

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Hostnik, M., 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Logar, J., somentor Klopčič, J.): 34 str.

Datum arhiviranja: 02-10-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Hostnik, M., 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Logar, J., co-supervisor Klopčič, J.): 34 pp.

Archiving Date: 02-10-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

**MARTIN HOSTNIK**

**UPORABA KONVERGENČNE METODE ZA  
NAČRTOVANJE PODPORNIH UKREPOV V  
PREDOROGRADNJI**

Diplomska naloga št.: 146/B-GR

**USE OF CONVERGENCE-CONFINEMENT METHOD  
FOR PRELIMINARY SUPPORT DESIGN IN  
TUNNELLING**

Graduation thesis No.: 146/B-GR

**Mentor:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 23. 09. 2014

Hostnik, M. 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji.

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.

---

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVA**

Podpisani Martin Hostnik izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom

**"Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji".**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 19.9.2014

Martin Hostnik

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.19(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Martin Hostnik</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Janko Logar</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Jure Klopčič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga - univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>34 str., 12 pregl., 24 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>konvergenčna krivulja, podporje, brizgan beton, sidra</b>

**Izvleček**

Namen diplomske naloge je analitična analiza primarnih podpornih ukrepov pri gradnji predorov v skladu s principi Nove avstrijske metode gradnje predorov (NATM) z uporabo konvergenčne metode. Predstavljeno je praktično določanje mehanskih parametrov hribine s pomočjo geološkega trdnostnega indeksa (GSI), katere potrebujemo za določitev reakcijske krivulje hribine. Nadalje so predstavljeni najpogosteje uporabljeni tipi podporja in njihov prispevek k podporni krivulji. Na podporno krivuljo vpliva čas vgradnje podporja, tip podporja in način upoštevanja le-tega. Brizgan beton in jeklene segmente vedno upoštevamo v podporni krivulji, medtem ko lahko sidra upoštevamo tako v podporni krivulji kot s spremenjenim potekom reakcijske krivulje hribine zaradi povečanja strižne odpornosti hribine. V nalogi sta predstavljena oba postopka, ki sta bila implementirana v Excelove preglednice, ki omogočajo primerjavo obeh pristopov upoštevanja pasivnih sider v analizi. V diplomski nalogi so predstavljeni rezultati izračuna ter njihova primerjava z dejanskimi pomiki nekaterih predorov na slovenskem avtocestnem omrežju.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

- UDK:** 624.19(043.2)
- Author:** Martin Hostnik
- Supervisor:** Assoc. Prof. Janko Logar, Ph.D.
- Co-advisor:** Assist. Jure Klopčič, Ph.D.
- Title:** Use of convergence-confinement method for preliminary support design tunnelling
- Document type:** Graduation Thesis – University Degree
- Scope and tools:** 34 p., 12 tab., 24 fig.
- Key words:** convergence curve, support, shotcrete, rockbolt

### **Abstract**

The main aim of the presented thesis is an analytical analysis of the primary support system in the tunnels, constructed according to the principles of the New Austrian Tunneling Method (NATM) using convergence-confinement method. To determine a ground reaction curve of the surrounding rock mass, parameters were calculated using Geological Strength Index (GSI). Further on different types of support and their contribution to the support curve are discussed. Support curve shape depends on the type of support used, time of support installation and approach to the support consideration. Shotcrete and steel arches are always incorporated in the support curve while rockbolts can be included as part of the support curve or in the convergence curve due to rock reinforcement effect. Both approaches are presented and implemented into the Excel spreadsheets allowing their comparison. To verify both approaches, the measured displacements from some tunnels on the Slovenian motorway network were compared to the calculated values as presented in the Appendix to the thesis.

Hostnik, M. 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji.

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.

---

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Janku Logarju, ki je omogočil izdelavo te diplomske naloge. Posebej bi se zahvalil somentorju asist. dr. Juretu Klopčiču, ki si je navkljub delu v tujini prizadeval in pomagal pri nastajanju te naloge.

Rad bi se zahvalil tudi moji družini in dekletu za vzpodbujanje tekom študija in izdelavo zaključnega dela.

Martin Hostnik

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1	Splošno .....	1
1.2	NATM – Nova avstrijska metoda gradnje predorov .....	1
<b>2</b>	<b>ANALITIČNA REŠITEV PO KONVERGENČNI METODI .....</b>	<b>4</b>
2.1	Geološki trdnostni indeks (GSI) in določitev mehanskih parametrov .....	4
2.2	Osnovni pojmi pri konvergenčni metodi .....	6
2.3	Karakteristična krivulja .....	8
2.4	Podporna krivulja .....	10
2.5	Ravnotežna točka.....	11
<b>3</b>	<b>IZRAČUN POMIKOV.....</b>	<b>12</b>
3.1	Vzdolžni profil pomikov .....	12
3.2	Pomik pri vgradnji podporja in maksimalni pomik, ki ga prenese podporje.....	13
<b>4</b>	<b>PODPORNI UKREPI .....</b>	<b>15</b>
4.1	Brizgani beton .....	15
4.2	Jekleni profili.....	16
4.3	Pasivna sidra .....	17
<b>5</b>	<b>TEORETIČNI PRIMER IN ANALIZA OBSTOJEČIH PREDOROV .....</b>	<b>20</b>
5.1	Prikaz različnega upoštevanja sider na teoretičnem primeru.....	20
5.2	Pedor Tabor .....	22
5.3	Pedor Trojane .....	28
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>33</b>
<b>VIRI .....</b>		<b>34</b>



**KAZALO PREGLEDNIC**

Tabela 1: Račun strižnih karakteristik hribine. ....	22
Tabela 2: Določitev začetnih napetosti $p_0$ pred izkopom predora. ....	23
Tabela 3: Račun togosti, maksimalnega podpornega tlaka, ki ga lahko prevzame del podporja in pomika, pri katerem pride do plastifikacije za tip podporja »B2 reducirano«. ....	23
Tabela 4: Podatki, ki jih potrebujemo za upoštevanje sider v analizi na oba načina - kot del podporne krivulje (levo), kot ojačitev hribine (desno). ....	24
Tabela 5: Vpliv kota razmikanja in faktorja poškodovanosti na pomike. ....	27
Tabela 6: Račun strižnih karakteristik hribine. ....	28
Tabela 7: Račun začetne napetosti pred izkopom predora. ....	28
Tabela 8: Vgrajen brizgan beton in jekleni segmenti. ....	29
Tabela 9: Podatki potrebni za oba načina upoštevanja sider. ....	29
Tabela 10: Parametri za račun strižnih karakteristik hribine. ....	31
Tabela 11: Račun začetnih napetosti pred izkopom predora. ....	31
Tabela 12: Primerjava rezultatov vseh treh primerov in odstopanja od dejanskega pomika. ....	32

## KAZALO SLIK

Slika 1: S sidri (zeleni trakovi) ojačana hribina (matice) prevzame celotno obremenitev [2].	2
Slika 2: Shema prečnega prereza in plastičnega območja predora [6].	7
Slika 3: Nadomestni radij $r_0$ .	7
Slika 4: Primer karakteristične in podporne krivulje.	8
Slika 5: Primeri različnih načinov podporja.	10
Slika 6: Delež izvršenih pomikov glede na največji pomik $u_{im}$ .	12
Slika 7: Shematski prikaz pomikov vzdolž osi predora [6].	13
Slika 8: Določitev pomika pri vgradnji podporja $u_{i0}$ [6].	14
Slika 9: Primer paličnih lokov [9].	16
Slika 10: Obremenitev sider in nevtralna točka.	17
Slika 11: Primer ravnotežne točke, če sidra upoštevamo kot izboljšanje strižne nosilnosti hribine.	20
Slika 12: Primer ravnotežne točke, ko upoštevamo sidra na strani podporne krivulje.	21
Slika 13: Skica podporja.	22
Slika 14: Ravnotežna točka, ko upoštevamo sidra na strani podporne krivulje.	24
Slika 15: Ravnotežna točka v primeru upoštevanja sider kot izboljšanje strižnih karakteristik hribine.	25
Slika 16: Dejanski navpični pomik po končani gradnji predora (ravnotežni pomik).	25
Slika 17: Ravnotežna točka ( $D = 0$ in $\psi = 1/2 \Phi$ ) – sidra upoštevamo na strani reakcijske krivulje hribine.	26
Slika 18: Ravnotežna točka ( $D = 0$ in $\psi = 1/2 \Phi$ ) – sidra upoštevamo na strani podporne hribine.	26
Slika 19: Skica podporja tipa C3.	28
Slika 20: Ravnotežna točka z upoštevanjem sider na strani podporne krivulje.	29
Slika 21: Ravnotežna točka (sidra kot izboljšanje strižne nosilnosti hribine).	30
Slika 22: Dejanski pomik v ravnotežni točki na stacionaži 81+105,00.	30
Slika 23: Ravnotežna točka, če upoštevamo sidra kot del podporne krivulje.	31
Slika 24: Ravnotežna točka (sidra kot ojačitev strižne nosilnosti hribine).	31

Hostnik, M. 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji.

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.

---

## **UPORABLJENE KRATICE**

NATM – (*New Austrian Tunneling Method*): Nova avstrijska metoda gradnje predorov

TBM – (*Tunnel Boring Machine*): Mehaniziran izkop po celotnem prečnem prerezu

GSI – (*Geological Strength Index*): Geološki trdnostni indeks

CFC – (*Continuously Frictionally Coupled Rockbolt*): Sidro, ki prenaša silo v hribino preko trenjskega stika (v nadaljevanju: trenjska sidra)

CMC – (*Continuously Mechanically Coupled Rockbolt*): Sidro, ki prenaša silo v hribino preko injektiranega mehanskega stika (v nadaljevanju: injektirana sidra)

**»Ta stran je namenoma prazna.«**

## **1 UVOD**

### **1.1 Splošno**

V slovarju slovenskega knjižnega jezika je beseda predor definirana kot cevast prostor pod zemljo, urejen za železniški ali cestni promet [1]. Danes je v svetu vse več posegov v okolje. Ena izmed rešitev, da gradimo okolju prijazno, je prav gotovo predorogradnja. Zelo pomembna je predvsem v goratih oziroma hribovitih predelih, kjer je narava še neokrnjena. Poleg tega predori pridejo v poštev tudi v urbanih naseljih, kjer na površju že primanjkuje prostora. Prav tako promet pod zemljo pripomore k čistejšemu zraku v mestu in manj hrupnemu okolju za prebivalce.

Pri gradnji predora je poglobitnega pomena okolje, v katerem gradimo. Od količine pričakovanega prometa je odvisna velikost predora (dvopasovni, štiripasovni ...). Izbira načina, tehnologije gradnje in podpornih ukrepov so odvisni od geološke setave in mehanskih karakteristik tal, nivoja podtalnice, vpada plasti, skrilavosti, nadkritja, poseljenosti nad predorom ...

Obstajajo različni pristopi gradnje predora. Najbolj uveljavljeni sta metoda z mehanskim izkopom po celotnem prečnem prerezu (TBM oziroma *Tunnel Boring Machine*) in sekvenčna metoda, ki je bolje poznana pod kratico NATM (*New Austrian Tunneling Method* oziroma Nova avstrijska metoda gradnje predorov). V diplomski nalogi se osredotočimo na slednjo, kajti v skladu s principi NATM so na slovenskem avtocestnem omrežju zgrajeni prav vsi predori. Pri tem pristopu upoštevamo, da se del obremenitve (radialne napetosti) z izkopom prerazporedi in ga prevzamejo tangencialne napetosti, preostali del prevzame podporje. Kolikšen del prevzame podporje, je odvisno od tipa podpornih ukrepov, predvsem pa od časa vgradnje.

