

## RAZVOJ SOFTVERA ZA PRORAČUN NAPREZANJA KRUŽNOG TUNELSKOG PRESJEKA I PROVJERA S PLAXIS2D

VINKO ŠKRLEC<sup>1\*</sup>, JOSIP VINCEK<sup>2</sup>, KAROLINA HERCEG<sup>1</sup>, IVAN VUJEVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup> Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine, Ulica Republike Austrije 14, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>3</sup> Université Grenoble Alpes, Institute for Earth Sciences (ISTerre), 1381 Rue de la Piscine, 38000 Grenoble, France

\* Kontakt: vinko.skrlec@rgn.unizg.hr

### Sažetak

U radu se prikazuje razvoj računalnog alata RockStressCalc za analitičku procjenu raspodjele napreznja, pomaka i čvrstoće stijenskog masiva oko kružnih tunela. Alat se temelji na Kirschovom elastičnom rješenju i generaliziranom Hoek–Brown kriteriju te je implementiran u programskom jeziku Python s ciljem primjene u preliminarnim fazama projektiranja. Validacija rezultata provedena je usporedbom s numeričkim proračunima u programu Plaxis2D. Dobiveni rezultati potvrđuju pouzdanost i konzistentnost analitičkog pristupa unutar idealiziranih uvjeta homogenog i izotropnog medija. Posebna vrijednost alata očituje se u njegovoj transparentnosti, jednostavnosti korištenja i mogućnosti brze inženjerske procjene. RockStressCalc se pokazuje kao koristan alat za edukaciju, parametarske analize i verifikaciju numeričkih modela u tunelskom inženjerstvu.

### Ključne riječi

tuneli, Kirschovo rješenje, Hoek–Brown kriterij, stijenski masiv, napreznja i pomaci, numerička validacija, Plaxis2D, Python, preliminarno projektiranje

## 1. Uvod

Tuneli predstavljaju jednu od temeljnih sastavnica suvremene prometne, energetske i komunalne infrastrukture, omogućujući sigurno i učinkovito savladavanje prirodnih i antropogenih prepreka u prostoru. S porastom urbanizacije, infrastrukturnih zahvata i potrebe za racionalnim korištenjem prostora, podzemne građevine postaju sve češći i složeniji inženjerski objekti. Takav razvoj nameće povećane zahtjeve u pogledu pouzdanosti projektiranja, osobito u ranim fazama kada se donose ključne odluke o geometriji, dubini, tehnologiji iskopa i sustavu podgrade.

Jedan od temeljnih problema u tunelogradnji jest preraspodjela napreznja u stijenskom masivu uzrokovana iskopom podzemnog otvora. Iskop tunela narušava postojeće stanje napreznja u stijeni, što dovodi do pojave induciranih (sekundarnih) napreznja i pomaka u neposrednoj okolini otvora. Takvo stanje izravno utječe na stabilnost konture iskopa, pojavu oštećenja stijenskog masiva te potrebu za odgovarajućim mjerama podgrade. Stoga je pouzdana analiza napreznja i deformacija ključni preduvjet sigurne i ekonomične izvedbe tunela. Projektiranje i izvedba tunela zahtijevaju detaljno poznavanje geoloških i geotehničkih uvjeta, kao i mehaničkog ponašanja stijenskog masiva. Analiza napreznja ima središnju ulogu u tom procesu jer omogućuje procjenu potencijalnih mehanizama loma, zona povećanih deformacija te područja u kojima se može očekivati gubitak nosivosti stijene. U tom kontekstu analitička rješenja raspodjele napreznja oko podzemnih otvora imaju dugogodišnju i nezamjenjivu ulogu, osobito u fazi preliminarnog projektiranja.

Klasični analitički pristupi uključuju zatvoreno elastično rješenje raspodjele napreznja oko kružnog otvora koje je krajem 19. stoljeća razvio Kirsch. Unatoč pojednostavljenjima, Kirschovo rješenje i danas se široko

primjenjuje u preliminarnim analizama tunela, parametarskim studijama i verifikaciji numeričkih modela jer omogućuje transparentnu analitičku interpretaciju redistribucije naprezanja u okolini iskopa. Ovo rješenje, izvedeno za homogeni, izotropni i linearno elastični medij beskonačnog prostornog obuhvata, omogućuje izravno određivanje radijalnih, tangencijalnih i posmičnih naprezanja te glavnih naprezanja u okolini kružnog tunela. Zbog jednostavnosti, transparentnosti i jasne fizičke interpretacije Kirschovo rješenje i danas predstavlja temeljnu referencu u mehanici stijena i tunelskom inženjerstvu, osobito za kružne presjeke u elastičnom okruženju.

