

# Analiza pora u betonu - međulaboratorijska ispitivanja

---

**Mikulić, Dunja; Gabrijel, Ivan; Hranilović Trubić, Ana; Uzelac, Srđan**

Source / Izvornik: **Građevinar, 2007, 59, 387 - 393**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:942239>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Analiza pora u betonu - međulaboratorijska ispitivanja

Dunja Mikulić, Ivan Gabrijel, Ana Hranilović Trubić, Srđan Uzelac

## Ključne riječi

beton,  
pore u betonu,  
svježi beton,  
očvršli beton,  
tlačna metoda,  
mikroskopska analiza

## Key words

concrete,  
concrete voids, fresh  
concrete,  
hardened concrete,  
compression method,  
microscopic analysis

## Mots clés

béton,  
pores du béton,  
béton frais,  
béton durci,  
méthode de compression,  
analyse microscopique

## Ключевые слова

бетон, поры в бетоне,  
свежий бетон,  
затвердевший бетон,  
метод давления,  
микроскопический  
анализ

## Schlüsselworte

Beton,  
Poren im Beton,  
frischer Beton,  
erhärteter Beton,  
Druckverfahren,  
mikroskopische Analyse

D. Mikulić, I. Gabrijel, A. Hranilović Trubić, S. Uzelac

Izvorni znanstveni rad

## Analiza pora u betonu - međulaboratorijska ispitivanja

U radu su prikazani i analizirani rezultati ispitivanja karakteristika zračnih pora u svježem i očvrnulom betonu. U svježem betonu ispitivanja su provedena tlačnom metodom pomoću porometra i analizom zračnih pora uređajem Air void analyzer. Na očvrnulom betonu pore su analizirane mikroskopskom analizom, uređajem pod nazivom RapidAir 457. Mjerene karakteristike zračnih pora su: ukupna količina, faktor razmaka i specifična površina. Uspoređeni su rezultati iz dva laboratorija.

D. Mikulić, I. Gabrijel, A. Hranilović Trubić, S. Uzelac

Original scientific paper

## Analysis of voids in concrete - interlaboratory testing

Results obtained by testing properties of air voids in fresh and hardened concrete are presented and analysed. In fresh concrete, the testing was conducted by compression using porometer and by air void analysis using the air void analyser. The voids in hardened concrete were analyzed through microscopic analysis using the device called the RapidAir 457. The following properties of air voids were measured: total quantity, spacing factor and specific area. The results obtained by two laboratories were then compared.

D. Mikulić, I. Gabrijel, A. Hranilović Trubić, S. Uzelac

Ouvrage scientifique original

## Analyse des pores du béton - essais inter-laboratoires

Les résultats obtenus par l'analyse des caractéristiques des pores du béton dans le béton frais et durci sont présentés et analysés. Dans le béton frais, les essais ont été faits par compression à l'aide du poromètre, et en analysant les pores à l'aide de l'analyseur des pores d'air. Les pores contenus dans le béton durci ont été analysés par l'analyse microscopique à l'aide du dispositif RapidAir 457. Les propriétés suivantes des pores d'air ont été mesurées: quantité totale, facteur d'espacement, et aire spécifique. Les résultats obtenus dans les deux laboratoires ont été comparés.

Д. Микулич, И. Габриел, А. Хранилович Трубич, С. Узелац

Оригинальная научная работа

## Анализ пор в бетоне – междулабораторные испытания

В работе показаны и анализированы результаты испытаний характеристик воздушных пор в свежем и затвердевшем бетоне. В свежем бетоне испытания проведены методом давления при помощи порометра и анализом воздушных пор аппаратом Air void analyzer. На затвердевшем бетоне поры анализировались микроскопическим анализом, аппаратом под названием RapidAir 457. Измерены следующие характеристики воздушных пор: общее количество, фактор расстояния между порами и их удельная поверхность. Сравнивались результаты из двух лабораторий.

D. Mikulić, I. Gabrijel, A. Hranilović Trubić, S. Uzelac

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Analyse der Betonporen - Untersuchungen zweier Laboratorien

Im Artikel sind Ergebnisse der Untersuchungen der Kennziffern von Luftporen im frischen und erhärtetem Beton dargestellt und analysiert. Im frischen Beton wurden die Untersuchungen mit dem Druckverfahren mit Hilfe des Porometers und mit der Analyse der Luftporen mit der Anlage Air void analyser durchgeführt. Am erhärteten Beton wurden die Poren mikroskopisch analysiert, mit der Anlage genannt Rapid Air 457. Die gemessenen Kennziffern der Luftporen sind: Gesamtmenge, Abstandfaktor und spezifische Fläche. Die Ergebnisse aus zwei Laboratorien sind verglichen.

