

Izrada softvera za proračun naprezanja tunela okruglog presjeka

Vincek, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:618282>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

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



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

**IZRADA SOFTVERA ZA PRORAČUN NAPREZANJA TUNELA OKRUGLOG
PRESJEKA**

Diplomski rad

Josip Vincek

R290

Zagreb, 2023



KLASA: 602-01/23-01/45
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 08.05.2023.

Josip Vincek, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/45, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 28.04.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

Izrada softvera za proračun naprezanja tunela kružnog presjeka

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljicu dr.sc. Karolina Herceg.

Voditelj

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Vinko Škrlec

(titula, ime i prezime)

Suvoditeljica

(potpis)

dr.sc. Karolina Herceg

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

IZRADA SOFTVERA ZA PRORAČUN NAPREZANJA TUNELA OKRUGLOG PRESJEKA

Josip Vincek

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

Sažetak

Tunelske konstrukcije imaju jednu od ključnih uloga u modernoj infrastrukturi, a analiza naprezanja je esencijalna za njihovu stabilnost i sigurnost. Ovim radom istraženo je područje sekundarnih naprezanja, čvrstoće stijenske mase i stabilnosti tunelskih konstrukcija u stijenskoj masi te je prilikom istraživanja razvijen program u Pythonu. Poblize su objašnjena područja ispitivanja i klasifikacija koja prethode analizi naprezanja i čvrstoće, dok su jednadžbe navedene u radu korištene prilikom razvoja programa. U svrhu validacije rezultata proračuna provedena je usporedna analiza sa rezultatima geotehničkog softvera Plaxis.

Ključne riječi: tunel, analiza naprezanja, stijenska masa, čvrstoća stijenske mase, python

Diplomski rad sadrži: 67 stranica, 14 tablica, 51 sliku i 22 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF

Komentorica: Dr. sc. Karolina Herceg, poslijedoktorand RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor. RGNF
Dr. sc. Siniša Stanković, docent RGNF

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR STRESS CALCULATION WITH APPLICATION IN TUNNEL
CONSTRUCTION

Josip Vincek

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department for Mining and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Tunnel constructions are critical components of modern infrastructure, and stress analysis is critical to their stability and safety. This thesis explored induced stresses, rock mass strength, tunnel structural stability in the rock mass and a Python program was developed throughout the research. The areas of testing and categorization that precede stress and strength analysis are discussed, and the equations presented in the article were used during the program's development. To validate the calculation results, a comparison with the results of the geotechnical software Plaxis was undertaken.

Keywords: tunnel, stress analysis, rock mass, rock mass strength, python

Thesis contains: 67 pages, 14 tables, 51 figures and 22 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD

Co-supervisor: Postdoctoral Researcher Karolina Herceg, PhD

Reviewers: Associate Professor Vinko Škrlec, PhD
Full Professor Mario Dobrilović, PhD
Assistant Professor Siniša Stanković, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O TUNELIMA.....	2
2.1. Geotehnička istraživanja u tunelogradnji.....	3
2.2. Geološka istraživanja u tunelogradnji.....	5
3. ISPITIVANJA I KLASIFIKACIJE STIJENA	7
3.1. Sustavi klasifikacije	8
3.1.1. RQD.....	9
3.1.2. Geomehanička ili RMR klasifikacija	11
3.1.3. Q klasifikacija	14
3.1.4. GSI.....	17
4. ČVRSTOĆA I NAPREZANJA.....	19
4.1. In-situ naprezanja.....	19
4.2. Sekundarna naprezanja - Kirschovo rješenje.....	21
4.2.1. Slučaj vertikalnog naprezanja	23
4.2.2. Slučaj vertikalnog i horizontalnog naprezanja	25
4.2.3. Slučaj kvazihidrostatskog naprezanja	27
4.2.4. Glavna naprezanja i pomaci	28
4.3. Hoek - Brown kriterij čvrstoće.....	29
4.3.1. Mohr - Coloumb parametri čvrstoće	34
4.3.2. Čvrstoća stijenske mase.....	35
4.3.3. Modul deformabilnosti stijenske mase	35
4.3.4. Određivanje vrijednosti σ_3, \max'	37
5. PROGRAM ZA PRORAČUN NAPREZANJA OKO KRUŽNOG OTVORA I ČVRSTOĆE STIJENE	39
5.1. Općenito.....	39
5.2. Način rada	40
5.3. Ulazni podaci.....	47
5.3.1. Proračun naprezanja i pomaka	47
5.3.2. Proračun čvrstoće	48
5.4. Validacija rezultata	49
5.4.1. Validacija naprezanja i pomaka.....	50
5.4.1.1. <i>Slučaj $\theta = 0^\circ$</i>	51

5.4.1.2. Slučaj $\theta = 90^\circ$	58
5.4.2. Validacija čvrstoće	62
6. ZAKLJUČAK	65
LITERATURA	66

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Pružanje, kut nagiba, smjer nagiba (Hoek i dr., 2012).....	6
Slika 3-1. RQD (Deb i Verma, 2016).....	10
Slika 3-2. Unaprijeđeni Q - podgradni dijagram za odabir podgrade u tunelima i kavernama u stijeni (Deb i Verma, 2016).....	17
Slika 3-3. GSI (Hrženjak i Briševac, 2009).....	18
Slika 4-1. Koeficijent k u ovisnosti o srednjem modulu deformabilnosti (Sheorey, 1993)	21
Slika 4-2. Primarno i sekundarno polje naprezanja (Vrkljan, 2013).....	22
Slika 4-3. Ploča s kružnim otvorom beskonačne dubine (Hrestak, 2010).....	22
Slika 4-4. Model za slučaj djelovanja vertikalnog naprezanja (Frgić, 2013).....	23
Slika 4-5. Preraspodjela tangencijalnih naprezanja za slučaj vertikalnog opterećenja (Frgić, 2013).....	25
Slika 4-6. Model prilikom djelovanja vertikalnog i horizontalnog naprezanja (Eberhardt, n.d.).....	26
Slika 4-7. Kvazihidrostatsko naprezanje (Eberhardt, n.d.).....	27
Slika 4-8. Krivulja sloma prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće (Hoek, 1983)	31
Slika 4-9. Vrijednosti konstante m_i (Hoek, 2007)	32
Slika 4-10. Vrijednosti parametra faktora poremećaja D (Hoek i Brown, 2018).....	33
Slika 5-1. Pojednostavljeni dijagram <i>RockStressCalc</i> programa	40
Slika 5-2. Ulazni parametri sekundarnih naprezanja i pomaka	41
Slika 5-3. Popis jediničnih težina stijenske mase	41
Slika 5-4. Mogućnosti prikaza sekundarnih naprezanja i pomaka	42
Slika 5-5. Proračun čvrstoće stijenske mase.....	43
Slika 5-6. Područje primjene kriterija čvrstoće	44
Slika 5-7. Područje primjene kriterija čvrstoće - Naizmjenična primjena	44
Slika 5-8. Područje primjene kriterija čvrstoće - Općenita primjena	44
Slika 5-9. Područje primjene kriterija čvrstoće – Tunelogradnja.....	44
Slika 5-10. Proračun modula deformabilnosti stijenske mase.....	44
Slika 5-11. Hoek - Brownovo rješenje iz 2002.	45
Slika 5-12. Hoek - Diedrichsovo rješenje iz 2006.....	45
Slika 5-13. Pojednostavljeno Hoek - Diedrichsovo rješenje iz 2006.	45
Slika 5-14. Izbornik za upravljanje datotekama	45
Slika 5-15. Izbornik za pohranjivanje ulaznih parametara	46

Slika 5-16. Izbornik za pohranjivanje rezultata proračuna.....	46
Slika 5-17. Dijagram prikaza ulaznih i izlaznih parametara proračuna sekundarnih naprezanja.....	47
Slika 5-18. Dijagram prikaza ulaznih i izlaznih parametara proračuna čvrstoće	49
Slika 5-19. Primjer ulaznih podataka proračuna sekundarnih naprezanja za $\theta = 0^\circ$	51
Slika 5-20. Mreža konačnih elemenata - Plaxis	51
Slika 5-21. Radijalno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc.....	52
Slika 5-22. Tangencijalno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	53
Slika 5-23. Posmično naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	53
Slika 5-24. Veće glavno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	54
Slika 5-25. Manje glavno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	54
Slika 5-26. Linijski dijagram sekundarnih naprezanja za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	55
Slika 5-27. Konturni prikaz većeg glavnog naprezanja za $\theta = 0^\circ$ - Plaxis	55
Slika 5-28. Linijski dijagram pomaka za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	56
Slika 5-29. Dijagram i iznos pomaka za $\theta = 0^\circ$ - Plaxis.....	57
Slika 5-30. Linijski dijagram sekundarnih naprezanja za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc	58
Slika 5-31. Linijski dijagram pomaka za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc	59
Slika 5-32. Dijagram i iznos pomaka za $\theta = 90^\circ$ - Plaxis.....	60
Slika 5-33. Naprezanja u kaloti tunela - RockStressCalc.....	61
Slika 5-34. Naprezanja u zidu tunela - RockStressCalc	62
Slika 5-35. Ulazni i izlazni podaci proračuna čvrstoće – RockStressCalc.....	63
Slika 5-36. Krivulja sloma za proračun čvrstoće - RockStressCalc.....	63
Slika 5-37. Ulazni i izlazni podaci za proračun čvrstoće - Plaxis	64

POPIS TABLICA

Tablica 3-1. Terenska i laboratorijska ispitivanja	8
Tablica 3-2. Sustavi klasifikacije stijenske mase (Deb i Verma, 2016)	9
Tablica 3-3. Klasifikacija stijena na temelju RQD (Deb i Verma, 2016)	10
Tablica 3-4. RMR klasifikacijski parametri i raspon vrijednosti bodovanja (Bieniawski, 1989).....	12
Tablica 3-5. Klasifikacija stijenske mase prema Q-sustavu (Deb i Verma, 2016).....	15
Tablica 3-6. Vrijednosti ESR (Hoek, 2007)	16
Tablica 3-7. GSI klasifikacija (Deb i Verma, 2016).....	18
Tablica 4-1. Vrijednosti MR (Hoek i Diedrichs, 2006).....	37
Tablica 5-1. Ulazni podaci za proces validacije	50
Tablica 5-2. Iznosi naprezanja za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc.....	52
Tablica 5-3. Iznos pomaka za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc	56
Tablica 5-4. Iznosi naprezanja za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc.....	58
Tablica 5-5. Iznos pomaka za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc	59
Tablica 5-6. Naprezanja u kaloti i zidu tunela - RockStressCalc	61

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
RQD	/	Indeks kvalitete stijene
J_n	/	Broj skupova pukotina
J_r	/	Indeks hrapavosti pukotina
J_a	/	Indeks promjene pukotine
J_w	/	Faktor pukotinske vode
SRF	/	Faktor redukcije naprezanja
D_e	m	Ekvivalentna dimenzija iskopa
ESR	/	Indeks podgrade
σ_v	Pa	Vertikalno naprezanje
σ_h	Pa	Horizontalno naprezanje
γ	N/m ³	Zapreminska težina
z	m	Dubina
k	/	Koeficijent bočnog pritiska tla/stijene
E_h	Pa	Srednji modul deformabilnosti
E	Pa	Youngov modul elastičnosti
ν	/	Poissonov koeficijent
G	Pa	Modul posmika
σ_r	Pa	Radijalno naprezanje
σ_θ	Pa	Tangencijalno naprezanje
$\tau_{r\theta}$	Pa	Posmično naprezanje
R	m	Radijus tunela
σ_1	Pa	Veće glavno naprezanje
σ_3	Pa	Manje glavno naprezanje
u_r	m	Radijalni pomak
u_θ	m	Tangencijalni pomak
σ_{ci}	Pa	Jednoosna tlačna čvrstoća
m, s, a	/	Konstante materijala
GSI	/	Geološki indeks čvrstoće (engl. <i>Geological Strength Index</i>)
D	/	Faktor poremećaja (engl. <i>Disturbance Factor</i>)

σ_c	Pa	Tlačna čvrstoća
σ_t	Pa	Vlačna čvrstoća
σ_n	Pa	Normalno naprezanje
τ	Pa	Posmično naprezanje
ϕ'	Pa	Kut trenja
c'	Pa	Kohezija
σ_{cm}'	Pa	Čvrstoća stijenske mase
<i>MR</i>	/	Koeficijent modula (engl. <i>Modulus Ratio</i>)
<i>RMR</i>	/	Geomehanička klasifikacija (engl. <i>Rock Mass Rating</i>)
<i>NGI</i>	/	Norveški geotehnički institut (engl. <i>Norwegian Geotechnical Intitute</i>)
<i>RMS</i>	/	Čvrstoća stijenske mase (engl. <i>Rock Mass Strength</i>)
<i>RMN</i>	/	Broj stijenske mase (engl. <i>Rock Mass Number</i>)
<i>UCS</i>	/	Jednoosna tlačna čvrstoća (engl. <i>Uniaxial Compressive Strength</i>)
<i>PLT</i>	/	Indeks točkaste čvrstoće (engl. <i>Point Load Test</i>)

1. UVOD

Tunelske građevine su značajan dio moderne infrastrukture jer pružaju rješenja za prijevoz, vodoopskrbu i odvodnju u urbanim i ruralnim sredinama. Projektiranje i izgradnja tunela zahtijevaju poznavanje geotehničkih i geoloških uvjeta lokacije, kao i karakteristika i ponašanja stijenske mase. Analiza naprezanja jedan je od najvažnijih aspekata projektiranja tunela jer se njenim pravilnim provođenjem i interpretacijom rezultata osigurava stabilnost i sigurnost tunela u različitim uvjetima opterećenja.

U svrhu istraživanja i dubljeg shvaćanja materije naprezanja, čvrstoće stijenske mase i stabilnosti tunelskih konstrukcija, u programskom jeziku Python napisan je program za proračun sekundarnih naprezanja uz kružni otvor u stijenskoj masi i čvrstoću stijenske mase.

U radu se u poglavljima 2. i 3. navode neka od najvažnijih geoloških i geotehničkih istraživanja, svojstva, ispitivanja i klasifikacije stijenske mase koja su potrebna za projektiranje kružnih tunela. Prikazane su ukratko in-situ i laboratorijske metode ispitivanja koje se koriste za određivanje svojstava stijenskih masa, te sustavi klasifikacije koji se koriste za kategorizaciju istih. U 4. poglavlju razrađena je problematika naprezanja, pomaka i čvrstoće materijala te su detaljno prikazana rješenja korištena prilikom izrade programa.

Jedna od ključnih metoda analize naprezanja koja je predmet istraživanja u ovom radu jest rješenje naprezanja oko ploče sa kružnim otvorom, predloženo od strane Kirscha. Ova metoda pruža analizu raspodjele naprezanja oko otvora tunela i koristi se u projektiranju tunela kružnog presjeka.

Cilj rada je izrada softvera (engl. *Software*) za proračun naprezanja tunela okruglog presjeka te usporedba rezultata proračuna sa rješenjima sofisticiranih programa koji svoju primjenu nalaze u području tunelogradnje. Osim toga, cilj rada je pružiti cjelovito razumijevanje analize naprezanja oko tunela kružnog poprečnog presjeka, važnosti geotehničkih i geoloških istraživanja, te svojstava i ponašanja stijenskih masa. Informacije iznesene u ovom diplomskom radu bit će dragocjene rudarskim inženjerima, geolozima i drugim stručnjacima koji se bave projektiranjem i gradnjom kružnih tunela. Namjera mu je poslužiti kao referenca za buduća istraživanja i kao vodič za praktičare u području tunelogradnje.

Prilikom određivanja opsega i hipoteze rada, pretpostavljeno je kako bi zadovoljavajuće razlike između rezultata proračuna dobivenih *RockStressCalc* i *Plaxis* softverima iznosile 10% u slučaju pretpostavke idealnih uvjeta (Škrlec, 2023).

2. OPĆENITO O TUNELIMA

Tunel je podzemna građevina koja služi za prolaz prometnica te provođenje vode ili komunalnih instalacija kroz prirodne ili umjetne zapreke ili ispod njih. Zbog povećanja broja stanovnika, širenja gradova, sve većih potreba za pitkom vodom, energijom i prijevozom, te sve većeg komunalnog standarda, potrebno je više prometnih, energetske i komunalnih objekata. S druge strane, nedostatak rekreacijskih površina i širenje pješačkih zona u gradovima, izraženija ekološka svijest, nastojanje da se spriječi buka i vibracije, te zaštititi priroda nameću potrebu da se, gdje je to moguće, mnogi objekti izgrađuju podzemno (Magdalenčić, 1997).

Vrste tunela razlikuju se prema namjeni, položaju, dubini i veličini poprečnog presjeka. Prema namjeni tuneli mogu biti: prometni, hidrotehnički i instalacijski. Osim toga, tuneli mogu biti plitki (do 10 m ispod površine) i duboki (više od 10 m ispod površine).

Prema položaju na terenu razlikuju se (Magdalenčić, 1997):

- a) *Brdski tunel* najčešći je tip tunela, a gradi se obično s namjenom da se svladaju terenske zapreke, a katkad i radi smanjenja nagiba pri svladavanju visinskih razlika. Tunel koji prolazi kroz veliki brdski masiv može ujedno biti i *vodorazvodni tunel*. On se naziva *bazni tunel* kad je niskoležeći, dug, i kad spaja dvije doline približno iste nadmorske visine, ili je visokoležeći, kraći, s usponima s obje strane i s prijelomom trase u tunelu.
- b) *Podvodni tunel* gradi se kako bi se svladale vodene prirodne zapreke (rijeke, jezera, kanali, morski zaljevi i prolazi). On može biti probijen kroz tlo ispod vodene zapreke ili položen na njezino dno (*uronjeni tunel*).
- c) *Gradski podzemni tunel* najčešće služi za promet podzemne željeznice, a u velikim se gradovima grade i cestovni tuneli za prolaz ispod velikih prometnih čvorišta, luka, stambenih četvrti i sl. Osim prometnih tunela, u gradu su vrlo rašireni i instalacijski tuneli.

Prema duljini razlikuju se:

- a) sasvim kratki (do 50 m),
- b) kratki (50 – 500 m),
- c) srednji (500 – 2 000 m),
- d) dugi (2 000 – 4 000) i
- e) vrlo dugi tuneli (dulji od 4 000 m).

Prema veličini poprečnog presjeka tuneli se dijele na:

- a) tunelne potkope ili hodnike ($5 - 16 \text{ m}^2$),
- b) tunele s malim profilom ($16 - 30 \text{ m}^2$),
- c) srednjim ($30 - 60 \text{ m}^2$),
- d) velikim ($60 - 80 \text{ m}^2$),
- e) vrlo velikim profilom (više od 80 m^2).

2.1. Geotehnička istraživanja u tunelogradnji

Geotehnika i geologija imaju ključnu ulogu u projektiranju i izgradnji tunela, utječući na ključne odluke kao što su izvedivost i trošak. Tlo ili stijena, koji okružuju tunel, za razliku od drugih građevinskih objekata, predstavljaju primarni nosivi sustav. Čvrstoća tla, odnosno stijene, održava iskop otvorenim do postavljanja potpornog sustava, a i nakon podgrađivanja značajno doprinosi nosivosti. Zbog toga se stijena ili tlo smatraju građevinskim materijalom čija su inženjerska svojstvima usporediva s betonom ili čelikom (Deb i Verma, 2016).

Dobro predviđanje svojstava tla i stijena, podzemne vode i primarnog stanja naprezanja ključno je za uspješno građenje i projektiranje tunela. Kako bi se to omogućilo potrebno je provesti istražne radove čije je cilj opis svih svojstava tla/stijene relevantnih za projektiranje tunela. Opseg istraživanja treba odgovarati veličini i svrsi tunela. Istražni radovi mogu se podijeliti na:

- a) preliminarna istraživanja,
- b) detaljna istraživanja,
- c) istraživanja za vrijeme građenja tunela.

Preliminarnim istražnim radovima obuhvaća se šire područje, a uključuje:

- a) pregled literature (geološke karte, hidrogeološke karte, seizmičnost područja, pregled podataka od projekata koji su na toj lokaciji ili u blizini),
- b) interpretaciju aero-foto snimaka kako bi se dobili podaci o topografiji, vegetaciji, upotrebi zemljišta, klizišta, rasjedi i sl.
- c) terenska istraživanja kojima se provodi površinska identifikacija stijena i tipova tla, strukturni detalji, glavne spojene točke i klizanja, rasjedna područja, hidrogeološka obilježja, geološke opasnosti (nestabilni obronci, područja sa značajnim uleknućima).

Na temelju rezultata preliminarnih istražnih radova određuje se opseg i količina potrebnih detaljnih istraživanja koja u pravilu uključuju:

- a) geofizička istraživanja,

- b) istražno bušenje,
- c) uzorkovanje,
- d) in-situ ispitivanja,
- e) laboratorijska ispitivanja.

Svrha detaljnih istražnih radova je određivanje svih potrebnih informacija za projektiranje i dimenzioniranje tunela, izrada ponudbene dokumentacije, procjena opasnosti za okolne objekte. U fazi izgradnje tunela provode se istraživanja tijekom građenja koja uključuju: inženjerskogeološka snimanja čela i izradu uzdužnog profila tunela, mjerenja pomaka konture tunela i točaka u stijenskoj masi, promatranje nivoa podzemne vode i in-situ ispitivanja.

