



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



**Ivan Lukić**

**KOMPARATIVNA ANALIZA OSNOVNIH  
SVOJSTAVA KONSTRUKCIJSKIH BETONA  
SPRAVLJENIH SA RAZLIČITIM VRSTAMA  
LAKIH AGREGATA**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**Novi Sad, 2015.**





УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>	
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>	
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Штампана грађа
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација
Аутор, <b>АУ:</b>	Иван Лукић
Ментор, <b>МН:</b>	Проф. др Властимир Радоњанин Проф. др Мирјана Малешев
Наслов рада, <b>НР:</b>	Компаративна анализа основних својстава конструкцијских бетона справљених са различитим врстама лаких агрегата
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски/Енглески
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Србија
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	Војводина
Година, <b>ГО:</b>	2015.
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, 21000, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	7/332/100 /55/135/0/17
Научна област, <b>НО:</b>	Грађевинско инжењерство
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Теорија и технологија бетона
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Лаки агрегат, лакоагрегатни бетон, минерални додатак, чврстоћа при притиску, модул елстичности, скупљање, упијање воде
<b>УДК</b>	
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН
Важна напомена, <b>ВН:</b>	-
Извод, <b>ИЗ:</b>	У дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања на основу којих је извршена компаративна анализа утицаја различитих врста лаких агрегата и врсте и количине цемента на основна физичко-механичка својства лакоагрегатних бетона. Такође, анализирана је и могућност замене дела цемента минералним додацима у циљу смањења негативних утицаја производње бетона на животну средину. Резултати су показали да је применом свих анализираних врста агрегата могуће добити конструкцијски лакоагрегатни бетон, чак и са мањим количинама цемента, односно са заменом дела цемента минералним додацима, као и да је могуће успоставити поуздане корелационе везе између појединих својстава бетона и примењених компонентних материјала.
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	
Датум одбране, <b>ДО:</b>	
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник: др Мирослава Радека, ред. проф. Члан: др Милан Тривунић, ред. проф. Члан: др Иван Игњатовић, доцент Члан, ментор: др Властимир Радоњанин, ред. проф. Члан, ментор: др Мирјана Малешев, ред. проф.
	Потпис ментора





UNIVERSITY OF NOVI SAD ● FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral dissertation
Author, <b>AU</b> :	Ivan Lukić
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. dr Vlastimir Radonjanin Prof. dr Mirjana Malešev
Title, <b>TI</b> :	A comparative analysis of the basic properties of structural concrete made with different types of lightweight aggregates
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian / English
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2015
Publisher, <b>PB</b> :	Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, 21000, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	7/332/100 /55/135/0/17
Scientific field, <b>SF</b> :	Civil Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Theory and technology of concrete
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, mineral admixture, compressive strength, modulus of elasticity, shrinkage, water absorption
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	The Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	In dissertation are presented results of own experimental research of a comparative analysis of the impact of different types of lightweight aggregates and the type and quantity of cement on basic physical and mechanical properties of structural lightweight concrete. Also, the possibility of replacing part of cement with mineral admixtures is analyzed in order to reduce the negative impact of concrete production on the environment. The results showed that it is possible to obtain structural lightweight aggregate concrete with all types of lightweight aggregates and even with lower quantities of cement or with a replacement of part of a cement with mineral admixtures. Also, it is possible to establish a reliable correlation between certain properties of concrete and used component materials.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: dr Miroslava Radeka, full professor
	Member: dr Milan Trivunić, full professor
	Member: dr Ivan Ignjatović, assistant professor
	Member, Mentor: dr Vlastimir Radonjanin, full professor
	Member, Mentor: dr Mirjana Malešev, full professor
	Mentor's sign



*„Za mene ne postoji veći izvor ovozemaljske časti i isticanja od napredovanja u nauci“*

*Isak Njutn*

## **ZAHVALNOST**

Iako je na koricama napisano moje ime, ova doktorska disertacija rezultat je zajedničkog rada sa kolegama uz koje sam stekao jedno od najboljih i najvrednijih iskustava, na čemu sam im veoma zahvalan.

Pre svega, želeo bih da izrazim najdublju zahvalnost mojim mentorima, profesorima i prijateljima Vlastimiru Radonjaninu i Mirjani Malešev. Njihov integritet, razumevanje, vera u mene i posvećenost mom ličnom i akademskom razvoju bili su veliki izvor motivacije tokom izrade ovog doktorata. Veština i značaj disciplinovanog kritičkog mišljenja kojima su me od prvog dana zajedničkog rada učili od neprocenjive su vrednosti.

Veliko hvala profesorici Miroslavi Radeki na dragocenim konsultacijama i pomoći u laboratorijskim ispitivanjima. Takođe, zahvalnost dugujem kolegini Vesni Bulatović i mladim kolegama Slobodanu Šupiću i Suzani Vukoslavčević na uloženom velikom trudu i vremenu kako bi sva ispitivanja tekla u skladu sa predviđenom dinamikom.

Reči zahvalnosti upućujem i laborantima Laboratorije za ispitivanje građevinskih materijala, Darku Bradiću i Stevanu Tomiću, bez kojih ne bi bio napravljen ni jedan uzorak, kao i Aleksandri Dmitrović na organizaciji rada u laboratoriji.

Za velikodušnu materijalnu pomoć u vidu cementa zahvalost upućujem kompaniji „Lafarge BFC“. Zahvaljujem se i kompanijama "Beton Gradnja". „Best izgradnja“, „Poraver“, „Leca“, kao i kolegama iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije, pre svega rukovodiocu projekta "EUREKA 4964-Development of lightweight aggregate from waste material and further processing into thermal insulation concrete", Vilmi Ducman, za celokupnu količinu agregata. Za hemijske dodatke betonima zahvaljujem se kompaniji „Sika Srbija“.

Veliku zahvalnost dugujem mojim roditeljima, Svetlani i Milanu Lukiću, za podršku i usađenu želju za stalnim ispitivanjem granica sopstvenih mogućnosti, a braći Igoru i Luki hvala što su me podsećali da postoji i svet van doktorata.

Najzad, ovu disertaciju posvećujem supruzi Dragani i ćerki Mini za svu ljubav, strpljenje i podršku koju su mi pružili i dali mi snage da ovaj rad, naš rad, privedem kraju.

Ivan Lukić





## REZIME

Predmet ovog istraživanja su konstrukcijski lakoagregatni betoni, a poseban akcenat je stavljen na analizu najznačajnijih fizičko-mehaničkih svojstava svežeg i očvrslog betona. Analiziran je uticaj tri vrste lakih agregata, dva komercijalna (na bazi ekspanzirane gline i ekspanziranog stakla) i jedne vrste čija je osnovna sirovina otpadni silikatni kameni mulj. Takođe, analiziran je i uticaj vrste i količine cementa sa analizom mogućnosti zamene dela cementa mineralnim dodacima (leteći pepeo i metakaolin). Napravljeno je 19 različitih betonskih mešavina. Ukupan broj uzoraka koji je ispitan iznosi 408, a za njihovu izradu je upotrebljeno cca 2,0m<sup>3</sup> betona.

Na osnovu komparativne analiza rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja izvedeni su opšti zaključci za projektovanje sastava, pojedina analizirana svojstva i mogućnost primene ispitivanih lakih betona u građevinskoj praksi. Sa aspekta projektovanja sastava zaključeno je da sve vrste lakog agregata u betonu zahtevaju upotrebu hemijskih dodataka tipa superplastifikatora, a u slučaju primene većih količina mineralnih dodataka preporučena je primena hiperplastifikatora. Na osnovu analize svojstava očvrslog betona, zaključeno je da se ispitivani laki agregati mogu koristiti za spravljanje konstrukcijskih lakoagregatnih betona. Najveće čvrstoće su dobijene sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ (>40MPa), dok su primenom lakih agregata od silikatnog-kamenog mulja („ZAG“) i ekspanziranog stakla („Poraver“) dobijeni betoni čvrstoće pri pritisku oko 30MPa. Specifična čvrstoća betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ je istog reda veličine kao specifična čvrstoća običnog betona. Zaključeno je i da režim nege betona nema značajnijeg uticaja na vrednost čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona kod kojih je primenjen postupak prethodnog kvašenja agregata. Moduli elastičnosti lakoagregatnih betona su 35-60% manji u odnosu na modul elastičnosti običnih betona. Skupljanje lakoagregatnih betona je istog reda veličine kao skupljanje običnog betona. Prema dubini prodora vode pod pritiskom, lakoagregatni betoni pripadaju klasama vodonepropusnosti V-II i V-III.

Može se reći da primena lakoagregatnih betona u potpunosti prati trend održivog građevinarstva. Zahvaljujući manjoj zapreminskoj masi može se smanjiti ukupna težina konstrukcije, a samim tim su potrebne i manje količine materijala za građenje. Pored toga, primenom mineralnih dodataka od industrijskih nus-proizvoda i otpada može se znatno uticati na smanjenje emisije štetnih gasova, očuvanje prirodnih neobnovljivih resursa i smanjenje potrošnje energije.

**Ključne reči:** laki agregat, lakoagregatni beton, čvrstoća pri pritisku, modul elastičnosti, skupljanje, upijanje vode.

## ABSTRACT

The subject of this research are structural lightweight aggregate concretes with special focus on the analysis of the most important physical and mechanical properties of fresh and hardened concrete. Impact of three types of light aggregates, two commercial (based on expanded clay and expanded glass) and one made from silicate-rock sludge is investigated. Also, the impact of type and quantity of cement and possibilities of replacing part of cement with mineral admixtures (fly ash and metakaolin) are investigated. Approximately 2,0m<sup>3</sup> of concrete is used for the production of 408 concrete samples in 19 different concrete mixtures.

Based on the comparative analysis of the results of own experimental research general conclusions for the design composition are derived. Also, basic physical and mechanical properties of concrete and the potential application of lightweight concrete in construction practice are analysed. From the aspect of design composition, it is concluded that all types of lightweight aggregate in concrete require the use of super plasticizer, and in the case of application of large quantities of mineral admixtures it is recommended to use hyper plasticizers. Based on the analysis of the properties of hardened concrete, it is concluded that the investigated lightweight aggregates can be used for the production of lightweight structural concrete. The greatest strength were obtained with lightweight aggregate "Leca-Laterlite" (more than 40MPa), while with use of silica-stone sludge aggregates ("ZAG") and expanded glass aggregate ("Poraver"), compressive strength of around 30MPa were obtained. The specific strength of the concrete with „Leca-Laterlite” aggregate is of the same order of magnitude as of ordinary concrete. It is concluded that curing regime of concrete has no significant impact on compressive strength of lightweight concrete if lightweight aggregates are pre-wetted. Modulus of elasticity of lightweight concrete is 35-60% lower compared to the modulus of elasticity of ordinary concrete. Shrinkage of lightweight concrete with studied lightweight aggregates is of the same order of magnitude as of ordinary concrete. According to the depth of penetration of water under pressure, all lightweight aggregate concretes belong to the class of water-tightness V-II and V-III.

It can be said that the application of lightweight concrete meets the trend of sustainable construction. As a consequence of lower bulk density, total weight of structure can be reduced, and therefore, the amount of materials for construction can be reduced. In addition, the application of mineral admixtures from industrial by-products and waste can significantly affect the reduction of greenhouse gas emission, saving natural non-renewable resources and reducing energy consumption.

**Keywords:** lightweight aggregate, lightweight aggregate concrete, compressive strength, specific strength, modulus of elasticity, shrinkage, water-tightness.

# SADRŽAJ

<b>I UVOD.....</b>	<b>1</b>
1. Uvod.....	3
2. Potreba za istraživanjem.....	4
3. Predmet, cilj i metodologija istraživanja.....	5
4. Primenljivost rezultata istraživanja.....	7
5. Kratak prikaz sadržaja rada.....	8
<b>II LAKI BETONI .....</b>	<b>9</b>
1. Definicija i klasifikacija.....	11
2. Vrste lakih betona.....	12
2.1. Lakoagregatni betoni.....	12
2.2. Kaverozni betoni.....	12
2.3. Čelijasti betoni.....	13
3. Laki beton kroz istoriju.....	15
<b>III LAKOAGREGATNI BETONI.....</b>	<b>19</b>
1. Lakoagregatni betoni.....	21
2. Komponentni materijali.....	21
2.1. Laki agregat.....	21
2.2. Cement.....	29
2.3. Voda.....	29
2.4. Dodaci betonu.....	30
3. Projektovanje sastava lakoagregatnih betona.....	32
3.1. Izbor komponentnih materijala.....	32
3.2. Projektovanja sastava.....	41
4. Svojstva lakoagregatnih betona.....	46
4.1. Zapreminska masa.....	46
4.2. Čvrstoća pri pritisku.....	48
4.3. Modul elastičnosti.....	51
4.4. Skupljanje.....	51
4.5. Upijanje vode.....	55
5. Prednosti i nedostaci konstrukcijskih lakoagregatnih betona.....	56
<b>IV PRIKAZ I ANALIZA ZNAČAJNIH ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>57</b>
1. Čvrstoća pri pritisku.....	59
2. Modul elastičnosti.....	69
3. Skupljanje.....	75
4. Upijanje vode.....	79
5. Zaključak.....	82
<b>V EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE .....</b>	<b>87</b>
1. Uvod.....	89
2. Program eksperimentalnog istraživanja.....	90
3. Opšti podaci.....	92

3.1. Podaci o komponentnim materijalima .....	92
4. Sastav betonskih mešavina.....	114
4.1. Primeri određivanja sastava betona.....	115
4.2. Sastav betonskih mešavina .....	118
5. Izrada betonskih mešavina.....	120
6. Postupci i tok ispitivanja .....	122
6.1. Svojstva svežeg betona .....	122
6.2. Svojstva očvrslog betona.....	123
6.3. Betonski blokovi za zidanje.....	127
7. Rezultati ispitivanja.....	128
7.1. Svojstva svežeg betona .....	128
7.2. Svojstva očvrslog betona.....	129
7.3. Betonski blokovi za zidanje.....	137
<b>VI ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA .....</b>	<b>139</b>
1. Beton sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	141
1.1. Konzistencija betona.....	141
1.2. Zapreminska masa.....	142
1.3. Čvrstoća pri pritisku .....	142
1.4. Modul elastičnosti.....	145
1.5. Zapreminske deformacije (skupljanje).....	148
1.6. Kapilarno upijanje vode.....	149
1.7. Upijanje vode pod pritiskom .....	152
2. Beton sa lakim agregatom „ZAG“ .....	153
2.1. Konzistencija betona.....	153
2.2. Zapreminska masa.....	153
2.3. Čvrstoća pri pritisku .....	154
2.4. Modul elastičnosti.....	157
2.5. Zapreminske deformacije (skupljanje).....	159
2.6. Kapilarno upijanje vode.....	161
2.7. Upijanje vode pod pritiskom .....	162
3. Beton sa lakim agregatom „Poraver“ .....	164
3.1. Konzistencija betona.....	164
3.2. Zapreminska masa.....	164
3.3. Čvrstoća pri pritisku .....	165
3.4. Modul elastičnosti.....	167
3.5. Zapreminske deformacije (skupljanje).....	169
3.6. Kapilarno upijanje vode.....	170
3.7. Upijanje vode pod pritiskom .....	172
4. Komparativna analiza.....	174
4.1. Konzistencija betona.....	174
4.2. Zapreminska masa.....	175
4.3. Čvrstoća pri pritisku .....	176
4.4. Modul elastičnosti.....	181

4.5. Zapreminske deformacije.....	184
4.6. Kapilarno upijanje vode.....	185
4.7. Upijanje vode pod pritiskom.....	186
5. Blokovi za zidanje.....	188
6. Zaključak.....	189
6.1. Svojstava svežeg betona.....	189
6.2. Svojstva očvrslog betona.....	189
6.3. Blokovi za zidanje.....	192
<b>VII ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>193</b>
1. Zaključna razmatranja.....	195
2. Pravci daljeg istraživanja.....	197
<b>VIII LITERATURA.....</b>	<b>199</b>
<b>IX PRILOZI.....</b>	<b>209</b>
PRILOG 1 - Određivanje fizičko-mehaničkih svojstava cementa.....	211
PRILOG 2 - Određivanje svojstava agregata.....	212
PRILOG 3 - Određivanje svojstava mineralnih dodataka.....	216
PRILOG 4 - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton NK.....	217
PRILOG 5 - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton LLK.....	218
PRILOG 6 - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton LSSL.....	219
PRILOG 7 - Granulometrijski sastav mešavine agregata za beton LP.....	220
PRILOG 8 - Određivanje konzistencije i uvučenog vazduha.....	221
PRILOG 9 - Određivanje zapreminske mase svežeg betona.....	222
PRILOG 10 - Određivanje zapreminske mase očvrslog, prirodno vlažnog betona.....	226
PRILOG 11 - Određivanje čvrstoće pri pritisku.....	230
PRILOG 12 - Određivanje statičkog modula elastičnosti.....	240
PRILOG 13 - Određivanje dinamičkog modula elastičnosti.....	291
PRILOG 14 - Određivanje zapreminskih deformacija (skupljanja) betona.....	295
PRILOG 15 - Određivanje upijanja vode pod pritiskom.....	314
PRILOG 16 - Određivanje kapilarnog upijanja vode.....	319
PRILOG 17 - Šuplji blokovi od lakoagregatnog betona.....	331

## Spisak slika

<i>Slika II-1. Šematski prikaz strukture lakih betona</i> .....	11
<i>Slika II-2. Podela lakoagregatnih betona prema zapreminskoj masi</i> .....	12
<i>Slika II-3. Aakvadukt Pont du Gard</i> .....	16
<i>Slika II-4. Panteon, Rim (4. Vek)</i> .....	16
<i>Slika II-5. most preko reke Mataponi (SAD)</i> .....	17
<i>Slika III-1. Plovućac</i> .....	23
<i>Slika III-2. Skorija</i> .....	23
<i>Slika III-3. Ekspandirana glina</i> .....	24
<i>Slika III-4. Ekspandirani škriljac</i> .....	24
<i>Slika III-5. Veza između zapreminske mase suvog rastresitog agregata i zapreminske mase samog zrna</i> 26	
<i>Slika III-6. Zavisnost dinamičkog modula elastičnosti od zapreminske mase samog zrna lakog agregata</i> .....	29
<i>Slika III-7. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od količine cementa za različite vrste lakih agregata</i> .....	36
<i>Slika III-8. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od efektivnog vodo-cementog faktora</i> .....	37
<i>Slika III-9. Odnos čvrstoća običnog betona i betona sa dodatkom letećeg pepela tokom vemen</i> .....	39
<i>Slika III-10. Uticaj zamene cementa metakaolinom na čvrstoću pri pritisku</i> .....	40
<i>Slika III-11. Apsolutne zapremine komponentnih materijala u 1m<sup>3</sup> svežeg betona</i> .....	45
<i>Slika III-12. Zavisnost čvrstoće betona od čvrstoće agregata i malterske</i> .....	50
<i>Slika III-13. Transfer napona pritiska u normalnom i lakoagregatnom betonu</i> .....	49
<i>Slika III-14. Zavisnost čvrstoće od zapreminske mase lakoagregatnog betona u suvom stanju</i> .....	50
<i>Slika IV-1. Zavisnost čvrstoće pri pritisku i količine cementa ili vodo-cementnog</i> .....	59
<i>Slika IV-2. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od količine cementa za različite vrednosti vodo-cementog faktora</i> .....	60
<i>Slika IV-3. Zavisnost čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase</i> .....	60
<i>Slika IV-4. Uticaj krupnoće zrna lakog agregata na čvrstoću pri pritisku</i> .....	61
<i>Slika IV-5. Uticaj vodo-cementog faktora na broj pora u tranzitnoj zoni</i> .....	62
<i>Slika IV-6. Zavisnost zapreminske mase (u funkciji zapreminskog udela lakog agregata) i čvrstoće pri pritisku</i> .....	63
<i>Slika IV-7. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od režima nege: a) čvrstoća pri starosti 28 dana b) čvrstoća pri starosti 91 dan</i> .....	66
<i>Slika IV-8. Vrednosti čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od režima nege</i> .....	68
<i>Slika IV-9. Upporedna analiza modula elastičnosti</i> .....	69
<i>Slika IV-10. Zavisnost modula elastičnosti od: a) čvrstoće pri pritisku b) zapreminske mase</i> .....	70
<i>Slika IV-11. Vrednosti modula elastičnosti u zavisnosti od režima nege</i> .....	73
<i>Slika IV-12. Uticaj količine cementa i načina prethodnog kvašenja na skupljanje</i> .....	76
<i>Slika IV-13. Uticaj vrste lakog agregata na skupljanje</i> .....	77

<i>Slika IV-14. Uticaj letećeg pepela na skupljanje lakoagregatnog betona</i> .....	78
<i>Slika IV-15. Vrednosti kapilarnog upijanja pri različitim režimima nege</i> .....	80
<i>Slika IV-16. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od zapreminske mase betona</i> .....	83
<i>Slika IV-17. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od vodo-cementog faktora</i> .....	84
<i>Slika IV-18. Zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritsiku</i> .....	85
<i>Slika IV-19. Zavisnost modula elastičnosti od zapreminske mase betona</i> .....	85
<i>Slika V-1. SEM snimak CEM I 42,5R</i> .....	92
<i>Slika V-2. SEM snimak CEM II/B-M (S-V-L) 32.5 R</i> .....	93
<i>Slika V-3. Izgled frakcija rečnog agregata</i> .....	93
<i>Slika V-4. Granulometrijske krive frakcija rečnog agregata</i> .....	94
<i>Slika V-5. Leca-Laterlite frakcije 2/3 (gore) i 4/15 (dole)</i> .....	95
<i>Slika V-6. SEM snimak agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x50)</i> .....	95
<i>Slika V-7. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 4/15 (uvećanje x50)</i> .....	96
<i>Slika V-8. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x200)</i> .....	96
<i>Slika V-9. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 4/15 (uvećanje x200)</i> .....	97
<i>Slika V-10. SEM snimak agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje 1000x)</i> .....	97
<i>Slika V-11. SEM snimak agregata Leca-Laterlite 4/15 (uvećanje x1000)</i> .....	98
<i>Slika V-12. SEM snimak agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x5000)</i> .....	98
<i>Slika V-13. SEM snimak agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x5000)</i> .....	99
<i>Slika V-14. SEM snimak površine agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x1000)</i> .....	99
<i>Slika V-15. SEM snimak površine agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x10000)</i> .....	100
<i>Slika V-16. SEM snimak površine agregata Leca-Laterlite 2/3 (uvećanje x20000)</i> .....	100
<i>Slika V-17. Granulometrijske krive frakcija lakog agregata „Leca-Laterlite“</i> .....	102
<i>Slika V-18. Kinetika upijanja vode lakog agregata „Leca-Laterlite“</i> .....	102
<i>Slika V-19. „ZAG“ frakcija 4/8</i> .....	103
<i>Slika V-20. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x5000)</i> .....	103
<i>Slika V-21. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x10000)</i> .....	104
<i>Slika V-22. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x50000)</i> .....	104
<i>Slika V-23. Granulometrijska kriva frakcija lakog agregata „ZAG“</i> .....	105
<i>Slika V-24. Kinetika upijanja vode lakog agregata „ZAG“</i> .....	105
<i>Slika V-25. Poraver frakcije 2/4 (gore) i 4/8 (dole)</i> .....	106
<i>Slika V-26. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x3000)</i> .....	106
<i>Slika V-27. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x300)</i> .....	107
<i>Slika V-28. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x200)</i> .....	107
<i>Slika V-29. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x500)</i> .....	108
<i>Slika V-30. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x500)</i> .....	108

<i>Slika V-31. SEM snimak površine agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x1000)</i> .....	109
<i>Slika V-32. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x1000)</i> .....	109
<i>Slika V-33. Granulometrijske krive frakcija lakog agregata „Poraver“</i> .....	110
<i>Slika V-34. Izgled mineralnih dodataka</i> .....	111
<i>Slika V-35. SEM snimak letećeg pepela</i> .....	112
<i>Slika V-36. SEM snimak metakaolina</i> .....	113
<i>Slika V-37. Granulometrijska kriva mešavine agregata i referentne krive</i> .....	115
<i>Slika V-38. Spravljanje betonske mešavine</i> .....	120
<i>Slika V-39. Kompaktiranje betona</i> .....	120
<i>Slika V-40. Beton ugrađen u kalupe</i> .....	121
<i>Slika V-41. Ugrađivanje betona u kalupe za betonske blokove za zidanje</i> .....	121
<i>Slika V-42. Betonski blokovi i ploče ugrađeni u kalupe</i> .....	121
<i>Slika V-43. Merenje konzistencije metodom sleganja za betone LLK-4 i LP5</i> .....	122
<i>Slika V-44. Određivanje sadržaja zaostalog vazduha u betonu LSSL-4</i> .....	122
<i>Slika V-45. Određivanje čvrstoće pri pritisku</i> .....	123
<i>Slika V-46. Određivanje statičkog modula elastičnosti</i> .....	124
<i>Slika V-47. Dispozicija ispitivanja brzine prolaza ultrazvuka</i> .....	125
<i>Slika V-48. Ispitivanje brzine prolaza ultrazvuka</i> .....	125
<i>Slika V-49. Merenje skupljanja prema SRPS U.M1.029</i> .....	126
<i>Slika V-50. Merenje skupljanja prema</i> .....	126
<i>Slika V-51. Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom</i> .....	126
<i>Slika V-52. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode</i> .....	126
<i>Slika V-53. Izgled blokova za zidanje pripremljenih za ispitivanje</i> .....	127
<i>Slika VI-1. Promena konzistencije običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ u toku prvih 30 minuta</i> .....	141
<i>Slika VI-2. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“</i> .....	142
<i>Slika VI-3. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“</i> .....	143
<i>Slika VI-4. Zavisnost čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ od količine cementa i vodo-cementog faktora</i> .....	145
<i>Slika VI-5. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim agregatom</i> .....	145
<i>Slika VI-6. Zavisnost modula elastičnosti lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ od količine cementa i vodo-cementog faktora</i> .....	146
<i>Slika VI-7. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim agregatom</i> .....	148
<i>Slika VI-8. Kapilarno upijanje vode običnog i betona sa lakim agregatom</i> .....	150
<i>Slika VI-9. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“</i> .....	150
<i>Slika VI-10. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“</i> .....	152



<i>Slika VI-11. Promena konzistencije običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ u toku prvih 30 minuta .....</i>	<i>153</i>
<i>Slika VI-12. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>154</i>
<i>Slika VI-13. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>155</i>
<i>Slika VI-14. Razlika čvrstoća betona LSSL-1 i LSSL-4 u zavisnosti od starosti betona .....</i>	<i>156</i>
<i>Slika VI-15. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji načina negovanja betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>157</i>
<i>Slika VI-16. Statički i dinamički modul elastičnosti običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>157</i>
<i>Slika VI-17. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim .....</i>	<i>159</i>
<i>Slika VI-18. Kapilarno upijanje vode običnog i betona sa lakim agregatom .....</i>	<i>161</i>
<i>Slika VI-19. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog i betona sa lakim .....</i>	<i>161</i>
<i>Slika VI-20. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>163</i>
<i>Slika VI-21. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....</i>	<i>164</i>
<i>Slika VI-22. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena običnog i betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....</i>	<i>165</i>
<i>Slika VI-23. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji načina negovanja betona za lakim agregatom „Poraver“ .....</i>	<i>167</i>
<i>Slika VI-24. Statički i dinamički modul elastičnosti običnog i betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....</i>	<i>167</i>
<i>Slika VI-25. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim agregatom .....</i>	<i>169</i>
<i>Slika VI-26. Kapilarno upijanje vode običnog i betona sa lakim agregatom .....</i>	<i>171</i>
<i>Slika VI-27. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog i betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....</i>	<i>171</i>
<i>Slika VI-28. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....</i>	<i>172</i>
<i>Slika VI-29 – Promena konzistencije u funkciji vremena .....</i>	<i>174</i>
<i>Slika VI-30. Zapreminske mase lakoagregatnih betona u prirodno vlažnom stanju .....</i>	<i>175</i>
<i>Slika VI-31. 28-dnevne čvrstoće pri pritisku svih ispitivanih lakoagregatnih betona .....</i>	<i>176</i>
<i>Slika VI-32. Promena čvrstoće pri pritisku ispitivanih vrsta betona kroz vreme .....</i>	<i>179</i>
<i>Slika VI-33. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa 450kg cementa .....</i>	<i>179</i>
<i>Slika VI-34. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa CEM I i različitim .....</i>	<i>180</i>
<i>Slika VI-35. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa visokim sadržajem mineralnih dodataka .....</i>	<i>180</i>
<i>Slika VI-36. Statički i dinamički modul elastičnosti ispitivanih betona .....</i>	<i>181</i>
<i>Slika VI-37. Zavisnost <math>E_d</math> i <math>E_c</math> za betone sa različitim vrstama lakih agregata .....</i>	<i>182</i>
<i>Slika VI-38. Zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku ispitivanih betona .....</i>	<i>183</i>
<i>Slika VI-38. Poređenje zavisnosti modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku sopstvenih ekperimentalnih rezultata sa rezultatima drugih autora .....</i>	<i>183</i>
<i>Slika VI-39. Skupljanje ispitivanih betona pri starosti od 63 dana .....</i>	<i>184</i>

<i>Slika VI-41. Kapilarno upijanja ispitivanih betona .....</i>	<i>185</i>
<i>Slika VI-42. Koeficijent kapilarnog upijanja ispitivanih betona .....</i>	<i>186</i>
<i>Slika VI-43. Upijanje vode pod pritiskom ispitivanih betona.....</i>	<i>187</i>
<i>Slika VI-44. Dubina prodora vode pod pritiskom ispitivanih betona.....</i>	<i>187</i>

## **Spisak tabela**

<i>Tabela II-1. Klasifikacija lakih betona .....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela II-2. Karakteristike kaveroznih betona.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela II-3. Karakteristike gas-betona.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela II-4. Karakteristike peno-betona .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabela III-1. Zavisnost zapreminske mase betona i zapreminske mase .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela III-2. Razlike u lakoagregatnom betonu iste čvrstoće sa različitim svojstvima lakog agregata .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela III-3. Približna količina vode [kg/m<sup>3</sup>] i uvučenog vazduha[%] u zavisnosti od zahtevanog sleganja i veličine zrna agregata aeriranog betona .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela III-4. Približna količina vode [kg/m<sup>3</sup>] i uvučenog vazduha[%] u zavisnosti od zahtevanog sleganja i veličine zrna agregata neaeriranog betona .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela III-5. Zavisnost između vodo-cementnog faktora i čvrstoće pri pritisku .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela III-6. Uticaj različitih faktora na zapreminsku masu betona .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela III-7. Klasifikacija lakoagregatnih betona u zavisnosti od zapreminske mase prema EN 206 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela III-8. Klase čvrstoće lakoagregatnih betona.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela III-9. Najčešće korišćeni modeli za određivanje modula elastičnosti lakoagregatnih betona.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela III-10. Procena veličine skupljanja prema standardima.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela IV-1. Zavisnost čvrstoće betona pri pritisku od zapreminske mase i udela agregata, MPa .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela IV-2. Mehanička svojstva analiziranih betona .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela IV-3. Zavisnost modula elastičnosti betona od zapreminske mase i udela agregata, GPa.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela IV-4. Zavisnost modula elastičnosti od zapreminske mase i čvrstoće pri.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela IV-5. Zavisnost modula elastičnosti od udela sitnog lakog agregata.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela IV-6. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela V-1. Osnovna svojstva lakih agregata.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabela V-2. Oznake betonskih mešavina.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabela V-3. Količine komponentnih materijala u 1m<sup>3</sup> betona.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela V-4. Svojstva svežeg betona.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabela V-5. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa rečnim krupnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela V-6. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa lakim sa lakim agregatom „ZAG“.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela V-7. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa lakim sa lakim agregatom „Poraver“.....</i>	<i>130</i>

Tabela V-8. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	131
Tabela V-9. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim.....	131
Tabela V-10. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim .....	131
Tabela V-11. Zapreminske deformacije betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ [mm/m].....	132
Tabela V-12. Zapreminske deformacije betona sa lakim agregatom „ZAG“ [mm/m] .....	132
Tabela V-13. Zapreminske deformacije betona sa lakim agregatom „Poraver“ [mm/m] .....	133
Tabela V-14. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	134
Tabela V-15. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	134
Tabela V-16. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....	134
Tabela V-17. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	135
Tabela V-18. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	136
Tabela V-19. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....	136
Tabela V-20. Karakteristike betonskog bloka za zidanje .....	137
Tabela VI-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku $f_c$ betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	143
Tabela VI-2. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti običnog i lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	147
Tabela VI-3. Eksperimentalno i analitički određene vrednosti modula elastičnosti običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ .....	148
Tabela VI-4. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ pri starosti od 63 dana .....	148
Tabela VI-5. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku $f_c$ običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	154
Tabela VI-6. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	158
Tabela VI-7. Eksperimentalno i analitički određene vrednosti modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	159
Tabela VI-8. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „ZAG“ pri starosti od 63 dana ..	160
Tabela VI-9. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku $f_c$ običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ .....	165
Tabela VI-10. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....	168
Tabela VI-11. Eksperimentalno i analitički određene vrednosti modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....	169
Tabela VI-12. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „Poraver“ .....	170
Tabela VI-13. Klase čvrstoće betona sa „Leca-Laterlite“ lakim agregatom .....	177

<i>Tabela VI-14. Klase čvrstoće betona sa „ZAG“ lakim agregatom.....</i>	<i>177</i>
<i>Tabela VI-15. Klase čvrstoće betona sa „Poraver“ lakim agregatom.....</i>	<i>177</i>
<i>Tabela VI-14. Specifična čvrstoća ispitivanih betona spravljanih sa cementom.....</i>	<i>178</i>
<i>Tabela VI-15. Specifična čvrstoća ispitivanih lakoagregatnih betona sa visokim sadržajem mineralnih dodataka.....</i>	<i>178</i>

**I**

**UVOD**



## 1. UVOD

Beton je najčešće korišćeni konstrukcijski materijal na svetu, sa prosečnom proizvodnjom od preko deset milijardi tona godišnje [1], kako zbog svoje trajnosti i velikih mogućnosti primene, tako i zbog jednostavnosti proizvodnje i dostupnosti sirovinskih materijala. Ipak, u poređenju sa konstrukcijskim materijalima poput čelika, odnos zapreminske mase prema čvrstoći betona je dosta velik, što primenu betona sa smanjenom zapreminskom masom, lakih betona, čini posebno interesantnom.