Autor: Prof. dr. sc. **Dunja Mikulić**, dipl. ing. fizike, **Ivan Gabrijel**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; mr. sc. **Ana Hranilović Trubić**, dipl. ing. građ.; **Srđan Uzelac**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb

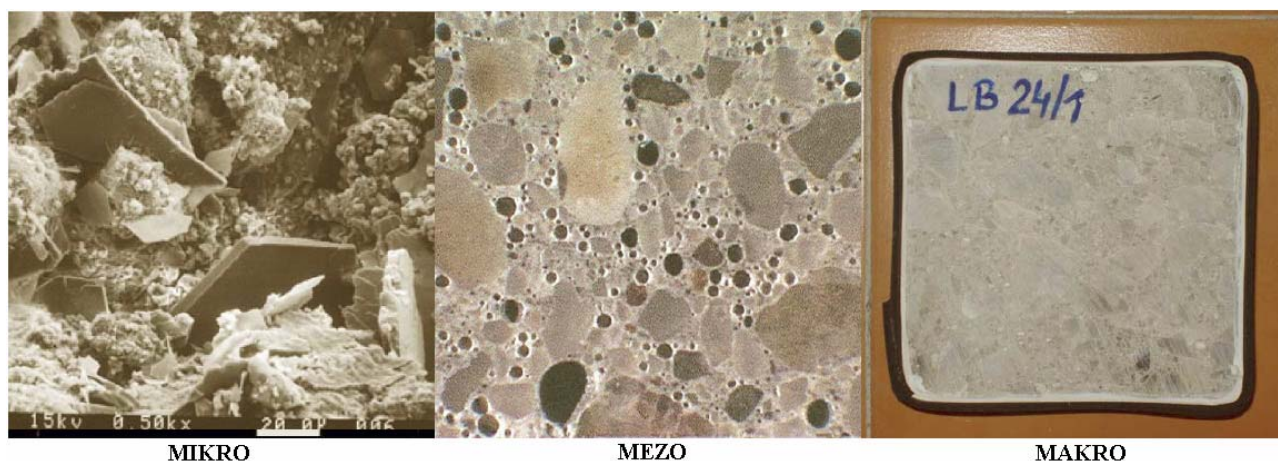
## 1 Uvod

Beton je kompozitni materijal dobiven miješanjem cementa, vode, agregata i, danas gotovo neizostavnih, kemijskih i/ili mineralnih dodataka. Po svojoj prirodi beton je porozni materijal. Pore u betonu mogu se podijeliti u četiri skupine.

Prvu skupinu čine pore gela. Hidratacijom cementa nastaju produkti hidratacije. Glavni su produkti hidratacije kalcij-silikat-hidrati (C-S-H) koji stvaraju kvazislojevitú strukturu s prosječnim razmakom između slojeva 1 nm-3 nm. Prostori između slojeva ispunjeni su međuslojnom vodom vezanom van der Waalsovím i vodikovím vezama. Takvi prostori nazivaju se pore gela jer produkti hidratacije cementa imaju svojstva slična gelu. Količina

U cementnom kamenu, na kontaktnoj površini cementnog kamena i agregata, dolazi do formiranja svih vrsta pora, kao i do njihova povećanog udjela [1, 2, 3].

U vrlo složenom kompozitu kakav je beton, raspon veličina krutih čestica proteže se na nekoliko redova veličina. Od zrna agregata, čija se veličina mjeri u milimetrima, do čestica cementnoga gela mjerljivih u nanometrima. Pri proučavanju međudjelovanja komponenata betona ili betona i okoline razlikuju se tri razine promatranja strukture. To su mikrorazina, mezorazina i makrorazina (slika 1.). Makrorazina se još naziva i inženjerskom razinom. Na toj razini beton se smatra kvaziizotropnim i samo na toj razini mogu se definirati njegovi parametri poput čvrstoće, modula elastičnosti itd. [3, 4, 5].



Slika 1. Beton promatran na mikrorazini, mezorazini i makrorazini

pora gela, za hidratizirani dio cementnog kamena, praktično je konstantna za sve cimente i na njihovu se količinu ne može utjecati.

Drugu skupinu čine kapilarne pore. Te su pore nastale na mjestima koja nisu ispunili produkti hidratacije, a njihova količina ovisi o količini vode upotrijebljenoj za izradu betona. Kapilarne pore povezane su u mrežu koja se proteže kroz cijelu strukturu cementnog kamena i kroz njih se može odvijati protok tvari. Tipični promjeri kapilarnih pora kreću se od 5 nm-1000 nm.

Treću skupinu pora čini zahvaćeni zrak. Zahvaćeni zrak su pore koje su nastale tijekom miješanja i ugradnje betona ili zbog naknadnog izdvajanja vode. Svaki beton sadrži određenu količinu ovih pora. Razlikuju se od ostalih skupina pora po veličini (1 mm i više) i nepravilnom obliku (nisu sferične).

Četvrtu skupinu pora čini uvučeni zrak. Uvućeni je zrak namjerno stvoren u betonu s pomoću dodataka za uvlačenje zraka (aerantata); sferičnog su oblika s tipičnim promjerima od 5  $\mu$ m-1250  $\mu$ m.

