnom polumjeru  $r$  (prostorna koordinata) [23]. Tad se radijalni pomak svake materijalne točke definira kao:

$$u(r) = r_0 - r \quad (7)$$



Slika 14.: a Analiza malih deformacija; b Analiza velikih deformacija (Izvor: [23])

## 7.2. Kinematička razmatranja

Prema Chadwicku koji je predložio uporabu logaritamskih (ili Henckyjevih) deformacija, koje se prema usvojenim konvencijama znakova mogu napisati u Eulerovom obliku kinematički odnos za radijalne i tangencijalne deformacije se izražava kao [23]:

$$\varepsilon_r = \ln \left( 1 + \frac{du}{dr} \right) \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \ln \left( 1 + \frac{u}{r} \right) \quad (9)$$

---

### 7.3. Elastično ponašanje

Kao što je spomenuto u uvodu, elastične deformacije su male, te se stoga u prethodnim jednadžbama mogu zanemariti članovi višeg reda. U tom slučaju, kinematički odnosi se pojednostavljaju na [23]:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (10)$$

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad (11)$$

Kako se unutarnji tlak podgrade  $\sigma_a$  postupno smanjuje, ponašanje tla oko otvora je u početku potpuno elastično. Radijalna naprezanja  $\sigma_r$  opadaju, dok tangencijalna naprezanja  $\sigma_t$  rastu i tako sve dok se ne dosegne Mohr Coulombov kriterij sloma. Naprezanja oko otvora dana su sljedećim jednadžbama [23]:

$$\sigma_r = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_a) \left(\frac{a}{r}\right)^2 \quad (12)$$

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_0 - \sigma_a \left(\frac{a}{r}\right)^2 \quad (13)$$

Izraz za konstrukciju karakteristične krivulje stijenske mase može se dobiti na način da se izračuna pomak na zidu tunela ( $r=a$ ) i uzme obzir definicija pomaka (7):

$$\frac{u_a}{a_0} = \left[ 1 + \frac{E}{(1 + \nu) \cdot (\sigma_0 - \sigma_a)} \right]^{-1} \quad (14)$$

Razlog zbog kojeg se svi gore navedeni izrazi mogu koristiti za konačne deformacije u slučaju elastičnog odgovora leži u njihovoj kompatibilnosti sa deformacijama u plastičnoj zoni gdje se razmatra točno rješenje za konačne deformacije [23].

### 7.4. Elastoplastično ponašanje

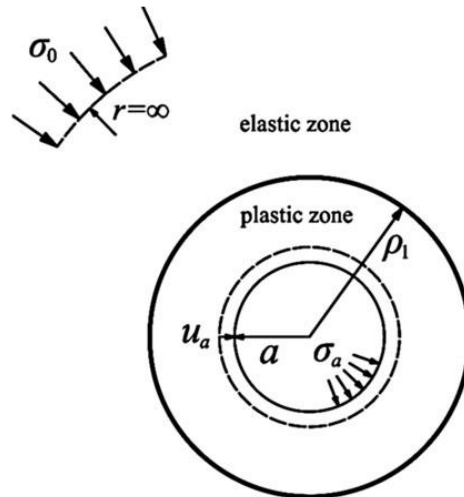
#### 7.4.1. Cilindrični otvori bez izvanravninskog naprezanja

Tijekom iskopa tlo ostaje u potpunosti elastično dok ne dosegne granicu loma na zidovima otvora. Smanjenjem podgradnog pritiska, tlo oko otvora se plastificira i stvara tzv. plastični prsten i to u trenutku dosezanja kritičnog naprezanja  $\sigma_{p1}$ . Vanjski radijus tog plastičnog prstena označava se s  $\rho_1$  [23].

Vrijednost kritičnog naprezanja  $\sigma_{\rho_1}$  može se dobiti pomoću izraza:

$$\sigma_{\rho_1} = \frac{2 \cdot \sigma_0 - \sigma_D}{m + 1} \quad (15)$$

Ako se problem promatra dvodimenzionalno, pretpostavka je da je aksijalno naprezanje, srednje glavno naprezanje. Ova pretpostavka ne vrijedi u svim slučajevima. Smanjenjem podgradnog pritiska može doći do stvaranja još jednog, unutarnjeg plastičnog prstena [23].



**Slika 15.:** Elastoplastično ponašanje cilindričnog otvora bez izvanravinskog naprezanja  
(Izvor: [23])

Jednadžbe se primjenom Caquotove transformacije mogu značajno pojednostaviti (transformacija materijala bez kohezije u kohezivni materijal):

$$\tilde{\sigma} = \left( \sigma + \frac{\sigma_D}{m - 1} \right) \quad (16)$$

Naprezanja na elastoplastičnoj granici zadovoljavaju kriterije elastičnog odgovora i pomoću prethodne jednadžbe mogu se zapisati:

$$\tilde{\sigma}_t = m \tilde{\sigma}_r \quad (17)$$

Iako ukupne deformacije u slučaju elastoplastičnog ponašanja mogu biti velike, komponente elastičnih deformacija su male i to opet omogućuje pretpostavku linearne elastičnosti i pokazuje da su velike deformacije uzrokovane plastičnim deformacijama [23].



Radijalni pomak za  $r=\rho_1$  može se izraziti:

$$u_{\rho_1} = (1 + \nu) \cdot (\widetilde{\sigma}_0 - \widetilde{\sigma}_{\rho_1}) \cdot \rho_1 \quad (18)$$

Naprezanja unutar plastične zone ( $a \leq r < \rho_1$ ) mogu se izraziti:

$$\widetilde{\sigma}_r = \widetilde{\sigma}_a \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \quad (19)$$

a trenutni plastični radijus:

$$\frac{\rho_1}{a} = \left(\frac{\widetilde{\sigma}_{\rho_1}}{\widetilde{\sigma}_a}\right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (20)$$

Ako se promatra polje plastičnih pomaka uzima se u obzir pretpostavka da je plastični potencijal dobijen s Mohr Coulombove anvelope sloma nakon zamjene kuta trenja, kutom dilatacije ( $0^\circ \leq \psi \leq \varphi$ ) [23].

$$d\varepsilon_r^{PL} + \kappa d\varepsilon_t^{PL} = 0 \quad (21)$$

gdje je:

$$\kappa = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (22)$$

Jednadžba za konstrukciju karakteristične krivulje stijenske mase [29]:

$$\frac{u_a}{a_0} = 1 - \left[ T_{01} + \left(\frac{\delta}{\Omega_{01}}\right) \cdot f_i(1, R_1) \right]^{\frac{-1}{\kappa+1}} \quad (23)$$

gdje je:

$$T_{01} = \left[ 1 + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\rho_1}}{E} \right]^{\kappa+1} \cdot R_1^\delta \quad (24)$$

$$\Omega_{01} = \exp [(\omega_{11} + \omega_{21})\widetilde{\sigma}_0] \quad (25)$$

$$\omega_{11} = \frac{1 + \nu}{E} [1 - \nu(\kappa + 1)] \quad (26)$$

$$\omega_{21} = \frac{1 + \nu}{E} [\kappa - (1 - \nu) - \nu] \quad (27)$$

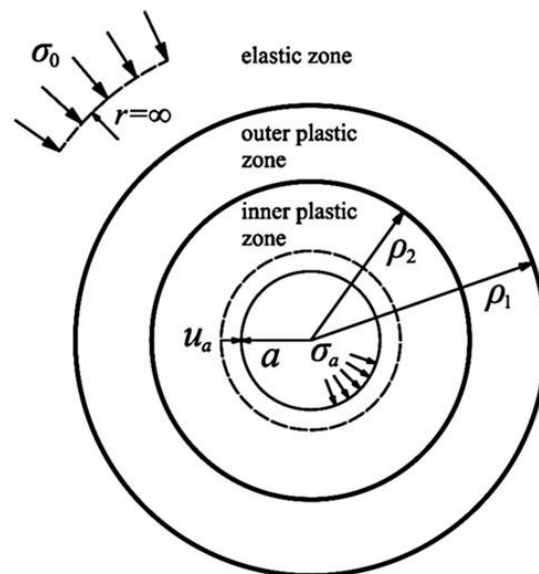
$$R_1 = \frac{\widetilde{\sigma}_{\rho_1}}{\widetilde{\sigma}_a} \quad (28)$$

$$f_I(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Omega_1^n}{n!(n+\delta)} (x^{n+\delta} - y^{n+\delta}) \quad (29)$$

$$\delta = \frac{\kappa + 1}{(m - 1)} \quad (30)$$

#### 7.4.2. Cilindrični otvori s izvanravninskim naprežanjem

Smanjenjem podgradnog pritiska unutar otvora, longitudinalno naprežanje počinje opadati, no ipak znatno sporije od tangencijalnog naprežanja unutar plastične zone. Kada podgradni pritisak dosegne kritičnu razinu, aksijalno i tangencijalno naprežanje se izjednačuju. Nakon toga, oba naprežanja opadaju istim tempom, zadržavajući jednakost. Ako je podgradni pritisak ispod kritične vrijednosti, dolazi do formiranja unutarnje plastične zone, čiji vanjski radijus iznosi  $\rho_2$  [23].



**Slika 16.:** Elastoplastično ponašanje cilindričnog otvora s izvanravninskim naprežanjem  
(Izvor: [23])

Na graničnom dijelu između dvije plastične zone ( $r = \rho_2$ ) vrijedi sljedeće:

- $\sigma_z = \sigma_t$ ,
- oba naprezanja zadovoljavaju kriterij popuštanja [23].

Naprezanje u tom slučaju se izražava kao:

$$\tilde{\sigma}_{\rho_2} = \frac{1 - 2\nu}{m(1 - \nu) - \nu} \tilde{\sigma}_0 \quad (31)$$

Ako se radijalna naprezanja na granici između zona izjednače s kritičnom vrijednošću naprezanja  $\sigma_{\rho_2}$  onda je radijus  $\rho_2$ :

$$\frac{\rho_2}{a} = \left( \frac{\tilde{\sigma}_{\rho_2}}{\tilde{\sigma}_a} \right)^{\frac{1}{m-1}} \quad (32)$$

Pri podgradnom pritisku  $\sigma_a$  koji je niži od  $\sigma_{\rho_2}$  ili će umjesto tangencijalnog, longitudinalno naprezanje postati glavno naprezanje unutar unutarnjeg plastičnog prstena ( $\sigma_r < \sigma_t < \sigma_z$ ) ili će dva pomenuta naprezanja ostati jednaka ( $\sigma_r < \sigma_t = \sigma_z$ ) [23].

Ako se prva činjenica  $\sigma_r < \sigma_t < \sigma_z$  uzme u obzir onda slijedi da je:

$$\tilde{\sigma}_t < \tilde{\sigma}_z$$

i prema Mohr Coulombovom kriteriju sloma:

$$\tilde{\sigma}_z = m\tilde{\sigma}_r \quad (33)$$

Jednadžba za konstrukciju karakteristične krivulje stijenske mase [29]:

$$\frac{u_a}{a_0} = 1 - \left[ T_{02} + \left( \frac{\delta}{\Omega_{02}} \right) \cdot f_i(1, R_2) \right]^{\frac{-1}{\kappa+1}} \quad (34)$$

gdje je:

$$T_{02} = T_{01} + \frac{\delta}{\Omega_{01}} f_i(R_2, R_1) \quad (35)$$

$$\Omega_{02} = \exp [(\omega_{12} + \omega_{22})\tilde{\sigma}_0] \quad (36)$$

$$\omega_{12} = \frac{1}{E} (1 - 2\nu\kappa) \quad (37)$$

$$\omega_{22} = \frac{2}{E} [\kappa(1 - \nu) - \nu] \quad (38)$$

$$R_2 = \frac{\widetilde{\sigma}_{\rho 2}}{\widetilde{\sigma}_a} \quad (39)$$

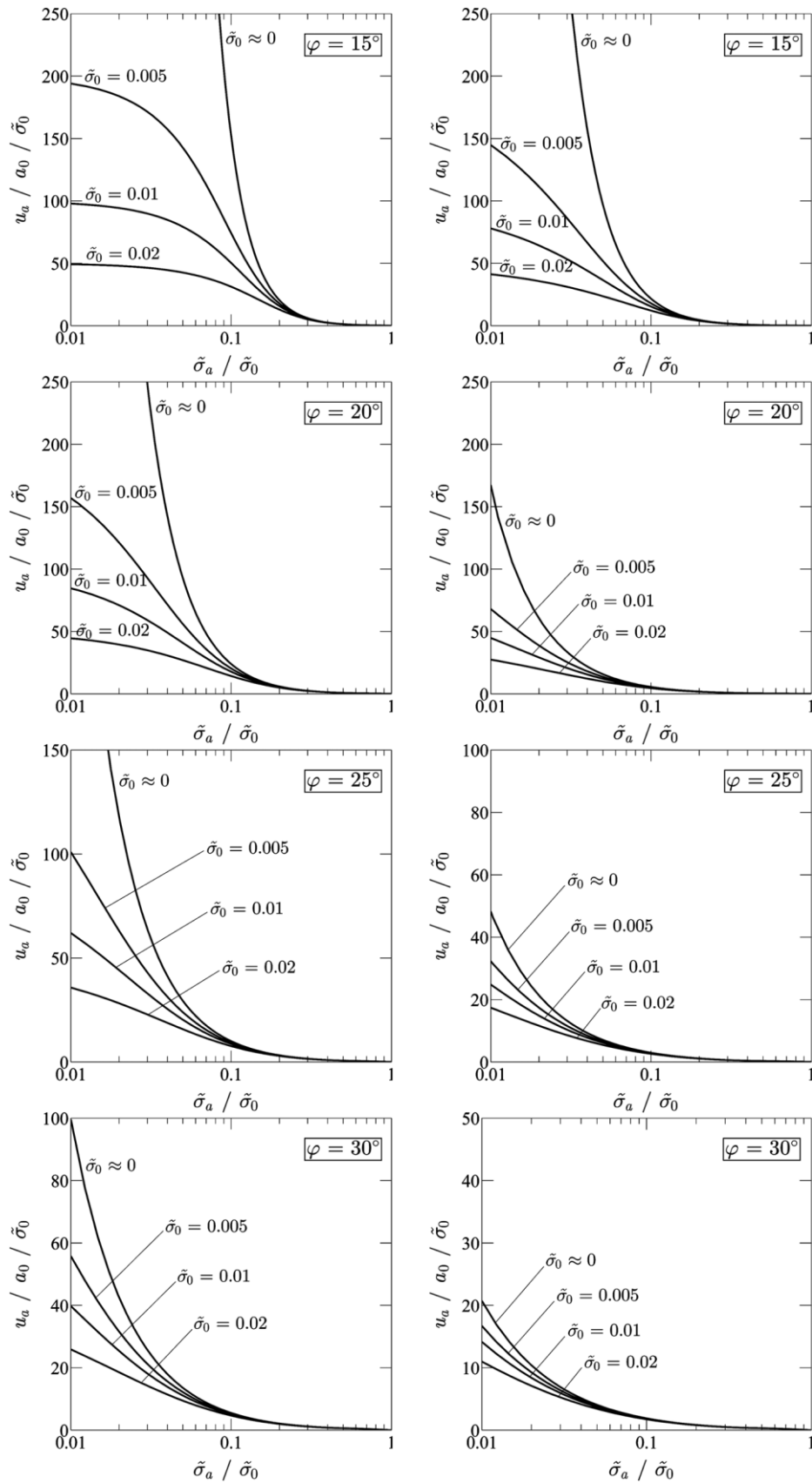
## 7.5. Pregled rješenja

Sve prethodno dobijene jednačbe za karakterističnu krivulju stijenske mase mogu se sažeti [29]:

$$\frac{u_a}{a_0} = \begin{cases} \left[ 1 + \frac{E/(1+\nu)}{(\sigma_0 - \sigma_a)} \right]^{-1}, & \sigma_{\rho 1} \leq \sigma_a; \\ 1 - \left[ T_{01} + \left( \frac{\delta}{\Omega_{01}} \right) \cdot f_i(1, R_1) \right]^{\frac{-1}{k+1}}, & \sigma_a \leq \sigma_{\rho 1}; \\ 1 - \left[ T_{02} + \left( \frac{\delta}{\Omega_{02}} \right) \cdot f_i(1, R_2) \right]^{\frac{-1}{k+1}}, & \sigma_a \leq \sigma_{\rho 2} \end{cases} \quad (40)$$

Na slici 17. prikazani su normalizirani dijagrami koji prikazuju odgovarajuće karakteristične krivulje stijenske mase za različite vrijednosti transformiranog početnog naprezanja  $\widetilde{\sigma}_0$  i kut trenja  $\varphi$ . Vrijednost Poissonovog koeficijenta  $\nu$  je konstantna i iznosi 0.25 dok je kut dilatacije  $\psi \max(0^\circ, \varphi - 20^\circ)$ . Odabrane vrijednosti kuta dilatacije tipične su za slabe stijene [23].

Na lijevoj strani prikazani su dijagrami koji se odnose na cilindrične otvore, dok su dijagrami na desnoj strani povezani sa sfernim otvorima. Uočava se da, s lošijom kvalitetom tla, dolazi do većeg početnog naprezanja, što rezultira manjim potpornim tlakom i većim konvergencijama. U takvim slučajevima, pogreška teorije malih deformacija također postaje značajnija [23].



Slika 17.: Primjeri karakterističnih krivulja stijenske mase (Izvor: [23])

---

## 8. PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE BEZ PODGRADE

Primjer određivanja karakteristične krivulje stijenske mase bez podgrade Vrakas i Anagnostou metodom, proveden je u softveru RocSupport. RocSupport je jednostavan softverski alat za procjenu deformacija u kružnim iskopima, kao i za vizualizaciju interakcije tunela s različitim sustavima podgrade. Program je primjenjiv za tunele iskopane u slabim stijenama pod tlačnim uvjetima, no nije prikladan za iskope u čvrstim stijenama gdje slom kontroliraju strukturni diskontinuiteti ili krhki lomovi. Na temelju radijusa tunela, uvjeta in-situ naprezanja, parametara stijenske mase i parametara podgrade, softver izračunava karakterističnu krivulju reakcije tla i karakterističnu krivulju reakcije podgrade. Točka presijecanja dvije navedene krivulje određuje faktor sigurnosti sustava podgrade. Krivulja reakcije tla temelji se na analitičkom rješenju za kružni tunel u elasto-plastičnoj stijenskoj masi pod hidrostatičkim naprežanjem, a čvrstoća stijenske mase može se definirati pomoću Mohr-Coulombovih ili Hoek-Brownovih parametara. Glavne pretpostavke softvera tijekom analize su sljedeće:

- tunel je kružnog presjeka,
- in-situ naprezanja su hidrostatska (jednak tlak u svim smjerovima),
- stijenska masa je izotropna i homogena, a slom nije kontroliran većim strukturnim diskontinuitetima,
- reakcija podgrade je elastično-savršeno plastična,
- podgrada se modelira kao ravnomjeran unutarnji tlak oko cijelog opsega tunela [30].

Posljednju pretpostavku je potrebno pažljivo razmotriti i uporediti sa stvarnim ponašanjem tunela budući da ravnomjeran podgradni pritisak podrazumijeva da mlazni beton formira zatvoreni prsten, čelični lukovi čine potpuni krug, a da su sidra postavljena na način da potpuno okruže tunel. Kako to u stvarnosti obično nije slučaj, stvarni učinak podgrade bit će manji, a deformacije veće nego ih pretpostavio RocSupport. Kako se metoda analize zasniva na karakterističnoj reakciji tla koja povezuje unutarnji potporni tla i konvergenciju zidova tunela, pretpostavke bi bile sljedeće: Kružni tunel je izložen hidrostatskom in-situ naprežanju i jednoliko raspoređenom potpornom pritisku [30].

---

Do sloma stijenskog masiva oko tunela dolazi u trenutku kada jednoliki unutarnji podgradni tlak bude manji od kritičnog podgradnog tlaka, a ako je unutarnji podgradni tlak veći od kritičnog podgradnog tlaka, do sloma neće doći i ponašanje stijenske mase oko tunela je elastično. Krutost i nosivost podgrade izraženi su kao maksimalni podgradni pritisak i maksimalna deformacija podgrade. Ovi parametri su na taj način izravno uključeni u analizu interakcije između stijene i podgradnog sustava [30].

Iako model korišten u RocSupportu nije namijenjen zamjeni za konačno rješenje podgrade tunela i potrebna je dodatna numerička analiza (posebno ako su u pitanju jako velike deformacije), iz njega se može dosta toga naučiti o interakciji tunela s različitim sustavima podgrade [30].

## 8.1. Gotthard Base tunel

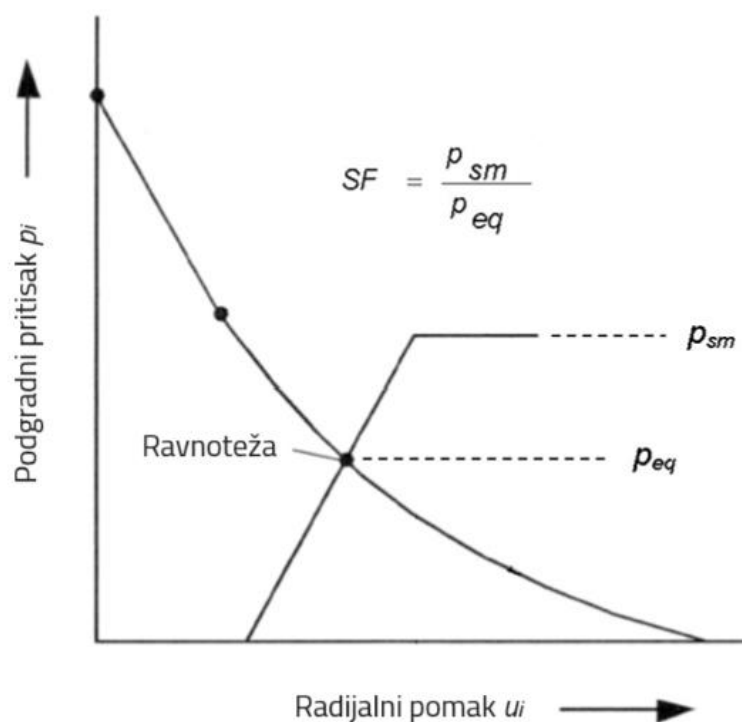
Primjer za određivanje karakteristične krivulje stijenske mase bez podgrade Vrakas i Anagnostou metodom je Gotthard tunel. Gotthard tunel, dug 57 km ispod švicarskih Alpa, najduži je tunel na svijetu. Ovaj impresivan projekt, zajedno s 15 km dugim Ceneri Base tunelom omogućuje gotovo ravnu željezničku liniju kroz Švicarsku. Cilj tunela je značajno smanjiti kamionski promet štetan za okoliš te povezati Švicarsku s ostatkom europskih visokoučinkovitih željeznica za putnički promet. Tunel je dizajniran s dvije jednokolosiječne cijevi, povezane svakih 325 metara, s multifunkcionalnim stanicama u Sedrunu i Faidu, smještenim na trećini dužine tunela. Ove stanice sadrže hitne točke za zaustavljanje. U dijelu tunela u Sedrunu, koji pokriva geološko područje Tavetsch Intermediate Massif North, inženjeri su se suočili s izazovnim uvjetima iskopavanja zbog različitih tipova stijena, uključujući kakiritne i kataklastične formacije koje se izmjenjuju s tvrdim škriljastim gnajsom. Ove stijene imaju tendenciju velikih deformacija. Također, u dijelu Faido, sjevernom dijelu tunela, naišli su na kontaktno područje između gnajsa Leventina i Lucomagno, pod ekstremno debelim prekrivačem koji prelazi 2.000 metara [31, 32].

