

**UNIVERZITET U BEOGRADU  
TEHNIČKI FAKULTET U BORU**

**Mladen B. Radovanović**

**PRILOG DEFINISANJU GEOMETRIJSKIH  
PARAMETARA DNA OTKOPNIH BLOKOVA  
PRI PRIMENI BLOKOVSKIH METODA  
OTKOPAVANJA**

**doktorska disertacija**

**Bor, 2026**

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
TECHNICAL FACULTY IN BOR**

**Mladen B. Radovanović**

**A CONTRIBUTION TO THE DEFINITION OF  
GEOMETRIC PARAMETERS OF THE  
BOTTOM STRUCTURE OF EXCAVATION  
BLOCKS IN BLOCK MINING METHODS**

**Doctoral Dissertation**

**Bor, 2026**

## **Mentor i komisija za odbranu doktorske disertacije**

Mentor:

Dr Radoje Pantović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Članovi komisije:

Dr Dejan Petrović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Dr Dragan Zlatanović, docent  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Dr Branko Gluščević, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

# **PRILOG DEFINISANJU GEOMETRIJSKIH PARAMETARA DNA OTKOPNIH BLOKOVA PRI PRIMENI BLOKOVSKIH METODA OTKOPAVANJA**

## **SAŽETAK**

Savremeno rudarstvo karakteriše eksploatacija sve dubljih i siromašnijih ležišta, gde blokofske metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena postaju dominantne zbog visoke produktivnosti i niskih troškova dobijanja rude. Ključni izazov ovih metoda je osiguranje stabilnosti konstrukcije dna otkopnog bloka, koja je često bila u drugom planu u odnosu na procese istakanja rude.

Osnovni cilj doktorske disertacije je definisanje geometrijskih parametara dna otkopnih blokova, širina i visina podsecanja, položaj i rastojanje između utovarnih prostorija, u funkciji stabilnosti čitavog sistema.

Istraživanje sprovedeno u okviru ove disertacije kombinuje eksperimentalne, analitičke i numeričke metode. Kako bi se dobili što precizniji ulazni podaci, izvršena su in-situ merenja primarnog naponskog stanja u rudnom telu Borska Reka i sprovedena su laboratorijska ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika na uzorcima iz oslabljene zone stenskog masiva. Na osnovu eksperimentalno utvrđenih parametara, kreiran je trodimenzionalni numerički model u programskom paketu *Midas GTS NX* primenom metode konačnih elemenata i generalizovanog Hoek-Brown-ovog kriterijuma loma.

Simulacije stabilnosti sprovedene su za različite varijante konstrukcija dna bloka, pri čemu su analizirani faktor sigurnosti, vertikalna i ukupna pomeranja i naponsko stanje stenskog masiva. Rezultati istraživanja kroz više serija numeričkih simulacija omogućili su preciznu identifikaciju kritičnih zona napona i pomeranja u zavisnosti od promene širine bloka i geometrijskih odnosa prostorija podsecanja i utovara.

Rezultati numeričke analize su pokazali da promena rastojanja između bočnih utovarnih komora i visine podsecanja direktno određuje raspon krovine i opterećenje koje se prenosi na masiv između utovarnih komora. Utvrđeno je da se povećanjem rastojanja između komora izbegava preklapanje naponskih polja i lokalizuje plastifikacija, čime veći deo stenskog masiva ostaje u stabilnom, elastičnom stanju.

Glavni naučni doprinos i krajnji cilj istraživanja ogleda se u izradi univerzalnog modela za definisanje geometrijskih parametara dna otkopnog bloka za različite konstrukcije. Kombinacijom empirijskih formula i nomograma, ovaj model omogućava optimizaciju parametara dna bloka i proveru stabilnosti sistema. Uključivanjem parametara radne sredine definisanih na osnovu sprovedenih istraživanja i merenja na terenu, predloženi model dobija na pouzdanosti i kao takav predstavlja efikasno sredstvo pri projektovanju, značajno povećavajući bezbednost i ekonomičnost podzemne eksploatacije na velikim dubinama.

**Ključne reči:** podzemna eksploatacija, blokofske metode otkopavanja, dna otkopnog bloka, stabilnost, numeričko modeliranje, naponsko stanje

**Naučna oblast:** Rudarsko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

**UDK broj:** 004.942: [622.274.54:624.121 (043.3)]  
622.274.5 (043.3)

# **A CONTRIBUTION TO THE DEFINITION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE BOTTOM STRUCTURE OF EXCAVATION BLOCKS IN BLOCK MINING METHODS**

## **ABSTRACT**

Modern mining is characterized by the exploitation of increasingly deeper and lower-grade deposits, where caving methods have become dominant due to high productivity and low extraction costs. A key challenge of these methods is ensuring the stability of the excavation block bottom structure, which has often been overlooked in favor of ore draw processes.

The primary objective of this doctoral dissertation is to define the geometric parameters of the bottom structure (undercut width and height, positioning, and spacing between drawpoints) as a function of overall system stability.

The research conducted within this dissertation combines experimental, analytical, and numerical methods. To ensure the most accurate input data, in-situ measurements of the primary stress state in the Borska Reka ore body were performed, alongside laboratory testing of the physical and mechanical characteristics of samples from the weakened rock mass zone. Based on the experimentally determined parameters, a three-dimensional numerical model was developed using the Midas GTS NX software package, employing the finite element method and the generalized Hoek-Brown failure criterion.

Stability simulations were performed for various block bottom design configurations, analyzing the factor of safety, vertical and total displacements, and the stress state of the rock mass. The research results, derived from multiple series of numerical simulations, enabled the precise identification of critical stress and displacement zones depending on changes in block width and the geometric relationships between undercut and drawpoint levels.

Numerical analysis results showed that variations in the spacing between lateral loading chambers (drawpoints) and the undercut height directly determine the roof span and the load transferred to the pillars between loading chambers. It was established that increasing the distance between chambers avoids stress field overlap and localizes plastification, thereby keeping a larger portion of the rock mass in a stable, elastic state.

The main scientific contribution and ultimate goal of the research is the development of a universal model for defining the geometric parameters of the bottom structure for various designs. By combining empirical formulas and nomograms, this model enables the optimization of block bottom parameters and the verification of system stability. By incorporating working environment parameters defined through the conducted field research and measurements, the proposed model increases reliability and serves as an efficient design tool, significantly enhancing the safety and economic efficiency of underground mining at great depths.

**Keywords:** underground mining, block mining methods, excavation block bottom structure, stability, numerical modeling, stress state.

**Scientific Field:** Mining Engineering

**Specific Scientific Field:** Exploitation of Mineral Deposits

**UDK number:** 004.942: [622.274.54:624.121 (043.3)]  
622.274.5 (043.3)

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
1.1. Predmet istraživanja.....	1
1.2. Cilj istraživanja.....	2
1.3. Polazna hipoteza istraživanja .....	2
1.4. Naučne metode istraživanja i očekivani doprinos .....	3
1.5. Struktura disertacije .....	4
2. Analiza faktora i izazova podzemne eksploatacije metaličnih mineralnih sirovina na većim dubinama .....	7
2.1. Blokovske metode otkopavanja .....	10
3. Priprema dna otkopnih blokova .....	17
3.1. Priprema sa stanovišta konstrukcije dna bloka.....	17
3.2. Priprema dna bloka sa stanovišta načina istakanja i utovara rude.....	20
4. Geomehantički uslovi stabilnosti .....	22
4.1. Naponsko stanje stenskog masiva .....	22
4.1.1. Primarno naponsko stanje.....	23
4.1.2. Određivanje pravaca primarnih napona.....	26
4.1.3. Sekundarno naponsko stanje .....	27
4.2. Deformabilnost stenskih masa .....	29
4.3. Kriterijumi loma stenske mase .....	30
4.3.1. Mohr – Coulomb-ov kriterijum loma.....	31
4.3.2. Hoek – Brown-ov kriterijum loma .....	32
5. Istraživačke metode .....	34
5.1. Analitičke metode .....	34
5.1.1. Regresione metode u analitičkom modelovanju.....	35
5.2. Empirijske metode.....	35
5.3. Metode opažanja.....	36
5.4. Numeričke metode.....	36
5.4.1. Metoda konačnih elemenata .....	38
5.4.2. Metoda konačnih razlika .....	38
5.4.3. Metoda graničnih elemenata .....	39
5.4.4. Metoda konačnih zapremina.....	39
5.4.5. Metoda razdvojenih elemenata .....	39
5.4.6. Metoda razdvojenih mreža lomova.....	40
5.5. Metode merenja naponskog stanja .....	40

5.5.1. Flatjack metoda merenja napona.....	40
5.5.2. Metoda hidrauličkog loma.....	41
5.5.3. Metode rejezgrovanja po USBM i CSIRO .....	42
5.5.4. Merenje napona mernim uređajem MS-IRM 2 .....	42
5.6. Primjenjene metode istraživanja .....	43
6. Numeričko modeliranje stabilnosti dna otkopnih blokova .....	45
6.1. Izbor lokacije za prikupljanje ulaznih podataka pri numeričkom modeliranju .....	46
6.2. Definisanje poremećene zone stenske mase .....	48
6.3. Merenje naponskog stanja za potrebe numeričkog modeliranja .....	56
6.3.1. Analiza rezultata merenja naponskog stanja .....	59
6.4. Određivanje kvaliteta stenske mase .....	62
6.5. Kreiranje numeričkog modela za geotehničku analizu stabilnosti.....	64
7. Analiza rezultata numeričkog modeliranja konstrukcije dna otkopnih blokova .....	67
7.1. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model I.....	68
7.1.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m .....	68
7.1.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m .....	74
7.1.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m .....	79
7.1.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model I.....	85
7.2. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model II.....	87
7.2.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m .....	88
7.2.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m .....	92
7.2.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m .....	97
7.2.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model II.....	103
7.3. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model III.....	105
7.3.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m .....	105
7.3.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m .....	110
7.3.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m .....	115
7.3.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model III.....	121

7.4. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model IV.....	123
7.5. Komentar.....	127
7.6. Definisanje univerzalnog modela stabilnosti .....	128
8. Zaključak.....	131
Literatura.....	133

## Zahvalnost

*Izradu ove doktorske disertacije pratio je dug put, popločan radom, odricanjima, ali i nesebičnom podrškom ljudi bez kojih ovaj uspeh ne bi bio moguć.*

*Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima, Branetu i Mirjani. Hvala ocu na podršci, a majci hvala na безусловnoj ljubavi i veri koju je u mene utkala; verujem da bi danas bila ponosna na ovaj veliki uspeh.*

*Najveći oslonac i smisao svega što radim dugujem svojoj porodici. Hvala mojoj supruzi Ivani na beskrajnom strpljenju i razumevanju, kojim je pratila svaki moj korak do završetka ove disertacije, kao i mojim sinovima, Zdravku i Branku, čiji su osmesi bili najlepši predah i motivacija da istrajem do kraja.*

*Svoju profesionalnu stazu dugujem ljudima koji su me uveli u svet nauke i oblikovali moj akademski put. Neizmernu zahvalnost dugujem svom prvom mentoru, prof. dr Vitomiru Miliću. On je bio čovek koji mi je otvorio vrata fakulteta, preneo ljubav prema rudarstvu i naučio me prvim profesionalnim koracima. Njegov trag u mom radu i profesionalnom biću ostaje neizbrisiv.*

*Zahvaljujem mentoru prof. dr Radoju Pantoviću, redovnom profesoru Tehničkog fakulteta u Boru i članovima komisije: dr Dejanu Petroviću, vanrednom profesoru Tehničkog fakulteta u Boru, dr Draganu Zlatanoviću, docentu na Tehničkom fakultetu u Boru i dr Branku Gluščeviću, redovnom profesoru Rudarsko-geološkog fakulteta u Beogradu, na stručnim savetima, usmeravanju i konstruktivnim kritikama koje su značajno oblikovale ovaj rad.*

*Posebno se zahvaljujem dr Milenku Ljubojevu, naučnom savetniku i Slavoljubu Obradoviću na nesebičnoj pomoći i saradnji tokom zahtevnih terenskih istraživanja. Bez njihovog dragocenog iskustva i zajedničkog rada na terenu, ovi rezultati ne bi bili potpuni.*

*Na kraju, veliku zahvalnost izražavam Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor i Rudniku bakra Jama, koji su mi omogućili pristup resursima i pružili logističku podršku za sprovođenje istraživanja, prepoznavši značaj ove teme za rudarsku struku.*

## 1. Uvod

U većini rudnih ležišta koja zaležu na manjim dubinama eksploatacija mineralnih sirovina je završena ili je u završnoj fazi tako da je u trenutnoj situaciji glavna karakteristika podzemne eksploatacije sve veća dubina na kojoj se otkopavanje odvija, uz sve niži sadržaj korisnih komponenti. I u takvim uslovima teži se ostvarenju pozitivnog ekonomskog rezultata kako bi se omogućila rentabilnost eksploatacije, što se može postići odabirom adekvatne metode otkopavanja. Međutim, pre svih uslova koje treba ispuniti da bi se vršila efikasna i ekonomična eksploatacija, potrebno je obezbediti bezbedne i sigurne uslove za rad. Da bi se to ostvarilo potrebno je obezbediti stabilnost otkopnih blokova, što se može postići odabirom optimalnih parametara i pravilnom konstrukcijom dna otkopnih blokova.

Blokovske metode otkopavanja, naročito one iz grupe sa zarušavanjem rude i pratećih stena, imajući u vidu njihovu visoku proizvodnost i produktivnost i niske troškove eksploatacije, preuzimaju vodeću ulogu pri eksploataciji rudnih ležišta sa siromašnom rudom, koja zaležu na većim dubinama. Kod blokovskih metoda otkopavanja proces istakanja rude je od suštinskog značaja za iskorišćenje i osiromašenje rude, a samim tim i za efikasnost metode otkopavanja. Stabilnost otkopa, kao i uspešnost procesa istakanja rude zavisice pre svega od konstrukcije dna otkopnih blokova uključujući prostorije podsecanja, bušenja, utovara, njihov međusobni položaj i rastojanje, kao i veličinu i oblik poprečnog preseka ovih prostorija.

### 1.1. Predmet istraživanja

Dosadašnja istraživanja blokovskih metoda su uglavnom bila usmerena na proces istakanja rude, bez posebne analize stabilnosti i provere prostorija u dnu bloka. Iskustva iz rudnika u kojima se primenjuje blokovsko samoobrušavanje rude pokazuju da se parametri otkopnih blokova određeni na osnovu najoptimalnijih vrednosti za iskorišćenje i osiromašenje rude ne moraju poklapati sa najpovoljnijim parametrima sa aspekta stabilnosti. U cilju optimizacije radnih uslova i ekonomskih pokazatelja, potrebno je parametre otkopa odrediti korelacijom rezultata ispitivanja istakanja rude i geomehaničke stabilnosti otkopne konstrukcije.

Geometrijski parametri dna otkopnih blokova, kao i vrsta konstrukcije dna otkopnih blokova uslovljeni su usvojenom metodom otkopavanja i dimenzijama otkopnih blokova koji se najčešće određuju prema najpovoljnijim vrednostima iskorišćenja i osiromašenja rude. Usled sve složenijih uslova u kojima se eksploatacija odvija u današnje vreme, definisanje geometrijskih parametara dna otkopnih blokova sa aspekta stabilnosti dobija na značaju. Pored konstruktivnih karakteristika dna bloka, dubine na kojoj se vrši eksploatacija, fizičko-mehaničkih karakteristika i primarnog naponskog stanja stenskog masiva, pri analizi stabilnosti dna bloka treba uzeti u obzir i karakteristike koje nisu odraz prirodnog stanja stenske mase, a mogu uticati na promenu njenog kvaliteta. Prilikom izrade prostorija i formiranja dna otkopa, kao i usled miniranja pri eksploataciji rude, u delovima oko iskopa formiraju se zone sa lošijim geomehaničkim karakteristikama u odnosu na intaktnu stenu. Veličina oslabljene zone, to jest njena širina i stepen oštećenja, koji nastaju kao posledica izvođenja rudarskih radova zavise od primenjene tehnologije izrade prostorija, odnosno načina otkopavanja i uslova radne sredine. Kvalitet miniranja u kombinaciji sa sadržajem vlage u jamskom vazduhu, uz prisustvo pukotinskih sistema, osim na širinu oslabljene zone utiče i na stepen oštećenja stenske mase. Generalizovani Hoek-Brown-ov kriterijum loma koji se koristi pri analizi naponsko-deformacionih stanja uključuje stepen oštećenja stenske mase usled miniranja u određenoj meri. Međutim, konstante koje uzimaju u obzir oštećenja stenske mase kod ovog kriterijuma loma usvajaju se samo na osnovu pretpostavki o kvalitetu miniranja pri izradi prostorija ili formiranju otkopa, što ukazuje na to da bi najefikasnije rešenje bilo kada bi se stepen oštećenja stenske mase odredio in-situ i kao takav iskoristio u analizi stabilnosti. Na taj način bi se prilikom kreiranja modela mogla definisati zona sa lošijim geomehaničkim karakteristikama oko izrađenih prostorija u dnu otkopnog bloka i na taj način

dobiti precizniji rezultati koji bi sa inženjerskog aspekta imali mnogo veću primenu, pogotovo pri eksploataciji na većim dubinama.

Predmetom istraživanja disertacije definišu se parametri kao što su širina, visina podsecanja, položaj i rastojanje između utovarnih prostorija u dnu bloka itd., u funkciji stabilnosti dna otkopnih blokova i prostorija pripreme u njima. Fizičko-mehaničke karakteristike stenske sredine dobijene laboratorijskim ispitivanjem na uzorcima iz dela prostorija koje su oslabljene pod uticajem dejstva rudarskih radova, fizičko-mehaničke karakteristike neporemećene radne sredine i naponsko stanje stenske mase dobijeno merenjima na terenu, koriste se kao ulazni podaci prilikom kreiranja modela. Kreiranje numeričkog modela vrši se u programskim paketima koji omogućavaju 3D analizu stabilnosti i na taj način se utvrđuje na koji način i u kojoj meri svaki od parametara utiče na stabilnost različitih konstrukcija dna otkopnih blokova, a samim tim i na stabilnost čitavog sistema.

### 1.2. Cilj istraživanja

Kod blokovskih metoda otkopavanja osim parametara otkopnih blokova veoma bitnu ulogu ima konstrukcija dna otkopnih blokova. S obzirom na to da se u dnu bloka, tj. u prostorijama u dnu bloka odvijaju sve glavne tehnološke operacije pri eksploataciji, kao što su utovar, bušenje, miniranje, po potrebi i zapunjavanje otkopnih prostora, znači da je stabilnost ovih prostorija od najvećeg značaja za bezbednost zaposlenih pri otkopavanju, kao i uspešnu primenu izabrane metode.

U prvoj fazi neophodno je analizirati parametre blokovskih metoda koje imaju najširu primenu u praksi i pripremu dna bloka sa stanovišta konstrukcije kako bi se definisali parametri neophodni za kreiranje modela. Tu se pre svega misli na širinu i visinu otkopnih blokova, vrstu i konstruktivne karakteristike dna bloka (visina i širina podsecanja, način utovara rude, položaj i rastojanje između utovarnih hodnika itd.).

U narednoj fazi potrebno je analizirati geomehničke uslove stabilnosti sa ciljem usvajanja parametara koji utiču na stabilnost posmatranog sistema rudničkih prostorija, a koji bi se koristili kao ulazni podaci pri kreiranju modela. Vrednost napona određena analitičkim i empirijskim metodama u praksi se ne mora poklapati sa stvarnim naponskim stanjem u stenskom masivu. Oko izrađenih prostorija formira se oslabljena zona u kojoj su usled izvođenja rudarskih radova geomehničke karakteristike znatno lošije nego kod intaktne stene. Zbog toga će se u ovoj fazi izvršiti određivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva oko prostorija sa ciljem da se utvrde njihove stvarne vrednosti.

Nakon prikupljanja i obrade podataka pristupa se kreiranju numeričkog modela na osnovu definisanih ulaznih parametara, pomoću koga se može odrediti u kojoj meri i na koji način određeni parametar utiče na stabilnost dna otkopnog bloka i na osnovu koga se mogu za usvojene dimenzije otkopnog bloka i dubinu na kojoj se vrši eksploatacija odrediti najpovoljniji geometrijski parametri dna otkopnog bloka.

### 1.3. Polazna hipoteza istraživanja

Sigurnost i zdravi uslovi rada su prvi i najvažniji uslov koji primenjena metoda otkopavanja mora da ispuni. Pored toga metoda otkopavanja mora da omogući i obezbeđenje potrebnog kapaciteta proizvodnje uz niske gubitke korisne sirovine i niske troškove proizvodnje. Imajući u vidu da se eksploatacija mineralnih sirovina odvija na sve većim dubinama, kao i da su za otkopavanje preostala uglavnom siromašnija ležišta, za ostvarenje prethodno navedenih uslova sve češće se primenjuju visokoprodne i visokoproduktivne blokovske i podetažne metode otkopavanja. Karakteristika ovih metoda je dobijanje rude iz otkopa većih dimenzija uz smanjenje obima pripremnih radova. Najveći deo pripreme za otkopavanje kod ovih metoda otpada na pripremu dna otkopnih blokova. S

obzirom na to da se eksploatacija ležišta mineralnih sirovina odvija u sve složenijim uslovima i na sve većim dubinama, sagledavanje geomehaničkih parametara otkopnih blokova i stenskog masiva dobijaju na sve većem značaju.

Mali broj istraživača se bavio određivanjem geometrijskih parametara i konstruktivnih karakteristikama dna otkopnih blokova u funkciji stabilnosti. Da bi se uspešno izvršila analiza stabilnosti potrebno je poznavati naponsko-deformaciono stanje stenskog masiva, kao i geomehaničke osobine rude i pratećih stena. Generalno uzevši svi problemi, sa stanovišta naponsko-deformacijske analize rudarskih konstrukcija su trodimenzionalni, pa je zato za analizu neophodno kreirati trodimenzionalne modele. Prostorna analiza zahteva dugo vreme pripreme, odnosno za kreiranje adekvatnog modela potrebno je prikupiti što preciznije ulazne podatke kako bi rizik od pojavljivanja grešaka bio sveden na minimum. Zbog toga je, da bi se dobile što realnije vrednosti napona, najbolje izvršiti merenja in-situ. Takođe, imajući u vidu da pod uticajem izvođenja rudarskih radova dolazi do formiranja oslabljenih zona sa lošijim geomehaničkim karakteristikama oko prostorija u dnu bloka, potrebno je ispitivanjem na uzorcima prikupljenim sa terena odrediti te vrednosti kako bi se i zone oslabljenja sa većom preciznošću uzele u obzir prilikom kreiranja modela.

Pomoću softvera za trodimenzionalnu analizu nekom od numeričkih metoda, može se izvršiti analiza stabilnosti određenih konstrukcija dna otkopnih blokova na određenim dubinama i tako odrediti parametri dna bloka pod kojima bi se nesmetano i na bezbedan način odvijala eksploatacija.

Prikupljanje uzoraka za određivanje fizičko-mehaničkih osobina stenske mase koji su se koristili pri kreiranju modela za analizu stabilnosti, sprovedeni su u rudnom telu Borska Reka, u okviru rudnika bakra Jama, koji se nalazi u sastavu Rudnika bakra Bor. Rudno telo Borska Reka pripada kategoriji ležišta velikih razmera, sa niskim sadržajem korisne komponente. Prosečna krajnja dubina rudnog tela od površine terena je oko 900 m, što ukazuje na to da ležište Borska Reka zaleže duboko ispod površine terena. Trenutno se eksploatacija u ovom rudnom telu odvija na XVII i XIX horizontu na 600-700 m dubine od površine terena primenom varijanti komorno-stubnih i metoda sa zarušavanjem rude i pratećih stena, dok su dublji delovi ležišta u fazi pripreme za otkopavanje primenom neke od varijanti blokovskih metoda. Imajući u vidu da je glavna karakteristika podzemne eksploatacije širom sveta eksploatacija ležišta na sve većim dubinama sa niskim sadržajem korisne komponente može se zaključiti da rudno telo Borska Reka predstavlja adekvatno mesto za eksperimentalna istraživanja.

Na osnovu svega navedenog postavljena je glavna hipoteza istraživanja:

*Primenom eksperimentalnih i numeričkih metoda moguće je kreirati model koji se može koristiti za određivanje parametara dna otkopnih blokova u zavisnosti od konstrukcije otkopa, dubine na kojoj se vrši eksploatacija i geomehaničkih karakteristika stenske mase, za koje će posmatrani sistem biti stabilan.*

### 1.4. Naučne metode istraživanja i očekivani doprinos

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije sprovedena su kroz sledeće faze:

- Literaturni pregled dosadašnjih istraživanja iz posmatrane oblasti, kao i drugih relevantnih izvora;
- Teorijska analiza parametara blokovskih metoda otkopavanja i pripreme dna bloka;
- Teorijska analiza geomehaničkih uslova stabilnosti – naponsko stanje stenskog masiva, deformabilnost stenskih masa, kriterijumi loma stenske mase;

- Eksperimentalni deo – prikupljanje uzoraka i laboratorijsko određivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stenske sredine oko izrađenih prostorija, in situ merenje naponskog stanja, prikupljanje i obrada dobijenih podataka, selekcija i odabir ulaznih parametara;
- Analiza mogućnosti primene numeričkih metoda pri kreiranju modela za analizu stabilnosti;
- Kreiranje numeričkog modela;
- Analiza i diskusija dobijenih rezultata i zaključni komentari.

U početnoj fazi istraživanja sa ciljem izrade doktorske disertacije, izvršeno je određivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stenske sredine oko izrađenih prostorija pripreme, standardizovanim laboratorijskim metodama na uzorcima dobijenim iz bušotina u bokovima prostorija.

Vrednost napona određena analitičkim i empirijskim metodama u praksi se ne mora poklapati sa stvarnim naponskim stanjem u stenskom masivu, pa je zbog toga merenje naponskog stanja izvršeno neposredno u samom rudnom telu. Oko izrađenih prostorija formira se oslabljena zona u kojoj su usled izvođenja rudarskih radova geomehaničke karakteristike znatno lošije nego kod intaktne stene. Zbog toga je neophodno izvršiti određivanje fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva oko prostorija sa ciljem utvrđivanja njihovih stvarnih vrednosti. Analiza geomehaničkih uslova stabilnosti na osnovu tako određenih fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva, omogućava usvajanje ulaznih parametara za kreiranje modela, koji utiču na stabilnost posmatranog sistema rudničkih prostorija u dnu otkopnog bloka. Osim toga neophodno je analizirati i parametre blokovskih metoda koje imaju najširu primenu u praksi i pripremu dna bloka sa stanovišta konstrukcije kako bi se usvojili parametri neophodni za kreiranje modela. Tu se pre svega misli na širinu i visinu otkopnih blokova, vrstu i konstruktivne karakteristike dna bloka (visina i širina podsecanja, način utovara rude, položaj i rastojanje između utovarnih hodnika itd.).

U drugom delu disertacije, na osnovu dobijenih podataka i konstruktivnih parametara otkopnih blokova i pripremnih radova u dnu otkopnih blokova, izvršeno je kreiranje numeričkog trodimenzionalnog modela u programskom paketu Midas GTS NX primenom metode konačnih elemenata. Pri kreiranju modela za kriterijum loma korišćen je generalizovani Hoek-Brown-ov kriterijum loma. Na tako konstruisanom numeričkom modelu primenom metode konačnih elemenata za promenljive vrednosti geometrijskih parametara dna otkopnih blokova, izvršena je analiza stabilnosti preko faktora sigurnosti, veličina napona i pomeranja, pri čemu različite kombinacije ulaznih parametara i njihovih vrednosti dovode do različitih izlaznih vrednosti, odnosno rezultata.

Kao rezultat istraživanja u okviru disertacije očekivano je ostvarenje naučnog doprinosa koji se ogleda u izradi univerzalnog modela za određivanje geometrijskih parametara dna bloka pomoću analize stabilnosti, pri primeni blokovskih metoda otkopavanja, za različite konstrukcije dna otkopnih blokova.

S obzirom na to da model uzima u obzir realne parametre radne sredine (stepen oštećenja i širinu oslabljene zone koja se formira oko prostorija) i orijentaciju i veličinu glavnih napona merenih na terenu, kreirani model se može koristiti za određivanje geometrijskih parametara i konstrukcije dna otkopnih blokova, koji posmatranoj metodi otkopavanja mogu obezbediti potrebnu stabilnost, a samim tim i omogućiti sigurne uslove za rad na eksploataciji.

### 1.5. Struktura disertacije

Istraživanja u okviru doktorske disertacije mogu se podeliti u dve glavne celine – teorijsku i eksperimentalnu. U okviru teorijskog dela izvršena je analiza uslova eksploatacije na velikim dubinama, sa pregledom blokovskih metoda otkopavanja i pripremom dna otkopnih blokova. Teorijski deo obuhvata i analizu numeričkih metoda primenjivih za geomehaničku analizu stabilnosti,

kao i pregled metoda merenja naponsko-deformacionog stanja i kriterijume loma stenske mase. Eksperimentalni deo disertacije odnosi se na izbor lokacije za prikupljanje ulaznih podataka za kreiranje modela, definisanje geomehaničkih parametara stabilnosti na osnovu terenskih merenja i rezultata ispitivanja prikupljenih uzoraka sa odabranih lokacija. Krajnji cilj eksperimentalnog dela je kreiranje numeričkog modela na osnovu koga se, geomehaničkom analizom stabilnosti mogu definisati geometrijski parametri dna otkopnog bloka za izabranu metodu otkopavanja.

Prema datom planu istraživanja definisana je struktura doktorske disertacije koju čine sledeća poglavlja:

1. Uvod,
2. Analiza faktora i izazova podzemne eksploatacije metalčnih mineralnih sirovina na većim dubinama,
3. Priprema dna otkopnih blokova
4. Geomehanički uslovi stabilnosti
5. Istraživačke metode
6. Numeričko modeliranje stabilnosti dna otkopnih blokova
7. Analiza rezultata numeričkog modeliranja konstrukcija dna otkopnih blokova
8. Zaključak

Prvo poglavlje predstavlja uvodni deo u okviru koga su definisani i obrazloženi predmet i cilj istraživanja, uz uspostavljanje osnovne naučne hipoteze istraživanja. Takođe u ovom delu je dat i kratak opis naučnih metoda istraživanja koje su korišćene tokom izrade ove disertacije.

U drugom poglavlju je analiziran trend prelaska na eksksploataciju na većim dubinama usled iscrpljivanja plićih ležišta i opadanja kvaliteta rude. Opisane su i klasifikovane blokovske metode otkopavanja, sa posebnim osvrtom na metode za zarušavanjem rude i pratećih stena, kao grupu metoda koje preuzimaju primat pri eksploataciji siromašnijih ležišta koja zaležu na većim dubinama. Pored toga identifikovani su ključni geomehanički i ekonomski izazovi rada na velikim dubinama uz naglasak da su izbor optimalnih konstrukcija otkopa i upravljanje pritiscima (naponima) ključni za bezbedan rad.

U trećem poglavlju analizirana je priprema dna otkopnih blokova sa stanovišta konstrukcije i načina istakanja i utovara rude.

Četvrto poglavlje obrađuje geomehaničke uslove stabilnosti, sa fokusom na definisanje primarnog i sekundarnog naponskog stanja stenske mase. Takođe u ovom poglavlju su opisani deformabilnost stenske mase i kao i najvažniji kriterijumi loma sa posebnim osvrtom nanjihovu praktičnu primenu.

Peto poglavlje sistematizuje istraživačke metode za analizu stabilnosti konstrukcija dna otkopnih blokova, obuhvatajući analitičke, empirijske, numeričke i metode opažanja. U ovom poglavlju akcenat je stavljen na mogućnost primene numeričkog modeliranja i geomehaničkih klasifikacija za definisanje naponsko-deformacionog stanja stenske mase. Osim toga, dodatno su opisane i neke od najčešće primenjivanih metoda merenja naponskog stanja.

U šestom poglavlju definisani su ulazni parametri numeričkog modela kroz proces in-situ merenja primarnih napona, primene geotehničkih klasifikacija kvaliteta stenske mase i fizičko-mehaničkih karakteristika stenske mase na izabranoj lokaciji. Pored toga definisana je i poremećena zona radne sredine oko podzemnih objekata na osnovu laboratorijskih ispitivanja uzoraka stenske mase i opisana je metodologija kreiranja 3D numeričkog modela.

Sedmo poglavlje predstavlja detaljnu analizu rezultata numeričkog modeliranja različitih varijanti konstrukcije dna otkopnog bloka u funkciji različitih parametara stabilnosti. Kroz četiri

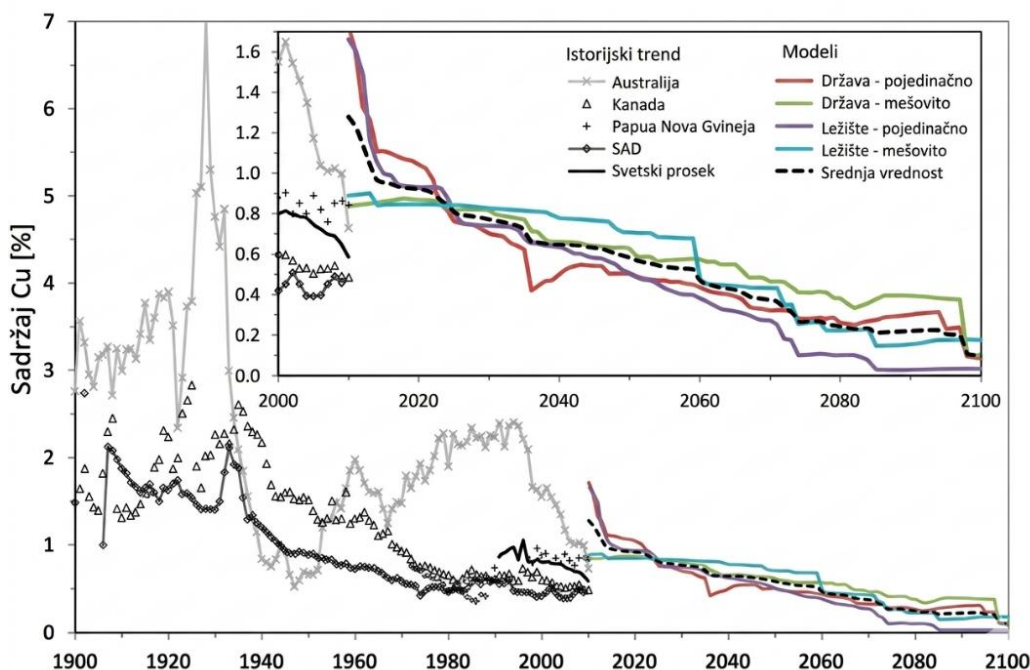
glavna modela i brojne simulacije, ispitana je interakcija između osnovnih geometrijskih elemenata dna bloka čime su precizno identifikovane kritične tačke sistema. Rezultati su predstavljeni tabelarno, grafički i putem empirijskih formula. Ključni doprinos poglavlja je definisanje optimalnih geometrijskih odnosa za predviđanje stabilnosti, što omogućava projektovanje bezbednih radnih uslova pri eksploataciji na velikim dubinama.

Poglavlje osam predstavlja završno poglavlje disertacije, gde su prikazani izvedeni zaključci i doprinosi na osnovu dobijenih i analiziranih rezultata iz prethodnog poglavlja.

## 2. Analiza faktora i izazova podzemne eksploatacije metaličnih mineralnih sirovina na većim dubinama

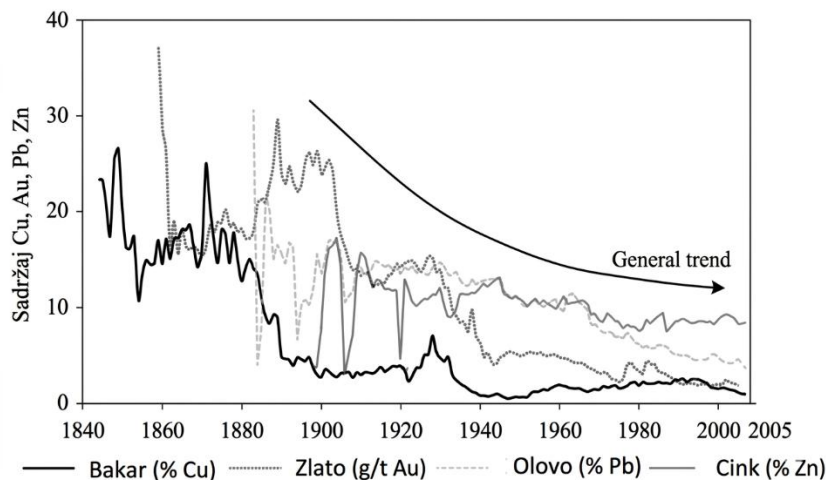
Mineralne sirovine, a naročito metali, imaju ključnu ulogu u razvoju savremenog društva. S obzirom na to da su poznate količine mineralnih rezervi ograničene, pitanje njihovog iscrpljivanja zauzima centralno mesto u ekonomskim analizama i naučnim istraživanjima [1]. Pored toga, dugotrajna eksploatacija dovodi do smanjenja kvaliteta preostalih ležišta, što se najčešće manifestuje kroz opadanje sadržaja metala u rudi. Brojne studije ukazuju na dugoročni trend smanjenja sadržaja metala u rudi kod eksploatiranih ležišta [2–7], pri čemu je važno napomenuti da pouzdani podaci o sadržaju metala u ležištima koja još nisu u procesu eksploatacije ili su još u fazi istraživanja, u velikoj meri nedostaju [4]. Kako se ležišta sa visokim sadržajem korisne komponente u rudi postepeno iscrpljuju, u eksploataciju se sukcesivno uvode nova ležišta kako bi se zadovoljila rastuća potražnja za mineralnim sirovinama. O uzrocima smanjenja sadržaja metala u rudi se vode brojne polemike pa se zato postavlja pitanje da li je to posledica isključivo geoloških faktora i samim tim pokazatelj iscrpljivanja mineralnih resursa ili je reč o složenom međudejstvu geoloških, ekonomskih, tehnoloških i društvenih činilaca [8].

Faktori koji utiču na promene sadržaja metala u rudi, kao i trend promene sadržaja metala daju se najčešće na primeru bakra kao jednog od prvih metala koji je počeo da se eksploatiše i koji i dalje ima izuzetno značajnu ulogu u funkcionisanju savremenog društva. Postoji opšteprihvaćena pretpostavka da je prosečan sadržaj bakra u eksploatiranim rudama tokom vremena kontinuirano opadao (slika 2-1) čemu u prilog govori i činjenica da je globalni prosečan sadržaj bakra od pre nekoliko decenija smanjen sa tadašnjih 2–3% na današnjih 0,6–0,8% [9–12]. Razlog tome je eksploatisanje ležišta sa višim sadržajem bakra u ranim fazama razvoja rudarstva, koja su ujedno bila i najpristupačnija i tehnološki najjednostavnija za preradu [5]. Ipak, slični trendovi opadanja sadržaja metala u rudi prisutni su i kod drugih metala (slika 2-2) [1].



Slika 2-1 Sadržaj bakra u otkopanoj rudi do 2010. godine i predviđeni trend sadržaja do 2100. godine [3]

Primarni uzroci trenda smanjenja sadržaja metala u rudama uključuju iscrpljivanje visokokvalitetnih i plitkih ležišta, kao i tehnološki napredak u eksploataciji i preradi što omogućava otkopavanje i ležišta sa nižim sadržajem korisne komponente za razliku od nekih prošlih vremena.



Slika 2-2 Prosečni sadržaj bakra, zlata, olova i cinka u australijskim rudnicima od sredine 19. veka do 2007. godine [13]

Za neke od najvećih površinskih kopova u svetu se očekuje da dostignu svoje krajnje granice u narednih 10 do 15 godina [14]. Pored toga, u mnogim rudnicima se planira prelazak sa površinske na podzemnu eksploataciju zbog povećanja dubine otkopavanja i strožih zahteva u pogledu zaštite životne sredine [15]. Sve to u kombinaciji sa prethodnim navodima ukazuje da budućnost rudarstva leži u podzemnoj eksploataciji, odnosno eksploatacija na većim dubinama (*deep underground mining*) predstavlja budućnost rudarstva i pored svih izazova koje nosi sa sobom [16]. Trenutno, rudnici sa podzemnom eksploatacijom čine oko 40 % globalnih rudarskih operacija, obuhvatajući otkopavanje različitih vrsta i tipova ležišta, primenom raznovrsnih metoda otkopavanja širom sveta, uz značajne razlike što se tiče produktivnosti rada i troškova otkopavanja [17].

Usled iscrpljivanja plitkih ležišta, odnosno ležišta koja zaležu na relativno manjim dubinama, pomeranje granica ka dubljim delovima Zemljine kore postalo je neizbežno kako bi se zadovoljile potrebe globalne ekonomije i omogućila energetska tranzicija [18]. Prelazak na eksploataciju ležišta koja zaležu na većim dubinama je neizbežan i već je u toku, jer su resursi dobijeni iz takvih rudnika neophodni za opstanak i razvoj savremenog društva i omogućavanje postepenog prelaska na obnovljive izvore energije.

Iako ne postoji univerzalna definicija tzv. „duboke eksploatacije“ (*deep mining*), u savremenom rudarstvu se sve češće suočavamo sa radom na dubinama većim od 1000 m. Bawden [19] smatra dubokim rudnicima sve rudnike u kojima se eksploatacija odvija na dubinama većim od 1000 m. Suorineni [20] pravi razliku između dubokih rudnika kod eksploatacije ugljeva i metalnih mineralnih sirovina i daje podelu po dubini u slučaju metalnih ležišta (tabela 2-1). Međutim naponi da se izvrši kategorizacija prema samoj dubini nisu široko prihvaćeni s obzirom na to da je problem znatno kompleksniji zbog velikog broja uticajnih faktora i potencijalnih rizika. Zato neki autori predlažu pristup definisanju „dubokih rudnika“ iz perspektive naponskog stanja stenskog masiva na osnovu odnosa napona i čvrstoće stenske mase [21].

Tabela 2-1 Klasifikacija rudnika sa podzemnom eksploatacijom metaličnih mineralnih sirovina prema dubini

Kategorija	Dubina [m]	Opis	Komentar
1	< 500	Veoma plitki rudnici	Strukturno indukovani lomovi mogu biti dominantni u čvrstim stenama.
2	500 – 1000	Plitki rudnici	Ovo je dubina nekih površinskih kopova. Na ovim dubinama se mogu javiti problemi usled napona indukovanim operativnim procesima.
3	1000 – 1500	Srednje duboki rudnici	Uglavnom manji problemi, ali stenska masa može početi da "radi" i modifikovani uslovi uzrokovani operativnim procesima mogu izazvati značajne probleme. Maksimalna dubina eksploatacije uglja u ovom opsegu. Za ugajl, 1500 m može biti mega-dubina. Na ovim dubinama počinju problemi uzrokovani naponima.
4	1500 – 3000	Duboki rudnici	Značajni problemi uzrokovani naponima. Merenja napona predstavljaju veliki izazov.
5	3000 – 4000	Ultra duboki rudnici	Logistika i stabilnost stenske mase su veliki izazov.
6	> 4000	Mega duboki rudnici	Malo iskustva sa ovih dubina – neistražena područja.

U poređenju sa eksploatacijom u blizini površine terena, sa povećanjem dubine podzemna eksploatacija se suočava sa kompleksnim izazovima kao što su stabilnost podzemnih prostorija, povećanje temperature, vlažnost vazduha, prodori mulja, obrušavanje, pojava opasnih gasova itd. Sa povećanjem dubine izvođenja rudarskih radova, najznačajniji uticaji na stensku masu su porast napona (pritisak stena) i temperature stena. Sa porastom napona, ponašanje stenske mase se menja i postaje teže za predviđanje, što povećava operativne rizike [22, 23]. Teorijski, vertikalni napon raste linearno sa dubinom, u zavisnosti od težine višeležećih slojeva [24-26]. Nasuprot tome, horizontalni napon pokazuje drugačiji obrazac koji uglavnom zavisi od tipa stene pa tako na primer u rudniku Kiruna, sa povećanjem dubine, horizontalni napon postaje glavni primarni napon [27]. Na većim dubinama prirodni naponi (*in-situ stresses*) se redistribuiraju oko iskopa i mogu se koncentrisati u određenim zonama [28]. Ovakve koncentracije napona dovode do deformacija, oštećenja i loma stenske mase, kao i urušavanja podzemnih prostorija [29, 30]. Takođe, naponi indukovani pod uticajem rudarskih aktivnosti, seizmički talasi (*mining induced seismicity*), gorski udari, vazdušni udari (pod dejstvom miniranja i prinudnog ili naglog obrušavanja stena) predstavljaju kritične rizike koji mogu dovesti do obustavljanja proizvodnje kao i fatalnih ishoda i zatvaranja rudarskih kompleksa. Zbog toga, ukoliko se tradicionalne rudarske tehnologije ne prilagode takvom radnom okruženju, bezbednost izvođenja radova biće neminovno ugrožena [31].

Podzemna eksploatacija je opravdana kada je mineralna sirovina pogodna za profitabilno otkopavanje i kada ima manji ekološki uticaj (*ground footprint*) u poređenju sa površinskom eksploatacijom. Ostvarivanje profita uz najniže moguće proizvodne troškove jedan je od primarnih ciljeva eksploatacije [32]. S obzirom na to da se sa porastom dubine povećavaju i troškovi otkopavanja, neophodno je prilagođavanje postojećih metoda otkopavanja i implementacija inovativnih rešenja kako bi se održala profitabilnost i bezbednost kroz optimalnije otkopavanje i povećanje stope proizvodnje čime bi se prevazišli izazovi povezani sa dubinom [33-36].

Povećanje proizvodnje, optimizacija i automatizacija procesa eksploatacije mogu se postići primenom odgovarajuće metode otkopavanja. U najvećem broju slučajeva metoda otkopavanja uslovljava većinu ostalih rešenja, koja se odnose na transport i izvoz mineralne sirovine, provetravanje ležišta, a često i sam izbor načina otvaranja i razrade ležišta. Prilikom izbora metode otkopavanja i njenih konstruktivnih parametara neophodno je ispuniti neke tehničko-ekonomske uslove, među kojima treba istaći kao najvažnije sigurnost i bezbedne uslove rada, niske gubitke

korisne sirovine (što veće iskorišćenje, uz minimalno osiromašenje rude), obezbeđenje potrebnog kapaciteta proizvodnje i niske troškove proizvodnje [37].

U dosadašnjoj rudarskoj praksi primena visokoproduktivnih i visokoproizvodnih podetažnih i blokovskih metoda otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena pokazala se kao najpovoljnija pri otkopavanju siromašnijih ležišta koja zaležu na većim dubinama, pri čemu je metoda blokovskog samoobrušavanje rude povezana sa najnižim operativnim troškovima i najviše se približava prosečnim troškovima eksploatacije kod površinskih otkopa [38].

## **2.1. Blokofske metode otkopavanja**

Podzemna eksploatacija podrazumeva različite metode otkopavanja mineralnih sirovina ispod površine terena [39]. U podzemnoj eksploataciji sve je podređeno metodi otkopavanja. Primenjena metoda otkopavanja obezbeđuje potrebnu efikasnost i ekonomičnost otkopavanja, sigurnost rada i racionalno iskorišćenje mineralne sirovine [40]. Metoda otkopavanja je zapravo način rada kojim se vrši otkopavanje ležišta, i određena je sistemom razrade i pripreme, kao i međusobnim prostornim odnosom prostorija pripreme i konstruktivnih elemenata otkopa kao osnovne proizvodne jedinice [41]. Metode podzemnog otkopavanja se značajno razlikuju kada se radi o otkopavanju slojevitih ležišta, pre svega, ležišta uglja, u odnosu na eksploataciju ležišta metaličnih (rudnih) mineralnih sirovina. Metodom otkopavanja definišu se oblik i dimenzije otkopne konstrukcije, način i redosled dezintegracije rude iz prirodnog okruženja, upravljanje stenskim masivom, tehnološki postupci otkopavanja koji uključuju i izbor mehanizacije, provetravanje otkopnih radilišta kao i organizacija rada na otkopavanju [42].

Rudna ležišta se karakterišu znatno većom raznovrsnošću uslova i načina pojavljivanja, pa samim tim postoji i veći broj grupa, podgrupa i varijanti metoda otkopavanja u odnosu na slojavita ležišta. U stručnoj literaturi se sreće veći broj klasifikacija metoda otkopavanja, pri čemu je većina zasnovana na uslovima i načinima saniranja otkopnih prostora.

Pod blokovskim metodama podrazumevaju se one metode kod kojih se prilikom otkopavanja ruda obara po celoj visini bloka. Kod blokovskog otkopavanja ruda se obara bušačko-minerskim radovima, zatim se gravitaciono spušta na dno bloka odakle se vrši njen utovar [43]. Na slici 2-3 prikazana je jedna od varijanti blokovskog otkopavanja.

Blokofske metode otkopavanja mogu se podeliti u sledeće grupe:

1. Metode blokovskog otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena [44]:

1.1. Metode blokovskog prinudnog zarušavanja

- Metode prinudnog jednostepenog zarušavanja sa miniranjem rude u stešnjenj sredini
- Metode blokovskog jednostepenog prinudnog podetažnog zarušavanja
- Metode blokovskog jednostepenog prinudnog etažnog zarušavanja
- Metode prinudnog dvostepenog zarušavanja
- Metode prinudnog dvostepenog zarušavanja sa vertikalnim kompenzacionim komorama
- Metode prinudnog dvostepenog zarušavanja sa horizontalnim kompenzacionim komorama

1.2. Metode blokovskog otkopavanja sa samoobrušavanjem rude

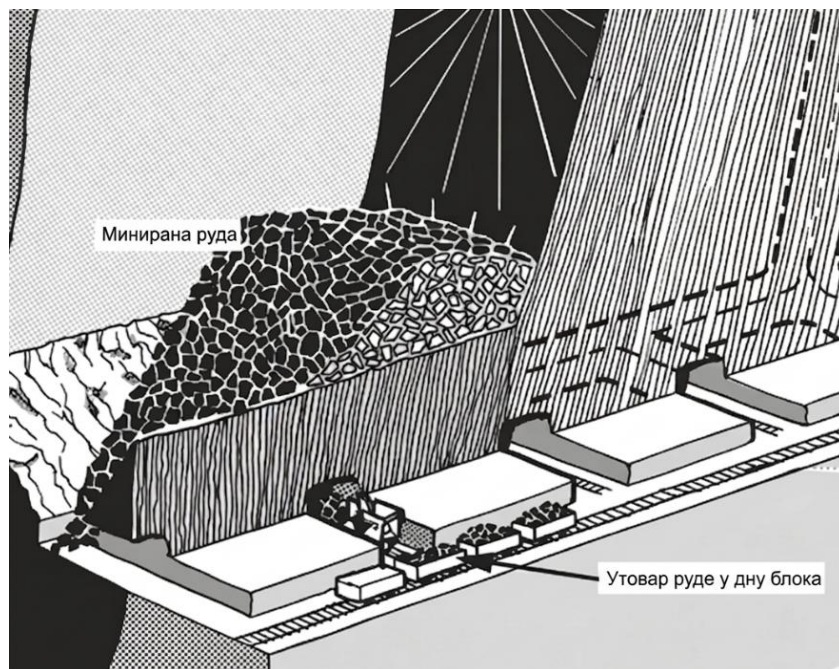
- Metode blokovskog (etažnog) samoobrušavanja
- Metode panelnog samoobrušavanja
- Metode kontinuiranog samoobrušavanja i istakanja rude.

2. Metode blokovskog zarušavanja sa magaziniranjem rude.

3. Metoda blokovskog otkopavanja sa očuvanjem površine (sa zapunjavanjem otkopa).

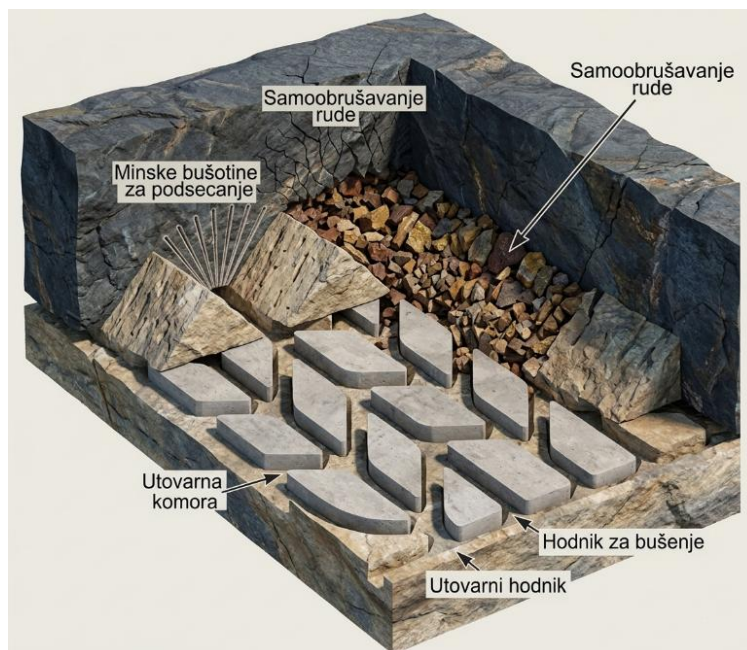
4. Metoda blokovskog otkopavanja sa ostavljanjem stubova i zapunjavanjem otkopnog prostora.

5. Metoda blokovskog otkopavanja sa ostavljanjem praznog otkopnog prostora (sa otvorenim otkopima).



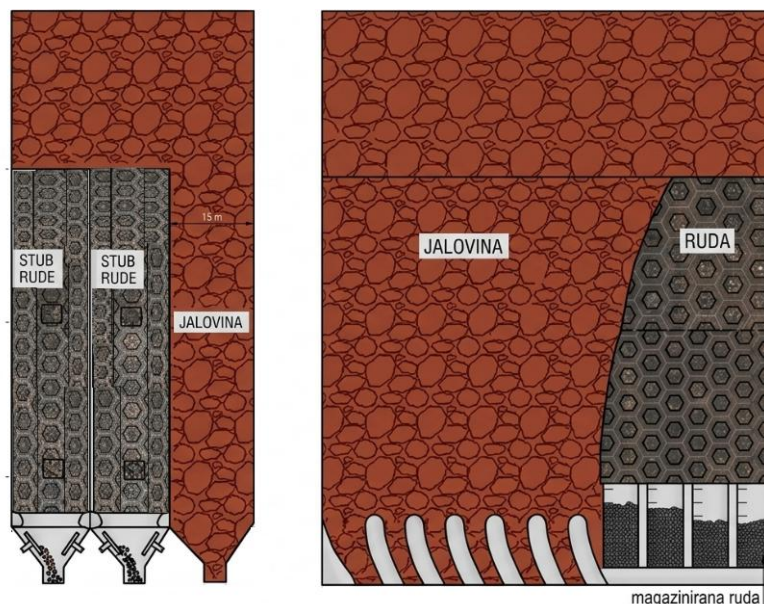
*Slika 2-3 Blokovsko otkopavanje [43]*

Metode blokovskog otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena (slika 2-4) primenjuju se uglavnom za otkopavanje velikih rudnih ležišta sa velikom moćnošću i strmim zaleganjem. Visoka proizvodnost i produktivnost metoda blokovskog zarušavanja, kao i mali obim pripremnih radova, omogućavaju otkopavanje sa niskim troškovima dobijanja rude. Zbog toga se primena ovih metoda prevashodno razmatra kada je u pitanju eksploatacija ležišta sa siromašnom rudom. Blokovske metode sa zarušavanjem rude i pratećih stena mogu biti sa samoobrušavanjem rude ili prinudnim zarušavanjem (jednostepenim ili dvostepenim), u zavisnosti od toga da li se ruda obara primenom bušačko-minerskih radova ili se ruda nakon podsecanja na odgovarajućoj površini sama obrušava. Otkopavanje blokova relativno velike visine može se vršiti jedinstvenim obaranjem rude po celoj visini, kada se radi o etažnom obaranju rude ili se može obavljati sa više nivoa, kada se radi o podetažnom obaranju rude, odnosno blokovskom podetažnom prinudnom zarušavanju [44].



Slika 2-4 Metoda blokovskog otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena [44]

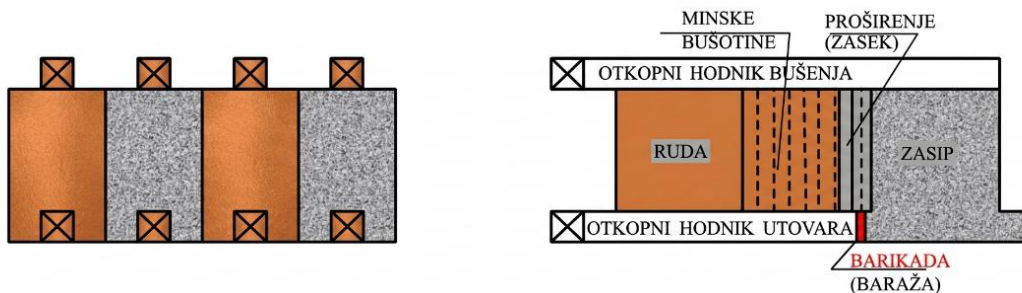
Metode blokovskog zarušavanja sa magaziniranjem rude se primenjuju u ležištima sa strmijim zaleganjem zbog gravitacionog istakanja rude. Karakteristika ove grupe metoda je da se oborena ruda u otkopnom bloku ne utovara i odvozi odmah već se privremeno magazinira. Zbog toga što otkopni prostor ostaje otvoren (prazan) nakon istakanja rude, prateće stene, a pre svega krovina moraju biti čvrsti, što je jedan od preduslova za mogućnost primene ovih metoda. U ležištima veće moćnosti potrebno je da i ruda bude čvrsta jer ona obezbeđuje stabilno držanje krova otkopa. Na slici 2-5 je prikazana varijanta blokovskog otkopavanja sa magaziniranjem rude razmatrana za primenu u rudnom telu Borska Reka.



Slika 2-5 Metoda blokovskog otkopavanja sa magaziniranjem rude

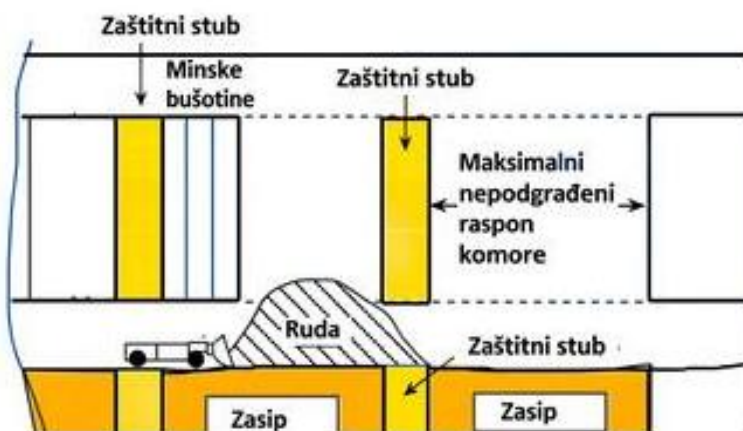
Metode otkopavanja sa očuvanjem površine (sa zapunjavanjem otkopa) primenjuju se u slučajevima kada postoji potreba za očuvanjem površine terena iznad ležišta. Ukoliko se na površini nalaze objekti od značaja kao što su naselja, saobraćajnice, vodene akumulacije, reke, spomenici

kulture itd., čije je izmeštanje neizvodljivo ili su troškovi toliko visoki da se u pitanje dovodi ekonomičnost eksploatacije, javlja se potreba za primenom metoda otkopavanja sa zapunjavanjem otkopnih prostora. Takođe varijante iz ove grupe metoda mogu da se primenjuju i u slučajevima kada se otkopava ruda sa visokim sadržajem metala u cilju ostvarenja što većeg iskorišćenja ili kada je potrebno zbog kvaliteta mineralne sirovine izbeći osiromašenje rude. Princip otkopavanja primenom metoda sa zapunjavanjem otkopa ogleda se u tome da se otkopi nakon što se iz njih izveze ruda ne ostavljaju prazni, već se zapunjavaju različitim vrstama zasipa u zavisnosti od fizičko-mehaničkih karakteristika i pritisaka koji se javljaju u ležištu u toku eksploatacije. Na slici 2-6 prikazana je varijanta blokovskog otkopavanja sa zapunjavanjem otkopnog prostora koja se primenjuje u rudnom telu Borska Reka.



Slika 2-6 Komorno-stubna metoda sa blokovskim otkopavanjem i zapunjavanjem otkopa pasta zasipom

Kod metoda blokovskog otkopavanja sa ostavljanjem stubova i zapunjavanjem otkopnog prostora otkopavanje se može izvoditi u komornim otkopima, pri čemu se specifičnost takvih metoda ogleda u tome da se najbolji uslovi mogu postići pri naknadnom zapunjavanju otkopnih komora. Razlog za primenu zasipavanja u takvim uslovima je u težnji da se postigne stabilnost krovinskih stena u dužem vremenskom periodu, čak i trajno ukoliko je to potrebno. Krov komora se može vremenom delimično zarušiti, ali se svakako izbegava veće sleganje površine. Drugi motiv može biti korišćenje mogućnosti da se u otkopni prostor odlažu otpadni materijali, poput separacijske ili flotacijske jalovine, pepela termoelektrana, šljake iz metalurških pogona i slično. Ovakav način otkopavanja najširu primenu je našao kod eksploatacije rudnih ležišta srednje moćnosti (slika 2-7), mada se ovakav vid otkopavanja u principu može primeniti i kod moćnijih ležišta, odnosno može se primeniti u situacijama sličnim onima u kojima se primenjuju metode otkopavanja sa otvorenim otkopima.



Slika 2-7 Komorno otkopavanje sa zapunjavanjem otkopnog prostora i ostavljanjem sigurnosnih stubova

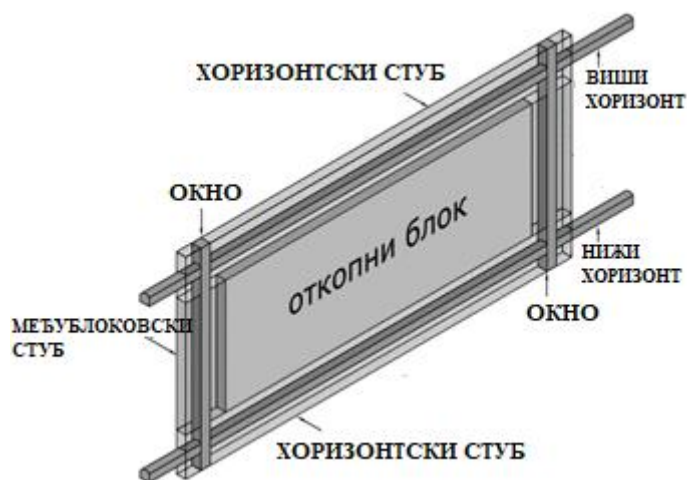
Za mogućnost primene metoda blokovskog otkopavanja sa ostavljanjem praznog otkopnog prostora (sa otvorenim otkopima) osnovni preduslov je da se eksploatacija vrši u ležištima strmijeg zaleganja sa boljim mehaničkim i strukturnim karakteristikama rude i pratećih stena. Prisustvo čvršće rude i pratećih stena je neophodno zbog potrebe za održanjem otkopnog prostora većih dimenzija, dok strmije zaleganje omogućava gravitaciono spuštavanje rude i utovar u dnu otkopnih blokova. Ukoliko se radi o rudnim telima veće moćnosti onda je neophodno između otkopnih komora ostavljati sigurnosne stubove. U tom slučaju javljaju se veliki gubici rude u sigurnosnim stubovima, odnosno smanjuje se iskorišćenje rude što ove metode može učiniti neracionalnim, pa se često pristupa kasnijem otkopavanju stubova, čime ove metode otkopavanja prelaze u kombinovane metode otkopavanja. Na slici 8 prikazan je predlog konstrukcije metode otkopavanja u komorama velike visine za rudno telo Borska Reka.

Osnovna proizvodna jedinica kod blokovskih metoda jeste otkopni blok. Podela ležišta na otkopne blokove određena je oblikom, veličinom i uslovima zaleganja. Kod ležišta strmijeg zaleganja, bez obzira da li su u pitanju rudne žice ili masivna rudna tela, u okviru horizonta vrši se podela na otkopne blokove pri čemu je uglavnom visina otkopnih blokova jednaka visinskom rastojanju između horizonata, koje u zavisnosti od primenjene metode može biti umanjena za debljinu među-horizontskih sigurnosnih stubova (slika 2-9).



*Slika 2-8 Blokovsko otkopavanje u komorama velike visine sa ostavljanjem praznog otkopnog prostora [44]*

Geometrijske parametre otkopnih blokova, osim visine, čine njihova dužina i širina. Dimenzije otkopnih blokova mogu biti veoma različite, zavisno od primenjene metode otkopavanja, kao i uslova pojavljivanja i načina zaleganja ležišta. Kod rudnih žica i žila, odnosno kod ležišta manje i srednje moćnosti, kod kojih se otkopni blokovi orijentišu po pružanju, dužina otkopnih blokova uslovljena je primenjenom metodom otkopavanja, a određuje se računskim procedurama upravljanja stenskim masivom. Širina otkopnog bloka je određena moćnošću pa tako na primer kod rudnih žica može biti jednaka širini rudne žice ili prilikom otkopavanja tankih bogatih rudnih žica može biti i veća od širine rudne žice [42]. Kod rudnih tela velikih dimenzija i velike moćnosti otkopni blokovi mogu biti orijentisani u pravcu pružanja ili što je češći slučaj popreko na pružanje rudnog tela, kada je dužina otkopnih blokova određena primenjenom metodom otkopavanja i horizontalnom moćnošću rudnog tela.



Slika 2-9. Otkopni blok u ležištu manje moćnosti [42]

Imajući u vidu konstataciju da je trend podzemnog otkopavanja povećanje dubine eksploatacije uz smanjenje sadržaja metala u rudi, sve veći značaj dobijaju masovne metode otkopavanja među kojima su najznačajnije metode otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena. Poslednjih godina izvršena su značajna istraživanja metoda otkopavanja za eksploataciju upravo takvih tipova ležišta, pri čemu je posebna pažnja posvećena usavršavanju postojećih varijanti i iznalaženju novih [45].

Kod blokovskih metoda otkopavanja proces istakanja rude je od esencijalnog značaja za iskorišćenje i osiromašenje rude, a samim tim i za efikasnost metode otkopavanja, što je u direktnoj vezi sa optimalnim rastojanjem između ispusnih otvora [46] i načinom pripreme dna otkopnih blokova. Julin & Tobie [47] su na osnovu prikupljenih iskustava iz rudnika širom sveta u kojima se primenjuju metode sa zarušavanjem rude i pratećih stena objavili tabelu za određivanje razmaka između ispusnih otvora na osnovu fragmentacije rude pri istakanju. Slično njihovom pristupu, Bullock & Hustrulid [48] su koristili srednju veličinu zrna da bi odredili radijus izolovane zone istakanja i dalji razmak ispusnih otvora. Castro [49] je koristio numerički model i računarski softver koji vrši simulaciju istakanja rude kako bi odredio parametre istakanja koji bi pružili maksimalno iskorišćenje rude uz minimalno osiromašenje. Osamdesetih godina prošlog veka na istraživačkom univerzitetu Colorado school of mines [50,51] razmak između ispusnih otvora i proces zarušavanja ispitivani su na velikim dvodimenzionalnim modelima, dok su Milić [52], Truman [53], Castro [54] i Susaeta [55, 56] koristili 3D fizičke modele kako bi odredili razmak između ispusnih otvora i objasnili principe gravitacionog toka.

Istraživanja vezana za blokovske metode uglavnom se zasnivaju na iznalaženju optimalnih parametara procesa zarušavanja na osnovu gravitacionog toka, veličine fragmentacije i geomehaničkih karakteristika rude i jalovine, bez neke detaljnije analize stabilnosti prostorija u dnu bloka, odakle se zapravo vrši dobijanje rude. S obzirom na to da se parametri otkopnih blokova određeni na osnovu dobijenih najoptimalnijih pokazatelja metode otkopavanja ne moraju poklapati sa najpovoljnijim parametrima sa aspekta stabilnosti, najpovoljnije bi bilo da se dimenzionisanje otkopnih blokova vrši njihovim međusobnim usaglašavanjem, a sve u cilju postizanja najboljih radnih uslova i ekonomskih rezultata [57-61].

U cilju postizanja najpovoljnijih otkopnih i ekonomskih pokazatelja, kombinacijom ispitivanja parametara istakanja rude i analizom stabilnosti na numeričkim modelima može se dobiti optimalna konstrukcija dna bloka i otkopa kao celine [62]. Stabilnost proizvodnog nivoa kod nekih varijanti blokovskog samoobrušavanja rude proučavana je na osnovu načina i kvaliteta podsecanja, naponskog stanja i visine između nivoa podsecanja i nivoa istakanja rude [63-65].

Dosadašnjim istraživanjima ustanovljeno je da pored naponsko-deformacijskog stanja i fizičko-mehaničkih karakteristika stenskog masiva veliki uticaj na stabilnost ima sama konstrukcija, orijentacija i dimenzije otkopa [66]. Takođe, uslovi stabilnosti ispitivani su i na osnovu dimenzionisanja sigurnosnih stubova i uticaja odnosa širina/visina i odnosa dužina/širina kod sigurnosnih stubova [67-71].

Osim optimalnih dimenzija otkopnih blokova za ostvarenje proizvodnih kapaciteta, za efikasnost i zdrave i sigurne uslove rada prilikom primene blokovskih metoda otkopavanja, veoma bitnu ulogu ima konstrukcija dna otkopnih blokova. Zbog toga je potrebno posvetiti posebnu pažnju stabilnosti dna otkopnih blokova u zavisnosti od konstrukcije, dubine na kojoj se vrši eksploatacija, fizičko-mehaničkih karakteristika i naponskog stanja stenskog masiva.