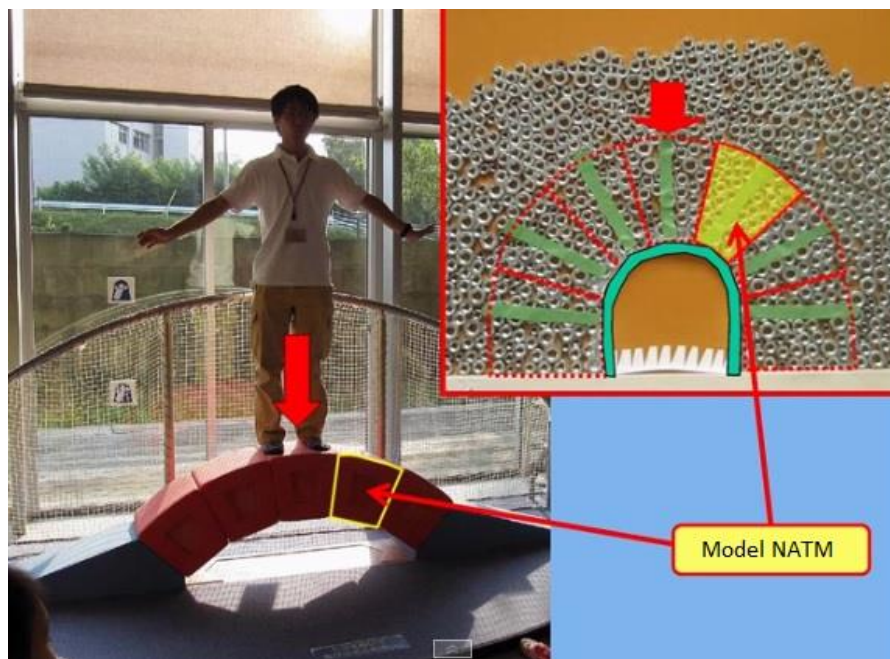
Za analizo predora v začetnih fazah projekta uporabljamo poenostavljene analitične metode kot npr. metoda reakcijske krivulje hribine in podporne krivulje. Ker je gradnja predora izrazito prostorski in časovno odvisen problem, se za analizo izkopa in podpiranja predora v kasnejših fazah projekta uporabljajo kompleksne numerične metode (MKE).

Reakcijska krivulja hribine oziroma krivulja reakcije tal predstavlja odvisnost med izvršenim pomikom in napetostjo na oboku predora. Podporna krivulja pa kaže odvisnost med napetostjo, ki jo prevzame podporje in pomikom. Presečišče krivulj imenujemo ravnotežna točka.

### **1.2 NATM – Nova avstrijska metoda gradnje predorov**

#### **1.2.1 Osnovni princip**

Osnovna ideja NATM je, da hribina okrog predora prevzame del obremenitve, s čimer okoliška hribina tvori del podpornega sistema predora. Klini na spodnji sliki tvorijo nosilni obok okrog odprtine, kar predstavlja aktivni del podporja v predoru. Pasivni del podporja predstavljata zelena obloga in spodnja razpora ter preprečujeta izpadanje posameznih koščkov »hribine«.



Slika 1: S sidri (zeleni trakovi) ojačana hribina (matice) prevzame celotno obremenitev [2].

Podporne ukrepe oziroma podporje, ki ga uporabljamo v NATM, tako delimo na aktivno in pasivno podporje. Aktivno podporje preko izboljšanja strižne nosilnosti izboljšuje obnašanje hribine (sidra, injektiranje, zamrzovanje ...). Brizgani beton je del pasivnega podporja, saj ne učinkuje na izboljšanje nosilnosti hribine, ampak na podpiranje le-te s preprečevanjem lokalnih zruškov ter rahljanja hribine. K pasivnemu podporju štejemo tudi podporne segmente (jeklne palične lokove), vendar običajno njihovo nosilnost zanemarimo. Upoštevamo jih le kot del začasne konstrukcije, dokler beton ne doseže zadostne trdnosti.

### 1.2.2 Temeljna načela

Osnovni principi NATM zahtevajo naslednje [3]:

- ohranitev trdnosti hribine (previden izkop, hitra vgradnja podporja),
- krožni prerez predora (izogib koncentriranim območjem napetosti),
- fleksibilna primarna konstrukcija dopušča pomike, kar vodi do formiranja nosilnega loka nad predorom in
- opazovalna metoda (monitoring), ki omogoča optimizacijo podporja.

### **1.2.3 Prednosti in slabosti [3]**

#### **Prednosti:**

- uporaba v različnih geoloških pogojih,
- fleksibilna glede spremembe prečnega prereza,
- optimizacija podpornih ukrepov poveča ekonomičnost gradnje,
- preprosta kombinacija s TBM in
- relativno nizka investicija s hitro amortizacijo.

#### **Slabosti:**

- uporaba v pogojih s podtalnico samo z dodatnimi ukrepi (zmrzovanje, dreniranje, injektiranje),
- počasna gradnja v primerjavi z uporabo TBM,
- visoke zahteve glede znanja in praktičnih izkušenj,
- visoke zahteve glede kakovosti izkopa,
- večje tveganje za investitorja in
- omejene možnosti za avtomatizacijo.

## 2 ANALITIČNA REŠITEV PO KONVERGENČNI METODI

### 2.1 Geološki trdnostni indeks (GSI) in določitev mehanskih parametrov

#### 2.1.1 Splošno

Za določitev karakteristične krivulje hribine moramo določiti mehanske parametre hribine, ki jih dobimo posredno iz geološkega trdnostnega indeksa (GSI).

#### 2.1.2 Razvrščanje [4]

Osnovni geološki materiali se delijo na zemljine in kamnine. Zemljine delimo naprej na organske in anorganske. Kamnine delimo na magmatske, sedimentne in metamorfne, ki se zaradi različne starosti in nastanka zelo razlikujejo po svoji trdnosti in deformabilnosti. Na njihove mehanske lastnosti bistveno vpliva anizotropija, podzemna voda in stopnja preperelosti. Anizotropno obnašanje hribine povzročajo ploskve anizotropije oz. diskontinuitete kot npr. skrjavost (metamorfne kamnine podvržene visokim pritiskom v procesu metamorfoze), plastovitost (sedimentne kamnine, kjer se plasti nalagajo ena na drugo) in razpokanost, ki je posledica tektonskih premikov.

Poznavanje geološke zgradbe tal je najpomembnejši del projektiranja predorov. A samo poznavanje zgradbe tal še ne pove veliko o obnašanju kamnine. Zaradi tega so razvili več sistemov razvrščanja, ki nam povedo, kako dobra je kamnina oziroma kako se obnaša.

Najpogostejši sistemi razvrščanja kamnin:

- RQD (*Rock Quality Designation*)
- Q (Bartonova klasifikacija)
- SMR (*Slope Mass Rating*)
- RMR (*Rock Mass Rating*): Ta sistem deluje po principu točkovanja, in sicer upošteva že večino faktorjev, ki pomembno vplivajo na mehanske lastnosti: trdnost intaktne kamnine,
- RQD, medsebojno oddaljenost razpok, stanje razpok, podzemno vodo, usmerjenost razpok,
- GSI (Geološki trdnostni indeks): Najbolj razširjena klasifikacija. Na podlagi strukture in površinskega stanja razpok določimo trdnostni indeks. Nato ga s pomočjo korelacij ter nekaterih lahko izmerljivih podatkov (enoosna tlačna trdnosti intaktne kamnine) pretvorimo v materialne karakteristike hribine (elastični modul, kohezijo in strižni kot).

#### 2.1.3 Določanje mehanskih karakteristik hribinske mase [5]

Najpomembnejši vidik sistema GSI je empirično določanje materialnih karakteristik kamninske mase. Splošni porušitveni kriterij sta vpeljala Hoek in Brown in sicer ločeno za intaktno kamnino

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{c,i} \left( m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{c,i}} + 1 \right)^{0,5}$$

ter za rapokano kamnino



$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{c,i} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{c,i}} + s \right)^a.$$

$\sigma'_1, \sigma'_3$  ... glavni efektivni napetosti

$\sigma_{c,i}$  ... tlačna trdnost intaktnega materiala

$m_i$  ... materialni parameter inaktne kamnine

$m_b, s, a$  ... materialni parametri razpokane kamnine

$D$  ... faktor poškodovanosti glede na tehnologijo izkopa

Materialne parametre  $m_b, a$  in  $s$  razpokane kamnine se oceni z naslednjimi enačbami, v katerih nastopa GSI:

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

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

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

S temi materialnimi parametri za razpokano kamnino lahko s spodnjimi enačbami določimo kohezijo in strižni kot:

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

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

kjer je  $\sigma'_{3n}$  razmerje med maksimalno vrednostjo  $\sigma'_3$  in tlačno trdnostjo intaktnega materiala.  $\sigma'_{3,max}$  dobimo iz:

$$\frac{\sigma'_{3,max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

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

Določiti moramo še tlačno trdnost hribinske mase, ki jo izračunamo iz empirične enačbe:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{c,i} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \left( \frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Na podlagi zveze

$$\frac{\sigma'_{3,max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left( \frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

dobimo še  $\sigma'_{3,max}$ , ki je potreben za račun kohezije kamninske mase.

$\gamma$  ... prostorninska teža hribinske mase

$H$  ... višina nadkritja

$\sigma'_{cm}$  ... tlačna trdnost hribinske mase

$\sigma'_{3,max}$  ... maksimalna napetost porušnega kriterija

Za elastični modul intaktnega materiala se privzame vrednost:

$$E_i = MR \sigma_{c,i}$$

iz česar pa nadalje izračunamo elastični modul hribinske mase  $E_{rm}$ :

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

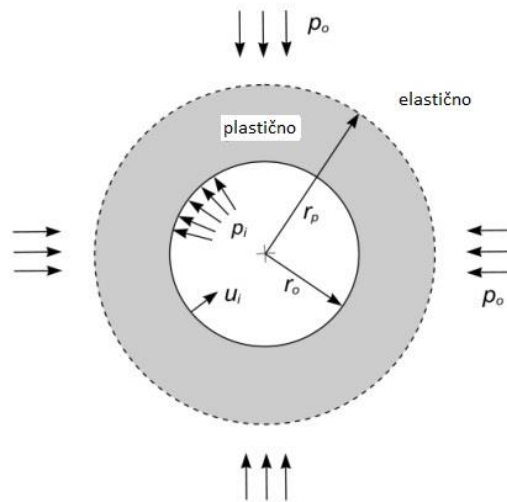
$E_i$  ... elastični modul intaktne kamnine

$MR$  ... razmerje modulov (Deere, 1968)

$E_{rm}$  ... elastični modul hribinske mase

## 2.2 Osnovni pojmi pri konvergenčni metodi

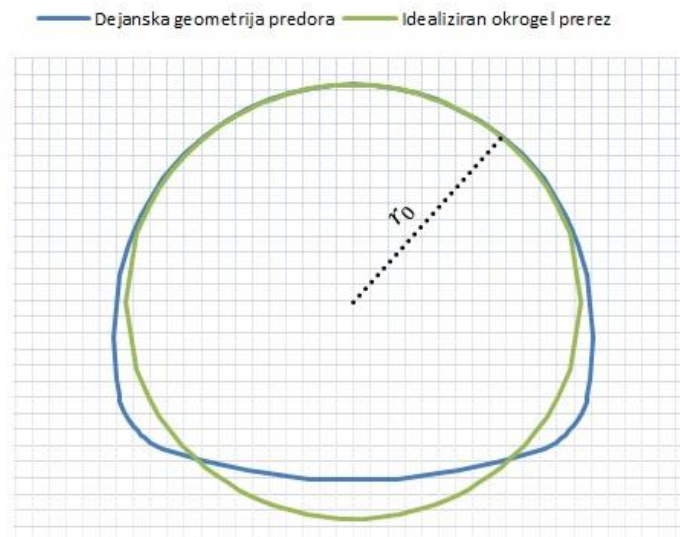
Osnovna predpostavka metode je krožen predor v izotropni in homogeni hribinski masi. Nadalje predpostavimo polarni koordinatni sistem z izhodiščem v središču predora. Z izkopom predora se del okoliške hribine začne deformirati. Ko preidemo mejo plastičnosti hribinske mase, se hribina plastificira in dobimo plastično območje okrog predora (Slika 2). Mejo plastičnosti imenujemo tudi radij plastičnega območja  $r_p$ . V kolikor je  $r_0 < r < r_p$ , je hribina v plastičnem stanju, za  $r > r_p$  pa območje ostane v elastičnem stanju.