Ovi izazovni uvjeti čine Gotthard tunel savršenim primjerom za primjenu Vrakas i Anagnostou metode koja pomaže u razumijevanju i prevladavanju složenih geotehničkih problema u tuneliranju.

### 8.1.1. Deterministička analiza

Deterministička analiza podrazumijeva da su sve ulazne varijable (poput in-situ naprezanja i parametara čvrstoće stijene) precizno poznate. Ova metoda generira jedinstveno rješenje za sve izlazne podatke, uključujući: karakterističnu krivulju stijenske mase, radijus plastične zone, ravnotežni podgradni pritisak i faktor sigurnosti za podgradu.

U slučaju kada je faktor sigurnosti veći od jedan, kao što je prikazano na slici 18., on se definira kao omjer maksimalnog podgradnog pritiska i ravnotežnog pritiska. Ravnotežni pritisak predstavlja pritisak u točki presjeka karakteristične krivulje stijenske mase i krivulje reakcije podgrade.

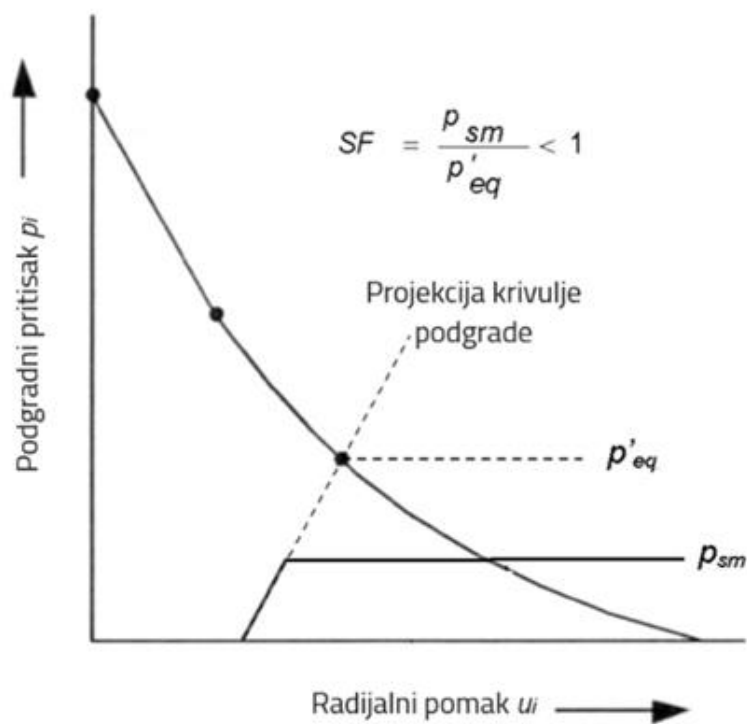


Slika 18.: Definicija faktora sigurnosti kada je veći od 1 (Izvor: [30])



---

S druge strane, ako je faktor sigurnosti manji od jedan, to može značiti da je karakteristična krivulja stijenske mase presjekla krivulju reakcije podgrade nakon što je premašena elastična granica podgrade, kao što je prikazano na slici 19.



Slika 19.: Definicija faktora sigurnosti kada je manji od 1 (Izvor: [23])

### 8.1.2. Parametri

Korišteni parametri odgovaraju materijalnim karakteristikama dionice Sedrun, tunela Gotthard i prikazani su u tablici 1.

Tablica 1.: Ulazni parametri

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Youngov modul E	2000.0 MPa
Početno naprezanje $\sigma_0$	22.5 MPa
Kohezija c	0.25 MPa
Poissonov koeficijent $\nu$	0.25
Kut trenja $\varphi$	23°
Kut dilatacije $\psi$	3°
Radijus tunela r	5.0 m

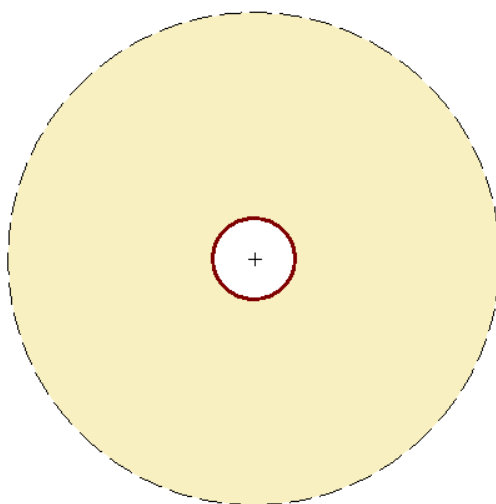
### 8.1.3. Rezultati

Tablica 2.: Rezultati proračuna karakteristične krivulje stijenske mase bez podgrade

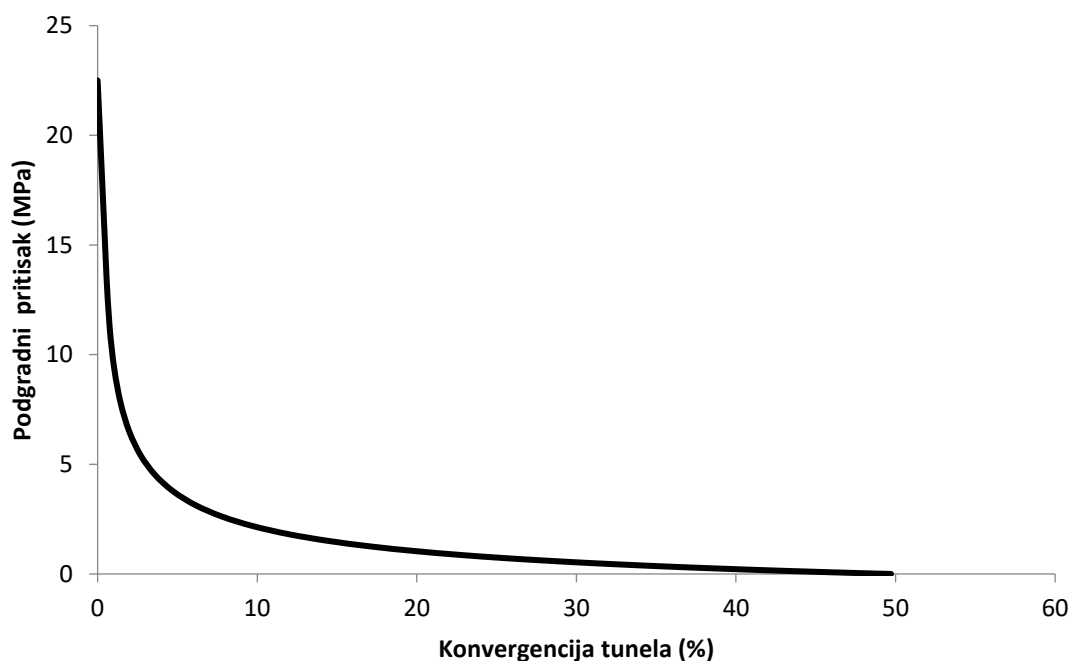
PARAMETAR	VRIJEDNOST
Radijus plastične zone $\rho_1$	29.85 m
Pomak zidova tunela $u_a$	2485.69 m
Pomak zidova tunela na ulazu u tunel $u_{\rho_1}$	338.44 mm
Konvergencija tunela U	49.71 %
Kritični podgradni pritisak $\sigma_{\rho_1}$	13.48 MPa
Jednoosna tlačna čvrstoća $\sigma_D$	0.76 MPa

---

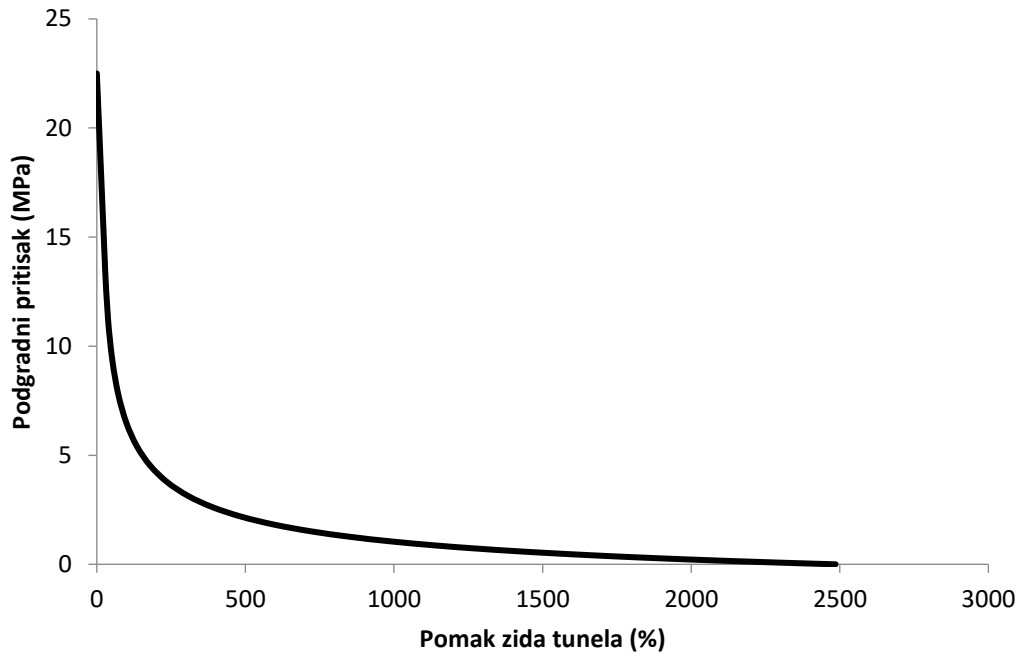
Na slici 20. koja je rezultat proračuna softvera RocSupport, grafički je prikazan tunel. Crvena kružnica označava granicu iskopa tj. tunel s pripadnim radijusom od 5 m, dok je žutom bojom prikazana zona plastifikacije čiji je radijus 29.85 m. Na slici 21. prikazan je graf ovisnosti podgradnog pritiska  $\sigma_a$  i konvergencije tunela  $U$ . Konvergencija u ovom slučaju iznosi 49.71%.



Slika 20.: Grafički prikaz plastične zone



Slika 21.: Karakteristična krivulja stijenske mase



Slika 22.: Prikaz ovisnosti podgradnog pritiska i pomaka zida tunela

Na slici 22. prikazan je graf ovisnosti podgradnog pritiska  $\sigma_a$  i pomaka zidova tunela  $u_a$ . Pomak zida tunela u ovom slučaju iznosi 2485.69 mm, dok na samom ulazu u tunnel on iznosi 338.44 mm.

Svi dobijeni parametri u softveru RocSupport mogu se provjeriti analitičkim proračunom što će i biti prikazano u nastavku.

#### 8.1.4. Analitički proračun – provjera rezultata

$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{1 + \sin 23^\circ}{1 - \sin 23^\circ} = 2.28$$

Jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_D$

$$\sigma_D = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{2 \cdot 0.25 \cdot \cos 23^\circ}{1 - \sin 23^\circ} = 0.76 \text{ MPa}$$

Kritični podgradni pritisak  $\sigma_{\rho 1}$

$$\sigma_{\rho 1} = \frac{2\sigma_0 - \sigma_D}{m + 1} = \frac{2 \cdot 22.5 - 0.76}{2.28 + 1} = 13.48 \text{ MPa}$$

### Radijus plastične zone $\rho_1$

$$\begin{aligned}r_{\rho_1} &= (a_0 - u_a) \left(1 + (m - 1) \frac{\sigma_{\rho_1}}{\sigma_D}\right)^{\frac{1}{m-1}} = \\&= (5000 - 2485.69) \left(1 + (2.28 - 1) \frac{13.48}{0.76}\right)^{\frac{1}{2.28-1}} \\&= 29818.53 \text{ mm} \approx 29.82 \text{ m}\end{aligned}$$

### Pomak zidova tunela na ulazu u tunel $u_{\rho_1}$

$$u_{\rho_1} = (1 + \nu) \cdot (\widetilde{\sigma}_0 - \widetilde{\sigma}_{\rho_1}) \cdot \rho_1 = (1 + 0.25) \cdot (23.09 - 14.07) \cdot 29.85 = 336.56 \text{ mm}$$

$$\widetilde{\sigma}_0 = \sigma_0 + \frac{\sigma_D}{m-1} = 22.5 + \frac{0.76}{2.28-1} = 23.09 \text{ MPa}$$

$$\widetilde{\sigma}_{\rho_1} = \sigma_{\rho_1} + \frac{\sigma_D}{m-1} = 13.48 + \frac{0.76}{2.28-1} = 14.07 \text{ MPa}$$

### Konvergenција tunela U

$$U = \frac{u_a}{a_0} = 1 - \left[T_{01} + \left(\frac{\delta}{\Omega_{01}}\right) \cdot f_i(1, R_1)\right]^{\frac{-1}{\kappa+1}} = 1 - \left[189.01 + \left(\frac{1.65}{1.01}\right) \cdot (-113.05)\right]^{\frac{-1}{1.11+1}}$$

$$U = 0.5 = 50 \%$$

$$T_{01} = \left[1 + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\rho_1}}{\frac{E}{1+\nu}}\right]^{\kappa+1} \cdot R_1^\delta = \left[1 + \frac{22.5 - 13.48}{\frac{2000}{1+0.25}}\right]^{1.11+1} \cdot 23.8^{1.65} = 189.01$$

$$\kappa = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} = \frac{1 + \sin 3^\circ}{1 - \sin 3^\circ} = 1.11$$

$$R_1 = \frac{\widetilde{\sigma}_{\rho_1}}{\widetilde{\sigma}_a} = \frac{14.07}{0.59} = 23.8$$

$$\delta = \frac{\kappa + 1}{(m - 1)} = \frac{1.11}{(2.28 - 1)} = 1.65$$

$$\Omega_{01} = \exp[(\omega_{11} + \omega_{21})\widetilde{\sigma}_0] = \exp[(0.0003 + 0.0004) \cdot 23.09] = 1.01$$

$$\omega_{11} = \frac{1 + \nu}{E} [1 - \nu(\kappa + 1)] = \frac{1 + 0.25}{2000} [1 - 0.25(1.11 + 1)] = 0.0003$$

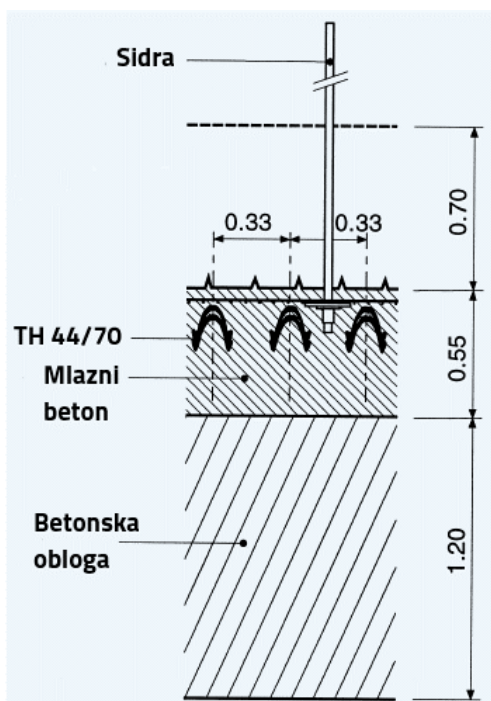
$$\omega_{21} = \frac{1 + \nu}{E} [\kappa - (1 - \nu) - \nu] = \frac{1 + 0.25}{2000} [1.11 - (1 - 0.25) - 0.25] = 0.0004$$

$$f_i(1, R_1) = -113.05$$

---

## 9. PRIMJER ODREĐIVANJA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE S PODGRADOM

Primarni podgradni sustav Gotthard tunela prikazan na slici 24., čine čelični lukovi TH 44/70, sidra duljine 12 m i mlazni beton u debljini od 0.55 m.



Slika 23.: Podgradni sustav tunela Gotthard

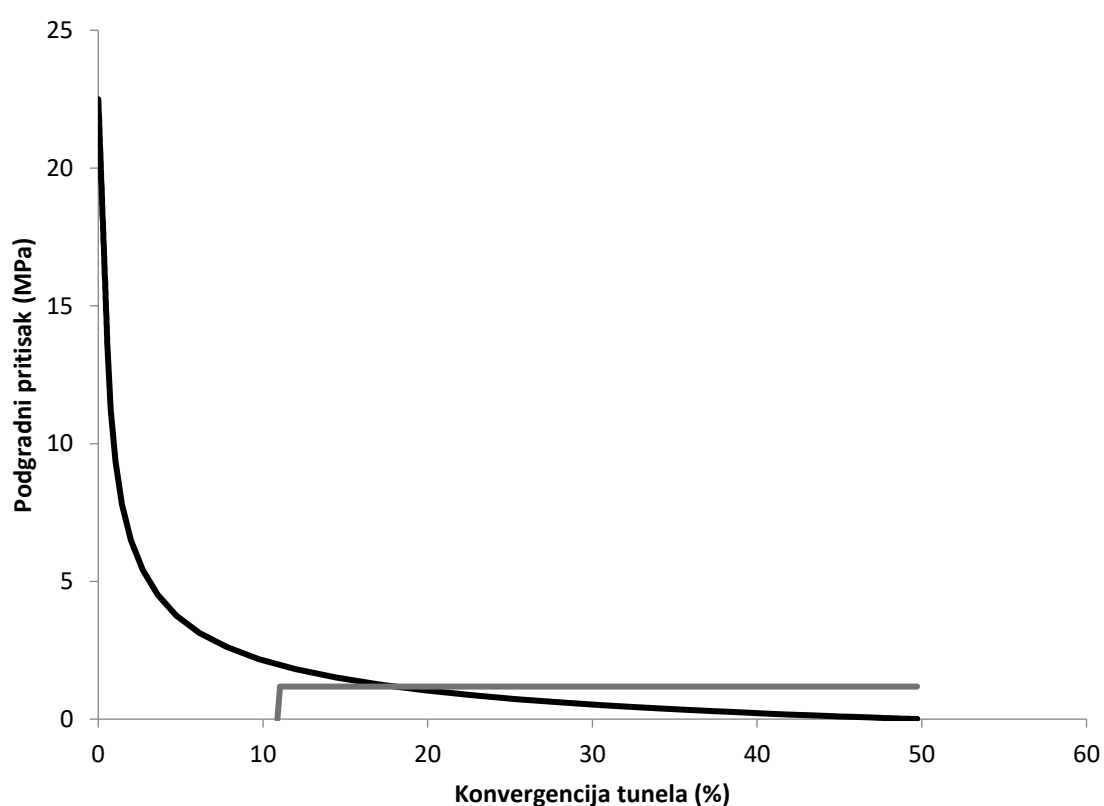
### 9.1. Parametri i rezultati

Korištene materijalne karakteristike u softveru prikazane su u tablicama u nastavku.

Prvo su postavljeni čelični lukovi TH 44/70 na razmaku od 33 cm. Njihovom ugradnjom, konvergencija se smanjila s gotovo 50 % na 18 % (slika 25.), no faktor sigurnosti je manji od 1 i iznosi 0.61. Na slici 24. crnom bojom prikazana je karakteristična krivulja stijenske mase i sivom bojom krivulja podgrade.

Tablica 3.: Karakteristike čeličnih lukova TH 44/70

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Površina poprečnog presjeka	5570 mm <sup>2</sup>
Granica elastičnosti	350 MPa
Youngov modul	207000 MPa
Težina	97 kg/m

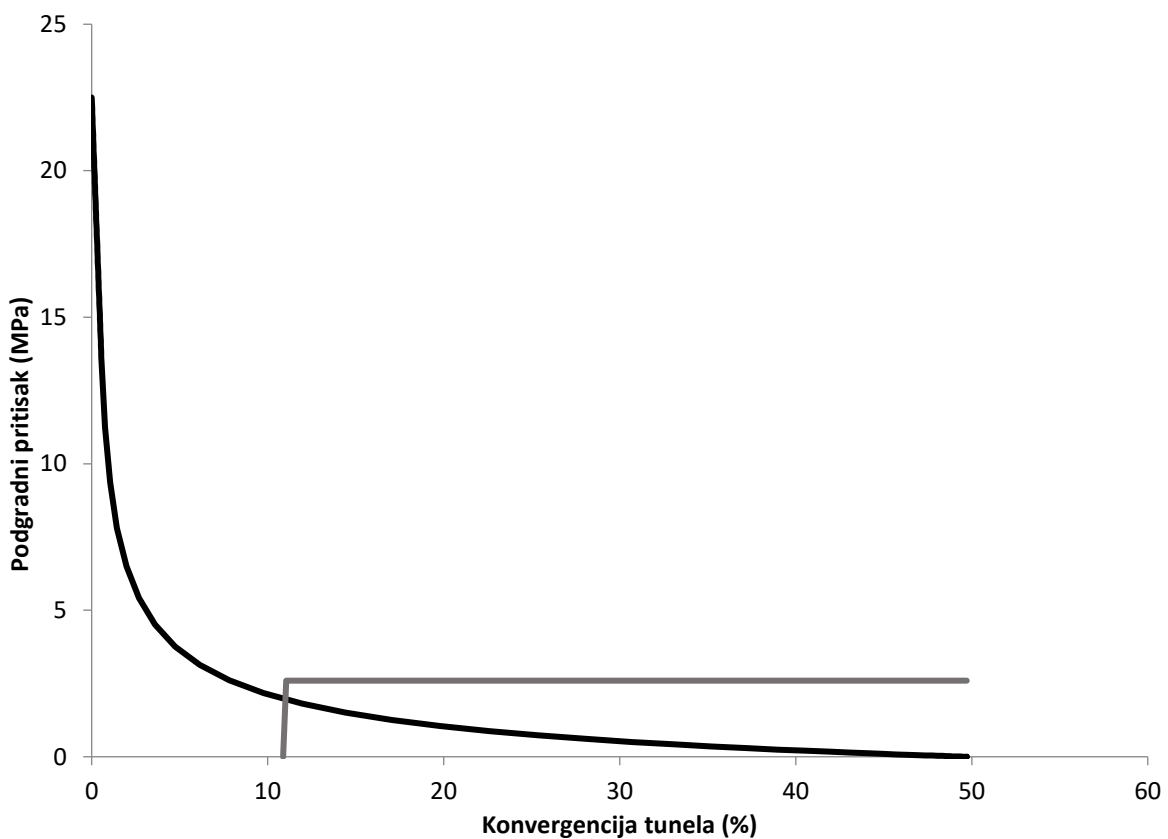


Slika 24.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima

Nakon čeličnih lukova ugrađena su sidra promjera 34 mm, duljine 12 m na razmaku od 0.5 m. Njihovom ugradnjom konvergencija je smanjena na 11 %, faktor sigurnosti je sada veći od 1 i iznosi 1.33. Na slici 25. crnom bojom prikazana je karakteristična krivulja stijenske mase i sivom bojom krivulja podgrade u slučaju kada su kao elementi primarnog podgradnog sustava ugrađeni čelični lukovi i sidra.