Prema (Bickel i dr., 1996) nepredviđene okolnosti tijekom izgradnje tunela mogu dovesti do skupih odgoda i komplikacija. Međutim, tuneli podvrgnuti temeljitom istraživanju mogu imati manja prekoračenja rokova gradnje te samim time i troškova gradnje. Korisna ispitivanja za procjenu izvedivosti, sigurnosti, dizajna i ekonomičnosti projekta tunela uključuju:

- Razvijanja sveobuhvatnog razumijevanja regionalne geologije i hidrogeologije za projektiranje i građenje.
- Definiranje fizičkih karakteristika materijala koji će utjecati na ponašanje tunela.
- Pomoć u određivanju izvedivosti projekta i upozoravanje inženjera i izvođača na potencijalne poteškoće koji se mogu pojaviti tijekom izgradnje u svrhu razvitka planova za nepredviđene situacije.
- Pružanje podataka za odabir alternativnih metoda iskopa i podgrade i, kada je to moguće, određivanje najekonomičnije trase i dubine.
- Pružanje specifičnih projektnih parametara za stijene, tlo i hidrogeologiju.
- Predviđanje kako će se tlo, odnosno stijena i podzemna voda ponašati prilikom iskopavanja i podupiranja različitim metodama.
- Utvrđivanje konačnih projektnih uvjeta tako da se "promijenjeni uvjeti" mogu pravedno identificirati i riješiti tijekom izgradnje
- Poboljšanje sigurnosti na radu.
- Pružanje iskustva u radu sa specifičnim tlom i/ili stijenom na gradilištu kroz opsežna ispitivanja ili preliminarna istraživanja, što može poboljšati kvalitetu projekta i terenskih odluka donesenih tijekom izgradnje.

- Pružanje specifičnih podataka potrebnih za pripremu procjena troškova, produktivnosti i rasporeda za odluke o projektu i za procjene troškova od strane investitora i izvođača.

2.2. Geološka istraživanja u tunelogradnji

Poznavanje geološkog sastava terena duž trase tunela od velike je važnosti za projektiranje, gradnju i uporabu podzemnih objekata. Rijetko koji inženjerski objekt iziskuje tako pažljivo i detaljno proučavanje inženjerskogeoloških prilika kao što to zahtjeva gradnja podzemnih objekata. Značenje je tih istraživanja to veće što je objekt dublje pod površinom terena (Magdalenić, 1997).

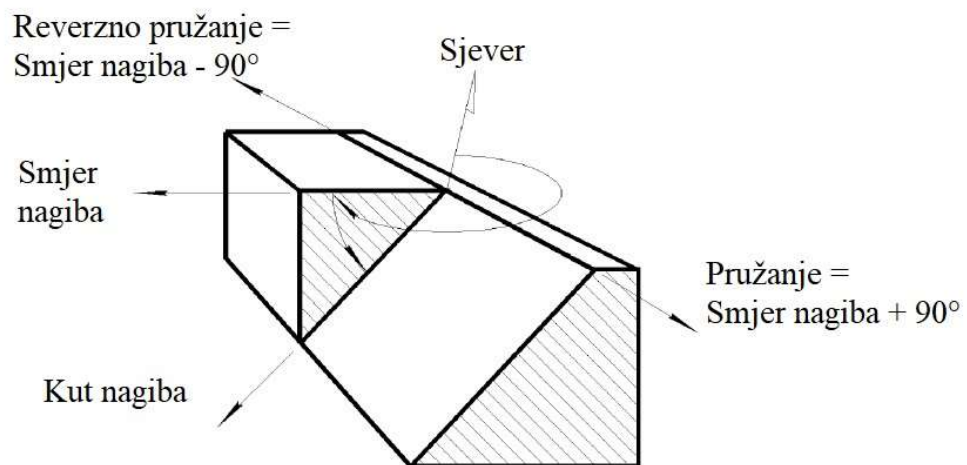
Prema geološkoj građi i geološkim uvjetima gradnje razlikuju se (Magdalenić, 1997):

- Laki tuneli* su oni koji se grade u čvrstim stijenskim masama. To su magmatske stijene velike čvrstoće i žilavosti te sedimentne stijene (vapnenci i dolomiti) veće čvrstoće i žilavosti. Pri gradnji tunela u tim stijenskim masama nema većih deformacija iskopanih prostora, pa nije potrebno podgrađivanje.
- Srednje teški tuneli* grade se kroz meke stijenske mase, kao što su meki glinoviti pješčenjaci, lapori, neki škriljavci, prapor i slični materijali. U takvim stijenama pojavljuju se nakon iskopa manji vertikalni pomaci, a katkad i bočni, koji opterećuju podgradu.
- Teški tuneli* grade se u stijenama koje su u raspadanju. To mogu biti i jako zdrobljene stijene već spomenutih kategorija. U tim se tunelima pojavljuje utjecaj vode i zraka, prisutne su veće deformacije i tlakovi, što sve zahtijeva osiguranje iskopanog obrisa tunela uz oprezan rad.
- Vrlo teški tuneli* grade se u terenima od pijesaka zasićenih vodom, raspadnutih glinovitih škriljavaca, glina muljevitih zemljišta. U njima je stijenska masa pokretljiva, pa može nastati urušavanje. Česte su i poteškoće s vodom. Zato je potrebna složena i jaka podgrada, te vrlo oprezan rad, jer se pri gradnji tunela u tim sredinama pojavljuju veliki tlakovi.

Gradnja podzemnih objekata ovisi o nizu inženjerskogeoloških čimbenika, koji se uklapaju u prognozni inženjerskogeološki profil. Cilj je istraživanja da prognozni profil bude što bliži stvarnom profilu. Prognozni inženjersko-geološki profil služi projektantu kao podloga za izradu projekta podzemne konstrukcije i građevne tehnologije. Istraživanja obuhvaćaju litološki sastav i tektonski sklop terena, hidrogeološke prilike, pojavu zapaljivih

ili otrovnih plinova, temperaturu pri izbijanju tunela, fizikalno-mehanička svojstva stijena i prognozu podzemnih tlakova (Magdalenić, 1997).

Stijenske mase rijetko su kontinuirane, homogene ili izotropne, a često su ispresijecane raznim diskontinuitetima kao što su rasjedi i pukotine. Također se mogu sastojati od različitih vrsta stijena koje su prošle različite stupnjeve promjene ili trošenja. Ponašanje stijenske mase prilikom podzemnih iskopa ovisi o svojstvima stijenskog materijala i diskontinuiteta. Cjeloviti inženjerskogeološki opis stijenske mase uključuje pojedinosti o stijenskom materijalu i prirodnim diskontinuitetima, kao i procjenu potencijalnog utjecaja podzemnih voda. Strukturno kartiranje je također važno u projektiranju podzemnih iskopa, jer pomaže u određivanju orijentacije glavnih skupova pukotina i procjeni mogućih načina strukturalnog sloma kao što je prikazano na slici 2-1 (Hoek i dr., 2012).



Slika 2-1. Pružanje, kut nagiba, smjer nagiba (Hoek i dr., 2012)

3. ISPITIVANJA I KLASIFIKACIJE STIJENA

U ovom poglavlju ukratko su prikazana neka od terenskih i laboratorijskih mjerenja te klasifikacija stijenske mase koja su od posebnog značaja za iskop i gradnju tunela. Kvalitetna interpretacija i razumijevanje njihovih rezultata ključna su po pitanju osiguranja stabilnosti i sigurnosti tunela tijekom izgradnje i kroz cijeli vijek trajanja. Navedena ispitivanja i klasifikacije imaju velik utjecaj na softverske alate u tunelogradnji, poput *RockStressCalc* softvera, koji je razvijen u sklopu ovog rada.

Program je namijenjen da koristi ulazne parametre dobivene iz navedenih terenskih, laboratorijskih mjerenja i klasifikacija kako bi omogućio što preciznije analize naprezanja i pomaka u stijenskim masama. Kvaliteta ulaznih podataka, kao što su jedinična težina stijenske mase, Poissonov koeficijent, modul deformabilnosti te omjer horizontalnog i vertikalnog naprezanja za analizu naprezanja prema Kirschovoj jednadžbi, te Hoek-Brownovi parametri čvrstoće, izravno su ovisni o točnosti i pouzdanosti rezultata dobivenih metodama ispitivanja i klasifikacija.

Terenska ispitivanja obuhvaćaju prikupljanja podataka o svojstvima stijenske mase, a to su istražno bušenje i ispitivanje Schmidtovim čekićem koji ima namjenu indirektnog mjerenje čvrstoće stijena. Mjerenja in-situ naprezanja u stijenskim masama obuhvaćaju metodu tlačnih jastuka, pokus hidrauličnog frakturiranja ili ispitivanje deformacijskom sondom (engl. *U.S. Bureau of Mines, USBM*). Kako bi se dobila detaljna fizičko-mehanička svojstava stijenske mase provode se laboratorijska ispitivanja koja uključuju određivanje jednoosne tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, troosna tlačna čvrstoća za analizu stijena pod višeosnim opterećenjem te indeks točkaste čvrstoće kao indikator stijenske čvrstoće. Neka od ispitivanja krutosti su opterećenje pločom, radijalno opterećenje, veliki tlačni jastuci te fleksibilni ili kruti dilatometar. Sustavi klasifikacije, kao što su indeks kvalitete stijenske mase (engl. *Rock Quality Designation, RQD*), geomehanička klasifikacija (engl. *Rock Mass Rating, RMR*), Q i geološki indeks čvrstoće (engl. *Geological Strength Index, GSI*), omogućuju procjenu kvalitete stijenske mase i odabir najprikladnije metode izgradnje tunela. U tablici 3-1 prikazan je sažetak potrebnih ispitivanja s ciljem što točnije interpretacije izlaznih podataka programa.

Tablica 3-1. Terenska i laboratorijska ispitivanja

Terenska ispitivanja	In-situ mjerenja naprezanja	Laboratorijska ispitivanja	Ispitivanja krutosti
Istražno bušenje	Metoda tlačnih jastuka	Jednoosno tlačno ispitivanje	Ispitivanje opterećenja pločom
	Pokus hidrauličkog frakturiranja	Troosno tlačno ispitivanje	Pokus radijalnog opterećenja
Schmidtov čekić	USBM	Ispitivanje vlačne čvrstoće	Veliki tlačni jastuci
	CSIR ili CSIRO sonda	Indeks točkaste čvrstoće	Fleksibilni dilatometar
			Kruti dilatometar

3.1. Sustavi klasifikacije

Sustavi za klasifikaciju stijenskih masa koriste se za procjenu stabilnosti stijenskih konstrukcija te za odabir odgovarajućeg podzemnog potpornog sustava. Sustavi klasifikacije stijenske mase koriste numeričke vrijednosti za procjenu utjecaja specifičnih stijenskih parametara na ukupna svojstva stijenske mase. Numeričke vrijednosti koriste se za klasificiranje stijenske mase u skupinu na temelju njezine kvalitete. Ovi sustavi klasifikacije nisu namijenjeni zamjeni dublje analize ili terenskih promatranja, već pružaju način za brzu kategorizaciju kvalitete stijenske mase na temelju pojedinih mjerljivih parametara (Deb i Verma, 2016).

Postoje različiti sustavi klasifikacije stijenske mase koji koriste tri kategorije parametara: parametre pukotina (diskontinuiteta), parametre materijala i rubne uvjete. Neki od sustava klasifikacije prikazani su tablicom 3-2. Oznaka kvalitete stijene RQD često se koristi kao parametar u drugim sustavima klasifikacije stijenske mase. Geomehanička klasifikacija (RMR) i Q-sustav obično se koriste za projektiranje nosivih sustava stijena, dok se geološki indeks čvrstoće (GSI) koristi za procjenu projektnih parametara. GSI sustav je jedini sustav klasifikacije stijenske mase koji je izravno povezan s inženjerskim modelima ponašanja tla poput Hoek - Brownovih parametara čvrstoće (Deb i Verma, 2016).

Tablica 3-2. Sustavi klasifikacije stijenske mase (Deb i Verma, 2016)

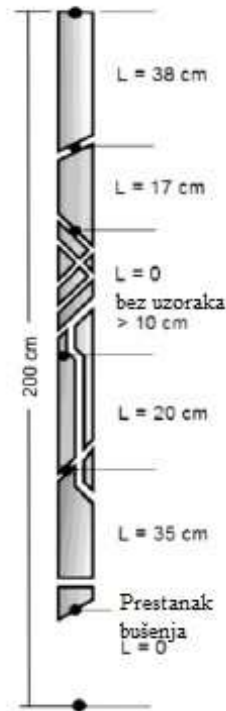
Ime klasifikacije	Organizator i godina	Primjena
Teorija opterećenja stijene (engl. <i>Rock Load Theory</i>)	Terzaghi (1946)	Tuneli s čeličnom podgradom; Neprikladan za modernu tunelogradnju
Nova austrijska metoda tuneliranja (engl. <i>New Austrian Tunneling Method, NATM</i>)	Rabcewicz (1964-65, 1972)	Tunelogradnja u nekompetentnom tlu
Indeks kvalitete stijene (engl. <i>Rock Quality Designation, RQD</i>)	Deere, Hendron, Patton, Cording (1967)	Tunelogradnja; Osjetljiv na orijentacijske efekte
Geomehanička klasifikacija (engl. <i>Rock Mass Rating, RMR</i>)	Bieniawski (1973, 1989)	Tunelogradnja, rudarstvo
NGI / Q – sustav	Barton, Lien, Lunde (1974, 2002)	Tunelogradnja i široki podzemni otvori
Čvrstoća stijenske mase (engl. <i>Rock Mass Strength, RMS</i>)	Stille, Groth, Fredriksson (1982)	Modificirani RMR
Geološki indeks čvrstoće (engl. <i>Geological Strength Index, GSI</i>)	Hoek, Kaiser, Bawden (1995)	Tunelogradnja, rudarstvo
Indeks stijenske mase (engl. <i>Rock Index, RMi</i>)	Palmstrom (1995)	Tunelogradnja, rudarski otvori
Broj stijenske mase (engl. <i>Rock Mass Number, RMN</i>)	Singh, Goel (1999)	Q – sustav bez naprezanja

3.1.1. RQD

Indeks kvalitete stijenske mase (RQD) kreirali su Deere, Hendron, Patton i Cording 1967. godine. Izračunava se kao postotak dijelova jezgre bušotine dužih od 10 cm i ukupne duljine uzorka stijene koji se dobije istražnim bušenjem s uzorkovanjem. Na RQD uvelike utječe tehnika bušenja, kao što je prikazano u jednadžbi 3-1.

$$RQD = \frac{\sum \text{Duljina dijelova jezgre} > 10 \text{ cm}}{\text{Ukupna duljina jezgre}} \quad (3-1)$$

RQD je jednostavan i brz način za mjerenje kvalitete stijenske mase i može se lako ugraditi u normalan proces istražnog bušenja bez značajnog povećanja troškova istraživanja lokacije. RQD ovisi o orijentaciji bušotine te ne uzima u obzir čimbenike poput orijentacije pukotina, razmaka i procjeđivanja, koji mogu utjecati na ponašanje stijenske mase oko podzemnih i površinskih iskopa. Klasifikacija stijena na temelju indeksa kvaliteta stijene iskazana je u tablici 3-3, dok je slikom 3-1 dan prikaz jezgre bušotine (Deb i Verma, 2016).



Slika 3-1. RQD (Deb i Verma, 2016)

Tablica 3-3. Klasifikacija stijena na temelju RQD (Deb i Verma, 2016)

RQD (%)	Kvaliteta stijene
< 25	Vrlo loša
25-50	Loša
50-75	Srednja
75-90	Dobra
90-100	Odlična

3.1.2. Geomehanička ili RMR klasifikacija

Geomehaničku klasifikaciju ili RMR, razvio je prof. Z.T. Bieniawski 1976. godine, a modificiran je 1989. RMR zahtijeva samo nekoliko osnovnih parametara povezanih s geometrijom i mehaničkim svojstvima stijenske mase. Izvorni RMR sustav (1976.) uključivao je osam parametara, dok je modificiranoj verziji sustava predloženoj 1989., Bieniawski iznio šest parametara. Parametri koji čine modificirani RMR sustav (1989.) su sljedeći (Deb i Verma, 2016), a njihovo bodovanje iskazano je u tablici 3-4:

- a) Jednoosna tlačna čvrstoća (engl. *Uniaxial Compressive Strength*, UCS) ili indeks točkaste čvrstoće (engl. *Point Load Test*, PLT),
- b) RQD,
- c) razmak diskontinuiteta (pukotina),
- d) stanje diskontinuiteta (pukotina),
- e) orijentacija diskontinuiteta i
- f) stanje podzemne vode.

Nakon bodovanja stijensku masu je moguće klasificirati u pet kategorija:

- a) RMR (100 - 81) - vrlo dobra stijenska masa,
- b) RMR (80 - 61) – dobra stijenska masa,
- c) RMR (60 - 41) – povoljna stijenska masa,
- d) RMR (40 - 21) – slaba stijenska masa,
- e) RMR (< 21) – vrlo slaba stijenska masa.

Tablica 3-4. RMR klasifikacijski parametri i raspon vrijednosti bodovanja (Bieniawski, 1989)

A) Klasifikacijski parametri i bodovanje									
Parametri			Raspon vrijednosti						
1	Čvrstoća intaktne stijene (MPa)	PLT	>10	4-10	2-4	1-2	Preporuka: ispitivanje UCS		
		UCS	250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Bodovi		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Bodovi		20	17	13	8	3		
3	Razmak diskontinuiteta		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Bodovi		20	15	10	8	5		
4	Stanja diskontinuiteta		Vrlo hrapave površine. Nisu kontinuirani. Bez zijeva. Rastrošeni.	Neznatno hrapave površine. Zijev < 1 mm. Neznatno rastrošena stijenska zidova.	Neznatno hrapave površine. Zijev < 1 mm. Jako rastrošena stijenska zidova.	Skliste površine. Ispuna < 5 mm debljine. Zijev 1 – 5 mm. Kontinuirani.	Mekana ispuna > 5 mm debljine. Zijev > 5 mm. Kontinuirani		
	Bodovi		30	25	20	10	0		
5	Podzemna voda	Dotok na 10 m duljine tunela (l/m)	Nema	< 10	10-25	25-125	> 125		
		Odnos tlaka pukotinske vode i većeg glavnog naprezanja	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Opći uvjeti	Kompletno suho	Vlažno	Mokro	Kapanje	Tečenje		
	Bodovi		15	10	7	4	0		

B) Korekcija bodova s obzirom na orijentaciju diskontinuiteta						
Orijentacija diskontinuiteta		Vrlo povoljna	Povoljna	Dobra	Nepovoljna	Vrlo nepovoljna
Bodovi	Tuneli i rudnici	0	-2	-5	-10	-12
	Temelji	0	-2	-7	-15	-25
	Kosine	0	-5	-25	-50	-60

C) Kategorizacija stijenske mase na osnovi ukupnog broja bodova					
Ukupni bodovi	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Oznaka kategorije	I	II	III	IV	V
Opis	Vrlo dobra stijena	Dobra stijena	Povoljna stijena	Slaba stijena	Vrlo slaba stijena

D) Značenje pojedinih kategorija					
Oznaka kategorije	I	II	III	IV	V
Prosječno vrijeme postojanosti	20 god/15 m raspona	1 god/10 m raspona	1 tj/5 m raspona	10 h/2,5 m raspona	30 min/1 m raspona
Kohezija stijenske mase (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Kut trenja stijenske mase	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15

E) Vodič za klasifikaciju stanja diskontinuiteta					
Duljina diskontinuiteta	< 1	1-3	3-10	10-20	> 20
Bodovi	6	4	2	1	0
Zijev diskontinuiteta	Nema	< 0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	> 5 mm
Bodovi	6	5	4	1	0
Hrapavost diskontinuiteta	Vrlo hrapavi	Hrapavi	Neznatno hrapavi	Glatki	Skliški
Bodovi	6	5	3	1	0
Ispuna diskontinuiteta	Bez	Tvrda ispuna < 5 mm	Tvrda ispuna > 5 mm	Meka ispuna < 5 mm	Meka ispuna > 5 mm
Bodovi	6	4	2	2	0
Trošnost diskontinuiteta	Nerastrošen	Neznatno rastrošen	Umjereno rastrošen	Jako rastrošen	Potpuno rastrošen
Bodovi	6	5	3	1	0

F) Efekt orijentacije diskontinuiteta u tunelogradnji			
Pružanje okomito osi tunela		Pružanje paralelno osi tunela	
Iskop u smjeru nagiba diskontinuiteta 45-90°	Iskop u smjeru nagiba diskontinuiteta 20-45°	Nagib 45-90°	Nagib 20-45°
Vrlo povoljno	Povoljno	Vrlo nepovoljno	Dobro
Iskop u smjeru suprotnom od nagiba diskontinuiteta 45-90°	Iskop u smjeru suprotnom od nagiba diskontinuiteta 20-45°		
Dobro	Nepovoljno	Dobro	

3.1.3. Q klasifikacija

Barton, Lien i Lunde s Norveškog geotehničkog instituta (engl. *Norwegian Geotechnical Institute*, NGI) predložili su indeks kvalitete stijenske mase Q 1974. godine kao način za određivanje karakteristika stijenske mase i zahtjeva za potporu tunela na temelju procjene brojnih povijesnih slučajeva podzemnih iskopavanja. Numerička vrijednost Q indeksa kreće se od 0,001 do najviše 1000 na logaritamskoj skali, a definira ju jednadžba 3-2:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (3-2)$$

Gdje je:

RQD – indeks kvalitete stijene,

J_n – broj skupova pukotina,

J_r – indeks hrapavosti pukotina,

J_a – indeks promjene pukotine,

J_w – faktor pukotinske vode i

SRF – faktor redukcije naprezanja (engl. *Stress Reduction Factor*).