### 3. Priprema dna otkopnih blokova

Pod pripremom za otkopavanje podrazumeva se izrada različitih vrsta jamskih prostorija, kojima se omogućava otkopavanje delova ležišta (otkopnog polja, otkopnih stubova, otkopnih blokova itd.). Prostorije pripreme mogu biti različitog karaktera (horizontalne, kose i vertikalne), različite namene (otkopne, utovarne, prostorije podsecanja, prostorije za bušenje, provetravanje, dopremu materijala, dopremu zasipa, prolaz ljudi i vazdušne struje, prolaz samohodne opreme i dr.), mogu biti različitog oblika i veličine poprečnog preseka, različitog načina podgrađivanja, različitog vremena trajanja itd [37]. Način pripreme zavisi od vrste ležišta i primenjene metode otkopavanja i značajno se razlikuje priprema za otkopavanje rudnih i slojevitih ležišta. S obzirom na to da se rudna ležišta karakterišu znatno većom raznovršnošću uslova i načina pojavljivanja, kao i najznačajnijih mehaničkih i strukturnih karakteristika kako rude, tako i pratećih stena to se i veći broj različitih metoda primenjuje za njihovo otkopavanje. Samim tim raznovrsniji je i složeniji i način pripreme za otkopavanje. Međutim i pored velike raznovrsnosti različitih varijanti metoda otkopavanja, svaku grupu metoda karakteriše određeni način pripreme. Za pripremu kod blokovskih metoda otkopavanja karakteristična je priprema dna otkopnih blokova. Pod dnom bloka podrazumeva se deo bloka između transportnog i nivoa podsecanja, iznad koga se vrši otkopavanje bloka. Priprema dna bloka se može posmatrati sa aspekta konstrukcije dna bloka i načina istakanja i utovara rude.

Sa stanovišta konstrukcije dna bloka razlikuje se priprema:

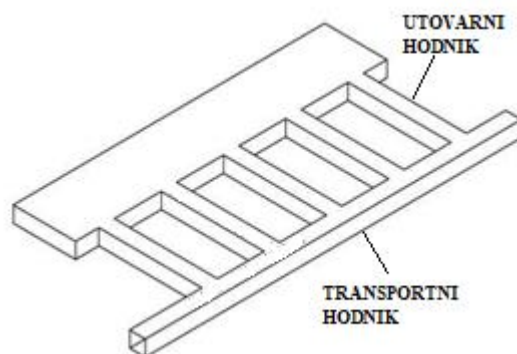
- sa ravnim dnom bloka,
- sa rudnim levcima,
- sa tranšejama,
- sa ispusnim zvonima.

Sa stanovišta načina istakanja i utovara rude razlikuje se priprema dna bloka:

- sa neposrednim istakanjem rude u transportna sredstva,
- sa hodnicima rešetki,
- sa skreperskim hodnicima,
- sa utovarom utovarnim ili utovarno-transportnim mašinama,
- sa utovarom vibrododavačima ili drugim utovarnim uređajima.

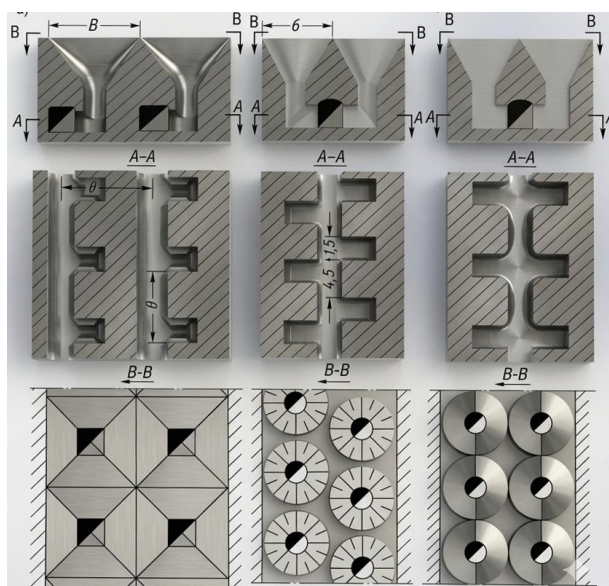
#### 3.1. Priprema sa stanovišta konstrukcije dna bloka

Konstrukcija otkopnog bloka sa ravnim dnom (slika 3-1) je najjednostavniji način pripreme s obzirom na to da u tom slučaju i nema nekih posebnih prostorija pripreme dna, osim hodnika podsecanja (bušenja) ili utovara. Podsecanje komore odnosno otkopnog bloka može da se vrši sa dna ili sa vrha komore, dok se utovar rude vrši na dnu otkopne komore. Ruda se obara po celoj visini komore iz podseka u dnu ili sa vrha komore. Utovar odminirane rude može biti čeon i bočni ukoliko se utovar vrši iz utovarnih niša. I kod čeonog i bočnog utovara utovarna mehanizacija ulazi u otvoreni otkopni prostor pa je neophodno da se obezbedi utovar mašinama sa daljinskim upravljanjem.



Slika 3-1 Ravno dno bloka [42]

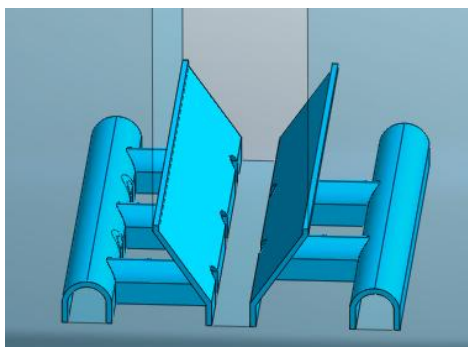
Priprema dna bloka sa rudnim levcima imala je veliku primenu u prvoj polovini dvadesetog veka u kombinaciji sa skreperskim utovarom. Osim skreperskog utovara dno bloka sa rudnim levcima primenjuje se i pri korišćenju hodnika rešetki, a ređe i pri primeni neke utovarne mašine. Priprema se izvodi tako što se iz prethodno izrađenog hodnika rešetki, skreperskog ili utovarnog hodnika izrađuju rudne sipke ili rudna okna samo sa jedne ili sa obe strane u odnosu na pomenute hodnike. Iznad rudnih levaka formira se nivo podsecanja izradom hodnika podsecanja iz kojih se blok podseca po celoj širini. Levkasto proširenje rudnih sipki ili okana može se vršiti iz podseka ili miniranjem konusno izbušenih minskih bušotina iz rudnih sipki (okana) i na taj način se dobija konačni oblik rudnih levkova. Dvostrani rudni levci mogu biti raspoređeni jedan naspram drugog ili mogu biti pomereni za polovinu međusobnog rastojanja («šah-mat» poredak). Osim rudnih levkova okruglog oblika postoji i priprema dna sa levcima kvadratnog preseka (oblika prevrnute zarubljene piramide), što je znatno ređi slučaj. Zbog složenosti konstrukcije i načina izrade rudnih levkova, ovakve konstrukcije dna blokova se sve više zamenjuju pripremanama sa tranšejnim podsecanjem [44].



Slika 3-2. Priprema dna bloka sa rudnim levcima [44]

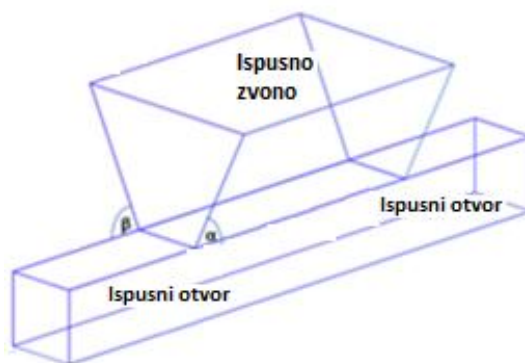
Priprema dna bloka sa tranšejama (slika 3-3) je jednostavnija i efikasnija jer omogućava visok stepen mehanizovanosti procesa i primenu visokoproduktivne opreme, pre svega opreme za bušenje minskih bušotina. Tranšeja se izrađuje bušenjem i miniranjem lepeze minskih bušotina iz hodnika podsecanja. Na taj način se formira tranšeja oblika obrnute horizontalne trostrane prizme. Hodnici podsecanja mogu biti na istom nivou kao i utovarni hodnici i na taj način se smanjuje visina dna bloka [72]. Nagib bočnih stranica treba da bude najmanje  $50^\circ - 60^\circ$ , da bi se obezbedilo efikasnije klizanje

rude u dno tranšeje gde se nalaze otvori za istakanje rude. Sa aspekta stabilnosti ovo je povoljan slučaj imajući u vidu da se utovarne komore nalaze u grebenu između dve susedne tranšeje, ili u stubu između dva bloka, zavisno od primenjene metode otkopavanja. Kada su hodnici utovara i podsecanja na istom nivou ispusni otvori su u boku tranšejnog hodnika podsecanja, što znači da se vrši bočni utovar rude iz utovarnih komora (niša) utovarnim ili utovarno-transportnim mašinama ili kao što je slučaj u nekim rudnicima u Rusiji vibrododavačima [73]. Nivo utovara može biti ispod nivoa podsecanja kada se hodnici utovara povezuju kratkim rudnim sipkama sa nivoom podsecanja. U slučaju kada je utovarni nivo ispod nivoa podsecanja, ispusni otvori su u dnu tranšejnog hodnika podsecanja. Podsecanje bloka se može vršiti sa jednom tranšejom, kada njena širina odgovara širini otkopnog bloka ili u nekim situacijama i dvema tranšejama. Na taj se način obavlja i potrebno podsecanje bloka za dalje nesmetano obaranje rude. Visina grebena rude, treba da bude tolika da obezbedi potrebnu stabilnost utovarnih hodnika.



Slika 3-3 Priprema dna bloka sa tranšejama

Priprema dna bloka sa ispusnim zvonima primenjuje se najčešće pri blokovskom samoobrušavanju rude. Ispusna zvana (slika 3-4) predstavljaju ispusne otvore većih dimenzija, koji svojim oblikom odgovaraju prevrnutim zarubljenim piramidama sa pravougaonom osnovom. U okviru pripreme dna bloka sa ispusnim zvonima formira se nekoliko različitih nivoa kao što su nivo transporta, nivo usitnjavanja, nivo provetranja, nivo utovara (produkcioni nivo) i nivo podsecanja. Najniži nivo jeste transportni nivo koji je rudnim oknima povezan sa komorama za usitnjavanje rude.



Slika 3-4 Ispusno zvono

Na nivou usitnjavanja koji se nalazi neposredno iznad nivoa transporta vrši se usitnjavanje negabaritnih komada rude hidrauličnim razbijačima (*pick hammer, ramer*), u komorama namenjenim za to. Iznad ovog nivoa je utovarni nivo (produkcioni nivo) na kom se nalaze utovarni hodnici. Ukoliko postoji nivo provetranja onda se on obično nalazi između nivoa usitnjavanja i utovarnog nivoa. Na utovarnom nivou se na određenom rastojanju izrađuju utovarni hodnici između kojih se izradom novih hodnika vrši formiranje zvona istakanja. Utovar se može vršiti sa obe strane ispusnih

zvona iz hodnika koji su izrađeni pod uglom (zakošeno) kako bi se olakšao ulaz utovarnim ili utovarno-transportnim mašinama. Ispusna zvona ne zahvataju celu površinu dna bloka, što znači da se međusobno ne dodiruju, tako da na grebenima između njih ostaje neistočena ruda. Gubitak rude koja ostaje u grebenima nije od velikog značaja imajući u vidu da je ta količina zanemarljivo mala u odnosu na količinu rude koja se dobija iz otkopnih blokova.

### **3.2. Priprema dna bloka sa stanovišta načina istakanja i utovara rude**

Priprema dna sa neposrednim istakanjem rude u transportna sredstva primenjuje se pri otkopavanju rudnih tela manjih dimenzija i manje moćnosti. Najčešće se koriste kod primene blokovskog otkopavanja sa ostavljanjem praznog otkopnog prostora ili sa magaziniranjem rude. Dno bloka, što se konstrukcije tiče, sastoji se od rudnih levaka najčešće pravougaonog preseka zbog male moćnosti. Neposredno nad utovarnim hodnikom se ugrađuje točište – šut sa zatvaračem, kroz koji se ruda iz rudnih levaka istače direktno u transportno sredstvo, najčešće jamske vagone. Nedostatak ovakvog vida pripreme jeste mogućnost zaglava zbog pojave krupnijih komada rude u šutu, što može dovesti do prekida u radu i nemogućnosti ostvarenja kontinuiteta pri transportu. Pri primeni sekundarnih miniranja za razbijanje negabaritnih komada može doći do oštećenja šuta. Da ne bi dolazilo do zaglava, a samim tim i zastoja u proizvodnji, neophodno je negabaritne komade usitniti odmah u otkopu. Ukoliko bi se usitnjavanje vršilo u samom točištu javlja se mogućnost oštećenja šuta, što može dovesti do dužih prekida u transportu rude.

U okviru pripreme dna bloka sa hodnicima rešetki iznad transportnog nivoa, odnosno iznad nivoa utovara, na visinskoj razlici od 6 – 8 m izrađuju se hodnici za usitnjavanje negabaritnih komada rude koji se nazivaju hodnici rešetki. Utovarni nivo je sa hodnicima rešetki povezan preko rudnih sipki iznad kojih se postavljaju čelične rešetke na kojima se negabaritni komadi, koji ne mogu da prođu kroz otvor rešetke, usitnjavaju korišćenjem pneumatskih ili hidrauličnih čekića ili se vrši usitnjavanje sekundarnim miniranjem. Ruda koja prođe kroz rešetku prolazi kroz rudnu sipku i preko šuta se istače u primenjeno transportno sredstvo, najčešće jamske vagone. Ovakav vid pripreme dna bloka je bio najzastupljeniji kod metoda blokovskog samoobrušavanja rude, gde se ruda obara pod uticajem sopstvene težine, pa postoji mnogo veća verovatnoća pojave negabaritnih komada. Ruda do hodnika rešetki dospeva kroz rudne levke pri čemu oni mogu biti raspoređeni simetrično u odnosu na hodnik rešetki, tako da se ruda iz dva levka ispušta na jednu rešetku koja se nalazi u podu hodnika. Postoji i varijanta pripreme kod koje se rešetka postavlja u bočnoj niši hodnika rešetki kojoj se pristupa kroz kratke bočne ulaze. I kod ove varijante postoji mogućnost da jedna rešetka služi za dva ispusna otvora, koji su raspoređeni po dužini otkopnog bloka. Takođe postoji mogućnost da ruda iz većeg broja ispusnih otvora pada u jedno sabirno rudno okno, kojim se dalje odvodi do hodnika utovara. S obzirom na to da se i na suprotnoj strani može formirati isti broj rudnih levaka koji su spojeni sa drugim rudnim oknom, to znači da se u utovarnom hodniku na jednom mestu može skupljati ruda iz većeg broja ispusnih otvora. Na taj način se formiraju granaste sipke prikazane na slici. Priprema dna bloka sa hodnicima rešetki karakteriše se složenijim i većim obimom pripremnih radova naročito pri primeni granastih sipki pa se u novije vreme sve češće prelazi na pripreme sa utovarnim i utovarno-transportnim mašinama.

Kao i u prethodnim slučajevima kod pripreme dna bloka sa skreperskim hodnicima rudni levci mogu se formirati samo sa jedne ili sa obe strane u odnosu na skreperski hodnik, a takođe mogu biti raspoređeni jedan naspram drugog u „šah-mat“ poretku. Specifičnost ovakvog načina pripreme se ogleda u tome da se rudne sipke ne izrađuju ispod svakog para rudnih levaka, već se izrađuje jedna sipka na kraju bloka, do koje se ruda prevlači skreperskom kašikom. Pripreme dna otkopnih blokova sa skreperskim hodnikom se danas retko primenjuju pošto su ih iz upotrebe sasvim istisnule pripreme dna bloka za primenu samohodnih utovarnih ili utovarno-transportnih mašina ili drugih savremenih uređaja.

U drugoj polovini dvadesetog veka sa razvojem rudarske mehanizacije primat preuzima priprema dna bloka sa utovarnim ili utovarno-transportnim mašinama i danas je ovaj vid pripreme najzastupljeniji u savremenim rudnicima. Primena samohodne opreme omogućava opsluživanje većeg broja ispusnih otvora sa jednom mašinom, dok veliki broj tipova utovarnih i utovarno-transportnih mašina omogućava različita rešenja u zavisnosti od primenjenog načina transporta rude. Istakanje rude može da se vrši na transportnom nivou što čini konstrukciju dna bloka jednostavnijom. Utovarnim ili utovarno-transportnim mašinama može da se vrši čeonu ili bočni utovar rude, pri čemu bočni utovar može biti jednostrani ili dvostrani. Utovarne komore (niše) iz kojih se vrši utovar izrađuju se iz hodnika utovara pod uglom u odnosu na hodnik podsecanja zbog lakšeg manevrisanja (ulaska i izlaska) utovarnom mašinom. Dvostrani utovar omogućava da se dobija ruda iz otkopnih blokova veće širine, dok je najmanji obim pripreme ukoliko se iz jednog utovarnog hodnika izrađuju bočne utovarne komore sa jedne i druge strane hodnika i na taj način se jednim utovarnim hodnikom opslužuju dva susedna otkopna bloka. Nakon izvršenog utovara ruda može da se pretovara direktno u neko drugo transportno sredstvo ili se utovar u transportna sredstva vrši preko rudnih okana. Rastojanje rudnog okna od sredine otkopnog bloka ne bi trebalo da bude veće od 150 – 200 m, budući da se pri velikim dužinama transporta značajno smanjuje kapacitet utovarno-transportne mašine [37].

Priprema dna bloka sa utovarnom vibrododavačima našla je primenu pri otkopavanju moćnih ležišta u velikim otkopnim blokovima kada je potrebno ostvariti visoke kapacitete na istakanju i utovaru. Prednost primene vibrododavača je u tome što može ostvariti visoke kapacitete na istakanju rude pri maloj potrošnji energije. Osim toga vibriranjem radne ploče vibrododavača prenose se oscilacije i na rudu u ispusnom otvoru čime se ostvaruje lakše istakanje rude i smanjenje broja zaglava. Nedostatak primene vibrododavača je u većem obimu radova i velikim troškovima na montaži i demontaži. Zbog toga, da bi primena vibrododavača bila opravdana, njihova primena je ograničena na otkopne blokove velikih dimenzija, pri čemu je neophodno da se iz jednog ispusnog otvora istače velika količina rude [74]. Vibrododavači se montiraju tako da se ruda direktno istače u transportna sredstva, pa da ne bi dolazilo do zastoja prilikom utovara najpovoljnije bi bilo da vibrododavači rade u kombinaciji sa nekom vrstom kontinualnog transportera (vibrokonvejeri, čelični člankasti transporteri, specijalni transporteri sa gumenom trakom).

Kod blokovskih metoda otkopavanja primenjuje se neka od navedenih konstrukcija pripreme dna otkopnih blokova. Pri usvajanju odgovarajućih parametara metode otkopavanja treba usvojiti konstrukciju dna koja odgovara tipu rudnog tela ili ležišta. S obzirom na vrstu metode otkopavanja, priprema dna bloka može obuhvatiti veliki deo pripreme, zbog čega treba težiti izboru najracionalnije konstrukcije.

## 4. Geomehanički uslovi stabilnosti

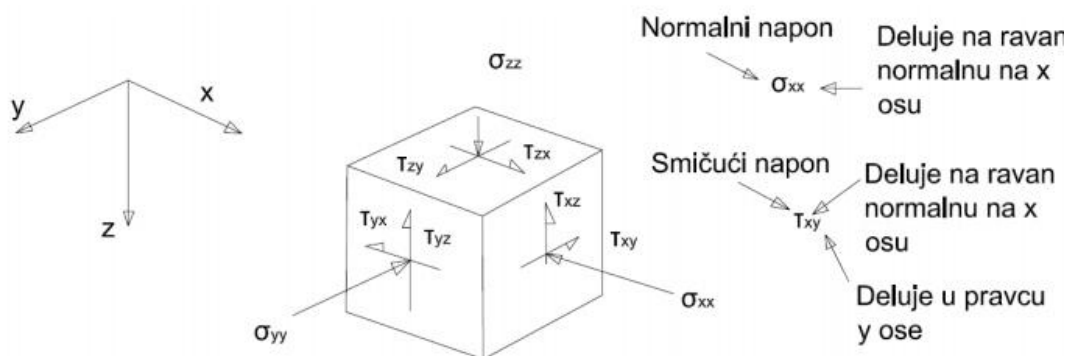
### 4.1. Naponsko stanje stenskog masiva

Jedna od najbitnijih komponenti pri određivanju parametara otkopa i analize stabilnosti jeste poznavanje primarnih i sekundarnih napona. Poznavanje veličina i pravaca ovih napona od značaja je za određivanje oblika, orijentacije i dimenzija otkopnih blokova i podzemnih objekata uopšte. Pored toga, poznavanje naponsko-deformacionog stanja u stenskoj masi može pomoći da se predvidi tip loma stene do kojeg može doći u budućnosti i identifikovati potencijalne zone pucanja stene.

Stenska masa se pre izvođenja rudarskih radova nalazi u prirodnom ravnotežom stanju napona, odnosno može se reći da stenska masa predstavlja prednapregnutu sredinu koja se nalazi pod dejstvom primarnih napona ili in-situ napona (*in-situ stress*) [75]. Kao rezultat rudarskih radova dolazi do poremećaja u prirodnom naponskom stanju koji za posledicu ima pojavu sekundarnog naponskog stanja ili indukovanih napona (*mining induced stress*).

Za definisanje napona je pored intenziteta i pravca delovanja potrebno poznavati i ravan na koju deluje, pa se može zaključiti da napon predstavlja tenzorsku veličinu [76]. Napon ne mora biti normalan u odnosu na posmatranu ravan, što će zavisi od orijentacije ravni u prostoru. To znači da se napon može razložiti na dve komponente, gde komponenta normalna na ravan predstavlja normalni napon  $\sigma_n$ , a komponenta paralelna sa ravni smičući napon  $\tau_n$ .

Naponsko stanje stenske mase definisano je sa 18 komponenti napona. Ovaj broj se može redukovati ako deo stenske mase posmatramo kao infinitezimalnu (beskonačno malu) kocku na čije tri vidljive ravni deluju normalne i smičuće komponente napona. Pravci napona posmatraju se u odnosu na x, y i z osu u Dekartovom koordinatnom sistemu. Međutim smičući napon na bilo kojoj površi neće biti u ravni sa osama za razliku od normalnog napona. Zbog toga se smičući napon definiše preko dve komponente u svakoj ravni. Na taj način se dolazi do devet komponenti napona od kojih su tri komponente normalnog i šest smičućeg napona [76, 77]. Na slici 4-1 su normalni naponi obeleženi sa  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ , pri čemu prva oznaka u indeksu označava ravan, a druga pravac delovanja. Smičući naponi su redom obeleženi  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$ .



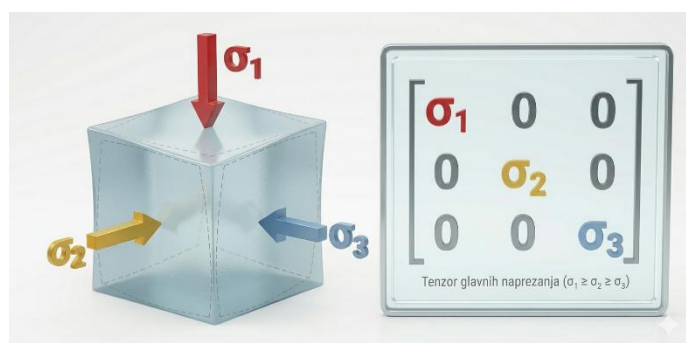
Slika 4-1 Normalni i smičući naponi [76]

Ovako određene komponente napona se mogu složiti u matricu gde redovi predstavljaju ravni delovanja, a kolone pravce delovanja napona:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Polazeći od pretpostavke da je posmatrano telo (kocka) u stanju ravnoteže, treba proveriti da li u svim tačkama u kojima se posmatra dejstvo napona vlada ravnotežno stanje. Da bi se to ostvarilo potrebno je da u svakoj tački vlada ravnotežno stanje sila i momenata, što znači da je za ravnotežno stanje potrebno da komponente smičućeg napona budu jednake ( $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz}=\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}=\tau_{zy}$ ). To dovodi do zaključka da je za definisanje napona u tački, kao tenzorske veličine, potrebno poznavanje šest nezavisnih komponenti napona ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$ ).

Dakle, komponente napona u matrici napona su tri normalna napona i tri napona smicanja. Stvarne vrednosti ovih komponenti u određenom telu koje je izloženo dejstvu napona zavisiće od orijentacije posmatrane kocke u samom telu. Trebalo bi, dakle, razmotriti pravce u kojima komponente normalnog napona poprimaju maksimalne i minimalne vrednosti. Utvrđeno je da su u ovim pravcima komponente napona smicanja na svim stranama kocke jednake nuli. Glavnim naponima se nazivaju normalne komponente napona koje deluju na ravni u kojima su vrednosti komponenti smičućeg napona jednake nuli. Naponi  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  prikazani na slici 4-2 zapravo predstavljaju glavne napone.



Slika 4-2 Glavni naponi

Poznavanje glavnih napona i njihovih pravaca ima fundamentalni značaj u analizi napona kada govorimo eksploataciji mineralnih sirovina. S obzirom da svi nepodgrađeni podzemni objekti nemaju smičuće napone koji deluju na njih dolazi se do zaključka da je za definisanje naponskog stanja stenske mase dovoljno poznavati tri glavna napona.

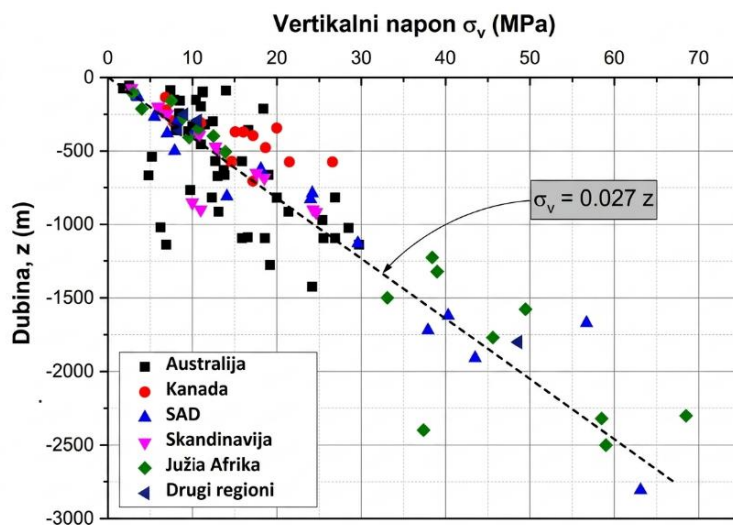
Ukoliko normalna komponenta deluje u suprotnom smeru od spoljne normale posmatrane površine onda se ta komponenta naziva napon pritiska, a ukoliko deluje u smeru spoljne normale onda je to napon zatezanja. U mehanici stena je usvojena konvencija računanja napona pritisaka kao pozitivnih i napona zatezanja kao negativnih normalnih napona [76].

Naponi mogu biti prouzrokovani tektonskim pokretima u zemljinoj kori (tektonski napon), a mogu nastati i kao posledica težine višeležećih stenskih masa (gravitacioni napon) [78]. Na pojavu napona uticaj imaju i gustina, orijentacija, raspodela i karakter ispuna pukotina i prslina, kao i morfologija terena (lokalni naponi – naponi na relativno uskom području). Takođe naponi mogu biti zarobljeni u stenskoj masi (rezidualni naponi) ili mogu nastati kao posledica temperaturnih promena (termalni naponi).

#### 4.1.1. Primarno naponsko stanje

Za predviđanje ponašanja stenske mase uglavnom se koriste kriterijumi koji se baziraju na dozvoljenim deformacijama ili čvrstoći stenske mase za šta je neophodno poznavanje in-situ (primarnog) i indukovano (sekundarnog) naponskog stanja stenskog masiva. Komponente primarnih napona, vertikalne i horizontalne, mogu se odrediti primenom teorije elastičnosti. Uz pretpostavku da

su komponente smičućeg napona jednake nuli određivanje primarnih napona se svodi na određivanje vertikalnih i horizontalnih napona, koji predstavljaju glavne napone  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Hoek i Brown [79] su prvi prikupili i objavili dijagram promene vertikalnog napona sa dubinom na osnovu izmerenih vrednosti širom sveta (slika 4-3) koji je kasnije ažuriran od strane drugih istraživača [80, 81].



Slika 4-3 Promena vertikalnog napona sa dubinom na osnovu izmerenih vrednosti širom sveta [76]

Na osnovu podataka prikazanih na dijagramu ustanovljen je trend povećanja napona sa povećanjem dubine 0.027 puta. Pošto je zapreminska masa za većinu stena 0.027 MN/m<sup>3</sup>, vertikalni napon na određenoj dubini se može odrediti po formuli [82]:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H \quad (2)$$

gde su:

$\sigma_v$ - vertikalni napon, MPa,

$\gamma$ - zapreminska težina višeležećih stenskih masa, MN/m<sup>3</sup>

H- dubina od površine terena, m.

Intenzitet vertikalnog napona je jednostavnije proceniti od horizontalnog. Horizontalni naponi pokazuju velika rasipanja podataka tako da se ne može izvesti zakonitost promene horizontalnog napona sa dubinom. Za procenu horizontalnog napona koristi se koeficijent bočnog pritiska koji definiše odnos između vertikalnog i horizontalnog glavnog napona:

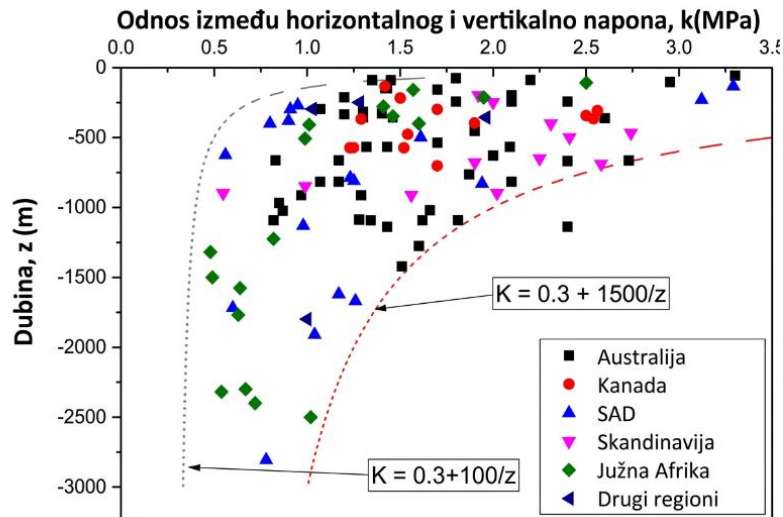
$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (3)$$

gde su:

$\sigma_h$ - horizontalni napon, MPa,

k - koeficijent bočnog pritiska.

Slično vertikalnim Hoek i Brown su predstavili i podatke vezane za horizontalne napone koji su prikazani na slici.



Slika 4-4 Promena odnosa horizontalni/vertikalni napon sa dubinom [76]

Na osnovu ovih podataka koeficijent bočnog pritiska se može proceniti po formuli:

$$0.3 + \frac{100}{H} < k < 0.5 + \frac{1500}{H} \quad (4)$$

Prema Sheorey [83] koeficijent bočnog pritiska može se odrediti iz izraza:

$$k = 0.25 + 7 \cdot E_h \cdot \left(0.001 + \frac{1}{H}\right) \quad (5)$$

gde je:

$E_h$ - modul deformacije gornjeg dela zemljine kore meren u horizontalnom pravcu, GPa.

Za idealno elastične i izotropne stene koeficijent  $k$  se može proceniti nezavisno od dubine po formuli [84]:

$$k = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (6)$$

gde je:

$\nu$  – Poasonov koeficijent.

Za stenske mase koje se ponašaju plastično koeficijent  $k$  se može odrediti prema izrazu [75]:

$$k = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi} \quad (7)$$

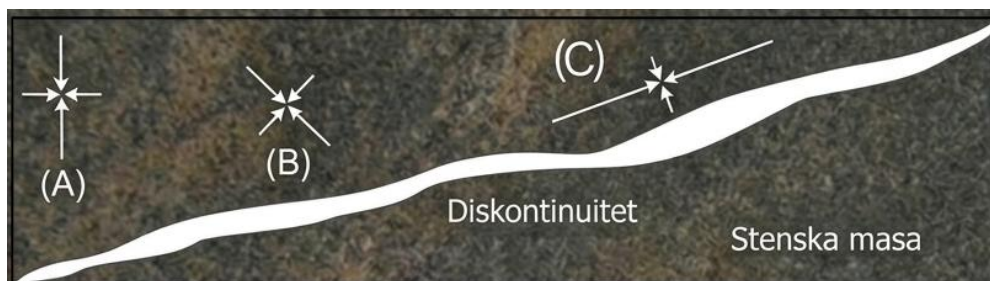
gde je:

$\varphi$  – ugao unutrašnjeg trenja.

U nekim slučajevima, tamo gde su se stvorili geološki uslovi za tako nešto (pojava raseda, naročito reverzibilnih, pukotine, anizotropija, erozija itd.) vrednosti koeficijenta bočnog pritiska mogu biti veće od 1, odnosno horizontalni napon može biti veći od vertikalnog [76].

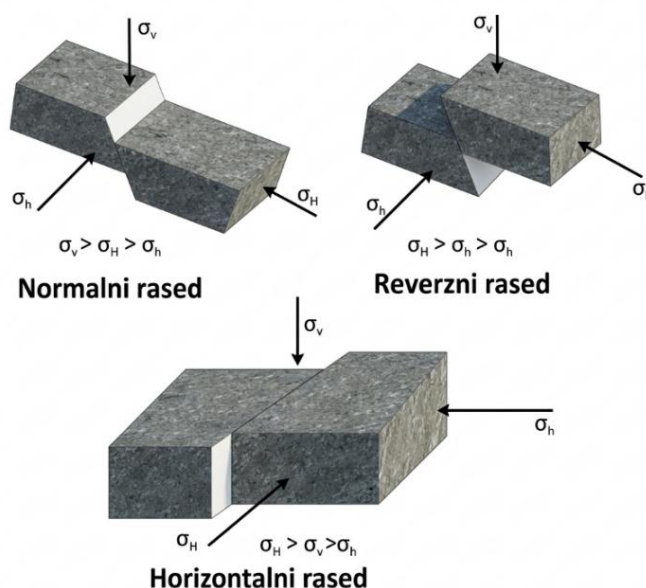
#### 4.1.2. Određivanje pravaca primarnih napona

Kod primarnog naponskog stanja polazi se od pretpostavke da glavni naponi deluju u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Postojanje geoloških struktura čak i kod homogenih stena mogu da dovedu do promene u pravcu delovanja glavnih napona [85]. Na mestima gde se javljaju promene u geološkim (geotehničkim) karakteristikama stenskog masiva može doći do rotacija pravaca glavnih napona kao što je prikazano na slici 4-5.



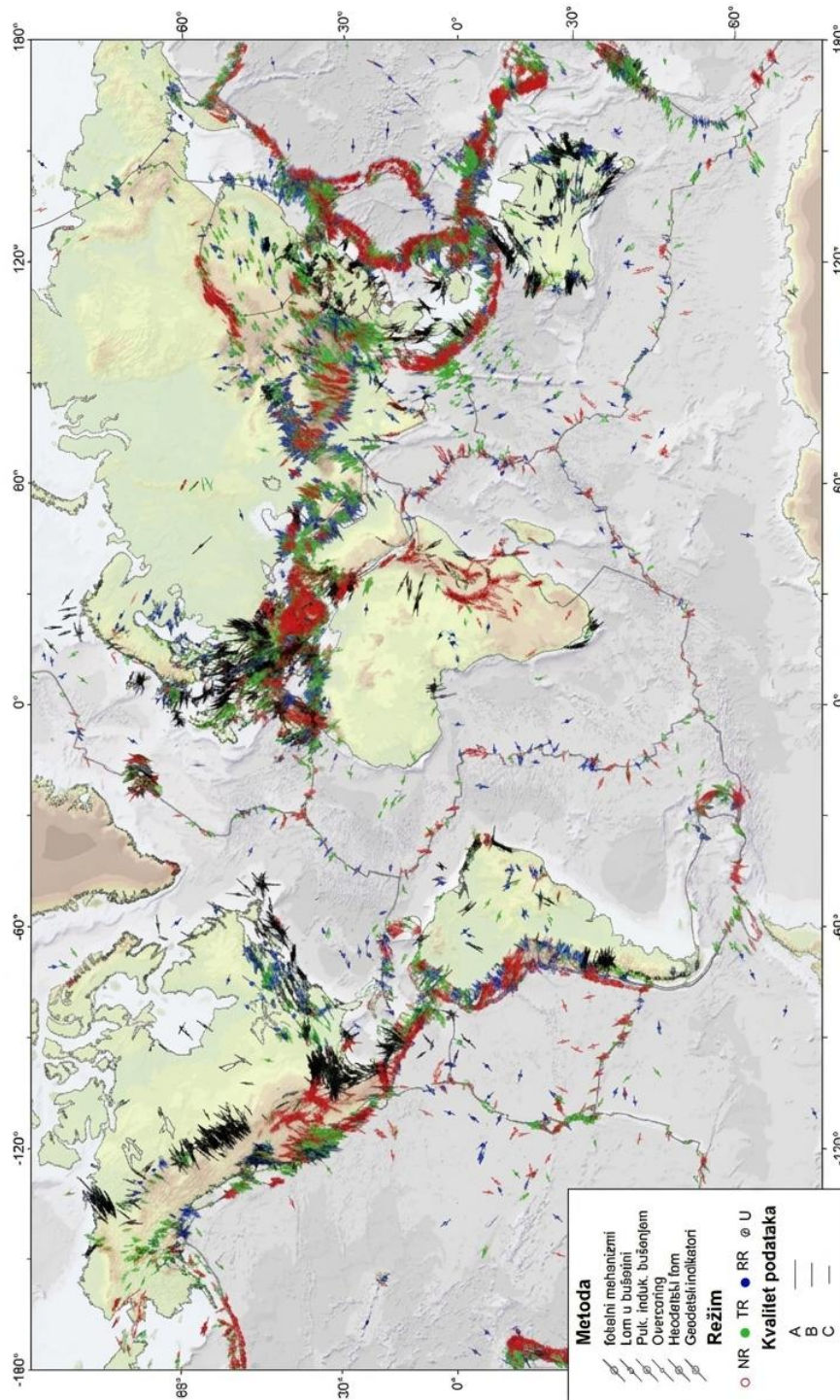
Slika 4-5 Orijentacija pravaca glavnih napona u okolini diskontinuiteta

Kod normalnih raseda vertikalni napon  $\sigma_v$  je veći od maksimalnog horizontalnog  $\sigma_H$  i minimalnog horizontalnog  $\sigma_h$  napona ( $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ ), kod reversnih raseda horizontalni naponi su veći od vertikalnog ( $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ ), a kod raseda horizontalnog tipa (rasedi po pružanju), vertikalni napon je manji od maksimalnog horizontalnog, a veći od minimalnog horizontalnog napona ( $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ ) [86-88].



Slika 4-6 Veličina glavnih napona u okolini različitih tipova raseda

U cilju proučavanja i što boljeg definisanja i razumevanja naponskog stanja u zemljinoj kori pokrenut je projekat pod nazivom Svetska mapa napona (*World Stress Map*), koja zapravo predstavlja globalnu bazu podataka o stanju vertikalnih i horizontalnih napona procenjenih i izmerenih širom sveta [89]. Ovi podaci mogu biti naročito korisni jer mogu ukazivati na rotaciju glavnog horizontalnog napona na području 50-500 km. Međutim zbog promena naponskog stanja lokalnog karaktera, naročito u blizini diskontinuiteta, treba biti pažljiv prilikom korišćenja podataka sa svetske mape napona.

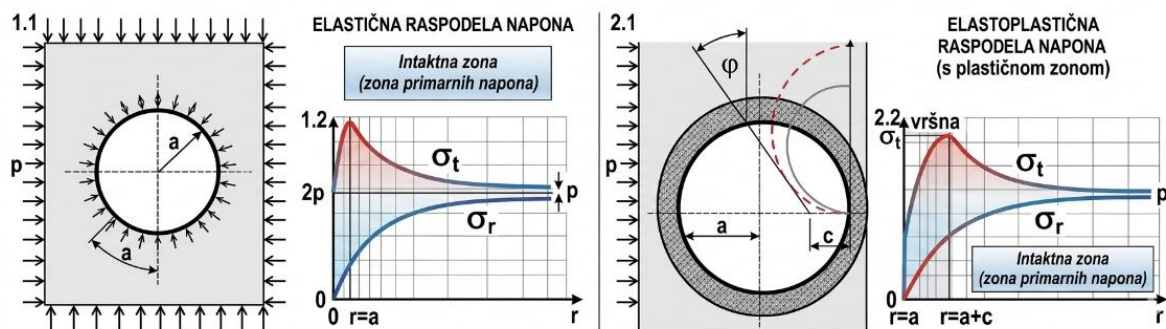


Slika 4-7 Svetska mapa napona [76]

### 4.1.3. Sekundarno naponsko stanje

Kao posledica izvođenja rudarskih radova dolazi do poremećaja primarnog naponskog stanja u delu masiva od kontura podzemnih objekata do određenog rastojanja i prelaska u sekundarno naponsko stanje (mining induced stress). Kada su ovi indukovani naponi veći od čvrstoće stenske mase može doći do pojave loma, odnosno do nestabilnosti izrađenih podzemnih objekata i struktura. U kojoj meri će doći do promene veličine i pravaca napona zavisice od oblika, veličine, odnosa visine i širine, blizine drugih podzemnih objekata, kao i dubine na kojoj su objekti izrađeni i fizičko-mehaničkih karakteristika stenske mase.

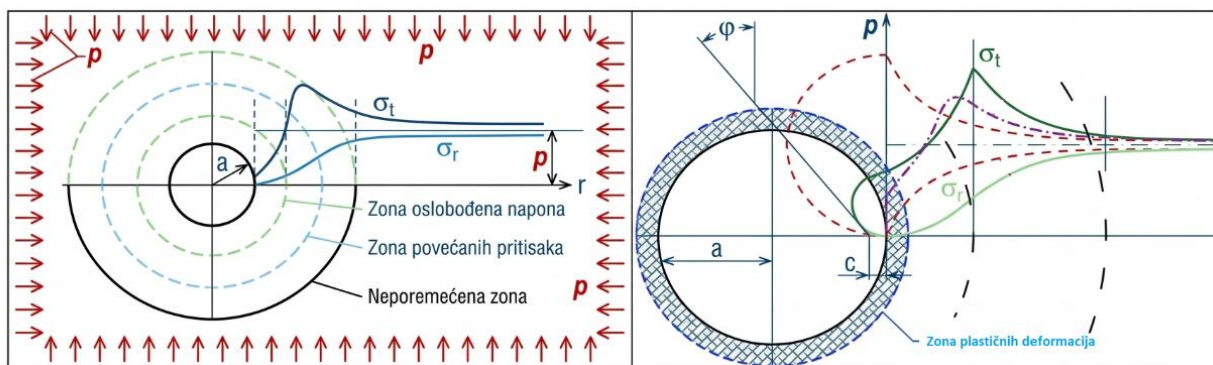
Ako se posmatra podzemna prostorija kružnog poprečnog preseka mogu se izdvojiti tri zone indukovanih (sekundarnih) napona i to zona oslobođenih napona (plastična zona), zona povećanih napona (elastična zona) i neporemećena zona (zona primarnih napona). Veličina i oblik zona indukovanih napona zavise od veličine sekundarnih tangencijalnih napona i čvrstoće na pritisak stenske mase. Ako se nakon izrade nekog podzemnog objekta javljaju naponi koji su manji od mehaničke otpornosti stene kroz koju je objekat izrađen neće doći do deformacija i promene oblika i veličine poprečnog preseka objekta. U suprotnom može doći do manjih ili većih deformacija koje mogu ugroziti funkcionalnost podzemnog objekta.



Slika 4-8 Raspodela napona oko stabilnog otvora kružnog poprečnog preseka

Na slici 4-8 je predstavljen šematski prikaz stabilnog otvora podzemne prostorije pod pretpostavkom da su vertikalni i horizontalni naponi jednaki. Na konturi prostorije radijalni napon je jednak nuli, dok je tangencijalni napon dvostruko veći od primarnog napona. Sa udaljavanjem od konture radijalni napon raste, tangencijalni opada približavajući se vrednosti primarnog napona. Prostorija će biti stabilna ukoliko je maksimalna čvrstoća stene na pritisak veća od tangencijalnog napona na konturi prostorije.

U slučaju kada je čvrstoća na pritisak masiva manja od dvostruke vrednosti primarnog napona dolazi do loma na konturi prostorije, odnosno prostorija je nestabilna (slika 4-9). Na konturi nestabilne prostorije radijalni napon je jednak ili veći od čvrstoće stene i nastavlja da raste sa udaljavanjem od konture sve do mesta koje predstavlja prevojnu tačku od koje na dalje radijalni napon opada sve do vrednosti primarnog napona. Suprotno od radijalnog, tangencijalni napon na konturi prostorije ima maksimalnu vrednost koja opada sa udaljavanjem od konture prostorije, ali tako da je suma radijalnog i tangencijalnog napona u svakoj tački jednaka dvostrukoj vrednosti primarnog napona. Takva raspodela napona dovodi do pojava zone oslobođenih napona, zone povećanih napona i zone gde prostorija nema uticaj na primarno naponsko stanje okolnog masiva (neporemećena zona).



Slika 4-9 Raspodela napona oko otvora kružnog poprečnog preseka u elasto-plastičnoj sredini

Na zonu oslobođenih napona, to jest na njeno formiranje, veliki uticaj imaju diskontinuiteti i vrednosti primarnih napona tako da ona može nastati nezavisno od kontura podzemnih objekata. Kod stena ispresecanih pukotinskim sistemima u ovoj zoni plastičnih deformacija može doći do većeg obrušavanja, dok kod čvršćih stena može doći do odlamanja komada u bokovima zbog povećane koncentracije napona u tom delu [75].

## 4.2. Deformabilnost stenskih masa

Deformabilnost stenskih materijala je osobina da se pod dejstvom opterećenja stena deformiše u zavisnosti od veličine opterećenja. Ukoliko se sa opterećenjem prekine pre loma uzorka i izvrši rasterećenje i ukoliko se stenski materijal po prestanku opterećenja vraća u prvobitno stanje bez zaostalih deformacija tada se može reći da se radi o elastičnom ponašanju stenske mase. Ukoliko se po prestanku opterećenja stenska masa ne vraća u prvobitno stanje, odnosno ukoliko je stena pretrpela trajnu deformaciju, tada se može reći da se radi o plastičnom ponašanju stenske mase.

Deformabilnost je, kao i napon, simetričan tenzor drugog reda. Opisuje se sa šest nezavisnih komponenti deformacija (tri dilatacije, tj. normalne deformacije i tri klizanja, tj. smičuće deformacije). Kao i u slučaju napona, mogu se definisati glavne deformacije koje deluju u ravnima gde su smičuće deformacije jednake nuli.

Deformabilnost stenske mase definiše se modulom koji opisuje vezu opterećenja i merene deformacije. S obzirom da se stenska masa u veoma uskom intervalu naprezanja ponaša elastično termin koji se češće koristi za opis generalnog ponašanja stenske mase je modul deformacije. U uslovima opterećenja mogu se razlikovati četiri faze deformisanja uzorka pre dostizanja vršne čvrstoće (*pre-peak behaviour*) i jedna faza nakon prekoračenja vršne čvrstoće [90]. Prva faza je faza zatvaranja prslina i pukotina. U ovoj fazi naponsko-deformacijska zavisnost može biti linearnog ili nelinearnog oblika što je uslovljeno karakteristikama mikroispugalosti. Druga faza je linearno-elastična faza. U toku ove faze napon i deformacija rastu proporcionalno (naponsko-deformacijska zavisnost je linearna), a deformacija je elastičnog karaktera. Treća faza je faza stabilnog rasta pukotina. U ovoj fazi dolazi do širenja i sjedinjavanja mikroprslina i pukotina, pri čemu radijalna i volumetrijska deformacija postaju nelinearnog karaktera, a akustične emisije se povećavaju. Poslednja faza pre dostizanja vršne čvrstoće je faza nestabilnog rasta pukotina (faza loma). U ovoj fazi dolazi do formiranja makropukotine i povećanja zapremine uzorka, pri čemu su sve naponsko-deformacijske zavisnosti nelinearne, a akustične emisije se naglo povećavaju. Ova faza se završava kada se dostigne vršna čvrstoća. Faza koja se javlja nakon dostizanja vršne čvrstoće je faza degradacije stene. U ovoj fazi dolazi do kretanja stene po formiranim ravnima loma, pri čemu lom nastavlja da se širi. Dužina trajanja navedenih faza uslovljena je vrstom stenske mase i njenim mineralnim sastavom.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} du_x \\ du_y \\ du_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & -\epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & -\epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}$$

$$\epsilon_{xx} = -du_x / dx \quad \gamma_{xy} = (\pi/2 - 2\alpha) = \beta$$

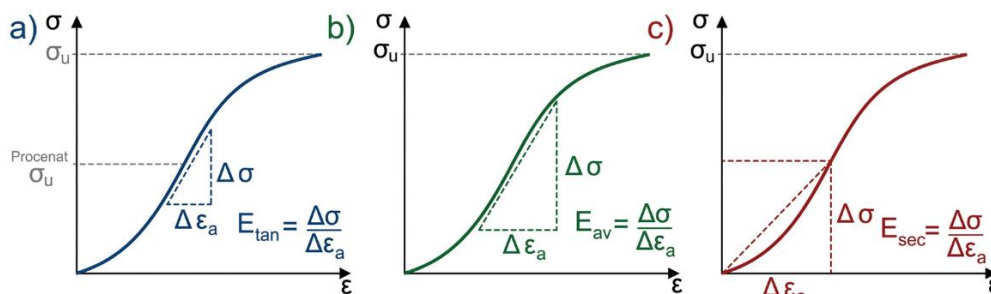
$$\alpha = \gamma_{xy} / 2$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} du_x \\ du_y \\ du_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{xy}/2 & 0 & \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{xz}/2 & \gamma_{yz}/2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}$$

Slika 4-10 Tenzor deformacije (normalne i smičuće deformacije) [77]

Osnovni parametar, koji se može odrediti jednostavnim opitom jednoaksijalne pritisne čvrstoće sa merenjem aksijalne deformacije je Young-ov modul elastičnosti (slika 4-11). Vrednosti ovog modula mogu da se odrede kao tangentna vrednost ( $E_{tan}$ ) za odgovarajući nivo napona, kao prosečna vrednost ( $E_{av}$ ) za određeni opseg napona i kao sekantna vrednost ( $E_{sec}$ ) za određenu veličinu napona (npr. 50% vrednosti jednoaksijalne čvrstoće).



Slika 4-11 Young-ov modul elastičnosti a) tangentni, b) prosečni, c) sekantni [90]

Young-ov modul elastičnosti intaktnog uzorka predstavlja odnos napona i deformacije za deformaciju manju od granice proporcionalnosti. Pod granicom proporcionalnosti se ovde podrazumevaju naponsko-deformacijske promene za koje važi Hooke-ov zakon, pri čemu su deformacije elastičnog karaktera [91]. Modul deformacije stenske mase predstavlja odnos opterećenja i odgovarajuće deformacije, uključujući elastične i plastične deformacije [91]. Modul elastičnosti stenske mase predstavlja odnos opterećenja i odgovarajuće deformacije, uključujući samo elastične deformacije [91].

Deformabilnost se može meriti direktno na intaktnom uzorku u laboratorijskim uslovima (najčešće u opitu jednoaksijalne kompresije ugradnjom mernih traka itd.), in situ opitima na stenskoj masi (hidraulički jastuk, presiometar itd.) ili indirektno iz korelacija sa različitim klasifikacionim sistemima.

Odnos modula elastičnosti i jednoaksijalne čvrstoće intaktnog uzorka, može se iskazati preko parametra  $MR$  (modulus ratio), pri čemu vrednost parametra  $MR$  ukazuje na kvalitet stenske mase. Modul deformacije stenske mase se indirektno može odrediti iz pojedinih klasifikacionih sistema stenske mase. U nedostatku eksperimentalnih ispitivanja ovakav način određivanja vrednosti modula deformacije je i najčešći slučaj u praksi. Za određivanje modula deformacije stenske mase veoma su popularne empirijske zavisnosti koje se baziraju na Hoek-Brown-ovom kriterijumu loma i GSI vrednosti.

Pored modula, drugi deformacijski parametar je Poisson-ov koeficijent. Njegova veličina se može odrediti merenjem aksijalnih i radijalnih deformacija na laboratorijski pripremljenom uzorku. Tipične vrednosti Poisson-ovog koeficijenta za izotropne stene kreću se u intervalu od 0 do 0,5 (za sve poznate materijale njegove vrednosti se kreću u širem intervalu, od -1,0 do 0,5). U slučaju anizotropnih stenskih masa njegove vrednosti mogu odstupati od uobičajenih, pri čemu mogu biti čak i negativne [92]. Kod transversalno izotropnih i ortotropnih materijala imamo tri, odnosno šest vrednosti Poisson-ovog koeficijenta, od čega su dve odnosno tri nezavisne, respektivno.

### 4.3. Kriterijumi loma stenske mase

Tokom podzemne eksploatacije mineralnih sirovina, odnosno izvođenjem rudarskih radova ispod površine zemlje (izrada prostorija otvaranja, razrade i pripreme, formiranje otkopnih komora itd.) dolazi do promene naponskog stanja u masivu usled čega može doći do stvaranja uslova za

nastanak loma. Lom stenske mase je kompleksan proces i za njegovo predstavljanje mogu da se koriste različiti kriterijumi. U rudarskoj praksi se najčešće koriste kriterijumi loma koji se izražavaju preko glavnih napona i to su:

- Von Misesov,
- Trescin,
- Mohr - Coulombov,
- Drucker - Pragerov,
- Hoek - Brownov kriterijum loma.

Iako postoji više teorijskih pristupa, težište daljeg rada biće na Mohr-Coulombovom i Hoek-Brownovom kriterijumu, s obzirom na njihovu najširu primenu u rudarskoj praksi.

#### **4.3.1. Mohr – Coulomb-ov kriterijum loma**

Najstariji i najčešće primenjivani kriterijum loma je Mohr – Coulomb-ov kriterijum loma. Mohr – Coulomb-ov kriterijum definiše granični smičući napon u zavisnosti od normalnog napona. Stanja loma stenske mase prikazuju se na dijagramu napon/deformacija Morovim krugovima. Prava linija koja tangira Morove krugove naziva se anvelopa napona loma. Anvelopa napona sa apscisom zaklapa određeni ugao  $\varphi$ , dok na ordinati formira odsečak C (slika 4-12). Linearna anvelopa loma se prema tome može predstaviti izrazom:

$$\tau_f = C + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

gde su:

C - kohezija za totalne napone,

$\varphi$  - ugao unutrašnjeg trenja,

$\sigma_n$  - normalni napon koji deluje na ravan smicanja, tj. ravan loma.

Morovi krugovi predstavljaju stanje napona u uzorku i ukoliko anvelopa dodiruje krugove smatra se da je došlo do loma stenske mase. Na slici 4-12 je prikazan Mohr – Coulomb-ov kriterijum loma preko anvelope napona i Morovih krugova. Na osnovu morovih krugova i dijagrama  $\sigma/\tau$  može se definisati zavisnost između normalnog i napona smicanja sa maksimalnim i minimalnim glavnim naponom:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\beta \quad (9)$$

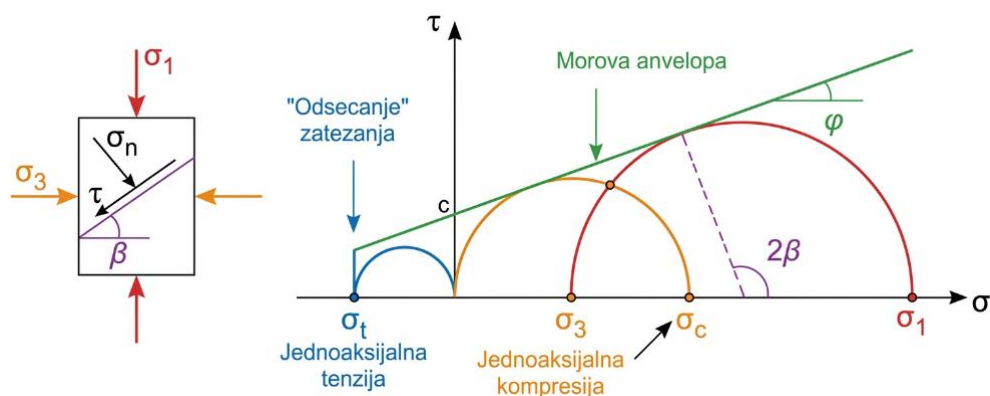
$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cos 2\beta \quad (10)$$

gde su:

$\sigma_1$  - maksimalni glavni napon u ravni

$\sigma_3$  - minimalni glavni napon u ravni

$\beta$  - ugao između ravni delovanja maksimalnog glavnog napona i ravni loma.



Slika 4-12 Mohr - Coulomb-ov kriterijum loma [76]

Morov dijagram je simetričan u odnosu na osu normalnih napona, što znači da postoje dve ravni koje sa pravcem maksimalnog glavnog napona zaklapaju jednake uglove. Ugao između ravni delovanja maksimalnog glavnog napona i ravni loma može se odrediti iz relacije:

$$\beta = \pm(45 + \varphi/2) \quad (11)$$

Mohr – Coulomb-ov kriterijum loma ne uzima u razmatranje srednji glavni napon  $\sigma_2$ , kao ni veličine deformacija, tako da se može izraziti u polju glavnih napona relacijom:

$$\sigma_1 = \frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi} + \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \cdot \sigma_3 \quad (12)$$

Ovaj kriterijum loma se široko upotrebljava u praksi zbog svoje jednostavnosti i pored toga što ne daje najprecizniji odnos napona pri lomu stenske mase.

#### 4.3.2. Hoek – Brown-ov kriterijum loma

Hoek – Brown-ov kriterijum loma nastao je na osnovu rezultata istraživanja o krutom lomu stena koje je sproveo Hoek sredinom prošlog veka [93] i Brown-ovih istraživanja o ponašanju i svojstvima ispucalih stenskih masiva [94]. Prvobitna jednačina koja opisuje ovaj kriterijum loma je zapravo korišćena još 1936. godine za opisivanje pojave loma kod betona [95]. Hoek i Brown su prvi koristili tada dostupne klasifikacije stenske mase za određivanje konstanti koje figuriraju u jednačini kriterijuma loma na osnovu geoloških opažanja. Hoek – Brown-ov kriterijum loma opisivao je intaktnu stenu preko sledećeg izraza:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (13)$$

gde su:

$\sigma_1$ - maksimalni glavni napon

$\sigma_3$ - minimalni glavni napon

$\sigma_c$  – jednoaksijalna čvrstoća na pritisak

$m_i$  – materijalna konstante intaktne stene.

Određivanje parametara Hoek – Brown-ovog kriterijuma pomoću klasifikacije stenske mase po Bienavskom (*Rock Mass Rating - RMR*) pokazala je nedostatke kod veoma slabih stena. Zbog toga je razvijen novi metod klasifikacije stenske mase poznat kao Geološki indeks čvrstoće (*Geological Strength Index - GSI*). U početku je i ovaj sistem klasifikacije stenske mase pokazivao zadovoljavajuće rezultate samo kod čvršćih stenskih masa da bi se daljim razvojem njegova primena

proširila i na slabije stene [96, 97]. Kao rezultat daljih istraživanja i usavršavanja nastao je generalizovani Hoek – Brown-ov kriterijum u kome je RMR klasifikaciju zamenila GSI klasifikacija [98, 99]. Generalizovani Hoek – Brown-ov kriterijum predstavljen je izrazom:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (14)$$

gde su:

$\sigma_1$  - efektivni maksimalni glavni napon pri lomu

$\sigma_3$  - efektivni minimalni glavni napon pri lomu

$\sigma_c$  - jednoaksijalna čvrstoća na pritisak

$m_b$  - redukovana vrednost konstante  $m_i$

$s$  - konstanta

$a$  - konstanta.

Od svog nastanka do danas Hoek – Brown-ov kriterijum loma je stalno usavršavan i tokom vremena je trpeo razne korekcije koje su se pre svega odnosile na određivanje materijalnih konstanti  $m_b$ ,  $s$  i  $a$  koje se mogu izračunati prema sledećim izrazima [100]:

$$m_b = m_b \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (15)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (16)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (17)$$

U formulama parameter D predstavlja faktor poremećaja stenske mase do koje dolazi kao posledica relaksacije napona i oštećenja nastalih kao posledica miniranja. Njegove vrednosti mogu da se kreću u rasponu od 0 do 1, pri čemu za neporemećene stenske mase faktor D ima vrednost 0, a za veoma poremećene 1.

## 5. Istraživačke metode

Metodologija istraživanja podrazumeva skup istraživačkih metoda koje se koriste za prikupljanje određenih podataka, uspostavljanje zakonitosti problema i predstavljanja rezultata istraživanja. Pod metodom se podrazumeva postupak kojim se dolazi do znanja ili drugačije rečeno metoda je alat uz pomoć kog se dolazi do novih saznanja o problemu [101]. U ovoj disertaciji su predstavljene određene metode u cilju sagledavanja mogućnosti njihove primene pri analizi uslova stabilnosti za različite konstrukcije dna otkopnih blokova. Iz grupe prikazanih metoda potrebno je izdvojiti one pomoću kojih bi se najpreciznije odredili parametri neophodni za određivanje uslova stabilnosti dna otkopnih blokova.

Kao što je već napomenuto sigurnost pri radu kod svake metode otkopavanja je glavni uslov koji se mora ispuniti. Kod blokovskih metoda otkopavanja osim parametara otkopnih blokova veoma bitnu ulogu ima konstrukcija dna otkopnih blokova. S obzirom da se u dnu bloka, tj. u prostorijama u dnu bloka odvijaju sve glavne tehnološke operacije pri eksploataciji, kao što su utovar, bušenje, miniranje, po potrebi i zapunjavanje otkopnih prostora, znači da je stabilnost ovih prostorija od najvećeg značaja za bezbednost zaposlenih pri otkopavanju, kao i uspešnu primenu izabrane metode. Osnovni cilj proračuna stabilnosti podzemnih objekata je da se na naučno zasnovanim principima definišu dimenzije objekata, koje će za planirani period vremena obezbediti funkcionalnost objekata, projektovanih za različite namene u toku eksploatacije ležišta. Na stabilnost podzemnih objekata glavni uticaj imaju dubina na kojoj se vrši otkopavanje, naponsko stanje stenskog masiva, fizičko-mehaničke karakteristike rude i pratećih stena, ali i veličina i oblik poprečnog preseka, međusobni položaj i rastojanje između pojedinih podzemnih objekata. Stoga je za stabilnost dna otkopnih blokova neophodno odrediti veličinu i oblik poprečnog preseka prostorija u dnu i rastojanje između njih, u zavisnosti od toga da li je u pitanju konstrukcija dna bloka sa ravnim dnom, sa rudnim levcima, sa tranšejama ili ispusnim zvonima. Da bi to bilo ostvarivo neophodno je što preciznije odrediti naponsko stanje masiva, kao i fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase. Za analizu stabilnosti, odnosno za određivanje napona u masivu oko podzemnog objekta, određenog poprečnog preseka, a za definisanje konturne uslove mogu se koristiti analitičke, empirijske, metode opažanja i numeričke metode.

### 5.1. Analitičke metode

Analitičke metode omogućavaju proračun napona matematičkim putem, pri čemu je osnovno polazište poznavanje veličine vertikalnog napona u datom masivu. Većina analitičkih metoda, zbog složenosti stanja masiva, bazirana je na idealizaciji i uprošćenju nekih elemenata [102]. Postoji veliki broj analitičkih metoda za analizu stabilnosti od kojih se najčešće koriste Kirch-ove jednačine, teorija grede, teorija svoda, dok se u analitičke metode za određivanje veličine napona mogu ubrajati i Hoek – Brown-ov i Mohr- Coulomb-ov kriterijum loma.

Kirch-ov pristup se zasniva na pretpostavkama da je stenski masiv idealno elastični, što znači da naponi ne zavise od elastičnih osobina stena. Proračun napona se vrši za prostoriju kružnog poprečnog preseka, jer se taj oblik najjednostavnije opisuje u cilindrično-polarnom koordinatnom sistemu pogodnom za definisanje radijalnih i tangencijalnih napona na konturi prostorije. Deformacije u uzdužnom preseku prostorije se zanemaruju i prostorija je izložena dejstvu vertikalnog napona koji potiče od težine višeležećih stenskih masa.

Teorija svoda zasniva se na ideji o formiranju razrušenog stenskog masiva iznad otkopa, prilikom otkopavanja horizontalnih ugljenih slojeva. Prema pretpostavljenoj hipotezi pritisak stenskog masiva koncentrisan je u određenom području blizu otkopnih radova, pri čemu dimenzije svoda zarušavanja zavise od fizičkih i mehaničkih osobina krovnih stena, kao i od debljine slojeva koji se otkopavaju. Suština ove teorije je u pretpostavci da se oko otkopa formira zona sa smanjenim

naponskim stanjem oblika svoda. Unutar svoda dolazi do preraspodele naprezanja i pojave zona opterećenih na pritisak i istežanje, te zona sa tangencijalnim naprezanjima bez oštih granica između zona. Hipoteza formiranja svodova pritiska podrazumeva razmatranje mehaničkih procesa koji se odvijaju u stenskoj masi kao rezultat formiranja i kretanja radova iskopavanja u nekoj lokalnoj zoni pored otkopa, pri tom masiv koji se nalazi izvan ove zone se ne uzima u obzir.

Sušтина hipoteze uklještene grede ili konzole, jeste da se slojevi stena iznad otkopnog prostora mogu posmatrati kao grede uklještene na jednom kraju. Drugi kraj grede može imati oslonac (podgrada, zasipni materijal) ili biti bez njega. U krovini otkopnog prostora, koja se sastoji od nekoliko slojeva stena, formira se skup takvih konzola, koji se preklapaju i međusobno naležu jedna na drugu. Teorija konzolnih ploča se bazira na poznatim elementima zavisnosti mehaničke čvrstoće materijala, gde se krovina posmatra kao ploča, oslonjena jednim krajem na ugljeni sloj, a drugim na stari rad (nasip) ili slobodno visi u slučaju metoda sa zarušavanjem krovine. U stvari, krovinska ploča je sastavljena od više slojeva, a sa pojavom savijanja dolazi do raslojavanja i pojave pukotina, pa kao takva gubi fizički kontinuitet.

### **5.1.1. Regresione metode u analitičkom modelovanju**

Regresiona analiza predstavlja statističko-analitičku metodu koja se koristi za kvantifikaciju odnosa između zavisne promenljive (npr. faktor sigurnosti) i skupa nezavisnih promenljivih (geometrijski i geomehanički parametri). U zavisnosti od prirode problema i očekivanog fizičkog ponašanja sistema, primenjuju se dva osnovna pristupa – linearna i nelinearna regresija.

Linearna regresija se koristi pod pretpostavkom da promena ulaznih parametara izaziva proporcionalnu i konstantnu promenu izlaznog rezultata. U mehanici stena, ona je pogodna za modelovanje bazičnih zavisnosti unutar elastične zone, gde su naponsko-deformacijski procesi predvidljivi i linearni.

Nelinearna regresija se primenjuje u slučajevima kada su zavisnosti između posmatranih pojava složene i neproporcionalne. S obzirom na to da su procesi loma u stenskom masivu, preraspodele napona i gubitak stabilnosti na velikim dubinama po pravilu nelinearni, ovaj metod omogućava korišćenje eksponencijalnih i logaritamskih funkcija. Nelinearna regresija obezbeđuje veću preciznost (bolji koeficijent determinacije) i omogućava modelovanje naglog otkazivanja sistema kada parametri dostignu kritične vrednosti.

Sintezom oba pristupa u okviru analitičke obrade, omogućava se prelaz sa diskretnih podataka na kontinuirani matematički model, koji verno interpretira ponašanje konstrukcija u masivu.

## **5.2. Empirijske metode**

Empirijske metode u mehanici stena uglavnom su zasnovane na iskustvima i situacijama vezanim sa konkretnim problemima u praksi. Glavni ulazni podaci za većinu empirijskih metoda dobijaju se na osnovu klasifikacija stenske mase.

Klasifikacije stenske mase mogu se koristiti za karakterizaciju kvaliteta stenske mase prema parametrima koji utiču na stabilnost i za kvantifikaciju nekih svojstava stenskog masiva koji se koriste i kod numeričkog modeliranja.

Prva racionalna klasifikacija koja je korišćena za procenu opterećenja kod podgrađivanja čeličnim lukovima bila je Terzaghi-jeva klasifikacija [103]. Lauffer-ova klasifikacija je značajna po uvođenju dva nova parametra, vremenski period za koji će nepodgrađena prostorija biti stabilna i udaljenost od čela prostorije, koji su uticali na razvoj savremenijih sistema klasifikacije [104].

Klasifikacija Deer-a (*Rock Quality Designation – RQD*) se bazira na ispuhalosti stenske mase koja je ocenjena na osnovu celovitosti jezgra dobijenog istražnim bušenjem [105]. Klasifikacija Wicham-a prva uvodi sistem bodovanja pri ocenjivanju stenskog masiva [106]. Jedan od sistema geomehničke klasifikacije stenske mase koji se široko koristi u rudarstvu je RMR (*Rock Mass Rating*) sistem koji je razvio Bieniawski [107]. Ovaj sistem je kasnije modifikovan na osnovu iskustava prikupljenih tokom godina [108-110]. RMR klasifikacija se zasniva na ocenjivanju stenske mase sabiranjem poena pet ulaznih parametara i u zavisnosti od primenjene varijante, određeni broj korektivnih faktora. Klasifikacija Norveškog geotehničkog instituta razvijena je od strane Barton-a, Lien-a i Lunde-a [111]. Veoma često se koristi zbog svoje sveobuhvatnosti i kompleksnog opisa stenskog masiva na osnovu šest ulaznih parametara. Laubscher-ova klasifikacija (*Mining Rock Mass Rating – MRMR*) je prilagođena za primenu u rudarstvu [112-114]. To je modifikovana RMR klasifikacija koja u odnosu na druge klasifikacije uzima u obzir i parameter rudarske korekcije. Geološki indeks čvrstoće (*Geological Strength Index - GSI*) [98, 99] je ključni faktor za procenu parametara Hoek-Brown kriterijuma loma. Prvi ga je uveo Hoek kao sistem karakterizacije zasnovan na geološkim posmatranjima struktura stenske mase i uslova na površini diskontinuiteta.

