

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Visokošolski strokovni študij  
gradbeništva, Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Gorazd Rajh**

**Pomen zgodnje trdnosti mikroarmiranih  
brizganih betonov pri projektiranju betonskih  
oblog predorov**

**Diplomska naloga št.: 356**

**Mentor:**

doc. dr. Jože Lopatič

**Somentor:**

dr. Jakob Šušteršič

Ljubljana, 2010

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani GORAZD RAJH izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »**POMEN ZGODNJE TRDNOSTI MIKROARMIRANIH BRIZGANIH BETONOV PRI PROJEKTIRANJU BETONSKIH OBLOG PREDOROV**«

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 29. 01. 2010

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.19:691.32(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Gorazd Rajh</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Jože Lopatič</b>
<b>Somentor:</b>	<b>dr. Jakob Šušteršič (IRMA d.o.o.)</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Pomen zgodnje trdnosti mikroarmiranih brizganih betonov pri projektiranju betonskih oblog predorov</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>93 str., 11 pregl., 58 sl., 4 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>mikroarmirani brizgani beton, zgodnje trdnosti, primarna obloga predora, podporni ukrepi</b>

### **Izveček:**

Diplomsko delo je razdeljeno na uvod, štiri vsebinska poglavja in zaključke. V prvem vsebinskem poglavju je predstavljena zgodovina betona, opisane so še njegove sestavine ter mehanske in druge fizikalne lastnosti. Sledi mikroarmirani beton, zgodovina uporabe vlaken za ojačevanje materialov in opis različnih vrst mikroarmiranih betonov glede na vrsto uporabljenih vlaken. Na koncu poglavja je opisan brizgani beton in dva postopka njegovega nanašanja (suhi, mokri). Naslednje poglavje prikazuje preiskavo obnašanja mladega mikroarmiranega brizganega betona pod enoosno tlačno obremenitvijo po metodi, ki jo priporoča RILEM. Program preskušanja je obsegal tri sestave betona, ki so se med seboj razlikovale samo po količini vsebovanih jeklenih vlaken. Preiskave po zgoraj navedeni metodi so bile izvedene pri starostih betona 1, 2, 4, 8 in 12 ur. Na vzorcih, starih 1, 2, 3, 7 in 28 dni, pa je bila določena samo največja tlačna trdnost. Podatki, dobljeni na ta način, so bili podlaga za četrto vsebinsko poglavje. V tretjem vsebinskem poglavju so predstavljene bistvene značilnosti metode NATM in primer uspešne uporabe mikroarmiranega brizganega betona pri gradnji predora Dekani. V zadnjem vsebinskem poglavju je predstavljena parametrična študija vpliva različne količine v betonu vsebovanih vlaken na dolžino izkopa in primarnega podpiranja (ob konstantni debelini obloge) predora. Osnova za študijo so bili podatki, zbrani med gradnjo novega predora Ljubno na AC odseku Peračica – Podtabor (Ljubljana – Jesenice). Ta je bil grajen skladno z načeli, ki jih narekuje nova avstrijska predorska metoda (NATM). Na koncu diplomskega dela so zbrani zaključki.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 624.19:691.32(043.2)  
**Author:** Gorazd Rajh  
**Supervisor:** assist. prof. dr. Jože Lopatič  
**Co-Supervisor:** dr. Jakob Šušteršič (IRMA d.o.o.)  
**Title:** The significance of steel fibre reinforced shotcrete's early strength on tunnel concrete lining design  
**Notes:** 93 p., 11 tab., 58 fig., 4 eq.  
**Key words:** fibre reinforced shotcrete, early strength, primary tunnel lining, support measures

### **Abstract:**

The present work is divided in an introduction, four substantive chapters and conclusions. The first substantive chapter represents concrete in general – its history, basic components, as well as mechanical and other physical characteristics. Fibre reinforced concrete is presented next, followed by a brief history of adding fibres to materials and a description of concrete depending on the type of fibres used. Shotcrete and its dry and wet process of application is described at the end of the chapter. Second chapter focuses on the measurements of ultimate uniaxial compressive strength of young steel fibre reinforced shotcrete, based on the test method recommended by RILEM. Test program consisted of three mixtures with different fibre content. Tests were performed on specimens after a period of 1, 2, 4, 8 and 12 hours. Specimens aged 1, 2, 3, 7 and 28 days were only tested for the ultimate compression strength. The data obtained this way leads to the fourth substantive chapter. The main principles of the NATM method are presented in chapter three together with the Dekani tunnel, as an example of successful application of steel fibre reinforced shotcrete. The last chapter contains parametric study, carried out to see how different contents of steel fibres in the mixture influence on tunnel excavation speed (at a constant thickness of shotcrete lining). Study was based on data gathered during the construction of a new tunnel Ljubno tube on the highway section Peračica – Podtabor (Ljubljana – Jesenice). This tunnel was built according to the principles of the new Austrian tunneling method (NATM). Conclusions are presented at the end.

## **ZAHVALA**

Mentorja tega dela sta bila doc. dr. Jože Lopatič in dr. Jakob Šušteršič, ki sta me k temu delu tudi vzpodbudila. Obema se zahvaljujem za izdatno pomoč in vztrajnost pri pripravi te diplomske naloge.

Pomemben sestavni del te diplomske naloge so laboratorijske preiskave mehanskih lastnosti betona. Zahvaljujem se dr. Jakobu Šušteršiču ter ostalim sodelavcem inštituta IRMA d.o.o. za vso strokovno in tehnično podporo pri izvedbi preiskav.

V nadaljevanju naloge je na osnovi rezultatov preskušanja mehanskih lastnosti izdelana parametrična študija vpliva različnih količin vlaken v betonu na izvedbo izkopa in primarnega podpiranja predora Ljubno. Zahvaljujem se g. Andreju Likarju in podjetju GEOPORTAL d.o.o. za vso strokovno in tehnično pomoč pri izvedbi te študije.

Na koncu bi se rad zahvalil še osebi, ki je s svojo neomajno vero, vztrajnostjo in zaupanjem vse skupaj omogočila. Mati, hvala.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BETON, MIKROARMIRANI BETON IN BRIZGANI BETON</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Beton</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Zgodovina</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sestava</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2.1</b>	<b>Agregat</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2.2</b>	<b>Cement</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2.3</b>	<b>Voda</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2.4</b>	<b>Dodatki</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Mehanske lastnosti</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3.1</b>	<b>Tlačna trdnost</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.2</b>	<b>Upogibna natezna trdnost</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.3</b>	<b>Cepilna natezna trdnost</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.4</b>	<b>Modul elastičnosti (E – modul)</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.5</b>	<b>Gostota</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3.6</b>	<b>Obrabnost</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3.7</b>	<b>Odpornost proti prodoru vode</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3.8</b>	<b>Zmrzljinska odpornost</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3.9</b>	<b>Prostorninska stabilnost</b>	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Mikroarmirani beton</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Zgodovina</b>	<b>9</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Vrste mikroarmiranih betonov glede na vrsto vlaken</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b>Beton, ojačan s jeklenimi vlakni (steel fiber reinforced concrete – SFRC)</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2.2</b>	<b>Beton, ojačan s steklenimi vlakni (glass fiber reinforced concrete – GFRC)</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2.3</b>	<b>Beton, ojačan s sintetičnimi vlakni (synthetic fiber reinforced concrete – SNFRC)</b>	<b>12</b>

<b>2.2.2.4</b>	<b>Beton, ojačan z naravnimi vlakni (natural fiber reinforced concrete – NFRC)</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Brizgani beton</b>	<b>14</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Mokri postopek brizganja</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Suhi postopek brizganja</b>	<b>15</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Razvojni potencial brizganega betona</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>PREISKAVE MEHANSKIH LASTNOSTI BRIZGANEGA BETONA IN MIKROARMIRANEGA BRIZGANEGA BETONA</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Sestave betona</b>	<b>17</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Agregat</b>	<b>17</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Cement</b>	<b>19</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Voda in kemični dodatki</b>	<b>20</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Jeklena vlakna (JV)</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Opis preskusne metode po priporočilu RILEM TC 148-SSC in odstopanja</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Uvod</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Priporočilo</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2.1</b>	<b>Preskušanci</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2.1.1</b>	<b>Geometrija in velikost</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2.1.2</b>	<b>Izdelava preskušancev</b>	<b>24</b>
<b>3.2.2.1.3</b>	<b>Nega preskušancev</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2.2</b>	<b>Merilna oprema</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.3</b>	<b>Naprava za preskušanje (stiskalnica)</b>	<b>27</b>
<b>3.2.2.4</b>	<b>Izvedba preskusa</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2.4.1</b>	<b>Robni pogoji</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2.4.2</b>	<b>Postavitev preskušanca</b>	<b>30</b>
<b>3.2.2.4.3</b>	<b>Krmiljenje preskusa</b>	<b>30</b>
<b>3.2.2.5</b>	<b>Rezultati preskusa</b>	<b>31</b>
<b>3.2.2.6</b>	<b>Poročilo o preskusu</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2.7</b>	<b>Zaključek</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Rezultati in obdelava</b>	<b>32</b>



<b>4</b>	<b>UPORABA MIKROARMIRANEGA BRIZGANEGA BETONA PRI GRADNJI PREDOROV Z NAČRTOVANJEM PODPORNIH UKREPOV PO NOVI AVSTRIJSKI PREDORSKI METODI</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>Nova avstrijska predorska metoda (NATM)</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Uporaba tehnologije primarnega podpiranja z mikroarmiranim brizganim betonom v predoru Dekani</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>PREDOR LJUBNO IN PARAMETRIČNA ANALIZA IZVEDBE PRIMARNEGA PODPIRANJA</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Pregled zgodovine izvedbe leve cevi predora Ljubno</b>	<b>47</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Povzetek predhodnih raziskav</b>	<b>48</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Tehnična rešitev gradnje in statična analiza načrtovanega podpornega sistema</b>	<b>49</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Nekatere posebnosti gradnje</b>	<b>51</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Rezultati geološko – geotehnične spremljave gradnje</b>	<b>52</b>
<b>5.2</b>	<b>Parametrična študija izvedbe primarnega podpiranja z MABB pri izkopu leve cevi predora Ljubno</b>	<b>54</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Splošno</b>	<b>54</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Vhodni podatki</b>	<b>55</b>
<b>5.2.2.1</b>	<b>Geomehanski parametri nastopajočih hribinskih materialov</b>	<b>55</b>
<b>5.2.2.2</b>	<b>Materialni parametri MABB</b>	<b>55</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Numerični model in predpostavke</b>	<b>55</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Postopek parametrične analize</b>	<b>57</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Rezultati izračuna</b>	<b>58</b>
<b>5.2.5.1</b>	<b>Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z običajnim BB v kaloti pri starosti brizganega betona 12 ur</b>	<b>58</b>
<b>5.2.5.2</b>	<b>Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z običajnim BB v stopnici in talnem oboku pri starosti brizganega betona 12 ur</b>	<b>61</b>
<b>5.2.5.3</b>	<b>Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z MABB v kaloti pri starosti brizganega betona 12 ur</b>	<b>66</b>

<b>5.2.5.4</b>	<b>Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z MABB v stopnici in talnem oboku pri starosti brizganega betona 12 ur</b>	<b>69</b>
<b>5.3</b>	<b>Analiza rezultatov</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>VIRI</b>	<b>78</b>

## **KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Prostorninska masa in vpijanje vode agregata

Preglednica 2: Sestave za 1 m<sup>3</sup> svežega betona

Preglednica 3: Rezultati preskušanj tlačne trdnosti mikroarmiranega betona

Preglednica 4: Ocene sekantnih modulov elastičnosti (E-modulov)

Preglednica 5: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo betona z 0,0 % JV

Preglednica 6: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo betona z 0,5 % JV

Preglednica 7: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo betona z 1,0 % JV

Preglednica 8: Vhodni podatki za numerično analizo – geomehanske karakteristike  
nastopajočih hribinskih materialov

Preglednica 9: Redukcija modula elastičnosti sivice v odvisnosti od dolžine izkopnega koraka

Preglednica 10: Vertikalni pomiki pri vseh štirih različnih starostih brizganega betona

Preglednica 11: Vertikalni pomiki pri vseh štirih različnih starostih MABB

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Sejalne krivulje
- Slika 2: Frakciji agregata 0/4 in 4/8 mm, uporabljeni za pripravo MAB
- Slika 3: Cement, uporabljen za pripravo MAB
- Slika 4: Kemična dodatka, uporabljena za pripravo MAB
- Slika 5: Jeklena vlakna, uporabljena za pripravo MAB
- Slika 6: Vpliv robnih pogojev na rezultat preskusa
- Slika 7: Vpliv dimenzij preskušanca na rezultat preskusa
- Slika 8: Uporabljena kalupa z “vložki” na stresalni mizici
- Slika 9: Bat stiskalnice s kalibriranim merilcem pomikov
- Sliki 10 in 11: Naprava za preskušanje – stiskalnica in njen krmilni del
- Sliki 12 in 13: Preskušanelec pred preskusom in po preskusu
- Slika 14: Rezultat preiskave je diagram  $\sigma - \epsilon$
- Slika 15: Obnašanje MAB pri starosti 1 ure
- Slika 16: Obnašanje MAB pri starosti 2 ur
- Slika 17: Obnašanje MAB pri starosti 4 ur
- Slika 18: Obnašanje MAB pri starosti 8 ur
- Slika 19: Obnašanje MAB pri starosti 12 ur
- Slika 20: Priraščanje tlačne trdnosti MAB do starosti 12 ur
- Slika 21: Priraščanje tlačne trdnosti MAB do starosti 28 dni
- Slika 22: Obnašanje MAB pri starosti 1 ure in 2 ur
- Slika 23: Obnašanje MAB pri starosti 2 in 4 ur
- Slika 24: Obnašanje MAB pri starosti 4 in 8 ur
- Slika 25: Obnašanje MAB pri starosti 8 in 12 ur
- Slika 26: Spreminjanje sekantnega modula elastičnosti s starostjo betona
- Slika 27: Situacijski prikaz poteka leve cevi predora Ljubno
- Slika 28: vzdolžni geološko-geotehnični profil predora Ljubno
- Slika 29: Primarno podpiranje v kaloti – hribinska kategorija C2
- Slika 30: Primarno podpiranje v stopnici in talnem oboku – hribinska kategorija C2
- Slika 31: Prirastki izmerjenih normalnih napetosti v tangencialni smeri v primarni oblogi v odvisnosti od časa

- Slika 32: Prirastki izmerjenih normalnih napetosti med hribino in primarno oblogo v odvisnosti od časa
- Slika 33: 2D numerični računski model
- Slika 34: Shematični prikaz vzdolžnega prereza opazovanega mesta in izkopnih korakov
- Slika 35: Izkopni korak 2m – maksimalni pomik znaša 0,3 cm
- Slika 36: Izkopni korak 4m – maksimalni pomik znaša 1,4 cm
- Slika 37: Izkopni korak 6m – maksimalni pomik znaša 2,4 cm
- Slika 38: Izkopni korak 8m – maksimalni pomik znaša 3,6 cm
- Slika 39: Izkop celotnega profila v kaloti – maksimalni pomik znaša 4,5 cm
- Slika 40: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu kalote in zavarovanju s primarno podgradnjo
- Slika 41: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm
- Slika 42: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm
- Slika 43: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm
- Slika 44: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm
- Slika 45: Izkop celotnega profila stopnice in talnega oboka – maksimalni pomik znaša 4,96 cm
- Slika 46: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu stopnice in talnega oboka ter zavarovanju s primarno podgradnjo
- Slika 47: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 0,3 cm
- Slika 48: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 1,4 cm
- Slika 49: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 2,4 cm
- Slika 50: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 3,6 cm
- Slika 51: Izkop celotnega profila v kaloti – maksimalni pomik znaša 4,5 cm
- Slika 52: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu kalote in zavarovanju s primarno podgradnjo
- Slika 53: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm
- Slika 54: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm
- Slika 55: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm
- Slika 56: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm
- Slika 57: Izkop celotnega profila stopnice in talnega oboka – maksimalni pomik znaša 4,95 cm

Rajh, G. 2009. Pomen zgodnje trdnosti mikroarmiranih brizganih betonov pri projektiranju ... oblog predorov. XIV  
Dipl. nal. – VSŠ. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Slika 58: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu stopnice in talnega oboka  
in zavarovanju s primarno podgradnjo

## 1 UVOD

Gradnja predorov je tako v zgodovini kot danes gradbenim inženirjem nudila številne izzive in vedno je zahtevala pogum. Pogum človeka, da se sooči z naravo. Pri gradnji predorov mora pogum temeljiti na poznavanju geomehanskih pogojev lokacije objekta, organizacije dela, gradbenih materialov in še nekaterih znanj. Bolj ko gradbeni inženir obvlada ta znanja, več si upa in zato je razvoj vseh teh področij ključen za doseganje napredka. To pa predstavlja nenehen izziv.

V okviru diplomskega dela sem se omejil na gradbeni material, imenovan mikroarmirani brizgani beton (MABB). Obravnaval sem tiste njegove mehanske lastnosti, ki so bistvene za projektiranje primarne obloge predora, in sicer časovno priraščanje trdnosti v začetnih fazah strjevanja betona. Ker je za namene preskušanja praktično nemogoče pridobiti reprezentativen vzorec brizganega betona, starega 1 uro, v nadaljevanju govorim o betonih. Tako sem na treh enakih sestavah z izjemo različne vsebnosti vlaken izvajal preskuse po metodi, ki jo je predstavila RILEM-ova tehnična komisija TC 148-SSC. To je preskusna metoda za merjenje izgube nosilnosti betona pri enoosni tlačni obremenitvi. Na ta način sem običajnim karakteristikam, ki se pri projektiranju uporabljajo, dodal nekaj drugih lastnosti.

V nadaljevanju sem na osnovi teh rezultatov izdelal parametrično študijo podpornih ukrepov konkretnega predora. Za primer sem izbral predor Ljubno na avtocestnem odseku Peračica – Podtabor v Sloveniji, ki je bil grajen po novi avstrijski predorski metodi (NATM). Nato sem primerjal vpliv dodanih vlaken v betonu na hitrost izkopa in primarnega podpiranja (pri konstantni debelini obloge) predora.

Preskušanje mehanskih lastnosti betona v tej diplomski nalogi je del obširnejše raziskovalne naloge z naslovom Obnašanje mikroarmiranih brizganih betonov (MABB) takoj po vgraditvi, izhodišče pa predstavljajo rezultati meritev na poskusnem polju primarne obloge predora Dekani. V času izvajanja del na predoru je bilo narejeno 60 m dolgo raziskovalno polje z namenom, da bi ugotovili, do katere spodnje meje mehanskih lastnosti kamnine je mogoče uporabiti MABB kot osnovni material za primarno oblogo predora. Z uporabo slednjega se

lahko izognemo uporabi predorskih lokov in armaturnih mrež, kar omogoča prihranke tako pri denarju kot pri času gradnje. To se je med gradnjo predora Dekani tudi jasno pokazalo, saj so bile povprečne dosežene hitrosti izkopa in primarnega podpiranja z uporabo MABB tudi do 8 m/dan/gradbišče, z uporabo predorskih lokov, armaturnih mrež in brizganim betonom brez vlaken pa 5 – 6 m/dan/gradbišče (Jovičič in sod., 2004).

Tu pa se potencial MABB še ne konča. Z razvojem tehnike na področju daljinskega vodenja in avtomatizacije brizganja betona lahko nekatere tvegane delovne faze izvedemo tudi brez prisotnosti ljudi na nevarnih mestih in s tem močno pripomoremo k varnosti pri delu.



## **2 BETON, MIKROARMIRANI BETON IN BRIZGANI BETON**

### **2.1 Beton**

#### **2.1.1 Zgodovina**

Beton naj bi se v svojih prvih oblikah začel pojavljati že pred približno 5000 leti v Egiptu, kjer naj bi zmes paste s hidravličnimi lastnostmi in peska uporabljali pri gradnji piramid. Prvi uradni začetki uporabe betona pa segajo v rimske čase, kjer so apneni malti dodali pucolan in zdrobljeno opeko – substance silikatne narave in tako dobili hidravlične lastnosti malte. Vanj so dodajali tudi živalske maščobe, kri in mleko, tehnologijo pa razvili do te stopnje, da so enovito maso vlili v lesen kalup. Z dobro vgradnjo so dobili beton, ki je dosegal trdnosti do 40 MPa in kakovost, ki ustreza današnjim normativom. Eden prvih širokopoteznih kompleksov, ki so bili grajeni z rimskim betonom, je bila Neronova Zlata palača v Rimu. Ostanke betona najdemo tudi med arheološkimi najdbami stare Emone. Rimska tehnologija izdelave in uporabe betona se nadaljuje leta 1414, ko so v švicarskem samostanu našli opis rimskega betona in pucolanskih zemelj ter ga začeli izboljševati in razvijati. Zgodba o betonu, ki ga poznamo danes, pa ima začetek v letu 1824, ko so v Angliji odkrili portlandski cement.

#### **2.1.2 Sestava**

Beton je umetni kompozit, ki ga običajno sestavljajo kameni agregat, cement in voda. Kameni agregat ima vlogo ogrodja oz. skeleta matrici iz cementnega kamna. Ta pa nastane kot produkt hidratacije zmesi cementa in vode ter dodatkov, s pomočjo katerih lahko spremenimo oz. izboljšamo lastnosti sveže betonske mešanice in strjenega betona. V praksi se razmerje sestavin izbere tako, da omogoča beton v svežem stanju primerno obdelovalnost, v strjenem pa doseže željeno trdnost in odpornost za razumno ceno. Pomembno je izbrati in po potrebi analizirati najprimernejšo sestavo betona.

### 2.1.2.1 Agregat

Agregat lahko definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonske mešanice. V normalnih betonih je najtrša komponenta betona in običajno predstavlja približno 75 % volumske mase. Zato je njegov izbor (granulometrijska sestava, čistost, oblika, primesi itd.) ključnega pomena za kakovost in lastnosti betona v svežem in strjenem stanju.

Vloga agregata v betonu:

- znižuje ceno betona, saj je zaradi enostavnega pridobivanja poceni,
- z ustrezno sestavo frakcij dobimo kohezivni beton, ki ga je v svežem stanju lahko obdelovati,
- znižuje hidrationsko toploto betona, ker je običajno kemično inerten in deluje kot odvajalo toplote,
- zmanjšuje krčenje betona, saj na večino agregatov voda ne deluje in lahko zato omejuje krčenje cementne paste med hidrationsjo.

Lastnosti agregata, ki so bistvene pri pripravi betonske mešanice:

- mineraloško-petrografska sestava vpliva na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona,
- granulometrijska sestava vpliva na obdelovalnost svežega betona, gostoto in ekonomičnost,
- oblika in površinska tekstura vplivata na obdelovalnost svežega betona ter sprejemljivost cementnega kamna in agregata v strjenem betonu.

### 2.1.2.2 Cement

Sivi prah, imenovan cement, uvrščamo med hidravlična veziva. Njegova osnovna lastnost je, da se ob stiku z vodo veže in strjuje (hidrationsja) v cementni kamen, ki tudi v vodi ohrani trdnost in stabilnost. Ta v betonu običajno predstavlja približno 25 % volumske mase.

Osnovna surovina cementa so minerali, ki jih po izkopu drobimo in transportiramo v silose. Po korigiranju njihove kemijske sestave jih žgemo v rotacijski peči do temperature sintranja

(1450 °C). Rezultat procesa je cementni klinker, ki je podoben pepelu, ima granule s premerom nekaj centimetrov in je močno porozen. Klinker ohladimo na sobno temperaturo in po dodajanju sadre zmeljemo v fin prah. Tako nastane portlandski cement.

Hidratacija cementa poteka v štirih fazah:

- ko dodamo vodo, pride do njenega kemijskega vezanja s  $C_3S$  in krajši čas obstaja  $C_3S \cdot H_2O$ ,
- iz nasičene otopine se po raztapljanju osnovnega zrna v njegovi okolici pojavijo igličasti kristali, nato kristalizira nov kristal silikat-hidrat,
- nasičena otopina z novo nastalimi kristali preide v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrni,
- nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.

V vseh fazah se sprošča hidratacijska toplota.

Proces hidratacije poteka nemoteno, če so zagotovljene primerne razmere v okolici (dovolj visoka temperatura in vlaga), v nasprotnem primeru pa se upočasni in praktično ustavi. Nadaljuje se lahko, če se izsušeni beton po svoji celotni prostornini ponovno navlaži in če se temperatura v okolici poviša.

Na izbiro ustreznega cementa vplivajo:

- namen uporabe (armirani, nearmirani, prednapeti beton ...),
- razvoj hidratacijske toplote v betonu,
- dimenzije konstrukcije,
- agresija okolja, ki ji je konstrukcija izpostavljena.

### 2.1.2.3 Voda

Voda je osnovni element betona in potrební pogoj za pretvorbo cementa v betonsko vezivo. Skupaj s cementom vpliva na obdelovalnost sveže betonske mešanice. Na splošno velja, da je za pripravo betona najprimernejša pitna voda, medtem ko je morska voda le pogojno primerna za nearmirane betone nižjih trdnosti. Posebno pozornost zahteva uporaba prečiščenih

odpadnih industrijskih voda. Največje tveganje predstavljajo snovi, ki so raztopljene v njih. Zato se pred morebitno uporabo takšne vode priporoča ne le kemična analiza, ampak tudi primerjalna preiskava vpliva vode na trdnost cementnega kamna.

Pojavi, ki so posledica uporabe neprimerne vode pri izdelavi betona:

- eflorescenca – površinsko izločanje soli,
- prostorninska nestabilnost cementnega kamna,
- sprememba časovnega poteka hidratacije paste,
- sprememba barve paste,
- različne vrste korozije cementnega kamna.

#### 2.1.2.4 Dodatki

Dodatek betonu je po definiciji material, ki je različen od vode, agregata in hidravličnega cementa. Betonski mešanici ga dodajamo z namenom, da se dosežejo oz. izboljšajo nekatere lastnosti svežega in/ali strjenega betona. Delimo jih na mineralne (elektrofiltrski pepel in mikrosilika) in kemične dodatke (plastifikatorji, aeranti, pospešila in zavlačevala, gostila ter pigmenti). Pri uporabi več dodatkov v betonu je treba posebno pozornost nameniti interakcijam med njimi.

Podatki v točki 2.1.1 in 2.1.2 so povzeti po knjigi Osnovne lastnosti gradiv (Žarnič, 2009) in knjigi Sanacije betonskih objektov (Grum in sod., 2004).

#### 2.1.3 Mehanske lastnosti

Mehanske lastnosti betona so poleg pravilno izbrane sestave in primerne vgrajevanja v največji meri odvisne od nege v času strjevanja. Proces hidratacije poteka, dokler so prisotni nehidratizirana zrnca cementa, dovolj visoka temperatura in vlažnost, višja od 80 %. Na pomanjkljivo nego so najbolj občutljivi betoni, ki imajo v primerjavi s svojo prostornino veliko odprto površino (plošče, stene), saj se sušijo hitreje kot masivni betoni.

### 2.1.3.1 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost je definirana kot največja izmerjena odpornost na enoosno tlačno obremenitev. Na trdnost imata velik vpliv vodocementno razmerje ( $v/c$ ) oziroma vodovezivno razmerje ( $v/v$ ) v kolikor se betonu dodajajo mineralni dodatki in stopnja dosežene hidratacije cementnega kamna, ki je običajno premosorazmerna s starostjo betona. Določa se na vzorcih v obliki kock ali valjev pri starosti 28 dni.

Karakteristična tlačna trdnost je vrednost, pod katero lahko za obravnavani beton pričakujemo največ 5 % vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti (5 % fraktilna vrednost).

### 2.1.3.2 Upogibna natezna trdnost

Upogibna natezna trdnost je odpornost betona proti delovanju sile pravokotno na os linijskega elementa ali površino plošče. Uporablja se pri dimenzioniranju hodnikov in plošč, položenih na podajno podlago. Določa se z upogibnim preskusom betonskih prizem in je sorazmerna tlačni trdnosti betona.

### 2.1.3.3 Cepilna natezna trdnost

Pomembna je pri oceni obremenitev, pri katerih nastanejo razpoke v betonu, in je približno enaka natezni trdnosti betona pri enoosnem nategu. Pri betonih višjih trdnostnih razredov je razmerje natezne proti tlačni trdnosti manjše kot pri betonih nižjih trdnostnih razredov.

### 2.1.3.4 Modul elastičnosti (E – modul)

Modul elastičnosti je mera deformabilnosti betona. Za praktičen račun ga lahko izračunamo s pomočjo izrazov, ki so podani v predpisih na osnovi tlačne trdnosti, ali pa ga določimo s preskusi na betonskih prizmah. Zelo približno so vrednosti modulov elastičnosti 1000-krat večje od tlačne trdnosti.