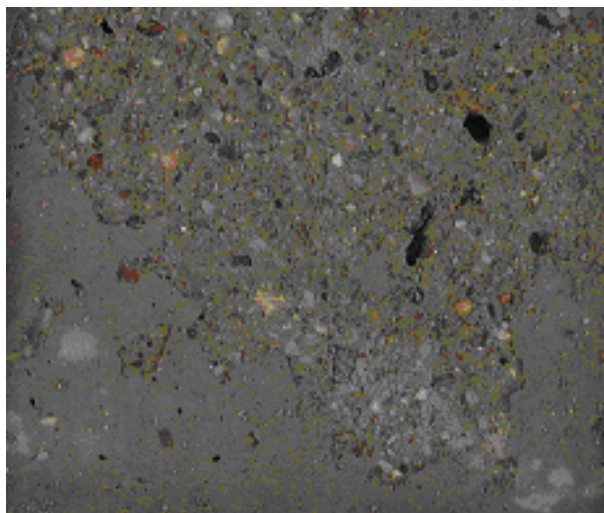
## 2 Razaranje betona smrzavanjem i odmrzavanjem

Kod betona izloženog smrzavanju i odmrzavanju razlikuju se dva tipa oštećenja:

1. *Unutarnje oštećenje* uzrokovano smrzavanjem vode u betonu. Ovo je oštećenje uvijek ograničeno na dijelove betona gdje je stupanj zasićenosti vodom veći od kritične vrijednosti zasićenja. Unutarnja oštećenja uzrokuju smanjenje tlačne i vlačne čvrstoće, modula elastičnosti i prionjivosti betona i armature.
2. *Ljuštenje površine* uzrokovano smrzavanjem površine betona koja je u kontaktu sa slabo zasićenom slanom otopinom (slika 2.). Početno ljuštenje razara samo cementni kamen, dok zrna agregata ostaju netaknuta. Kako ljuštenje napreduje sve dublje, zrna agregata počinju se odvajati od cementnog kamena.

Da bi se razjasnili mehanizmi koji razaraju beton zbog smrzavanja i odmrzavanja potrebno je promatrati beton na mezorazini. Na mezorazini beton se promatra kao kompozit sastavljen od cementnog kamena, agregata i pora. Ponašanje betona poradi smrzavanja i odmrzava-

nja ovisi o strukturi pora, količini vode koja se nalazi u porama i temperaturi. Struktura pora odnosi se na njihovu veličinu, količinu, vrstu, distribuciju i povezanost. Poseban utjecaj na otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje ima količina i distribucija pora uvučenog zraka.



Slika 2. Primjer oštećenja: ljuštenje površine [6]

Kada se ispituje otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje moguće ju je mjeriti na makrorazini i mezorazini. Ispitivanja na makrorazini podrazumijevaju izlaganje uzoraka ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa soli ili bez soli za odmrzavanje i mjerenjem promjena nekih svojstava (čvrstoća, modul elastičnosti) ili mjerenjem količine oljuštenog materijala [7, 8, 9].

Ispitivanje na mezorazini podrazumijeva određivanje svojstava pora uvučenog zraka. Mjera otpornosti na smrzavanje pri tome je faktor razmaka pora (Powersov faktor razmaka). Ustanovljeno je da je pri izlaganju betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja bez soli beton otporan ako mu je faktor razmaka pora manji od 0,23 mm - 0,25 mm. Pri izlaganju betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa soli nije uočena tako dobra korelacija otpornosti s faktorom razmaka pora, ali postoje indicije da faktor razmaka treba biti najviše 0,18 mm - 0,20 mm [10, 11].

### 3 Provedena ispitivanja

U ovome radu prikazani su rezultati ispitivanja karakteristika zračnih pora u betonu. Ispitivanja su provedena u dva laboratorija: laboratoriju Zavoda za betonske i zidane konstrukcije u Karlovcu-Instituta građevinarstva Hrvatske (IGH) i laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu (GFZ), kako bi se pokazala obnovljivost mjernih rezultata. Obnovljivost je bliskost slaganja između mjernih rezultata iste mjerene veličine izvedene u promijenjenim mjernim uvjetima.

U laboratoriju IGH izrađeno je 9 mješavina betona različitih sastava označenih slovima od A do I te je analiziran utjecaj v/c omjera i količine aeranta na svojstva zračnih pora. Sastavi mješavina prikazani su na slici 3. Mješavine A, B i C izrađene su bez dodatka aeranta, ali s različitim v/c omjerima; mješavine D do I izrađene su s različitim količinama aeranta i različitim v/c omjerima. Uspoređeni su rezultati ispitivanja količine, faktora razmaka i specifične ploštine zračnih pora. Ispitivanjima karakteristika zračnih pora ocijenjena je otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje. Kriterij za postignutu otpornost na smrzavanje i odmrzavanje sa solima za odmrzavanje bio je faktor razmaka pora  $< 0,2$  mm. Rezultati o postignutoj otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje mjerenjem faktora razmaka pora, provjereni su izlaganjem uzoraka ciklusima smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje. Kriterij u slučaju ispitivanja smrzavanjem i odmrzavanjem sa solima za odmrzavanje bio je gubitak mase  $< 1,0$  kg/m<sup>2</sup> nakon 28 ciklusa [12, 13].