Jedna od najpoznatijih empirijska metoda koja je danas u upotrebi je Mathews-ov grafikon stabilnosti [115]. Ova metoda se odnosi na analizu stabilnosti otvorenih otkopa i kao i druge metodologije i ona je tokom vremena trpela određene dopune i modifikacije [116-118]. Analiza stabilnosti se zasniva na proračunu dva glavna faktora od kojih se prvi uzima u obzir sposobnost stene da ostane nepodgrađena pod određenim uslovima, a drugi faktor uzima u obzir uticaj oblika i veličine površine otkopa.

### 5.3. Metode opažanja

Metoda opažanja se zasniva na praćenju i posmatranju karakteristika iskopa i stenske mase tokom izvođenja rudarskih radova i po potrebi modifikovanju, odnosno prilagođavanju njihovih parametara potrebama. Postoje razne tehnike opažanja ponašanja stenske mase, pri čemu se monitoring može vršiti vizuelno ili pomoću instrumenata [119]. Metode opažanja su najbolji način da se kalibriše numerički model i da se potvrde i verifikuju predviđanja ostvarena korišćenjem numeričkih metoda.

### 5.4. Numeričke metode

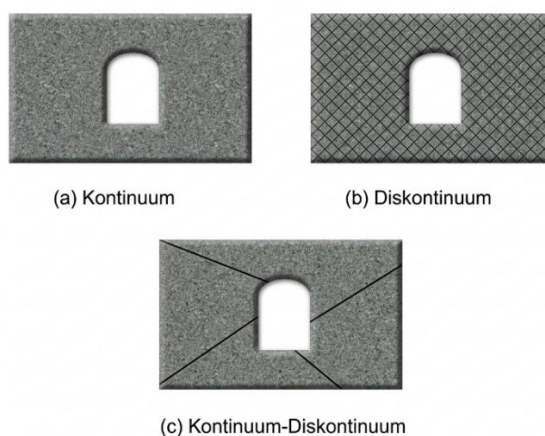
Većina podzemnih objekata ima nepravilan oblik i nalaze se u blizini drugih objekata. Ovu grupu objekata mogu da čine otkopi sa raznim pomoćnim prostorijama, okna, navozišta itd. Svi oni čine kompleks trodimenzionalnih oblika. Pored toga stenski masiv je ispresecan pukotinama. Analiza naponsko-deformacijskih stanja u stenskoj masi, sa složenom konstrukcijom otkopa, koja se ne može vršiti uz pomoć egzaktnih matematičkih metoda rešavaju se primenom numeričkih metoda. Ove su metode poznate dugi niz godina, ali je njihov ubrzan razvoj i ogromna praktična primena usko vezana sa razvojem računarskih softvera.

Pristup koji je prihvaćen kod svih ovih metoda je fizička podela modela u manje delove čiji zbir uticaja aproksimira ponašanje čitavog sistema. Niz jednačina oformljenih u ovom postupku zahteva neki metod rešenja.

Numeričke metode, koje se koriste u mehanici stena, mogu se podeliti u tri grupe: domen (*continuum*), granične (*discontinuum*) i hibridne (*hybrid continuum/discontinuum*) metode. Kod graničnih metoda samo se kontura prostorije deli na elemente, a unutrašnjost stenske mase predstavlja matematički kao beskonačni kontinuum. Domen metode dele unutrašnji deo stenske mase u geometrijski proste zone, svaka sa svojim osobinama. Ukupno ponašanje i međusobna interakcija

ovih prostih zona, modeliraju kompleksnije i često nepredvidivo ponašanje stenske mase. Hibridne metode predstavljaju kombinaciju graničnih i domen metoda.

Koja grupa metoda će se koristiti za analizu zavisi od vrste problema i geometrije sistema loma. Na slici 5-1a je prikazano kontinuirano polje pomeranja bez diskontinuiteta, stoga bi za takav sistem bile odgovarajuće domen (kontinuum) metode. Granične (diskontinuum) metode su pogodne za umereno napuknute stenske mase gde su moguća velika pomeranja pojedinačnih blokova [120]. Na primeru na slici 5-1b pomeranje je određeno klizanjem duž diskontinuiteta i rotacijom blokova pa bi u ovom slučaju bile povoljnije granične metode. Ne postoje jasna pravila o tome koji je metod bolji i kada treba koristiti jedan ili drugi. Međutim, nedostaci graničnih i domen metoda se mogu izbeći korišćenjem hibridnih metoda. Na slici 5-1c je prikazano polje pomeranja koje je kontinuirano unutar svake oblasti, ali sa izraženim diskontinuitetima između njih, tako da bi u ovom slučaju hibridne metode bile najpovoljniji izbor [121].



Slika 5-1 Numeričke metode u mehanici stena a) domen (continuum), b) granične (diskontinuum), c) hibridne (continuum/diskontinuum)

Najznačajnije numeričke domen metode su:

- Metoda konačnih elemenata MKE (*Finite Element Method - FEM*)
- Metoda konačnih razlika MKR (*Finite Difference Method - FDM*)
- Metoda graničnih elemenata MGE (*Boundary Element Method - BEM*)
- Metoda konačnih zapremina MKZ (*Finite Volume Method - FVM*)

Najznačajnije numeričke granične metode su:

- Metoda razdvojenih elemenata MRE (*Discrete Element Method - DEM*)
- Metoda razdvojenih mreža lomova MRML (*Discrete Fracture Network - DFN*)

Najznačajnije hibridne metode su:

- Hibridna MKE/MGE metoda (*Hybrid FEM/BEM*)
- Hibridna MRE/MGE metoda (*Hybrid DEM/BEM*)
- Hibridna MKE/MRE metoda (*Hybrid FEM/DEM*).

#### 5.4.1. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata nastala je ranih šezdesetih godina prošlog veka [122, 123]. Razvijena je kao alternativa metodi konačnih razlika za numeričko rešenje koncentracije napona u mehanici kontinuuma i bila je prva numerička metoda koja je mogla da uzme u obzir heterogenost materijala, nelinearnost, složene geometrije i granične uslove. Te njene karakteristike učinile su je najprimenjenijom numeričkom metodom u mehanici stena. Za ubranu primenu ove metode krajem sedamdesetih i početkom osamdesetih godina zaslužni su radovi Zienkiewicz-a i Bathe-a [124, 125]. Većina problema iz mehanike stena u to vreme su rešavani metodom konačnih elemenata [126-128]. Metoda konačnih elemenata se razvijala tokom godina i danas je i dalje najčešće primenjivana numerička metoda za simulacije nelinearnog, vremenski zavisnog i anizotropnog ponašanja stenske mase [129].

Jedna od najvećih prednosti metode konačnih elemenata je mogućnost predstavljanja heterogenih stena, gde je moguće dodeliti različite osobine materijala različitim konačnim elementima.

Zbog pretpostavki kontinuuma, metode konačnih elemenata imaju ograničenja u efikasnoj analizi loma, pukotinskih sistema i oštećenja izazvanih diskontinuitetima ili singularnostima [130, 131]. Pošto su stene diskontinualni sistemi, a MKE je metoda kontinuuma, bilo je mnogo pokušaja da se ona poboljša kako bi se njena primena proširila na simuliranje širenje loma i pukotinskih sistema, odnosno drugih efekata koje prouzrokuju diskontinuiteti singularnostima [132-138]. Kao rezultat nastali su generalizovana i poboljšana MKE koje ove nedostatke prevazilaze [139-144]. Metoda konačnih elemenata se danas najviše primenjuje putem geotehničkih softvera od kojih su najznačajniji *MIDAS* i *PLAXIS*.

Metoda konačnih elemenata počiva na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Razmatrano područje kontinuuma zamenjuje se konačnim brojem elemenata konačnih dimenzija koji su međusobno povezani u čvorovima. Na ovaj način se kontinuum sa bezbroj stepeni slobode zamenjuje diskretnim modelom sa konačnim brojem stepeni slobode. Povećanjem broja elemenata model se približava ponašanju neprekidne sredine. Stanje u svakom konačnom elementu definiše se stanjem čvorova, odnosno osnovne nepoznate su u čvorovima. To mogu biti sile, pomeranja ili i sile i pomeranja, pa se u skladu sa tim razlikuju i postupci rešavanja sistema. Postupak proračuna kod MKE se sastoji iz dva dela. Na početku se odabrani elementi razmatraju pojedinačno, a zatim se povezuju u celinu koja simulira ponašanje kontinuuma. Rešavanje konkretnih problema svodi se na proces sa šest osnovnih koraka koji se rešavaju jedan za drugim. To su diskretizacija kontinuuma, izbor funkcije pomeranja, određivanje svojstva konačnog elementa, formiranje jednačina diskretnog sistema, određivanje pomeranja i proračun napona i deformacija.

#### 5.4.2. Metoda konačnih razlika

Metoda konačnih razlika je metoda numeričkog rešavanja običnih i parcijalnih diferencijalnih jednačina. Zasnovana je na aproksimaciji rešenja date funkcije pomoću diferencijalnih ekvivalenata u konačnom broju tačaka proizvoljno odabrane mreže. Rešavanje diferencijalnih jednačina, koje u matematičkom smislu formulišu dati problem, pomoću MKR započinje konstrukcijom mreže u oblasti za koju se traži rešenje. Elementi mreže mogu biti trougaonog, pravougaonog, kvadratnog i dr. oblika, pri čemu su rastojanja između čvorova po pravilu jednaka. Data diferencijalna jednačina se u čvorovima aproksimira odgovarajućom jednačinom u konačnom obliku [52].

Vrednosti funkcije u graničnim čvorovima određuju se iz zadatih graničnih uslova. Potom se formiraju jednačine za sve ostale čvorove, čime se dobija veliki broj linearnih algebarskih jednačina sa istim tolikim brojem nepoznatih.

#### **5.4.3. Metoda graničnih elemenata**

Metoda graničnih elemenata, za razliku od dve prethodne koje su diferencijalne, pripada grupi integralnih numeričkih metoda. Integralne metode vrše diskretnu aproksimaciju osnovnih integralnih jednačina superpozicijom poznatih partikularnih rešenja datog problema. Kod ove metode nije potrebna podela čitavog područja, već se diskretizacija vrši samo po granicama. To i jeste osnovna njena prednost, jer je broj elemenata pa i broj jednačina bitno manji [52].

Ono što je specifično za MGE je to što se vrednosti promenljivih dobijaju samo tamo gde je to potrebno, kao i to što se vrednosti dobijaju direktno. Krajnja granica područja je u beskonačnosti, tako da se ne javljaju problemi vezani za specificiranje granice istražnog područja, kao kod MKE na primer.

#### **5.4.4. Metoda konačnih zapremina**

Metoda konačnih zapremina (MKZ) predstavlja jednu od eksplicitnih numeričkih tehnika koje se primenjuju u analizi i upravljanju stenskim masivima. Njen koncept počiva na podeli prostora na određeni broj elemenata, odnosno konačnih zapremina, dok se proračun oslanja na zakone kretanja i jednačine koje definišu kako se materijal naponski i deformacijski ponaša. Ova metoda čini osnovu softvera *FLAC3D*, koji nudi dve varijante prostorne diskretizacije. Prva je heksaedarna, gde se prostor deli na heksaedre koji su dalje sastavljeni od tetraedara kao računskih jedinica; stanje heksaedra se tada dobija težinskim prosekom stanja njegovih pod-elemenata. Druga opcija je direktna tetraedarna mreža, kod koje se svojstva elemenata određuju preko čvornih vrednosti i volumetrijskog ponderisanja [145].

Značajna prednost MKZ je fleksibilnost u simulaciji diskontinuiteta, koji se mogu modelirati na dva načina. Implicitni pristup koristi specijalne konstitutivne modele koji diskontinuitet tretiraju kao oslabljenu ravan unutar materijala gde je rizik od loma najveći. S druge strane, eksplicitni pristup koristi „interface“ elemente (trougaoone elemente sa specifičnim mehaničkim svojstvima) koji se postavljaju na granicu između dve zone modela. Ovaj metod je posebno koristan kod analiza velikih pomeranja, jer omogućava precizan prikaz relativnog kretanja blokova duž te dodirne površine [145].

#### **5.4.5. Metoda razdvojenih elemenata**

Metoda razdvojenih elemenata (MRE) primenjuje se za simulaciju diskretnih sistema, kao što su tlo, stenski masivi ili smeše čvrstih čestica i fluida. Ključna odlika ove metode je tretiranje elemenata kao zasebnih celina koje međusobno komuniciraju pod dejstvom spoljnih sila. Zahvaljujući takvom pristupu, elementi se mogu slobodno kretati duž kontaktnih ravni i ostvarivati nove interakcije unutar sistema. Iako su teorijski temelji postavljeni još 70-ih godina prošlog veka, šira primena metode usledila je tek tokom 90-ih, kada su računari postali dovoljno pristupačni i snažni za složene proračune koje ova metoda zahteva [145].

U pogledu geometrije, softverski kodovi se dele na one koji koriste blokove i one koji se baziraju na partikulama, pri čemu su obe varijante dostupne u 2D i 3D okruženju (u oblicima poligona, poliedara, krugova ili sfera). Zavisno od postavljenog problema i odabranog konstitutivnog modela, elementi mogu biti kruti ili deformabilni, a njihove međusobne veze raskidive ili trajne. Kod deformabilnih blokova, unutrašnja analiza napona vrši se metodama kontinuuma (poput konačnih

elemenata ili razlika), dok se kod sferičnih čestica deformacija simulira promenom njihovog radijusa. Među najpoznatijim softverskim rešenjima ističu se *UDEC*, *3DEC*, *PFC*, *YADE* i *WoodDem*, od kojih svaki ima specifičnu upotrebnu vrednost u inženjerskoj praksi [145].

#### 5.4.6. Metoda razdvojenih mreža lomova

Ovo je diskretni model koji je počeo da se razvija krajem 1970-ih uglavnom za simulaciju protoka fluida i kretanja kroz povezane frakture stena. U kretanju podzemnih voda dominiraju povezane putanje formirane lomovima, pukotinama, šupljinama itd. Glavni problem je definisanje položaja, geometrije i svojstva diskretnih preloma. Za jednom deterministički ili stohastički definisane diskretne lomove, MRM model se može primeniti za razumevanje problema i prirode kretanja i protoka fluida. Jednačine protoka kroz frakture mogu se izvesti korišćenjem rešenja zatvorenog oblika, metode konačnih elemenata, metode graničnih elemenata, modela cevi ili modela rešetke. Modeli cevi i modeli rešetki kanala se rešavaju analitički i računarski su manje zahtevni od modela MKE i MGE. Najpoznatiji softver za primenu u rudarstvu u koji je ova metoda implementirana naziva se *FRACMAN* [129].

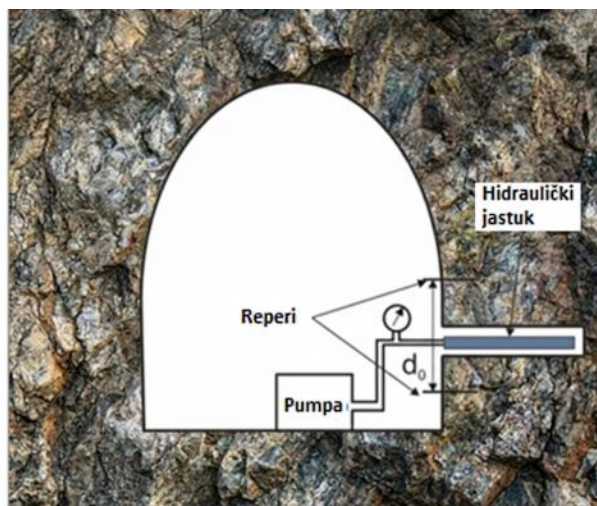
### 5.5. Metode merenja naponskog stanja

Vrednost napona određena analitičkim i empirijskim metodama u praksi se ne mora poklapati sa stvarnim naponskim stanjem u stenskom masivu. Najprecizniji podaci o veličini i orijentaciji napona mogu se dobiti neposrednim merenjem na terenu.

Postoje razni načini i metode merenja napona u masivu. Merenje naponskog stanja se uglavnom bazira na principu rasterećenja masiva, odnosno oslobađanja napona ili na principu oslobađanja i ponovnog uspostavljanja napona, mada postoje i metode koje se baziraju na emitovanju akustičnih i ultrazvučnih talasa, kao i X-zraka. Takođe, razlikuje se merenje napona na konturi prostorije (otkopne komore ili nekog drugog podzemnog objekta) i merenje napona u dubini masiva. Međunarodno društvo za mehaniku stena (*International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering – ISRM*) [146-148] za merenje naponskog stanja preporučuje nekoliko metoda kao što su *Flatjack* metoda, metoda hidrauličkog loma, metoda rejezgrovanja (*overcoring*) Američkog biroa za rudnike (*United States Bureau of Mines - USBM*) i metoda rejezgrovanja Organizacije za naučna i industrijska istraživanja Komonvelta (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization – CSIRO*). Pored ovih metoda koje ISRM preporučuje postoji veliki broj eksperimentalnih metoda koji se primenjuje u praksi kao što su: metoda Oberti, metoda sa centralnom bušotinom, Tincelinova metoda, merenje napona na konturi prostorije rozetom mernih traka itd.

#### 5.5.1. Flatjack metoda merenja napona

Primenom ove metode merenjem se dobijaju vrednosti normalne komponente napona. Da bi se izračunao napon smicanja, mora se izmeriti normalni napon u različitim pravcima. Zbog toga je za određivanje tenzora napona potrebno šest merenja u šest različitih pravaca. Glavne pretpostavke od kojih se polazi su da je stena savršeno elastična i primarni naponi deluju u vertikalnom i horizontalnim pravcima [149]. Skica metode merenja data je na slici 5-2. U bok prostorije na određenom rastojanju jedan iznad drugog postavljaju se dva repera (dva metalna pina). Nakon što se između njih napravi prerez, pod uticajem normalnog napona rastojanje između repera bi trebalo da počne da se smanjuje. U napravljeni prerez se ubacuje hidraulički jastuk (*flatjack*) i nanosi se pritisak sve dok se rastojanje između repera ne vrati u početno stanje. Vrednost pritiska koja se tom prilikom nanosi se koristi zapravo za određivanje vrednosti normalnog napona. S obzirom da se napon meri u boku prostorije ili otkopa, koji su pod uticajem sekundarnog naponskog stanja, merene vrednosti ne mogu predstavljati primarne napone, već su to sekundarni naponi [76].

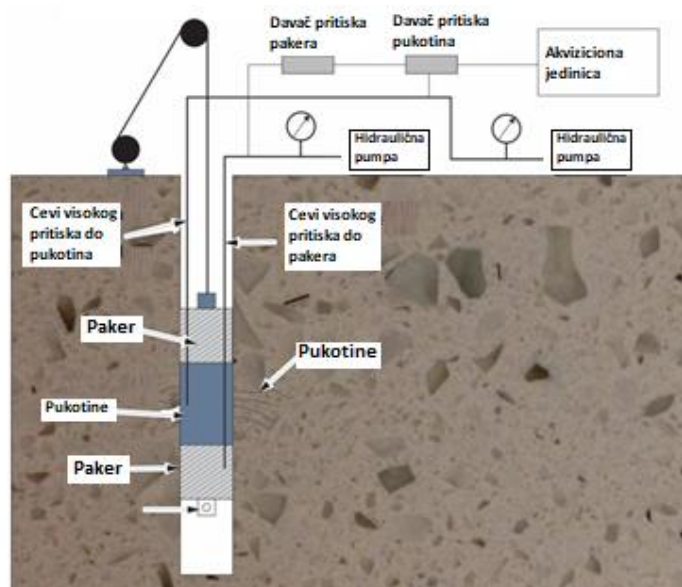


Slika 5-2 Flatjack metoda merenja napona

### 5.5.2. Metoda hidrauličkog loma

Pun naziv ove metode glasi hidrauličko ispitivanje na već postojećim pukotinama (*hydraulic testing of pre-existing fractures - HTPF*). Ovom metodom mogu se dobiti svih šest komponenti neophodnih za definisanje tenzora napona.

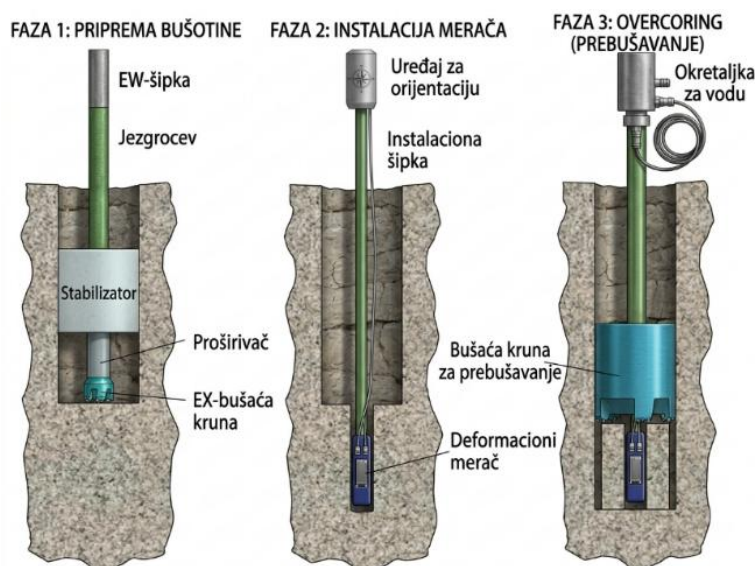
Princip HTPF metode je prikazan na slici 5-3 U prethodno izbušenu bušotinu, u delu u kome se meri napon postavljaju se dva gumena pakera na naduvavanje. Pakeri imaju funkciju zaptivanja bušotine i rastojanje između njih ne sme biti manje od šest prečnika bušotine. Ovaj izolovani (zapečaćeni) deo se izlaže pritisku upumpavanjem nekog fluida, najčešće vode, sve do pojave otvaranja i širenja pukotina. Veličina glavnih napona se određuje na osnovu dva pritiska: pritiska pri kome dolazi do pojave širenja pukotina i pritiska pri kome dolazi do zatvaranja pukotina. Ova metoda se bazira na pretpostavci da su glavni naponi paralelni i normalni na osu bušotine i da se vertikalni naponi mogu odrediti iz težine višeležećih stenskih masa. Najbolje rezultate ova metoda pokazuje u elastičnim, homogenim, izotropnim, krtim i neporoznim materijalima [150]. Takođe, istraživanja su pokazala da ova metoda ne daje dobre rezultate kod kristalnih stena u uslovima povećanih horizontalnih napona [151].



Slika 5-3 Metoda hidrauličkog loma

### 5.5.3. Metode rejezgrovanja po USBM i CSIRO

Metode merenja naponskog stanja rejezgrovanjem mogu se podeliti u dve grupe: metoda merenja deformacija bušotina Američkog biroa za rudnike (USBM) i metoda merenja napona mernom ćelijom Saveta organizacije za naučna i industrijska istraživanja (CSIRO). Osnovni princip kod ovih metoda je merenje deformacija bušotina izazvanih relaksacijom napona. I u ovom slučaju polazi se od pretpostavke da je stena idealno elastična, kontinualna, homogena i izotropna.



Slika 5-4 Metoda rejezgrovanja

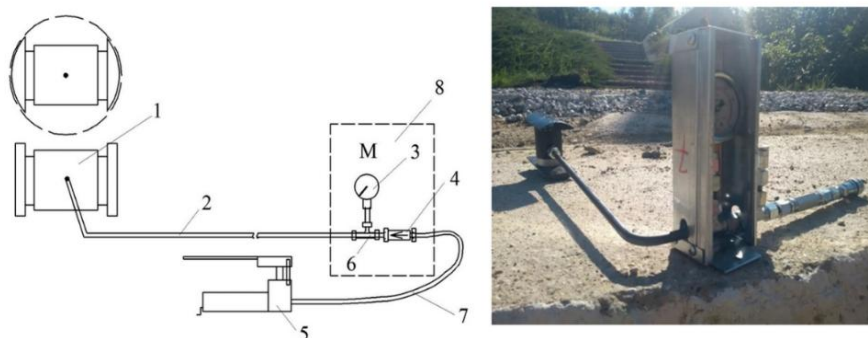
Proces merenja se sastoji od nekoliko faza od kojih je prva bušenje bušotine odgovarajućeg prečnika na mestu na kojem postoji potreba za određivanjem naponskog stanja. Nakon bušenja bušotine većeg prečnika, na njenom dnu se buši bušotina manjeg prečnika takozvana pilot bušotina. U pilot bušotinu manjeg prečnika se instalira merna ćelija ili merni uređaj. Nakon toga se iz bušotine većeg prečnika vrši rejezgrovanje, odnosno vadi se jezgo koje sadrži pilot bušotinu sa mernim uređajem. Rejezgrovanjem se vrši relaksacija napona, a dobijeno jezgro sa mernim uređajem (mernom ćelijom) se koristi za određivanje deformabilnosti stene. Iz izmerenih deformacija, računskim putem se određuju vrednosti glavnih napona. Metoda rejezgrovanja prikazana je na slici 5-4.

### 5.5.4. Merenje napona mernim uređajem MS-IRM 2

Primena prethodno navedenih metoda merenja naponskog stanja zahteva relativno skupu opremu, pa su stoga u Institutu za rudarstvo i metalurgiju u Boru konstruisani i izrađeni instrumenti za merenje napona u masivu.

Konstruisani merni uređaj MS-IRM 2 je u obliku sonde (slika 5-5) koje se ugrađuju u bušotinu prečnika 70 do 100 mm. Može se primenjivati u bušotinama na površinskim kopovima, jamama i tunelogradnji. Sonda je, u principu, jednosmerni cilindar sa dva sferna segmenta koji se, usled dejstva pritiska pomeraju i prijanjaju na zidove bušotine. Pomoću cevi (2) se povezuje dvosmerni cilindar (1) i ugrađuje na željenu dubinu gde će se izvršiti merenje. Drugi kraj cevi povezan je sa manometrom (3) sa koga se očitavaju vrednosti pritiska. Nakon što se sonda ubaci u bušotinu na jednosmerni ventil (4) priključuje se hidraulična pumpa (5) pomoću creva (7) i nanosi se pritisak koji predstavlja početnu vrednost. Nakon toga spoj hidrauličkog creva (7) i jednosmernog ventila (4) se rastavlja i hidraulična pumpa se uklanja. Manometar se nalazi izvan bušotine i smešten je u metalnom kućištu sa koga se očitavaju vrednosti pritiska u određenom vremenskom intervalu. Dobijeni rezultati se odgovarajućim

matematičkim metodama preračunavaju u napone i deformacije. Bušotina u koju se ugrađuje sonda buši se sa jezgrovanjem, tako da se izvađenog jezgra laboratorijskim ispitivanjem mogu odrediti fizičko-mehaničke karakteristike stenske sredine.



Slika 5-5 Merni uređaj MS-IRM 2

Sonda je do sada uspešno korišćena za merenje napona u rudnicima uglja u Bosni, pri određivanju naponsko-deformacionog stanja duž trase tunela ispod flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj i Jami Bor [152].

Preporučeno je da merni uređaj bude dobro zaštićen metalnom kutijom neposredno iznad bušotine. Kontrola na manometru se vrši periodično prema zahtevu u projektu. Dobijeni rezultati se odgovarajućim matematičkim metodama preračunavaju u napone i deformacije.

## 5.6. Primenjene metode istraživanja

Metodološki okvir istraživanja u ovoj disertaciji zasnovan je na kombinaciji eksperimentalnih, empirijskih i numeričkih metoda, čijom integracijom je razvijen univerzalni model za procenu stabilnosti konstrukcije dna otkopnih blokova. Primenjene metode su sprovedene kroz faze laboratorijskih ispitivanja fizičko-mehaničkih karakteristika stenske mase, in-situ merenja naponskog stanja, empirijske klasifikacije i karakterizacije masiva, numeričke analize metodom konačnih elemenata i nelinearne regresije.

Početna faza istraživanja obuhvatila je detaljna laboratorijska ispitivanja uzoraka stenske mase prikupljenih iz rudnog tela Borska Reka. Ispitivanja su sprovedena u skladu sa važećim srpskim i međunarodnim standardima radi utvrđivanja zapreminske i specifične težine, jednoaksijalne čvrstoće na pritisak, čvrstoće na zatezanje, modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta, kohezije i ugla unutrašnjeg trenja. Ovi podaci su poslužili kao osnova za dalju karakterizaciju stenskog masiva.

Osnovni ulazni parametri za modeliranje definisani su kombinacijom laboratorijskih ispitivanja i in-situ merenja primarnog naponskog stanja. Za određivanje napona primenjena je metoda rejezgrovanja CSIRO HID ćelijom. Ova metoda, zasnovana na principu merenja deformacija jezgra usled relaksacije napona, omogućila je direktno definisanje njegovih komponenti u neporemećenom masivu.

Kako bi se izvršila ocena kvaliteta radne sredine primenjena je geomehanička RMR klasifikacija. Na osnovu rezultata ispitivanja jednoaksijalne čvrstoće na pritisak i terenskih opservacija radne sredine u rudnom telu Borska Reka, izvršeno je bodovanje parametara stenskog masiva (RQD, stanje diskontinuiteta, podzemne vode), čime je dobijen indeks kvaliteta i kategorizacija stenske mase. Krajnji cilj primene klasifikacije je bio određivanje vrednosti GSI, kao ulaznog parametra za numeričko modeliranje.

Za analizu naponsko-deformacijskog stanja konstrukcije dna bloka korišćen je programski paket Midas GTS NX, baziran na metodi konačnih elemenata. Primena metode konačnih elemenata omogućila je simulaciju različitih varijanti konstrukcije dna bloka. Numerički modeli su omogućili precizno lociranje zona plastifikacije i proračun faktora sigurnosti za svaku varijantu dizajna.

Kako bi se rezultati numeričkih simulacija pretvorili u praktično primenljiva rešenja, primenjena je regresiona analiza kao univerzalna statističko-analitička metoda. Budući da stabilnost nije linearna funkcija, primenjena je nelinearna regresija kako bi se obuhvatio eksponencijalni uticaj parametara dna bloka na promenu faktora sigurnosti. Primenom metode nelinearne regresije, podaci iz softvera sintetisani su u univerzalnu empirijsku formulu, čime je omogućeno da se stabilnost predstavi kao funkcija ključnih geometrijskih parametara.

## 6. Numeričko modeliranje stabilnosti dna otkopnih blokova

Primenljivost metode otkopavanja podrazumeva određivanje njenih osnovnih konstruktivnih parametara. Sigurnost pri radu kod svake metode otkopavanja je glavni uslov koji se mora ispuniti. Ne sme se dozvoliti da metoda postane opasna po život ljudi i rudničke instalacije [153].

Savremeni pristup primeni metoda otkopavanja sa zarušavanjem rude i pratećih stena razmatra dva najčešća tipa konstrukcije dna otkopnih blokova – ispusna zvona i tranšejno podsecanje. Tokom istraživanja i projektovanja metoda otkopavanja, pored određivanja optimalnih parametara istakanja rude, posebna pažnja mora se posvetiti analizi stabilnosti otkopnih blokova, a naročito stabilnosti konstrukcije dna otkopnih blokova. Ovo je neophodno kako bi se osiguralo bezbedno radno okruženje pri eksploataciji na većim dubinama.

Osnovni cilj analize stabilnosti podzemnih objekata jeste definisanje njihovih odgovarajućih dimenzija i oblika. Izborom pravilne geometrije osigurava se funkcionalnost objekata različitih namena tokom planiranog perioda eksploatacije ležišta.

Za potrebe analize stabilnosti najpre je neophodno izabrati konstrukciju otkopnog bloka sa svim geometrijskim parametrima na osnovu kojih će se izvršiti kreiranje potrebnog modela. Nakon toga potrebno je izvršiti izbor odgovarajućeg računarskog softvera u kojem će se putem 3D modeliranja i simulacija analizirati posmatrani model. Uspešnost softverske simulacije i pouzdanost rezultata analize u najvećoj meri zavise od kvaliteta ulaznih podataka, pa je s tim u vezi najbolje prikupiti podatke o fizičko-mehaničkim karakteristikama radne sredine i naponsko-deformacionom stanju stenske mase direktno na terenu.

Analiza stabilnosti za potrebe ove disertacije izvršena je preko numeričkog modela kreiranog u programskom paketu Midas GTS NX. Midas GTS NX (skraćeno od *New Experience of Geo-Technical Analysis System*) predstavlja softverski paket za geotehničku analizu zasnovan na metodi konačnih elemenata. Za razliku od softvera koji su se u bliskoj prošlosti uglavnom koristili za rešavanje problema vezanih za stabilnost konstrukcija u podzemnoj eksploataciji, GTS NX omogućava jednostavan prelaz iz 2D ravni u potpuno 3D okruženje. Ovo je ključno za analize koje su neophodne u rudarstvu, gde se uticaj izvođenja rudarskih radova i projektovanje kompleksnih sistema ne može uvek realno sagledati samo kroz poprečne preseke. Takođe, softver je dizajniran tako da omogućava praćenje faza razvoja radova, što znači da može simulirati svaki proces korak po korak. Na taj način se mogu analizirati početno stanje stenske mase pre početka izvođenja rudarskih radova, promena naponsko-deformacionog stanja pri izradi prostorija i pri otkopavanju, odnosno promene u ponašanju stenskog masiva, podgradnih sistema i generalno parametara stabilnosti sa svakim korakom napredovanja radova u toku eksploatacije. Jedna od njegovih najvažnijih funkcija je metoda smanjenja čvrstoće - SRM (*Strength Reduction Method*), preko koje program automatski smanjuje parametre čvrstoće materijala dok ne dođe do loma, čime precizno definiše faktor sigurnosti i kritičnu površinu klizanja ili urušavanja. Još jedna prednost ovog softvera ogleda se u činjenici da se prilikom formiranja mreže konačnih elemenata dozvoljava kombinovanje različitih vrsta elemenata (tetraedri, heksaedri itd.) u istom modelu, što omogućava da oko same otkopne prostorije, gde je bitna preciznost, mreža bude gusta i heksagonalna, a dalje u stenskoj masi ređa, čime se smanjuje vreme trajanja simulacije i angažovanje računarskih resursa.

Kao što je već napomenuto, za pouzdanost modela najbitniji je adekvatan odabir ulaznih parametara, što je uslovljeno izabranim kriterijumom loma stenske mase. Ulazni podaci se dobijaju merenjima na terenu i laboratorijskim ispitivanjima na uzorcima stenske mase. Merenjima sa terena neophodno je prikupiti podatke vezane za naponsko-deformaciono stanje stenskog masiva, dok je od podataka vezanih za fizičko-mehaničke karakteristike radne sredine, ispitivanjem potrebno odrediti čvrstoću na pritisak, modul elastičnosti, poasonov koeficijent, koheziju i ugao unutrašnjeg trenja.

Ukoliko je moguće, najpogodnije bi bilo izvršiti kalibraciju modela, poređenjem rezultata dobijenih simulacijom i rezultata izmerenih na terenu, čime bi se omogućilo predviđanje parametara stabilnosti sa velikom sigurnošću. U suprotnom, preciznost dobijenih rezultata se svodi na kvalitet definisanja ulaznih podataka.

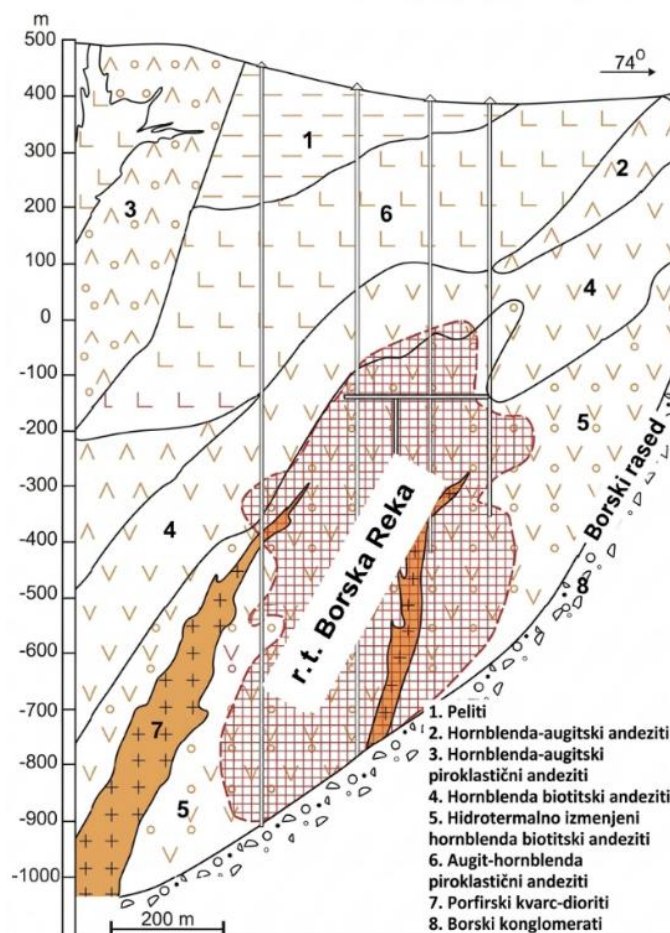
### **6.1. Izbor lokacije za prikupljanje ulaznih podataka pri numeričkom modeliranju**

Najznačajnija ležišta rude bakra u Srbiji nalaze se u istočnom delu zemlje, a skoncentrisana su na potezu od Bora do Majdanpeka. Globalni trend smanjnja sadržaja metala u rudi, sa tendencijom povećanja dubine na kojoj se vrši eksploatacija nije zaobišao ni Borsko ležište bakra. U pomenutom ležištu eksploatacija se u kontinuitetu održava duže od jednog veka i za to vreme je većina bogatijih rudnih tela koja zaležu bliže površini terena eksploatisana. Za nastavak proizvodnje i obezbeđivanje kontinuiteta u podzemnoj eksploataciji najznačajnije je rudno telo Borska Reka, koje se po svojim karakteristikama uklapa u već pomenuti trend – rudno telo sa niskim sadržajem bakra koje zaleže na većoj dubini. Za nastavak eksploatacije u ovom rudnom telu u planu je primena masovnih metoda eksploatacije uz povećanje dubine otkopavanja, što ga uz njegove karakteristike čini pogodnim za sprovođenje istraživanja vezanih za stabilnost dna otkopnih blokova i upravo iz tog razloga je i izabrano kao podloga za kreiranje modela.

Borsko rudno polje deo je Borske metalogenetske zone, koja se prostorno poklapa sa Timočkim magmatskim kompleksom i koja pripada gornjokrednom metalogenetskom pojasu Apuseni-Banat-Timok-Srednogorje (Karpato-balkanska metalogenetska provincija). Ovaj kompleks pripada Tetijsko-evroazijskoj metalogenetskoj zoni, svetski poznatoj po ležištima bakra i zlata [154].

Rudno telo Borska Reka nalazi se u severozapadnom delu na obodu grada Bora ispod doline Borske reke. Sastavni je deo Timočkog magmatskog kompleksa i sastavni je deo rudnika Jama. Od borske hidrotermalne zone odvojeno je Borskim rasedom i zaleže pod uglom od 45° do 55° u skladu sa zaleganjem borskih peščara i konglomerata. Nalazi se u centralnom delu borskog ležišta bakra, dužine je oko 1000 m i širine oko 500 m, a nalazi se na dubini između 500 i 1200 metara. Prema razmerama, porfirsko orudnjenje rudnog tela Borska Reka pripada kategoriji ležišta velikih razmera. Prosečna debljina orudnjenja iznosi preko 300 m [155].

Rudno telo Borska Reka je smešteno u intenzivno izmenjenim andezitima i njihovim piroklastitima pri čemu se generalno mogu izdvojiti dve različite zone stena koje učestvuju u geološkoj građi ležišta. Površinsku zonu čine stene pelitske serije (peliti, tufovi, tufiti, laporci i breče), koje su zastupljene u zapadnom delu ležišta. Ispod njih se nalaze hornblenda-biotitski andeziti, ređe daciti i njihovi vulkanoklastiti, koji su slabo izmenjeni i imaju očuvanu porfirsku strukturu. Drugu zonu čine intenzivno hidrotermalno izmenjene stene andezitskog sastava, koje se nalaze ispod prve zone i prostiru se do Borskog raseda, koji ih odvaja od borskih konglomerata. Ova zona izmenjenih stena predstavlja nastavak borske hidrotermalno izmenjene zone koja se pruža ka severozapadu i nalazi se duboko ispod površine terena. Hidrotermalno izmenjenu zonu čine potpuno izmenjeni hornblenda-biotitski andeziti i njihovi vulkanoklastični ekvivalenti. Idući od površine, intenzitet hidrotermalnih izmena raste sa dubinom. Od hloritizovanih i kalcitizovanih stena andezitskog sastava, izmene postepeno prelaze u kaolinisane, a zatim u visoko silifikovane, sulfatizovane i piritisane stene, odnosno u samo rudno telo. Unutar zone izmenjenih stena, gornji deo nije mineralizovan, izuzev neposredne krovine rudnog tela gde je sadržaj bakra veoma nizak. Donji deo izmenjene zone, koji naleže na konglomerate, predstavlja rudno telo Borska reka. Poprečni presek rudnog tela Borska reka sa okolnim stenama prikazan je na slici 6-1 [156,157].

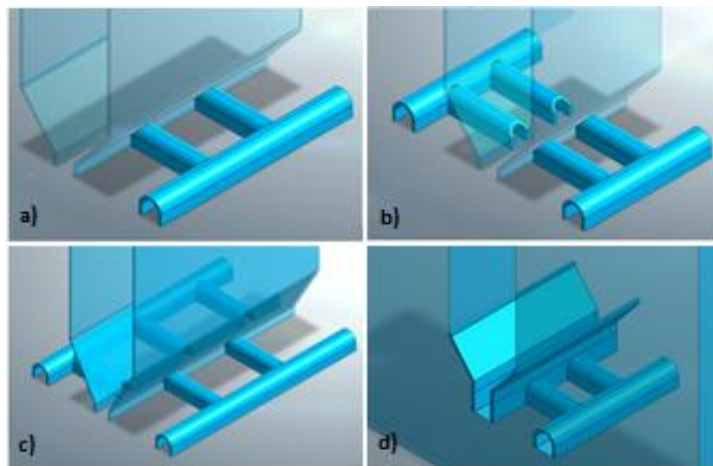


Slika 6-1 Poprečni presek rudnog tela Borska Reka

Imajući u vidu da je Borska Reka rudno telo velikih razmera, koje zaleže na velikoj dubini i sadrži siromašnu rudu, a da se na površini terena nalaze infrastrukturni objekti od značaja, izbor metode otkopavanja je dugi niz godina bio predmet istraživanja i ispitivanja. U razmatranje su uzimane metode blokovskog otkopavanja sa zarušavanjem rude i metode otkopavanja sa zapunjavanjem otkopnog prostora. Kod većine istraživanih metoda najpovoljnije vrednosti iskorišćenja i osiromašenja rude dobijene su za širine otkopnih blokova između 10 i 20 m i za visinu otkopnog bloka od 80 m [40, 52]. Uzimajući u obzir ove činjenice, kao i to da visina horizonta u Jami Bor iznosi 80 m, za visinu otkopnog bloka u numeričkom modelu je usvojena upravo visina od 80 m kao konstantna i nepromenljiva, dok je širina bloka uzeta kao varijabilna u rasponu od 10 do 20 m. S obzirom da je u ovom slučaju akcenat na analizi stabilnosti dna bloka, konstrukcija otkopnog bloka je svedena upravo na konstrukciju dna otkopnog bloka. U prethodnim poglavljima je već navedeno da pri otkopavanju siromašnijih ležišta primat preuzimaju metode sa zarušavanjem rude i pratećih stena zbog, pre svega, niskih troškova dobijanja rude. Iz tog razloga, a i zbog toga što su za buduću eksploataciju uglavnom istraživane i planirane neke od metoda iz ove grupe, i u slučaju modela za analizu biće usvojeno blokovsko otkopavanje sa zarušavanjem rude i pratećih stena u opštem obliku.

Što se tiče same konstrukcije dna bloka, model će biti kreiran za tranšejno podsecanje s obzirom na to da je tranšeja jednostavnija za izradu od ispusnih zvona i da je kod istraživanih metoda dominantnu ulogu imala upravo ovakva konstrukcija. Ugao nagiba stranica tranšeje takođe predstavlja varijabilni deo modela usvojen u opsegu od  $50^{\circ}$ – $60^{\circ}$ , zbog efikasnijeg klizanje rude, što u kombinaciji sa različitom širinom bloka daje različite visine podsecanja. Konstrukcijom dna bloka predviđen je bočni utovar odminirane rude, koji omogućava da se u istovremenom radu nađe veći

broj utovarnih mesta u jednom otkopnom bloku. To se obezbeđuje time što je moguće odminirati veći pojas rude u jednom bloku bez bojazni da će procesom utovara ostati veći deo odminirane mase zarobljen jalovinom tj. zauvek izgubljen, što je slučaj kod čeonog utovara sa povećanom moćnošću pojasa odminirane rude [158]. Takođe, u odnosu na čeonog utovar, bočni utovar je povoljniji jer se bočne utovarne komore nalaze u grebenu između dve susedne tranšeje ili u stubu između dva bloka. Sa aspekta ventilacije bočni utovar ima prednost nad čeonim načinom utovara jer obezbeđuje protočnu vetrenu struju u utovarnom hodniku što je veoma značajno sa aspekta bezbednosti i radnih uslova. Prilikom kreiranja modela rastojanje između bočnih utovarnih komora predstavlja varijablu u rasponu, koji je na osnovu prethodnih istraživanja metoda, usvojen u granicama 10 – 20 m. Takođe, razmatrene su i varijante sa jednostranim i dvostranim utovarom rude i različitim međusobnim položajem utovarnih komora, kao i varijanta sa utovarnim nivoom lociranim ispod nivoa podsecanja.



*Slika 6-2 Konstrukcija dna otkopnog bloka*

- a) Jednostrani bočni utovar; b) Dvostrani bočni utovar; c) Dvostrani bočni utovar sa utovarnim komorama u šah rasporedu; d) Jednostrani bočni utovar sa “spuštenim” utovarnim nivoom*

## **6.2. Definisane poremećene zone stenske mase**

Analiza stabilnosti dna otkopnih blokova predstavlja složen inženjerski problem koji zahteva integrirano sagledavanje geometrijskih, geomehaničkih i tehnoloških parametara. Pored geometrijskih karakteristika konstrukcije, dubine eksploatacije, fizičko-mehaničkih parametara rude i pratećih stena, kao i naponsko-deformacionog stanja, poseban značaj imaju sekundarne promene izazvane rudarskim radovima. Na slici 6-3 prikazan je uticaj izvođenja rudarskih radova na stensku masu u Jami Bor.

Naime, proces izrade podzemnih prostorija i seizmički efekti miniranja neminovno dovode do formiranja zona poremećene stenske mase (zone oštećenja) u okolini iskopa. Ove oslabljene zone karakteriše smanjenje čvrstoće i promena deformacionih parametara u odnosu na intaktni masiv, pri čemu njihova širina i stepen oštećenja zavise od primenjene tehnologije izrade prostorija i otkopavanja, kvaliteta miniranja, strukturnih karakteristika stenske mase i uslova radne sredine.



a)

b)

Slika 6-3 Uticaj rudarskih radova na oštećenje stenske mase na K-130 (Jama Bor)






a) Oštećenje zaštitnog stuba u otkopnom hodniku OH 39L; b) Oštećenje krovine i boka otkopnog hodnika OH 36L

U praksi za opisivanje čvrstoće stenske mase dobrog kvaliteta i veoma ispucale stenske mase može da se primeni generalizovani Hoek-Brown-ov kriterijum, koji koristi parametar oštećenja stenske mase (*disturbance factor*) kao korektivni faktor. Međutim, ne postoje jasne smernice za određivanje vrednosti ovog parametra, već se on najčešće određuje na osnovu preporuka datih u tabeli [159].

Širina zone oštećenja stenske mase, kao i karakter promene oštećenja sa udaljavanjem od površine iskopa izučavani su u uslovima miniranja na površinskim kopovima [160-163]. Pored toga bilo je pokušaja da se vrednost faktora D odredi na osnovu prostiranja P-talasa kroz stensku masu [164-166], međutim pouzdana metodologija za određivanje faktora oštećenja i širine zone oštećenja u uslovima podzemne eksploatacije do danas nije ustanovljena. U tabeli 6-1 prikazane su preporuke za određivanje vrednosti faktora D.

Definisanje zone oštećenja unutar softverskog modela nije samo tehničko pitanje, već jedan od načina za dobijanje preciznijih inženjerskih rezultata. Nepravilno modelirana zona oštećenja ili njeno potpuno isključivanje iz modela može dovesti do pogrešnih ili nedovoljno pouzdanih procena stabilnosti. Zbog toga je u ovom slučaju, za potrebe kreiranja modela, umesto oslanjanja na teorijske pretpostavke, zona oštećenja definisana na osnovu direktnih in-situ merenja. Implementacijom ovako određene zone u numerički model analiza stabilnosti dobija na pouzdanosti i preciznosti.

Tabela 6-1 Preporuke za određivanje vrednosti faktora poremećenosti stenske mase D

Izgled stenske mase	Opis stenske mase	Vrednost parametra D
	Miniranje visokog kvaliteta ili mehanizovano otkopavanje i izrada prostorija	D=0
	Mehaničko ili ručno otkopavanje u slabijim stenama uz minimalno oštećenja stenske mase  Istiskivanje podine usled dejstva pritisaka	D=0  D=0,5
	Miniranje slabog kvaliteta u čvrstoj stenskoj masi sa oštećenjima koja se prostiru 2-3 m u okolni stenski masiv	D=1 na konturi iskopa sa linearnim opadanjem do D=0 na 2 m u dubinu masiva
	Miniranje manjih razmera na kosinama sa umerenim oštećenjem stenske mase kada uz primenu kontrolisanog miniranja. Nekontrolisano proizvodno miniranje može dovesti do značajnog oštećenja površine stene.	D=0,5 za kontrolisano ili presplit miniranje  D=1 za proizvodno miniranje
	U nekim slabim stenama otkopavanje se može vršiti riperima i dozerima. Oštećenje na kosinama se javlja kao posledica rasterećenja napona.  Velike kosine na poršinskim kopovima trpe oštećenja usled masovnog proizvodnog miniranja i relaksacije napona usled uklanjanja raskrivke.	D=0,7 mehaničko otkopavanje usled relaksacije napona  D=1 za proizvodno miniranje

Za potrebe određivanja poremećene zone uzeto je deset uzoraka stenske mase iz rudnog tela Borska Reka. Uzorci su dobijeni bušenjem sa jezgrovanjem u bok prostorija i to sedam u otkopnim hodnicima na K-130 m i tri u otkopnim hodnicima na K-150 m u prvom eksploatacionom zahvatu od XV do XVII horizonta. Bušotine prečnika 100 mm bušene su pomoću bušilice Cardi T1 150-EL koja je prikazana na slici 6-4.



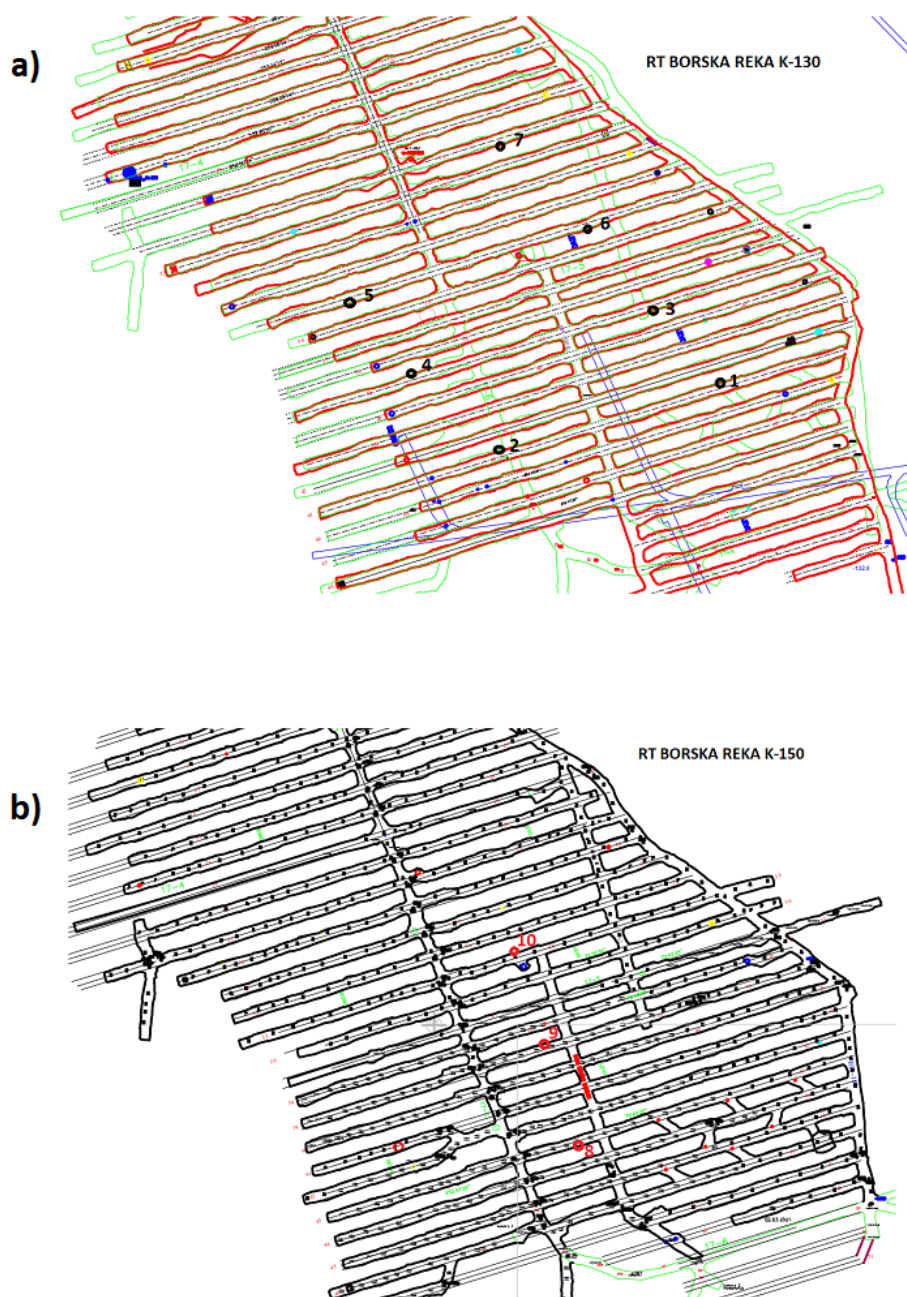
Slika 6-4 Bušilica Cardit T 150-EL

Za otkopavanje u rudnom telu Borska Reka u prvom eksploatacionom zahvatu usvojena je *Komorno-stubna metoda sa blokovskim otkopavanjem i zasipavanjem otkopa pasta zasipom*. Otkopna priprema se sastoji iz izrade otkopnih hodnika i to jednog na dnu i jednog na vrhu komore. Otkopni hodnici su poprečno orijentisani u odnosu na pravac pružanja rudnog tela. Izrađeni su po osi komora iz etažnog hodnika izrađenog po sredini rudnog tela u pravcu pružanja. Otkopavanje je vršeno u komorama širine 12 m i visine 20 m, što odgovara visini jednog otkopnog pojasa. Otkopni hodnik na gornjim nivou ima funkciju hodnika bušenja, dok je utovar vršen iz otkopnog hodnika u dnu otkopne komore. Eksploatacija je vršena otkopavanjem svake druge komore između kojih je ostavljan zaštitni stub koji je trebalo da se otkopava u drugoj fazi nakon zapunjavanja komora otkopanih u prvoj fazi. S obzirom na to da zapunjavanje otkopnih komora nije vršeno i samim tim zaštitni stubovi nisu otkopani, otkopni hodnici u stubovima izabrani su za uzimanje uzoraka kao pogodni jer su bili izloženi uticaju izvođenja rudarskih radova u njihovoj neposrednoj blizini (miniranje u susednim komorama, bušenje, utovar i transport). Na koti K-130 m uzorci su uzeti iz otkopnih hodnika OH 43 levo, OH 43 desno, OH 39 levo, OH 39 desno, OH 35 levo, OH 35 desno i OH 31 levo (slika 6-6 a). Na koti K-150 m uzorci su uzeti iz otkopnih hodnika OH 43 levo, OH 39 levo i OH 35 levo (slika 6-6 b).

Uzorci stenske mase (slika 6-5), uzeti iz bokova utovarnih hodnika bušotinama dužine do 1 m podvrgnuti su laboratorijskim ispitivanjima u cilju određivanja parametara čvrstoće i deformabilnosti degradirane stenske mase sa ciljem da se dobijeni rezultati iskoriste kao ulazne veličine u trodimenzionalnom numeričkom modelu.



Slika 6-5 Uzorci stenske mase iz rudnog tela Borska Reka



Slika 6-6 Lokacija bušotina za uzimanje uzoraka u rudnom telu Borska Reka

Za određivanje specifične mase korišćena je metoda koja je poznata kao piknometarska metoda, dok je zapreminska masa određena potapanjem uzorka u vodu i merenjem istisnute tečnosti uz prethodno parafinisanje i merenje mase uzorka. Čvrstoća na pritisak, kao i parametri deformabilnosti - Jungov modul elastičnosti i Poasonov koeficijent, dobijeni su iz opita jednoaksijalne kompresije na probnim telima u obliku valjka. Zatezna čvrstoća je dobijena iz Brazilskog testa, takođe na probnim telima u obliku valjka. Parametri otpora smicanju - kohezija i ugao unutrašnjeg trenja određeni su na osnovu rezultata dobijenih triaksijalnim testom, dok su brzine prostiranja talasa dobijene ultrazvučnom metodom.

Osim geomehaničkih parametara stenske mase u oslabljenoj zoni, potrebno je definisati i njenu širinu. Na osnovu prethodno rađenih studija vezanih za karakteristike radne sredine u rudnom telu Borska Reka pretpostavljeno je da će ponašanje stenskog masiva biti elasto-plastično [155].

Elasto-plastično ponašanje stenskog masiva oko podzemne prostorije može se definisati postupcima po Kastneru i po Labuš-Rupenajtu. Ovaj model se bazira na pretpostavci da se oko prostorija formiraju dve zone: zona plastičnih deformacija neposredno oko konture jamske prostorije i zona elastičnih deformacija gde se deformacije odvijaju u skladu sa Hukovim zakonom [167]. Prema modelu Labuš-Rupenajta granica zone uticaja u dubinu stenskog masiva može se odrediti preko formule [167]:

$$r_{pe} = a \cdot \left( \frac{\sigma_z + c \cdot ctg\varphi}{q + c \cdot ctg\varphi} \cdot (1 - \sin\varphi) \right)^{\frac{1}{\psi}} \quad (17)$$

gde su:

$a = \frac{4U}{2F} = 1,85$  m – poluprečnik prostorije (formula je data za prostoriju kružnog preseka pa je ovde za slučaj niskozasvođenog profila proračun rađen na osnovu ekvivalentnog prečnika za prostoriju poprečnog preseka 16,68 m<sup>2</sup>)

$\sigma_z = 17$  MPa – glavni primarni napon

$c = 5,167$  MPa – kohezija

$\varphi = 34^\circ$  – ugao unutrašnjeg trenja

$q = 8,18$  MPa – pritisak koji je nastao kao posledica pomeranja

$\psi = 2,55$  – koeficijent koji se računa po obrascu  $\psi = \frac{2 \cdot \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$ .

Pritisak koji je nastao kao posledica pomeranja računa se po obrascu:

$$q = (\sigma_z + c \cdot ctg\varphi)(1 - \sin\varphi) \left( \frac{a}{r_p} \right)^\psi - c \cdot ctg\varphi \quad (18)$$

gde je:

$r_p = 1,6$  m – poluprečnik plastične zone.

Poluprečnik plastične zone računa se po obrascu:

$$r_p = a \cdot \left( \frac{2}{\beta + 1} \cdot \frac{\sigma_0 \cdot (\beta - 1) + R_p}{R_p} \right)^{\frac{1}{\beta - 1}} \quad (19)$$

gde je:

$\beta = 3,55$  – koeficijent koji se računa po obrascu  $\beta = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}$

$R_p = 81,279$  MPa – čvrstoća masiva na pritisak.

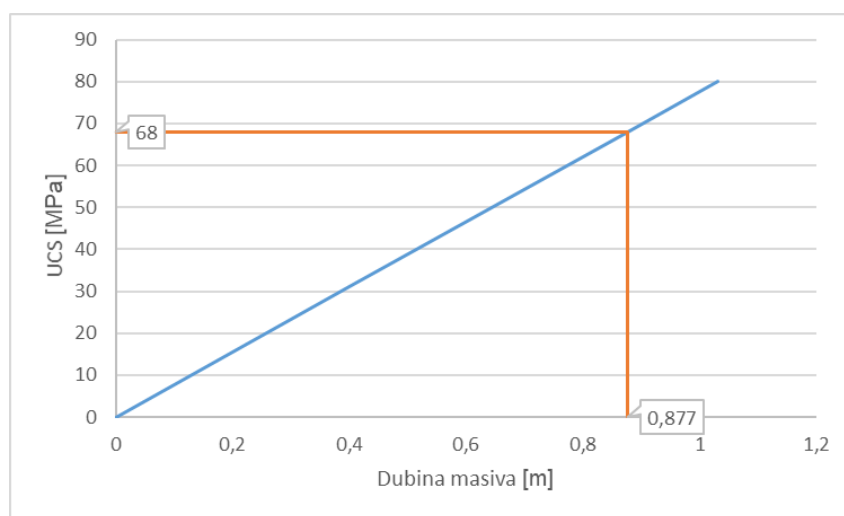
Na osnovu formule za elasto-plastični model, za deo plastičnih deformacija dobija se poluprečnik uticaja od 1,6 m, dok se za deo vezan za elastične deformacije ne može odrediti jasna granica uticaja zbog nemogućnosti određivanja veličine dozvoljenog odstupanja od primarnog napona. Poluprečnik zone elastičnih deformacija se računa preko formule:

$$r_e = \frac{a}{\sqrt{a}}, m \quad (20)$$

gde je:

$d$  – dozvoljeno odstupanje.

Zbog nemogućnosti da se širina zone odredi empirijskim formulama, za potrebe kreiranja numeričkog modela za analizu stabilnosti, širina zone oštećenja određena je na osnovu dobijenih fizičko-mehaničkih karakteristika masiva oko prostorije i dubina bušotina iz kojih su vađena jezgra. Širina je određena pomoću grafika gde je na x-osi prikazana dubina masiva sa koje su dobijena jezgra, a na y-osi jednoaksijalna čvrstoća na pritisak tih uzoraka. Uz pretpostavku da je promena kvaliteta stenske mase od konture iskopa, kroz oštećenu zonu, do neporemećenog masiva linearna [166], sa grafika se za veličinu jednoaksijalne čvrstoće na pritisak neporemećene stene očitava dubina masiva koja zapravo predstavlja širinu zone oštećenja (slika 6-7). Na konturi prostorije je uzeto da su vrednosti čvrstoće i dubine jednake nuli, pri čemu se po utvrđenoj linearnoj zavisnosti povećavaju do vrednosti jednoaksijalne čvrstoće na pritisak neporemećene stene dobijene na osnovu prethodnih istraživanja [155] na odgovarajućoj lokaciji. Na osnovu prikazane grafičke zavisnosti usvojena je širina oštećene zone za numeričko modeliranje 0,8 m.



Slika 6-7 Grafik za određivanje širine oštećene zone

Tabela 6-2 Geomehanički parametri uzoraka stenske mase iz rudnog tela Borska Reka

Redni broj	Oznaka uzorka	Zapreminska masa $\gamma_z$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Specifična masa $\gamma_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Jednoosna čvrstoća na pritisak $\sigma_p$ [MPa]	Jednoosna zatezna čvrstoća $\sigma_z$ [MPa]	Parametri otpora smicanju		Brzina prostiranja longitudinalnih talasa $v$ [m/s]	Parametri deformabilnosti	
						kohezija $c$ [MPa]	ugao un. trenja $\phi$ [°]		modul elastičnosti $E_{(50\%)}$	Poasonov koeficijent $\nu_{(50\%)}$
1.	K-130 OH 43 LEVO	2.903	2.910	15.95	2.87	3.38	44	4867	5468	0.21
2.	K-130 OH43 DESNO	2.947	2.954	34.08	3.11	5.20	57	4949	13034	0.19
3.	K-130 OH 39 LEVO	2.867	2.875	25.59	3.87	5.01	47	4375	9389	0.21
4.	K-130 OH 39 DESNO	2.932	2.941	35.00	3.46	5.45	55	5434	13734	0.19
5.	K-130 OH 35 DESNO	2.845	2.853	20.45	4.00	4.54	43	4690	6952	0.22
6.	K-130 OH 35 LEVO	2.826	2.836	19.93	2.73	3.73	49	5732	7030	0.21
7.	K-130 OH 31 LEVO	2.915	2.921	14.40	2.78	3.23	43	5245	5015	0.23
8.	K-150 OH 43 LEVO	2.999	3.021	27.78	4.22	5.45	48	4877	10694	0.20
9.	K-150 OH 39 LEVO	2.850	2.854	56.97	7.58	10.36	50	5544	25962	0.18
10.	K-150 OH 35 LEVO	2.768	2.777	14.02	2.16	2.70	47	4486	4914	0.23

### 6.3. Merenje naponskog stanja za potrebe numeričkog modeliranja

Eksploatacija na velikim dubinama zahteva fundamentalno poznavanje ponašanja stenske mase, kao i njenih fizičko-mehaničkih, tehnoloških i strukturnih karakteristika [168]. Da bi numeričkim modeliranjem ili empirijskim procedurama na bazi neke od klasifikacija došli do podataka o naponsko-deformacionim stanjima otkopne konstrukcije neophodno je imati podatke o primarnom, početnom naponskom stanju neporemećenog masiva. Da bi se dobili što precizniji ulazni parametri pri modeliranju stenskog masiva, odnosno kako bi rizik od pojavljivanja grešaka bio sveden na minimum, najpovoljnija varijanta za određivanje vrednosti glavnih napona jeste in-situ merenje naponskog stanja.

Najpre je za merenje naponskog stanja u rudnom telu Borska Reka primenjen merni uređaj MS-IRM 2 Instituta za rudarstvo i metalurgiju Bor, međutim ova metoda koja se pokazala uspešnom u ležištima uglja, u ovom slučaju nije dala rezultata. Zbog toga je merenje napona izvršeno metodom rejezgrovanja CSIRO HID ćelijom kao jednom od najpreciznijih i izuzetno pouzdanih metoda.

Osnovni princip kod ovih metoda je merenje deformacija bušotina izazvanih relaksacijom napona, pri čemu se meri stvarna deformacija stene nakon što se jezgro odvoji od masiva, što je fizički vrlo direktan dokaz naponskog stanja. Metoda je najpouzdanija u čvrstim, elastičnim i homogenim stenama. Ako je stena previše ispucala ili se ponaša plastično, rezultati mogu biti nepouzdati jer se pretpostavka o linearnoj elastičnosti, na kojoj se bazira proračun, narušava.

CSIRO HID ćelija (slika 6-8) je instrument namenjen za praćenje naprezanja, koji uključuje visokoprecizni merač deformacija i ugrađeni mikrokontroler koji može kontinuirano da prati deformacije i beleži vrednosti putem serijskog porta, čime se značajno pojednostavljuje povezivanje. Ovaj merni uređaj se sastoji od tri grupe mernih jedinica (*strain flowers*), koje čine 12 merača deformacija (mernih traka) ugrađenih u cilindar. Oni su inkapsulirani u zid šupljeg cilindra poznatog modula elastičnosti, iz kojeg izlazi dvanaestožilni kabl koji se povezuje sa akvizicionom jedinicom, koja je dalje povezana sa računarom preko koga se očitavaju vrednosti deformacija. Cilindar sa mernim uređajem u sebi se učvršćuje u bušotinu pomoću epoksi smola, što omogućava praćenje reakcije stene tokom procesa rasterećenja napona u bušotini. Takođe, merač se može ostaviti u bušotini na duži vremenski period radi praćenja promene naprezanja tokom vremena.



