

## OPTIMALIZACIJA SASTAVA BETONA ZA TUNELSKJE OBLOGE

## SADRŽAJ

1. UVOD
2. CILJ ISTRAŽIVAČKOG RADA
3. DEFINIRANJE PROGRAMA
4. DOSADAŠNJA SAZNANJA O POJAVI PUKOTINA U BETONU
5. ANALIZA PUKOTINA NASTALIH U SEKUNDARNIM TUNELSKIM OBLOGAMA
6. TEORIJSKI PRORAČUN SVOJSTAVA BETONA

7. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE SVOJSTAVA MLADOG BETONA PO KRITERIJU MINIMUMA PUKOTINA
8. ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH LABORATORIJSKIM ISTRAŽIVANJIMA
9. USPOREDBA REZULTATA SVOJSTAVA BETONA DOBIVENIH TEORIJSKIM PRORAČUNOM I LABORATORIJSKIM ISPITIVANJEM
10. OPTIMALIZACIJA SASTAVA BETONA ZA TUNELSKJE OBLOGE
11. ZAKLJUČAK

### 1. UVOD

U gotovo svim betonskim konstrukcijama prisutna je pojava pukotina.

Ovisno o vremenu nastanka pukotina, moguće je odrediti njihov uzrok.

Pukotine su mjesta oslabljenja betona, te je važno istražiti uzroke i mjere sprječavanja te pojave.

Istraživanjem pukotina u sekundarnim tunelskim oblogama ustanovljena su dva tipa pukotina:

- uzdužne pukotine u tjemenu
- radijalne pukotine u području bokova svoda

Jedan od značajnih uzroka pojave pukotina u tunelskoj oblozi su svojstva mladog betona.

### 2. CILJ ISTRAŽIVAČKOG RADA

Cilj i svrha istraživanja optimalnog sastava betona za tunelske obloge je u potrebi određivanja sastava i svojstava betona s minimumom rizika nastanka pukotina.

Utvdit će se optimalni sastavi betona za razne klimatske, projektne i tehnološke uvjete izvedbe tunelske obloge.

Istraživana su svojstva betona izrađenih od lokalnih materijala (cementa i agregata).

### 3. DEFINIRANJE PROGRAMA

Programom istraživanja obuhvaćena su:

- laboratorijska istraživanja,
- teorijska istraživanja

sastava betona varirajući: vrstu i količinu cementa, vrstu i maksimalno zrno agregata, primjenu različitih aditiva i mikroarmature i promjene temperature.

Provedena su i terenska istraživanja pukotina u našim postojećim cestovnim tunelima.

Radi kompleksnosti uzroka pojave pukotina u tunelskim oblogama, konstruirana je specijalna aparatura za određivanje naprezanja kod spriječene deformacije pri raznim temperaturnim uvjetima okoline.

### 4. DOSADAŠNJA SAZNAJNA O POJAVI PUKOTINA U BETONU

Uzroci nastanka pukotina:

- skupljanje i slijeganje mladog betona
- temperaturni utjecaji
- nepredviđena opterećenja
- slijeganje temelja
- kemijske reakcije
- požar

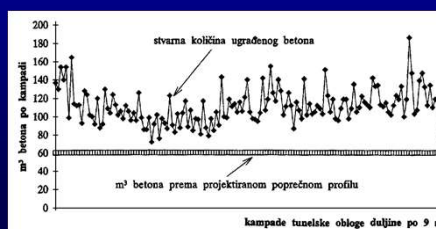
### 5. ANALIZA PUKOTINA NASTALIH U SEKUNDARNIM TUNELSKIM OBLOGAMA

Istraživanje stanja pukotinskog sistema u tunelskoj oblozi provedeno je analizirajući:

- projektno rješenje tunela
- geološki uvjeti stijenskog masiva
- izvođački podaci o načinu izvedbe
- vizuelni pregled obloge tunela na odabranim profilima

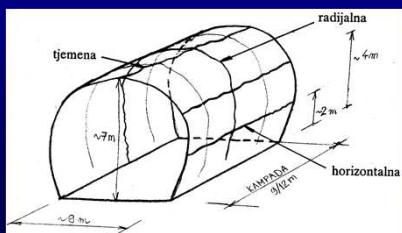
Zbog različite veličine prekoprofilnog iskopa u odnosu na teorijski profil, debljina betonske obloge nije jednolika.

Odnos projektirane i stvarno ugrađene količine betona u tunelsku oblogu može znatno varirati.