U laboratoriju GFZ provedeno je ispitivanje da bi se ustanovilo koliko će se razlikovati rezultati ispitivanja zračnih pora u betonu (količina, faktor razmaka i specifična ploština) ako provedemo ispitivanja na 5 mješavina betona jednakog sastava. Na temelju rezultata ispitivanja dobivenih u laboratoriju IGH, odabran je sastav betona oznake G. Sastav betona G odabran je zbog postignute otpornosti na cikluse smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje i relativno dobrog slaganja rezultata ispitivanja faktora razmaka pora mjenog dvjema metodama. Pritom je posebna pozornost posvećena pripremi komponenata, miješanju i ugradnji betona na

| SASTAVI BETONSKIH MJEŠAVINA |                     |      |      |      |      |      |     |      |      |
|-----------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
|                             | A                   | B    | C    | D    | E    | F    | G   | H    | I    |
| CEMENT (kg)                 | 300                 | 300  | 300  | 300  | 300  | 300  | 300 | 300  | 300  |
| v/c                         | 0,5                 | 0,52 | 0,54 | 0,5  | 0,52 | 0,54 | 0,5 | 0,52 | 0,52 |
| KOLIČINA AERANTA (kg)       | 0                   | 0    | 0    | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,6 | 0,6  | 0,9  |
| FRAKCIJE AGREGATA           | 0-4, 8-16, 16-32 mm |      |      |      |      |      |     |      |      |

Slika 3. Sastavi betona

jednak način za svih 5 mješavina. Ispitivanja svojstava svježeg i očvrnulog betona provodile su iste osobe na istim uređajima da bi se pokazala ponovljivost rezultata. Pod pojmom ponovljivosti razumijevamo bliskost slaganja rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedene u istim mjernim uvjetima

### 3.1 Materijali i način pripravljanja betona

Sve su mješavine pripravljene s istim komponentama. Upotrijebljen je cement Dalmacija-cementa tipa CEM II/A-S 42,5R. Uporabljen je drobljeni agregat frakcija 0-4 mm, 8-16 mm i 16-32 mm iz nalazišta Tounj. Dodatak za uvlačenje zraka bio je Cementol ETA S proizvođača TKK Serpenica. Postupak miješanja proveden je prema normi HRN EN 480-1:2004 - Dodaci betonu, mortu i mortu za injektiranje – Ispitne metode – 1. dio: Referencijski beton i referencijski mort za ispitivanje. Beton se u kalupe ugrađivao u dva sloja i svaki je sloj bio vibriran na vibrostolu.

### 3.2 Metode ispitivanja

Svojstva betona u svježem i očvrnulom stanju provedena su prema normama prikazanim na slici 4. U radu su primijenjene tri metode ispitivanja zračnih pora u betonu. U svježem betonu ispitivanja su provedena tlačnom metodom s pomoću porometra (TM) i analizatorom zračnih pora (AVA - Air void analyzer). Na očvrnulom betonu pore su analizirane mikroskopskom analizom (MA), uređajem pod nazivom RapidAir 457. Mjerenje su karakteristike zračnih pora: ukupna količina zra-

ka, faktor razmaka ( $\bar{L}$ ) i specifična ploština ( $\alpha$ ). Ukupna količina zračnih pora izmjerena je svima trima metodama, dok su faktor razmaka pora i specifična ploština izmjereni analizatorom zračnih pora na svježem betonu i mikroskopskom analizom na očvrnulom betonu.

## 4 Analiza rezultata ispitivanja

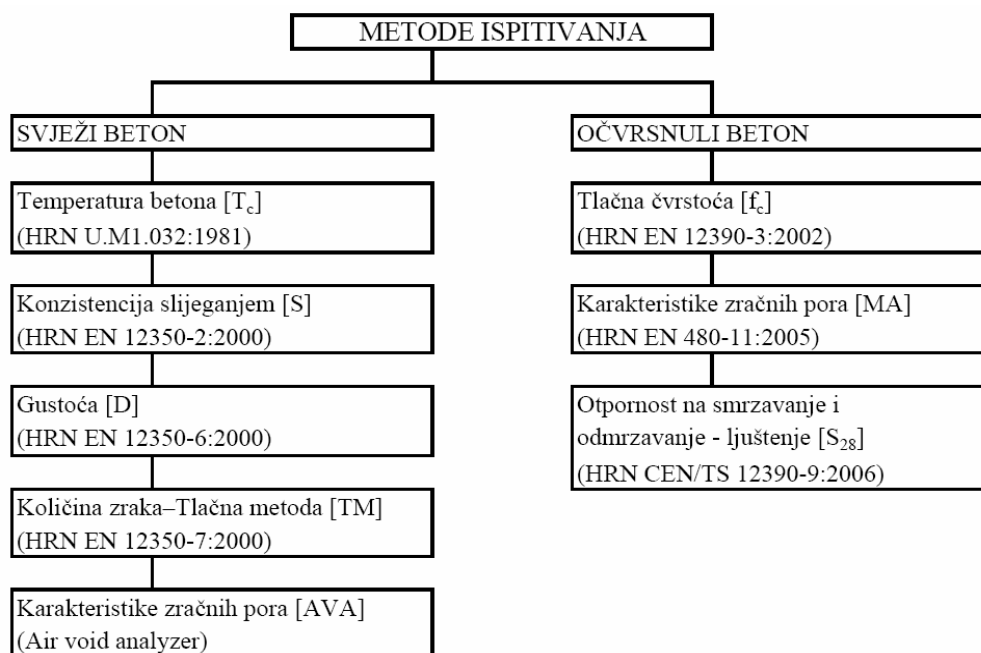
### 4.1 Institut građevinarstva Hrvatske - laboratorij Zavoda za betonske i zidane konstrukcije u Karlovcu