Slika 6-8 CSIRO HID ćelija

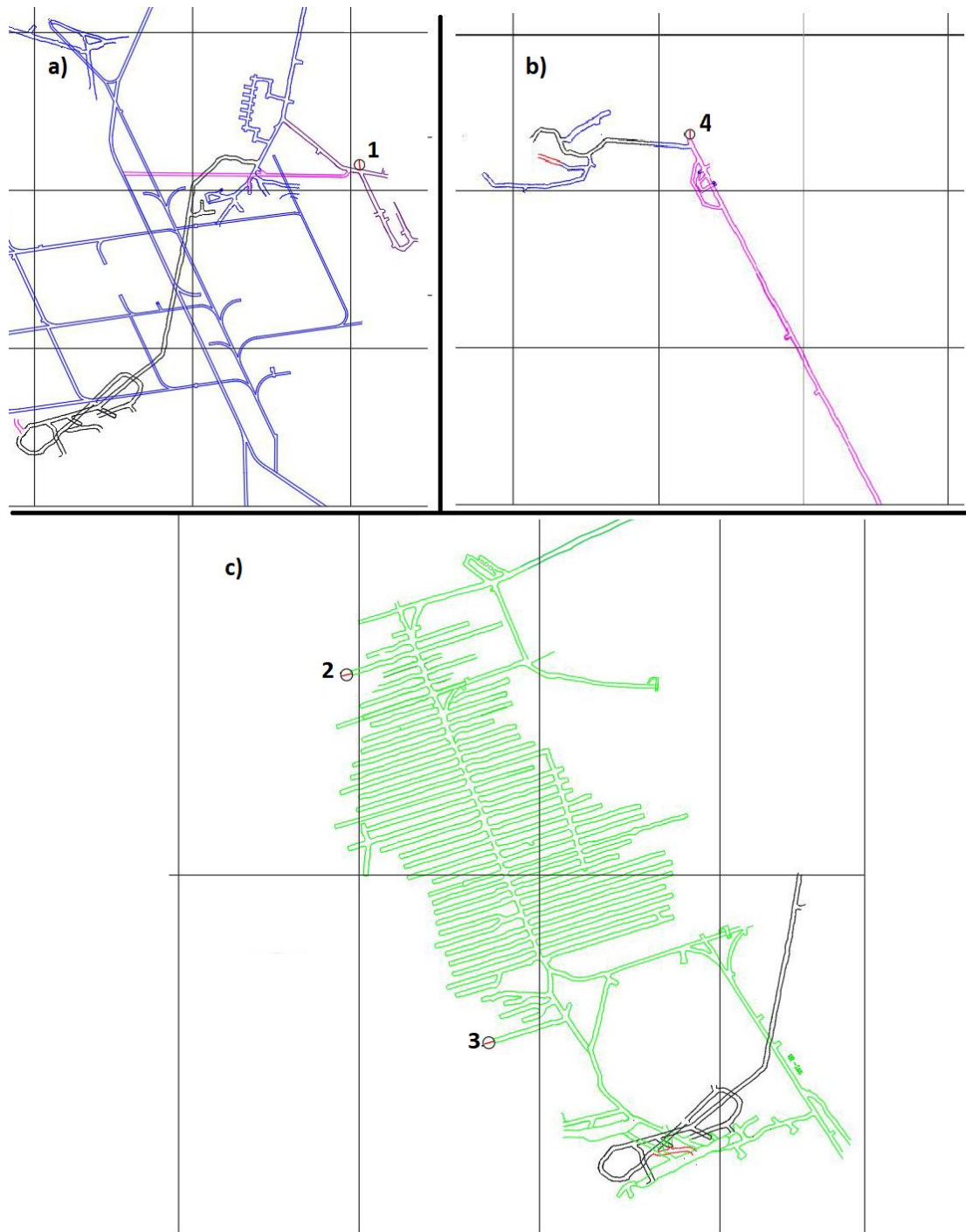
Pored kućišta cilindra i akvizicione jedinice oprema za merenje napona (slika 6-9) se sastoji još od vodećeg pozicionera, učvršćivača, montažne šipke i balansera i živinog pozicionera. Njihova funkcija jeste da omoguće precizno postavljanje mernog uređaja na unapred određenu poziciju i učvrste ga u bušotinu radi rasterećenja napona. Pored navedene opreme tu su još i Hukova ćelija i ručna hidraulična pumpa koje se koriste za određivanje modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta.



Slika 6-9 Oprema za merenje naponskog stanja a) Montažna šipka i balanser; b) Živin pozicioner; c) Hukova ćelija; d) Ručna hidraulična pumpa

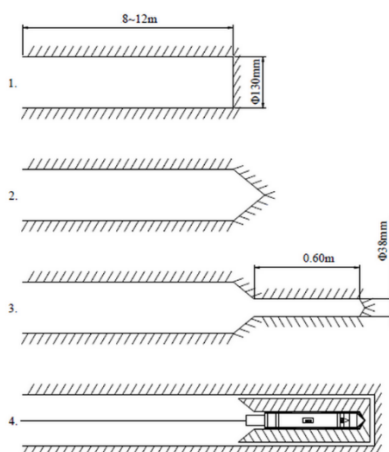
Proces merenja napona sproveden je na četiri merna mesta u rudnom telu Borska Reka (slika 6-10). Merne stanice su locirane na koti -60 m (istražni hodnik), na XVII horizontu na koti -150 m (otkopni hodnici OH16 i OH51), kao i na XIX horizontu na koti -235 m (glavni transportni hodnik). Merna mesta u otkopnim hodnicima na koti k-150 m se zapravo nalaze u okviru konstrukcije dna otkopnih blokova.

Proces merenja se sastoji od nekoliko faza od kojih je prva bušenje glavne bušotine prečnika 130 mm, dubine 8–12 m. Dno bušotine se obrađuje brušenjem radi postavljanja opreme za pozicioniranje i precizno postavljanje mernog uređaja. Na pripremljenom dnu glavne bušotine buši se pilot bušotina manjeg prečnika (38 mm), dubine 600 mm, u koju se instalira merna ćelija (*CSIRO HID Cell*) povezana sa akvizicionim sistemom izvan bušotine. Proces relaksacije napona ostvaruje se rejezgrovanjem iz bušotine većeg prečnika, čime se zahvata manje bušotinsko jezgro sa mernim uređajem u sebi. Tokom bušenja, provodnici prolaze kroz unutrašnjost bušačkog pribora do instrumenta, čime se omogućava kontinuirani monitoring promena u polju napona u realnom vremenu. Napredovanjem jezgrene cevi, jezgro se postepeno izoluje od spoljašnjeg polja napona, što rezultuje elastičnim povratom materijala i detekcijom odgovarajućih promena na mernom instrumentu. Proces se smatra završenim kada očitavanja dostignu stabilnu vrednost, nakon čega se pristupa vađenju jezgra. Diferencijalna vrednost očitavanja pre i nakon procesa rasterećenja predstavlja bazu za dalju kalkulaciju. Dobijeno jezgro sa mernim uređajem (mernom ćelijom) se koristi za određivanje deformabilnosti stene na osnovu čega se određuju vrednosti glavnih napona. Na slici 6-11 prikazan je šematski prikaz faza bušenja i instalacije opreme.



Slika 6-10 Lokacije merenja napona a) Istražni hodnik K-60 m; b) Glavni transportni hodnik K-235 m; c) Otkopni hodnici K-150 m

Rejezgrovanjem se vrši relaksacija napona, a nakon rasterećenja napona i vađenja jezgra (zajedno sa mernim uređajem), jezgro se nosi u laboratoriju gde su triaksijalnim testom određene vrednosti modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta. Metoda rejezgrovanja prikazana je na slici 6-12.



Slika 6-11 Faza bušenja i instalacije opreme

Na osnovu prikupljenih eksperimentalnih podataka, primenom specijalizovanog softverskog paketa, izvršen je proračun intenziteta, pravaca i padnih uglova vektora maksimalnih, srednjih i minimalnih glavnih napona. Vrednosti napona date su u tabeli 6-3.

Tabela 6-3 Izmerene vrednosti glavnih napona

Merno mesto	Dubina [m]	Lokacija	Glavni naponi [MPa]		
			$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
1	510	Istražni hodnik -60 m	14,6	15,6	11,8
2	600	Otkopni hodnik OH16 -150 m	16,8	18,1	13,9
3	600	Otkopni hodnik OH51 -150 m	15,7	17,0	12,8
4	685	Glavni transportni hodnik -235 m	17,6	18,8	14,3

### 6.3.1. Analiza rezultata merenja naponskog stanja

Analizom rezultata merenja naponskog stanja u četiri merne tačke u rudnom telu Borska Reka dolazi se do zaključka da su dve od tri komponente glavnog napona približno horizontalne, dok je jedna približno vertikalna. Horizontalne komponente napona u svim mernim tačkama zaklapaju ugao sa horizontalnom ravni manji od  $20^\circ$ , dok je ugao vertikalnog napona sa vertikalnom ravni za sva 4 slučaja manji od  $15^\circ$ .

Generalno gledano, ispitivanjem je ustanovljeno da je glavni horizontalni napon veći od glavnog vertikalnog napona u svim tačkama.

$$\sigma_y = 1,23 \cdot \sigma_x \quad (18)$$

$$\sigma_y = 1,20 \cdot \sigma_x \quad (19)$$

$$\sigma_y = 1,22 \cdot \sigma_x \quad (20)$$

$$\sigma_y = 1,23 \cdot \sigma_x \quad (21)$$

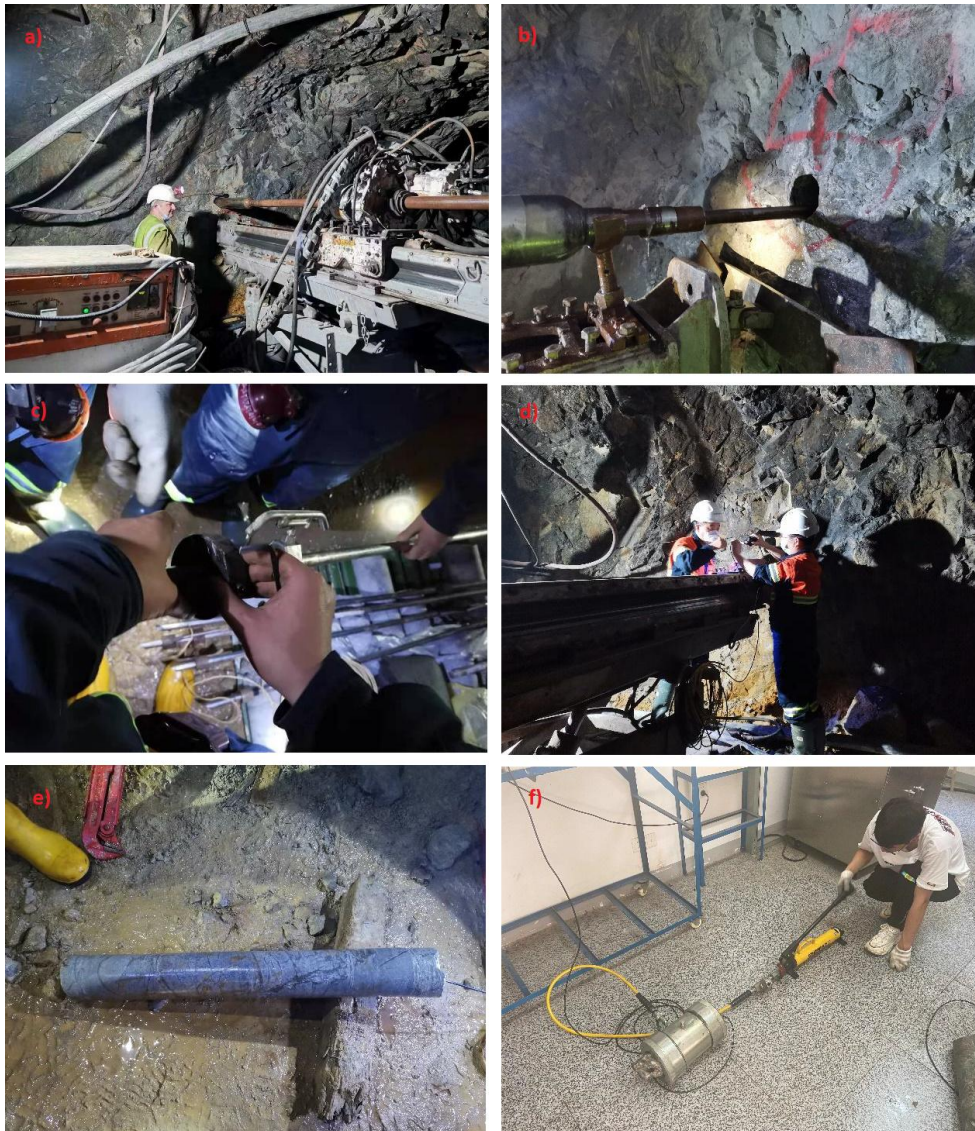
Izmereni vertikalni naponi u osnovi su jednaki težini višeležećih stenskih masa, sa malim razlikama između izmerenih i vrednosti dobijenih računskim putem (kao težina stuba višeležeće

mase). Takođe je zabeleženo da se sa povećanjem dubine povećavaju i vrednosti glavnih napona i to naprezanje raste približno linearno u funkciji dubine (slika 6-13). Granični uslovi glavnih napona su:

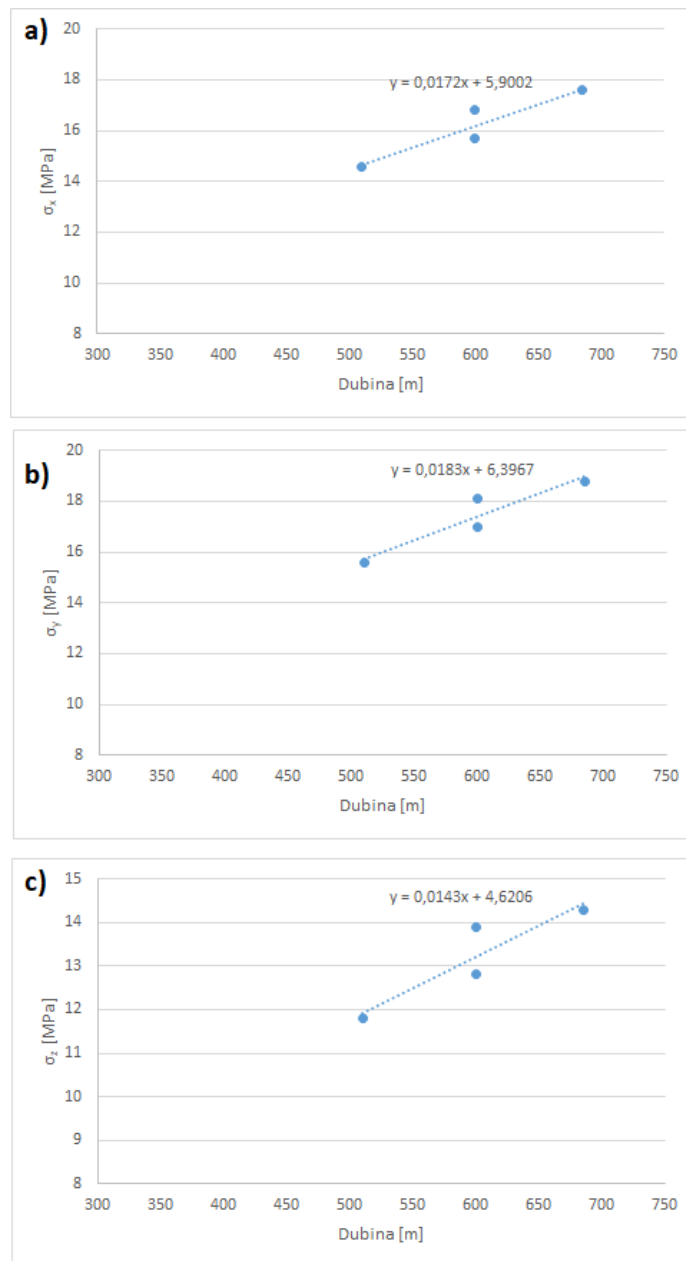
$$\sigma_x = 0,0172h + 5,9002 \quad (22)$$

$$\sigma_y = 0,0183h + 6,3967 \quad (23)$$

$$\sigma_x = 0,0143h + 4,6206 \quad (24)$$



*Slika 6-12 Proces merenja napona a) Bušenje vodeće (glavne) bušotine; b) Bušenje pilot bušotine; c) Postavljanje mernog uređaja u cilindar; d) Instalacija uređaja u bušotinu; e) Jezgro sa mernim uređajem; f) Određivanje modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta*



Slika 6-13 Promena glavnih napona u funkciji dubine a) Vertikalna komponenta napona; b) Horizontalna komponenta napona  $\sigma_y$ ; c) Horizontalan komponenta napona  $\sigma_z$

S obzirom na to da je vertikalna komponenta napona približno jednaka težini višeležećih slojeva stenske mase i da je horizontalni napon neznatno veći od vertikalnog, zbog univerzalnosti modela usvojen je glavni vertikalni napon kao proizvod visine stuba koja odgovara dubini eksploatacije i zapreminske težine stena koje se nalaze iznad ležišta. Iz istog razloga za koeficijent bočnog napona usvojena je vrednost 1.

$$\sigma_v = \gamma \cdot H = 27 \cdot 600 = 16200 \text{ kN/m}^2 \quad (25)$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v = 1 \cdot 16200 = 16200 \text{ kN/m}^2 \quad (26)$$

## 6.4. Određivanje kvaliteta stenske mase

Specifičnost rudarskog inženjerstva, između ostalog, ogleda se u tome što se rudarski objekti nalaze unutar geološkog tela, odnosno stenske mase složenih strukturnih karakteristika, što ima direktan uticaj na uslove njihove stabilnosti. Izrada rudarskih objekata odvija se u dinamičkom okruženju praćenom promenama naponsko-deformacionog stanja u procesu razvoja iskopa.

Razmatranje karakteristika stenske mase iz perspektive njihove strukture može odraziti samu suštinu njenih svojstava, što predstavlja efikasan metod za procenu stabilnosti u rudarskom inženjerstvu.

Stenska masa predstavlja radnu sredinu u kojoj se izvode rudarski radovi, pa je stoga određivanje kategorije kvaliteta stenske mase jedan od ključnih faktora u evaluaciji njene ukupne stabilnosti. Pošto klasifikacija stenske mase može u potpunosti odraziti njene geološke karakteristike, ona se efikasno koristi za procenu stabilnosti i ima široku primenu u inženjerskoj praksi. Međutim, metode klasifikacije stenske mase često imaju karakteristike kvalitativne ili kvazi-kvantitativne procene. Njihova primena često nosi određenu dozu neodređenosti i neizvesnosti. Među metodama koje se koriste za klasifikaciju stenske mase pojedine su jednostavne, brze, ekonomične i pod malim uticajem subjektivnih (ljudskih) faktora, ali nedovoljno uzimaju u obzir činioce koji utiču na kvalitet stenske mase, pa stoga imaju usku primenljivost i ograničenja. RMR klasifikacija po *Bieniawskom* i Q klasifikacija *Norveškog geotehničkog instituta* razmatraju brojne i sveobuhvatne faktore, te su ove metode, generalno govoreći, najprikladnije za klasifikaciju stenske mase.

Kvantitativna procena kvaliteta stenske mase za potrebe numeričkog modeliranja u ovoj disertaciji izvršena je pomoću geomehaničke klasifikacije RMR (*Rock Mass Rating System*). U današnje vreme se koriste dve varijante ove klasifikacije poznate kao RMR<sub>89</sub> (modifikovana 1989. godine) i RMR<sub>14</sub> (modifikovana 2014. godine). Klasifikacija RMR<sub>89</sub> se bazira na pokazateljima kvaliteta stenske sredine zasnovanih na pet osnovnih i jednom korektivnom faktoru:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| • Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak      | osnovni faktor    |
| • RQD indeks (Rock Quality Designation)    | osnovni faktor    |
| • Razmak između pukotina (diskontinuiteta) | osnovni faktor    |
| • Stanje pukotina                          | osnovni faktor    |
| • Stanje podzemne vode                     | osnovni faktor    |
| • Orijentacija pukotina                    | korektivni faktor |

Kod klasifikacije RMR<sub>14</sub> postoji pet osnovnih i tri korektivna faktora. Drugi i treći faktor kod stare klasifikacije postaju drugi faktor kod nove, uvodi se još jedan novi osnovni faktor, dok preostala tri ostaju isti. Kod novije varijante pored postojećeg korektivnog faktora uvode se još dva nova [169]:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| • Jednoaksijalna čvrstoća na pritisak                                    | osnovni faktor    |
| • Gustina pukotina (diskontinuiteta)                                     | osnovni faktor    |
| • Stanje pukotina  | osnovni faktor    |
| • Izmenjivost (alterabilnost) intaktne stene                             | osnovni faktor    |
| • Stanje podzemne vode   | osnovni faktor    |
| • Orijentacija pukotina  | korektivni faktor |
| • Faktor koji zavisi od primenjene metode                                | korektivni faktor |
| • Faktor koji zavisi od naponsko deformacionog stanja na čelu prostorije | korektivni faktor |

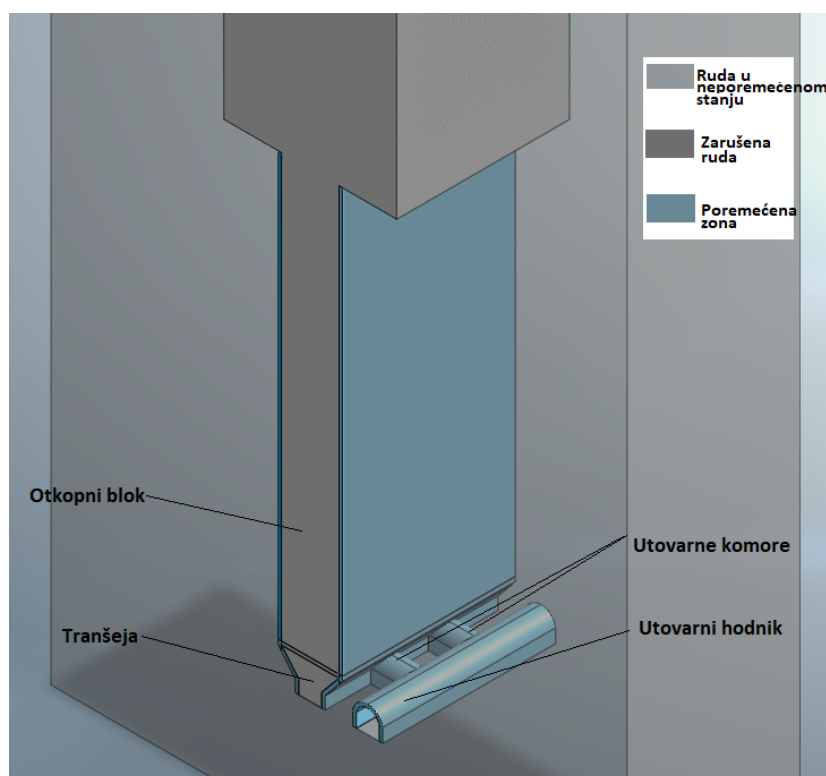
RMR<sub>14</sub> je usavršena verzija RMR<sub>89</sub> koja pruža realističnije procene kvaliteta stenske mase. Ipak, RMR<sub>89</sub> ostaje široko prihvaćen i korišćen standard u praksi zbog svoje jednostavnosti i dugogodišnje primene, pa je iz tog razloga korišćen i za potrebe ove disertacije. Sledeća tabela prikazuje procenjeni kvalitet stenske mase za geotehničke sredine korišćene u modelu.

Tabela 6-4 Procena kvaliteta radne sredine za potrebe modeliranja

A Klasifikacioni parametri i poeni									
Parametar		Vrednost							
1	Čvrstoća na pritisak (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1	
	Broj poena	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)	90-100		75-90	50-75	25-50		<25	
	Broj poena	20		15	10	8		5	
3	Rastojanje pukotina (m)	>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2		<0,06		
	Broj poena	20	15	10	8		5		
4	Stanje pukotina	Veoma hrapave površine, nekontinualne, bez zeva, neraspadnuta stena		Blago hrapave površine, zev manji od 1 mm, blago raspadnuta stena	Blago hrapave površine, zev manji od 1 mm, veoma raspadnuta stena	Glatke površine ili ispuna manja od 5 mm širine ili sa zevom od 1-5 mm, kontinualna		Meka ispuna širine veće od 5 mm ili zev veći od 5 mm, kontinualne	
		Broj poena	30	25	20	10		0	
5	Podzemna voda	Priliv na 10 m prostorije (l/min)	Nikakav	<10	10-25	25-125		>125	
		Pritisak vode u pukotini		<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5		>0,5	
		Opšte stanje	Suvo	Vlažno	Natopljeno	Kaplje		Teče	
	Broj poena	15	10	7	4		0		
B Korektivni faktor za orijentaciju pukotina									
6	Položaj pukotina u odnosu na čelo prostorije i njeno prostiranje	Prostiranje pukotina normalno na jamsku prostoriju, pad pukotina od čela pod uglom:		Pad pukotina od masiva ka čelu, pri uglu:		Prostiranje pukotina paralelno sa jamskom prostorijom, pri uglu pada:		Ugao pada pukotina	
		45°>β≤90°	20°>β≤45°	45°>β≤90°	20°>β≤45°	45°>β≤90°	20°>β≤45°	0 – 20°	
	Broj poena	0	-2	-5	-10	-12	-5	-10	
C Klasa stenskog masiva									
Broj poena		81-100		61-80		41-60		21-40	0-20
Klasa		I		II		III		IV	V
Opis stene		Veoma dobra stena		Dobra stena		Povoljna stena		Slaba stena	Veoma slaba stena
Ruda u neporemećenom stanju						Σ 70 poena			
Ruda u poremećenom stanju (zona oštećenja)						Σ 55 poena			
Višeležeće stenske mase						Σ 65 poena			

## 6.5. Kreiranje numeričkog modela za geotehničku analizu stabilnosti

Za istraživanje uslova stabilnosti otkopne konstrukcije, kreiran je model prikazan na slici 6-14. Kao što je već napomenuto, za formiranje modela je usvojena konstantna visina od 80 m, sa konstrukcijom dna bloka sa tranšejnim podsecanjem i bočnim utovarom rude. Dimenzije prostorija u dnu bloka su takođe konstantne, širine 4 m i veličine poprečnog preseka  $16,68 \text{ m}^2$ , što odgovara dimenzijama prostorija pripreme u rudnom telu Borska Reka. Prilikom istraživanja u modelu su kao promenjivi parametri uzeti rastojanje između utovarnih komora, njihov raspored, kao i visina i širina podsecanja.



Slika 6-14 Model za ispitivanje geomehaničkih uslova stabilnosti

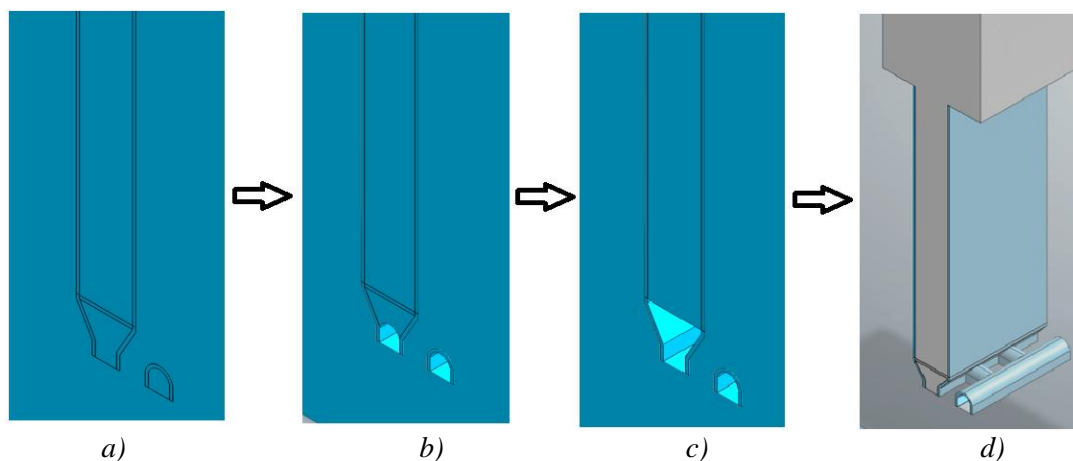
Nakon kreiranja blok-modela, unose se podaci neophodni za analizu. U modelu su prisutne četiri kvazi-homogene zone: ruda u neporemećenom stanju, zarušena ruda, poremećena zona (zona oštećenja) i višeležeća stenska masa, koje su opisane parametrima prikazanim u tabeli 6-5.

Tabela 6-5 Ulazni parametri numeričkog modeliranja

	Modul elastičnosti (MPa)	Poasonov koeficijent	Zap. težina ( $\text{kN/m}^3$ )	Kohezija ( $\text{kN/m}^2$ )	Ugao un. trenja ( $^\circ$ )	Čvrstoća na pritisak (MPa)	Zatezna čvrstoća (MPa)
Ruda	40423	0,205	29	5167	34	81,279	0,608
Poremećena zona	10219	0,207	29	1226	28	26,417	0,077
Višeležeća stenska masa	26729	0,23	27	4912	34	78,200	0,621
Zarušena ruda	10000	0,25	22	100	30	/	0

Stenska masa kroz koju se izvode rudarski radovi nikada nije savršeno homogena, ali se za potrebe numeričkog modeliranja može tako tretirati unutar određenih granica, pa se stoga koristi termin kvazi-homogena. S obzirom na to da se analiza vrši po fazama izvođenja radova (slika 6-15), u početnoj fazi model je sačinjen od rude u neporemećenom stanju i vešeležeće stenske mase. Nakon

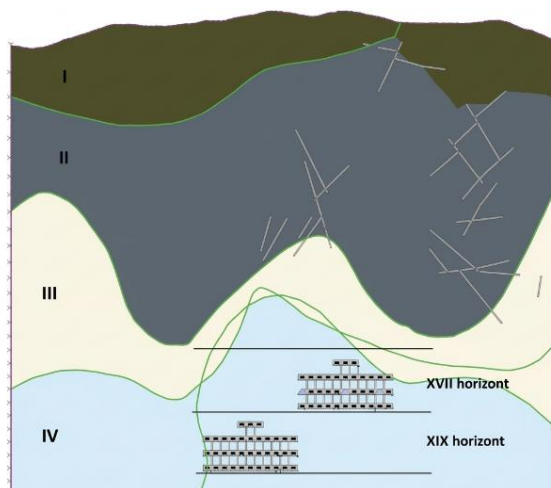
početka izrade prostorija u dnu bloka u model se oko iskopa uvodi poremećena zona, nastala kao posledica izvođenja rudarskih radova. Zona oštećenja se ubacuje oko svih iskopa u kasnijim fazama razvoja modela i prati napredak izvođenja rudarskih radova. U narednoj fazi se vrši podsecanje otkopnog bloka i formiranje tranšeje, da bi se nakon toga u model uključila i obrušena ruda, što predstavlja završnu fazu modeliranja.



Slika 6-15 Faze razvoja modela a) Početno stanje; b) Izrada hodnika podsecanja i utovarnih hodnika; c) Formiranje tranšeje; d) Završno stanje (sa zonama oštećenja i zarušenom rudom)

Parametri rude u neporemećenom stanju uzeti su iz projektne dokumentacije otkopavanja rudnog tela Borska Reka [155], dok su zbog sličnosti geotehničkih sredina, parametri obrušene rude preuzeti iz podataka vezanih za eksploataciju rudnog tela Tilva Roš, gde se otkopavanje vršilo Švedskom metodom podetažnog zarušavanja [170]. Parametri za poremećenu zonu (fizičko-mehaničke karakteristike i širina zone) dobijeni su na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja uzoraka uzetih iz utovarnih hodnika u dnu otkopnih komora u rudnom telu Borska Reka.

Povlata modela predstavljena je geotehničkom sredinom koju čine borski peliti (I), andeziti (II) i kaolinisani andeziti (III), prikazanom na slici 6-16. Ona nije detaljno prikazana u ovom modelu, jer je naglasak na stabilnosti dna otkopnog bloka, ali je uključena u numeričku analizu stabilnosti. Radi pojednostavljenja modela, ove tri različite sredine (u četvrtoj sa slike 6-16 - silifikovanom andezitu, formirano je rudno telo) predstavljene su kao jedna kvazi-homogena zona (višeležeća stenska masa) u modelu, jer sve imaju slična fizičko-mehanička svojstva, osim kaolinisanih andezita koji imaju slabija svojstva, ali su oni deo zarušenog materijala koji je u modelu predstavljen kao obrušena ruda.



Slika 6-16 Poprečni presek geotehničkih sredina u okolini rudnog tela Borska Reka

Lokalni rasedi i drugi diskontinuiteti nisu direktno uzeti u obzir u modelu, što uz homogenost i izotropnost predstavlja glavno ograničenje modela, ali se može reći da su ova ograničenja delimično uvažena, jer su ulazni parametri za analizu uglavnom preuzeti iz in-situ merenja i laboratorijskih uzoraka samog rudnog tela.

Za analizu je korišćen Generalizovan Hoek-Brown-ov kriterijum loma u slučaju rude, poremećene zone, i vešeležećih stena, dok je Mohr-Coulomb-ov model (bez zatezne čvrstoće) korišćen za obrušenu rudu. Obrušena ruda se ponaša više kao zrnast materijal (tlo) nego kao čvrsta stena, pa je klasični Mohr-Coulomb model sa nultom ili minimalnom zateznom čvrstoćom (*non-tension*) mnogo stabilniji i realniji za softversku analizu. Primenjeni softver koristi modul elastičnosti, Poasonov koeficijent i jednoosnu čvrstoću na pritisak kao glavne ulazne parametre. Takođe, s obzirom na izabrani kriterijum loma neophodno je odrediti i dodatne ulazne parametre kao što su GSI i Hukove konstante  $m_b$ ,  $s$  i  $a$ . GSI (*geological strength index*) se pokazao kao nepouzdan za ocenu stenskog masiva na velikim dubinama, pa je stoga vrednost ovog parametra određena preko dobijenih vrednosti  $RMR_{89}$  putem formule [171]:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (27)$$

Hukove konstante se mogu definisati u samom softveru, empirijskim formulama ili drugim specijalizovanim softverima. U ovom slučaju za određivanje vrednosti Hoekovih konstanti, koje su prikazane u tabeli 6-6, korišćen je računarski softver RocLab.

Tabela 6-6 Vrednosti Hoek-ovih konstanti za numeričko modeliranje

Zone numeričkog modela	RMR	GSI	Hukove konstante		
			$m_b$	$s$	$a$
Ruda	70	65	2,734	0,0206	0,502
Poremećena zona	55	50	1,326	0,0039	0,506
Višeležeća stenska masa	65	60	2,579	0,0205	0,502

## 7. Analiza rezultata numeričkog modeliranja konstrukcije dna otkopnih blokova

Rezultati analize stabilnosti dobijeni su softverskom simulacijom. S obzirom na to da se u dnu bloka obavljaju sve tehnološke operacije eksploatacije rude, analizirani su i posmatrani samo rezultati stabilnosti objekata u dnu otkopnog bloka, ne i celog otkopa u globalu,

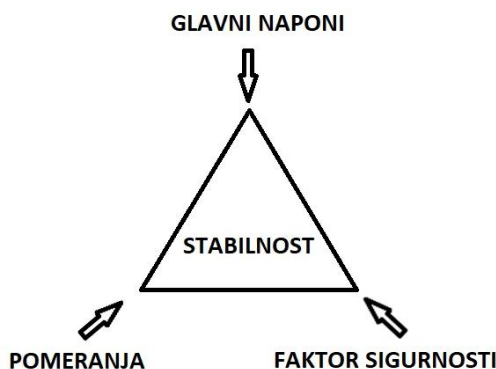
Na osnovu ulaznih podataka formiran je numerički model sa hibridnom mrežom konačnih elemenata. Istraživanje je sprovedeno za slučajeve jednostranog i dvostranog bočnog utovara sa utovarom i podsecanjem (bušenjem) na istom nivou, kao i za dno bloka sa jednostranim bočnim utovarom sa nivoom utovara ispod nivoa podsecanja. Tokom istraživanja, kod dvostranog bočnog utovara, položaj utovarnih komora je menjan, odnosno razmatrane su varijante sa normalnim i šahovskim rasporedom utovarnih komora.

Nakon izvršene simulacije rezultati su prikazani tabelarno i grafički preko srednjeg efektivnog napona, ukupnih i vertikalnih pomeranja i faktora sigurnosti. Svaki od ovih pokazatelja pruža specifičan uvid u ponašanje konstrukcije pod opterećenjem, dok njihova međusobna korelacija omogućava sveobuhvatnu interpretaciju rezultata.

Glavni naponi (*principal stresses*) predstavljaju ekstremne vrednosti normalnih napona u konstrukciji i koriste se za identifikaciju lokalnih kritičnih tačaka, što je od ključnog značaja za procenu da li masiv može da izdrži opterećenje bez plastične deformacije ili loma. Tri glavna napona (vertikalni i dva horizontalna) mogu se u softveru prikazati preko jedne veličine koja se naziva glavni efektivni napon (*mean effective stress*). Srednji efektivni napon se može posmatrati kao hidrostatički pritisak koji pokušava da sabije čestice materijala sa svih strana podjednako. U geotehnici, efektivni napon je onaj koji zapravo drži stabilnost konstrukcije. Dobija se tako što se od ukupnog napona (koji predstavlja srednju vrednost tri glavna napona) oduzme pritisak vode u porama (ako je ima). Dakle, to je stvarni pritisak koji se javlja na kontaktu između komada stene.

Pomeranja (*displacement*) definišu prostornu deformaciju konstrukcije i direktno utiču na njenu funkcionalnost. Prekoračenje dozvoljenih pomeranja može dovesti do gubitka upotrebljivosti, čak i u slučajevima kada su naponi unutar dozvoljenih granica.

Faktor sigurnosti (*safety factor*) se definiše kao odnos između dozvoljenog i stvarnog napona, odnosno otpornosti i opterećenja. Daje direktnu meru pouzdanosti konstrukcije u odnosu na granicu čvrstoće. To je najjednostavniji pokazatelj da li je projektovani sistem dovoljno stabilan, odnosno da li se u njemu mogu obezbediti bezbedni radni uslovi.



Slika 7-1 Dijagram uticajnih faktora na stabilnost konstrukcije

U praksi, ova tri parametra zajedno pružaju kompletan pregled stabilnosti konstrukcije, što je grafički predstavljeno na slici 7-1. Izostavljanje bilo kog od navedenih parametara može dovesti do

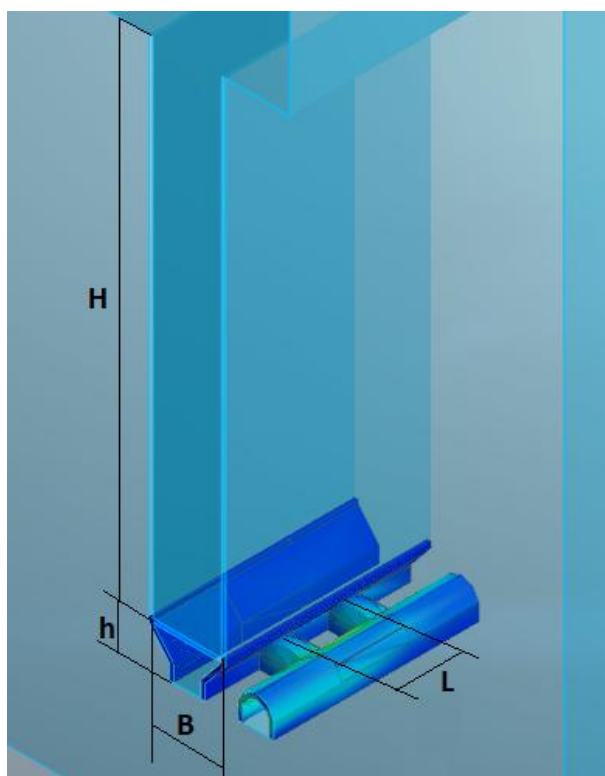
nepotpune ili pogrešne interpretacije rezultata. Na primer, konstrukcija sa prihvatljivim naponskim stanjem može biti nefunkcionalna usled prekomernih pomeranja, dok nizak faktor sigurnosti može ukazivati na nedovoljnu rezervu pouzdanosti uprkos zadovoljavajućim naponskim i deformacionim uslovima.

### 7.1. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model I

Prvi model kreiran je za jednostrani bočni utovar rude sa dve bočne utovarne komore na istom nivou sa nivoom podsecanja. Geometrijski parametri dna bloka predstavljaju promenljive veličine u ovom modelu, a to su rastojanje između bočnih utovarnih komora  $L$  (10, 15 i 20 m), širina otkopnog bloka  $B$  (10, 15 i 20 m) i visina podsecanja  $h$  (6, 7, 8, 9, 10.5, 12, 14 i 16 m). Analizirane su sve kombinacije ovih parametara što je dalo ukupan broj od 27 varijanti.

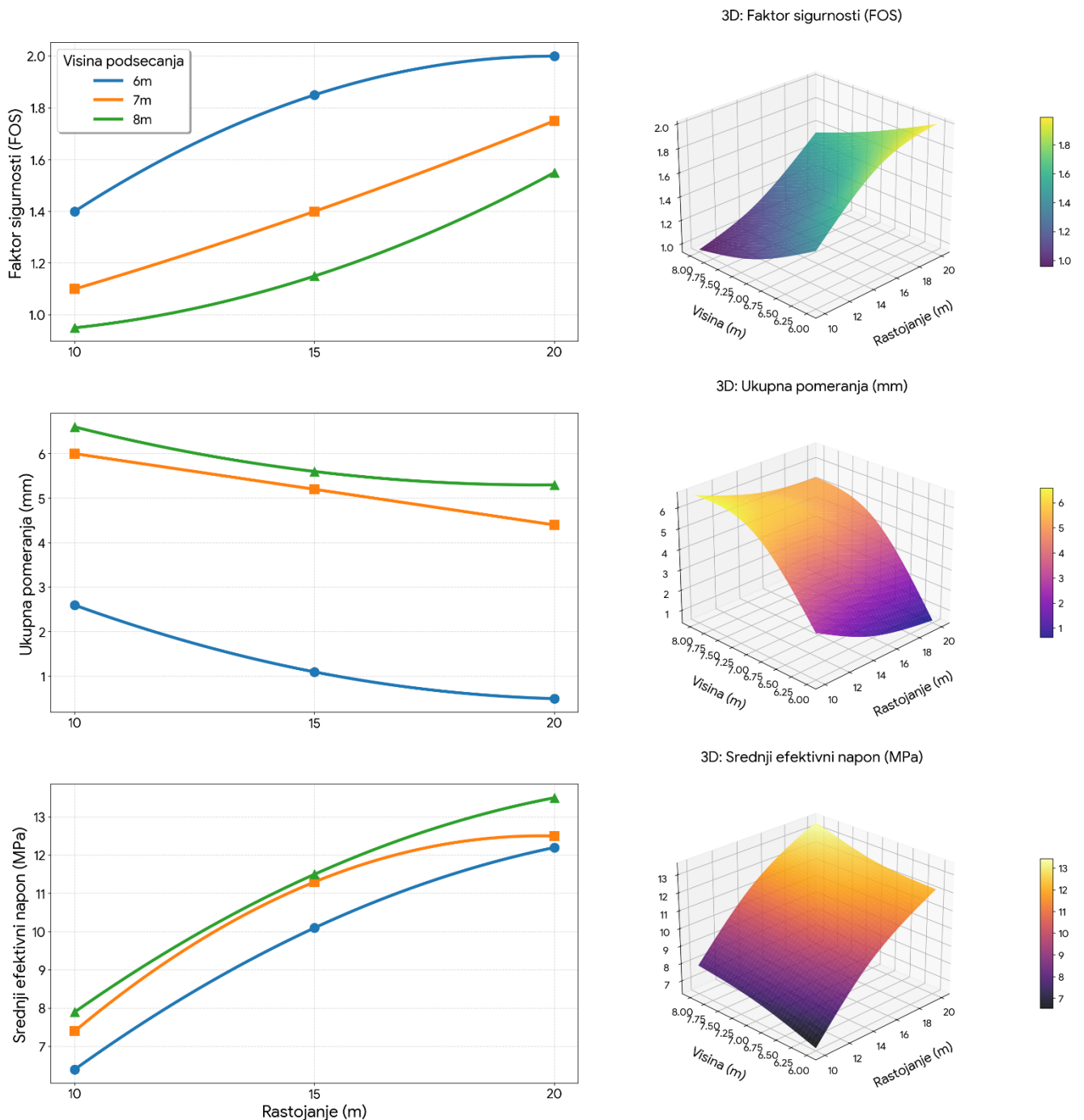
#### 7.1.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m

Prva varijanta razmatra slučaj sa širinom bloka od 10 m, rastojanjima između utovarnih komora 10, 15 i 20 m i visine tranšeje 6, 7 i 8 m, što daje ukupno devet različitih modifikacija. Visine tranšeja su određene iz odnosa širine bloka i nagiba stranica tranšeje, što za širinu bloka od 10 m i uglova nagiba stranica tranšeja  $50^\circ$ ,  $55^\circ$  i  $60^\circ$  iznosi redom 6, 7 i 8 m. Geometrijski parametri dna bloka prikazani su na slici 7-2.



Slika 7-2 Geometrijski parametri dna bloka:  $h$  - visina podsecanja;  $B$  - širina otkopa (tranšeje);  $L$  - rastojanje između utovarnih komora

Model simulira formiranje dna bloka i celokupne otkopne konstrukcije po prethodno opisanim fazama. Faznom izradom mogu se ispratiti redistribucije napona i razvoj zona plastičnosti sa napredovanjem rudarskih radova i odrediti faktor sigurnosti kao finalni pokazatelj stabilnosti posmatranog sistema. Rezultati analize prikazani su za završnu fazu otkopne konstrukcije zbog toga što ona predstavlja konačno stanje sistema nakon izrađenih svih neophodnih prostorija i formiranog dna bloka i otkopa.



Slika 7-3 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Analiza stabilnosti konstrukcije dna bloka pokazuje da je pri rastojanju između utovarnih komora od 10 m stabilnost konstrukcije kritična. Naponske zone susednih prostorija se potpuno preklapaju, stvarajući efekat "gnječenja" stuba. Stub širine 10 m koji se formira između utovarnih komora, tranšeje i hodnika utovara je skoro u potpunosti plastifikovan već na visini dna bloka (tranšeje) od 7 m. Na 8 m visine, usled povećanja napona smicanja stub gubi nosivost. U tom slučaju horizontalna pomeranja su najveća (konvergencija) što čini sistem nestabilnim.

Modifikacija sa rastojanjem između utovarnih komora od 15 m predstavlja prelazno stanje sa aspekta stabilnosti. Interakcija napona je prisutna, ali stub zadržava stabilno elastično jezgro do visine podsecanja od 7 m. Zona plastifikacije je lokalizovana na bokovima tranšeje. Na visini od 8 m, vitkost

stuba između utovarnih komora počinje da utiče na stabilnost, a faktor sigurnosti pada na graničnih 1,1 – 1,2. Pomeranja su kontrolisana (oko 2,5 mm), ali se uočava trend rasta sa svakim metrom visine.

Rastojanje između utovarnih komora od 20 m predstavlja stabilno stanje sistema. Utovarne komore se ponašaju kao nezavisni objekti, odnosno polja glavnih napona se ne preklapaju u središtu stuba. Rastojanje od 20 m čini stub između utovarnih komora masivnim i sigurnim. Međutim, utovarni hodnik (zbog blizine od 10 m u odnosu na hodnik podsecanja) pokazuje zonu zatezanja (*tension failure*) u krovini. Sleganje krovine je minimalno u utovarnim komorama, ali izraženije u utovarnom hodniku (oko 5 mm na visini podsecanja od 8 m). Grafički prikaz promene parametara stabilnosti u zavisnosti od rastojanja između utovarnih komora prikazan je na slici 7-3.

Posmatrano sa stanovišta visina tranšeje, na visini od 6 m sistem je u svojoj najpovoljnijoj geometriji. Pomeranja su linearna i zanemarljiva (ispod 1,5 mm). Podina je stabilna i bez izraženog bubrenja. Zona plastifikacija se javlja samo kao "tačkasta" u samim uglovima iskopa bez dubljeg prodiranja u masiv. Za visinu tranšeje od 6 m, čak i na 10 m razmaka između utovarnih komora, stub između njih uspešno razdvaja naponska polja formirana oko ovih prostorija. Pri rastojanju od 15 m između utovarnih komora srednji efektivni napon skače na 10 MPa, a na rastojanju od 20 m na 12 MPa na samim ivicama gde se dno bloka spaja sa bokovima otkopa. To što ovi delovi konstrukcije, pre svega spoj tranšeje sa bokovima otkopa i stub koji se formira između utovarnih komora, preuzimaju veći deo tereta dovodi do ravnomernije raspodela napona u ostalim delovima dna bloka i povećanja faktora sigurnosti. Rezultati simulacije za visinu podsecanja od 6 m prikazani su u tabeli 7-1.

Tabela 7-1 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 6 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
<b>Faktor sigurnosti (FOS)</b>	~1,4 (zadovoljavajuće)	> 1,8 (stabilno)	> 2,0 (veoma stabilno)
<b>Vertikalna pomeranja</b>	Do 1,5 mm	Ispod 1,0 mm	Minimalne/Zanemarljive
<b>Ukupna pomeranja</b>	2,58 mm	1,1 mm	Minimalne/Zanemarljive
<b>Srednji efektivni napon</b>	6,37 MPa	10,1 MPa	12,18 MPa
<b>Status masiva</b>	Elastično jezgro prisutno	Potpuno elastičan stub	Potpuno stabilan masiv
<b>Kritična zona</b>	Uglovi bokova (koncentracija)	Minimalna naponska polja	Nema kritičnih zona
<b>Glavni rizik</b>	Lokalno odlamanje na ivicama	Nema izraženog rizika	Nema rizika

Visina tranšeje od 7 m predstavlja prelaznu fazu u kojoj se uočava početak nelinearnog ponašanja i zamora stuba između utovarnih komora. Pomeranja počinju da rastu i uočava se jasno deformisanje bokova ka unutrašnjosti kod razmaka utovarnih komora od 10 m. Kod rastojanja od 15 m, plastične zone zahvataju oko 20-30% širine stuba sa obe strane. Jezgro je i dalje elastično, ali se njegova nosivost smanjuje. Za širinu otkopnog bloka od 10 m udaljenost utovarnog hodnika od hodnika podsecanja je tolika da naponi iz utovarnog hodnika ostvaruju interakciju sa otkopnim blokom, stvarajući asimetrična opterećenja. I u ovom slučaju najveća koncentracija napona je u prelaznom delu između tranšeje i utovarnih komora. Iako na prvi pogled deluje da veća ukupna pomeranja čine sistem manje stabilnim, njihova zona uticaja je zapravo uža pa su umerena pomeranja ravnomernije raspoređena, što čini sistem stabilnijim, odnosno stub širine 15 m trpi manji specifični pritisak. Sa povećanjem razmaka na 20 m maksimalna pomeranja drastično opadaju što znači da ovaj razmak omogućava formiranje stuba između komora koji je toliko krut da skoro potpuno sprečava sleganje krovine. Takođe, primećuje se značajan pad maksimalne vrednosti efektivnog napona zbog

toga što ova širina između komora obezbeđuje veliku nosivost i preuzimanje pritiska nadsloja sa minimalnim naprežanjem po jedinici površine. Rezultati simulacije za visinu podsecanja od 7 m prikazani su u tabeli 7-2.

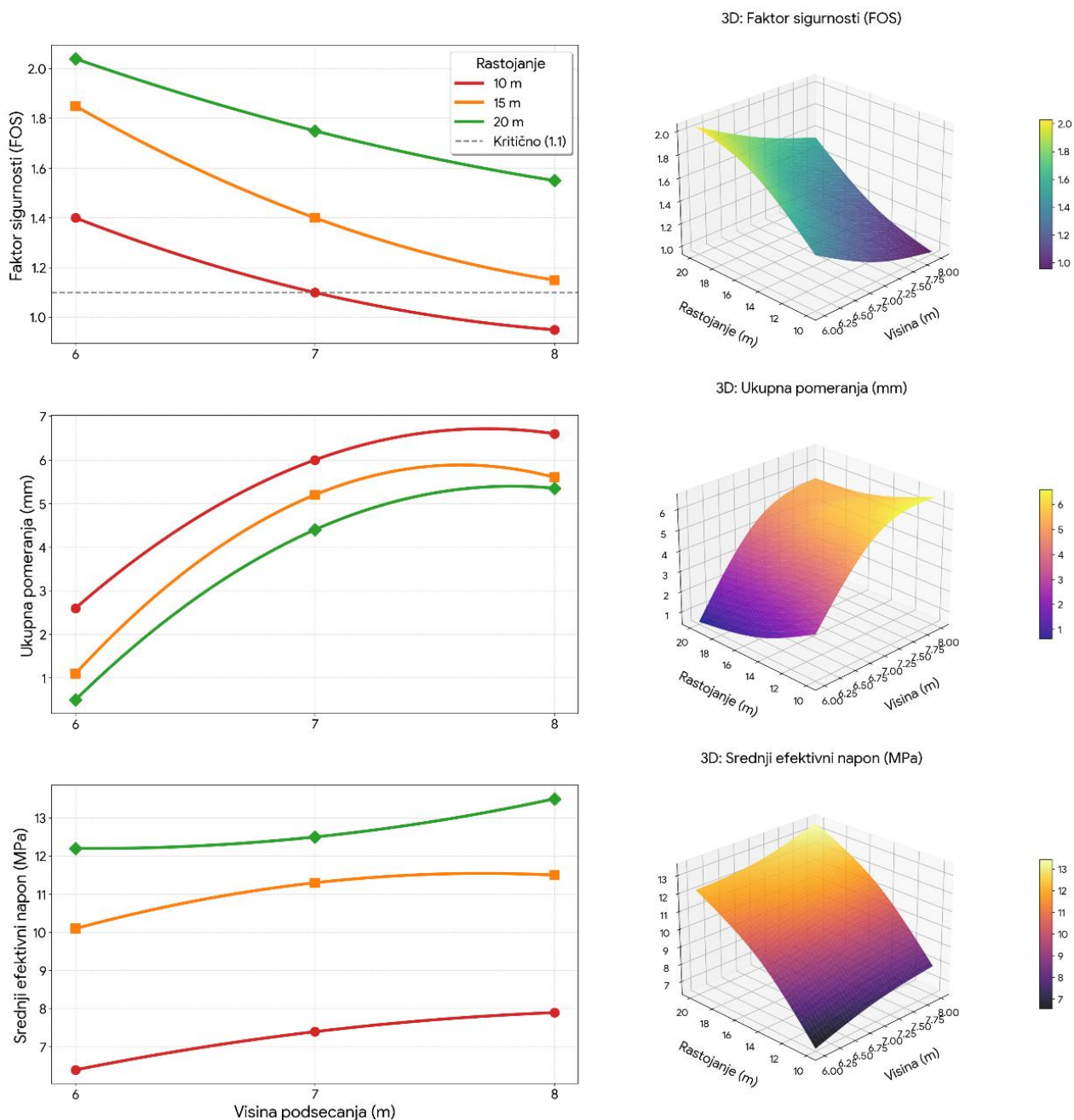
Tabela 7-2 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 7 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	~1,1 (Granično)	~1,4 (Zadovoljavajuće)	> 1,7 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	2,0 – 2,5 mm	~1,5 mm	< 1,2 mm
Ukupna pomeranja	6 mm	5,22 mm	4,41 mm
Srednji efektivni napon	7,38 MPa	11,32 MPa	12,51 MPa
Status masiva	Početak "spajanja" zona plastičnosti	Stabilno jezgro se sužava	Masivno i stabilno
Kritična zona	Sredina stuba (pritisak)	Donje trećine bokova	Krovina transportnog hodnika
Glavni rizik	Progresivna plastifikacija	Početak listanja zidova	Lokalna nestabilnost krovine

Pri visini tranšeje od 8 m masiv između utovarnih komora dostiže nivo gde pritisci na bokovima prevazilaze čvrstoću stene na smicanje. Ova visina predstavlja kritičnu fazu za stabilnost konstrukcije. Povećanje visine sa 7 na 8 metara uzrokuje nelinearan skok deformacija, naročito u krovinskom delu utovarnog hodnika. Za širinu od 10 m veći deo masiva u stubu je pod opterećenjem u odnosu na manje visine podsecanja. Skok maksimalnih vrednosti srednjeg efektivnog napona u odnosu na prethodnu varijantu ukazuje da su zbog veće visine podsecanja stubovi vitkiji i manje otporni na vertikalni pritisak nadsloja. Sa povećanjem razmaka na 15 m formira se stub dovoljne širine da spreči značajno uleganje krovine, odnosno zone pomeranja su manje nego kod razmaka od 10 m. Koncentracija napona je u donjim uglovima tranšeje i spojevima sa utovarnim komorama. Iako povećano rastojanje između utovarnih komora na 20 m čini stub između njih širim, kod visine tranšeje od 8 m, ivice na spoju podseka i komora postaju žarišta napona, ali je i pored toga ostatak masiva veoma stabilan. Pomeranja nešto veća od 5 mm ne predstavljaju problem, jer su deformacije ravnomerno raspoređene u široj zoni što čini konstrukciju dna bloka stabilnom čak i pri većoj visini podsecanja. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 8 m su prikazani u tabeli 7-3, dok su zavisnosti promena parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja prikazani na slici 7-4.

Tabela 7-3 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 8 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	< 1,0 (nestabilno)	~1,15 (granično)	> 1,5 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	Skok na > 5 mm	~3,0 mm	~1,8 mm
Ukupna pomeranja	6,59 mm	5,59 mm	5,35 mm
Srednji efektivni napon	7,9 MPa	11,51 MPa	13,5 MPa
Status jezgra stuba	Potpuna plastifikacija	Načete ivice / Usko jezgro	Masivno jezgro
Kritična zona	Kruna podsecanja	Spoljne ivice stubova	Krovina transportnog hodnika
Glavni rizik	Kolaps otkopne konstrukcije	Iznenadni krti lom	Ispadanje blokova u krovu



Slika 7-4 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Ukoliko deo masiva između utovarnih komora posmatramo kao zaštitni stub u interakciji tranšeja-utovarne komore-utovarni hodnik onda stabilnost sistema nije određena samo širinom stuba (rastojanje između utovarnih komora) već i odnosom širine i visine, odnosno odnosom rastojanja između komora i visine podsecanja  $L/h$ . Ovaj pokazatelj se može nazvati faktorom vitkosti stuba koji sa povećanjem visine podsecanja opada, što direktno vodi ka padu nosivosti. Kod ovog odnosa, fokus je na stubu masiva između utovarnih komora koji je određen nosivošću jezgra stuba. Na osnovu numeričkih modela, identifikovana je korelacija između geometrijskog faktora  $L/h$  i mehaničkog odziva masiva.

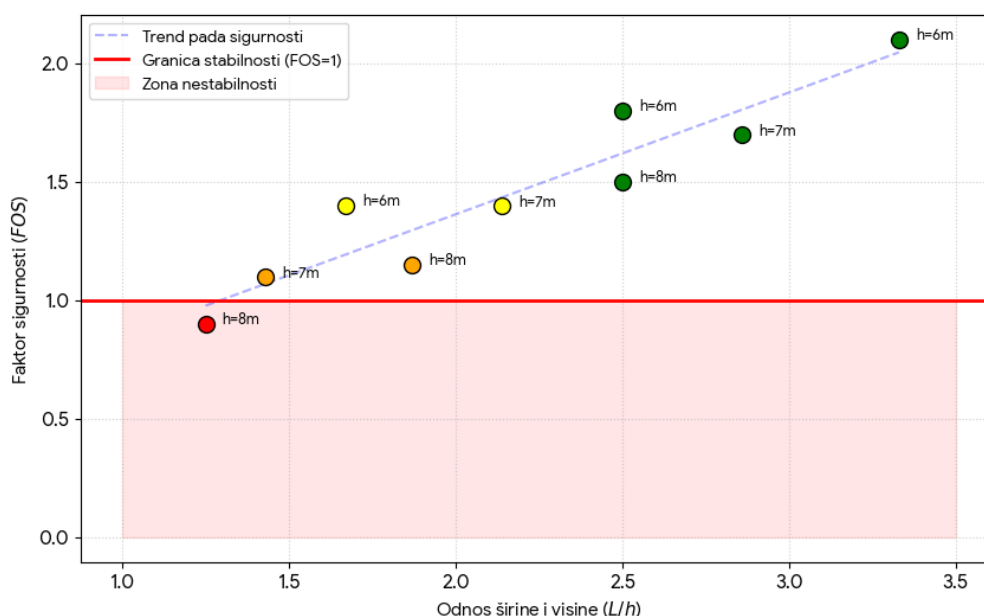
Analiza kroz odnos širine otkopa i visine podsecanja (koeficijent  $B/h$ ) menja fokus sa stabilnosti stuba na stabilnost same krovine i bokova otvorenog prostora. Odnos  $B/h$  zapravo predstavlja funkcionalni parametar koji opisuje geometriju samog tranšejnog podsecanja. Ovaj odnos direktno ukazuje na promenu naponskog stanja: što je koeficijent manji (visoko podsecanje, uska

komora), to su bokovi izloženi izvijanju i smicanju, odnosno naponi u nožicama su veći, a rizik od izvijanja bokova unutar tranšeje raste. Vrednosti faktora sigurnosti za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka prikazani su u tabeli 7-4.

Tabela 7-4 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

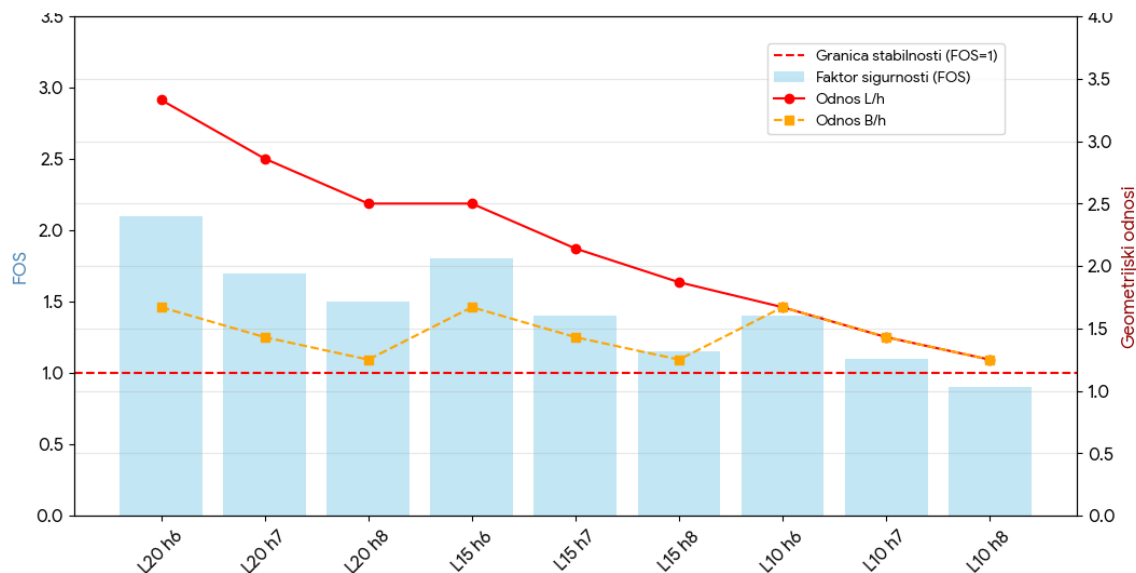
Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	6 m	3,33	1,67	> 2	veoma stabilno
20 m	7 m	2,86	1,43	1,7	stabilno
20 m	8 m	2,50	1,25	~1,5	Stabilno
15 m	6 m	2,50	1,67	~1,8	Stabilno
15 m	7 m	2,14	1,43	1,4	zadovoljavajuće
15 m	8 m	1,87	1,25	1,15	granično
10 m	6 m	1,67	1,67	1,4	zadovoljavajuće
10 m	7 m	1,43	1,43	~1,1	granično
10 m	8 m	1,25	1,25	< 1,0	nestabilno

Analiza tri scenarija za širine stubova 10, 15 i 20 m kroz tri faze različite visine 6, 7 i 8 m omogućava nam da identifikujemo tačnu vrednost geometrijskog odnosa pri kojoj masiv prelazi iz elastičnog u plastično stanje. U zoni visoke sigurnosti ( $L/h > 2$ ) stub poseduje masivno elastično jezgro. Čak i ako su ivice plastifikovane, središnji deo stuba uspešno nosi teret nadsloja bez značajnih deformacija (primer rastojanje između komora 20 m na visini tranšeje od 8 m). Sa opadanjem vrednosti odnosa  $L/h$  dolazi do progresivnog sužavanja elastičnog jezgra. Naponi se redistribuiraju ka centru stuba, a faktor sigurnosti opada ka jediničnoj vrednosti ( $L/h < 1,4$ ). Za odnos rastojanja i visine manji od 1,25 vitkost stuba je tolika da on više ne može da formira unutrašnji stub nosivosti, već dolazi do spajanja zona smicanja (*shear failure*) sa obe strane stuba, što uzrokuje povećanje pomeranja i fizičko razaranje masiva. Na slici 7-5 grafički je prikazana promena faktora sigurnosti sa promenom odnosa  $L/h$ .



Slika 7-5 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja  $L/h$

Odnos B/h se smanjuje sa povećanjem visine podsecanja. Smanjenjem odnosa B/h sa 1,67 do 1,25 raste vertikalna pomeranja, dok se faktor sigurnosti smanjuje. Odnos B/h može biti isti za različita rastojanja između utovarnih komora (npr. 1,67 za visinu podsecanja 6 m i širine stuba 10, 15 i 20 m) pri čemu u tom slučaju faktor sigurnosti raste sa povećanjem rastojanja L. To je još jedna potvrda uticaja širine stuba između utovarnih komora na globalnu stabilnost sistema. Promena faktora sigurnosti u odnosu na promene odnosa L/h i B/h prikazana je na slici 7-6.



Slika 7-6 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

### 7.1.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m

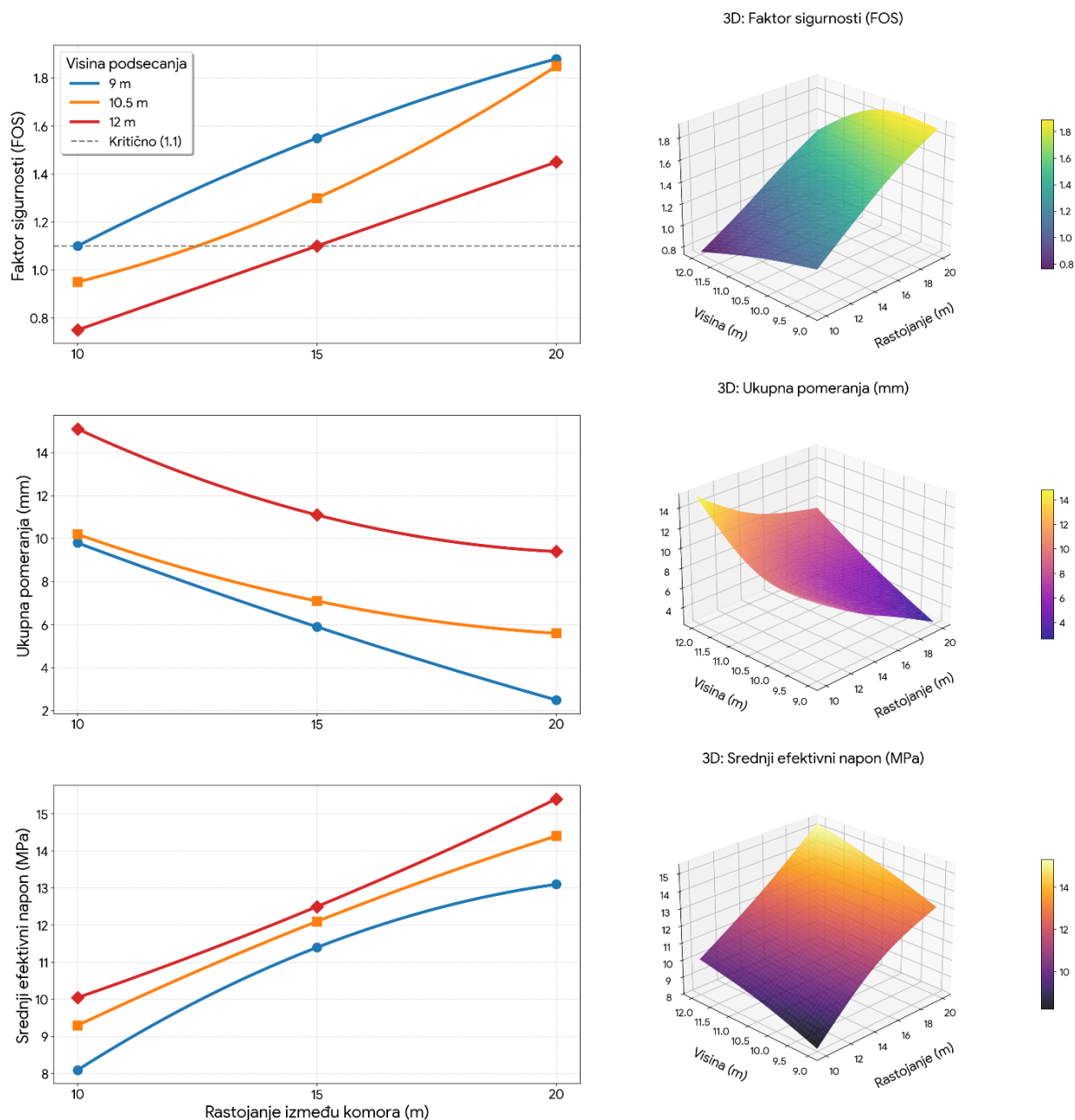
Druga varijanta razmatra konstrukciju dna bloka sa širinom od 15 m i rastojanjima između utovarnih komora 10, 15 i 20 m. S obzirom na to da je širina bloka povećana sa 10 na 15 m to je uticalo i na promene visine podsecanja, koje u ovom slučaju iznose 9, 10,5 i 12 m.

Rezultati simulacije za ovu varijantu modela prikazani su na slici 7-7 preko zavisnosti promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora i na slici 7-8 preko zavisnosti promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja.

Za otkop širine 15 m, rastojanje između utovarnih komora od 10 m predstavlja geotehnički alarmantnu situaciju jer je faktor sigurnosti nizak. Već pri visini podsecanja od 9 m stub u masivu između utovarnih komora je plastifikovan i faktor sigurnosti ukazuje da je sistem na ivici loma. Sa povećanjem visine tranšeje faktor sigurnosti pada ispod jedan, što je potvrda da je geometrijska konstrukcija dna nestabilna i da je ušla u zonu generalnog loma. Povećanje visine podsecanja sa 9 m na 10,5 m, zbog plastifikacije više od 70% boka tranšeje vodi ka progresivnom urušavanju, koje kreće od nožice i širi se ka vrhu (krunici) tranšeje. Stub između utovarnih komora potpuno je izgubio elastičnost jezgra i ceo se nalazi u stanju plastifikacije (*yielding*), što gledano sa aspekta stabilnosti ukazuje na stanje kolapsa.