Tipične pukotine u betonskoj oblozi tunela "Učka" na pojedinim kampadama

- jedna ili više uzdužnih pukotina u tjemenu kalote
- jedna ili više radijalnih pukotina u bočnim zidovima
- horizontalne pukotine na visinama ~2 i 4 m od kolnika



### 6. TEORIJSKI PRORAČUN SVOJSTAVA BETONA

Određena su karakteristična svojstva betona koja utječu na pojavu pukotina u mladom betonu:

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća savijanjem
- vlačna čvrstoća cijepanjem
- modul elastičnosti
- deformacija od skupljanja i puzanja
- progib od vlastite težine
- termički proračun za ocjenu rizika pojave pukotina u betonu.

U termičkom proračunu razmatrani su sljedeći parametri:

- debljine sekundarne tunelske obloge  
( $d = 30, 60, 90 \text{ cm}$ )
- temperature betona u zimskim i ljetnim uvjetima  
( $T_{bz}=5, 10, 15^\circ\text{C}$ ;  $T_{bj}=20, 25, 30^\circ\text{C}$ )
- temperature okoline u tunelu u zimskim i ljetnim uvjetima  
( $T_{oz}=6, 8, 10, 12^\circ\text{C}$ ;  $T_{oj}=12, 14, 16, 18^\circ\text{C}$ )

Termički proračun zagrijavanja betona od procesa hidratacije, te hlađenja na temperaturu okoline proveden je prema Schmidtovoj metodi (ACI 207.1R)

Termičkim proračunom određeno je:

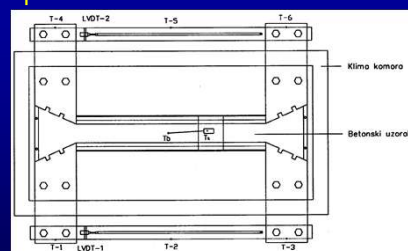
- maksimalno zagrijavanje betona
- naprezanja u betonu uzrokovana bržim hlađenjem površinskog sloja
- naprezanja u betonu uzrokovana spriječenosti deformiranja od hlađenja betona na temperaturu okoline

## 7. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE SVOJSTAVA MLADOG BETONA PO KRITERIJU MINIMUMA PUKOTINA

Istraživanje je provedeno u specijalnoj aparaturi za laboratorijsko mjerenje utjecaja sastava betona i okolne temperature na riziko pojave pukotina u beton



Opis aparature:



- LVDT - mjerenje promjene duljine bočnih čeličnih šipki
- $T_b$  - temperatura u betonu (na tri mjesta po visini uzorka)
- $T_k$  - temperatura u komori (okolina)
- $T_i$  - temperatura u bočnim čeličnim šipkama

## SASTAVI BETONA - IZBOR KOMPONENTI

- Cement:**
- dvije vrste cementa (PC 30z 45S, PC 15p 35S)
  - u ljetnim uvjetima: 300 kg i 330 kg
  - u zimskim uvjetima: 330 kg i 360 kg
- Agregat:**
- dvije vrste: riječni i drobljeni
  - max. zrno: 16 mm i 32 mm
- Aditivi:**
- aerant
  - plastifikator
  - polimer - latex

Vlakna za mikroarmiranje: polipropilenska  $L/d=30/0,15$

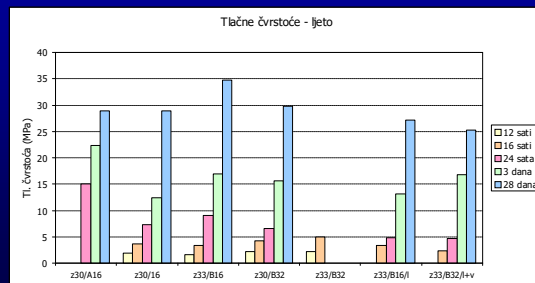
Odabrani sastavi betona za ljetne i zimske uvjete

Mješavina	Oznaka - ljetni uvjeti	Oznaka - zimski uvjeti
1	z30/A16/25	z36/B16/15
2	z30/16/25	z33/B16/15
3	z33/B16/25	z33/B32/15
4	z30/B32/25	p33/B16/15
5	z33/B32/25	p36/B16/15
6	z33/B16/25 +latex	z36/B32/15 +latex+vlakna
7	z33/B32/25 +latex+vlakna	z36/B16/15 +latex