#### 2.1.3.5 Gostota

Pri navadnih betonih se gostota giblje med 2200 in 2400 kg/m<sup>3</sup>, pri lahkih znaša 250 kg/m<sup>3</sup>, pri težkih pa tudi nad 6000 kg/m<sup>3</sup>. Na gostoto najbolj vplivata vrsta in sestava (gostota zrn, granulacija in poroznost) agregata. Sveži beton je praviloma gostejši, saj med strjevanjem nekaj vode vedno izhlapi.

#### 2.1.3.6 Obrabnost

Bistvena je za betone, vgrajene na površinah, ki so izpostavljene mehanskim vplivom in tekoči vodi. Odpornost betona proti obrabi dosežemo z nizkim vodocementnim razmerjem, uporabo trdega in trdnega agregata (eruptivne kamnine) ter ustrezno površinsko obdelavo.

#### 2.1.3.7 Odpornost proti prodoru vode

Potrebna je pri betonih, izpostavljenih atmosferskim in drugim ekstremnim vplivom pri konstrukcijah, ki morajo biti sposobne zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Manj prepustni betoni so tudi odpornejši na delovanje kemikalij, ki potujejo v obliki vodne raztopine, in na vplive zmrzovanja. Prepustnost betona je odvisna od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter razmerja med njima. Prepustnost cementnega kamna je odvisna od vodovezivnega razmerja cementne paste, stopnje hidratacije in nege med strjevanjem. Odpornost betona proti prodoru vode izboljšamo z dodajanjem mineralnih dodatkov ali polimerov. Najbolj negativno pa na vodotesnost vplivata razpokanost in odprta poroznost. Določa se tako, da izmerimo globino prodora vode v betonski preskušanelec (kocko, valj) potem, ko je bil izpostavljen delovanju vode pod pritiskom.

#### 2.1.3.8 Zmrzljinska odpornost

Ta lastnost je ključna za obstojnost betona in posledično za trajnost betonske konstrukcije. Cikli zmrzovanja in tajanja, še posebno ob prisotnosti kemikalij, kot so soli, kisline ipd., destruktivno vplivajo na beton. Voda, ki se nahaja v porah, ob ohladitvi zmrzne in ker led zavzema večjo prostornino kot voda, povzroči notranje obremenitve, ki večajo notranjo

razpokanost betona. Odprte pore v agregatu so bolj nevarne, ker so tanjše od por v cementnem kamnu. Zmrzlinško odporen beton dobimo z nizkim vodocementnim razmerjem in z aeracijo betona, saj sistem zaprtih por ovira pretok vode in nastanek ledu. Standardi predpisujejo ločene preiskave notranje in površinske odpornosti proti zmrzovanju in tajanju do zahtevanega števila ciklov.

### 2.1.3.9 Prostorninska stabilnost

Prostorninska stabilnost je faktor, ki vpliva na delovanje betona znotraj konstrukcije. Strjeni beton vedno rahlo spreminja svojo prostornino, odvisno od sprememb temperature in vlage v njegovi okolici ter obremenitev (elastične deformacije in lezenje betona). Spremembe so velikostnega reda 0,1 do 0,8 ‰. Na prostorninsko stabilnost najbolj vplivajo vodovezivno razmerje, vrsta in količina cementa, granulacija in vrsta agregata, oblika betonskega elementa, način nege med strjevanjem in stopnja hidratacije cementa.

Podatki v točki 2.1.3 so povzeti po knjigi Osnovne lastnosti gradiv (Žarnič, 2009).

## 2.2 Mikroarmiran beton

### 2.2.1 Zgodovina

Človek je krhke materiale že od nekdaj ojačeval z vlakni. Tako je npr. v malto dodal konjsko dlako, ilovici je primešal mleto slamo, jo oblikoval, posušil na soncu in dobil opeko, ki ni tako hitro razpadla. Te prve oblike kompozitov danes najpogosteje srečamo ob sanacijah starih domačij pa tudi v vedno pogostejših primerih ekološko usmerjenih novogradenj. Na začetku dvajsetega stoletja je razvoj prinesel azbestna vlakna, kar je povzročilo velik razcvet proizvodnje in uporabe azbestnocementnih izdelkov po vsem svetu. V istem obdobju pa je bila opravljena tudi prva raziskava o vplivu različnih dodanih oblik jeklenih vlaken na lastnosti betona. In ko so na podlagi spoznanj o vplivih azbesta na zdravje ljudi njegovo proizvodnjo in uporabo začeli omejevati in posledično prepovedovati, so v šestdesetih in sedemdesetih letih prejšnjega stoletja začeli uvajati nove tipe vlaken.

Prednosti betona, ojačanega z vlakni, v primerjavi z navadnim betonom:

- duktilna porušitev kot posledica postopnega izvlačanja in pretrganja vlaken,
- povečana natezna, strižna in torzijska trdnost ter odpornost proti abraziji,
- bistveno povečana upogibna trdnost, žilavost, odpornost proti udarni obtežbi in utrujanju.

Na lastnosti svežega betona, ojačanega z vlakni, najbolj vpliva:

- razmerje med dolžino in premerom vlaken,
- geometrija vlaken,
- količina vlaken v betonu,
- lastnosti stika med vlakni in cementno matrico,
- razmerja sestavin betona.

## **2.2.2 Vrste mikroarmiranih betonov glede na vrsto vlaken**

### 2.2.2.1 Beton, ojačan z jeklenimi vlakni (steel fiber reinforced concrete – SFRC)

To je beton, ki je v osnovi sestavljen iz mineralnega agregata, cementa, vode in jeklenih vlaken. V ZDA so izvedli prvo obsežno raziskavo o prednostih uporabe jeklenih vlaken v betonu v zgodnjih šestdesetih letih dvajsetega stoletja in od takrat se razvoj zaradi potenciala jeklenih vlaken in nešteti možnosti kombiniranja še danes nadaljuje po vsem svetu.

Za projektiranje betona, ojačanega z jeklenimi vlakni, obstaja več pristopov, v osnovi pa so to postopki za projektiranje z navadnim betonom, ki upoštevajo natezno trdnost z vlakni ojačanega kompozita. Ker pa je v praksi nemogoče zagotoviti enakomerno razporeditev vlaken po elementu in s tem izključiti možne lokalne oslavitve, se priporoča konzervativen pristop k projektiranju, in sicer naj natezne napetosti v natezno ali upogibno obremenjenih elementih v celoti prevzame klasična armatura.

Zaradi naštetih lastnosti se beton, ojačan z jeklenimi vlakni, prednostno uporablja za primarne obloge predorov, stabilizacije skalnih pobočij ter rudniških rovov, talne plošče v skladiščih ipd., kjer prisotnost klasične armature ni pogoj za varnost in integriteto konstrukcijskih



elementov. V teh primerih lahko z uporabo vlaken dosežemo izboljšanje mehanskih lastnosti elementov, zmanjšanje prereza elementa in skrajšanje časa gradnje.

#### 2.2.2.2 Beton, ojačan s steklenimi vlakni (glass fiber reinforced concrete – GFRC)

V tem primeru se osnovnemu betonu dodajo steklena vlakna. Cementno pasto, ojačano s steklenimi vlakni, so začeli razvijati v šestdesetih letih prejšnjega stoletja, pri čemer so uporabili cement, vodo in dve vrsti stekla: borosilikatno ali natrij-kalcijevo. Pokazalo se je, da vlakna hitro izgubijo svojo trdnost zaradi visoke bazičnosti cementne matrice ( $\text{pH} \geq 12,5$ ) in zato je sledil razvoj alkalno odpornega stekla, kar so dosegli z dodajanjem cirkonijevega dioksida (alkali resistant-glass fiber reinforced concrete – AR-GFRC). To je steklenim vlaknom omogočilo dolgoročno stabilne lastnosti v cementni matrici. S pričetkom komercialne uporabe v sedemdesetih letih dvajsetega stoletja so začeli dodajati tudi mineralni agregat, in sicer najprej v razmerju agregat – cement 1 proti 3, nato pa zaradi prevelikega krčenja elementov tudi 1 proti 2 in 1 proti 1.

Večina komercialno dostopnih betonov, ojačanih s steklenimi vlakni, pa ima tudi slabost, ki omejuje njihovo uporabo, in to je tendenca, da z leti in izpostavljenostjo vremenskim pojavom izgubljajo natezno in upogibno trdnost ter duktilnost, ki pa je njihova bistvena značilnost. Za to obstajata dve razlagi:

- po prvi naj bi bazičnost cementne matrice vplivala na vlakna tako, da ta izgubijo natezno trdnost, posledično pa jo izgubi tudi kompozit,
- po drugi, bolj sprejeti, pa naj bi izpostavljenost vremenu oziroma neposredno vodi omogočala nadaljno hidratacijo cementa, katere produkti nato zapolnejo morebitne praznine med fibrili vlaken in okolico in tako postopoma občutno povečajo sprijemno vez vlaken in cementne matrice. To pa zmanjšuje možnost izvlačanja vlaken oziroma vodi v natezno porušitev vlaken in posledično v krhko obnašanje kompozita.

Obstaja pa tudi možnost sočasnega delovanja obeh vplivov s tem, da eden prevladuje. V primeru uporabe vlaken (teoretično možno, praktično ne), izdelanih iz alkalno neodpornega stekla, prevladuje vpliv bazičnosti cementne matrice, v primeru uporabe alkalno odpornih steklenih vlaken pa vpliv povečanja sprijemne vezi med vlaknom in okolico na račun hidratacije.

Vpliv izgube natezne in upogibne trdnosti ter duktilnosti lahko omilimo z ustrezno prilagojenimi računskimi metodami ter z uporabo materiala za nestrukturne elemente, kot so fasadne plošče in razni arhitekturni dodatki objektom.

#### 2.2.2.3 Beton, ojačan s sintetičnimi vlakni (synthetic fiber reinforced concrete – SNFRC)

Pod tem nazivom poznamo beton, ojačan z vlakni, ki niso jeklena, steklena ali naravna. Sem spadajo vlakna, ki izhajajo iz razvoja petrokemične in tekstilne industrije. Za pripravo kompozitov na osnovi betona iz portlandskega cementa se uporabljajo naslednje vrste sintetičnih vlaken:

- akrilna vlakna,
- aramidna vlakna,
- karbonska vlakna na osnovi poliakrilonitrila (PAN),
- karbonska vlakna na osnovi petroleja in premoga (pitch),
- vlakna iz najlona,
- vlakna iz poliestra,
- vlakna iz polietilena,
- vlakna iz polipropilena.

Za nekatere vrste vlaken obstaja malo poročil o raziskavah in so zato njihove lastnosti oz. prednosti slabo poznane, medtem ko za druge tipe vlaken obstaja veliko podatkov in se zato tudi uporabljajo na več področjih.

Z nadaljnjim razvojem posameznih vrst vlaken se bo njihova uporaba še razširila, neslutene možnosti pa obeta kombiniranje vrst vlaken, s čimer lahko izdelamo kompozite za zelo specifične namene.

Akrilna, aramidna in polietilenska vlakna se primarno uporabljajo kot nadomestilo azbestnih vlaken. Karbonska vlakna so se izkazala za primerna v zelo širokem spektru aplikacij, vendar njihovo uporabo tako kot uporabo aramidnih vlaken omejuje visoka cena. Najlon so za vlakna v betonu sprva uporabili ameriški vojaški inženirji, ko so razvijali beton, odporen na eksplozijo. Vlakna iz poliestra se v beton dodajajo zato, da se omeji širjenje razpok, ki jih

povzroča plastično krčenje. Polipropilenska vlakna se uporabljajo zaradi vpliva na zgodnje trdnosti, s čimer se olajša manipulacija z gotovimi izdelki, in zato, ker izginejo pri visoki temperaturi, kar povzroči nastanek sistema drobnih kanalov, s pomočjo katerih lahko vplivamo na spremembe toplote in vlage v elementu. Zaradi relativno najnižje cene se polipropilenska vlakna uporabljajo zelo pogosto.

#### 2.2.2.4 Beton, ojačan z naravnimi vlakni (natural fiber reinforced concrete – NFRC)

Beton, ojačan z naravnimi vlakni, je vrsta kompozita, ki je na svetu poznana najdlje. Že od nekdaj so opeke izdelovali iz na soncu posušene ilovice, kateri so primešali slamo. Vendar se uporabi naravnih vlaken za ojačevanje betona ni posvečalo potrebne znanstvene pozornosti vse do šestdesetih let prejšnjega stoletja.

Naravna vlakna v osnovi delimo na surova in obdelana. Surova vlakna pridobivamo zelo enostavno, na voljo so v relativno velikih količinah širom sveta in predstavljajo obnovljiv vir. S preiskavami so nakazali potencial naravnih vlaken za izdelavo stenskih in strešnih elementov.

Rastline, katerih vlakna se uporabljajo za ojačevanje cementnih izdelkov:

- bambus,
- kokos,
- sisalova agava,
- sladkorni trs,
- konoplja,
- juta,
- lan,
- slonova trava,
- trsje,
- trpotec,
- mehansko pridobljena lesna vlakna.

Obdelana vlakna pridobivamo iz dreves, in sicer na tri načine: mehanski, polkemični in kemični. Mehanski način pomeni drobljenje lesa, zaradi česar vlakna, pridobljena na ta način, uvrščamo med surova naravna vlakna. Pri kemičnem načinu les narežemo na manjše kocke, te pa nato kuhamo v bazični raztopini in tako razgradimo material, ki drži vlakna skupaj. Pri polkemičnem načinu pridobivanja kose lesa najprej kuhamo v bazični raztopini in nato mehansko drobimo, da dobimo vlakna. V praksi se je pokazalo, da so obdelana vlakna veliko trajnejša kot neobdelana, saj se med kuhanjem v bazični raztopini uniči material, ki je občutljiv na bazičnost cementa.

Pri uporabi naravnih vlaken je potrebno upoštevati:

- da se vlakna pojavljajo v različnih dolžinah in premerih,
- glukozo v vlaknih, ki zavlačuje vezanje cementa,
- veliko vsebnost oziroma absorbcijo vode,
- nabrekanje vlaken v prisotnosti vlage,
- priporoča se zaščita vlaken z organskimi mikrobiocidi, da se prepreči delovanje bakterij.

Naravna vlakna imajo največji potencial pri gradnji z omejenimi sredstvi predvsem v državah v razvoju. Ker so dostopna v relativno velikih in obnovljivih količinah ter jih je enostavno pridobivati, so za območja, kjer rastejo, dragocen gradbeni material. V prihodnjosti se bo njihova uporaba zaradi ekološke sprejemljivosti širila tudi v razvitem svetu.

Podatki v točki 2.2 so povzeti po ACI Committee 544.1R. Report on Fiber Reinforced Concrete (American Concrete Institute, Manual of concrete practice, 2009).

### **2.3 Brizgani beton**

Izraz brizgani beton predstavlja beton, ki ga z visoko hitrostjo nanašamo na podlago. V osnovi je to običajen beton, ki je pripravljen v betonarni in dostavljen na gradbišče, lahko pa se uporabi tudi suho zmes cementa, agregata in suhih dodatkov, kateri pod pritiskom

dodajamo vodo in tekoče dodatke na izhodni šobi za brizganje. Tako poznamo dva postopka brizganja:

- mokri postopek in
- suhi postopek

### **2.3.1 Mokri postopek brizganja**

Leta 1910 so gradbeni industriji prvič predstavili dvoprekatno napravo za črpanje vnaprej pripravljene betonske mešanice pod visokim pritiskom. Od takrat pa do danes je bilo na tem področju narejenih veliko izboljšav, tako pri opremi za brizganje kot pri materialih, kar je omogočilo črpanje večjih količin mešanice z nižjo konsistenco na večje razdalje.

Proces poteka v petih korakih:

1. vse sestavine betonske mešanice temeljito premešamo,
2. mešanico vnesemo v napravo za črpanje,
3. material se iz naprave po cevi prenese do izhodne šobe s pomočjo črpalke ali stisnjenega zraka,
4. na šobo se dovaja stisnjen zrak, ki poveča hitrost in izboljša razporeditev delcev,
5. material zapusti izhodno šobo pri visoki hitrosti in zavzame svojo končno lego.

### **2.3.2 Suhi postopek brizganja**

V šestdesetih letih prejšnjega stoletja je razvoj tehnologije brizganja omogočil dodajanje vode na izhodni šobi in s tem uvedel tako imenovani suhi postopek.

Proces poteka v petih korakih:

1. vse sestavine betonske mešanice razen vode temeljito premešamo,
2. mešanico vnesemo v napravo za črpanje,
3. material se iz naprave po cevi prenese do izhodne šobe s pomočjo dozirnega sistema v napravi ali stisnjenega zraka,
4. v šobo je vgrajen sistem, ki v suho mešanico dovaja vodo (in po potrebi tudi dodatke) pod pritiskom tako, da se sestavine dobro premešajo,
5. material zapusti izhodno šobo pri visoki hitrosti in zavzame svojo končno lego.

Primerjava obeh postopkov je podana v naslednji preglednici.

Primerjava mokrega in suhega postopka brizganja (ACI Committee 506. Guide to Shotcrete)

<b>Suhi postopek</b>	<b>Mokri postopek</b>
Sprotno prilagajanje količine dodane vode in s tem konsistence različnim pogojem podlage	Dodajanje vode pri mešanju, kar omogoča natančno doziranje
Primernejši za mešanice z lahkimi ali drobljenimi agregati	Zagotavlja boljšo homogenizacijo dodane vode v betonsko mešanico
Lahko se transportira na večje razdalje	Manjša izguba finih delcev agregata in cementa med nanašanjem
Lažja manipulacija s cevmi, po katerih se prenaša material	Navadno se material manj odbija med nanašanjem, zato je manj odpadka
Manjši volumen glede na velikost cevi	Večji volumen glede na velikost cevi

### **2.3.3 Razvojni potencial brizganega betona**

Brizgani beton se zelo dobro obnese pri izdelavi primarne obloge predorov. Omogoča uporabo materialov, ki se izjemno hitro strdijo. Z dodajanjem vlaken lahko v nekaterih primerih izločimo uporabo armaturnih mrež in predorskih lokov, velik potencial pa predstavlja razvoj daljinskega upravljanja opreme za brizganje ter njena avtomatizacija. To bistveno dviguje raven varnosti, saj prisotnost človeka na nekaterih nevarnih mestih ne bo več potrebna.

Podatki v točki 2.3 so povzeti po ACI Committee 506R. Guide to Shotcrete (American Concrete Institute, Manual of concrete practice, 2009).

### **3 PREISKAVE MEHANSKIH LASTNOSTI BRIZGANEGA BETONA IN MIKROARMIRANEGA BRIZGANEGA BETONA**

Preiskave sem izvajal na mikroarmiranih brizganih betonih (MABB) v treh enakih sestavah, ki so se med seboj razlikovale le po količini dodanih vlaken, in sicer na beton brez vlaken in MABB z 0,5 vol.% ter 1,0 vol.% vlaken. Za oceno obnašanja mladega MABB sem uporabil preskusno metodo, ki jo je predstavila RILEM-ova tehnična komisija TC 148-SSC in je pri podobni raziskovalni nalogi že bila uporabljena. V nadaljevanju podajam opis bistvenih elementov te metode. Ker je za namene preskušanja praktično nemogoče pridobiti reprezentativen vzorec brizganega betona, starega 1 uro, sem dejansko preiskoval navadne betone, ki pa so po svoji sestavi primerni za brizganje. Vzorce za preiskave sem tako pripravil v kalupih na stresalni mizici. Opazoval sem časovni razvoj priraščanja enoosne tlačne trdnosti pri starosti 1, 2, 4, 8 in 12 ur. Na osnovi RILEM-ove metode sem spremljal obnašanje betona tudi po doseženi največji tlačni trdnosti, torej v področju izgube nosilnosti oz. mehčanja (področje, kjer diagram  $\sigma - \epsilon$  pada). Tako sem lahko ugotavljal, ali se z večanjem količine vlaken v betonu ta med izgubo nosilnosti obnaša duktilno ali krhko. Pri izvedbi preiskusov sem uporabljal računalniško vodeno hidravlično stiskalnico z zmogljivostjo 200 kN. Ker pa so trdnosti vzorcev po 12 urah presegale njeno zmogljivost, sem starejše vzorce preskušal v ročno vodeni hidravlični stiskalnici z zmogljivostjo 3000 kN. Tako sem za vse tri sestave pridobil podatke o doseženi tlačni trdnosti pri starosti 1, 2, 3, 7 in 28 dni.

#### **3.1 Sestave betona**

##### **3.1.1 Agregat**

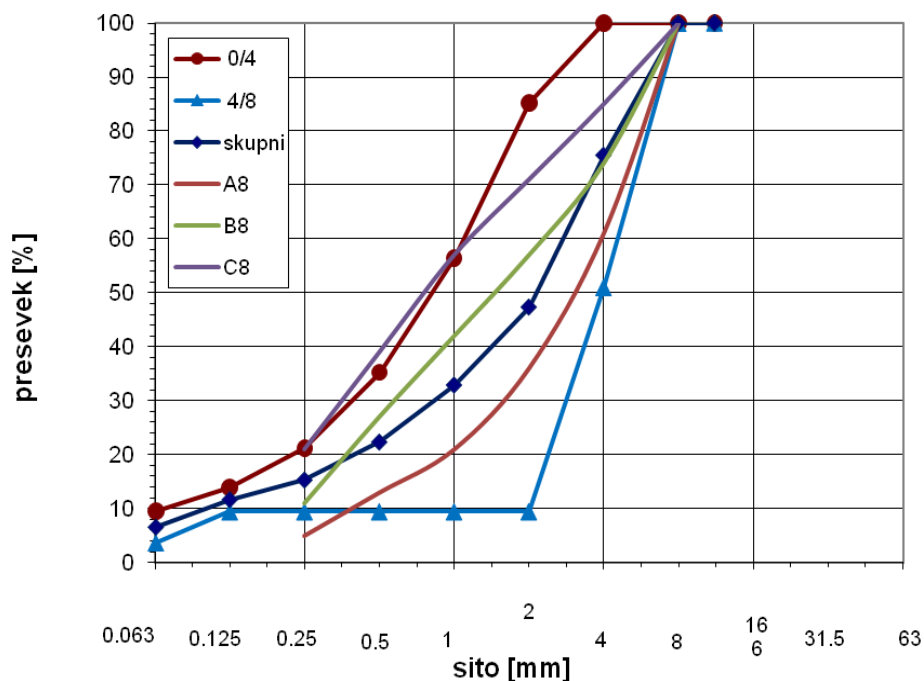
Za pripravo betona sem uporabil drobljeni dolomitni agregat s frakcijama 0/4 in 4/8 mm. Pred pričetkom preiskav betonov sem opravil nekaj preiskav samega agregata. Preveril sem:

- prostorninsko maso in vpijanje vode (po SIST EN 1097-6),
- sejhalno analizo ter vsebnost finih delcev (po SIST EN 933-1).

Rezultati so zbrani v preglednici 1, sejalni krivulji pa sta prikazani na sliki 1. Na sliki je prikazana še krivulja skupne sestave obeh frakcij in priporočena območja med krivuljami A8, B8 in C8 po SIST 1026 (2008). Krivulja skupne sestave agregata poteka na območju med krivuljama A in B.

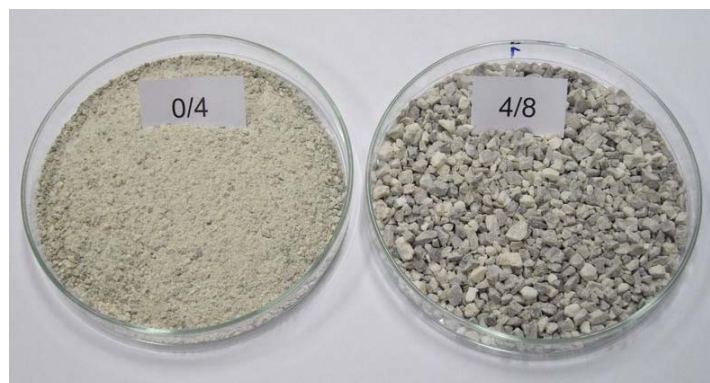
Preglednica 1: Prostorninska masa in vpijanje vode agregata

Frakcija (mm):	0/4	4/8
Vsebnost finih delcev (%m/m):	9,5	3,7
Prostorninska masa zrn ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ):	2,843	2,846
Suha prostorninska masa zrn ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ):	2,801	2,824
Prostorninska masa nasičenih in površinsko suhih zrn ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ):	2,816	2,832
Vpijanje vode (%m/m):	0,54	0,28



Slika 1: Sejalne krivulje





Slika 2: Frakciji agregata 0/4 in 4/8 mm, uporabljeni za pripravo MAB

### 3.1.2 Cement

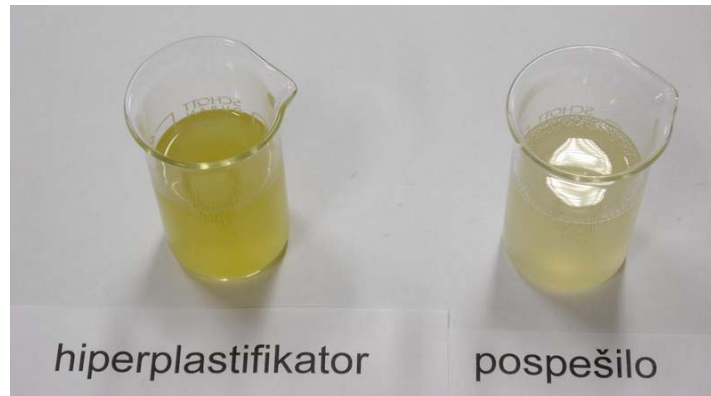
Cement, uporabljen pri preiskavah, ima oznako CEM I 52,5 R. Rezultati preiskovanja samega cementa kažejo, da ima njegov vzorec začetek vezanja po 135 minutah, konec vezanja pa po 150 minutah (po EN 196-3). Izmerjena tlačna trdnost pri starosti 2 dni znaša 37,0 MPa (po EN 196-1).



Slika 3: Cement, uporabljen za pripravo MAB

### 3.1.3 Voda in kemični dodatki

Za izdelavo betona sem uporabil navadno pitno vodo iz vodovoda. Poleg osnovnih sestavin betona sem uporabil še kemična dodatka, in sicer hiperplastifikator na osnovi modificiranih polikarboksilatov in močno nealkalno pospešilo v tekoči obliki.



Slika 4: Kemična dodatka, uporabljena za pripravo MAB

### 3.1.4 Jeklena vlakna (JV)

Izbral sem jeklena vlakna, ki imajo dolžino 16 mm in premer 0,5 mm. Izdelana so iz visoko kakovostne žice in na obeh koncih zakrivljena zaradi boljšega sidranja v cementno matrico.



Slika 5: Jeklena vlakna, uporabljena za pripravo MAB

Sestavine so bile celoten čas izvajanja preiskav hranjene v prostoru z nadzorovano temperaturo 20 °C. Betonske mešanice so se razlikovale med seboj samo po količini vsebovanih vlaken. Kot referenčno sestavo sem vzel recepturo brez vlaken in z njo primerjal sestavi z 0,5 vol% (40 kg/m<sup>3</sup> vgrajenega betona) ter 1,0 vol% (80 kg/m<sup>3</sup> vgrajenega betona). Cilj obnašanja svežega betona je bil beton, primeren za brizganje, kar zahteva konsistenčno stopnjo S4 (posed 160 do 210 mm – standard SIST EN 206-1:2003). To je bilo s posedom med 165 in 205 mm tudi doseženo. Ker se pri postopku brizganja pospešilo dodaja na izstopni šobi, sem konsistenco meril pred dodajanjem pospešila. Vse tri sestave svežega betona so podane v preglednici 2.