Suvremeni pristupi projektiranju tunela u velikoj se mjeri oslanjaju na numeričke metode, ponajprije metodu konačnih elemenata (dalje u tekstu: MKE), koje omogućuju analizu složenih geometrija, heterogenih materijala, nelinearnog ponašanja stijenskog masiva i interakcije s podgradom. Komercijalni softverski paketi, poput Plaxis2D, široko su prihvaćeni u inženjerskoj praksi. Međutim, njihova numerička složenost, velik broj ulaznih parametara i ograničena transparentnost često otežavaju interpretaciju rezultata, osobito u ranim fazama projektiranja i u edukacijskom kontekstu. Iako takvi programi omogućuju analizu složenih geometrija, nelinearnog ponašanja materijala i interakcije s podgradom, u ranim fazama projektiranja često je potrebno brzo procijeniti osnovne trendove redistribucije naprezanja i odnosa naprezanja i čvrstoće stijenskog masiva. Unatoč dostupnosti naprednih numeričkih alata, u praksi i dalje postoji potreba za laganim, transparentnim i dobro dokumentiranim računalnim alatima koji integriraju klasična analitička rješenja naprezanja s procjenom čvrstoće stijenskog masiva unutar jedinstvenog radnog okvira. Takvi su alati osobito vrijedni za preliminarne analize, parametarske studije osjetljivosti, brze inženjerske procjene te neovisnu provjeru rezultata numeričkih modela.

U tom se kontekstu u ovom radu predstavlja razvoj računalnog alata RockStressCalc, izrađenog u programskom jeziku Python. Alat je namijenjen:

- (i) analitičkom proračunu induciranih sekundarnih naprezanja i pomaka oko kružnog podzemnog otvora primjenom Kirschova analitičkog rješenja te
- (ii) procjeni čvrstoće stijenskog masiva primjenom generaliziranog Hoek–Brown kriterija, uključujući izračun parametara čvrstoće i modula deformabilnosti.

Cilj rada jest prikazati metodologiju razvoja programskog rješenja te provesti validaciju dobivenih rezultata usporedbom s numeričkim proračunima u programu Plaxis2D. Time se ocjenjuje inženjerska pouzdanost i uporabljivost alata RockStressCalc za brze procjene stabilnosti i početne analize sigurnosti u ranim fazama projektiranja tunela. Razmatranja su ograničena na kružne tunele iskopane u homogenom, izotropnom i linearno elastičnom stijenskom masivu, pod idealiziranim uvjetima zadavanja stanja primarnih in-situ naprezanja.

Znanstveni doprinos rada ne ogleda se u uvođenju novog konstitutivnog modela, nego u eksplicitnoj integraciji klasičnog analitičkog rješenja redistribucije naprezanja i procjene čvrstoće stijenskog masiva unutar transparentnog i reproducibilnog računalnog okvira.

## 2. Metode

### 2.1. Softver i arhitektura

U okviru istraživanja razvijen je računalni program RockStressCalc u programskom jeziku Python, s grafičkim korisničkim sučeljem implementiranim standardnom bibliotekom Tkinter. Program je koncipiran kao lagani i transparentni alat za preliminarne analize tunela kružnog presjeka u homogenom, izotropnom i linearno elastičnom stijenskom masivu, uz pretpostavku ravninskog deformacijskog stanja (engl. *plane strain*). Za numeričke izračune i evaluaciju analitičkih izraza primijenjena je biblioteka NumPy, dok se Pandas koristi za organizaciju ulaznih/izlaznih podataka i tablični prikaz rezultata. Vizualizacija rezultata provedena je bibliotekom Matplotlib, pri čemu se generiraju konturne prikaze naprezanja i pomaka te linijski profili

naprezanja/pomaka duž odabranog smjera promatranja, uz mogućnost izvoza grafova u slikovne formate. Računalni radni tok programa organiziran je u dvije funkcionalne cjeline koje se mogu koristiti zasebno ili povezano u okviru inženjerske interpretacije rezultata:

- (A) Naprezanja i pomaci - analitičko rješenje raspodjele naprezanja oko kružnog otvora prema Kirschu (Kirsch, 1898), uz izračun glavnih naprezanja ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ) te prikaz konturnih i linijskih profila;
- (B) Čvrstoća stijenskog masiva - primjena generaliziranog Hoek–Brown kriterija za određivanje parametara ( $m_\beta$ ,  $s$ ,  $a$ ), odabir domene primjene, izračun  $\sigma'_{3,max}$  te procjenu modula deformabilnosti  $E_m$  prema formulacijama Hoeka i Browna (2002) te Hoeka i Diederichsa (2006).