Q -sustav se sastoji od tri kvocijenta međusobno pomnoženih, kao što je prikazano izrazom 3-5. Prvi kvocijent (RQD/J_n) predstavlja strukturu stijenske mase, a gruba je mjera veličine bloka. Drugi kvocijent (J_r/J_a) iskazuje hrapavost, dok vrijednost posmične čvrstoće pukotina iznosi $\tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \right)$. Treći kvocijent (J_w/SRF) sastoji se od dva parametra naprezanja

i opisuj princip "aktivnog naprezanja". Klasifikacija stijenske mase prema Bartonu prikazana je tablicom 3-5.

Tablica 3-5. Klasifikacija stijenske mase prema Q-sustavu (Deb i Verma, 2016)

Q - vrijednost	Klasa	Ocjena stijenske mase
400 – 1000	A	Izuzetno dobra
100 – 400	A	Ekstremno dobra
40 – 100	A	Vrlo dobra
10 – 40	B	Dobra
4 – 10	C	Povoljna
1 – 4	D	Loša
0.1 – 1.0	E	Vrlo loša
0.01 – 0.1	F	Ekstremno loša
0.001 – 0.01	G	Izuzetno loša

Barton i dr. (1974) definirali su parametar nazvan ekvivalentna dimenzija iskopa (D_e), kako bi se vrijednost Q povezalo sa zahtjevima stabilnosti i potpore podzemnih iskopa. Ekvivalentna dimenzija iskopa je omjer raspona, promjera ili visine zida iskopa i indeksa podgrade (engl. *Excavation Support Ratio, ESR*) iz jednadžbe 3-3 (Deb i Verma, 2016).

$$D_e = \frac{\text{Raspon iskopa, promjer, visina (m)}}{ESR} \quad (3-3)$$

Gdje je:

D_e – ekvivalentna dimenzija otkopa podzemne prostorije (m),

ESR – indeks podgrade.

Vrijednost ESR povezana je s namjenom iskopa i stupnjem sigurnosti koji se zahtijeva od potpornog sustava instaliranog za održavanje stabilnosti iskopa. U tablici 3-6 se nalaze

predložene vrijednosti (Hoek, 2007). Na slici 3-2 nalazi se unaprijeđeni Q dijagram za odabir podgrade tunela u stijeni.

Tablica 3-6. Vrijednosti ESR (Hoek, 2007)

Kategorija iskopa	ESR
Privremeni rudarski iskopi	3-5
Trajni rudarski iskopi, vodeni tuneli za hidroenergiju (isključujući visokotlačne cjevovode), pilot tuneli, bušotine za velike iskope	1.6
Skladišta, postrojenja za pročišćavanje vode, manji cestovni i željeznički tuneli, vodne komore, pristupni tuneli	1.3
Elektrane, veliki cestovni i željeznički tuneli, podzemna spremišta, civilne podzemne komore i skloništa, portali	1.0
Podzemne nuklearne elektrane, metro, temelji sportskih i javnih objekata, tvornice	0.8

Barton i dr. (1980) definirali su vezu između duljine sidara (L_s), širinom iskopa (B) i indeksom podgrade (ESR) kao:

$$L_s = \frac{2 + 0.15B}{ESR} \quad (3-4)$$

Gdje je:

L_s – duljina sidara (m),

B – širina iskopa (m) i

ESR – indeks podgrade.

Maksimalni nepodgrađeni raspon iznosi:

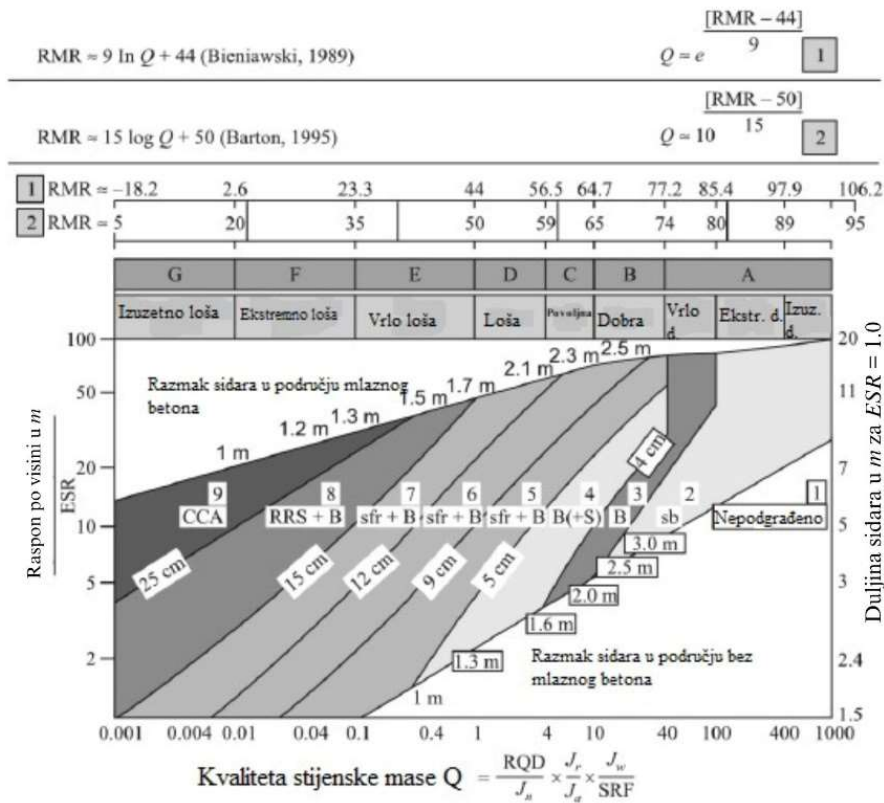
$$MNR = 2 \cdot ESR \cdot Q^{0.4} \quad (3-5)$$

Gdje je:

MNR – maksimalni nepodgrađeni raspon,

ESR – indeks podgrade,

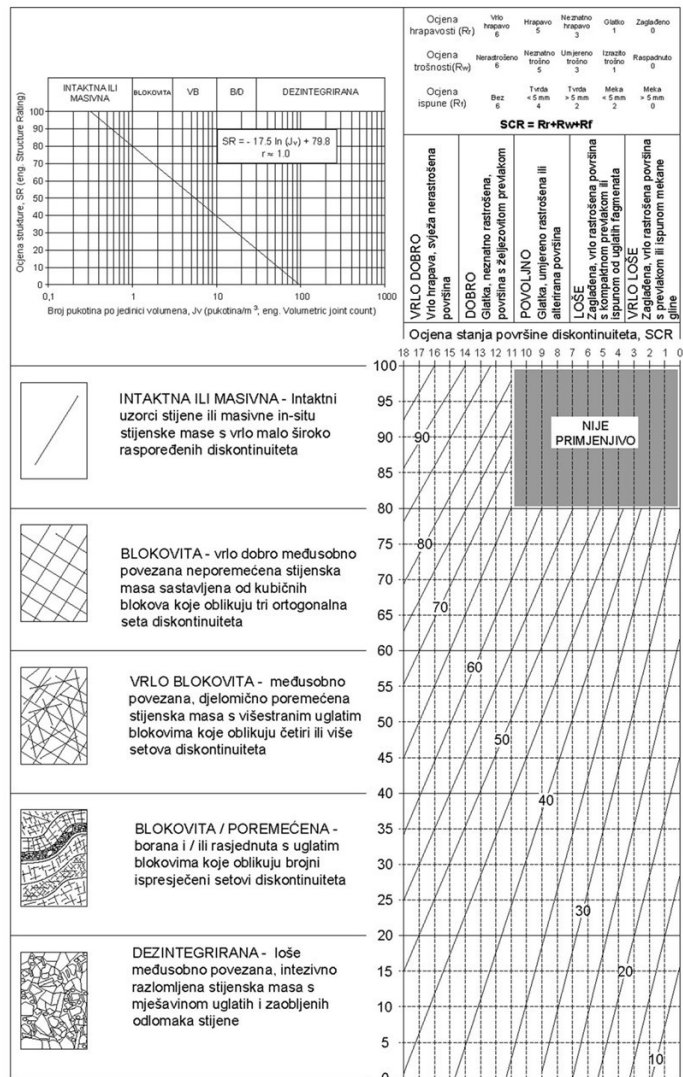
Q – vrijednost dobivena klasifikacijom.



Slika 3-2. Unaprijeđeni Q - podgradni dijagram za odabir podgrade u tunelima i kavernama u stijeni (Deb i Verma, 2016)

3.1.4. GSI

Geološki indeks čvrstoće (engl. *Geological Strength Index*, GSI), koji je razvio Hoek 1994. i dodatno poboljšao u kasnijim radovima sa suradnicima, je pojednostavljeni klasifikacijski sustav stijenskih masa na temelju promatranja na terenu. Terenska promatranja se zasnivaju na procjeni litologije, strukture, i uvjeta površine diskontinuiteta u stijenskoj masi. GSI je numerička ljestvica koja se kreće od oko 5 za izrazito slabe stijenske mase do 100 za izuzetno jake stijenske mase. GSI karakteriziraju dva osnovna svojstva stijenske mase: blokovitost i značajke diskontinuiteta, kao što je prikazano slikom 3-3. U tablici 3-7 nalazi se klasifikacija stijenske mase na temelju dobivene GSI vrijednosti.



Slika 3-3. GSI (Hrženjak i Briševac, 2009)

Tablica 3-7. GSI klasifikacija (Deb i Verma, 2016)

Vrijednost GSI	76-95	56-75	36-55	21-35	< 20
Kvaliteta stijenske mase	Vrlo dobra	Dobra	Povoljna	Slaba	Vrlo slaba

4. ČVRSTOĆA I NAPREZANJA

U ovom djelu objašnjeni su pojmovi primarnih i sekundarnih napreznja stijenskog materijala kao i samog kriterija čvrstoće korištenih u programu za analizu napreznja tunela kružnog presjeka razvijenog u sklopu ovog rada.

4.1. In-situ napreznja

Stijene u dubini podvrgnute su raznim napreznjima, uključujući one uzrokovane težinom gornjih slojeva i one koje proizlaze iz tektonske aktivnosti. Stijena podvrgnuta inženjerskom zahvatu se nalazi u poremećenom polju napreznja, a u okolnu se stijenu uvode nova napreznja (sekundarna ili potaknuta napreznja). Razumijevanje veličine i smjera ovih in-situ i sekundarnih napreznja ključno je u projektiranju podzemnih iskopa, budući da se čvrstoća stijene može premašiti i može doći do nestabilnosti.

Prema Hoeku (2007.) primarna napreznja mogu se podijeliti na vertikalna i horizontalna. Razmatranjem elementa stijene na dubini z ispod površine dobije se izraz za vertikalno napreznje. Napreznje za navedeni element je umnožak zapreminske težine i dubine na kojoj se nalazi (4-1):

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (4-1)$$

Gdje je:

σ_v – vertikalno napreznje (kPa),

γ – zapreminska težina (kN/m³),

z – dubina ispod površine (m).

Horizontalna napreznja koja djeluju na element stijene na dubini z ispod površine puno je teže procijeniti nego vertikalna napreznja. Obično se omjer prosječnog horizontalnog napreznja i vertikalnog napreznja označava koeficijentom k kao u jednadžbi 4-2 (Hoek, 2007).

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

Gdje je:

σ_h – horizontalno napreznje (kPa),

k – bočni potisak stijenske mase.

Terzaghi i Richart (1952) predložili su za stijensku masu pod gravitacijskim opterećenjem, bez bočnog naprezanja tijekom formiranja gornjih slojeva, konstantnu vrijednost k , neovisnu o dubini. Taj se izraz (4-3) naširoko koristio u ranoj mehanici stijena, ali se od tada pokazalo netočnim i danas se rijetko koristi (Hoek, 2007).

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (4-3)$$

Gdje je:

ν – Poissonov koeficijent.

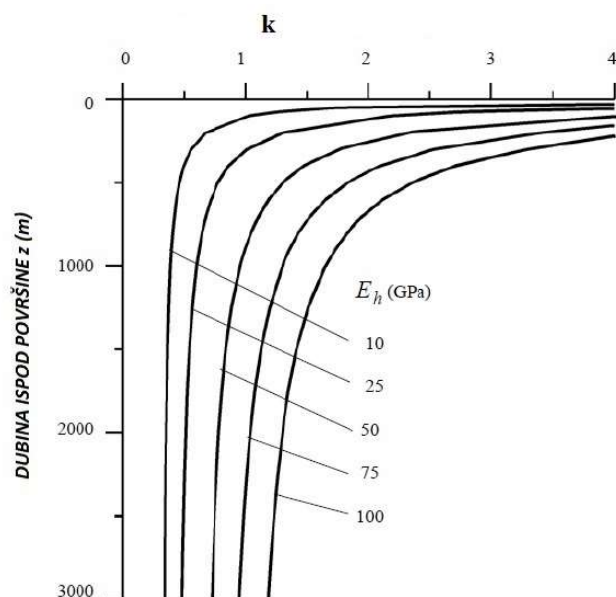
S obzirom da je izraz 4-3 primjenjiv u područjima nedavne sedimentacije te se tada može primijeniti teorija elastičnosti korištenjem izraza za koeficijent bočnog pritiska. Formulacija slijedi iz simetrije jednodimenzionalnog opterećivanja elastičnog materijala, gdje je uzeto u obzir nepostojanje horizontalnih deformacija. Stoga formula nema značaj za stijenske mase koje su prošle mnoge cikluse opterećenja i rasterećenja. Provođenjem mjerenja horizontalnih naprezanja u velikom broju podzemnih građevina i rudnika, pokazalo se da koeficijent bočnog pritiska ima veće vrijednosti u manjim dubinama, te da mu se vrijednost smanjuje povećanjem dubine. Sheorey (1993.) je razvio elasto-statički termalni model zemlje koji razmatra zakrivljenost zemljine kore i varijaciju elastičnih konstanti, gustoće i termalne ekspanzije zemljine kore, te je sukladno tome predložio jednadžbu 4-4 (Hoek, 2007).

$$k = 0.25 + 7 \cdot E_h \cdot \left(0.001 + \frac{1}{z}\right) \quad (4-4)$$

Gdje je:

E_h - srednji modul deformabilnosti gornjeg dijela zemljine kore mjeren u vodoravnom pravcu (GPa).

Niti navedeni Sheoreyev pristup ne objašnjava pojave vertikalnih naprezanja većih od izmjerenih, pojave vrlo visokih horizontalnih naprezanja te pojave česte nejednakosti između dva mjerena horizontalna naprezanja na istoj lokaciji. Pretpostavlja se da je tomu razlog lokalne topografije i svojstava geologije koji se ne mogu uzeti u obzir u velikoj skali. Slika 4-1 grafički je prikaz vrijednosti k za omjer horizontalnih i vertikalnih naprezanja u ovisnosti o srednjem modulu deformabilnosti prema Sheoreyevoj jednadžbi 4-4.



Slika 4-1. Koeficijent k u ovisnosti o srednjem modulu deformabilnosti (Sheorey, 1993)

Poznavanjem stanja napreznja, prema teoriji elastičnosti je moguće odrediti stanje deformacija (ali i obratno). Za dvodimenzionalni slučaj vrijednosti napreznja su prikazane izrazima od 4-5 do 4-8 (Timoshenko i Goodier, 1951).

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} [\varepsilon_{xx} + \nu \cdot \varepsilon_{yy}] \quad (4-5)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} [\varepsilon_{yy} + \nu \cdot \varepsilon_{xx}] \quad (4-6)$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} = G \cdot 2 \cdot \varepsilon_{xy} \quad (4-7)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4-8)$$

Gdje je:

E – Youngov modul elastičnosti (kPa),

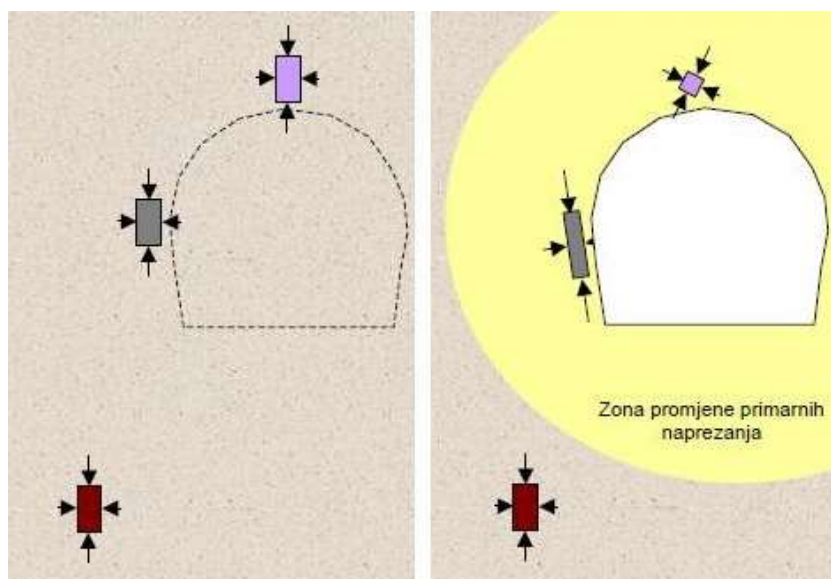
G – Modul posmika (kPa),

ν – Poissonov koeficijent.

4.2. Sekundarna napreznja - Kirschovo rješenje

Napreznje u stijeni na dubini z prije inženjerskog zahvata izazvano je masom gornjih naslaga i geološke povijesti. Polje primarnih napreznja poremeti se uslijed inženjerskog zahvata u ili na stijenskoj masi što je prikazano na slici 4-2. Novonastalo poremećeno stanje napreznja u njemačkoj se literaturi naziva sekundarnim napreznjem, dok se u engleskoj literaturi navodi kao izazvano napreznje (engl. *Induced stress*). Ponekad sekundarna

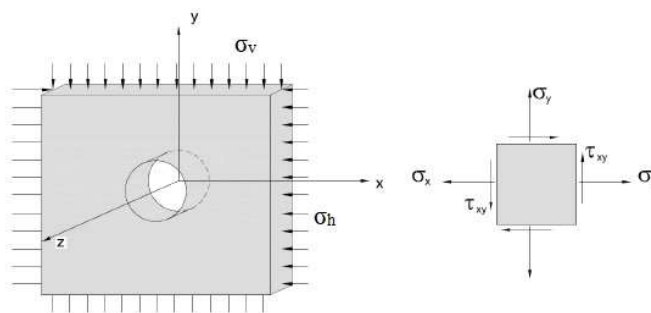
naprezanja mogu biti dovoljno visoka da premaše čvrstoću stijenske mase, te tako dovesti do gubitka stabilnosti i urušavanja otvora iskopa (Vrkljan, 2013).



Slika 4-2. Primarno i sekundarno polje naprezanja (Vrkljan, 2013)

Za proračun stanja naprezanja i deformacija otvor tunela na nekoj dubini promatra se kao otvor u beskonačnoj dubini. Naprezanja uz otvor objašnjava teorija elastičnosti uzimajući u obzir homogen, izotropan i elastičan materijal (Hrestak, 2010).

Kod tunela opterećenje djeluje u ravnini koja je okomita na uzdužnu os z i jednakog je intenziteta uzduž osi tunela. Poprečni presjeci nalaze se u istom stanju pa ih prikazujemo s dvije fiksne ravnine u jediničnom razmaku. Tako razdvojena ploča s otvorom (slika 4-3) nalazi se u stanju ravninske deformacije. U svakoj točki ravnine imamo tri komponente tenzora naprezanja σ_x , σ_y i τ_{xy} , kao funkcije koordinata x i y (naprezanja su označena prema teoriji elastičnosti) (Hrestak, 2010).

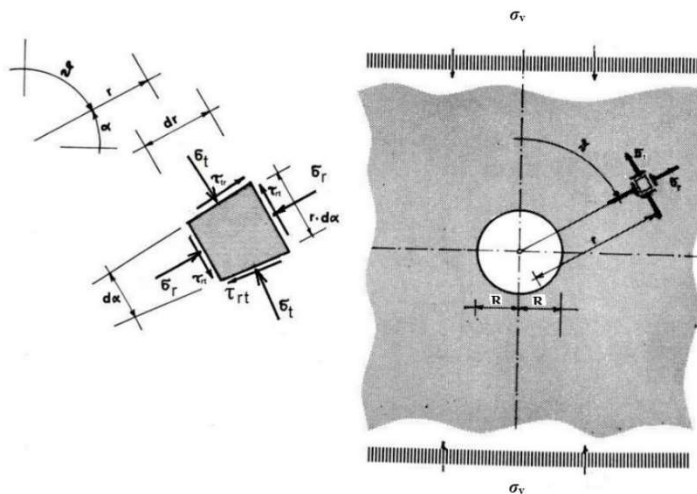


Slika 4-3. Ploča s kružnim otvorom beskonačne dubine (Hrestak, 2010)

Za čitav niz promatranja pojava oko profila podzemnih prostorija kao osnova mogu poslužiti zatvorena analitička rješenja prema teoriji elastičnosti, iako stijenska masa nema uvijek izrazito elastična svojstva. Pod zatvorenim analitičkim rješenjem podrazumijevaju se rješenja koja neki model ponašanja opisuju jednostavnim analitičkim jednadžbama za koje postoji jedinstveno rješenje. Veći broj tih rješenja pretpostavlja elastičan, homogen i izotropan medij, dok ostala rješenja mogu dati rezultate i za elasto-plastičan, elasto-ortotropni, linearno-viskoelastični i uslojeni anizotropni materijal.