Preglednica 2: Sestave za 1 m<sup>3</sup> vgrajenega svežega betona

Prostorninski deleži jeklenih vlaken:		Količina materiala za 1 m <sup>3</sup> vgrajenega betona		
		0,0 %	0,5 %	1,0 %
Posamezni sestavni materiali (kg)	Cement CEM I 52,5 R:	480	480	480
	Hiperplastifikator:	6,24	6,24	6,24
	Pospešilo:	26,4	26,4	26,4
	Jeklena vlakna JV 50/16:	0	40	80
	Zamesna voda:	205,55	205,55	205,55
	Agregat, frakcije 0/4:*	808,11	800,91	793,71
	Agregat, frakcije 4/8:*	812,70	805,46	798,22

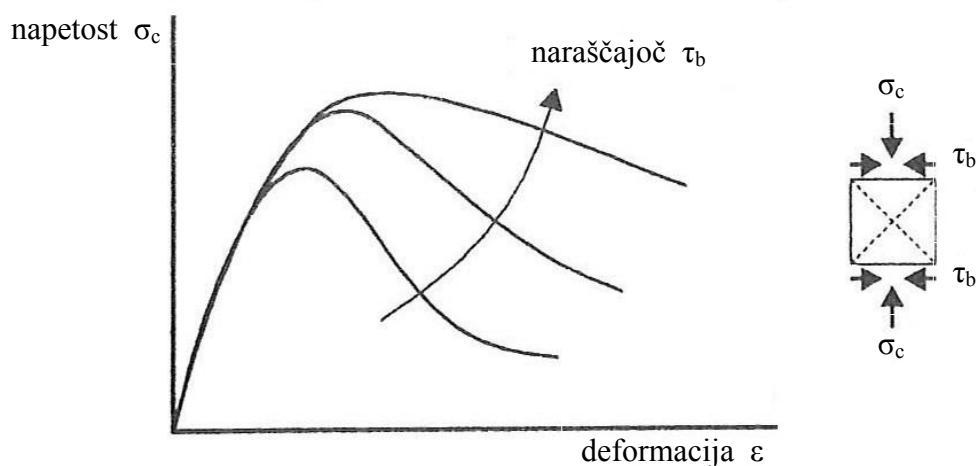
\* količina agregata se zmanjšuje zaradi dodajanja jeklenih vlaken

## 3.2 Opis preskusne metode po priporočilu RILEM TC 148-SSC in odstopanja

### 3.2.1 Uvod

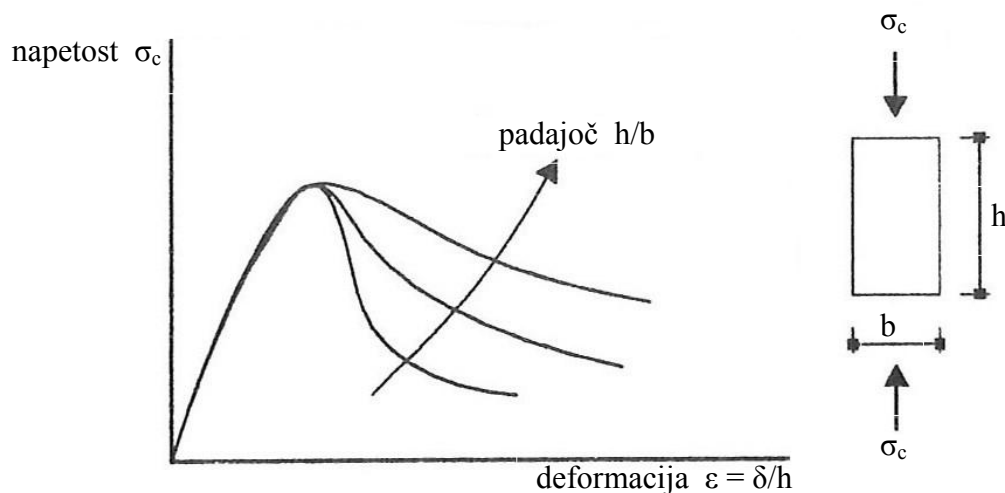
Z novejšimi znanji o projektiranju konstrukcij se pojavlja potreba po poznavanju obnašanja betona tudi po doseženi največji tlačni trdnosti, torej v področju izgube nosilnosti. Na diagramu  $\sigma - \epsilon$  je to padajoči del krivulje. Na obnašanje preskušanca med preskusom oziroma na potek porušitve betona in s tem na obliko padajočega dela diagrama  $\sigma - \epsilon$  najbolj vplivata

dva faktorja. Prvi predstavlja robne pogoje preskušanca med preskusom, drugi pa vitkost preskušanca. Dokazano je bilo, da večje trenje med preskušancem in naležno površino naprave za preskušanje rezultira v višji največji doseženi tlačni trdnosti ter bolj duktilnem obnašanju betona po njej. Primeri diagramov  $\sigma - \epsilon$  so prikazani na sliki 6.



Slika 6: Vpliv robnih pogojev na rezultat preskusa

Drugi prav tako pomemben faktor je vitkost preskušanca, torej razmerje med višino  $h$  in širino  $b$ . Bolj vitki preskušanci imajo posledično bolj krhke porušitve, z manjšanjem razmerja  $h/b$  pa prihaja do bolj duktilnega obnašanja po doseženi največji trdnosti betona. Primeri diagramov  $\sigma - \epsilon$  so prikazani na sliki 7.



Slika 7: Vpliv dimenzij preskušanca na rezultat preskusa

Med preskušanjem vzorcev različnih vitkosti je bilo opaženo, da se deformacije pričnejo lokalizirati po doseženi največji tlačni trdnosti. To ima velik pomen za strukturno analizo, saj padajočega dela diagrama  $\sigma - \varepsilon$  dejansko ni več mogoče uporabljati. To področje pravzaprav spada k lomni mehaniki.

Na osnovi zgoraj naštetih dejstev je bila izkazana potreba po vzpostavitvi standardne testne metode, ki bo omogočala poenotenje dela in s tem primerljivost rezultatov.

Iz analize večjega števila raziskovalnih nalog je bilo podano naslednje.

### 3.2.2 Priporočilo

#### 3.2.2.1 Preskušanci

##### 3.2.2.1.1 Geometrija in velikost

Priporočilo navaja:

Prečni prerez preskušanca naj bo kvadraten ali okrogel s karakteristično dimenzijo 100 mm. Višina naj bo dvakratnik karakteristične dimenzije prečnega prereza. Preskušanec naj bo torej prizma z dimenzijami 100 mm x 100 mm x 200 mm ali valj premera 100 mm in višine 200 mm.

Način aplikacije v preiskavi:

Glede na razpoložljivo opremo sem za obliko vzorcev izbral prizmo 100 mm x 100 mm x 200 mm.

#### 3.2.2.1.2 Izdelava preskušancev:

Priporočilo navaja:

Preskušance lahko izdelamo na dva načina, in sicer z žaganjem večjih blokov (bolj zaželeno) ali z vgradnjo v kalupe. V primeru slednje je potrebno uporabiti toge kalupe (če je možno, jeklene), beton pa vgraditi pravokotno na smer obremenjevanja. Tako se zagotovi ravnost in vzporednost naležnih površin preskušanca. Drugače je z obliko valja, kjer moramo preskušanec vgraditi vzporedno s smerjo obremenjevanja. V tem primeru je treba z zaglajevanjem površine zagotoviti potrebno ravnost in vzporednost naležnih površin. Pred preskusom je treba izmeriti vse dimenzije preskušanca. Višina (osna dimenzija) je povprečje meritev na vseh štirih vogalih, obe prečni dimenziji pa povprečje para meritev na zgornji in spodnji strani vsake prečne dimenzije.

Način aplikacije v preiskavi:

Zaradi izvajanja preskusov pri zgodnjih starostih žaganje preskušancev ni bilo izvedljivo. Ob upoštevanju zgoraj navedenega sem se odločil za uporabo dveh kalupov 200 mm x 200 mm x 200 mm, ki sta bila predhodno preverjena in ustrezata zahtevam za kalupe za izdelavo betonskih preskušancev. V vsakega od njiju smo po diagonali vstavili posebej za ta namen izdelan par jeklenih "vložkov" dimenzij 100 mm x 100 mm x 200 mm. V preostalem prostoru to omogoča izdelavo prizem enakih dimenzij in tudi ustrezno natančnost pri glajenju površine. Kalupa sta prikazana na sliki 8. Beton je bil vgrajen vzporedno s smerjo obremenjevanja.

Meritev dimenzij preskušancev nisem opravljal zaradi uporabe preverjenih in seveda ustreznih kalupov ter zelo natančno izdelanih in preverjenih jeklenih vložkov.



Slika 8: Uporabljeni kalupa z "vložki" na stresalni mizici

#### 3.2.2.1.3 Nega preskušancev:

Priporočilo navaja:

Preskušance je treba po 1-2 urah dokončno zagladiti (predno začne cement vezati), nato pa prekriti s PVC folijo ali z moko krpo. Po dveh dneh je treba preskušance razkalupiti in do preskusa hraniti v prostoru z 99 % relativno vlago in temperaturo 20 °C.

Način aplikacije v preiskavi:

Zaradi namena preiskave (zgodnje trdnosti in uporaba pospešila) zgoraj zapisanega priporočila ni bilo mogoče upoštevati. Za izvedbo preskusa po 1 uri sem najprej v največji možni meri pripravil vse potrebno, nato pa pribl. 5 minut pred pričetkom razkalupil vzorec in ga kar se da pazljivo namestil na predvideno mesto. Preskušance sem hranil v prostoru za odležavanje betonskih preskušancev pri temperaturi 20 °C. Tiste, ki so bili stari do vključno 24 ur, na suhem, starejše pa v vodi.

### 3.2.2.2 Merilna oprema:

Priporočilo navaja:

Glede na obliko preskušanca, ki je lahko prizma ali valj, uporabimo štiri oziroma tri induktivne merilce pomikov. Njihovo merilno območje naj obsega vsaj 2 mm. Pritrdimo jih neposredno ob preskušanelec, in to tako, da merijo vzporedno s smerjo obremenjevanja. Pri prizmi jih razvrstimo po enega ob vsako stransko ploskev, pri valju pa tako, da je kot med njimi  $120^\circ$  ( $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ ). Merilce vedno pritrdimo na plošče uporabljene stiskalnice, in ne na preskušanelec, saj lahko pojav razpok v območju izgube nosilnosti betona ogrozi njihovo stabilnost. S tem pa ogrozi tudi potek preskusa, saj je krmiljen preko teh merilcev.

Način aplikacije v preiskavi:

Za preiskave tlačne trdnosti sem imel na voljo računalniško krmiljeno stiskalnico. Ta ima ob batu vgrajen kalibrirani merilec pomikov, preko katerega je krmiljena. Ta merilec je prikazan na sliki 9. Poleg tega merilca sem uporabil še dva kalibrirana induktivna merilca, pritrjena vsak na svoje stojalo z vijakom. Stojalo se na ploščo stiskalnice pritrdi s pomočjo magneta. Postavil sem ju ob dve sosednji stranici. Uporabil sem merilca z merilnim območjem 10 mm, saj so pri zgodnjih starostih pomiki večji. Merilca sta prikazana na slikah 12 in 13.





Slika 9: Bat stiskalnice s kalibriranim merilcem pomikov

### 3.2.2.3 Naprava za preskušanje (stiskalnica)

Priporočilo navaja:

Priporočilo ne podaja posebnih zahtev za stiskalnico, razen računalniškega vodenja preko merilcev pomikov in dovolj velike zmogljivosti. Plošči, med kateri vstavimo preskušanec, morata biti enakih dimenzij kot preskušanec. Pod nobenim pogojem ne smeta biti manjši, lahko pa sta malo večji (do 2 mm na vsaki strani). Pred preskusom moramo zagotoviti, da se lahko ena od teh dveh plošč prosto vrti, medtem ko mora biti druga togo vpeta.

Način aplikacije v preiskavi:

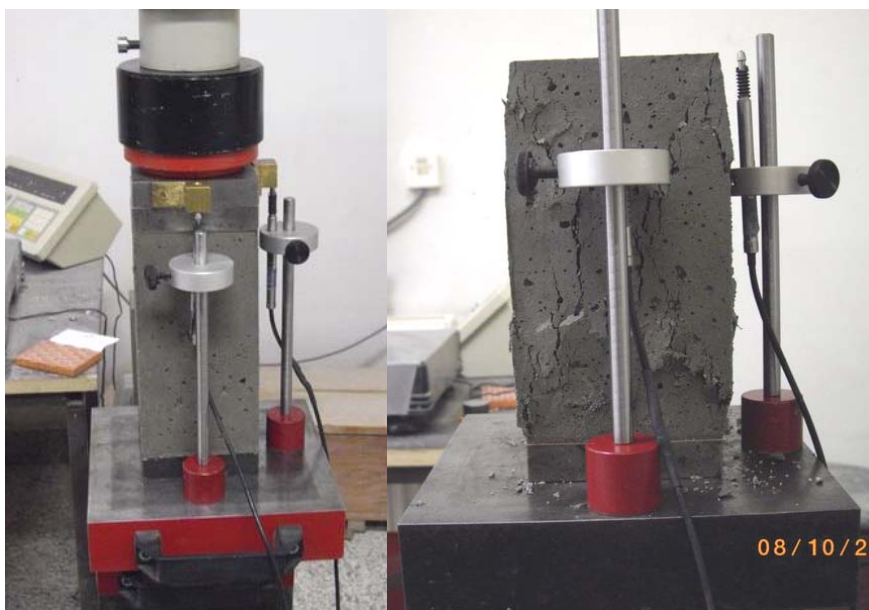
Računalniško krmiljena stiskalnica, ki sem jo imel na voljo, ima zmogljivost obremenjevanja 200 kN. Na sliki 10 je prikazana stiskalnica, na sliki 11 pa njen krmilni del. Na njej sem lahko opravil preskuse do vključno 12 ur starih preskušancev, saj so 24 ur stari preskušanci to mejo že preseгли. Za namen preiskave je to zadostovalo, zgolj informativno pa sem izvajal preiskave betona tudi po starosti 12 ur, in sicer pri 1, 2, 3, 7 ter 28 dneh. Uporabil sem

hidravlično preskusno napravo (stiskalnico) z zmogljivostjo 3000 kN, ki pa je vodena ročno. Hitrost obremenjevanja je bila pribl. 5 kN/s, pomikov pa nisem meril. Tako sem dobil podatke, na osnovi katerih sem izdelal grafikon priraščanja tlačne trdnosti primerjanih betonov do starosti 28 dni.



Sliki 10 in 11: Naprava za preskušanje – stiskalnica in njen krmilni del

Podstavek stiskalnice je bil sestavljen tako, da so bili preprečeni zasuki, nanj pa sem položil jekleno ploščico dimenzij 100 mm x 100 mm x 20 mm. Na bat stiskalnice, ki se nahaja na zgornji strani, je bila vpeta glava s krogelnim zglobom, ki omogoča prosto vrtenje spodaj nameščenih nastavkov v vse smeri. Na to glavo je bila pritrjena druga jeklena ploščica dimenzij 100 mm x 100 mm x 20 mm. Za delovanje obeh induktivnih merilcev je bilo treba na to ploščico togo pritrditi en kovinski čep na vsako stran. Uporabljeni pripomočki so zagotovili preprosto nameščanje preskušanca v stiskalnico z ustrežno natančnostjo.



Sliki 12 in 13: Preskušavec pred preskusom in po preskusu

#### 3.2.2.4 Izvedba preskusa

##### 3.2.2.4.1 Robni pogoji

###### Priporočilo navaja:

Glede na zapisano v uvodu je treba predpisati način, ki bo zagotavljal določeno drsnost na stičnih površinah med preskušancem in preskusno opremo. Predlaga se uporaba vložkov, sestavljenih iz dveh PFTE folij (teflon) enakih dimenzij kot preskušavec, debeline 100  $\mu\text{m}$  in sloja masti med njima. En tak vložek položimo med spodnjo jekleno ploščo in preskušavec, drugega pa med preskušavec in zgornjo jekleno ploščo.

###### Način aplikacije v preiskavi:

Uporabljal sem PFTE folijo enakih dimenzij kot preskušavec in debeline 125  $\mu\text{m}$ .

#### 3.2.2.4.2 Postavitev preskušanca

Priporočilo navaja:

Preskušanec postavimo na spodnjo jekleno ploščo, med njiju pa vstavimo vložek iz para PFTE folij in masti. Drugi vložek postavimo na vrh preskušanca. Nato spustimo na bat stiskalnice pritrjeno zgornjo ploščo do preskušanca tako, da ga predobremenimo s silo 0,5-1,0 kN. Ko opravimo še fine nastavitve preskušanca, namestimo induktivne merilce. Povečamo obtežbo na približno 10 kN in nato prestavimo na samodejno krmiljenje. Obtežba naj se pri tem povečuje tako, da bo hitrost deformiranja znašala 1  $\mu\text{m/s}$  z natančnostjo  $\pm 10\%$ .

Način aplikacije v preiskavi:

Pri izvajanju preiskav sem uporabljal preskusno napravo, ki samodejno zaustavi bat stiskalnice ko ta naleže na preskušanec. Sila upora, pri kateri se je bat zaustavil, je bila zaradi pričakovano nižjih trdnosti nastavljena na 0,2 kN. Po namestitvi induktivnih merilcev in zagonu preiskave se ta izvede samodejno. Zaradi bolj svežih in torej bolj podajnih preskušancev sem hitrost obremenjevanja nastavil tako, da povzroča deformacijo s hitrostjo 50  $\mu\text{m/s}$ .

#### 3.2.2.4.3 Krmiljenje preskusa

Priporočilo navaja:

Preskus mora biti opravljen preko kontrole pomikov. Pri uporabi valja mora biti pomik določen iz povprečja vseh treh uporabljenih merilcev, pri prizmi pa iz povprečja nasprotnih dveh merilcev. Osne deformacije lahko uporabljamo za namene krmiljenja preskusa za betone do trdnosti 60-70 MPa. Za preskušanje betonov višjih trdnosti uporabljamo posebne ukrepe.

Način aplikacije v preiskavi:

V mojem primeru je bil uporabljen merilec, ki je pritrjen na bat stiskalnice ravno za potrebe krmiljenja. Poleg njega sem uporabil še dva induktivna merilca, postavljena ob sosednji stranici. Vsi merilci so bili kalibrirani.

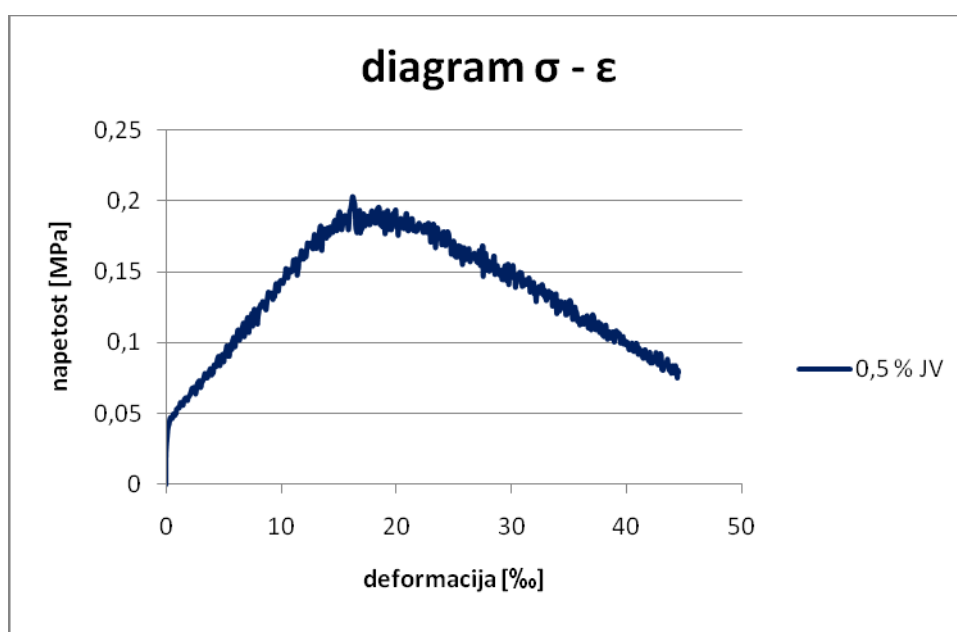
### 3.2.2.5 Rezultati preskusa

Priporočilo navaja:

Preskus se mora izvesti na vsaj treh vzorcih istega betona. Rezultat naj se poda v obliki diagrama napetost – deformacija ( $\sigma - \epsilon$  diagram). Napetost se izračuna iz sile in površine obremenjevanja, ki je bila izmerjena pred preskusom. Osnova deformacija pa se izračuna iz povprečja treh (za valj) oziroma štirih (za prizmo) induktivnih merilcev.

Način aplikacije v preiskavi:

Ker zaradi uporabe preverjenih kalupov dimenzij nisem meril, sem izračune opravil z nazivnimi dimenzijami preskušanca. V nadaljevanju sledi, da je razlika med rezultati večja v primerjavi z napako, storjeno zaradi uporabe nazivnih dimenzij. Deformacije sem določil iz povprečja meritev obeh induktivnih merilcev, postavljenih ob preskušancu. Primer  $\sigma - \epsilon$  krivulje betona, starega 2 uri, je prikazan na sliki 14.



Slika 14: Rezultat preiskave je diagram  $\sigma - \epsilon$

### 3.2.2.6 Poročilo o preskusu

Priporočilo navaja:

Poročilo naj vsebuje osno tlačno trdnost, izračunano kot povprečje treh posamičnih največjih tlačnih trdnosti. Poleg tega naj vsebuje tudi grafikon s prikazanimi posameznimi krivuljami  $\sigma - \varepsilon$ . Napetosti naj bodo izražene v MPa, deformacije pa v mm/mm.

Način aplikacije v preiskavi:

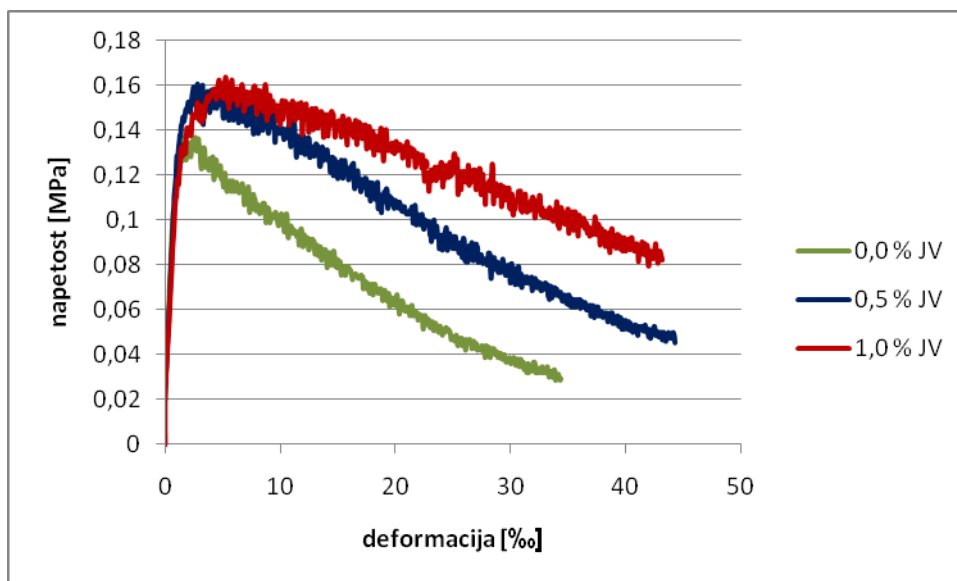
Rezultati preskušanj so prikazani v nadaljevanju. Deformacije na diagramih so izražene v ‰.

### 3.2.2.7 Zaključek

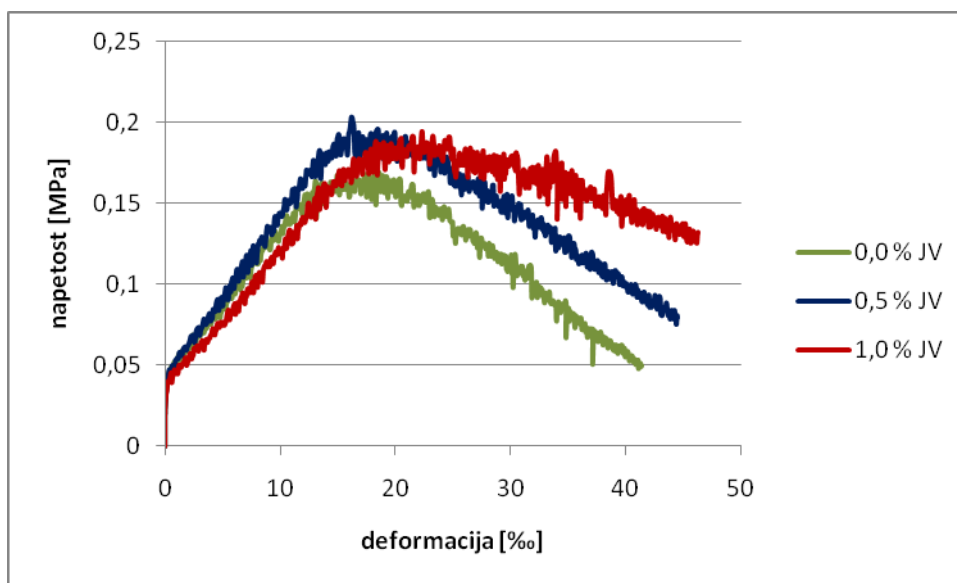
Cilj priporočila je omogočiti ponovljive preiskave enosne tlačne trdnosti s poudarkom na področju po doseženi največji tlačni trdnosti – torej v področju izgube nosilnosti betona. Treba je upoštevati dva ključna parametra, in sicer robne pogoje med preskusom ter vitkost preskušanca. Obstaja več pristopov za uporabo rezultatov pri analizi konstrukcij, kar pa je zunaj obsega tega priporočila.

## 3.3 Rezultati in obdelava

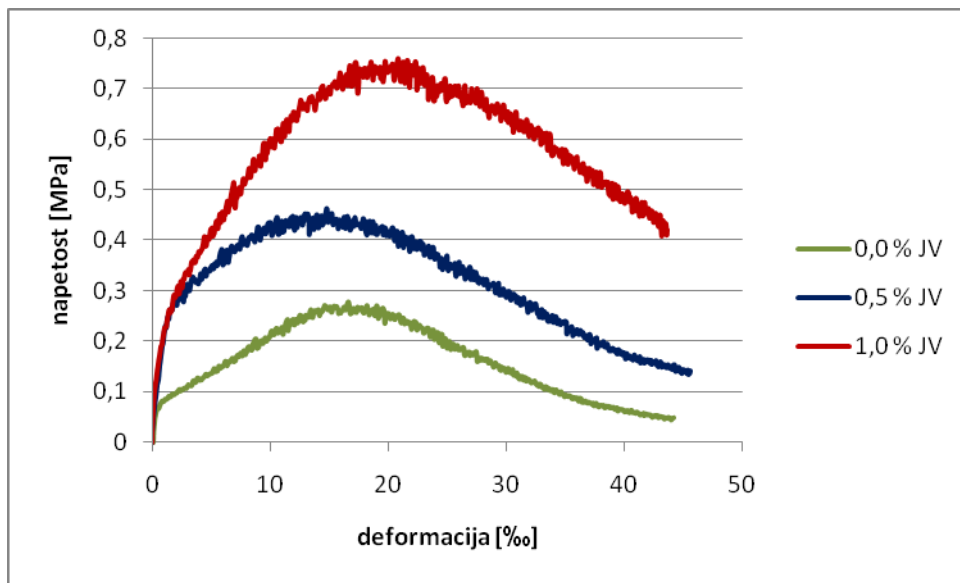
Vsi preskusi vzorcev, starih do vključno 12 ur, so bili opravljeni z računalniško vodeno stiskalnico. Med preskusom se podatki zapisujejo v datoteko, katero je potem mogoče prenesti v program za statistično obdelavo podatkov. Tako sem za vsak preskus dobil diagram sila – pomik (enote kN – mm) oziroma po pretvorbi enot diagram  $\sigma - \varepsilon$  (enote MPa – ‰). V nadaljevanju prikazujem diagrame  $\sigma - \varepsilon$ , na katerih sem zaradi večje preglednosti prikazal rezultate preskusa tistega od treh vzorcev, ki se ni obnašal najbolje oziroma najslabše – torej vmesne vrednosti (slike 15 do 19).