Analiza varijante sa rastojanjem između utovarnih komora od 15 m ukazuje na geotehničku održivost ovakve geometrije i znatno veću sigurnost u odnosu na prethodnu varijantu. U većem delu dna bloka faktor sigurnosti prelazi vrednost od 1,5 osim u levom boku tranšeje gde mestimično pada do vrednosti 1,1-1,2, ali je ta zona lokalnog karaktera i ne širi se u dubinu masiva. Stub između utovarnih komora karakteriše postojanje masivnog elastičnog jezgra, što mu omogućava da nosi teret

višeležećih slojeva. Faktor sigurnosti pri povećanju visine podsecanja na 10,5 m potvrđuje da je povećanje stuba na 15 m bilo ključno za održavanje stabilnosti. Iako je model napregnutiji nego na manjoj visini, sistem je i dalje globalno stabilan. Stub od 15 m ima i dalje dovoljno elastično jezgro da spreči lom konstrukcije, uprkos tome što su mu ivice načete naprežanjem. Daljim povećanjem visine podsecanja na 12 m ovaj sistem je i dalje stabilan, ali na samoj granici sigurnosti. Na levom boku tranšeje dolazi do širenja plastičnih zona, naročito u nožici tranšeje. Naponi koji se indukuju kao posledica pritiska nadsloja dovode do toga da su bokovi tranšeje na granici stabilnosti, međutim stub između utovarnih komora i dalje uspeva da zadrži kompaktno elastično jezgro zahvaljujući kome stub uspeva da drži krovnu ploču i sprečava lančanu reakciju popuštanja, koja bi se desila kod užih stubova.



Slika 7-7 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Varijanta sa širinom stuba od 20 m predstavlja najsigurniju konstrukciju. Pri visini podsecanja od 9 m faktor sigurnosti je najviši sa vrednostima većim od 1,8. Širina stuba i udaljenost utovarnog

hodnika od hodnika podsecanja od 15 m dovodi do toga da utovarni hodnik uopšte ne oseća interakciju sa otkopnim blokom. Stub širine 20 m omogućava visoku stabilnost čak i pri povećanju visine podsecanja na 12 m, uz eventualno listanje masiva na bokovima tranšeje.

Posmatrano sa stanovišta visine podsecanja najniža visina (9 m) predstavlja referentnu tačku pri kojoj sistemi sa stubovima širine od 15 m i 20 m pokazuju visoku stabilnost ( $FOS > 1,5$ ). Međutim, kod stuba širine 10 m, faktor sigurnosti je već na donjoj granici ( $\sim 1,1$ ), što ukazuje na to da je napon indukovani u masivu izjednačen sa čvrstoćom stene već u početnoj fazi. Pri ovoj visini stubovi od 15 m i 20 m zadržavaju masivno elastično jezgro, što garantuje krutost krovine. Rezultati simulacije za visinu podsecanja od 9 m prikazani su u tabeli 7-5.

Tabela 7-5 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 9 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	$\sim 1,1$ (granično/kritično)	$> 1,5$ (stabilno)	$> 1,8$ (stabilno)
Vertikalna pomeranja	9,1 mm	5,1 mm	2,1 mm
Ukupna pomeranja	9,8 mm	5,9 mm	2,5 mm
Srednji efektivni napon	8,12 MPa	11,43 MPa	13,1 MPa
Status masiva	Načeto/plastifikovana stena	Elastično jezgro očuvano	Potpuno elastično jezgro
Kritična zona	Ivice stuba i tranšeje	Levi bok tranšeje	Nema kritičnih zona
Glavni rizik	Lokalno odlamanje na ivicama	Nema izraženog rizika	Nema rizika

Visina podsecanja 10,5 m predstavlja tranzicionu fazu u pogledu stabilnosti. Povećanje visine za samo 1,5 m dovodi do drastičnog pada sigurnosti. Kod stuba širine 10 m, faktor sigurnosti pada ispod jedinične vrednosti ( $FOS < 1$ ), označavajući lom stenske mase. Elastično jezgro stuba potpuno nestaje, a čitav element prelazi u stanje tečenja (*yielding*). Stub od 15 m u ovoj fazi ulazi u zonu takozvane granične stabilnosti ( $FOS = 1,2-1,4$ ), gde su zidovi pod velikim pritiskom i zahtevaju podgrađivanje. Plastifikacija počinje da prodire u bokove stuba putem smicanja, sužavajući elastično jezgro. Povećanjem rastojanja između utovarnih komora faktor sigurnosti raste i sistem ulazi u zonu visoke sigurnosti ( $FOS > 1,8$ ). Rezultati simulacije za visinu podsecanja od 10,5 m prikazani su u tabeli 7-6.

Tabela 7-6 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 10,5 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	$< 1$ (nestabilno)	1,2-1,4 (granično)	$> 1,8$ (stabilno)
Vertikalna pomeranja	9,3 mm	6,3 mm	$\sim 5$ mm
Ukupna pomeranja	10,2 mm	7,1 mm	5,6 mm
Srednji efektivni napon	9,31 MPa	12,1 MPa	14,4 MPa
Status masiva	Potpuna plastifikacija	Elastično jezgro suženo	Očuvano elastično jezgro
Kritična zona	Bok tranšeje	Ivice stuba, spoj tranšeje i stuba	Nema kritičnih zona
Glavni rizik	Urušavanje od nožice ka vrhu tranšeje	Povećano naprezanje na ivicama stuba	Minimalan

Visina 12 m je geometrijski limit ovog modela. Faktor sigurnosti kod stuba od 10 m pada na vrednosti manje od 0,8, što predstavlja totalni kolaps konstrukcije. Čak i kod najrobusnijeg stuba (20

m), faktor sigurnosti opada na 1,4–1,5, što je i dalje bezbedno, ali uz pojavu lokalnog listanja stene u nožicama bokova tranšeje. Kod stuba od 15 m, registruje se duboka plastifikacija bokova i kritično zatezanje u gornjem delu stuba. Stub od 20 m je jedini koji i pri ovoj visini uspeva da spreči spajanje plastifikovanih zona krovine i podine, čime sprečava lančanu reakciju urušavanja. Rezultati simulacije za visinu podsecanja od 12 m prikazani su u tabeli 7-7.

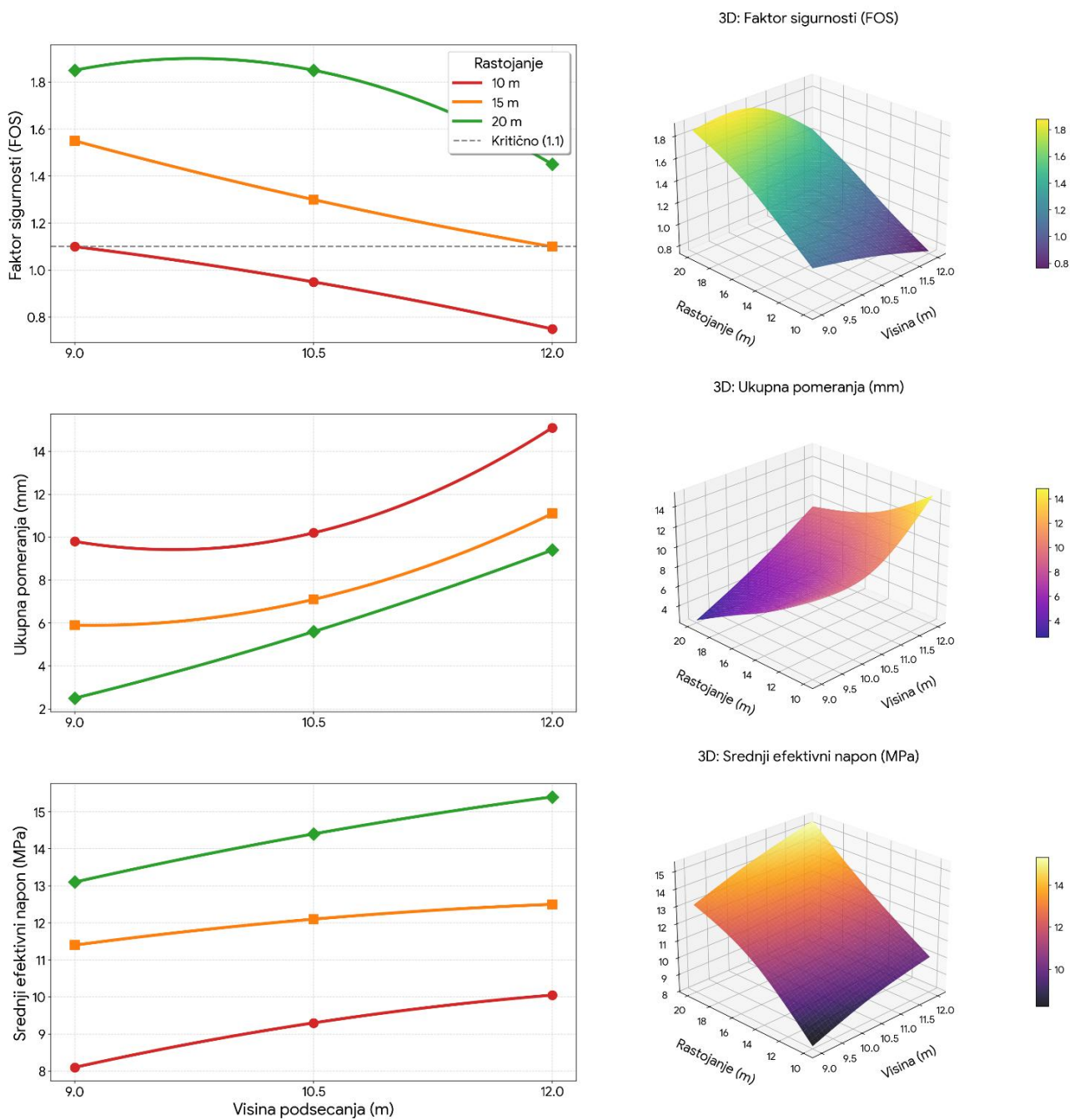
Tabela 7-7 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	< 0,8 (kolaps)	1,05-1,15 (granično/kritično)	1,4-1,5 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	13,8 mm	9,1 mm	8 mm
Ukupna pomeranja	15,1 mm	11,1 mm	9,4 mm
Srednji efektivni napon	10,06 MPa	12,5 MPa	15,4 MPa
Status masiva	Zdrobljen stub	Usko elastično jezgro, plastifikacija u bokovima tranšeje	Stabilno jezgro
Kritična zona	Bokovi tranšeje i stuba	Nožica i bokovi tranšeje	Bokovi tranšeje
Glavni rizik	Progresivno urušavanje	Bokovi tranšeje na granici stabilnosti	Listanje masiva na bokovima tranšeje

Sprovedena numerička simulacija dokazuje da je geometrijska konstrukcija stubova između utovarnih komora primarni faktor stabilnosti u uslovima širokih otkopa i velikih visina podsecanja. Model sa stubom od 10 m je geotehnički limitiran jer je neodrživ za visine preko 9 m bez pojačane podgrade. Povećanje visine podsecanja degradira stub iz nosivog u element koji gubi svojstva nosivosti i vodi ka popuštanju. Lom se uvek inicira u nožicama tranšeje gde su gradijenti napona najveći, a zatim se pri visinama većim od 10,5 m progresivno širi ka krunici. Visina od 10,5 m predstavlja prelomnu tačku za geometriju konstrukcije dna otkopnog bloka, gde za stabilnosti sistema minimalna širina stuba mora biti 15 m uz obavezno podgrađivanje. Visina od 12 m predstavlja tehnički limit konstrukcije. Iako povećanje širine stuba na 20 m menja mehanizam prenosa opterećenja čineći sistem imunim na veće visine podsecanja, pritisak nadsloja na bokove uzrokuje duboku plastifikaciju koja zahteva odgovarajući obim podgrađivanja. Konstrukcija pri kojoj su širina otkopa i rastojanja između utovarnih hodnika jednake (15 m) predstavlja granično održivu geometriju, dok je jedini garant stabilnosti sistema primena stuba čija je širina veća od širine samog otkopa ( $L=20$  m). U tabeli 7-8 prikazane su vrednosti faktora sigurnosti za različite odnose  $L/h$  i  $B/h$ .

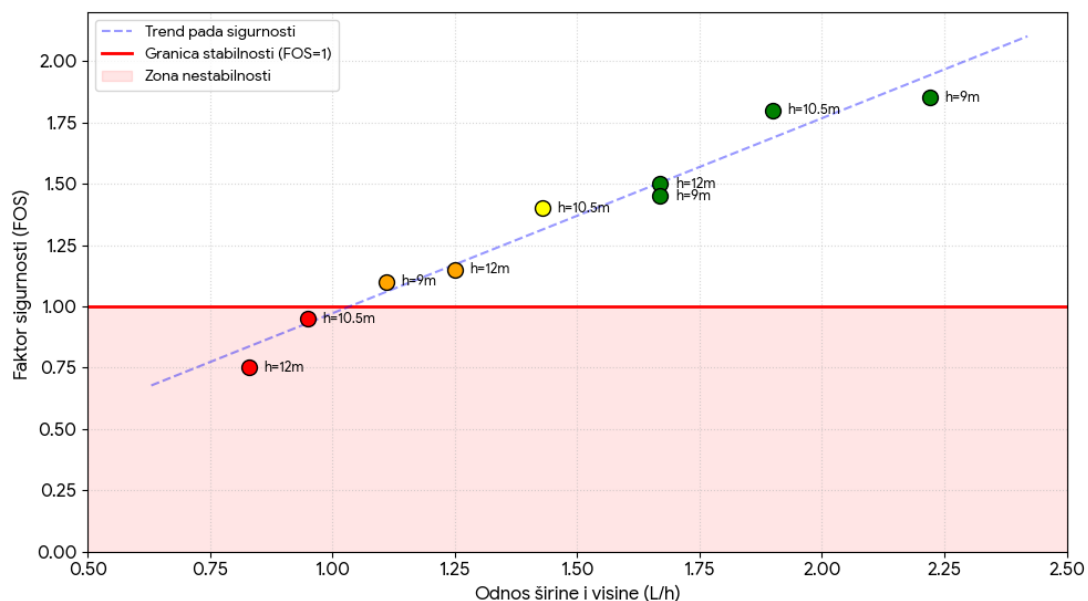
Tabela 7-8 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos $L/h$	Odnos $B/h$	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	9 m	2,22	1,67	> 1,8	stabilno
20 m	10,5 m	1,9	1,43	1,8	stabilno
20 m	12 m	1,67	1,25	1,5	stabilno
15 m	9 m	1,67	1,67	1,4 – 1,5	stabilno
15 m	10,5 m	1,43	1,43	1,4	granično
15 m	12 m	1,25	1,25	1,15	granično
10 m	9 m	1,11	1,67	1,1	Granično/kritično
10 m	10,5 m	0,95	1,43	< 1,0	nestabilno
10 m	12 m	0,83	1,25	< 0,8	kolaps



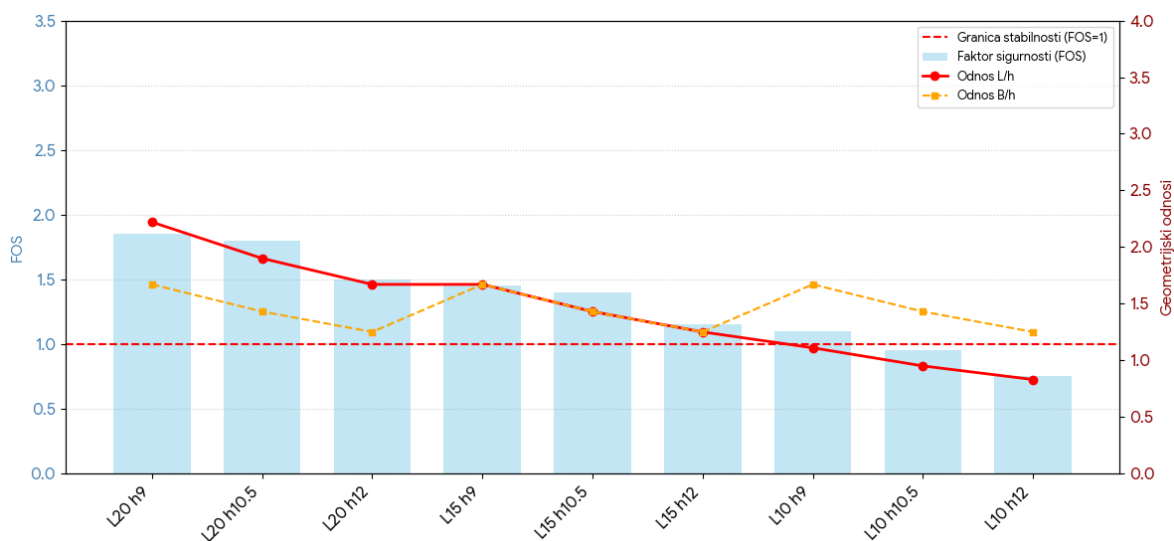
Slika 7-8 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Stabilnost je direktno uslovljena odnosom širine i visine stuba ( $L/h$ ). Kada je vrednost  $L/h > 1,5$  sistem je u zoni sigurnosti. Smanjenjem ovog odnosa dolazi do ubrzanog spajanja plastičnih zona i gubitka elastičnog jezgra stuba. Stub od 15 m na visini od 9 m i stub od 20 m na visini od 12 m imaju isti faktor vitkosti (1,67). Međutim, stub od 20 m pokazuje bolju stabilnost jer veća apsolutna širina stuba pruža bolju horizontalnu krutost celom sistemu. Kada odnos  $L/h$  padne ispod 1 (slučaj stuba 10 m na visini 10,5 m i 12 m), dolazi do gubitka elastičnog jezgra i progresivnog loma. Promena faktora sigurnosti prema odnosu rastojanje između utovarnih komora / visina podsecanja prikazana je na slici 7-9.



Slika 7-9 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu L/h

Analiza uticaja odnosa B/h potvrđuje zaključak izveden za prethodnu varijantu i pored povećanja širine otkopa. Za eksploataciju pri visinama podsecanja iznad 10,5 m neophodno projektovati stubove čija je širina najmanje 30% veća od širine samog otkopa kako bi se sprečio generalni lom konstrukcije. Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu L/h i odnosu B/h prikazan je na slici 7-10.



Slika 7-10 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

### 7.1.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m

Konstrukcija dna bloka kod treće varijante sastoji se od otkopnog bloka širine 20 m i rastojanjima između utovarnih komora 10, 15, i 20 m, pri većim visinama podsecanja (12, 14, 16 m). I u ovom slučaju fokus je na očuvanju elastičnog jezgra stuba između utovarnih komora kao primarnog uslova globalne stabilnosti.

Pri širini otkopa od 20 m stub masiva između utovarnih komora od 10 m nema dovoljnu širinu koja bi ispunila uslov stabilnosti pri većim visinama podsecanja. Pri visini podsecanja od 12 m zone plastifikacije prodiru do središta stuba, dok se na visinama od 14 i 16 m, zone plastifikacije sa dve susedne utovarne komore potpuno spajaju. Stub više nema zdravu masu u sredini, faktor sigurnosti pada ispod 1, što znači da je lom materijala neizbežan bez većeg obima podgrađivanja.

Stub širine 15 m predstavlja kompromisno rešenje zbog toga što se konstrukcija sa ovakvom geometrijom nalazi na donjoj granici stabilnosti. Do visine podsecanja od 14 m stub zadržava masivan pojas elastičnog jezgra, što sprečava progresivni kolaps krovinskog dela. Faktor sigurnosti u bokovima se kreće od 1,2 do 1,8, što uz prisustvo elastičnog jezgra u stubu i pored granične vrednosti faktora sigurnosti celokupne konstrukcije dna (oko 1,1) čini sistem prihvatljivim sa aspekta stabilnosti uz manji obim podgrađivanja.

Geometrija sa širinom otkopa od 20 m i rastojanjem između utovarnih komora od 20 m čini konstrukciju dna otkopnog bloka stabilnom za sve tri analizirane visine podsecanja. Kod ovakvog odnosa geometrijskih parametara dna bloka dolazi do izolacije napona, odnosno utovarne komore i hodnik se ponašaju kao izolovani objekti. Jezgro stuba je elastično sa niskim nivoom naprezanja i kao takvo skoro da ne odstupa od primarnog stanja napona. Promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora prikazane su na slici 7-11, dok su promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja prikazane na slici 7-12.

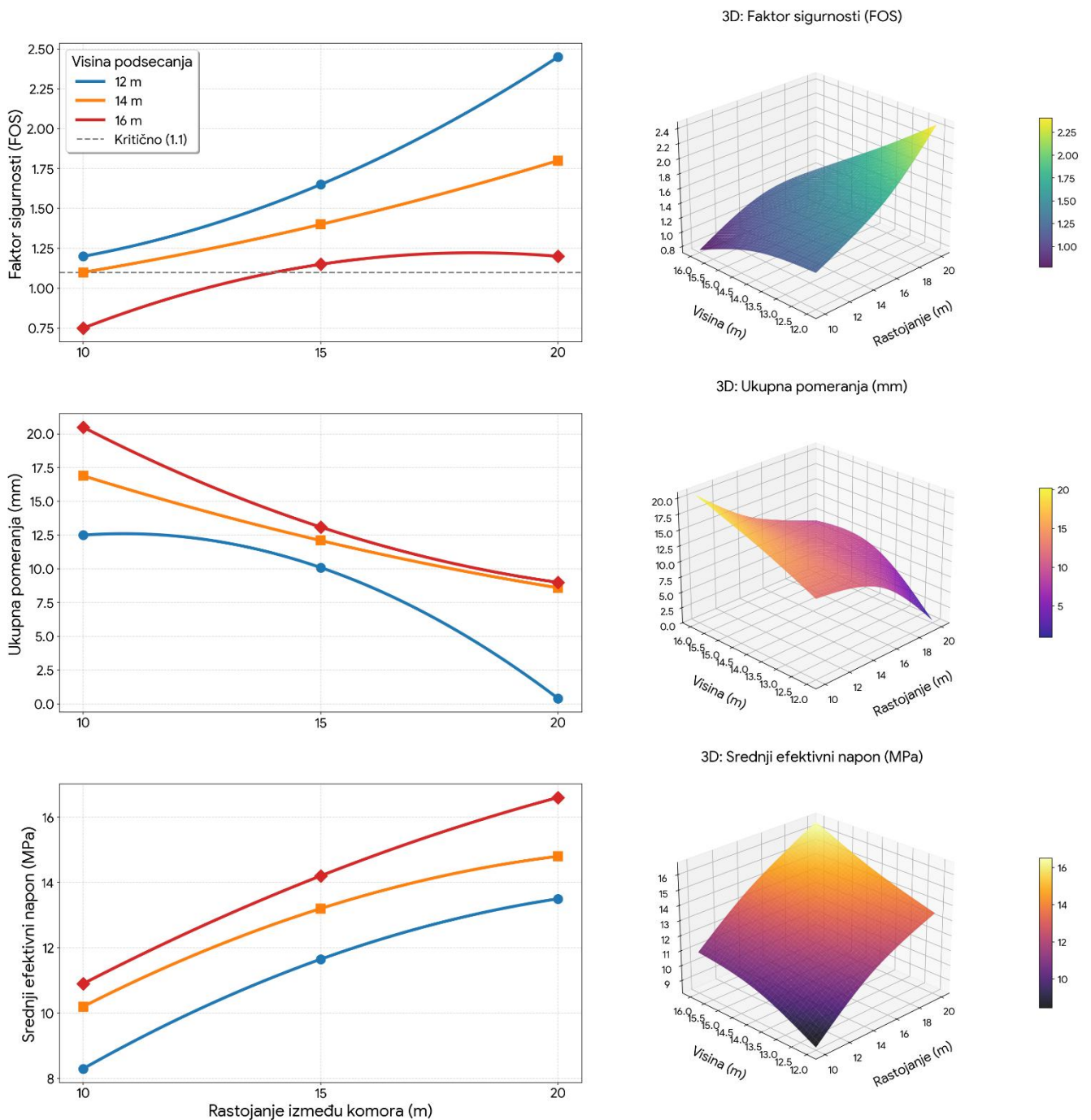
Na osnovu analiziranih parametara stabilnosti, model sa visinom podsecanja od 12 m je geomehanički veoma stabilan. Bokovi tranšeje predstavljaju kritičnu zonu u kojoj faktor sigurnosti pada na vrednosti između 1 i 1,5. Za razliku od njih utovarni hodnik je u zoni gde je faktor sigurnosti iznad 2. Visoke vrednosti faktora sigurnosti potvrđuju da je distanca od 20 m od hodnika podsecanja odlično odabrana jer se hodnik nalazi van direktnog uticaja naprezanja koncentrisanih oko same otkopne komore. Za visinu podsecanja od 12 m pokazalo se i da je rastojanje između utovarnih komora od 10 m dovoljno da se suprotstavi vladajućim pritiscima. Stub između susednih utovarnih komora ima faktor sigurnosti oko 1,7 - 2 koji na samim ivicama gde se hodnici spajaju sa tranšejom pada na niže vrednosti (1,2), što je očekivano zbog koncentracije napona u ovom delu. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m prikazani su u tabeli 7-9.

Tabela 7-9 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
<b>Faktor sigurnosti (FOS)</b>	1,2 (granično)	1,5 – 1,8 (stabilno)	> 2,5 (veoma stabilno)
<b>Vertikalna pomeranja</b>	11 mm	9,2 mm	0,18 mm
<b>Ukupna pomeranja</b>	12,5 mm	10,1 mm	0,31 mm
<b>Srednji efektivni napon</b>	8.32 MPa	11,63 MPa	13,5 MPa
<b>Status masiva</b>	Načeto/plastifikovano	Usko elastično jezgro, plastifikacija u bokovima tranšeje	Potpuno elastično
<b>Kritična zona</b>	Sredina stranica tranšeje	Nožica tranšeje	Nema kritičnih zona
<b>Glavni rizik</b>	Lokalni odroni bokova	Bokovi tranšeje na granici stabilnosti	Nema rizika

Sa povećanjem visine podsecanja na 14 m situacija se drastično menja. Na levom boku tranšeje faktor sigurnosti pada ispod 1, što praktično znači da stenska masa na bokovima više nije samonoseća. U tom slučaju bez primene ozbiljne systemske podgrade dolazi do trenutnog loma i

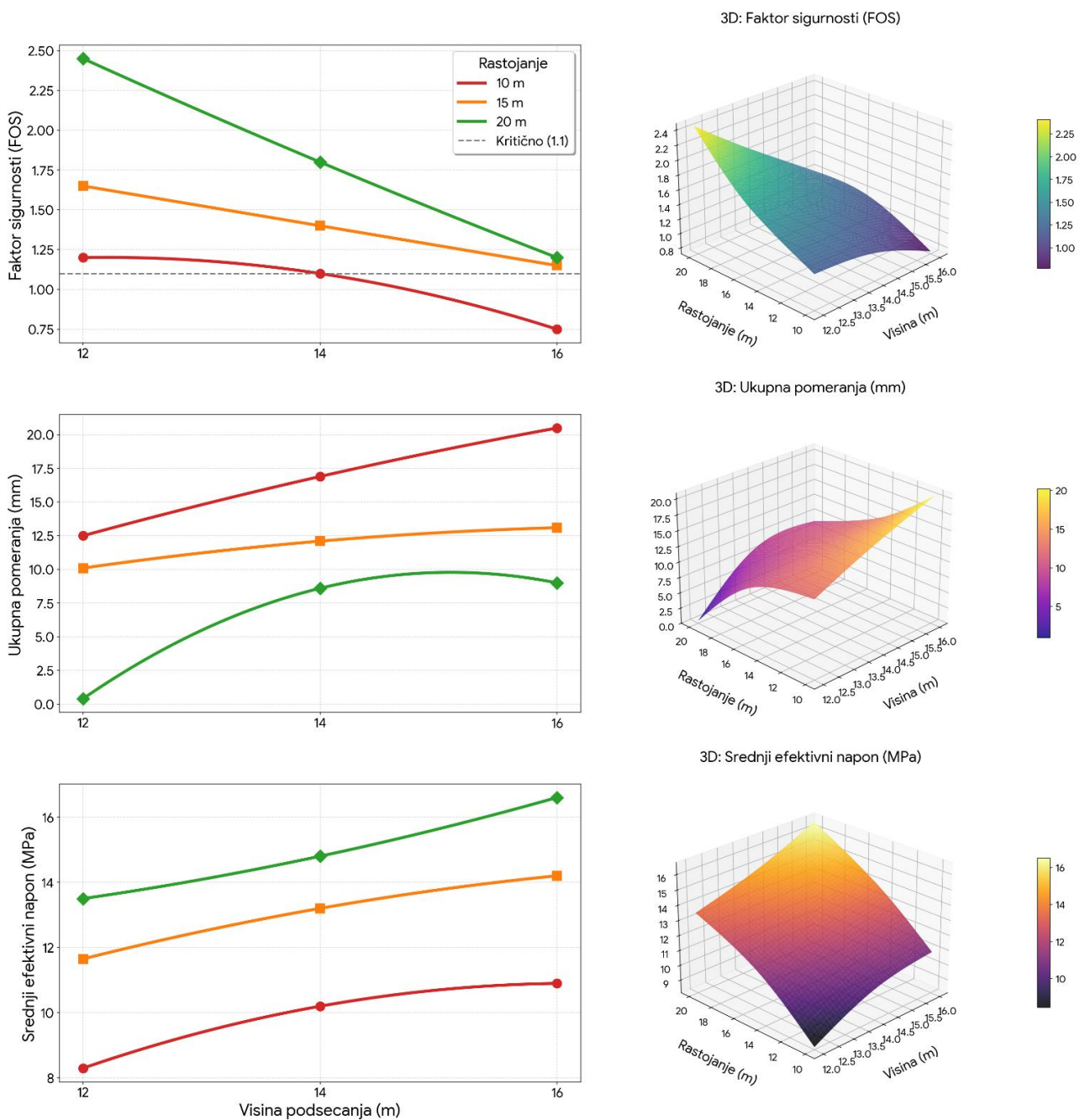
urušavanja bokova tranšeje. Za širinu stuba od 10 m stub između utovarnih komora zadržava faktor sigurnosti oko 1,5 – 1,7 iako je ušao u plastično stanje. I sa povećanom visinom podsecanja, utovarni hodnik ostaje potpuno bezbedan, što potvrđuje da rastojanje od 20 m od tranšeje služi kao odličan zaštitni stub. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 14 m prikazani su u tabeli 7-10.



Slika 7-11 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Tabela 7-10 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 14 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,1 (granično)	1,3-1,5 (zadovoljavajuće)	1,8 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	16,5 mm	11,9 mm	8 mm
Ukupna pomeranja	16,9 mm	12,1 mm	8,6 mm
Srednji efektivni napon	10,2 MPa	13,2 MPa	14,8 MPa
Status masiva	Plastifikacija stuba	Stabilno/očuvano jezgro	Stabilno jezgro
Kritična zona	Bokovi tranšeje	Bokovi tranšeje	Nožica tranšeje
Glavni rizik	Urušavanje bokova	Bokovi tranšeje na granici stabilnosti	Minimalan



Slika 7-12 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Visina podsecanja od 16 m predstavlja ekstremno rizičnu visinu i najkritičniji analizirani dizajn do sada. Rezultati pokazuju da je sistem ušao u fazu generalnog popuštanja materijala. Za razliku od modela sa 12 m i 14 m, ovde stub između utovarnih hodnika (10 m) više nema elastično jezgro. On je u potpunosti prešao u plastično stanje, što znači da se njegova nosivost oslanja isključivo na rezidualnu čvrstoću i ugrađenu podgradu. Iako je udaljen 20 m, i transportni hodnik je sada potpao pod zonu plastifikacije. Bokovi tranšeje postali su previše vitki i počinju da popuštaju pod vertikalnim pritiskom nadsloja. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m prikazani su u tabeli 7-11.

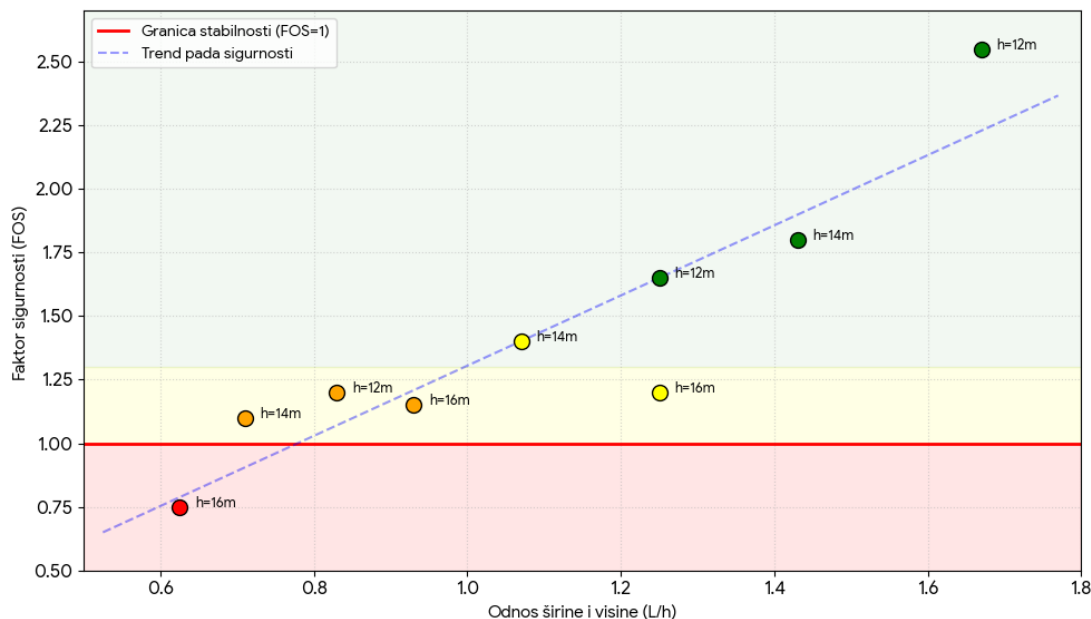
Tabela 7-11 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	< 0,8 (kolaps)	1,1-1,2 (granično)	1,2 (granično)
Vertikalna pomeranja	19,3 mm	11,5 mm	8,3 mm
Ukupna pomeranja	20,5 mm	13,1 mm	9 mm
Srednji efektivni napon	10,9 MPa	14,2 MPa	16,7 MPa
Status masiva	Zdrobljen stub	Plastifikacija jezgra stuba/rezidualna nosivost	Stabilno jezgro
Kritična zona	Stub između utovarnih komora	Bokovi tranšeje	Spoj tranšeje i hodnika
Glavni rizik	Potpuni lom	Lom bokova tranšeje	Povećan napon smicanja na spoju tranšeje i hodnika

Na osnovu svih varijanti za otkop širine 20 m, može se zaključiti da je visina podsecanja od 12 m najsigurnija. Povećanje širine stuba sa 10 m na 20 m rezultira smanjenjem ukupnih pomeranja za skoro 60%, što direktno potvrđuje da krutost stuba ograničava deformacije krovne ploče. Model sa širinom stuba od 10 m je neodrživ za visine podsecanja preko 12 m. Stub je previše vitak i dolazi do spajanja zona plastičnosti susednih prostorija. Model sa širinom stuba 15 m je povoljniji i do visine podsecanja od 14 m zahteva minimalni obim podgrađivanja. Model širine stuba 20 m pruža maksimalnu sigurnost u odnosu na druge varijante. Zbog povećanja visine tranšejnog podsecanja kritičnu tačku sistema predstavlja bok tranšeje, kao i spoj tranšeje i utovarnog hodnika gde su naprezanja veća, što vodi ka smanjenju faktora sigurnosti. Rastojanje transportnog hodnika u odnosu na tranšeju od 20 m je ispravno odabrano - hodnik ostaje bezbedan u svim varijantama osim kod stuba od 10 m na visini podsecanja od 16 m. Vrednosti faktora sigurnosti za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka prikazani su u tabeli 7-12.

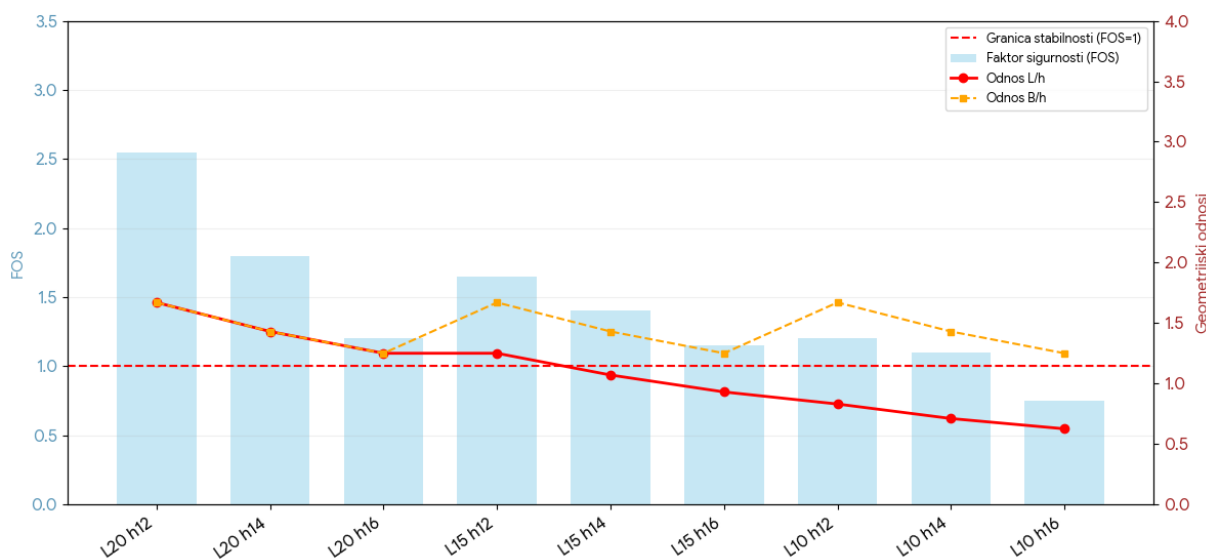
Tabela 7-12 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	12 m	1,67	1,67	> 2,5	veoma stabilno
20 m	14 m	1,43	1,43	1,8	Stabilno
20 m	16 m	1,25	1,25	1,2	granično
15 m	12 m	1,25	1,67	1,5 – 1,8	Stabilno
15 m	14 m	1,07	1,43	1,3 – 1,5	zadovoljavajuće
15 m	16 m	0,93	1,25	1,1 – 1,2	granično
10 m	12 m	0,83	1,67	1,2	granično
10 m	14 m	0,71	1,43	1,1	vranično/kritično
10 m	16 m	0,625	1,25	< 0,8	kolaps



Slika 7-13 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Korelacijom između faktora vitkosti stuba (odnos L/h) i mehaničkog odziva masiva potvrđeno je da širina stuba od 20 m pruža maksimalnu globalnu stabilnost, ali da visina od 16 m predstavlja kritični prag gde lokalni faktor sigurnosti pada ispod jedinične vrednosti, zahtevajući intenzivne mere osiguranja iskopa. Faktor sigurnosti opada nelinearno sa smanjenjem faktora vitkosti (slika 7-13). Sa odnosom L/h od 0,6 pri širini stuba od 10 m stub ulazi u fazu totalnog loma. Naponi smicanja prodiru kroz celo jezgro, čime stub gubi funkciju oslonca. Kod širine stuba od 20 m čak i pri ekstremnoj visini (16 m), vitkost od 1,21 omogućava zadržavanje elastičnog jezgra, što je neka vrsta geomehaničkog bedema koji štiti utovarni hodnik. I kod ove varijante manje vrednosti odnosa B/h ukazuju na trend smanjenja faktora sigurnosti uz trend rasta pri istim vrednostima B/h, ali sa povećanjem rastojanja između utovarnih komora. Promena faktora sigurnosti u odnosu na promene odnosa L/h i B/h prikazana je na slici 7-14.



Slika 7-14 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

#### 7.1.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model I

Predmet istraživanja kod ovog modela je stabilnost konstrukcije dna otkopnog bloka u funkciji variranja tri ključna geometrijska parametra: širine otkopnog bloka, visine tranšejnog podsecanja i rastojanja (širine zaštitnog stuba) između bočnih utovarnih komora. Cilj istraživanja je identifikacija kritičnih tačaka loma i određivanje optimalnog geometrijskog odnosa za bezbednu eksploataciju. Analiza je sprovedena kroz pet faza simulacije, od neporemećenog stanja masiva do finalne faze formiranog otkopa sa zarušenom rudom. Stabilnost je evaluirana kroz faktor sigurnosti, razvoj zona plastičnosti (prelazak iz elastičnog u plastično stanje), vertikalna i ukupna pomeranja, srednji efektivni napon, faktor vitkosti stuba i odnos širine i visine podsecanja.

Kod varijante sa širinom bloka od 10 m, visine tranšeja su limitirane na 6, 7 i 8 m. Analiza pokazuje da je stabilnost direktno ugrožena kod stubova širine 10 m već pri visini od 7 m, gde dolazi do "gnječenja" stuba usled preklapanja naponskih zona. Pri visini od 8 m, faktor sigurnosti pada ispod 1, što ukazuje na gubitak nosivosti.

Povećanje širine otkopnog bloka na 15 m praćeno je povećanjem visine podsecanja (9, 10,5 i 12 m). Stubovi širine 10 m u ovoj varijanti predstavljaju geotehnički alarmantno stanje jer faktor sigurnosti pada ispod jedinice na visini od 10,5 m, uz potpunu plastifikaciju jezgra. Konstrukcija sa stubom od 15 m (odnos  $L=B$ ) predstavlja granično održivu geometriju.

Pri daljem povećanju visina podsecanja (12, 14 i 16 m), jedino stub širine 20 m uspeva da zadrži stabilno elastično jezgro. Iako dolazi do lokalne plastifikacije na bokovima i nožici tranšeje, masiv ostaje globalno stabilan. Kod užih stubova ( $L=10$  m) na ovim visinama, zabeležena su intenzivna vertikalna pomeranja koja vode ka totalnom kolapsu sistema.

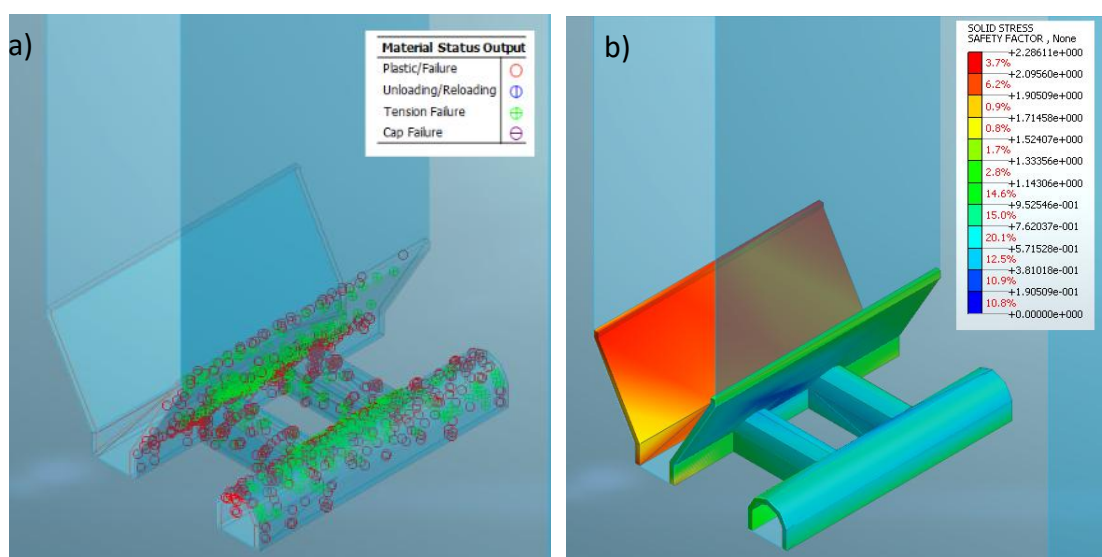
Širina stuba od 10 m predstavlja geometrijski limit jer je neodrživa za visine podsecanja preko 9 m bez pojačanih mera osiguranja prostorija i otkopa. Lom se uvek inicira u nožici tranšeje i na spojevima tranšeje i utovarnih komora, gde su gradijenti napona najveći, a zatim se progresivno širi ka krunici. Kao garant globalne stabilnosti sistema pri varijabilnim visinama podsecanja nameće se primena zaštitnog stuba čija je širina najmanje 30% veća od širine samog otkopa. Stub širine 20 m menja mehanizam prenosa opterećenja, čineći sistem imunim na štetne uticaje povećane visine podsecanja do 12 m, dok na ekstremnim visinama (16 m) služi kao geomehanički bedem koji štiti utovarni hodnik.

Numerička simulacija pokazuje nelinearnu korelaciju između faktora vitkosti i mehaničkog odziva masiva. Pri vrednostima  $L/h > 2$ , masivno elastično jezgro stuba uspešno nosi teret nadsloja i to je zona visoke sigurnosti. Kod vrednosti faktora vitkosti  $1,5 < L/h < 2$  dolazi do progresivnog sužavanja elastičnog jezgra, ali sistem i dalje ostaje stabilan. Za vrednosti  $L/h < 1,5$  dolazi do spajanje zona smicanja, gubitka nosivosti jezgra i povećanog rizika od loma, pa se ova zona može smatrati zonom granične stabilnosti. Zonu loma predstavlja konstrukcija za koju je  $L/h < 1$ , gde dolazi do spajanje zona smicanja sa obe strane stuba i plastifikacije celokupnog jezgra. Međutim, kod varijante sa širinom otkopa od 20 m numerički modeli pokazuju specifično ponašanje masiva. Pri širini stuba od 20 m i visini od 12 m, odnos  $L/h$  iznosi 1,67. Stub širine 15 m na visini od 9 m ima identičan faktor vitkosti (1,67), ali model pokazuje da je stub od 20 m stabilniji (tabela 7-13). Ovo se može objasniti efektom apsolutne širine stuba, pri čemu veća širina (20 m) pruža bolju horizontalnu krutost celom sistemu. Takođe, zbog većeg rastojanja, sve prostorije se ponašaju kao izolovani objekti. Naponska polja formirana oko jedne prostorije ne interferiraju sa naponskim poljima susedne prostorije. Čak i ako je pojedinačni faktor vitkosti nizak, ne dolazi do destruktivnog spajanja zona smicanja koje je karakteristično za uže varijante. Zone plastifikacije i faktora sigurnosti za jednu od varijanti su prikazani na slici 7-15.

Tabela 7-13 Uporedni odnos faktora sigurnosti pri identičnim vrednostima odnosa L/h

Varijanta	Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos	Faktor sigurnosti (FOS)	Status masiva
I	10 m	6 m	1,67	1,4	zadovoljavajuće
II	15 m	9 m	1,67	1,4 – 1,5	stabilno
III	20 m	12 m	1,67	> 2,5	veoma stabilno

Povećanje apsolutne širine stuba, odnosno rastojanja između utovarnih komora sa 10 m na 20 m linearno povećava zapreminu masiva, ali nelinearno povećava njegovu otpornost na smicanje. Kod širine od 20 m, jezgro stuba je toliko masivno da lokalna plastifikacija ivica (koja bi kod stuba od 10 m izazvala kolaps) ovde predstavlja zanemarljiv procenat ukupne nosive površine. Na osnovu modela treće varijante može se zaključiti da apsolutna širina stuba (L) ima primarni uticaj na globalnu stabilnost u odnosu na relativnu vitkost (L/h).



Slika 7-15 Varijanta Modela I sa rastojanjem između utovarnih komora 15 m i visinom tranšeje 9 m  
a) Zone potencijalnog loma i koncentracije napona; b) Faktor sigurnosti

Posmatranje parametra B/h otkriva da, kako se taj odnos smanjuje ka vrednosti 1,25, vertikalna pomeranja rastu. To ukazuje, da zbog prevelike visine bokova koji ne mogu da drže svod, globalna stabilnost sistema opada. Prva i druga varijanta pri odnosu 1,67 (npr. 10/6 i 15/9) pokazuju slično ponašanje masiva, što znači da je stabilnost skalabilna do određene granice. Međutim, kod treće varijante na istom odnosu (20/12), apsolutne dimenzije postaju veće, pa uprkos istom koeficijentu, naponi u nožicama rastu eksponencijalno. Analizom je ustanovljeno da je optimalni opseg za bezbednu eksploataciju odnos B/h > 1,5. Pad ovog koeficijenta ispod 1,3, naročito kod velikih širina otkopa (B=20m), transformiše sistem iz stabilne konstrukcije u visokorizičnu zonu gde su primarni uzroci nestabilnosti izvijanje bokova i popuštanje nožica tranšeje.

Na osnovu prethodne tvrdnje može se odrediti maksimalna visina podsecanja za bilo koju širinu otkopa po formuli:

$$h_{max} = \frac{B}{1,5} \quad (28)$$

gde su:

$h_{max}$  - maksimalna visina dna bloka;  
B – širina otkopnog bloka (tranšeje)

Kod sve tri varijante odnos  $B/h$  od 1,67 daje zadovoljavajući faktor sigurnosti. To su tačke sistema gde je geometrija u ravnoteži sa naponima. Čim odnos  $B/h$  padne ispod 1,43, faktor sigurnosti se približava jedinici. Kod širih otkopa (treća varijanta) sistem duže trpi ovaj pad zbog veće apsolutne mase stuba, ali deformacije postaju nelinearne. Za prvu i drugu varijantu, odnos  $B/h$  od 1,25 znači siguran lom ( $FOS < 1$ ). U trećoj varijanti, zahvaljujući većoj širini stuba od 20 m, sistem uspeva da opstane čak i na tom odnosu, ali uz povećane deformacije i faktor sigurnosti na granici stabilnosti.

Na osnovu numeričkih podataka iz analize, za konkretan slučaj, zavisnost faktora sigurnosti ( $FOS$ ) od odnosa  $B/h$  (širina otkopa/visina podsecanja) prati nelinearnu, logaritamsku putanju. Iz podataka se vidi da stabilnost eksponencijalno opada kada odnos  $B/h$  padne ispod 1,5, pa bi empirijska formula izvedena iz modela imala oblik:

$$FOS = 2,5 \cdot \ln(B/h) + 0,4 \quad (29)$$

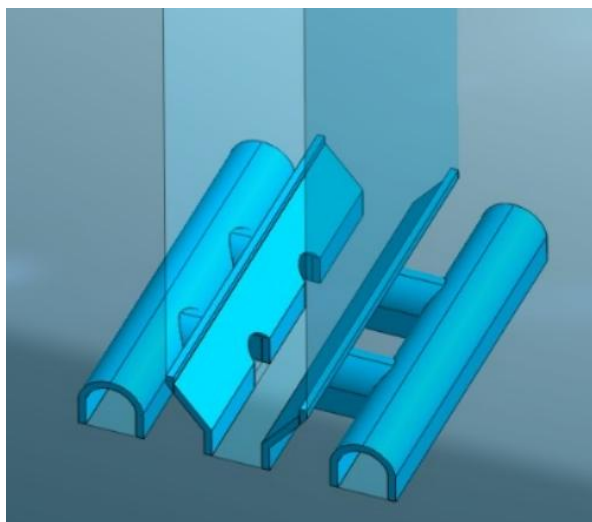
gde su:

- $B/h$  - odnos širine otkopa i visine podsecanja ( $B/h > 1,25$  – ispod ovih vrednosti dolazi do loma);
- 2,5 i 0,4 - koeficijenti specifični za određene fizičko-mehaničke karakteristike stenske mase.

Koeficijenti iz formule su dobijeni regresionom analizom gde koeficijent  $a$  (2,5) predstavlja brzinu kojom masiv gubi stabilnost, a koeficijent  $b$  (0,4) je konstanta pomeraja koja zavisi od same čvrstoće stene i kohezije u konkretnom slučaju. Visok koeficijent  $a$  govori da je masiv izuzetno osetljiv na geometriju. Mala promena visine podsecanja može izazvati nagli pad faktora sigurnosti. Nizak koeficijent  $b$  govori o tome da masiv ima relativno nisku rezidualnu čvrstoću. Čim se naruši idealna geometrija, sama stena nema dovoljno unutrašnje snage da drži napone bez pomoći podgrade.

## 7.2. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model II

Drugi model razmatra konstrukciju dna bloka sa dvostranim bočnim utovarom rude, sa utovarnim komorama koje su postavljene simetrično jedna naspram druge, na istom nivou sa nivoom podsecanja (slika 7-16). Geometrijski parametri dna bloka predstavljaju promenljive veličine u ovom modelu, a to su rastojanje između bočnih utovarnih komora  $L$  (10, 15 i 20 m), širina otkopnog bloka  $B$  (10, 15 i 20 m) i visina podsecanja  $h$ , koja se menja u zavisnosti od ugla nagiba stranica tranšeje i širine otkopnog bloka. Analizirane su sve kombinacije ovih parametara, što je dalo ukupan broj od 27 modifikacija.



Slika 7-16 Konstrukcija dna bloka sa dvostranim bočnim utovarom rude

### 7.2.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m

Prva varijanta modela II razmatra slučaj sa širinom bloka od 10 m, rastojanjima između utovarnih komora 10, 15 i 20 m sa obe strane tranšeje i visina tranšeje 6, 7 i 8 m, što daje ukupno devet različitih modifikacija. Visine tranšeja su određene na isti način kao i u prethodnom modelu.

Varijanta sa širinom otkopa od 10 m i istom širinom stuba između utovarnih komora (odnos 1:1) pokazuje najveću osetljivost na promenu visine podsecanja. Pri manjim visinama podsecanja (6 i 7 m), zone plastifikacije počinju da se šire od ivica tranšeje ka unutrašnjosti stuba i s obzirom na to da još uvek nisu toliko izražene, sistem se nalazi na donjoj granici stabilnosti. Daljim povećanjem visine podsecanja zone plastifikacije na bokovima tranšeje postaju izraženije sa tendencijom širenja ka stubu, što vodi ka padu faktora sigurnosti i smanjuju stabilnosti. Kod varijante sa širinom stuba od 10 m, visina podsecanja od 8 m predstavlja granicu stabilnosti ispod koje bi bezbednost izvođenja radova na otkopavanju bila dovedena u pitanje.

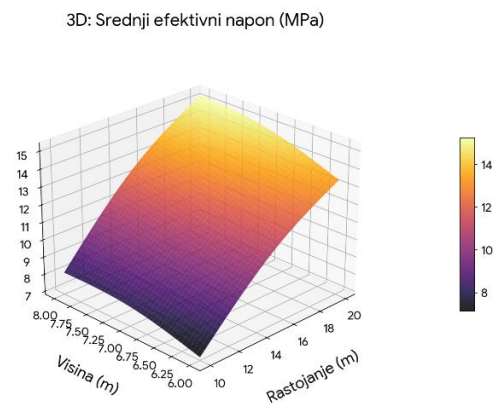
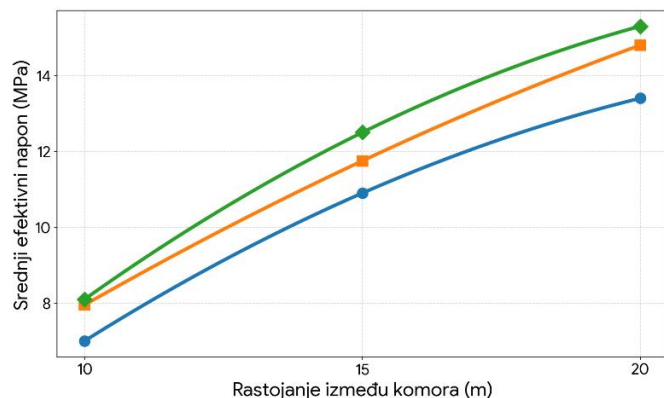
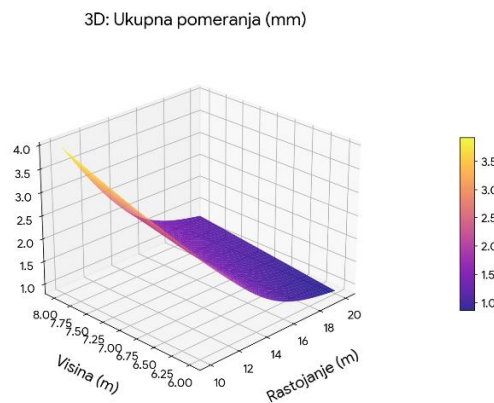
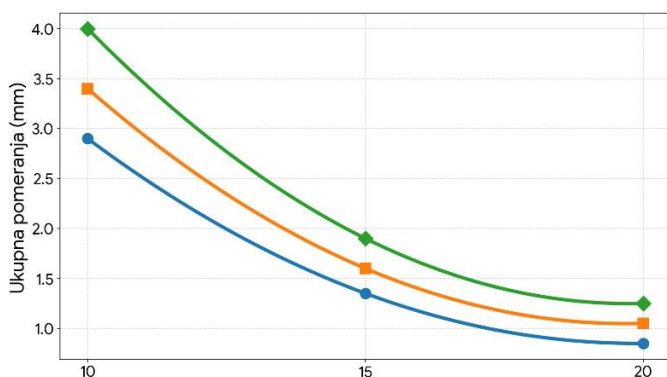
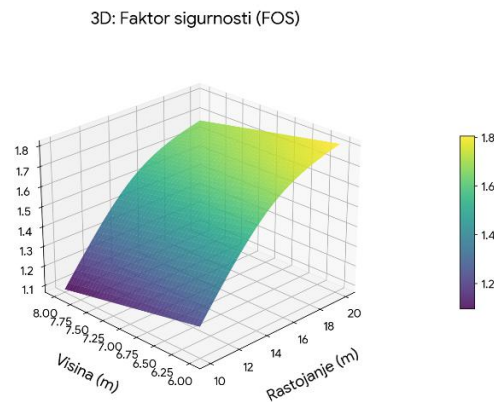
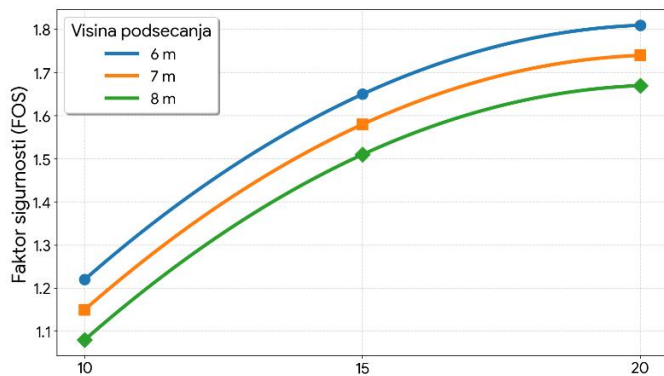
Povećanjem širine stuba, odnosno rastojanja između utovarnih komora na 15 m, faktor sigurnosti raste sa graničnih vrednosti do vrednosti na kojima je sistem stabilan. Maksimalna pomeranja su redukovana za više od 50%. Dok je kod stuba od 10 m sa visinom dna bloka od 8 m pomeranje iznosilo 4 mm, ovde je svedeno na svega 1,2 mm. Elastično jezgro stuba ostaje netaknuto čak i na visini od 8 m, što garantuje dugotrajnu stabilnost bez potrebe za intenzivnim podgrađivanjem.

Analiza za najveće rastojanje između utovarnih komora (20 m), pri svim ispitanim visinama podsecanja pokazuje visoku stabilnost sistema. Pri ovoj konstrukciji, stub je izrazito masivan u odnosu na otkop, što rezultira zanemarljivim deformacijama. Čak i na visini od 8 m, faktor sigurnosti (1,67) je veći nego kod stuba od 10 m na najnižoj visini od 6 m (1,22). To znači da širina stuba ima veći uticaj na stabilnost nego visina podsecanja. Maksimalna pomeranja od oko 1 mm su praktično na nivou elastičnih deformacija stene, što eliminiše rizik od odrona u krovu. Središnji deo stuba (jezgro) je potpuno neopterećen u smislu plastifikacije. Naponi su koncentrisani samo na kontaktima sa hodnicima, dok veći deo unutrašnjosti stuba miruje. Na slici 7-17 prikazani su grafici promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora, dok su na slici 7-18 prikazani grafici promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja.

Pri visini podsecanja od 6 m (tabela 7-14) stubovi između utovarnih prostorija imaju najveću krutost. Čak i pri rastojanju od 10 m, faktor sigurnosti je najviši u poređenju sa ostalim visinama. Vertikalna i ukupna pomeranja su minimalna. Naponsko stanje u jezgru stuba je stabilno, bez značajnijih zona plastifikacije.

Tabela 7-14 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 6 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,22 (granično)	1,65 (stabilno)	1,81 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	2,7 mm	1,26 mm	0,74 mm
Ukupna pomeranja	2,9 mm	1,35 mm	0,84 mm
Srednji efektivni napon	7,02 MPa	10,92 MPa	13,36 MPa
Status masiva	Delimično plastifikovan	Elastično	Stabilno elastično
Kritična zona	Ivice stuba i krov	Ivice bokova	Uglovi komora
Glavni rizik	Lom po ivicama	Lokalno odronjavanje	Nema značajnog rizika



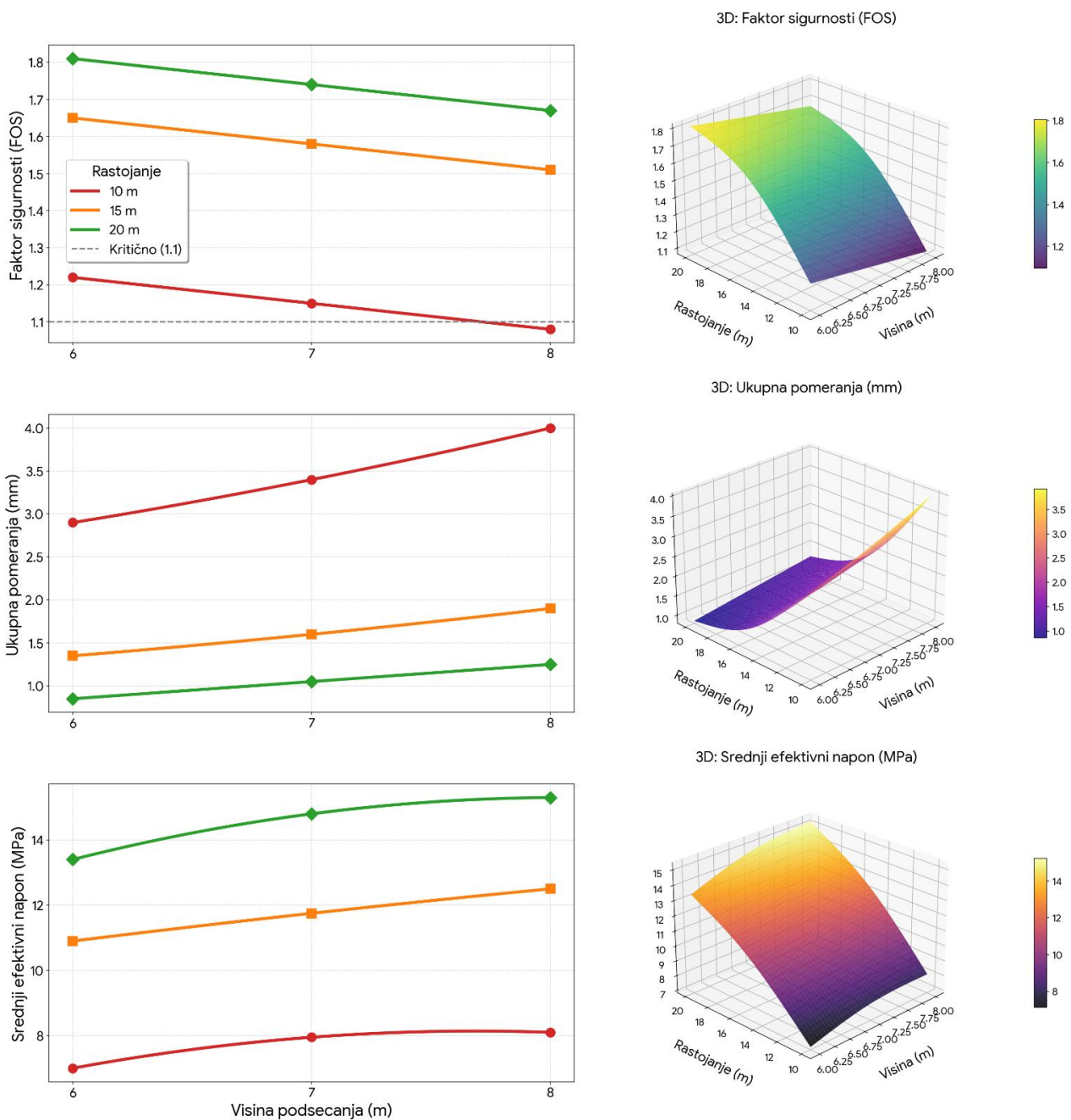
Slika 7-17 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Povećanje visine podsecanja za 1 m dovodi do blagog širenja zona plastičnog popuštanja na ivicama tranšeje. Srednji efektivni napon raste, a jezgro stuba počinje da trpi veće opterećenje, naročito kod užih stubova (10 m). Rezultati simulacije za visinu podsecanja 7 m prikazani su u tabeli 7-15.

Najnepovoljnija geometrija je pri visini podsecanja od 8 m. Glavni rizik se ogleda u mogućoj pojavi drobljenja stuba i nekontrolisanog urušavanja krovine zbog velike visine tranšeje i relativno male širine potpornih elemenata. Vertikalna pomeranja direktno zavise od visine podsecanja. Sa povećanjem visine na 8 m, krovina trpi veća ugibanja. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 8 m prikazani su u tabeli 7-16.

Tabela 7-15 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 7 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,15 (granično)	1,58 (stabilno)	1,74 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	3,1 mm	1,4 mm	0,9 mm
Ukupna pomeranja	3,4 mm	1,6 mm	1,05 mm
Srednji efektivni napon	8 MPa	11,72 MPa	14,95 MPa
Status masiva	Širenje plastifikovanih zona	Elasto-plastično jezgro	Minimalna plastifikacija
Kritična zona	Ivice i bokovi tranšeje	Ivice tranšeje	Uglovi komora
Glavni rizik	Lom po ivicama	Lokalno odronjavanje	Nema značajnog rizika



Slika 7-18 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Tabela 7-16 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 8 m

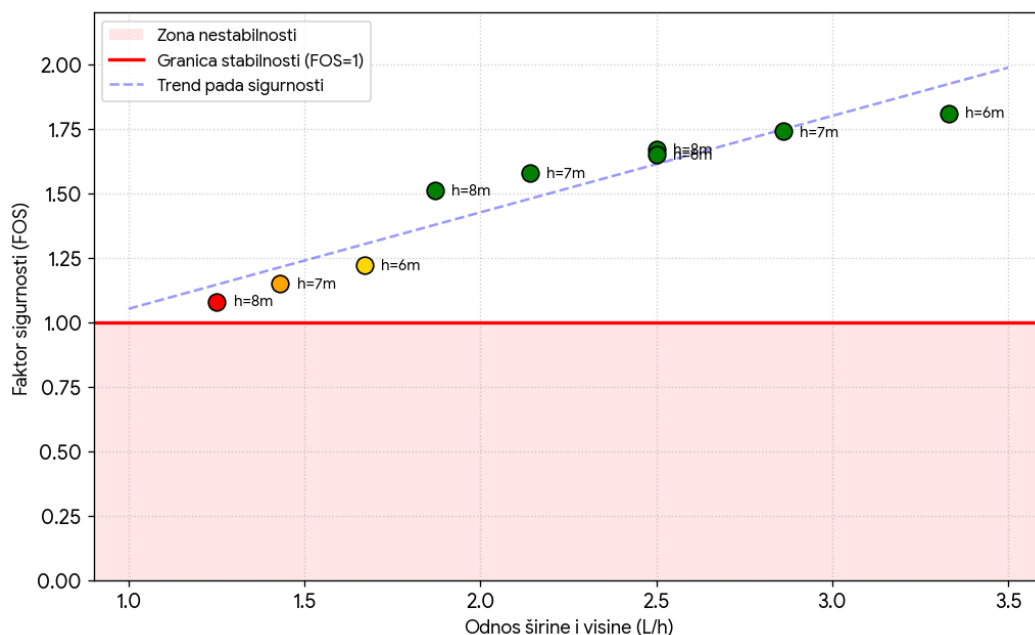
Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,08 (granično/kritično)	1,51 (stabilno)	1,67 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	3,84 mm	1,75 mm	1,1 mm
Ukupna pomeranja	4,0 mm	1,9 mm	1,25 mm
Srednji efektivni napon	8,11 MPa	12,52 MPa	15,25 MPa
Status masiva	Izražena plastifikacija	Elasto-plastično jezgro	Minimalna plastifikacija
Kritična zona	Bokovi tranšeje	Ivice i bokovi tranšeje	Uglovi komora
Glavni rizik	Lom bokova tranšeje	Lokalno odronjavanje	Nema značajnog rizika

Rastojanje između utovarnih komora ima eksponencijalno veći uticaj na stabilnost sistema nego visina podsecanja. Povećanje širine sa 10 na 15 m drastično popravlja stanje, dok varijanta od 20 m ostaje visoko stabilna čak i pri najnepovoljnijim visinama. Varijanta sa stubom od 10 m je visokorizična i praktično neupotrebljiva na visinama podsecanja preko 7 m bez pojačane podgrade. Varijanta sa stubom od 15 m predstavlja takođe prihvatljivo rešenje – stabilna je na svim visinama podsecanja. Varijanta sa stubom od 20 m je najsigurnija opcija kod koje su pomeranja na nivou elastičnih deformacija stene, što eliminiše rizik od odrona. Sa smanjenjem širine stuba i povećanjem visine podsecanja, naponi se premeštaju sa ivica u samo središte (jezgro) stuba. Kod stabilnih varijanti jezgro miruje, dok kod kritičnih dolazi do njegovog slabljenja. Vrednosti faktora sigurnosti za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka prikazani su u tabeli 7-17, dok je grafički prikaz promene faktora sigurnosti u funkciji odnosa L/h predstavljen na slici 7-19.