Slika 2: Shema prečnega prereza in plastičnega območja predora [6].

Pri tem je  $r_0$  radij krožnega predora. Če predor ni pravilne krožne oblike (Slika 3 **Error! Reference source not found.**), za  $r_0$  upoštevamo nadomestni radij, ki ga izračunamo iz včrtane krožnice in očrtane krožnice:

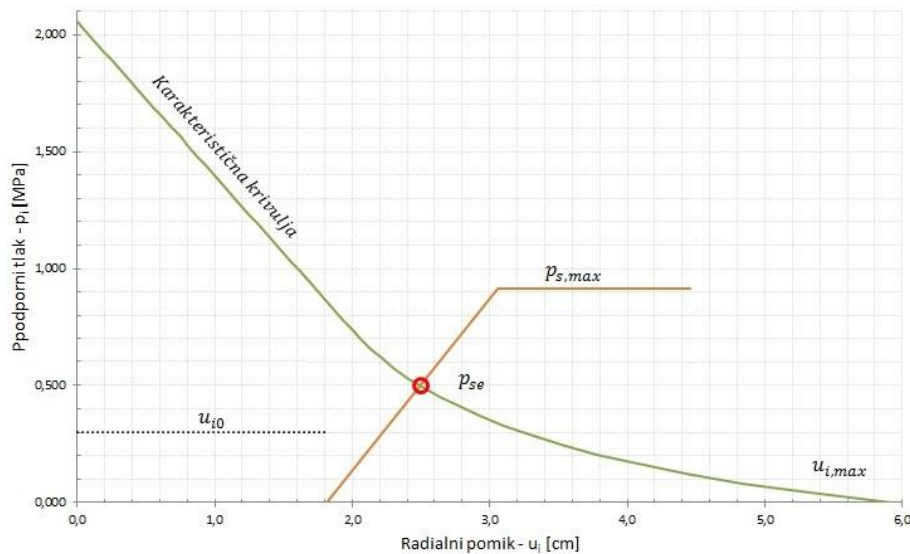
$$r_0 = \frac{r_{\text{včrtano}} + r_{\text{očrtano}}}{2}$$

Slika 3: Nadomestni radij  $r_0$ .

S povečevanjem pomikov se zmanjšujejo radialne napetosti po oboku predora. Del radialnih napetosti prevzame hribina sama preko tangencialnih napetosti, preostali del pa moramo prevzeti s podpornimi ukrepi [7]. Če ne vgradimo podporja pravočasno, lahko pride do lokalnih skruškov ali povzročimo dezintegracijo strukture hribinske mase in s tem povečevanje pomikov, kar lahko vodi do plastifikacije podporja ali celo porušitve dela predora.

### 2.3 Karakteristična krivulja

Reakcijska krivulja hribine ali karakteristična krivulja (Slika 4) predstavlja odvisnost med potrebnim podpornim tlakom in radialnim pomikom. Pomik ob vgradnji podporja je odvisen tudi od oddaljenosti obravnavanega prereza od čela predora, ki se z nadaljnim izkopavanjem povečuje. Torej se s povečevanjem razdalje  $x$  povečuje radialni pomik  $U_r$ , s tem pa se manjša potrební notranji podporni tlak.



Slika 4: Primer karakteristične in podporne krivulje.

Iščemo povezavo med napetostjo  $\sigma_i = \beta \sigma_0$  in pomikom  $U_r$ . Upoštevamo robne pogoje [7]:

$$\sigma_r|_{r=r_0} = \beta \sigma_0$$

$$U_r|_{r=r_p-dr} = U_r|_{r=r_p+dr}$$

$$\sigma_r|_{r=\infty} = \sigma_0$$

Za račun pomika potrebujemo količine  $A^i$ ,  $B^i$ ,  $C^i$  in  $D^i$ , ki so odvisne od koeficientov  $N_\phi$ ,  $N_\psi$ , enosne tlačne trdnosti hribine  $N_c$  ter radija plastičnega območja  $r_p^i$ :

$$A^i = - \left( \frac{1+\nu}{E_{rm}} \right) \left( \beta \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right) \left( \frac{1 + N_\psi N_\phi - \nu(1 + N_\psi)(1 + N_\phi)}{N_\phi + N_\psi} \right) \left( \frac{r_p^i}{r_0} \right)^{N_\phi} r_0 r_p^i N_\psi + \left( \frac{1+\nu}{E_{rm}} \right) \left( (1 - 2\nu) \left( \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right) + \left( \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1} \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi + 1} \right) \right) r_p^i N_\psi + 1$$

$$B^i = \left( \frac{1 + \nu}{E_{rm}} \right) \left( \beta \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right) \left( \frac{1 + N_\psi N_\phi - \nu(1 + N_\psi)(1 + N_\phi)}{N_\phi + N_\psi} \right) * \left( \frac{1}{r_0} \right)^{N_\phi - 1}$$

$$C^i = - \left( \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E_{rm}} \right) \left( \sigma_0 + \frac{N_c}{N_\phi - 1} \right)$$

$$D^i = \left( \frac{1 + \nu}{E_{rm}} \right) (1 - \beta) \sigma_0 r_0^2$$

$$N_\Phi = \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi}$$

$$N_c = \frac{2c \cos \Phi}{1 - \sin \Phi}$$

$$N_\psi = \frac{2c \cos \psi}{1 - \sin \psi}$$

$N_\Phi$  ... razmerje med glavnima napetostima

$N_c$  ... enosna tlačna trdnost hribine

$N_\psi$  ... kot razmikanja hribine

$\beta$  ... redukcijski faktor

$c$  ... kohezija hribine

$\Phi$  ... strižni kot hribine

$\nu$  ... Poissonov količnik hribine

$E_{rm}$  ... elastični modul hribine

$\sigma_0$  ... celotna obremenitev na predor

Radij plastičnega območja  $r_p^i$  je odvisen ob redukcijskega faktorja  $\beta$  in ga dobimo iz naslednje enačbe:

$$\left( \frac{r_p^i}{r_0} \right)^{N_\Phi - 1} = \left( \frac{N_\Phi - 1}{(N_\Phi - 1) * \beta \sigma_0 + N_c} \right) \left( \left( \frac{2\sigma_0 - N_c}{N_\Phi + 1} \right) + \left( \frac{N_c}{N_\Phi - 1} \right) \right)$$

Enačba za račun pomikov je odvisna od tega, v katerem območju nas zanima pomik:

- za  $r_0 < r < r_p^i$ :

$$U_r = -A^i r^{-N_\psi} - B^i r^{N_\Phi} - C^i r$$

- za  $r \geq r_p^i$ :

$$U_r = - \left( \frac{1 + \nu}{E_{rm}} \right) \left( \frac{(N_\Phi - 1) \sigma_0 + N_c}{N_\Phi + 1} \right) \frac{(r_p^i)^2}{r}$$

Dokler velja

$$\beta \geq \frac{2\sigma_0 - N_c}{\sigma_0(1 + N_\Phi)}$$

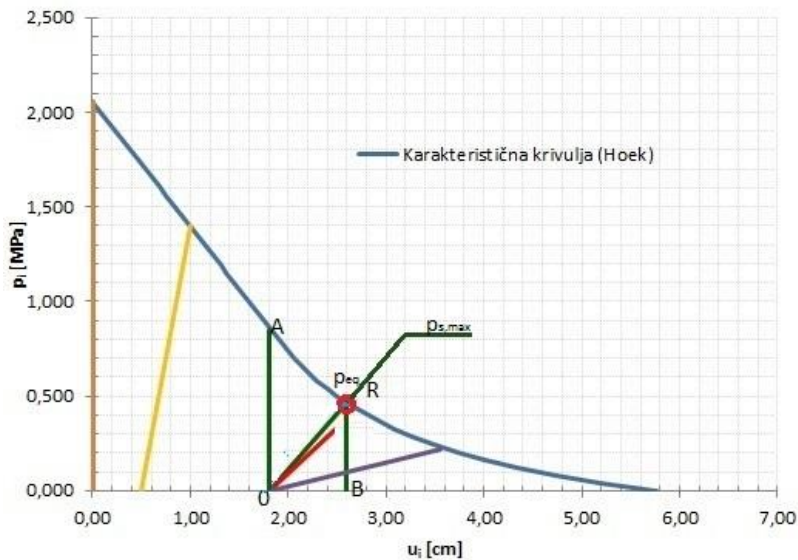
je hribina v elastičnem stanju in izračunamo pomik z enačbo:

$$U_r = \frac{-D^i}{r}$$

Z zgornjimi enačbami izračunamo odvisnost med napetostjo v hribini in radialnim pomikom oziroma konvergenco (od tod ime krivulje) v smeri proti središču predora (Slika 4).

## 2.4 Podporna krivulja

Velikost plastičnega območja in pomike omejimo z notranjim podpornim tlakom  $p_i$  oziroma z vgradnjo podporja. Da bi preprečili tako lokalne porušitve (zruške) kot tudi globalno porušitev, moramo podporje vgraditi pravočasno.



Slika 5: Primeri različnih načinov podporja.

Če vgradimo absolutno togo podporje pri  $u_{i0} = 0$  (oranžna krivulja), se ne izvršijo nikakršni pomiki, celoten podporni tlak prevzame podporje in hribina ne sodeluje pri prevzemu obremenitve. Takšno podporje je praktično skoraj nemogoče izvesti, saj se bo del pomikov med izkopom vedno izvršil. Pri nizkem nadkritju in pod poseljenim območjem moramo zgodaj vgraditi dovolj togo podporje (rumena krivulja), da preprečimo prevelike deformacije, ki bi povzročile znatne pomike na površju. Rdeča krivulja predstavlja prešibko podporje, kajti do njegove plastifikacije pride še pred ravnotežno točko. Vijolična krivulja ponazarja fleksibilno podporje, ki dovoljuje velik pomike.

Običajno vgradnjo podporja prikazuje zelena krivulja. Podporje vgradimo pri deformaciji O in napetosti A. Ker je podporje fleksibilno, se bo deformiralo, dokler ne pride do ravnotežja (točka R) med hribino in podporjem. Do plastifikacije podporja pride pri podpornem tlaku  $p_{s,max}$ .

Podporje je običajno pri NATM kombinacija sider, brizganega betona in jeklenih lokov. Skupaj jih upoštevamo v podporni krivulji, ki jo določimo iz pomika, pri katerem vgrajujemo podporje  $u_{i0}$  in največjega pomika  $u_{iy}$ , ki ga dobimo pri največjem možnem podpornem tlaku  $p_{s,max}$ . Naklon krivulje je odvisen od togosti podporja  $K_s$ .

$$u_{iy} = u_{i0} + \frac{p_{s,max}}{K_s}$$

$$p_{s,max} = p_{ss,max} + p_{sc,max} + p_{sb,max}$$

$$K_s = K_{ss} + K_{sc} + K_{sb}$$

$p_{ss,max}$  ... maksimalni podporni tlak, ki ga prenesejo jekleni loki

$p_{sc,max}$  ... maksimalni podporni tlak, ki ga prenese brizgan beton

$p_{sb,max}$  ... maksimalni podporni tlak, ki ga prenesejo sidra (če jih upoštevamo na strani podporne krivulje)

$K_{ss}$  ... togost jeklenih lokov

$K_{sc}$  ... togost brizganega betona

$K_{sb}$  ... togost sider

## 2.5 Ravnotežna točka

Na mestu, kjer se reakcijska krivulja hribine in podporna krivulja sekata, dobimo ravnotežno točko (Slika 5). Iz razmerja med maksimalnim ( $p_{s,max}$ ) in mobiliziranim ( $p_{se}$ ) podpornim tlakom dobimo faktor varnosti  $FS$ .