Laki beton nije nov materijal, naprotiv, primeri početaka primene datiraju još iz perioda 3000 godina p.n.e [2]. Uprkos tome, kao i činjenici da je pažnja velikog broja istraživača usmerena na istraživanje svojstava lakoagregatnih betona, u našoj zemlji se konstrukcijskoj primeni ovog materijala se i dalje pristupa vrlo skeptično.

Veliki broj inženjera beton definiše kao materijal sastavljen od cementa, peska, rečnog ili drobljenog agregata i vode (uz mogućnost primene dodatka betonima), sa zapreminskom masom od oko  $2400\text{kg/m}^3$  i čvrstoćama većim od  $15\text{MPa}$ , dok se kontakt sa lakim betonom uglavnom ogleda kroz primenu u izradi betonskih blokova za zidanje i za cementne košuljice, što je, neopravdano, uticalo na stvaranje asocijacije između lakog betona i male čvrstoće. Tačno je da nisu sve vrste lakog betona pogodne za konstrukcijsku primenu, ali je većina lakih agregata pogodna za proizvodnju uobičajenih konstrukcijskih betona, dok je sa nekim vrstama moguće napraviti i betone izrazito visokih mehaničkih svojstava.

Za razliku od običnih betona koji imaju zapreminsku masu od  $2000\text{kg/m}^3$  do  $2500\text{kg/m}^3$ , pod lakim betonima se smatraju betoni koji, u zavisnosti od vrste primenjenog lakog agregata, imaju zapreminsku masu od  $300\text{kg/m}^3$  do  $2000\text{kg/m}^3$  [3].

Osnovna prednost koju lakoagregatni betoni imaju, u poređenju sa običnim betonima, ogleda se upravo u manjoj zapreminskoj masi. Težina konstrukcije predstavlja važan faktor prilikom projektovanja i izvođenja objekata jer direktno utiče na smanjenje ukupne težine objekta, smanjenje opterećenja na temelje i tlo, dimenzije poprečnog preseka prefabrikovanih elemenata mogu biti povećane ili sa jednostavnijom geometrijom bez uticaja na sistem transporta i ugradnje, itd.. Potopljen u vodu, laki beton ima zapreminsku masu cca 40% manju u odnosu na običan beton [4], što je

posebna prednost pogotovo u izgradnji objekata u vodi (naftne platforme, pontoni i sl.), a zahvaljujući velikoj poroznosti, laki betoni imaju i bolje termotehničke performanse i bolju otpornost na dejstvo požara [5].

Kao i svi materijali, i laki betoni imaju nedostataka među kojima se ističe veća jedinična cena, kao posledica cene proizvodnje i transporta lakog agregata i potrebne veće količine cementa u odnosu na obične betone sa istom čvrstoćom. Problem primene veće količine cementa se poslednjih godina posebno naglašava zbog sve većeg zagađenja životne sredine i stvaranja efekta staklene bašte, za koje se posebno "optužuje" cementna industrija. Pored ekonomskih, mana lakih betona se ogleda i u lošijoj zvučnoj izolaciji, povećanom tečenju i deformacijama usled nižeg modula elastičnosti.

Iako su fizičko-mehaničke karakteristike najčešće korišćenih komercijalnih lakih agregata vrlo konzistente, čak i kod agregata istog sirovinskog sastava postoje značajne razlike u svojstvima u zavisnosti od proizvođača, što se, za razliku od normalnih agregata, često navodi kao razlog za nepouzdanost njihove primene. Zbog toga, posebno je važno da postoji što bolja baza podataka o svim vrstama lakih agregata i betonima koji se sa njima spravljaju.

## **2. POTREBA ZA ISTRAŽIVANJEM**

U preporukama za izbor vrste i određivanje količina komponentnih materijala konstrukcijskih lakoagregatnih betona, često se nailazi na podatak da je najbolje koristiti čiste portland cimente visokih klasa čvrstoće (npr. CEM I 42.5). Međutim, proizvodnja takvih cemenata ima najveći negativan uticaj na životnu sredinu. Opravdanje za upotrebu velike količine cementa visokih klasa čvrstoće nalazi se u objašnjenju načina prenošenja opterećenja u lakoagregatnim betonima. Dok kod betona normalne težine u prenosu opterećenja učestvuju obe makrostrukturne komponente (cementna matrica i agregat), kod lakoagegatnih betona mehaničke karakteristike zavise od kvaliteta cementne matrice [6]. Zbog toga, cementna matrica mora imati visoke mehaničke karakteristike i mora dobro da obavije zrna lakog agregata. Prema FIP [7] i ACI 213R-03 [8], 1m<sup>3</sup> lakoagregatnog betona se orijentaciono sastoji od 0,1m<sup>3</sup> cementa, 0,2m<sup>3</sup> efektivne vode i pora u cementnoj pasti i 0,7m<sup>3</sup> agregata.



Radi provere opravdanosti primene velike količine cementa visoke klase čvrstoće (CEM I 42.5), kao i radi utvrđivanja mogućnosti smanjenja količine cementa, zamene CEM I sa portland-kompozitnim cementima i supstitucije dela CEM I drugim vezivnim materijalima, sprovedeno je eksperimentalno istraživanje u okviru kog je, pored variranja vrste i količine cementa, ispitan i uticaj vrste lakog agregata na osnovna svojstva konstrukcijskih lakoagregatnih betona.

Analizom dostupne literature uočeno je da postoji mali broj istraživanja u kojima je uporedo analiziran uticaj vrste lakih agregata, različitih vrsta i količina cementa i primena mineralnih dodataka na osnovna svojstva konstrukcijskih lakoagregatnih betona.

Drugi razlog za ovo istraživanje je činjenica da je primena lakoagregatnih betona kod nas na veoma niskom nivou, pogotovo konstrukcijskih lakoagregatnih betona, što je posledica nedovoljnog poznavanja fizičko-mehaničkih svojstava betona, ponašanja u različitim eksploatacionim uslovima i aspekata projektovanja i izvođenja konstrukcija od ove vrste betona.

### **3. PREDMET, CILJ I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA**

Predmet ovog istraživanja su konstrukcijski lakoagregatni betoni, a poseban akcenat je stavljen na analizu nekih najznačajnijih fizičko-mehaničkih svojstava svežeg i očvrslog betona, koja su bitna i sa aspekta projektovanja sastava betonskih mešavina i sa aspekta projektovanja betonskih konstrukcija.

U okviru istraživanja analizirana su sledeća svojstva:

- Svež beton
- zapreminska masa,
- konzistencija,
- količina uvučenog vazduha.
- Očvršli beton
- čvrstoća pri pritisku,
- modul elastičnosti,
- skupljanje pri sušenju,
- kapilarno upijanje vode,
- upijanje vode pod pritiskom.

Prilikom projektovanja sastava betonskih mešavina, u cilju postizanja optimalnih svojstava očvrstlog betona, često se kombinuju različite vrste sitnog i krupnog agregata. U ovom istraživanju, u svim betonskim mešavinama, kao sitan agregat je korišćen prirodni rečni agregat, a kao zamena za krupan agregat (i u nekim slučajevima jednim delom sitan agregat) varirane se tri vrste lakog agregata. Upotrebljene vrste lakog agregata su:

- laki agregat na bazi ekspanzirane gline: „Leca-Laterlite“ – Italija,
- laki agregat čija je osnovna sirovina silikatni-kameni mulj: „ZAG“ – Slovenija,
- laki agregat na bazi ekspanziranog recikliranog stakla: „Poraver“ – Nemačka.

Navedene vrste krupnog agregata odabrane su za istraživanje zbog različitih fizičko-mehaničkih svojstava, čime je omogućeno realnije sagledavanje uticaja vrste lakog agregata na analizirana svojstva betona.

U cilju analize uticaja vrste i količine primenjenog veziva, kao i mogućnost supstitucije dela cementa, korišćeni su sledeći materijali:

- CEM I 42.5 R (Lafarge Beočinska fabrika cementa),
- CEM II/B-M (S-V-L) 32.5 R (Lafarge Beočinska fabrika cementa),
- Leteći pepeo (tip "V", termoelektrana "Nikola Tesla B" Obrenovac – Srbija),
- Metakaolin HR ("Metamax" – SAD).

Osnovni cilj ovog istraživanja je određivanje međusobne zavisnosti fizičko-mehaničkih svojstava konstrukcijskih lakoagregatnih betona i svojstava različitih vrsta agregata i vrste i količine cementa, čime bi se omogućilo modeliranje svojstava ove vrste betonskih kompozita i podstakla njihova šira primena.

Na osnovu postavljenog cilja, kao osnova za definisanje plana i programa istraživanja, postavljene su polazne hipoteze:

*Hipoteza 1: Primenom navedenih vrsta lakih agregata moguće je dobiti konstrukcijske lakoagregatne betone fizičko-mehaničkih svojstava uporedivih sa običnim betonima.*

*Hipoteza 2: Moguće je dobiti konstrukcijske lakoagregatne betone sa znatno manjom količinom cementa od uobičajene uz primenu mineralnih dodataka.*

Kako bi se proverile definisane hipoteze, sprovedene su sledeće aktivnosti:

- 1) Sistematizacija dostupnih podataka o osnovnim fizičko-mehaničkim svojstvima konstrukcijskih lakoagregatnih betona koji su od posebne važnosti za razumevanje ponašanja betona; definisanje međusobne zavisnosti različitih svojstava konstrukcijskih lakoagregatnih betona i uporedna analiza sa tradicionalnim betonima sa rečnim krupnim agregatom.
- 2) Eksperimentalno ispitivanje osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava konstrukcijskih lakoagregatnih betona u funkciji:
  - vrste primenjenog lakog agregata,
  - vrste i količine cementa, uz istraživanje mogućnosti supstitucije dela cementa mineralnim dodacima.
- 3) Donošenje opštih zaključaka o međusobnoj zavisnosti osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava konstrukcijskih lakoagregatnih betona, kao i o mogućnosti primene navedenih vrsta lakih agregata u kombinaciji sa supstitucijom dela cementa mineralnim dodacima za dobijanje konstrukcijskih lakoagregatnih betona.

Imajući u vidu predmet i cilj istraživanja, kao i postavljene hipoteze doktorske disertacije, od izuzetnog je značaja pravilan izbor metoda naučno-istraživačkog rada. Sintezom i kritičkom analizom dostupnih rezultata istraživanja drugih autora vezanih za oblast teorije i tehnologije lakoagregatnih betona formirana je baza podataka kao osnova za sopstveno eksperimentalno istraživanje. U analizi rezultata korišćena je statistička metoda i metoda korelacija, a izvođenje zaključaka sopstvenog istraživanja bazirano je na primeni komparativne metode.

#### **4. PRIMENLJIVOST REZULTATA ISTRAŽIVANJA**

Projektovanje sastava betonskih mešavina je složen i dugotrajan proces i krajnji rezultat zavisi od velikog broja međusobno povezanih faktora. Rezultati ovog eksperimentalnog istraživanja daju značajan doprinos u razumevanju uticaja svojstava različitih vrsta lakih agregata i veziva kako na sam proces projektovanja sastava betonskih mešavina, tako i na fizičko-mehanička svojstva očvrslog betona.

Takođe, rezultati ovog istraživanja predstavljaju polaznu osnovu za razvoj ekspertskog sistema za projektovanje sastava konstrukcijskih lakoagregatnih betona, pomoću kojeg će biti omogućeno brže i jednostavnije definisanje početnih količina

komponentnih materijala za spravljanje betona, kao i predviđanje mehaničkih svojstava betona dobijenih primenom ovog sistema.

## **5. KRATAK PRIKAZ SADRŽAJA RADA**

U prvom poglavlju dat je prikaz postavke i opis problema, ciljevi, metodologija i primenljivost predmetnog istraživanja.

U drugom poglavlju data je definicija i klasifikacija osnovnih vrsta lakih betona, svojstva lakih betona, kao i istorijski razvoj i primena ovih betonskih kompozita u praksi.

U trećem poglavlju akcenat je stavljen na svojstva i postupke dobijanja lakih agregata, vrste komponentnih materijala koji se mogu upotrebiti, projektovanje sastava, najvažnija svojstva lakoagregatnih betona i prednosti i nedostatke u odnosu na obične betone.

U četvrtom poglavlju dat je pregled aktuelnih istraživanja iz oblasti lakoagregatnih betona. U okviru ovog poglavlja urađena je komparativna analiza rezultata ispitivanja drugih autora, sa aspekta osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava lakoagregatnih betona, na osnovu koje su izvedeni opšti zaključci o uticaju vrste i količine komponentnih materijala na osnovna svojstva lakoagregatnih betona.

U petom poglavlju prikazano je sopstveno eksperimentalno istraživanje. Dati su program istraživanja, postupak i projektovanje sastava betonskih mešavina, izrada uzoraka za laboratorijska ispitivanja, oprema i postupci ispitivanja, kao i dobijeni rezultati ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava lakoagregatnih betona.

U šestom poglavlju analizirani su rezultati istraživanja lakoagregatnih betona za svaku vrstu upotrebljenog agregata, a zatim je izvršena i komparativna analiza. Takođe, rezultati ovog istraživanja upoređeni su i sa rezultatima do kojih su došli drugi istraživači, nakon čega su izvedeni opšti zaključci.

U sedmom poglavlju sumirani su najvažniji rezultati na osnovu kojih su izvedena zaključna razmatranja i predloženi su pravci daljeg istraživanja.

**II**

**LAKI BETONI**



## 1. DEFINICIJA I KLASIFIKACIJA

Pod lakim betonom se smatra beton koji ima zapreminsku masu u suvom stanju ne manju od  $300\text{kg/m}^3$  i ne veću od  $2000\text{kg/m}^3$  [3].

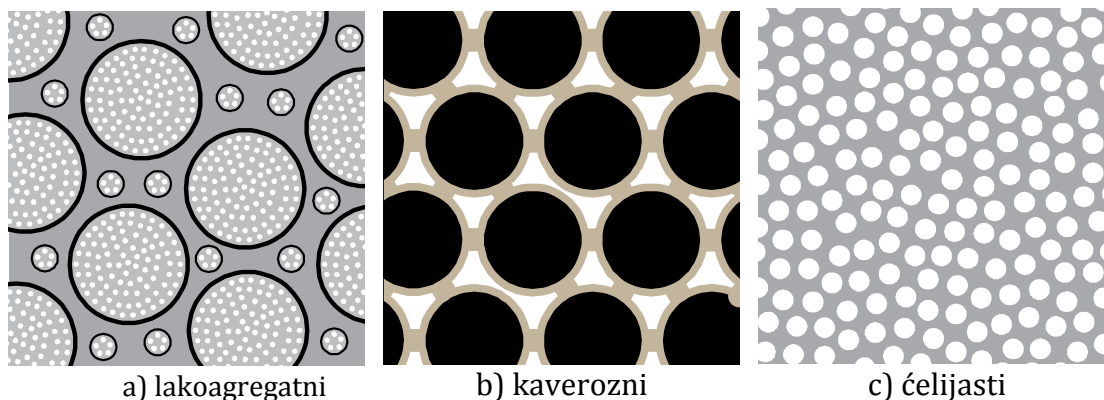
Klasifikacija lakih betona, u zavisnosti od namene, data je u Tabeli II-1. Kako se može videti, nemena zavisi od fizičko-mehaničkih svojstava, prvenstveno od zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku.

Tabela II-1. Klasifikacija lakih betona [9]

Svojstvo	Klasa i vrsta betona		
	I Konstrukcijski	II Konstrukcijski/Izolacioni	III Izolacioni
Čvrstoća pri pritisku [MPa]	>15,0	>3,5	>0,5
Zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ]	1600-2000	<1600	<<1450
Koeficijent toplotne provodljivosti [W/mK]	-	<0,75	<0,30

Generalno, dobijanje lakih betona podrazumeva povećanje količine vazduha, što je moguće postići na jedan od sledećih načina:

- zamenom dela ili celokupne količine običnog agregata nekom od vrsta lakih (poroznih) agregata - lakoagregatni betoni;
- izbacivanjem sitnog agregata - kaverozni betoni (eng. „no-fines“);
- uvođenjem mehurića vazduha u strukturu betona – ćelijasti betoni (gas-betoni, peno-betoni).



Slika II-1. Šematski prikaz strukture lakih betona [10]

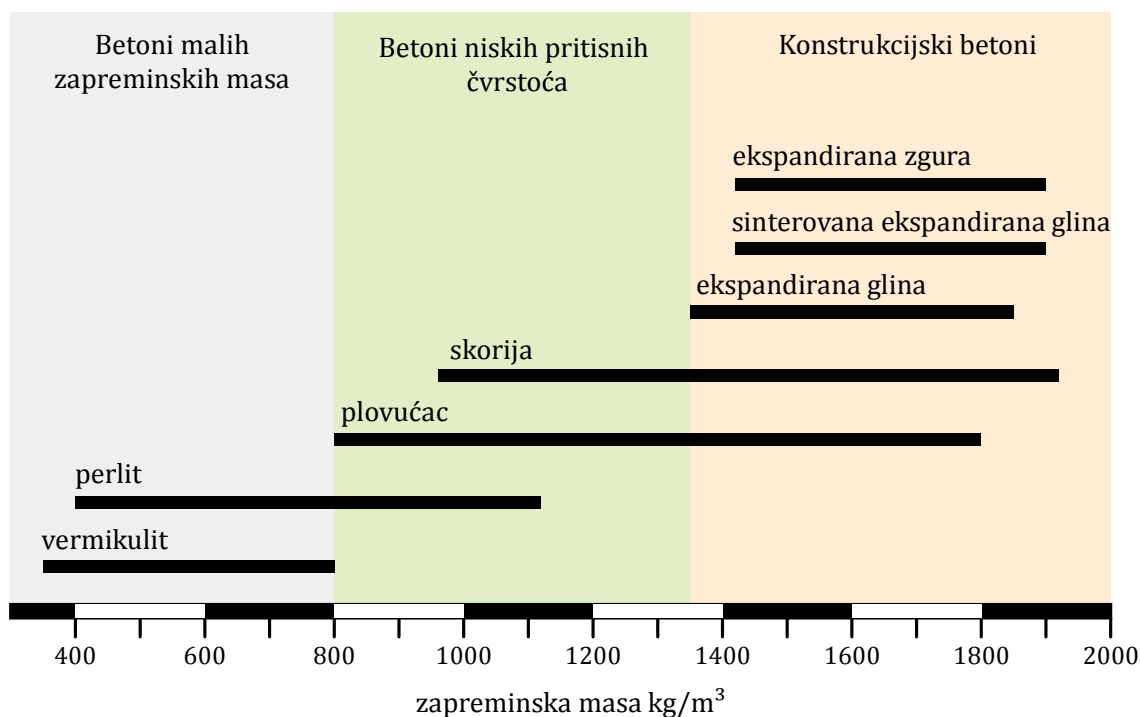
## 2. VRSTE LAKIH BETONA

### 2.1. Lakoagregatni betoni

Osnovne komponente lakoagregatnih betona su cement, voda i laki agregat, pri čemu je, u zavisnosti od zahtevanih svojstava, deo lakog agregata moguće zameniti prirodnim, najčešće sitnim agregatom. U zavisnosti od porekla, laki agregat koji se koristi u lakoagregatnim betonima se može podeliti u dve grupe:

- laki agregat prirodnog porekla (perlit, vermikulit, plovuće, skorija, tuf...);
- proizvedeni laki agregat (ekspandirana glina i škrljac, ekspandirana zgura; sinterovani leteći pepeo, ekspandirano staklo...).

Na Slici II-2 data je veza između zapreminske mase lakoagregatnog betona i oblasti primene, kao i najčešće korišćene lake agregate (prirodne i proizvedene) za spravljanje određene vrste lakoagregatnih betona.



Slika II-2. Podela lakoagregatnih betona prema zapreminskoj masi [11]

### 2.2. Kaverozni betoni

Kaverozni betoni se sastoje od cementa, vode, i krupnog agregata, dok je sitan agregat (pesak) izbačen [10], pri čemu se mogu dodati i mineralni dodaci poput letećeg pepela i mala količina filera ili sitnog agregata. Dobijaju se tako što se agregat, nakon prethodnog kvašenja, meša sa cementom i vodom, a rezultat su zrna agregata



obavijena slojem cementne paste međusobno tačkasto povezana, tako da između zrna ostaje prazan prostor (Slika II-1b).

Ova vrsta betona se pravi, najčešće, samo od jedne frakcije krupnog agregata. Prostori između zrna su međusobno povezani čime se formira otvorena porozna struktura betona, sa malom zapreminskom masom, malim mehaničkim svojstvima, malim koeficijentom toplotne provodljivosti, dok se zbog smanjenog kapilarnog upijanja vode smatraju otpornim na dejstvo mraza. Kod ove vrste betona je kvalitet agregata posebno značajan, pa se ne preporučuje upotreba izduženih ili oštih zrna, kako bi se smanjila mogućnost lokalnog drobljenja prilikom dejstva opterećenja.

Zapreminska masa zavisi pretežno od vrste i granulometrijskog sastava agregata kao i od odnosa agregata i cementa, a kreće se u granicama:

- od 1200 do 1900kg/m<sup>3</sup> za običan rečni ili drobljeni agregat sa odnosom agregat/cement od 6 do 10;
- od 800 do 1400kg/m<sup>3</sup> za lake agregate sa odnosom agregat/cement od 3 do 8.

*Tabela II-2. Karakteristike kaveroznih betona [10]*

	Odnos agregat/cement (po masi)	
	Običan agregat: 6 - 10	Laki agregat: 3 - 8
Vodo-cementni faktor	0,38 - 0,45	0,38 - 0,45
Zapreminska masa prirodno vlažnog betona [kg/m <sup>3</sup> ]	1200 - 1900	800 - 1400
Čvrstoća pri pritisku [MPa]	3 - 7	3 - 7

### 2.3. Čelijasti betoni

Čelijasti betoni dobili su naziv po strukturi koja sadrži veliki procenat pora - ćelijica veličine 1 do 2mm. Ukupna poroznost ovih betona je vrlo velika i može iznositi i do 85%. Čelijasta struktura se obrazuje dodavanjem proizvedene pene ili razvijača gasa osnovnoj masi [12].

Prema načinu formiranja pora u masi betona, razlikuju se dve vrste ćelijastih betona, gas-betoni i peno-betoni.

Gas-betoni se dobijaju od portland cementa, hidratisanog kreča, kvarcnog peska, vode i praha aluminijuma koji služi za obrazovanje pora. Tehnološki proces proizvodnje

gas-betona sastoji se iz sledećih operacija: samleveni kvarcni pesak se homogenizuje sa vezivima, vodom i prahom aluminijuma, zatim se lije u kalupe i odležava 5 do 6 sati da bi se usled reakcije između aluminijuma i  $\text{Ca(OH)}_2$  obrazovao gas vodonik koji formira mehuriće u strukturi betona.

Gas-betoni očvršćavaju u autoklavima na  $T=180^\circ\text{C}$  i  $p=0.98\text{MPa}$ . Dobijeni materijal ima zapreminsku masu od  $500\text{kg/m}^3$  do  $700\text{kg/m}^3$ , čvrstoće od  $2,5\text{MPa}$  do  $6\text{MPa}$ . Proizvodi od gas-betona se mogu armirati prethodno zaštićenom armaturom [12].

U Tabeli II-3 date su osnovne karakteristike gas-betona.

*Tabela II-3. Karakteristike gas-betona [10]*

Zapreminska masa [ $\text{kg/m}^3$ ]	Čvrstoća pri pritisku u vlažnom stanju [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Koeficijent toplotne provodljivosti (3% vlažnost) [W/mK]
450	3,2	0,65	1,6	0,12
525	4,0	0,75	2,0	0,14
600	4,5	0,85	2,4	0,16
675	6,3	1,00	2,5	0,18
750	7,5	1,25	2,7	0,2

Peno-betoni se dobijaju od istih osnovnih sirovina kao i gas-betoni samo se za obrazovanje pora umesto praha aluminijuma koriste preparati na bazi smola i sapuna koji obrazuju stabilnu penu.

Tehnološki proces proizvodnje peno-betona se sastoji iz sledećih operacija: prvo se vodi doda sredstvo za formiranje pene, pa kada se dobije pena, dodaju se cement i pesak i vrši se homogenizacija mase. Ova vrsta betona očvršćava ili na vazduhu ili u autoklavima.

U Tabeli II-4 date su osnovne karakteristike peno-betona.

Tabela II-4. Karakteristike peno-betona [10]

Zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku u vlažnom stanju [MPa]	Čvrstoća na savijanje [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Koeficijent toplotne provodljivosti (3% vlažnost) [W/mK]
400	0,5 - 1,0	0,8 - 1,0	0,10	0,30 - 0,35
600	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5	0,11	0,22 - 0,25
800	1,5 - 2,0	2,0 - 2,5	0,17 - 0,23	0,20 - 0,22
1000	2,5 - 3,0	2,5 - 3,0	0,23 - 0,30	0,15 - 0,18
1200	4,5 - 5,5	3,5 - 4,0	0,38 - 0,42	0,09 - 0,11
1400	6,0 - 8,0	5,0 - 6,0	0,50 - 0,55	0,07 - 0,09
1600	7,5 - 10,0	10,0 - 12,0	0,62 - 0,66	0,06 - 0,07

### 3. LAKI BETON KROZ ISTORIJU

Prvi primeri upotrebe lakog betona kao konstruktivnog materijala, datiraju iz perioda od pre 5000 godina, kada su izgrađeni čuveni gradovi Mohenjo-daro i Harapa u dolini Inda na teritoriji današnjeg Pakistana [2]. Prve vrste lakih betona su pravljene upotrebom grčkog i italijanskog plovućca kao lakog agregata, dok je kao vezivo korišćen krečnjak. Iako, u poređenju sa današnjim betonima, ovi betoni imaju značajno lošije mehaničke karakteristike, zahvaljujući izuzetnoj trajnosti, objekti iz tog perioda i danas postoje.

Neki od najpoznatijih objekata izvedenih upotrebom lakog agregata su Koloseum u Rimu (70-82. godina), Panteon u Rimu (118-128. godina, kupola prečnika 43.3m) gde su za spravljanje betona korišćeni plovućac i tuf, akvadukt Pont du Gard (1. vek), Aja Sofija u Istanbulu (4. vek) [2], itd. [2]

Stari Rimljani su, tokom vojnih pohoda, širili primenu lakog betona kad god i gde god je bilo pogodnih nalazišta materijala. Od tog doba, različiti materijali su korišćeni za dobijanje lakih betona, neki sa značajno boljim mehaničkim karakteristikama, ali sve do 20. veka, sav napredak se odnosio uglavnom na mehaničke karakteristike vezivnih materijala. [13]



*Slika II-3. Aakvadukt Pont du Gard  
(1. vek n.e.)*



*Slika II-4. Panteon, Rim (2. Vek)<sup>1</sup>*

U novije vreme, značajnija primena i istraživanja primene lakog betona počinju tokom Prvog svetskog rata, u sklopu programa izgradnje brodova koji je nastao usled nedostatka čelika. Najpoznatiji poznatiji brod od lakog betona je tanker U.S.S. Selma (dužina 132m, težina 7500t). Tokom Drugog svetskog rata, lakoagregatni beton spravljen sa ekspanzibilnim škriljcem je takođe našao primenu u brodogradnji sa 105 izgrađenih brodova kapaciteta od 3.200t do 140.250t, korišćenih u ratnim operacijama [13].