Tablica 4.: Karakteristike sidara

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Promjer	34 mm
Nosivost	0.354 MN
Youngov modul	207000 MPa
Težina	97 kg/m



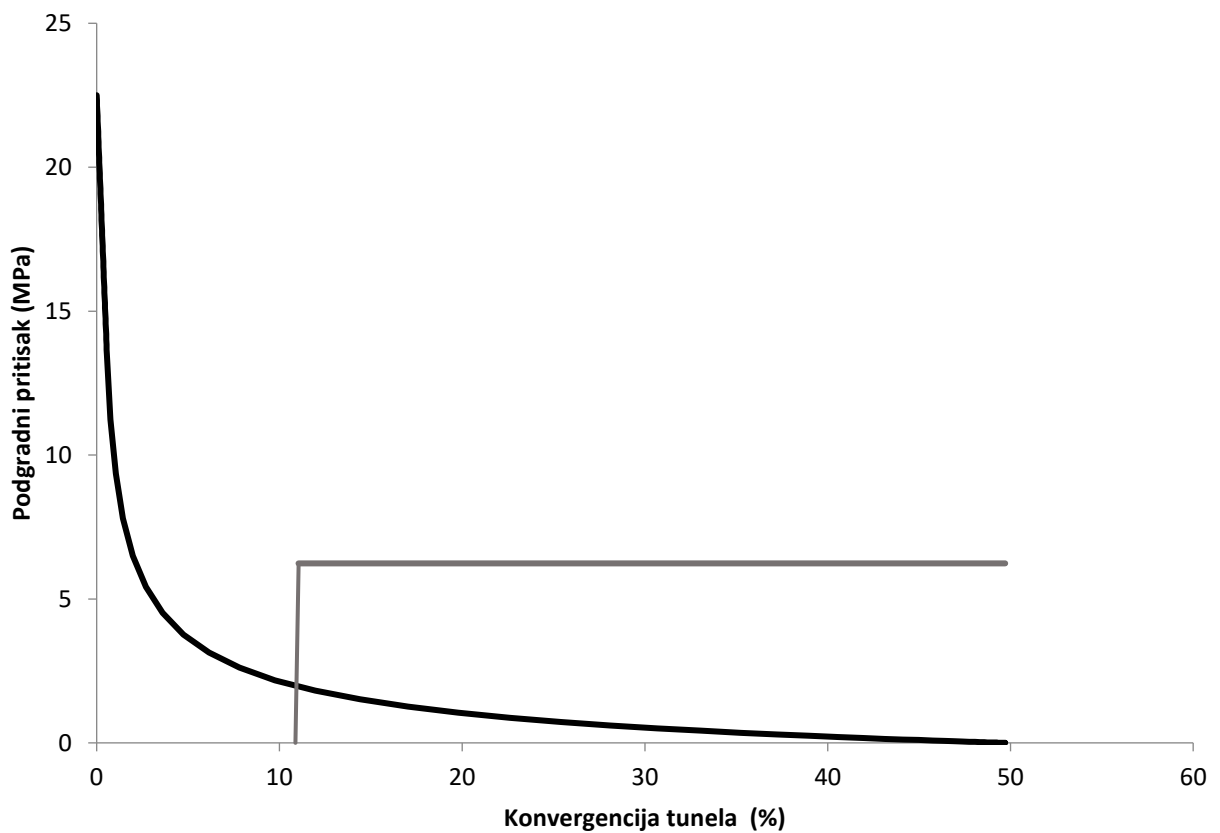
Slika 25.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima i sidrima

Kao posljednji element primarnog podgradnog sustava tunela Gotthard, ugrađen je mlazni beton u debljini od 0.55 m. Njegovom ugradnjom konvergenција se još nešto malo smanjila na 10.93 %, no faktor sigurnosti se značajno povećao na 3.16. Na slici 26. crnom bojom prikazana je karakteristična krivulja stijenske mase i crvenom bojom krivulja podgrade u slučaju kada su svi elementi primarnog podgradnog sustava ugrađeni čelični lukovi, sidra i mlazni beton.



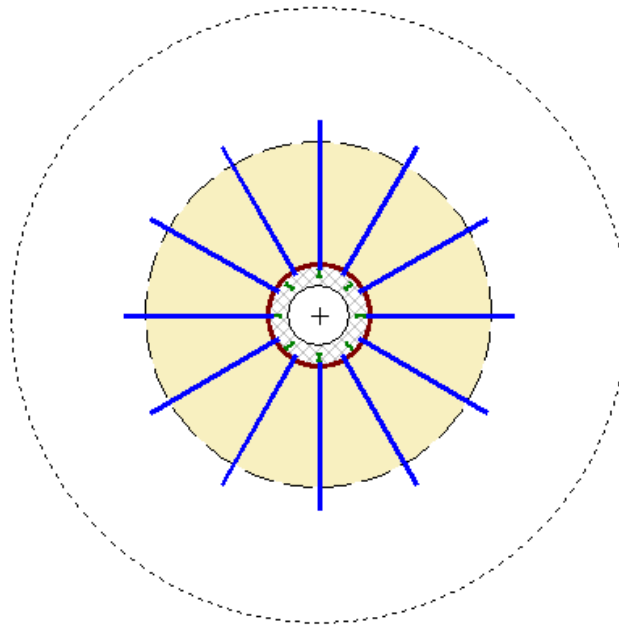
Tablica 5.: Karakteristike mlaznog betona

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Debljina	550 mm
Jednoosna tlačna čvrstoća	35 MPa
Youngov modul	30000 MPa
Poissonov koeficijent	0.2



Slika 26.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima, sidrima i mlaznim betonom

Ostali rezultati proračuna prikazani su na slici 27. i u tablici 6. Radijus plastične zone s prvobitnih 29.85 smanjio se na 16.81 m, a pomak zidova tunela je sad 546.66 mm.



Slika 27.: Grafički prikaz plastične zone nakon ugrađenog primarnog podgradnog sustava

Tablica 6.: Rezultati proračuna karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

PARAMETAR	VRIJEDNOST
Radijus plastične zone $\rho_2$	16.81 m
Pomak zidova tunela $u_a$	546.44 m
Pomak zidova tunela na ulazu u tunel $u_{\rho_1}$	338.44 mm
Konvergencija tunela U	10.93 %
Podgradni pritisak $\sigma_{\rho_2}$	7.31 MPa
Jednoosna tlačna čvrstoća $\sigma_D$	0.76 MPa
Faktor sigurnosti	3.16

## 9.2. Analitički proračun – provjera rezultata

$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{1 + \sin 23^\circ}{1 - \sin 23^\circ} = 2.28$$

Jednoosna tlačna čvrstoća  $\sigma_D$

$$\sigma_D = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{2 \cdot 0.25 \cdot \cos 23^\circ}{1 - \sin 23^\circ} = 0.76 \text{ MPa}$$

Podgradni pritisak  $\sigma_{\rho 2}$

$$\sigma_{\rho 2} = \frac{(1 - 2\nu)\sigma_0 - (1 - \nu)\sigma_D}{m - \nu(m + 1)} = \frac{(1 - 2 \cdot 0.25) \cdot 22.5 - (1 - 0.25) \cdot 0.76}{2.28 - 0.25 \cdot (2.28 + 1)} = 7.31 \text{ MPa}$$

Radius plastične zone  $\rho_2$

$$r_{\rho_2} = (a_0 - u_a) \left( \frac{\sigma_{\rho 1} + \frac{\sigma_D}{m-1}}{\sigma_a + \frac{\sigma_D}{m-1}} \right)^{\frac{1}{m-1}} = (5000 - 546.44) \left( \frac{13.48 + \frac{0.76}{2.28-1}}{1.97 + \frac{0.76}{2.28-1}} \right)^{\frac{1}{2.28-1}}$$

$$r_{\rho_2} = 16844.9 = 16.8 \text{ m}$$

Konvergencija tunela U

$$U = \frac{u_a}{a_0} = 1 - \left[ T_{02} + \left( \frac{\delta}{\Omega_{02}} \right) \cdot f_i(1, R_2) \right]^{\frac{-1}{k+1}} = 1 - \left[ 7.0 + \left( \frac{1.65}{1.01} \right) \cdot (-3.5) \right]^{\frac{-1}{1.11+1}}$$

$$U = 0.11 = 11 \%$$

$$T_{02} = T_{01} + \frac{\delta}{\Omega_{01}} f_i(R_2, R_1) = 17.36 + \frac{1.65}{1.01} \cdot (-6.4) = 7.0$$

$$T_{01} = \left[ 1 + \frac{\sigma_0 - \sigma_{\rho 1}}{E} \right]^{k+1} \cdot R_1^\delta = \left[ 1 + \frac{22.5 - 13.48}{2000} \right]^{1.11+1} \cdot 5.6^{1.65} = 17.36$$

$$R_1 = \frac{\widetilde{\sigma}_{\rho 1}}{\widetilde{\sigma}_a} = \frac{14.07}{2.5} = 5.6$$

$$R_2 = \frac{\widetilde{\sigma}_{\rho 2}}{\widetilde{\sigma}_a} = \frac{7.9}{2.5} = 3.16$$

$$\widetilde{\sigma}_{\rho 2} = \frac{1 - 2\nu}{m(1 - \nu) - \nu} \widetilde{\sigma}_0 = \frac{1 - 2 \cdot 0.25}{2.28 \cdot (1 - 0.25) - 0.25} \cdot 23.09 = 7.9 \text{ MPa}$$

$$\Omega_{02} = \exp[(\omega_{12} + \omega_{22})\widetilde{\sigma}_0] = \exp[(0.0002 + 0.0006) \cdot 23.09] = 1.01$$

---

$$\omega_{12} = \frac{1}{E} (1 - 2\nu\kappa) = \frac{1}{2000} (1 - 2 \cdot 0.25 \cdot 1.11) = 0.0002$$

$$\omega_{22} = \frac{2}{E} [\kappa(1 - \nu) - \nu] = \frac{2}{2000} [1.11 \cdot (1 - 0.25) - 0.25] = 0.0006$$

---

## 10. PARAMETARSKA ANALIZA UTJECAJA MLAZNOG BETONA, SIDARA I ČELIČNIH LUKOVA NA KARAKTERISTIČNE KRIVULJE STIJENSKE MASE I PODGRADE

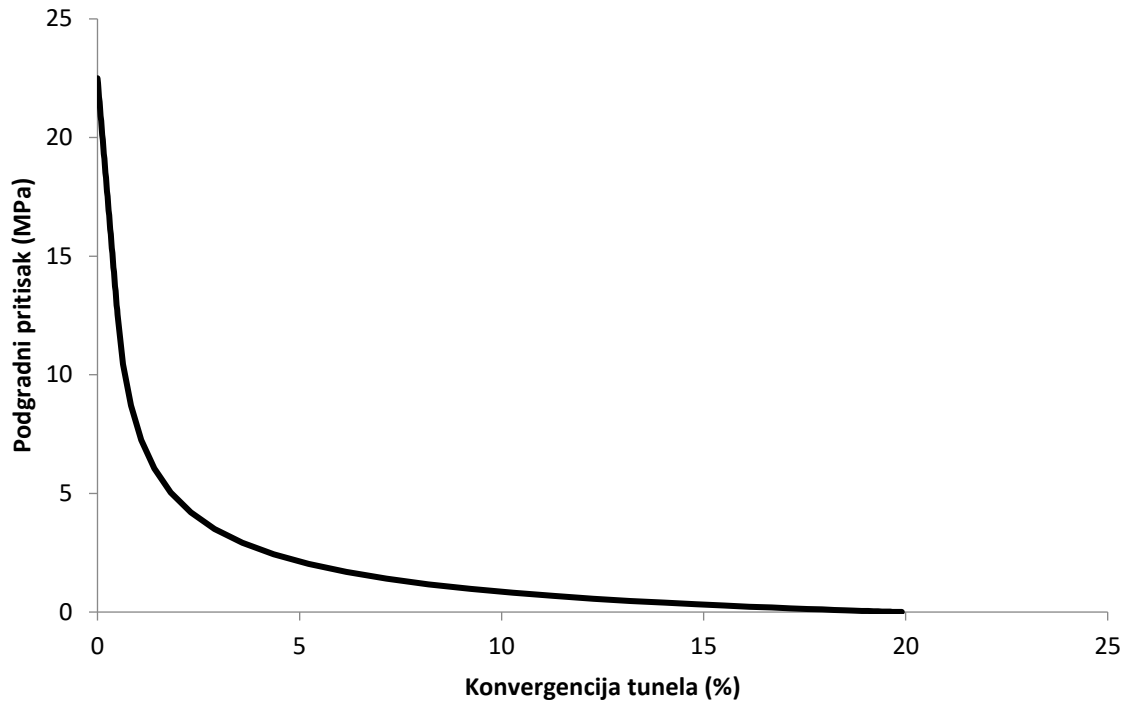
Parametarska analiza je postupak korišten u istraživanju s ciljem razumijevanja kako promjene određenih parametara unutar modela utječu na krajnji rezultat. Ovaj pristup omogućuje analizu osjetljivosti različitih ulaznih parametara te prepoznavanje ključnih varijabli koje značajno oblikuju ponašanje modela.

U nastavku je prikazana parametarska analiza s konstantnim parametrima stijenske mase u tunelu Gotthard. Također je prikazana analiza za stijensku masu s većom krutošću i čvrstoćom u odnosu na onu u tunelu Gotthard. U obje analize variraju parametri elemenata primarnog podgradnog sustava, odnosno mijenja se sila u sidru, razmak između sidara, debljina mlaznog betona, poprečni presjek čeličnih lukova te njihov razmak. U tablici 7. dati su parametri stijena.

Tablica 7.: Ulazni parametri stijene

PARAMETAR	VRIJEDNOST – tunel Gotthard	VRIJEDNOST – stijena veće krutosti i čvrstoće
Youngov modul $E$	2000.0 MPa	2500.0 MPa
Početno naprezanje $\sigma_0$	22.5 MPa	22.5 MPa
Kohezija $c$	0.25 MPa	0.5 MPa
Poissonov koeficijent $\nu$	0.25	0.25
Kut trenja $\varphi$	23°	25°
Kut dilatacije $\psi$	3°	3°

Na slici 21. prikazana je karakteristična krivulja stijenske mase tunela Gotthard, a na slici 28. karakteristična krivulja stijenske mase za stijenu veće krutosti i čvrstoće nego u tunelu Gotthard. Uočljivo je da je već pri samom povećanju čvrstoće i krutosti stijene konvergencija manja, iako je izložena istom početnom naprezanju.



**Slika 28.:** Karakteristična krivulja stijenske mase veće krutosti i čvrstoće

Tablica 8. prikazuje izlazne parametar stijene dobivene u softveru RocSupport. Vrijednosti parametara za stijenu veće krutosti i čvrstoće znatno su manji nego vrijednosti za stijenu tunela Gotthard.

**Tablica 8.:** Izlazni parametri stijene

PARAMETAR	VRIJEDNOST – tunel Gotthard	VRIJEDNOST – stijena veće krutosti i čvrstoće
Radius plastične zone	29.85 m	22.72 m
Pomak zidova tunela	2485.69 m	995.08 m
Pomak zidova tunela na čelu tunela	338.44 mm	167.76 mm
Konvergencija tunela	49.71 %	19.9 %
Kritični podgradni pritisak	13.48 MPa	12.54 MPa
Jednoosna tlačna čvrstoća	0.76 MPa	1.57 MPa

---

## 10.1. Utjecaj sidara na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

### 10.1.1. Tunel Gotthard

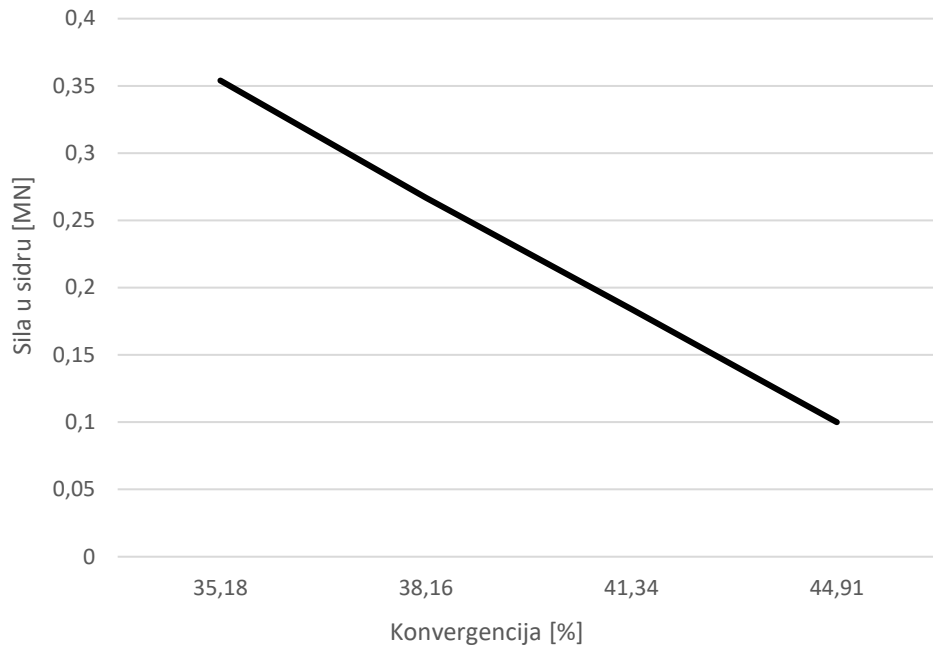
U tablici 9. i 10. navedene su karakteristike sidara koje variraju i dobiveni rezultati odnosno utjecaj variranih parametara na faktor sigurnosti, konvergenciju i podgradni pritisak.

Tablica 9.: Karakteristike sidara u stijenskoj masi tunela Gotthard

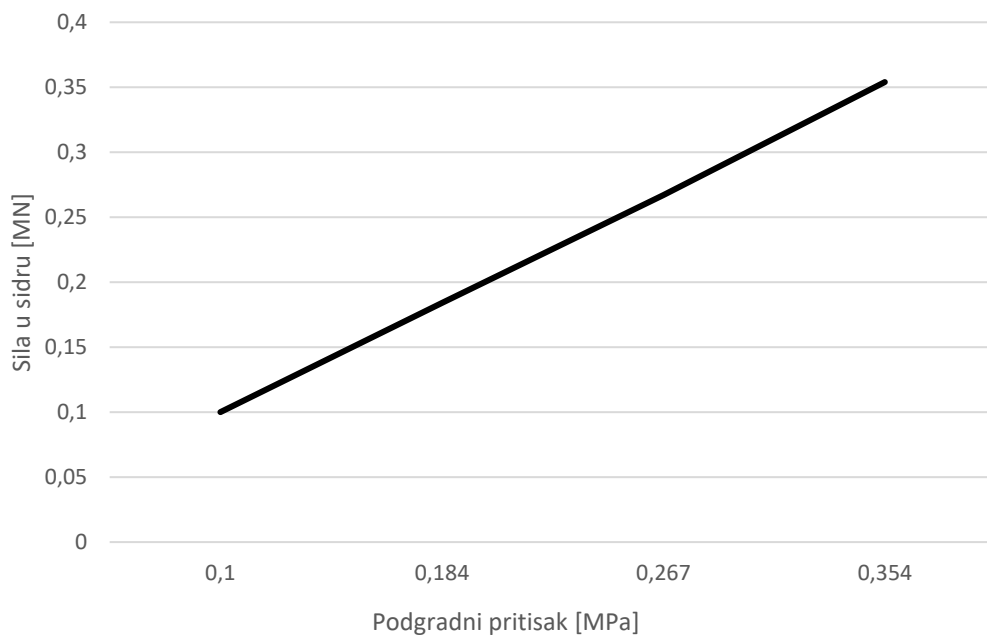
Promjer sidra [mm]	Sila u sidru [MN]	Fs	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
17	0.1	0.06	44.91	0.1
19	0.184	0.11	41.34	0.184
25	0.267	0.15	38.16	0.267
34	0.354	0.19	35.18	0.354

Tablica 10.: Razmaci između sidara u stijenskoj masi tunela Gotthard

Razmak između sidara [m]	Fs	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1.0	0.19	35.19	0.354
0.7	0.38	25.53	0.72
0.5	0.73	15.34	0.416
0.3	2.0	10.98	3.93