Tabela 7-17 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

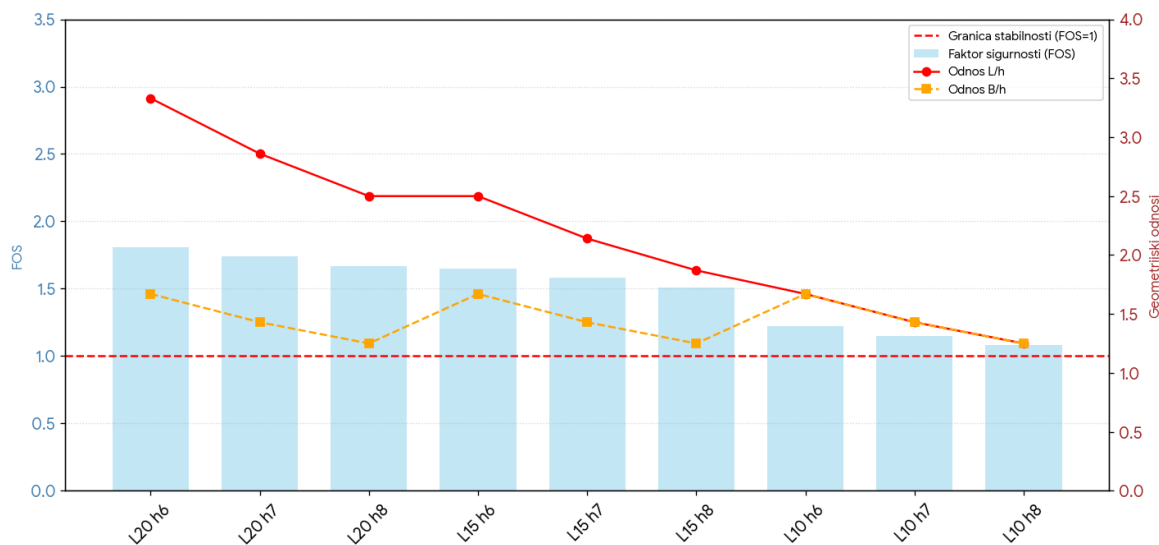
Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	6 m	3,33	1,67	1,81	Stabilno
20 m	7 m	2,86	1,43	1,74	Stabilno
20 m	8 m	2,50	1,25	1,67	Stabilno
15 m	6 m	2,50	1,67	1,65	Stabilno
15 m	7 m	2,14	1,43	1,58	Stabilno
15 m	8 m	1,87	1,25	1,51	Stabilno
10 m	6 m	1,67	1,67	1,22	Granično
10 m	7 m	1,43	1,43	1,15	Granično
10 m	8 m	1,25	1,25	1,08	Granično /Kritično

Za vrednosti koeficijenta  $L/h > 1,8$  stubovi su kruti i preuzimaju opterećenje krovine bez značajnih deformacija jezgra. Faktor sigurnosti je u zoni maksimalne sigurnosti. Čim odnos  $L/h$  padne ispod 1,8, faktor sigurnosti opada, ali je sigurnost i dalje zadovoljavajuća. Za vrednosti  $L/h < 1,4$  stub postaje vitak, što dovodi do drastičnog pada faktora sigurnosti i širenja zona plastičnosti kroz čitav presek stuba. To je najočiglednije za rastojanje između utovarnih komora od 10 m i visine podsecanja od 8 m, gde faktor sigurnosti pada blizu jedinične vrednosti. Ukupna pomeranja su najveća u varijantama gde je visina podsecanja maksimalna, a širina stuba minimalna (odnos  $L/h$  najmanji). Srednji efektivni napon raste sa smanjenjem vrednosti  $L/h$ .



Slika 7-19 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Kod užih stubova, naponsko stanje se koncentriše u centralnom delu, što može dovesti do loma masiva. Veće vrednosti odnosa B/h prati veći faktor sigurnosti, pri čemu kod istih vrednosti ovog koeficijenta veće rastojanje između utovarnih komora vodi ka stabilnijem sistemu. Promene faktora sigurnosti u odnosu na koeficijente L/h i B/h prikazani su na slici 7-20.



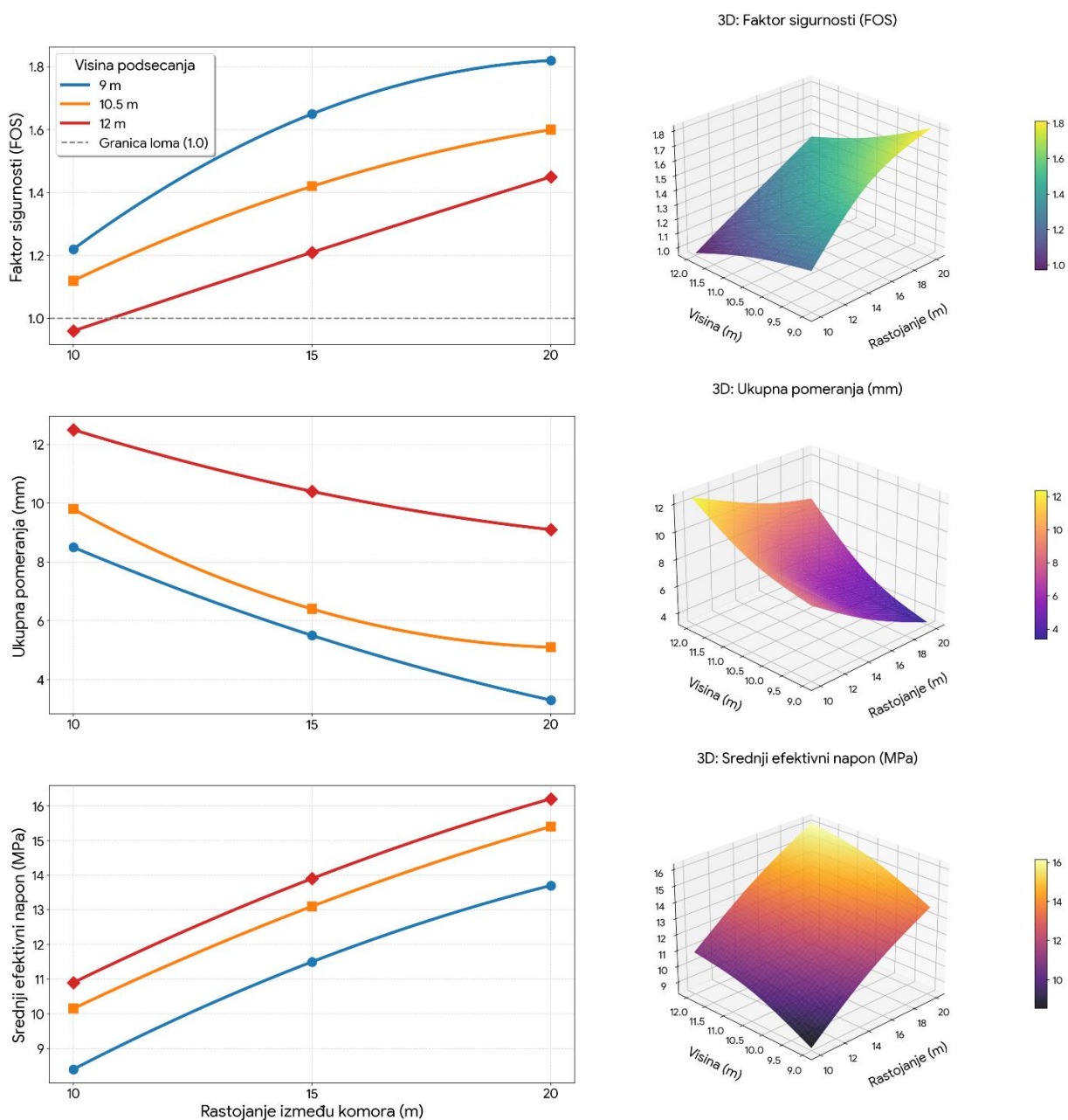
Slika 7-20 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

### 7.2.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m

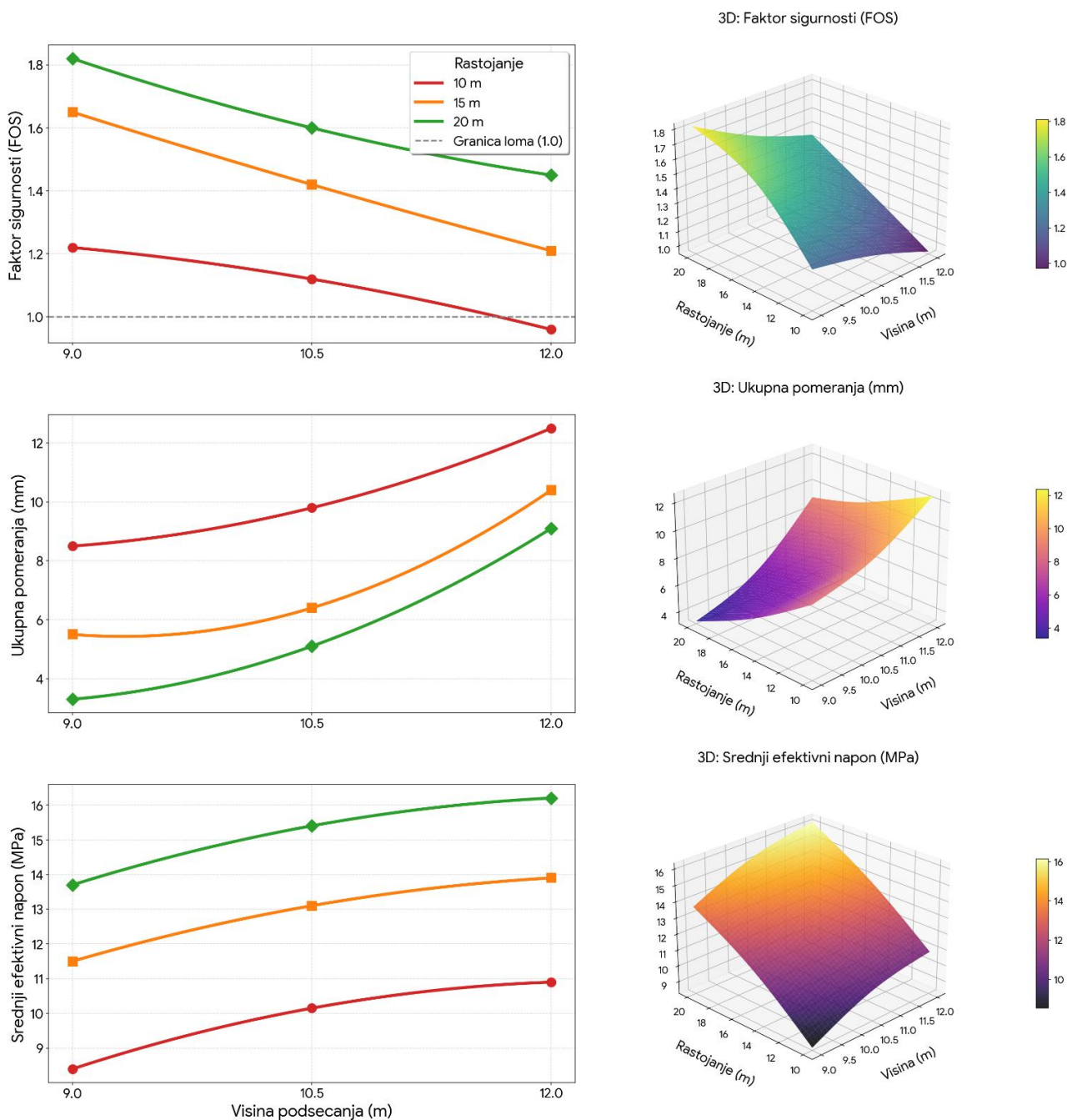
Druga varijanta ovog modela razmatra konstrukciju dna bloka sa širinom od 15 m i rastojanjima između utovarnih komora 10,15 i 20 m. S obzirom na to da je širina bloka povećana, to je uticalo i na promene visine podsecanja koje u ovom slučaju iznose 9, 10,5 i 12 m.

Rastojanje između utovarnih komora od 10 m predstavlja najveći rizik sa aspekta stabilnosti. Ovo rastojanje pokazuje najveću interakciju naponskih polja između prostorija. Kod najmanje visine podsecanja (9 m) faktor sigurnosti je u zoni granične stabilnosti (približno 1,22). Naponi su koncentrisani na uglovima, a masiv je delimično plastifikovan. Sa povećanjem visine podsecanja na 10,5 m primećuje se značajno širenje zona plastifikacije, faktor sigurnosti opada, a pomeranja u krovini utovarnih komora rastu. Sa daljim povećanjem visine podsecanja (12 m) zone plastifikacije između susednih komora se spajaju, a pomeranja dostižu maksimalne vrednosti za ovaj set parametara.

Povećanje rastojanja između komora na 15 m značajno popravlja stabilnost. Pri visini podsecanja od 9 m sistem je stabilan, dok su naponi u stubu u zoni elastičnosti. Sa povećanjem visine podsecanja na 10,5 m dolazi do blage koncentracije napona, ali bez opasnosti od spajanja plastičnih zona. Za visinu podsecanja od 12 m sistem je stabilniji nego kod širine od 10 m, ali se pojavljuju znatna pomeranja u gornjem delu tranšeje.



Slika 7-21 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja



Slika 7-22 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Najveća stabilnost se ostvaruje pri rastojanju između utovarnih komora od 20 m. U ovoj geometriji široki stubovi omogućavaju bolju stabilnost i pri većim visinama podsecanja. Stubovi trpe opterećenje bez znakova popuštanja (faktor sigurnosti je stabilan). Pri visini podsecanja od 9 m koncentracija napona je lokalizovana na samim ivicama utovarnih komora. Jezgro stuba ostaje u elastičnoj zoni, što znači da stub u potpunosti zadržava svoju nosivost. Povećanje visine podsecanja dovodi do uočljive promene u naponskom stanju. Zone povišenog napona počinju dublje da prodiru u bokove stuba. Plastifikacija se širi vertikalno iznad podsečenog dela i zdravo jezgro stuba se blago smanjuje. Pri visini podsecanja od 12 m primećuje se intenzivnije naprezanje stuba. Plastične zone iznad dve susedne komore počinju da se šire jedna ka drugoj, ali se ne spajaju u potpunosti zbog velike širine stuba. Na slikama 7-21 i 7-22 prikazani su grafici promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora i visina podsecanja.

Posmatrano sa aspekta visine podsecanja, pri najmanjoj visini (9 m) i pri najmanjem razmaku od 10 m, faktor sigurnosti je na donjoj granici prihvatljivosti, uz pojavu plastifikacije na ivicama stuba. Povećanjem razmaka na 15 m i 20 m, masiv prelazi u potpuno elastično stanje, čime se rizik od loma drastično smanjuje. Vrednosti parametara stabilnosti za visinu podsecanja 9 m dati su u tabeli 7-18

Tabela 7-18 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 9 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,22 (granično)	1,65 (stabilno)	1,81 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	8,3 mm	4,3 mm	3 mm
Ukupna pomeranja	8,5 mm	5,5 mm	3,3 mm
Srednji efektivni napon	8,40 MPa	11,48 MPa	13,71 MPa
Status masiva	Delimično plastifikovan	Elastično	Stabilno elastično
Kritična zona	Ivice stuba i krov	Ivice bokova	Uglovi komora
Glavni rizik	Lom po ivicama	Lokalno odronjavanje	Nema značajnog rizika

Povećanjem visine podsecanja za 1,5 m, pri najmanjem rastojanju (10 m), stubovi između utovarnih komora trpe najveći pritisak. Najveća pomeranja su u krovini direktno iznad ose stuba, a faktor sigurnosti je nizak. Kako se povećava širina stuba, površina oslonca stuba se povećava, u relativnom smislu, pa su ukupna pomeranja ujednačenija i manjeg intenziteta nego kod užih stubova. Povećanjem rastojanja na 20 m, zona plastifikacije se povlači ka ivicama komora, dok jezgro stuba ostaje u elastičnoj zoni. Faktor sigurnosti je značajnije veći, što garantuje stabilniju konstrukciju. Parametri stabilnosti za visinu podsecanja 10,5 m prikazani su u tabeli 7-19.

Tabela 7-19 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 10,5 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,12	1,42	1,60
Vertikalna pomeranja	9,1 mm	5,2 mm	4,5 mm
Ukupna pomeranja	9,8 mm	6,4 mm	5,1 mm
Srednji efektivni napon	10,15 MPa	13,12 MPa	15,38 MPa
Status masiva	Plastifikovan (krov)	Delimično plastifikovan	Elastično
Kritična zona	Ceo krovni svod	Uglovi i bokovi stuba	Donji uglovi komora
Glavni rizik	Početak urušavanja	Lokalna nestabilnost	Minimalan rizik

Kod razmaka od 10 m, povećanje visine sa 9 m na 12 m dovodi sistem iz stabilnog (FOS=1,22) u stanje loma (FOS<1). Na visini podsecanja od 12 m jedino stub širine 20 m ostaje relativno siguran. Kod visine od 12 m i razmaka od 10 m, ukupno pomeranje skače na preko 10 mm. Ovo je jasan indikator nestabilnosti, jer numerička konvergencija počinje da popušta pred tečenjem materijala. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m prikazani su u tabeli 7-20.

Tabela 7-20 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

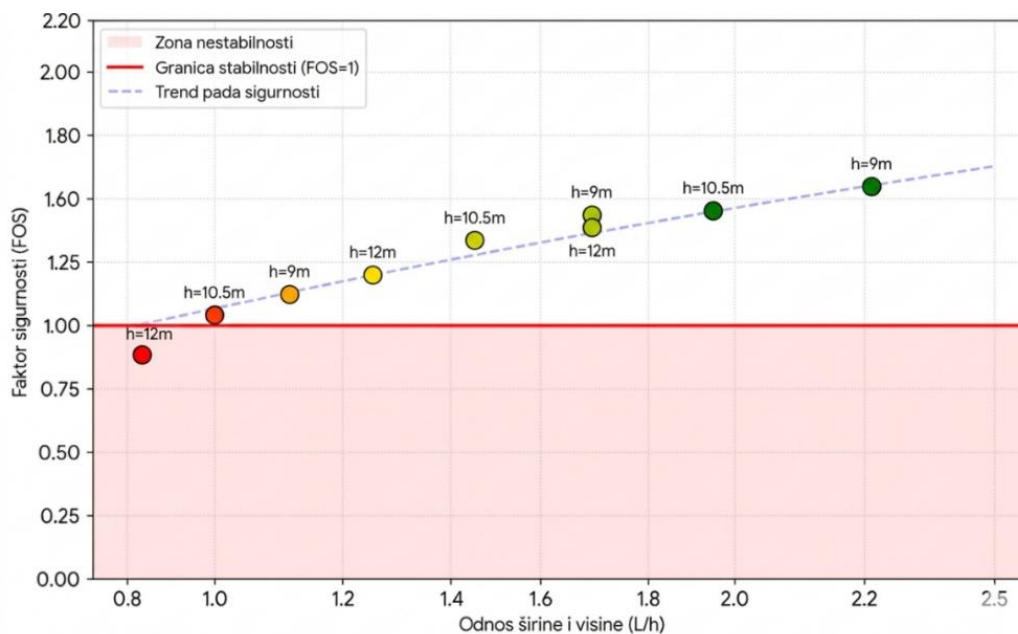
Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	0,96 (nestabilno)	1,21 (granično)	1,45 (zadovoljavajuće)
Vertikalna pomeranja	11,5 mm	8,8 mm	8,2 mm
Ukupna pomeranja	12,8 mm	10,4 mm	9,1 mm
Srednji efektivni napon	10,92 MPa	13,94 MPa	16,21 MPa
Status masiva	Potpuni lom (Failure)	Značajna plastifikacija	Delimično plastifikovan
Kritična zona	Jezgro stuba	Gornja trećina stuba	Ivice krovine
Glavni rizik	Gubitak nosivosti	Smicanje po bokovima	Umereni otklon krovine

Rastojanje između utovarnih komora od 10 m predstavlja najveći rizik. Sa povećanjem visine podsecanja na 12 m, faktor sigurnosti pada na 0,96, što označava potpuni lom i gubitak nosivosti jezgra stuba. Najveća stabilnost se postiže pri razmaku od 20 m gde i pri maksimalnoj visini podsecanja (12 m), sistem ostaje relativno siguran (FOS= 1,45), a jezgro stuba zadržava elastična svojstva. Povećanje visine podsecanja (sa 9 na 12 m) direktno uzrokuje pad faktora sigurnosti, povećanje deformacija i širenje zona plastifikacije. Sa povećanjem opterećenja, odnosno rasta napona, masiv prelazi iz potpuno elastičnog stanja u stanje značajne plastifikacije i eventualnog loma.

Stabilnost primarno zavisi od odnosa L/h. Kada ovaj koeficijent padne ispod 1,1, faktor sigurnosti se približava kritičnoj vrednosti, kao što je slučaj kod varijanti sa stubom 10 m širine. Modeli jasno pokazuju da vitki stubovi gube nosivost i prelaze u plastično stanje. Svako povećanje visine podsecanja mora biti praćeno linearnim povećanjem rastojanja između utovarnih komora kako bi se održao povoljan faktor sigurnosti. Kritičnu zonu predstavlja visina podsecanja od 12 m jer čak i pri srednjem rastojanju (15 m) sistem se nalazi u zoni granične i kritične stabilnosti (L/h=1,25). Analiza pokazuje da je za siguran rad neophodno ostvariti odnos L/h>1,5 pri kojima se dobijaju povoljne vrednosti faktora sigurnosti. Faktor sigurnosti za različite vrednosti odnosa L/h i B/h prikazan je u tabeli 7-21, dok slike 7-23 i 7-24 prikazuju funkcionalnu zavisnost faktora sigurnosti i ovih geometrijskih odnosa.

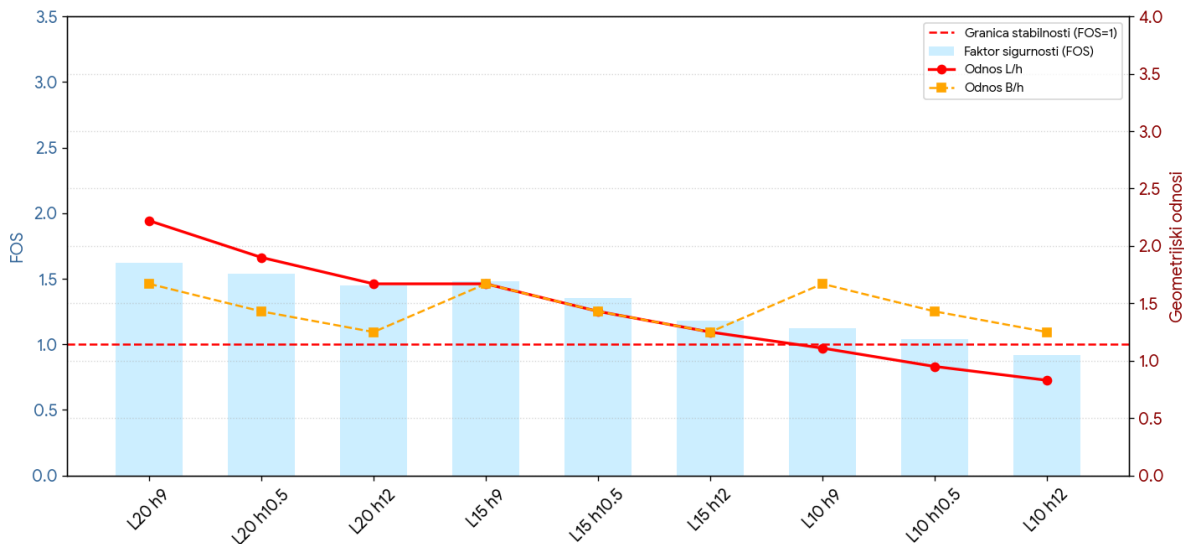
Tabela 7-21 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	9 m	2,22	1,67	1,62	Stabilno
20 m	10,5 m	1,90	1,43	1,54	Stabilno
20 m	12 m	1,67	1,25	1,45	Zadovoljavajuće
15 m	9 m	1,67	1,67	1,48	Zadovoljavajuće
15 m	10,5 m	1,43	1,43	1,35	Zadovoljavajuće
15 m	12 m	1,25	1,25	1,18	Granično
10 m	9 m	1,11	1,67	1,12	Granično
10 m	10,5 m	0,95	1,43	1,04	Granično /Kritično
10 m	12 m	0,83	1,25	0,92	Nestabilno



Slika 7-23 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Najveća vrednost odnosa B/h (1,67), ukazuje na najveća relativna pomeranja u krovini, ali su naponi u stubovima u granicama dozvoljenog. Smanjenjem ovog odnosa (1,43), krovina postaje kruća, ali se opterećenje prenosi na stubove koji postaju usko grlo stabilnosti. Kod najmanjih vrednosti (1,25), iako je otkop relativno uži u odnosu na visinu za razliku od prethodnih varijanti, to ne pomaže očuvanju stabilnosti jer stubovi ne mogu da izdrže vertikalni pritisak masiva.

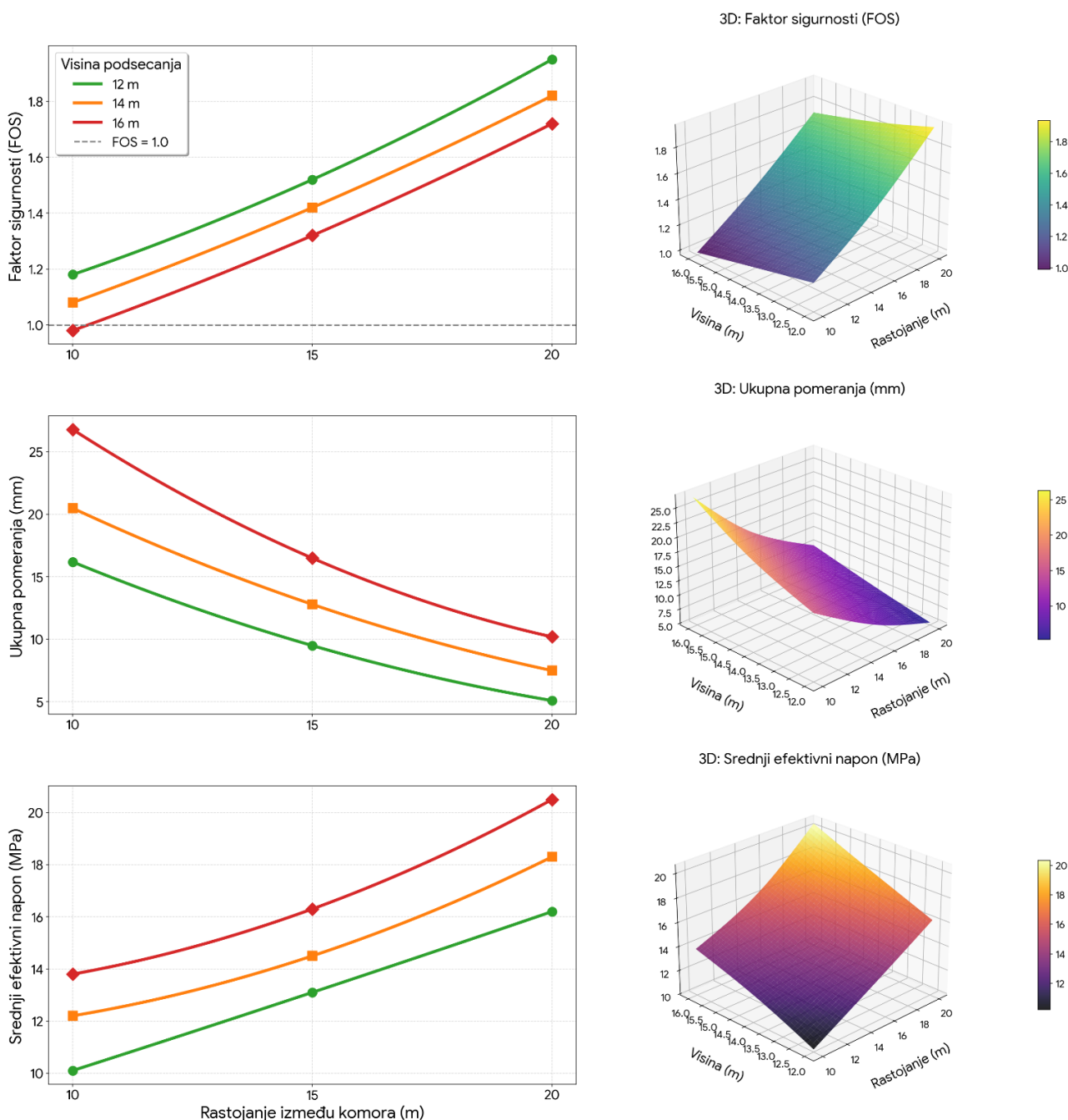


Slika 7-24 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

### 7.2.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m

Konstrukcija dna bloka kod treće varijante sastoji se od otkopnog bloka širine 20 m sa rastojanjima između utovarnih komora identičnim kao u prethodnim varijantama, ali sa povećanim visinama podsecanja (12, 14, i 16 m).

Pri rastojanju od 10 m zone uticaja susednih utovarnih komora se značajno preklapaju. To rezultira sabiranjem napona u međukomornom stubu. Primetno je da se najveća pomeranja javljaju u krovini utovarnih komora i na bokovima stuba. Sa povećanjem visine podsecanja na 16 m, vrednosti totalnih pomeranja rastu, što ukazuje na dodatno opterećenje stuba. S obzirom na to da su utovarne komore geomehnički veoma blizu postoji visok rizik od proloma stuba između njih, jer plastifikacija obuhvata gotovo čitavu širinu stuba od 10 metara, naročito kod većih visina podsecanja ( $h=16$  m). Pri širini stuba od 10 m faktor sigurnosti ima niske vrednosti, naročito u zonama oko utovarnih komora gde su vrednosti blizu kritičnim.



Slika 7-25 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Povećanje rastojanja sa 10 m na 15 m značajno smanjuje međusobni uticaj utovarnih hodnika. U poređenju sa prethodnom varijantom, zone napona su više lokalizovane oko samih prostorija, a središnji deo stuba ostaje u elastičnom stanju. Maksimalna pomeranja su koncentrisana u temenu

(krovini) utovarnih komora. Konture pomeranja pokazuju da se krovina jedne ne spaja sa drugim susednim prostorijama, što je ključno za sprečavanje masovnog urušavanja. Pri visini podsecanja od 12 m zone plastifikacije su ograničene na neposrednu krovinu i bokove prostorija, dok je jezgro stuba od 15 m neoštećeno. Pri povećanju visine podsecanja primećuje se blagi porast totalnih pomeranja u krovini, ali je faktor sigurnosti i dalje u prihvatljivim granicama. Pri maksimalnoj visini podsecanja, pritisak na stub se povećava, zone loma počinju dublje da prodiru u bokove stuba, ali on i dalje zadržava svoju nosivost bolje nego u prethodnom slučaju. Zone sa niskim faktorom sigurnosti se znatno smanjuju u odnosu na varijantu sa  $L = 10$  m. Povećanje od 5 metara u širini stuba pruža neophodnu rezervu nosivosti, što ovaj model čini geomehanički povoljnijim.

Pri rastojanju od 20 m, stub masiva između utovarnih prostorija je najstabilniji. Zone visokog naponskog stanja su potpuno razdvojene, odnosno svaka utovarna komora i hodnik se ponašaju kao izolovan sistem, što je idealno sa aspekta sigurnosti. Za razliku od modela sa rastojanjem između utovarnih komora od 10 m, gde je stub bio skoro potpuno u plastičnom stanju, ovde su zone loma prisutne samo u neposrednoj krovini i na čoškovima hodnika. Središnji deo stuba ostaje u elastičnoj zoni, što garantuje da stub može da izdrži pritisak krovine bez rizika od iznenadnog rušenja. Čak i pri maksimalnoj visini podsecanja od 16 m, stub od 20 m ostaje stabilan. Iako se totalna pomeranja povećavaju u krovini otkopa, sam stub između prostorija utovara nije ugrožen.

Funkcionalna zavisnost promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora prikazana je na slici 7-25, dok je na slici 7-26 prikazana funkcionalna zavisnost promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja.

Posmatrano sa aspekta visine podsecanja, širina stuba od 10 m predstavlja kritičnu tačku pri visini od 12 m. Zona napona oko utovarnih komora koja se spaja, dovodi do najvećih totalnih pomeranja, jer stub nema dovoljno masivno elastično jezgro da se odupre pritisku krovine. Sa povećanjem širine na 15 m, iako postoje pomeranja, ona su pod kontrolom. Faktor sigurnosti je iznad kritične granice, što ovaj dizajn čini bezbednim za rad. Sa daljim povećanjem širine vertikalna pomeranja se svode na minimum, jezgro stuba je stabilno elastično, a faktor sigurnosti raste. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m prikazani su u tabeli 7-22.

Tabela 7-22 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,18 (granično)	1,52 (stabilno)	1,95 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	14,5 mm	8,2 mm	4,5 mm
Ukupna pomeranja	16,2 mm	9,5 mm	5,2 mm
Srednji efektivni napon	10,1 MPa	13,1 MPa	16,2 MPa
Status jezgra stuba	Delimično plastifikovan	Elastično	Stabilno elastično
Kritična zona	Ivice stuba i krov	Ivice otkopa	Uglovi komora
Glavni rizik	Lom po ivicama	Lokalno odronjavanje	Nema značajnog rizika

Sa povećanjem visine podsecanja na 14 metara, pritisak na međukomorne stubove raste u odnosu na prethodni model što se direktno odražava na povećanje pomeranja i pad faktora sigurnosti. Kod ove visine podsecanja, rastojanje od 10 metara postaje veoma rizično. Faktor sigurnosti pada na 1,08, što je praktično na granici loma. Totalna pomeranja prelaze 20 mm, a plastična zona zahvata skoro čitav poprečni presek stuba. Sa povećanjem rastojanja na 15 m naponi rastu, ali stub i dalje zadržava elastično jezgro. To znači da se središnji deo stuba ne lomi, već uspešno prenosi opterećenje. Faktor sigurnosti od 1,42 je i dalje dovoljno iznad kritične granice za bezbedan rad na otkopavanju. Trend kretanja napona pokazuje da povećanje visine podsecanja za 2 metra povećava totalna

pomeranja za oko 20-25%, što ukazuje na to da je konstrukcija veoma osetljiva na promenu visine. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 14 m prikazani su u tabeli 7-23.

Tabela 7-23 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 14 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,08 (Granično/Kritično)	1,42 (zadovoljavajuće)	1,82 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	18,4 mm	11,2 mm	6,8 mm
Ukupna pomeranja	20,5 mm	12,8 mm	7,5 mm
Srednji efektivni napon	12,2 MPa	14,5 MPa	18,3 MPa
Status jezgra stuba	Plastifikovan (>85%)	Dominantno elastično	Stabilno elastično
Kritična zona	Ceo stub i krovina	Ivice otkopa i uglovi	Uglovi komora
Glavni rizik	Prolom stuba	Lokalno obrušavanje krovine	Bez većeg rizika

Visina podsecanja od 16 m predstavlja najnepovoljniji scenario. Pri ovoj visini, pritisak krovine na stubove je maksimalan, što dovodi do značajne plastifikacije masiva, naročito kod užih stubova. Kod ove visine podsecanja, rastojanje od 10 m je nedovoljno za očuvanje stabilnosti sistema. Faktor sigurnosti pada na 1, što zapravo označava da je sistem u zoni loma. Stub gubi svoju nosivost, a totalna pomeranja od preko 20 mm ukazuju na ozbiljan porast deformacija. Pri visini od 16 m, čak i stub od 15 m počinje da pokazuje znake zamora. Faktor sigurnosti (1,32) je na samoj granici prihvatljivosti za rudarske objekte. Jedino rastojanje od 20 m pruža potpunu sigurnost pri ovoj visini podsecanja. Pomeranja se kreću u rasponu od par milimetara do 10 mm, a stub ima dovoljno široko elastično jezgro da spreči bilo kakvo iznenadno popuštanje. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m dati su u tabeli 7-24.

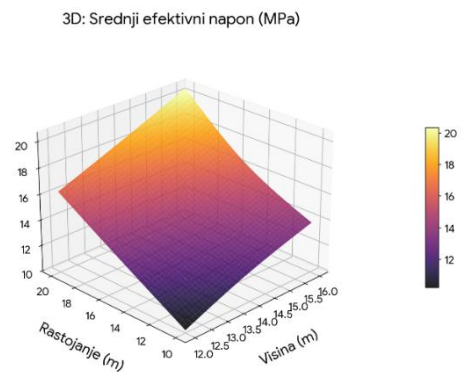
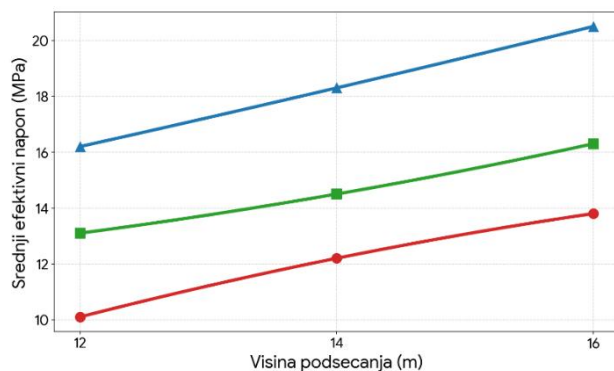
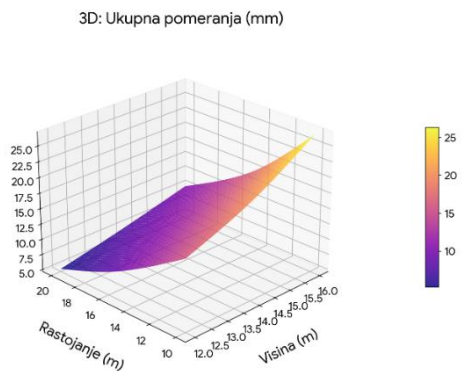
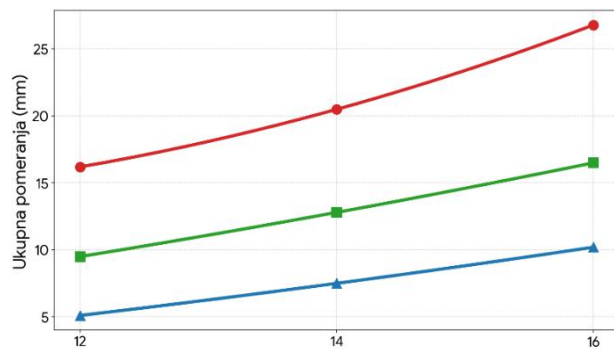
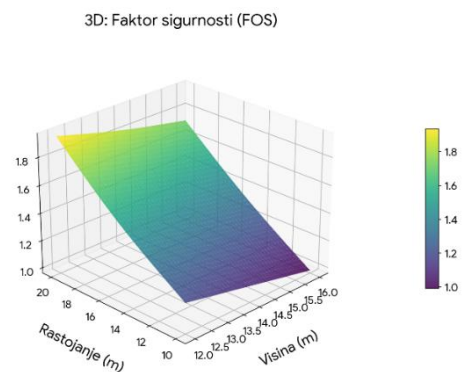
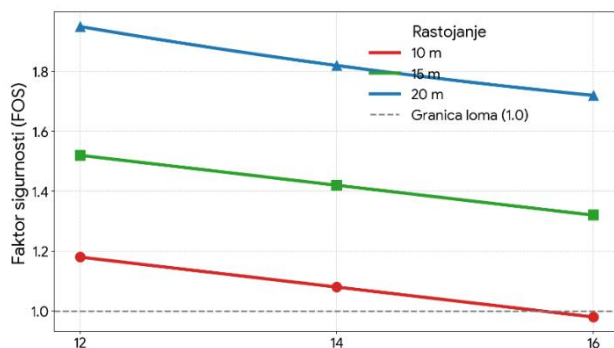
Tabela 7-24 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	0,98 (nestabilno)	1,32 (Granično)	1,71 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	23,5 mm	14,2 mm	9,1 mm
Ukupna (totalna) pomeranja	26,8 mm	16,5 mm	10,2 mm
Srednji efektivni napon	13,82 MPa	16,3 MPa	20,5 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno plastifikovan	Delimično plastifikovan	Dominantno elastično
Kritična zona	Ceo stub, krov i pod	Krovina i bokovi stuba	Uglovi i ivice otkopa
Glavni rizik	Kolaps stuba i urušavanje	Intenzivno odronjavanje	Lokalna nestabilnost uglova

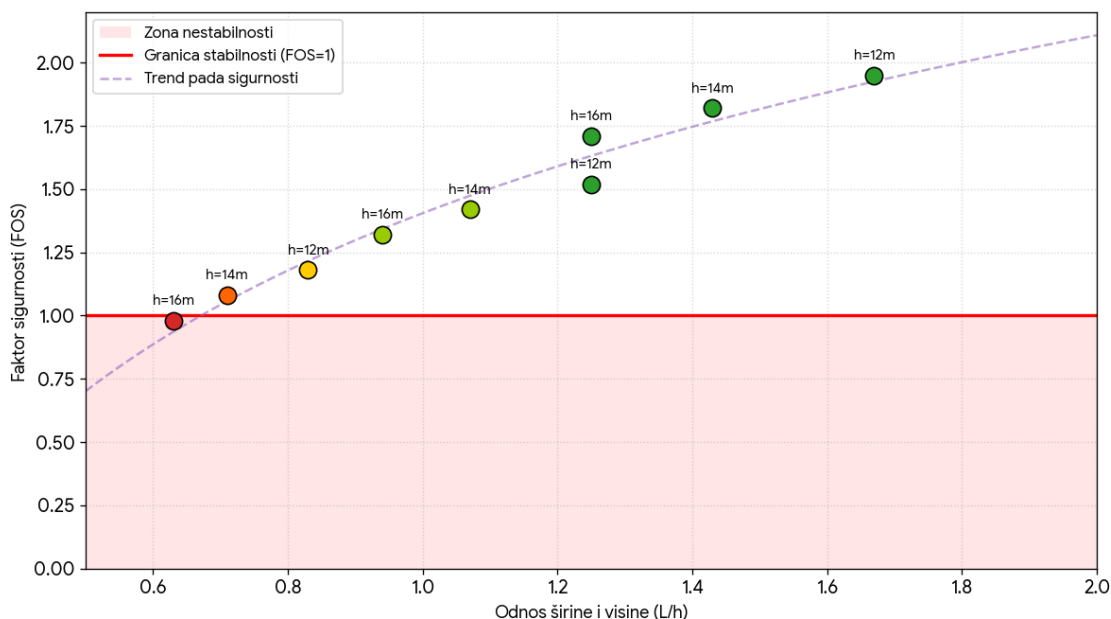
Kada odnos  $L/h$  padne ispod 1 (slučaj  $L=10$  m, pri  $h=16$  m), stub gubi sposobnost da efikasno nosi vertikalno opterećenje. Kod vrednosti  $L/h$  od 0,63, stub je pod velikim dejstvom polja napona. Varijanta  $L = 15$  m pri  $h = 12$  m ima odnos  $L/h = 1,25$  i faktor sigurnosti od 1,52, što predstavlja osnov za sigurne uslove rada. Pri odnosu  $L/h < 1$  stabilnost opada ka graničnim i kritičnim zonama stabilnosti, dok pri vrednostima većim od 1 sistem ostvaruje zadovoljavajuću stabilnost. Za vrednosti od preko 1,25 sistem prelazi u zonu sigurnih radnih uslova. Pri vrednostima od 1,67 za odnos  $B/h$ , pritisak na stubove je najizraženiji jer je otkop relativno širok u odnosu na visinu, što stvara veliki most masiva koji stub mora da podrži. Sa smanjenjem koeficijenta  $B/h$  visina ima sve veći uticaj na stabilnost, što vodi ka smanjenju faktora sigurnosti pri istoj širini otkopa. Promena faktora sigurnosti prema odnosu  $L/h$  i odnosu  $B/h$  grafički je predstavljena na slici 7-27 i slici 7-28.

Tabela 7-25 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	12 m	1,67	1,67	1,95	Stabilno
20 m	14 m	1,43	1,43	1,82	Stabilno
20 m	16 m	1,25	1,25	1,71	Stabilno
15 m	12 m	1,25	1,67	1,52	Stabilno
15 m	14 m	1,07	1,43	1,42	Zadovoljavajuće
15 m	16 m	0,94	1,25	1,32	Granično
10 m	12 m	0,83	1,67	1,18	Granično
10 m	14 m	0,71	1,43	1,08	Granično/Kritično
10 m	16 m	0,63	1,25	0,98	Nestabilno

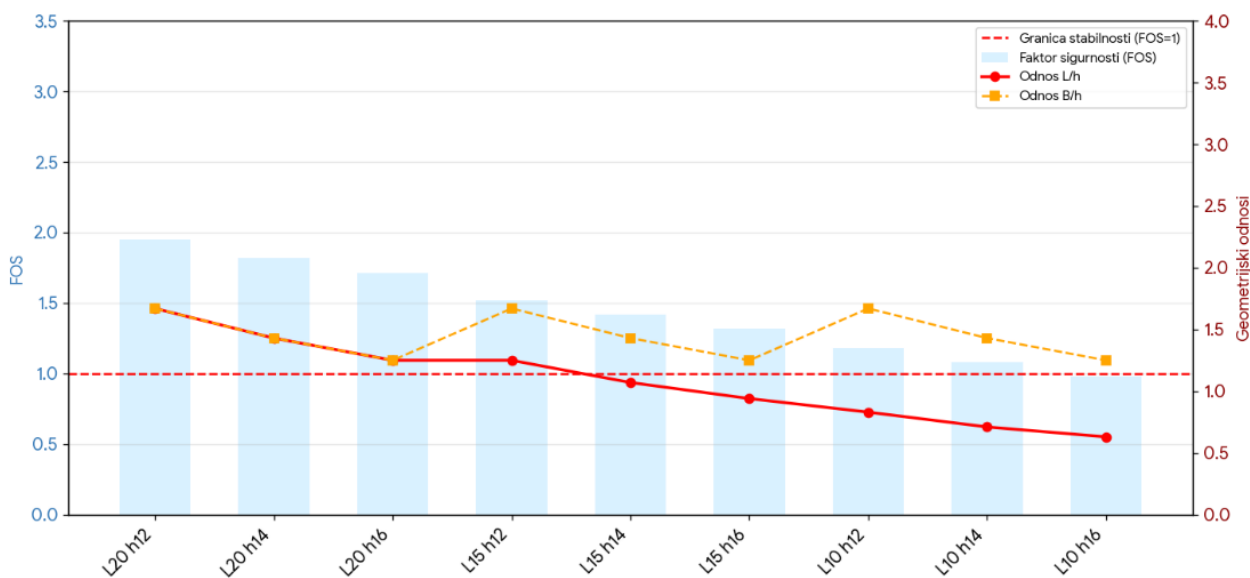


Slika 7-26 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja



Slika 7-27 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Na osnovu numeričkih modela i integrisanih analiza za različite visine podsecanja može se zaključiti da varijante sa rastojanjem između utovarnih komora od 10 m predstavljaju visokorizičnu zonu, pri čemu je ova širina stuba geomehanički neprihvatljiva za visine podsecanja veće od 12 m. Rastojanje između utovarnih komora od 15 m predstavlja optimalno rešenje, jer čak i pri maksimalnom opterećenju ( $h=16$  m), stub zadržava nosivost sa faktorom sigurnosti od 1,32. Iako se javljaju zone plastifikacije na bokovima, elastično jezgro ostaje očuvano, što sprečava masovno urušavanje. Pri širini stuba od 20 m (maksimalna sigurnost) u svim scenarijima hodnici se ponašaju kao izolovani sistemi, što ukazuje na visok faktor sigurnosti uz minimalna pomeranja.



Slika 7-28 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

#### 7.2.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model II

U okviru istraživanja kod Modela II ispitivani su geomehanički uslovi stabilnosti konstrukcije dna otkopnog bloka za slučaj dvostranog bočnog utovara sa ravnomerno raspoređenim utovarnim komorama. I u ovom slučaju kao i kod prethodnog modela stabilnost je ispitivana u funkciji tri ključna geometrijska parametra: širine otkopnog bloka, visine tranšejnog podsecanja i rastojanja (širine zaštitnog stuba) između bočnih utovarnih komora. Kao ključni indikator globalne stabilnosti konstrukcije identifikovano je stanje elastičnog jezgra stuba između utovarnih komora.

Varijantu sa širinom otkopnog bloka od 10 m karakteriše direktna zavisnost stabilnosti od visine podsecanja. Stabilnost kod ovakvog modela je visoka samo pri malim visinama podsecanja. Povećanje visine kod ovako uskog bloka brzo dovodi do širenja plastifikacije ka jezgru stuba, što direktno utiče na smanjenje stabilnosti. Čim visina podsecanja dostigne 8 m, sistem dolazi do granice stabilnosti (FOS=1,08 za stub širine 10 m).

Širina otkopa od 15 m predstavlja prelaznu fazu gde uticaj geometrije postaje kompleksniji. Povećanje širine bloka dovodi do većih naprezanja u krovini. Sa povećanjem širine otkopa kritična visina podsecanja se pomera naviše. Na 12 m visine, uski stubovi (10 m) doživljavaju potpuni lom (FOS= 0,96), dok širi stubovi (20 m) ostaju stabilni.

Kod najšireg ispitivanog bloka (20 m), pritisak krovine na stubove je maksimalan. Kod ove varijante odnos B/h (širina/visina) ima značajnu ulogu. Veće vrednosti ovog odnosa prate veći faktori sigurnosti, ali samo pod uslovom da je rastojanje između komora (L) dovoljno veliko. Na maksimalnoj visini podsecanja (16 m), jedino rastojanje između komora od 20 m pruža potpunu sigurnost. Kod užih stubova, široki otkop uzrokuje oštećenje jezgra stuba pod vertikalnim pritiskom.

Numerička analiza je pokazala da povećanje visine podsecanja za samo 1 do 2 metra kod užih stubova može izazvati nesrazmeran skok napona (preko 20%), što ukazuje na ekstremnu osetljivost geometrije na promenu visine podsecanja. Nasuprot tome, kod varijante L= 20 m, jezgro ostaje stabilno elastično čak i pri maksimalnim visinama podsecanja (16 m), čime se rizik od iznenadnog kolapsa svodi na minimum.

Geometrijski odnos L/h (širina stuba/visina podsecanja) je primarni indikator stabilnosti sistema. Rezultati ukazuju na jasnu korelaciju između ovog odnosa i faktora sigurnosti, pri čemu se izdvajaju tri karakteristične zone stabilnosti: zona visoke stabilnosti ( $L/h > 1,5$ ), zona zadovoljavajuće stabilnosti ( $1,1 \leq L/h \leq 1,5$ ) i zona granične stabilnosti koja prelazi u zonu visokog rizika i loma ( $L/h < 1,1$ ).

U svim analiziranim modelima, održavanje koeficijenta L/h iznad vrednosti 1,5 garantuje očuvanje elastičnog jezgra stuba. U ovom režimu, stubovi zadržavaju punu nosivost, a pomeranja su minimalna, što eliminiše potrebu za intenzivnim obimom podgrađivanja. Zone povišenih napona i plastifikacije su strogo lokalizovane na ivicama i uglovima tranšeje. Pad odnosa L/h ispod 1,5 dovodi do progresivne koncentracije napona na ivicama i uglovima tranšeje koji počinje da se širi ka jezgru stuba. Iako sistem ostaje globalno stabilan, javlja se rizik od lokalnog obrušavanja i smicanja po bokovima, što zahteva pojačane mere tehničke zaštite i podgrađivanja. Kod užih stubova (10 m), čim odnos padne ispod kritične vrednosti (1,1), dolazi do spajanja zona plastifikacije susednih utovarnih komora. Ovaj proces, uslovno nazvan drobljenje stuba, rezultira gubitkom nosivosti jezgra i naglim porastom totalnih pomeranja (preko 20 mm), što direktno vodi ka kolapsu konstrukcije.

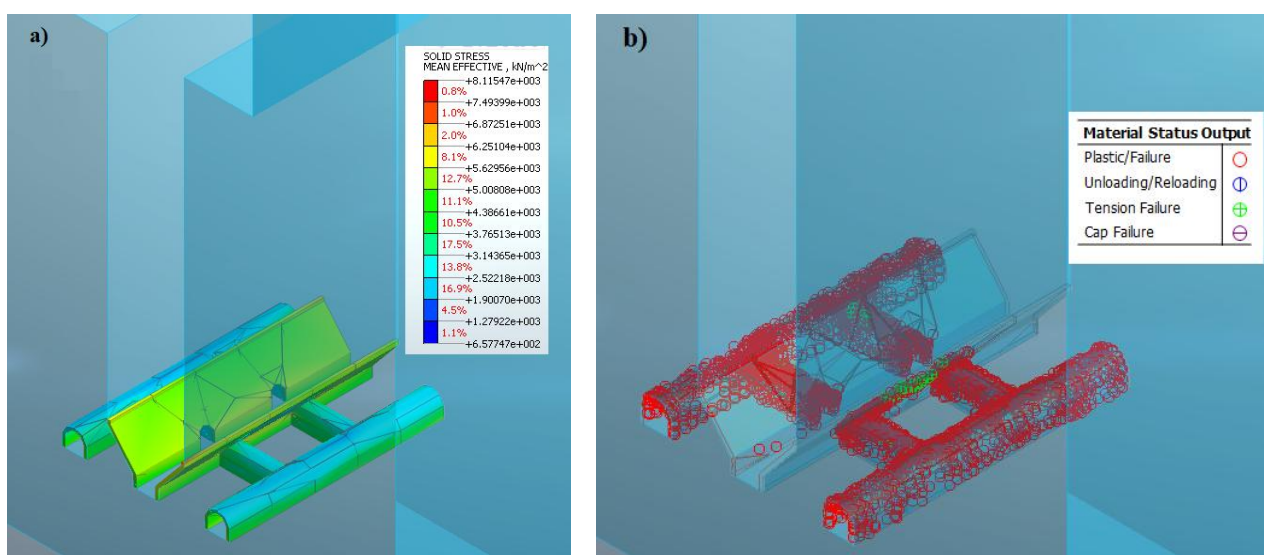
Uporedna analiza je pokazala da širina stuba (L) ima eksponencijalno veći uticaj na stabilnost nego visina podsecanja (h). Pri identičnom odnosu L/h, masivniji stubovi (20 m) pokazuju znatno veći faktor sigurnosti i bolju adaptibilnost na promenu visine otkopa u poređenju sa užim stubovima.

Tabela 7-26 Uporedni odnos faktora sigurnosti pri identičnim vrednostima odnosa L/h

Varijanta	Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Status masiva
I	10 m	6 m	1,67	1,22	Granično
II	15 m	9 m	1,67	1,48	Zadovoljavajuće
III	20 m	12 m	1,67	1,95	Stabilno

Pri istom odnosu L/h, masivnije konstrukcije sa većom apsolutnom širinom stuba između utovarnih komora su znatno stabilnije jer širi stubovi bolje izoluju međusobne uticaje susednih hodnika. Slika 7-29 pokazuje zone plastifikacije i polja napona za varijantu sa rastojanjem između utovarnih komora 15 m i visine dna bloka 9 m.

Odnos B/h definiše geometrijsku krutost krovine i način na koji se opterećenje prenosi na stubove. Iz analize stabilnosti se može zapaziti direktna korelacija između povećanja odnosa B/h i faktora sigurnosti – povećanje odnosa B/h prati povećanje faktora sigurnosti, ali uz specifične promene u zavisnosti od širine stuba L. Pri višim vrednostima B/h (1,67) krovina je relativno fleksibilnija, što uzrokuje veća vertikalna pomeranja, ali su naponi u stubovima u granicama dozvoljenog dokle god je stub dovoljno širok. Pri nižim vrednostima odnosa B/h (1,25) povećana visina podsecanja uzrokuje da stubovi ne mogu da izdrže vertikalni pritisak masiva, što vodi ka gubitku nosivosti jezgra stuba kod užih varijanti (L= 10 m).



Slika 7-29 Varijanta Modela II sa rastojanjem između utovarnih komora 15 m i visinom dna bloka 9 m  
a) Polja napona; b) Zone plastifikacije

Analiza pokazuje da faktor sigurnosti raste proporcionalno sa povećanjem odnosa B/h. Svako povećanje odnosa za 1 u proseku podiže faktor sigurnosti za 0,08-0,09 jedinica.

Primenom linearne regresije dobija se sledeća korelacija između faktora sigurnosti i odnosa B/h:

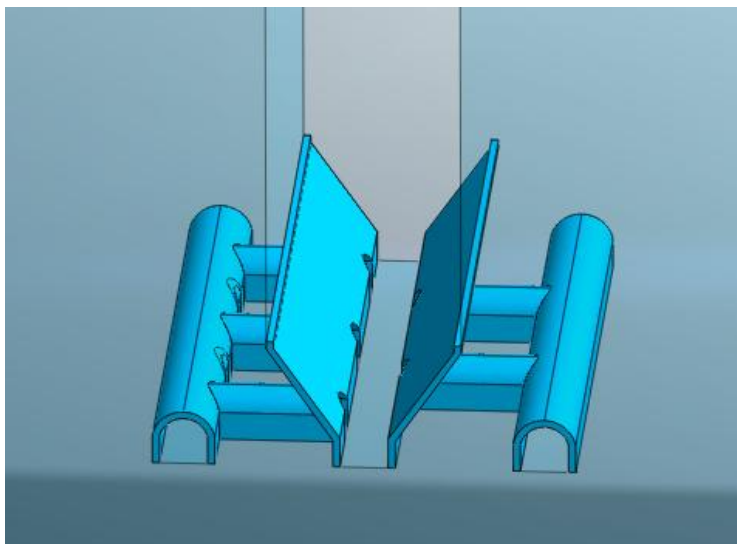
$$FOS \approx 0,85 \cdot (B/h) + 0,35 \quad (30)$$

Ovaj model ima visok stepen korelacije za stabilne i varijante sa zadovoljavajućom stabilnošću, dok kod izuzetno visokih podsecanja od 16 m pokazuje blago odstupanje zbog ulaska materijala u zonu potpunog loma.

Za obezbeđivanje dugotrajne stabilnosti bez intenzivne podgrade, neophodno je projektovati geometriju tako da odnos  $B/h$  ostane iznad 1,40, uz obavezno održavanje odnosa  $L/h > 1,25$  kako bi se očuvalo elastično jezgro stuba.

### **7.3. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model III**

Model broj tri predstavlja konstrukciju dna bloka sa dvostranim bočnim utovarom rude, ali za razliku od prethodnog modela sada su bočne utovarne komore raspoređene u šah poretku (slika 7-30). Kao i kod prethodnih modela promenljive veličine su geometrijski parametri dna bloka, a to su rastojanje između bočnih utovarnih komora  $L$ , širina otkopnog bloka  $B$  i visina podsecanja  $h$ . Analizirane su sve kombinacije promenljivih parametara što daje ukupan broj od 27 modifikacija.



*Slika 7-30 Konstrukcija dna otkopnog bloka sa dvostranim bočnim utovarom rude i utovarnim komorama u šah rasporedu*

#### **7.3.1. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 10 m**

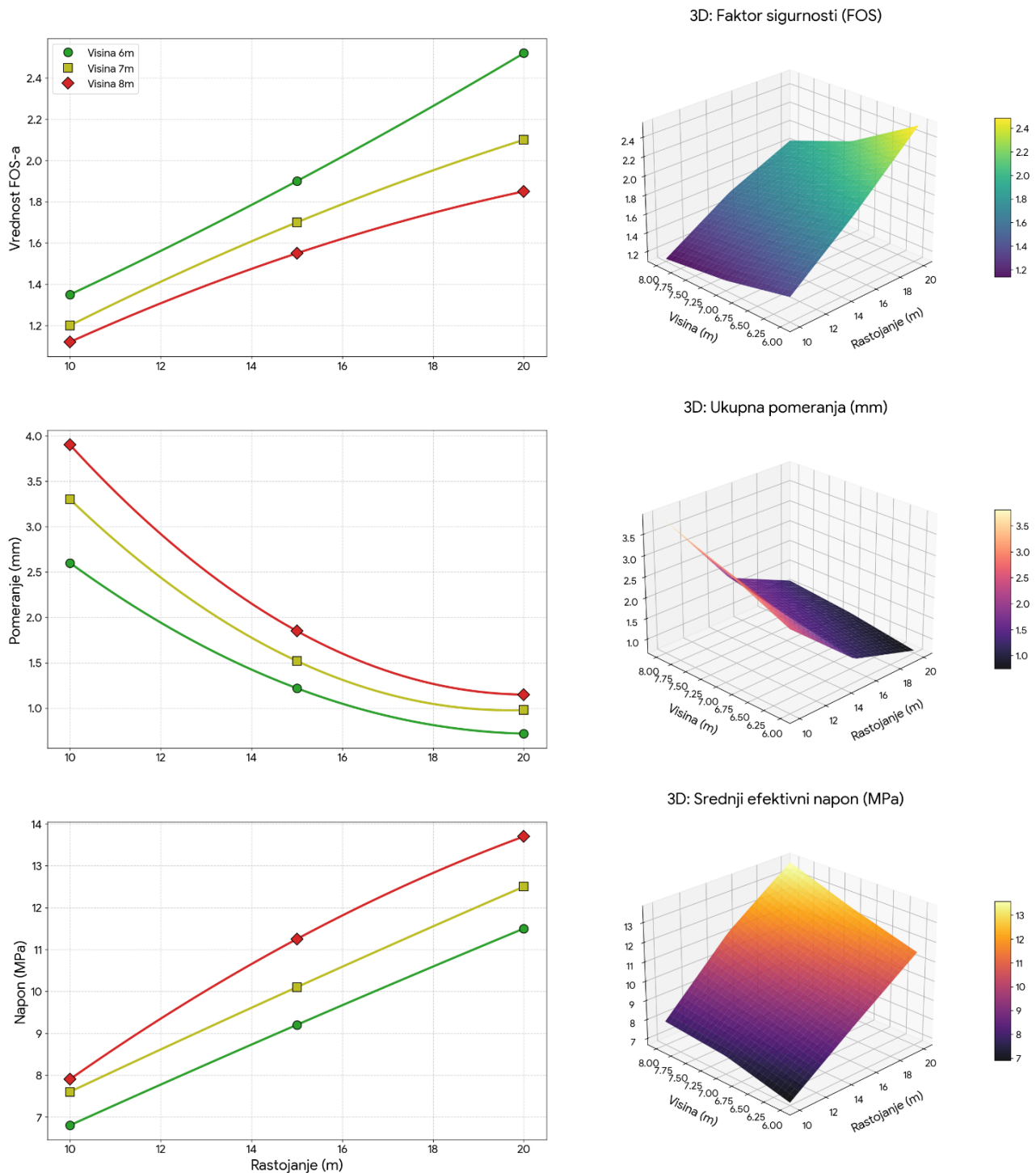
Prva varijanta razmatra slučaj sa širinom bloka od 10 m, rastojanjima između utovarnih komora 10, 15 i 20 m sa obe strane tranšeje i visine tranšeje 6, 7 i 8 m, što daje ukupno devet različitih modifikacija. Visine tranšeja su određene na isti način kao i u prethodnim modelima.

Pri najmanjem analiziranom rastojanju između utovarnih komora od 10 m, zbog njihove međusobne blizine dolazi do značajnog preklapanja zona povišenih napona u međukomornim stubovima. Intenzivne zone plastifikacije prodiru duboko u masiv koji čini stub između utovarnih komora potencijalno nestabilnim pri većim visinama podsecanja (8 m). Pri većim visinama podsecanja zone sa faktorom sigurnosti blizu 1 se šire kroz čitav presek između dve susedne komore, što ukazuje da su delovi stuba na ivici popuštanja. Najveća ukupna pomeranja javljaju se u temenima tranšeje, posebno u centralnom delu gde dostižu najveće vrednosti.

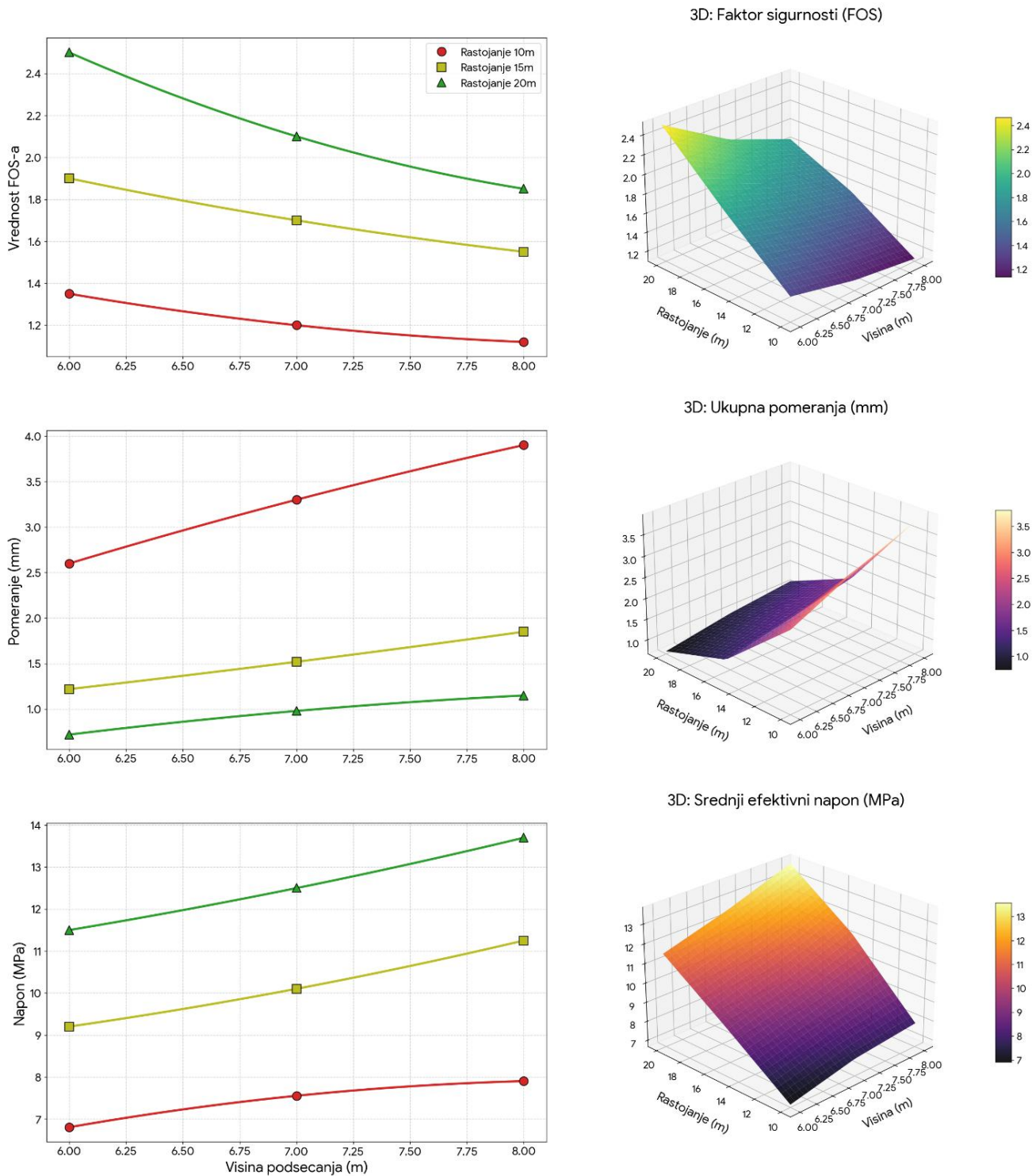
Povećanje rastojanja između utovarnih komora na 15 m dovodi do povoljnijeg naponsko-deformacijskog stanja. Veće rastojanje dovodi do stabilizacije stubova, pri čemu međukomorni stub preuzima opterećenje sa manjim stepenom plastifikacije u svom jezgru. Faktor sigurnosti pokazuje stabilnije vrednosti u poređenju sa prethodnim slučajem. Centralni deo stuba zadržava stabilnost sa faktorom iznad 1,5, dok su zone niskog faktora sigurnosti sada strogo lokalizovane uz same ivice tranšeje. Vrednosti pomeranja su umerene uz ravnomerniju raspodelu deformacija. Maksimalna pomeranja u krovini su stabilizovana i duplo su manja u odnosu na prethodnu varijantu.

Maksimalno analizirano rastojanje od 20 m pruža najbolju statičku stabilnost pojedinačnih objekata. Utovarne komore i hodnici se ponašaju gotovo kao izolovani podzemni otvori, odnosno uticaj iskopa jedne prostorije na drugu je minimalan, što ukazuje na visok faktor sigurnosti. Zone plastifikacije su svedene na uski pojas oko konture utovarnih prostorija uz minimalna pomeranja, dok jezgro stuba ostaje u elastičnoj zoni, što garantuje dugoročnu stabilnost.

Funkcionalna zavisnost promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora prikazana je na slici 7-31, dok je na slici 7-32 prikazana funkcionalna zavisnost promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja.



Slika 7-31 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja



Slika 7-32 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Model sa visinom podsecanja od 6 m pruža najviši stepen sigurnosti u svim varijacijama. Ukupna pomeranja su najmanja u poređenju sa ostalim modelima. Deformacije su unutar granica elastičnosti materijala za većinu simuliranih rastojanja. Zone napona pokazuju relativno ravnomernu raspodelu oko bokova tranšeje. Koncentracija napona je primetna u donjim uglovima, ali su gornje ivice stabilne. Parametri stabilnosti za visinu podsecanja od 6 m dati su u tabeli 7-27.

Tabela 7-27 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 6 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,35 (Zadovoljavajuće)	1,9 (Stabilno)	> 2,50 (Veoma stabilno)
Vertikalna pomeranja	2,4 mm	1,1 mm	0,6 mm
Ukupna pomeranja	2,6 mm	1,23 mm	0,72 mm
Srednji efektivni napon	6,84 MPa	9,2 MPa	11,5 MPa
Status jezgra stuba	Delimično plastifikovan	Stabilno elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Ivice stuba i tranšeje	Spoj tranšeje i komora	Nema kritičnih zona
Glavni rizik	Lokalno popuštanje bokova	Manja odronjavanja	Nema značajnog rizika

Povećanje visine podsecanja za 1 m dovodi do uočljive promene u geometriji naponskih lukova. Zona zatezanja u gornjem delu podseka postaje izraženija. Dolazi do blagog širenja zona plastifikacije iznad kruna utovarnih komora (širi se ka unutrašnjosti stubova). Primećuje se trend rasta vertikalnih pomeranja u centralnom delu usled spajanja zona uticaja susednih komora u krovnom delu. Sve navedeno skupa vodi ka blagom padu vrednosti faktora sigurnosti. Parametri stabilnosti za visinu podsecanja od 7 m dati su u tabeli 7-28.