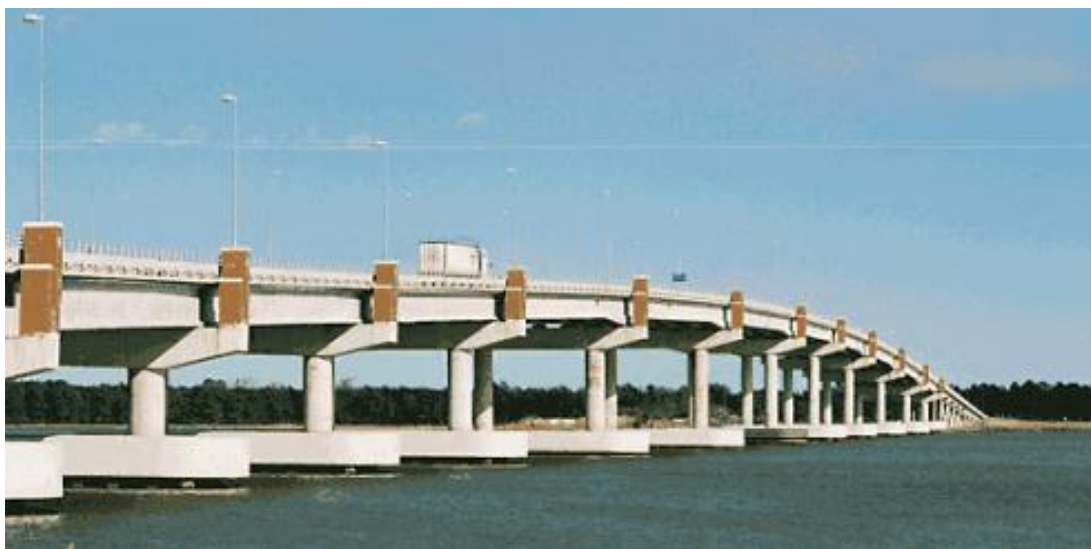
Verovatno najvažniji trenutak u razvoju primene lakoagregatnih betona dogodio se u Americi kada je, 1918. godine, S. J. Hajd patentirao proces proizvodnje lakog agregata na bazi ekspanzirane gline u rotacionim pećima.

Između dva rata, kao rezultat istraživanja primene ekspanziranog škriljca, započeta je industrijska proizvodnja ove vrste lakog agregata. Neki od prvih ozbiljnijih projekata u kojima je upotrebljen lakoagregatni beton kao konstrukcijski beton su zgrada kompanije Bell u Kansasu (SAD) izgrađena u periodu 1922-1929. i Hotel Plaza u Sent Luisu (SAD), izgrađen 1929. godina, za čiju izgradnju je upotrebljen lakoagregatni beton spravljen sa ekspanzibilnim škriljcem.

.....  
<sup>1</sup>Giovanni Paolo Panini –Unutrašnjost Panteona, Rim (Ulje na platnu, oko 1734. god.)

Tokom 50-ih i 60-ih godina XX veka izgrađen je veliki broj objekata sa potpunom ili delimičnom primenom lakoagregatnog betona, od kojih su najpoznatiji terminal aerodroma u Njujorku, izgrađen u periodu 1956-1962., Arktička katedrala u gradu Tromso u Norveškoj (1965. godina), pešački most Dyckerhoff u Visbadenu u Nemačkoj (1966. godina) [11].

U novije vreme, kao primer primene lakog agregata u konstrukcijskim betonima je izdvojeno nekoliko objekata: most preko reke Mataponi (SAD) sa rasponima 44-73m izgrađen 2007. godine (Slika II-5), gde je upotrebljen lakoagregatni beton sa agregatom na bazi ekspandiranog škriljca za izradu kolovozne ploče i prethodno napregnutih grednih nosača [14], hotelski kompleks u Bransonu (Misuri, SAD) izgrađen 1997. godine gde je za krovnu konstrukciju raspona 40m korišćen lakoagreatni beton sa agregatom na bazi ekspandiranog škriljca [15], Milenijum centar u Kardifu (Vels), izgrađen u periodu 2002-2003. godine, 'Broadgate Tower' u Londonu, izgrađen u periodu 2005-2009. i bolnica kraljice Elizabete u Birminghamu, izgrađena 2010. godine, kod kojih je korišćen lakoagregatni beton na bazi letećeg pepela [16].



*Slika II-5. Most preko reke Mataponi (SAD)*



**III**

**LAKOAGREGATNI BETONI**





## 1. LAKOAGREGATNI BETONI

U skladu sa klasifikacijom lakih betona datoj u prethodnom poglavlju, posebnu grupu lakoagregatnih betona predstavljaju konstrukcijski lakoagregatni betoni.

Pod lakoagregatnim betonom se, prema EN 206-1:2000 [17]<sup>2</sup>, smatra beton koji ima zapreminsku masu u suvom stanju ne manju od 800kg/m<sup>3</sup> i ne veću od 2000kg/m<sup>3</sup>. Ovi betoni mogu da se dobiju potpunom zamenom običnog agregata lakim agregatom, ili delimičnom zamenom, pri čemu je uobičajena praksa da se kao sitan agregat koristi prirodni pesak, a kao krupan, laki agregat. Najčešće, komercijalne vrste agregata ne prelaze veličinu zrna od 16mm, a kao maksimalna je usvojena veličina od 25mm [7].

## 2. KOMPONENTNI MATERIJALI

Osnovne komponente lakoagregatnih betona su:

- laki agregat (ili krupan laki agregat i sitan rečni ili drobljeni agregat)
- cement,
- voda.

Pored osnovnih komponentnih materijala, radi postizanja zahtevanih svojstava svežeg i očvrslog betona, najčešće je neophodno da se dodaju i hemijski i/ili mineralni dodaci.

### 2.1. Laki agregat

Laki agregat se definiše kao agregat mineralnog porekla sa zapreminskom masom samog zrna (potpuno suvog) manjom od 2000kg/m<sup>3</sup> ili zapreminskom masom u rastresitom stanju manjom od 1200kg/m<sup>3</sup> [17].

Da bi se agregat mogao koristiti za spravljanje konstrukcijskih lakoagregatnih betona, neophodno je da budu ispunjeni sledeći uslovi [18]:

- da ima dovoljno veliku otpornost na drobljenje,
- da omogući spravljanje betona sa čvrstoćom pri pritisku većom od 20MPa,
- da beton spravljen sa lakim agregatom ima zapreminsku masu u potpuno suvom stanju u rasponu od 1500kg/m<sup>3</sup> do 2000kg/m<sup>3</sup>.

.....  
<sup>2</sup> Prema ACI 213R-03 [65], pod konstrukcijskim lakoagregatnim betonom smatra se beton koji ima zapreminsku masu u prirodnom stanju između 1120kg/m<sup>3</sup> i 1920kg/m<sup>3</sup>.

### 2.1.1. Vrste lakih agregata

Laki agregati mogu biti prirodnog porekla i proizvedeni laki agregati, a u zavisnosti od postupka pripreme i proizvodnje mogu se podeliti u dve kategorije.

Prvu kategoriju čine laki agregati koji ne prolaze kroz proces termičkog tretmana i mogu se podeliti u dve grupe:

- Agregati koji se dobijaju mehaničkim tretmanom (drobljenje i prosejavanje) stenske mase (agregati prirodnog porekla), ali i raznih otpadnih materijala kao što su opeka ili krupne frakcije elektrofilterskog pepela ili zgure.
- Agregati koji se dobijaju formiranjem granula u procesu aglomeracije zvanim hladno vezivanje (eng. „cold-bonding“). U ovom procesu se materijali sa pucolanskim svojstvima oblikuju u granule tako što se prvo napravi mešavina praha i veziva (cement, kreč i voda) koja se u svežem stanju transportuju do diska za peletizaciju gde se formiraju granule sfernog oblika, a zatim se transportuju u struji bogatoj lakim pepelom do silosa gde će se proces hidratacije neometano odvijati. U procesu hidratacije se postiže temperatura oko 85°C. Nakon postizanja strukturne čvrstoće agregat se može koristiti za spravljanje betona.

Drugu kategoriju čine agregati od sirovina različitog porekla koji prolaze kroz proces termičkog tretmana. Faze u procesu proizvodnje su: priprema sirovine, oblikovanje i pečenje.

U fazi pripreme sirovine se, najčešće, dodaju materije koje će dovesti do oslobađanja gasova na određenoj temperaturi u procesu pečenja, što ima za posledicu formiranje porozne strukture. Izuzetak su perlit, vermikulit i škrljac. Oni u strukturi sadrže vodu ili druge materije koje će u procesu pečenja prelaziti u paru (voda) ili sagorevati (organske materije) i oslobađati gasove koji će dovesti do ekspanzije polazne mase. Kada su u pitanju gline, kao ekspanzivne materije mogu se koristiti karbonati, različiti oksidi, itd.

U procesu oblikovanja polazne mase u granule, najčešće se koristi proces peletiranja<sup>3</sup>, ali može da se koristi i proces ekstruzije. U slučaju da se za pečenje koristi rotaciona peć, faza oblikovanja nije neophodna jer se obavlja u peći.

Proces pečenja se može odvijati u rotacionim pećima, vertikalnim pećima ili u pećima gde je omogućeno pečenja granula koje se kreću kao na pokretnoj traci. Materijal u

.....  
<sup>3</sup> U procesu peletiranja granule se formiraju na metalnom disku koji je pod uglom i koji može lagano da vibrira.

procesu pečenja prolazi kroz različite faze. Kako će se voditi proces pečenja zavisi najviše od sastava početne sirovine.

#### 2.1.1.1. Prirodni laki agregat

Prirodni laki agregati su, najčešće, vulkanskog porekla, zbog čega se mogu naći samo u određenim delovima sveta. Nastali su naglim hlađenjem magme, pri čemu dolazi do stvaranja amorfne staklaste strukture velike poroznosti. Najčešće korišćeni prirodni laki agregat je plovuće.

U zavisnosti od mineralošskog sastava, prilikom hlađenja magme može doći do stvaranja bazaltne verzije plovućca, tzv. skorije, koja ima veće, nepovezane i nepravilno raspoređene pore zbog čega ima malo lošije mehaničke karakteristike od plovućca.

Pored plovućca i skorije (Slike III-1 i III-2), prirodni laki agregat vulkanskog porekla koji je u prošlosti bio dosta korišćen je i vulkanski tuf koji najčešće nastaje taloženjem sitnijeg vulkanoklastičnog materijala [19].



*Slika III-1. Plovuće*



*Slika III-2. Skorija*

Takođe, kao laki agregati se, u nekim slučajevima, mogu koristiti i sedimentne stene poput dijatomejske zemlje, porozne sitnozrne stene izgrađene pretežno od skeleta dijatomeja (silikatnih algi) sastavljenih od opalske silicijumske materije [20].

#### 2.1.1.2. Proizvedeni laki agregat

U zavisnosti od porekla i karakteristika sirovinskog materijala upotrebljenog za proizvodnju, proizvedene lake agregate možemo podeliti u tri grupe:

- agregat dobijen preradom prirodnih sirovina kao što su perlit, vermikulit, glina, škriljac...;
- industrijski proizveden agregat, npr. ekspanirano staklo;
- agregat dobijen preradom industrijskih nus-proizvoda kao što su leteći pepeo, zgura, itd.

Agregati dobijeni od prirodnih materijala se, najčešće, proizvode postupcima u kojima dolazi do ekspanzije pod dejstvom vodene pare ili sagorevanjem organskih materija. U ovim postupcima se izaziva istovremeno omekšavanja materijala i stvaranja gasa usled čega dolazi do ekspanzije agregata. U zavisnosti od vrste materijala i hemijskog sastava, temperatura na kojoj dolazi do omekšavanja iznosi između 700°C i 1400°C, dok je temperaturni opseg u kom dolazi do ekspanzije mnogo manji. O ovome se mora posebno voditi računa kako bi se odredio trenutak kada se prekida zagrevanje i počinje sa naglim hlađenjem da bi se postigao željeni stepen ekspanzije i formiranje čvrste opne agregata. U slučaju da dođe do preterane ekspanzije, debljina opne zrna agregata će biti suviše tanka a agregat neće imati dovoljnu otpornost na drobljenje i samim tim neće biti pogodan za spravljanje konstrukcijskog betona.

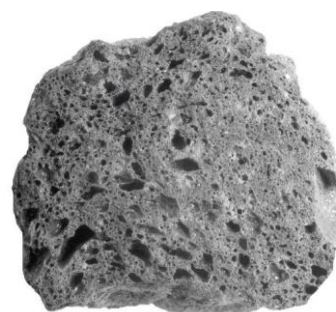
Ukoliko se koriste meke gline, sirovina se prvo melje u fini prah, suši se, a zatim se meša sa vodom i oblikuje peletiziranjem, čime se dobija skoro savršen sferičan oblik. Nakon toga, vrši se zaprašivanje zrna prahom  $\text{CaCO}_3$  i transport u rotacionu peć gde glina prolazi kroz dve faze zagrevanja (postepeno do 900-1100°C u prvoj fazi, a zatim u drugoj fazi do 1150°C) usled čega dolazi do ekspanzije gline, a zatim se u trećoj fazi naglo hladi. U industriji, ovaj proces se naziva „suvi postupak“ [11].

„Mokri postupak“ se koristi u slučaju da su kao sirovina dostupne tvrde gline i škriljci [21]. U ovom procesu, sirovina se meša dok se ne dobije homogeno testo koje se zatim ekstrudira i seče. Nakon ove faze, sirovina se transportuje u rotacionu peć gde se usled rotacije formira oblik lakog agregata, dok je proces ekspanzije isti kao kod suvog postupka. Za razliku od „suvog postupka“, sirovina u rotacionoj peći prolazi samo kroz jednu fazu pa je kontrola veličine zrna agregata znatno komplikovanija.

U grupu lakih agregata dobijenih preradom prirodnih sirovina koji se najčešće koriste u konstrukcijskim betonima su ekspandirana glina i ekspandirani škriljac (Slika III-3 i Slika III-4), ekspandirani perlit i vermikulit [7].



*Slika III-3. Ekspandirana glina*



*Slika III-4. Ekspandirani škriljac*

U proizvodnji agregata dobijenih preradom industrijskih nus-proizvoda koji su, za razliku od prirodnih materijala, već prošli termičku obradu i koji se tope na

temperaturama iznad 1100°C [11], najčešće se koristi postupak aglomeracije. Kod ove vrste lakih agregata se u prvoj fazi vrši oblikovanje zrna. Nakon oblikovanja se zrna kvase, usled čega dolazi do kohezije između zrna i formiranja kuglica agregata. Posebno se mora voditi računa o stepenu vlažnosti kako ne bi došlo do stvaranja mulja zbog prevelike vlažnosti, odnosno, nedovoljne sile kohezije između zrna agregata usled premale vlažnosti. U ovoj fazi, zbog slabe sile kohezije, zrna nemaju dovoljnu čvrstoću da bi mogla da se koriste kao agregat pa se vrši očvršćavanje na jedan od dva načina [2]:

- sinterovanjem na temperaturama preko 900°C;
- primenom dopunskih veziva kao što su krečnjak i portland cement, pri čemu se vezivanje odvija ili na temperaturama 100-250°C (hidrotermalni proces) ili na temperaturama manjim od 100°C (proces hladnog vezivanja).

### **2.1.2. Svojstva lakih agregata**

Karakteristike lakih agregata, zbog svoje raznolikosti po pitanju sastava i porekla, mogu značajno da se razlikuju, što definiše i njihovu primenu. Uobičajeno je da zapremina lakog agregata iznosi 70-75% zapremine betona [7], pa je i uticaj agregata na fizičko-mehanička svojstva lekoagregatnih betona izuzetno velik. Dok se na karakteristike lakih agregata prirodnog porekla ne može mnogo uticati, kod agregata koji se dobijaju preradom prirodnih sirovina ili nus-proizvoda moguće je, u manjoj ili većoj meri, korekcijama u toku procesa proizvodnje postići željene karakteristike.

#### **2.1.2.1. Geometrija i struktura zrna**

Oblik i veličina zrna zavise prvenstveno od procesa proizvodnje. Kod agregata koji se dobijaju preradom prirodnih sirovina, oblik zrna, veličina, struktura i tekstura površine zrna mogu da se definišu u procesu proizvodnje. Odabirom načina pripreme sirovine se, npr. kod glina, utiče na oblik i veličinu peleta, a samim tim i na oblik i veličinu zrna lakog agregata. Definisanjem režima zagrevanja se utiče na teksturu površine zrna, veličinu zrna i strukturu pora.

Sa druge strane, kod agregata kod kojih se u procesu pripreme materijala vrši drobljenje sirovine (škrljac, perlit, vermikulit...), a u procesu proizvodnje dolazi do ekspanzije zrna, moguće je uticati na veličinu zrna, delimično na oblik i teksturu<sup>4</sup>, dok struktura pora zavisi od sirovinskog materijala i na to se ne može uticati. Kod prirodnih agregata (plovuće, skorija i sl.) i agregata od industrijskih nus-proizvoda je moguće uticati samo na veličinu, i donekle, oblik zrna.

.....

<sup>4</sup> U procesima u kojima se pečenje vrši u rotacionim pećima, zrna agregata imaju loptast oblik i glatku zatvorenu opnu. U ovu grupu spadaju agregati dobijeni preradom škrljca, perlita, vermikulita...

### 2.1.2.2. Zapreminska masa

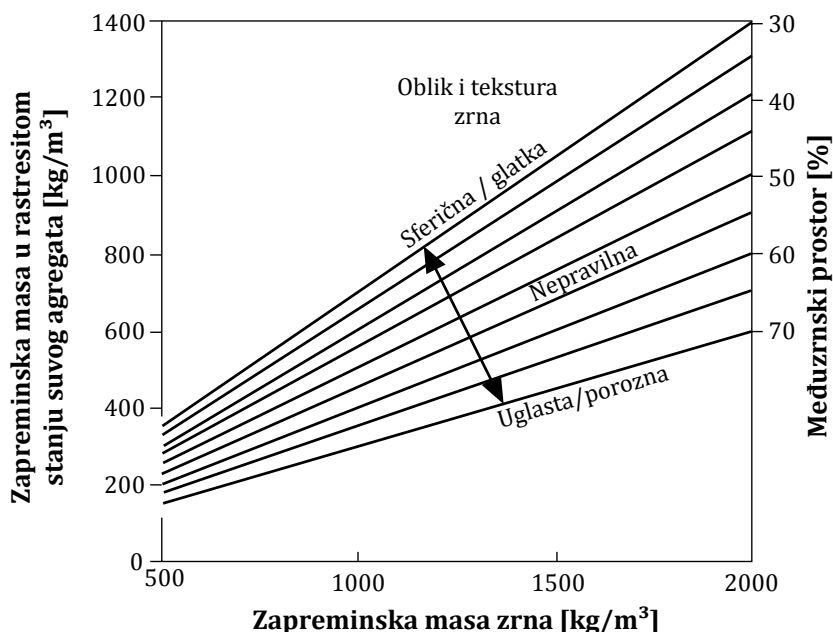
Zapreminska masa lakih agregata može da se posmatra na više načina, kao zapreminska masa samog zrna ili kao zapreminska masa rastresitog materijala.

Zapreminska masa samog zrna predstavlja odnos mase zrna i zapremine zrna, uključujući pore u samom zrnu, i zavisi od specifične mase materijala (najčešće 2500-3000kg/m<sup>3</sup>) i poroznosti. Kod nekih vrsta lakih agregata, zapreminska masa samog zrna zavisi i od veličine zrna, pa je moguće da sitnija zrna imaju veću zapreminsku masu (krupnija zrna su u procesu proizvodnje više ekspandirala pa imaju veću poroznost).

Prilikom projektovanja sastava betona, za određivanje apsolutne zapremine agregata se koristi zapreminska masa samog zrna.

Zapreminska masa materijala predstavlja odnos mase materijala i zapremine koju taj materijal zauzima, uključujući i prostor između zrna. Ova zapreminska masa zavisi od nekoliko faktora:

- veličine zrna;
- granulometrijskog sastava;
- oblika i teksture zrna;
- kompaktnosti (rastresito ili zbijeno stanje);
- vlažnosti.



Slika III-5. Veza između zapreminske mase suvog rastresitog agregata i zapreminske mase samog zrna [18]

Na slici III-5 data je veza između zapreminske mase samog zrna i zapreminske mase materijala u zavisnosti od oblika i teksture zrna i prostora između zrna (kompaktnosti) kod agregata dobijenih nekom od navedenih metoda proizvodnje.

### **2.1.2.3. Upijanje vode**

Upijanje vode se, najčešće, određuje zajedno sa zapreminskom masom samih zrna. Količina upijene vode zavisi od strukture pora (vrste, veličine i rasporeda) i karakteristika opne zrna. Proces upijanja vode se može podeliti u dve faze. Prva faza se javlja kad se suv agregat uroni u vodu i kada se upijanje odvija brzo. U ovoj fazi, nakon potapanja dolazi do zasićenja većih pora vodom, pri čemu ostaje određena količina zarobljenog vazduha koji će biti izbačen tokom druge faze. U drugoj fazi dolazi do zasićenja manjih pora, pri čemu je ova faza mnogo sporija (u nekim slučajevima traje šest do dvanaest meseci [2]).

Neki agregati imaju pore mikroskopskih dimenzija dok se kod drugih mogu naći i pore veličine do nekoliko milimetara. U oba slučaja, pore mogu biti međusobno povezane ili zatvorene. Jedan od načina da se smanji upijanje vode je da se u procesu proizvodnje oko porozne strukture agregata formira opna što manje poroznosti (npr. sinterovanjem). U agregate sa ovakvom opnom spadaju agregati na bazi ekspanzirane gline, škriljca i letećeg pepela kod kojih se količina vode koju laki agregat upija kreće u granicama 5-30% (u odnosu na zapreminu) u toku 24h dok kod nekih (npr. plovuće) može da iznosi i do 50% [7].

### **2.1.2.4. Čvrstoća agregata**

Poznato je da je čvrstoća agregata pri pritisku zavisna od poroznosti i generalno važi da, što je veća poroznost, to je čvrstoća pri pritisku manja.

Što se čvrstoće na zatezanje tiče, direktnu vezu između čvrstoće i poroznosti nije moguće uspostaviti jer čvrstoća na zatezanje u mnogome zavisi od strukture pora. Za istu poroznost, veću čvrstoću na zatezanje će imati zrna koja imaju sitnije, jednako raspoređene pore nego zrna s krupnim porama. Takođe, na čvrstoću na zatezanje utiču i karakteristike opne zrna agregata. Kod agregata poput ekspanzirane gline i škriljca čvrstoća se povećava i do 10% jer opna, zbog sinterovanja, ima malu poroznost i veću čvrstoću na zatezanje od jezgra zrna agregata.

Postoji više načina da se odredi čvrstoća agregata:

- kao čvrstoća samog zrna,
- empirijski, na osnovu čvrstoće betona napravljenog od lakog agregata uronjenog u matricu visoke pritisne i zatezne čvrstoće i modula elastičnosti (npr. malter od peska pomešanog sa epoksidnom smolom),
- određivanjem sile potrebne da se izvrši sabijanje agregata u cilindru do određenog nivoa,
- određivanjem nivoa do kog se sabije agregat pri određenoj sili sabijanja,
- određivanjem mase zdrobljenog agregata prosejanog kroz sito za jednu veličinu manje od najmanjeg zrna ispitivanog agregata.

#### 2.1.2.5. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja odnos napona i odgovarajuće deformacije, izazvane opterećenjem koje se nalazi u zoni ispod granice elastičnosti za dati materijal. Modul elastičnosti lakih agregata, pogodnih za konstrukcijske betone, najčešće iznosi od 5GPa do 15GPa [7].

Problem kod određivanja modula elastičnosti lakog agregata se ogleda u veličini uzorka. Kako su zrna agregata mala, standardni postupci za određivanje modula elastičnosti nisu mogući, pa se modul elastičnosti određuje nekom od indirektnih metoda.

Jedna od metoda za određivanje modula elastičnosti agregata podrazumeva laboratorijska ispitivanja betona spravljenog sa lakim agregatom. Na osnovu poznatih vrednosti modula elastičnosti cementne matrice i poznatih zapreminskih udela agregata i cementne matrice, modul elastičnosti samog agregata se može analitički odrediti primenom različitih kompozitnih modela od kojih su najpoznatiji Voight-ov model, Reuss-ov model, Popovićev model i Cuonto model [22].

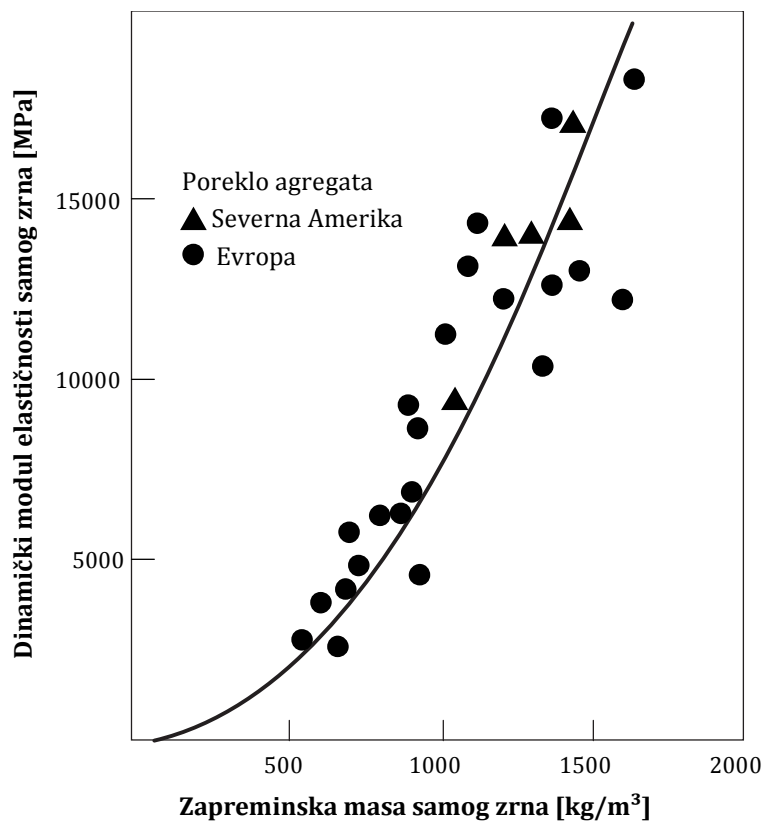
Takođe, određivanja modula elastičnosti zrna je moguće i na osnovu zapreminske mase samog zrna i brzine prolaska ultrazvuka za svako zrno posebno. Modul elastičnosti određen na ovaj način predstavlja dinamički modul elastičnosti. Na slici III-6 prikazani su rezultati istraživanja veze između zapreminske mase samog zrna i dinamičkog modula elastičnosti, na osnovu kog je definisana korelacija u obliku:

$$E_{cd} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p^2 \quad [23] \quad (1)$$



gde su:

- $E_{cd}$  – dinamički modul elastičnosti [MPa],
- $\rho_p$  – zapreminska masa samog zrna [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].



Slika III-6. Zavisnost dinamičkog modula elastičnosti lakog agregata od zapreminske mase samog zrna [23]

## 2.2. Cement

Iako se za spravljanje lakoagregatnih betona mogu koristiti sve vrste cemenata<sup>5</sup>, najčešće se koristi čist portland cement (CEM I), dok se zbog potrebe za obezbeđenjem visokih mehaničkih karakteristika cementnog kamena preporučuje upotreba cemenata visoke klase čvrstoća.

## 2.3. Voda

Voda koja se koristi za spravljanje lakoagregatnih betona mora da zadovolji iste kriterijume kao i voda za spravljanje običnih betona.

<sup>5</sup> Prema standardu EN 206 [98] mogu se koristiti sve vrste cementa definisane standardom EN 197-1 [81].

## 2.4. Dodaci betonu

S obzirom na to da nije utvrđena nekompatibilnost između dodataka i lakih agregata, njihova primena može da bude ista kao i kod normalnih betona. Dodaci koji se najčešće koriste se mogu podeliti u dve grupe [11]:

### a) Hemijski dodaci

- plastifikatori i superplastifikatori;
- aeranti;
- akceleratori;
- retarderi.

### b) Mineralni dodaci

- prirodni mineralni dodaci (vulkansko staklo, vulkanski tuff, diatomejska zemlja);
- veštački mineralni dodaci (leteći pepeo, granulirana zgora, silikatna prašina, metakaolin).

Plastifikatori su, najčešće, jedinjenja na bazi masnih kiselina, naftenskih kiselina i lignosulfata, dok su superplastifikatori najčešće vodeni rastvori sulfonovanog melamin-formaldehida, sulfonovanog naftalin-formaldehida i modifikovanih lignosulfata [24]. Njihovim dodavanjem u beton postiže se poboljšanje ugradljivosti i obradljivosti mešavine, uz smanjenje količine vode.

Aeranti u strukturi betona formiraju fine, ravnomerno raspoređene mehuriće vazduha. Primena aeranata ima višestruku ulogu:

- smanjenje zapreminske mase betona (povećanjem količine uvučenog vazduha u količini od 3% smanjuje se zapreminska masa betona za  $\approx 50 \text{ kg/m}^3$ );
- povećanje otpornosti na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje (ravnomerno raspoređeni mehurići vazduha veličine 0,01-0,3mm prekidaju mrežu finih kapilara u cementnom kamenu. Na ovaj način se smanjuje kapilarno upijanje vode i formira cca 20% rezervne zapremine pora za širenje leda, čime se eliminišu unutrašnji naponi koji dovode do destrukcije očvrstlog betona [24];
- poboljšava se ugradljivost (1% uvučenog vazduha poboljšava ugradljivost kao 3-5kg vode [7]).

Akceleratori (ubrzivači) imaju ulogu u skraćivanju vremena početka vezivanja i ubrzavanju očvršćavanja. Po svom hemijskom sastavu, akceleratori su najčešće neorganska jedinjenja na bazi hlorida, karbonata, silikata, aluminata itd. ali mogu biti i organska jedinjenja poput trietanolamina, dietanolamina, karbamida, glioksala i sl.

Najduže korišćen akcelerator je kalcijum hlorid ( $\text{CaCl}_2$ )<sup>6</sup>, ali je njegova primena (kao i ostalih na bazi hlorida) zbog mogućnosti stvaranja uslova za pojavu korozije zabranjena u armirano betonskim konstrukcijama [25]. Novije generacije akceleratora su na bazi kalcijum nitrata ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) i natrijum nitrata ( $\text{NaNO}_3$ ).

Retarderi (usporivači) imaju ulogu u produženom vremenu odvijanja hemijskih reakcija na relaciji cement-voda, tj. produžava se vreme ugradnje betona. Najpoznatiji retarder je sadra ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), a pored sadre koriste se i druga organska jedinjenja na bazi natrijuma, kalcijuma, ugljovodonika itd. Od neorganskih jedinjenja se koriste oksidi olova i cinka, fosfati, soli magnezijuma, itd. [24]

Mineralni dodaci su fino mleveni silikatni materijali koji se, u zavisnosti od vrste, dodaju betonu u količinama 10-70% u odnosu na masu cementa. Iako se u nekim zemljama i dalje koriste prirodni mineralni dodaci, iz ekonomskih razloga i potrebe za smanjenjem zagađenja primarnu sirovinu sve više predstavljaju industrijski nusproizvodi [26], pri čemu se preporučuje primena aktivnih mineralnih dodataka (dodaci sa hidrauličnim ili pucolanskim svojstvima).