Rezultati ispitivanja provedenih u laboratoriju IGH navedeni su u tablici 1. Prikazani su rezultati analize zračnih pora u betonu i otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje te rezultati ispitivanja temperature svježeg betona, konzistencije slijeganjem, gustoće i tlačne čvrstoće.

Mješavine A, B i C izrađene su bez dodatka aeranta. Kod tih mješavina izmjerene su male količine zraka u betonu osim kod mješavine B u slučaju ispitivanja analizatorom zračnih pora (tablica 1.). Mješavine D do I izrađene su s dodatkom aeranta te su s pomoću sve tri metode ispitivanja dobivene velike količine zraka u betonu. Mikroskopskom analizom dobivene su veće vrijednosti specifične ploštine ( $\alpha$ ) i manji faktori razmaka pora ( $\bar{L}$ ) u odnosu na rezultate dobivene analizatorom zračnih pora kod svih mješavina s dodatkom aeranta (tablica 1.).

Referencijski betoni (mješavine A, B i C) bez zaštitnog djelovanja aeranta nisu zadovoljili kriterije otpornosti na

smrzavanje sa solima ni po jednom kriteriju. Mješavine D, E, G i H zadovoljile su uvjete otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje u sve tri metode ispitivanja. Mješavine F i I nisu zadovoljile uvjete otpornosti analizom u svježem betonu, dok su zadovoljile uvjete otpornosti mjerenom ostalim dvjema metodama u očvrnulom betonu. Mješavina F ima najveći v/c omjer, a mješavina I najveću količinu aeranta. Utjecaj v/c omjera i količine aeranta na rezultate ispitivanja analizatorom zračnih pora trebalo bi dodatno istražiti.

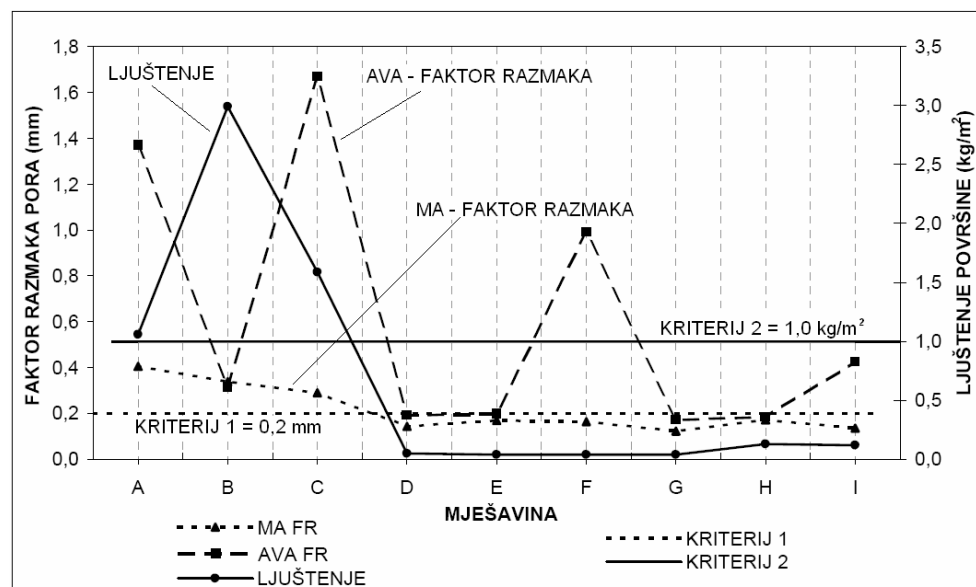


Slika 4. Shematski prikaz metoda ispitivanja

Tablica 1. Rezultati ispitivanja provedenih u laboratoriju IGH Zavoda za betonske i zidane konstrukcije