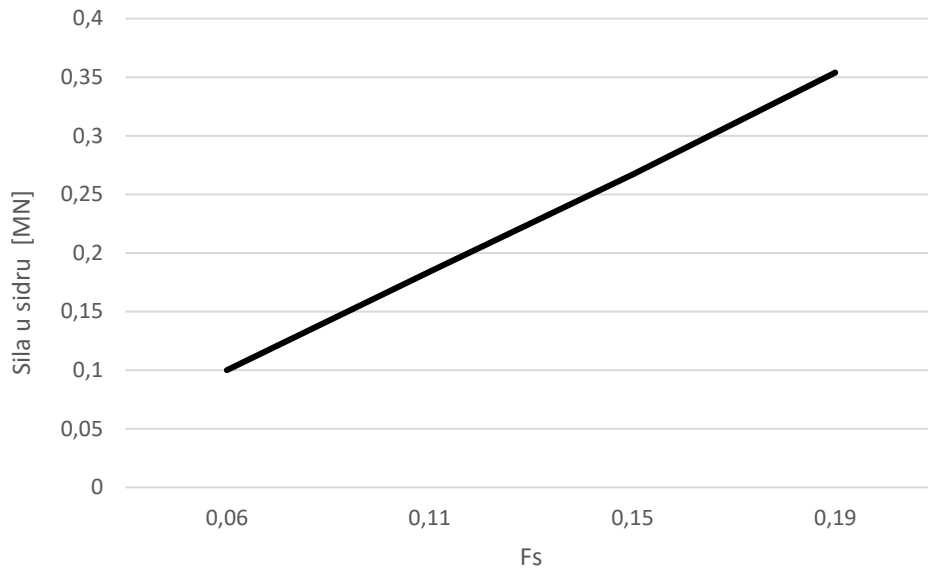


**Slika 29.:** Ovisnost sile u sidru i konvergencije

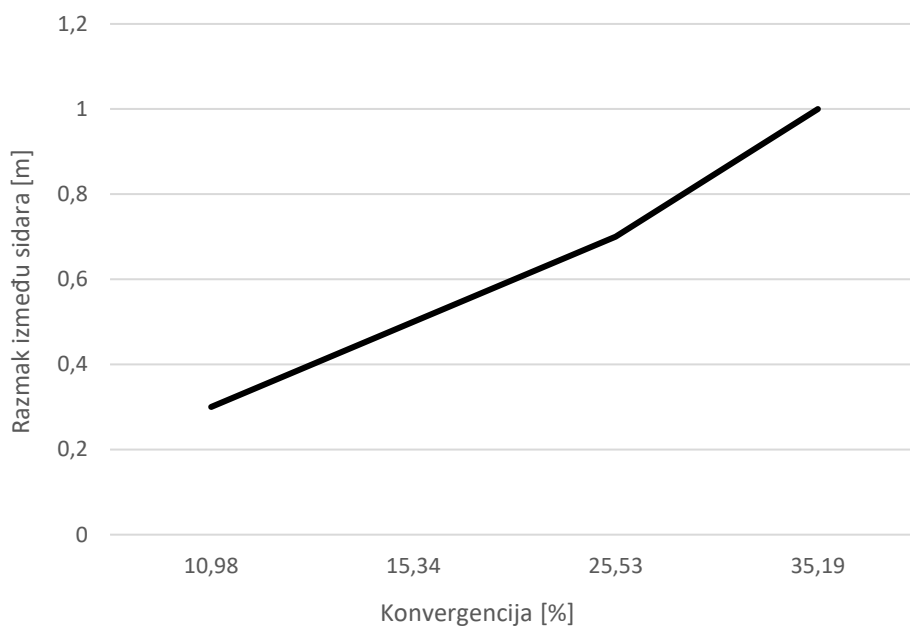


**Slika 30.:** Ovisnost sile u sidru i podgradnog pritiska

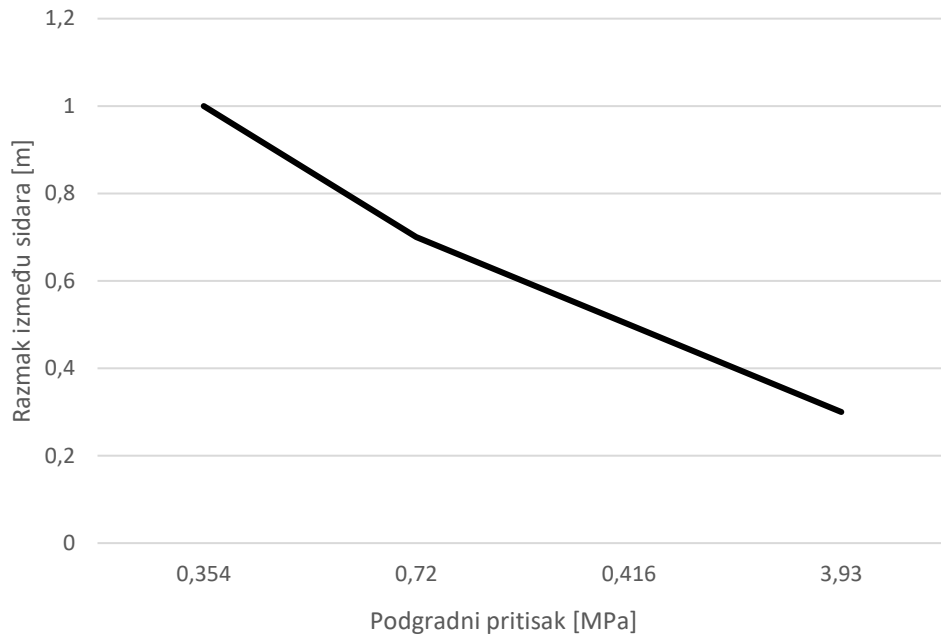




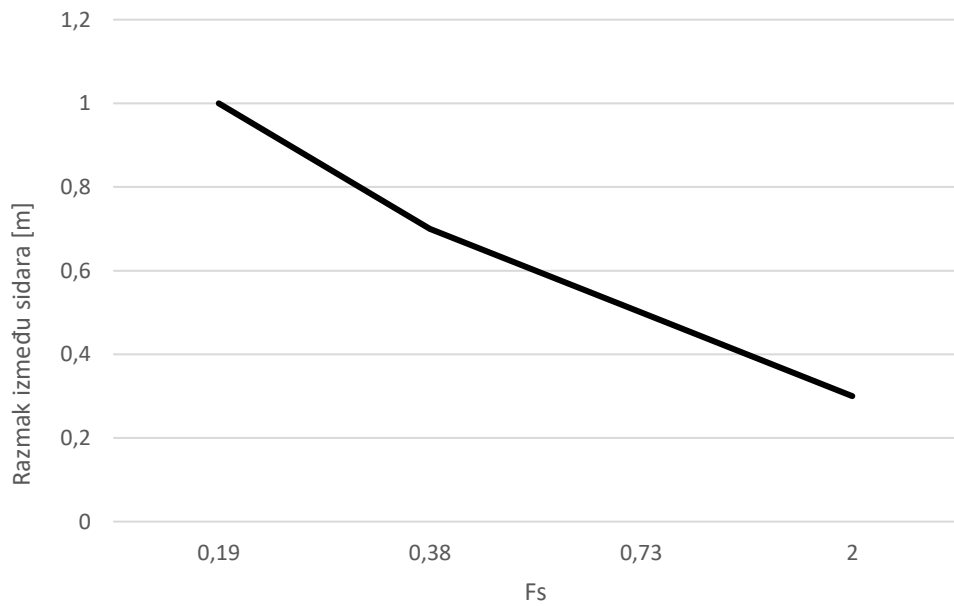
**Slika 31.:** Ovisnost sile u sidru i faktora sigurnosti



**Slika 32.:** Ovisnost razmaka između sidara i konvergencije



**Slika 33.:** Ovisnost razmaka sidara i podgradnog pritiska

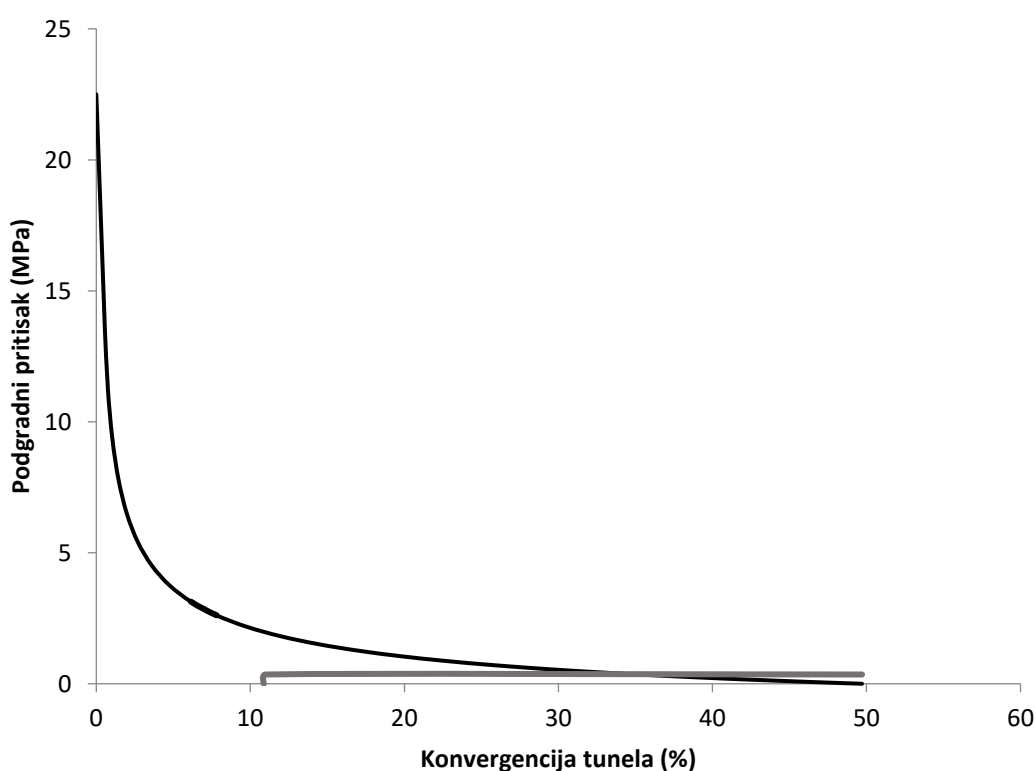


**Slika 34.:** Ovisnost razmaka sidara i faktora sigurnosti

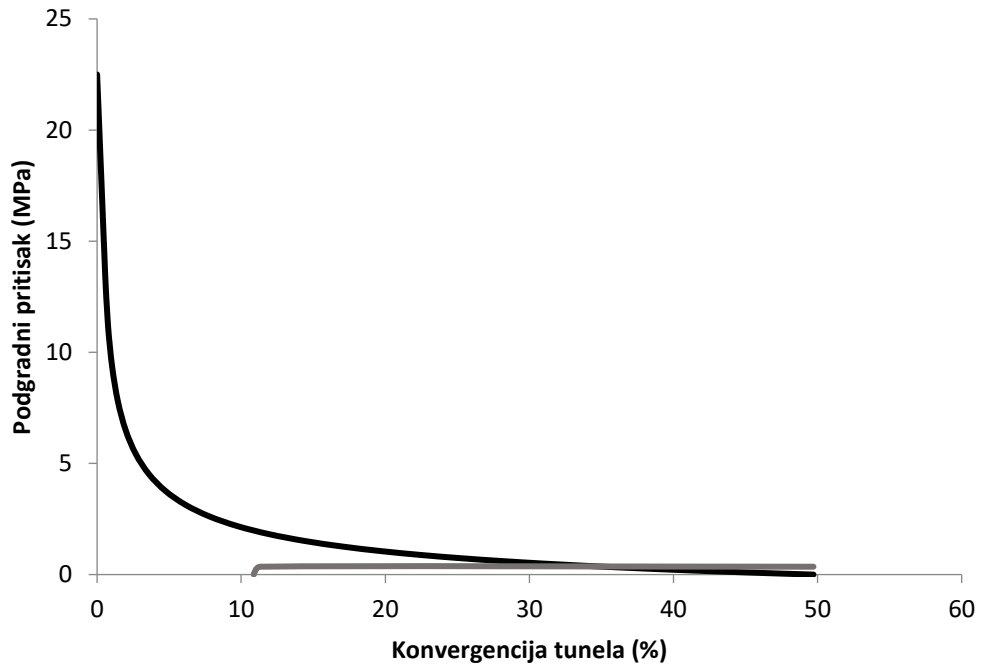
---

Iz prikazanih dijagrama na slikama 29., 30., 31., 32., 33. i 34. da se zaključiti da povećanjem promjera sidra samim time i sile u sidru faktor sigurnosti se povećava, odnosno konvergencija zidova tunela se umanjuje, dok se za smanjenje razmaka između sidara za svega nekoliko desetaka centimetara, konvergencija umanjuje za gotovo 10%, a podgradni pritisak povećava.

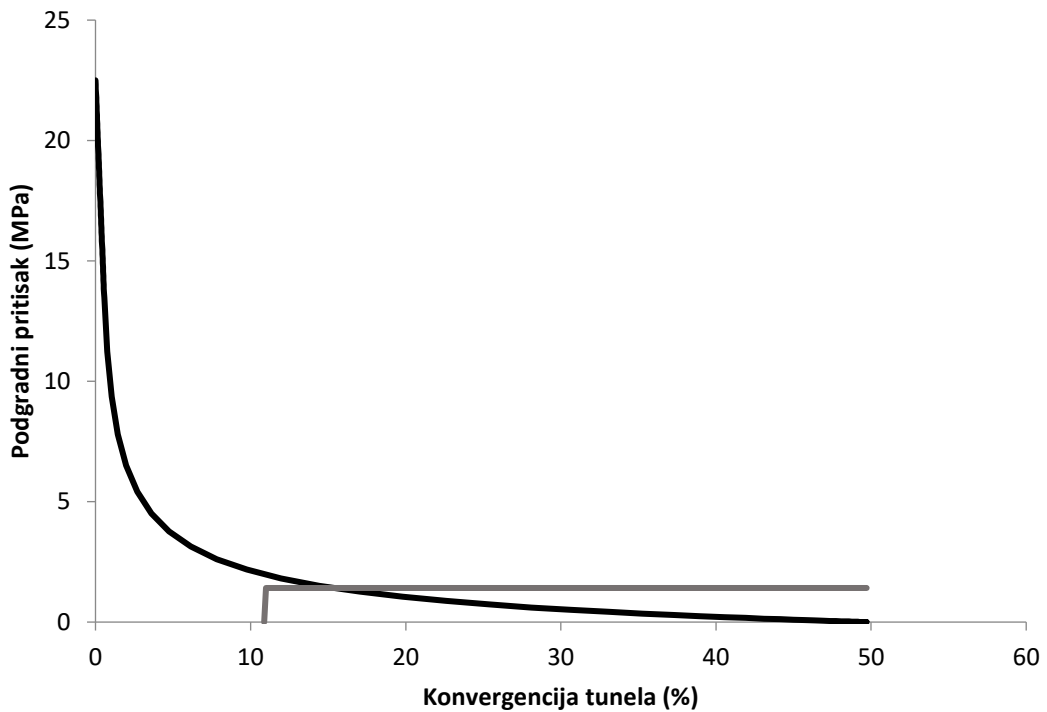
Da u ovom slučaju, zapravo puno veći utjecaj ima razmak između sidara nego sila u sidru i kako izgledaju karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za promjer od 34 mm i 17 mm te za razmak između sidara 1 m i 0.5 m prikazano je na slikama u nastavku.



**Slika 35.:** Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 1 m



Slika 36.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 17 mm i razmak između sidara 1 m



Slika 37.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 0.5 m

### 10.1.2. Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće

U tablici 11. i 12. navedene su karakteristike sidra koje variraju i dobiveni rezultati odnosno utjecaj variranih parametara na faktor sigurnosti, konvergenciju i podgradni pritisak.

**Tablica 11.:** Karakteristike sidara u stijenskoj masi veće krutosti i čvrstoće

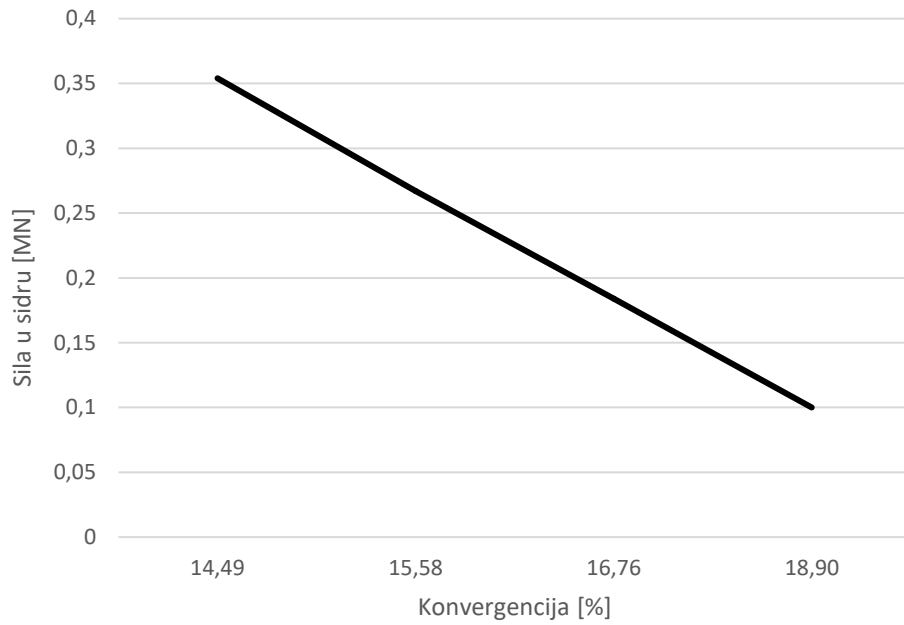
Promjer sidra [mm]	Sila u sidru [MN]	Fs	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
17	0.100	0.08	18.09	0.100
19	0.184	0.13	16.76	0.184
25	0.267	0.17	15.58	0.267
34	0.354	0.20	14.49	0.354

**Tablica 12.:** Razmaci između sidara u stijenskoj masi veće krutosti i čvrstoće

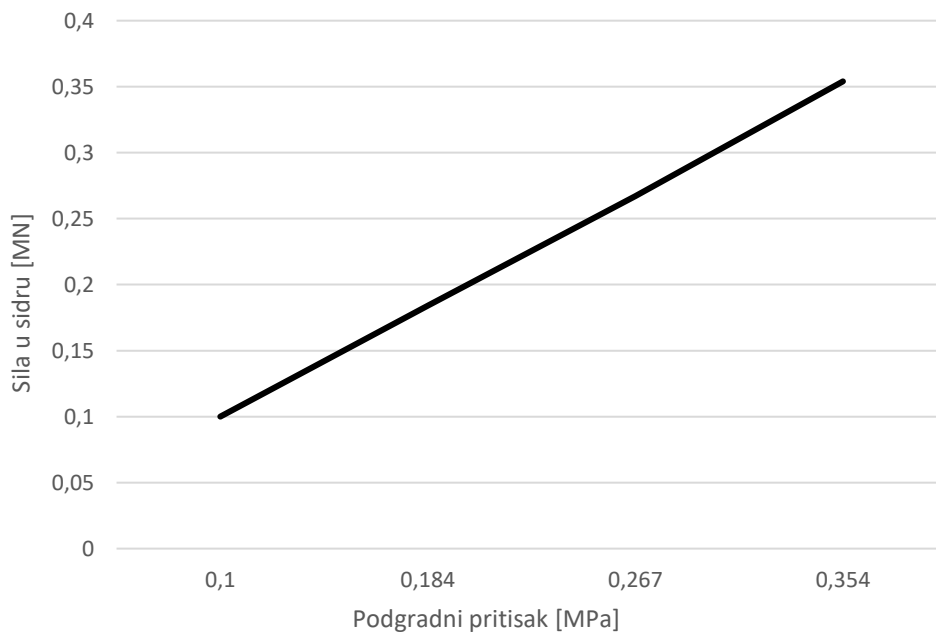
Razmak između sidara [m]	Fs	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1.0	0.20	14.49	0.354
0.7	0.41	10.95	0.722
0.5	0.76	7.12	1.416
0.3	2.05	5.50	3.933

Iz prikazanih dijagrama na slikama 38., 39., 40., 41., 42. i 43 da se zaključiti da povećanjem promjera sidra samim time i sile u sidru faktor sigurnosti se povećava, odnosno konvergencija zidova tunela se smanjuje, dok se za smanjenje razmaka između sidara za svega nekoliko desetaka centimetara, konvergencija značajno smanjuje, a podgradni pritisak povećava.

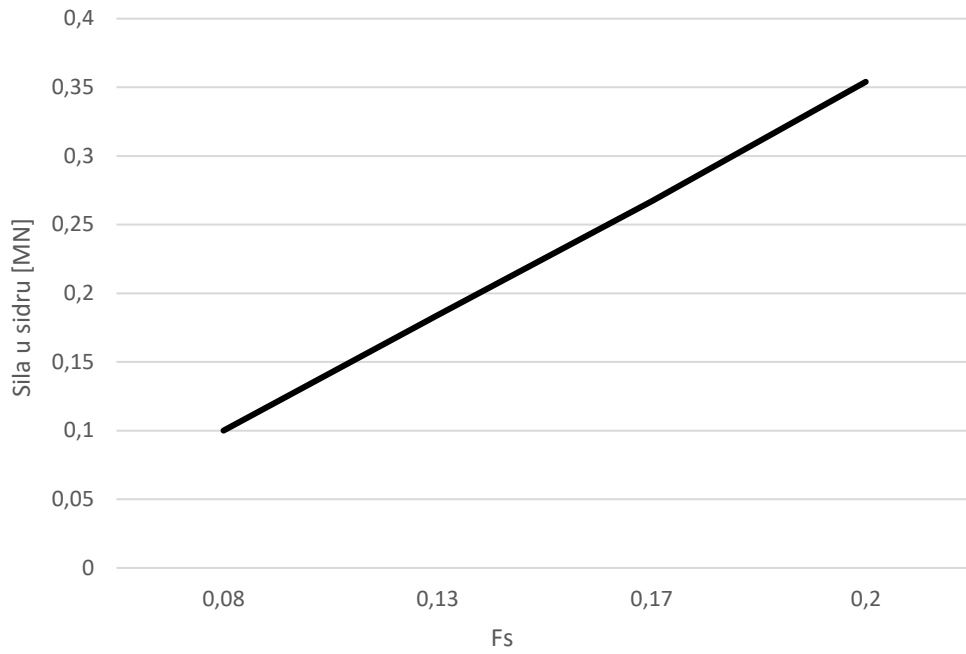
Da u ovom slučaju, zapravo puno veći utjecaj ima razmak između sidara nego sila u sidru i kako izgledaju karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za promjer od 34 mm i 17 mm te za razmak između sidara 1 m i 0.5 m prikazano je na slikama 44., 45. i 46.