Leteći pepeo kao dodatak se, najčešće, koristi za zamenu cementa u količini do 30% ali ima slučajeva gde je zamena cementa letećim pepelom iznosila i 50-60% [27]. U zavisnosti od hemijskog sastava, razlikuju se dva tipa [28]: tip „F“ ima mali sadržaj CaO (manje od 10%) i ima pucolansko svojstvo<sup>7</sup>, dok je u tipu „C“ veća količina kalcijuma (15-40%) u obliku  $\text{C}_3\text{A}$ , CS i  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ <sup>8</sup>, što mu omogućava da hidratiše sam za sebe [27].

Metakaolin spada u grupu visoko reaktivnih alumosilikata. Nastaje zagrevanjem kaolina u rotacionim pećima na temperaturama 700°C - 800°C, nakon čega se naglo hladi i melje u fini prah. Po hemijskom sastavu predstavlja jedinjenje u kom preovlađuju aluminijum, silicijum i kiseonik. Metakaolin dobijen na ovaj način ima veoma neuređenu (amorfnu) strukturu zbog čega je reaktivnost sa kalcijum hidroksidom, koji nastaje kao proudukt hidratacije cementa, izuzetno brza. Neka istraživanja [29] pokazala su da se upotrebom metakaolina skoro u potpunosti može eliminisati kalcijum hidroksid.

.....  
<sup>6</sup> Prva dokumentovana primena u betonu je bila 1873. godine, a prvi patent 1885. godine [99]

<sup>7</sup> Pucolani su silikatni i alumosilikatni materijali, koji nemaju latentna hidraulična svojstva, ali hemijski reaguju sa kalcijum hidroksidom usled čega nastaju spojevi koji imaju cementirajuća, hidraulična svojstva. To svojstvo naziva se pucolanska aktivnost.

<sup>8</sup> U hemiji cemenata se koriste skraćenice C=CaO; S=SiO<sub>2</sub>; A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Š=SO<sub>3</sub>; H=H<sub>2</sub>O

### 3. PROJEKTOVANJE SASTAVA LAKOAGREGATNIH BETONA

Cilj projektovanja sastava betona je, bez obzira na to o kojoj vrsti i nameni betona se radi, da se odrede količine komponentnih materijala čijim mešanjem će biti postignuta zahtevana svojstva betona kako u svežem tako i u očvrslom stanju. Svojstva betona koja, u zavisnosti od projektantskih zahteva, najčešće moraju biti zadovoljena su: konzistencija, obradljivost, čvrstoća pri pritisku, vodonepropusnost, otpornost na dejstvo mraza (ili mraza i soli), mogućnost primene u različitim vrstama agresivne sredine, itd. Pored nabrojanih svojstava, podrazumeva se da tokom spravljanja betona ne dolazi do segregacije, isplivavanja vode na površinu i da bude očuvana homogenost tokom transporta i ugradnje [2].

Izbor vrste i količine komponentnih materijala vrši se u zavisnosti od njihovih svojstva i uticaja tih svojstava na beton.

#### 3.1. Izbor komponentnih materijala

##### 3.1.1. Agregat

Prilikom izbora lakog agregata, prvo o čemu treba voditi računa su zapreminska masa i mehaničke karakteristike, pri čemu između ovih svojstava postoji direktna zavisnosti. Kako agregat zauzima cca 70% zapremine betona, jasno je da ima i veliki uticaj i na zapreminsku masu i na mehaničke karakteristike betona. Orijentacione vrednosti zapreminske mase lakog agregata i betona koji se dobije sa tim agregatom, date su u tabeli III-1.

*Tabela III-1. Zavisnost zapreminske mase betona i zapreminske mase lakog agregata [7]*

Približna srednja vrednost zapreminske mase samog zrna agregata* [kg/m <sup>3</sup> ]	Zapreminska masa betona u potpuno suvom stanju [kg/m <sup>3</sup> ]
800	1000
1150	1200
1450	1400
1700	1600
2000	1800
2300	2000

\* vrednosti sračunate uzimajući u obzir i moguću upotrebu prirodnog sitnog agregata

Agregati sa malom zapreminskom masom, po pravilu, imaju niske mehaničke karakteristike, i obrnuto. Kako se iz tabele III-2 može videti, moguće je postići iste čvrstoće betona i sa agregatom niskih i sa agregatom boljih mehaničkih karakteristika, ali uz određene razlike u sastavu i ostalim svojstvima.

*Tabela III-2. Razlike u lakoagregatnom betonu iste čvrstoće sa različitim svojstvima lakog agregata [7]*

<b>Agregat male čvrstoće i male zapreminske mase zrna</b>	<b>Agregat visoke čvrstoće i velike zapreminske mase zrna</b>
Potrebna veća količina cementa	Količina cementa slična kao kod normalnih betona
Manja zapreminska masa betona	Veća zapreminska masa betona
Veće početne čvrstoće i manji prirast kroz vreme	Prirast čvrstoće sličan kao kod normalnih betona
Bolja veza između betona i armature	Veza između betona i armature je nešto lošija kod elemenata opterećenih na savijanje ali je ista za pritisnute elemente
Skoro linearan radni dijagram	Radni dijagram sličan kao kod normalnih betona
Mali modul elastičnosti	Veći modul elastičnosti, ali manji nego kod normalnih betona

Kod normalnih betona, granulometrijski sastav agregata utiče na količinu vode potrebnu za postizanje odgovarajuće ugradljivosti. Sa povećanjem količine sitnih čestica raste i potreba za vodom, što dovodi do povećanja vodo-cementnog faktora, odnosno, smanjenja čvrstoće betona pri pritisku [26]. Odavde se može zaključiti da količina krupnog agregata i veličina zrna treba da budu što je moguće veće, uz zadržavanje ugradljivosti.

Kod lakoagregatnih betona, generalno, važi isto pravilo, ali se mora voditi računa o uticaju veličine zrna agregata na mehanička svojstva betona. Naime, sa povećanjem veličine zrna, kod većine lakih agregata, dolazi do smanjenja čvrstoće i modula elastičnosti zrna, a samim tim i do smanjenja mehaničkih karakteristika betona. Veličina zrna lakog agregata zavisi, prvenstveno, od procesa proizvodnje, odnosno, kod agregata prirodnog porekla, od procesa drobljenja. Najčešće, komercijalne vrste agregata ne prelaze veličinu zrna od 16mm, dok je kao maksimalno zrno usvojena veličina od 25mm [7].

Za postizanje željene ugradljivosti potrebna je manja količina cementne paste ukoliko su zrna zaobljena [18]. U slučaju uglastih zrna, a takva su najčešće zrna agregata kod kojih proces proizvodnje podrazumeva drobljenje (škriljac, perlit, vermikulit), dolazi do uklinjavanja zrna čime se značajno smanjuje ugradljivost, ali se se mogu dobiti betoni većih čvrstoća.

Tekstura zrna agregata takođe utiče kako na svojstva svežeg betona, tako i na karakteristike veze između cementne paste i zrna agregata. Kvalitet veze između cementne paste i agregata je veoma važan za mehaničke karakteristike lakoagregatnih betona, pa prednost imaju zrna koja imaju hrapavu, poroznu opnu. Međutim, mora se voditi računa da je kod ovakvih betona, da bi se postigla odgovarajuća ugradljivost, potrebna veća količina cementne paste jer deo paste (zajedno sa sitnijim česticama agregata) ispunjava pore, a kako malterska komponenta ima veću zapreminsku masu od lakog agregata, povećava se i zapreminska masa betona.

Kao sitan agregat se često koristi prirodni agregat (uglavnom rečni) u cilju poboljšanja ugradljivosti, smanjenja skupljanja i povećanja mehaničkih karakteristika. Takva praksa se može objasniti poređenjem strukture i teksture sitnog lakog agregata i prirodnog agregata. Sitan laki agregat, usled procesa drobljenja, ima grubu teksturu i često veliku otvorenu poroznost, čime je otežano kompaktiranje betona i raspoređivanje malterske komponente između zrna krupnog agregata. Takođe, povećanje čvrstoće se može objasniti i potrebnom manjom količinom vode zbog povoljnijeg oblika zrna peska u odnosu na sitan laki agregat.

Primena prirodnog sitnog agregata umesto sitnog lakog agregata ima i negativnih posledica:

- zapreminska masa betona se povećava;
- zbog razlike u gustinama malterske komponente (cement+voda+prirodni sitan agregat) i lakog agregata postoji mogućnost da dođe do segregacije prilikom spravljanja betona.

Kako je ranije napomenuto, upijanje vode ima velikog uticaja na projektovanje sastava betona, a samim tim i na svojstva svežeg i očvrslog betona. Naime, ukoliko dođe do upijanja vode iz cementne paste, dolazi do smanjenja ugradljivosti betona, a

takođe i od promene vodocementnog faktora. Kako je, u tom slučaju, vrlo upitna tačnost određivanja stvarnog (efektivnog) vodocementnog faktora, teško je predvideti i čvrstoću pri pritisku. Približno, za određivanje efektivne količine vode u cementnoj pasti koristi se voda dodata tokom spravljanja umanjena za količinu vode koju agregat upije za 30 minuta.

Probleme koji se mogu javiti kao posledica upijanja vode moguće je rešiti na dva načina:

- dodavanjem vode koju će agregat da upije sračunatoj količini vode potrebnoj za postizanje zahtevane konzistencije ili
- prethodnim zasićenjem agregata vodom.

Prvi način se koristi kod agregata koji imaju relativno malo upijanje vode ili kod agregata kod kojih do zasićenja vodom dolazi jako brzo (u fazi spravljanja betona). U slučaju da je količina dodatne vode jako velika i da za posledicu ima suviše tečan beton, primenjuje se druga metoda.

Voda koju agregat upije ima važnu ulogu u procesu hidratacije cementa. Oko 67% vode koju agregat upije, u procesu hidratacije pređe u cementu pastu. Preostala voda u agregatu može da se iskoristi u slučaju da dođe do značajnog pada relativne vlažnosti, kako bi se smanjili negativni uticaji skupljanja [30]. Prečnik kapilarnih pora u cementnom kamenu je manji od pora u agregatu, pa kad dođe do pada relativne vlažnosti (usled hidratacije i isušivanja), voda iz agregata kapilarnim putem prelazi u cementni kamen i reaguje sa nehidratiranim česticama cementa. Proces hidratacije se nastavlja, smanjuje se prečnik kapilarnih pora čime se omogućava i dalje upijanje vode iz agregata.

Na ovaj način je, sa jedne strane, obezbeđen maksimalan stepen hidratacije cementa, a sa druge strane, smanjeni su uticaji skupljanja. U literaturi se opisani proces naziva „samonegovanje“ (eng. self-curing) [2].

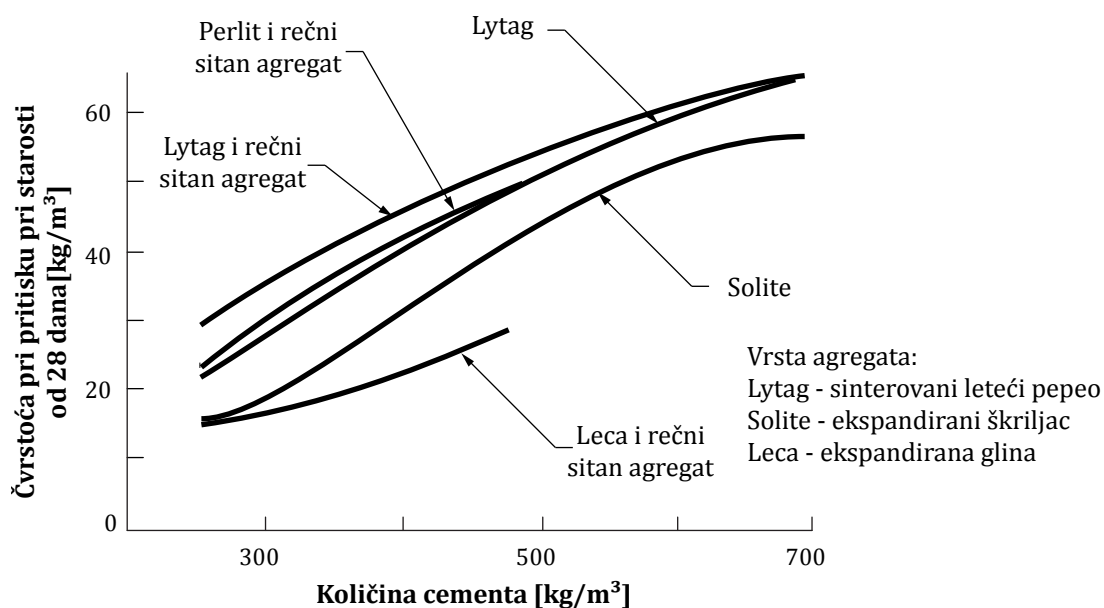
### **3.1.2. Cement**

Količina cementa potrebna za postizanje određene čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona značajno zavisi od vrste lakog agregata (Slika III-7), ali i od količine vode neophodne da bi se obezbedila ugradljivost. Generalno, za postizanje

iste čvrstoće pri pritisku kao kod normalnih betona, potrebna je veća količina cementa (približno 10% za betone sa čvrstoćama manjim od 35-40MPa, i 25-30% za veće čvrstoće). Laki agregati nižih mehaničkih karakteristike zahtevaju još veće čvrstoće malterske komponente, a samim tim i veće količine cementa [31].

U zavisnosti od vrste agregata, kod lakoagregatnih betona se sa povećanjem količine cementa od 10% dobijaju betoni sa približno 5% većom čvrstoćom, dok kod normalnih betona, ovo povećanje iznosi oko 15%.

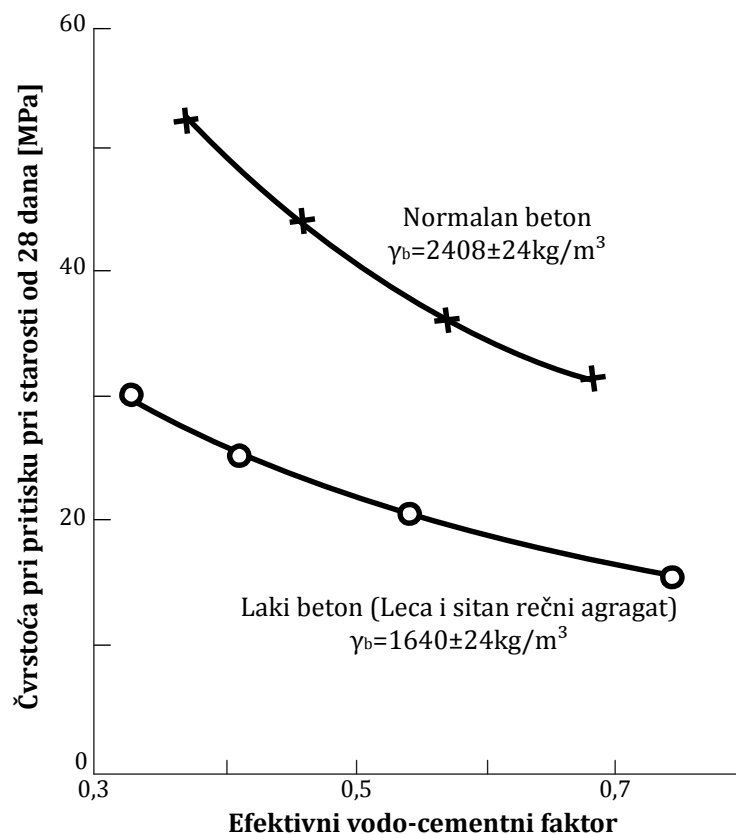
Negativna strana povećanja količine cementa se ogleda u povećanju zapreminske mase betona, kao posledice velike specifične mase cementa (oko 3100kg/m<sup>3</sup>), pa je jedan od načina da se smanji količina cementa, a zadrži odgovarajuća čvrstoća pri pritisku, primena cementa veće klase čvrstoće.



Slika III-7. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od količine cementa za različite vrste lakih agregata [10]

Uticaj vodo-cementnog faktora na čvrstoću lakoagregatnih betona je isti kao kod normalnih betona (sa porastom vodo-cementnog faktora, smanjuje se čvrstoća, i obrnuto) što se može videti na slici III-8, pri čemu trend promene čvrstoće zavisi od karakteristika agregata.





Slika III-8. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od efektivnog vodo-cementog faktora [31]

Zbog problema prilikom određivanja stvarnog vodo-cementnog faktora lakoagregatnih betona, neki autori [32] smatraju da je, kod projektovanja sastava lakoagregatnih betona, čvrstoću pri pritisku bolje vezivati za količinu cementa.

### 3.1.3. Voda

Ukupna količina vode kod lakoagregatnih betona se sastoji iz slobodne (efektivne) vode i vode koja se nalazi u porama zrna agregata. Slobodna voda je ona voda koja se nalazi u cementnoj pasti i utiče na ugradljivost i vodo-cementni faktor. Faktori koji utiču na potrebnu količinu slobodne vode za postizanje odgovarajuće ugradljivosti isti su kao i kod normalnih betona (granulometrijski sastav, oblik i tekstura agregata i delom količina cementa).

Dodatna voda, iako po količini manja od slobodne vode, u zavisnosti od vrste lakog agregata može da iznosi i do  $100 \text{ kg/m}^3$ . Količinu vode koja će ostati u agregatu nakon ugradnje (i kasnije koristiti, kako je ranije objašnjeno) nije moguće tačno odrediti, ali se kao gruba procena može uzeti količina vode koju agregat upije za 30 minuta.

### 3.1.4. Dodaci betonima

Generalno, može se reći da je uticaj dodataka kod lakoagregatnih betona isti kao i kod normalnih betona. Prilikom projektovanja sastava betona se, međutim, mora imati na umu da je kod dodataka koji se rastvaraju u vodi uticaj zavisan od stepena zasićenosti lakog agregata vodom [7].

#### Plastifikatori i superplastifikatori

U zavisnosti od potrebe, plastifikatori i superplastifikatori mogu imati dvostruku ulogu:

- redukcija potrebne količine vode u cilju smanjenja vodo-cementnog faktora čime se omogućava postizanje većih čvrstoća uz zadržavanje ugradljivosti, ili
- poboljšanje ugradljivosti bez promene (povećanja) vodo-cementnog faktora, odnosno bez smanjenja čvrstoće.

Redukcija vode koju je moguće postići primenom plastifikatora iznosi 10-15%, dok je sa superplastifikatorima moguće redukovati vodu i do 30%. Novije generacije superplastifikatora (tzv. hiperplastifikatori) omogućavaju redukciju vode preko 30%.

#### Mineralni dodaci

Primenom mineralnih dodataka betonu, može se značajno uticati na svojstva kako svežeg, tako i očvrslog betona.

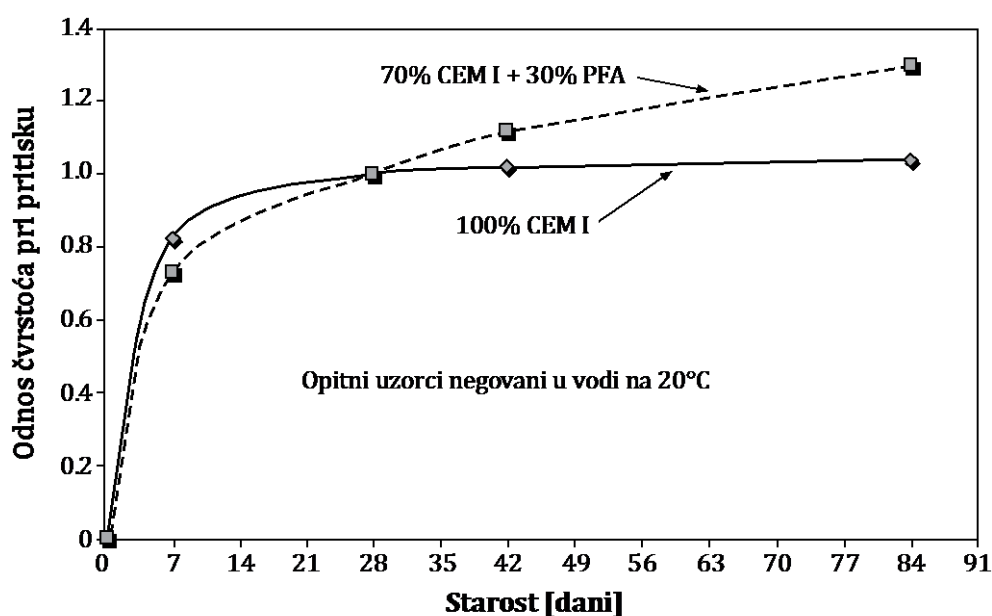
Poznato je da je višak vode, kao posledica potrebe za postizanjem odgovarajuće ugradljivosti, jedan od glavnih uzročnika problema koji se javljaju u betonu. Dodavanjem letećeg pepela, u zavisnosti od kvaliteta i količine, moguće je postići redukciju vode i do 20% [33], što znači da se leteći pepeo može posmatrati kao svojevrsan plastifikator. Ipak, neka istraživanja [34] su pokazala da, u zavisnosti od karakteristika letećeg pepela, može biti potrebno i do 5% dodatne količine vode. Uticaj letećeg pepela na ugradljivost se može objasniti preko tri mehanizma [27]:

- zbog razlike u naelektrisanju, čestice letećeg pepela se lepe za čestice cementa čime se sprečava njihovo grupisanje i povećava specifična površina za koju se vezuje voda;
- zrna letećeg pepela su sferična i imaju glatku površinu usled čega je trenje između čestica smanjeno, a posledično, povećana pokretljivost;

- veličina čestica letećeg pepela i cementa je, najčešće, od 1  $\mu\text{m}$  do 45  $\mu\text{m}$  i kao takve odlično popunjavaju prostore između zrna agregata, odnosno, obezbeđuju dobro pakovanje zrna.

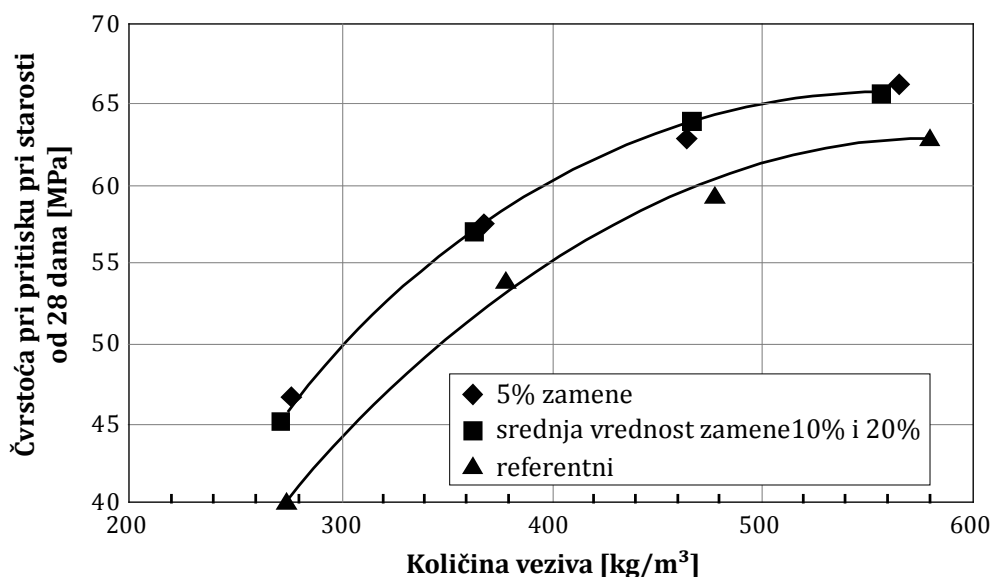
Iako svi mineralni dodaci pozitivno utiču na kohezivnost i obradljivost sveže betonske mase, metakaolin nema dejstvo „plastifikatora“ kao leteći pepeo, već je potrebna dodatna voda za obezbeđivanje odgovarajuće konzistencije. Naime, leteći pepeo ima specifičnu površinu najčešće 3000-5000  $\text{cm}^2/\text{g}$  [35] dok je kod metakaolina specifična površina znatno veća i iznosi oko 120000  $\text{cm}^2/\text{g}$  [36].

Čvrstoća betona sa dodatkom letećeg pepela zavisi od toga da li je postignuto smanjenje količine vode (smanjenje vodo-cementnog faktora) kao i od pucolanske aktivnosti letećeg pepela. U prvih 28 dana čvrstoća je niža od referentnog betona što se može objasniti time da leteći pepeo usporava reakciju alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) u portland cementu u prvo vreme. Kako se produkti hidratacije vremenom inteziviraju, silikatna struktura koja nastaje postaje nosilac mehaničkih karakteristika [24]. U ovoj fazi površina zrna letećeg pepela predstavlja centar nukleacije, pri čemu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reaguje sa  $\text{SiO}_2$  ili  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  strukturom na površini čestica pepela. Što su čestice finije (veća specifična površina), reakcija je intenzivnija i vremenom je doprinos letećeg pepela prirastu čvrstoće sve veći (Slika III-9).



Slika III-9. Odnos čvrstoća običnog betona i betona sa dodatkom letećeg pepela tokom vremena [37]

Uticao metakaolina na čvrstoću pri pritisku se može posmatrati kroz efekat punioca (filera), kroz ubrzanje hidratacije cementa u toku prvih 24h i kroz pucolansku aktivnost čiji je efekat najizraženiji u prvih 7-14 dana. Efekat metakaolina na čvrstoću pri pritisku običnih betona je dosta istraživan, a s obzirom na to da je efekat vezan prvenstveno za reakciju sa produktima hidratacije cementa, za očekivati je da bude sličan i kod lakoagregatnih betona. Na Slici III-10 prikazan je uticaj zamene cementa metakaolinom na čvrstoću pri pritisku.



Slika III-10. Uticaj zamene cementa metakaolinom na čvrstoću pri pritisku [36]

Skupljanje usled sušenja je jedna od negativnih posledica upotrebe čistog portland cementa u betonu i zavisi od količine i kvaliteta cemente paste. Sa povećanjem odnosa cementna pasta/agregat, kao i sa povećanjem količine vode u pasti, raste i skupljanje betona. Dodavanjem letećeg pepela i metakaolina se smanjuju poroznost i propustljivost što utiče na smanjenje i gubitak vode tokom sušenja, a samim tim se smanjuje i skupljanje.

Trajnost betona (korozijska, alkalno-agregatna reakcija, prodor hlorida) u velikoj meri zavisi od propusnosti cementnog kamena. Nakon ugrađivanja betona jedan deo vode zbog manje gustine izlazi na površinu, dok se preostala voda akumulira uz površinu zrna agregata. Usled toga se u tranzitnoj zoni između agregata i cementne paste formira cementna pasta sa visokim vodo-cementnim faktorom. Kako je zbog „efekta zida“ pakovanje zrna poremećeno, tranzitna zona sadrži pretežno sitnije čestice i ima

znatno veću količinu pora u odnosu na ostatak cementnog kamena [38], pa formiranje mikroprslina u cementnom kamenu najčešće počinje upravu u tranzitnoj zoni [26].

Značaj upotrebe mineralnih dodataka ogleda se upravo u pucolanskom svojstvu. Sa razvojem pucolanske aktivnosti smanjuju se veličina kapilarnih pora i veličina kristala koji nastaju kao produkti procesa hidratacije, čime se smanjuje debljina tranzitne zone, a samim tim se eliminiše slaba karika u mikrostrukтури betona [27].

### 3.2. Projektovanja sastava

Kao što je već rečeno, projektovanjem sastava betona se određuju količine komponentnih materijala za beton zahtevanih svojstava. Uobičajene metode projektovanja sastava koje se koriste kod normalnih betona takođe su primenljive i kod lakoagregatnih betona, uz određena ograničenja:

- zapreminska masa predstavlja dodatni faktor o kom se mora voditi računa;
- svojstva betona su veoma zavisna od svojstava lakog agregata;
- posebno se mora voditi računa o upijanju vode kod lakog agregata.

Zbog svega navedenog, generalno primenljiva procedura projektovanja sastava lakoagregatnih betona ne postoji, ali uz postojeće metode koje se koriste za projektovanje sastava normalnih betona i izradu probnih mešavina, može da se dođe do odgovarajućeg sastava. Najčešće korišćene procedure su „Težinska metoda“ i „Zapreminska metoda“ definisane u ACI 211.2-98 [39], kao i smernice date u FIP-ovom uputstvu [7] od kojih je izdvojena „Metoda apsolutnih zapremina“ korišćena u eksperimentalnom delu ove doktorske disertacije.

#### 3.2.1. Težinska metoda [39]

Ova metoda se koristi za lakoagregatne betone koji se spravljaju sa krupnim lakim agregatom i sitnim prirodnim agregatom. Podrazumeva se da se pre određivanja količina komponentnih materijala moraju odrediti upijanje vode agregata kao i faktor specifične mase<sup>9</sup>. Projektovanje sastava se sastoji iz sedam koraka.

.....  
<sup>9</sup> Faktor specifične mase predstavlja odnos mase agregata i zapremine koju zrna agregata zauzimaju (zapreminska masa samih zrna)

**Korak 1: Izbor konzistencije**

U zavisnosti od vrste konstruktivnog elementa u koji se beton ugrađuje, projektom se definiše zahtevana konzistencija, a u slučaju da nije definisana, u standardu su date preporuke.

**Korak 2: Izbor maksimalne veličine zrna agregata**

Najkrupnije zrno agregata se određuje na osnovu dimenzija elemenata u koje se beton ugrađuje. Generalno, primena što je moguće krupnijih zrna uz dobar granulometrijski sastav obezbeđuje najmanju količinu prostora koji cementna pasta treba da ispuni. Međutim, kod betona visokih čvrstoća preporučuje se redukcija veličine maksimalnog zrna agregata.

**Korak 3: Određivanje količine vode i uvučenog vazduha**

Količina vode potrebna da se obezbedi odgovarajuća ugradljivost zavisi od granulometrijskog sastava agregata, oblika zrna i veličine maksimalnog zrna, kao i od količine uvučenog vazduha i eventulane primene dodataka. U standardu su definisane okvirne vrednosti količine vode u zavisnosti od zahtevane konzistencije i veličine zrna, kao i preporučena količina uvučenog vazduha u zavisnosti od veličine zrna i klase izloženosti (Tabela III-3 i Tabela III-4).

*Tabela III-3. Približna količina vode [kg/m<sup>3</sup>] i uvučenog vazduha[%] u zavisnosti od zahtevanog sleganja i veličine zrna agregata aeriranog betona [39]*

Sleganje [mm]	Nominalno najkrupnije zrno agregata		
	9,5 [mm]	12,7 [mm]	19,1 [mm]
25-51	181	175	166
76-100	202	193	181
127-152	211	199	187
Klasa izloženosti	Uvučeni vazduh		
Blaga	4,5	4,0	4,0
Umerena	6,0	5,5	5,0
Ekstremna	7,5	7,0	6,0

Napomena: vrednosti u tabeli su preračunate u skladu sa pravilima konverzije iz US sistema mera u SI sistem.