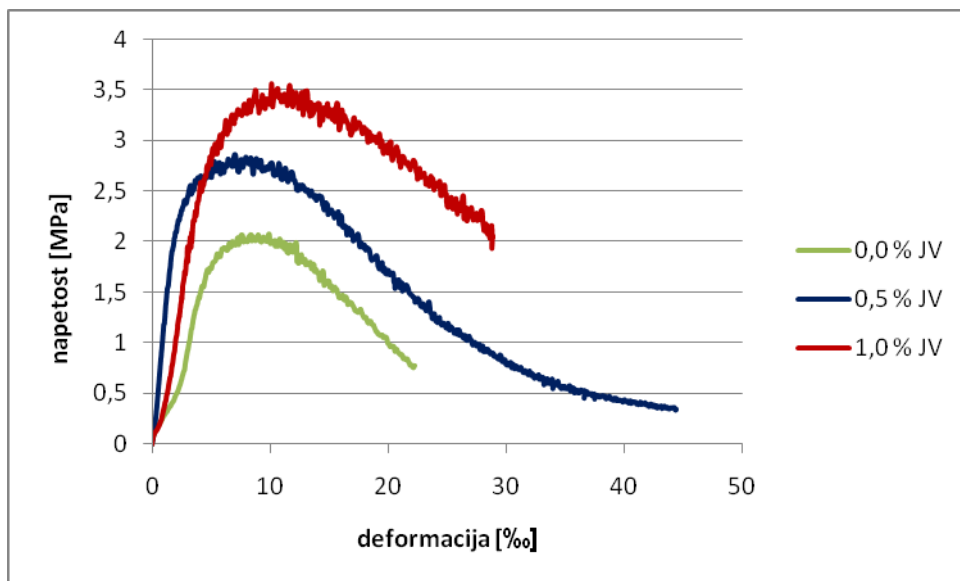
Slika 15: Obnašanje MAB pri starosti 1 ure



Slika 16: Obnašanje MAB pri starosti 2 ur

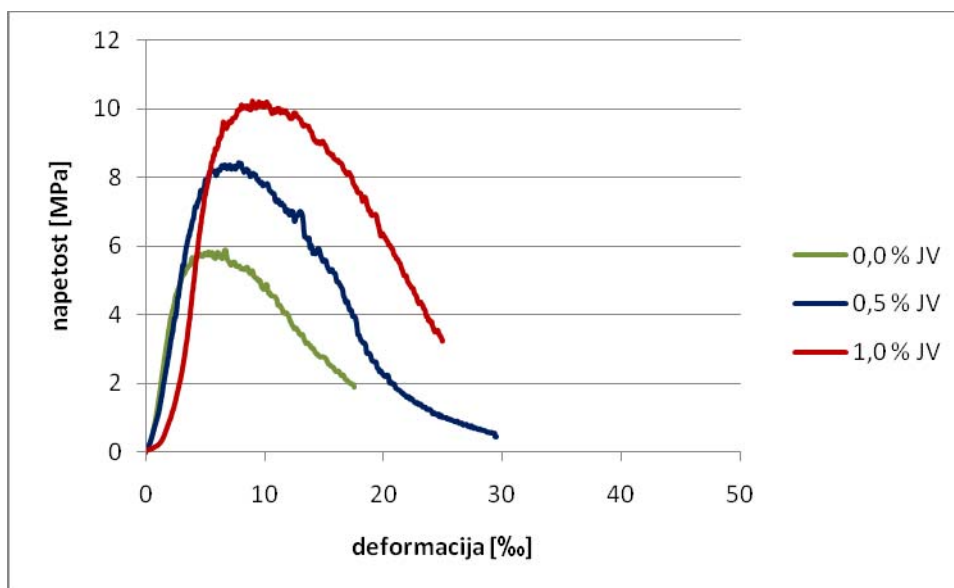


Slika 17: Obnašanje MAB pri starosti 4 ur



Slika 18: Obnašanje MAB pri starosti 8 ur





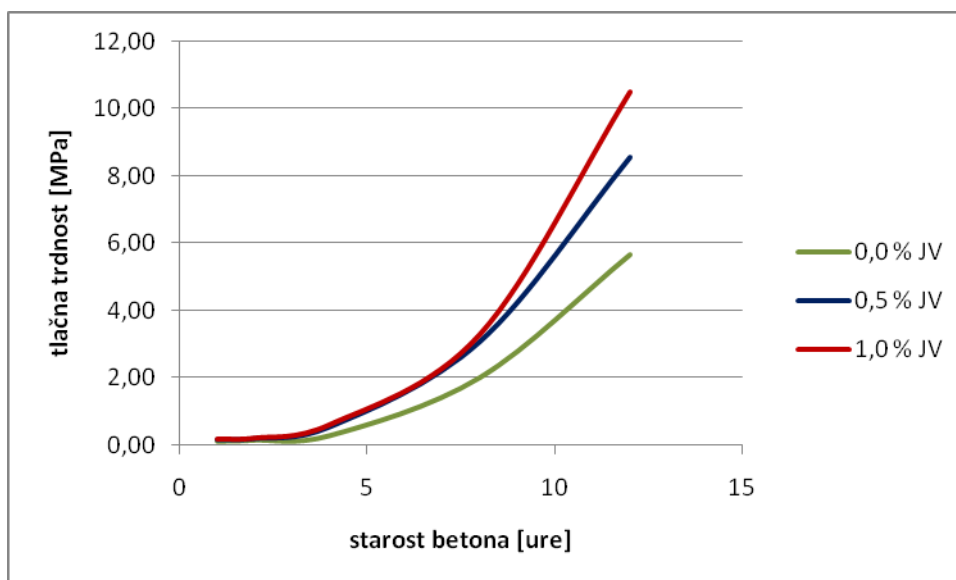
Slika 19: Obnašanje MAB pri starosti 12 ur

Na vseh diagramih je nedvoumno izkazano, kako dodana vlakna vplivajo na obnašanje betona pod enoosno tlačno obtežbo. Do starosti betona 4 ure razlike v tlačni trdnosti niso opazne, pri in po tej starosti pa so razlike vedno večje (do starosti 24 ur). Povprečne vrednosti meritev so zbrane v preglednici 3.

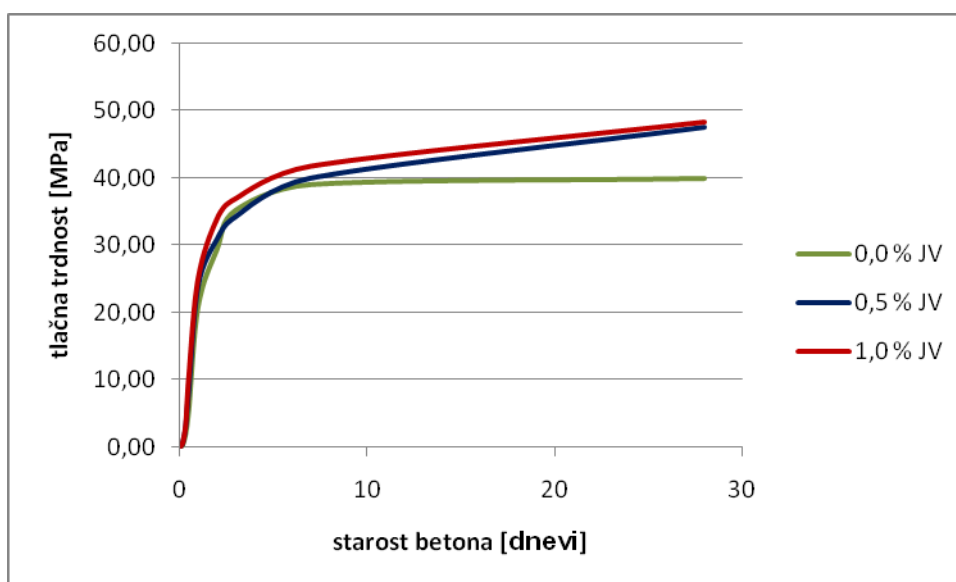
Preglednica 3: Rezultati preskušanj tlačne trdnosti mikroarmiranega betona

Starost v dnevih:	Starost v urah:	Tlačna trdnost v MPa:		
		0,0 %	0,5 %	1,0 %
-	1	0,13	0,16	0,16
-	2	0,16	0,20	0,20
-	4	0,30	0,55	0,60
-	8	2,01	3,08	3,29
-	12	5,65	8,56	10,51
1 dan	24	21,00	24,00	25,03
2 dni	48	29,40	30,90	33,83
3 dni	72	35,30	34,30	36,87
7 dni	168	39,10	40,00	41,67
28 dni	672	40,00	47,60	48,20

Diagram priraščanja tlačne trdnosti s časom zaradi boljše preglednosti predstavljam na dveh slikah. Na sliki 20 je diagram do starosti 12 ur, na sliki 21 pa celotna krivulja do starosti 28 dni.

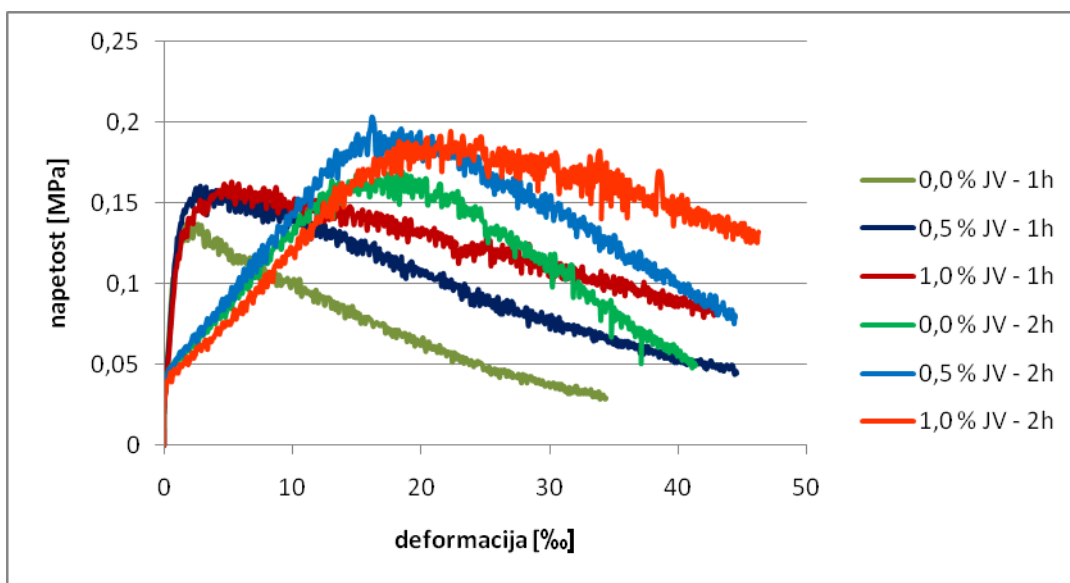


Slika 20: Priraščanje tlačne trdnosti MAB do starosti 12 ur

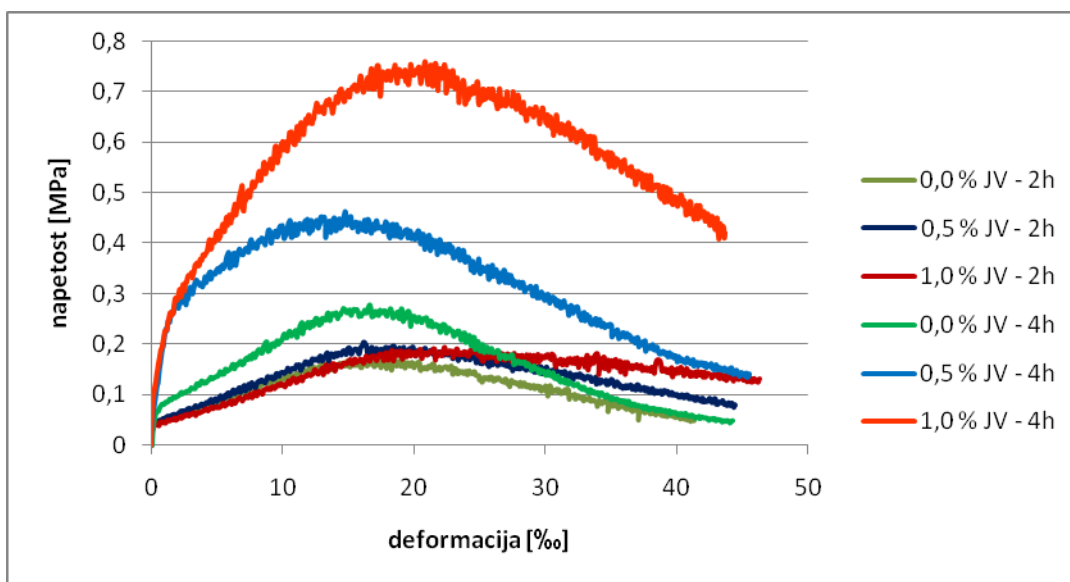


Slika 21: Priraščanje tlačne trdnosti MAB do starosti 28 dni

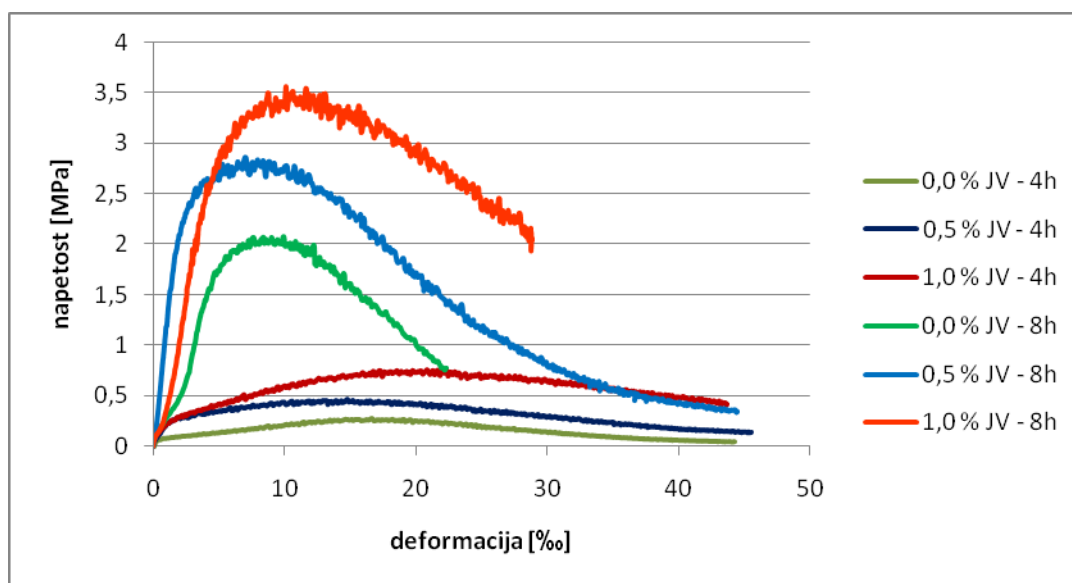
Za boljšo predstavbo o razlikah, ki nastanejo s staranjem betona, v nadaljevanju prikazujem diagrame  $\sigma - \epsilon$ , na katerih so združeni podatki dveh sosednjih starosti (npr. 1 ura in 2 uri, 2 in 4 ure itd.):



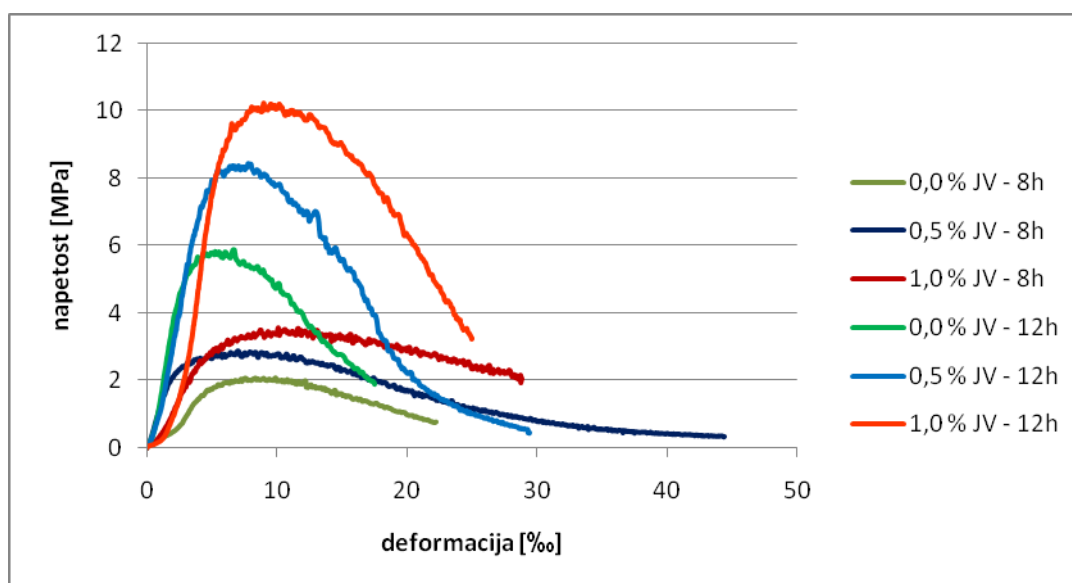
Slika 22: Obnašanje MAB pri starosti 1 ure in 2 ur



Slika 23: Obnašanje MAB pri starosti 2 in 4 ur



Slika 24: Obnašanje MAB pri starosti 4 in 8 ur



Slika 25: Obnašanje MAB pri starosti 8 in 12 ur

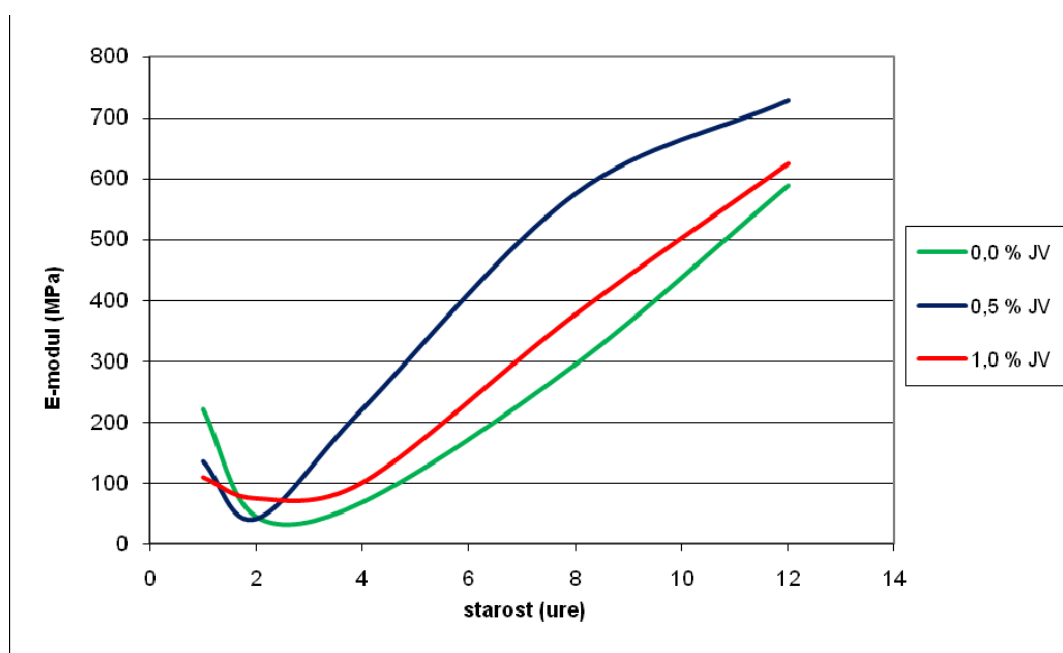
Od prikazanih najbolj izstopajo diagrami na sliki 22: Obnašanje MAB pri starosti 1 ure in 2 ur. V tej fazi strjevanja pride do pojava, katerega vpliv je dobro opazen, če iz prikazanih diagramov ocenimo sekantni modul elastičnosti (E-modul). Ocene so zbrane v preglednici 4, naslednja slika pa prikazuje diagrame priraščanja sekantnega modula elastičnosti s staranjem betona. Sekantni modul elastičnosti sem ocenil kot razmerje tretjine največje izmerjene tlačne trdnosti in pripadajoče deformacije. Na sliki 26 hitro opazimo, da ima 1 uro star beton

bistveno večji modul kot tisti, ki je star 2 uri. Po približno 3 urah preide modul elastičnosti vseh treh vrst betona v monotono rast. Teoretična razlaga pojava presega okvire te diplomske naloge, njegov praktični pomen pa je za večino primerov gradbene prakse zanemarljiv.

Preglednica 4: Ocene sekantnih modulov elastičnosti ( $E_{\text{sek}}$ -modulov)

Starost v urah	$E_{\text{sek}}$ -modul v MPa:		
	0,0 %	0,5 %	1,0%
1	220,6	135,0	109,0
2	43,6	40,6	73,9
4	67,8	221,7	100,7
8	294,5	575,7	377,1
12	588,5	728,7	624,5
24*	1177,0	1457,4	1249,0

\*vrednosti  $E_{\text{sek}}$ -modula pri 24 ur starem betonu so dvakratnik vrednosti  $E_{\text{sek}}$ -modula pri 12 ur starem betonu



Slika 26: Spreminjanje sekantnega modula elastičnosti s starostjo betona

Kot rečeno je razlaga tega pojava zunaj okvira te diplomske naloge. Za namene projektiranja je dovolj, da poznamo čas, od katerega dalje modul elastičnosti monotono narašča. Zato sem v

parametrično analizo vključil rezultate tlačnih trdnosti od starosti vključno 4 ur do vključno 24 ur.

Podrobnejša analiza rezultatov je obdelana v referatu z naslovom “Ocenjevanje duktilnega obnašanja mikroarmiranih brizganih betonov takoj po vgraditvi” (Šušteršič, 2009), ki je bil predstavljen na 9. mednarodnem posvetovanju o gradnji predorov in podzemnih prostorov v Ljubljani.

Rezultati tlačnih trdnosti MABB, vključeni v analizo podpornih ukrepov v poglavju 5, so zbrani v preglednicah 5, 6 in 7. Poleg tlačnih trdnosti so v preglednicah zbrane tudi ocenjene rezidualne ter upogibne natezne trdnosti. Zato najprej podajam matematične izraze, s pomočjo katerih sem iz tlačnih trdnosti ocenil upogibne natezne trdnosti MABB (Šušteršič, 2000):

- srednja osna natezna trdnost:

$$f_{fctm,ax} = 0,3(f_{fck})^{2/3},$$

- karakteristična osna natezna trdnost:

$$f_{fctk,ax} = 0,7 f_{fctm,ax},$$

- razmerje med srednjo osno natezno trdnostjo in srednjo upogibno natezno trdnostjo:

$$f_{fctm,ax} = 0,6 f_{fctm,fl} \quad \rightarrow \quad f_{fctm,fl} = \frac{f_{fctm,ax}}{0,6},$$

- karakteristična upogibna natezna trdnost:

$$f_{fctk,fl} = 0,7 f_{fctm,fl}.$$

Na osnovi zgornjih izrazov lahko ocenimo karakteristično upogibno natezno trdnost:

$$f_{fctm,ax} = 0,3(f_{fck})^{2/3} \quad \rightarrow \quad f_{fctm,fl} = \frac{f_{fctm,ax}}{0,6} \quad \rightarrow \quad f_{fctk,fl} = 0,7 f_{fctm,fl}$$

Preglednica 5: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo betona z 0,0 % JV

t	$f_{fck}$	$f_{fck,res}$	$f_{fctm,ax}$	$f_{fctm,fl}$	$f_{fctk,fl}$	$f_{fctk,fl,res}^*$	$E_{sek-modul}$
[h]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	0,30	0,15	0,13	0,22	0,16	0,00	64,80
8	2,01	1,01	0,48	0,80	0,56	0,00	294,50
12	5,65	2,83	0,95	1,59	1,11	0,00	588,50
24	21,00	10,50	2,28	3,81	2,40	0,00	1177,00

\* vrednosti karakteristične upogibne rezidualne natezne trdnosti so nične zaradi odsotnosti armature

Preglednica 6: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo z 0,5 % JV

t	$f_{fck}$	$f_{fck,res}$	$f_{fctm,ax}$	$f_{fctm,fl}$	$f_{fctk,fl}$	$f_{fctk,fl,res}$	$E_{sek-modul}$
[h]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	0,55	0,28	0,20	0,34	0,23	0,03	221,70
8	3,08	1,54	0,64	1,06	0,74	0,15	575,70
12	8,56	4,28	1,26	2,09	1,46	0,43	728,70
24	24,00	12,00	2,50	4,16	2,40	1,20	1457,40

Preglednica 7: Rezultati preskušanj in iz njih ocenjeni parametri za sestavo z 1,0 % JV

t	$f_{fck}$	$f_{fck,res}$	$f_{fctm,ax}$	$f_{fctm,fl}$	$f_{fctk,fl}$	$f_{fctk,fl,res}$	$E_{sek-modul}$
[h]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
4	0,60	0,30	0,21	0,36	0,25	0,03	100,70
8	3,29	1,65	0,66	1,11	0,77	0,16	377,10
12	10,51	5,26	1,44	2,40	1,68	0,53	624,50
24	25,03	12,52	2,57	4,28	2,40	1,25	1249,00

Pomen parametrov:

$f_{fck}$  ..... najvišja izmerjena tlačna trdnost betona (rezultat preiskave),

$f_{fck,res}$  ..... rezidualna tlačna trdnost betona (ocena – polovica največje izmerjene tlačne trdnosti),

$f_{fctm,ax}$  ..... srednja čista osna natezna trdnost betona,

$f_{fctm,fl}$  ..... karakteristična čista osna natezna trdnost betona,

$f_{fctk,fl}$  ..... karakteristična upogibna natezna trdnost betona,

$f_{fctk,fl,res}$  ..... rezidualna upogibna natezna trdnost betona (ocena 10 %  $f_{ck,res}$ ),

$E_{sek}$ -modul... sekantni modul elastičnosti.



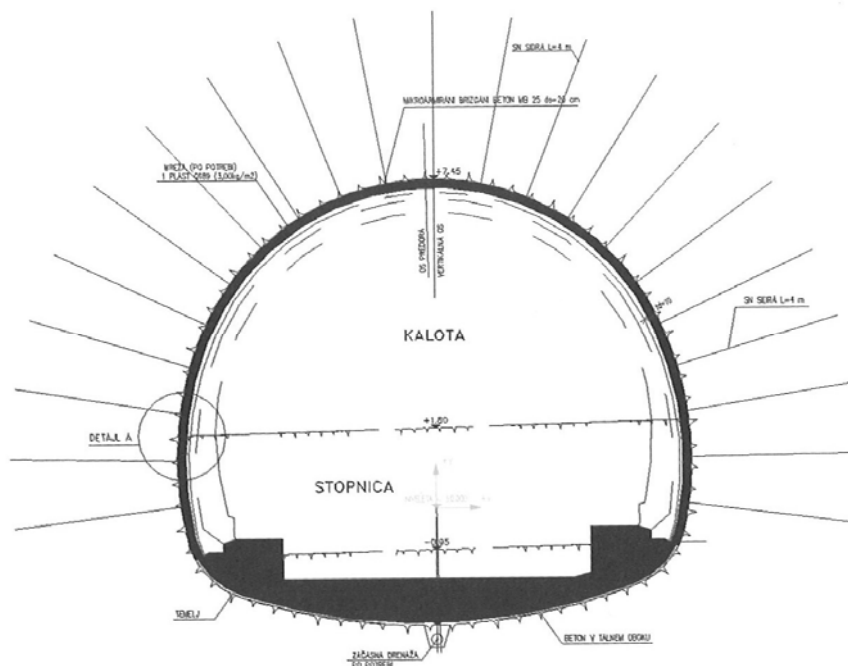
#### **4 UPORABA MIKROARMIRANEGA BRIZGANEGA BETONA PRI GRADNJI PREDOROV Z NAČRTOVANJEM PODPORNIH UKREPOV PO NOVI AVSTRIJSKI PREDORSKI METODI**

Gradnja vsakega predora je nov izziv. Opiranje na izkušnje je v večini primerov omejeno, saj je vsak predor popolnoma unikatno delo. Vedno se zbere edinstvena ekipa sodelavcev, večinoma se uporabljajo najnovejša znanja in materiali in vsak predor je grajen v edinstvenih geomehanskih pogojih. In ravno to zadnje področje je povezano z največjimi tveganji, saj poteka gradnja v materialu, ki ga nikoli ne poznamo popolnoma. Zato je treba pred gradnjo posvetiti posebno pozornost geomehanskim raziskavam in na osnovi njihovih izsledkov določiti metodo gradnje. Predorski stroji (tunnel boring machines oz. TBM) se uporabljajo pri daljših predorih, teh pa pri nas ni prav veliko. V Sloveniji se je tako glede na značilnosti terena za gradnjo predorov najbolj uveljavila »nova avstrijska predorska metoda« oziroma NATM.