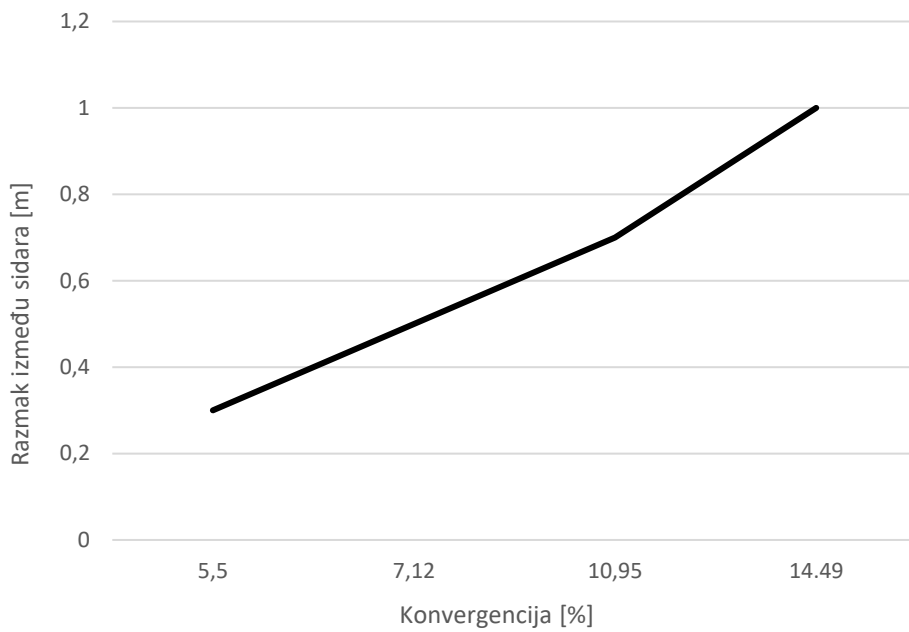
**Slika 38.:** Ovisnost sile u sidru i konvergencije



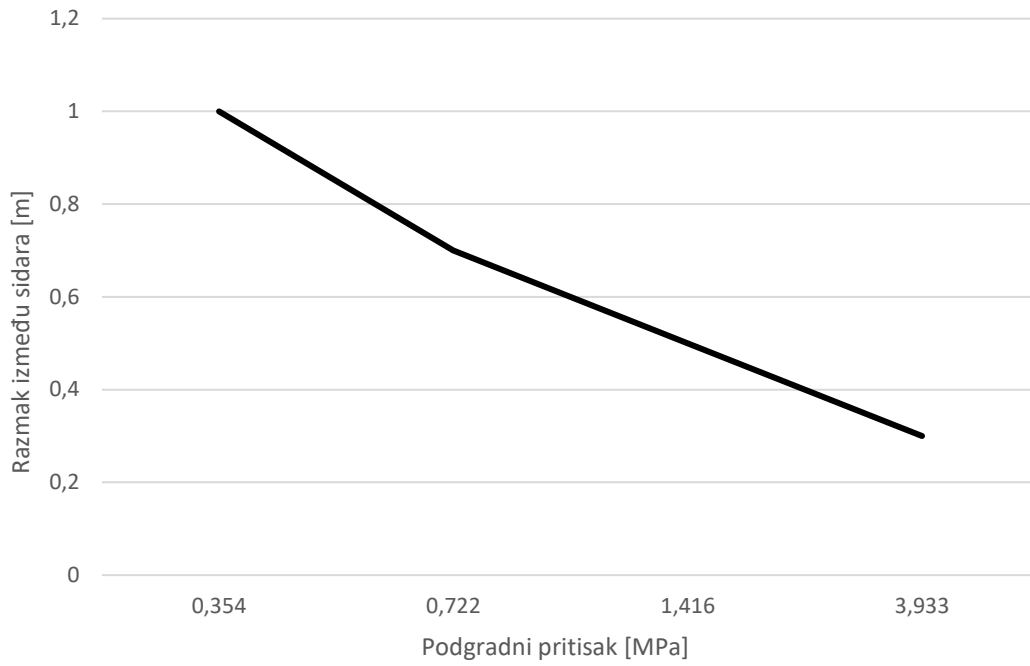
**Tablica 39.:** Ovisnost sile u sidru i podgradnog pritiska



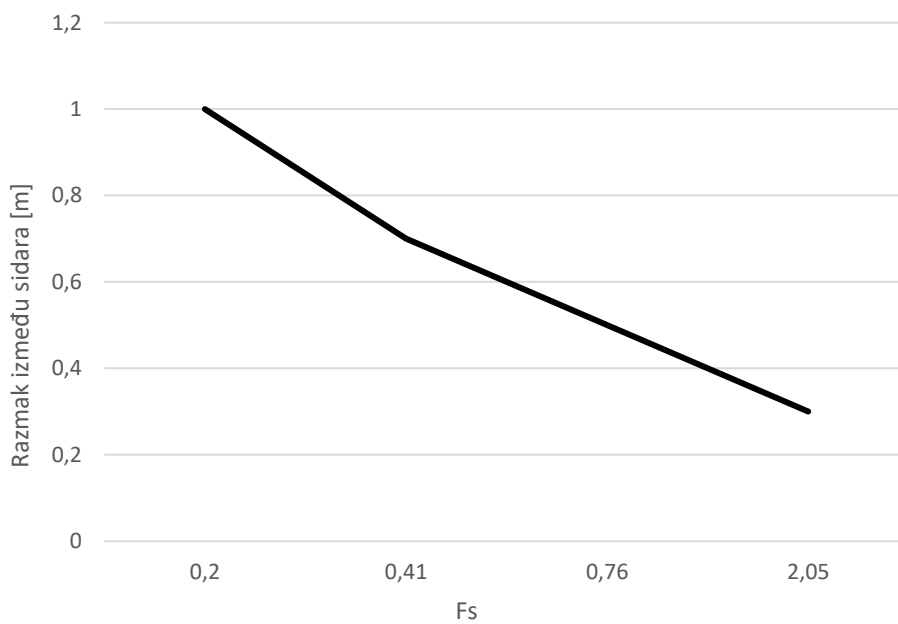
**Slika 40.:** Ovisnost sile u sidru i faktora sigurnosti



**Slika 41.:** Ovisnost razmaka između sidara konvergencije

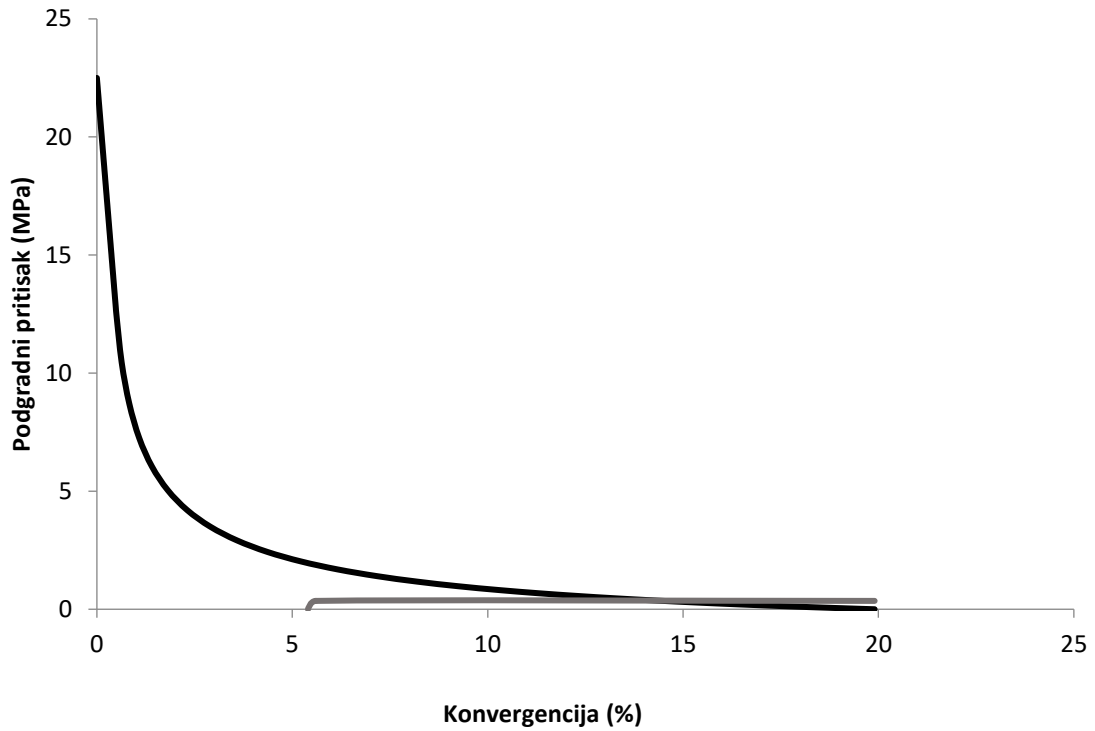


**Tablica 42.:** Ovisnost razmaka između sidara i podgradnog pritiska

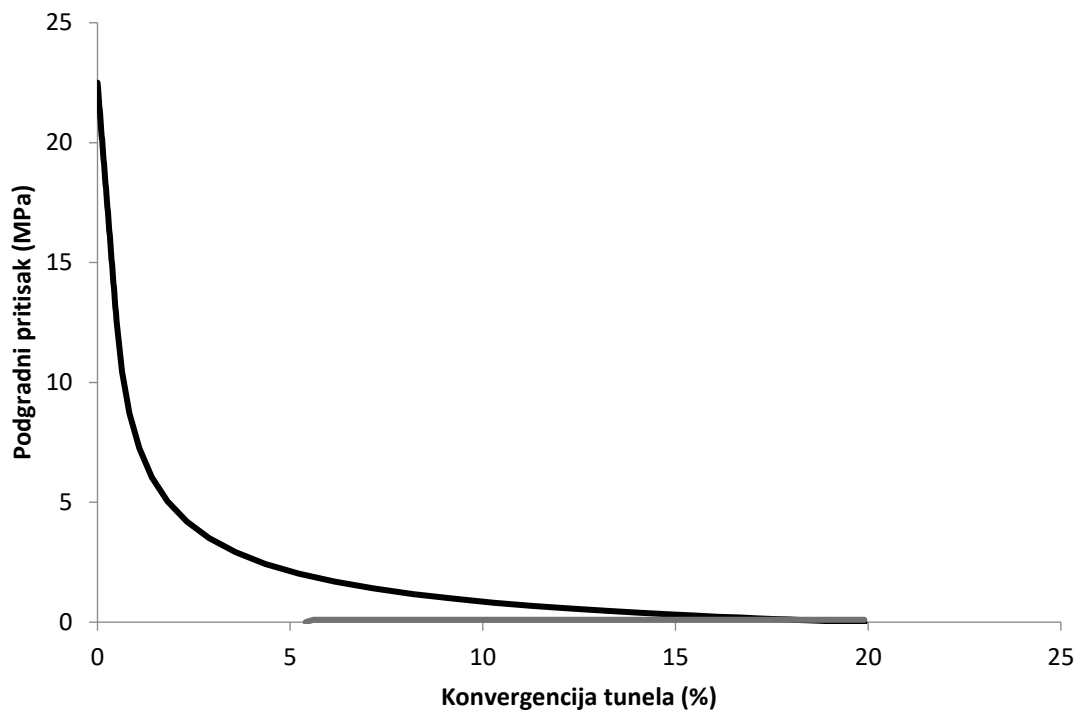


**Slika 43.** Ovisnost razmaka između sidara i faktora sigurnosti

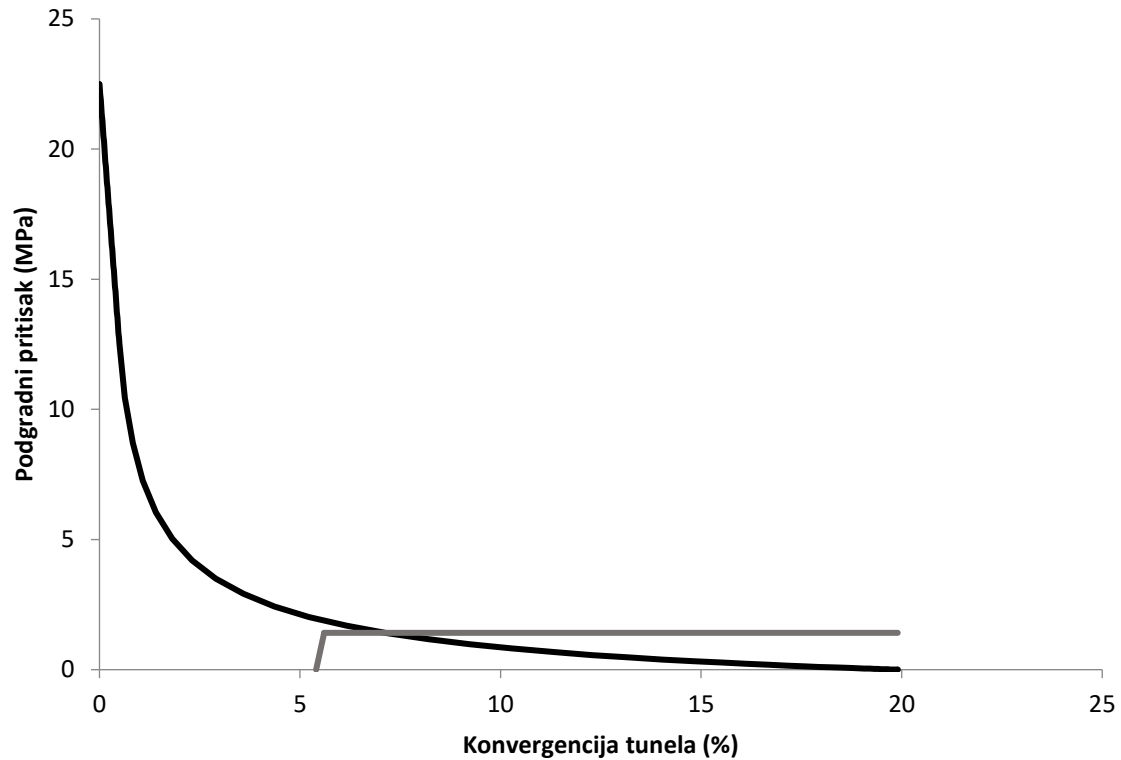




**Slika 44.:** Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 1 m



**Slika 45.:** Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 17 mm i razmak između sidara 1 m



Slika 46.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm I razmak između sidara 0.5 m

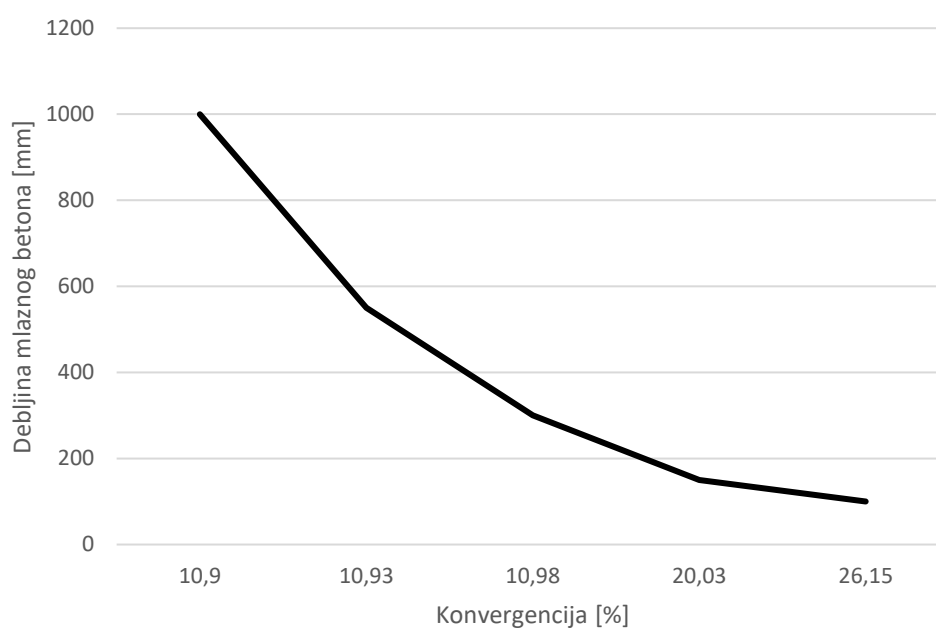
## 10.2. Utjecaj mlaznog betona na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

### 10.2.1. Tunel Gotthard

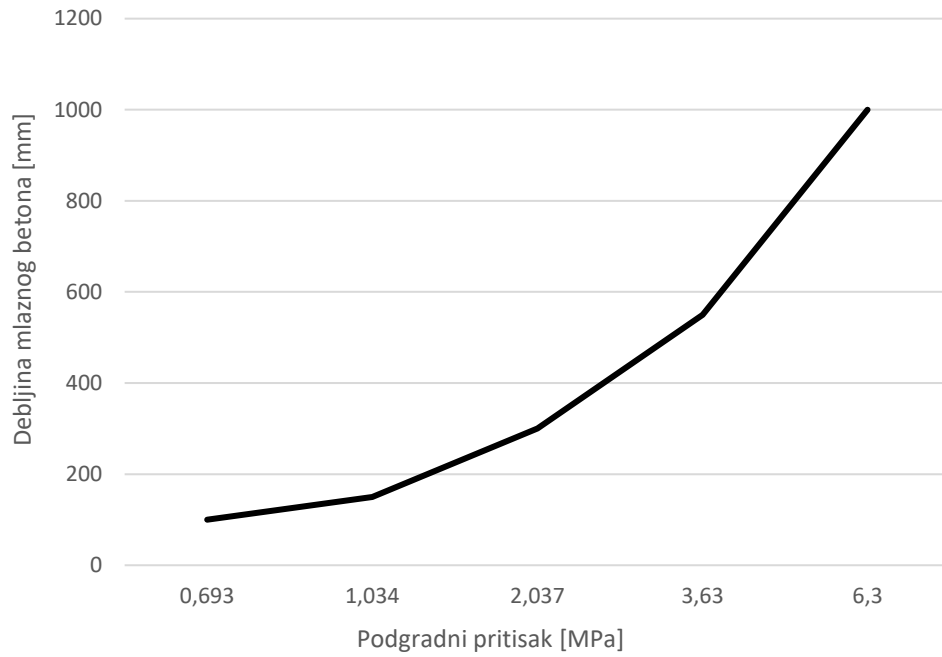
Karakteristika mlaznog betona koja se mijenja u analizi je njegova debljina (tablica 13.). Zaključak analize je da povećanjem debljine mlaznog betona se smanjuju konvergencije na zidovima tunela (slika 47.), dok podgradni pritisak raste (slika 48.), kao i faktor sigurnosti (slika 49.). Bitno je primjetiti da već samom ugradnjom i onog najtanjeg mlaznog betona u debljini od 100 mm konvergencija se smanjuje s gotovo 50 na 26 %. Prikazan je i izgled karakterističnih krivulja s tanjim i debljim slojem mlaznog betona (slika 50. i 51.).

Tablica 13.: Debljina mlaznog betona u tunelu Gotthard

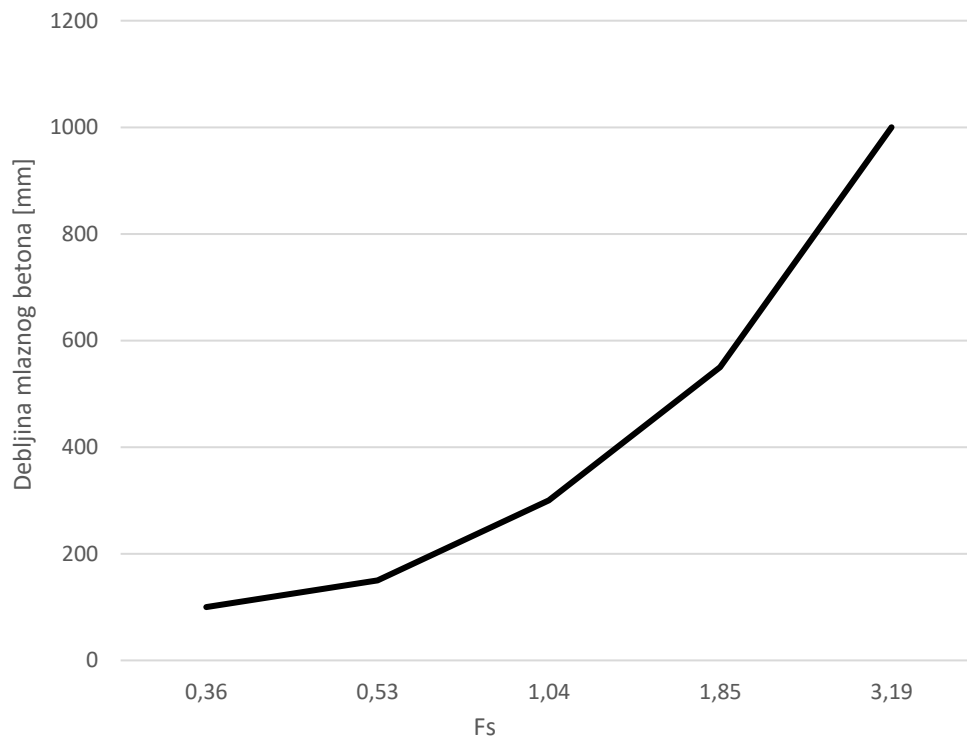
Debljina mlaznog betona [mm]	F <sub>s</sub>	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1000	3.19	10.9	6.3
550	1.85	10.93	3.63
300	1.04	10.98	2.037
150	0.53	20.03	1.034
100	0.36	26.15	0.693