Program je organiziran kroz tri logičke cjeline (ekrana): unos ulaza za naprezanja i pomake (engl. *Induced Stress - Input*), vizualizacija rezultata (engl. *Induced Stress – Plot*) te modul čvrstoće (engl. *Failure Criterion*), u kojem se računaju parametri Hoek–Brown kriterija i svojstva stijenskog masiva, uz mogućnost interpretacije u odnosu na inducirana naprezanja.

## 2.2 Ulazni parametri - naprezanja i pomaci

Za proračun induciranih sekundarnih naprezanja i pomaka koriste se geometrijski i mehanički parametri: radijus otvora  $R$ , dubina osi tunela  $z$ , koeficijent bočnog tlaka  $k = \sigma_h/\sigma_v$ , zapreminska težina stijenskog masiva  $\gamma$ , Poissonov koeficijent  $\nu$  te modul posmika  $G$ . Naprezanja se izražavaju u MPa, pri čemu se eventualni ulazni podaci zadani u kPa unutar programa automatski pretvaraju radi konzistentnosti s proračunom čvrstoće stijenskog masiva. Postavke promatranja uključuju odabir kuta  $\theta$  u polarnom koordinatnom sustavu te definiranje područja prikaza rezultata.

Rezultati naprezanja i pomaka prikazuju se na dva načina:

- konturnim prikazima, gdje se promatra puni raspon kuta  $\theta$  od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , a područje prikaza definira korisnik (granica prikaza naprezanja i pomaka);
- linijskim profilima, gdje korisnik definira kut promatranja  $\theta$ , a prikaz profila standardno je ograničen na približno 6 m od konture iskopa. Navedeni obuhvat predstavlja postavku vizualizacije radi preglednosti i usporedbe, a ne ograničenje analitičkog rješenja, koje se može evaluirati za proizvoljnu radijalnu udaljenost.

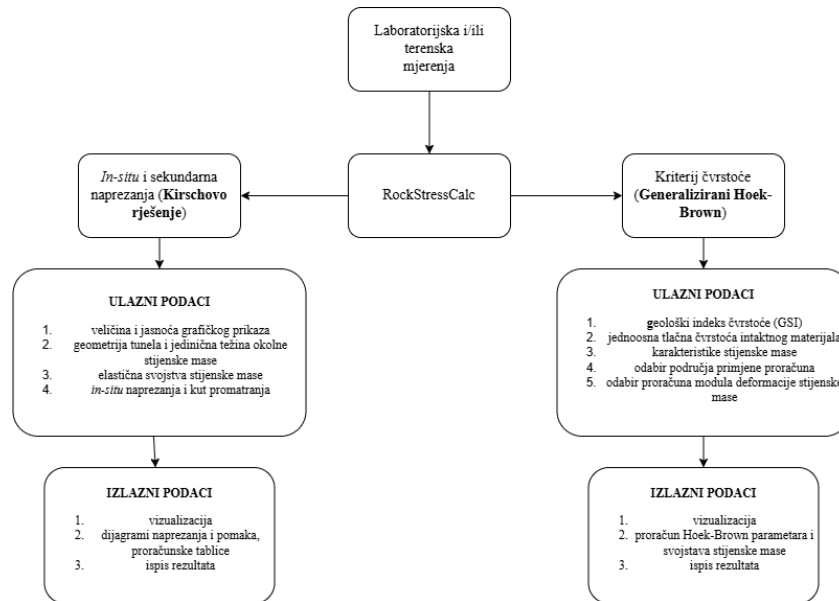
## 2.3. Ulazni parametri - čvrstoća stijenskog masiva

Za procjenu čvrstoće stijenskog masiva koriste se ulazni podaci: GSI, jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene  $\sigma_{ci}$ , materijalna konstanta  $m_i$  te faktor poremećenosti  $D$ . Na temelju tih ulaza određuju se parametri generaliziranog Hoek–Brown kriterija ( $m_\beta$ ,  $s$ ,  $a$ ), te se, ovisno o odabranoj domeni primjene, definira najveća vrijednost manjeg glavnog efektivnog naprezanja  $\sigma'_{3,max}$  za evaluaciju omotača loma. Za procjenu modula deformabilnosti stijenskog masiva  $E_m$  može se koristiti omjer modula  $MR$  ili modul deformabilnosti intaktne stijene  $E_i$ , ovisno o odabranoj formulaciji (Hoek & Brown, 2002; Hoek & Diederichs, 2006).