$$FS = \frac{p_{s,max}}{p_{se}}$$

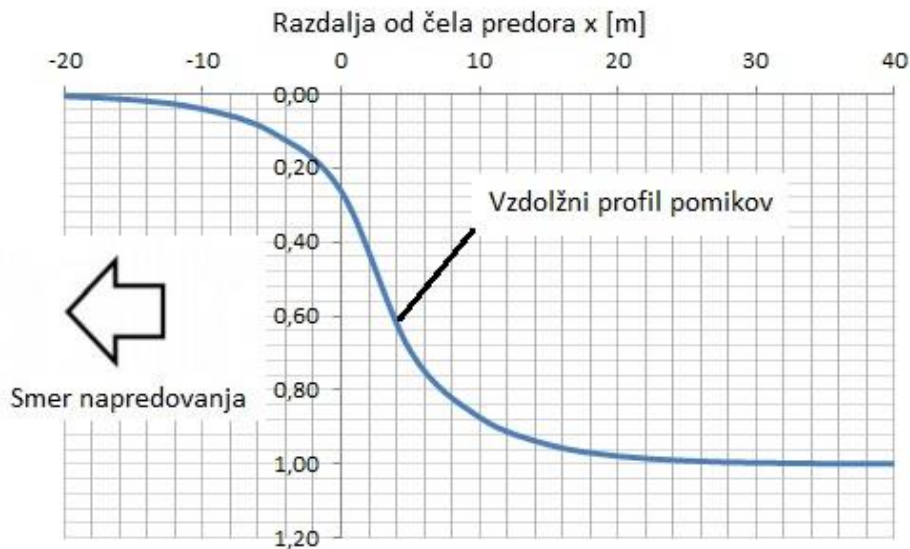
$FS$  ... Faktor varnosti (Factor of Safety)

### 3 IZRAČUN POMIKOV

#### 3.1 Vz dolžni profil pomikov

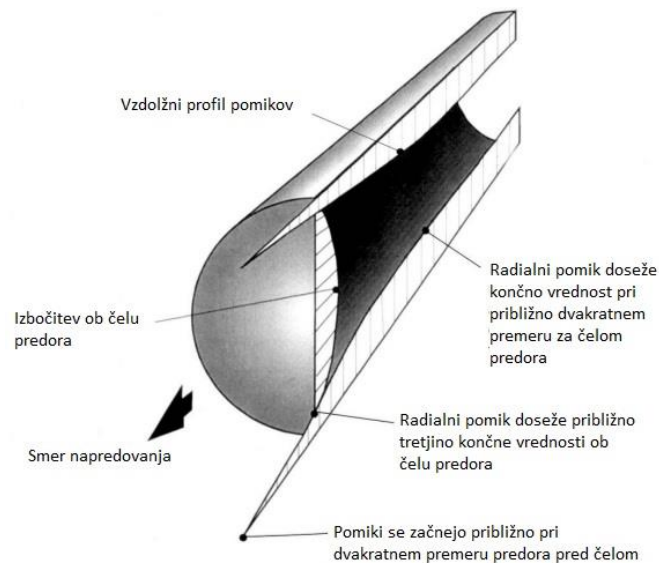
Konvergenčna metoda je omejena na ravninsko deformacijsko stanje in ne upošteva prostorskega vpliva gradnje predora na velikost pomikov. Zato uvedemo relativno koordinato  $x$  z izhodiščem ob čelu predora. Pri  $x < 0$  se nahajamo v področju, kjer izkop še ni izveden. Obratno velja za  $x > 0$ .

Dejanski razvoj pomikov je zelo odvisen od deleža pomika, ki se zgodi pred čelom. Pri konvergenčni metodi delež pomika označimo z  $\beta$  in variira med  $0.2$  in  $0.8$ . V izotropnih hribinah lahko privzamemo vrednost približno  $0.3$ , medtem ko je lahko v anizotropnih od  $0.2$  do  $0.8$ . V tej analitični rešitvi je postopek omejen na izotropne hribine in je zato osnovna predpostavka  $\beta = 0.3$ . Za natančejšo analizo anizotropnih hribin bi bilo potrebno enačbe prilagoditi, da bi upoštevale različen delež pomika, ki se izvrši pred čelom predora.



Slika 6: Delež izvršenih pomikov glede na največji pomik  $u_{im}$ .





Slika 7: Shematski prikaz pomikov vzdolž osi predora [6].

Pomik ob čelu predora ( $x = 0$ ) izračunamo po enačbi:

$$u_{if} = \left(\frac{u_{im}}{3}\right) e^{-0,15\left(\frac{r_{pm}}{r_0}\right)}$$

Delež izvršenih pomikov pred čelom predora ( $x < 0$ ):

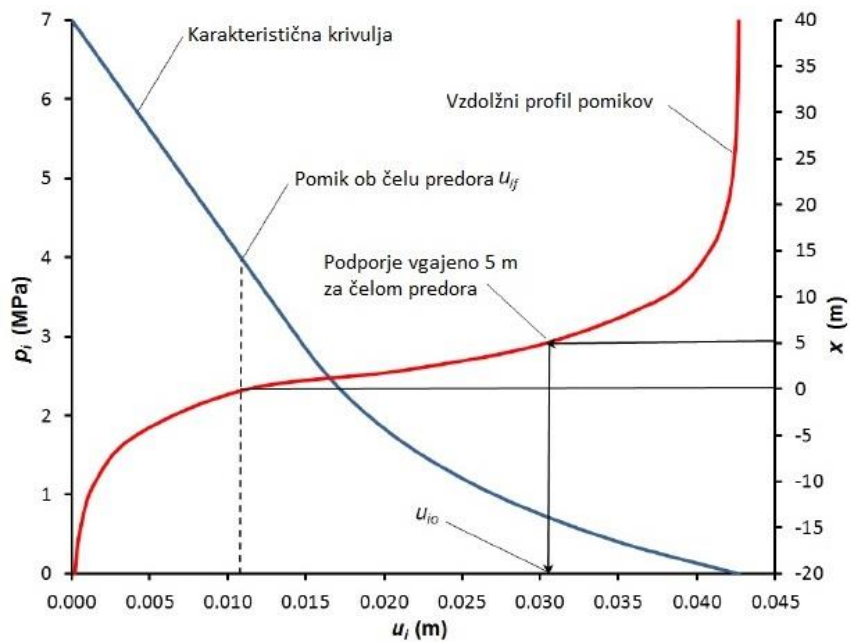
$$u_i = \frac{u_{if}}{u_{im}} e^{\frac{x}{r_0}}$$

Delež izvršenih pomikov za čelom predora ( $x > 0$ ):

$$u_i = 1 - \left(1 - \frac{u_{if}}{u_{im}}\right) e^{\frac{-3x}{r_0} \frac{2r_{pm}}{r_0}}$$

### 3.2 Pomik pri vgradnji podporja in maksimalni pomik, ki ga prenese podporje

Pomik pri vgradnji podporja je odvisen od oddaljenosti od čela predora, kjer se vgradi podporje. Lahko ga izračunamo po zgornji enačbi, kjer je pozitivna koordinata oddaljenost vgradnje od čela predora. Slika 8 prikazuje vpliv oddaljenosti na velikost pomikov. Običajno se pri  $x = 2 r_0$  za čelom predora že izvršijo vsi pomiki. Tudi pred izkopnim čelom predora ( $x < 0$ ) izkop vpliva prav tako do razdalje približno  $2 r_0$ .

Slika 8: Določitev pomika pri vgradnji podporja  $u_{i0}$  [6].

Pomik, pri katerem pride do plastifikacije podporja, označimo z  $u_{iy}$ ; odvisen je od pomika pri točki vgradnje podporja  $u_{i0}$ , maksimalne nosilnosti in togosti podporja:

$$u_{iy} = u_{i0} + \frac{p_{s,max}}{K_s}$$

## 4 PODPORNİ UKREPI

### 4.1 Brizgani beton

#### 4.1.1 Splošno

Pod izrazom brizgani beton razumemo betonsko mešanico, ki jo s pomočjo stisnjenega zraka nanesemo na ostenje predora [8]. Ker deformacije na začetku najhitreje naraščajo, je potrebno beton vgraditi čimprej. Poleg tega s tem zaščitimo hribino pred dostopom zraka, ki povzroča razpadanje slabih hribin. Svež beton ne more prevzeti obremenitve, zato med brizganjem preko šobe dodajamo pospeševalec, ki omogoča izjemno hitro strjevanje betona. To je pomembno predvsem pri prevzemu lastne teže betona, saj sodobni roboti zmorejo brizgati s pretokom tudi do 30 m<sup>3</sup>/h in se zaradi hitrosti gradnje nanašajo hkrati debele plasti brizganega betona. Brizgani beton je v nasprotju z litim betonom izpostavljen delovanju obtežbe takoj po vgradnji.

#### 4.1.2 Račun karakteristik

Določiti moramo največji podporni tlak ( $p_{sc,max}$ ), ki ga lahko prenese brizgan beton in njegovo togost ( $K_{sc}$ ). Podporni tlak ( $p_{sc,max}$ ) je odvisen od enosne tlačne trdnosti betona, debeline plasti nanešenega betona in polmera predorske cevi.

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

Togost je odvisna od elastičnega modula betona, polmera predora, Poissonovega količnika in debeline plasti. Pomembna je pri oblikovanju podporne krivulje - določa naklon krivulje.

$$K_{sc} = \frac{E_c(r_0^2 - (r_0 - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_0 - t_c)r_0^2}$$

$\sigma_{cc}$  ... enosna tlačna trdnost brizganega betona

$E_c$  ... modul elastičnosti brizganega betona

$\nu_c$  ... poissonov količnik

$t_c$  ... debelina plasti brizganega betona

$r_0$  ... nadomestni radij predorske cevi

## 4.2 Jekleni profili

### 4.2.1 Splošno

Prvotno so uporabljali težke jeklene loke in sicer samo kot začasno konstrukcijo, ki je varovala delavce, dokler beton ni dosegel primerne trdnosti. Kasneje so se pojavili jekleni loki v obliki paličja (Slika 9). Njihova preprosta proizvodnja, transport in vgradnja so pripomogli k ponovnem vzponu uporabe le-teh v predorogradnji. V primerjavi s klasičnimi jeklenimi TH loki jih je mnogo lažje kakovostno zabrizgati z betonom.



Slika 9: Primer paličnih lokov [9]

### Najpomembnejše funkcije jeklenih profilov [8]:

- Začasna konstrukcija, dokler beton ne doseže zadostne trdnosti
- Natančni pokazatelj debeline vgrajenega betona
- Prispevek k celotnemu primarnemu podporju
- Urgentno začasno podporje v nestabilni hribini (TH lokovi)

### 4.2.2 Račun karakteristik

Jeklene profile v analizi upoštevamo podobno kot brizgan beton. Največji podporni tlak  $p_{ss,max}$ , ki ga zagotavljajo, dobimo iz njihovega prečnega prereza  $A_s$  in napetosti pri meji tečenja  $\sigma_{ys}$ . Tako togost ( $K_{sc}$ ) kot maksimalna napetost v loku je odvisna od polmera loka in njihove medsebojne oddaljenosti vzdolž predora.

$$p_{ss,max} = \frac{A_s \sigma_{ys}}{s_l r_0}$$

$$K_{sc} = \frac{E_s A_s}{s_l r_0^2}$$

$\sigma_{yc}$  ... meja plastičnosti jekla

$E_s$  ... modul elastičnosti jekla

$A_s$  ... prečni prerez profila

$s_l$  ... razdalja med profili vzdolž osi predora

$r_0$  ... nadomestni radij predorske cevi

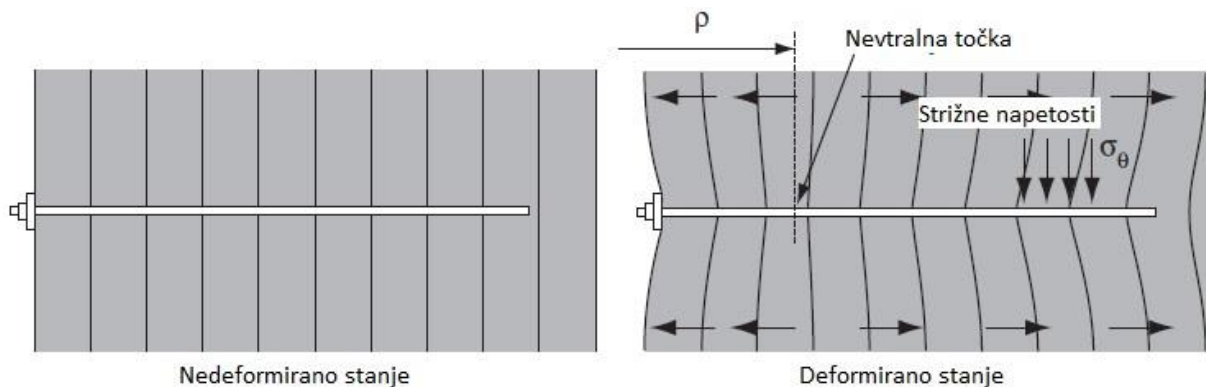
### 4.3 Pasivna sidra

#### 4.3.1 Splošno

V predorogradnji se običajno uporabljajo pasivna (ne-prednapeta) sidra, ki prenašajo obremenitev v hribinsko maso preko strižnega stika direktno s hribino (trenjska sidra kot npr. Swellex sidra, split-set sidra) ali preko injekcijske mase (injektirana sidra kot npr. IBO sidra SN sidra, injekcijska masa je običajno na bazi cementa ali hitro vezočih umetnih smol). Trenjska in injektirana sidra delujejo na hribino kot ojačitev, podobno kot deluje armatura v betonu. Kljub temu vpliv takšnih sider na hribino lahko upoštevamo na dva različna načina. Če plastični radij  $r_p$  ne preseže dolžine sider, lahko njihov vpliv upoštevamo tudi kot povečanje togosti podporja. Pri upoštevanju pasivnih sider na strani reakcijske krivulje hribine se ob uporabi trenjskih ali injektiranih sider spremeni oblika krivulje.