Tabela 7-28 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 7 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,20 (Granično)	1,70 (Stabilno)	2,1 (Veoma stabilno)
Vertikalna pomeranja	2,9 mm	1,32 mm	0,85 mm
Ukupna pomeranja	3,3	1,54 mm	0,98 mm
Srednji efektivni napon	7,58 MPa	10,15 MPa	12,5 MPa
Status jezgra stuba	Izražena plastifikacija	Početna plastifikacija	Potpuno elastično
Kritične zone	Bokovi stuba i tranšeje	Ivice ranšeje i komora	Nema kritičnih zona
Glavni rizik	Progresivno ljuštenje	Lokalno obrzšavanje	Nema značajnog rizika

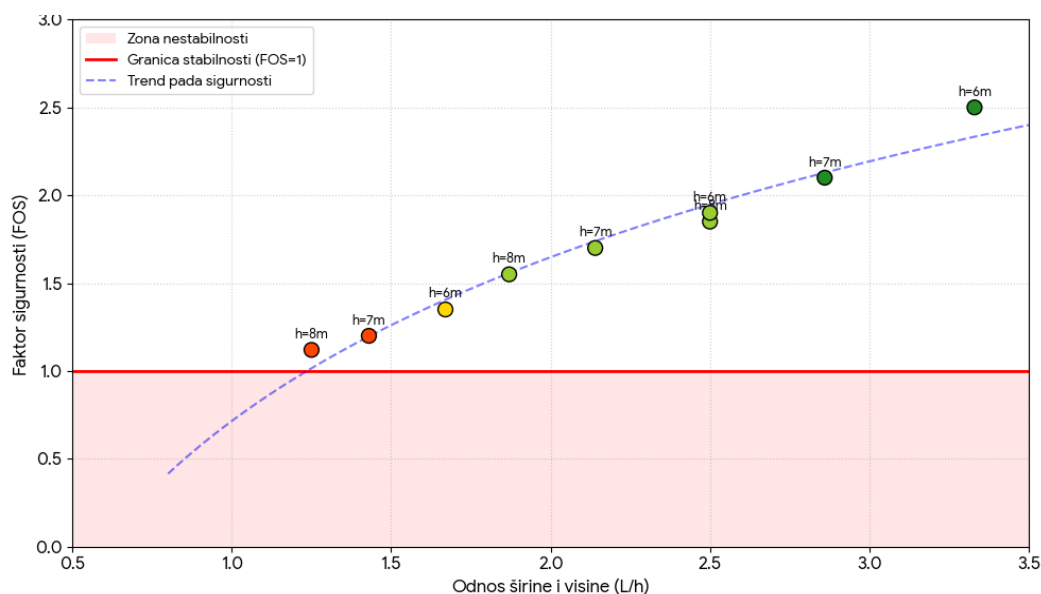
Maksimalna analizirana visina (8 m) rezultira najnepovoljnijim uslovima stabilnosti. Najniže vrednosti faktora sigurnosti su zabeležene upravo kod ove visine. Zone plastifikacije se šire i preklapaju pri manjim rastojanjima između utovarnih prostorija, što može dovesti do progresivnog rušenja konstrukcije dna bloka. Međutim kod većih rastojanja između utovarnih komora, zahvaljujući širini stuba koji se formira i rasporedu utovarnih komora i pri ovoj visini sistem zadržava stabilnost. Parametri stabilnosti za visinu podsecanja od 8 m dati su u tabeli 7-29.

Uporedna analiza pokazuje da povećanje rastojanja sa 10 na 20 m linearno smanjuje intenzitet plastifikacije i ukupna pomeranja. Rastojanje od 20 m u kombinaciji sa visinom podsecanja od 6 m pruža najveću sigurnost jer su zone napona oko komora potpuno izolovane, što sprečava njihovo preklapanje i slabljenje stuba. Sa porastom visine podsecanja uočava se trend opadanja stabilnosti. Povećanje visine tranšeje sa 6 na 7 m dovodi do konstantnog pada faktora sigurnosti za oko 0,15 do 0,20 jedinica. To znači da svaki metar dodatne visine direktno smanjuje stabilnost, bez obzira na to koliko je stub širok. Kod visine podsecanja od 8 m, pri većim rastojanjima između utovarnih komora sistem je stabilan, ali je kritična stabilnost najizraženija pri najmanjem rastojanju između utovarnih komora, gde dizajn dna otkopnog bloka ulazi u zonu granične stabilnosti.

Tabela 7-29 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 8 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,12 (granično)	1,55 (stabilno)	1,85 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	3,68 mm	1,62 mm	1,05 mm
Ukupna pomeranja	3,9 mm	1.85 mm	1,15 mm
Srednji efektivni napon	7,9 MPa	11,25 MPa	13,74 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno plastifikovan	Duboka plastifikacija	Početna plastifikacija
Kritične zone	Ceo stub i širi deo tranšeje	Bokovi tranšeje	Ivice i uglovi komora
Glavni rizik	Urušavanje stuba	Intenzivno ljuštenje bokova i lom	Lokalno obrušavanje

Analiza odnosa geometrijskih parametara  $L/h$  i  $B/h$  ključna je za razumevanje vitkosti i nosivosti stubova, kao i stabilnosti konstrukcije u krovinskom delu. Veće vrednosti odnosa  $L/h$  ukazuju da je stub između dve utovarne komore masivniji i stabilniji. Pri vrednostima koeficijenta  $L/h > 2,5$  faktor sigurnosti prelazi u zone visoke stabilnosti, što ukazuje da treba težiti takvom odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja. Za koeficijent vitkosti (odnos  $L/h$ ) granica stabilnosti se nalazi na vrednosti 1,5. Sve ispod ove vrednosti dovodi do spajanja plastičnih zona i delimičnog ili potpunog gubitka nosivosti stuba. Na slici 7-33 prikazana je promena faktora sigurnosti u odnosu na koeficijent  $L/h$ , za različite vrednosti rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja. Vrednosti faktora sigurnosti za različite vrednosti odnosa  $L/h$  i  $B/h$  dati su u tabeli 7-30.

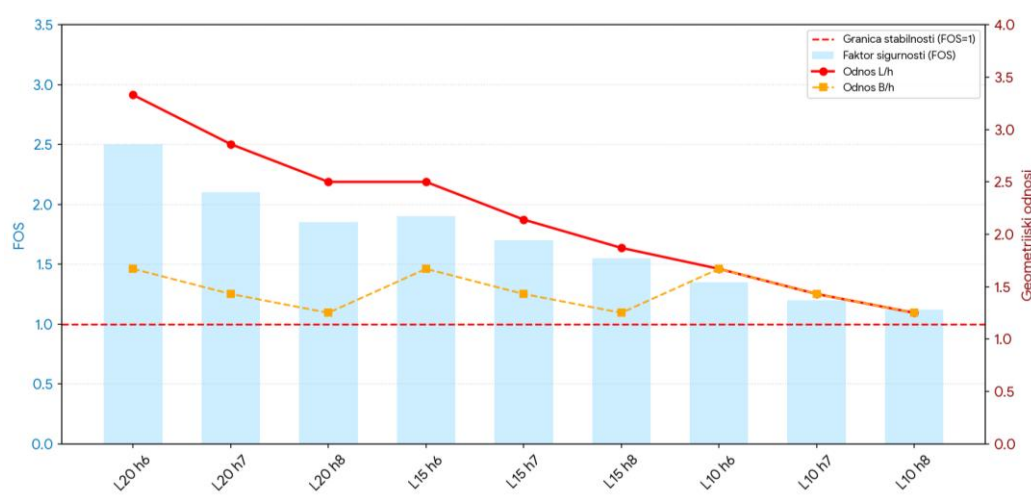


Slika 7-33 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja  $L/h$

S obzirom na to da je širina otkopa konstantna (10 m) odnos  $B/h$  zapravo pokazuje kako visina podsecanja utiče na stabilnost slobodnog raspona tranšejnog podsecanja, uz napomenu da za isti odnos  $B/h$  sa povećanjem rastojanja između utovarnih komora raste i faktor sigurnosti. Smanjenjem ovog odnosa (povećanjem visine podsecanja), gornji deo podseka postaje podložniji izvicanju i ljuštenju. Pri vrednosti od 1,25, i manjoj širini stuba  $L$  (10 m) pritisak na bokove tranšeje postaje toliko velik da izaziva nekontrolisana pomeranja i dovodi sistem u zonu kritične stabilnosti (nestabilnosti). Na slici 7-34 grafički je prikazana zavisnost faktora sigurnosti od promene odnosa  $L/h$  i  $B/h$ .

Tabela 7-30 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	FOS (procena)	Procena stabilnosti
20 m	6 m	3,33	1,67	> 2,50	Veoma sztabilno
20 m	7 m	2,86	1,43	2,1	Veoma Stabilno
20 m	8 m	2,50	1,25	1,85	Stabilno
15 m	6 m	2,50	1,67	1,9	Stabilno
15 m	7 m	2,14	1,43	1,7	Stabilno
15 m	8 m	1,87	1,25	1,55	Stabilno
10 m	6 m	1,67	1,67	1,35	Zadovoljavajuće
10 m	7 m	1,43	1,43	1,2	Granično
10 m	8 m	1,25	1,25	1,12	Granično



Slika 7-34 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

### 7.3.2. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 15 m

Druga varijanta Modela III razmatra konstrukciju dna bloka sa širinom od 15 m i rastojanjima između utovarnih komora kao i u prethodnom slučaju. Zbog promene širine otkopnog bloka, visine podsecanja su povećane na 9, 10,5 i 12 m.

Pri najmanjem rastojanju između utovarnih komora (10 m) uski stubovi ne mogu da izdrže pritisak nadsloja, pa se ovakva konstrukcija pokazala kao najnestabilnija. Zbog male širine, plastične zone sa bokova stuba se spajaju u samom jezgrou već pri visini od 9 m. Koncentracija napona na ivicama tranšeje dostiže kritične vrednosti, pa zbog popuštanja stubova krovina gubi oslonac i dolazi do njenog savijanja (povećana vertikalna pomeranja), što može izazvati totalno urušavanje.

Povećanje rastojanja između utovarnih komora na 15 m značajno popravija opštu stabilnost, jer su stubovi između prostorija širi i masivniji. Pri visini od 9 m, stub još uvek poseduje elastično jezgro koje nosi glavni teret. Međutim, povećanjem visine na 10,5 m, to jezgro se smanjuje, a pri 12 m potpuno nestaje, prelazeći u stanje duboke plastifikacije. Pomeranja su umerena, moguće je intenzivno listanje bokova usled vertikalnog pritiska. Bokovi tranšeje i deo masiva na spoju sa tranšejom su najugroženiji. Ovde se javljaju tenzioni naponi koji mogu uzrokovati otvaranje postojećih prslina u steni.

Rastojanje od 20 m nudi maksimalnu stabilnost sistema. Na najnižoj visini podsecanja (9 m) naponi se ravnomerno raspoređuju, a faktor sigurnosti je u sigurnoj zoni. Zone plastifikacije su zanemarljive i van neposrednog profila prostorija. Sa porastom visine podsecanja dolazi do porasta pomeranja u krovinskom delu utovarnih komora, ali bez većeg ugrožavanja opšte stabilnosti. Čak i pri visini od 12 m, centralni deo stuba ostaje relativno neoštećen (početna plastifikacija), što sprečava totalni kolaps. Na sledećim slikama su prikazane funkcionalne zavisnosti parametara stabilnosti u odnosu na rastojanje između utovarnih komora (slika 7-35) i visine podsecanja (slika 7-36).

Visina podsecanja od 9 m pokazuje najveću stabilnost u poređenju sa varijantama sa većim visinama podsecanja, pri preostalim istim geometrijskim parametrima dna bloka. Pri visini od 9 m i najmanjem rastojanju između utovarnih komora (10 m) stubovi su previše blizu, što dovodi do njihovog preopterećenja i potpune plastifikacije. Faktor sigurnosti ukazuje na potencijalnu opasnost od urušavanja. Kako se rastojanje povećava, naponi i pomeranja opadaju pa se rastojanje od 20 m pokazuje kao najsigurnija opcija. Širi razmak omogućava bolju preraspodelu napona, značajno smanjuje ukupna pomeranja i obezbeđuje stabilan faktor sigurnosti iznad 1,8. Vrednosti parametara stabilnosti za visinu podsecanja 9 m date su u tabeli 7-31.

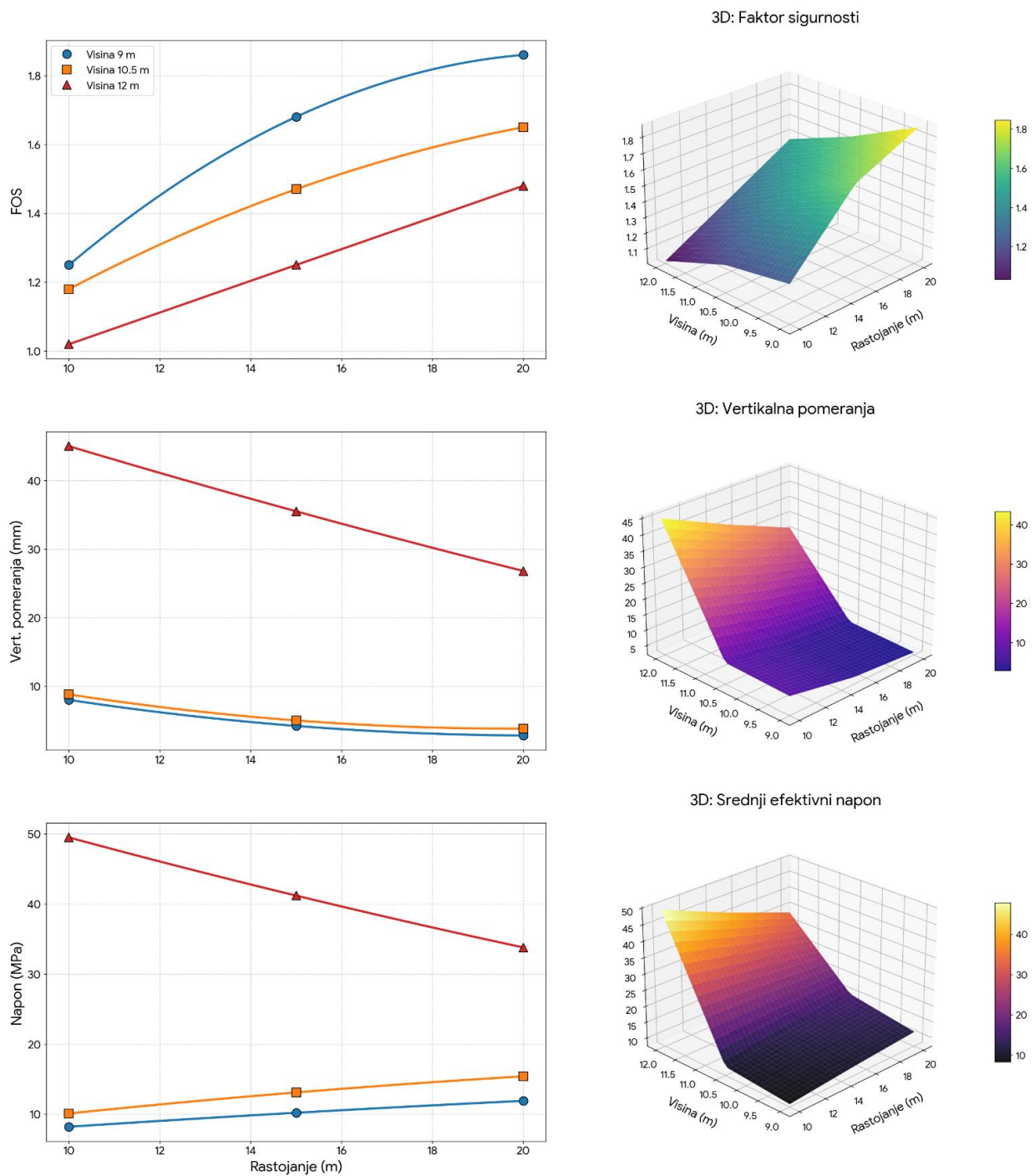
Tabela 7-31 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 9 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,25 (granično)	1,68 (stabilno)	1,85 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	7,9 mm	4,1 mm	2,7 mm
Ukupna pomeranja	8,1 mm	4,9 mm	3 mm
Srednji efektivni napon	8,15 MPa	10,24 MPa	11,92 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno plastifikovan	Duboka plastifikacija	Početna plastifikacija
Kritične zone	Ceo stub i širi deo tranšeje	Bokovi stuba i tranšeje	Ivice i uglovi tranšeje
Glavni rizik	Urušavanje stuba	Intenzivno ljuštenje i lom	Lokalno obrušavanje

Povećanjem visine podsecanja na 10,5 m dolazi do širenja zona efektivnih napona ka središnjem delu podseka. Opterećenje na stubove između prostorija se povećava. Plastifikacija počinje da zahvata veći deo bokova podseka i stubova. Pri najmanjoj širini stuba faktor sigurnosti se približava kritičnim vrednostima, što znači da je sistem u stanju mogućeg loma. Povećanjem širine stuba faktor sigurnosti raste od zadovoljavajućeg (širina stuba 15 m) do stabilnog (20 m). U tabeli 7-32 prikazane su vrednosti parametara stabilnosti za visinu podsecanja 10,5 m.

Tabela 7-32 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 10,5 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,18 (Granično)	1,47 (Zadovoljavajuće)	1,65 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	8,7 mm	4,9 mm	3,7 mm
Ukupna pomeranja	9,5 mm	5,8 mm	5 mm
Srednji efektivni napon	10,15 MPa	13,12 MPa	15,38 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno razrušen	Potpuno plastifikovan	Duboka plastifikacija
Kritične zone	Tranšeja i ceo stub	Bokovi stuba i deo tranšeje	Uglovi i gornja ivica tranšeje
Glavni rizik	Trenutno urušavanje	Intenzivno ljuštenje i lom	Moguće obrušavanje

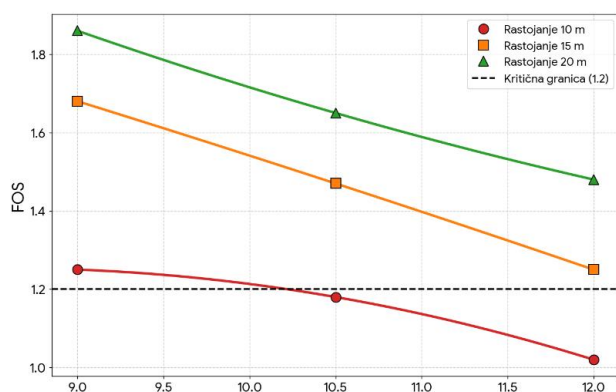


Slika 7-35 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

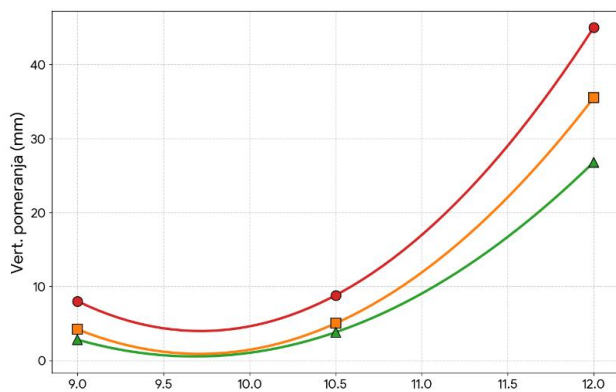
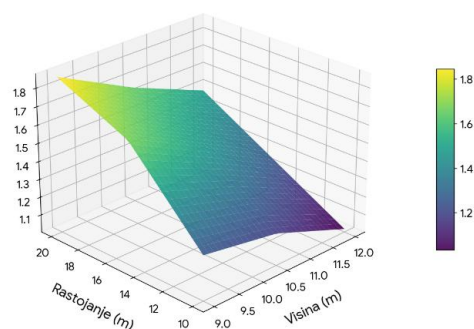
Visina podsecanja 12 m predstavlja najkritičnije stanje za stabilnost konstrukcije. Naponi i pomeranja dostižu maksimalne vrednosti. Iznad utovarnih komora dolazi do izrazite koncentracije napona. Faktor sigurnosti u toj zoni opada i ulazi u zonu nestabilnosti za manja rastojanja između utovarnih komora. Zone plastifikacije su guste i međusobno povezane duž cele ravni podseka. Postoji jasna indikacija formiranja tzv. luka popuštanja iznad celog dna bloka, što može dovesti do iznenadnog obrušavanja. Jedino pri najvećem rastojanju između utovarnih komora se ostvaruje granična stabilnost. U tabeli 7-33 prikazane su vrednosti parametara stabilnosti za visinu podsecanja 12 m.

Tabela 7-33 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

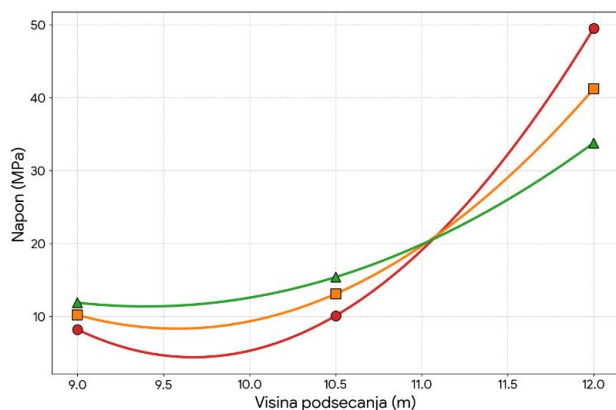
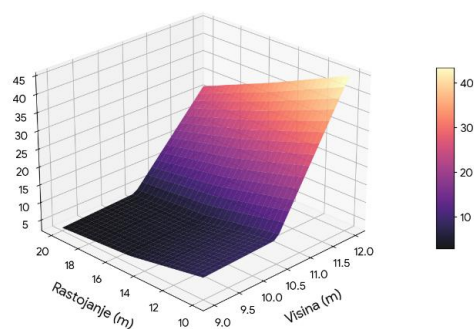
Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,02 (Nestabilno)	1,25 (Granično)	1,48 (Zadovoljavajuće)
Vertikalna pomeranja	42,0 – 50,5 mm	32,5 – 38,0 mm	24,5 – 29,0 mm
Ukupna pomeranja	55,0 – 65,0 mm	40,0 – 48,0 mm	32,0 – 37,5 mm
Srednji efektivni napon	46,5 – 53,0 MPa	38,0 – 44,5 MPa	31,5 – 36,0 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno razoren (kolaps)	Potpuno plastifikovan	Duboka plastifikacija
Kritične zone	Krovina, stub i širi masiv	Ceo presek stuba i krov	Bokovi stuba i ivice komora
Glavni rizik	Potpuni kolaps sekcije	Urušavanje stuba	Intenzivno ljuštenje i lom



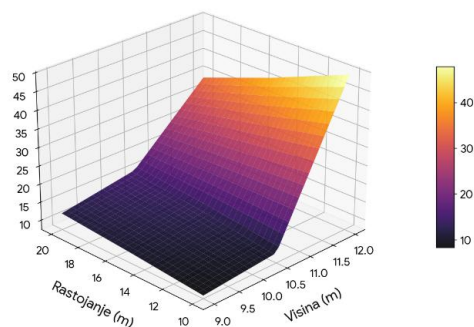
3D: Pad stabilnosti (FOS)



3D: Rast pomeranja



3D: Promena napona

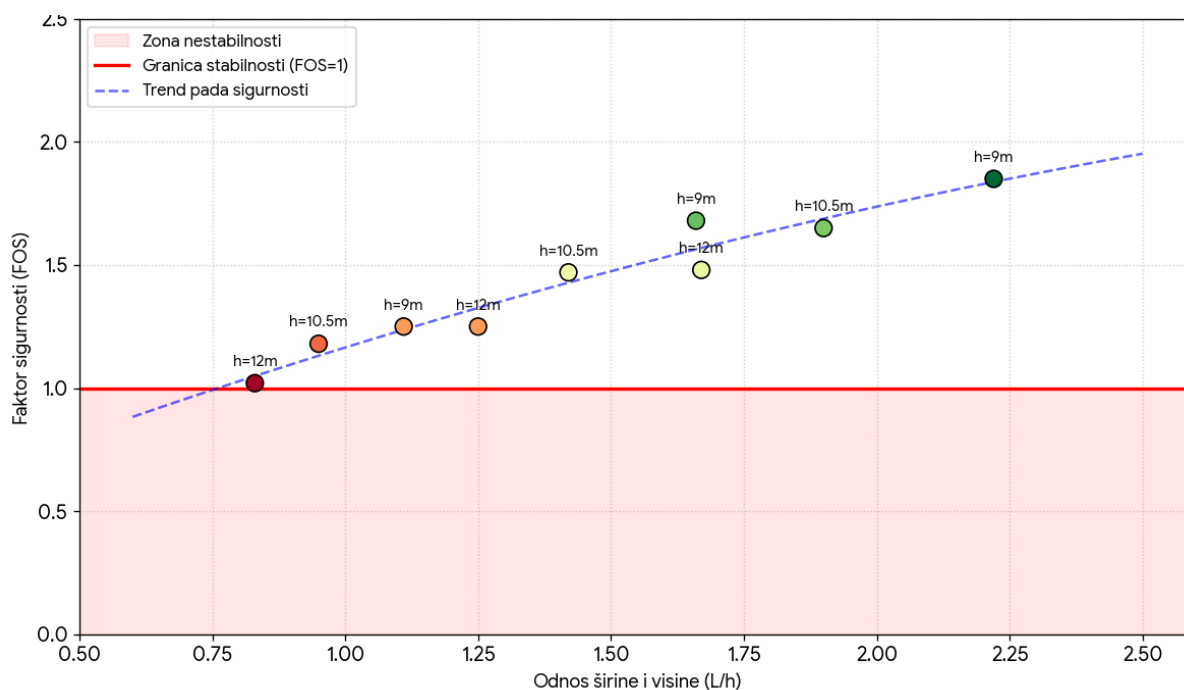


Slika 7-36 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Široki stubovi (20 m) uspešno formiraju noseće elastično jezgro koje preuzima pritisak nadsloja bez značajnih deformacija. Ovakav dizajn sa visinama podsecanja do 10,5 m jedini garantuje faktor sigurnosti iznad 1,5. Pri rastojanju između utovarnih komora od 15 m i za visine podsecanja do 10,5 m, kao i za kombinaciju rastojanje - visina 20/12 sistem ostvaruje zadovoljavajuću stabilnost sa faktorom sigurnosti nešto ispod 1,5. Povećanjem visine na 12 m (čak i kod širih stubova) ili smanjenjem rastojanja na 15 m, stenska masa ulazi u fazu duboke plastifikacije. Bokovi stubova počinju da se ljušte, a krovina gubi idealan oslonac. Pri širini stuba od 10 m faktor sigurnosti pada od graničnih ka kritičnim i nestabilnim vrednostima pri  $L/h \leq 1$ , odnosno uski stubovi su geotehnički nepodobni da izdrže opterećenje, što dalje ukazuje na pojavu totalnog loma jezgra stuba. Tabela 7-34 pokazuje vrednosti faktora sigurnosti za različite vrednosti odnosa  $L/h$  i  $B/h$ , dok je na slici 7-37 prikazan grafik zavisnosti faktora sigurnosti od koeficijenta  $L/h$ .

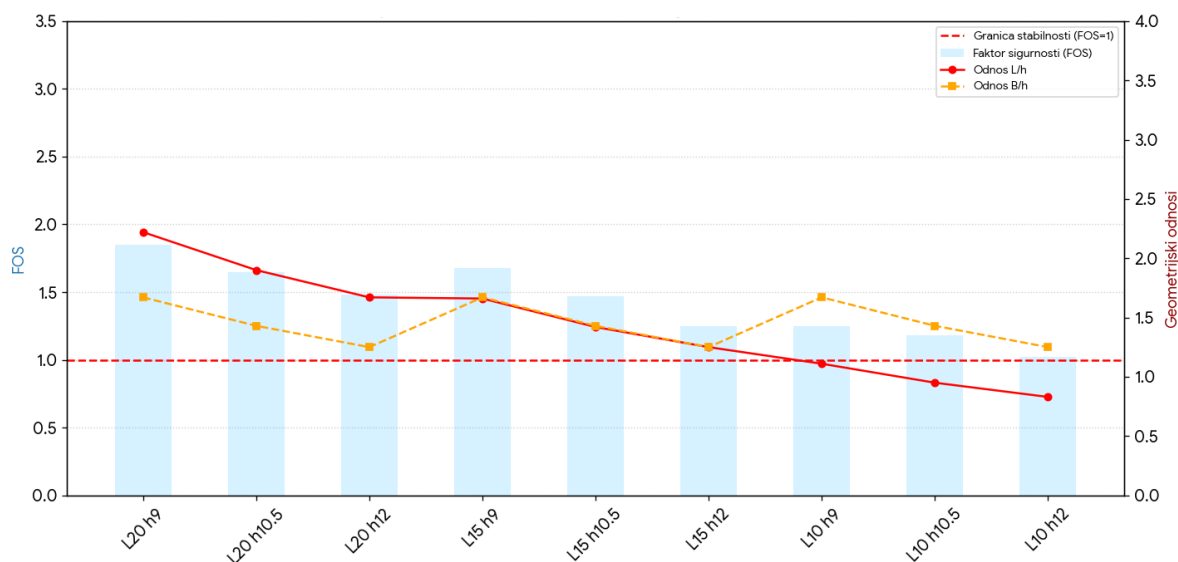
Tabela 7-34 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	9 m	2,22	1,67	1,85	Stabilno
20 m	10,5 m	1,90	1,43	1,65	Stabilno
20 m	12 m	1,67	1,25	1,48	Zadovoljavajuće
15 m	9 m	1,66	1,67	1,68	Stabilno
15 m	10,5 m	1,42	1,43	1,47	Zadovoljavajuće
15 m	12 m	1,25	1,25	1,25	Granično
10 m	9 m	1,11	1,67	1,25	Granično
10 m	10,5 m	0,95	1,43	1,18	Granično
10 m	12 m	0,83	1,25	1,02	Nestabilno



Slika 7-37 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja  $L/h$

Za bezbedan rad bez većeg obima podgrađivanja, odnos  $L/h$  ne sme pasti ispod 1,5. U zoni granične stabilnosti ( $1 < L/h < 1,5$ ) stub je duboko plastifikovan. Spoljašnje ivice stuba su sklone ljuštenju i odronima, a samo usko centralno jezgro nosi teret. Pri odnosu  $L/h < 1$  (zona kritične stabilnosti i zona loma) stub ima veću visinu u odnosu na širinu. Naponske zone sa oba boka se preklapaju u centru stuba, što vodi ka njegovom popuštanju. Faktor sigurnosti teži ka vrednostima blizu jedinice i manje, što znači da stena popušta brže nego što se opterećenje nanosi. Visok odnos  $B/h$  (1,67) ukazuje na to da krovina ima bolji oslonac jer je visina otvora manja u odnosu na širinu. Sa smanjenjem ovog odnosa faktor sigurnosti pada jer veća visina podsecanja u odnosu na širinu stvara nepovoljno naponsko stanje. Zavisnost faktora sigurnosti od odnosa  $L/h$  i  $B/h$  prikazana je na slici 7-38.



Slika 7-38 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja  $L/h$  i širine otkopa i visine podsecanja  $B/h$

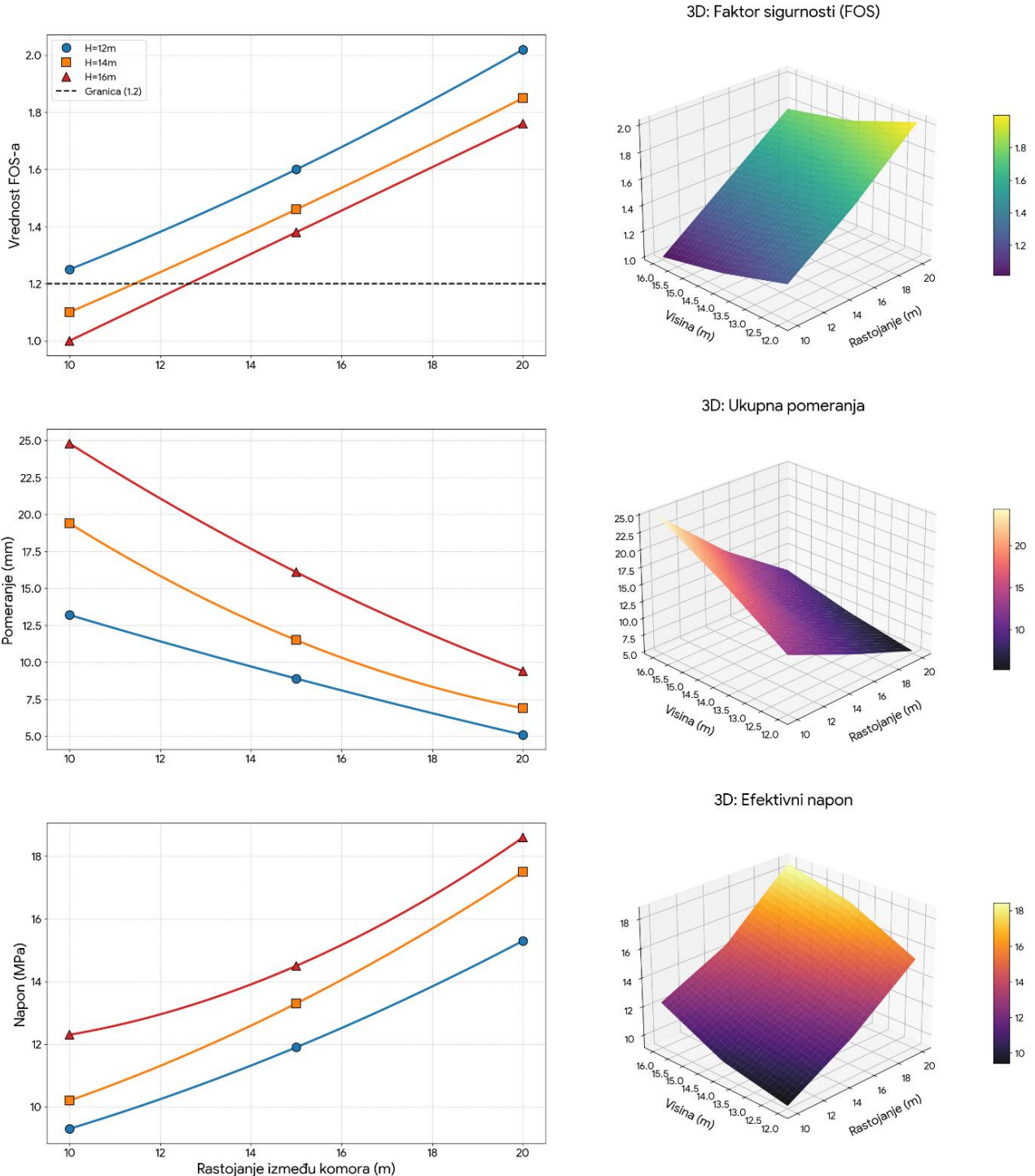
### 7.3.3. Analiza uticaja geometrijskih parametara dna bloka na stabilnost za širinu otkopnog bloka 20 m

Konstrukciju dna bloka kod treće varijante sačinjava otkopni blok širine 20 m sa različitim rastojanjima između utovarnih komora (10, 15, 20 m) pri povećanim visinama podsecanja (12, 14, 16 m) u odnosu na prethodne varijante.

Rastojanje od 10 m između utovarnih komora je u zoni granične stabilnosti za visinu podsecanja 12 m. Međutim, pri visini podsecanja od 16 m, dolazi do značajnog preklapanja zona uticaja susednih komora, što rezultira smanjenjem faktora sigurnosti i povećanim rizikom od plastifikacije stuba. Na rastojanju od 10 m, primetna je značajna interakcija napona. Stub trpi povišene vertikalne napone usled pritiska koji se prenosi sa šireg otkopa (20 m). Oko profila prostorija se javljaju zone plastifikacije koje se pri većim visinama podsecanja šire ka unutrašnjosti stuba. Maksimalna pomeranja su lokalizovana u zoni podsecanja i temenu utovarnih komora. Kako visina podsecanja raste, intenzitet pomeranja se povećava, a zona uticaja se širi dublje u okolnu stensku masu.

Analiza stabilnosti za rastojanje između utovarnih komora od 15 m pokazuje poboljšanje opšte stabilnosti u poređenju sa prethodnim. Stub između utovarnih komora ima dovoljnu širinu da preuzme opterećenje od širokog otkopa, bez ulaska u kritičnu fazu plastifikacije. Zone plastifikacije su uglavnom koncentrisane u samim čoškovima (spojevima) i na bokovima utovarnih komora, koji

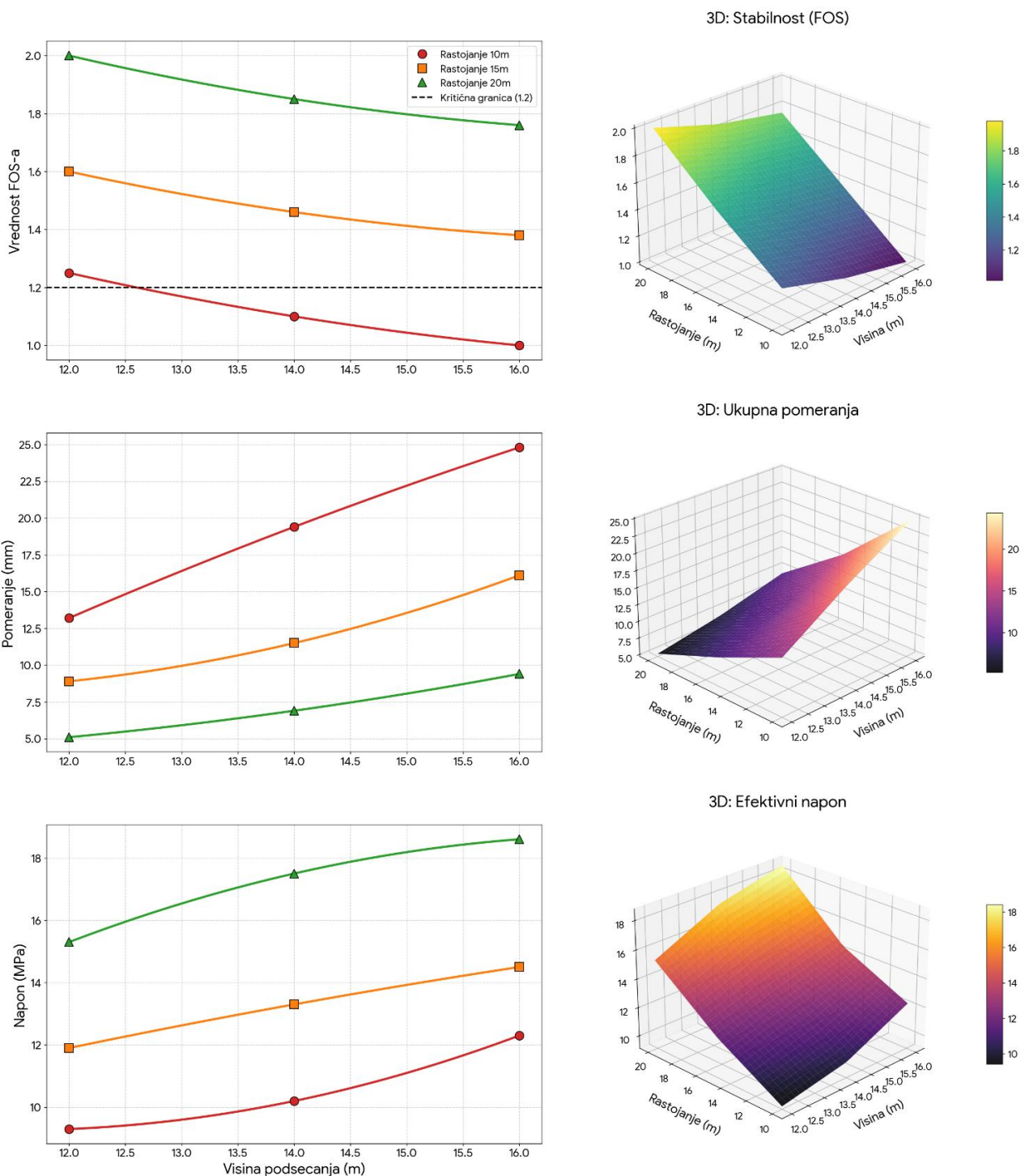
su direktno pod uticajem iskopa. Središnji deo stuba, između dve susedne utovarne komore, ostaje uglavnom u elastičnoj zoni, čak i pri većim visinama podsecanja. Zone najvećih pomeranja lokalizovane su oko temena komora, ali se ne šire u tolikoj meri kroz ceo masiv. Čak i kada se visina podsecanja poveća na 16 m, rastojanje od 15 m uspešno amortizuje dodatne napone, zadržavajući deformacije u prihvatljivim granicama.



Slika 7-39 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na rastojanja između utovarnih komora za različite visine podsecanja

Analiza stabilnosti za rastojanje između utovarnih komora od 20 m pokazuje da ovo rešenje nudi najviši stepen sigurnosti. Sa rastojanjem od 20 m, utovarne komore funkcionišu gotovo kao

potpuno nezavisni objekti. Ovde nema preklapanja naponskih polja, čime se izbegava akumulacija kritičnih napona, pa i pri maksimalnoj visini podsecanja od 16 m faktor sigurnosti u jezgu stuba ostaje visok. Veći deo masiva između utovarnih komora ostaje u elastičnom stanju, što znači da stub ima veliku rezervu nosivosti. Zone popuštanja su lokalizovane uz same ivice profila prostorija i zone podsecanja. Deformacije su koncentrisane u neposrednoj okolini iskopa i ne prenose se značajno kroz masiv. Na slici 7-39 grafički je prikazana zavisnost parametara stabilnosti od rastojanja između utovarnih komora, a na slici 7-40 zavisnost parametara stabilnosti od visina podsecanja.



Slika 7-40 Grafik promene parametara stabilnosti u odnosu na visine podsecanja

Za visinu podsecanja od 12 m, sistem je stabilan u svim analiziranim konfiguracijama. Pri širini stuba od 10 m primetna je značajna interakcija napona između prostorija u dnu. Stub trpi povišene vertikalne napone, a zone plastifikacije se javljaju oko profila i šire ka unutrašnjosti stuba. Pomeranja su lokalizovana u zoni podsecanja i temenu hodnika. Sa povećanjem širine stuba uslovi stabilnosti se poboljšavaju. Središnji deo stuba ostaje u elastičnoj zoni. Zone plastifikacije su koncentrisane samo u ćoškovima i na bokovima utovarnih komora. Pomeranja su pod kontrolom i ne šire se kroz ceo masiv. Parametri stabilnosti za visinu podsecanja 12 m dati su u tabeli 7-35.

Tabela 7-35 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 12 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,25 (Granično)	1,60 (Stabilno)	2 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	12,5 mm	7,8 mm	4,8 mm
Ukupna pomeranja	13,2 mm	8,9 mm	5,1 mm
Srednji efektivni napon	9,28 MPa	11,94 MPa	15,26 MPa
Status jezgra stuba	Početna plastifikacija	Uglavnom elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Uglovi i teme utovarnih komora	Ivice komora i podseka	Isključivo linija iskopa
Glavni rizik	Lokalno popuštanje i krt lom	Minimalne deformacije	Bez značajnog uticaja

Povećanje visine na 14 m najviše pogađa varijantu sa rastojanjem od 10 m, gde stub počinje da gubi svoju primarnu funkciju nosivosti. Nasuprot tome, rastojanja od 15 m i 20 m zadržavaju stabilnost. Kod širine stuba od 10 m interakcija napona između utovarnih komora postaje intenzivna. Zone plastifikacije se šire duboko u jezgro stuba. Maksimalna pomeranja u temenu utovarnih komora značajno rastu, a zona uticaja zahvata veći deo okolnog masiva. Sa povećanjem rastojanja između utovarnih komora središnji deo stuba ostaje u elastičnoj zoni. Zone popuštanja su i dalje koncentrisane samo uz ivice hodnika i zonu podsecanja. Pri širini stuba od 20 m jezgro stuba ostaje elastično, što garantuje dovoljnu rezervu nosivosti. U tabeli 7-36 prikazani su parametri stabilnosti za visinu podsecanja 14 m.

Tabela 7-36 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 14 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,1 (granično/kritično)	1,46 (zadovoljavajuće)	1,85 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	15,8 mm	9,7 mm	6,1 mm
Ukupna pomeranja	19,4 mm	11,5 mm	6,9 mm
Srednji efektivni napon	10,23 MPa	13,3 MPa	17,47 MPa
Status jezgra stuba	Duboka plastifikacija	Dominantno elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Jezgro stuba i krovina	Bokovi i uglovi hodnika	Ivice profila hodnika
Glavni rizik	Spajanje zona popuštanja	Lokalno ljuštenje bokova	Bez značajnog rizika

Sa povećanjem visine podsecanja na 16 m, pri širini stuba od 10 m, dolazi do značajnog preklapanja zona uticaja utovarnih komora i stub više ne može nezavisno da nosi opterećenje. Ovo rezultira smanjenjem faktora sigurnosti do zone nestabilnosti (loma). Povećanje rastojanja između utovarnih komora na 15 m uspešno amortizuje dodatne napone. Stub između utovarnih prostorija ima dovoljnu širinu da preuzme opterećenje od širokog otkopa, bez ulaska u kritičnu fazu plastifikacije. Zone najvećih pomeranja su i dalje lokalizovane oko temena komora i zadržavaju se u prihvatljivim granicama, ne šireći se kroz ceo masiv. Daljim povećanjem rastojanja na 20 m čak i pri visini

podsecanja od 16 m, utovarne komore i hodnici funkcionišu kao potpuno nezavisni objekti, što garantuje visoku rezervu nosivosti i dugotrajnu stabilnost. Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m dati su u tabeli 7-37.

Tabela 7-37 Rezultati simulacije za visinu podsecanja 16 m

Parametar	Rastojanje između bočnih utovarnih komora		
	10 m	15 m	20 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,0 (nestabilno)	1,38 (zadovoljavajuće)	1,76 (stabilno)
Vertikalna pomeranja	22,1 mm	13,26 mm	8,7 mm
Ukupna pomeranja	24,9 mm	16,1 mm	9,4 mm
Srednji efektivni napon	12,33 MPa	14,5 MPa	18,67 MPa
Status jezgra stuba	Potpuno razoren (spajanje zona)	Uglavnom elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Ceo stub, tranšeja i okolni masiv	Ćoškovi i bokovi komora	Isključivo ivice profila
Glavni rizik	Potpuni kolaps i gubitak stuba	Lokalna popuštanja uz ivice	Minimalan

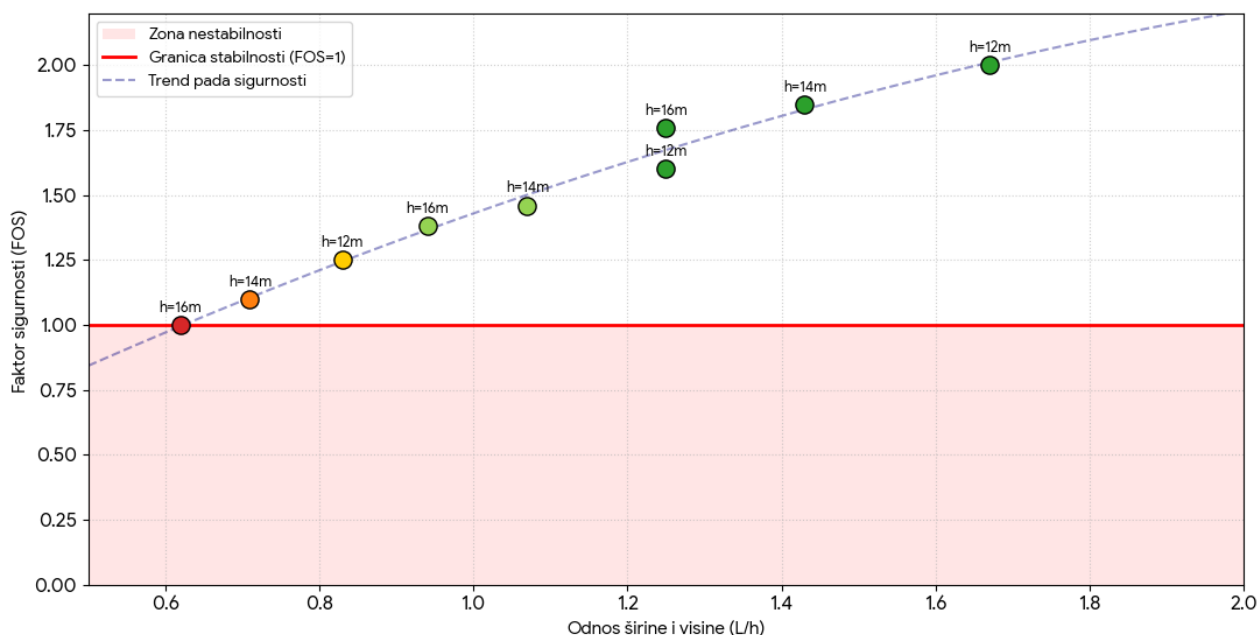
Analiza odnosa  $L/h$  direktno definiše vitkost stuba i intenzitet interakcije naponskih polja. Kada je rastojanje između hodnika manje od visine podsecanja, koeficijent vitkosti je manji od 1, stabilnost drastično opada i sistem prelazi iz graničnog u kritično i nestabilno stanje. U ovoj zoni dolazi do spajanja polja napona oko dve susedne prostorije, stub ulazi u stanje potpune plastifikacije pri čemu faktor sigurnosti pada ispod kritične granice. Zona granične stabilnosti predstavlja granicu gde sistem prelazi iz uslovno stabilnog u sigurno stanje ( $0,8 \leq L/h \leq 1,25$ ). Ovde stub ima dovoljno široko elastično jezgro. Iako se javljaju zone plastifikacije na bokovima, one se ne spajaju. Stabilnost je zadovoljavajuća, ali su pomeranja primetna. Zona stabilnosti ( $L/h > 1,25$ ) se formira kada je rastojanje veće od visine podsecanja, pa je interakcija naponskih polja između susednih objekata svedena na minimum. U ovom slučaju faktor sigurnosti je visok ( $FOS > 1,5$ ), stub poseduje dovoljnu rezervu nosivosti, a deformacije su minimalne i strogo lokalizovane. Faktor sigurnosti za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka prikazan je u tabeli 7-38, dok je njihova grafička zavisnost prikazana na slici 7-41.

Tabela 7-38 Rezultati simulacije za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos $L/h$	Odnos $B/h$	Faktor sigurnosti (FOS)	Procena stabilnosti
20 m	12 m	1,67	1,67	2,0	Stabilno
20 m	14 m	1,43	1,43	1,85	Stabilno
20 m	16 m	1,25	1,25	1,76	Stabilno
15 m	12 m	1,25	1,67	1,60	Stabilno
15 m	14 m	1,07	1,43	1,46	Zadovoljavajuća
15 m	16 m	0,94	1,25	1,38	Zadovoljavajuća
10 m	12 m	0,83	1,67	1,25	Granično
10 m	14 m	0,71	1,43	1,1	Granično/kritično
10 m	16 m	0,62	1,25	1,0	Nestabilno

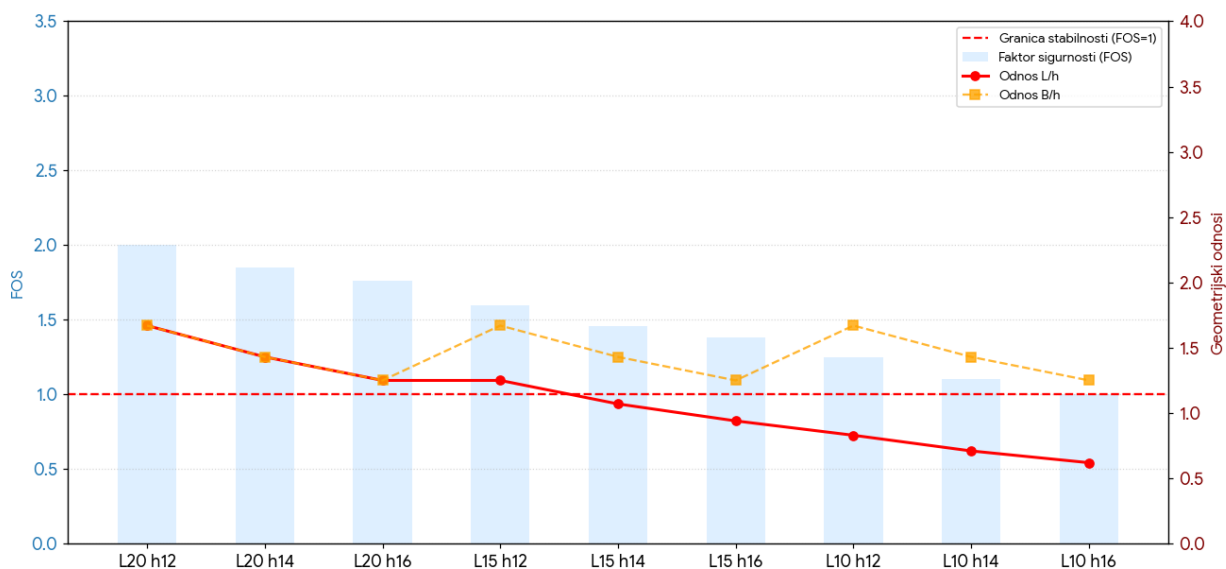
Analiza odnosa  $B/h$  definiše intenzitet primarnog opterećenja koje se sa širokog otkopa prenosi na stubove između utovarnih komora. Pri odnosu  $B/h > 1,6$  vertikalni naponi su ravnomerno raspoređeni, a stubovi imaju dovoljnu masu da amortizuju pritisak. Kako se visina podsecanja povećava ovaj odnos opada a stubovi postaju vitkiji u odnosu na širinu otkopa. Naponi počinju da se

koncentrišu u jezgru stuba, što rezultira dubokom plastifikacijom i smanjenjem faktora sigurnosti. Na slici 7-42 prikazana je promena faktora sigurnosti u zavisnosti od odnosa L/h i B/h.



Slika 7-41 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Stabilnost sistema direktno zavisi od interakcije naponskih polja između utovarnih komora. Sa povećanjem visine podsecanja sa 12 m na 16 m, pritisak sa širokog otkopa (20 m) se intenzivnije prenosi na stub, dovodeći do progresivnog širenja zona plastifikacije. Za razliku od visina podsecanja, sa povećanjem rastojanja između utovarnih komora stabilnost raste jer stubovi koji se formiraju između utovarnih komora postaju širi i masivniji i samim tim sposobniji da prime veće opterećenje.



Slika 7-42 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

### 7.3.4. Zaključna razmatranja analize stabilnosti za Model III

Model III predstavlja specifičnu konfiguraciju dna bloka sa dvostranim bočnim utovarom, sa utovarnim komorama u šahovskom poretku. Ovakav raspored komora direktno utiče na preraspodelu napona u stubovima masiva između utovarnih komora i krovini prostorija. Analiza obuhvata uticaj tri ključna geometrijska parametra: širine otkopnog bloka, visine tranšejnog podsecanja i rastojanja (širine zaštitnog stuba) između bočnih utovarnih komora. U Modelu III, šahovski raspored utovarnih komora osmišljen je da smanji međusobni uticaj otvorenih prostora u stenskoj masi. U šahovskom rasporedu utovarnih komora naponska polja naspramnih prostorija se mimoilaze. Napon koji obilazi oko utovarne komore sa jedne strane nailazi na pun masiv sa druge strane, što utiče na smanjenje napona u odnosu na simetrični raspored utovarnih komora. Međutim, promena širine bloka bitno menja naponsko stanje i direktno određuje raspon krovine tranšeje i opterećenje koje se prenosi na stubove između utovarnih komora.

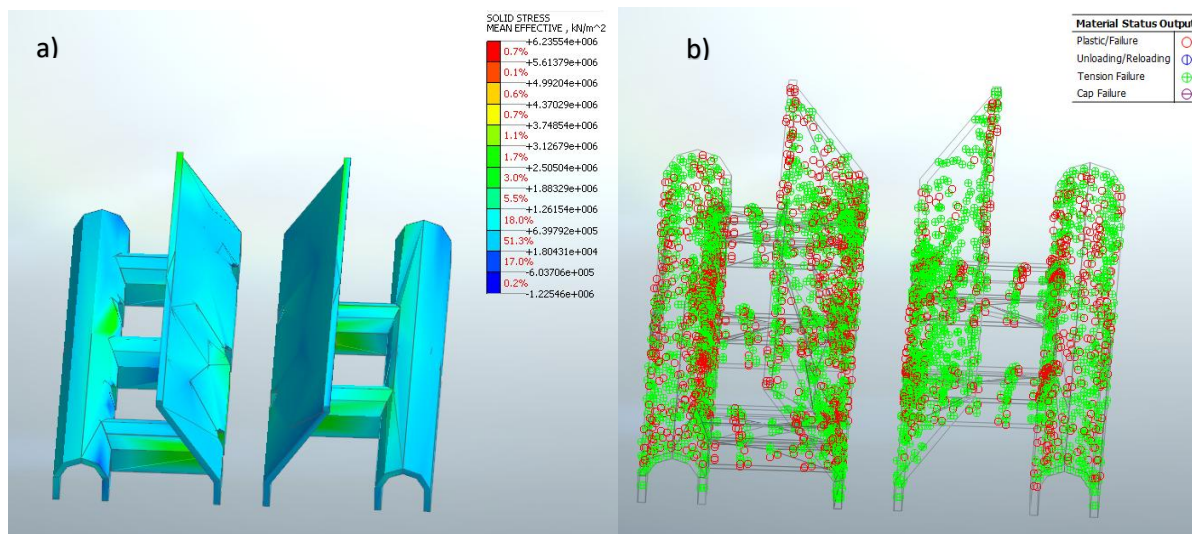
U prvoj varijanti sa širinom otkopnog bloka od 10 m uži otkopni blok vodi ka manjem rasponu krovine tranšejnog podsecanja. Šahovski raspored ovde najbolje funkcioniše jer sprečava spajanje polja napona. Tranšeja u ovoj varijanti ima najveću sopstvenu nosivost. Čak i pri maksimalnoj visini podsecanja od 8 m, uz rastojanje između utovarnih komora od 20 m, konstrukcija ostaje u zoni sigurnosti ( $FOS > 1,8$ ). Vertikalna pomeranja su najmanja pri geometrijskom dizajnu sa ovakvim rasponom otkopa, što ukazuje na očuvan integritet masiva. Što se mehanizma loma tiče, dominira lokalno popuštanje ivica stubova na spoju sa tranšejom, kod malih rastojanja ( $L=10$  m).

Drugu varijantu sa širinom otkopnog bloka od 15 m karakteriše umereno opterećenje krovnog svoda. Povećanje širine otkopa za 50% značajno menja distribuciju napona. Ova varijanta zahteva strožu kontrolu visine podsecanja ( $h \leq 10,5$  m) i minimalno rastojanje između bočnih utovarnih komora od 15 m. Kod rastojanja od 10 m, stubovi ulaze u zonu duboke plastifikacije, što dovodi do smanjenja faktora sigurnosti. Pri visini podsecanja od 9 m i širine stuba 10 m, konstrukcija prelazi u zonu granične stabilnosti. Početna plastifikacija jezgra stuba javlja se ranije nego u prethodnoj varijanti. Krovina počinje da pokazuje znake izvijanja, dok pomeranja rastu za oko 30-40% u odnosu na prethodnu varijantu.

Treća varijanta sa najvećom širinom otkopnog bloka (20 m) je najrizičnija. Pri ovoj širini bloka, sa manjim rastojanjem između utovarnih komora, šahovski raspored utovarnih komora najmanje utiče na stabilnost, jer je sistem u ovoj varijanti teži od granične zone ka zoni loma. Jedino pri najvećem rastojanju 20 m, faktor sigurnosti ostaje u granicama većim od 1,5. Kod ove varijante dominira popuštanje krovine usled velikog raspona. Modifikacije sa visinom podsecanja većim od 12 m i rastojanjem između utovarnih komora manjim od 15 m, ulaze u zonu kritične stabilnosti i zonu nestabilnosti. Ukupna pomeranja su ovde najveća, uz duboku plastifikaciju koja zahvata čitav poprečni presek stuba između prostorija.

Kod najužeg otkopnog bloka, sistem je najtolerantniji na vitkost stubova. Analizom je ustanovljeno da je pri širini otkopa od 10 m kritična granica stabilnosti pri odnosu  $L/h = 1,5$ . Pri manjem koeficijentu vitkosti stuba ( $L/h = 1,25$ ) faktor sigurnosti je 1,12 (granična stabilnost). Stub je potpuno plastifikovan, ali mali raspon krovine tranšeje (10 m) sprečava trenutno urušavanje. Pri većim vrednostima koeficijenta vitkosti stuba ( $L/h > 2$ ) sistem je stabilan ( $FOS > 1,7$ ). Povećanje širine bloka na 15 m povećava pritisak na stubove. Pri koeficijentu vitkosti 1,25 konstrukcija prelazi u zonu granične stabilnosti, da bi sa daljim smanjnjem vrednosti ovog odnosa ispod 1, sistem prešao u nestabilnu zonu. U tom slučaju dolazi do duboke plastifikacije koja se širi iz jezgra stuba ka krovini. I u ovom slučaju se veća stabilnost ostvaruje pri vrednostima koeficijenta vitkosti većim od 2, dok je za siguran rad neophodan odnos rastojanja i visine podsecanja od 1,5. Najveća širina bloka menja ulogu koeficijenta vitkosti. Pri vrednostima većim od 1,25 sistem se nalazi u zoni stabilnosti. Tek sa padom odnosa  $L/h$  ispod 1 sistem prelazi u zonu granične stabilnosti da bi u zonu loma prešao tek pri odnosu  $L/h < 0,8$ . U tom slučaju dolazi do potpunog loma konstrukcije, jer prevelik raspon tranšeje

u krovinskom delu izaziva prevelik pritisak koji vitki stubovi ne mogu da apsorbuju. Na slici 7-43 prikazani su naponsko stanje i zone plastifikacije za dno bloka sa rastojanjem između utovarnih komora 15 m i visinom podsecanja 9 m.



Slika 7-43 Varijanta Modela III sa rastojanjem između utovarnih komora 15 m i visinom dna bloka 9 m  
a) Polja napona; b) Zone plastifikacije

Odnos B/h se u svim varijantama kreće od 1,25-1,67, s tim što se faktor sigurnosti razlikuje u zavisnosti od širine otkopnog bloka. U prvoj varijanti sa širinom otkopnog bloka 10 m stabilnost je visoka. Naponski lukovi su strmi, što omogućava krovini da ostane stabilna čak i uz minimalnu podgradu. Faktor sigurnosti se kreće u rasponu od 1,67-1,81, što ukazuje na to da su stubovi dovoljno masivni u odnosu na raspon otvora transeje. U varijantama sa većom širinom otkopnog bloka (15 m i 20 m) odnos B/h je isti kao u prvoj varijanti, ali povećanje širine otkopa povlači i povećanje visine podsecanja, što utiče na smanjenje koeficijenta vitkosti stuba L/h. Faktor sigurnosti opada, a stabilnost se smanjuje.

Tabela 7-39 Upporedni odnos faktora sigurnosti pri identičnim vrednostima odnosa L/h

Varijanta	Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos	Faktor sigurnosti (FOS)	Status masiva
I	10 m	6 m	1,67	1,35	Zadovoljavajuće
II	15 m	9 m	1,67	1,68	Stabilno
III	20 m	12 m	1,67	2,0	Stabilno

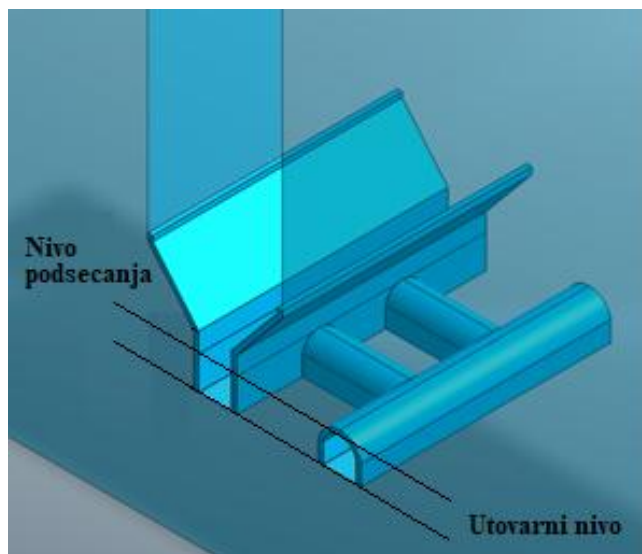
Smanjenje stabilnosti sistema ne odvija se linearno, već sa približavanjem kritičnim tačkama (stanje loma), pad faktora sigurnosti se ubrzava. Zbirno ponašanje konstrukcije najbolje se može opisati eksponencijalnom funkcijom:

$$FOS = 0,61 \cdot e^{0,68 \cdot (B/h)} \quad (31)$$

Svako povećanje odnosa B/h sa manjom visinom podsecanja eksponencijalno doprinosi sigurnosti, naročito u varijantama sa širim otkopima. Rezultati analize ukazuju na to da treba težiti šahovskom rasporedu utovarnih komora sa što manjom širinom bloka kako bi se maksimizovao efekat izolovanih objekata koji ovaj model nudi.

#### 7.4. Analiza rezultata numeričkog modeliranja - Model IV

Ovaj numerički model predstavlja konstrukciju dna bloka sa jednostranim bočnim utovarom i nivoom utovara ispod nivoa podsecanja (slika 7-44). Kod ovog modela utovarne komore i utovarni hodnik su „spušteni“ niže u odnosu na hodnik podsecanja (bušenja), stvarajući vizuelni efekat povišenog dna tranšeje. Na taj način se povećava visina masiva između utovarnih komora i gornje ivice boka tranšeje u odnosu na konstrukciju sa istim geometrijskim parametrima i utovarom i podsecanjem na istom nivou. S obzirom na to da su kod prethodnih modela već utvrđene određene zakonitosti promena parametara stabilnosti, kod ovog modela su analizirane samo određene varijante geometrijskih parametara, sa ciljem da se dobijeni rezultati uporede sa istim varijantama iz prethodnih modela.



Slika 7-44 Konstrukcija dna bloka sa jednostranim bočnim utovarom i utovarnim nivoom ispod nivoa podsecanja

Konstrukcija dna bloka sa širinom otkopa od 10 m pokazuje najveću stabilnost, uz minimalna pomeranja. Kod ove varijante analizirane su modifikacije sa rastojanjima između utovarnih komora i visinama podsecanja 10/6, 15/6 i 20/7. Rezultati analize prikazani su u tabeli 7-40.

Tabela 7-40 Rezultati numeričke analize za širinu otkopa 10 m

Parametar	L = 10 m, h = 6 m	L = 15 m, h = 6 m	L = 20 m, h = 7 m
Faktor sigurnosti (FOS)	2,27 (Visoka stabilnost)	2,58 (Visoka stabilnost)	2,93 (Visoka stabilnost)
Vertikalna pomeranja	1,99 mm	1,83 mm	1,57 mm
Ukupna pomeranja	2,45 mm	2,25 mm	1,86 mm
Srednji efektivni napon	8,95 MPa	8,27 MPa	8,45 MPa
Status jezgra stuba	Elastično stanje	Potpuno elastično	Neporemećeno (Elastično)
Kritične zone	Ivice tranšeje i komora	Donji uglovi tranšeje	Nema kritičnih zona
Glavni rizici	Koncentracija napona na bokovima	Nema značajnih rizika	Nema značajnih rizika

Povećanjem širine otkopa na 15 m dolazi do blagog pada faktora sigurnosti i povećanja napona u krovini. I pored većeg raspona otkopa (tranšeje) i povećanja visine podsecanja, zadržava se visok faktor sigurnosti, uz neznatna povećanja pomeranja koja su i dalje u granicama dozvoljenih vrednosti. Parametri stabilnosti za širinu otkopa 15 m dati su u tabeli 7-41.

Tabela 7-41 Rezultati numeričke analize za širinu otkopa 15 m

Parametar	L = 10 m, h = 9 m	L = 15 m, h = 9 m	L = 20 m, h = 10,5 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,84 (Stabilno)	2,08 (Visoka stabilnost)	2,32 (Visoka stabilnost)
Vertikalna pomeranja	2,27 mm	1,94 mm	1,67 mm
Ukupna pomeranja	2,78 mm	2,33 mm	2,05 mm
Srednji efektivni napon	10,8 MPa	8,86 MPa	8,55 MPa
Status jezgra stuba	Napregnuto, elastično	Elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Ivice tranšeje i krovina	Ivice i bokovi hodnika	Donje ivice podsecanja
Glavni rizici	Koncentracija napona u krovini	Lokalna slabljenja konture	Nema značajnih rizika

Kod maksimalne širine otkopa (20 m), faktori sigurnosti su i dalje u dozvoljenim granicama stabilnosti, ali su deformacije i naponi najizraženiji. Pri smanjenju rastojanja između utovarnih hodnika na 10 m faktor sigurnosti pada ispod 1,5. Rezultati numeričke analize za širinu otkopa 20 m prikazani su u tabeli 7-42.