## 2.4. Validacija

Usporedba rezultata provedena je između programa RockStressCalc i Plaxis2D kako bi se provjerila numerička konzistentnost analitičke implementacije Kirschova rješenja i implementacije Hoek–Brown kriterija unutar razvijenog programskog okvira. U Plaxis2D je korištena gusto diskretizirana mreža elemenata, a usporedba je izvedena odabirom čvorova koji po položaju najbolje odgovaraju analitičkim radijalnim točkama promatranja izraženim odnosom  $R/r$ . Pri usporedbi naprezanja razmatrane su inducirane vrijednosti povezane s iskopom, dok su pomaci uspoređivani između radijalne komponente iz RockStressCalc i ukupne magnitude pomaka dobivene u Plaxis2D u odgovarajućim točkama. Takav pristup omogućuje izravnu usporedbu analitičkog rješenja, koje pretpostavlja beskonačnu elastičnu domenu, s numeričkim modelom koji je nužno definiran unutar konačne računalne domene.

Zbog razlika u orijentaciji koordinatnih sustava i konvencijama predznaka između programa, usporedbe su provedene na temelju magnituda relevantnih veličina. Korištene metrike uključuju relativne razlike u komponentama naprezanja i ukupnim pomacima, pri čemu se rezultati interpretiraju u kontekstu idealiziranih pretpostavki analitičkog modela i numeričkog modeliranja u konačnoj domeni (PLAXIS, 2021).



Slika 1. Pojednostavljeni dijagram toka RockStressCalc (grane A i B) s ulazima/izlazima.

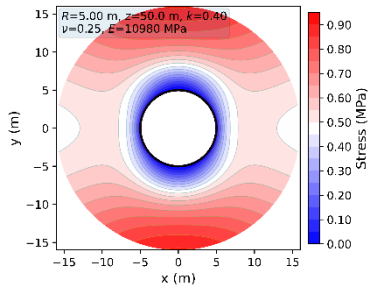
### 3. Rezultati

**Postavke.** Rezultati su dobiveni usporedbom analitičkih rješenja implementiranih u programu RockStressCalc s numeričkim rješenjima dobivenima metodom konačnih elemenata u programu Plaxis2D, pri čemu su obje analize provedene u ravninskom deformacijskom stanju, prikladnom za idealizaciju beskonačno dugog tunela kružnog presjeka. Promatrana je elastična redistribucija naprezanja uzrokovana iskopom u odnosu na zadano stanje primarnih in-situ naprezanja.

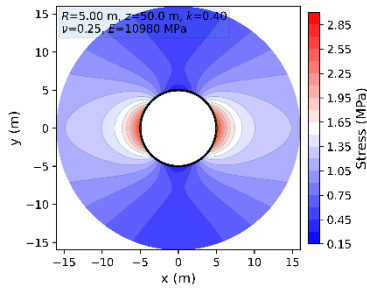
Kao reprezentativan primjer odabrani su sljedeći ulazni parametri: dubina osi tunela  $z = 50$  m, radijus tunela  $R = 5$  m, koeficijent bočnog tlaka  $k = 0,40$ , zapreminska težina stijenskog masiva  $\gamma = 0,022$  MN/m<sup>3</sup>, Poissonov koeficijent  $\nu = 0,25$ , dok su parametri čvrstoće stijenskog masiva definirani vrijednostima  $GSI = 70$ ,  $\sigma_{ci} = 75$  MPa,  $m_i = 10$  i faktorom poremećenosti  $D = 0,8$ . U analitičkom modelu RockStressCalc korišteno je 1000 diskretnih točaka duž radijalnog profila, dok je u Plaxis2D primijenjena znatno gušća numerička mreža s više od 5000 čvorova u području interesa.

**Naprezanja ( $\theta = 0^\circ$ ).** Za smjer promatranja  $\theta = 0^\circ$ , koji odgovara bočnom zidu tunela, konturni prikazi i linijski profili radijalnih ( $\sigma_r$ ), tangencijalnih ( $\sigma_\theta$ ) i posmičnih naprezanja ( $\tau_{r\theta}$ ) pokazuju iznimno dobro podudaranje između analitičkog i numeričkog rješenja. Vrijednosti naprezanja duž profila  $R/r$  prate očekivane trendove Kirschova rješenja, s nulom radijalnog naprezanja na konturi iskopa i maksimalnim tangencijalnim naprezanjima neposredno uz rub tunela.