#### Trenjska sidra in injektirana sidra

V splošnem se pri obeh tipih sider del obremenitev prenese iz hribine v sidra zvezno vzdolž celotne dolžine sidra. Prenos pri trenjskih sidrih poteka preko trenja med sidrom in okoliško hribino, pri injektiranih sidrih pa preko mehanske povezave (cementna masa ali smola). Takoj po vgradnji so sidra neobremenjena (relativni zdrs med sidrom in hribino je enak nič). Ko se hribina deformira, se v sidru pojavijo napetosti. Največjo napetost dobimo v ti. nevtralni točki. Del hribine, ki se nahaja pred točko poskuša izvleči sidro, del hribine za nevtralno točko pa to preprečuje.



Slika 10: Obremenitev sider in nevtralna točka.

#### 4.3.2 Račun karakteristik (upoštevano na strani podporne krivulje)

Največjo nosilnost sider oziroma največji podporni tlak, ki ga lahko prevzamejo dobimo s pomočjo ti. *Pull-Out* oziroma izvlečnega preizkusa, s katerim dobimo največjo silo  $T_{bf}$ , ki jo lahko prevzame sidro. Togost sider dobimo analogno kot pri brizganem betonu ali jeklenih lokovih [6].

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

$$K_{sb} = \frac{E_s \pi d_b^2}{4 l s_l s_c}$$

$d_b$  ... premer sidra

$l$  ... dolžina sidra

$E_s$  ... elastični modul

$s_c$  ... razdalje med sidri po obsegu

$s_l$  ... prosta dolžina sidra (mora biti daljša kot je radij plastične cone)

$T_{bf}$  ... največja izvlečna trdnost, dobljena na izvlečnem testu [MN]

### 4.3.3 Račun interakcijske krivulje hribina-sidra

#### Splošno

Z vgradnjo sider se izboljša strižna nosilnost hribine. Po tej metodi sidra ne podpirajo hribinske mase, ampak izboljšujejo njene mehanske karakteristike. Hribina je lahko v elastičnem ali v plastičnem stanju. Meja med plastičnim in elastičnim območjem je pri  $r_p$ . Kot je bilo na začetku že omenjeno, je v območju  $r_0 < r < r_p$  hribina v plastičnem stanju, pri  $r > r_p$  pa v elastičnem stanju. Analitična rešitev mora zadostiti ravnotežnim, kompatibilitetnim in konstitutivnim enačbam ter robnim pogojem. Izkop razbremeni radialne napetosti na oboku predora tako, da se vsa napetost prenese na tangencialne napetosti.

Predpostavke [7]:

- krožni prerez cevi predora
- predor globoko pod površjem (vsaj desetkratni radij predora)
- osnosimetrični problem (neodvisno od polarne koordinate  $\theta$ )
- homogena in izotropna hribina
- elasto-plastično obnašanje hribine
- MC kriterij porušitve
- uporaba  $\beta$ -metode
- elastično obnašanje sider

#### $\beta$ -metoda

$\beta$ -metoda ima dva koraka. Ko je izkop izveden, je napetost enaka  $\beta \sigma_0$  ( $\sigma_0$  je obremenitev,  $\beta$  je redukcijski faktor). Ko v drugem koraku vgradimo sidra, se napetost  $\beta \sigma_0$  porazdeli med hribino in sidri.  $\beta$  tako nadomešča časovni faktor vgradnje sider. Običajno variira med 0.2 in 0.8. Njegova vrednost je odvisna od načina vgrajevanja, togosti hribine, plastičnega modela, faktorja  $K_0$  ( $K_0 = 1$  – osnosimetričen problem) in razdalje od čela predora  $x$  [7].

### Enačbe

Rešitev dobimo z iteracijskim postopkom, pri čemer predpostavimo polmer plastičnega območja  $r_p$ . Izračunamo od  $r_p$  odvisni konstanti  $C_8$  in  $C_9$ , iz katerih dobimo še  $C_5$  in  $C_6$ . Nato izračunamo ostale parametre, ki vplivajo na potek krivulje.

Ko je  $r_p^i > r_0$ , se hribina plastificira in lahko pomik na obodu predora ( $r_0$ ) izračunamo z naslednjo enačbo:

$$U_r = -A^i r^{-N_\psi} - B^i r^{N_\phi} - C^i r + \frac{r_1 + 1 - N_\phi}{(r_1 + 1)r_1 \kappa} C_1 r^{r_1+1} + \frac{r_2 + 1 - N_\phi}{(r_2 + 1)r_2 \kappa} C_2 r^{r_2+1}$$

Konstante  $A^i$ ,  $B^i$  in  $C^i$  smo določili že v poglavju 2.3.

Konstanto  $\kappa$  določimo z naslednjo enačbo:

$$\kappa = \frac{A_b E_b}{S_z \bar{S}_\theta}$$

Konstanti  $C_1$  in  $C_2$  dobimo iz bolj kompleksnih enačb in sta odvisni od konstant  $C_5$  in  $C_6$ , ki sta nadalje odvisni od  $C_7$ ,  $C_8$  in  $C_9$  [7].

$r_1$  in  $r_2$  sta ničli kvadratne enačbe:

$$\begin{aligned} & \left\{ 1 + \frac{1 + \nu}{E_{rm}} \kappa [1 + N_\phi N_\psi - \nu(1 + N_\phi)(1 + N_\psi)] \right\} r_1^2 \\ & + \left\{ 2 + N_\psi - N_\phi + \frac{1 + \nu}{E_{rm}} \kappa [1 + N_\phi N_\psi - \nu(1 + N_\phi)(1 + N_\psi)] \right\} r_1 \\ & - (1 + N_\psi)(N_\phi - 1) = 0 \end{aligned}$$

## 5 TEORETIČNI PRIMER IN ANALIZA OBSTOJEČIH PREDOROV

### 5.1 Prikaz različnega upoštevanja sider na teoretičnem primeru.

#### 5.1.1 Podatki

Za teoretični prikaz smo uporabili naslednje podatke:

Hribina:

$$r_0 = 3 \text{ m}, \rho = 6 \text{ m}, \sigma_0 = 1 \text{ MPa}, E_{rm} = 500 \text{ MPa}, \nu = 0,2, \Phi = 30^\circ, c = 0,1 \text{ MPa}$$

Sidra:

$$E_b = 210 \text{ GPa}, \nu_b = 0,3, d_b = 32 \text{ mm}, S_z = 1 \text{ m}, S_\theta^0 = 10^\circ, T_{bf} = 0.25 \text{ MN in } \beta=0,3$$

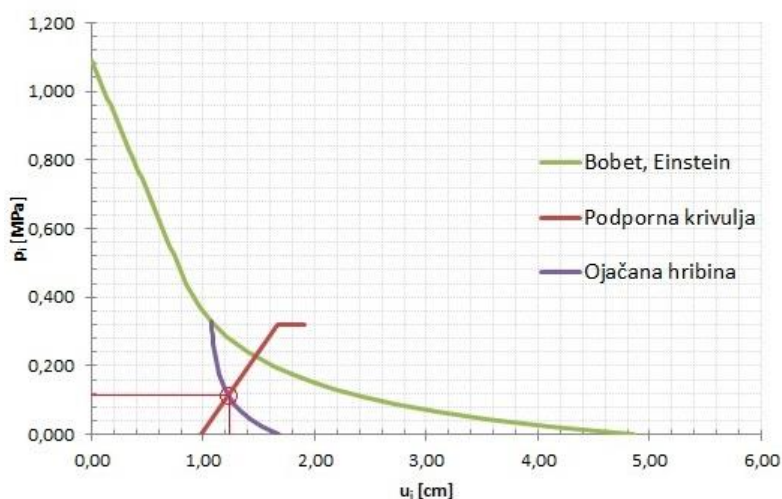
Brizgan beton:

$$t_c = 25 \text{ cm}, \sigma_{cc} = 7 \text{ MPa}, E_c = 10\,000 \text{ MPa}, \nu_c = 0.2$$

#### 5.1.2 Sidra kot ojačitev hribine

Z upoštevanjem sider na strani reakcijske krivulje hribine (kar se kaže v spremembi oblike konvergenčne krivulje), dobimo ravnotežno točko pri pomiku  $u_{se} = 1.21 \text{ cm}$  in podpornem tlaku  $p_{se} = 0.110 \text{ MPa}$ . Maksimalni podporni tlak znaša  $p_{sc,max} = 0.318 \text{ MPa}$ . Iz tega izračunamo faktor varnosti FS.

$$FS = \frac{0.318}{0.110} = 2.89$$



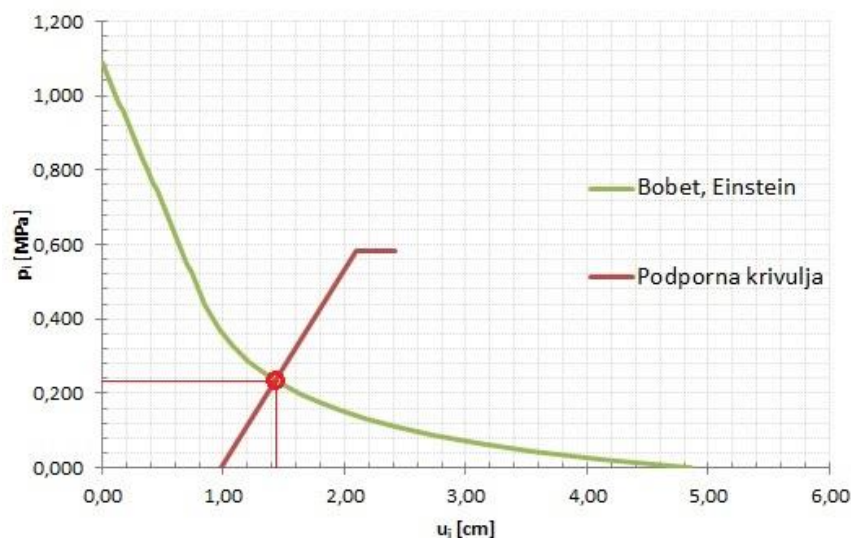
Slika 11: Primer ravnotežne točke, če sidra upoštevamo kot izboljšanje strižne nosilnosti hribine.



### 5.1.3 Sidra kot del podporne krivulje

V tem primeru dobimo ravnotežno točko pri približno dvakrat večjem podpornem tlaku. Z upoštevanjem sider na strani podporne krivulje se povečata tako nosilnost kot togost podporja. Ravnotežno točko dobimo pri pomiku  $u_{se} = 1.42$  cm in podpornem tlaku  $p_{se} = 0.238$  MPa. Varnostni faktor  $FS$  znaša:

$$FS = \frac{0.584}{0.238} = 2.45$$



Slika 12: Primer ravnotežne točke, ko upoštevamo sidra na strani podporne krivulje.