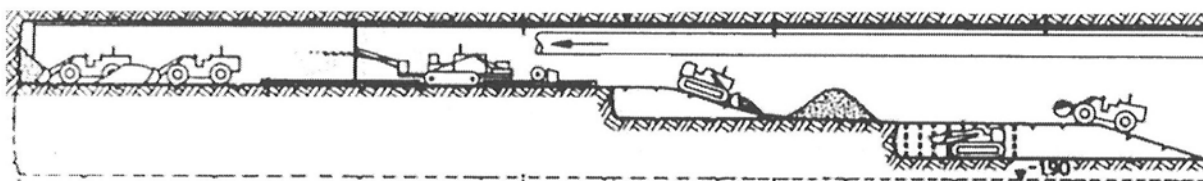
##### **4.1 Nova avstrijska predorska metoda (NATM)**

Ta način gradnje predorov so med leti 1957 in 1965 razvili v Avstriji Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Muller in Franz Pacher. Cilj je doseči tehnično učinkovito, varno in ekonomično načrtovanje in izgradnjo. Pri tej metodi se obravnava hribina okrog območja izkopa kot breme in kot nosilni obroč, ki to breme tudi nosi. To velja za hribine, ki lahko prenesejo dodatne obremenitve. V nizkonosilnih (visko-plastičnih) hribinah je nosilnejši obroč možno doseči z uporabo sodobnih tehnoloških postopkov, ki povečajo togost in trdnost hribine. Če se obroč okrog podzemnega prostora dodatno ojača, se samonosilnost obloge poveča, kar vpliva na intenzivnost primarne in sekundarne obloge. Tak pristop, pri katerem se obravnava hribina kot breme in hkrati kot nosilni obroč, ki breme nosi, do neke mere loči NATM od drugih načinov načrtovanja, ki obravnavajo hribino okrog podzemnega prostora le kot breme, ki naj bi ga nosila izključno obloga v predoru. Za učinkovitost te metode je treba upoštevati naslednje dejavnike:

- pri izbiri profila oziroma oblike prostora morajo biti upoštevani primarno napetostno stanje in samonosilnost hribine ter okoliščine, ki vplivajo na zmanjšanje nosilnosti. Z obliko podzemnega prostora lahko zagotovimo, da ne pride do koncentracij napetosti.
- Izkop profila se izvaja postopoma (kalota, stopnica in po potrebi talni obok) z namenom čim manjšega deformiranja hribine in posledično ohranjanja njene trdnosti.



Razdelitev prečnega profila predora na kaloto in stopnico ter podporni ukrepi (Hann in Likar, 2002)



Izkopu kalote sledi izkop stopnice (včasih skupaj s talnim obokom) na primerni razdalji (Hann in Likar, 2002)

- Podporni ukrepi se določijo na podlagi predhodnih raziskav in kategorizacije hribine v ustrezne razrede vzdolž trase podzemnega objekta.

- Vgrajevanje podpornih elementov mora biti časovno optimalno in postopno, da ne pride do večjih deformacij hribine. Podporni elementi so predvsem jekleni loki, armaturne mreže, brizgani beton in hribinska sidra. Vsi naštetih podporni elementi se lahko prilagajajo med samo gradnjo v spremenljivih geotehničnih razmerah vzdolž objekta. S tem se je možno v največji možni meri prilagoditi potrebnim spremembam v načinu podpiranja med gradnjo predora.
- Zahteva se, da zagotavlja primarna obloga trajno stabilnost sistema hribina – podporni sistem, medtem ko notranja obloga, ki še dodatno poveča stabilnost podzemnega prostora, daje objektu izgled, omogoča namestitvev različnih vodov, izboljša vodoneprepustnost, omogoča boljši pretok zraka in lažje vzdrževanje.
- V primeru večjih deformacij pri izkopu je treba izvesti dodatne podporne ukrepe. Deformacije primarne obloge so ugotovljive na osnovi sprotih meritev, ki dejansko določajo intenzivnost podpiranja in način izkopa. Statični izračuni so izvedeni v fazi načrtovanja, lahko pa tudi med gradnjo, če se geotehnični pogoji bistveno spremenijo.
- Hidrogeološki pogoji morajo biti analizirani posebej, ker lahko visoki tlaki hribinske vode bistveno spremenijo potek gradnje predora in vplivajo na samonosilnost hribine. Če nastopa hribinska voda pod visokimi pritiski, jo je treba ustrezno drenirati, da se zmanjšajo pritiski in negativen vpliv na lastnosti hribine.

Pri uporabi principov NATM sta predvidena aktiven projektantski pristop ter tesno sodelovanje med projektanti in izvajalci del, saj se projektiranje ne zaključuje z izdelavo projekta za razpis, ampak je treba projekt ažurirati skladno z napredovanjem izkopa.

Zaradi dobre prilagodljivosti različnim geotehničnim razmeram so se principi NATM v preteklih desetletjih pri nas uspešno uveljavili. Široka možnost uporabe se je odražala pri gradnji različnih podzemnih objektov za potrebe cestne in železniške infrastrukture ter drugih podzemnih objektov v rudnikih.

Podatki v točki 4.1 so povzeti po internetni strani Wikipedija (New Austrian Tunnelling method, 15. 11. 2009) in referatu »Primerjava dveh metod gradnje predorov v zahtevnih geotehničnih pogojih« (Hann in Likar, 2002).

#### **4.2 Uporaba tehnologije primarnega podpiranja z mikroarmiranim brizganim betonom v predoru Dekani**

Na odseku Klanec – Strmin, na primorski avtocesti, je zgrajen dvocevni dvopasovni predor Dekani dolžine 2190 m in 2175 m. Predor poteka v flišnih kamninah, za katere je značilna plastovita struktura s sloji laporja in peščenjaka različnih debelin (od nekaj cm do več kot enega metra debeline) in leg v prostoru. Predor je bil v splošnem zgrajen z uporabo klasične metode gradnje z vrtanjem in razstreljevanjem ter vgrajevanjem standardnih podpornih elementov, kot so jekleni loki, armaturne mreže, brizgani beton in hribinska sidra. Sprotna geološko-geotehnična spremljava, primerjana s prognozirano hribinsko klasifikacijo območja, je omogočala prilagajanje gradnje dejanskim hribinskim razmeram in na ta način zagotavljala smotrno in strokovno utemeljeno napredovanje izkopa skupaj z vgradnjo podpornih sistemov. Posebej uspešno je bila uporabljena tehnologija gradnje z uporabo mikroarmiranega brizganega betona, kar je omogočilo hitrejše napredovanje izkopa in obenem podpiranja. Tehnično dobro usposobljen izvajalec z izkušeno delovno ekipo je dosegel skrajšanje predvidenega roka dokončanja del za štiri mesece, kar je bil vsekakor lep uspeh, ki je zvišal zadovoljstvo vseh partnerjev, sodelujočih na zahtevnem projektu.

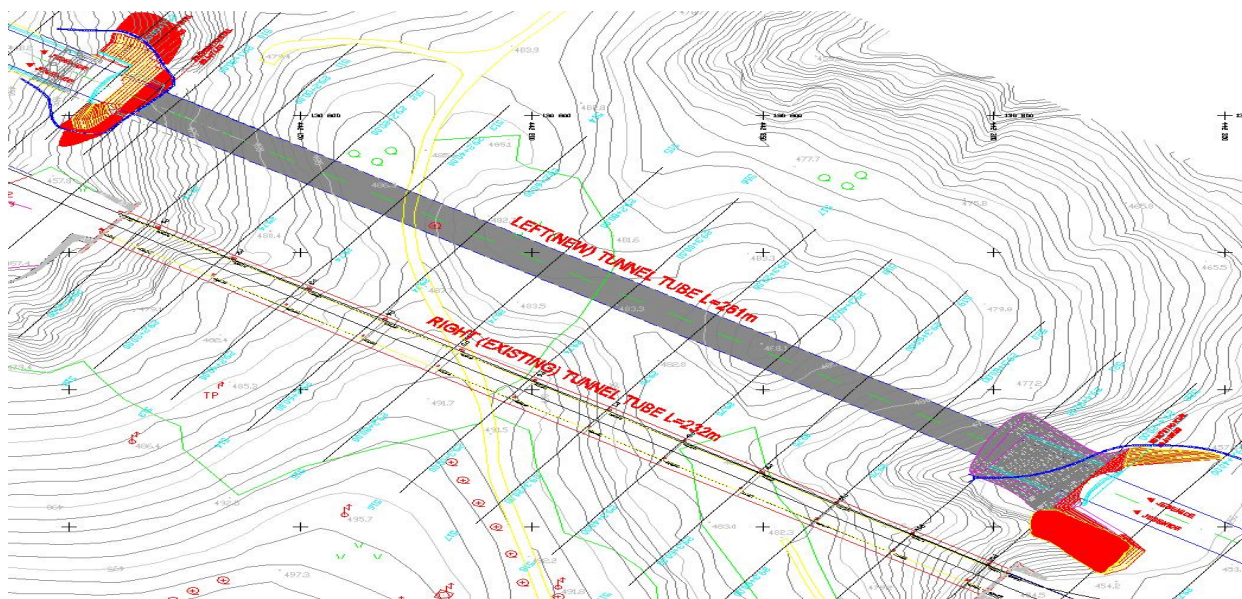
Podatki v točki 4.2 so povzeti po referatu »Nekatere posebnosti gradnje novih cestnih predorov v Republiki Sloveniji« (Likar in sod., 2006).

Za primer možne izvedbe primarne podgradnje z MABB je bila izbrana že izvedena leva cev predora Ljubno. Izdelana je bila parametrična študija časov in dolžin izkopnih korakov v odvisnosti od prirastka trdnostnih parametrov MABB, povzetih iz poglavja 3.

## 5 PREDOR LJUBNO IN PARAMETRIČNA ANALIZA IZVEDBE PRIMARNEGA PODPIRANJA

### 5.1 Pregled zgodovine izvedbe leve cevi predora Ljubno

Obstoječi predor Ljubno je bil zgrajen pred približno štiridesetimi leti in obratuje še danes, brez izvršenih večjih sanacij, kljub temu da je okoliška hribina v pretežni meri sivica, ki predstavlja dokaj zahteven material za gradnjo. Sivica ima namreč specifične lastnosti, ki posredno narekujejo prilagojeno tehnologijo gradnje s sprotno zaščito izkopnih površin, saj je izredno občutljiva na vodo in zračno vlago, v stiku s katerima zelo hitro razpade in s tem izgublja naravne trdnostne lastnosti.



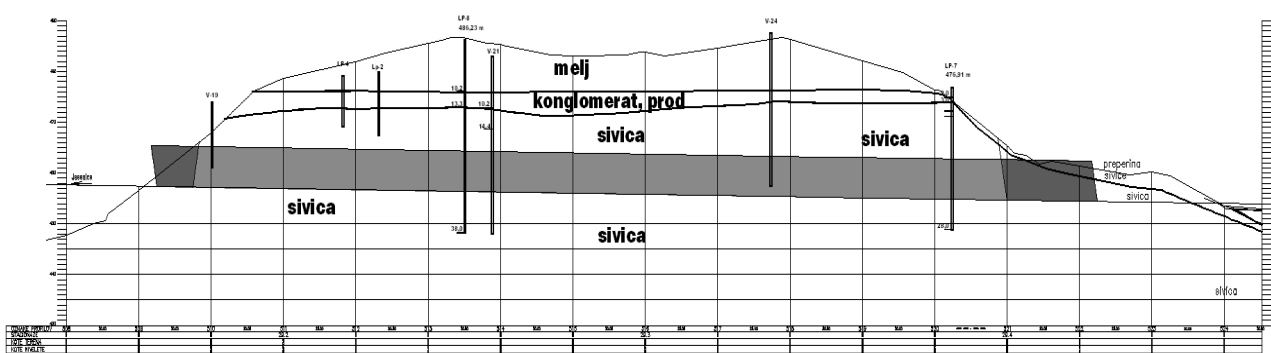
Slika 27: Situacijski prikaz poteka leve cevi predora Ljubno

Nova cev predora Ljubno je del avtocestne povezave Ljubljana – Jesenice, ki teče vzporedno ob nekdanji regionalni cesti. V fazi načrtovanja ceste je bilo na tem odseku preverjenih več možnosti, in sicer gradnja pokritega vkopa oziroma odprtega vkopa preko hriba, gradnja nove predorske cevi tik ob obstoječi predorski cevi oziroma gradnja samostojne predorske cevi na takšni razdalji, da ne bo vpliva na obstoječo predorsko cev. Kot optimalna se je izkazala

zadnja rešitev, predvsem zato, ker je zagotavljala varnost prometa skozi obstoječi predor, ki je bil del glavne prometne žile med Gorenjsko in osrednjo Slovenijo. Nova predorska cev je bila tako predvidena kot predor z dvema voznima pasovoma širine 3,75 m in z odstavnim pasom širine 3,20 m. Teoretični izkopni profil predora znaša približno 141 m<sup>2</sup>.

### 5.1.1 Povzetek predhodnih raziskav

Izvedene so bile obsežne terenske in laboratorijske raziskave sivice in v manjši meri konglomeratne plasti, ki se prav tako nahaja na tem območju. Na sliki 28 je podan vzdolžni geološko-geotehnični profil predora Ljubno, iz katerega je razvidno, da se nova cev predora nahaja izključno v sivici. Ker je nad predorom plast konglomerata s hribinsko vodo, ki bi lahko vplivala na stabilnost izkopa predora, so bila sidra načrtovana tako, da ne bi prišlo do poslabšanja trdnostnih lastnosti hribine kot posledice učinkovanja te vode.



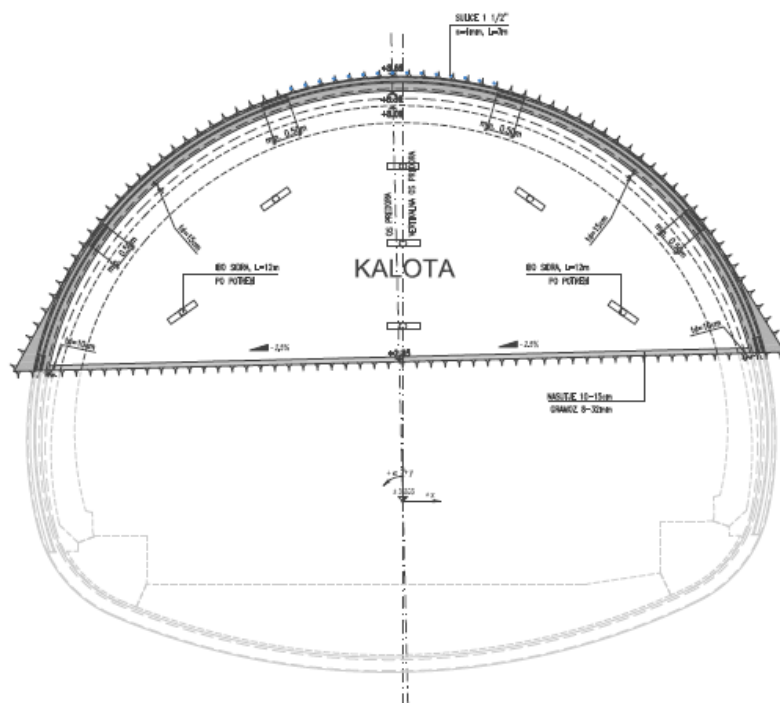
Slika 28: Vzdolžni geološko-geotehnični profil predora Ljubno

Geološko-geotehnične terenske raziskave so obsegale geološko kartiranje, vrtanje sondažnih vrtin, SPT ter presiometriške raziskave. Laboratorijske preiskave so obsegale med drugim raziskave vlage, enosne tlačne trdnosti, triosne strižne trdnosti ter pritiskov nabrekanja. Pokazale so, da ima sivica solidne trdnostne lastnosti, dokler ne pride v stik z vodo in/ali zračno vlago. Nekatere raziskave nabrekljivosti so podale tlake nabrekanja velikosti  $p_{nab} = 200 - 350$  kPa in nabrekalne deformacije do 10 %, nekatere druge pa tudi  $p_{nab} = 1200$  kPa. Nadalje je bilo ugotovljeno, da bi bile lahko deformacije bolj posledica relaksacije in/ali sukcije kot pa spremembe volumna hribine z nabrekljivimi materiali.

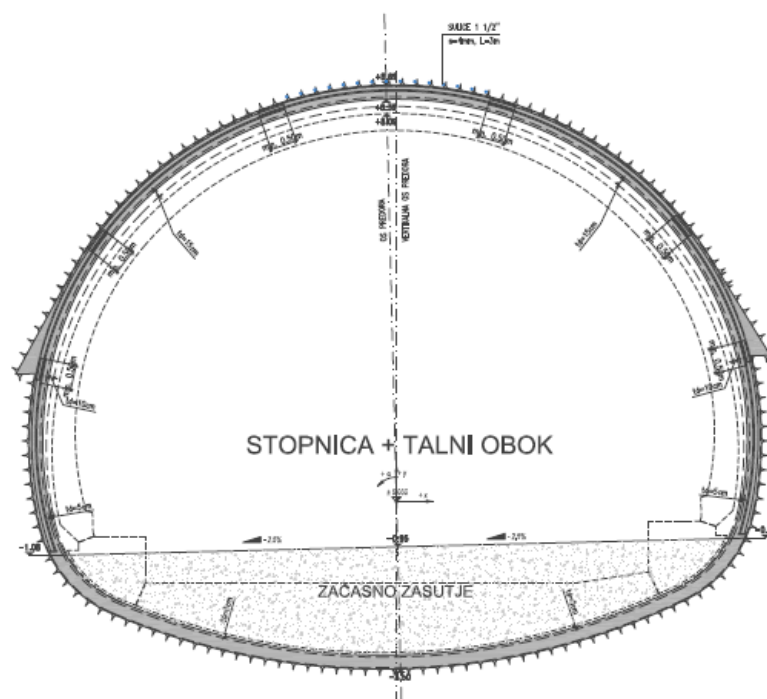
### 5.1.2 Tehnična rešitev gradnje in statična analiza načrtovanega podpornega sistema

Zaradi pričakovanega obnašanja sivice, pri kateri obstaja nevarnost vpliva vode in zračne vlage na trdnost intaktnega materiala, so bili pri načrtovanju predvideni takšni tehnološki ukrepi, da se je v najkrajšem možnem času po izkopu zaščitila vsaka prosta površina z brizganim betonom. V projektu je bilo načrtovano vrtanje in sidranje samo po potrebi, brez uporabe vode. Namen teh ukrepov je bil preprečiti stik vode s hribino in s tem obdržati sivico v naravnem stanju.

Glavna podporna elementa, jekleni loki in brizgani beton debeline 30-35 cm, sta se izkazala ustrezna za dejanske geotehnične razmere. V celotni dolžini predora je bil predviden talni obok, po potrebi pa tudi brizgani beton v talnem oboku in začasem talnem oboku. Hribinska klasifikacija je bila narejena po avstrijskih standardih ONORM B 2203. Na sliki 29 so prikazani podporni ukrepi za hribinsko kategorijo C2 v kaloti, na sliki 30 pa v stopnici in talnem oboku. Ti podporni ukrepi so bili uporabljeni pri izkopu največjega dela predora.



Slika 29: Primarno podpiranje v kaloti – hribinska kategorija C2



Slika 30: Primarno podpiranje v stopnici in talnem oboku – hribinska kategorija C2

Podporni ukrepi so bili verificirani tako, da sta bili s programom FLAC3D izvedeni dve 3D numerični analizi za oba mejna primera, in sicer za primer upoštevanja dodatnih pritiskov zaradi nabrekanja (1200 kPa) in za primer, ko nabrekanja ni. V preglednici 8 so podani vhodni podatki za numerični analizi. Izkop predora je bil deljen na kaloto, stopnico in talni obok, medtem ko je bil v vzdolžni smeri izkop simuliran v korakih dolžine 10 m. Podporni elementi so bili v izračunu upoštevani kot obloga iz brizganega betona. Uporabljeni so bili »shell« elementi, ki so bili upoštevani kot nosilni elementi tako, da so bili »vgrajeni« en korak za izkopom v kaloti.



Preglednica 8: Vhodni podatki za numerično analizo – geomehanske karakteristike nastopajočih hribinskih materialov

Material	Specifična teža $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Elastični modul E (MPa)	Kohezija $c_k$ (kPa)	Kot notranjega trenja $\varphi_k$ (°)
Glinasti melj	17	5	5	17
Konglomerat	24	4000	500	40
Sivica	23	150	140	33,5
Preperina sivica	19	20	0	23

### 5.1.3 Nekatere posebnosti gradnje

Zaradi kratke dolžine predora ni bilo smiselno izvajati izkopa v več fazah hkrati, zato je bil najprej predviden in izveden izkop kalote, nato pa stopnice in talnega oboka skupaj. Ker severni portal ni bil dostopen, se je celoten izkop izvajal z južnega portala proti severnemu, kjer je bil izveden tudi neposredni preboj na površino brez uporabe kakršnih koli predhodnih zaščitnih ukrepov na območju severnega portala. Zadnjih nekaj metrov kalote je bilo izvedenih v stranski galeriji, katere prečni profil je znašal približno tretjino prečnega profila kalote. S tem načinom izkopa je bila zmanjšana nevarnost nastanka večjih zruškov pri preboju. Tako preboj, kot tudi izkop severnega portala ter izkop preostanka kalote predora pa so bili izvedeni sukcesivno.

Izmerjene deformacije pri izkopu kalote predora so bile manjše od pričakovanih in so znašale manj kot 3cm, kar je delno posledica ugodnih geološko-geomehanskih razmer in spoštovanja tehnološke discipline s strani izvajalca del. Časovni razvoji pomikov, izmerjeni v merskih profilih, so se praktično brez večjih odstopanj umirili v enem tednu po izkopu. Izkopu stopnice je sledil izkop talnega oboka ter vgradnja temeljev in talnega oboka iz betona na primerni razdalji, določeni na osnovi tehnologije, ki jo ima izvajalec del.

V času izkopa nove predorske cevi so se tudi v obstoječi predorski cevi izvajale meritve pomikov obloge. Ugotovljene so bile minimalne deformacije, ki pa so bile posledica vibracij

in nenatančnosti meritev zaradi nedostopnosti merskih točk. Rezultati meritev so pokazali, da gradnja nove predorske cevi ne vpliva na obstoječo oziroma vplivi ob pogostih vizualnih pregledih obstoječe predorske cevi niso bili ugotovljeni. Raziskave sivice so tudi pokazale možnost, da bi vsebnost pirita lahko povzročala sulfatno korozijo, kar negativno vpliva na trajnost betona.

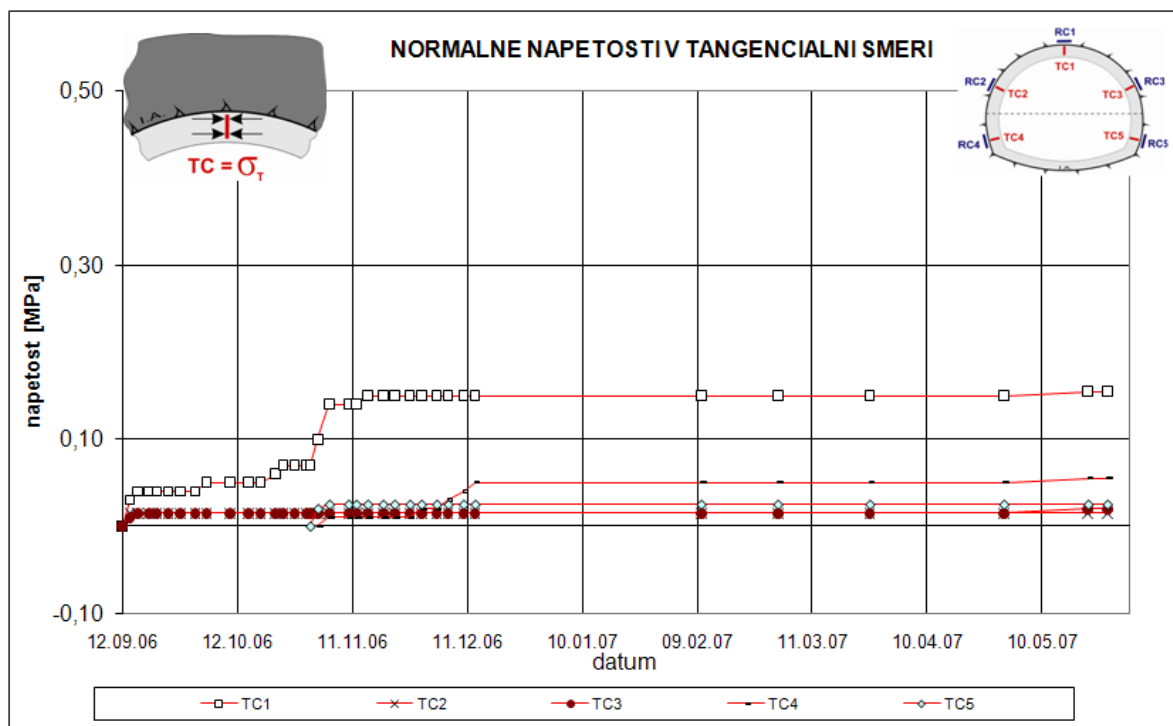
#### **5.1.4 Rezultati geološko-geotehnične spremljave gradnje**

Spremljava gradnje je potekala redno in pridobivanje podatkov je koristilo tudi za potrebe načrtovanja sanacije obstoječe predorske cevi. Izvajale so se naslednje geološko-geotehnične raziskave:

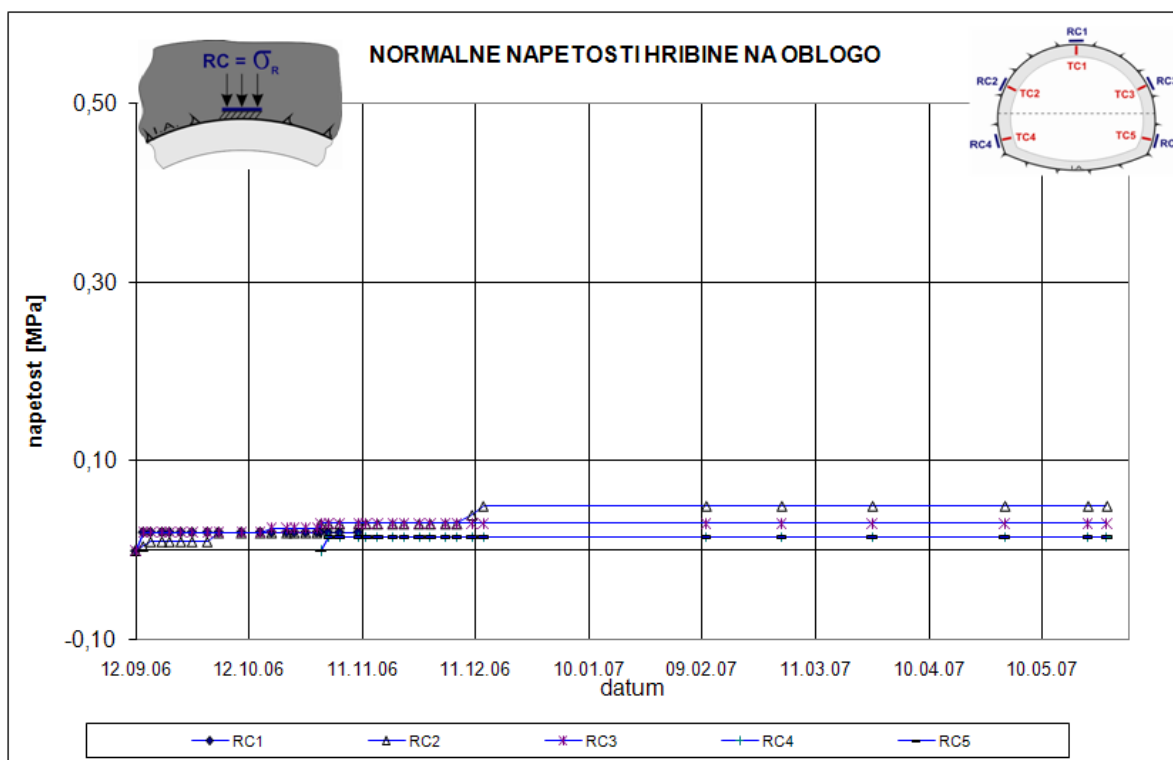
- redna geološka opazovanja čela izkopa,
- pregledi obstoječe predorske cevi,
- 3D meritve pomikov točk,
- meritve z več točkovnimi ekstenzometri,
- meritve tlačnih napetosti z Gloetzlovimi merskimi celicami v radialni in cirkularni smeri.

V novo predorsko cev predora Ljubno so vgradili 22 merskih profilov z merskimi točkami ter dva merska profila na portalih, tri merske profile z ekstenzometri ter dva merska profila z merskimi celicami. V obstoječi predorski cevi je bilo vgrajenih 15 merskih točk, in sicer v levem boku predora, gledano v smeri naraščanja stacionaže. Hribina je bila skozi celoten predor kompaktna in suha, izkop pa je bilo mogoče izvajati brez večjih težav.

Ocenjeno je bilo, da bodo morebitni negativni vplivi nabrekanja sivice opazni v daljšem časovnem obdobju, zato bodo meritve tlakov v oblogi in na stiku s hribino omogočene tudi v času, ko bo nova predorska cev v fazi obratovanja. Dosedanje meritve v predoru še niso potrdile, ali je nabrekanje prisotno. Na sliki 31 in sliki 32 so podane meritve tlačnih celic v profilu na km 29+230. Začetno povečanje napetosti je posledica deformacij v bližini izkopa, dodatno povečanje pa posledica izkopa stopnice.