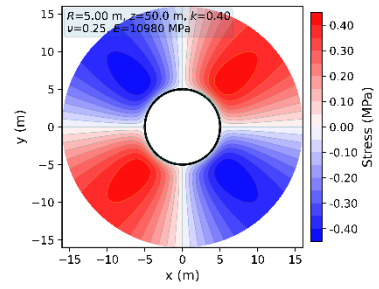
Kvantitativna usporedba pokazuje da maksimalna relativna razlika između RockStressCalc i Plaxis2D iznosi približno 0,28 %, što potvrđuje ispravnu implementaciju analitičkih izraza i stabilnost numeričke evaluacije. Izračunata glavna naprezanja ( $\sigma_1$  i  $\sigma_3$ ), dobivena transformacijom komponenti naprezanja, konzistentna su s numeričkim rezultatima, pri čemu se razlike u predznaku pripisuju različitim konvencijama koordinatnih sustava; usporedba je provedena na temelju magnituda.



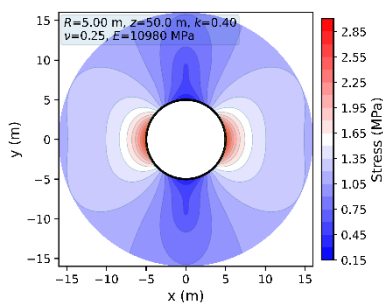
Slika 2. a) Radijalno naprezanje za slučaj  $\theta = 0^\circ$  - RockStressCalc



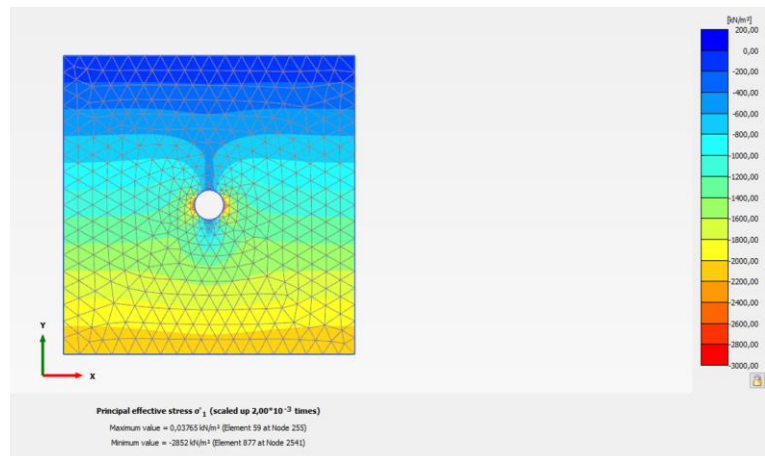
Slika 2. b) Tangencijalno naprezanje za slučaj  $\theta = 0^\circ$  - RockStressCalc



Slika 2. c) Posmično naprezanje za slučaj  $\theta = 0^\circ$  - RockStressCalc



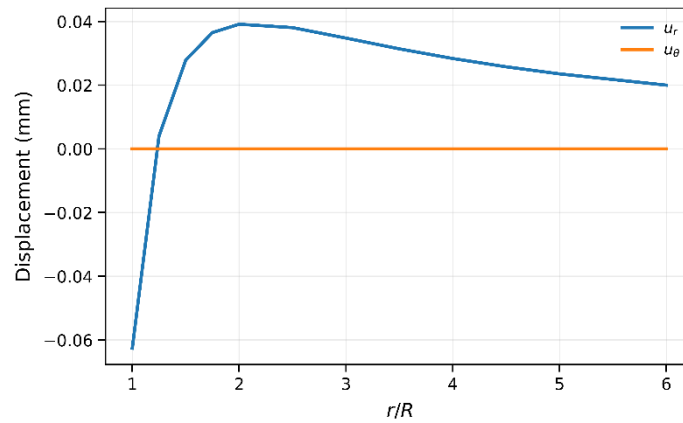
Slika 3. a) Veće glavno naprezanje  $\sigma_1$  za  $\theta = 0^\circ$  - RockStressCalc



Slika 3. b) Veće glavno naprezanje  $\sigma_1$  za  $\theta = 0^\circ$  - Plaxis2D

**Pomaci ( $\theta = 0^\circ$ ).** U istom smjeru promatranja ( $\theta = 0^\circ$ ) provedena je i usporedba pomaka. RockStressCalc daje analitičke izraze za radijalnu i tangencijalnu komponentu pomaka izvedene iz Kirschova elastičnog rješenja, dok Plaxis2D omogućuje očitavanje ukupne magnitude pomaka u odgovarajućim čvorovima numeričke mreže. Važno je naglasiti da se u analitičkom modelu promatra radijalna komponenta pomaka u polarnom koordinatnom sustavu, dok Plaxis2D prikazuje ukupnu magnitudu pomaka vektora deformacije, zbog čega usporedba predstavlja interpretaciju istog fizikalnog odziva kroz dvije različite reprezentacije pomaka. Linijski profili pomaka pokazuju izraženo smanjenje vrijednosti s porastom udaljenosti od konture iskopa, što je u skladu s elastičnim odzivom homogenog i izotropnog stijenskog masiva.