### 5.1.4 Komentar opažanj

Če primerjamo zgornji dve sliki, najprej opazimo spremembo oblike reakcijske krivulje hribine na Slika 11. Zaradi upoštevanja sider na strani reakcijske krivulje od točke vgradnje sider ( $\beta = 0.3$ ) naprej napetost v hribini strmo pada, medtem ko ima podporje manjšo nosilnost in togost (upoštevamo samo brizgani beton). V primeru na Slika 12, ko sidra upoštevamo na strani podporja, se to odrazi na naklonu podporne krivulje (bolj togo podporje) in maksimalne nosilnosti podporja (sidra precej povečajo nosilnost podporja). V primeru upoštevanja sider na strani reakcijske krivulje hribine dobimo manjši podporni tlak in manjši maksimalni tlak, ki ga lahko prevzame podporje (brizgani beton). Na Slika 12, kjer so sidra del podporja je izrazito vidna večja togost (večji naklon krivulje) in večja nosilnost (večji maksimalni pritisk na podporje) podporja.

Varnostni faktor  $FS$  je pri upoštevanju sider na strani reakcijske krivulje hribine večji od faktorja pri upoštevanju sider na strani podporne krivulje, iz česar sledi, da smo na varni strani, če sidra upoštevamo kot del podporne krivulje.

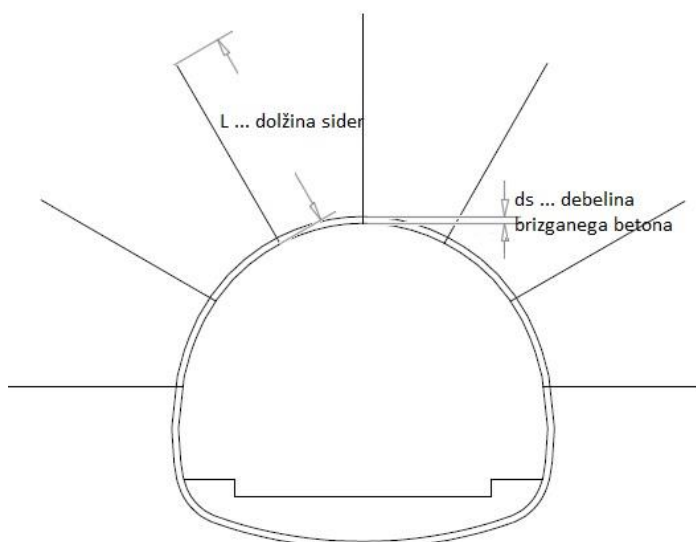
## 5.2 Predor Tabor

### 5.2.1 Osnovni podatki

Dvocevni dvopasovni predor Tabor, zgrajen na hitri cesti Razdrto – Vipava leta 2004, je dolg približno 600 m. Zgrajen je v težjih geoloških pogojih [10]. Na obravnavanem območju (stacionaža km 7+721,60) se izmenjujejo nagubane plasti laporja in lapornega meljevca. Na podlagi pridobljenega geološkega profila smo izračunali strižni kot, kohezijo in elastični modul hribine [5].

Začetna napetost je odvisna od nadkritja in prostorninske teže. Na obravnavani stacionaži imamo približno 57 m nadkritja.

Na tem mestu so vgrajena SN sidra dolžine izmenično 4 in 6 metrov in jekleni segmenti tipa TH 21. Obloga brizganega betona C20/25 je debela 20 cm [11].



Slika 13: Skica podporja

### 5.2.2 Izračun

Tabela 1: Račun strižnih karakteristik hribine.

$\gamma =$	26	kN/m <sup>3</sup>				
$D =$	0,3					
$GSI =$	30					
$m_i =$	7					
$\sigma_{ci} =$	15,0	MPa	→	$\phi' =$	30,9	°
$\nu =$	0,3			$c' =$	0,130	MPa
$MR =$	210			$E_{rm} =$	174,5	MPa
$E_i =$	3150	MPa				

Hostnik, M. 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji.

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.

Tabela 2: Določitev začetnih napetosti  $p_0$  pred izkopom predora.

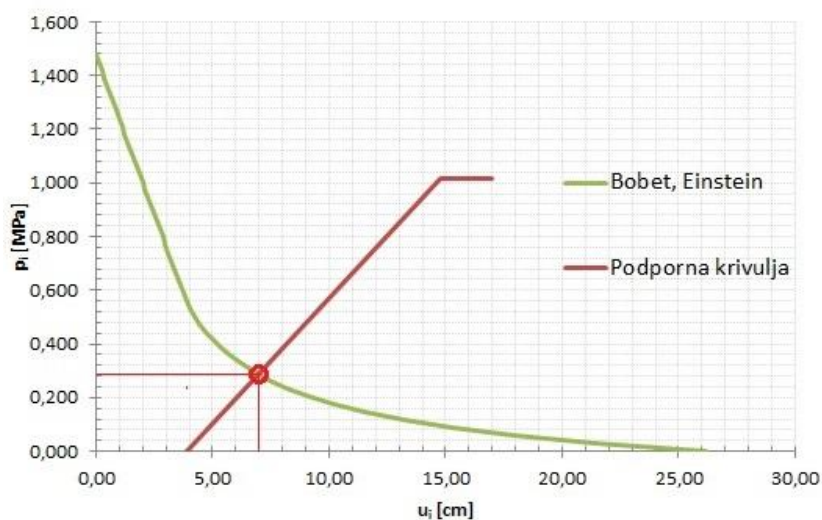
H =	56,79	m	→	$p_0 =$	1,477	MPa
$\gamma =$	26	kN/m <sup>3</sup>				

Tabela 3: Račun togosti, maksimalnega podpornega tlaka, ki ga lahko prevzame del podporja in pomika, pri katerem pride do plastifikacije za tip podporja »B2 reducirano«.

C20/25			TH 21		
<b>Brizgan beton:</b>			<b>Jekleni profili:</b>		
$t_c =$	20	cm = 0,2 m	$\sigma_{ys} =$	235	MPa
$\sigma_{cc} =$	20	MPa	$E_s =$	210000	MPa
$E_c =$	8000	MPa	$A_s =$	26,7	cm <sup>2</sup>
$\nu_c =$	0,2		$s_l =$	1	m
$p_{sc,max}$			$p_{ss,max}$		
=	0,730	MPa	=	0,117	MPa
$K_{sc} =$	58,69	MPa	$K_{ss} =$	19,4	MPa
$u_{iy,sc} =$	0,134	m	$u_{iy,ss} =$	0,065	m

Tabela 4: Podatki, ki jih potrebujemo za upoštevanje sider v analizi na oba načina - kot del podporne krivulje (levo), kot ojačitev hribine (desno).

	SN Sidra		CMC/CFC	
$d_b =$	0,032	m	$r =$	5,38 m
$l =$	5	m	$\rho =$	6,00 m
$E_s =$	210000	MPa	$E_b =$	210,0 GPa
$s_c =$	1,50	m	$d_b =$	32,0 mm $\rightarrow A_b =$ <b>0,00080</b> m <sup>2</sup>
$s_l =$	1,5	m	$v_b =$	0,3
$T_{bf} =$	0,25	MN	$S_z =$	1,00 m
			$S_\theta^0 =$	10,0 $^\circ \rightarrow L =$ <b>0,97</b> m
			$\beta =$	0,30

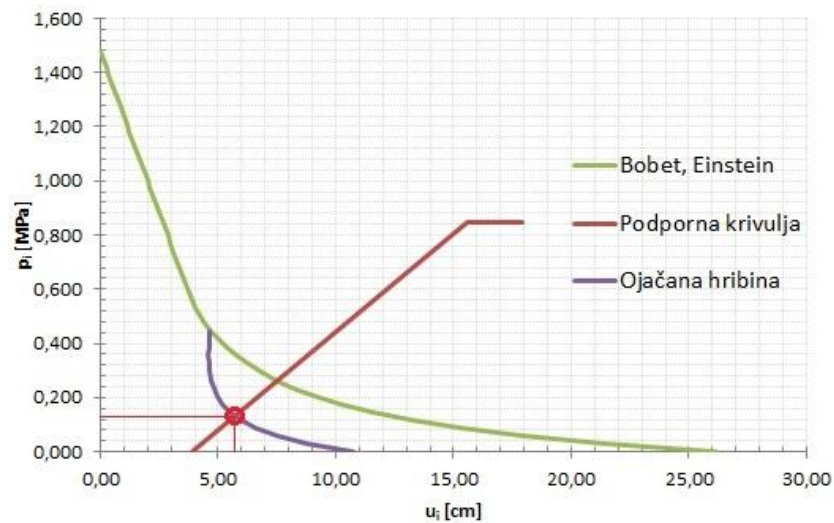


Slika 14: Ravnotežna točka, ko upoštevamo sidra na strani podporne krivulje.

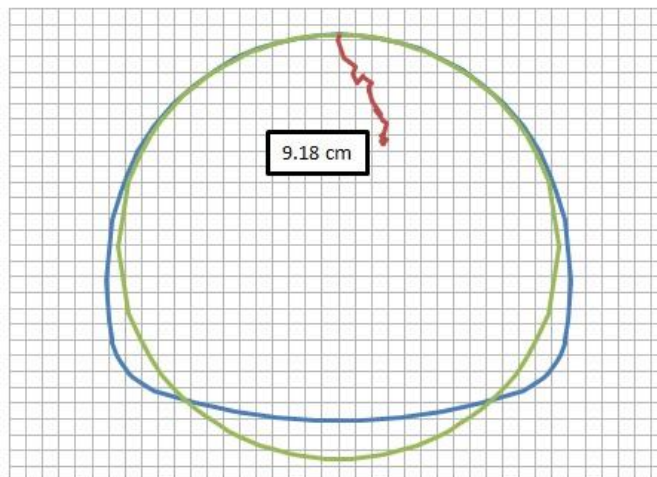
V primeru, ko upoštevamo sidra na strani podporne krivulje, dobimo pomik v ravnotežni točki  $u_{eq} = 7$  cm, pri podpornem tlaku približno  $p_{eq} = 0.300$  MPa. Če sidra v računu zajamemo kot ojačitev hribine, dobimo pomik  $u_{eq} = 5.9$  cm in podporni tlak  $p_{eq} = 0.120$  MPa (slika 14).

Hostnik, M. 2014. Uporaba konvergenčne metode za načrtovanje podpornih ukrepov v predorogradnji.

Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.

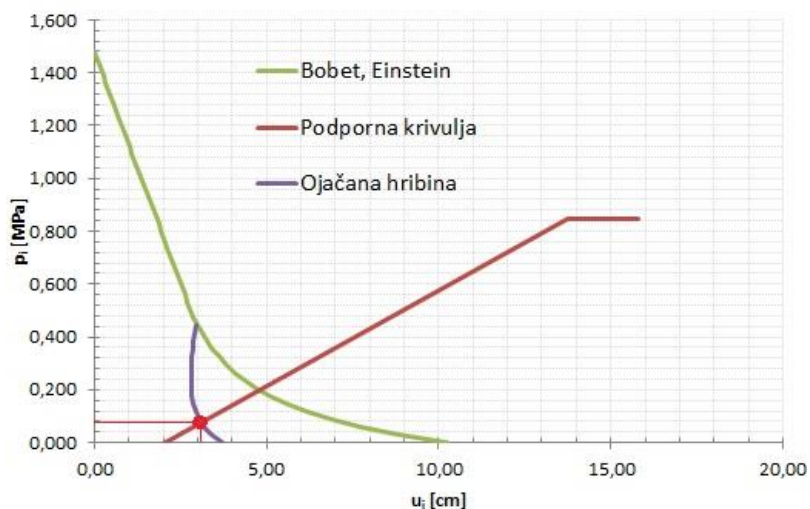


Slika 15: Ravnotežna točka v primeru upoštevanja sider kot izboljšanje strižnih karakteristik hribine.