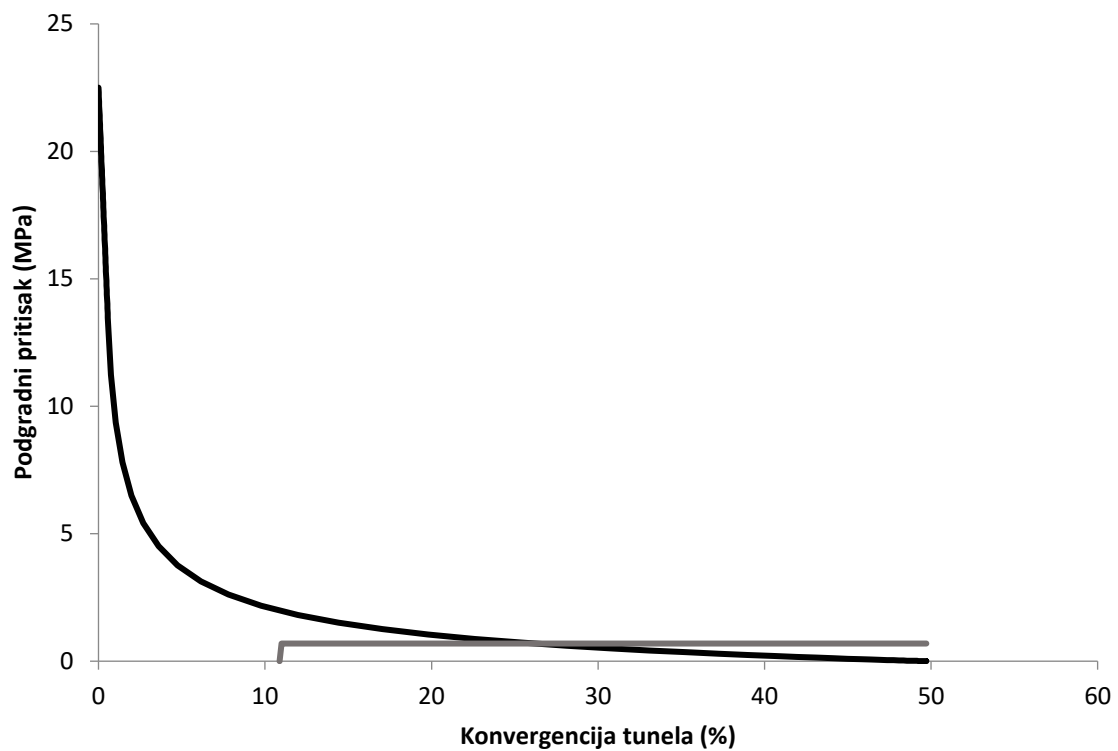
Slika 47.: Ovisnost debljine mlaznog betona i konvergencije



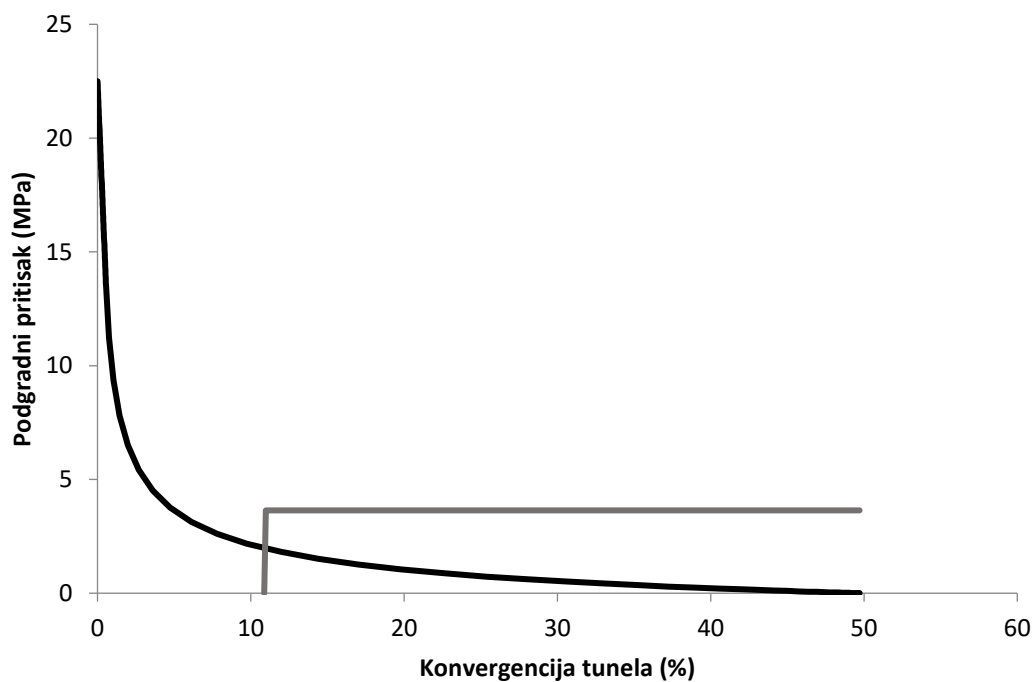
**Slika 48.:** Ovisnost debljine mlaznog betona i podgradnog pritiska



**Slika 49.:** Ovisnost debljine mlaznog betona i faktora sigurnosti



Slika 50.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 100 mm



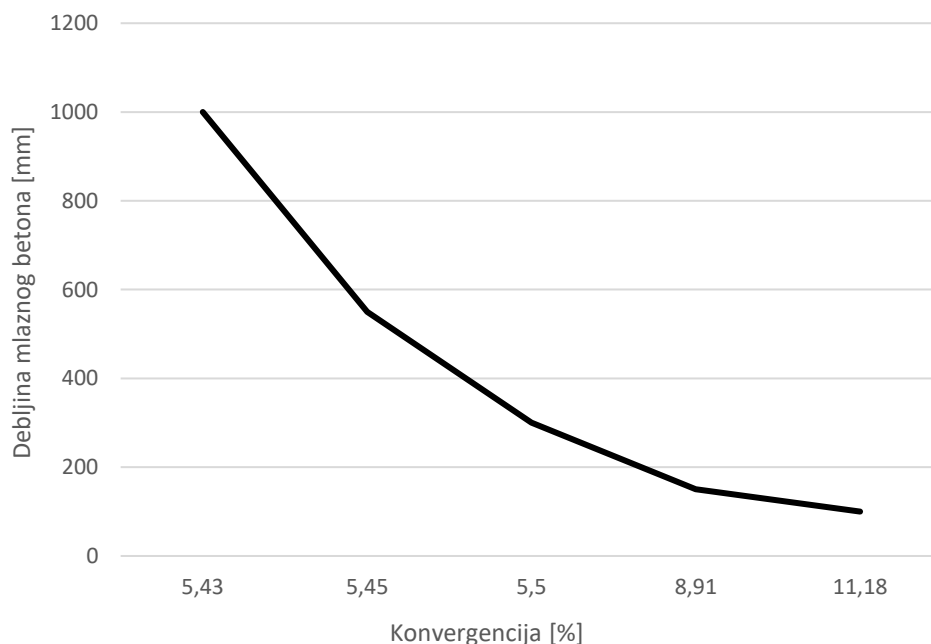
Slika 51.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 550 mm

## 10.2.2. Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće

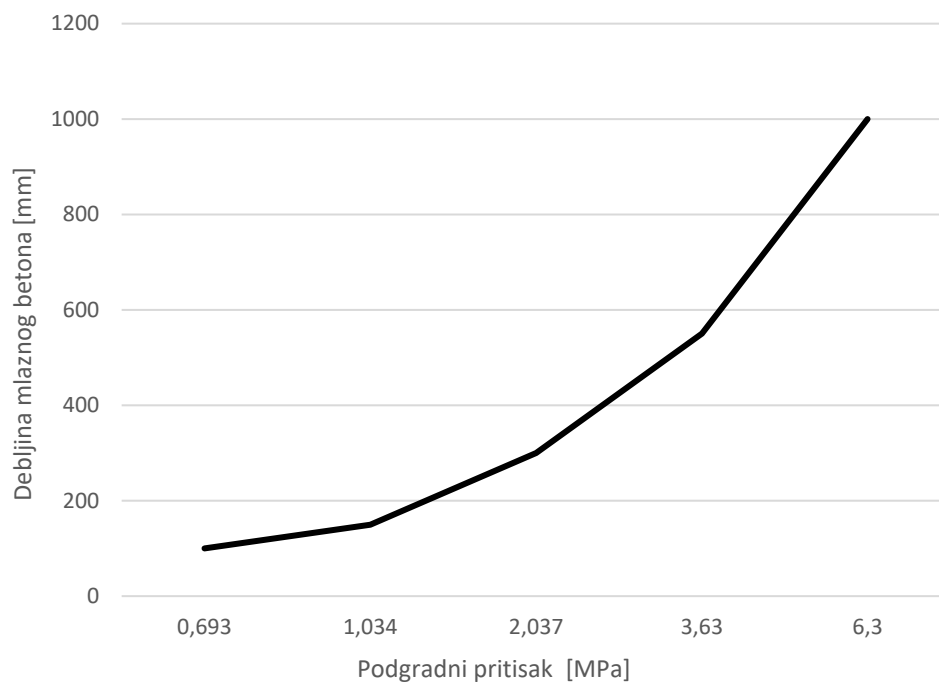
Karakteristika mlaznog betona koja se mijenja u analizi je njegova debljina (tablica 14.). Zaključak analize je da povećanjem debljine mlaznog betona se smanjuju konvergenције na zidovima tunela (slika 52.), dok podgradni pritisak raste (slika 53.), kao i faktor sigurnosti. Bitno je primjetiti da se već samom ugradnjom i onog najtanjeg mlaznog betona u debljini od 100 mm konvergencija znatno smanjuje. Prikazan je i izgled karakterističnih krivulja s tanjim i debljim slojem mlaznog betona (slika 54. i 55.).

Tablica 14.: Debljina mlaznog betona za stijenu veće krutosti i čvrstoće

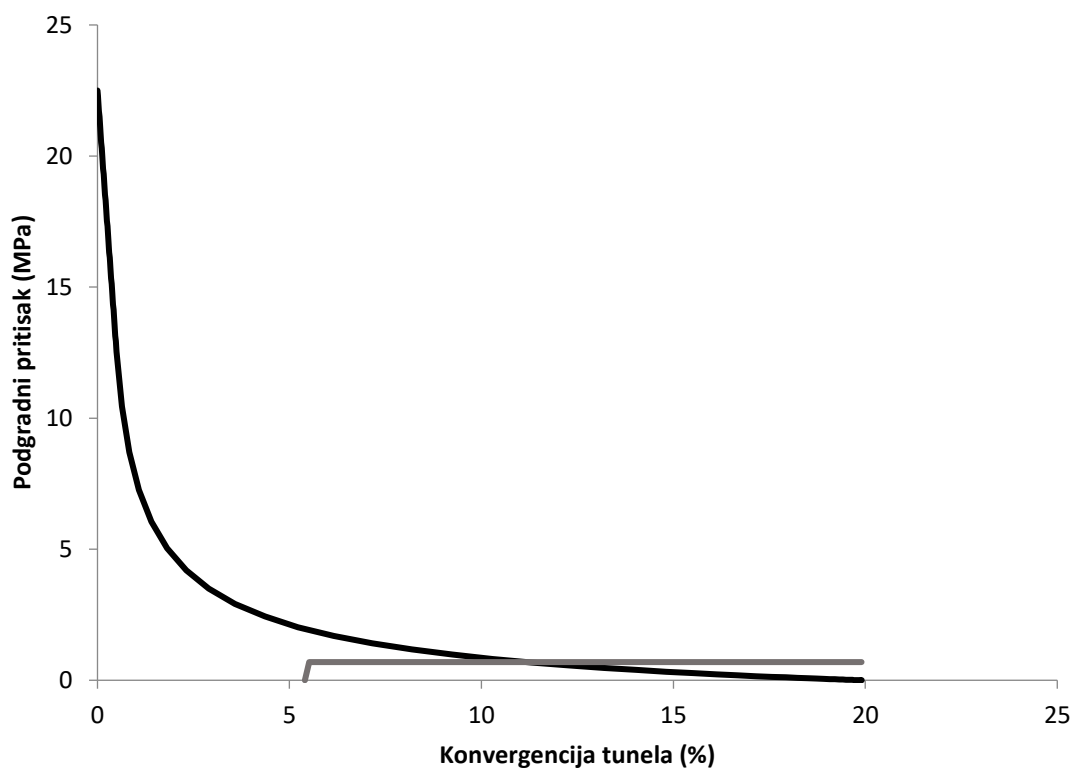
Debljina mlaznog betona [mm]	Fs	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1000	3.24	5.43	6.3
550	1.88	5.45	3.63
300	1.06	5.50	2.037
150	0.55	8.91	1.034
100	0.38	11.18	0.693



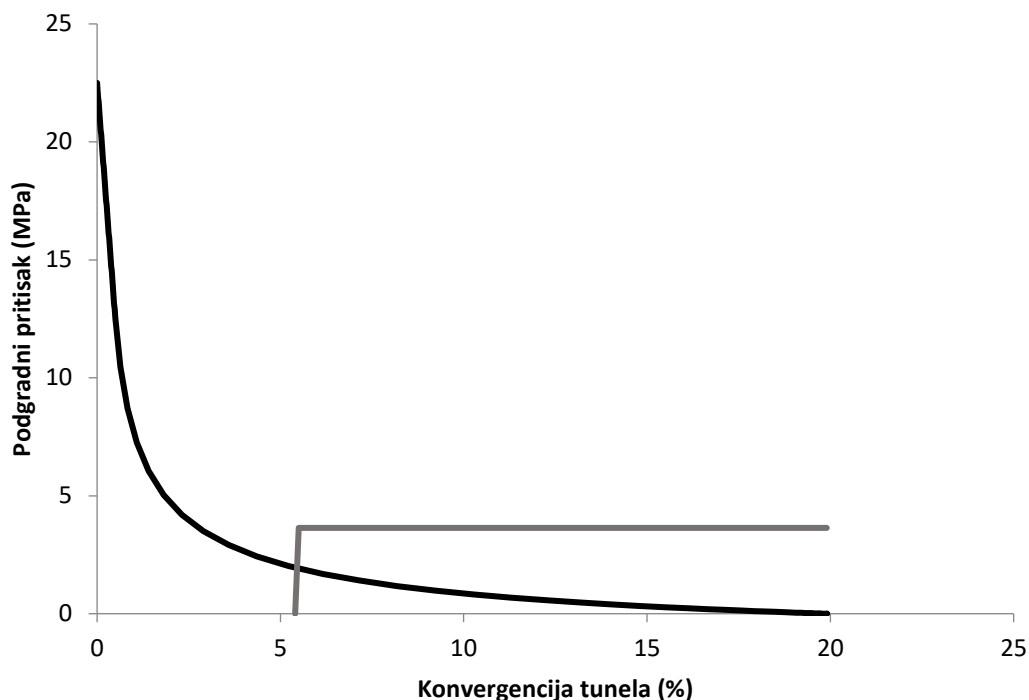
Slika 52.: Ovisnost debljine mlaznog betona i konvergenције



Slika 53.: Ovisnost debljine mlaznog betona i podgradnog pritiska



Slika 54.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 100 mm



Slika 55.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 550 mm

### 10.3. Utjecaj čeličnih lukova na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade

#### 10.3.1. Tunel Gotthard

Tablice 15. i 16. prikazuju karakteristike čeličnih lukova koje variraju u analizi. Kako na sidra, tako i na čelične lukove veliki utjecaj ima razmak na kojem su postavljeni, što se može i zaključiti iz dijagrama danih u nastavku ( slike 59., 60. i 61.). Povećanjem površine poprečnog presjeka čeličnih lukova, kovergencija se smanjuje, a podgradni pritisak i faktor sigurnosti se povećavaju (slike 56., 57. i 58.).

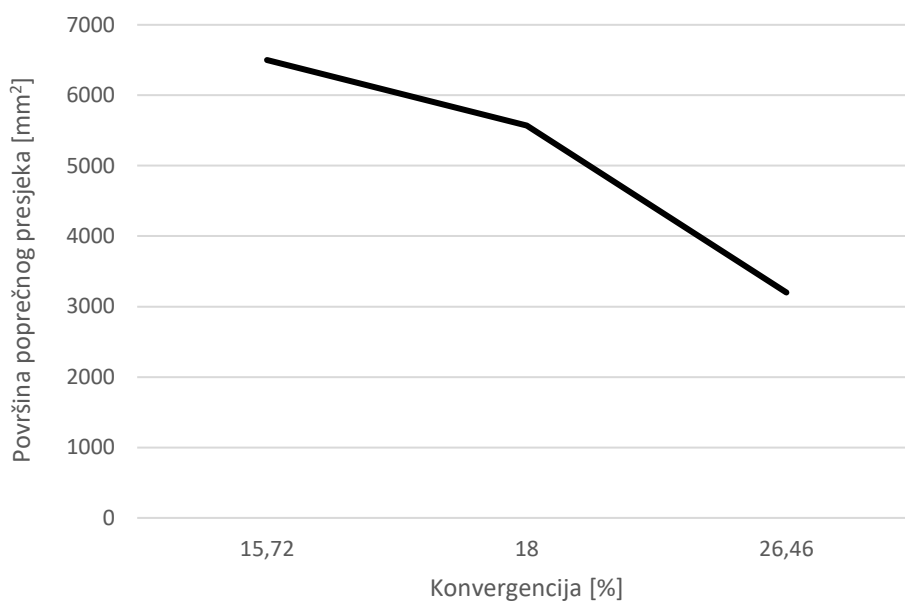
Tablica 15.: Površina poprečnog presjeka čeličnih lukova u tunelu Gotthard

Površina poprečnog presjeka [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>s</sub>	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
6500	0.71	15.72	1.516
5570	0.61	18.0	1.299
3200	0.35	26.46	0.75

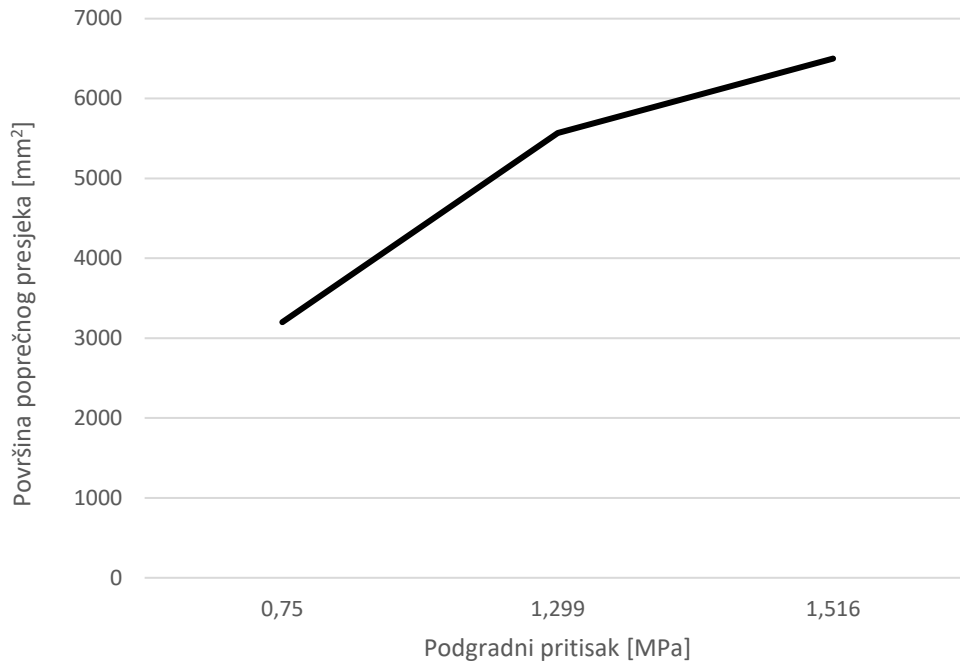


**Tablica 16.:** Razmak čeličnih lukova u tunelu Gotthard

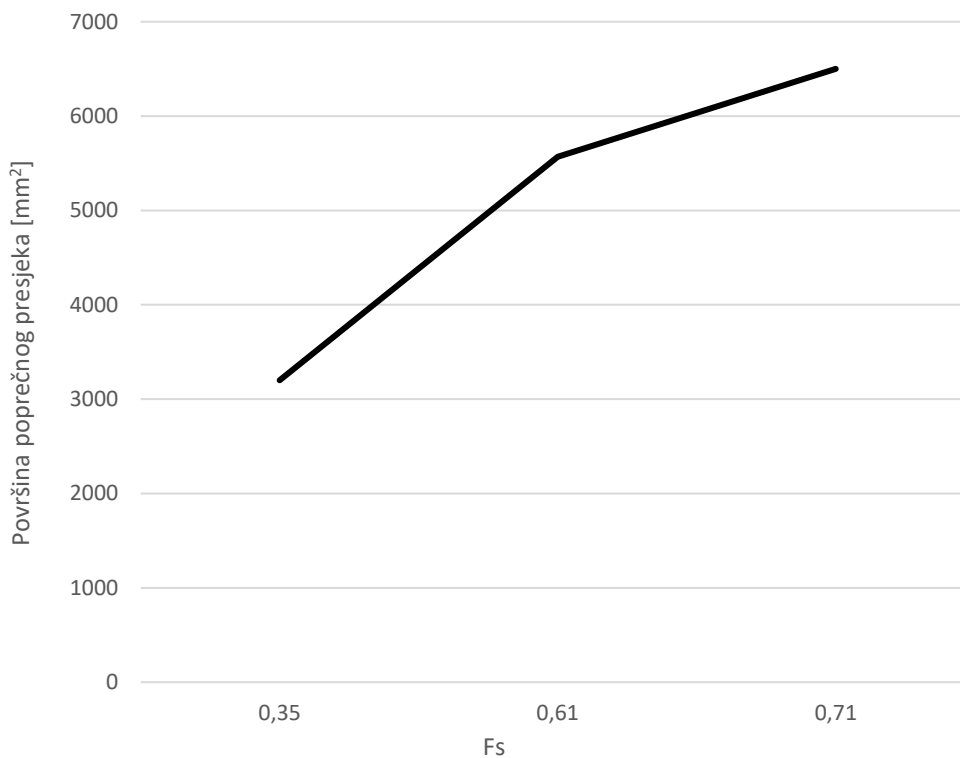
Razmak [m]	F <sub>s</sub>	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1.0	0.21	34.04	0.389
0.5	0.41	24.37	0.779
0.3	0.67	16.58	1.299



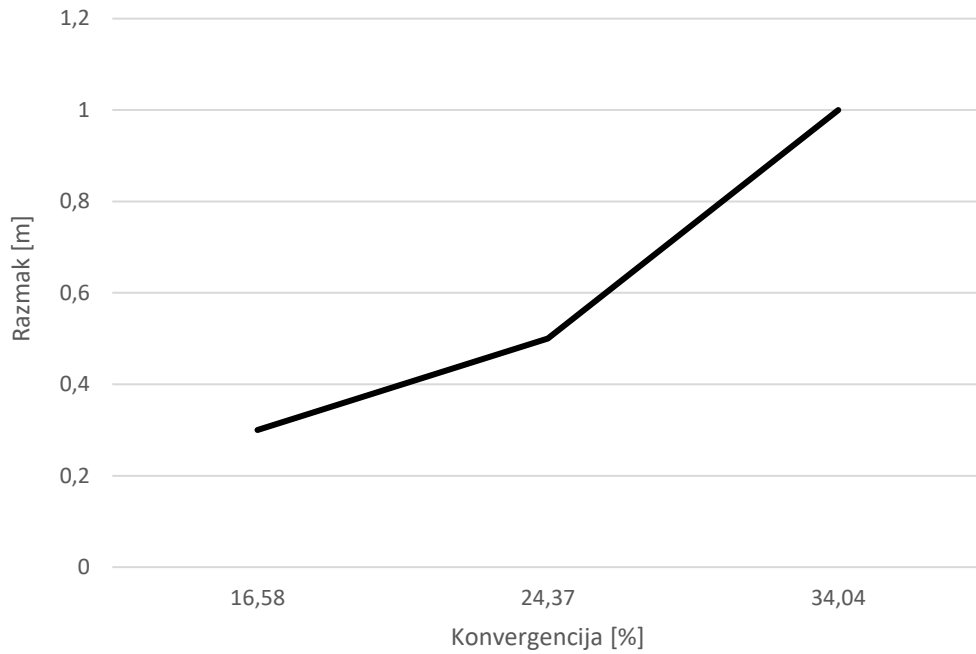
**Slika 56.:** Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i konvergencije