| Mješavina                      | A    | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     |       |
|--------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_c$ [°C]                     | 22,9 | 20,6  | 21,8  | 20,9  | 21,8  | 22,0  | 20,6  | 21,9  | 20,6  |       |
| S [mm]                         | 115  | 70    | 160   | 120   | 125   | 160   | 140   | 150   | 150   |       |
| D [kg/m <sup>3</sup> ]         | 2389 | 2264  | 2408  | 2270  | 2258  | 2277  | 2252  | 2245  | 2220  |       |
| $f_c$ [MPa]                    | 45,1 | 45,8  | 47,8  | 38,5  | 33,9  | 35,0  | 36,6  | 32,5  | 30,8  |       |
| Karakteristike zračnih pora    |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Količina zraka [%]             | TM   | 1,7   | 1,5   | 1,2   | 5,6   | 5,7   | 5,1   | 6,0   | 6,0   | 6,5   |
|                                | AVA  | 0,6   | 4,1   | 0,7   | 8,0   | 8,5   | 3,5   | 9,0   | 7,9   | 4,5   |
|                                | MA   | 2,83  | 1,76  | 0,94  | 6,53  | 5,43  | 6,48  | 6,72  | 6,30  | 8,46  |
| $[\bar{L}]$ [mm]               | AVA  | 1,370 | 0,316 | 1,668 | 0,192 | 0,198 | 0,992 | 0,172 | 0,185 | 0,426 |
|                                | MA   | 0,405 | 0,340 | 0,291 | 0,143 | 0,170 | 0,164 | 0,123 | 0,172 | 0,135 |
| $\alpha$ [mm <sup>-1</sup> ]   | AVA  | 9,3   | 17,4  | 7,1   | 21,0  | 22,5  | 6,0   | 25,0  | 20,5  | 12,4  |
|                                | MA   | 15,00 | 22,02 | 33,54 | 33,81 | 26,72 | 24,78 | 29,82 | 24,46 | 22,80 |
| Ljuštenje [kg/m <sup>2</sup> ] | 1,06 | 2,99  | 1,59  | 0,05  | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,13  | 0,12  |

Na slici 5. uspoređeni su rezultati ispitivanja faktora razmaka pora i ljuštenja površine nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima, kao i kriteriji. Kriterij 1 odnosi se na zahtjev da faktor razmaka pora bude < 0,2 mm, a kriterij 2 na zahtjev da ljuštenje površine bude manje od 1,0 kg/m<sup>2</sup> nakon 28 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Na dijagramu slike 5. faktor razmaka pora izmjeren je mikroskopskom analizom i analizatorom zračnih pora.



Slika 5. Usporedba otpornosti betona ispitivanjem faktora razmaka pora i ljuštenja površine

Iz dijagrama sa slike 5. može se uočiti da se ocjena otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje u slučaju ispitivanja mikroskopskom analizom u svim slučajevima slaže s ocjenom danom ljuštenjem površine. Kod mješavina F i I ocjena otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje ispitana analizatorom zračnih pora nije sukladna s ocjenom ispitivanja ljuštenja površine nakon 28 ciklusa smrzavanja sa soli za odmrzavanje.

#### 4.2 Građevinski fakultet u Zagrebu - laboratorij Zavoda za materijale

Na temelju rezultata dobivenih u laboratoriju IGH, odabran je sastav betona oznake G (slika 3.). Budući da je izrađeno 5 mješavina istovjetnoga sastava, mješavine su označene oznakama G1-G5. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 2. U tablici 2. prikazane su i srednje vrijednosti ( $\bar{x}$ ) te standardne devijacije ( $s$ ) karakteristika zračnih pora.

Na slikama 6., 7. i 8. uspoređeni su rezultati ispitivanja karakteristika zračnih pora na mješavinama sastava G dobivenim u laboratorijima IGH i GFZ. Usporedba rezultata prikazana je s pomoću standardne devijacije ( $s$ ) (tablica 2.). Rezultati ispitivanja količine zraka tlačnom metodom u laboratoriju IGH nalaze su u intervalu od jedne standardne devijacije ( $\pm s$ ) dobivene u laboratoriju GFZ, a ispitivanjem mikroskopskom analizom u intervalu od dvije standardne devijacije ( $\pm 2s$ ). Pri ispitivanju količine zraka AVA metodom rezultati dobiveni u laboratoriju IGH izlaze iz intervala od tri standardne devijacije ( $\pm 3s$ ) (slika 6.).

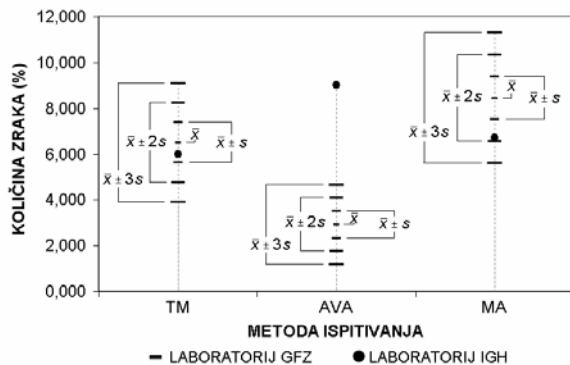
Faktor razmaka pora, izmjeren AVA metodom u laboratoriju IGH, nalazi se unutar granica jedne standardne devijacije dobivene u laboratoriju GFZ, dok je u slučaju mješavina F i I ocjena otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje ispitana analizatorom zračnih pora nije sukladna s ocjenom ispitivanja ljuštenja površine nakon 28 ciklusa smrzavanja sa soli za odmrzavanje.