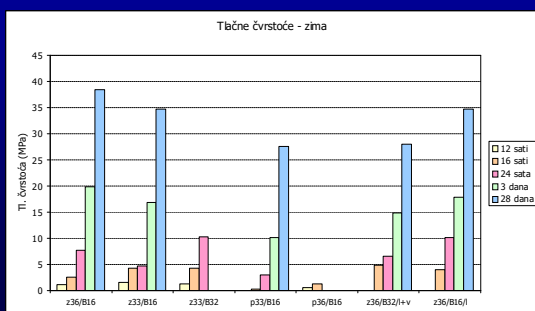
Ispitivanja fizikalnih i mehaničkih svojstava za odabrane sastave:

- tlačna čvrstoća betona
- vlačna čvrstoća betona savijanjem
- vlačna čvrstoća betona cijepanjem
- deformacija od skupljanja i puzanja
- progib
- Ring test

## Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona u ljetnim uvjetima



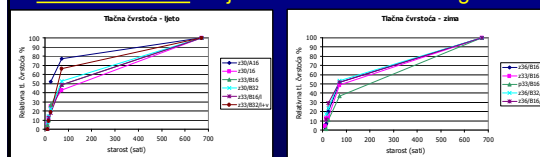
## Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće betona u zimskim uvjetima



## 8. ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH LABORATORIJSKIM ISTRAŽIVANJIMA

MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA  
→ NORMIRANJE REZULTATA

Tlačna čvrstoća - mješavine betona s 330 kg cementa



Prirast tlačne čvrstoće u:  
starosti 24 sata → ljetni uvjeti 18-26%, zimski uvjeti 11-14%  
starosti 3 dana → ljetni uvjeti 48-66%, zimski uvjeti 37-49%

### Vlačna čvrstoća savijanjem

Prirast vlačne čvrstoće u:

starosti 24 sata - ljetni uvjeti 23-45%, zimski uvjeti 17-25%  
starosti 3 dana - ljetni uvjeti 34-59%, zimski uvjeti 42-56%

### Vlačna čvrstoća cijepanjem

Prirast vlačne čvrstoće u:

starosti 24 sata - ljetni uvjeti 18-44%, zimski uvjeti 7-40%  
starosti 3 dana - ljetni uvjeti 49-73%, zimski uvjeti 41-68%

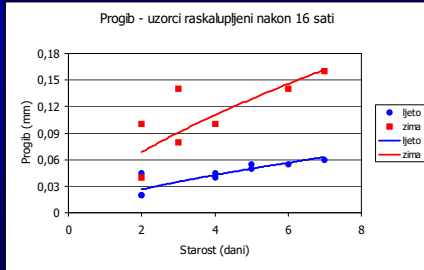
## DEFORMACIJSKA SVOJSTVA

### Skupljanje i puzanje

Ukupne deformacije od skupljanja i puzanja betona (s 330 kg cementa) u zimskim uvjetima iznose 30 - 50% od vrijednosti u ljetnim uvjetima.

Deformacija od puzanja je veća kod betona opterećenih u manjoj starosti.

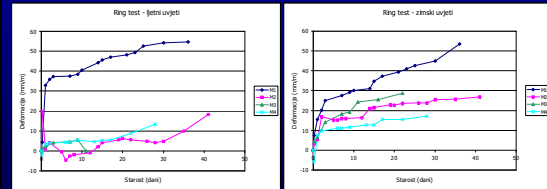
**Progib**



Progib od vlastite težine je veći u zimskim uvjetima (~2,5 puta)

**Ring test**

Deformacije izmjerene u ljetnim uvjetima su oko 20% manje od deformacija u zimskim uvjetima.



**ANALIZA REZULTATA IZ APARATURE ZA SIMULACIJU RAZLIČITIH KLIMATSKIH OKOLNOSTI**

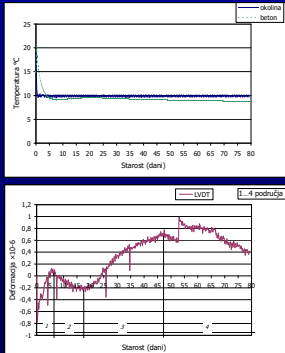
**Sastavi ispitanih betona**

Red. br.	Oznaka	Sastav	Temperatura (°C)	
			svježeg betona	okoline
1.	M-I	z330 / riječni 16 / SB50	20	10
2.	M-II	z330 / riječni 32 / SB50	20,8	10
3.	M-III	z330 / riječni 32 / SB50 / vlakna	22	10
4.	M-IV	z330 / riječni 32 / SB50 / vlakna	22,8	18
5.	M-V	z330 / riječni 32 / vlakna	21,6	14
6.	M-VI	z360 / drobljeni 32 / SB50	14	10
7.	M-VII	z360 / drobljeni 32 / SB50 / vlakna	17,6	10
8.	M-VIII	z360 / drobljeni 16 / SB50	10	14