Tabela III-4. Približna količina vode [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] i uvučenog vazduha[%] u zavisnosti od zahtevanog sleganja i veličine zrna agregata neaeriranog betona [39]

Sleganje [mm]	Nominalno najkrupnije zrno agregata		
	9,5 [mm]	12,7 [mm]	19,1 [mm]
25-51	208	199	187
76-100	228	217	202
127-152	237	222	208
<b>Uvučeni vazduh</b>	3	2,5	2

Napomena: vrednosti u tabeli su preračunate u skladu sa pravilima konverzije iz US sistema mera u SI sistem.

#### Korak 4: Određivanje vodo-cementnog faktora

Određivanje vodo-cementnog ( $m_v/m_c$ ) faktora se vrši ne samo na osnovu zahtevane čvrstoće već i na osnovu drugih svojstava, npr. trajnosti. Kako se sa različitim vrstama cementa i lakih agregata, za isti odnos  $m_v/m_c$ , postižu različite čvrstoće, preporučuje se da se definiše zavisnost između čvrstoće pri pritisku i  $m_v/m_c$  za date materijale. Ukoliko ovakva zavisnost ne postoji, u standardu su date okvirne vrednosti  $m_v/m_c$  u zavisnosti od čvrstoće betona (Tabela III-5). Generalna preporuka je da se, bez obzira na to što je određenu čvrstoću moguće postići i sa većim  $m_v/m_c$ , ovaj odnos usvaja što je moguće manji.

Tabela III-5. Zavisnost između vodo-cementnog faktora i čvrstoće pri pritisku [39]

Čvrstoća pri pritisku [MPa]	Približna vrednost vodo-cementnog faktora	
	Neaerirani beton	Aerirani beton
41	0,41	-
34,5	0,48	0,40
27,6	0,57	0,48
20,7	0,68	0,59
13,8	0,82	0,74

Napomena: vrednosti u tabeli su preračunate u skladu sa pravilima konverzije iz US sistema mera u SI sistem.

#### Korak 5: Određivanje količine cementa

Količina cementa se određuje na osnovu usvojene količine vode i vodo-cementnog faktora. U slučaju da postoji uslov minimalne količine cementa za obezbeđivanje

odgovarajuće čvrstoće ili trajnosti, kao merodavan uslov se usvaja onaj koji daje veću potrebnu količinu cementa.

#### **Korak 6: Određivanje količine krupnog lakog agregata**

Smatra se da beton spravljen sa različitim agregatima iste krupnoće i istog granulometrijskog sastava imaju približno istu ugradljivost, pod uslovom da je upotrebljena ista apsolutna zapremina agregata. Prema ovom standardu, količina krupnog lakog agregata zavisi od krupnoće agregata i modula finoće sitnog agregata i iznosi 0,4-0,57m<sup>3</sup>.

#### **Korak 7: Određivanje količine sitnog prirodnog agregata**

Količina sitnog prirodnog agregata se određuje na osnovu razlike između masa svih ostalih komponentnih materijala (određenih u prethodnim koracima) i pretpostavljene mase jedinične zapremine svežeg betona. U slučaju da se, na osnovu prethodnog iskustva, ne može dovoljno tačno pretpostaviti zapreminska masa svežeg betona, u standardu su date okvirne vrednosti u zavisnosti od količine uvučenog vazduha i faktora specifične mase.

#### **3.2.2. Zapreminska metoda [39]**

Ova metoda se koristi za lakoagregatne betone sa celokupnom količinom lakog agregata kao i u slučaju kombinacije prirodnog sitnog agregata i krupnog lakog agregata.

Proizvođači lakog agregata često daju preporuke za sastav betonskih mešavina u zavisnosti od namene, pri čemu su količine date preko zapremine materijala u rastresitom stanju. Najčešće, količina agregata iznosi od 1,04-1,25m<sup>3</sup> za 1m<sup>3</sup> betona, dok zapremina sitnog agregata iznosi 40-60% od ukupne zapremine agregata. Količina i odnos sitnog i krupnog agregata u mešavini zavisi od više faktora, i preporuka je da se uvek kontaktira proizvođač za dobijanje približne količine cementa i količine i odnosa sitnog i krupnog agregata za postizanje odgovarajuće čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase.



Ukoliko ove informacije nisu dostupne, neophodno je napraviti dovoljan broj probnih mešavina uz variranje količine cementa da bi se dobila veza između količine cementa (ili vodo-cementog faktora) i čvrstoće pri pritisku.

### 3.2.3. Metoda apsolutnih zapremina

Metoda aposlutnih zapremina se zasniva na činjenici da je zapremina svežeg betona jednaka sumi apsolutnih zapremina komponentnih materijala, uključujući i uvučeni vazduh. Približni odnos apsolutnih zapremina komponentnih materijala kod lakoagregatnih betona grafički je prikazan na slici III-11 [7].

Cement $\approx 0,1\text{m}^3$
"Efektivna" voda + uvučeni vazduh $\approx 0,2\text{m}^3$
Agregat $\approx 0,7\text{m}^3$

Slika III-11. Apsolutne zapremine komponentnih materijala u  $1\text{m}^3$  svežeg betona [7]

Količina cementa se određuje na osnovu prethodno definisanih referentnih krivi za datu vrstu agregata i cementa ili, ukoliko krive ne postoje, na osnovu veze između vodo-cementog faktora i čvrstoće pri pritisku<sup>10</sup>.

Voda se dozira najčešće u količini potrebnoj za postizanje odgovarajuće ugradljivosti, pri čemu se mora voditi računa o upijanju agregata.

Količina agregata se dobija oduzimanjem procenjenih vrednosti apsolutnih zapremina cementa, vode i uvučenog vazduha od zapremine betona, dok se količine pojedinačnih frakcija određuju tako da se postigne željeni granulometrijski sastav mešavine.

.....  
<sup>10</sup> Količina cementa određena na ovaj način je samo približna, jer je određivanje tačne vrednosti vodo-cementog faktora kod lakoagregatnih betona teško zbog upijanja vode.

## 4. SVOJSTVA LAKOAGREGATNIH BETONA

Razlike u svojstvima lakoagregatnih betona i normalnih betona su, prvenstveno, posledica zamene normalnog agregata nekom od vrsta lakih agregata. Najvažnija svojstva i njihova međusobna zavisnost, analizirana u ovom istraživanju su:

- zapreminska masa;
- čvrstoća pri pritisku;
- modul elastičnosti;
- skupljanje;
- upijanje vode i vodonepropusnost.

### 4.1. Zapreminska masa

Zapreminska masa predstavlja najvažnije „specijalno“ svojstvo lakoagregatnih betona. U zavisnosti od stanja betona prilikom određivanja zapreminske mase razlikujemo:

- zapreminsku masu betona u svežem stanju;
- zapreminsku masu prirodno vlažnog očvrslog betona;
- zapreminsku masu potpuno suvog očvrslog betona.

Vrednost zapreminske mase lakoagregatnog betona zavisi od više faktora. Njihov okvirni uticaj na zapreminsku masu prikazan je u tabeli tabeli III-6.

*Tabela III-6. Uticaj različitih faktora na zapreminsku masu betona [10]*

Faktor	Uticaj na vrednost zapreminske mase
Količina cementa	Povećanjem količine cementa za 100 kg/m <sup>3</sup> zapreminska masa raste za ≈ 50 kg/m <sup>3</sup>
Relativna zapreminska masa agregata	Zamenom sitnog lakog agregata normalnim sitnim agregatom zapreminska masa raste za ≈ 150-200 kg/m <sup>3</sup>
Vlažnost agregata	Beton spravljen sa delimično ili potpuno zasićenim agregatom može da ima značajno veću zapreminsku masu u svežem stanju

U zavisnosti od zapreminske mase u potpuno suvom stanju lakoagregatni betoni su, prema EN 206 [40], podeljeni u šest klasa (Tabela III-7).

*Tabela III-7. Klasifikacija lakoagregatnih betona u zavisnosti od zapreminske mase prema EN 206 [40]*

Klasa	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Opseg zapreminske mase [kg/m <sup>3</sup> ]	≥800 i ≤1000	> 1000 i ≤1200	> 1200 i ≤1400	> 1400 i ≤1600	> 1600 i ≤1800	> 1800 i ≤2000

#### 4.1.1. Zapreminska masa betona u svežem stanju

Zapreminska masa betona u svežem stanju ( $\gamma_{b,sv}$ ) predstavlja masu betona u jedinici zapremine neposredno nakon ugrađivanja. U ovom trenutku beton sadrži ukupnu količinu vode, efektivnu i vodu dodatu zbog upijanja agregata.

#### 4.1.2. Zapreminska masa prirodno vlažnog betona

Zapreminska masa betona u prirodno vlažnom stanju ( $\gamma_{b,pv}$ ) predstavlja masu betona u jedinici zapremine očvrstlog betona u konstrukciji. Pod normalnim uslovima može da se pretpostavi da je tokom procesa hidratacije 20% vode hemijski vezano i da vlažnost u stanju ravnoteže iznosi oko 5-10% (po zapremini). Na osnovu ovoga, zapreminska masa prirodno vlažnog betona može da se odredi iz izraza:

$$\gamma_{b,pv} = 1,2 \cdot m_c + m_a + 50 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad [23] \quad (2)$$

U slučaju da je upotrebljen sitan i krupan laki agregat, približna zapreminska masa može da se odredi tako što se od zapreminske mase u svežem stanju oduzme 100-200kg/m<sup>3</sup>, a u slučaju da je upotrebljen sitan prirodni agregat i krupan laki agregat, oduzimanjem 50-100kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.1.3. Zapreminska masa potpuno suvog betona

Zapreminska masa betona u potpuno suvom stanju ( $\gamma_{b,s}$ ) predstavlja masu u jedinici zapremine betona osušenog na temperaturi 105-110°C do konstante mase. Kod konstrukcijskih lakoagregatnih betona ova zapreminska masa iznosi najčešće 1200-2000kg/m<sup>3</sup>.

Kako je zapreminska masa povezana sa ostalim svojstvima betona, radi jednostavnijeg poređenja, ova vrednost se uzima kao referentna.

## 4.2. Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća betona pri pritisku predstavlja prosečan napon u uzorku izloženog aksijalnom pritisku pri sili loma, za slučaj određene starosti betona [24].

Klase čvrstoće, definisane u EN 206 [40], date su u tabeli III-8.

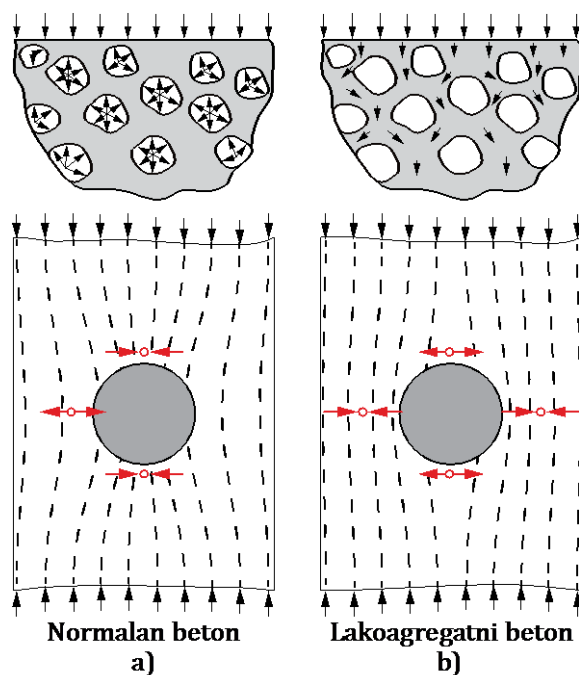
Tabela III-8. Klase čvrstoće lakoagregatnih betona [40]

Klasa čvrstoće	Najmanja karakteristična čvrstoća određena na cilindru Ø150x300 $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Najmanja karakteristična čvrstoća određena na kocki 150x150x150mm $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Do loma betona dolazi used pojave prslina, tj. usled prekoračenja napona zatezanja. Kod normalnih betona do prekoračenja napona zatezanja najčešće dolazi na kontaktu između zrna agregata i cementnog kamena (u tzv. tranzitnoj zoni, slika III-12a). Kod lakoagregatnih betona, kod kojih je krutost agregata manja nego krutost cementnog kamena, transfer opterećenja se odvija kroz cementni kamen što za posledicu ima pojavu napona zatezanja iznad i ispod zrna agregata (Slika III-12b). U zavisnosti od kvaliteta veze agregat-cementni kamen i čvrstoće na zatezanje zrna agregata, propagacija prslina se može odvijati na jedan od sledećih načina:

- po tranzitnoj zoni;
- kroz maltersku komponentu;
- kroz agregat.

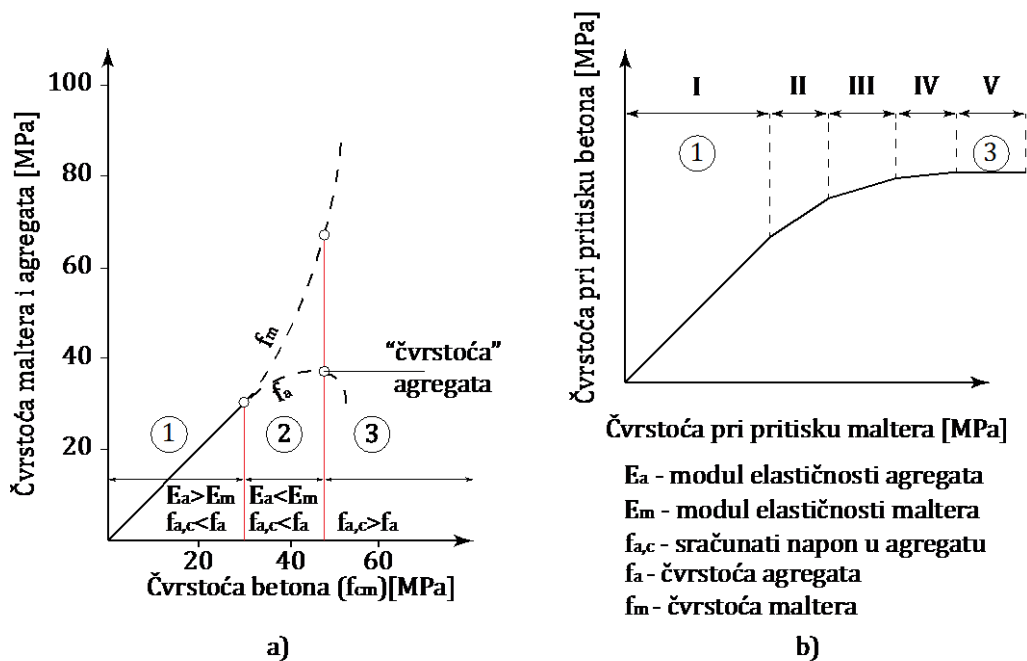
Najčešće, kod lakoagregatnih betona do loma dolazi kroz zrno agregata [2].



Slika III-12. Transfer napona pritiska u normalnom i lakoagregatnom betonu [7] [41]

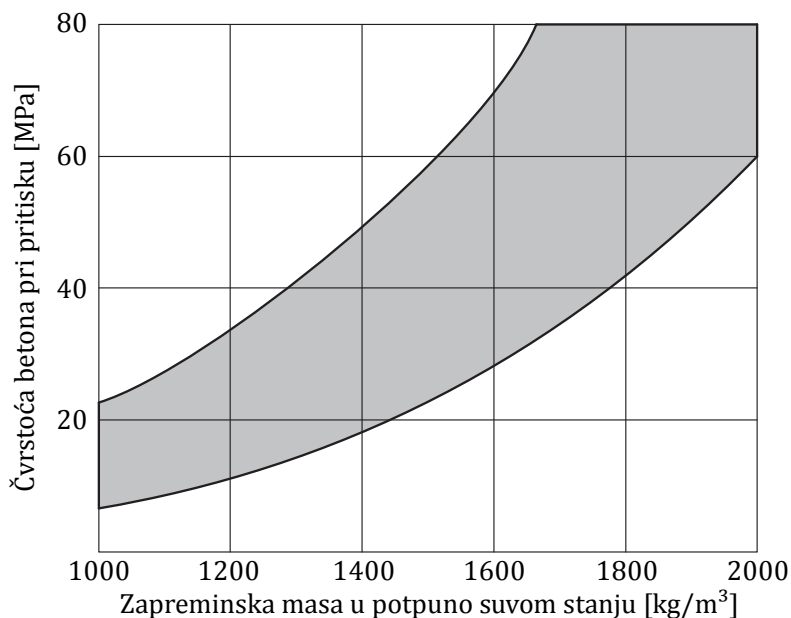
Prema FIP-u [7], ponašanje konstrukcijskih lakoagregatnih betona pod pritiskom može da se prikaže kao na slici III-13. Granica između oblasti 1 i 2 (Slika III-13a) naziva se „granična čvrstoća“ i odgovara čvrstoći betona kod koje su krutost agregata i krutost malterske komponente približno jednake. Kod čvrstoća ispod granične, modul elastičnosti agregata je veći nego modul elastičnosti malterske komponente pa na sebe prihvata veći deo sile, odnosno, graničnu pritisnu čvrstoću betona određuje čvrstoća malterske komponente (oblast 1, na slikama III-13a i III-13b). Kod čvrstoća iznad granične situacija je obrnuta, pa se veći deo sile preraspoređuje oko agregata, na maltersku komponentu (oblast 2 na slici III-13a i II-IV na slici III-13b).

Kod betona malih starosti veza između agregata i cementnog kamen nema dovoljnu čvrstoću, pa do pojave prsline dolazi duž površine zrna agregata. Ovakav tip loma se javlja u zoni čvrstoće malo iznad granične (oblast II, Slika III-13b). Ukoliko je čvrstoća veze dovoljno velika, prekoračenje čvrstoće agregata na zatezanje dovodi do propagacije prsline kroz agregat. Kod agregata sa malom zateznom čvrstoćom do ovoga dolazi pre nego što prsline u malteru dođe do susednih zrna (oblast III, slika III-13b), dok kod agregata sa većom zateznom čvrstoćom prsline u malteru dostiže maksimalnu dužinu, tj. prostire se između susednih zrna agregata (oblast IV, slika III-13b). Kod maltera visokih čvrstoća naponi zatezanja u agregatu dostižu graničnu vrednost pre pojave prsline u malteru. U ovom slučaju čvrstoća betona zavisi samo od zatezne čvrstoće agregata (oblast 3 na slici III-13a i V na slici III-13b).



Slika III-13. Zavisnost čvrstoće betona od čvrstoće agregata i malterske komponente [7]

Iako je ranije napomenuto da postoji veza između zapreminske mase betona i čvrstoće pri pritisku, vrednost zapreminske mase se ne može koristiti kao pouzdan pokazatelj čvrstoće lakoagregatnog betona. Kako se sa slike III-14 može videti, za istu vrednost zapreminske mase mogu se dobiti betoni čije čvrstoće značajno variraju.



Slika III-14. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od zapreminske mase lakoagregatnog betona u suvom stanju [7]

Uticaj količine cementa i vodocementog faktora na čvrstoću betona je opisan u tački 3.1.2.

### 4.3. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti može da se definiše kao mera krutosti materijala i jednaka je odnosu napona i aksijalne deformacije u elastičnom području radnog dijagrama. Vrednost modula elastičnosti betona zavisi od modula elastičnosti njegovih komponenti i njihovog zapreminskog odnosa.

Tabela III-9. Modeli za određivanje modula elastičnosti lakoagregatnih betona

Izraz	Parametri	Izvor
$E_{lcm} = 0,04\sqrt{\rho^3 f_{cu}}$	$E_{lcm}$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $f_{cu}$ – čvrstoća pri pritisku određena na uzorku oblika kocke	Pauw, A. [41]
$E_{lcm} = 9,5^3 \sqrt{f_{cyl}} \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2$	$E_{lcm}$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $f_{cyl}$ – čvrstoća pri pritisku određena na uzorku oblika cilindra	CEB/FIP [42]
$E_{lcm} = 0,043\rho^{1,5} \sqrt{f_{cyl}}$	$E_{lcm}$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $f_{cyl}$ – čvrstoća pri pritisku određena na uzorku oblika cilindra 100x200mm	ACI 318-95 [43]
$\frac{E_{lcm}}{E_{cm}} = \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2$	$E_{lcm}$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $E_{cm}$ – modul elastičnosti normalnog betona	CEB/FIP [42]
$E_{cm} = 2,2 \cdot 10^4 \left(\frac{f_{cyl}}{10}\right)^{0,3} \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$	$E_{cm}$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $f_{cyl}$ – čvrstoća pri pritisku određena na uzorku oblika cilindra	EN 1992-1 [44]
$E_c = 0,0017 \rho^2 \sqrt{f_{ck}}$	$E_c$ – modul elastičnosti $\rho$ – zapreminska masa betona $f_{ck}$ – čvrstoća pri pritisku određena na uzorku oblika kocke 100mm	BS 8110 [45]

U literaturi je moguće pronaći više izraza kojima je definisana veza između modula elastičnosti, čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase betona (Tabela III-9). Kako mehanička svojstva lakih agregata mogu značajno da variraju za istu vrednost

zapreminske mase, o čemu je ranije već bilo reči, vrednosti modula elastičnosti dobijene analitički mogu značajno da se razlikuju od onih eksperimentalno određenih.

Sa slike III-6 se može videti da vrednost modula elastičnosti lakih agregata najčešće iznosi između 5GPa i 15Gpa, što je značajno manje od modula elastičnosti prirodnih agregata. Zbog toga je i vrednost modula elastičnosti konstrukcijskih lakoagregatnih betona u poređenju sa običnim betonima znatno manja. U zavisnosti od vrste agregata, modul elastičnosti lakoagregatnih betona najčešće iznosi između 10GPa i 24GPa [7]. Odavde se jasno vidi da je za postizanje viših vrednosti modula elastičnosti lakoagregatnih betona neophodan velik modul elastičnosti cementnog kamena.

#### 4.4. Skupljanje

Skupljanje betona se može definisati kao promena zapremine betona usled smanjenja vlažnosti (gubitka vode) cementnog kamena tokom vremena. Na skupljanje najviše utiču [46]:

- količina cementne paste u betonu;
- vodo-cementni faktor;
- vrsta i količina upotrebljenog agregata;
- dimenzije elementa;
- dužina trajanja i uslovi nege.

U zavisnosti od uzroka i vremena odvijanja, ukupno skupljanje betona može da se podeli u tri faze [24]:

- plastično skupljanje - skupljanje usled isparavanja vode tokom perioda vezivanja cementa;
- hidrataciono skupljanje - skupljanje usled kontrakcije produkata hidratacije;
- hidrauličko skupljanje - skupljanje nakon završetka procesa vezivanja cementa (autogeno skupljanje, skupljanje usled sušenja, hemijsko skupljanje).

Hidrataciono i hidrauličko skupljanje su skupljanja očvrslog betona i u oba slučaja do skupljanja dolazi usled promene vlažnosti. U slučaju hidratacionog skupljanja do promene dolazi usled trošenja vode u procesu hidratacije, dok se u slučaju hidrauličkog skupljanja voda gubi u spoljnu sredinu.



Hidrauličko skupljanje se odvija preko tri mehanizma [47]:

- promena zapremine kao posledica pojave kapilarnih sila koje se javljaju u kapilarama usled smanjenja radijusa meniska uzrokovanog isparavanjem vode;
- promena zapremine usled gubitka apsorbovane vode koja se nalazi u C-S-H<sup>11</sup> strukturi, a javlja se pri niskoj relativnoj vlažnosti (<40%) i nakon isparavanja vode koja se nalazi u kapilarama;
- promena zapremine usled površinskih napona koji se javljaju u C-S-H strukturi nakon uklanjanja apsorbovane vode, a pri unutrašnjoj relativnoj vlažnosti manjoj od 50%.

Generalno, lakoagregatni betoni kod kojih je količina cementne paste približno jednaka količini kod normalnih betona imaju približno isto skupljanje kao i normalni betoni, ali je moguće da budu i značajno veća ili manja.

U slučaju da se koristi drobljeni agregat, agregat nepovoljnog granulometrijskog sastava ili teksture, kao i agregat loših mehaničkih karakteristika, za postizanje odgovarajuće čvrstoće i ugradljivosti potrebne su veće količine cementa i vode, čime se povećava skupljanje. Sa druge strane, primenom lakih agregata koji imaju veliku otvorenu poroznost, uzimajući u obzir mehanizme hidrauličkog skupljanja, prethodnim zasićenjem agregata vodom moguće je značajno smanjiti skupljanje.

Dužim trajanjem nege u vlažnoj sredini se pospešuje hidratacija, menja struktura pora i održava visok stepen relativne vlažnosti u betonu, čime se, takođe, može smanjiti skupljanje.

Dimenzije elemenata takođe igraju značajnu ulogu u skupljanju betona. Kod elemenata sa malim dimenzijama poprečnog preseka, u slučaju da vlaga može slobodno da isparava i da je upotrebljen suv agregat, vrednost skupljanja lakoagregatnih betona i normalnih betona je približno ista. Kod velikih elemenata, kod kojih vlaga ne može slobodno da isparava i agregat je prethodno potpuno zasićen vodom, skupljanje može da bude značajno manje. U nekim slučajevima moguće je da

.....  
<sup>11</sup> Kalcijum silikat hidrat (C-S-H) nastaje kao produkt hidratacije portland cementa.

dođe do povećanja dimenzija (bubrenja), što je posledica difuzije vode iz agregata u cementni kamen [7].

U standardima, npr. ACI209R [48], EN 1992 [44], procena vrednosti ukupnog skupljanja se određuje na osnovu izraza definisanih za normalan beton. U Tabeli III-7 dati su izrazi za procenu vrednosti skupljanja.

Tabela III-10. Procena veličine skupljanja prema standardima

Standard	Ukupno skupljanje
ACI 209R-08 [48]	$\varepsilon_{sh,t} = \varepsilon_{sh,u}(t - t_c)/(f + t - t_c)$ $\varepsilon_{sh,u} = 780 \cdot \gamma_{sh} \cdot 10^{-6}$ $\gamma_{sh} = \gamma_{tc} \cdot \gamma_{RH} \cdot \gamma_{vs} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{\psi} \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{\alpha}$ $f = 26 \cdot e^{1,42 \cdot 10^{-2} \cdot (V/S)}$
$\varepsilon_{sh,t}$ – skupljanje pri starosti t (u danima)	$\gamma_{sh}$ – faktor korekcije skupljanja
t – starost betona	f – vremenska funkcija skupljanja zavisna od
$t_c$ – starost betona u trenutku prestanka nege betona	geometrijskih karakteristika uzorka (V/S)
$\varepsilon_{sh,u}$ – ukupna deformacija skupljanja	V – zapremina uzorka
	S – površina uzorka
EN 1992 [44]	$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \eta_3 \cdot \varepsilon_{cd}(t) + \varepsilon_{ca}(t)$ $\varepsilon_{cd}(t) = K_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \cdot \beta_{ds}(t, t_s)$ $\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \beta_{RH} \cdot [(220 + 110\alpha_{ds1})e^{-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}/10}] \cdot 10^{-6}$ $\beta_{ds}(t, t_s) = (t - t_s) / [(t - t_s) + 0,04 \cdot h_0^{3/2}]$ $\varepsilon_{ca}(t) = [1 - e^{-0,2 \cdot t^{0,5}}] \cdot \varepsilon_{ca,0}$ $\varepsilon_{ca,0} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$ $\eta_3 = 1,2 \text{ za } f_{ck} \geq \text{LC20/22}$
$\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ – ukupno skupljanje	$\varepsilon_{ca,0}$ – bazno autogeno skupljanje
$\varepsilon_{cd}(t)$ – skupljanje usled sušenja	t – starost betona
$\varepsilon_{ca}(t)$ – autogeno skupljanje	$t_s$ – starost betona u trenutku
$\varepsilon_{cd,0}$ – bazno skupljanje usled sušenja	prestanka nege betona

Napomena:

ACI 209R-08:  $\gamma_{sh}$  predstavlja kombinovani uticaj vremena nege ( $t_c$ ), relativne vlažnosti (RH), geometrijskih karakteristika uzorka (V,S), konzistencije/sleganja (s), udela sitnog agregata ( $\psi$ ) i uvučenog vazduha ( $\alpha$ )

EN 1992:  $K_h$ ,  $\beta_{RH}$ ,  $\alpha_{ds1}$ ,  $\alpha_{ds2}$  su koeficijent koji zavise od dimenzija poprečnog preseka ( $h_0$ ), relativne vlažnosti (RH), vrste cementa ( $\alpha_{ds1}$ ,  $\alpha_{ds2}$ ), klase čvrstoće lakoagregatnog betona ( $\eta_3$ )

#### 4.5. Upijanje vode

Upijanje vode jedno je od svojstava koja su direktno povezano sa trajnošću betona i zavisi od više faktora: stepena hidratacije cementa, poroznosti, strukture pora i svojstava cementa i agregata [24]. Mogućnost prodora vode u strukturu betona definiše brzinu i stepen prodora agresivnih jedinjenja ili jona u, ili kroz, betonsku masu, a samim tim i brzinu i stepen deterioracije.

Većina lakoagregatnih betona pokazuju veće upijanje nego normalni betoni, što se može objasniti velikom poroznošću samih zrna lakog agregata, pri čemu upijanje nije u onoj meri veće, koliko bi se očekivalo [10]. Naime, prodor vode je uslovljen prisustvom defekata u strukturi betona. Kod normalnih betona, tranzitna zona predstavlja „slabo mesto“ usled prisustva veće količine kalcijum hidroksida. Mala zatezna čvrstoća tranzitne zone dodatno povećava rizik od pojave prslina i povećanja propusnosti betona. Kod lakoagregatnih betona, tekstura i poroznost površine agregata obezbeđuju dobru vezu između agregata i cementnog kamena. Prilikom spravljanja betona jedan deo vode upija agregat, što dovodi do smanjenja vodo-cementnog faktora u tranzitnoj zoni. To znači da je, iako porozan, agregat okružen cementnim kamenom male propustljivosti. Takođe, deformabilnost agregata je veća u poređenju sa običnim agregatom, dok je razlika u krutosti između agregata i cementnog kamena mnogo manja, pa je manja i mogućnost pojave mikro-prslina usled skupljanja [11].

## **5. PREDNOSTI I NEDOSTACI KONSTRUKCIJSKIH LAKOAGREGATNIH BETONA**

Na osnovu prethodno iznetog, može se zaključiti da konstrukcijski lakoagregatni betoni imaju niz prednosti, ali i nedostataka, u poređenju sa normalnim betonima. Neke od prednosti se ogledaju u sledećem:

- smanjenjem sopstvene težine konstrukcije može se značajno uticati kako na intenzitet uticaja koji su zavisni od spostvene težine konstrukcije (npr. seizmički uticaji) tako i na uštedu u troškovima materijala, transporta, ugradnje itd.;
- primenom lakoagregatnih betona može se značajno uticati na trajnost konstrukcije što je uslovljeno slabijom propustljivošću, kvalitetnijom tranzitnom zonom, mogućnosti „samonegovanja“, itd...;
- upotrebom industrijskih otpadnih materijala u proizvodnji lakoagregatnog betona može se značajno uticati na smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu;
- rušenje konstrukcija od lakoagregatnog betona je zbog manje zapreminske mase betona jednostavnije i jeftinije, a materijal se takođe može reciklirati i ponovo koristiti.