Faktor razmaka pora, izmjeren AVA metodom u laboratoriju IGH, nalazi se unutar granica jedne standardne devijacije dobivene u laboratoriju GFZ, dok je u slučaju mješavina F i I ocjena otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje ispitana analizatorom zračnih pora nije sukladna s ocjenom ispitivanja ljuštenja površine nakon 28 ciklusa smrzavanja sa soli za odmrzavanje.

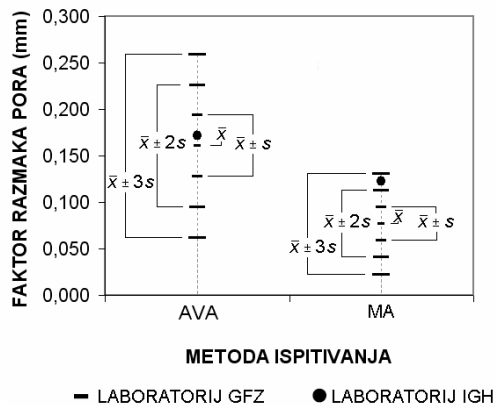
Tablica 2. Rezultati ispitivanja mješavina sastava G

| Mješavina                    | G1   | G2    | G3    | G4    | G5    | Ispitivanja obavljena u laboratoriju<br>Zavoda za materijale<br>Građevinskog fakulteta u Zagrebu |                           |       |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--|---------------------------|-------|
| $T_c$ [°C]                   | 26,2 | 26,0  | 26,2  | 26,3  | 27,0  |  |                           |       |
| S [mm]                       | 65   | 55    | 60    | 65    | 85    |  |                           |       |
| D [kg/m <sup>3</sup> ]       | 2180 | 2250  | 2260  | 2280  | 2240  |  |                           |       |
| $f_c$ [MPa]                  | 24,1 | 30,1  | 30,4  | 32,1  | 28,1  |  |                           |       |
| Karakteristike zračnih pora  |      |       |       |       |       | Srednja vrijednost ( $\bar{X}$ )   | Standardna devijacija (s) |       |
| Količina zraka [%]           | TM   | 7,7   | 6,3   | 5,8   | 5,6   | 7,0  | 6,48                      | 0,87  |
|                              | AVA  | 3,9   | 2,5   | 2,5   | 2,9   | 2,7  | 2,90                      | 0,58  |
|                              | MA   | 8,19  | 8,76  | 9,36  | 6,91  | 8,93   | 8,43                      | 0,95  |
| $[\bar{L}]$ [mm]             | AVA  | 0,132 | 0,153 | 0,133 | 0,211 | 0,172  | 0,160                     | 0,033 |
|                              | MA   | 0,103 | 0,083 | 0,057 | 0,076 | 0,063  | 0,076                     | 0,018 |
| $\alpha$ [mm <sup>-1</sup> ] | AVA  | 39,8  | 41,5  | 47,8  | 28,0  | 35,6   | 38,5                      | 7,4   |
|                              | MA   | 36,4  | 38,1  | 42,3  | 48,6  | 44,8   | 42,0                      | 5,0   |

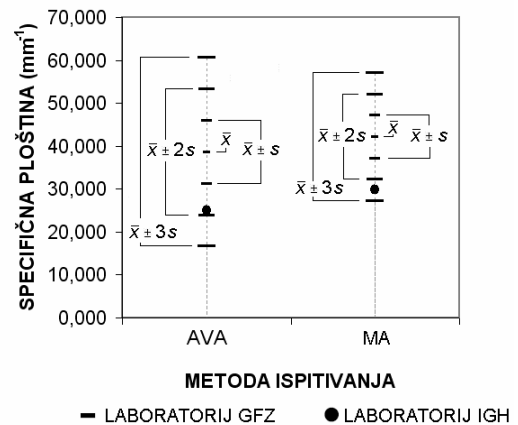
renja mikroskopskom analizom rezultat u granicama od tri standardne devijacije (slika 7.). Specifična ploština, izmjerena AVA metodom u laboratoriju IGH, nalazi se unutar granica dviju standardnih devijacija vrijednosti dobivenih u laboratoriju GFZ, dok je u slučaju mjerenja mikroskopskom analizom rezultat u granicama od tri standardne devijacije (slika 8.).



Slika 6. Usporedba rezultata ispitivanja količine zraka dobivenih u laboratorijima IGH i GFZ za mješavine sastava G



Slika 7. Usporedba rezultata ispitivanja faktora razmaka pora dobivenih u laboratorijima IGH i GFZ za mješavine sastava G



Slika 8. Usporedba rezultata ispitivanja specifične ploštine pora dobivenih u laboratorijima IGH i GFZ za mješavine sastava G

### 5 Zaključak

U ovome radu prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje provedenih u laboratoriju Karlovac, Zavoda za betonske i zidane konstrukcije Instituta građevinarstva Hrvatske i laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

Za određivanje otpornosti betona na smrzavanje i odmrzavanje uporabljene su tri metode ispitivanja: ciklusi smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje, analiza zračnih pora u svježem betonu i mikroskopska analiza.