Slika 31: Prirastki izmerjenih normalnih napetosti v tangencialni smeri v primarni oblogi v odvisnosti od časa



Slika 32: Prirastki izmerjenih normalnih napetosti med hribino in primarno oblogo v odvisnosti od časa

Podatki v točki 4.3 so pridobljeni iz referata »Gradnja novega cestnega predora Ljubno« (Likar in sod., 2006).

Iz pregleda zgodovine izvedbe leve predorske cevi predora Ljubno je razvidno, da je povprečni napredek izkopa kalote dosegel 3m/dan, kar je bilo več od pričakovanega. To dejstvo predstavlja osnovo za naslednje poglavje, v katerem podajam rezultate parametrične študije dolžine izkopnega koraka ob uporabi MABB za izvedbo primarnega podpiranja predora.

## **5.2 Parametrična študija izvedbe primarnega podpiranja z MABB pri izkopu leve cevi predora Ljubno**

### **5.2.1 Splošno**

Pričujoči razdelek vsebuje povzete rezultate parametrične geostatične analize izkopa in primarne podgradnje leve cevi predora Ljubno z izvedbo primarne obloge iz MABB. V ta namen so bile izdelane 2D numerične analize predora za primer maksimalnega nadkritja v hribinski kategoriji C2.

Izračuni so bili opravljeni s programom PHASE2, ki temelji na metodi končnih elementov. V programu PHASE2 je bil za hribinske materiale, obstoječo debelostensko notranjo oblogo in cestno telo privzet Mohr-Coulomb-ov konstitutivni materialni model.

Cilj parametrične analize je bila določitev ustrezne dolžine izkopnih korakov v odvisnosti od starosti vgrajenega MABB. Privzeta je bila konstantna debelina MABB primarne obloge  $d = 20$  cm.

## 5.2.2 Vhodni podatki

### 5.2.2.1 Geomehanski parametri nastopajočih hribinskih materialov

V numeričnih izračunih so bili upoštevani hribinski materiali, ki so skupaj s svojimi geomehanskimi parametri prikazani v preglednici 8. Ti podatki izvirajo iz preiskav, ki so bile opravljene za potrebe gradnje leve cevi predora Ljubno.

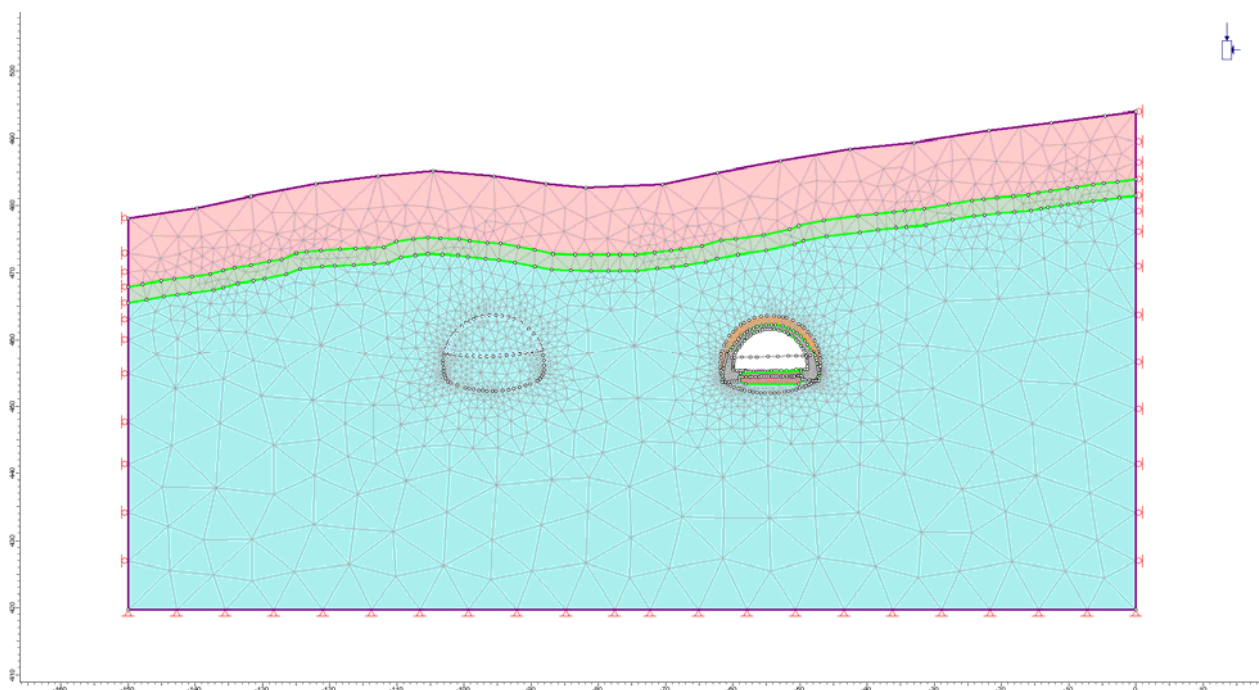
### 5.2.2.2 Materialni parametri MABB

V izračunih so bili upoštevani materialni parametri MABB, ki izhajajo iz preiskav, predstavljenih v poglavju 3, in so zbrani v preglednicah 5 in 7.

V analizi so bili uporabljeni jekleni podporni lokovi K24 na razdalji  $e = 4$  m.

K24:  $f_{yk} = 400$  MPa

## 5.2.3 Numerični model in predpostavke



Slika 33: 2D numerični računski model

Princip izdelave parametrične analize temelji na evalvaciji dolžine izkopnega koraka pri določeni starosti MABB. Materialni parametri MABB so bili vzeti iz rezultatov preiskave na vzorcih. Zaradi obsežnosti sta bila v parametrični analizi primerjana le običajen brizgani beton in MABB z 1 % vlaken. V analizi so bile upoštevane karakteristične vrednosti materialnih parametrov za brizgani beton in MABB. Strižni parametri hribinskih plasti so bili skladno s SIST EN 1997-1 reducirani z varnostnim faktorjem 1,25.

Dolžina izkopnega koraka se pri 2D numerični analizi problemov običajno določi z redukcijo modula elastičnosti, pri čemer je velikost modula elastičnosti v izkopnem profilu odvisna od dolžine izkopnega koraka. Manjši kot je modul elastičnosti medija znotraj izkopnega profila, večji je izkopni korak oziroma večja je oddaljenost izkopnega čela od mesta, kjer opazujemo vgrajeno primarno oblogo. Na ta način je v 2D analizo posredno vključen tudi 3D učinek varovanja izkopnega profila z izkopnim čelom.

Analiza je bila prilagojena potrebam po pridobitvi ustreznih povratnih informacij, ki zadevajo možnosti aplikacije mikroarmiranega brizganega betona pri gradnji predorov v ustreznih hribinskih kategorijah.

Preglednica 9: Redukcija modula elastičnosti sivice v odvisnosti od dolžine izkopnega koraka

Dolžina izkopnega koraka $L_{ik}$ (m)	$E_{red}$ (MPa)
0,00	150,00
2,00	113,00
4,00	75,00
6,00	40,00
8,00	10,00

Profil leve predorske cevi se v celoti nahaja v sivici, zato je bilo treba ustrezno reducirati le omenjeno hribinsko plast.

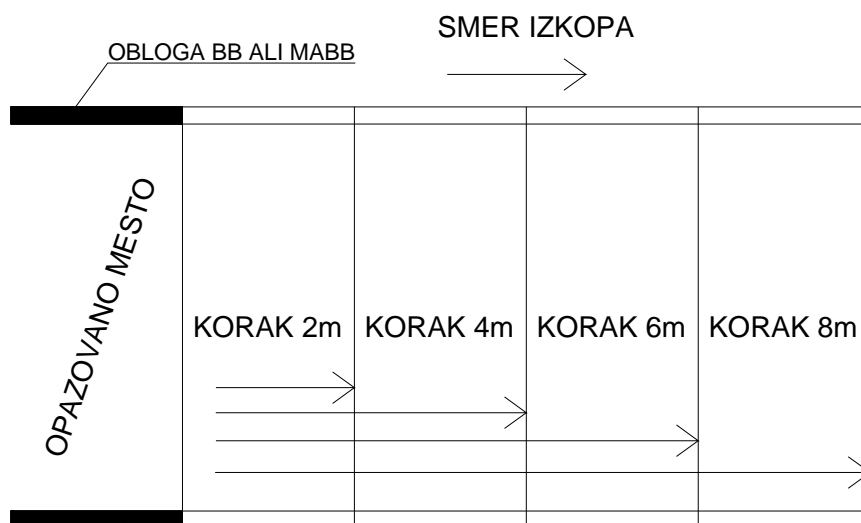
Analiza izkopnih korakov v stopnici in talnem oboku je bila izvedena ob predpostavki, da je bila v oblogi iz BB oziroma MABB že dosežena učinkovita tlačna trdnost in posledično dosežen končni modul elastičnosti.

#### **5.2.4 Postopek parametrične analize**

Kot mejna vrednost dovoljenega pomika zaradi izkopa predorskega profila znaša deformacijska toleranca  $\delta = 2 \text{ cm}$  z upoštevanjem zavarovanja z izkopnim čelom. Končna deformacijska toleranca brez upoštevanja varovanja z izkopnim čelom znaša  $\delta = 5 \text{ cm}$ . Tako določen velikostni red deformacijskih toleranc je ustrezen za takšne vrste kompaktnih hribinskih materialov, kot je sivica. Poleg deformacijske tolerance predstavlja pomemben kriterij tudi velikostni red robnih napetosti v oblogi.

Analiza je bila izdelana za vsak sklop materialnih parametrov brizganega betona oziroma MABB pri različnih starostih (4, 8, 12 in 24 ur) posebej z obravnavanjem izkopnih korakov 2, 4, 6 in 8 m najprej v kaloti, nato pa skupaj še v stopnici in talnem oboku.

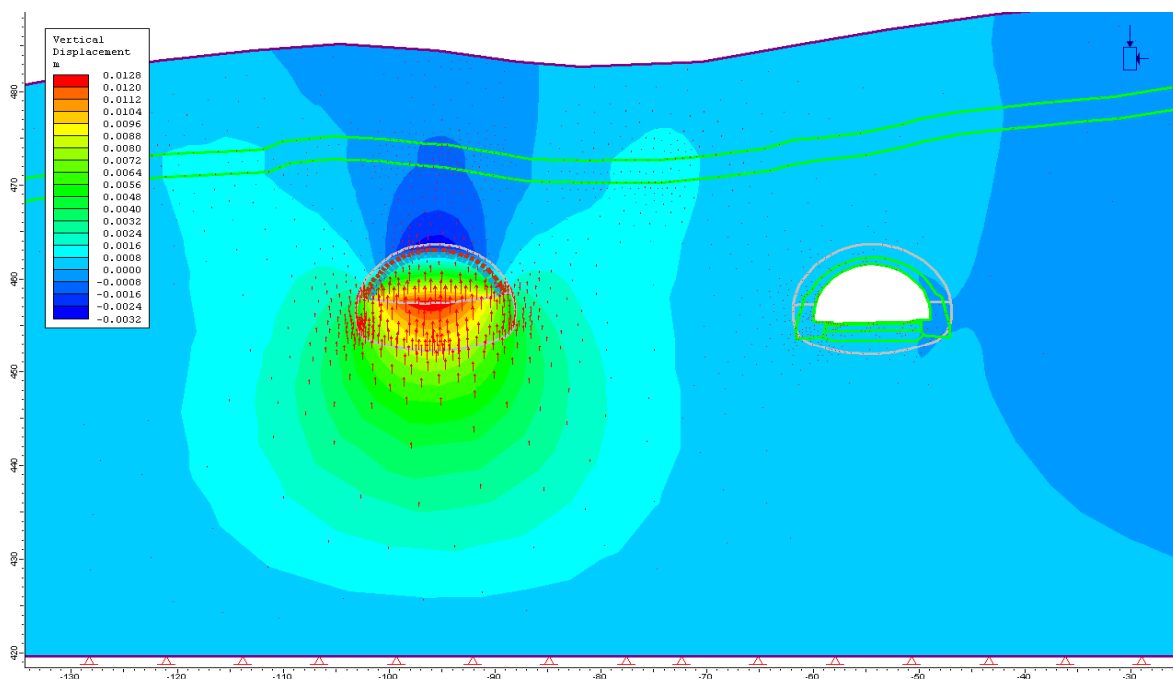
Mesto opazovanja je izkopni profil pred nadaljevanjem izkopa, kar pomeni, da v dani točki opazujemo vpliv zgodnjih trdnosti brizganega betona oziroma MABB na deformacijo opazovanega izkopnega profila glede na nadaljnji izkop.



Slika 34: Shematični prikaz vzdolžnega prereza opazovanega mesta in izkopnih korakov

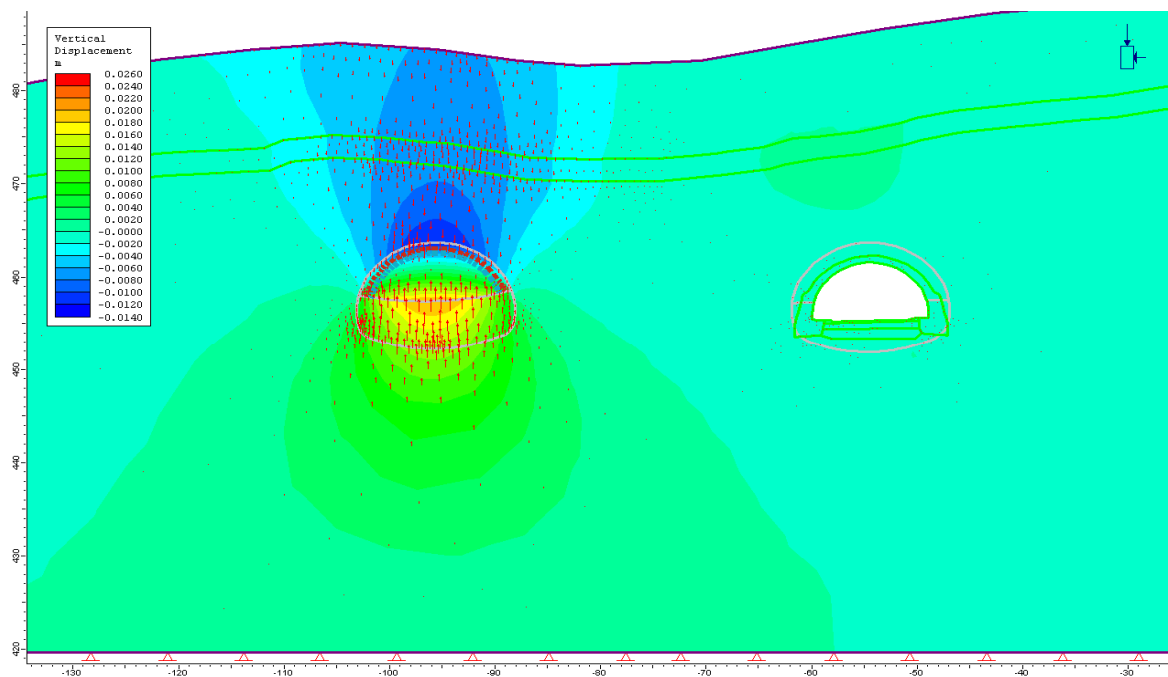
## 5.2.5 Rezultati izračuna

### 5.2.5.1 Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z običajnim BB v kaloti pri starosti brizganega betona 12 ur

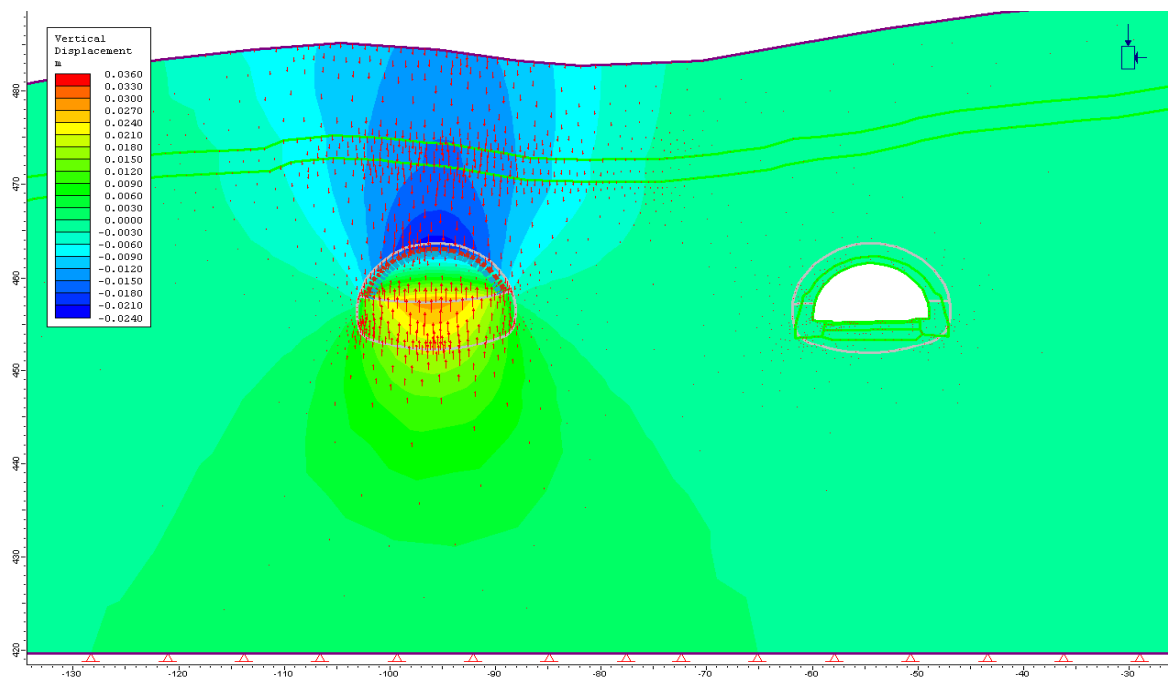


Slika 35: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 0,3 cm

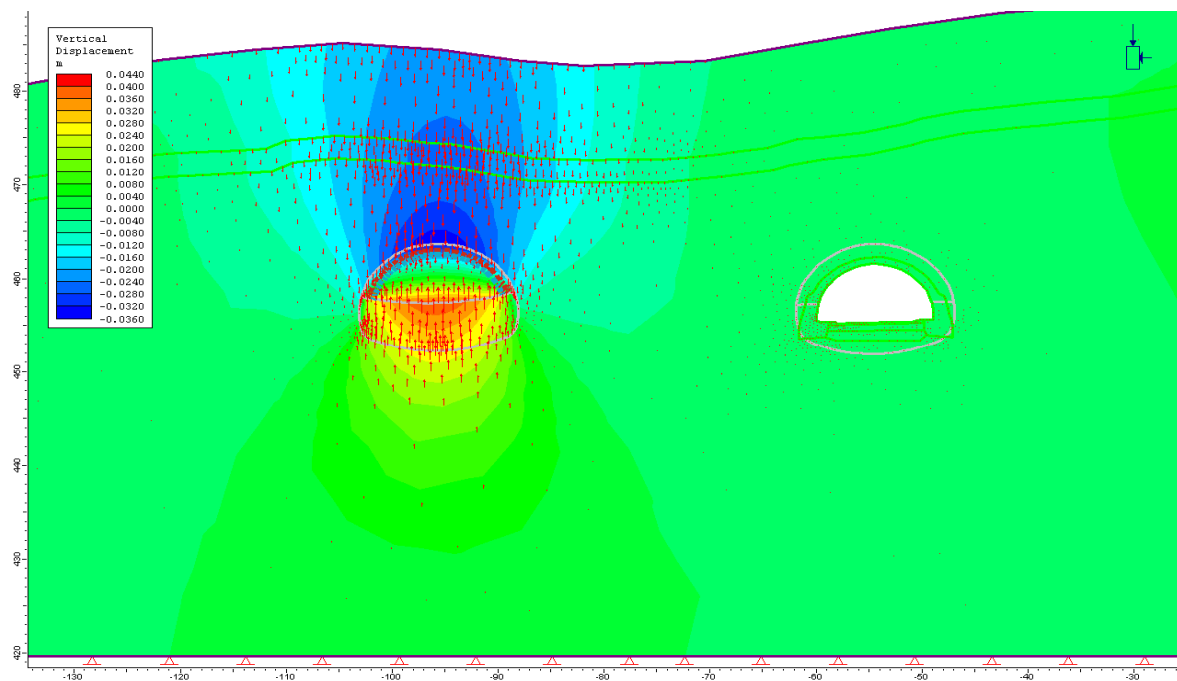




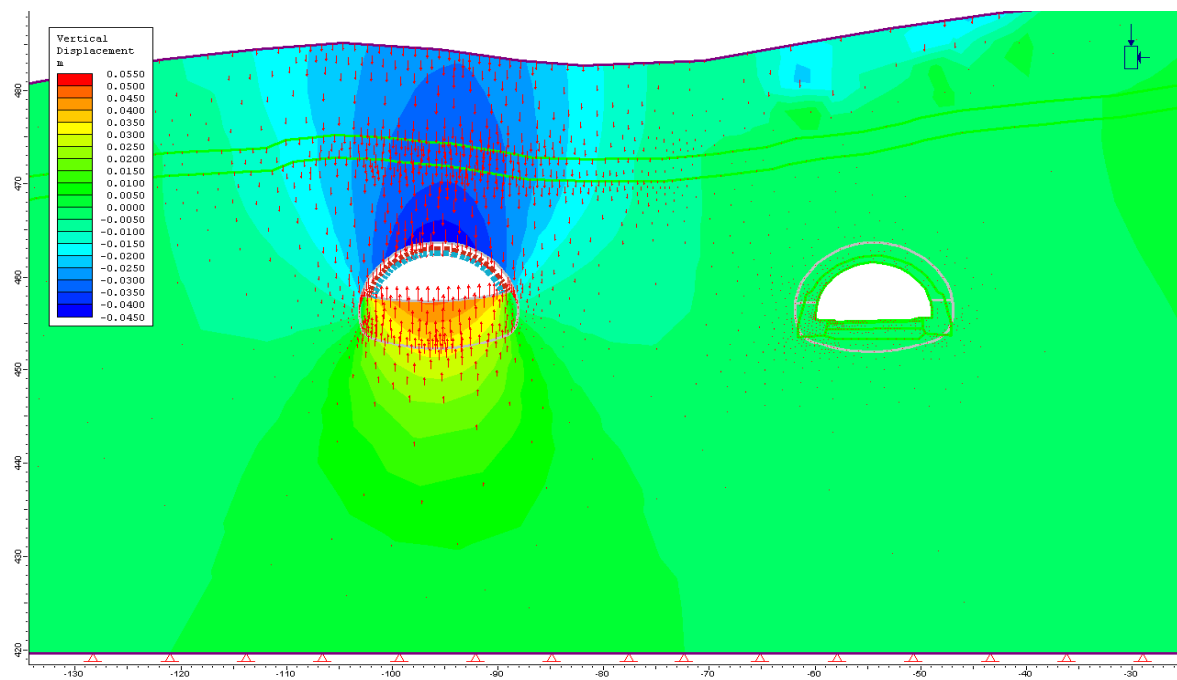
Slika 36: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 1,4 cm



Slika 37: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 2,4 cm

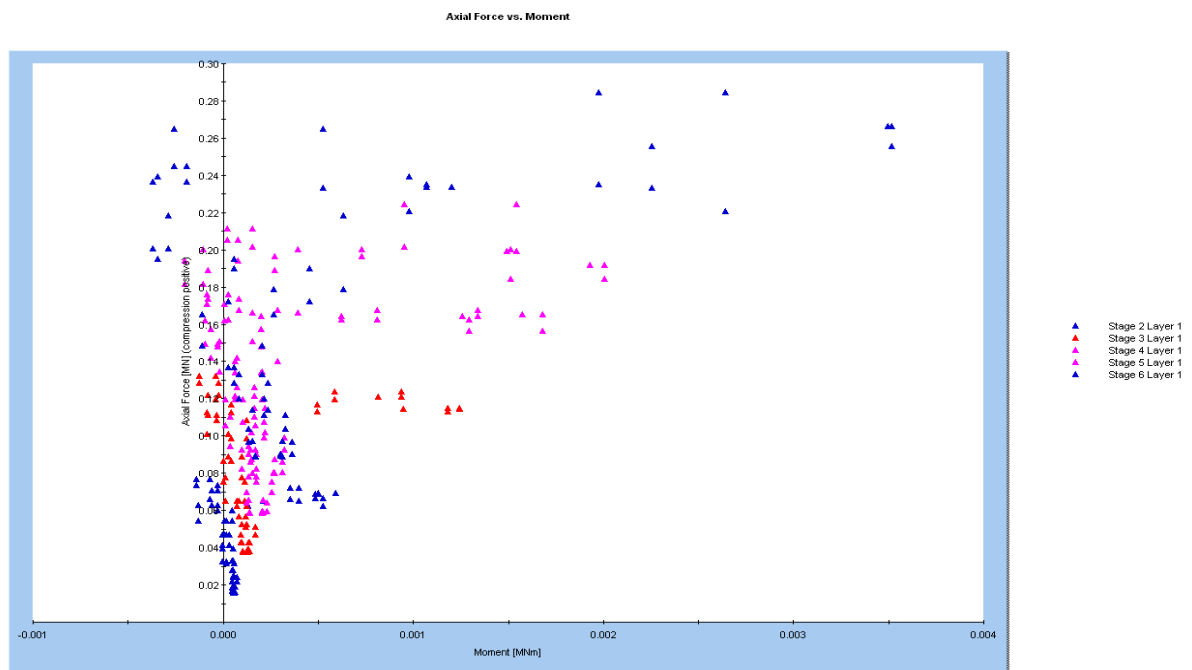


Slika 38: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 3,6 cm



Slika 39: Izkop celotnega profila v kaloti – maksimalni pomik znaša 4,5 cm

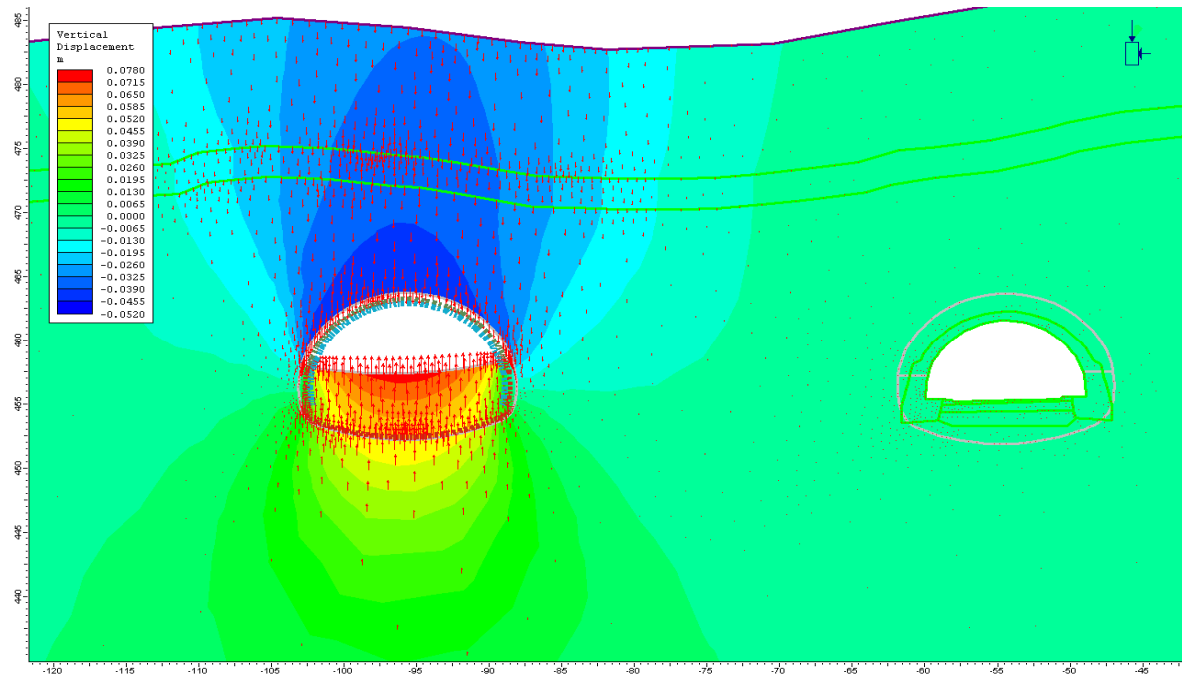
Pri starosti brizganega betona 12 ur lahko v kaloti izvedemo izkop v poljubnem koraku od opazovanega območja, pri čemer so vertikalni pomiki še v mejah tolerance.