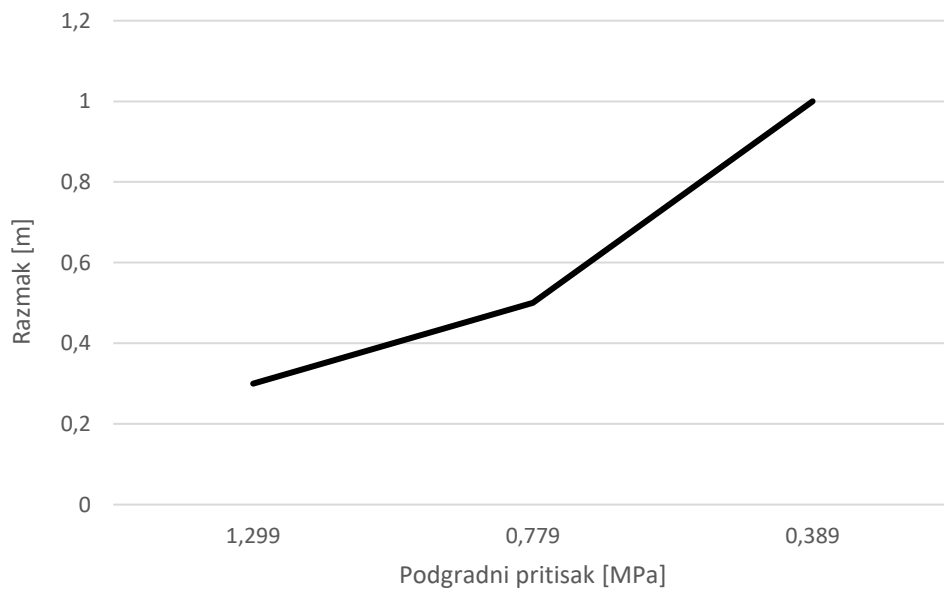
**Slika 57.:** Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i podgradnog pritiska



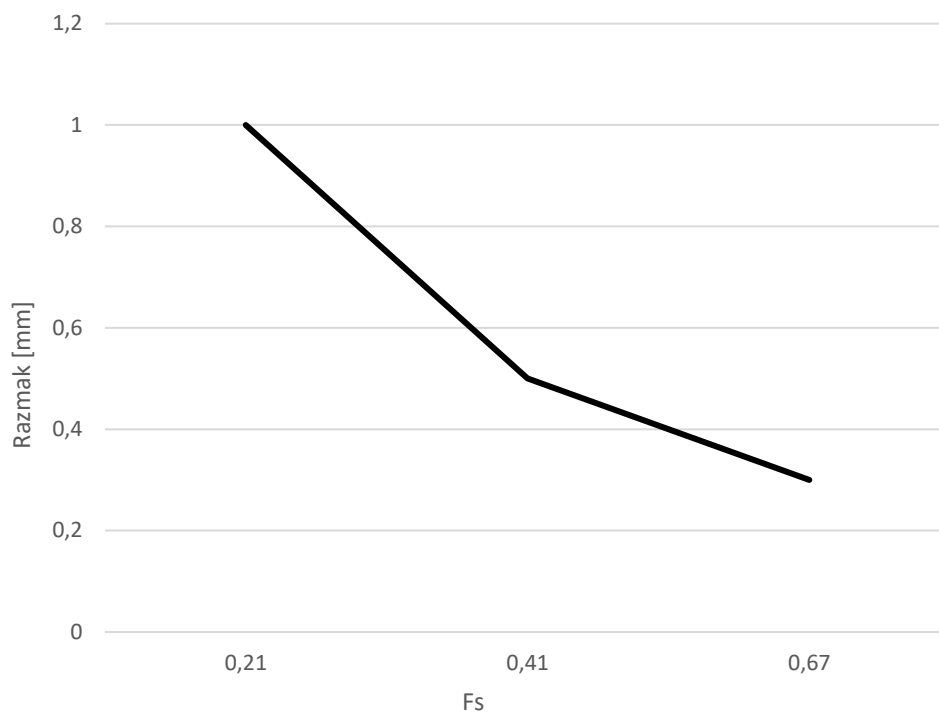
**Slika 58.:** Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i faktora sigurnosti



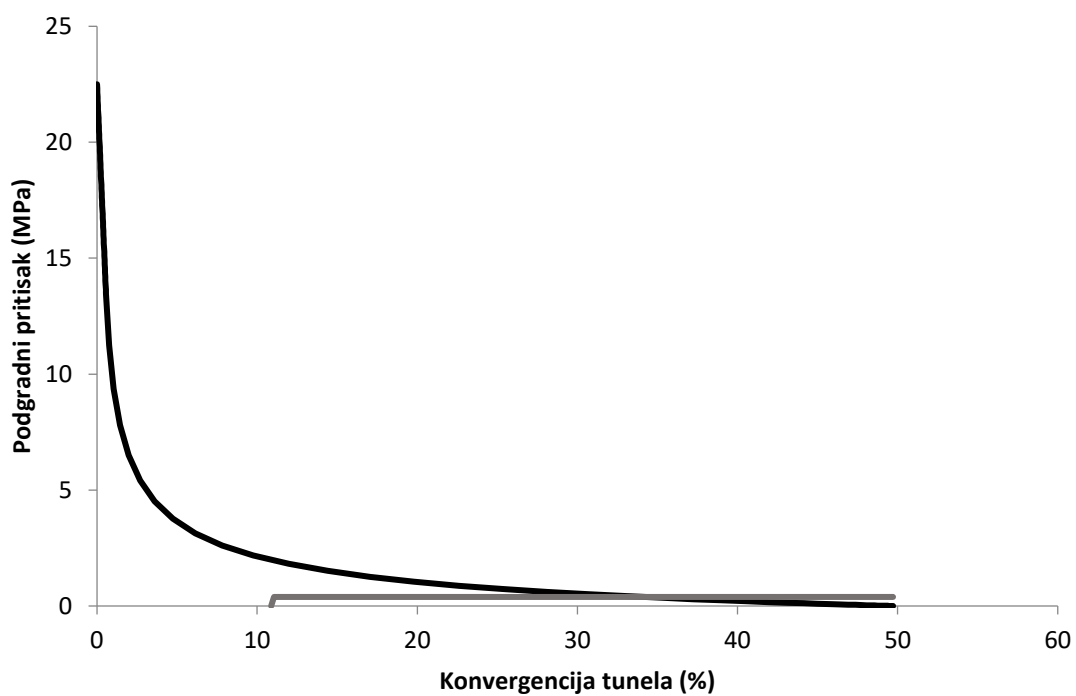
**Slika 59.:** Ovisnost razmaka čeličnih lukova i konvergencije



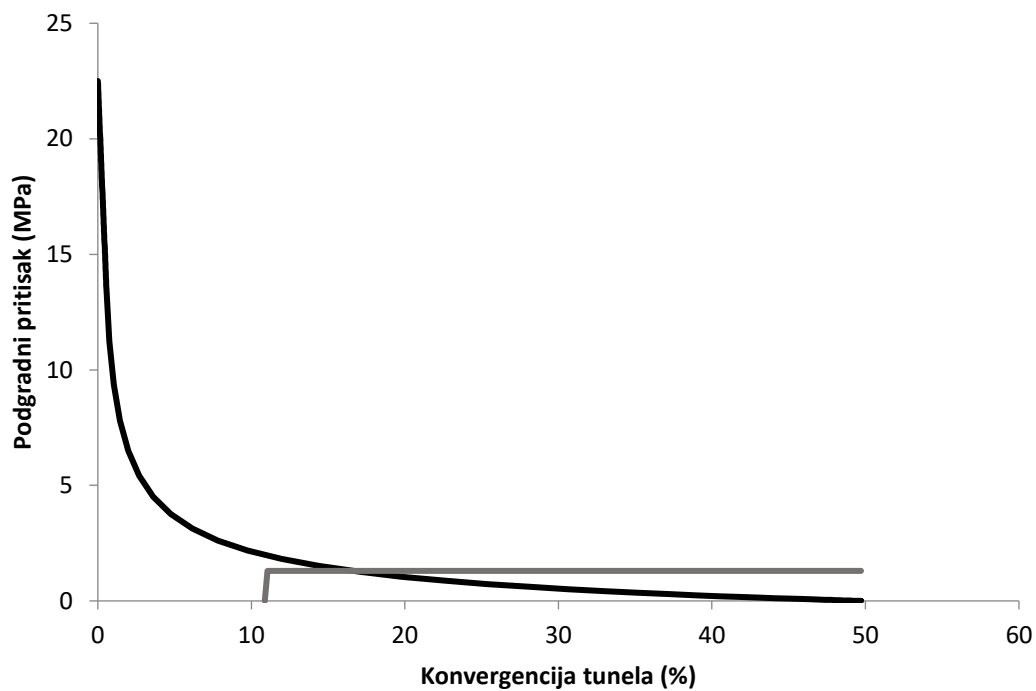
**Slika 60.:** Ovisnost razmaka čeličnih lukova i podgradnog pritiska



Slika 61.: Ovisnost razmaka čeličnih lukova I faktora sigurnosti



Slika 62.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 5570 mm<sup>2</sup> na razmaku od 1 m



**Slika 63.:** Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 5570 mm<sup>2</sup> na razmaku od 0.3 m

Na slikama 62. i 63. prikazan je izgled karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade za jednak poprečni presjek čeličnih lukova ali drugačiji razmak između njih.

---

### 10.3.2. Stijenska masa veće krutosti i čvrstoće

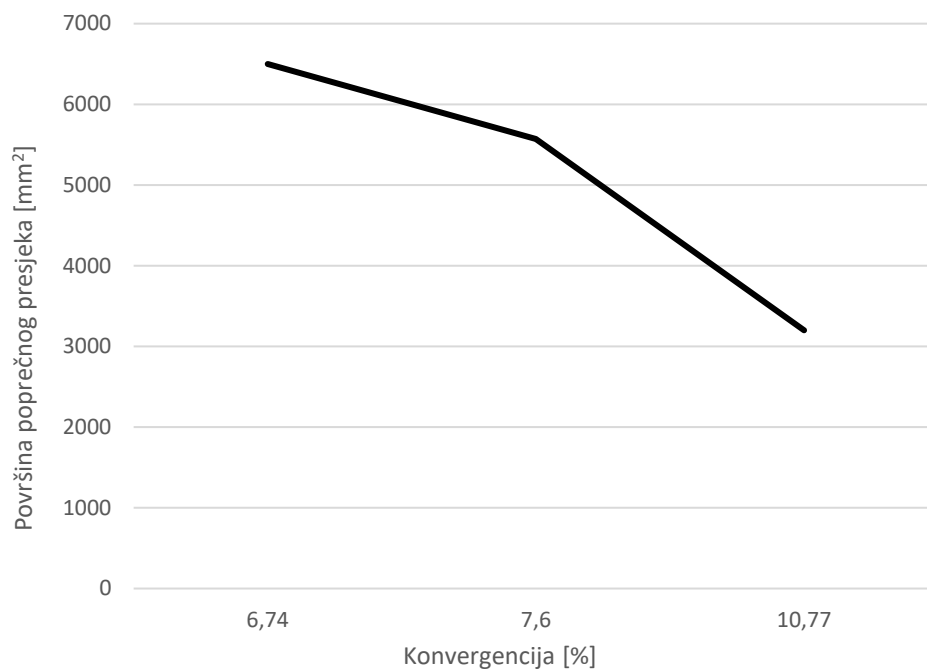
Tablice 17. i 18. prikazuju karakteristike čeličnih lukova koje variraju u analizi. Kako na sidra, tako i na čelične lukove veliki utjecaj ima razmak na kojem su postavljeni, što se može i zaključiti iz dijagrama danih u nastavku (slike 67., 68. i 69.). Povećanjem površine poprečnog presjeka čeličnih lukova, kovergencija se smanjuje, a podgradni pritisak i faktor sigurnosti se povećavaju (slike 64., 65. i 66.). Na slikama 70. i 71. prikazan je izgled karakterističnih krivulja stijenske mase i podgrade za jednak poprečni presjek čeličnih lukova ali drugačiji razmak između njih.

**Tablica 17.:** Površina čeličnih lukova za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće

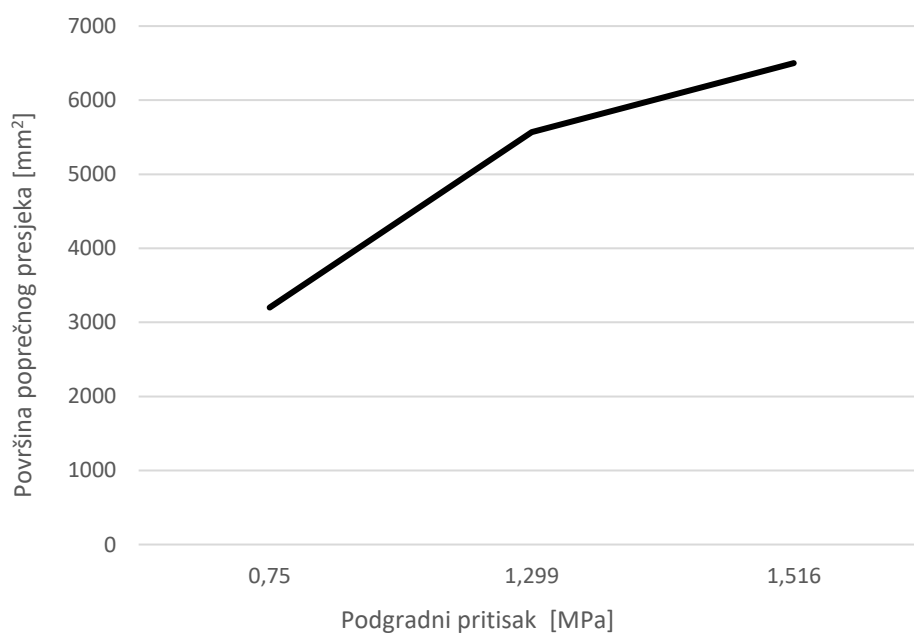
Površina poprečnog presjeka [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>s</sub>	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
6500	0.81	6.74	1.516
5570	0.7	7.6	1.299
3200	0.41	10.77	0.75

**Tablica 18.:** Razmak čeličnih lukova za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće

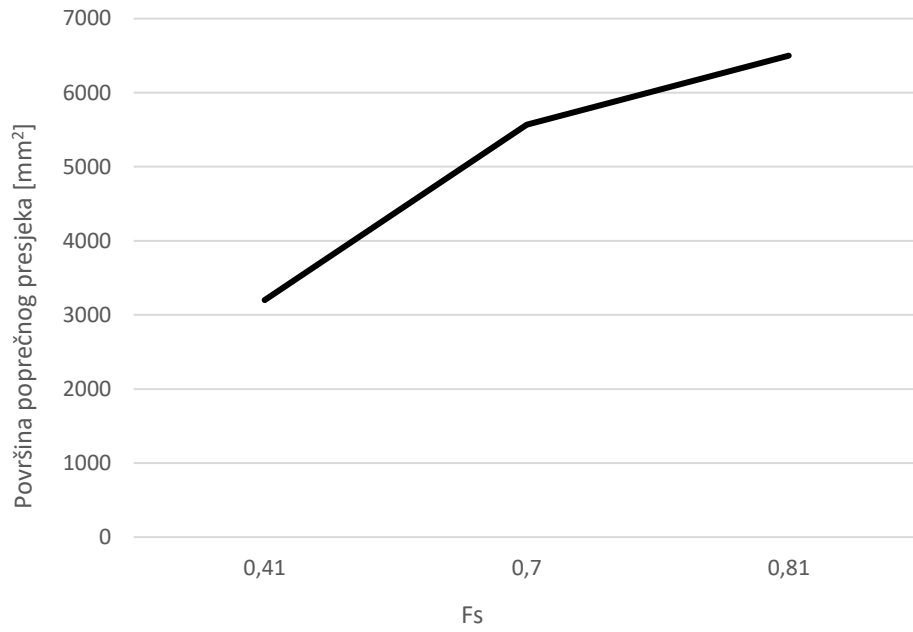
Razmak [m]	F <sub>s</sub>	Konvergencija [%]	Podgradni pritisak [MPa]
1.0	0.26	13.36	0.455
0.5	0.50	9.64	0.91
0.3	0.81	6.74	1.516



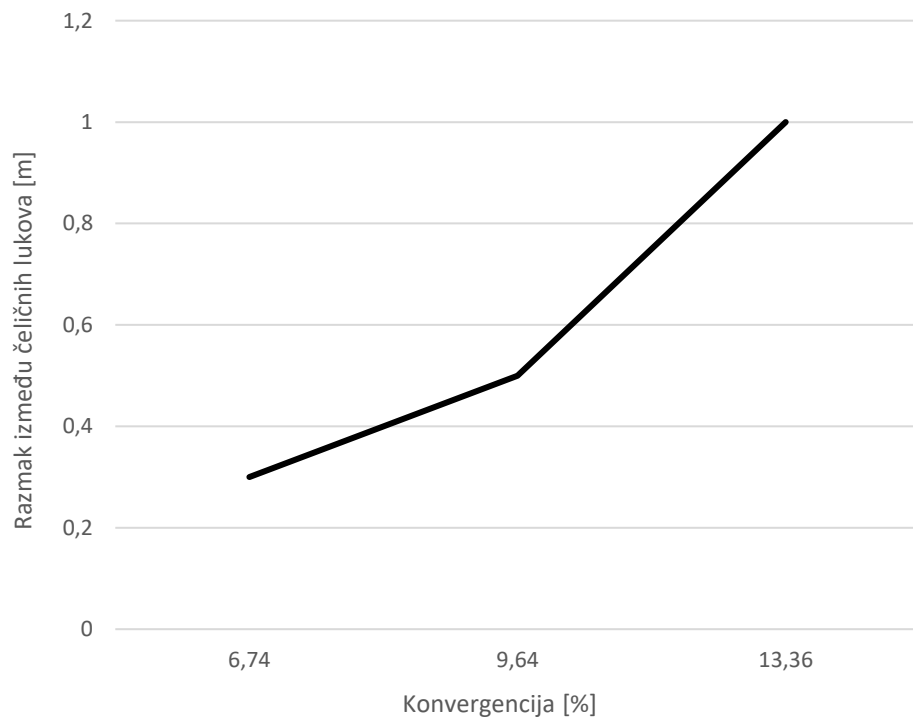
**Slika 64.:** Prikaz ovisnosti površine čeličnih lukova i konvergencije