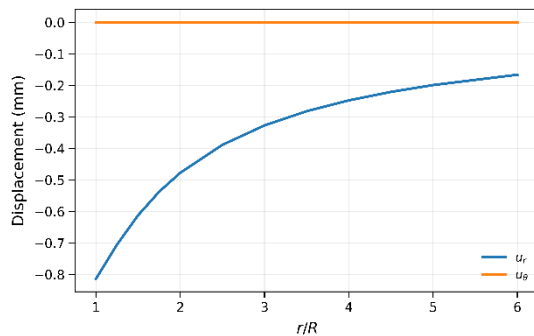
Usporedba rezultata pokazuje vrlo dobro slaganje, pri čemu maksimalno odstupanje ukupne magnitude pomaka iznosi 2,95 %. Ovakva razina podudarnosti upućuje na to da razlike između analitičkog i numeričkog rješenja u promatranom slučaju ponajprije proizlaze iz ograničenja numeričkog modela, prvenstveno zbog konačne veličine računalne domene u MKE analizi.



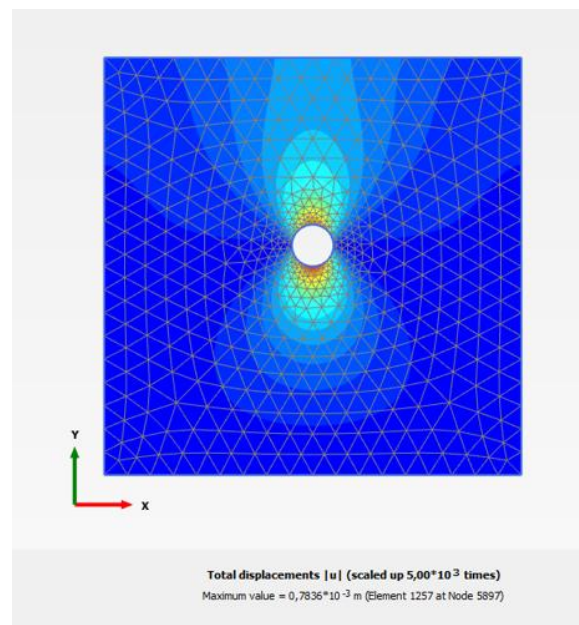
Slika 4. Linijski dijagram pomaka za slučaj  $\theta = 0^\circ$  - RockStressCalc

**Slučaj  $\theta = 90^\circ$  (svod).** Analiza za kut  $\theta = 90^\circ$ , koji odgovara svodu tunela, dodatno potvrđuje konzistentnost analitičkog i numeričkog rješenja te očekivanu redistribuciju naprezanja prema Kirschovu elastičnom modelu. U ovom se smjeru opaža drugačiji odnos radijalnih i tangencijalnih naprezanja u odnosu na bočni zid, što je posljedica nehidrostatskog stanja primarnih in-situ naprezanja ( $k \neq 1$ ). Raspodjela  $\sigma_r$  i  $\sigma_\theta$  pokazuje očekivane trendove: dominantna tangencijalna naprezanja na konturi iskopa te postupno smanjenje radijalnih naprezanja s udaljavanjem od otvora, u suglasju s Kirschovim rješenjem (Kirsch, 1898; Hudson & Harrison, 1997).

Maksimalni pomak na kruni tunela dobiven u Plaxis2D iznosio je 0,7836 mm, dok RockStressCalc daje radijalni pomak od 0,754 mm na konturi iskopa ( $R/r = 1,0$ ). Relativna razlika od 3,73 % može se pripisati rubnim uvjetima i konačnoj domeni numeričkog modela, dok analitičko rješenje pretpostavlja beskonačno elastično okruženje.