4.2.1. Slučaj vertikalnog naprezanja

Kod određivanja stanja naprezanja i pomaka oko podzemnog otvora vrlo se često primjenjuje polarni koordinatni sustav, koji je osobito povoljan za promatranje pojava uz kružni otvor oko određenog medija. Polarni koordinatni sustav $r - \theta$, prikazan na slici 4-4 za slučaj djelovanja samo vertikalnog naprezanja, ima koordinate točke definirane s radijus-vektorom r i kutom α (grč. *Alpha*). Za zadatke vezane uz profile podzemnih prostorija prikladnije je računati s kutom θ (grč. *Theta*), koji se uzima pozitivno u smjeru obrnutom od kazaljke na satu.



Slika 4-4. Model za slučaj djelovanja vertikalnog naprezanja (Frgić, 2013)

Osnovne komponente tenzora naprezanja i njihove definicije su:

σ_r – radijalno normalno naprezanje, normalno na plohu koja je okomita na radijus,

σ_θ – tangencijalno normalno naprezanje, naprezanje na plohi koja je paralelna s radijus-vektorom, a vektor naprezanja usmjeren je okomito na radijus-vektor,

$\tau_{r\theta}$ – posmično naprezanje.

Naprezanja u stijeni mogu se dobiti množenjem osnovnih jednadžbi (4-9 do 4-11) kartezijevog koordinatnog sustava matricom transformacije zbog primarnih i horizontalnih naprezanja (Frgić, 2013):

$$\sigma_r = \sigma_z \cdot \cos^2\theta + \sigma_y \cdot \sin^2\theta \quad (4-9)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_z \cdot \sin^2\theta + \sigma_y \cdot \cos^2\theta \quad (4-10)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \cdot \sin 2\theta \quad (4-11)$$

Gdje je:

- $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ - komponente naprezanja polarnog koordinatnog sustava (kPa),
- σ_z, σ_y – komponente naprezanja kartezijevog koordinatnog sustava (kPa),
- θ - kut polarnog koordinatnog sustava (°).

Usljed iskopa u stijenskoj masi dolazi do pojave sekundarnog stanja naprezanja te se mogu odrediti vertikalna naprezanja (Frgić, 2013):

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[1 - \frac{R^2}{r^2} + \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad (4-12)$$

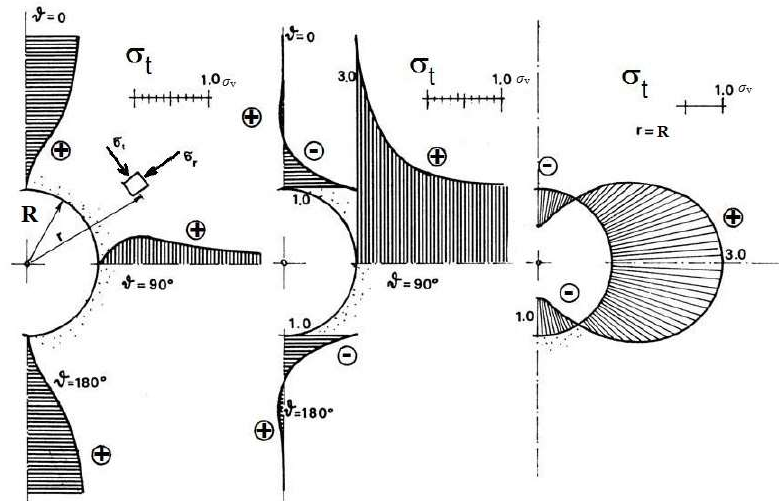
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[1 + \frac{R^2}{r^2} - \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad (4-13)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right] \cdot \sin 2\theta \quad (4-14)$$

Gdje je:

- σ_r – radijalno naprezanje (kPa),
- σ_θ – tangencijalno naprezanje (kPa),
- $\tau_{r\theta}$ – posmično naprezanje (kPa),
- σ_v – vertikalno naprezanje (kPa),
- R – radijus tunela (m),
- r – radijalna udaljenost od središta tunela (m),
- θ - kut polarnog koordinatnog sustava (°).

Promjena napreznja u odnosu prema primarnim napreznjima se u ovim izrazima lako gubi. Razlika između primarnih i sekundarnih napreznja postaje manja od 5 % već na udaljenosti od $r=3.5R$. Iz istoga je vidljivo kako otvaranje profila podzemne prostorije ima neposredan utjecaj samo u okolini otvora.

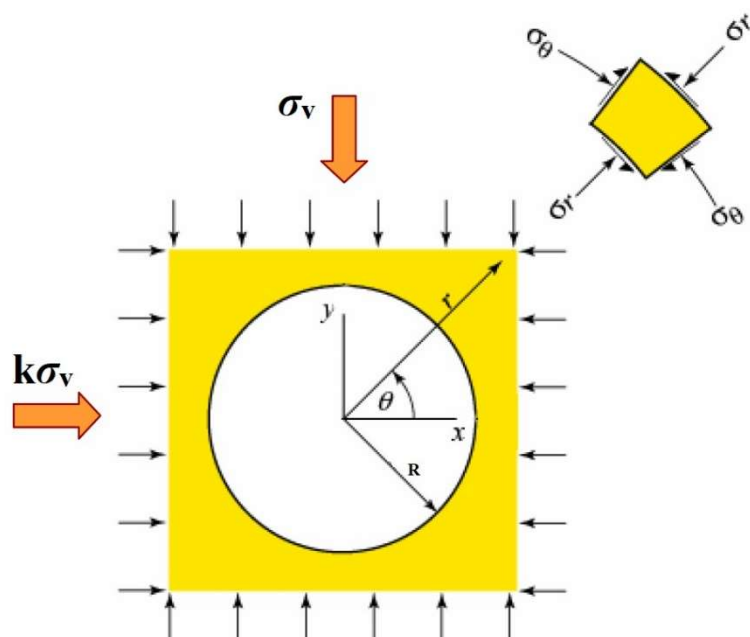


Slika 4-5. Preraspodjela tangencijalnih napreznja za slučaj vertikalnog opterećenja (Frgić, 2013)

Tangencijalna napreznja σ_θ u horizontalnom presjeku dostižu najveću koncentraciju uz rub otvora i ta su napreznja tri puta veća od osnovnog primarnog napreznja. Istodobno u vertikalnom presjeku kroz os simetrije na gornjem rubu u kaloti postoje vlačna napreznja koja su istog intenziteta, kao i primarno tlačno vertikalno napreznje. Dijagram u ta dva karakteristična presjeka za σ_θ nalazi se u srednjem dijelu slike 4-5. Lijevi dijagram na slici prikazuje raspodjelu radijalnih napreznja σ_r , koja će na nešto većoj udaljenosti od središta postati, u horizontalnom presjeku, jednaka nuli, a u vertikalnom presjeku primarnom tlaku σ_1 . U desnom dijagramu slike 4-5, prikazan je dijagram tangencijalnih napreznja σ_θ po obodu otvora, iz čega se vidi da je vlačna zona u kaloti ograničena na 60° , dok je ostali dio oboda u stanju povećanih tlačnih napreznja (Frgić, 2013).

4.2.2. Slučaj vertikalnog i horizontalnog napreznja

Superpozicijom se može rješenje proširiti na slučaj istovremenog djelovanja vertikalnog i horizontalnog napreznja kako prikazuje slika 4-6.



Slika 4-6. Model prilikom djelovanja vertikalnog i horizontalnog naprezanja (Eberhardt, n.d.)

Prema Hudsonu i Harrisonu (1997) jednadžbe koje se koriste u slučaju djelovanja vertikalnog i horizontalnog naprezanja su sljedeće:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[(1+k) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - (1-k) \cdot \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad (4-15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[(1+k) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + (1-k) \cdot \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad (4-16)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_v}{2} \cdot \left[(1-k) \cdot \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \cdot \sin 2\theta \right] \quad (4-17)$$

Gdje je:

σ_v – vertikalno naprezanje (kPa),

σ_h – horizontalno naprezanje (kPa)

R – radijus iskopa (m),

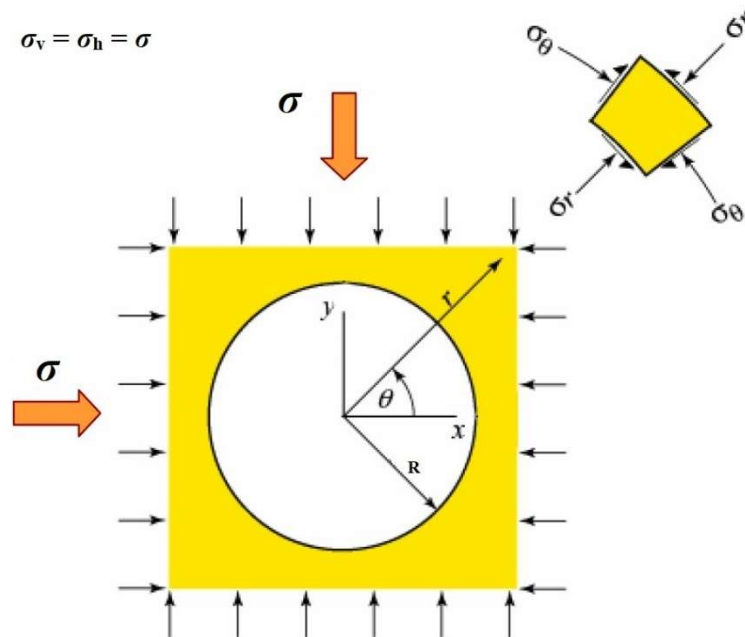
r – radijalna udaljenost od središta iskopa (m),

θ - kut polarnog koordinatnog sustava (°).

k – bočni potisak stijenske mase, σ_h/σ_v .

4.2.3. Slučaj kvazihidrostatskog naprezanja

Osim navedenih stanja naprezanja prilikom vertikalnog opterećenja, te horizontalnog i vertikalnog opterećenja, na slici 4-7 prikazan je poseban slučaj kada je vertikalno naprezanje jednako horizontalnom naprezanju. Takvo stanje primarnih naprezanja naziva se *kvazihidrostatsko*, a rješenje je rotacijski simetrično, što znači da rješenja ne ovise o orijentaciji radijus-vektora r (Frgić, 2013). Rješenja koja se tada koriste dana su izrazima 4-18 do 4-20.



Slika 4-7. Kvazihidrostatsko naprezanje (Eberhardt, n.d.)

$$\sigma_r = \sigma \cdot \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (4-18)$$

$$\sigma_\theta = \sigma \cdot \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) \quad (4-19)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (4-20)$$

Gdje je:

σ – iznos naprezanja za slučaj $\sigma_v = \sigma_h$ (kPa)

4.2.4. Glavna naprezanja i pomaci

Osim navedenih izraza za proračun sekundarnih naprezanja, potrebno je izračunati iznose glavnih naprezanja. Ona su ekstremne vrijednosti normalnih naprezanja kada nema posmičnih sila, odnosno iznosi većeg i manjeg glavnog naprezanja. Prema Hrženjaku i Briševcu (2009.) prikazani su izrazima 4-21 i 4-22.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \quad (4-21)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \quad (4-22)$$

Gdje je:

σ_1 - iznos većeg glavnog naprezanja (kPa),

σ_3 — iznos manjeg glavnog naprezanja (kPa).

σ_r – radijalno naprezanje (kPa),

σ_θ – tangencijalno naprezanje (kPa),

$\tau_{r\theta}$ – posmično naprezanje (kPa).

Konačno, nakon proračuna naprezanja moguće je preko izraza 4-23 i 4-24 izračunati vrijednosti radijalnih i tangencijalnih deformacija, odnosno vrijednosti pomaka (Eberhardt, n.d.).

$$u_r = -\frac{\sigma_v \cdot R^2}{4 \cdot G \cdot r} \cdot \left[(1+k) - (1-k) \cdot \left(4 \cdot (1-\nu) - \frac{R^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (4-23)$$

$$u_\theta = -\frac{\sigma_v \cdot R^2}{4 \cdot G \cdot r} \cdot \left[(1-k) \cdot \left(2 \cdot (1-2\nu) + \frac{R^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \right] \quad (4-24)$$

Gdje je:

u_r - radijalni pomak (m),

u_θ - tangencijalni pomak (m),

σ_v – vertikalno naprezanje (kPa),

ν - Poissonov koeficijent,

G - modul posmika (kPa),

R - radijus tunela (m),

r – radijalna udaljenost od središta iskopa (m),

θ - kut polarnog koordinatnog sustava ($^{\circ}$)

k - bočni potisak stijenske mase, σ_h/σ_v .

4.3. Hoek - Brown kriterij čvrstoće

Hoek - Brown kriterij sloma razvijen je kako bi pružio osnovu za projektiranje podzemnih iskopa i kosina. U vrijeme objave izvornog kriterija nije bilo odgovarajućih metoda za procjenu čvrstoće stijenskih masa. Stoga je cilj bio formulirati jednadžbu koja bi se mogla povezati s geološkim informacijama koje se mogu dobiti na terenu (Hoek i Marinos, 2007). Jednadžba 4-25 izražava kriterij u njegovom izvornom obliku.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (4-25)$$

Gdje je:

σ_1 – veće glavno efektivno naprezanje (MPa),

σ_3 – manje glavno efektivno naprezanje (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća (MPa),

m, a – konstante materijala ($s = 1$, za intaktnu stijenu).

Izvorno, RMR (*Bieniawski, 1976; Bieniawski, 1989*) je korišten za povezivanje kriterija s geološkim terenskim opažanjima, jer je već bio široko rasprostranjen i dobro prihvaćen. Međutim, s vremenom je postala uočljiva teškoća primjene RMR-a u stijenskim masama loše kvalitete, zbog činjenice da se one značajno razlikuju od čvrste stijenske mase s čvrsto pričvršćenim blokovima, na kojima je formuliran izvorni kriterij, pa je odlučeno da se kriterij ažurira (jednadžbe 4-26 do 4-31) uvođenjem GSI kao zamjene za RMR (Hoek i dr., 1995).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4-26)$$

Za $GSI > 25$:

$$\frac{m_b}{m_i} = e^{\left(\frac{GSI-100}{28} \right)} \quad (4-27)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9} \right)} \quad (4-28)$$

$$a = 0.5 \quad (4-29)$$

Za $GSI < 25$:

$$s = 0 \quad (4-30)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (4-31)$$

Gdje je:

σ_1' – veće glavno efektivno naprezanje u trenutku sloma (MPa),

σ_3' – manje glavno efektivno naprezanje u trenutku sloma (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (MPa),

m_b – vrijednost konstante m za stijensku masu,

m_i – konstanta materijala za intaktnu stijenu,

s, a – konstante materijala (ovise o karakteristikama stijenske mase).

GSI – geološki indeks čvrstoće.

Hoek i dr. (2002.) napravili su važnu reviziju kriterija uključivanjem novih odnosa između parametara m_b, s, a i GSI . Revizijom je uklonjen uvjet za GSI vrijednost i uveden je u jednadžbe parametar naziva faktor poremećaja (D) (engl. *Disturbance factor*).

Generalizirani Hoek - Brown kriterij izražen je jednadžbama 4-32 do 4-35.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4-32)$$

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28} \right)} \quad (4-33)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (4-34)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4-35)$$

Gdje je:

σ_1' – veće glavno efektivno naprezanje u trenutku sloma (MPa),

σ_3' – manje glavno efektivno naprezanje u trenutku sloma (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene (MPa),

m_b – vrijednost konstante m za stijensku masu,

m_i – konstanta materijala za intaktnu stijenu,

s, a – konstante materijala (ovise o karakteristikama stijenske mase),

GSI – geološki indeks čvrstoće,

D – faktor poremećaja stijenske mase.

Konstanta stijene m_i dobiva se statističkom analizom ispitivanja troosne tlačne čvrstoće. Ukoliko ju nije moguće provesti, može se procijeniti kao $\sigma_{ci} = \sigma_t$ (Hoek i dr. 2002). Slika 4-9 daje vrijednosti m_i za različite vrste intaktne stijene. Faktor poremećaja D ovisi o stupnju izmjene stijenske mase s obzirom na aktivnosti miniranja i/ili relaksacije naprezanja. Njegova vrijednost može biti u rasponu od 0 za nepromijenjene stijenske mase, do 1 za jako izmijenjene stijenske mase. Odabir parametara nalazi se na slici 4-10.

Jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase može se dobiti primjenom $\sigma'_3 = 0$, što rezultira jednadžbom 4-36. Na slici 4-8 nalazi se primjer krivulje sloma dobivene Hoek-Brownovim kriterijem čvrstoće.

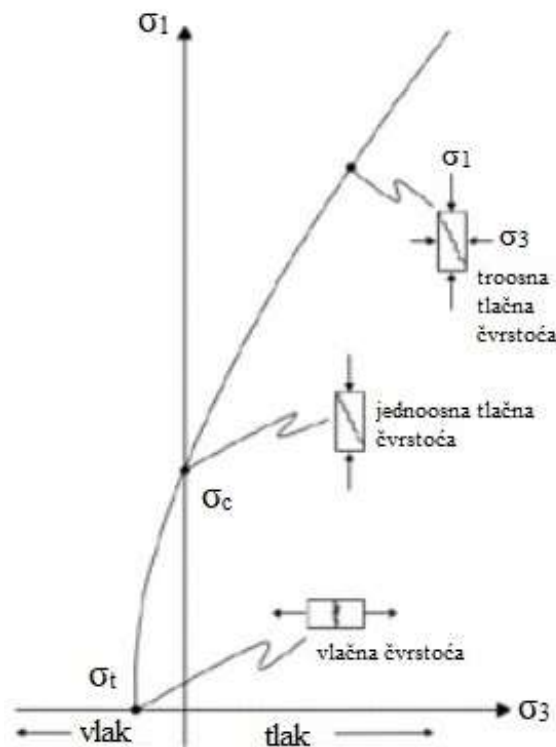
$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (4-36)$$

Gdje je:

σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća stijenske mase (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa),

s, a – konstante materijala (ovise o karakteristikama stijenske mase).



Slika 4-8. Krivulja sloma prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće (Hoek, 1983)

Na isti način ($\sigma'_3 = 0$), dobiva se vlačna čvrstoća stijenske mase:

$$\sigma_t = -\frac{\sigma_{ci} s}{m_b} \quad (4-37)$$

Gdje je:

σ_t – vlačna čvrstoća stijenske mase (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa),

m_b - vrijednost konstante m za stijensku masu,

s – konstanta materijala (ovisi o karakteristikama stijenske mase).

Jednadžba 4-37 je izvedena uzimajući uvrštavanjem izraza $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_{tm}$ u jednadžbu (4-32). Izraz predstavljanja stanje dvoosnog naprezanja, a dokazano je kako za krte materijale jednoosna vlačna čvrstoća odgovara dvoosnoj (Hoek i dr., 2002).

Tip stijene	Klasa	Grupa	Tekstura			
			Krupna	Srednja	Fina	Vrlo fina
SEDIMENTNE	Klastične		Konglomerat (22)	Pješčenjak 19	Siltit (Prahovnjak) 9	Argilit (Glinjak) 4
			Grauvaka 18			
	Neklastične	Organske	Kreda 7			
			Ugljen (8-21)			
		Karbonatne	Breča (20)	Sparitni vapnenac (10)	Mikritni vapnenac 8	
		Kemijske		Gips 16	Anhidrit 13	
METAMORFNE	Neškrijave		Mramor 9	Hornfels (Rožnac) (19)	Kvarcit 24	
	Slabo škrijave		Migmatit (30)	Amfibolit 25-31	Milonit (8)	
	Škrijave		Gnajs 33	Škrijavac 4-8	Filit (10)	Slejt 9
MAGMATSKE	Svijetle (Kisele)		Granit 33		Riolit (16)	Opsidijan (19)
			Granodiorit (30)		Dacit (17)	
			Diorit (28)		Andezit 19	
	Tamne (Lužnate)		Gabro 27	Dolerit (19)	Bazalt (17)	
			Norit 22			
		Efuzivni piroklastični tip		Aglomerat (20)	Breča (18)	Tuf (15)

* Vrijednosti za intaktnu stijenu ispitano okomito na škrijavost. Vrijednost m_i je značajno različita u slučaju da slom nastupa duž plohe škrijavosti. (Hoek, 1983).