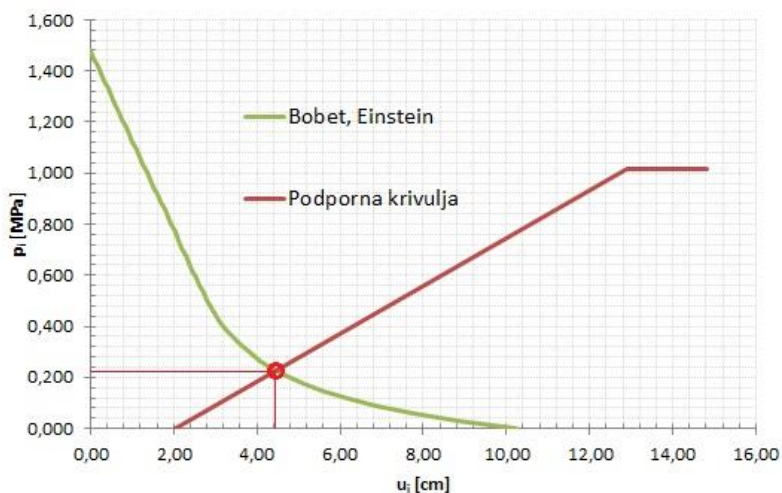


Slika 16: Dejanski navpični pomik po končani gradnji predora (ravnotezni pomik).

Vertikalni pomik izmerjen tekom gradnje predora (ko so se deformacije umirile in je bila dosežena ravnotežna točka) je znašal  $u_{eq} = 9.18$  cm. Če primerjamo oba računski pomika in dejanski izmerjen pomik, hitro ugotovimo, da je dejanski pomik večji od obeh dobljenih analitičnih rešitev.



Slika 17: Ravnotežna točka ( $D = 0$  in  $\psi = \frac{1}{2}\Phi$ ) – sidra upoštevamo na strani reakcijske krivulje hribine.



Slika 18: Ravnotežna točka ( $D = 0$  in  $\psi = \frac{1}{2}\Phi$ ) – sidra upoštevamo na strani podporne hribine.

Rezultat izračuna je močno odvisen od predpostavljenega kota razmikanja  $\psi$  in faktorja poškodovanosti  $D$ . Kot razmikanja je definiran kot sprememba volumske deformacije zaradi strižnega deformiranja. Kot razmikanja variira med nič in vrednostjo strižnega kota. V računu reakcijske krivulje [6] dr. Hoek upošteva  $\psi = 0$ , medtem ko v reakcijski krivulji, izračunani po postopku iz poglavja 2.3, upoštevamo vrednost kota razmikanja med  $0.33\Phi$  in  $0.66\Phi$ . Faktor poškodovanosti  $D$  je odvisen od načina izkopa in variira med  $0$  in  $1.0$ , pri čemer privzamemo vrednost  $0$  pri natančnem izkopu s TBM, medtem ko vzamemo vrednost  $1.0$  pri slabo kontroliranem miniranju.

V zgornjem primeru smo v računu predpostavili kot razmikanja  $\psi = \frac{2}{3}\Phi$  in faktor poškodovanosti  $D = 0.3$ . Če predpostavimo kot razmikanja in faktor poškodovanosti  $\psi = \frac{1}{2}\Phi$  in  $D = 0$ , dobimo manjše pomike in s tem večje odstopanje od izmerjenih vrednosti (

Tabela 5).

Če primerjamo zgornje slike ugotovimo, da se računski pomiki glede na kot razmikanja in faktor poškodovanosti zelo razlikujejo med sabo. Dejstvo je, da je kot razmikanja in faktor poškodovanosti težko enolično določiti, zato je to bolj ocena kot dejanska vrednost in stvar odločitve inženirja.

Tabela 5: Vpliv kota razmikanja in faktorja poškodovanosti na pomike.

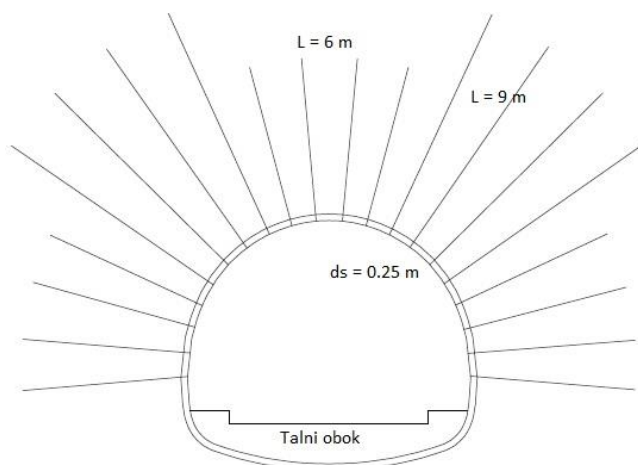
Sidra kot del podporne krivulje			Sidra kot ojačitev hribine		
<b>D =</b>	0,3	0,0	<b>D =</b>	0,3	0,0
<b><math>\psi</math> (delež <math>\Phi</math>) =</b>	0,66	0,50	<b><math>\psi</math> =</b>	0,66	0,50
<b><math>p_{eq}</math> [MPa] =</b>	0,30	0,22	<b><math>p_{eq}</math> [MPa] =</b>	0,12	0,09
<b><math>u_{eq}</math> [cm] =</b>	7,00	4,20	<b><math>u_{eq}</math> [cm] =</b>	5,90	3,10
<b><math>u_{izmerjeni}</math> [cm] =</b>	9,18	9,18	<b><math>u_{izmerjeni}</math> [cm] =</b>	9,18	9,18
<b>Odstopanje</b>	23,7%	54,2%	<b>Odstopanje</b>	35,7%	66,2%

### 5.3 Predor Trojane

#### 5.3.1 Osnovni podatki

Trojanski predor meri v dolžino približno 2.900 metrov. Lociran je na štajerskem delu slovenskega avtocestnega križa A1. Zgrajen je v zelo zahtevnih geoloških pogojih. Na prvem obravnavanem odseku (merski profil na stacionaži km 81+105,00 v levi/južni cevi predora) je izkop pretežno potekal v skladih skrilavega meljevca – primer Trojane 1. Na drugi obravnavanem odseku (merski profil na stacionaži km 81+242,00 v levi/južni cevi predora Trojane) se izmenjujejo plasti glinovca in meljevca z nekaj kremenca - primer Trojane 2. Enako kot pri predoru Tabor izračunamo strižne karakteristike hribine za oba obravnavana odseka.

Nad predorom imamo približno 125 m (primer Trojane 1) oziroma 86 m (primer Trojane 2) metrov nadkritja. V obeh primerih je vgrajeno podporje tipa »C3«, in sicer IBO sidra dolžine 6 in 9 metrov, jekleni segmenti TH 21 in obloga iz brizganega betona debeline 25 cm [11].



Slika 19: Skica podporja tipa C3

#### 5.3.2 Izračun za primer Trojane 1

Tabela 6: Račun strižnih karakteristik hribine.

$\gamma =$	26	$\text{kN/m}^3$		
$D =$	0,3			
$GSI =$	19			
$m_i =$	7			
$\sigma_{ci} =$	30,0	MPa	$\phi' =$	25,1 °
$\nu =$	0,3		$\rightarrow c' =$	0,192 MPa
$MR =$	350		$E_{rm} =$	350,39 MPa
$E_i =$	10500	MPa		

Tabela 7: Račun začetne napetosti pred izkopom predora.

$H =$	124,90	m	$\rightarrow$	$p_0 =$	3,248	MPa
$\gamma =$	26	$\text{kN/m}^3$				

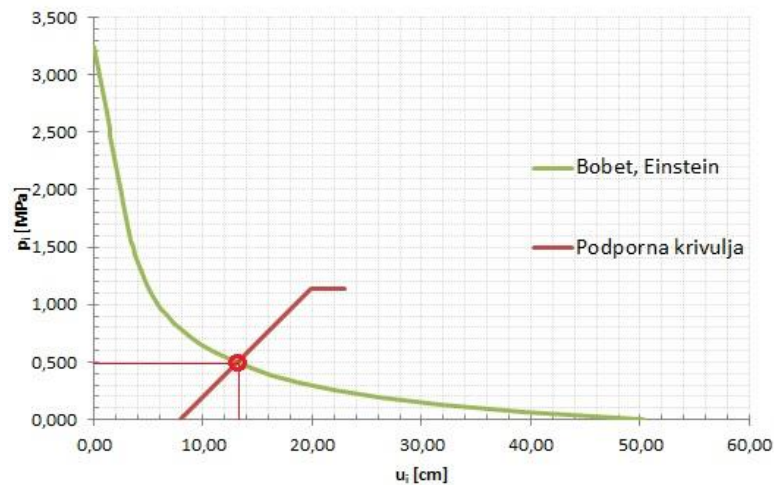


Tabela 8: Vgrajen brizgan beton in jekleni segmenti.

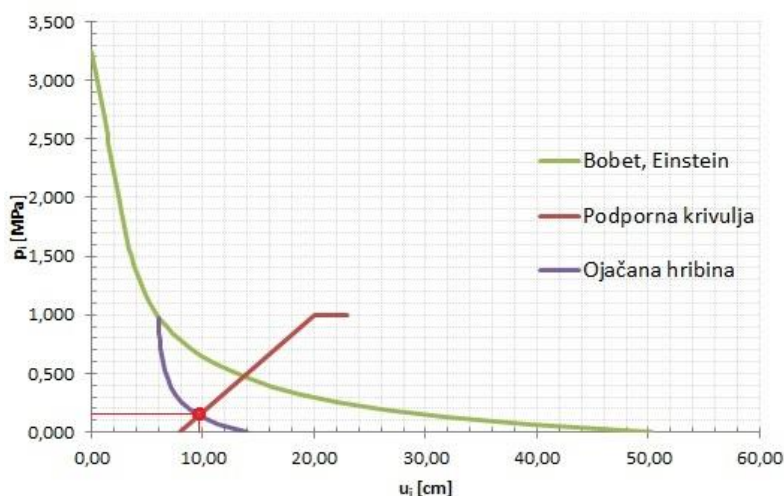
C20/25		TH 21	
<b>Brizgan beton:</b>		<b>Jekleni profili:</b>	
$t_c =$	25 cm = 0,25 m	$\sigma_{ys} =$	235 MPa
$\sigma_{cc} =$	20 MPa	$E_s =$	210000 MPa
$E_c =$	8000 MPa	$A_s =$	26,7 cm <sup>2</sup>
$v_c =$	0,2	$s_l =$	1,25 m
$\rho_{sc,max} =$	0,908 MPa	$\rho_{ss,max} =$	0,093 MPa
$K_{sc} =$	73,73 MPa	$K_{ss} =$	15,5 MPa
$u_{iy,sc} =$	0,132 m = 13,25 cm	$u_{iy,ss} =$	0,065 m = 6,48 cm

Tabela 9: Podatki potrebni za oba načina upoštevanja sider

SN ali IBO		CMC/CFC	
$d_b =$	0,032 m	$\rho =$	10,38 m
$l =$	7,5 m	$E_b =$	210,0 GPa
$E_s =$	210000 MPa	$d_b =$	32,0 mm $\rightarrow A_b =$ 0,00080 m <sup>2</sup>
$s_c =$	1,50 m	$v_b =$	0,3
$s_l =$	1,25 m	$s_z =$	1,25 m
$T_{bf} =$	0,25 MN	$S_{\theta}^0 =$	10,0 ° $\rightarrow L =$ 1,16 m
		$\beta =$	0,30

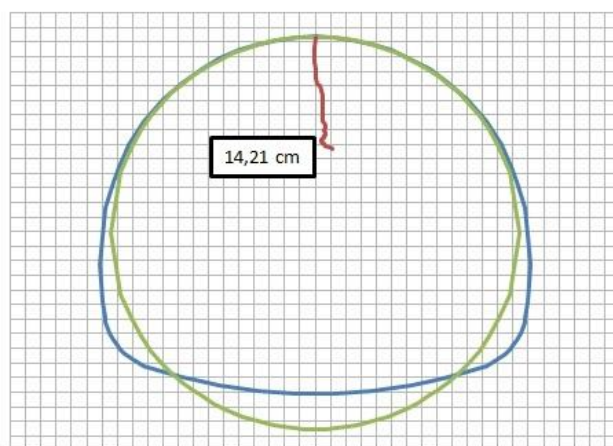


Slika 20: Ravnotežna točka z upoštevanjem sider na strani podporne krivulje



Slika 21: Ravnotežna točka (sidra kot izboljšanje strižne nosilnosti hribine)

Če sidra smatramo kot del podporne krivulje, dobimo pomik v ravnotežni točki  $u_{eq} = 13.7$  cm in podpornem tlaku  $p_{eq} = 0.500$  MPa. V primeru, ko sidra upoštevamo kot izboljšanje strižne nosilnosti hribine, dobimo izračunani pomik  $u_{eq} = 10$  cm in podporni tlak  $p_{eq} = 0.180$  MPa.