Referencijski betoni bez zaštitnog djelovanja aeranta nisu zadovoljili kriterije otpornosti na smrzavanje sa solima prema normama HRN EN 480-11:2005, HRN CEN/TS 12390-9:2006 niti analizatorom zračnih pora (slika 5.).

Prednost ispitivanja svježeg betona (analizator zračnih pora) jest „trenutačna“ spoznaja o mogućoj otpornosti

betona na djelovanje smrzavanja. Metodu karakterizira visoka podudarnost s metodom ispitivanja očvrnulog betona (HRN EN 480-11:2005) i procjenom na strani sigurnosti u području upotrebljivosti metode.

Razlike u rezultatima ispitivanja dobivenim metodama na različitim nivoima promatranja betona uzrokovane su posebnostima svake metode.

Usporedbom rezultata dobivenih na mješavini G u oba laboratorija ustanovljeno je dobro slaganje rezultata mjerenja parametara zračnih pora (slike 6. do 8.), tj. rezultati dobiveni u laboratoriju IGH nalaze se unutar intervala  $\bar{x} \pm 3s$  određenog na temelju rezultata ispitivanja u laboratoriju GFZ. Veliko odstupanje uočeno je u količini zraka dobiveno AVA metodom (slika 6.). Ovdje je važno naglasiti da svrha AVA metode nije mjerenje količine zraka u betonu. Uzrok tome je što je veličina

uzorka, statistički gledano, premala da se uzmu u obzir zračne pore veće od 3 mm. S druge strane to ne utječe na upotrebljivost AVA metode za karakterizaciju strukture pora u betonu [14].

Razlike u rezultatima ispitivanja unutar iste metode provedenim na različitim mjestima i pod izmijenjenim okolnostima (obnovljivost) pokazuje važnost međulaboratorijske suradnje te procjenjivanja svih mogućih izvora mjerne nesigurnosti (slike 6. do 8.). Uzroci tih razlika mogu se tražiti u svojstvima svježeg betona, tj. temperaturi i konzistenciji, ali također i u mogućim pogreškama tijekom mjerenja.

Ispitivanja prikazana u ovome radu pokazala su nam važnost ispitivanja ponovljivosti (tablica 2.) i obnovljivosti rezultata te će se istraživanja nastaviti na većem broju mješavina različitih sastava u više laboratorija.

#### Zahvala

Ovaj rad je proveden u sklopu znanstvenog projekta „Od nano do makrostrukture betona“, 082-0822161-2990 koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa.

#### LITERATURA

- [1] Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, 4th edition, John Wiley & Sons INC., New York, 1996.
- [2] Pigeon, M.; Pleau R.: *Durability of Concrete in Cold Climates*, E&FN Spon, London, 1995.
- [3] Ukrainczyk, V.: *Beton struktura svojstva tehnologija*, Alcor, Zagreb, 1994.
- [4] Mikulić, D.; Gucunski, N. and Maher, A. *Blacktop resurfacing of bridge decks, Report No. FHWA 2001-011*, New Jersey Department of Transportation, U.S.A., 2001.
- [5] Sekulić D., Mikulić D., Kuzminski D. *Utjecaj mikrostrukture cementne paste na tlačnu čvrstoću betona*, Građevinar 50 (1998) 3, 145-152
- [6] Ille, M.; Sekulić, D.: *Mehanizmi i modeliranje oštećenja betona djelovanjem smrzavanja*, Građevinar 58 (2006) 1, 15-23
- [7] Bjegović, D., Mikulić, D., Ukrainczyk, V. *Theoretical Aspect and Methods of Testing Concrete Resistance to Freezing and Deicing Chemicals*, Proceedings of Katarine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability, Atlanta, USA, April 27 - May 1, 1987, Vol.1, 947-972
- [8] Setzer, M.J.; Fagerlund, G.; Janssen, D.J.: *CDF TEST-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF)* Materials and Structures 29 (1996) 9, 523-528
- [9] Setzer, M.J.; Heine, P.; Kasperek, S.; Palecki, S.; Auberg, R.; Feldrappe, V.; Siebel, E.: *Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test-Reference method and alternative methods A and B*, Materials and Structures 37 (2004) 10, 743-753
- [10] Powers, Treval C.: *The properties of fresh concrete*, Wiley, New York, 1968.
- [11] Fagerlund, G.: *Manual for assessing concrete structures affected by frost*, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, 2001.
- [12] Hranilović Trubić, A.: *Otpornost betona na djelovanje mraza i soli*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, magistarski rad, Zagreb, 2006.
- [13] Uzelac, S.; Hranilović Trubić, A.; Šustić I.: *Projektiranje sastava betona visoke otpornosti na smrzavanje*, Građevinar 59 (2007) 1, 1-5
- [14] *Quality assurance of concrete based on testing of the fresh, still plastic concrete*, Brite/Euram Project No: BE-3376-89