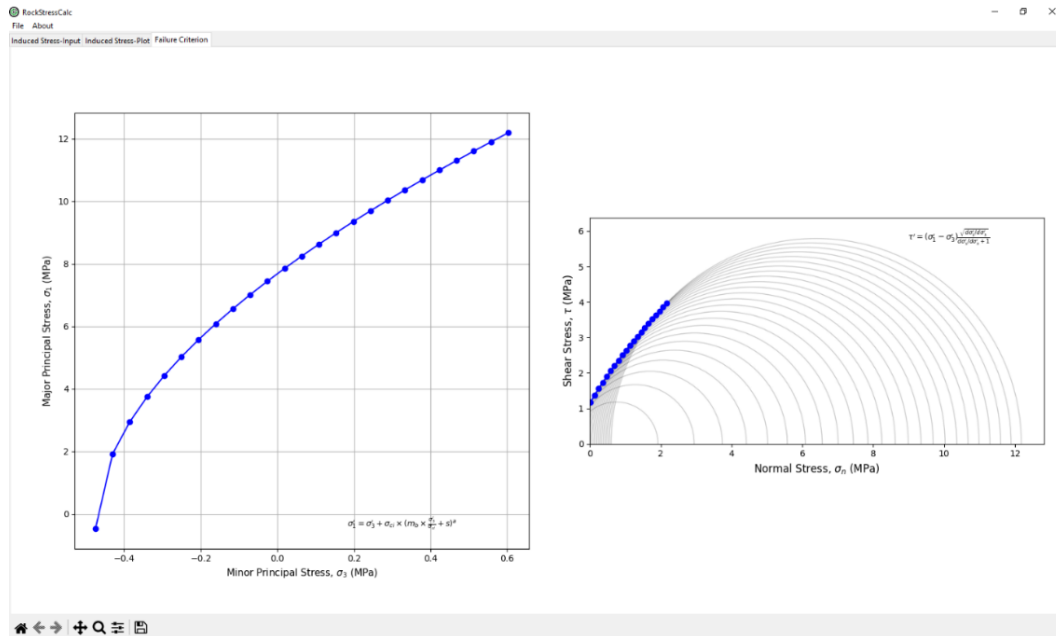
Slika 5.a) Radijalni pomak na svodu tunela ( $\theta = 90^\circ$ ) - RockStressCalc



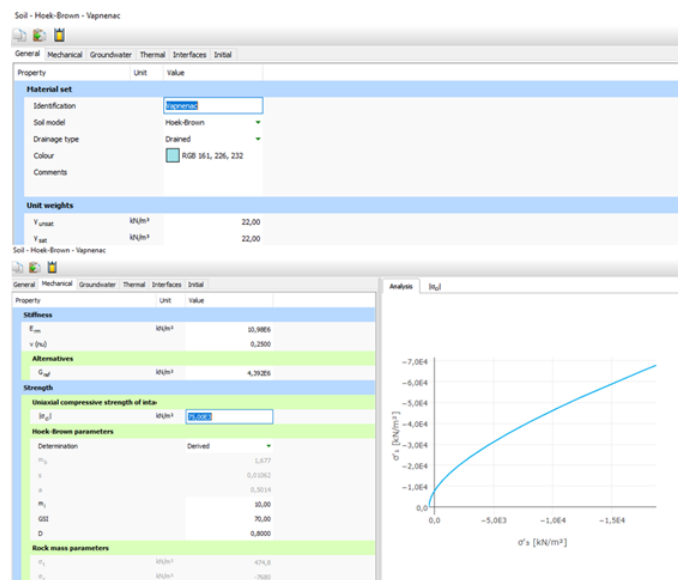
Slika 5.b) Ukupna magnituda pomaka na svodu tunela ( $\theta = 90^\circ$ ) - Plaxis2D

**Čvrstoća stijenskog masiva - provjera Hoek–Brown kriterija.** U okviru programa RockStressCalc provedena je i validacija implementacije generaliziranog Hoek–Brown kriterija čvrstoće stijenskog masiva. Za iste ulazne parametre korištene u analizi naprezanja ( $GSI = 70$ ,  $\sigma_{ci} = 75$  MPa,  $m_i = 10$ ,  $D = 0,8$ ) izračunani su parametri ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ), ekvivalentni Mohr–Coulombovi parametri te karakteristične čvrstoće stijenskog masiva, uključujući procijenjenu jednoosnu tlačnu čvrstoću stijenskog masiva, vlačnu čvrstoću i modul deformabilnosti.

Dobiveni omotač loma uspoređen je s rezultatima iz programa Plaxis2D, pri čemu je u oba slučaja primijenjen isti Hoek–Brown kriterij i jednake pretpostavke materijalnog ponašanja. Usporedba pokazuje potpunu podudarnost parametara generaliziranog Hoek–Brown kriterija ( $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ ) te izvedenih vrijednosti, uključujući procijenjenu čvrstoću stijenskog masiva, vlačnu čvrstoću i modul deformabilnosti, između programa RockStressCalc i Plaxis2D. Takav rezultat potvrđuje ispravnu i numerički dosljednu implementaciju Hoek–Brown kriterija u programu RockStressCalc.