**Slika 65.:** Prikaz ovisnosti površine čeličnih lukova i podgradnog pritiska

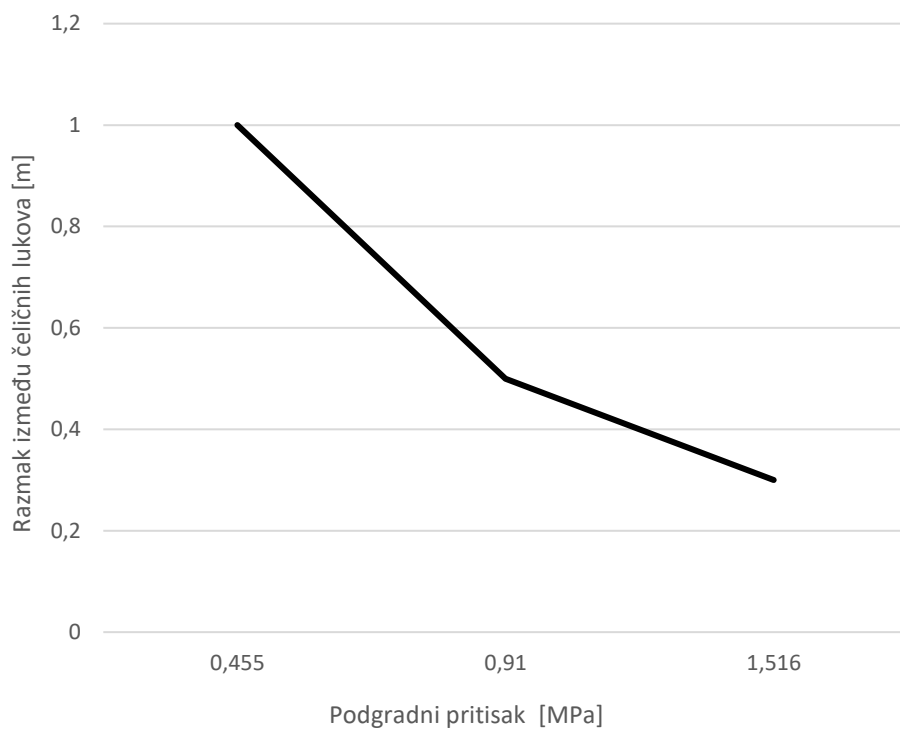


**Slika 66.:** Prikaz ovisnosti poprečnog presjeka čeličnih lukova i faktora sigurnosti

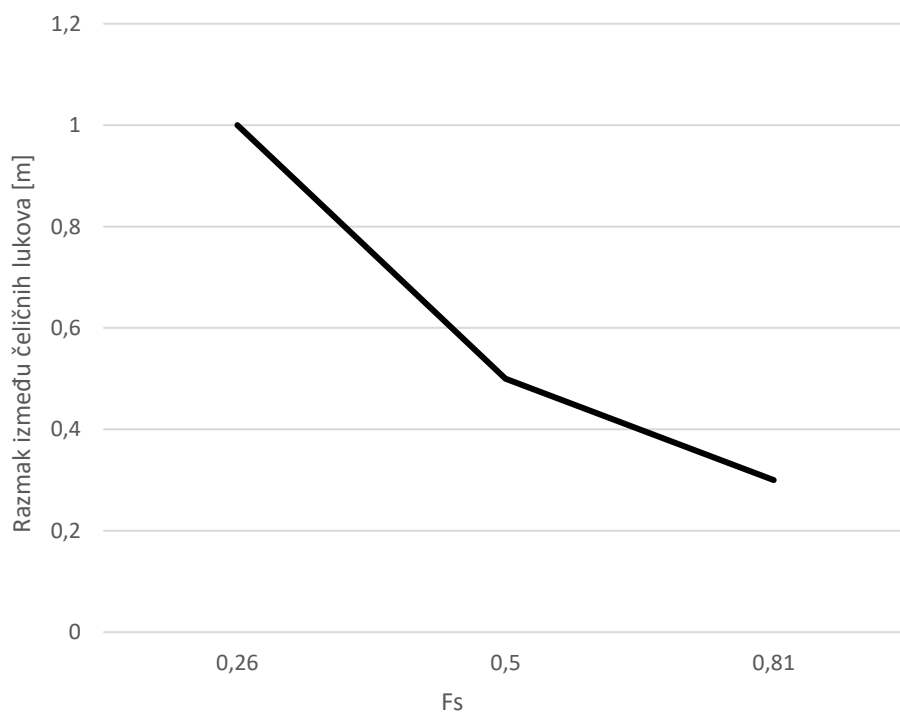


**Slika 67.** Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i konvergencije

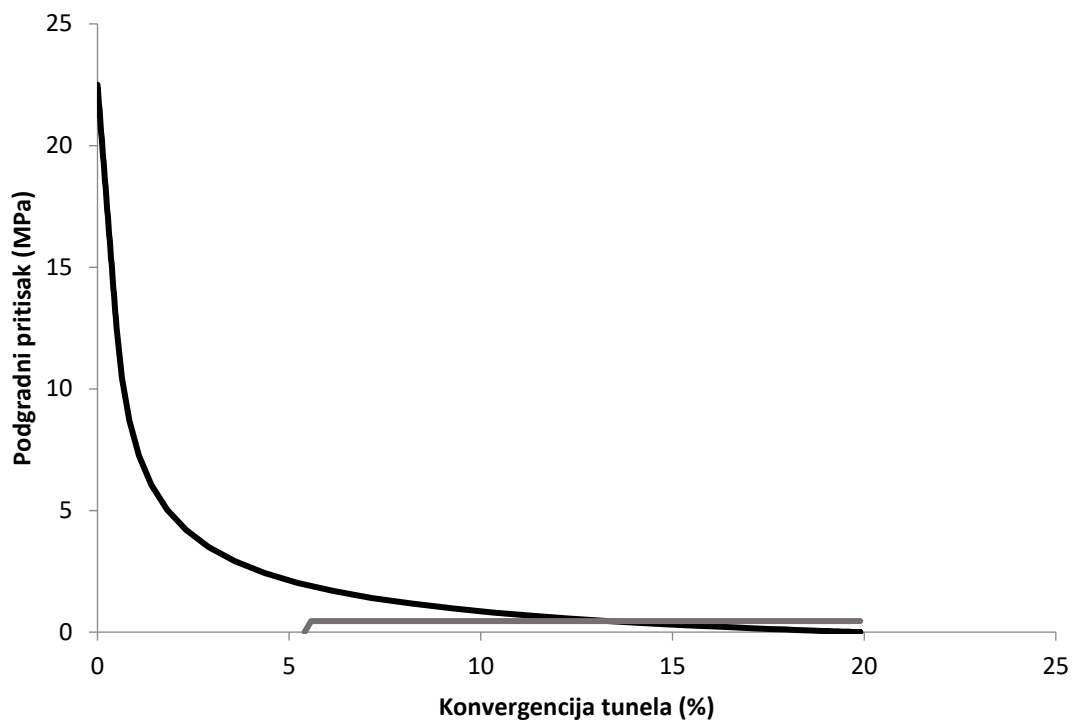




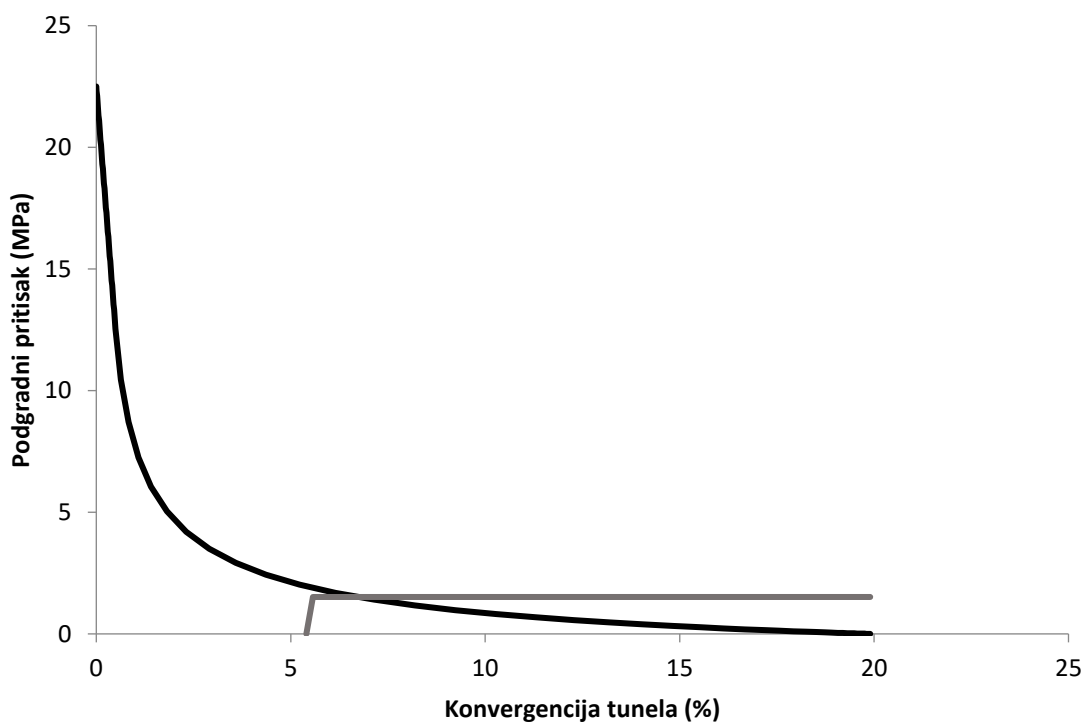
**Slika 68.:** Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i podgradnog pritiska



**Slika 69.:** Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i faktora sigurnosti



Slika 70.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 6500 mm<sup>2</sup> na razmaku od 1 m



Slika 71.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 6500 mm<sup>2</sup> na razmaku od 0.3 m

---

## 11. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražen je utjecaj elemenata primarnog podgradnog sustava na karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade, koristeći metodu Vrakas i Anagnostou, koja je prilagođena za analizu velikih deformacija stijenske mase u tunelskim uvjetima. Glavni cilj bio je analizirati kako se stijenska masa ponaša tijekom i nakon iskopavanja tunela, posebno u složenim geotehničkim uvjetima gdje je prisutna anizotropija stijena, niska nosivost tla i visoka deformabilnost, što se često susreće u projektima tuneliranja kroz planine ili duboke podzemne iskope, poput tunela Gotthard. Metoda Vrakas i Anagnostou omogućuje preciznu analizu kroz bezdimenzionalne dijagrame koji uzimaju u obzir nelinearnost u deformacijama, anizotropiju stijenske mase, kao i interakciju između stijenske mase i potpornog sustava. Poseban doprinos ove metode leži u mogućnosti predviđanja konvergencije tunela te određivanja optimalne količine podgrade potrebne za sprječavanje prekomjernog stiskanja tunela, što je od ključne važnosti u uvjetima "squeezing ground". Primjenom ovog pristupa, inženjeri dobivaju brze i pouzdane procjene stabilnosti tunela te smjernice za dizajn podgradnih sustava.

U praktičnom dijelu rada, korištenjem softverskog alata RocSupport, proveden je niz simulacija na primjeru tunela Gotthard, čime su analizirane karakteristične krivulje stijenske mase s i bez podgradnog sustava. Rezultati su pokazali da je uz primjenu metode Vrakas i Anagnostou moguće predvidjeti deformacije stijenske mase te stabilnost tunela tijekom različitih faza iskopavanja. Parametarska analiza elemenata primarne podgrade, uključujući sidra, čelične lukove i mlazni beton, pokazala je da ti elementi značajno utječu na krivulje deformacija i stabilnost tunelske konstrukcije, omogućujući optimizaciju dizajna podgradnog sustava.

Jedna od glavnih prednosti metode Vrakas i Anagnostou je njena sposobnost pružanja eksplicitnih rješenja koja mogu poslužiti kao referentna točka za daljnje numeričke proračune. Međutim, metoda ima svoja ograničenja u vrlo heterogenim ili složenim geološkim uvjetima, gdje su potrebne dodatne prilagodbe.

Zaključno, ovaj rad potvrđuje da metoda Vrakas i Anagnostou ima važnu ulogu u optimizaciji podgradnog sustava tunela, posebno u složenim geotehničkim uvjetima. Simulacije i rezultati pokazali su da je ova metoda pouzdan alat za predviđanje deformacija i stabilnosti tunelskih konstrukcija, što pridonosi sigurnosti, ekonomičnosti i uspjehu tunelskih projekata, kao što je slučaj s tunelom Gotthard. Metoda pruža vrijedne smjernice za inženjerske projekte i dokazuje se kao koristan alat za brzu procjenu stabilnosti i optimizaciju dizajna u praktičnim primjenama tuneliranja.

---

## POPIS LITERATURE

- [1] Kovačević M.S. *Mehanika stijena*. Sveučilište u Zagrebu. Građevinski fakultet. Zagreb; 2021.
- [2] Kovačević J. *Osnovne koncepcije NATM*. Sarajevo: FLAX d.o.o. Društvo za tržišna ispitivanja i poslovne komunikacije; 2003.
- [3] Mohyla M., Vojtasik K., Hrubesova E., Stolarik M., Nedoma J., Pinka M. Approach for Optimisation of Tunnel Lining Design. *Applied sciences*. 2020; 10: 6705
- [4] von Rabcewicz L., Golser J., Principles of dimensioning the supporting system for the "new austrian tunnelling method". *Water Power* 1973; 25: 88–93.
- [5] von Rabcewicz L., Golser J., Application of the natm to the underground works at tarbela. part 1. *Water Power* 1974; 26, 314–321.
- [6] Hudec M. Primjena principa graničnih stanja u tunelogradnji. *Građevinar*. 2000; 8: 443-450.
- [7] European-standard. CSN EN 1997-1 (731000) EuroCode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules; Technical Report ICS 91.010.30; 93.020; ÚNMZ: Prague, Czech Republic, 2006.
- [8] Vermeer P.A., Moeller S.C. On design analyses of NATM-tunnels. *In Underground Space Use. Analysis of the Past and Lessons for the Future*. Taylor & Francis Group: Boca Raton: FL, USA, 2005.
- [9] *Tucon*. Dostupno: <https://www.tucon.sk/en/project/road-tunnel-gubrist/>  
[Pristupljeno: 25.7.2024.]
- [10] Posebni betoni i tehnologije. Presentacije s predavanja 6: Mlazni beton. Dostupno: [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/PBT\\_6\\_-\\_Mlazni\\_beton.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PBT_6_-_Mlazni_beton.pdf)  
[Pristupljeno: 15.7.2024.]
- [11] Oraee B., Oraee K., Tavassoli M., Designing Shotcrete As Primary Support in Tunnels. Conference: 30th International Conference on Ground Control in Mining *Morgantown, West Virginia, U.S.A*, 2011.
- [12] Seferović E., Šandrak Nukić I., Mračkovski D., Macan D. Armiranje mlaznog betona makrosintetičkim vlaknima. *Građevinar*. 2011; 63-68.

- 
- [13] Fibres d'acier pour la construction des tunnels et ouvrage souterrains, "Dramix" - Bekaert S.A. 1998.
- [14] Fibres d'acier trefile pour la construction des tunnels et ouvrage souterrains, "Dramix"-Bekaert S.A. 1998.
- [15] Seferović E. Primjena čeličnih vlakana u primarnoj podgradi tunela. *Građevinar*. 2002; 58: 473-478.
- [16] Curtis Concrete Pumping. Dostupno: <https://www.curtisconcretepumping.com/culvert-tunnel-shotcrete-linings/> [Pristupljeno: 17.7.2024.]
- [17] Song X., Junxun Z., Analysis of Supporting Mechanism of Steel Arch Frame in Tunnel Collapse. The 6th International Conference on Environmental Science and Civil Engineering IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science* 2020; 455.
- [18] Gall Zeidler Consultants. Dostupno: <https://www.gzconsultants.com/service/tunnel-rehabilitation/#gallery-11/> [Pristupljeno: 20.7.2024.]
- [19] Ivas D. *Opterećenje na tunelsku podgradu i primjena nove austrijske tunelske metode*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. 2019.
- [20] Minova Global. Rock bolting solutions. Dostupno: <https://www.minovaglobal.com/media/1280/rock-bolting-solutions.pdf> [Pristupljeno: 20.7.2024.]
- [21] Canadian Mining Journal. Dostupno: <https://www.canadianminingjournal.com/event/innovation-competition-to-secure-tunnels-in-underground-mining/> [Pristupljeno: 22.7.2024.]
- [22] Barczak T. Research developments that contributed to the landscape of longwall roof support design over the past 25 years. Peng S. *Advances in Coal Mine Ground Control*. Sawstone, Cambridge: Woodhead Publishing; 2017.
- [23] Vrakas A., Anagnostou G., A finite strain closed – form solution for the elastoplastic ground response curve in tunneling. *Int. J. Numer. Analyt. Methods Geomech.* 2014; 38, No. 11, 1131-1148.
- [24] Podzemne građevine. Prezentacije s predavanja 2023.
- [25] Vrakas A., Anagnostou G., Ground Response to Tunnel Reprofilng Under Heavily Squeezing Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016; 49:2753–2762.

- 
- [26] Vrakas A., Anagnostou G., A simple equation for obtaining finite strain solutions from small strain analyses of tunnels with very large convergences. *Geotechnique*. 2015; 65, No 11: 936-944.
- [27] Primijenjena mehanika stijena. Prezentacije s predavanja 2022.
- [28] Hoek E., Guevara R. Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2009.; 42, No. 2: 389-418.
- [29] Vrakas A., Anagnostou G., A Closed-Form Solution for the Ground Response Curve of Circular Tunnels Considering Large Deformations. 3rd International Conference on Computational Methods in Tunneling and Subsurface Engineering 17.-19. travanj 2013. *Ruhr University Bochum*
- [30] Rocscience. RocSupport Introduction Manual. Dostupno: [https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RocSupport/Introduction\\_Manual.pdf](https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RocSupport/Introduction_Manual.pdf) [Pristupljeno: 10.8.2024.]
- [31] Simoni R. Gotthard base tunnel, Switzerland – the world's longest railway tunnel. *Civil engineering*. 2014; 167; 159-166.
- [32] Geotechnik Schweiz. Dostupno: [https://geotechnikschweiz.ch/?page\\_id=3972&lang=en](https://geotechnikschweiz.ch/?page_id=3972&lang=en) [Pristupljeno: 15.8.2024.]

---

## POPIS SLIKA

Slika 1.: Čimbenici koji utječu na opterećenje primarnog podgradnog sustava.....	10
Slika 2.: Izvedena primarna podgrada (Izvor:[9]).....	12
Slika 3.: Suhi postupak.....	14
Slika 4.: Mokri postupak.....	15
Slika 5.: Nanošenje mlaznog betona nakon postavljenih čeličnih mreža (Izvor:[16]) .....	18
Slika 6.: Čelični lukovi (Izvor: [18]).....	20
Slika 7.: Osnovni elementi štapnog sidra (Izvor: [1]).....	21
Slika 8.: Tunel s ugrađenim štapnim sidrima (Izvor: [20]).....	22
Slika 9.: Proces ugradnje štapnih sidara (Izvor: [21]).....	22
Slika 10.: Tri tipa podgrade.....	25
Slika 11.: a Gotthard Base tunel; b Lyon-Turin base tunel (Izvor: [25]).....	27
Slika 12.: Kolaps tunela Yacambú-Quibor (Izvor: [28]).....	28
Slika 13.: Mohr Coulombov kriterij sloma.....	30
Slika 14.: a Analiza malih deformacija; b Analiza velikih deformacija (Izvor: [23]).....	31
Slika 15.: Elastoplastično ponašanje cilindričnog otvora bez izvanravnskog naprezanja (Izvor: [23]).....	33
Slika 16.: Elastoplastično ponašanje cilindričnog otvora s izvanravnskim naprežanjem (Izvor: [23]).....	35
Slika 17.: Primjeri karakterističnih krivulja stijenske mase (Izvor: [23]) .....	38
Slika 18.: Definicija faktora sigurnosti kada je veći od 1 (Izvor: [30]).....	41
Slika 19.: Definicija faktora sigurnosti kada je manji od 1 (Izvor: [23]) .....	42
Slika 20.: Grafički prikaz plastične zone.....	44
Slika 21.: Karakteristična krivulja stijenske mase.....	44
Slika 22.: Prikaz ovisnosti podgradnog pritiska i pomaka zida tunela .....	45
Slika 23.: Podgradni sustav tunela Gotthard .....	47
Slika 24.: Karakteristična krivulja stijenske mase I podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima .....	48
Slika 25.: Karakteristična krivulja stijenske mase I podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima i sidrima.....	49
Slika 26.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s ugrađenim čeličnim lukovima, sidrima i mlaznim betonom.....	50
Slika 27.: Grafički prikaz plastične zone nakon ugrađenog primarnog podgradnog sustava .....	51

---

Slika 28.: Karakteristična krivulja stijenske mase veće krutosti i čvrstoće .....	55
Slika 29.: Ovisnost sile u sidru i konvergencije .....	57
Slika 30.: Ovisnost sile u sidru i podgradnog pritiska .....	57
Slika 31.: Ovisnost sile u sidru i faktora sigurnosti.....	58
Slika 32.: Ovisnost razmaka između sidara i konvergencije.....	58
Slika 33.: Ovisnost razmaka sidara i podgradnog pritiska.....	59
Slika 34.: Ovisnost razmaka sidara i faktora sigurnosti.....	59
Slika 35.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 1 m.....	60
Slika 36.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 17 mm i razmak između sidara 1 m.....	61
Slika 37.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 0.5 m .....	61
Slika 38.: Ovisnost sile u sidru i konvergencije .....	63
Tablica 39.: Ovisnost sile u sidru i podgradnog pritiska .....	63
Slika 40.: Ovisnost sile u sidru i faktora sigurnosti.....	64
Slika 41.: Ovisnost razmaka između sidara konvergencije.....	64
Tablica 42.: Ovisnost razmaka između sidara i podgradnog pritiska.....	65
Slika 43. Ovisnost razmaka između sidara i faktora sigurnosti.....	65
Slika 44.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 1 m.....	66
Slika 45.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 17 mm i razmak između sidara 1 m.....	66
Slika 46.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za sidra 34 mm i razmak između sidara 0.5 m .....	67
Slika 47.: Ovisnost debljine mlaznog betona i konvergencije.....	68
Slika 48.: Ovisnost debljine mlaznog betona i podgradnog pritiska .....	69
Slika 49.: Ovisnost debljine mlaznog betona i faktora sigurnosti .....	69
Slika 50.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 100 mm	70
Slika 51.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 550 mm	70
Slika 52.: Ovisnost debljine mlaznog betona i konvergencije.....	71
Slika 53.: Ovisnost debljine mlaznog betona i podgradnog pritiska .....	72
Slika 54.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 100 mm	72
Slika 55.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade za mlazni beton od 550 mm	73
Slika 56.: Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i konvergencije .....	74
Slika 57.: Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i podgradnog pritiska.....	75
Slika 58.: Ovisnost površine poprečnog presjeka čeličnih lukova i faktora sigurnosti.....	75



---

Slika 59.: Ovisnost razmaka čeličnih lukova i konvergencije.....	76
Slika 60.: Ovisnost razmaka čeličnih lukova i podgradnog pritiska.....	76
Slika 61.: Ovisnost razmaka čeličnih lukova i faktora sigurnosti.....	77
Slika 62.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 5570 mm <sup>2</sup> na razmaku od 1 m.....	77
Slika 63.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 5570 mm <sup>2</sup> na razmaku od 0.3 m.....	78
Slika 64.: Prikaz ovisnosti površine čeličnih lukova i konvergencije.....	80
Slika 65.: Prikaz ovisnosti površine čeličnih lukova i podgradnog pritiska.....	80
Slika 66.: Prikaz ovisnosti poprečnog presjeka čeličnih lukova i faktora sigurnosti.....	81
Slika 67. Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i konvergencije .....	81
Slika 68.: Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i podgradnog pritiska.....	82
Slika 69.: Prikaz ovisnosti razmaka čeličnih lukova i faktora sigurnosti.....	82
Slika 70.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 6500 mm <sup>2</sup> na razmaku od 1 m.....	83
Slika 71.: Karakteristična krivulja stijenske mase i podgrade s čeličnim lukovima poprečnog presjeka 6500 mm <sup>2</sup> na razmaku od 0.3 m.....	83

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1.: Ulazni parametri.....	43
Tablica 2.: Rezultati proračuna karakteristične krivulje stijenske mase bez podgrade.....	43
Tablica 3.: Karakteristike čeličnih lukova TH 44/70.....	48
Tablica 4.: Karakteristike sidara.....	49
Tablica 5.: Karakteristike mlaznog betona.....	50
Tablica 6.: Rezultati proračuna karakteristične krivulje stijenske mase i podgrade .....	51
Tablica 7.: Ulazni parametri stijene.....	54
Tablica 8.: Izlazni parametri stijene.....	55
Tablica 9.: Karakteristike sidara u stijenskoj masi tunela Gotthard .....	56
Tablica 10.: Razmaci između sidara u stijenskoj masi tunela Gotthard .....	56
Tablica 11.: Karakteristike sidara u stijenskoj masi veće krutosti i čvrstoće .....	62
Tablica 12.: Razmaci između sidara u stijenskoj masi veće krutosti i čvrstoće.....	62
Tablica 13.: Debljina mlaznog betona u tunelu Gotthard.....	68
Tablica 14.: Debljina mlaznog betona za stijenu veće krutosti i čvrstoće.....	71
Tablica 15.: Površina poprečnog presjeka čeličnih lukova u tunelu Gotthard.....	73
Tablica 16.: Razmak čeličnih lukova u tunelu Gotthard .....	74
Tablica 17.: Površina čeličnih lukova za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće.....	79
Tablica 18.: Razmak čeličnih lukova za stijensku masu veće krutosti i čvrstoće.....	79