Nakon ugradnje u kalup ponašanje uzorka ovisi o:

- (1) termičkom širenju uzorka (od hidratacije)
- (2) termičkom širenju ili skraćivanju uzorka (ovisno o temperaturi)
- (3) skupljanju betona uslijed evaporacije
- (4) promjeni mehaničkih svojstava mladog betona
- (5) relaksaciji napreznja uslijed tlačnog ili vlažnog puzanja

**Sastav betona oznake M-I (z330/riječni 16/SB50)**

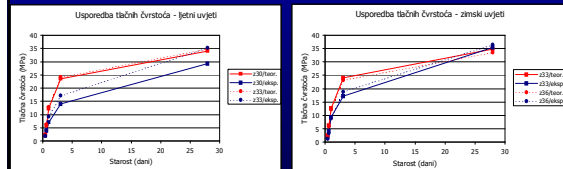


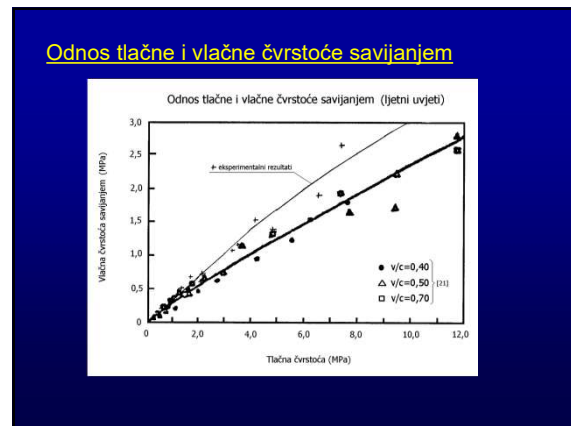
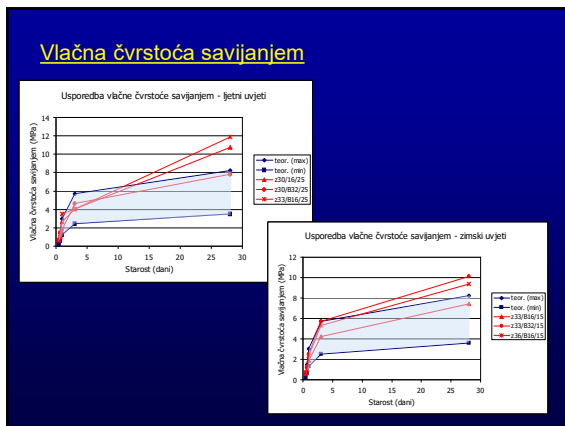
**Područje 1**

- predviđanje ponašanja betona u okolini
- predviđanje napreznja ili je skraćivanja (autogeni) napreznja
- prevladava skraćivanje betona uslijed evaporacije
- relaksacija uslijed tlačnog napreznja
- vrijeme hlađenja betona
- hlađenje betona → tlačna napreznja u betonu

**9. USPOREDBA REZULTATA SVOJSTAVA BETONA**

**Tlačna čvrstoća**





### Naprezanja od temperaturnih utjecaja

#### a) Naprezanja od hlađenja površine betona

UVJET	Debljina obloge (cm)	Teorijski proračunata vlačna naprezanja u betonu, $\sigma_t$ (MPa)	Eksperimentalno određena vlačna čvrstoća betona savijanjem (MPa)	
			starost 16 sati	starost 24 sata
Zima	30	0,46 - 1,06	0,31 - 1,2	1,01 - 2,53
	60	1,04 - 1,86		
	90	1,27 - 2,29		
Ljeto	30	0,74 - 1,37	0,98 - 1,49	1,77 - 4,00
	60	1,40 - 2,29		
	90	1,67 - 2,81		

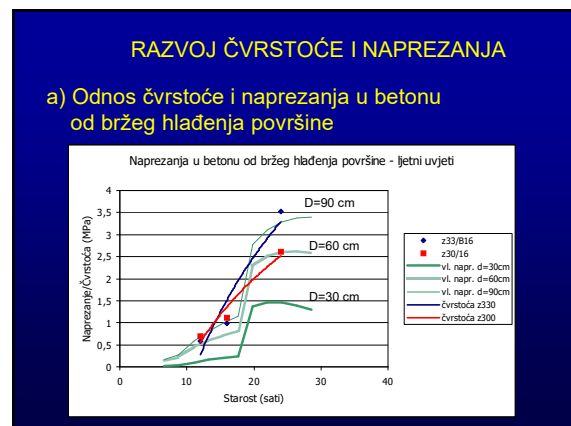
#### b) Naprezanja od spriječene deformacije