Slika 4-9. Vrijednosti konstante m_i (Hoek, 2007)

Izgled stijenske mase	Opis stijenske mase	Preporučena vrijednost D
	Izvršna kvaliteta kontroliranog miniranja ili iskopavanja TBM-om rezultira minimalnim poremećajem stijenske mase koja okružuje tunel.	$D = 0$
	Strojno ili ručno iskopavanje u stijenskoj masi loše kvalitete minimalno remeti okolnu stijensku masu. Tamo gdje problemi sa stiskanjem rezultiraju značajnim dizanjem poda, smetnja može biti ozbiljna osim ako se ne postavi privremeni invert*, kao što je prikazano na fotografiji. *Invert je struktura obrnutog luka postavljena na dnu tunela kako bi se poboljšali uvjeti naprezanja gornje potporne strukture.	$D = 0$ $D = 0.5$ Bez inverta
	Loša kontrola usmjeravanja bušenja, dizajna punjenja i slijeda detonacije rezultira vrlo lošim miniranjem tunela u tvrdim stijenama s velikim oštećenjima, koja se protežu 2 ili 3 m, u okolnoj stijenskoj masi.	$D = 0.8$
	Mala miniranja na kosinama rezultiraju skromnim oštećenjima stijenske mase kada se koristi kontrolirano miniranje. Nekontrolirano proizvodno miniranje može rezultirati značajnim oštećenjem stijene.	$D = 0.7$ Dobro miniranje $D = 1.0$ Loše miniranje
	U nekim slabim stijenskim masama iskop se može izvoditi rpanjem i doziranjem. Oštećenja na padinama prvenstveno su posljedica rasterećenja. Vrlo velike kosine površinskih kopova trpe značajne poremećaje zbog teškog proizvodnog miniranja i smanjenja naprezanja od uklanjanja otkrivke.	$D = 0.7$ Mehanički iskop $D = 1.0$ Proizvodno miniranje

Slika 4-10. Vrijednosti parametra faktora poremećaja D (Hoek i Brown, 2018)

Normalna i posmična naprezanja su glavnim naprezanjima povezana prema jednadžbama 4-38 i 4-39 (Hoek i dr., 2002).

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} - 1}{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} + 1} \quad (4-38)$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \frac{\sqrt{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'}}}{\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} + 1} \quad (4-39)$$

Gdje je:

$$\frac{d\sigma_1'}{d\sigma_3'} = 1 + am_b \left(\frac{m_b \cdot \sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}, \quad (4-40)$$

σ_n' – normalno naprezanje (MPa),

τ – posmično naprezanje (MPa).

4.3.1. Mohr - Coloumb parametri čvrstoće

S obzirom da većina geotehničkih programa još uvijek koristi Mohr-Coloumbov kriterij sloma, bitno je izračunati odgovarajuće kutove trenja i koheziju za stijensku masu. To se može postići uspostavljanjem prosječne linearne veze s krivuljom dobivenom iz izraza 4-32 (Hoek i dr., 2002).

Skup podataka vezanih za vrijednosti naprezanja manjeg glavnog naprezanja nalazi se u rasponu naprezanja $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3,max}$. Proces određivanja Mohr-Coloumbovih parametara čvrstoće prikazan je u jednadžbama 4-41 i 4-42.

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (4-41)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}))/((1+a)(2+a))}} \quad (4-42)$$

Gdje je:

c' – kohezija (MPa),

ϕ' – kut trenja ($^\circ$),

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

Mohr – Coloumbova posmična čvrstoća τ se za zadano normalno naprezanje σ dobije uvrštavanjem vrijednosti kuta trenja iz izraza 4-41 i kohezije iz izraza 4-42 u jednadžbu 4-43.

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan\phi' \quad (4-43)$$

Gdje je:

τ – posmično naprezanje (MPa),

σ – normalno naprezanje (MPa),

c' – kohezija (MPa),

ϕ' – kut trenja ($^\circ$).

Prosječna linearna veza Hoek – Brownovog i Mohr – Coloumbovog kriterija, u pogledu većeg i manjeg glavnog naprezanja dana je izrazom 4-44.

$$\sigma_1' = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_3' \quad (4-44)$$

Gdje je:

σ_1' – veće glavno efektivno naprežanje u trenutku sloma (MPa),

σ_3' – manje glavno efektivno naprežanje u trenutku sloma (MPa),

c' – kohezija (MPa),

ϕ' – kut trenja ($^\circ$).

4.3.2. Čvrstoća stijenske mase

Prema Hoeku (2002.) razvijen je koncept globalne čvrstoće stijenske mase na temelju veze sa Mohr – Coloumbovim parametrima (iz jednadžbe 4-44) gdje su kohezija i kut trenja određeni iz raspona naprežanja $\sigma_t < \sigma_3' < \frac{\sigma_{ci}}{4}$ dobije se izraz za čvrstoću stijenske mase (σ'_{cm}) 4-45.

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (4-45)$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (4-46)$$

Gdje je:

σ'_{cm} – čvrstoća stijenske mase (MPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa),

m_b – vrijednost konstante m za stijensku masu

s, a – konstante materijala (ovise o karakteristikama stijenske mase),

c' – kohezija (MPa),

ϕ' – kut trenja ($^\circ$).

4.3.3. Modul deformabilnosti stijenske mase

Prema Hoeku i dr. (2002.) modul deformabilnosti stijenske mase određuje se iz izraza 4-47:

$$E_{rm} (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (4-47)$$

Gdje je:

E_{rm} – modul deformabilnosti stijenske mase (GPa),

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa),

GSI – geološki indeks čvrstoće,

D – faktor poremećaja stijenske mase.

Na temelju velikog broja provedenih ispitivanja Hoek i Diedrichs (2006.) su u svojem radu prezentirali dvije nove jednadžbe za proračun modula deformabilnosti. Izraz 4-48 se preporuča koristiti kad je poznata vrijednost GSI (ili RMR ili Q). Izraz 4-49 se koristi kada su poznate vrijednosti intaktnog modula deformabilnosti ili čvrstoće intaktnog materijala.

$$E_{rm} (MPa) = 100,000 \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{75+25D-GSI}{11}\right)}} \right) \quad (4-48)$$

$$E_{rm} (MPa) = E_i \left(0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left(\frac{60+15D-GS}{11}\right)}} \right) \quad (4-49)$$

Gdje je:

E_{rm} – modul deformabilnosti stijenske mase (MPa),

E_i – intaktni modul deformabilnosti (MPa).

GSI – geološki indeks čvrstoće,

D – faktor poremećaja stijenske mase.

Intaktni modul deformabilnosti određuje se iz jednadžbe 4-50 gdje vrijednost MR predstavlja koeficijent modula (engl. *Modulus Ratio*), a dobivena je na temelju mnogobrojnih ispitivanja. Vrijednosti MR dane su tablicom 4-1.

$$E_i = MR\sigma_{ci} \quad (4-50)$$

Gdje je:

E_i – intaktni modul deformabilnosti (MPa),

MR – koeficijent modula deformabilnosti,

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa).

Tablica 4-1. Vrijednosti MR (Hoek i Diedrichs, 2006)

Tip stijene	Klasa	Grupa	Tekstura			
			Krupna	Srednja	Fina	Vrlo fina
Sedimentna	Klastična		Konglomerat (300-400) Breča (230-350)	Pješčenjak (200-350)	Silit (350-400) Grauvaka (350)	Glinjak (200-300) Škriljevac (150-250) Lapor (150-200)
	Neklastična	Karbonatna		Sparitični vapnenac (600-800)	Mikritični vapnenac (800-1000)	Dolomit (350-500)
		Evaporitna		Gips (350)	Anhidrit (350)	
		Organska				Kreda (1000+)
Metamorfna	Bez folijacije		Mramor (700-1000)	Kornit (400-700) Metapješčenjak (200-300)	Kvarcit (300-450)	
	Blago folijacijske		Migmatit (350-400)	Amfibolit (400-500)	Gnajs (300-750)	
	Folijacijske			Škriljavci (250-1100)	Filit/ Tinjac (300-800)	Slejt (400-600)
Magmatska	Plutonske	Svijetle	Granit (300-550)	Diorit (300-350)		
			Grandiorit (400-450)			
		Tamne	Gabro (400-500)	Dolerit (300-400)		
			Norit (350-400)			
	Hipoabisalne		Porfiri (400)		Dijabaz (300-350)	Peridotit (250-300)
Vulkanske	Lava		Riolit (300-500) Andezit (300-500)	Dacit (350-450) Bazalt (250-450)		
	Piroklasti	Anglomerat (400-600)	Vulkanska breča (500)	Tuf (200-400)		

4.3.4. Određivanje vrijednosti $\sigma'_{3,max}$

Problem određivanja odgovarajuće vrijednosti $\sigma'_{3,max}$ za korištenje u izrazima 4-41 i 4-42 ovisi od primjene područja proračuna. Prema Hoeku i dr. (2002.) dana su dva rješenja, za tunele i kosine, ali je u ovom radu prikazan samo izraz 4-51 za tunele. Vrijednost $\sigma_{3,max}$ daje ekvivalentne karakteristične krivulje za dva kriterija sloma, a primjenjuje se za duboke tunele ili ekvivalentne profile slijeganja plitkih tunela. Iznimno, za slučajeve u kojima horizontalno naprezanje premašuje vrijednosti vertikalnog naprezanja preporuča se zamijeniti vrijednost γz iznosom horizontalnog naprezanja.

$$\frac{\sigma'_{3,max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma z} \right)^{-0.94} \quad (4-51)$$

Gdje je:

σ'_{cm} - čvrstoća stijenske mase (MPa),

γ – zapreminska težina (MN/m³),

z – dubina ispod površine (m).

5. PROGRAM ZA PRORAČUN NAPREZANJA OKO KRUŽNOG OTVORA I ČVRSTOĆE STIJENE

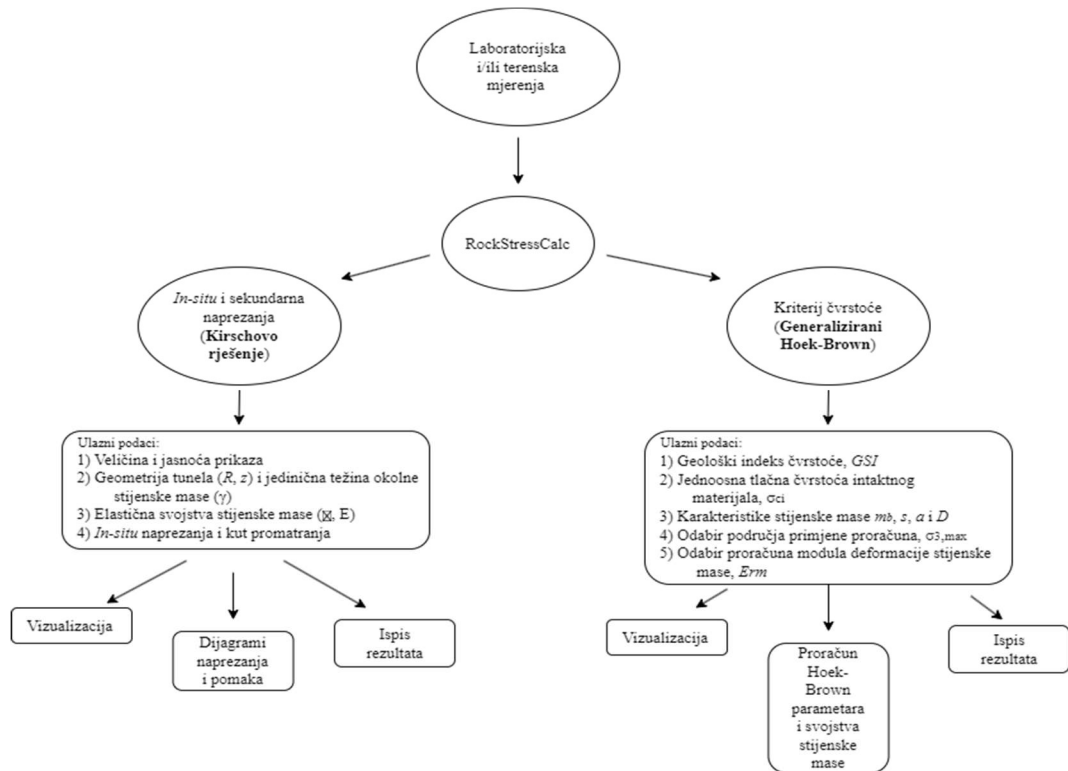
U ovom poglavlju nalazi se detaljniji način rada programa kao i validacija rezultata.

5.1. Općenito

U svijetu inženjerstva malo je područja kritično za projektiranje i izvođenje radova kao što je analiza napreznja. Bilo da je riječ o projektiraju podzemnih prostorija, zgrada, mostova ili zrakoplova, inženjeri nastoje predvidjeti ponašanje materijala i strukture u različitim uvjetima. Razumijevanje ponašanja projektiranog okruženja jedno je od najvećeg po važnosti za osiguranje sigurnosti i stabilnosti. Godinama su se inženjeri oslanjali na razne alate i tehnike analize napreznja koji se kreću od jednostavnih proračuna do sofisticiranih računalnih simulacija, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke.

U svrhu istraživanja prilikom pisanja ovog rada napravljen je program naziva *RockStressCalc*. Napisan u programskom jeziku *Python*, program koristi standardni dodatak *Tkinter* za grafičko korisničko sučelje (engl. *Graphical User Interface*, GUI). *NumPy* je dodatak za znanstvene proračune koji pruža podršku za višedimenzionalne nizove i matrice, zajedno s mnoštvom matematičkih funkcija. U programu se koristi za numeričke proračune Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće te napreznja oko kružnog otvora temeljenih na Kirschovoj jednadžbi. *Pandas* je korišten prilikom manipulacije i analize podataka. U programu se koristi za rukovanje i pohranjivanje rezultata sekundarnih napreznja i Hoek-Brown proračuna te za ispis rezultata u tabličnom obliku. *Matplotlib* omogućava vizualizaciju podataka koja pruža širok raspon statičnih i interaktivnih dijagrama. U programu se koristi za stvaranje vizualizacija kao što su dijagrami sekundarnih napreznja, normalnog napreznja u odnosu na posmično napreznje, ali i pohranjivanje rezultata kao slikovnih datoteka.

Na slici 5-1 nalazi se pojednostavljeni dijagram toka programa sa ulaznim i izlaznim podacima u dvije grane proračuna.



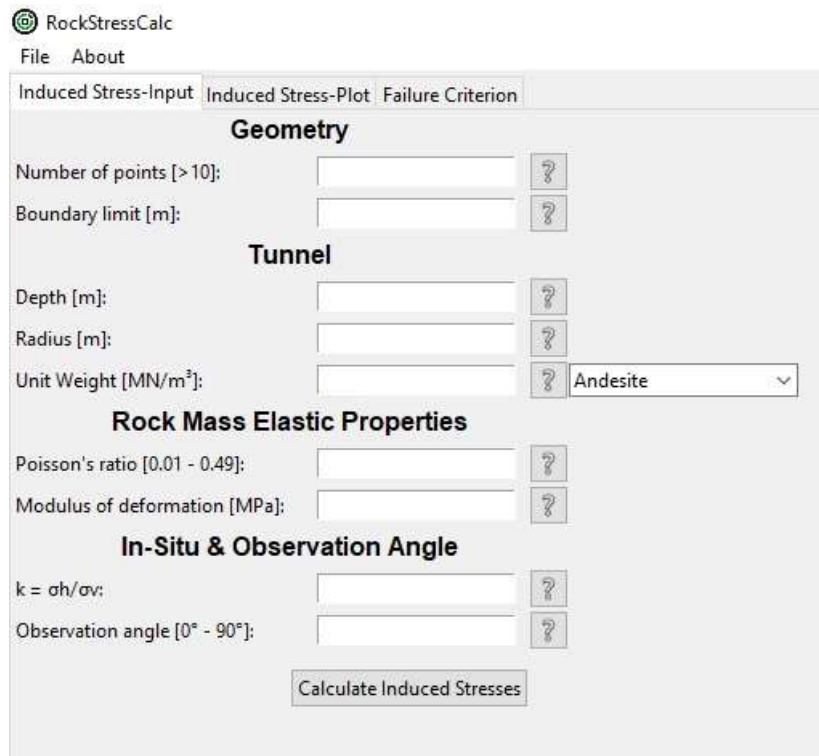
Slika 5-1. Pojednostavljeni dijagram *RockStressCalc* programa

5.2. Način rada

RockstressCalc je podržan na operativnom sustavu *Windows*, a omogućava korisniku zasebno razmatranje sekundarnih naprezanja na podzemnim prostorijama kružnog otvora (npr. hidrotehnički tunel) i kriterija čvrstoće stijenske mase. Ulazni i izlazni parametri proračuna su u potpunosti neovisni kao i njihov ispis u tabličnom i/ili slikovnom obliku. Provođenjem obje analize moguće je izračunati faktor stabilnosti budući da je za stijensku masu isti određen omjerom čvrstoće materijala iz Hoek-Brownovog kriterija i naprežanjem u točki promatranja iz Kirschovih jednadžbi.

Prilikom pokretanja programa otvara se početni zaslon naziva *Induced Stress – Input* prikazan na slici 5-2. Ovaj dio proračuna namijenjen je unosu podataka za provedbu analize sekundarnih naprezanja i pomaka. Ulazni podaci podijeljeni su u četiri grupe:

1. geometrija (engl. *Geometry*),
2. tunel,
3. elastična svojstva stijenske mase (engl. *Rock mass elastic properties*) i
4. in situ naprezanja i kut promatranja (engl. *Observation angle*).



Slika 5-2. Ulazni parametri sekundarnih naprezanja i pomaka

U sklopu navedenog prozora nalazi se popis stijena u padajućem izborniku na slici 5-3 koji služi kao ulazni podatak jedinične težine okolne stijenske mase. Popis stijena je dan kako bi korisniku olakšao analizu, a dobiven je temeljem podataka prosječne gustoće pojedine vrste stijena. U padajućem izborniku se odabirom opcije ostalo (engl. *Other*) unosi proizvoljna vrijednost. Nakon unosa podataka potrebno je odabrati naredbu *Calculate Induced Stresses* kako bi se pristupilo odabiru vizualnog prikaza sa idućeg prozora (slika 5-4).



Slika 5-3. Popis jediničnih težina stijenske mase

Nakon unosa podataka i odabira izvršenja proračuna pristupa se prozoru *Induced Stress – Plot* sa slike 5-4. Unutar njega se nalaze dvije vrste načina prikaza podataka (više na slici 5-17), a to su konturni prikaz i dijagramski prikaz. Kvaliteta konturnog prikaza je određena ulaznim parametrima vezanim za geometriju, odnosno polarnu mrežu. Dijagramski prikaz određen je predefiniranim područjem promatranja u rasponu vrijednosti $R/r = 1.00$ do $R/r = 6.00$. Prozor se sastoji od tri grupe podataka za prikaz, a to su:

1. sekundarna i glavna naprezanja oko radijusa otvora – konturni prikaz,
2. radijalna i tangencijalna naprezanja u kaloti i zidovima tunela – konturni prikaz,
3. naprezanja i pomaci u kaloti i zidovima tunela – dijagramski prikaz.



Slika 5-4. Mogućnosti prikaza sekundarnih naprezanja i pomaka

Posljednji prozor proračunava čvrstoću stijenske mase, a naziva se *Failure Criterion*. Unutar prozora nalazi se četiri grupe podataka od kojih prva čini ulazne podatke, dok preostale tri predstavljaju parametre čvrstoće, a to su (slika 5-5):

1. ulazni podaci za generalizirani Hoek-Brown kriterij čvrstoće,
2. proračun Hoek-Brown parametara čvrstoće,
3. proračun svojstava stijenske mase i
4. proračun faktora sigurnosti (zahtjeva proračun sekundarnih naprezanja i čvrstoće stijenske mase).

RockStressCalc
File About

Induced Stress-Input Induced Stress-Plot Failure Criterion

Generalized Hoek Brown

GSI, Geological Strength Index [0-100]:

σ_{ci} , Uniaxial compressive strength [MPa]:

m_i , Material constant [2-35]:

D, Disturbance factor [0-1]:

Number of tests [σ_{3min} - σ_{3max}]:

Select an application field:

Rock Mass Modulus:

Hoek Brown parameters

m_b : s : a :

Rock Mass properties

ϕ' , Friction angle [°]: c' , Cohesion [MPa]:

σ_t , Tensile strength [MPa]:

σ_c , Uniaxial compressive strength [MPa]:

σ_{cm} , Rock Mass Strength [MPa]:

E_m , Modulus of deformation [MPa]:

Factor of stability

Factor of stability:

Slika 5-5. Proračun čvrstoće stijenske mase

Prije proračuna dvije ili tri grupe parametara navedenog prikaza potrebno je definirati područje primjene kriterija (engl. *Application field*) i način proračuna modula deformacije stijenske mase (engl. *Rock Mass Modulus*). Na slici 5-6 nalazi se padajući izbornik kojim se odabire područje primjene. Tri su moguća područja primjene:

1. naizmjenično (engl. *Random*) – slika 5-7,
2. općenito (engl. *General*) – slika 5-8 i
3. tunelogradnja – slika 5-9.