Tabela 7-42 Rezultati numeričke analize za širinu otkopa 20 m

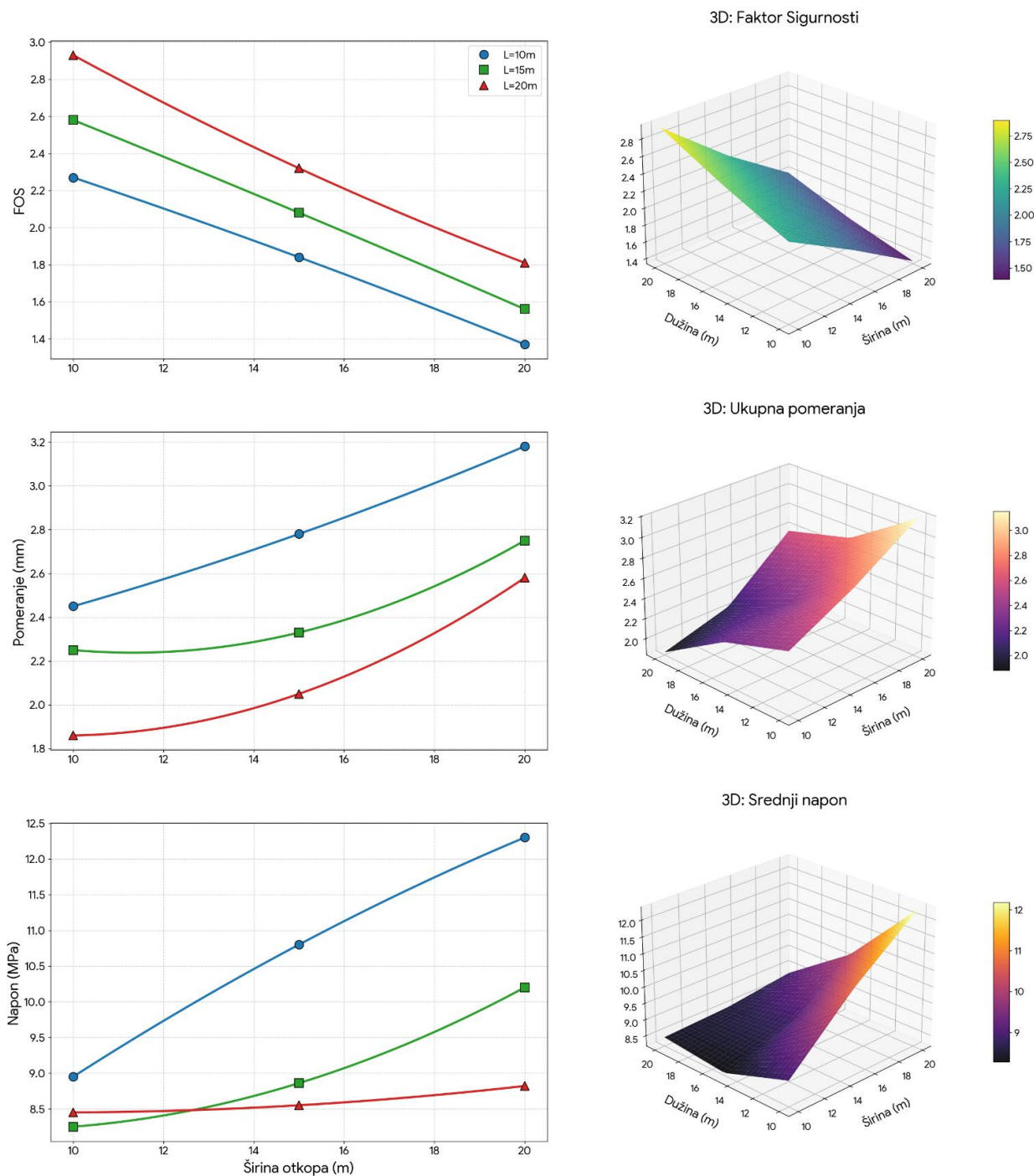
Parametar	L = 10 m, h = 12 m	L = 15 m, h = 12 m	L = 20 m, h = 16 m
Faktor sigurnosti (FOS)	1,37 (Zadovoljavajuće)	1,56 (Stabilno)	1,81 (Stabilno)
Vertikalna pomeranja	2,59 mm	2,21 mm	2,11 mm
Ukupna pomeranja	3,18 mm	2,75 mm	2,58 mm
Srednji efektivni napon	12,3 MPa	10,2 MPa	8,81 MPa
Status jezgra stuba	Napregnuto, elastično	Elastično	Potpuno elastično
Kritične zone	Ivice tranšeje i krovina	ivice i bokovi hodnika	Donje ivice podseka
Glavni rizici	Pritisak na bokove utovarnih komora	Koncentracija napona u krovini	Nema značajnih rizika

Svi analizirani modeli pokazuju faktor sigurnosti veći od 1,3, što ukazuje na to da su predložene geometrije stabilne pod zadatim uslovima. Najveća pomeranja i najniži faktori sigurnosti javljaju se kod širine bloka od 20 m, posebno kada je rastojanje između komora nisko (10 m) u odnosu na visinu podsecanja. Zone plastičnih deformacija javljaju se uglavnom u uglovima podsecanja (spoj tranšeje i bokova otkopa) i na bokovima utovarnih komora, što je očekivano mesto koncentracije napona. Na slici 7-45 prikazana je promena parametara stabilnosti za različite širine otkopnih blokova.

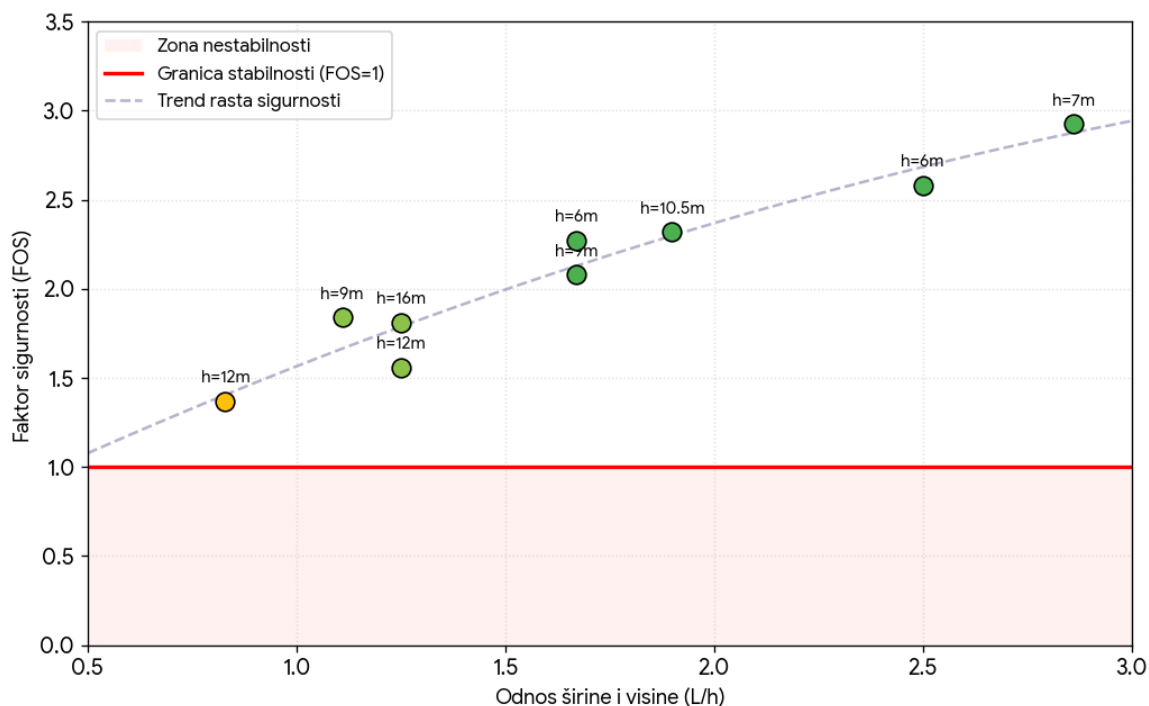
Tabela 7-43 Rezultati numeričke analize za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka

Širina stuba (L)	Visina (h)	Odnos L/h	Odnos B/h	FOS	Procena stabilnosti
20 m	7 m	2,86	1,43	<b>2,93</b>	Visoka stabilnost
20 m	10,5 m	1,90	1,43	<b>2,32</b>	Visoka stabilnost
20 m	16 m	1,25	1,25	<b>1,81</b>	Stabilno
15 m	6 m	2,50	1,67	<b>2,58</b>	Visoka stabilnost
15 m	9 m	1,67	1,67	<b>2,08</b>	Visoka stabilnost
15 m	12 m	1,25	1,67	<b>1,56</b>	Stabilno
10 m	6 m	1,67	1,67	<b>2,27</b>	Visoka stabilnost
10 m	9 m	1,11	1,67	<b>1,84</b>	Stabilno
10 m	12 m	0,83	1,67	<b>1,37</b>	Zadovoljavajuće

Kada je rastojanje između utovarnih komora znatno veće od visine podsecanja, sistem se ponaša izuzetno stabilno ( $L/h > 1,6$ ). U zoni visoke stabilnosti faktor sigurnosti je konstantno visok ( $FOS > 2$ ). Pomeranja su minimalna, a zone uticaja pojedinačnih komora se ne preklapaju. Stub između bočnih utovarnih komora je masivan i krut. U zoni stabilnosti ( $1 \leq L/h \leq 1,6$ ) faktor sigurnosti se i dalje održava na visokom nivou. Pomeranja su neznatno veća, bez većeg uticaja na stabilnost sistema. Iako se visina podsecanja povećava, povećano rastojanje između utovarnih prostorija uspešno kompenzuje pritisak, sprečavajući degradaciju stuba. Kada se visina podsecanja približi ili premaši rastojanje između komora, stabilnost opada ka graničnim vrednostima ( $L/h \leq 1$ ). Stub postaje vitak, dok zone plastifikacije sa bokova počinju da prodiru ka jezgru stuba. Rezultati analize za različite odnose geometrijskih parametara dna bloka prikazani su u tabeli 7-43, dok je na slici 7-46 prikazana promena faktora sigurnosti za različite vrednosti koeficijenta  $L/h$ .

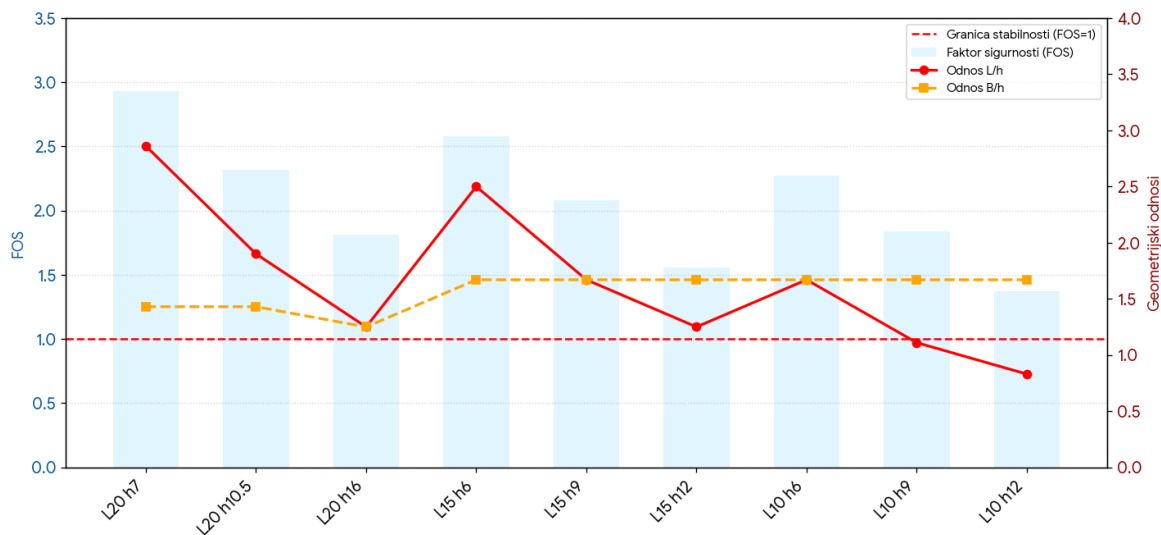


Slika 7-45 Grafik zavisnosti parametara stabilnosti za različite širine otkopa



Slika 7-46 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h

Kod ovog modela se najbolje oslikava uticaj rastojanja između utovarnih komora na stabilnost sistema za iste vrednosti koeficijenta B/h. Kada je širina otkopa znatno veća od visine podsecanja ( $B/h > 1,6$ ), stabilnost primarno zavisi od nosivosti neposredne krovine. U slučaju kada je odnos B/h praćen i povoljnim odnosom L/h ostvaruje se odgovarajuća stabilnost konstrukcije. Slika 7-47 prikazuje promenu faktora sigurnosti za različite vrednosti koeficijenta L/h i B/h.



Slika 7-47 Grafik promene faktora sigurnosti prema odnosu rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja L/h i širine otkopa i visine podsecanja B/h

Analiza odnosa B/h pokazuje da povećanje apsolutne širine otkopa ima mnogo snažniji negativan uticaj na stabilnost nego samo povećanje visine podsecanja. Kod manjih odnosa B/h, stabilnost više zavisi od širine stuba L nego od same širine otkopa.

Ubrzano slabljenje stabilnosti kako se približavamo kritičnom rasponu najbolje se može predstaviti eksponencijalnim modelom:

$$FOS = 0,75 \cdot e^{0,66 \cdot (B/h)} \quad (32)$$

Eksponencijalni model predviđa nagli pad stabilnosti kada odnos B/h padne ispod 1,2. Svako smanjenje odnosa B/h za 0,1 (npr. povećanje visine podsecanja) rezultira eksponencijalnim padom faktora sigurnosti za oko 7%.

## 7.5. Komentar

Analiza dobijenih rezultata ukazuje na jasnu korelaciju između geometrijskog dizajna dna bloka i globalne stabilnosti sistema, što je kvantifikovano kroz faktor sigurnosti (FOS), promenu statusa naprezanja unutar masiva i pomeranja (deformacije) usled izloženosti masiva naprezanju. Istraživanjem je dokazano da globalna stabilnost sistema nije linearna funkcija pojedinačnih parametara, već rezultat složene interakcije faktora vitkosti stuba (L/h) i eksponencijalnog pritiska krovine koji generiše širina otkopa (B/h).

Kao tehnički najpovoljnije rešenje izdvaja se Model IV sa „spuštenim“ utovarnim nivoom. Kod ovog modela povećanje visine masiva između utovarnih prostorija funkcioniše kao ključna zaštitna barijera. Spuštanjem utovarnog nivoa formira se zona netaknute, elastične stene koja efikasno izoluje naponsko polje prostorija od zona dinamičkog uticaja otkopa, što se potvrđuje nižim vrednostima napona u odnosu na druge modele.

Nasuprot tome, Model II (simetrični dvostrani utovar) pokazuje najniži stepen stabilnosti. Glavni nedostatak ovog modela je direktno sučeljavanje naponskih polja u središtu masiva između utovarnih komora, što dovodi do drobljenja jezgra i nelinearnog skoka deformacija. Međutim, uvođenjem šahovskog rasporeda utovarnih komora (Model III), izbegava se preklapanje naponskih polja između naspramnih komora. Na taj način se sprečava formiranje jedinstvene zone smicanja kroz centar stuba, što rezultuje poboljšanjem stabilnosti.

Tabela 7-44 Uporedna analiza geomehaničke stabilnosti modela konstrukcije dna bloka

Parametar	Model I Jednostrani utovar	Model II Dvostrani simetrični	Model III Dvostrani šahovski	Model IV Spušten utovarni nivo
Faktor sigurnosti (FOS)	2,08	1,42	1,51	2,45
Srednji efektivni napon (MPa)	8,86	13,12	11,95	7,42
Ukupna pomeranja (mm)	2,33	6,40	5,22	1,15
L/h	1,67	1,43	1,43	2,10
B/h	1,67	1,43	1,43	1,90
Status masiva u stubu	Elastično jezgro	Delimično plastifikovano	Elastično	Potpuno elastično

U svim modelima, povećanje visine podsecanja (h) deluje kao katalizator nestabilnosti. Model II najbrže gubi nosivost jezgra stuba, dok je Model IV najotporniji na ove promene. Spuštanjem nivoa utovarnih hodnika Model IV postiže najniže napone i minimalna pomeranja. Uporedna analiza Modela II i Modela III pokazuje da se prostornim mimoilaženjem utovarnih komora može dobiti povećanje faktora sigurnosti od oko 6-10% u odnosu na Model II, bez promene dimenzija hodnika i parametara dna bloka. Kod Modela II se primećuje nelinearan skok deformacija, gde „gnječenje“ stuba usled dvostranog pritiska dovodi do većih pomeranja u odnosu na ostale modele.

## 7.6. Definisane univerzalnog modela stabilnosti

Analizom podataka numeričke simulacije, u većem broju modela ustanovljena je nelinearna priroda loma i eksponencijalni uticaj apsolutne širine stuba između utovarnih komora, pa je na osnovu podataka za ključne geometrijske promenljive (širina stuba, širina otkopa i visina podsecanja) za sva 4 modela, putem nelinearne regresije ustanovljena zajednička empirijska formula globalne stabilnosti sistema:

$$FOS = \lambda \cdot \left( \alpha \cdot \frac{L}{h} + \beta \cdot e^{\gamma \cdot \frac{B}{h}} \right) \quad (33)$$

Gde su:

$L/h$  – Koeficijent vitkosti stuba (primarni nosilac opterećenja),

$B/h$  – Geometrija otkopa (generator napona u krovini),

$\lambda$  – Tehnički koeficijent (koeficijent tehničke konstrukcije dna bloka),

$\alpha, \beta, \gamma$  – Empirijski koeficijenti stenske mase.

Uticaj vitkosti stuba, odnosno odnos rastojanja između utovarnih komora i visine podsecanja ( $L/h$ ) predstavlja linearni deo formule i u praksi se odnosi na bazičnu nosivost stuba formiranog između utovarnih komora. Rezultati softverske simulacije pokazuju da povećanje apsolutne širine  $L$  linearno povećava zapreminu zdravog jezgra stuba.

Eksponencijalni deo formule ( $e^{\gamma \cdot \frac{B}{h}}$ ) predstavlja njen ključni deo. Ovaj deo formule objašnjava zašto stabilnost opada sa povećanjem širine otkopa ( $B$ ) ili visine podsecanja ( $h$ ). Eksponencijalna funkcija najbolje opisuje stanje povećanja napona pri kritičnim geometrijskim odnosima.

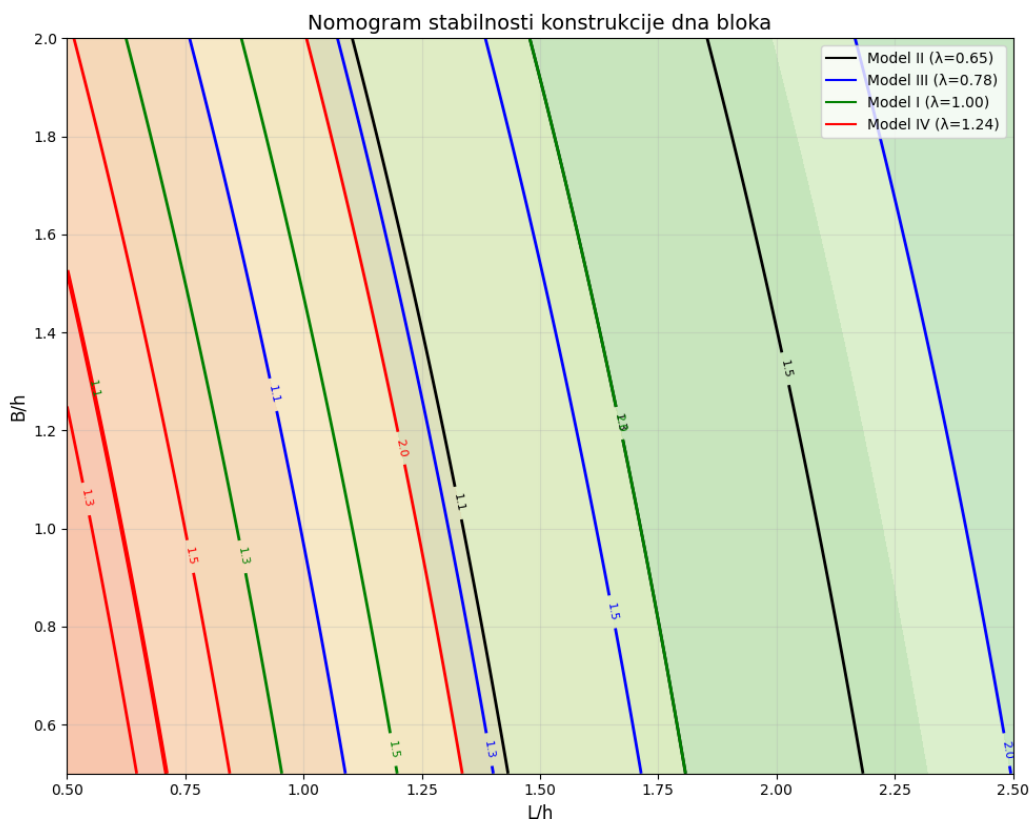
Statističkom analizom je konstatovano da krive faktora sigurnosti kod svih modela imaju sličan nagib, ali su vertikalno pomerene. Kvantifikacija ovih promena je definisana uvođenjem tehničkog koeficijenta  $\lambda$  koji varira u zavisnosti od modela. Prema Modelu I, koji je uzet kao osnovni model, određene su vrednosti tehničkog koeficijenta za ostale modele:

- Model I (osnovni) –  $\lambda \approx 1$
- Model II (redukcija zbog direktne interferencije napona) –  $\lambda \approx 0,65$
- Model III (redukcija zbog dvostranog utovara) –  $\lambda \approx 0,75$
- Model IV (najveća rezerva stabilnosti) –  $\lambda \approx 1,20$

Empirijski koeficijenti stenske mase opisuju fizičko-mehanički odgovor stene na naprezanje. Koeficijent  $\alpha$  se odnosi na linearni doprinos nosivosti stuba između utovarnih komora, odnosno na zapreminu zdravog jezgra. Koeficijenti  $\beta$  i  $\gamma$  se odnose na eksponencijalni uticaj pritiska krovine. Oni definišu koliko brzo stabilnost opada sa povećanjem širine otkopa ili povećanjem visine podsecanja.

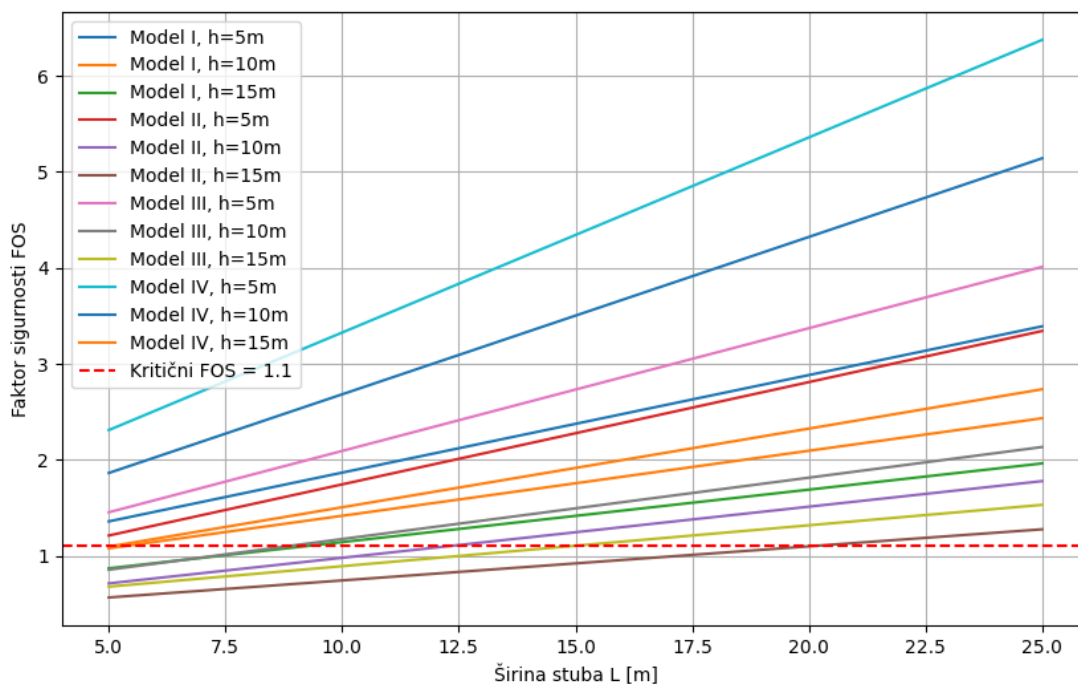
Na osnovu empirijske formule faktora sigurnosti konstruisani su nomogrami stabilnosti.

Prvi nomogram (slika 7-48) prikazuje faktor sigurnosti konstrukcije dna bloka kao funkciju geometrijskih parametara: odnosa širine otkopa i visine podsecanja ( $B/h$ ) na y-osi i odnosa širine stuba (rastojanja između utovarnih komora) i visine podsecanja ( $L/h$ ) na x-osi. Za četiri različita modela dna bloka (Model I–IV), faktori sigurnosti su označeni različitim bojama, sa pripadajućim vrednostima tehničkog koeficijenta ( $\lambda$ ). Zelenom bojom su na nomogramu obeležene sigurne zone gde konstrukcija ima dobru stabilnost ( $FOS > 1,5$ ). Narandžastom i crvenom bojom su obeležene kritične zone u kojima postoji visok rizik od kolapsa/loma stenske mase. Pomoću nomograma je moguće proveriti vrednosti faktora sigurnosti za usvojene geometrijske parametra dna bloka odgovarajućeg modela. Nomogram može pomoći i u reverznom pristupu: za zadate ili ciljane vrednosti faktora sigurnosti moguće je odrediti dozvoljene granice odnosa  $B/h$  i  $L/h$ .



Slika 7-48 Nomogram za određivanje geometrijskih parametara dna bloka na osnovu faktora sigurnosti

Drugi nomogram (slika 7-49) prikazuje faktor sigurnosti kao funkciju rastojanja između utovarnih komora (L) za različite visine podsecanja (h), za sva četiri modela (I–IV). Linije na grafiku su obeležene bojama koje odgovaraju odgovarajućim modelima i visinama podsecanja. Horizontalna crvena isprekidana linija označava granični, odnosno kritični faktor sigurnosti (FOS = 1,1), koji predstavlja granicu između stabilne i potencijalno nestabilne konstrukcije.



Slika 7-49 Nomogram za određivanje geometrijskih parametara dna bloka na osnovu usvojenog modela i visine podsecanja

Nomogram omogućava jednostavnu procenu stabilnosti bez potrebe za kompleksnim proračunima. Za izabrani model i visinu podsecanja sa x-ose se može odrediti rastojanje između utovarnih komora za koje sistem ima odgovarajući faktor sigurnosti (y-osa) ili se za usvojene geometrijske parametre proverava da li je sistem stabilan ili potencijalno nestabilan.

Kombinovanjem empirijske formule sa grafičkim nomogramima, dobijen je pouzdan metodološki okvir za procenu i optimizaciju konstrukcija dna otkopnih blokova, koji olakšava kako projektovanje otkopnih konstrukcija, tako i svakodnevnu inženjersku praksu.

## 8. Zaključak

Priprema dna otkopnih blokova predstavlja ključni element blokovskih metoda otkopavanja, jer omogućava bezbedno, efikasno i kontinuirano obaranje, istakanje i utovar rude. Način pripreme zavisi od vrste ležišta, dimenzija otkopnog bloka i primenjene metode otkopavanja. Prilikom izbora konstrukcije i načina utovara, cilj je postići optimalnu stabilnost otkopnog bloka, kontinuitet procesa, maksimalnu mehanizovanost i ekonomičnost.

Podzemna eksploatacija na velikim dubinama je neizbežna zbog iscrpljivanja plićih ležišta i rastuće globalne potražnje za metalima. Izazovi koje eksploatacija na velikim dubinama nosi su višestruki: geotehnički, tehnološki, ekonomski i sigurnosni. Blokofske metode otkopavanja, naročito one iz grupe sa zarušavanjem rude i pratećih stena, omogućavaju ekonomičnu i sigurnu eksploataciju siromašnijih i ležišta koja zaležu na većim dubinama. Optimizacija i pravilan izbor dimenzija otkopnih blokova, kao i konstrukcija dna otkopnih blokova ključna je za povećanje efikasnosti i smanjenje rizika.

U okviru ove doktorske disertacije izvršeno je sveobuhvatno istraživanje uticaja geometrijskih parametara dna otkopnih blokova na njihovu stabilnost pri primeni blokovskih metoda otkopavanja. Polazeći od već pomenute činjenice da se savremena podzemna eksploatacija metaličnih ležišta odvija na sve većim dubinama i u složenijim geomehaničkim uslovima, rad je uspešno povezoao teorijske postavke, in-situ merenja i savremeno numeričko modeliranje kako bi se obezbedili uslovi za efikasno i sigurno izvođenje radova na eksploataciji.

Osnovni cilj disertacije bio je definisanje geometrijskih parametara prostorija u dnu otkopnog bloka, širine otkopa, visine podsecanja i rastojanja između utovarnih komora, u funkciji stabilnosti, čime se optimizuju uslovi rada na otkopavanju mineralnih sirovina. Dosadašnja istraživanja blokovskih metoda su pretežno bila usmerena na proces istakanja rude, dok je geomehanička provera stabilnosti prostorija odakle se vrši dobijanje rude često bila u drugom planu.

Na osnovu sprovedenih istraživanja i analize dobijenih rezultata potvrđena je polazna hipoteza da je primenom eksperimentalnih i numeričkih metoda moguće kreirati pouzdan model za definisanje optimalnih geometrijskih parametara dna otkopnog bloka, pri čemu model uspešno integriše dubinu eksploatacije, konstrukciju otkopa i relevantne geomehaničke karakteristike stenske mase.

Istraživanje je pokazalo da se precizna analiza stabilnosti ne može zasnivati isključivo na teoretskim pretpostavkama. Korišćenjem rezultata neposrednih merenja naponskog stanja u rudnom telu Borska Reka i laboratorijskih ispitivanja uzoraka, čime je precizno definisana oslabljena (poremećena) zona stenske mase nastala usled izvođenja rudarskih radova, dobijeni su numerički rezultati koji imaju visoku pouzdanost i primenljivost. Rudno telo Borska Reka je izabrano kao polazna tačka istraživanja jer se uklapa u trend siromašnijih ležišta koja zaležu na većim dubinama.

Za konstrukciju dna otkopnog bloka usvojena je varijanta sa tranšejnim podsecanjem i bočnim utovarom rude. Tranšejno podsecanje je izabrano jer je tranšeja, između ostalog, jednostavnija za izradu od ispusnih zvana, dok bočni utovar omogućava da se u istovremenom radu nađe veći broj utovarnih mesta u jednom otkopnom bloku, što nije slučaj kod čeonog utovara.

Rezultati numeričkog modeliranja nedvosmisleno potvrđuju da stabilnost nije funkcija pojedinačnih parametara, već rezultat nelinearne interakcije odnosa vitkosti stuba ( $L/h$ ) i geometrije otkopa ( $B/h$ ). U radu je jasno dokazano da odnos  $L/h$  predstavlja osnovni mehanički parametar koji kontroliše nosivost i integritet stubova formiranih između bočnih utovarnih komora, dok odnos  $B/h$  deluje kao dominantni generator naponskog stanja u krovini konstrukcije, sa izraženim eksponencijalnim uticajem na degradaciju stabilnosti sistema. U radu su definisani i jasni inženjerski kriterijumi za projektovanje stabilnih konstrukcija dna otkopnih blokova. Optimalni uslovi

podrazumevaju održavanje odnosa  $L/h \geq 1,25$  (poželjno  $\geq 1,5$ ), uz kontrolu odnosa  $B/h$  i ograničenje širine otkopa u skladu sa dozvoljenim naponskim stanjem. Takođe, preporučuje se primena konstrukcionih rešenja koja minimizuju interakciju naponskih polja, čime se značajno povećava bezbednost i dugotrajna stabilnost sistema.

Numeričkom analizom precizno su identifikovane kritične tačke u konstrukciji dna bloka, sa posebnim osvrtom na promenu faktora sigurnosti i preraspodelu napona pri različitim širinama otkopnog bloka (10 m, 15 m i 20 m). Utvrđeno je da geometrijski parametri, kao što su rastojanje između utovarnih prostorija i visina podsecanja, direktno uslovljavaju stabilnost čitavog sistema na velikim dubinama. Kao optimalno rešenje izdvojen je model sa "spuštenim" nivoom utovara u odnosu na nivo podsecanja, kod koga povećana visina netaknutog masiva funkcioniše kao prirodna zaštitna barijera, obezbeđujući najviše vrednosti faktora sigurnosti, minimalna pomeranja i potpuno očuvanje elastičnog jezgra stuba. Nasuprot tome, model sa simetričnim dvostranim utovarom identifikovan je kao najnepovoljniji, usled izražene interferencije naponskih polja i ubrzanog razvoja plastičnih zona. Uvođenje šahovskog rasporeda utovarnih komora predstavlja efikasnu optimizaciju postojećih rešenja, čime se postiže povećanje stabilnosti bez promene osnovnih geometrijskih parametara.

Značajan naučni doprinos rada predstavlja razvoj univerzalnog empirijskog modela za procenu faktora sigurnosti, koji integriše linearni uticaj vitkosti stuba i eksponencijalni uticaj geometrije otkopa kroz jedinstvenu analitičku formulaciju. Uvođenjem tehničkog koeficijenta  $\lambda$  omogućena je kvantifikacija uticaja različitih konstrukcionih rešenja, čime je model proširen sa teorijskog na praktično primenljiv. Validacija modela kroz veliki broj numeričkih simulacija potvrđuje njegovu pouzdanost i primenljivost u širokom spektru geomehničkih uslova.

Dodatno, razvijeni nomogrami stabilnosti predstavljaju originalan inženjerski alat koji omogućava brzu procenu stabilnosti i optimizaciju geometrijskih parametara bez potrebe za složenim numeričkim analizama. Nomogrami stabilnosti, izvedeni na osnovu empirijske formule, omogućavaju brzo određivanje faktora sigurnosti na osnovu dimenzionih odnosa geometrijskih parametara dna bloka. Takođe, pomoću nomograma na osnovu ciljanih i usvojenih vrednosti faktora sigurnosti mogu se odrediti geometrijski parametri dna bloka.

Naučni doprinos nomograma ogleda se i u njihovoj sposobnosti da olakšaju interpretaciju i primenu složenih teorijskih modela, čineći ih dostupnijim inženjerima i istraživačima. Sa praktične strane, nomogrami služe kao efikasno sredstvo podrške odlučivanju i optimizaciji pri dimenzionisanju otkopa, što doprinosi povećanju bezbednosti, smanjenju rizika od deformacija i kolapsa, kao i ekonomičnosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina.

## Literatura

- [1] Rötzer N, Schmidt M. Decreasing metal ore grades—Is the fear of resource depletion justified? *Resources*. 2018 Dec; 7(4):88. doi:10.3390/resources7040088
- [2] Mudd GM. *The sustainability of mining in Australia: Key production trends and environmental implications*. Research Report No. RP5. Melbourne (Australia): Department of Civil Engineering, Monash University; Mineral Policy Institute; 2009.
- [3] Northey S, Mohr S, Mudd GM, Weng Z, Giurco D. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resour Conserv Recycl*. 2014 May; 83:190–201. doi:10.1016/j.resconrec.2013.10.005
- [4] Calvo G, Mudd GM, Valero A, Valero A. Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality? *Resources*. 2016 Nov; 5(4):36. doi:10.3390/resources5040036
- [5] Crowson P. Some observations on copper yields and ore grades. *Resour Policy*. 2012 Mar; 37(1): 59–72. doi:10.1016/j.resourpol.2011.12.006
- [6] Mason L, Mikhailovich N, Mudd G, Sharpe S, Giurco D. *Advantage Australia: resource governance and innovation in the Asian Century*. Sydney (Australia): Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney; 2013.
- [7] Mudd GM, Weng Z, Jowitt SM. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments. *Economic Geology*. 2013 Aug; 108(5):1163–83. doi:10.2113/econgeo.108.5.1163
- [8] Northey SA, Mudd GM, Werner TT. Unresolved complexity in assessments of mineral resource depletion and availability. *Nat Resour Res*. 2017 Jul;26(3):367–83. doi:10.1007/s11053-016-9313-2
- [9] West J. Decreasing metal ore grades. *J Ind Ecol*. 2011 Apr;15(2):165–8. doi:10.1111/j.1530-9290.2011.00334.x
- [10] Valero A, Valero A. A prediction of the exergy loss of the world's mineral reserves in the 21st century. *Energy*. 2011 Apr;36(4):1848–54. doi:10.1016/j.energy.2010.02.044
- [11] Mudd GM. Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resour Policy*. 2007 Mar-Jun;32(1–2):42–56. doi:10.1016/j.resourpol.2007.05.002
- [12] Prior T, Giurco D, Mudd G, Mason L, Behrisch J. Resource depletion, peak minerals and implications for sustainable resource management. *Glob Environ Change*. 2012 Aug;22(3):577–87. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.02.007
- [13] Hillis RR, Giles D, van der Wielen SE, Baensch A, Cleverley JS, Fabris A, et al. Coiled tubing drilling and real-time sensing—enabling prospecting drilling in the 21st century? In: Kelley KD, Golden HC, editors. *Building Exploration Capability for the 21st Century*. Littleton (CO): Society of Economic Geologists; 2014. p. 243–59. (SEG Special Publication; no. 18). doi:10.5382/SP.18.13
- [14] Bakhtavar E, Shahriar K, Oraee K. Transition from open-pit to underground as a new optimization challenge in mining engineering. *J Min Sci*. 2009 Sep;45(5):485–94. doi:10.1007/s10913-009-0061-0

- [15] Chen J, Guo D, Li J. Optimization principle of combined surface and underground mining and its applications. *J Cent South Univ Technol.* 2003 Sep;10(3):203–7. doi:10.1007/s11771-003-0010-0
- [16] Ghorbani Y, Nwaila GT, Zhang SE, Bourdeau JE, Cánovas M, Arzua J, et al. Moving towards deep underground mineral resources: Drivers, challenges and potential solutions. *Resour Policy.* 2023 Jan;80:103222. doi:10.1016/j.resourpol.2022.103222
- [17] Martino R, McCann P, Ray RK, van der Ende O. Digging deeper: Trends in underground hard-rock mining for gold and base metals [Internet]. McKinsey & Company; 2023 [cited 2024 Apr 25]. Available from: mckinsey.com
- [18] Litvinenko VS. Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Nat Resour Res.* 2020 Jun;29(3):1521–41. doi:10.1007/s11053-019-09568-4
- [19] Bawden WF. Geotechnical risk and risk mitigation in deep underground mines in hard, brittle rock. In: Hammah RE, et al., editors. *Proceedings of the Rocscience International Conference (RIC 2023)*. Cham: Atlantis Press; 2023. p. 31–47. (AHE; vol. 19). doi:10.2991/978-94-6463-258-3\_5
- [20] Suorineni FT. Challenges and implications for the mining industry for future resources extraction. *Int J Soc Mater Eng Resour.* 2022;25(1):10–7. doi:10.5188/ijsmr.25.10
- [21] Wagner H. Deep mining: a rock engineering challenge. *Rock Mech Rock Eng.* 2019 May;52(5):1417–46. doi:10.1007/s00603-019-01799-4
- [22] Cai M, Kaiser PK, Uno H, Tasaka Y, Minami M. Estimation of rock mass strength and deformation modulus using GSI system – a quantitative approach. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2004 Jan;41(1):3–19. doi:10.1016/S1365-1609(03)00025-X
- [23] Cai M, Kaiser PK, Tasaka Y, Minami M. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using GSI system. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2007 Feb;44(2):247–65. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.07.005
- [24] Li P, Miao SJ. Analysis and application of in-situ stress in metal mining area of Chinese mainland. *Chin J Eng.* 2017 Mar;39(3):323–34. Chinese. doi:10.13374/j.issn.2095-9389.2017.03.001
- [25] Li P, Cai MF, Guo QF, Miao SJ. Characteristics and implications of stress state in a gold mine in Ludong area, China. *Int J Miner Metall Mater.* 2018 Dec;25(12):1363–72. doi:10.1007/s12613-018-1690-0
- [26] Li P, Cai MF, Guo QF, Miao SJ. In situ stress state of the northwest region of the Jiaodong Peninsula, China from overcoring stress measurements in three gold mines. *Rock Mech Rock Eng.* 2019 Nov;52(11):4497–507. doi:10.1007/s00603-019-01828-2
- [27] Sjöberg J, Lundman P, Nordlund E. Analys och prognos av utfall i bergschakt. KUIJ 1045. Slutrapport. LKAB Utredning 01-762. 2001. Swedish. (Nema DOI)
- [28] Ranjith PG, Zhao J, Ju M, De Silva RVS, Rathnaweera TD, Bandara AKMS. Opportunities and challenges in deep mining: a brief review. *Engineering.* 2017 Aug;3(4):546–51. doi:10.1016/J.ENG.2017.04.024
- [29] Qi C, Qian Q, Wang M. Evolution of the deformation and fracturing in rock masses near deep-level tunnels. *J Min Sci.* 2009 Mar;45(2):112–9. doi:10.1007/s10913-009-0015-8Xie H. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory. *Adv Eng Sci.* 2017;49(1):1–16.

- [30] Xie H. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory. *Adv Eng Sci*. 2017 Jan;49(1):1–16. doi:10.15961/j.jsuese.201600918
- [31] Li P, Cai MF. Challenges and new insights for exploitation of deep underground metal mineral resources. *Trans Nonferrous Met Soc China*. 2021 Nov;31(11):3478–505. doi:10.1016/S1003-6326(21)65744-8
- [32] Puzder M, Pavlik T, Molokač M, Hlavnova B, Vaverčák N, Samaneh Ihab BA. Cost-ratio model proposal and consequential evaluation of model solutions of manufacturing process in mining company. *Acta Montanistica Slovaca*. 2017;22(3):270–7.
- [33] Nehring M, Topal E, Kizil M, Knights P. Integrated short-and medium-term underground mine production scheduling. *J South Afr Inst Min Metall*. 2012 May;112(5):365–78.
- [34] Jory S, Benamraoui A, Roshan BD, Madichie NO. Net present value analysis and the wealth creation process: a case illustration. *J Account Educ*. 2016 Dec;37:85–99. doi:10.1016/j.jaccedu.2016.10.002
- [35] Musingwini C. Optimisation in underground mine planning – developments and opportunities. *J South Afr Inst Min Metall*. 2016 Sep;116(9):809–20. doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n9a1
- [36] Malli T, Pamukcu C, Kose H. Determination of optimum production capacity and mine life considering net present value in open pit mining at different overall slope angles. *Acta Montanistica Slovaca*. 2015;20(1):62–70.
- [37] Milićević Ž, Milić V. Tehnologija podzemne eksploatacije. Bor: RDS Grupa; 2013. (Knjiga)
- [38] Parra P, Quispe PM, Lobaton ZF, Vela FA. Trends in Underground Mining. *Int J Eng Manag Res*. 2021 Aug;11(4):219–24. doi:10.31033/ijemr.11.4.31
- [39] Diogo MT. European legal framework related to underground mining and tunnelling concerning commission directive (EU) 2017/164, 31 January establishing a fourth list of indicative occupational exposure limit values. *Int J Min Sci Technol*. 2020 Jul;30(4):541–5. doi:10.1016/j.ijmst.2020.05.017
- [40] Milićević Ž. Metode podetažnog i blokovskog zarušavanja. Bor: Tehnički fakultet u Boru; 2008.
- [41] Majstorović S, Miljanović J, Tošić D. Metode podzemne eksploatacije. Prijedor: Univerzitet u Banjoj Luci, Rudarski fakultet Prijedor; 2019.
- [42] Torbica S, Lapčević V. Metode podzemnog otkopavanja. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet; 2020.
- [43] Hamrin H. Guide to Underground Mining Methods and Applications. Stockholm: Atlas Copco MCT AB; 1986. Report No.: 9851 5073 01C.
- [44] Milićević Ž. Metode podzemnog otkopavanja ležišta mineralnih sirovina. Bor: RDS grupa d.o.o.; 2011.
- [45] Milić V, Radovanović M. Determination of the main parameters of semi-level induced caving method with lateral loading. *J Min Sci*. 2021 Jan;57(1):76–85. doi:10.1134/S106273912101009X
- [46] Zarate EU, Pourrahimian Y, Boisvert J. Optimizing block caving drawpoints over multiple geostatistical models. *Int J Min Reclam Environ*. 2019;33(7):469–89. doi:10.1080/17480930.2018.1532866

- [47] Julin DE, Tobie R. Block caving. In: Cummins AB, Given IA, editors. *SME Mining Engineering Handbook*. 2nd ed. Littleton (CO): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 1992. p. 1815–36.
- [48] Bullock R, Hustrulid W. Planning the underground mine on the basis of mining method. In: Hustrulid WA, Bullock RL, editors. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Littleton (CO): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2001. p. 29–49.
- [49] Castro RL, Gonzales F, Arancibia E. Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving. *J S Afr Inst Min Metall*. 2009 Jul;109(7):393–400.
- [50] Peters D. Physical modelling of the draw behaviour of broken rock in caving. *Q Colo Sch Mines*. 1984;79(1):1–48.
- [51] McNearny RL, Abel JF. Large-scale two-dimensional block caving model tests. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*. 1993 Feb;30(2):93–109. doi:10.1016/0148-9062(93)90703-V
- [52] Milić V. Istraživanje osnovnih parametara novih metoda poluetažnog prinudnog zarušavanja za otkopavanje dubokih delova borskog ležišta [doktorska disertacija]. Bor: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru; 1996.
- [53] Trueman R, Castro R, Halim A. Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2008 Oct;45(7):1044–51. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.02.003
- [54] Castro R, Trueman R, Halim A. A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2007 Sep;44(6):860–70. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.01.002
- [55] Susaeta A. Theory of gravity flow (part 1). In: Karzulovic A, Alfaro MA, editors. *MassMin 2004: Proceedings of the 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining*; 2004 Aug 22-25; Santiago, Chile. Santiago: Editec; 2004. p. 167–72.
- [56] Susaeta A, Diaz H. Estado del arte del modelamiento del flujo gravitacional en minería por hundimiento de bloques. *Minerales*. 2000;55(255):17–26. Spanish.
- [57] Guo M, Tan Y, Chen D, Song W, Cao S. Optimization and stability of the bottom structure parameters of the deep sublevel stope with delayed backfilling. *Minerals*. 2022 May;12(6):709. doi:10.3390/min12060709
- [58] Campbell R, Banda H, Fajar J, Brannon C. Optimising for success at the Grasberg Block Cave. In: Potvin Y, Jakubec J, editors. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*; 2018 Oct 15-17; Vancouver, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2018. p. 3–16.
- [59] Cuello D, Newcombe G. Key geotechnical knowledge and practical mine planning guidelines in deep, high-stress, hard rock conditions for block and panel cave mining. In: Potvin Y, Jakubec J, editors. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*; 2018 Oct 15-17; Vancouver, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2018. p. 17–36.
- [60] Shelswell KJ, Labrecque PO, Morrison DM. Increasing productive capacity in block caving mines. In: Potvin Y, Jakubec J, editors. *Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*; 2018 Oct 15-17; Vancouver, Canada. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2018. p. 107–18.

- [61] Delentas A, Bernados A, Nomikos P. Analyzing stability conditions and ore dilution in open stope mining. *Minerals*. 2021 Dec;11(12):1404. doi:10.3390/min11121404
- [62] Radovanovic M, Pantovic R, Petrovic D, Stajic M. Determination of the excavation block bottom structure parameters using finite element numerical method stability analysis. *Eurasian Min*. 2025;(2):47–53. doi:10.17580/em.2025.02.09
- [63] Gomez R, Saez K, Pino N, Labbe E, Marambio E. Analysis of extraction level layouts for block caving. In: Castro R, editor. *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining; 2020 Dec 9-11; Santiago, Chile*. Santiago: University of Chile; 2020. p. 773–86.
- [64] Zhi-Yuan X, Zhuo-Ying T. Study on instability mechanism of extraction structure under undercut space based on thin plate theory in block caving method. *Shock Vib*. 2021 Feb 28;2021:1–11. doi:10.1155/2021/6620579
- [65] Zhiyuan X, Zhuoying T, Qingyan P, Junhu W. Ground pressure damage evolution mechanism of extraction level excavations induced by poor undercutting in block caving method. *Geotech Geol Eng*. 2019 Oct;37(5):4461–72. doi:10.1007/s10706-019-00921-6
- [66] Swart AH, Handley MF. The design of stable stope spans for shallow mining operations. *J South Afr Inst Min Metall*. 2005 May;105(4):275–86.
- [67] Kaiser P, Kim B, Bewick R, Valley B. Rock mass strength at depth and implications for pillar design. *Min Technol*. 2011 Sep;120(3):170–9. doi:10.1179/1743286311Y.0000000010
- [68] Martin CD, Maybee WG. The strength of hard-rock pillars. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2000 Dec;37(8):1239–46. doi:10.1016/S1365-1609(00)00032-X
- [69] Esterhuizen G, Dolinar D, Ellenberger J. Pillar strength and design methodology for stone mines. In: Peng SS, editor. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining; 2008 Jul 29-31; Morgantown, WV*. Morgantown (WV): West Virginia University; 2008. p. 241–53.
- [70] Sankhaneel S, Walton G. Integration of three-dimensional continuum model and two-dimensional bonded block model for studying the damage process in a granite pillar at the Creighton Mine, Sudbury, Canada. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2021 Apr;13(2):275–88. doi:10.1016/j.jrmge.2020.07.006
- [71] Sankhaneel S, Walton G. Numerical analyses of pillar behavior with variation in yield criterion, dilatancy, rock heterogeneity and length to width ratio. *J Rock Mech Geotech Eng*. 2019 Feb;11(1):46–60. doi:10.1016/j.jrmge.2018.06.005
- [72] Bajkonurov OA, Rykov AT. *Soveršenstvovanie dnišč blokov na rudnikah*. Moskva: Nedra; 1977. Russian.
- [73] *Odnostadijnaja vyemka v moščnyh rudnyh mestoroždenijah (Zbornik radova)*. Moskva: Nedra; 1967. Russian.
- [74] Agoškov MI, Borisov SS, Bojarskij VA. *Razrabotka rudnyh i nerudnyh mestoroždenij*. Moskva: Nedra; 1970. Russian.
-

- [75] Stanković MO. Poboljšanje stenskih masa. Beograd: Autor; 2020.
- [76] Berisavljević Z, Berisavljević D, Marjanović M. Stabilnost kosina u stenskoj masi. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet; 2021.
- [77] Hudson J, Harrison J. Engineering rock mechanics: An introduction to the principles. Oxford: Elsevier Science Ltd; 1997. p. 444.
- [78] Hudson JA, Cornet FH, Christiansson R. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2003 Oct;40(7-8):991–8. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.07.011
- [79] Hoek E, Brown ET. Empirical strength criterion for rock masses. *J Geotech Eng Div*. 1980 Sep;106(9):1013–35.
- [80] Aydan O. Methods of in-situ stress measurements and its applications to Turkey. *Yer Mühendisliği*. 2014;(2):46–51.
- [81] Aydan O, Kawamoto T. The general characteristics of the stress state in the various parts of the earth's crust. In: Sugawara K, Obara Y, editors. *Rock Stress: Proceedings of the International Symposium on Rock Stress*; 1997 Oct 7-8; Kumamoto, Japan. Rotterdam: Balkema; 1997. p. 369–73.
- [82] Sepehri M. Finite element analysis model for determination of in-situ and mining induced stresses as a function of two different mining methods used at Diavik Diamond Mine [dissertation]. Edmonton: University of Alberta; 2016.
- [83] Sheorey PR. A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*. 1994 Feb;31(1):23–34. doi:10.1016/0148-9062(94)92312-4
- [84] Terzaghi K, Richart FE. Stress in rock about cavities. *Geotechnique*. 1952 Jun;3(2):57–90. doi:10.1680/geot.1952.3.2.57
- [85] Martin CD, Chandler NA. Stress heterogeneity and geological structures. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*. 1993 Dec;30(7):993–9. doi:10.1016/0148-9062(93)90059-E
- [86] Goodman R. *Introduction to rock mechanics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1989.
- [87] Singh R, Ghose A. *Engineering rock structures in mining and civil construction*. London: Taylor & Francis; 2006.
- [88] Taherynia MH, Agha S, Fahimifar A. In-situ stress state and tectonic regime in different depths of earth crust. *Geotech Geol Eng*. 2016 Apr;34(2):679–87. doi:10.1007/s10706-015-9973-2
- [89] Heidbach O, Rajabi M, Cui X, Fuchs K, Müller B, Reinecker J, et al. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*. 2018 Oct;744:484–98. doi:10.1016/j.tecto.2018.07.007
- [90] Małkowski P, Ostrowski Ł. The methodology for the Young modulus derivation for rocks and its value. *Procedia Eng*. 2017;191:134–41. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.164
- [91] International Society for Rock Mechanics. Commission on terminology, symbols and graphic representation. Lisbon: ISRM; 1975.
- [92] Gercek H. Poisson's ratio values for rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2007 Jan;44(1):1–13. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.04.011
- [93] Hoek E. Brittle failure of rock. In: Stagg KG, Zienkiewicz OC, editors. *Rock Mechanics in Engineering Practice*. London: Wiley; 1968. p. 99–124.

- [94] Brown ET. Strength of models of rock with intermittent joints. *J Soil Mech Found Div.* 1970 Nov;96(6):1935–49.
- [95] Hoek E, Marinos P. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils Rocks.* 2007;30(2):85–92.
- [96] Marinos P, Hoek E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *Proceedings of GeoEng2000: International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*; 2000 Nov 19-24; Melbourne, Australia. Lancaster (PA): Technomic Publishing; 2000. p. 1422–46.
- [97] Marinos P, Hoek E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull Eng Geol Environ.* 2001;60(2):85–92. doi:10.1007/s100640000090
- [98] Hoek E. Strength of rock masses. *ISRM News J.* 1994;2(2):4–16.
- [99] Hoek E, Kaiser PK, Bawden WF. *Support of underground excavations in hard rock.* Rotterdam: Balkema; 1995.
- [100] Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. In: Hammah R, Bawden W, Curran J, Telesnicki M, editors. *NARMS-TAC 2002: Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity*; 2002 Jul 7-10; Toronto, Canada. Toronto: University of Toronto; 2002. p. 267–73.
- [101] Miljković M. Metodologija naučnog istraživanja, modeliranja, optimizacije i programiranja u rudarstvu. Bor: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru; 2004.
- [102] Mladenović D. Analiza uticaja pojedinih fizičko-mehaničkih i strukturnih osobina stenskog masiva na faktor stabilnosti horizontalnih podzemnih prostorija [magistarski rad]. Bor: Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru; 1995.
- [103] Terzaghi K. Rock defects and loads on tunnel supports. In: Proctor RV, White TL, editors. *Rock Tunneling with Steel Supports.* Youngstown (OH): Commercial Shearing and Stamping Co.; 1946. p. 17–99.
- [104] Lauffer H. Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. *Geol Bauwesen.* 1958;24(1):46–51. German.
- [105] Deere DU, Hendron AJ, Patton FD, Cording EJ. Design of surface and near surface construction in rock. In: Fairhurst C, editor. *Failure and Breakage of Rock: Proceedings of the 8th US Symposium on Rock Mechanics*; 1966 Sep 15-17; Minneapolis, MN. New York: Society of Mining Engineers; 1967. p. 237–302.
- [106] Wickham GE, Tiedemann HR, Skinner EH. Support determination based on geologic predictions. In: Lane KS, Garfield LA, editors. *Proceedings of the North American Rapid Excavation and Tunneling Conference*; 1972 Jun 5-7; Chicago, IL. New York: Society of Mining Engineers; 1972. p. 43–64.
- [107] Bieniawski ZT. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S Afr Inst Civ Eng.* 1973;15(12):335–44.
- [108] Bieniawski ZT. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering.* New York: John Wiley & Sons; 1989. p. 272.
- [109] Celada B, Tardáguila I, Varona P, Rodríguez A, Bieniawski ZT. Innovating tunnel design by an improved experience based RMR system. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014: Tunnels for a Better Life*; 2014 May 9-15; Foz do Iguaçu, Brazil. p. 1–9.

- [110] Celada B, Bieniawski ZT. Ground characterisation and structural analyses for tunnel design. Boca Raton (FL): CRC Press, Taylor & Francis Group; 2020.
- [111] Barton N, Lien R, Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 1974 Dec;6(4):189–232. doi:10.1007/BF01239496
- [112] Laubscher DH. Class distinction in rock masses. *Coal Gold Base Miner S Afr.* 1975 Aug; 23: 37–50.
- [113] Laubscher DH. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *J S Afr Inst Min Metall.* 1990 Oct;90(10):257–73.
- [114] Laubscher DH, Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid WA, Bullock RL, editors. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies.* Littleton (CO): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2001. p. 475–81.
- [115] Mathews KE, Hoek E, Wyllie DC, Stewart SBV. Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1000m in hard rock. Ottawa: CANMET; 1981. Report No.: DSS Serial No. OSQ80-00081.
- [116] Potvin Y. Empirical open stope design in Canada [dissertation]. Vancouver: University of British Columbia; 1988.
- [117] Potvin Y, Hadjigeorgiou J. The stability graph method for open-stope design. In: Hustrulid WA, Bullock RL, editors. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies.* Littleton (CO): Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2001. p. 513–20.
- [118] Mawdesley C, Trueman R, Whiten W. Extending the Mathews stability graph for open-stope design. *Trans Inst Min Metall A.* 2001 Jan;110: 27–39.
- [119] Brady B, Brown E. *Rock mechanics for underground mining.* 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2004. p. 628.
- [120] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2003 Apr;40(3):283–353. doi:10.1016/S1365-1609(03)00013-3
- [121] Bobet A, Fakhimi A, Johnson S, Morris J, Tonon F, Yeung MR. Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications. *J Geotech Geoenviron Eng.* 2009 Nov;135(11):1547–61. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000133
- [122] Clough RW. The finite element method in plane stress analysis. In: *Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation;* 1960 Sep 8-9; Pittsburgh, PA. New York: American Society of Civil Engineers; 1960. p. 345–78.
- [123] Argyris J. *Energy theorems and structural analysis.* London: Butterworths Scientific Publications; 1960.
- [124] Zienkiewicz OC. *The finite element method in engineering science.* 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 1977.
- [125] Bathe KJ. *Finite element procedures in engineering analysis.* Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1982.
- [126] Naylor DJ, Pande GN, Simpson B, Tabb R. *Finite elements in geotechnical engineering.* Swansea (UK): Pineridge Press; 1981.

- [127] Pande GN, Beer G, Williams JR. Numerical methods in rock mechanics. New York: Wiley; 1990.
- [128] Wittke W. Rock mechanics: theory and applications with case histories. Berlin: Springer-Verlag; 1990.
- [129] Nikolić M, Roje-Bonacci T, Ibrahimbegovic A. Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Tech Gaz.* 2016 Apr;23(2):627–37. doi:10.17559/TV-20140521091514
- [130] Ibrahimbegovic A. Nonlinear solid mechanics: theoretical formulations and finite element solution methods. London: Springer; 2009.
- [131] Wriggers P. Nonlinear finite element methods. Berlin: Springer-Verlag; 2008.
- [132] De Borst R, Remmers JC, Needleman A, Abellan MA. Discrete vs smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap. *Int J Numer Anal Methods Geomech.* 2004 Jul;28(7-8):583–607. doi:10.1002/nag.374
- [133] Goodman RE, Taylor RL, Brekke TL. A model for the mechanics of jointed rock. *J Soil Mech Found Div.* 1968 May;94(3):637–59.
- [134] Goodman RE. Methods of geological engineering in discontinuous rocks. San Francisco: West Publishing Company; 1976.
- [135] Zienkiewicz OC, Best B, Dullage C, Stagg K. Analysis of nonlinear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems. In: *Proceedings of the 2nd International Congress on Rock Mechanics*; 1970 Sep 21-26; Belgrade, Yugoslavia. Belgrade: Jaroslav Černi Institute; 1970. p. 8-14.
- [136] Ghaboussi J, Wilson EL, Isenberg J. Finite element for rock joints and interfaces. *J Soil Mech Found Div.* 1973 Oct;99(10):833–48.
- [137] Desai CS, Zamman MM, Lightner JG, Siriwardane HJ. Thin-layer element for interfaces and joints. *Int J Numer Anal Methods Geomech.* 1984 Jan;8(1):19–43. doi:10.1002/nag.1610080103
- [138] Buczkowski R, Kleiber M. Elasto-plastic interface model for 3D frictional orthotropic contact problems. *Int J Numer Methods Eng.* 1997 Feb;40(4):599–619. doi:10.1002/(SICI)1097-0207(19970228)40:4<599::AID-NME78>3.0.CO;2-Q
- [139] Strouboulis T, Babuška I, Copps K. The design and analysis of the generalized finite element method. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 2000 Feb;181(1-3):43–69. doi:10.1016/S0045-7825(99)00072-X
- [140] Strouboulis T, Copps K, Babuška I. The generalized finite element method. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 2001;190(32-33):4081–93. doi:10.1016/S0045-7825(00)00388-8
- [141] Ortiz M, Leroy Y, Needleman A. A finite element method for localization failure analysis. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 1987 Mar;61(2):189–214. doi:10.1016/0045-7825(87)90004-1
- [142] Armero F, Kim J. Three dimensional finite elements with embedded strong discontinuities to model material failure in the infinitesimal range. *Int J Numer Methods Eng.* 2012 Sep;91(12):1291–330. doi:10.1002/nme.4312
- [143] Dias-da-Costa D, Alfaiate J, Sluys LJ, Júlio E. Towards a generalisation of a discrete strong discontinuity approach. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 2009 Sep;198(45-46):3670–81. doi:10.1016/j.cma.2009.07.013

- [144] Foster CD, Borja RI, Regueiro RA. Embedded strong discontinuity finite elements for fractured geomaterials with variable friction. *Int J Numer Methods Eng.* 2007 Nov;72(5):549–81. doi:10.1002/nme.2030
- [145] Lapčević V. Uticaj promenljivosti osobina zarušenog stenskog materijala na gravitacioni tok kod metoda podetažnog zarušavanja [doktorska disertacija]. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet; 2020.
- [146] Hudson JA, Cornet FH, Christiansson R. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2003 Oct;40(7-8):991–8. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.07.011
- [147] Sjöberg J, Christiansson R, Hudson JA. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 2: Overcoring methods. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2003 Oct;40(7-8):999–1010. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.07.012
- [148] Haimson BC, Cornet FH. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of preexisting fractures (HTPF). *Int J Rock Mech Min Sci.* 2003 Oct;40(7-8):1011–20. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.07.013
- [149] Singh R, Ghose A. *Engineering rock structures in mining and civil construction.* London: Taylor & Francis; 2006.
- [150] Kim K, Franklin JA. Suggested methods for rock stress determination. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr.* 1987 Feb;24(1):53–73. doi:10.1016/0148-9062(87)91232-4
- [151] Thompson PM, Chandler NA. In situ rock stress determinations in deep boreholes at the Underground Research Laboratory. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2004 May;41(3):1305–16. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.03.220
- [152] Zlatanović D, Ljubojev M, Stojanović Z, Stojanović G. Determining the stress of rock massif. *Min Metall Eng Bor.* 2014;(2):33–44.
- [153] Gluščević B. *Otvaranje i metode podzemnog otkopavanja rudnih ležišta.* Subotica: Minerva; 1974.
- [154] Banješević M, Cvetković V, von Quadt A, Ljubović Obradović D, Vasić N, Pačevski A, et al. New constraints on the main mineralization event inferred from the latest discoveries in the Bor Metallogenic Zone (BMZ, East Serbia). *Minerals.* 2019 Nov;9(11):672. doi:10.3390/min9110672
- [155] Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor. *Dopunski rudarski projekat eksploatacije rude bakra iz ležišta Borska Reka iznad XIX horizonta (k-235m) sa očuvanjem površine terena.* Bor: Institut za rudarstvo i metalurgiju; 2016. (Tehnička dokumentacija)
- [156] RTB Bor grupa „Rudnici bakra Bor“. *Elaborat o rezervama ležišta bakra Bor.* Bor: RTB Bor; 2012.
- [157] Jelenković R, Milovanović DJ, Koželj D, Banješević M. The mineral resources of the Bor Metallogenic Zone: a review. *Geol Croat.* 2016 Feb;69(1):143–55. doi:10.4154/GC.2016.11
- [158] Milić V, Milićević Ž. *Primena metoda otkopavanja sa bočnim utovarom rude.* U: XVII Oktobarsko savetovanje rudara i metalurga; 1985 Okt; Bor, Jugoslavija. Bor: Institut za rudarstvo i metalurgiju; 1985. str. 124–35.
- [159] Hoek E, Brown ET. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2019 Jun;11(3):445–63. doi:10.1016/j.jrmge.2018.08.001
- [160] Hoek E. Blast damage factor D. *RocNews Technical Note [Internet].* 2012 [cited 2026 Feb 18]. Available from: rocscience.com
-

- [161] Zuo J, Shen J. The Hoek-Brown failure criterion: from theory to application. Singapore: Springer Nature; 2020. doi:10.1007/978-981-15-1769-3
- [162] Rose ND, Scholz M, Burden J, King M, Maggs C, Havaej M. Quantifying transitional rock mass disturbance in open pit slopes related to mining excavation. In: Slope Stability 2018: Proceedings of the XIV International Congress on Energy and Mineral Resources; 2018 Apr 11-13; Seville, Spain. Seville: Asociación Nacional de Ingenieros de Minas; 2018. p. 1273–88.
- [163] Kaveh Ahangaran D, Ahangari K, Eftekhari M. Numerical analysis of blast-induced damage in rock slopes. *Innov Infrastruct Solut.* 2022;7(1):83. doi:10.1007/s41062-021-00684-w
- [164] Luo GJ, Fu WX. Quantitative assessment of the disturbance factor in Hoek–Brown formulas. *Adv Mater Res.* 2012;368: 2819–23. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.2819
- [165] Wen L, Luo ZQ, Qin YG, Luo ZY. The use of Hoek Brown failure criterion on determination of the geo-mechanical parameters of a grouting consolidation body. *IEEE Access.* 2019;7:142703–14. doi:10.1109/ACCESS.2019.2941833
- [166] Yang J, Dai J, Yao C, Jiang S, Zhou C, Jiang Q. Estimation of rock mass properties in excavation damage zones of rock slopes based on the Hoek-Brown criterion and acoustic testing. *Int J Rock Mech Min Sci.* 2020 Feb; 126:104192. doi:10.1016/j.ijrmms.2019.104192
- [167] Jovanović P. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih rudarskih prostorija – knjiga 1. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet; 1994.
- [168] Mirenkov VE. Deformation of rock mass in the vicinity of underground opening at great depth. *J Min Sci.* 2021 May;57(3):380–5. doi:10.1134/S1062739121030043
- [169] Mateus S, Afonso MJ, Fernandes I, Chaminé HI. RMR14 versus RMR89: a methodological approach for rock mass excavations (N Portugal). In: *Advances in Geoengineering, Geotechnologies, and Geoenvironment for Earth Systems and Sustainable Georesources Management.* Cham: Springer Nature Switzerland; 2023. p. 187–92. doi:10.1007/978-3-031-25885-5\_43
- [170] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Studija naponsko deformacijskog ponašanja stenskog masiva usled jamske eksploatacije rudnog tela „Tilva Roš“: Sveska 1, Preliminarni 2D model. Beograd: Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“; 1995.
- [171] Putera DA, Hendrayana H, Indrawan IGB. Engineering geological characteristics based on Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI) in Jlantah Dam intake tunnel, Karanganyar District, Central Java Province. *E3S Web Conf.* 2021;325:08003. doi:10.1051/e3sconf/20213250

## Biografija

Mladen Radovanović je rođen 26.08.1984. u Knjaževcu. Osnovnu školu Timočki partizani u Knjaževcu završio je 1999. godine. Knjaževačku gimnaziju upisuje iste godine i završava 2003. godine. Tehnički fakultet u Boru, rudarsko inženjerstvo, smer Eksploatacija ležišta mineralnih sirovina, upisuje 2003. godine i završava 2012. godine sa prosečnom ocenom 8,24. Diplomski rad sa temom „Analiza postojećeg stanja, mogućnosti i perspektive podzemne eksploatacije u Jami Bor“, odbranio je sa ocenom 10. Master akademske studije na istom studijskom programu upisuje 2013. godine i završava 2016. godine sa prosečnom ocenom 9,75. Master rad sa temom „Razvoj površinskog kopa kvarcnog peščara Deo Donja Bela Reka za period 2016-2021. godine“, odbranio je sa ocenom 10. Doktorske akademske studije, upisao je školske 2016/2017 godine na Tehničkom fakultetu u Boru, na studijskom programu Rudarsko inženjerstvo. Položio je sve ispite predviđene studijskim programom sa prosečnom ocenom 9,89.

Septembra 2014. godine zasniva radni odnos u pogonu „Belorečki peščar“ koji posluje u okviru kompanije Jugo-Kaolin, koja je deo nemačke Quarzwerke grupe, na radnom mestu glavni inženjer službe eksploatacije i prerade na drobljenju, da bi kasnije tokom 2016. godine bio unapređen u rukovodioca službe eksploatacije i prerade na drobljenju i na tom mestu ostaje do januara 2018. godine.

Od januara 2018. godine započinje radni odnos na Tehničkom fakultetu u Boru na mestu univerzitetskog saradnika - asistenta za užu naučnu oblast Rudarstvo i geologija – rudarska grupa predmeta, sa punim radnim vremenom. Trenutno je angažovan na izvođenju vežbi iz predmeta Tehnologija podzemne eksploatacije, Metode otkopavanja, Projektovanje rudnika, Izrada jamskih prostorija, Ventilacija rudnika i Uticaj rudarstva na životnu sredinu, koji po važećoj akreditaciji pripadaju osnovnim akademskim studijama, kao i na predmetima Planiranje jamske proizvodnje, Izrada specijalnih podzemnih objekata, Tehno-ekonomska ocena projekata i Teorijske osnove za izradu master rada, koji po važećoj akreditaciji pripadaju master akademskim studijama. Stručni ispit položio je 24.11.2023. u Savezu inženjera i tehničara Srbije u Beogradu.

Aktivno je učestvovao u radu fakulteta kao član Komisije za popis osnovnih sredstava, član Komisije za popis sitnog inventara i član Komisije za obezbeđenje i unapređenje kvaliteta. Takođe je bio član organizacionih odbora International Student Conference on Technical Science - ISC 2018, ISC 2019 i ISC 2023; International October Conference on Mining and Metallurgy – IOC 2018 i IOC 2021; predsednik organizacionog odbora International Student Conference on Technical Science - ISC 2021.

Autor je ili koautor većeg broja radova publikovanih u međunarodnim časopisima, časopisima nacionalnog značaja, kao i saopštenja sa konferencija međunarodnog i nacionalnog značaja, a takođe je učestvovao i u izradi nekoliko studija i projekata.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Младен Радовановић

Број индекса 27/2016

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Прилог дефинисању геометријских параметара дна откопних блокова при примени  
блоковских метода откопавања

---

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

## **Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора Младен Радовановић

Број индекса 27/2016

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада Прилог дефинисању геометријских параметара  
дна откопних блокова при примени блоковских метода  
откопавања

Ментор проф. др Радоје Пантовић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Прилог дефинисању геометријских параметара дна откопних блокова при примени  
блоковских метода откопавања

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_