Slika 22: Dejanski pomik v ravnotežni točki na stacionaži 81+105,00

Izmerjeni vertikalni pomik v ravnotežni točki  $u_{eq} = 14.21$  cm se ujema s pomiku pri računu, kjer smo sidra upoštevali kot del podporne krivulje. Glede na rezultate je v tem primeru natančnejši izračun, če upoštevamo sidra na strani podporne krivulje. V računu smo upoštevali  $\psi = \frac{1}{2}\Phi$  in  $D = 0.3$ .

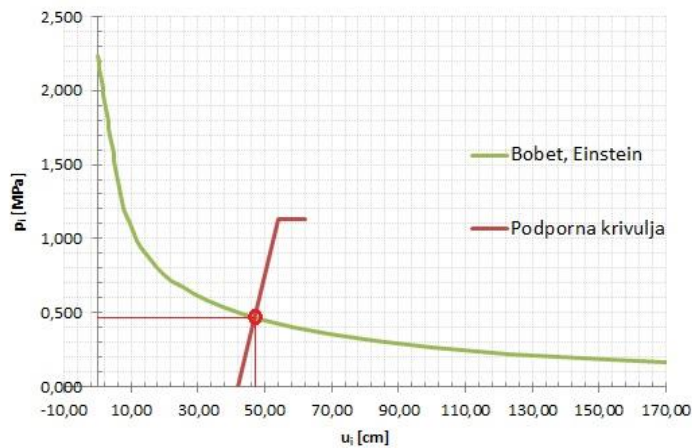
### 5.3.3 Izračun za primer Trojane 2

Tabela 10: Parametri za račun strižnih karakteristik hribine

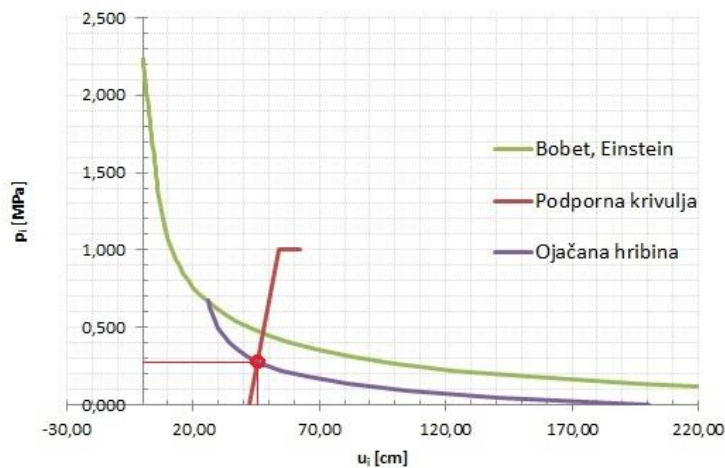
$\gamma =$	26	$\text{kN/m}^3$			
$D =$	0,3				
$GSI =$	29				
$m_i =$	4				
$\sigma_{ci} =$	7,5	MPa	$\rightarrow$	$\phi' =$	18,7 °
$\nu =$	0,3			$c' =$	0,100 MPa
$MR =$	250			$E_{rm} =$	98,31 MPa
$E_i =$	1875	MPa			

Tabela 11: Račun začetnih napetosti pred izkopom predora

$H =$	86,03	m	$\rightarrow$	$p_0 =$	2,237	MPa
$\gamma =$	26	$\text{kN/m}^3$				



Slika 23: Ravnotežna točka, če upoštevamo sidra kot del podporne krivulje



Slika 24: Ravnotežna točka (sidra kot ojačitev strižne nosilnosti hribine)

Ko primerjamo zgornji dve sliki ugotovimo, da smo z analitičnim računom v obeh primerih dokaj natančno izračunali predvidene pomike. Če sidra upoštevamo na strani podporne krivulje, dobimo pomik  $u_{eq} = 47$  cm. V primeru upoštevanja sider kot izboljšanje strižnih karakteristik hribine smo dobili pomik v ravnotežni točki približno  $u_{eq} = 45$  cm. Glede na dejanski izmerjeni pomik  $u_{eq} = 52.42$  cm, lahko trdimo, da smo dobro ocenili kot razmikanja ( $\psi = \frac{1}{3}\Phi$ ) in faktor poškodovanosti  $D = 0.3$ ).

Tabela 12: Primerjava rezultatov vseh treh primerov in odstopanja od dejanskega pomika

	Sidra kot del podporne krivulje			Sidra kot ojačitev hribine		
	Tabor	Trojane - 1	Trojane - 2	Tabor	Trojane - 1	Trojane - 2
D =	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$\psi$ (delež $\phi$ ) =	0,66	0,33	0,33	0,66	0,33	0,33
$p_{eq}$ [MPa] =	0,30	0,50	0,47	0,12	0,18	0,26
$u_{eq}$ [cm] =	7,00	13,70	47,00	5,90	10,00	45,00
$u_{izmerjeni}$ [cm] =	9,18	14,21	52,42	9,18	14,21	52,42
Odstopanje	23,7%	3,6%	10,3%	35,7%	29,6%	14,2%

Rezultati izračunov (Tabela 12) kažejo, da z upoštevanjem sider na strani podporne krivulje bolj natančno določimo pomik v ravnotežni točki. Razlika med upoštevanjem sider v računu je v primeru Trojane 2 samo nekaj odstotkov, medtem ko je v pri primeru Trojane 1 in Tabor razlika precej večja. Razlog za takšne razlike lahko tiči v slabo ocenjenih parametrih kot sta faktor poškodovanosti in kot razmikanja ali napačno ocenjene geološke značilnosti (GSI). Najverjetnejši razlog za to je anizotropija – del računa, kjer je največ odstopanja od dejanskega stanja, saj metoda temelji na izotropnem obnašanju hribine.

### Komentar:

Izračun je bil narejen na podlagi enačb pojasnjenih v drugem poglavju, in sicer s pomočjo orodja *MS Excel*. Program na podlagi vhodnih podatkov izračuna mehanske karakteristike hribine, nadomestni radij predora, višino nadkritja, konvergenčno in podporno krivuljo in pomike pred in za čelom predora. Postopek izračuna je jasen in pregleden. Vsi rezultati so predstavljeni grafično.

Največ zapletov pri računu je bilo med ugotavljanjem določenih parametrov [7], ki dejansko ne obstajajo in so se izkazali za napako v enačbah v računu pomika konvergenčne krivulje brez ojačitve  $U_r$  in v enačbi za konstanto  $D$  iz katere izračunamo pomik konvergenčne krivulje v elastičnem območju  $U_r$ .

## 6 ZAKLJUČEK

Predstavili smo teoretično ozadje uporabe konvergenčne metode v predorogradnji, njene predpostavke in značilnosti. Povzeli smo tudi, kako je v računu podporne krivulje upoštevan brizgani beton, jekleni segmenti in sidra. Poudarek naloge je na različnih načinih upoštevanja pasivnih sider v praktičnem računu reakcijske krivulje hribine oziroma podporne krivulje. Izdelan je teoretični primer, ki prikazuje vpliv različnih načinov upoštevanja sider na faktor varnosti, velikost radialnih pomikov in podporna tlaka.

Zavedati se moramo, da je glavna predpostavka konvergenčne metode izotropno obnašanje hribine. Takšnih hribin v naravi praktično ni, zato je ta metoda uporabna le za predore, kjer lahko privzamemo vsaj približno izotropno obnašanja hribine. V analitični rešitvi smo predpostavili osno simetrijo, kar spet ne drži v realnosti, saj je običajno prečni prerez podkvaste oblike, poleg tega tudi sider ne vgrajujemo v talni obok. Dejanski računski pomiki so zelo odvisni od deleža pomikov pred čelom predora.

Ker je hribina pri predoru Tabor nehomogena in anizotropna (menjajoče se plasti laporja in lapornega meljevca), tudi izračunani pomiki v tem primeru najbolj odstopajo od izmerjenih. Ker konvergenčna metoda temelji na izotropnem obnašanju hribine in 30 % deležem izvršenih pomikov pred čelom predora, je to lahko razlog, da so odstopanja računskih pomikov v primerjavi z izmerjenimi precejšnja.

Pri analizi dveh odsekov predora Trojane smo ugotovili, da se da s konvergenčno metodo relativno dobro oceniti magnitudo pomikov. Na Trojanah je hribina mnogo starejša kot na predoru Tabor in je zarade tektonike močno poškodovana, a navkljub dobro izraženi anizotropiji (skrilavost, razpokanost, plastovitost) deluje kot izotropna hribina.

Konvergenčna metoda je enako kot ostale razpoložljive analitične metode zelo odvisna od pristopa in poenostavitve. Poleg že opisane nezmogljivosti upoštevati različnih deležev pomikov, ki se zgodijo pred čelom predora, je konvergenčna metoda močno odvisna od parametrov, ki so težko enoznačno določljivi ali izmerljivi. S tem se daje velik poudarek subjektivni oceni inženirja, kar lahko vodi do napak pri določanju potrebnih podpornih ukrepov. Zato je konvergenčna metoda primerna za začetno oceno primernosti podpornih ukrepov, za natančnejše analize so potrebne 3D analize s sodobnimi programskimi orodji. Da bi dobili boljše rezultate, bi morali konvergenčno metodo nadgraditi tako, da bi lahko upoštevali različne deleže pomikov pred čelom predora, različno razporeditev sider, bolje raziskati vpliv kota razmikanja in njegovo velikost ...

## VIRI

- [1] Pogačnik, A. 2008, Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana: Slovenska akademija znanosti in umetnosti.
- [2] Bosaimokeijikken, Režiser, NATM工法のアーチ効果の説明. [Film]. 2014.
- [3] Ebner, M. idr. 1995, NATM - New Austrian Tunneling Method. Dunaj, University of Technology Vienna
- [4] Hoek, E. 2014, Rock mass classification.  
[https://www.rocscience.com/hoek/corner/3\\_Rock\\_mass\\_classification.pdf](https://www.rocscience.com/hoek/corner/3_Rock_mass_classification.pdf). (Pridobljeno 8. 7. 2014.)
- [5] Hoek, E. 2014. Rock mass properties.  
[https://www.rocscience.com/hoek/corner/11\\_Rock\\_mass\\_properties.pdf](https://www.rocscience.com/hoek/corner/11_Rock_mass_properties.pdf). (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [6] Hoek E. 2014. Rock-Support Interaction analysis for tunnels.  
[https://www.rocscience.com/hoek/corner/12\\_Tunnels\\_in\\_weak\\_rock.pdf](https://www.rocscience.com/hoek/corner/12_Tunnels_in_weak_rock.pdf). (Pridobljeno 1. 7. 2014.)
- [7] Bobet, A., Einstein, H. H. 2011. Tunnel reinforcement with rockbolts, Tunnelling and Underground Space Technology. Str. 100-123.
- [8] Hudec, M., Kolić, D., Hudec, S. 2009. Tunnels, Excavation and primary support. Zagreb, Croatian Society for Concrete Engineering and Construction Technology
- [9] Haruki. 2013. Innovation Spirit  
<http://www.innovationspirit.at/allgemein/fully-automated-production-cell-for-tunnel-lattice-girders-from-gms>. (Pridobljeno 1. 9. 2014.)
- [10] Elea iC 2014.  
<http://www.elea.si/pdf/predori.../predora-tabor-in-barnica>. Pridobljeno (12. 9. 2014.)
- [11] KMTal. UL FGG. Baza podatkov o pomikih in uporabljenem podporju pri gradnji predorov na slovenskem avtocestnem križu.