Neki od nedostataka lakoagregatnih betona su:

- povećana krtost kao posledica cementnog kamena boljeg kvaliteta;
- manji modul elastičnosti u poređenju sa običnim betonom uslovljava veće poprečne preseke;
- potrebna veća količina cementa boljih mehaničkih karakteristika za postizanje svojstava betona uporedivih sa običnim betonima;
- potrebna bolja kontrola proizvodnje.

**IV**

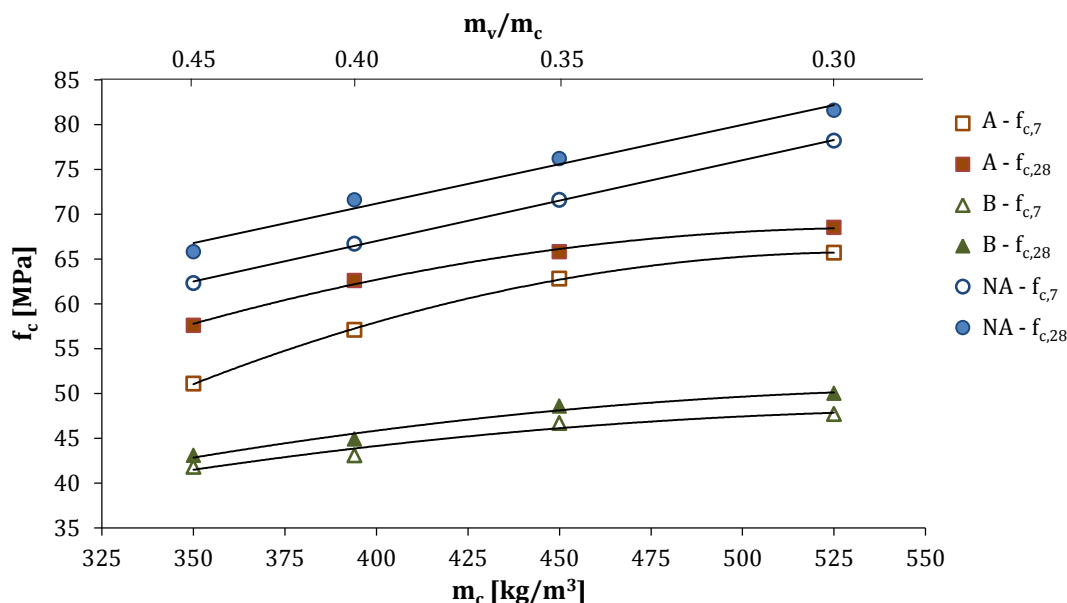
**PRIKAZ I ANALIZA ZNAČAJNIH  
ISTRAŽIVANJA**



## 1. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU

Opširno eksperimentalno istraživanje konstrukcijskih lakoagregatnih betona koje su sproveli Bogas i Gomes [49], uključivalo je betonske mešavine napravljene sa komercijalnim lakim agregatima na bazi ekspanzirane gline (A-Arlita, B-Leca, C-Argex) i prirodnim rečnim agregatom za referentni beton. Varirane su vrednosti vodo-cementnog faktora, količina cementa i zapreminski udeo lakog agregata.

Analizirajući rezultate ispitivanja (Slika IV-1) autori su zaključili da, za razliku od normalnih betona (NA), zavisnost između čvrstoće pri pritisku i količine cementa nije skoro linearna i da se sa povećanjem količine cementa kod betona sa visokim sadržajem veziva ne postiže značajnije povećanje čvrstoće pri pritisku.

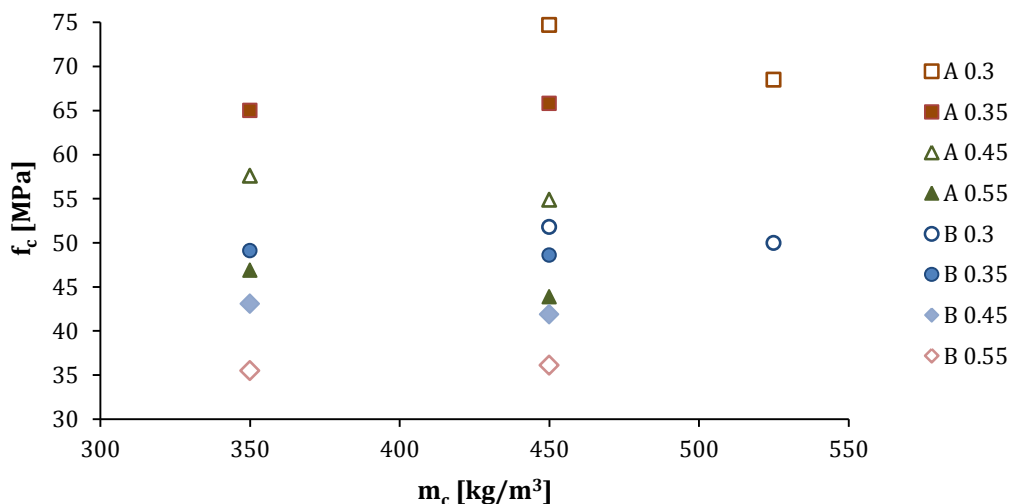


Slika IV-1. Zavisnost čvrstoće pri pritisku i količine cementa i vodo-cementnog faktora [50]

Poređenjem vrednosti čvrstoća pri pritisku betona pri starosti od 7 i 28 dana zaključeno je da je prirast čvrstoće pri pritisku nakon 7 dana gotovo zanemarljiv (iznosi 3-10%). Kako je zapreminski udeo agregata u svim recepturama bio isti, autori su zaključili da kvalitet agregata igra značajnu ulogu u krajnjoj čvrstoći betona pri pritisku.

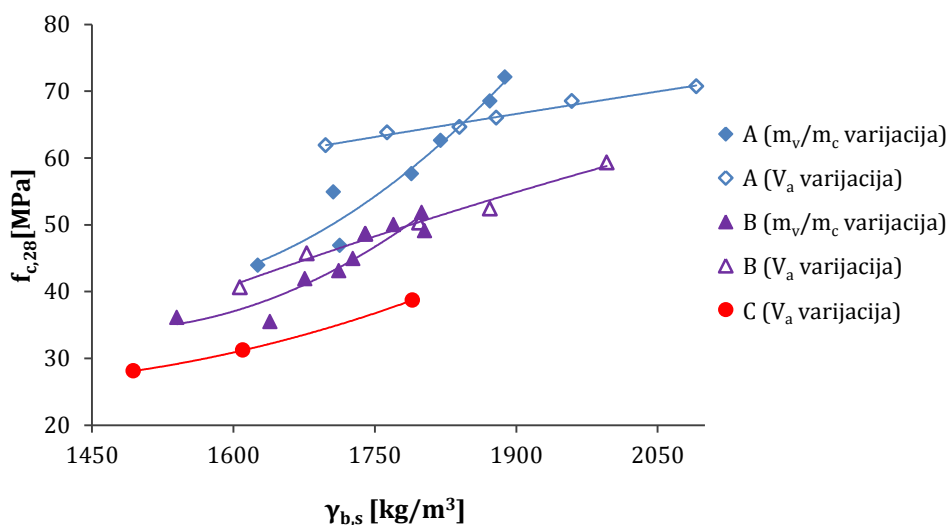
Poređenjem vrednosti čvrstoća postignutih sa istim agregatom, za istu vrednost vodo-cementnog faktora, vrednosti čvrstoće su, praktično, jednake (Slika IV-2). Odavde su Bogas i Gomez izveli zaključak da čvrstoća betona pri pritisku vrlo malo zavisi od

količine cementa, što je u suprotnosti sa rezultatima do kojih su drugi autori došli [32] [50].



Slika IV-2. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od količine cementa za različite vrednosti vodo-cementog faktora [50]

Zavisnost zapremine mase u suvom stanju i čvrstoće pri pritisku je prikazana na slici IV-3. Na osnovu prikazanih rezultata zaključeno je da ne postoji direktna veza između posmatranih svojstava. Poredeći čvrstoće dobijene varijacijom vodo-cementog faktora i one dobijene varijacijom zapreminskog udela agregata, uočeno je da se promenom količine lakog agregata mnogo efikasnije mogu dobiti betoni sa manjom zapreminskom masom, a zadovoljavajuće čvrstoće, nego promenom vodo-cementnog faktora.



Slika IV-3. Zavisnost čvrstoće pri pritisku i zapremine mase [50]



Bogas i saradnici [51] su prethodno istraživanje nastavili kroz istraživanje mogućnosti određivanja čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona nedestruktivnom metodom, merenjem brzine prolaska ultrazvuka. Istraživanje je obuhvatilo 84 betonske mešavine, pravljene sa tri vrste lakih agregata na bazi ekspanzirane gline, sa postignutim čvrstoćama pri pritisku u rasponu od 30-80 MPa.

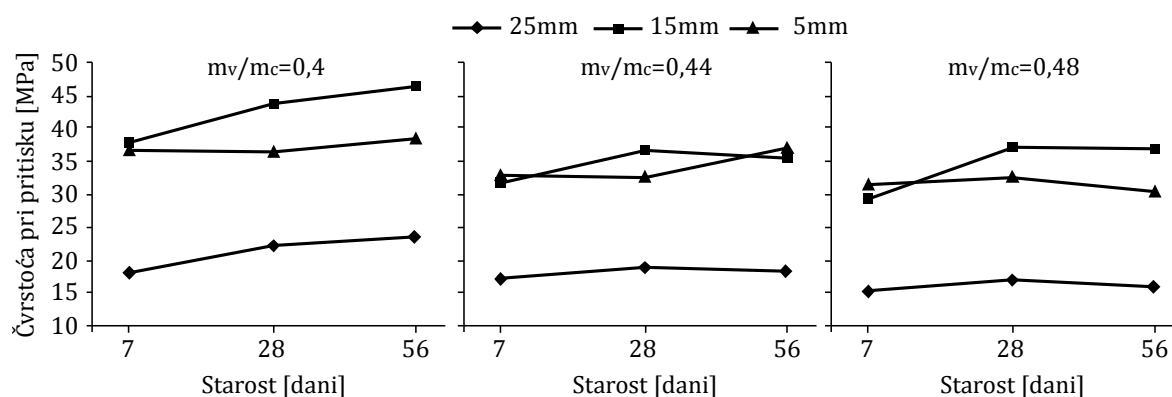
Kao rezultat istraživanja definisan je jednostavan izraz za određivanje čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od brzine prolaska ultrazvuka i zapreminske mase koji se može primenjivati za beton sa zapreminskom masom iznad  $1000\text{kg/m}^3$  u obliku:

$$f_c \approx \left( \frac{UPV}{K_{UPV} \cdot \rho^{0,5}} \right)^{2/3} [MPa] \quad (3)$$

U prethodnom izrazu,  $K_{UPV}$  je konstanta i iznosi  $54,3-54,6 \text{ m}^{2,5} \text{ MPa}^{-0,15} \text{ kg}^{-0,5} \text{ s}^{-1}$ .

U istraživanju svojstava lakoagregatnog betona, Lo sa saradnicima [52] je varirao vrednosti vodo-cementnog faktora i veličinu maksimalnog zrna agregata sa ciljem da se utvrdi njihov uticaj na čvrstoću pri pritisku. U betonskim mešavinama su varirane tri vrednosti vodo-cementnog faktora i laki agregat na bazi ekspanzirane gline sa maksimalnim zrnom veličine 5mm, 15mm i 25mm.

Rezultati istraživanja su pokazali da najveće čvrstoće, bez obzira na vrednost vodo-cementnog faktora i bez obzira na starost betona, mogu da se postignu sa agregatom krupnoće 15mm, nešto manje sa agregatom krupnoće 5mm, a najmanje sa agregatom krupnoće 25mm (Slika IV-4).

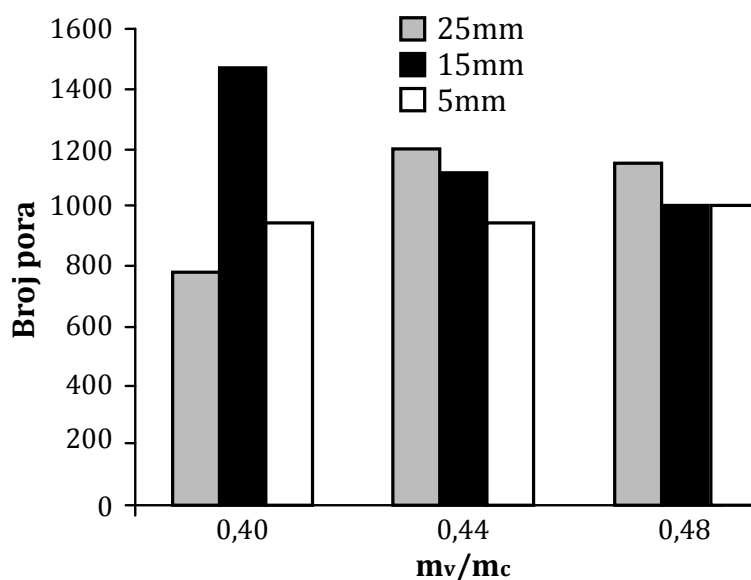


Slika IV-4. Uticaj krupnoće zrna lakog agregata na čvrstoću pri pritisku [52]

Ovakav rezultat, autori su objasnili uticajem čvrstoće agregata (agregat sa zrnima veličine 15mm imao je najveću, a sa zrnima 25mm najmanju čvrstoću). Takođe, primećeno je da su vrednosti čvrstoće pri pritisku pri starosti od 7 dana za agregate sa zrnima 15mm i 5 mm praktično jednake, što je i očekivano jer pri manjim starostima čvrstoća pri pritisku zavisi od čvrstoće cementnog kamena i kvaliteta tranzitne zone.

Poređenjem rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od vrednosti vodo-cementnog faktora za sve tri krupnoće agregata, zaključeno je da sa povećanjem vodo-cementnog faktora čvrstoća opada.

U ovom istraživanju je analiziran i uticaj pora na čvrstoću betona, pri čemu su analizirani broj pora krupnoće 1-100 $\mu$ m u cementnom kamenu i pore krupnoće oko 30 $\mu$ m u tranzitnoj zoni. Rezultati do kojih se došlo pokazali su da broj pora u cementnom kamenu raste sa porastom vodo-cementnog faktora, odnosno da čvrstoća opada sa porastom broja pora (što je i očekivano). U tranzitnoj zoni, broj pora kod agregata krupnoće 5mm i 25mm raste sa povećanjem vodo-cementnog faktora, dok je kod agregata krupnoće 15mm, situacija obrnuta (Slika IV-5).



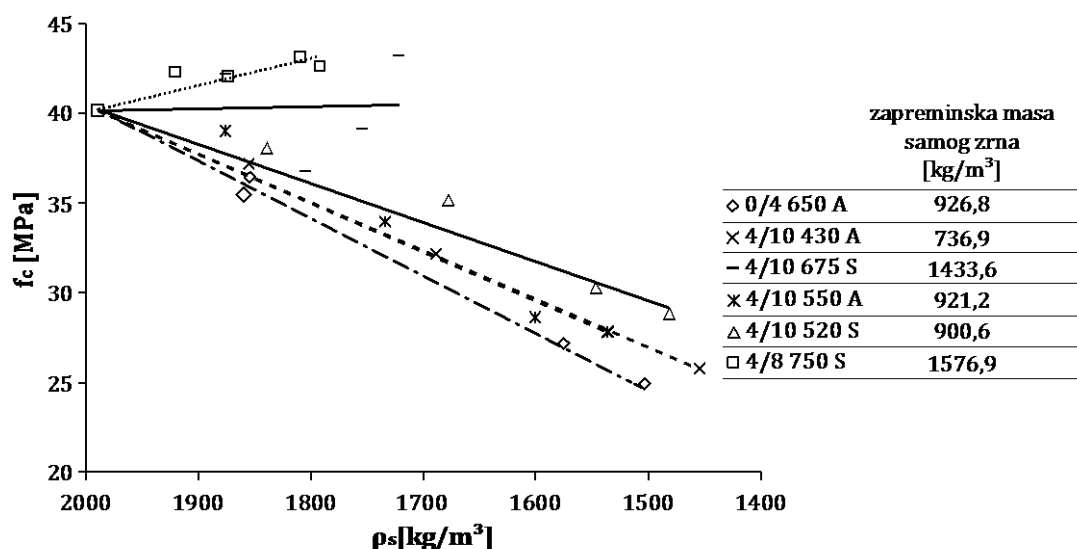
Slika IV-5. Uticaj vodo-cementnog faktora na broj pora u tranzitnoj zoni [52]

Ovakav rezultat je objašnjen malom otvorenim poroznošću zrna agregata. Količina vode koju agregat upije i koja se kasnije koristi u procesu hidratacije i obezbeđuje kvalitetniju tranzitnu zonu znatno je manja nego kod poroznijih agregata. Usled

ovoga se kod lakih agregata visokih čvrstoća, kao i kod običnog agregata, javlja „efekat zida“ što za posledicu ima porozniju tranzitnu zonu.

Na osnovu rezultata istraživanja koje je sproveo Chi sa saradnicima [53] koristeći tri veštačka laka agregata (sa zapreminskim masama 1230, 1290 i 1440kg/m<sup>3</sup>) napravljena od cimente paste sa različitim sadržajem letećeg pepela, zaključeno je da sa povećanjem zapreminskog udela agregata dolazi do značajnog smanjenja mehaničkih svojstava betona. Smanjenje je bilo znatno izraženije kod agregata sa manjom zapreminskom masom.

Uticajem zapreminskog udela agregata na mehanička svojstva lakoagregatnog betona bavio se i Ke sa saradnicima [54]. U ovom istraživanju je za šest vrsta lakog agregata (tri tipa ekspandirane gline i tri tipa ekspandiranog škriljca)<sup>12</sup> variran zapreminski udeo (12,5-45% od zapremine betona) pri čemu su vodo-cementni faktor i odnos sitnog agregata i cementa bili konstantni. Na slici IV-6 prikazana je zavisnost čvrstoće pri pritisku od zapreminskog udela lakog agregata.



Slika IV-6. Zavisnost zapreminske mase (u funkciji zapreminskog udela lakog agregata) i čvrstoće pri pritisku [54]

Za četiri vrste agregata sa zapreminskim masama zrna od 700kg/m<sup>3</sup> do 900kg/m<sup>3</sup> utvrđeno je da sa povećanjem udela lakog agregata čvrstoća pri pritisku opada, dok

<sup>12</sup> Oznake agregata su definisane na sledeći način: prvi broj označava frakciju agregata (d/D), drugi broj zapreminsku masu u rastresitom stanju [kg/m<sup>3</sup>], a slovom je označena vrsta agregata A-ekspandirana glina i S-ekspandirani škriljac.

kod dve vrste agregata sa zapreminskim masama zrna od  $1430 \text{ kg/m}^3$  i  $1570 \text{ kg/m}^3$ , sa povećanjem udela agregata raste i čvrstoća.

Analizom karaktera loma uzoraka betona sa agregatom iz prve grupe zaključeno je da je čvrstoća betona pri pritisku ograničena čvrstoćom zrna agregata na zatezanje. Kod druge grupe je do loma došlo po cementnom kamenu, pa je ovakav mehanizam loma objašnjen boljom deformacionom kompatibilnošću lakog agregata i cementnog kamena kao i tanjom i manje poroznom tranzitnom zonom. U ovom slučaju, čvrstoća pri pritisku je ograničena kvalitetom samog cementnog kamena.

Drugi deo istraživanja se odnosio na uticaj kvaliteta samog agregata, a kao važni uticajni faktori su izdvojeni debljina omotača (opne) zrna agregata, makro-poroznost i procenat slomljenih zrna. Navedeni faktori su direktno povezani sa upijanjem vode, pa su autori poređenjem uticaja odnosa zapreminske mase i upijanja vode sa jedne strane i čvrstoće pri pritisku sa druge strane istakli da postoji mnogo bolja korelacija između posmatranih parametara nego u slučaju korelacije zapreminska masa/čvrstoća pri pritisku.

Slično istraživanje je sproveo i Nguyen sa saradnicima [55]. Analiziran je uticaj zapreminskog udela tri vrste lakog agregata (ekspandirana glina, plovućac i ekspandirani škriljac) na mehanička svojstva betona, pri čemu je menjan udeo i sitnog i krupnog lakog agregata. Rezultati do kojih su došli su pokazali da sa porastom zapreminske mase raste i čvrstoća, i obrnuto. Poređenjem rezultata uzoraka koji imaju istu zapreminsku masu, zavisnost čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase objašnjena je razlikama u mikrostrukturi zrna, tj. gustinom omotača zrna agregata. Pored toga, autori su došli do zaključka da na čvrstoću betona mnogo više utiče sadržaj krupnog lakog agregata nego sadržaj sitnog lakog agregata.

Uticaj lakog agregata na mehaničke karakteristike lakoagregatnog betona istraživao je i Cui sa saradnicima [56]. U ovom istraživanju je analiziran uticaj zapreminskog udela i svojstava pet agregata, tri na bazi ekspandirane gline (LT, LS, DG) jedan na bazi ekspandiranog škriljca (YC) i jedan na bazi škriljca i pepela (SH).

Bez obzira na vrstu agregata, rezultati (Tabela IV-1) su pokazali da zapreminski udeo agregata ima veliki uticaj na čvrstoću pri pritisku, što se poklapa sa rezultatima drugih istraživanja, npr. [53] i [57]. Kako sa povećanjem udela lakog agregata čvrstoća opada, može se zaključiti da je agregat najslabija komponenta u betonu.

*Tabela IV-1. Zavisnost čvrstoće betona pri pritisku od zapreminske mase i udela agregata, MPa [56]*

Vrsta agregata	Zapreminska masa samog zrna [kg/m <sup>3</sup> ]	Zapreminski udeo agregata		
		30%	40%	50%
LT	593	30,4	23,0	18,9
DG	1067	45,5	42,5	35,0
LS	1172	44,9	42,6	38,5
YC	1544	59,1	57,2	54,7
SH	1620	48,1	48,1	45,0

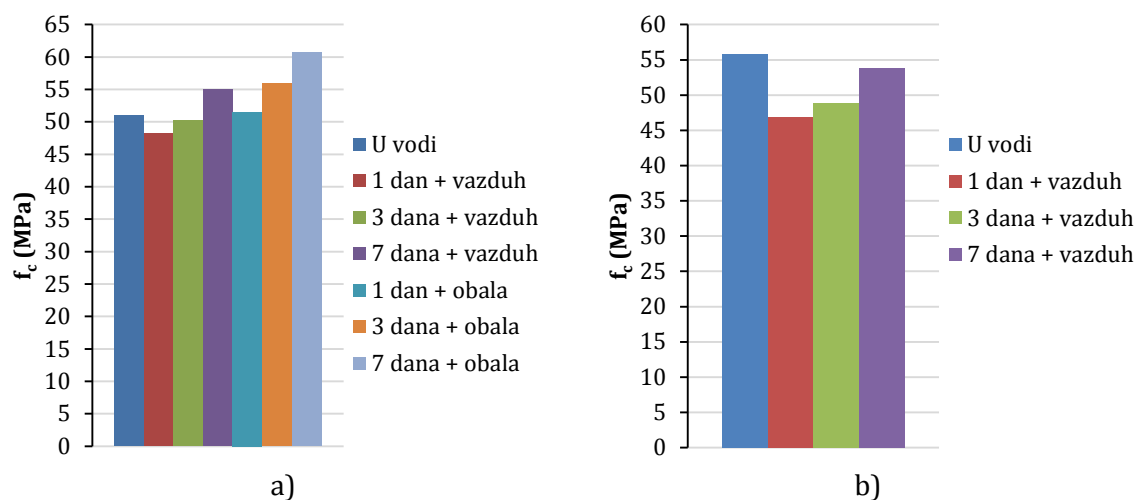
Generalno, čvrstoća agregata je povezana sa zapreminskom masom samog zrna. Sa povećanjem zapreminske mase raste i čvrstoća, a kako svojstva agregata utiču na svojstva betona, raste i čvrstoća betona. Rezultati prikazani u tabeli IV-1 su, u principu, u skladu sa prethodno iznetim, sa izuzetkom betona sa agregatom YC, čije se odstupanje može pripisati uticaju oblika zrna. Naime, ovaj agregat, za razliku od ostalih koji imaju zaobljena zrna, ima uglasta zrna.

Efektom uticaja početnog režima nege betona na čvrstoću lakoagregatnog betona bavili su se Al-Khaiat i Haque [58]. U ovom istraživanju je korišćen laki agregat komercijalnog naziva Lytag (agregat na bazi letećeg pepela). Čvrstoće pri pritisku su određivane pri starostima od 28 i 91 dan, pri čemu su režimi nege nakon vađenja iz kalupa definisani na sledeći:

- Grupa 1 – negovani 27 dana u vodi;
- Grupa 2 – negovani u spoljašnjoj sredini;
  - na vazduhu;
  - 2 dana u vodi, a o ostalo na vazduhu;
  - 6 dana u vodi, a o ostalo na vazduhu;
- Grupa 3 – negovani u blizini morske obale;
  - na vazduhu;
  - 2 dana u vodi, a o ostalo na vazduhu;
  - 6 dana u vodi, a o ostalo na vazduhu.

Dobijeni rezultati (Slika IV-7) su pokazali da kod uzoraka negovanih na spoljašnjem vazduhu režim nege betona nema značajan uticaj na čvrstoće pri starosti od 28 dana, što se može objasniti efektom „samonegovanja“. Veće čvrstoće pri pritisku uzoraka

negovanih uz obalu pripisane su većoj vlažnosti i temperaturi sredine što je uticalo na ubrzanje procesa hidratacije.



Slika IV-7. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od režima nege: a) čvrstoća pri starosti 28 dana b) čvrstoća pri starosti 91 dan [58]

Pri starosti od 91 dan, uzorci negovani jedan odnosno tri dana u vodi, a zatim na vazduhu, pokazali su pad čvrstoće od 16% i 12% u odnosu na one negovane 28 dana u vodi, dok su uzorci negovani sedam dana pokazali pad od cca 4%. Autori su na osnovu ovih rezultata naglasili značaj nege u prvih 7 dana bez detaljnijeg objašnjenja razloga pada čvrstoće pri povećanju starosti uzoraka negovanih na vazduhu.

S obzirom na to da je eksperimentalno istraživanje sprovedeno u Kuvajtu, koji je u oblasti sa kontinentalnom klimom i temperaturama koje leti mogu biti iznad 51°C, razlog za ovakve rezultate bi mogao da bude prebrzo isušivanje uzoraka („pregorevanje“) čime je onemogućena potpuna hidratacija cementa. Drugi razlog mogu biti i razlike u deformacijama agregata i cementnog kamena zbog temperaturne razlike koja u toku dana može iznositi skoro 20°C, usled čega dolazi do pojave mikroprslina čime se narušava veza agregat-cementni kamen.

Lo sa saradnicima [59] je analizirao uticaj dužine trajanja prethodnog kvašenja agregata i količine mlevenog letećeg pepela kao zamene za deo cementa na mehanička svojstva betona. U istraživanju je korišćen laki agregat na bazi ekspanzirane gline (sitne i krupne frakcije), a varirani su količina cementa (420 i 450kg/m<sup>3</sup>) i dužina trajanja kvašenja agregata (bez kvašenja, 30 minuta i 60 minuta). Uticaj letećeg pepela je analiziran zamenom cementa u količini od 15% i 25%.

Rezultati istraživanja prikazani su u tabeli IV-2. Analizom površine loma uočeno je da do loma dolazi kroz zrna agregata, na osnovu čega je zaključeno da je agregat najslabija komponenta i da se dodavanjem cementa u cilju povećanja čvrstoće cementnog kamena ne može značajno doprineti povećanju čvrstoće pri pritisku. Ovakav zaključak je donet i u prethodno navedenom istraživanju [58].

Tabela IV-2. Mehanička svojstva analiziranih betona [59]

Mešavina	$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m_{lp}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$m_v/(m_c+m_{lp})$	Trajanje kvašenja [min]	$f_{c,7}$ [MPa]	$f_{c,28}$ [MPa]
1	420	0	0,55	0	31,33	36,41
2	420	0	0,55	30	31,84	38,58
3	420	0	0,55	60	33,10	37,59
4	450	0	0,54	0	24,31	29,19
5	450	0	0,54	30	35,88	42,95
6	450	0	0,54	60	32,01	39,04
7	450	0	0,56	30	28,21	31,22
8*	382,5	67,5	0,56	30	26,30	32,16
9**	37,5	112,5	0,56	30	24,94	34,48

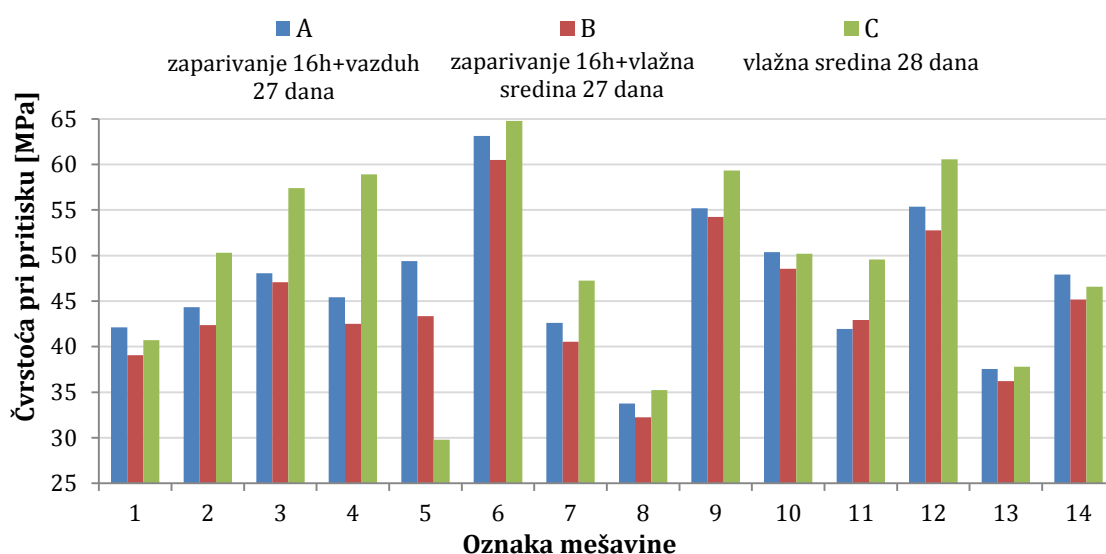
\* zamena cementa letećim pepelom u količini od 15%

\* zamena cementa letećim pepelom u količini od 25%

Poređenje čvrstoća pri pritisku betona sa različitim trajanjem prethodnog kvašenja agregata je pokazalo da betoni kod kojih je agregat kvašen 30 minuta imaju najveće čvrstoće, a oni kod kojih agregat nije prethodno kvašen, najmanje. Ovakav rezultat se može objasniti značajnim upijanjem vode lakog agregata usled čega se u tranzitnoj zoni, zbog nedovoljne količine vode u početnoj fazi očvršćavanja, stvara veći broj mikro pora koje pod dejstvom opterećenja prelaze u mikro prsline. Takođe, nedovoljna količina vode uslovljava nepotpunu hidrataciju cementa i smanjenje čvrstoće očvrstlog betona. Nešto niže čvrstoće u slučaju agregata koji je kvašen 1h autori su pripisali lošijoj ugradljivosti betona.