Slika 6.a) Omotač čvrstoće stijenskog masiva prema generaliziranom Hoek–Brown kriteriju - RockStressCalc



Slika 6.b) Omotač čvrstoće stijenskog masiva prema generaliziranom Hoek–Brown kriteriju – Plaxis2D

Dobiveni rezultati pokazuju vrlo visoku razinu konzistentnosti između analitičke implementacije kriterija u programu RockStressCalc i numeričke evaluacije u programu Plaxis2D. U cjelini, usporedba potvrđuje ispravnu implementaciju generaliziranog Hoek–Brown kriterija u programu RockStressCalc te njegovu dosljednost u odnosu na komercijalni numerički alat Plaxis2D.

Validacija prikazana u ovom radu provedena je unutar jasno definiranih idealiziranih pretpostavki analitičkog modela: homogenog i izotropnog stijenskog masiva, linearno elastičnog ponašanja materijala, ravninskog

deformacijskog stanja te beskonačne elastične domene s kružnim podzemnim otvorom. Ove pretpostavke odgovaraju klasičnim uvjetima primjene Kirschova analitičkog rješenja te omogućuju izravnu usporedbu s numeričkim modelom bez utjecaja nelinearnih ili rubnih uvjeta koji se javljaju u složenijim geotehničkim modelima. Relativna odstupanja za ključne pokazatelje kreću se u rasponu 0,3 - 3,8 %, što je prihvatljivo za preliminarne inženjerske analize. Detaljnije razmatranje pretpostavki i ograničenja pristupa dano je u Vincek (2023).

**Tablica 1.** Sažetak validacije RockStressCalc vs. Plaxis2D (reprezentativne metrike).

Metrika (slučaj)	RockStressCalc	Plaxis2D	Rel. razlika (%)
Naprezanja, $\theta=0^\circ$	-	-	0.28
Ukupni pomak, $\theta=0^\circ$	-	-	2.95
Maks. pomak na svodu, $\theta=90^\circ$	0,754 mm	0,7836 mm	3,73
Hoek–Brown parametri i izvedene vrijednosti	identično	identično	0

#### 4. Zaključak

Razvijeni programski alat RockStressCalc omogućuje brzu, transparentnu i pouzdanu procjenu induciranih naprezanja, pomaka i čvrstoće stijenskog masiva u kružnim podzemnim otvorima. Validacija u odnosu na numerički model temeljen na metodi konačnih elemenata (Plaxis2D) pokazala je vrlo dobro slaganje rezultata, pri čemu su relativna odstupanja ograničena na približno 0,3 – 3,8 % za naprezanja i pomake, dok su parametri i izvedene vrijednosti dobiveni Hoek–Brown kriterijem pokazali potpunu podudarnost s rezultatima iz programa Plaxis2D. Time je potvrđena ispravna implementacija Kirschovih analitičkih izraza te dosljedna primjena generaliziranog Hoek–Brown kriterija u okviru transparentnog računalnog alata za preliminarne analize stabilnosti tunela. Dobiveni rezultati potvrđuju da analitički pristup implementiran u programu RockStressCalc može poslužiti kao pouzdana referentna osnova za brze parametarske analize, edukacijske primjene i neovisnu provjeru rezultata numeričkih modela u ranim fazama projektiranja tunela.

Zbog jednostavnosti primjene, jasne strukture ulaznih podataka i transparentnosti proračuna RockStressCalc se preporučuje za rane faze projektiranja, orijentacijsku procjenu stabilnosti i inicijalnu provjeru odnosa naprezanja i čvrstoće stijenskog masiva. Alat je također prikladan za edukacijske svrhe u području mehanike stijena i tunelskog inženjerstva, kao i za neovisnu provjeru numeričkih modela, gdje može poslužiti kao referentno analitičko rješenje.

Budući razvoj uključuje:

- (i) proširenje validacijskog skupa na više stvarnih tunela,
- (ii) usporedbu s dodatnim komercijalnim numeričkim programima te
- (iii) integraciju s AI/ML modelima za automatsku detekciju i procjenu rizika akcidentnih stanja u stvarnom vremenu.

#### Literatura

- Hoek, E. & Brown, E.T. (2002) ‘Practical estimates of rock mass strength’, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), pp. 777–789.
- Hudson, J.A. & Harrison, J.P. (1997) *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Oxford: Elsevier.
- Hoek, E. & Diederichs, M.S. (2006) ‘Empirical estimation of rock mass modulus’, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), pp. 203–215.

Kirsch, G. (1898) 'Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre', Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure (ZVDI), 42, pp. 797–807.

PLAXIS (2021) PLAXIS 2D Reference Manual – CONNECT Edition V21. Delft: Bentley Systems.

Vincek, J. (2023) Izrada softvera za proračun naprezanja tunela okruglog presjeka. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Dostupno na:

<https://repositorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn:2264> (Pristupljeno: 31. listopada 2025.)