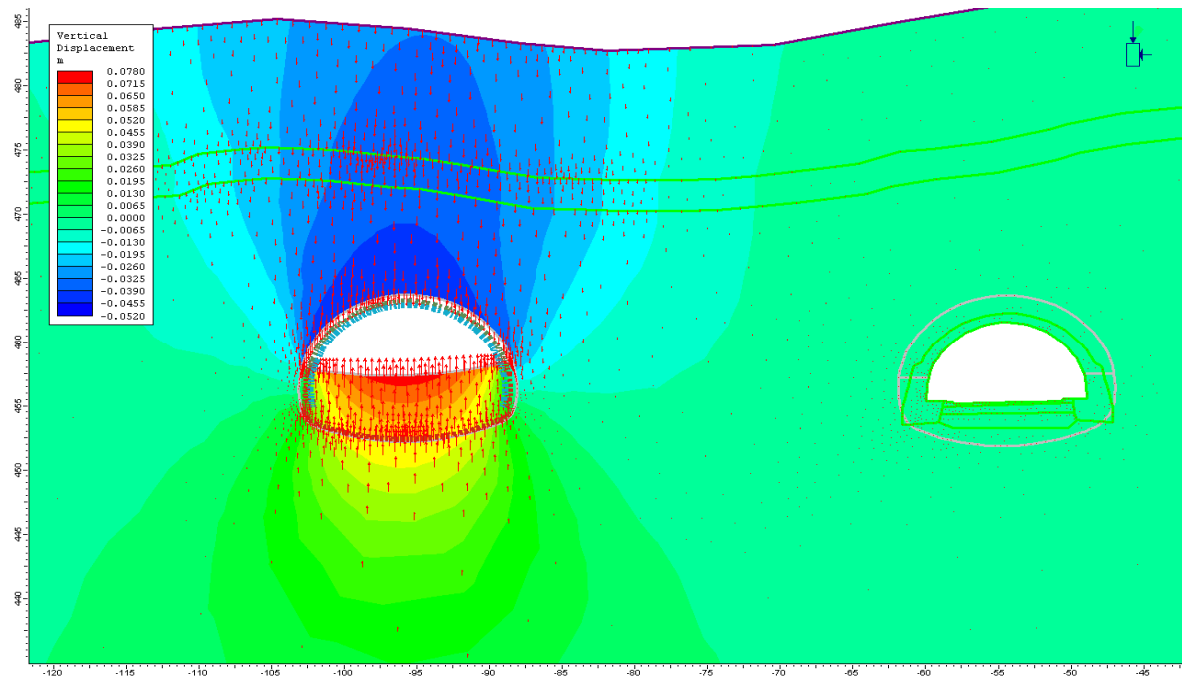
Slika 40: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu kalote in zavarovanju s primarno podgradnjo

#### 5.2.5.2 Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z običajnim BB v stopnici in talnem oboku pri starosti brizganega betona 12 ur

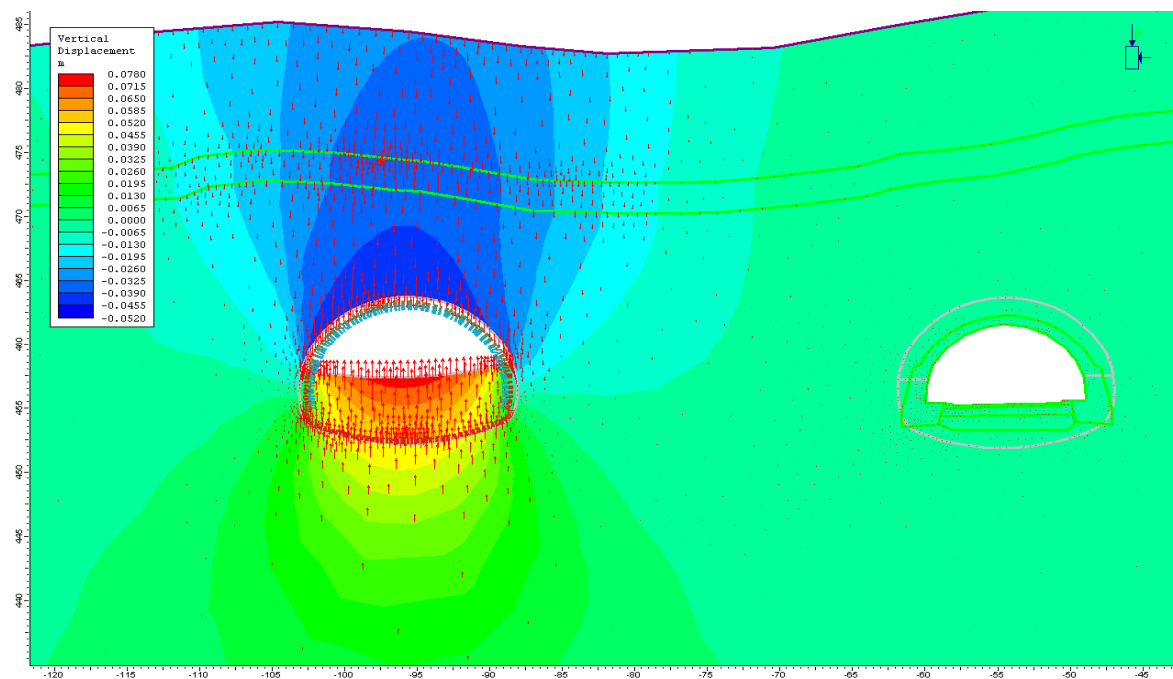
Smatra se, da je pred izvedbo izkopa in zaščite predorskega profila v področju stopnice ter talnega oboka obloga iz brizganega betona v kaloti že dosegla učinkovito trdnost.



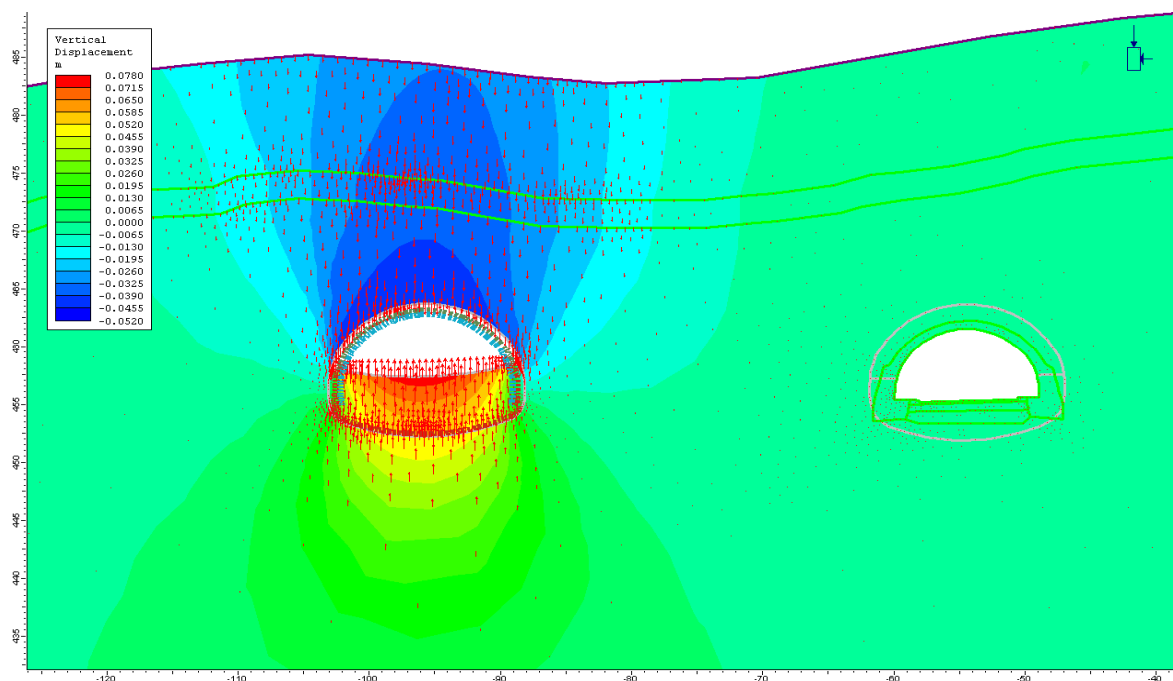
Slika 41: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm



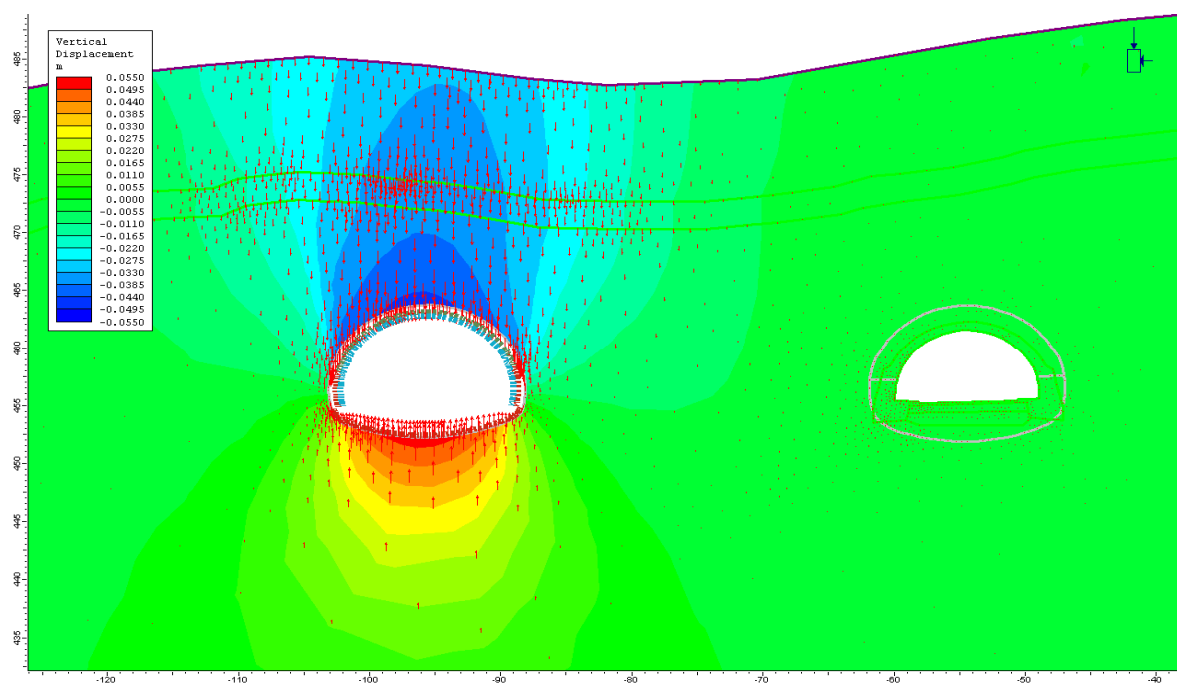
Slika 42: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm



Slika 43: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm

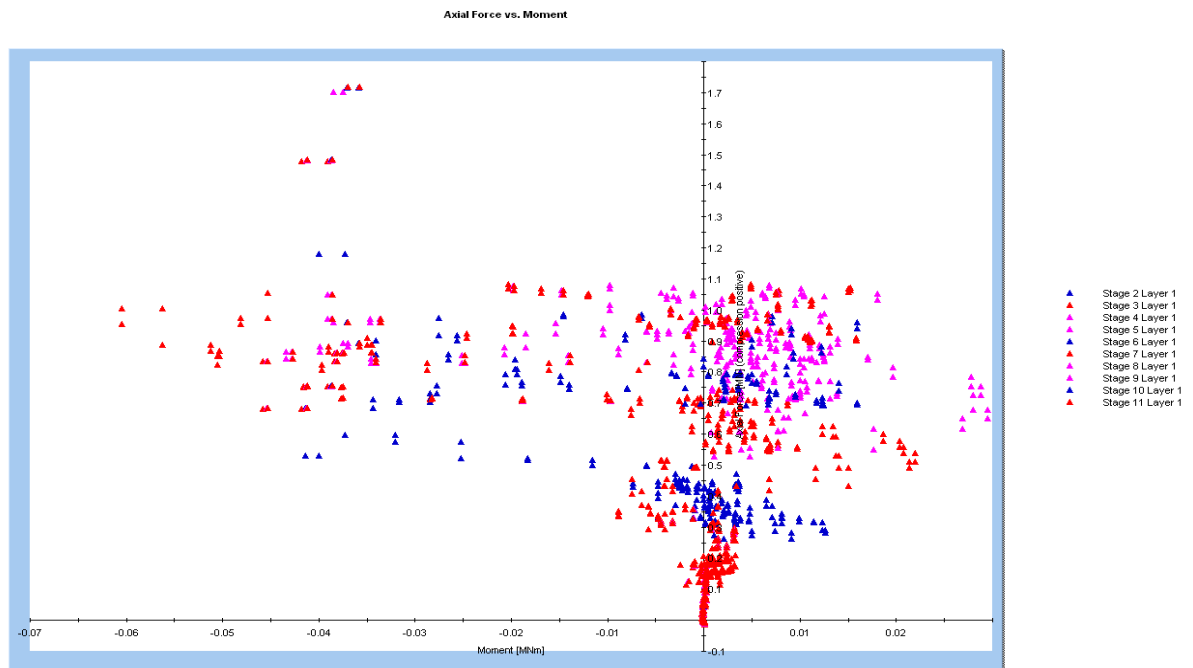


Slika 44: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 4,96 cm



Slika 45: Izkop celotnega profila stopnice in talnega oboka – maksimalni pomik znaša 4,96 cm

Pri starosti brizganega betona 12 ur lahko izvedemo korak poljubne dolžine glede na opazovano območje, saj pomiki ne presegajo določene tolerance.



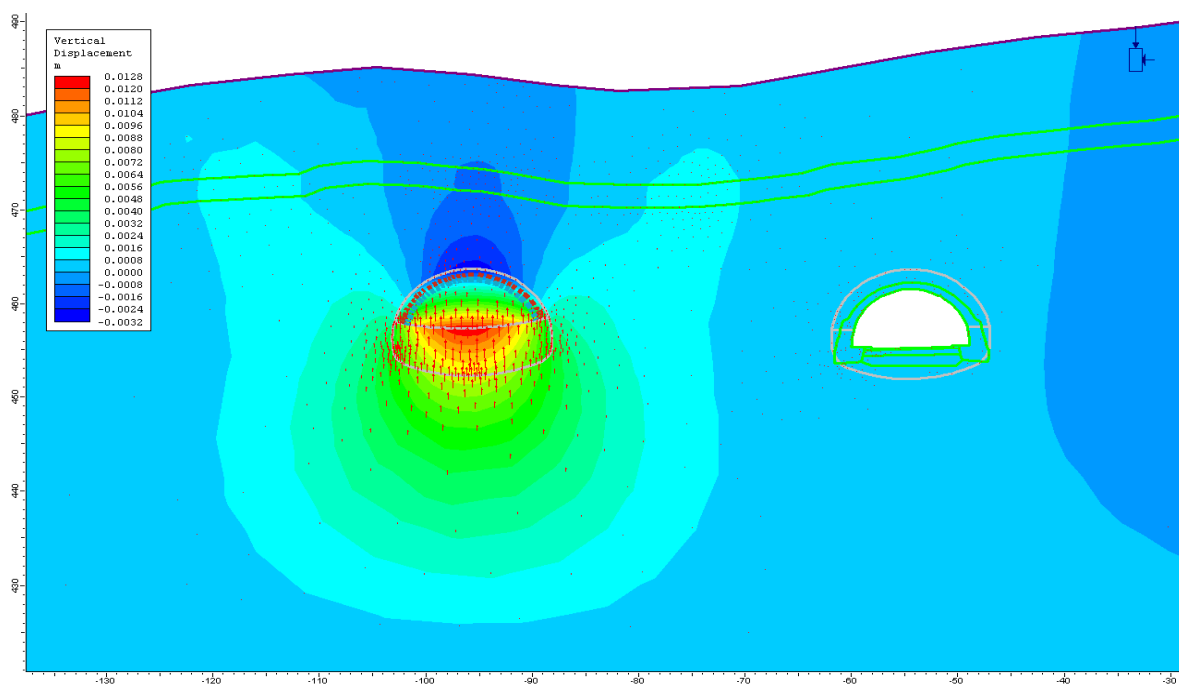
Slika 46: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu stopnice in talnega oboka ter zavarovanju s primarno podgradnjo

Zaradi večje preglednosti so rezultati evalvacije možnosti izkopa in zaščite pri vseh štirih različnih starostih brizganega betona brez vlaken zbrani v preglednici 10.

Preglednica 10: Vertikalni pomiki pri vseh štirih različnih starostih brizganega betona

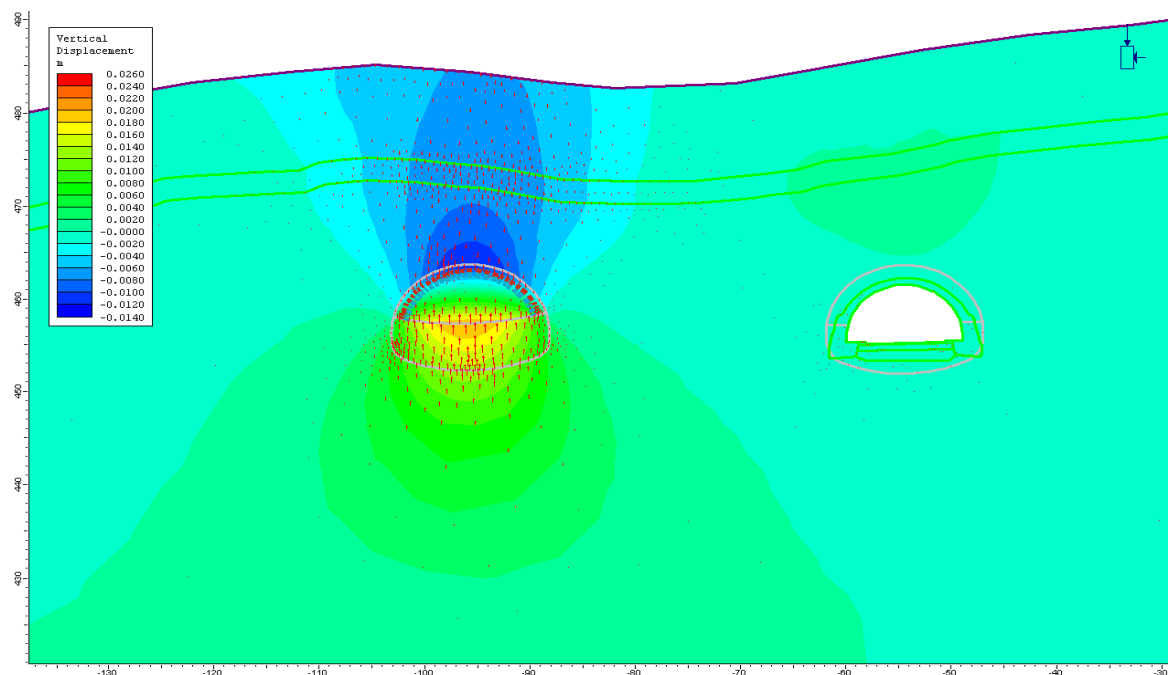
Element	Dolžina koraka	Vertikalni pomik pri starosti (ure)				
		4	8	12	24	
Kalota	2 m	0,3	0,3	0,3	0,3	cm
	4 m	1,4	1,4	1,4	1,2	cm
	6 m	2,4	2,4	2,4	2,4	cm
	8 m	4,0	3,6	3,6	3,6	cm
	Brez varovanja z izkopskim čelom	9,75	5,0	4,5	4,5	cm
Stopnica + talni obok	2 m	15,5	5,2	4,95	4,8	cm
	4 m	16,2	5,2	4,96	4,82	cm
	6 m	17,9	5,2	4,96	4,82	cm
	8 m	18,8	5,2	4,96	4,96	cm
	Brez varovanja z izkopskim čelom	19,5	5,2	4,96	4,82	cm

### 5.2.5.3 Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z MABB v kaloti pri starosti brizganega betona 12 ur

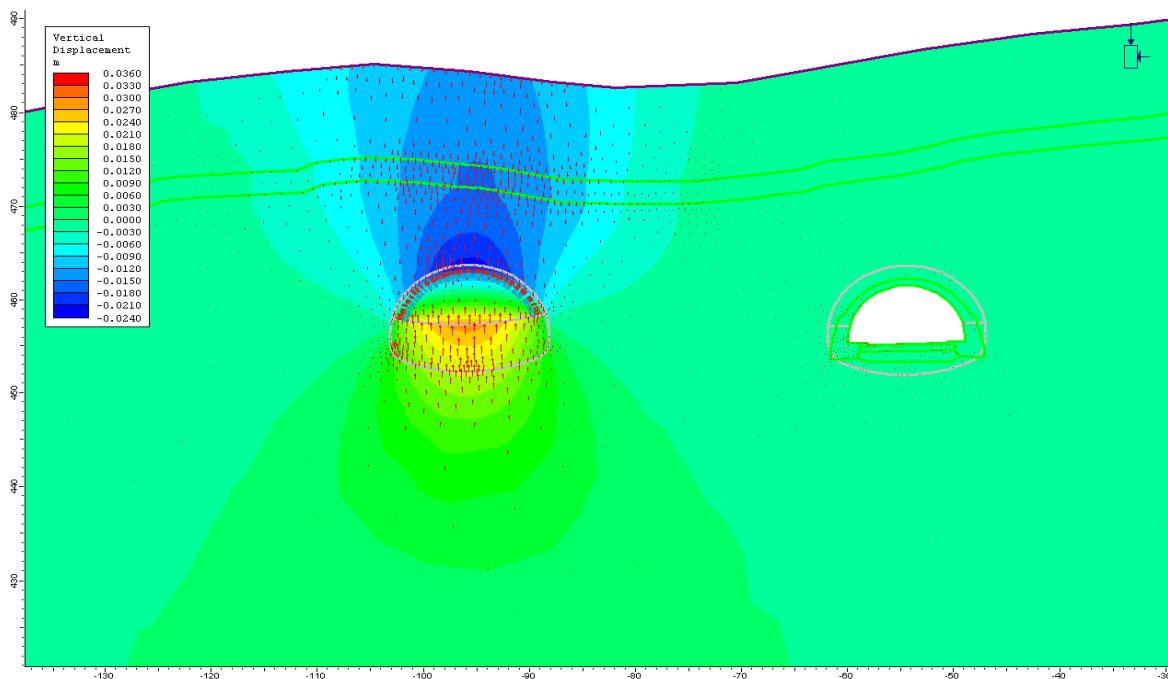


Slika 47: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 0,3 cm

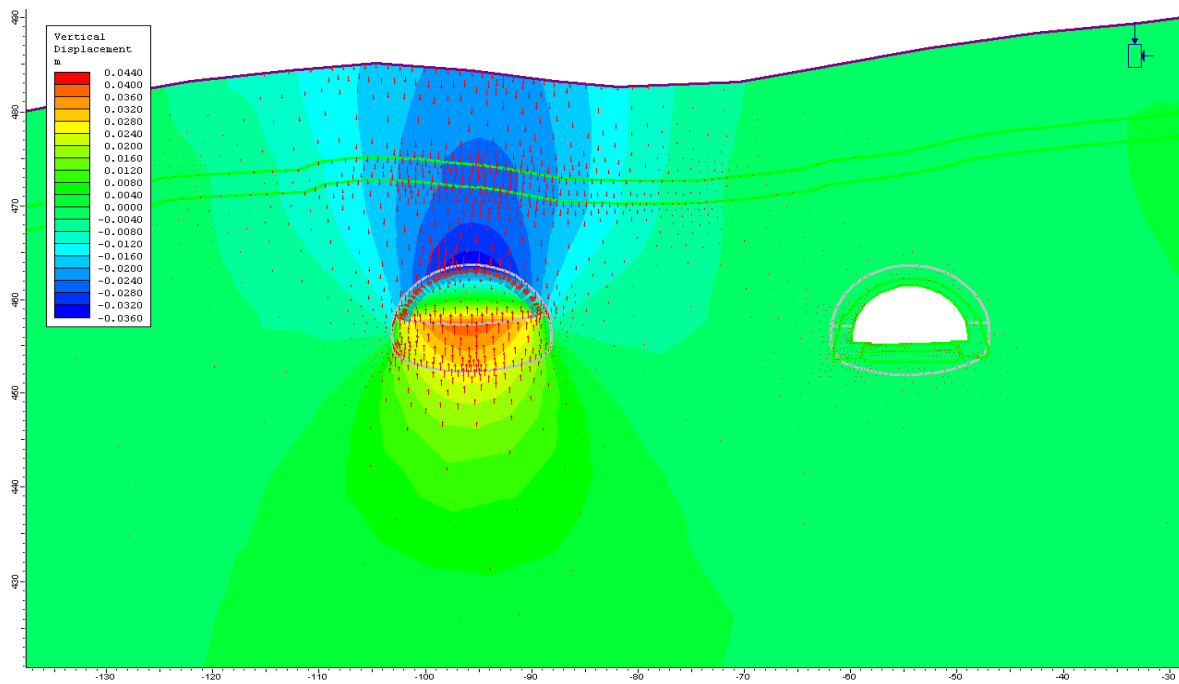




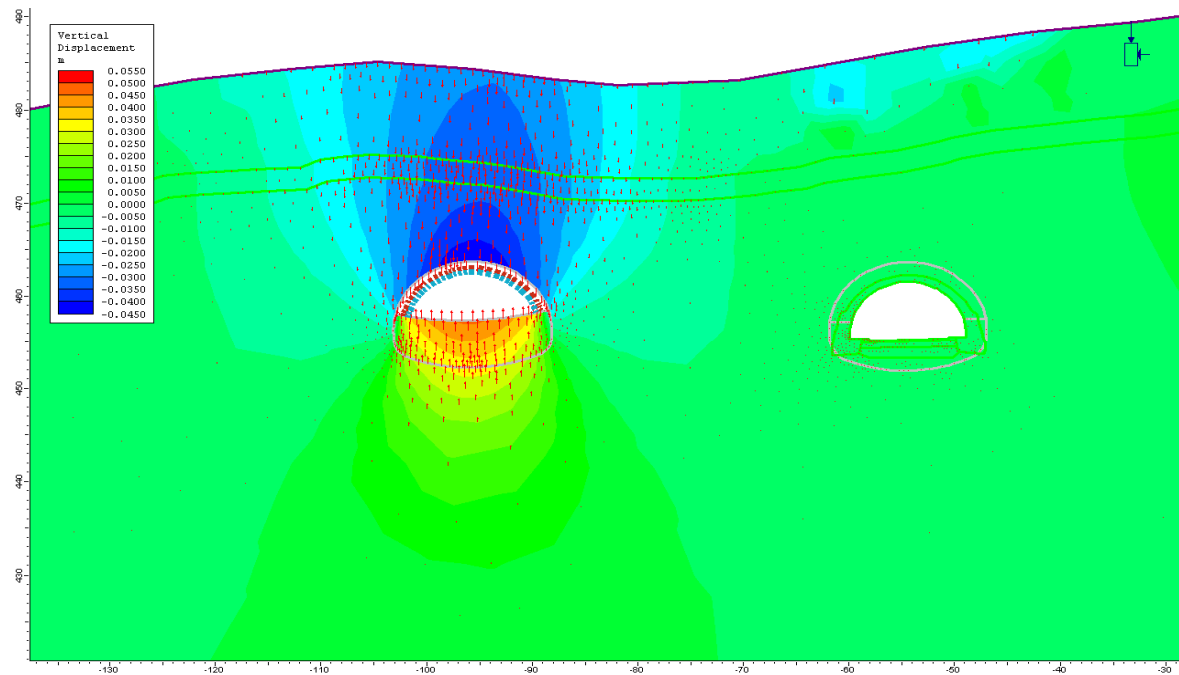
Slika 48: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 1,4 cm