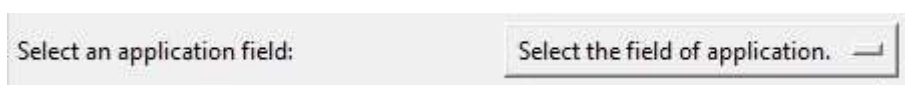
Odabirom opcije naizmjenično moguće je unijeti podatak izmjerenog najvećeg manjeg glavnog naprežanja $\sigma_{3,max}$. Izborom općenitog područja primjenjuje se izraz 5-1.

$$\sigma_{3,max} = \frac{\sigma_{ci}}{4} \quad (5-1)$$

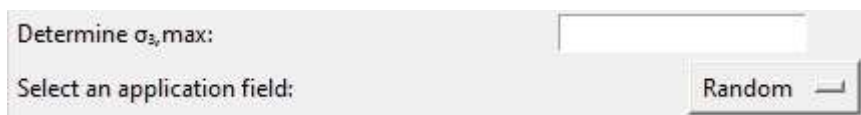
Gdje je:

σ_{ci} – jednoosna tlačna čvrstoća intaktnog materijala (MPa).

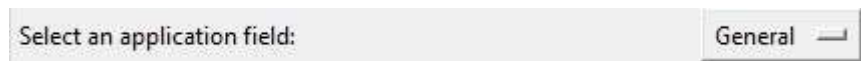
Prilikom primjene u tunelogradnji za potrebe proračuna je potreban unos vrijednosti jedinične težine okolne stijenske mase i dubine iskopa budući da je za proračun iste korišten izraz (4-51).



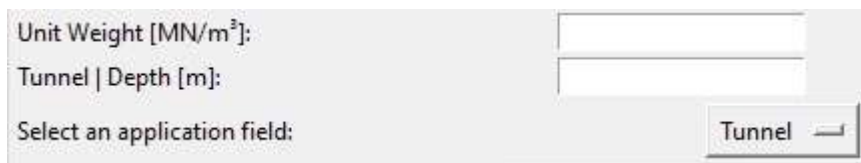
Slika 5-6. Područje primjene kriterija čvrstoće



Slika 5-7. Područje primjene kriterija čvrstoće - Naizmjenična primjena

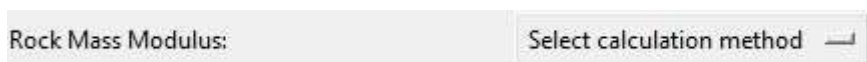


Slika 5-8. Područje primjene kriterija čvrstoće - Općenita primjena

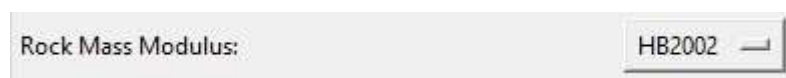


Slika 5-9. Područje primjene kriterija čvrstoće – Tunelogradnja

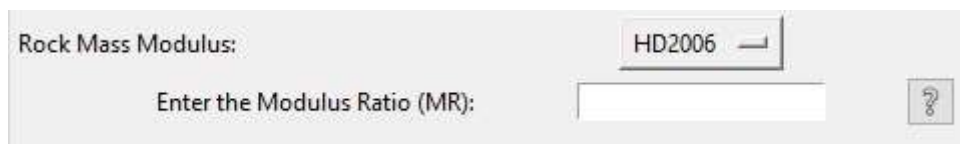
Sukladno određivanju područja primjene nužno je odabrati način proračuna modula deformabilnosti stijenske mase za koji također postoje tri mogućnosti (slika 5-10 do slike 5-13). Proračun sa slike 5-11 određen je izrazom 4-47, dok su proračuni sa slika 5-12 i 5-13 određeni izrazima 4-49 i 4-48.



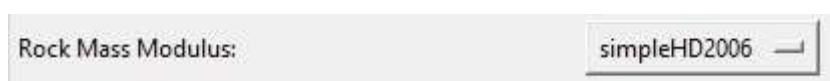
Slika 5-10. Proračun modula deformabilnosti stijenske mase



Slika 5-11. Hoek - Brownovo rješenje iz 2002.



Slika 5-12. Hoek - Diedrichsovo rješenje iz 2006.

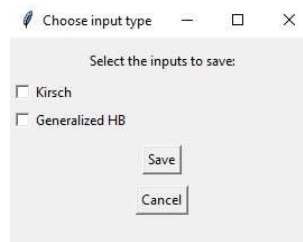


Slika 5-13. Pojednostavljeno Hoek - Diedrichsovo rješenje iz 2006.

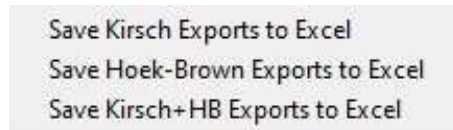
U svrhu pohrane ulaznih podataka i ispisa rezultata, unutar sučelja nalazi se padajući izbornik za upravljanje datotekama (engl. *File*) prikazan na slici 5-14. Unutar izbornika je moguće izabrati novu datoteku za rad (engl. *New file*) prilikom čega trenutni podaci i polja unosa postaju prazna. Izborom na unos (engl. *Import*) ubacuju se ulazni podaci jednog ili oba odabrana proračuna. Naredbom za spremanje ulaznih podatka (engl. *Save Inputs*) sa slike 5-15 moguće je iste pohraniti kao tekstualnu datoteku (formata “.txt”), dok je na slici 5-16 prikazan izbornik za pohranu. Na njemu vidljiva su tri moguća načina pohranjivanja ulaznih i izlaznih parametara proračuna u *Excel* tablicu. Formati za ispisu u tablicu su “.xlsx” i “.csv”.



Slika 5-14. Izbornik za upravljanje datotekama



Slika 5-15. Izbornik za pohranjivanje ulaznih parametara



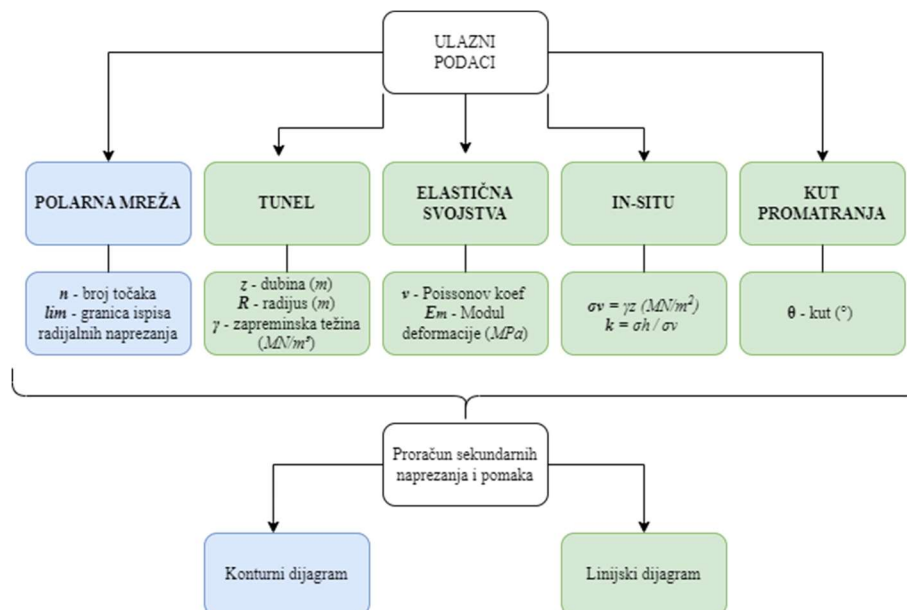
Slika 5-16. Izbornik za pohranjivanje rezultata proračuna

5.3. Ulazni podaci

Ovim poglavljem su pobliže objašnjeni ulazni parametri za proračun sekundarnih naprezanja, pomaka i čvrstoće stijenske mase.

5.3.1. Proračun naprezanja i pomaka

Na slici 5-1 prikazan je pojednostavljeni dijagram toka *RockStressCalc*_programa te su navedene grupe ulaznih podataka. S obzirom da su ulazni podaci i njihovo određivanje ključni za dobivanje kvalitetnih izlaznih rezultata u ovom djelu rada će biti više riječi o njima kao i o korištenim formulama za proračune naprezanja, pomaka i čvrstoće. Slikom 5-17 prikazano je pet grupa ulaznih podataka za proračun sekundarnih naprezanja i pomaka. Plavom bojom u dijagramu označeni su podaci koji nakon provedbe proračuna daju konturne dijagrame naprezanja, dok su zelenom bojom prikazani parametri za kreiranje linijskih dijagrama. Razlika između kreiranih dijagrama je područje promatranja naprezanja i pomaka. Naime, granicu ispisa naprezanja konturnih dijagrama određuje sam korisnik s obzirom na ulazni podatak granice ispisa, dok je granica promatranja naprezanja kod linijskih dijagrama postavljena na maksimalno 6 metara od prostorije otvaranja. Razlika u prikazu naprezanja je unutar dijagramima određena i kutom promatranja (θ). Naime, prilikom ispisa konturnih dijagrama cijelo područje oko tunelske prostorije se uzima u razmatranje (0° do 360°), dok je prilikom ispisa linijskih dijagrama ono određeno unesenim podatkom za kut θ od strane korisnika.

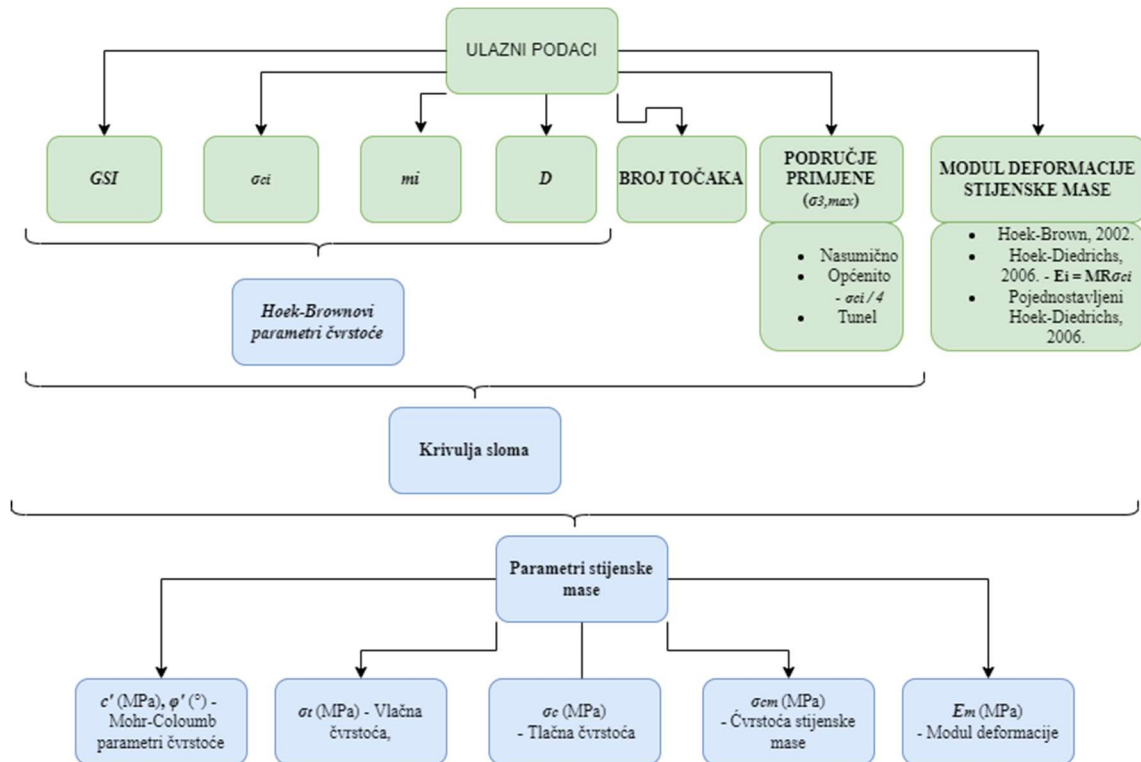


Slika 5-17. Dijagram prikaza ulaznih i izlaznih parametara proračuna sekundarnih naprezanja

Za proračun naprezanja i prikaz konturnih dijagrama korišteni su izrazi izneseni u radu. Izrazi uključuju proračun radijalnih (4-15), tangencijalnih (4-16) i posmičnih naprezanja (4-17). Jedina odstupanja korištenih izraza u samom programskom jeziku je vezana za horizontalna naprezanja koja su u *Pythonu* izvedena preko koeficijenta k kojeg korisnik sam određuje za proračun. Koeficijent k se dobije iz izraza 4-2 u kojem je njegova vrijednost jednaka omjeru horizontalnog i vertikalnog naprezanja u homogenom mediju. Nadalje, korištene formule za proračun većeg i manjeg glavnog naprezanja u radu su prikazane izrazima 4-21 i 4-22. Za proračun radijalnih i tangencijalnih pomaka u prethodnom poglavlju su prikazani izrazi 4-23 i 4-24.

5.3.2. Proračun čvrstoće

Referentno na sliku 5-1 na kojoj se nalazi pojednostavljeni dijagram toka *RockStressCalc* programa, na slici 5-18 prikazan je detaljniji dijagram proračuna čvrstoće, a korišteni kriterij čvrstoće je generalizirani Hoek – Brownov. Preko unesenih vrijednosti za geološki indeks čvrstoće (GSI), jednoosnu tlačnu čvrstoću intaktnog materijala (σ_{ci}), konstantu materijala (m_i) i faktora poremećaja (D), program napravi dio proračuna parametara čvrstoće. U poglavlju 4. su prikazani izrazi za proračun čvrstoće, a dani su formulama 4-33 do 4-35. Ulazni podatak za broj točaka označava područje prikaza Hoek-Brownove krivulje sloma. Osim toga, potrebno je odabrati područje primjene kriterija, odnosno odrediti najveću vrijednost manjeg glavnog naprezanja. Na korisniku je odabrati hoće li navedena vrijednost poprimiti nasumičan iznos, općeniti iznos (izraz 5-1) te područje za primjenu proračuna u tunelogradnji čiji je izraz dan jednadžbom (4-51). Konačno, moguće je izabrati između tri proračuna modula deformacije stijenske mase. Izrazi za proračun modula deformabilnosti su: izraz 4-47 iz Hoekovog i Brownovog rada 2002. godine te izrazi 4-48 i 4-49 iz Hoekovog i Diedrichsovog rada 2006. godine.



Slika 5-18. Dijagram prikaza ulaznih i izlaznih parametara proračuna čvrstoće

Konačno, referencirane su formule ovog diplomskog rada koje se odnose na izlazne podatke Hoek-Brownovog proračuna, a koje su korištene prilikom izrade programa:

- 1) kut trenja (jednadžba 4-41),
- 2) kohezija (jednadžba 4-42),
- 3) tlačna čvrstoća (jednadžba 4-36),
- 4) vlačna čvrstoća (jednadžba 4-37),
- 5) čvrstoća stijenske mase (jednadžba 4-46) i
- 6) modul deformabilnosti (jednadžbe 4-47, 4-48, 4-49).

5.4. Validacija rezultata

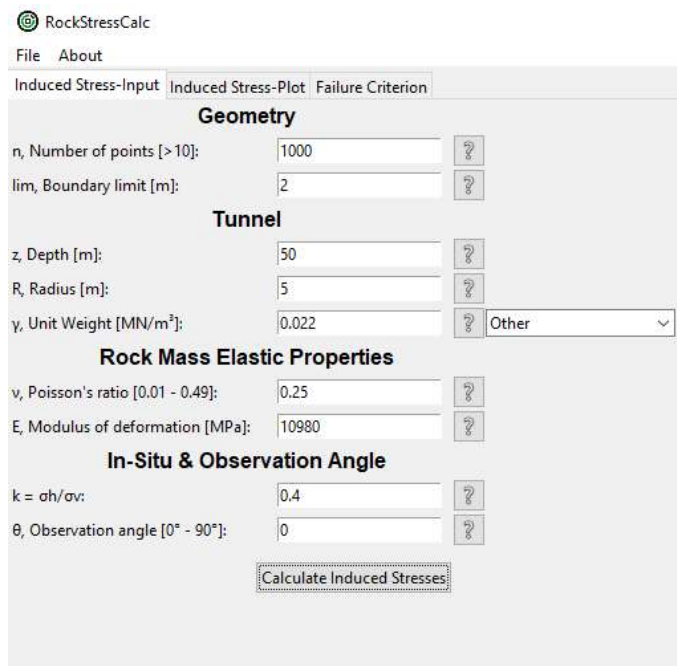
S ciljem potvrde ispravnosti rezultata proračuna dobivenih *RockStressCalc* programom korištena je usporedba s rezultatima proračuna geotehničkog programa *Plaxis2D*, koji se temelji na metodi konačnih elemenata. U nastavku će biti zasebno prikazani dijelovi proračuna vezano za sekundarna naprezanja i kriterij čvrstoće. U tablici 5-1 prikazani su ulazni parametri u oba korištena programa na temelju kojih je provedena potvrda točnosti rješenja.

Tablica 5-1. Ulazni podaci za proces validacije

RockStressCalc		Plaxis2D	
Sekundarna naprezanja		Sekundarna naprezanja	
Broj točaka	1000	Broj točaka	> 5000
Granica prikaza naprezanja (m)	16	Granica prikaza naprezanja (m)	< 30
Dubina (m)	50	Dubina (m)	50
Radijus (m)	5	Radijus (m)	5
Jedinična težina (MN/m ³)	0.022	Omjer naprezanja <i>k</i>	0.40
Poissonov koeficijent	0.25		
Modul deformabilnosti (MPa)	10 980		
Omjer naprezanja <i>k</i>	0.40		
Kut promatranja (°)	0		
	45		
	90		
Kriterij čvrstoće		Kriterij čvrstoće	
GSI	70	GSI	70
σ_{ci} (MPa)	75	σ_{ci} (MPa)	75
m_i	10	m_i	10
D	0.8	D	0.8
Broj točaka	25	Poissonov koeficijent	0.5
Područje primjene ($\sigma_{3,max}$) - Tunel	Jedinična težina (MN/m ³) = 0.022	Područje primjene ($\sigma_{3,max}$) - Tunel	Jedinična težina (kN/m ³) = 22
	Dubina (m) = 50		
Modul deformabilnosti – Hoek i Diedrichsov izraz 4-49	MR = 500	Modul deformabilnosti (kN/m ²)	10.98 ⁶

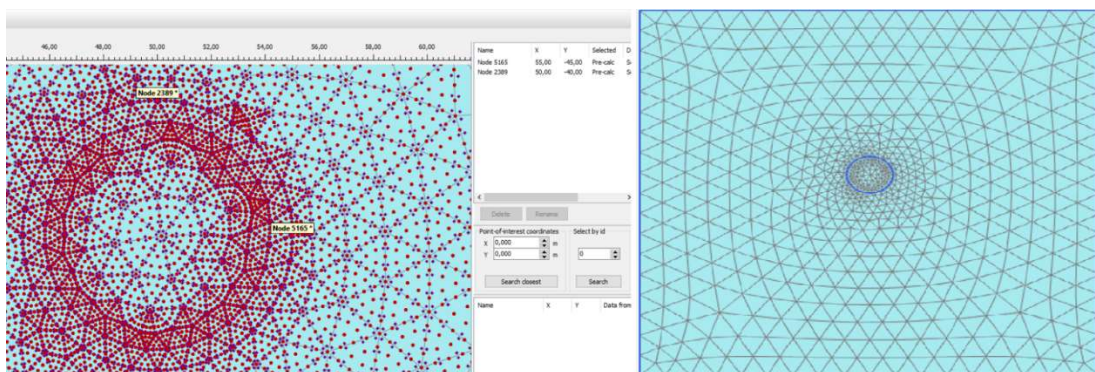
5.4.1. Validacija naprezanja i pomaka

Potvrda proračuna sekundarnih naprezanja provedena je za dva kuta promatranja (0° i 90°). Na slici 5-19 nalazi se prikaz ulaznih parametara u *RockStressCalc* korištenih prilikom validacije naprezanja i pomaka za kut promatranja od 0°.



Slika 5-19. Primjer ulaznih podataka proračuna sekundarnih naprezanja za $\theta = 0^\circ$

Prilikom pristupanju usporedbi rezultata sa *Plaxisom* potrebno je istaknuti zasebnosti proračuna ovom metodom konačnih elemenata. Naime, *Plaxisom* se generira gusta mreža točaka prilikom čega korisnik ima uvid u naprezanja i pomake točaka. Na slici 5-20 nalazi se primjer mreže i dviju promatranih točki unutar *Plaxisa*. Prikazane točke su korištene prilikom validacije rezultata pomaka.



Slika 5-20. Mreža konačnih elemenata - Plaxis

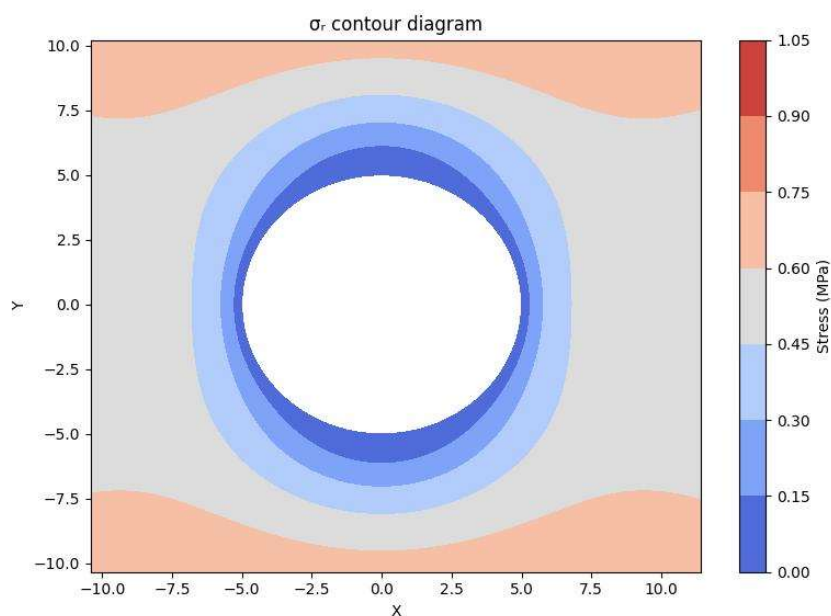
5.4.1.1. Slučaj $\theta = 0^\circ$

Konturni dijagrami sekundarnih naprezanja *RockStressCalc* programa prikazani su slikama 5-21 do 5-23, dok se linijski dijagram sekundarnih naprezanja nalazi na slici 5-26.