Poređenjem čvrstoće pri pritisku pri starostima od 7 i 28 dana može se videti da sa povećanjem količine pepela čvrstoća betona u početku opada što je posledica sporije hidratacije cementa. Vremenom dolazi do povećanja čvrstoće, što je u skladu sa ranije datim objašnjenjem uticaja letećeg pepela na čvrstoću.

Istraživanje koje je sproveo Ozyildirim [60] imalo je za cilj da ispita uticaj različitih režima nege na svojstva betona. Lakoagregatni betoni su spravljani sa agregatom dostupnim na američkom tržištu (četiri vrste na bazi ekspandiranog škriljca i dve vrste na bazi ekspandirane gline), a spravljeno je ukupno 14 betonskih mešavina. Radi poređenja sa ostalim istraživanjima, ovde su izdvojena tri režima nege, režim „A“ (zaparivanje 16h + vazduh 27 dana), režim „B“ (zaparivanje 16h + vlažna sredina 27 dana) i režim „C“ (u vlažnoj sredini 28 dana).



Slika IV-8. Vrednosti čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od režima nege [60]

Rezultati su pokazali da se najveće čvrstoće postižu u slučaju režima nege „A“, zatim „C“, dok su najmanje čvrstoće postignute u slučaju režima nege „B“. Postignute čvrstoće su određene na cilindru, i u zavisnosti od betonske mešavine, iznose od 28MPa do 54MPa. Na osnovu statističke analize rezultata, autori su zaključili da ne postoji značajna razlika u čvrstoćama betona negovanih u vlažnoj sredini i zaparivanih pa negovanih na vazduhu, dok je razlika između betona zaparivanih pa negovanih u vlažnoj sredini i druga dva značajna.

Surbasi [61] je u svom istraživanju analizirao uticaj količine letećeg pepela na svojstva lakoagregatnog betona na bazi ekspandirane gline. U radu je varirana količina pepela u količini 0-30% u zavisnosti od količine cementa koja je iznosila 350, 400 i 450kg/m<sup>3</sup>. Analizom dobijenih rezultata zaključeno je da se najveće čvrstoće postižu zamenom cementa u količini od 10%.

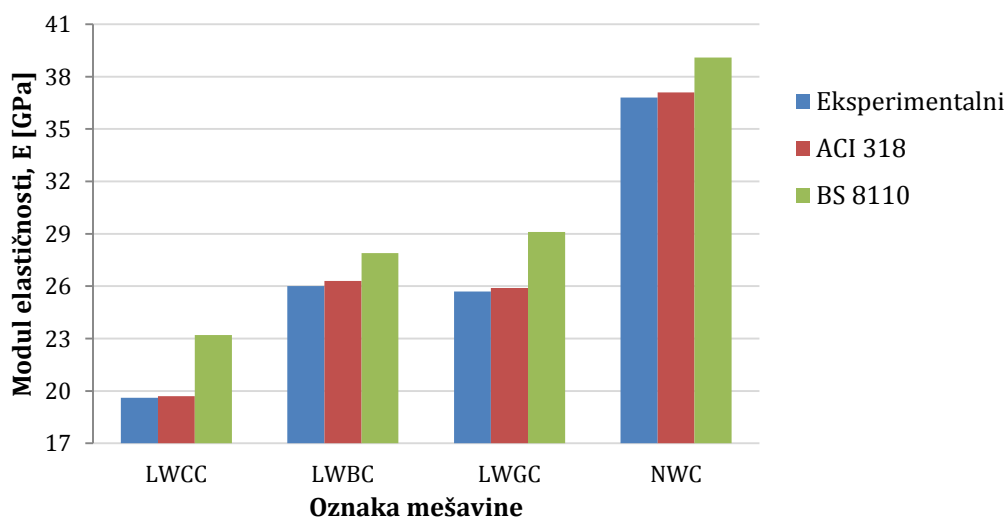


## 2. MODUL ELASTIČNOSTI

Istraživanje koje su sproveli Al-Khaiat i Haque [58] pokazalo je da režim nege nema značajnog uticaja na vrednost modula elastičnosti. Ovakav rezultat su autori pripisali „samonegovanju“ tj. dodatnoj količini vode koja se nalazi u agregatu i koja se koristi u procesu hidratacije cementa.

Kockai i Ozturan [62] su ispitivali uticaj tri vrste lakog agregata na bazi letećeg pepela (LWBC i LWGC - dobijene sinterovanjem i LWCC – dobijena mešanjem sa cementom i vodom) na mehanička svojstva lakoagregatnih betona, dok je za referentni beton korišćen običan agregat. Kako modul elastičnosti zavisi od većeg broja faktora (karakteristike komponentnih materijala i njihov zapreminski udeo, kvalitet tranzitne zone, čvrstoća pri pritisku...), autori su u ovom istraživanju varirali samo vrstu agregata, dok je sve ostalo bilo isto.

Rezultati istraživanja (Slika IV-9) pokazali su da betoni sa lakim agregatom imaju znatno niži modul elastičnosti od običnog betona. Poređenjem lakoagregatnih betona uočeno je da betoni sa agregatom na bazi sinterovanog letećeg pepela imaju veće vrednosti modula elastičnosti od betona sa agregatom dobijenim mešanjem letećeg pepela sa cementom i vodom, što je objašnjeno karakteristikama samog agregata. Naime, agregati dobijeni sinterovanjem imaju veću zapreminsku masu samih zrna, manju poroznost i finiju strukturu sa ujednačnim rasporedom pora, pa su autori posebno izdvojili ove parametre kao značajne za vrednost modula elastičnosti.

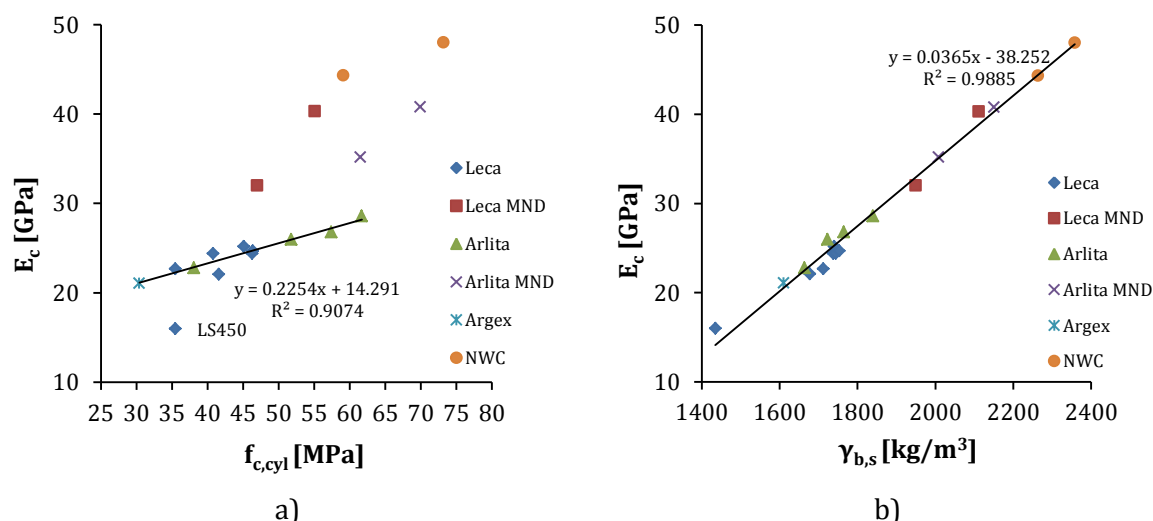


Slika IV-9. Uporedna analiza modula elastičnosti [62]

Pored ovog, upoređeni su rezultati sa vrednostima dobijenim na osnovu izraza definisanih u standardima ACI 318 [43] i BS 8110 [45]. Kao što se može videti, vrednosti dobijene prema ACI 318 standarda vrlo malo odstupaju (1-2%), dok one dobijene prema BS 8110 odstupaju od 4% od 16%, pri čemu se na osnovu oba standarda dobijaju precenjene vrednosti u odnosu na eksperimentalno određene.

Istraživanje koje su sproveli Bogas i Gomes [63] imalo je za cilj da se utvrdi uticaj različitih vrsta lakih agregata na bazi ekspanzirane gline (komercijalno dostupni agregati Leca, Arlita i Argex) na modul elastičnosti betona. Dobijeni rezultati su pokazali da je vrednost modula elastičnosti lakoagregatnih betona 40-56% manja od referentnog normalnog betona, pri čemu su vrednosti modula elastičnosti opadale sa smanjenjem zapreminske mase, porastom udela lakog agregata i porastom vodocementnog faktora. Na slici IV-10 prikazana je zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase.

Iz prikazanih rezultata se može zaključiti da kod betona kod kojih je sav krupan agregat zamenjen lakim agregatom (u legendi označeni sa Leca, Arlita i Argex) postoji vrlo jaka korelacija između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti. Takođe, postoji i vrlo jaka korelacija između zapreminske mase u suvom stanju i modula elastičnosti bez obzira na vrstu upotrebljenog agregata.



Slika IV-10. Zavisnost modula elastičnosti od: a) čvrstoće pri pritisku b) zapreminske mase [63]

Takođe, autori su poredili dobijene rezultate sa rezultatima drugih autora kao i sa vrednostima modula elastičnosti dobijenim na osnovu izraza definisanih u različitim

standardima. Poređenje je pokazalo da, ako se uzmu u obzir činjenice da su korišćene različite vrste agregata i različiti udeli agregata, postoji dosta dobro poklapanje i sa rezultatima drugih istraživanja (razlike su 5-15%) i sa vrednostima dobijenim na osnovu analitičkih izraza definisanih u standardima ACI 213 [8], EN 1992 [44] i ACI 318 [43].

Cui sa saradnicima [56] je analizirao i uticaj lakog agregata na modul elastičnosti. Rezultati istraživanja (Tabela IV-3) pokazali su da sa povećanjem zapreminske mase loakog agregata raste modul elastičnosti, dok sa povećanjem udela lakog agregata u betonu modul elastičnosti opada. Autori su istakli da oblik zrna takođe ima značajan uticaj na modul elastičnosti. Ovakav zaključak je izveden na osnovu rezultata dobijenog za beton sa agregatom koji ima uglasta zrna. Ovaj beton je i pored niže zapreminske mase imao veći modul elastičnosti, što je objašnjeno uklještenjem zrna agregata u cementom kamenu.

*Tabela IV-3. Zavisnost modula elastičnosti betona od zapreminske mase i udela agregata, GPa [56]*

Vrsta agregata	Zapreminska masa samog zrna [kg/m <sup>3</sup> ]	Zapreminski udeo agregata		
		30%	40%	50%
LT	593	21,32	17,14	12,46
DG	1067	22,25	21,09	17,51
LS	1172	22,65	20,53	17,32
YC	1544	28,66	26,91	24,71
SH	1620	24,48	23,59	20,36

Lo sa saradnicima [59] je analizirao i uticaj dužine trajanja prethodnog kvašenja agregata i količine mlevenog letećeg pepela na modul elastičnosti betona. Ispitivane vrste betona su imale vrednosti modula elastičnosti od 15GPa do 20,3GPa. Takođe, autori su poredili eksperimentalne rezultate sa onim dobijenim na osnovu izraza definisanih u standardima ACI 318 [43] i BS8110 [45].

Kako se iz tabele IV-4 može videti, rezultati su pokazali da se izmerene vrednosti dosta dobro slažu sa računskim i da se pomoću datih izraza, u ovom slučaju, može dovoljno precizno odrediti modul elastičnosti ako se znaju vrednosti zapreminske mase i čvrstoće betona pri pritisku.

*Tabela IV-4. Zavisnost modula elastičnosti od zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku [59]*

Mešavina	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{c,28}$ [MPa]	$E_c$ [GPa]	BS 8110 [GPa]	ACI 318 [GPa]
1	1848	36,41	18,8	19,0	18,4
2	1851	38,58	19,2	19,4	19,0
3	1840	37,59	19,0	19,0	18,6
4	1757	29,19	15,0	16,0	15,3
5	1806	42,95	20,3	19,2	19,3
6	1771	39,04	18,4	17,9	17,9

Nguyen sa saradnicima [55] je istraživao uticaj udela sitnog lakog agregata na modul elastičnosti betona. Rezultati ovog istraživanja prikazani u tabeli IV-5.

*Tabela IV-5. Zavisnost modula elastičnosti od udela sitnog lakog agregata [55]*

Mešavina	$\gamma_{b,s}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_c$ [GPa]
OS-0	1440	19,3
OS-50	1380	18,6
OS-100	1320	17,3
OP-0	1490	19,1
OP-50	1410	17,0
OP-100	1340	15,3
OC1-0	1410	16,3
OC1-50	1290	13,60
OC1-100	1170	11,10
OC2-0	1520	18,20
OC2-50	1400	15,70
OC2-100	1280	13,60
NWC	2030	32,70

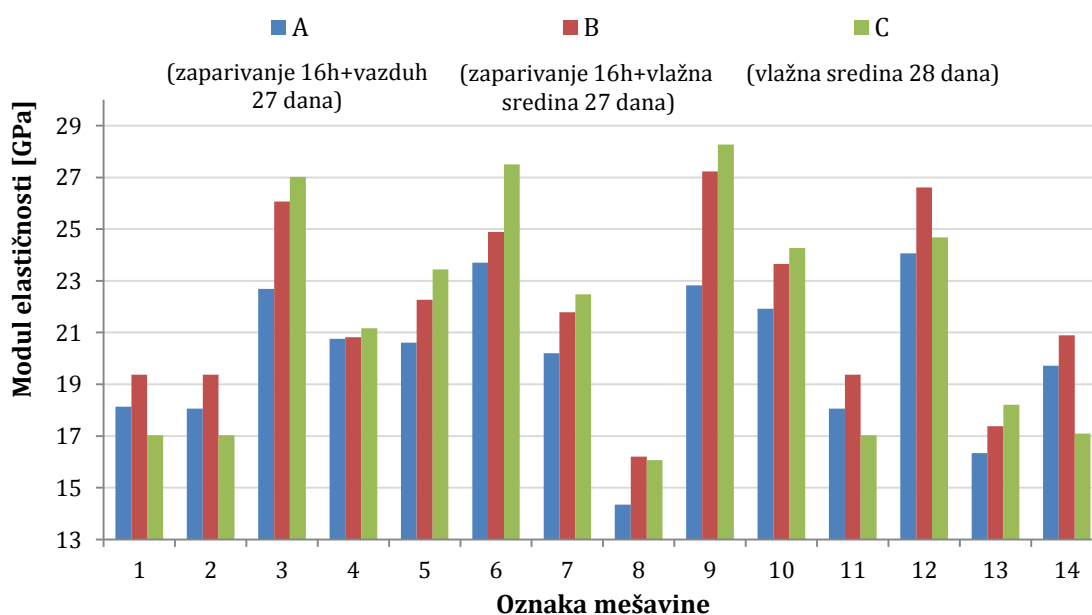
S – ekspanzirani škriljac, P – plovućac, C – ekspanzirana glina,  
NWC – normalan beton

Za sve betonske mešavine se može zaključiti da sa smanjenjem zapreminske mase dolazi i do smanjenja mehaničkih karakteristika, pri čemu betoni sa istim

zapreminskim masama nemaju i iste mehaničke karakteristike. Ovakav rezultat su autori objasnili uticajem strukture zrna agregata. Agregat na bazi ekspaniranog škriljca (S) ima deblji i manje porozan omotač zrna u poređenju sa ostalim agregatima pa su i njegova čvrstoća i krutost veće. Posledično, i betoni sa ovim agregatom imaju bolje mehaničke karakteristike.

Iako plovuac u poređenju sa agregatom na bazi ekspanirane gline ima lošije mehaničke karakteristike zbog veće poroznosti i tanjeg omotača zrna, bez obzira na procenat zamene običnog sitnog agregata lakim agregatom, betoni OP pokazuju manji pad modula elastičnosti. Jedno od mogućih objašnjenja za ovakav rezultat može da se nađe u činjenici da plovuac sadrži određenu količinu „slobodnog“ amornog silicijuma, što dovodi do dodatne pucolanske aktivnosti sa cementom. Takođe, ako se uporede vrednosti modula elastičnosti i zapreminskih masa, može se videti da sa povećanjem udela sitnog lakog agregata posmatrane vrednosti imaju manji pad kod betona OP nego kod betona OC1 i OC2, što ukazuje na međusobnu zavisnost posmatranih svojstava.

Ozyldirim [60] je, pored uticaja na čvrstoću pri pritisku, istraživao i uticaj različitih režima nege na modul elastičnosti, a rezultati su prikazani na slici IV-11.



Slika IV-11. Vrednosti modula elastičnosti u zavisnosti od režima nege [60]

Na osnovu statističke analize zaključeno je da postoji značajna razlika između režima „A“ i „B“ i „A“ i „C“, dok između „B“ i „C“ ne postoji značajna razlika u razlikama modula elastičnosti. Sa slike se vidi da se, u zavisnosti od betonske mešavine, sa različitim režimima zaparivanja postižu najveće vrednosti modula elastičnosti. U 43% slučajeva najveći moduli elastičnosti je postignut režimom nege „B“, dok je u 57% najveći modul postignut režimom nege „C“. Najmanji modul elastičnosti je u 72% dobijen režimom nege „A“, a u 28% režimom „C“. Iako nije moguće jednoznačno definisati najbolji režim nege, jasno je da se najmanje vrednosti modula elastičnosti dobijaju režimom nege „A“, a najveće negom uzoraka samo u vlažnoj sredini (režim „C“).

### 3. SKUPLJANJE

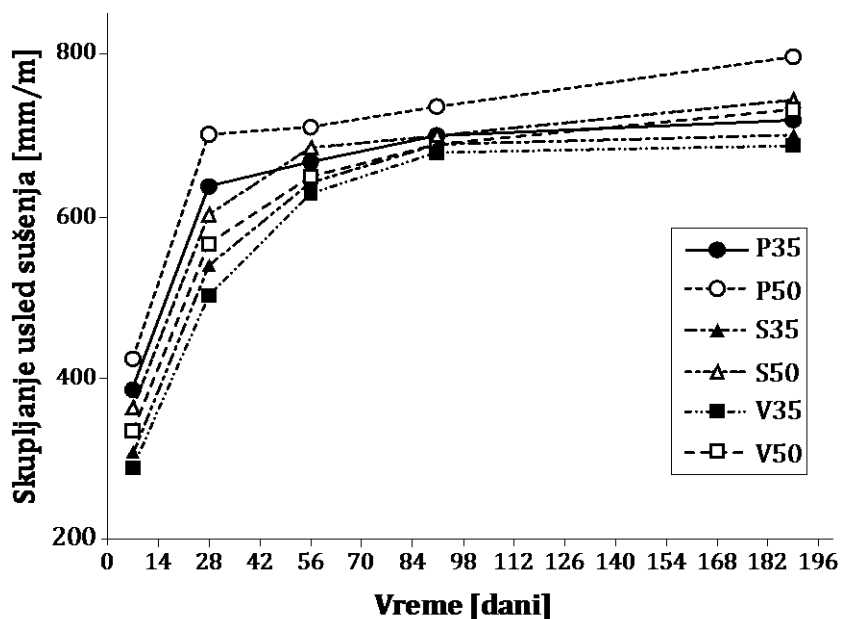
Jedno od prvih istraživanja skupljanja lakoagregatnih betona sproveo je Pfeifer [64]. U ovom istraživanju je analiziran uticaj sedam vrsta lakih agregata od kojih je spravljeno 47 betonskih mešavina. U zavisnosti od vrste lakog agregata skupljanje nakon dve godine, kod betona koji su imali čvrstoću pri pritisku oko 20MPa, iznosilo je  $475 \times 10^{-3}$ - $780 \times 10^{-3}$ mm/m, dok je referentni normalan beton imao skupljanje reda veličine  $540 \times 10^{-3}$ mm/m. Betoni sa čvrstoćama oko 35MPa imali su skupljanje između  $560 \times 10^{-3}$ mm/m i  $980 \times 10^{-3}$ mm/m, a referentni normalan beton  $610 \times 10^{-3}$ mm/m. Merenje skupljanja je započeto pri starosti betona od 7 dana, čime je uticaj autogenog skupljanja eliminisan.

Povećanje skupljanja sa porastom čvrstoće, navedeno u ACI213 [65], povezano je sa povećanjem količine cementne paste radi postizanja većih čvrstoća. Ovde su takođe date i vrednosti skupljanja nakon godinu dana za betone različitih čvrstoća. Betoni sa čvrstoćama oko 20MPa imaju skupljanje od  $450 \times 10^{-3}$ mm/m do  $800 \times 10^{-3}$ mm/m, a sa čvrstoćama oko 40MPa skupljanje iznosi  $650 \times 10^{-3}$ - $1000 \times 10^{-3}$ mm/m. Za razliku od normalno negovanih betona, betoni koji su zaparivani imaju cca 30% manje skupljanje. Jedan od mogućih razloga za povećanje skupljanja sa povećanjem čvrstoće je smanjenje vodo-cementnog faktora koje uzrokuje veće autogeno skupljanje. Kod betona sa malim vodo-cementnim faktorom autogeno skupljanje može biti značajno.

Kohno i saradnici [66] su na osnovu rezultata istraživanja uticaja tri vrste lakog agregata na skupljanje utvrdili da laokagregatni beton ima manje autogeno skupljanje nego referentni normalan beton, što je posledica vlažnosti agregata i njegovih apsorpcionih svojstava.

Problemom uticaja lakog agregata i metode prethodnog kvašenja vodom na skupljanje betona bavili su se Kabay i Akoz [67]. U istraživanju je analiziran uticaj tri metode prethodnog kvašenja: kvašenje agregata vodom u količini koju upije za 1h (betoni sa oznakom P), zasićenje agregata vodom u trajanju od 24h pre spravljanja betona (S), zasićenje vodom u vakuumu u trajanju od 10min (V). Agregat korišćen u ovom istraživanju je plovućac, a količina cementa varirana je u iznosu od  $350 \text{kg/m}^3$  i  $500 \text{kg/m}^3$ .

Kako se sa dijagrama vidi (Slika IV-12), betoni kod kojih je agregat prethodno zasićen vodom u vakuumu (V) ili u trajanju od 24h (S), bez obzira na količinu cementa, imaju manje skupljanje u poređenju sa betonom sa kvašenim agregatom (P). Ovakav rezultat je posledica bolje „unutrašnje“ nege koja je obezbeđena većom količinom vode u agregatima koji su zasićeni. Na osnovu rezultata se, takođe, može videti da sa povećanjem količine cementa, a smanjenjem udela agregata, raste i skupljanje.



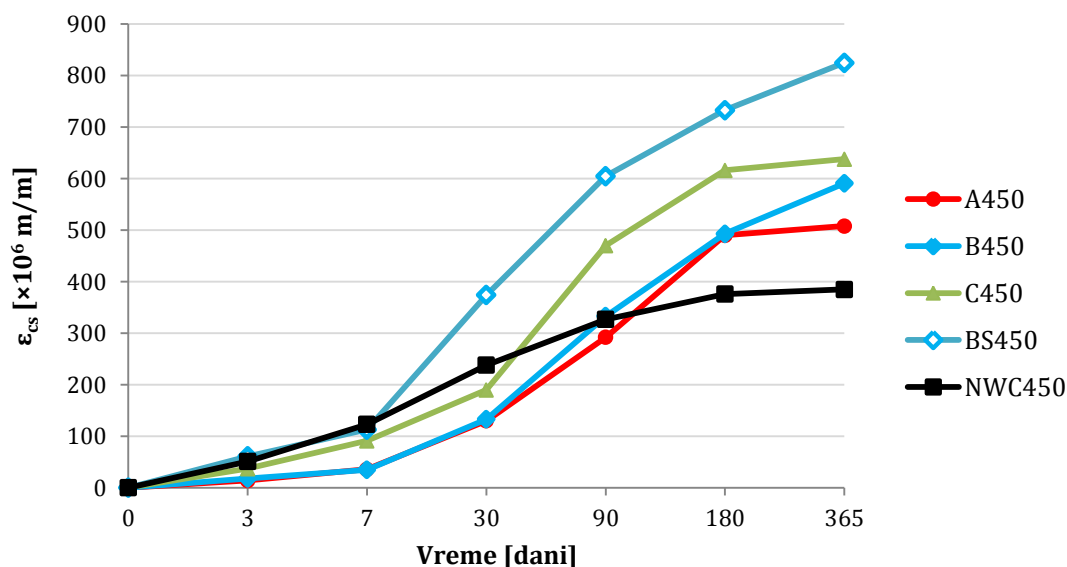
Slika IV-12. Uticaj količine cementa i načina prethodnog kvašenja na skupljanje betona [67]

Bogas, Nogueira i Alemida [68] publikovali su rezultate svojih istraživanja o uticaju sastava lakoagregatnih betona na bazi ekspanzirane gline na skupljanje. U ekperimentu su varirana tri komercijalna laka agregata (A-Arlita, B-Leca i C-Argex), vodo-cementi faktor, zapreminski udeo agregata, količina cementa i količina mineralnih dodataka: letećeg pepela (Tip F) i silikatne prašine.

Uticaj vrste agregata na veličinu skupljanja je prikazan na slici IV-13. U zavisnosti od svojstava lakog agregata, betoni sa lakim agregatom imaju manje skupljanje u poređenju sa normalnim betonom ( $\approx 50\%$ ) za starosti od 40 dana do oko tri meseca, da bi nakon godinu dana lakoagregatni betoni imali 1,3-1,7 puta veće skupljanje. Ovakav rezultat se može objasniti trošenjem „rezerve“ vode u lakom agregatu pri manjim starostima, dok je povećanje skupljanja u odnosu na normalan beton pri većim starostima posledica manje krutosti agregata. Betoni sa agregatom B su imali



najveću dodatnu količinu vode (zbog najvećeg upijanja), a beton sa agregatom C najmanju, na osnovu čega je zaključeno da „rezerva“ vode igra značajnu ulogu u redukciji skupljanja.



Slika IV-13. Uticaj vrste lakog agregata na skupljanje [68]

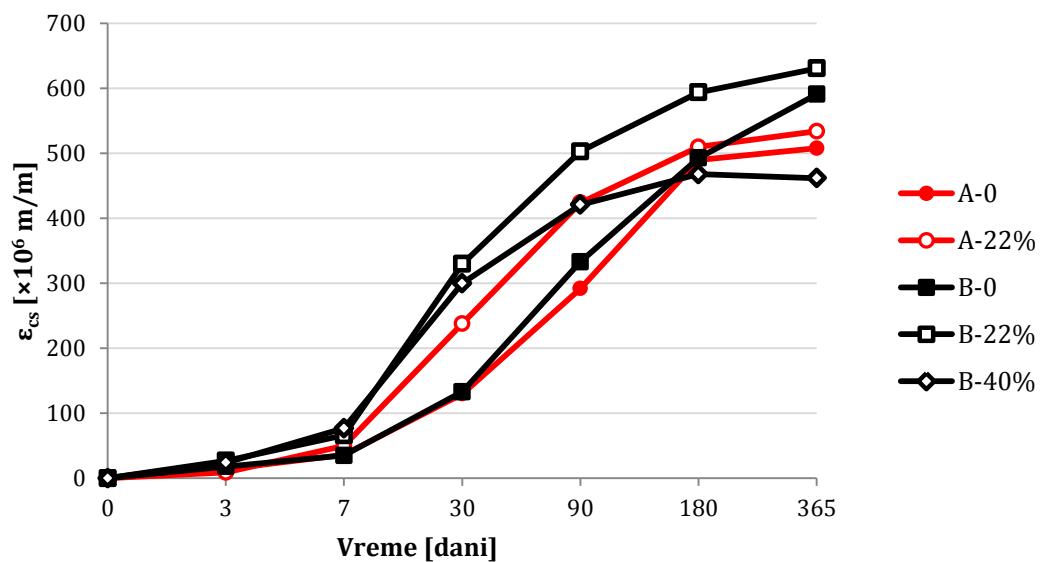
Poređenjem betona BS450 (beton kod kog je deo peska zamenjen sitnim lakim agregatom) sa ostalim vrstama može se videti da se zamenom dela prirodnog sitnog agregata lakim agregatom skupljanje povećava.

Poređenjem vrednosti skupljanja betona sa različitim količinama cementa, pri čemu je zadržana ista količina vode (menjan je vodo-cementni faktor), zaključeno je da sa smanjenjem količine cementa skupljanje raste, bez obzira na vrstu lakog agregata.

Zamena dela cementa letećim pepelom u količini od 22% dovela je do povećanja skupljanja, dok je zamenom 40% cementa postignuto smanjenje skupljanja kod betona sa agregatom B pri starostima većim od šest meseci (Slika IV-14). Razlike u skupljanju pri zameni od 22% su izraženije kod betona sa agregatom B što je pripisano manjoj krutosti agregata i činjenici da je kod betona sa letećim pepelom proces hidratacije usporen pa deo „rezervne“ vode koja se nalazi u agregatu ispari.

Pored skupljanja, autori su merili i gubitak mase usled isušivanja. Uočeno je da pri malim starostima gubitak mase nije proporcionalan veličini skupljanja, dok pri većim

starostima jeste. Kod normalnog betona, ova proporcionalnost postoji od samog početka.



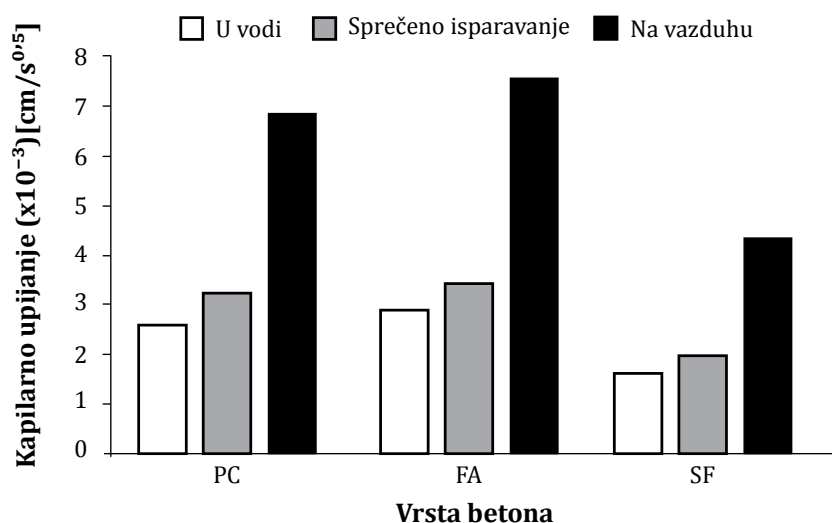
Slika IV-14. Uticaj letećeg pepela na skupljanje lakoagregatnog betona [68]

#### 4. UPIJANJE VODE

Upijanje vode tesno je povezano sa količinom vode u betonu i kod lakoagregatnih betona je obično veće nego kod normalnih betona [7]. Veća količina vode i manja propusnost malterske komponente kod lakoagregatnih betona imaju uticaja na produženje vremena sušenja betona [69]. Ovo je od posebnog značaja za unutrašnju negu betona koja ima dvostruki uticaj na kapilarno upijanje. Sa jedne strane, kapilarno upijanje je smanjeno zbog veće količine vode u betonu (što utiče na smanjenje kapilarnih sila u betonu), a sa druge strane, unutrašnjom negom se pospešuje hidratacija što za posledicu ima gušću mikrostrukturu [70] [71], odnosno kvalitetniju tranzitnu zonu.