Slika 49: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 2,4 cm

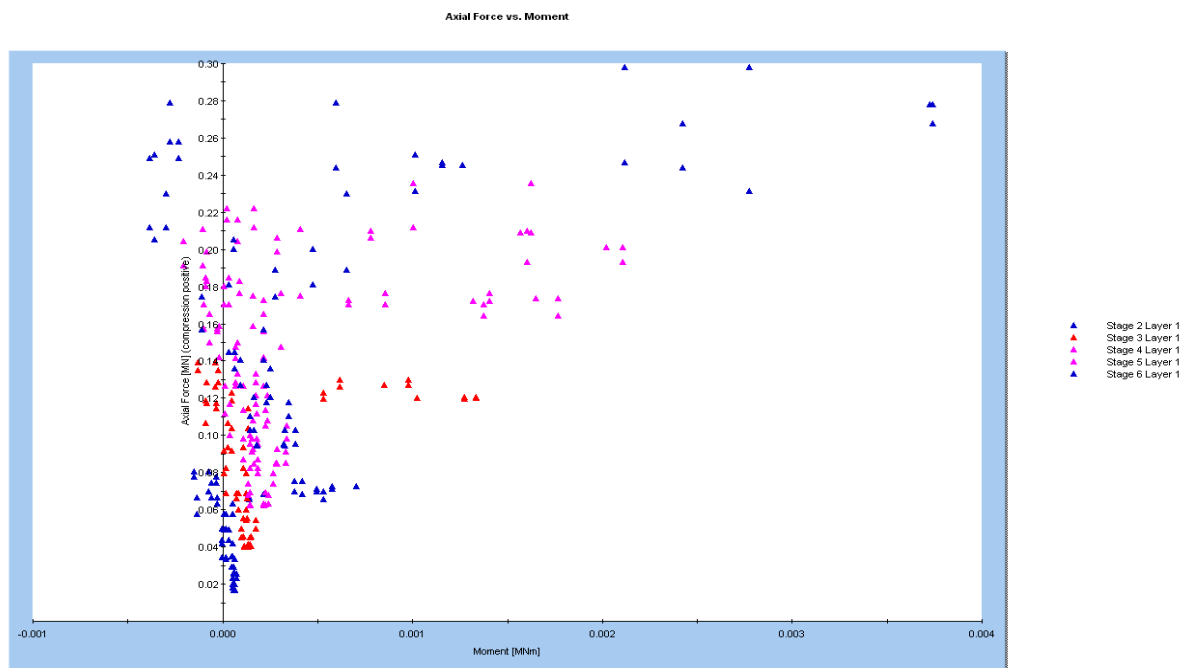


Slika 50: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 3,6 cm



Slika 51: Izkop celotnega profila v kaloti – maksimalni pomik znaša 4,5 cm

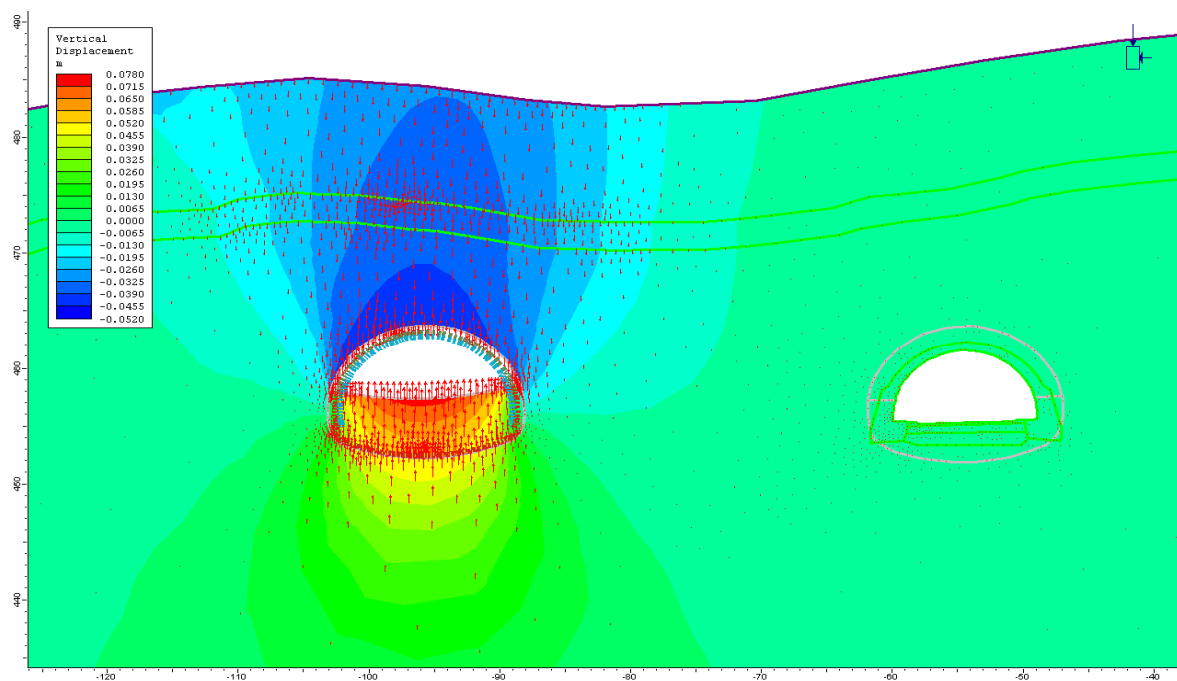
Pri starosti MABB 12 ur lahko v kaloti izvedemo izkop v poljubnem koraku od opazovanega območja, pri čemer so vertikalni pomiki še v mejah tolerance.



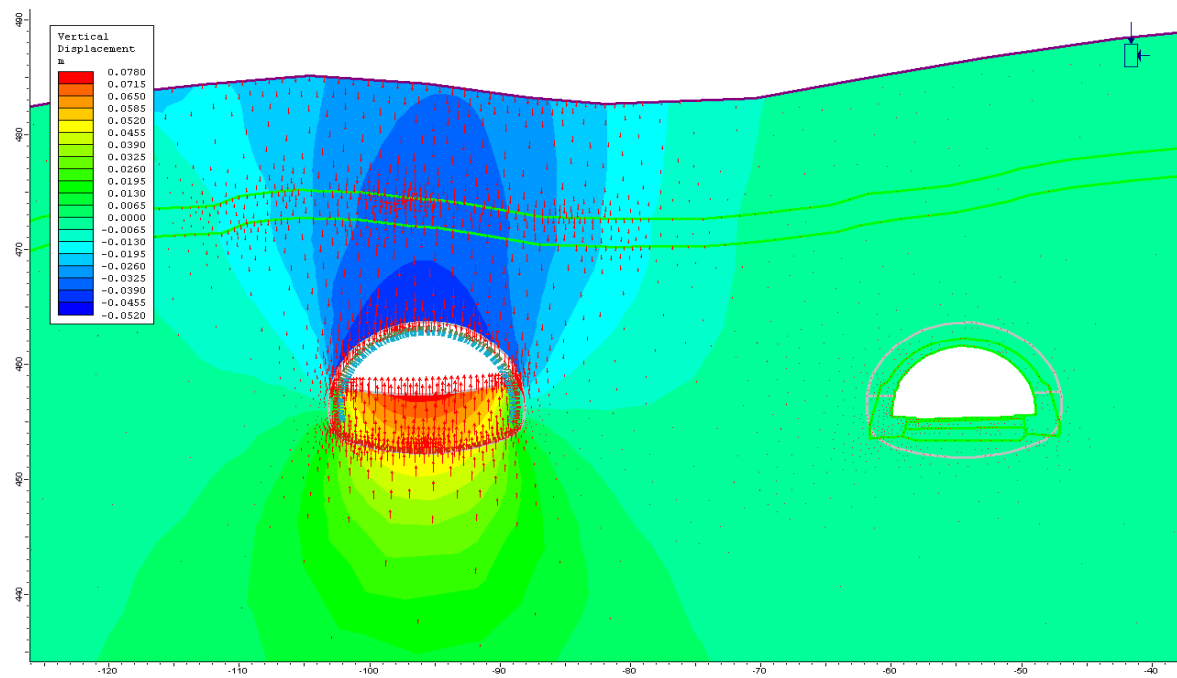
Slika 52: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu kalote in zavarovanju s primarno podgradnjo

#### 5.2.5.4 Parametrična analiza izkopa in izvedbe primarne podgradnje z MABB v stopnici in talnem oboku pri starosti brizganega betona 12 ur

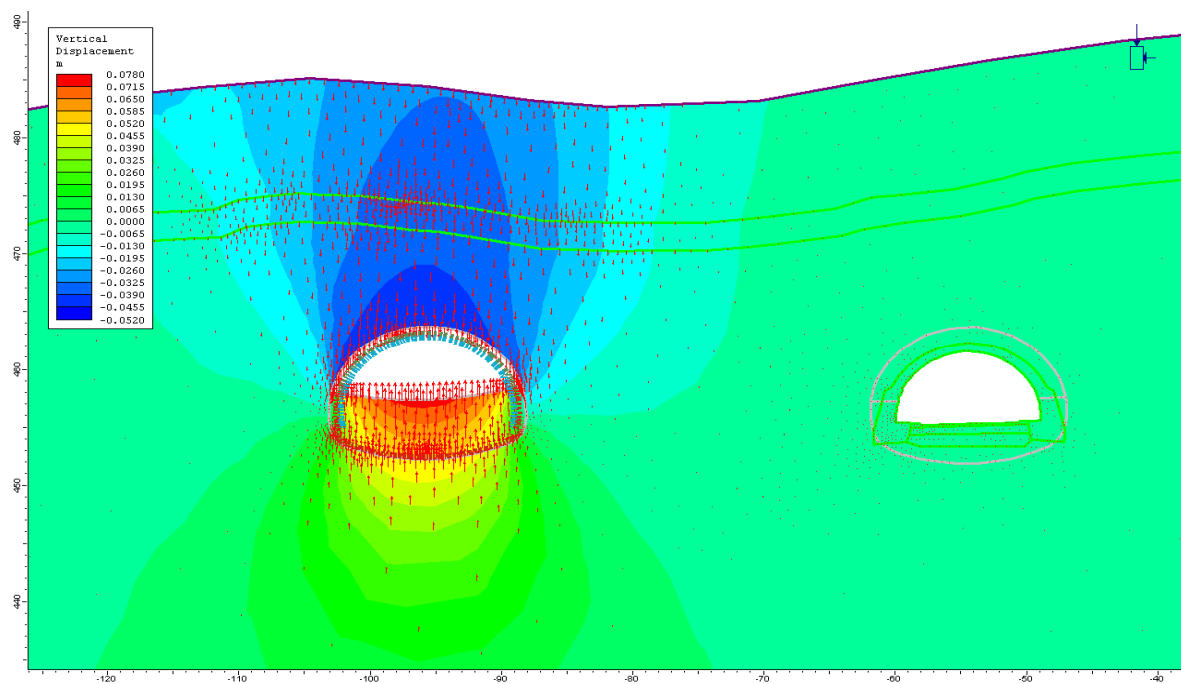
Smatra se, da je pred izvedbo izkopa in zaščite predorskega profila v področju stopnice ter talnega oboka obloga iz MABB v kaloti že dosegla učinkovito trdnost.



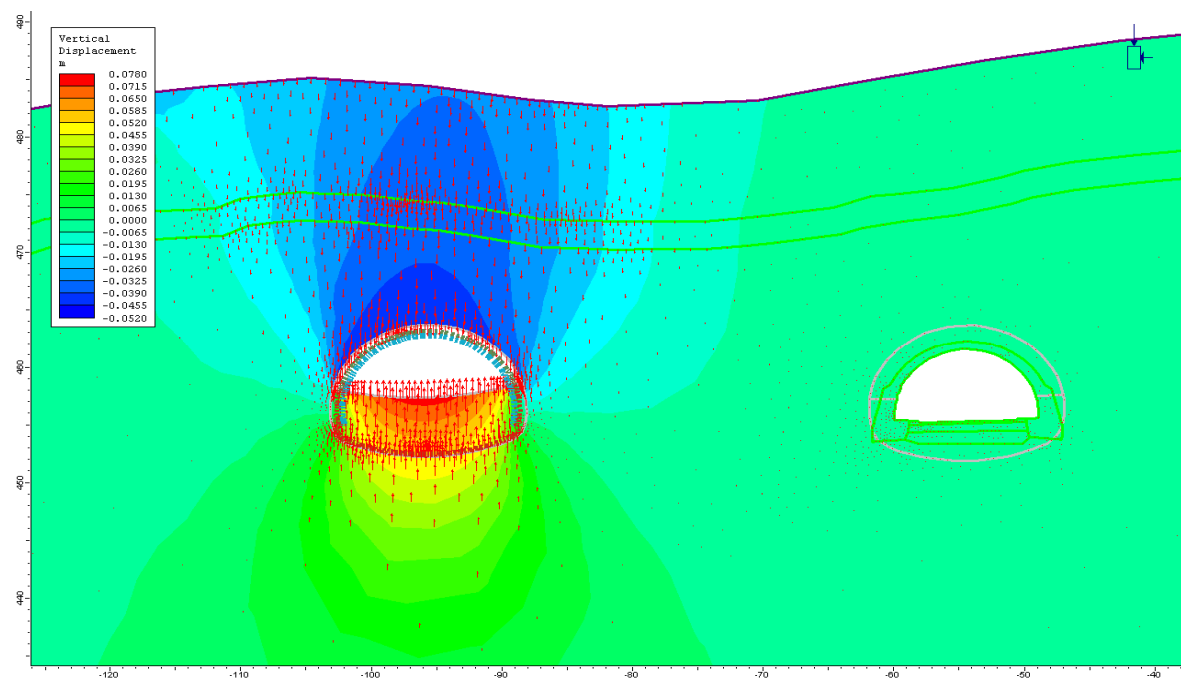
Slika 53: Izkopni korak 2 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm



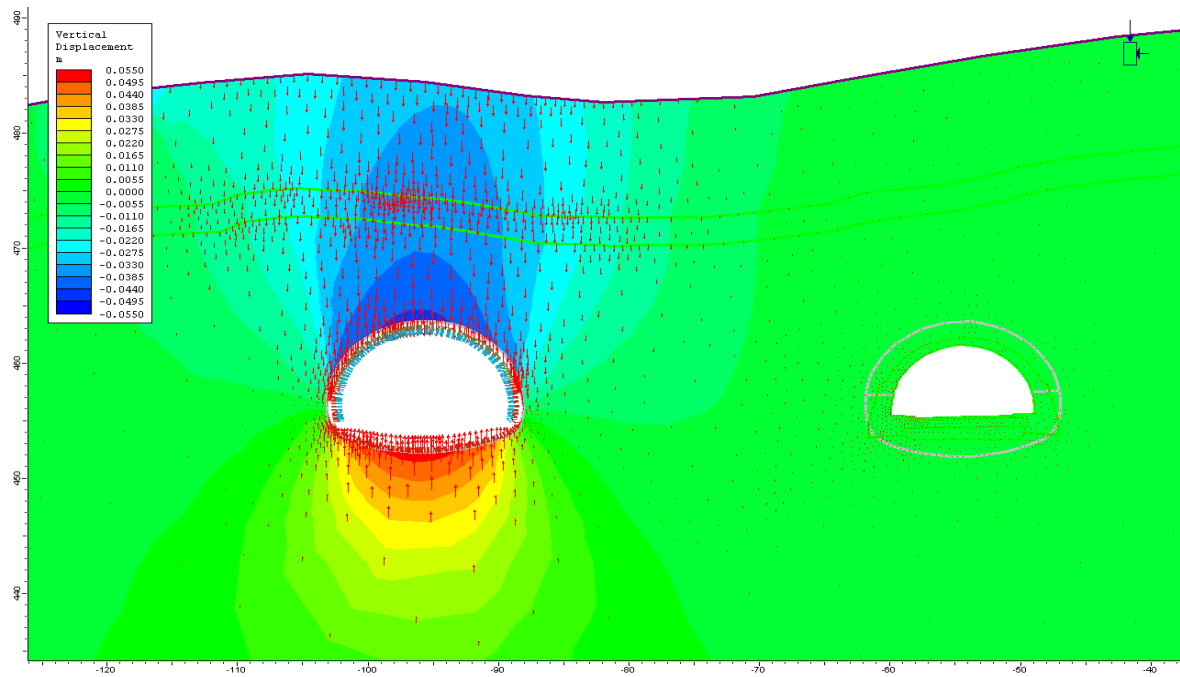
Slika 54: Izkopni korak 4 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm



Slika 55: Izkopni korak 6 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm

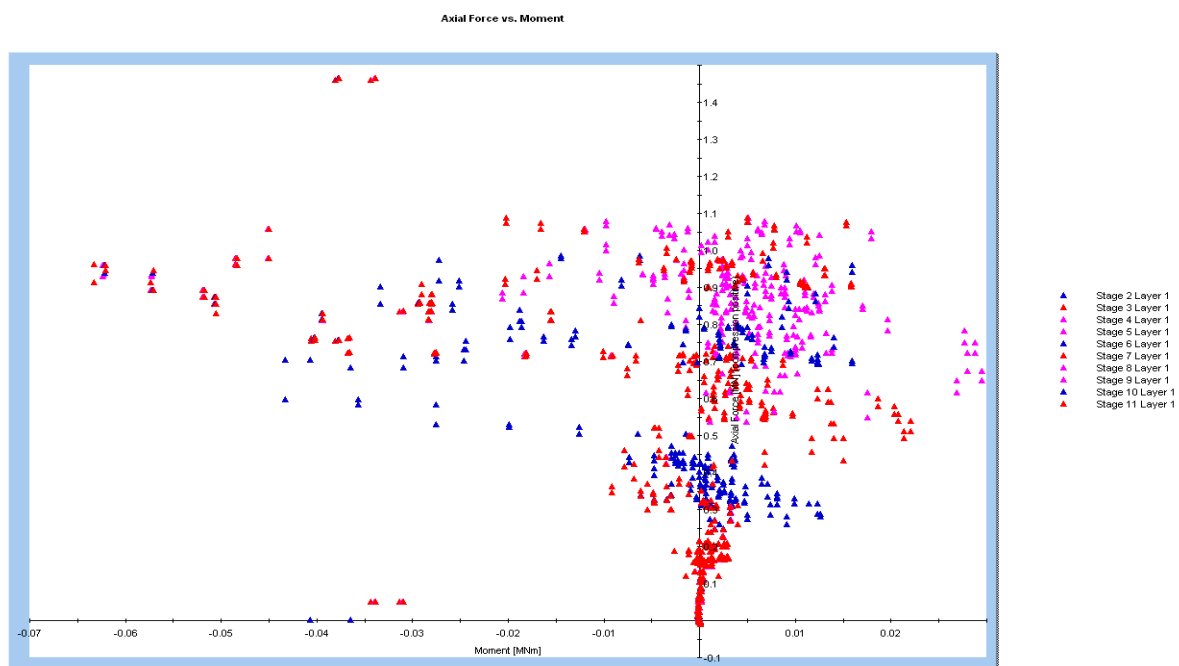


Slika 56: Izkopni korak 8 m – maksimalni pomik znaša 4,95 cm



Slika 57: Izkop celotnega profila stopnice in talnega oboka – maksimalni pomik znaša 4,95 cm

Pri starosti MABB 12 ur lahko izvedemo korak poljubne dolžine glede na opazovano območje, saj pomiki ne presegajo določene tolerance.



Slika 58: Interakcijski diagram osna sila – moment po izkopu stopnice in talnega oboka in zavarovanju s primarno podgradnjo

Zaradi večje preglednosti so rezultati evalvacije možnosti izkopa in zaščite pri vseh štirih različnih starostih MABB zbrani v preglednici 11.

Preglednica 11: Vertikalni pomiki pri vseh štirih različnih starostih MABB

Element	Dolžina koraka	Vertikalni pomik pri starosti (ure)				
		4	8	12	24	
Kalota	2 m	0,3	0,3	0,3	0,3	cm
	4 m	1,4	1,4	1,4	1,2	cm
	6 m	2,4	2,4	2,4	2,4	cm
	8 m	4,0	3,6	3,6	3,6	cm
	Brez varovanja z izkopnim čelom	8,4	4,5	4,5	4,5	cm
Stopnica + talni obok	2 m	11,0	5,08	4,95	4,8	cm
	4 m	11,85	5,09	4,95	4,81	cm
	6 m	12,3	5,09	4,95	4,81	cm
	8 m	12,7	5,09	4,95	4,81	cm
	Brez varovanja z izkopnim čelom	12,7	5,09	4,95	4,82	cm

### 5.3 Analiza rezultatov

Rezultati parametrične študije so zbrani v preglednici 10 (brizgani beton) in preglednici 11 (MABB). S primerjavo vrednosti lahko ugotovimo, da so pri obravnavi kalote razlike med uporabo brizganega betona (BB) in MABB zanemarljivo majhne. Prav tako staranje obeh vrst betona in posledično pridobivanje trdnosti ne vpliva na pomike. Razlog je v tem, da se predor nahaja v hribini z zelo ugodnimi geološko-geomehanskimi karakteristikami. S krožno obliko predora je bil ustvarjen nosilni lok v hribini okrog območja izkopa in s tem upoštevano eno od osnovnih načel metode NATM in sicer da večji del obremenitev nosi hribina sama. Posledično temu je za zadostno varovanje izkopnega profila kalote dovolj že minimalna opora primarne obloge predora. Vertikalni pomiki stropa izkopnega profila so tako odvisni le od dolžine izkopnega koraka in s tem vpliva varovanja z izkopnim čelom. Malo opaznejše razlike med BB in MABB se izkazujejo pri obravnavi stopnice in talnega oboka. Z ozirom na tolerance za pomike, podane v točki 5.2.4, lahko ugotovimo, da je za izvedbo primarnega



podporja poljubne od primerjanih dolžin izkopa tako v kaloti kot tudi v stopnici in talnem oboku primeren le beton (BB in MABB, opisana v poglavju 3), ki je star vsaj 12 ur. Beton, mlajši od 12 ur, je primeren za dolžine izkopa in primarnega podporja kalote do dolžine 8 m z zavarovanjem z izkopnim čelom. Brez varovanja z izkopnim čelom kalote je možna uporaba MABB, starega 8 ur, medtem ko je brizgani beton brez vlaken na meji dovoljene tolerance. Za primarno podpiranje stopnice in talnega oboka beton, mlajši od 12 ur, ni primeren zaradi posledičnega preseganja deformacijskih toleranc.

## 6 ZAKLJUČKI

Rezultati analize dolžin izkopnih korakov izkazujejo minimalne razlike med dvema materialoma, ki sta v osnovi enaka, vendar z eno bistveno razliko. Eden vsebuje jeklena vlakna, drugi pa ne. Po drugi strani pa kažejo preiskave obnašanja betona brez jeklenih vlaken in z jeklenimi vlakni pod enoosno tlačno obremenitvijo na manjše razlike v največji doseženi tlačni trdnosti in na večje razlike v duktilnosti, upogibni ter strižni trdnosti pa tudi sposobnosti prenašanja obtežbe po največji doseženi tlačni trdnosti, kar je razvidno iz referata z naslovom "Ocenjevanje duktilnega obnašanja mikroarmiranih brizganih betonov takoj po vgraditvi" (Šušteršič, 2009), ki je bil predstavljen na 9. mednarodnem posvetovanju o gradnji predorov in podzemnih prostorov v Ljubljani.

Na osnovi omenjenih dejstev se postavlja vprašanje, kje se ta razlika izgubi. Ali obstaja metoda projektiranja, s katero bi bilo mogoče bolj temeljito upoštevati prednosti MABB? Iz prakse je znano, da je MABB zelo primeren material za primarno podporje pri nekaterih podzemnih gradnjah, kar pa dejansko pomeni priložnost za optimizacijo. Slednja je možna pri večanju hitrosti izkopa in primarnega podpiranja ali pa pri tanjšanju obloge in s tem prihranku pri količini uporabljenega materiala in posledično na obrabi mehanizacije. Vprašanji z začetka tega odstavka predstavljata izhodišče za nadaljne raziskave tega področja, ki ima svetlo prihodnost. Odgovori nanju pa presegajo okvir te diplomske naloge.

Na podlagi rezultatov, ki so skoraj enaki za beton brez vlaken in z vlakni, je mogoče sklepati, da je v nekaterih primerih armaturne mreže mogoče uspešno nadomestiti z jeklenimi vlakni. V teh primerih imajo jeklena vlakna dve prednosti v primerjavi s klasično armaturo in sicer:

- jeklena vlakna dodajamo betonski mešanici pred oziroma med brizganjem, medtem ko je treba klasično armaturo namestiti v predor pred brizganjem. Z MABB tako izločimo fazo nameščanja klasične armature, kar ima neposreden učinek na čas gradnje.
- Z uvedbo MABB ni več potrebe po ekipi, ki vgrajuje klasično armaturo, kar ima neposreden učinek na stroške gradnje in varnost pri delu.

Poleg zgoraj zapisanega pa MABB izkazuje še eno prednost, in sicer pri znatnem deformiranju v zgodnejših fazah strjevanja in sledeči stabilizaciji oziroma umiritvi razmer, je MABB še vedno sposoben doseči visoko raven trdnosti. Razpoke, ki so se pojavile med deformiranjem, premoščajo vlakna in tako do neke mere omogočajo prenos nateznih in strižnih napetosti. To pa je že nova tema za nadaljnje raziskave lastnosti MABB.

Prav tako je treba omeniti, da predstavlja metoda za preskušanje mehčanja deformacij, ki jo priporoča RILEM, z nekaj modifikacijami dobro alternativo obstoječim metodam za ugotavljanje priraščanja tlačne trdnosti (SIST EN 14488-2; metoda A in metoda B). Predmet diskusije pri RILEM-ovem priporočilu je v našem primeru samo vzorec. Brizganje v kalupe ni primerno zaradi premajhnih dimenzij kalupa oziroma vpliva brizganja na robne pogoje preskušanca. Po drugi strani pa po avstrijskih smernicah za brizgane betone vrtanje vzorcev ni priporočljivo, dokler beton ne doseže trdnosti vsaj 10 MPa (Sprayed concrete guideline, 1999). Tako postane v primeru preiskav, kjer bistvo ni odvisno od načina izdelave vzorca, RILEM-ovo priporočilo o preskusni metodi zelo aktualno.

## VIRI

Jovičič, V., Likar, J., Markič, S., Huis, M. 2004. Gradnja predora Dekani. V: Vilhar, M. (ur.). Zbornik 7. slovenskega kongresa o cestah in prometu. Portorož, Grand Hotel Bernardin, 20.–22. oktober 2004. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 323–332 str.

Grum, B., Čebular, U., Kavčič, F., Šušteršič, J., Gerbec, B., Leskovar, I., Bergant, M., Dobnikar, V. 2004. Sanacije betonskih objektov. I2 družba za založništvo, izobraževanje in raziskovanje d.o.o.: 14–35 str.

Žarnič, R. 1999. Osnovne lastnosti Gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 106–108 str.

ACI Committee 544.1. Report on Fiber Reinforced Concrete, Farmington hills, American Concrete Institute: 1–64 str.

ACI Committee 506. Guide to Shotcrete, Farmington hills, American Concrete Institute: 1–5 str.

SIST EN 206-1:2003. Beton : 1. del : Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 18 str.

RILEM TC 148-SSC: Strain softening of concrete – Test methods for compressive softening. Test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression. Recommendations. Materials and Structures, Vol. 33 (2000): 347–351 str.

Šušteršič, J., Rajh, G., Lopatič, J., Zajc, A. 2009. Ocenjevanje duktilnega obnašanja mikroarmiranih brizganih betonov takoj po vgraditvi. V: Likar, J. (ur.). Zbornik 9. mednarodnega posvetovanja o gradnji predorov in podzemnih prostorov. Ljubljana, Hotel Mons, 16.–18. september 2009. Ljubljana, Slovensko društvo za podzemne gradnje: str. 73–79 str.

Dipl. nal. – VSŠ. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Šušteršič, J., Zajc, A., Leskovar, I., Dobnikar, V., Šajna, A., Štefančič, A., Zajc – Pogorelčnik, M. 2000. Projektiranje elementov iz mikroarmiranih betonov : prvi del : projektiranje oblog predorov. Ljubljana, IRMA d.o.o.: 8 str.

Wikipedija, New Austrian Tunnelling method

[http://en.wikipedia.org/wiki/New\\_Austrian\\_Tunnelling\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/New_Austrian_Tunnelling_method) (15. 11. 2009).

Hann, D., Likar, J. 2002. Primerjava dveh metod gradnje predorov v zahtevnih geotehničnih pogojih. V: Kostiov, L. (ur.). Zbornik 6. mednarodnega posvetovanja o gradnji predorov in podzemnih prostorov. Ljubljana, 25.–27. september 2002. Ljubljana, Društvo za podzemne in geotehnične konstrukcije: 286–287 str.

Likar, J., Čadež, J., Huis, M. 2006a. Nekatere posebnosti gradnje novih cestnih predorov v Republiki Sloveniji. V: Gostinčar, A. (ur.). Zbornik 8. slovenskega kongresa o cestah in prometu. Portorož, Grand Hotel Bernardin, 25.–27. oktober 2006. Ljubljana, DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 867–878 str.

Likar, J., Čadež, J., Huis, M. 2006b. Gradnja novega cestnega predora Ljubno. V: Kostiov, L. in Likar, J. (ur.). Zbornik 8. mednarodnega posvetovanja o gradnji predorov in podzemnih prostorov. Ljubljana, Hotel Mons, 15.–17. november 2006. Ljubljana, Društvo za podzemne in geotehnične konstrukcije: 290–299 str.

SIST EN 14488-2:2006. Preskušanje brizganega betona – 2. del: Tlačna trdnost svežega brizganega betona: 5 str.

Sprayed Concrete Guideline : Application and testing. 1999. Dunaj, Österreichischer Betonverein: 57 str.