UVJET	Debljina obloge (cm)	Starost betona (dani)	Teorijski proračunata vlačna naprezanja u betonu, $\sigma_t$ (MPa)	Eksperimentalno određena vlačna čvrstoća betona savijanjem $f_t$ (MPa)	
				nakon 3 dana	nakon 28 dana
Zima	30	8,5 - 8,6	0,86 - 2,35	2,58 - 5,31	6,04 - 9,39
	60	11,3 - 11,42	1,78 - 3,25		
	90	15,46 - 15,71	2,04 - 3,54		
Ljeto	30	8,54	1,47 - 3,45	4,04 - 5,26	7,83 - 11,9
	60	11,25 - 11,29	2,39 - 3,98		
	90	15,38 - 15,54	2,61 - 4,24		

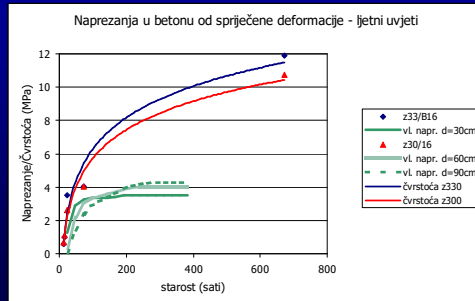
## 10. OPTIMALIZACIJA SASTAVA BETONA ZA TUNELSKJE OBLOGE

Parametri relevantni za pojavu pukotina u betonu

- Termohigrometrijski uvjeti - različiti sastavi za ljetne i za zimске uvjete
- Mehaničke karakteristike betona male starosti (tlačna i vlačna čvrstoća)
- Deformacijske karakteristike mladog betona (skupljanje i puzanje, istezljivost)



## b) Odnos čvrstoće i napreznja u betonu od spriječene deformacije - ljetni uvjeti



Za nastanak tipičnih pukotina u betonu tunelske obloge, bitni utjecaj imaju parametri klasificirani po grupama:

- relevantno svojstvo,
- tehnički parametar,
- uzrok - utjecaj,
- tehnološke mjere

Tehnički parametri sastava betona koji utječu na pojavu pukotina:

- tlačna čvrstoća,
- vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem,
- deformacija od skupljanja i puzanja,
- istezljivost
- vrijeme pojave pukotine

## 11. ZAKLJUČAK

*Optimalizirati sastave betona sukladno temperaturnim uvjetima okoline:*

**U ljetnim uvjetima** - beton izrađen s 330 kg/m<sup>3</sup> cementa i maksimalnim zrnom agregata 32 mm ima zadovoljavajuću ranu čvrstoću.

**U zimskim uvjetima** - beton izrađen s 360 kg/m<sup>3</sup> cementa maksimalnim zrnom agregata 16 mm ima zadovoljavajuću ranu čvrstoću.

- dodaci polimera latex-a i vlakana u betonu poboljšavaju svojstvo istezljivosti, a time umanjuju mogućnost pojave pukotina

- betoni s više cementa imaju veću deformaciju do nastanka pukotine, a pukotine se pojavljuju kod veće starosti betona

- betoni s manjim maksimalnim zrnom agregata uslijed hlađenja betona na temperaturu okoline manje se deformiraju

- kod betona s više cementa i većim maksimalnim zrnom agregata veća je relaksacija napreznja

- vlačna napreznja uslijed temperaturnih utjecaja su u ljetnim uvjetima veća nego u zimskim uvjetima

- izvoditi iskop tunela s što manje neravnina, odnosno iste predhodno zapuniti, kako bi sekundarna obloga bila jednolike debljine

- smanjenje početne temperature svježeg betona i primjena agregata koji imaju manji koeficijent temperaturnog širenja

- pravilna njega mladog betona posebno zaštitom od isušivanja površine betona, a bez naglih promjena temperature (polijevanje hladnom vodom)

- izvedba hidroizolacije po cijeloj konturi iskopnog profila smanjuje uklještenost sekundarne obloge s primarnom oblogom odnosno stijenskom masom, a time je manji riziko pojave pukotina.