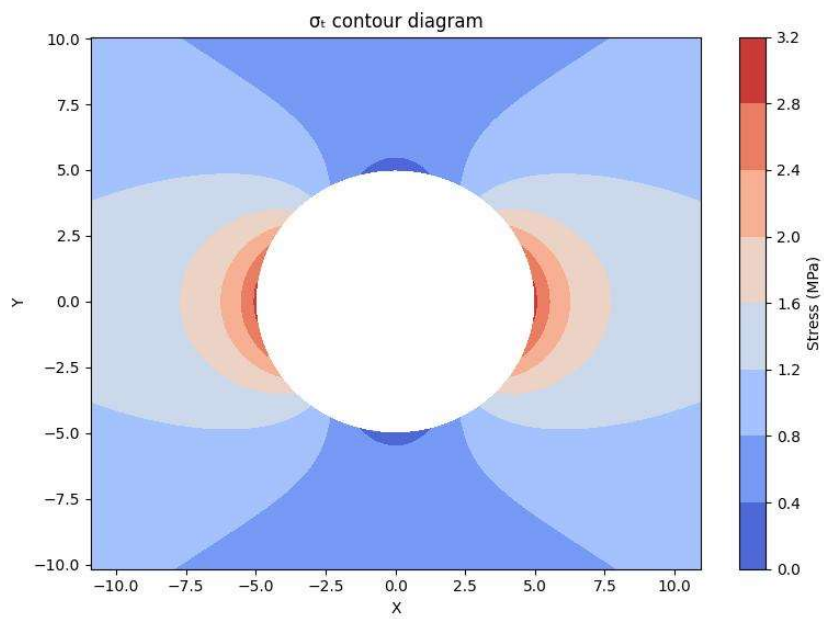
Konturni dijagram većeg i manjeg glavnog naprezanja nalaze se na slikama 5-24 i 5-25 te je zbog usporedbe naprezanja u *Plaxisu* priložena slika 5-27 na kojoj se nalazi iznos većeg glavnog naprezanja. Tablicom 5-2 prikazani su iznosi naprezanja dobivenih programom izrađenim u sklopu diplomskog rada.

Tablica 5-2. Iznosi naprezanja za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc

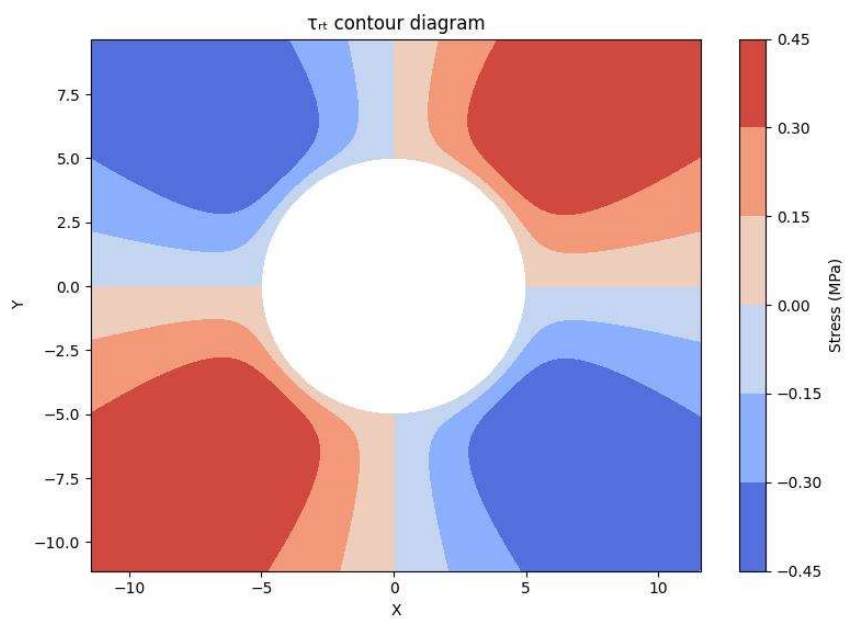
R/r	σ_r	σ_θ	$\tau_{r\theta}$	σ_1	σ_3
1.00	0	2.86	0	2.86	0
1.25	0.39	2.00	0	2.00	0.39
1.50	0.49	1.64	0	1.64	0.49
1.75	0.51	1.46	0	1.46	0.51
2.00	0.52	1.35	0	1.35	0.52
2.50	0.50	1.25	0	1.25	0.50
3.00	0.49	1.20	0	1.20	0.49
3.50	0.48	1.17	0	1.17	0.48
4.00	0.47	1.15	0	1.15	0.47
4.50	0.46	1.14	0	1.14	0.46
5.00	0.46	1.13	0	1.13	0.46
6.00	0.45	1.12	0	1.12	0.45



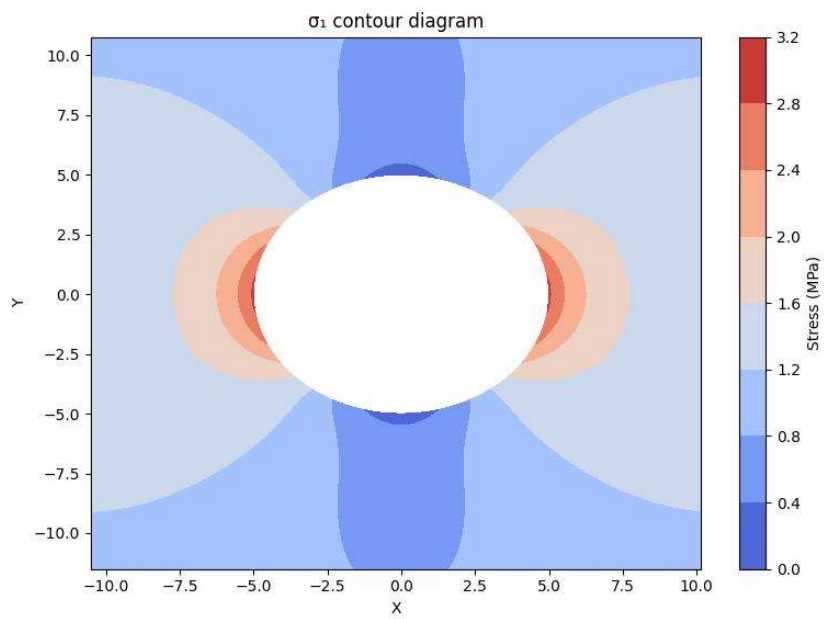
Slika 5-21. Radijalno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc



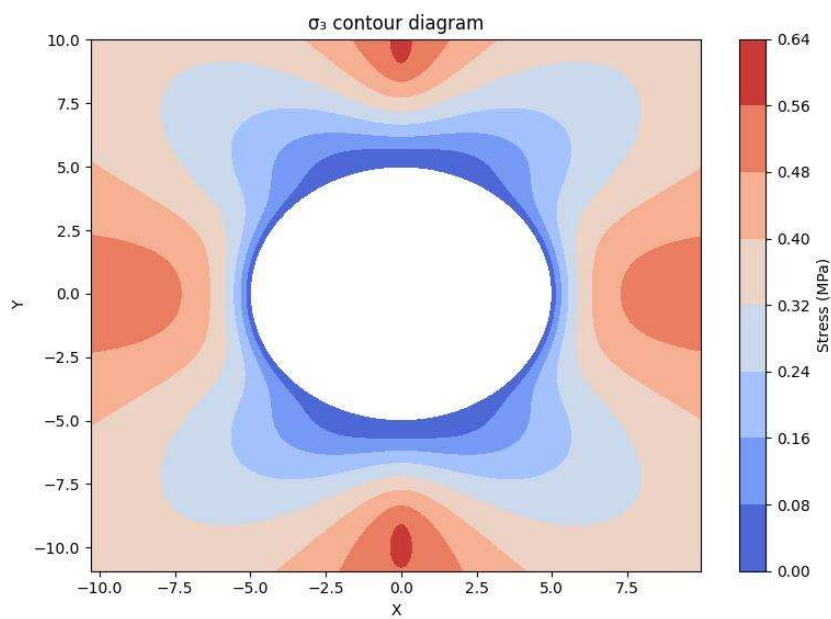
Slika 5-22. Tangencijalno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc



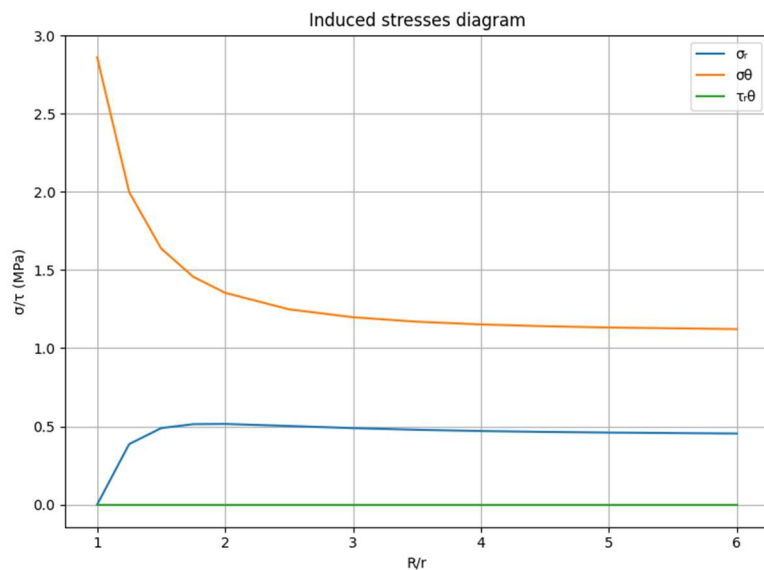
Slika 5-23. Posmično naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc



Slika 5-24. Veće glavno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc

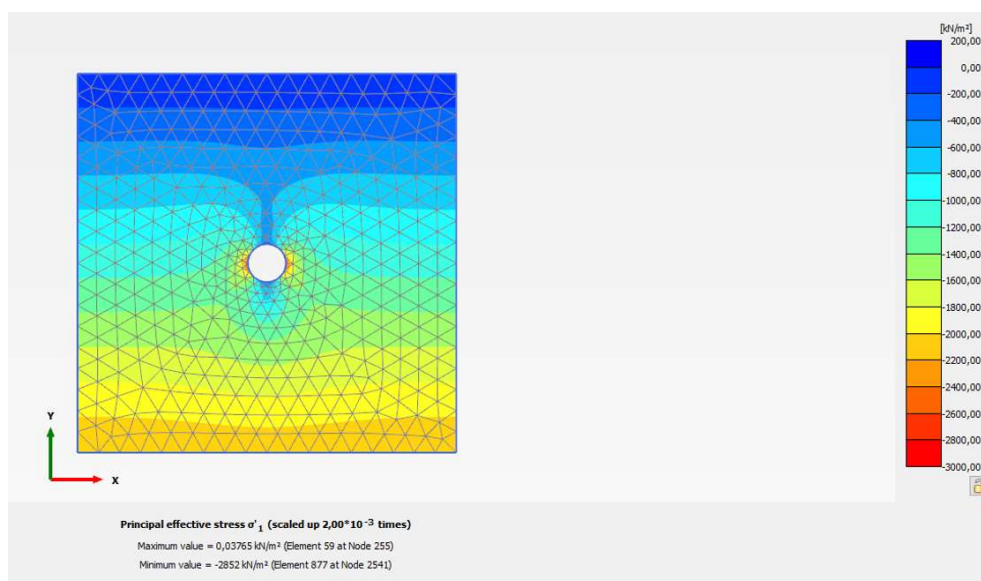


Slika 5-25. Manje glavno naprezanje za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc



Slika 5-26. Linijski dijagram sekundarnih napreznja za $\theta = 0^\circ$ - RockStressCalc

Usporedbom konturnih dijagrama dobivenih *RockStressCalc* programom i *Plaxisom* uočavaju se sličnosti iznosa napreznja. Potrebno je napomenuti da su ekstremne vrijednosti napreznja dobivene *Plaxisom* negativnog predznaka zbog orijentacije koordinatnog sustava. Očita li se vrijednosti maksimalnog glavnog napreznja iz tablice 5-2 za slučaj $R/r = 1.0$ (2.86 MPa) i usporedi s vrijednošću najvećeg glavnog napreznja dobivenu iz *Plaxisa* sa slike 5-27 (2852 kN/m²), može se zaključiti kako razlika između proračuna softvera iznosi 0.28 %.

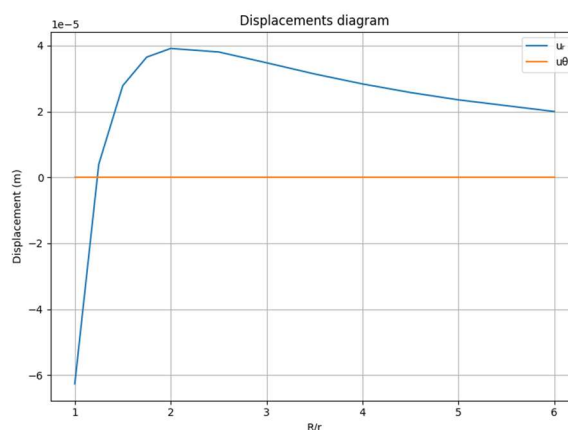


Slika 5-27. Konturni prikaz većeg glavnog napreznja za $\theta = 0^\circ$ - Plaxis

Za promatrani slučaj prikazane su u tablici 5-3 vrijednosti pomaka pomoću kojih je dobiven linijski dijagram pomaka (slika 5-28) iz *RockStressCalc* programa.

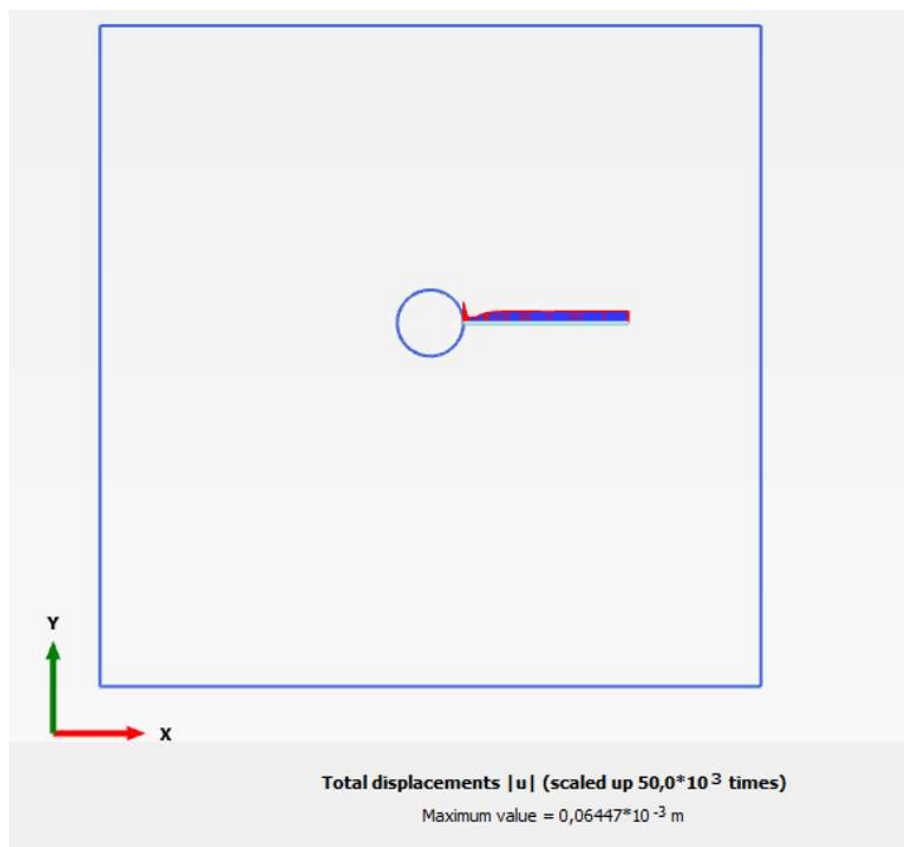
Tablica 5-3. Iznos pomaka za $\theta = 0^\circ$ - *RockStressCalc*

R/r	u_r (m)	u_θ (m)	u_r (mm)	u_θ (mm)
1.00	-0.000063	0	-0.063	0
1.25	0.000004	0	0.004	0
1.50	0.000028	0	0.028	0
1.75	0.000037	0	0.037	0
2.00	0.000039	0	0.039	0
2.50	0.000038	0	0.038	0
3.00	0.000035	0	0.035	0
3.50	0.000031	0	0.031	0
4.00	0.000028	0	0.028	0
4.50	0.000026	0	0.026	0
5.00	0.000024	0	0.024	0
6.00	0.000020	0	0.020	0



Slika 5-28. Linijski dijagram pomaka za $\theta = 0^\circ$ - *RockStressCalc*

Za usporedbu rezultata pomaka u *Plaxisu* je promatrana točka koja se nalazi najbliže referentnoj točki (0°) na obodu kružnog tunela. Na slici 5-29 prikazan je dijagram ukupnih pomaka dobiven u *Plaxisu* te je moguće očitati vrijednost najvećeg pomaka.



Slika 5-29. Dijagram i iznos pomaka za $\theta = 0^\circ$ - Plaxis

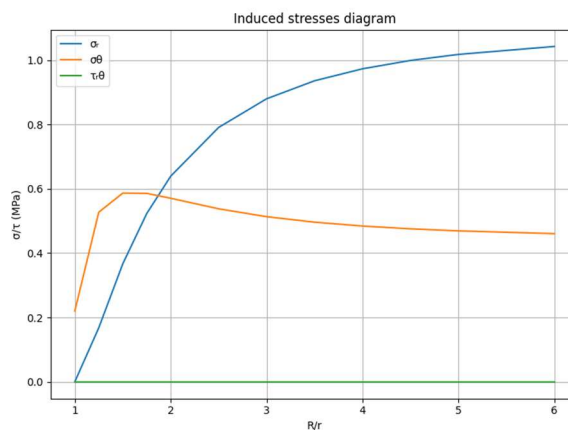
Usporede li se vrijednost ukupnog pomaka iz *Plaxisa* sa slike 5-29 (0.0000645 m) i radijalnog pomaka (za $R/r = 1.0$ iz tablice 5-3) iz *RockStressCalca*. Dobije se razlika u proračunima od 2.95% .

5.4.1.2. Slučaj $\theta = 90^\circ$

Konturni dijagram naprezanja iz *RockStressCalc* za slučaj kuta promatranja od 90° odgovaraju vizualno naprezanjima prikazanim na slikama 5-21 do 5-25, dok se linijski dijagram naprezanja nalazi na slici 5-30. Tablicom 5-4 prikazani su iznosi naprezanja.

Tablica 5-4. Iznosi naprezanja za $\theta = 90^\circ$ - *RockStressCalc*

R/r	σ_r	σ_θ	$\tau_{r\theta}$	σ_1	σ_3
1.00	0	0.22	0	0.22	0
1.25	0.17	0.53	0	0.53	0.17
1.50	0.37	0.59	0	0.59	0.37
1.75	0.52	0.59	0	0.59	0.52
2.00	0.64	0.57	0	0.64	0.57
2.50	0.79	0.54	0	0.79	0.54
3.00	0.88	0.51	0	0.88	0.51
3.50	0.94	0.50	0	0.94	0.50
4.00	0.97	0.48	0	0.97	0.48
4.50	1.00	0.48	0	1.00	0.48
5.00	1.02	0.47	0	1.02	0.47
6.00	1.04	0.46	0	1.04	0.46

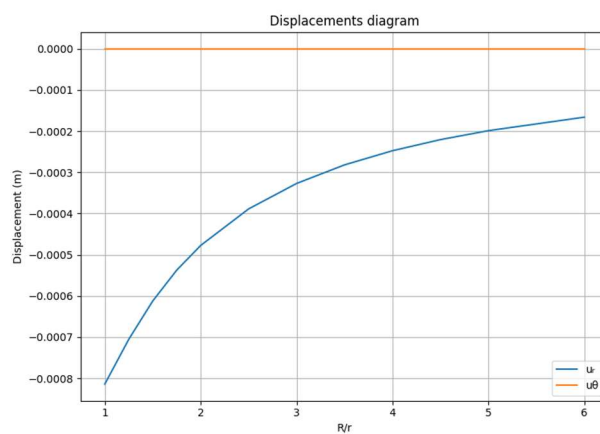


Slika 5-30. Linijski dijagram sekundarnih naprezanja za $\theta = 90^\circ$ - *RockStressCalc*

Za promatrani slučaj prikazane su u tablici 5-5 vrijednosti pomaka pomoću kojih je dobiven linijski dijagram pomaka (slika 5-31) iz *RockStressCalc* programa.

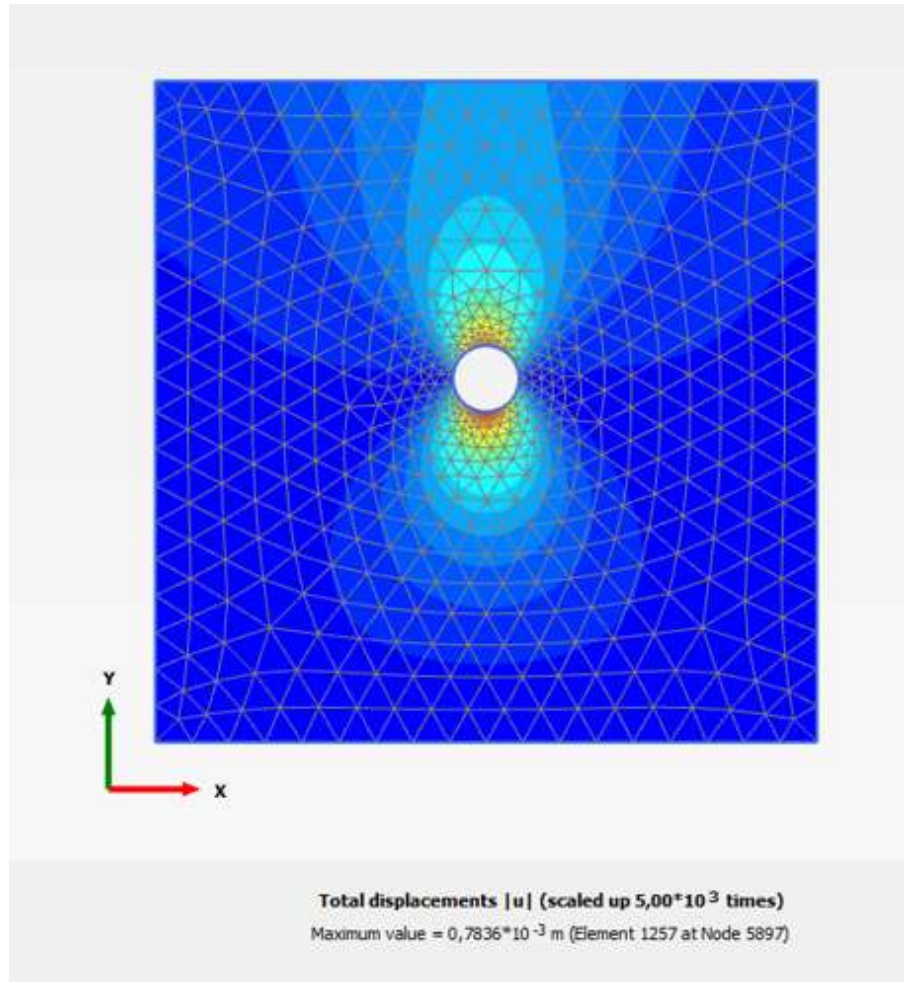
Tablica 5-5. Iznos pomaka za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc

R/r	u_r (m)	u_θ (m)	u_r (mm)	u_θ (mm)
1.00	-0.000814	0	- 0.814	0
1.25	-0.000705	0	- 0.705	0
1.50	-0.000612	0	- 0.612	0
1.75	-0.000537	0	- 0.537	0
2.00	-0.000477	0	- 0.477	0
2.50	-0.000389	0	- 0.389	0
3.00	-0.000327	0	- 0.327	0
3.50	-0.000282	0	- 0.282	0
4.00	-0.000248	0	- 0.248	0
4.50	-0.000221	0	- 0.221	0
5.00	-0.000199	0	- 0.199	0
6.00	-0.000166	0	- 0.166	0



Slika 5-31. Linijski dijagram pomaka za $\theta = 90^\circ$ - RockStressCalc

U *Plaxisu* je promatrana točka koja se nalazi najbliže referentnoj točki (90°) na kaloti kružnog tunela. Na slici 5-32 prikazan je dijagram ukupnih pomaka dobiven u *Plaxisu* te je moguće očitati vrijednost najvećeg pomaka.



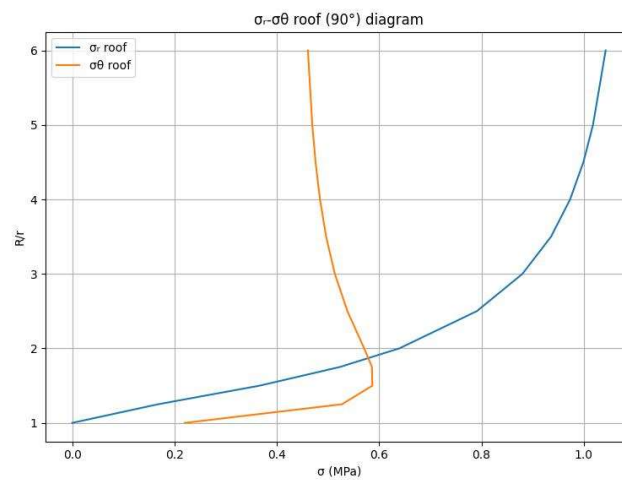
Slika 5-32. Dijagram i iznos pomaka za $\theta = 90^\circ$ - Plaxis

Usporede li se vrijednost ukupnog pomaka iz *Plaxisa* sa slike 5-32 (0.0007836 m) i radijalnog pomaka (za $R/r = 1.0$ iz tablice 5-5) iz *RockStressCalca* dobije se da je razlika u proračunima 3.73% .

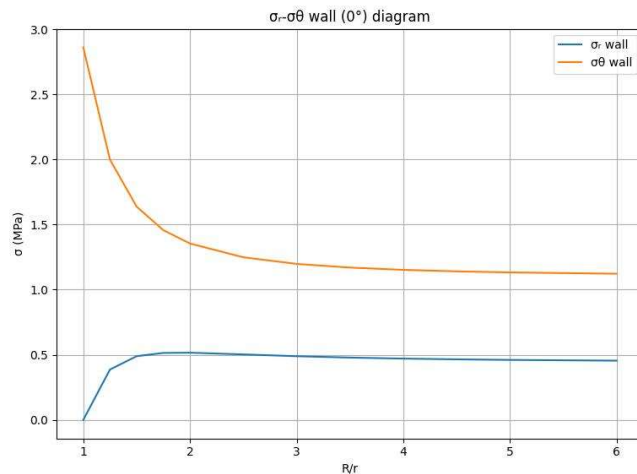
Konačno, tablicom 5-6 su prikazani iznosi radijalnih i tangencijalnih naprezanja u kaloti tunela (90°) i zidu (0°), dok su slikama 5-33 i 5-34 prikazani linijski dijagrami naprezanja za odabrane točke.

Tablica 5-6. Naprezanja u kaloti i zidu tunela - RockStressCalc

R/r	$\sigma_{r,zid}$	$\sigma_{r,kalota}$	$\sigma_{\theta,zid}$	$\sigma_{\theta,kalota}$
1.00	0.39	0.17	2.00	0.53
1.25	0.49	0.37	1.64	0.59
1.50	0.51	0.52	1.46	0.59
1.75	0.52	0.64	1.35	0.57
2.00	0.50	0.79	1.25	0.54
2.50	0.49	0.88	1.20	0.51
3.00	0.48	0.94	1.17	0.50
3.50	0.47	0.97	1.15	0.48
4.00	0.46	1.00	1.14	0.48
4.50	0.46	1.02	1.13	0.47
5.00	0.45	1.04	1.12	0.46
6.00	0.39	0.17	2.00	0.53



Slika 5-33. Naprezanja u kaloti tunela - RockStressCalc

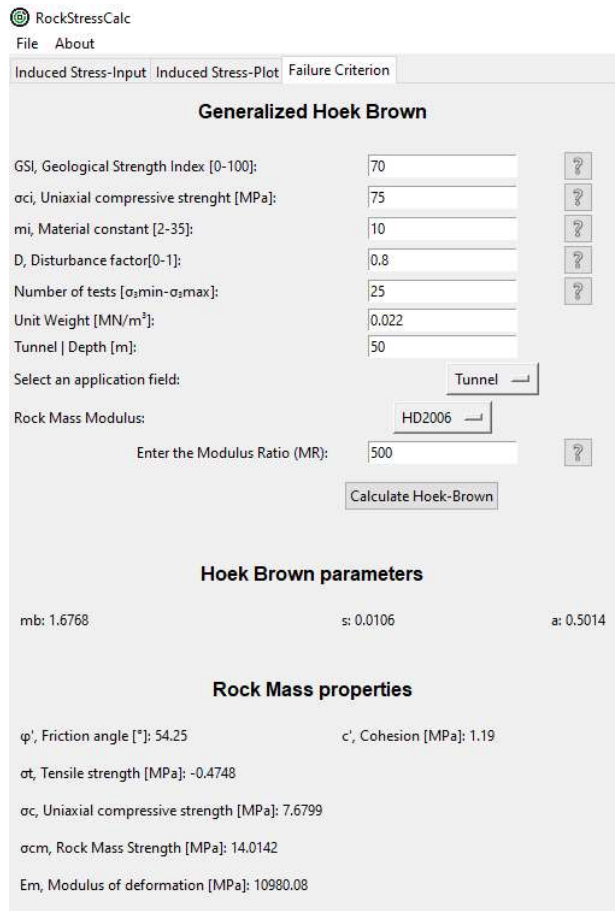


Slika 5-34. Naprezanja u zidu tunela - RockStressCalc

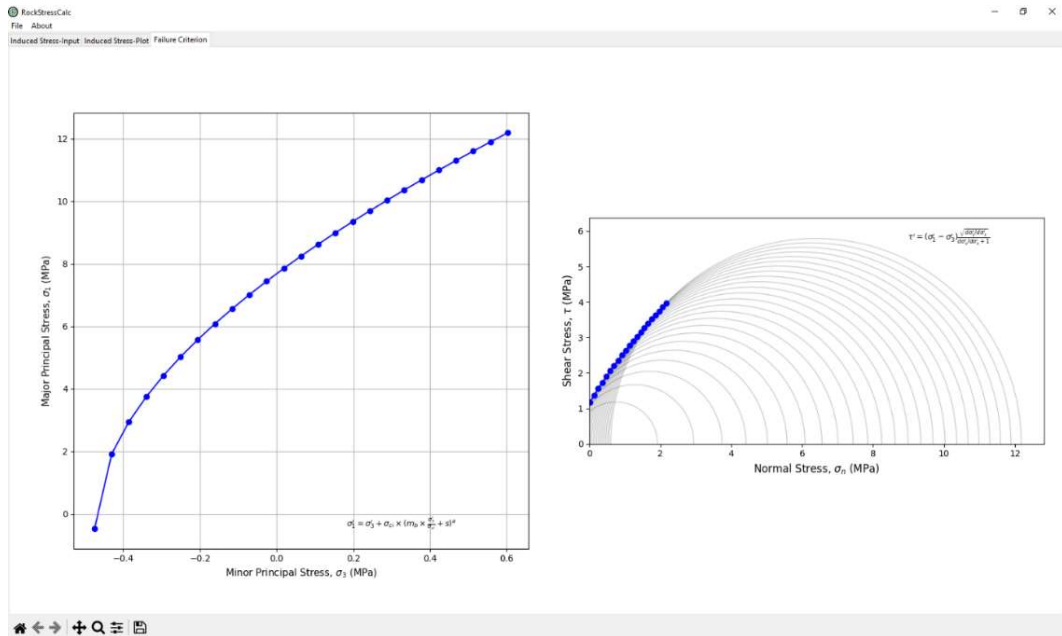
5.4.2. Validacija čvrstoće

Prilikom validacije kriterija čvrstoće slikom 5-35 iskazani su ulazni parametri kao i proračunate vrijednosti iz *RockStressCalc* programa. Krivulja sloma za dane vrijednosti nalazi se na slici 5-36. Usporedbom rezultata proračuna čvrstoće *RockStressCalc* na slici 5-35 s rezultatima *Plaxisa* na slici 5-37 moguće je zaključiti da se izračunate vrijednosti parametara čvrstoće i svojstava stijenske mase podudaraju.

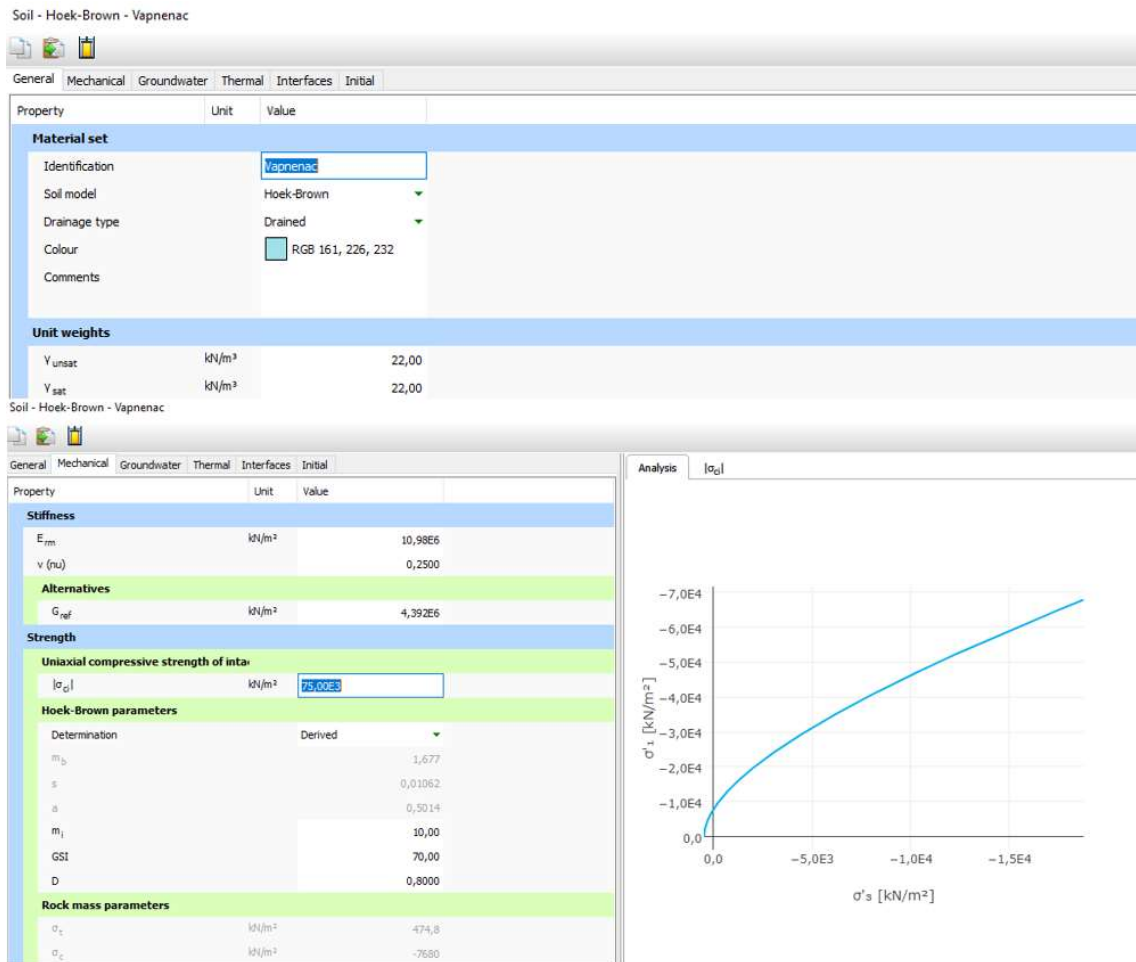
U slučaju usporedbe rezultata tlačne i vlačne čvrstoće između dvaju programa, potrebno je uzeti u obzir orijentaciju koordinatne osi zbog kojih dolazi do razlika u predznaku čvrstoća.



Slika 5-35. Ulazni i izlazni podaci proračuna čvrstoće – RockStressCalc



Slika 5-36. Krivulja sloma za proračun čvrstoće - RockStressCalc



Slika 5-37. Ulazni i izlazni podaci za proračun čvrstoće - Plaxis

Konačno, validacijom čvrstoće između programa, može se zaključiti da je potvrđena pretpostavka poklapanja rezultata do 10% u slučaju idealnih uvjeta. Prema Škrlec (2023.) potvrda se temelji na sljedećim uvjetima prilikom analize:

1. homogeni i izotropni materijal koji okružuje tunelski otvor,
2. linearno-elastično ponašanje materijala,
3. ravninsko stanje naprezanja,
4. beskonačno polje,
5. savršena geometrija.

6. ZAKLJUČAK

U radu je iznesen uvid u analizu naprezanja, geotehnička i geološka istraživanja, te svojstva i ponašanje stijenskih masa prilikom iskopa kružnog otvora u stijenskoj masi.

Kroz istraživanje je proučena analiza sekundarnih naprezanja, pomaka i čvrstoće stijenske mase kod tunela kružnog presjeka te su rezultati dobiveni korištenjem rješenja razvijenog u sklopu programskog jezika *Python* uspoređeni s rješenjima geotehničkog programa *Plaxis*. Analizirani su pojedini rezultati proračuna na temelju zadavanja istih ulaznih vrijednosti u oba programa, gdje je to bilo moguće. S obzirom da je *RockStressCalc*, program razvijen u sklopu rada temeljen na analitičkom rješenju, dok *Plaxis* daje numeričko rješenje u vidu metode konačnih elemenata, usporedba rezultata se odnosila na različit kut promatranja točke na rubu tunela kružnog otvora.

Za kut promatranja od 0° , rezultati usporedne analize su sljedeći:

- Razlika od 0.28% između vrijednosti većih glavnih naprezanja ukazuje na zanemarivo odstupanje, što potvrđuje pouzdanost programa u analizi sekundarnih naprezanja.
- Razlika od 2.95% u vrijednostima pomaka također pokazuje zadovoljavajuće rezultate.

Za kut promatranja od 90° , razlika od 3.73% u vrijednostima pomaka je pokazala najveće odstupanje od savršenog podudaranja, ali se također pokazuje pouzdanom uzimajući početnu hipotezu u obzir.

Konačno, usporedba kriterija čvrstoće je neovisna o kutu promatranja te je za istu dobiveno potpuno podudaranje izlaznih vrijednosti dvaju programa.

Rezultati ovog istraživanja potvrđuju visok stupanj podudaranja između pojedinih rezultata dobivenih *RockStressCalc* softverom i *Plaxisom* u slučaju idealnih uvjeta te pouzdanost i primjenjivost razvijenog programa za proračun sekundarnih naprezanja i čvrstoće stijenske mase kod tunela kružnog presjeka.

LITERATURA

Bickel, J., Kuesel, T., King, E. 1996. *Tunnel Engineering Handbook*.(2). Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.

Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley & Sons.

Bieniawski, Z.T. 1976. *Rock mass classification in rock engineering*. In *Exploration for rock engineering, proc. of the symp.* 1, str. 97-106. Cape Town: Balkema.

Deb, D., Verma, A.K. 2016. *Fundamentals and Applications of Rock Mechanics*. Delhi: PHI Learning Private Limited.

Eberhardt, E. n.d. *Stress Analysis Around Underground Openings*. Predavanje. Međunarodno društvo za mehaniku stijena (ISRM) URL: <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/2007/Topic3-GroundReactionCurves.pdf> (15.1.2023.)

Frgić, L. 2013. *Tuneli*. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Hoek, E. 1983. *Strength of Jointed Rock Masses*. Géotechnique 33(3), str. 187-223.

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W. 2012. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. (3). CRC Press.

Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion*. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, str. 267 – 273.

Hoek, E., Diedrichs, M.S. 2006. *Empirical Estimation of Rock Mass Modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(2), str. 203-215.

Hoek, E. 2007. *Practical Rock Engineering*.

URL: <https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner> (5.1.2023.)

Hoek, E., Marinos, V. 2007. *The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses. Underground works under special conditions*, Lisabon: Taylor & Francis.

Hoek, E., Brown, E.T. 2018. *The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition*. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 11(3), str. 445-463.

Hrestak, T. 2010. *A Contribution to Securing Low Overburden Tunnel Excavations*. PhD Thesis. Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering.

Hudson, J.A., Harrison, J.P. 1997. *Engineering Rock Mechanics*. Oxford: Elsevier Science Ltd.

Hrženjak, P., Briševac, Z. 2009. *Upute i predlošci za laboratorijske vježbe i programe iz mehanike stijena*. Interna skripta. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Magdalenić, A. 1997. *Tehnička enciklopedija, svezak 13, Tunel*. Zagreb: Nacionalna i sveučilišna knjižnica, str. 203-209.

Sheorey, P. 1993. *A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transverseley Isotropic Rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.

Škrlec, V. 2023. *Osobna komunikacija tijekom izrade rada*, 20.1.2023.

Terzaghi, K., Richart, F.E. 1952. *Stresses in rock about cavities*. Géotechnique 3, str. 57-90.

Timoshenko, S., Goodier, J.N. 1951. *Theory of Elasticity*. (2). Palo Alto: McGraw-Hill Book Company.

Vrkljan, I. 2013. *Podzemne građevine i tuneli*. Građevinski fakultet. Sveučilište u Rijeci, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zagreb.