Bogas sa saradnicima [72] je istraživao uticaj količine cementa, mineralnih dodataka, zamene običnog agregata lakim agregatom kao i različitih režima nege na kapilarno upijanje. U istraživanju su korišćena tri komercijalna laka agregata na bazi ekspandirane gline, Arlita (A), Leca (B) i Argex (C). Upotrebljeni agregati su odabrani zbog različitih svojstava: poroznosti, zapreminske mase, geometrijskih karakteristika, strukture opne zrna, itd. Rezultati istraživanja su pokazali da je kapilarno upijanje lakoagregatnih betona sa većom zapreminskom masom vrlo slično kao i kod normalnih betona. Autori su ovakav rezultat objasnili kvalitetnijom tranzitnom zonom i manjim kapilarnim silama zbog pora koje su kod lakog agregata veće nego što su pore u okolnom cementnom kamenu.

Uticaj režima nege na kapilarno upijanje vode su istraživali Bozkurt i Yazicioglu [73]. U istraživanju je analiziran uticaj mineralnih dodataka, letećeg pepela i silikatne prašine, kao zamene za cement u količinama od 20% i 10%, respektivno. Uzorci su negovani na vazduhu, u vodi ili tako da je bilo sprečeno isparavanje vode. Rezultati istraživanja su pokazali da, bez obzira na režim nege, betoni sa dodatkom silikatne prašine (SF) imaju najmanje upijanje, a betoni sa letećim pepelom (FA) najveće (Slika IV-15). Ovakav rezultat autori su objasnili činjenicom da su čestice silikatne prašine dovoljno male da ispune pore u cementnoj pasti ili tranzitnoj zoni kao i pucolanskom aktivnošću. Kako je prosečna veličina zrna letećeg pepela veća nego kod silikatne prašine, kod betona sa letećim pepelom efekat punioca nije tako izražen.



Slika IV-15. Vrednosti kapilarnog upijanja pri različitim režimima nege [73]

Istraživanje koje je objavio Liu sa saradnicima [74] pokazalo je da lakoagregatni betoni u poređenju sa normalnim betonom sa istim vodo-cementnim faktorom i sličnom čvrstoćom pri pritisku imaju isto ili neznatno veće kapilarno upijanje, dok je dubina prodora vode pod pritiskom manja. Upijanje je mereno i na samom cementnom kamenu, a rezultati su pokazali da beton ima upijanje (i kapilarno i pod pritiskom) manje nego sam cementni kamen, što je i očekivano jer prisustvo agregata značajno utiče na povezanost pora. U istom istraživanju analiziran je i uticaj zamene sitnog agregata (peska) drobljenim lakim agregatom. Pokazalo se da je upijanje betona sa sitnim drobljenim lakim agregatom veće, a autori su ovakav rezultat objasnili povećanjem poroznosti malterske komponente zbog velike otvorene poroznosti agregata.

Chia i Zhang [75] su objavili rezultate uporednog eksperimentalnog istraživanja prodora vode pod pritiskom lakoagregatnih i normalnih betona sa i bez zamene cementa silikatnom prašinom. Rezultati istraživanja su dati u tabeli IV-6.

Rezultati su pokazali da lakoagregatni betoni imaju manju dubinu prodora vode. Poređenjem dubine prodora vode betona serije 2 i betona serije 1, vidi se da, iako je delovanje vode pod pritiskom bilo znatno duže, betoni serije 2 imaju manju dubinu prodora. Kako je vodocementni faktor serije 2 manji, rezultat je objašnjen poboljšanjem malterske komponente i tranzitne zone. U seriji 3 je deo cementa zamenjen silikatnom prašinom, a dubina prodora smanjena za više od 50%. Na

osnovu prikazanih rezultata, autori su kao važan parametar u kontroli dubine prodora vode izdvojili kvalitet malterske komponente.

*Tabela IV-6. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom [77]*

Seriya	Receptura	Vrsta agregata	$m_v/(m_c + m_{sf})$	Silikatna prašina [%]	Dubina prodora vode [mm]	Čvrstoća pri pritisku [MPa]
1	1	NWA	0,55	0	54,63	42,8
	2	LWA	0,55	0	20,19	34,2
2	3	NWA	0,35	0	23,21	78,2
	4	LWA	0,35	0	16,21	50,2
3	5	NWA	0,35	10	7,8	92,3
	6	LWA	0,35	10	11,8	55,8

Seriya 1 - Prodor vode meren nakon 12 dana delovanja vode pod pritiskom od 4MPa

Seriya 2 - Prodor vode meren nakon 49 dana delovanja vode pod pritiskom od 4MPa

Seriya 3 - Prodor vode meren nakon 56 dana delovanja vode pod pritiskom od 4MPa

Haque i Al-Khaiti [76] su istraživali uticaj trajanja nege betona na upijanje vode pod pritiskom. Ispitivanje je urađeno u skladu sa standardom DIN 1048 [77], a eksperimentalna analiza je obuhvatila dve mešavine lakoagregatnog betona sa čvrstoćama pri pritisku 35MPa i 50MPa i jednu mešavinu normalnog betona sa čvrstoćom pri pritisku 50MPa. Rezultati su pokazali da se dubina prodora vode smanjuje sa povećanjem dužine trajanja nege betona. Na osnovu izmerenih dubina prodora vode je zaključeno da su lakoagregatni betoni mnogo osetljiviji na režim nege od normalnih betona. Bez obzira na režim nege, lakoagregatni betoni sa čvrstoćom 50MPa su imali cca 2,5 puta manju dubinu prodora vode od lakoagregatnog betona sa čvrstoćom od 35MPa. U poređenju sa normalnim betonom lakoagregatni betoni su imali veću dubinu prodora vode, što je objašnjeno većom poroznošću i većom apsorpcijom vode lakih agregata.

## 5. ZAKLJUČAK

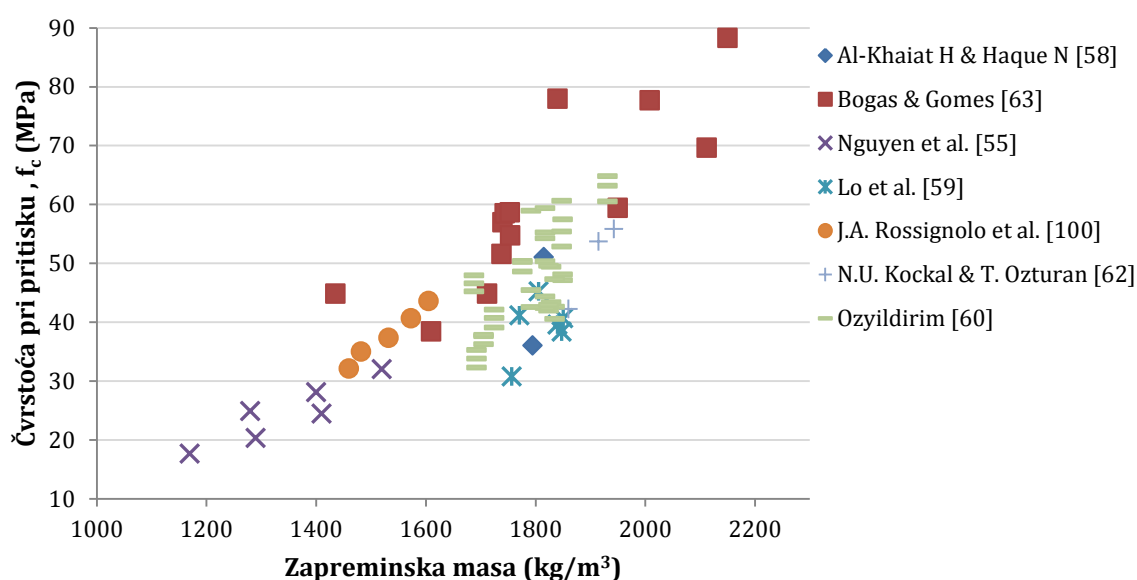
Na osnovu uporednih analiza prikazanih istraživanja, kao i pregleda šire literature iz ove oblasti, može se zaključiti da su predmet istraživanja najčešće bili lakoagregatni betoni sa lakim agregatima na bazi ekspandiranog škriljca, ekspandirane gline i agregata na bazi letećeg pepela. Istraživanja na betonima sa ostalim vrstama agregata, npr. reciklirano ekspandirano staklo i ostale vrste otpadnih materijala, su u mnogo manjoj meri zastupljena.

Kao posledica različitih osnovnih parametara (sastav betona, uslovi nege, metodologija ispitivanja, oblik i dimenzije uzoraka...) i uslova u kojima su prikazana eksperimentalna istraživanja izvedena, postoje razlike u zaključcima do kojih su autori došli. Razlozi za poteškoće u sagledavanju i uporednoj analizi rezultata istraživanja pojedinih svojstava lakoagregatnih betona i njihove međusobne zavisnosti su:

- Ispitivanja su rađena prema različitim standardima, a često i prema internim metodama, dok za neka istraživanja nisu ni navedene metode ispitivanja. Ovo se posebno odnosi na ispitivanja skupljanja i upijanja vode, gde su režimi nege od posebnog značaja, a kod kojih trajanje nege u prikazanim radovima varira od 1 do 28 dana (u vlažnoj sredini, na vazduhu ili u vodi).
- Nisu date karakteristike opreme na kojoj su vršena ispitivanja (brzina nanošenja opterećenja, tačnost očitavanja sile ili deformacija, merni opseg...).
- Iako fizičko-mehanička svojstva agregata, granulometrijski sastav, maksimalno zrno agregata imaju velikog uticaja na svojstva betona, u nekim radovima nisu precizno definisani, ili nisu ni dati ovi podaci. Najčešće, autori su navodili da se radi o određenoj vrsti agregata (npr. ekspandirana glina, ekspandirani škriljac), bez podataka o proizvođaču, ukoliko se radi o komercijalnim vrstama agregata, ili osnovnim fizičko-mehaničkim svojstvima agregata. Takođe, upijanje vode i metoda prethodnog kvašenja agregata ima velikog značaja na efektivnu količinu vode u betonu (a samim tim i svojstva betona), ali u nekim radovima ovaj podatak nije preciziran.
- Najčešće, za spravljanje betona je upotrebljivan čist portland cement, ali postoji značajan broj radova u kojima nisu navedene vrsta ili klasa cementa.
- Uobičajeno je da se, zbog poređenja, svojstva betona zavisna od zapreminske mase definišu u odnosu na zapreminsku masu potpuno suvog betona. U velikom broju radova data je zapreminska masa svežeg betona i/ili zapreminska masa očvrslog betona bez navođenja o kojoj vrsti zapreminske mase se radi.

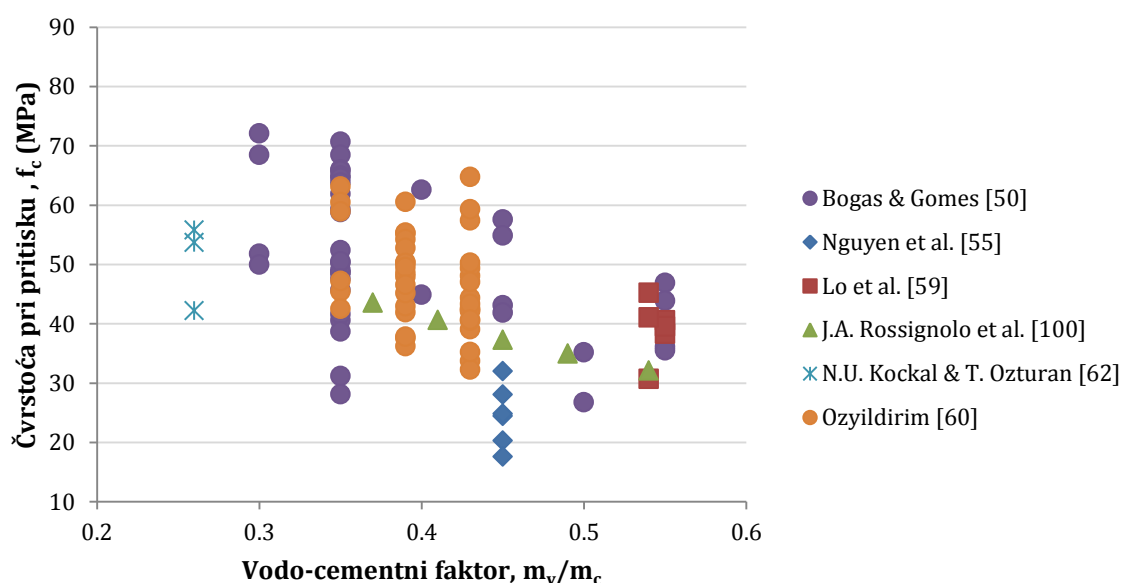
Značaj i uticaj prethodno navedenih ograničenja u donošenju zaključaka se slikovito može prikazati sumiranjem rezultata istraživanja, uz neophodne korekcije kako bi rezultati bili uporedivi (npr. preračunavanje čvrstoće pri pritisku na uzorke iste dimenzije).

Na slici IV-16 sumirani su rezultati analiziranih istraživanja i prikazana je zavisnost čvrstoće pri pritisku od zapreminske mase lakoagregatnih betona. Kako se može videti, rasipanje rezultata je veliko i nije moguće uspostaviti pouzdanu korelaciju između zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku. Ovde, kao i na slici III-14, može da se uoči povećanje rasipanja rezultata sa porastom zapreminske mase.



Slika IV-16. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od zapreminske mase betona

Na slici IV-17 prikazani su sumirani rezultati zavisnosti čvrstoće pri pritisku od vodo-cementnog faktora. Generalno, sa povećanjem vodo-cementnog faktora, čvrstoća pri pritisku opada (i obrnuto). Međutim, sa slike IV-17 se jasno može videti da sama vrednost vodo-cementnog faktora ne može biti pouzdan pokazatelj za određivanje čvrstoće pri pritisku, već se moraju uzeti u obzir i drugi faktori.



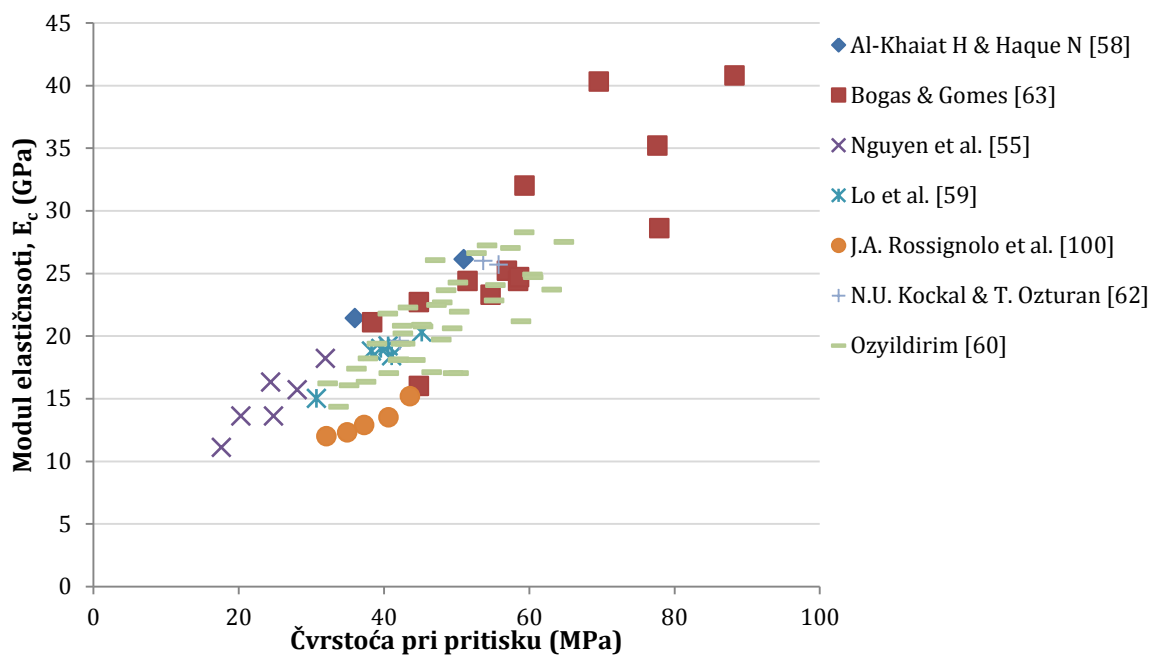
Slika IV-17. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od vodo-cementog faktora

Na osnovu analiziranih istraživanja se mogu izvesti sledeći zaključci:

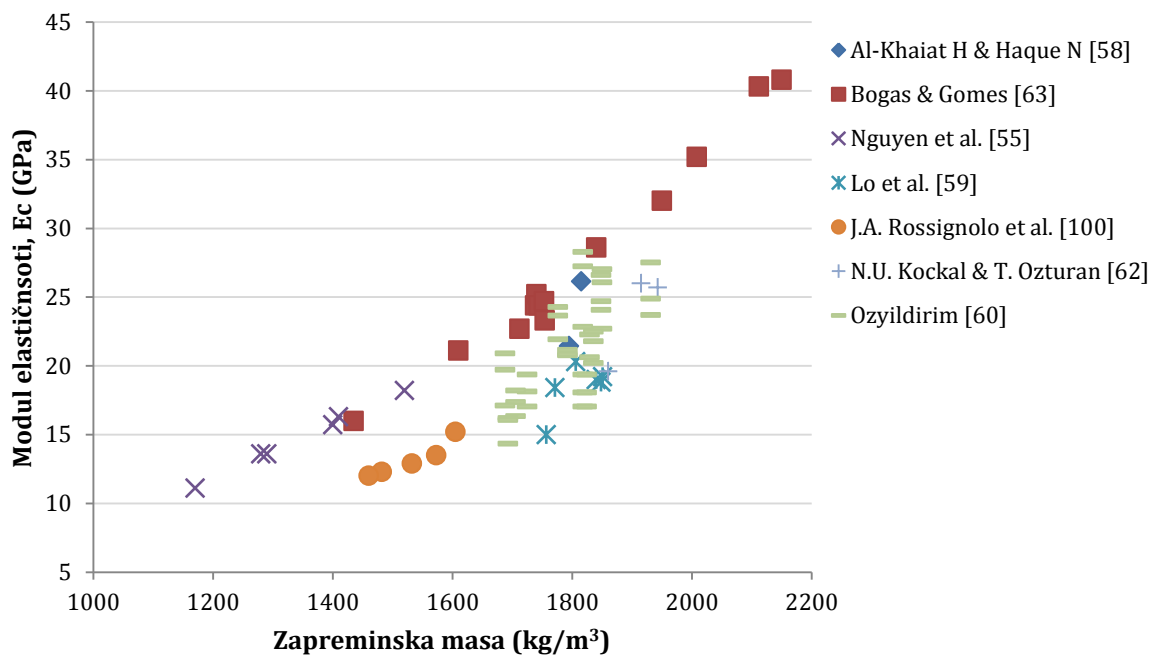
- za iste vrednosti  $m_v/m_c$ , čak i u istom istraživanju, dobijene su značajno različite vrednosti čvrstoće pri pritisku, što je posledica različitih karakteristika ili udela lakog agregata i različitih količina cementa;
- kod agregata sa manjim zapreminskim masama zrna, udeo lakog agregata ima značajan uticaj na čvrstoću pri pritisku, dok sa povećanjem zapreminske mase uticaj zapreminskog udela opada;
- prethodno zasićenje agregata vodom je od značaja sa aspekta obezbeđenja ugradljivosti, kontrole efektivnog vodo-cementnog faktora i samim tim čvrstoće pri pritisku, kao i obezbeđenja manje zavisnosti svojstava betona od načina negovanja betona u periodu očvršćavanja;
- prirast čvrstoće pri pritisku sa povećanjem količine cementa opada, a u nekim istraživanjima je uočen i mali pad čvrstoće pri pritisku;
- nega betona (u vodi ili na vazduhu) nema velikog uticaja na čvrstoću pri pritisku, pod uslovom da je agregat prethodno zasićen vodom.

Uporedne vrednosti modula elastičnosti u zavisnosti od čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase analiziranih istraživanja date su na slikama IV-18 i IV-19.





Slika IV-18. Zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku



Slika IV-19. Zavisnost modula elastičnosti od zapreminske mase betona

Analizom rezultata se može videti da postoji veliko rasipanje rezultata, za istu čvrstoću pri pritisku kao i za istu zapreminsku masu, tako da se ne može uspostaviti jedinstvena korelacija između modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku, kao ni između modula elastičnosti i zapreminske mase lakoagregatnih betona. Ipak, sa dijagrama IV-18 i IV-19 se može sagledati trend korelacije koji pokazuje da se sa povećanjem čvrstoće pri pritisku odnosno zapreminske mase povećava i modul

elastičnosti lakoagregatnih betona. Kako se u okviru pojedinačnih istraživanja mogu definisane korelacione veze, kao najuticajni faktori izdvojeni su zapreminski udeo i vrsta krupnog agregata upotrebljenih u pomenutim istraživanjima, dok udeo sitnog lakog agregata i kvalitet cementne matrice (izražen kroz vodo-cementni faktor, vrstu i količinu cementa) imaju manji uticaj na modul elastičnosti.

Skupljanje lakoagregatnih betona u velikoj meri zavisi od vrste lakog agregata. Upotrebom agregata manje krutosti smanjuje se njegovo „ograničavajuće“ dejstvo na cementnu matricu, koja je izvor kontrakcije u betonu. Takođe, lakoagregatni betoni često imaju veću količinu kvalitetne cementne paste. Na osnovu navedenih stavova, skupljanje lakoagregatnih betona bi trebalo biti veće u poređenju sa normalnim betonima iste čvrstoće. Međutim, ako se uzmu u obzir veća krutost kvalitetnije cementne paste i otpuštanje „rezervne“ vode iz pora lakog agregata kojom se kompenzuje gubitak vode isušivanjem cementnog kamena, kao i svojstva različitih vrsta agregata i kombinovano dejstvo navedenih faktora, skupljanje lakoagregatnih betona pri manjim starostima može biti manje, dok je pri većim starostima, nakon trošenja „rezervne vode“, skupljanje u odnosu na normalne betone često veće.

Mehanizmi kapilarnog upijanja vode još uvek nisu u potpunosti objašnjeni, što je posledica uticaja vrste krupnog agregata, karakteristika malterske komponente koja okružuje agregat kao i metoda ispitivanja. Ispitivanja dubine prodora vode pod pritiskom su takođe dala oprečne rezultate. Zbog toga, na osnovu uporednih analiza prikazanih, kao i ostalih analiziranih istraživanja, nije moguće doneti jedinstven zaključak o odnosu upijanja vode lakoagregatnih i normalnih betona.

Međutim, bez obzira na razlike i velika rasipanja rezultata prikazanih u prethodnom delu ovog poglavlja, može se sa dovoljnom pouzdanošću zaključiti da se primenom lakih agregata mogu dobiti konstrukcijski lakoagregatni betoni sa svojstvima bliskim normalnim betonima. Ovakav zaključak potvrđuju rezultati prikazani na slikama IV-16, IV-17 i IV-18, na kojima se može videti da je u velikom broju slučajeva postignuta čvrstoća lakoagregatnih betona veća od 30MPa.

Uvažavajući rezultate i zaključke do kojih su došli drugi autori, sadržaj eksperimentalnog dela ove disertacije osmišljen je tako da doprinese razumevanju osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava lakoagregatnih betona, ali sa posebnim naglaskom na primenu različitih vrsta lakih agregata, različitih vrsta cemenata kao i mogućnost zamene dela cementa letećim pepelom i metakaolinom.

**V**

**EKSPERIMENTALNO  
ISTRAŽIVANJE**



## 1. UVOD

Analizom rezultata dosadašnjih istraživanja uočeno je da postoji malo rezultata u kojima je uporedo analiziran uticaj vrste lakih agregata i različitih vrsta i količina cementa na osnovna svojstva konstrukcijskih lakoagregatnih betona, kao i mogućnost primene cemenata sa manjim negativnim uticajem na životnu sredinu.

Pre sastavljanja programa ispitivanja betonskih mešavina sa lakim agregatom, analizirani su podaci i preporuke proizvođača lakog agregata za spravljanje konstrukcijskih betona, kao i stručna literatura iz ove oblasti. Kao osnove za projektovanje sastava konstrukcijskih lakih betona korišćeni su FIP: Manual of Lightweight Aggregate Concrete [7] i ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete [65]. Cilj ove faze istraživanja jeste upoznavanje sa specifičnostima projektovanja sastava i svojstvima konstrukcijskih betona spravljenih sa lakim agregatom koji se može nabaviti na evropskom tržištu. Iskustva stečena ovim prethodnim ispitivanjima iskorišćena su za proveru mogućnosti primene lakih agregata spravljenih od industrijskih otpadnih materijala u konstrukcijskim betonima.

Prilikom sastavljanja programa ispitivanja konstrukcijskih betona sa odabranom vrstom lakog agregata, želeo se sagledati i doprinos vrste i količine cementa na svojstva svežeg i očvrslog lakoagregatnog betona, kao i uticaj lakog agregata na predmetna svojstva u odnosu na obični – rečni agregat.

Kompletno istraživanje je sprovedeno u Laboratoriji za ispitivanje građevinskih materijala Departmana za građevinarstvo i geodeziju, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

Sva ispitivanja su obavljena u periodu septembar 2011. – oktobar 2014. godine.

## 2. PROGRAM EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

U cilju planskog i kontrolisanog odvijanja eksperimenta sastavljen je detaljan program ispitivanja. Ovim programom definisani su sastavi probnih betonskih mešavina, dimenzije i broj uzoraka za ispitivanje, uslovi nege kao i obim i vrste pojedinih ispitivanja.

Za realizaciju planiranih ispitivanja predviđeno je da se izrade tri grupe betona, u zavisnosti od vrste upotrebljenog lakog agregata i jedna vrsta betona sa krupnim rečnim agregatom. Grupe su označene na sledeći način:

- LLK – betoni kod kojih je kao krupan agregat upotrebljan laki agregat na bazi ekspanzirane gline komercijalnog naziva „Leca – Laterlite“ (Italija);
- LSL - betoni kod kojih je kao krupan agregat upotrebljan laki agregat čija je osnovna sirovina silikatni-kameni mulj iz fabrike Termit d.d. proizveden u saradnji ZAG (Ljubljana, Slovenija) i Termit d.d. (Moravče, Slovenija), a deo sitnog rečnog agregata zamenjen agregatom „Leca-Laterlite“ krupnoće 2/3mm;
- LP - betoni kod kojih je deo sitnog i deo krupnog rečnog agregata zamenjen lakim agregatom na bazi ekspanziranog stakla komercijalnog naziva „Poraver“ (Nemačka);
- NK – normalan beton spravljen sa rečnim sitnim i krupnim agregatom.

U okviru svake od grupa betona sa lakim agregatom, varirane su vrsta i količina cementa i mineralnih dodataka na sledeći način:

- CEM I 42.5 R (Lafarge Beočinska fabrika cementa) u količini 350-450kg/m<sup>3</sup>;
- CEM II/B-M (S-V-L) 32.5 R (Lafarge Beočinska fabrika cementa) u količini od 450kg/m<sup>3</sup>;
- leteći pepeo (tip "V", termoelektrana "Nikola Tesla B" Obrenovac – Srbija) u cilju supstitucije dela cementa u količini od 40% od mase cementa;
- Metakaolin HR ("Metamax" – SAD) u cilju supstitucije dela cementa u količini od 10% od mase cementa.

Sastav betonskih mešavina projektovan je na osnovu sledećih polaznih uslova:

- ista konzistencija izražena merom sleganja nakon 15 minuta ( $\Delta h = 12 \pm 2 \text{cm}$ , S3 prema EN 206 [40]);
- apsolutna zapremina veziva i vode oko 0,3m<sup>3</sup>, a apsolutna zapremina agregata oko 0,7m<sup>3</sup>;
- granulometrijski sastav mešavine agregata u obliku kontinualne krive (uzorna kriva B16 ili B8);
- dodatna količina vode se određuje na osnovu upijanja vode lakog agregata nakon 30 minuta;

- količina superplastifikatora u zavisnosti potrebe za postizanje zahtevane konzistencije (cca 0,6-0,7% mase veziva);
- efektivni vodo-vezivni faktor 0,4–0,5 u zavisnosti od količine veziva.

Na osnovu prethodno definisanih ciljeva, plana i programa istraživanja, variranjem navedenih šarametara je napravljeno ukupno 19 betonskih mešavina za komparativnu analiza sledećih svojstava očvrslog betona:

- čvrstoća pri pritisku nakon 2, 7 i 28 dana;
- modul elastičnosti;
- dinamički modul elastičnosti;
- skupljanje pri sušenju;
- kapilarno upijanje vode;
- upijanje vode pod pritiskom.

Pored toga, sprovedena su standardna ispitivanja svežeg betona:

- zapreminska masa u svežem stanju;
- konzistencija betona;
- količina uvučenog vazduha.

Potreban broj i dimenzije uzoraka za nabrojana ispitivanja određen je prema odgovarajućim standardima. Od svake vrste betona izrađeni su sledeći uzorci:

- čvrstoća pri pritisku i upijanje vode – 15 uzoraka oblika kocke ivice 150mm;
- modul elastičnosti – 3 cilindra prečnika 150mm i visine 300mm;
- skupljanje – 3 prizme dimenzija 100x100x400mm ili 100x100x500mm.

Pored uzoraka za ispitivanje osnovnih svojstava lakoagregatnih betona, u okviru svake grupe lakoagregatnih betona je od jedne vrste betona napravljeno po tri šuplja betonska bloka za zidanje.

Za kompaktiranje betona je korišćen laboratorijski vibro sto. Nakon ugradnje, svi uzorci betona su prvih 24 časa negovani u kalupima, prekriveni PVC folijom, a zatim na sledeći način:

- 27 dana u vodi  $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  (za ispitivanje čvrstoća pri pritisku i modula elastičnosti) i po tri uzorka na vazduhu  $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  za ispitivanje uticaja režima nege na čvrstoću pri pritisku;
- 13 dana u vodi, a ostatak na vazduhu  $T\approx 20^{\circ}\text{C}$  i  $\varphi\approx 60\%$  do trenutka ispitivanja kapilarnog upijanja vode i upijanja vode pod pritiskom;
- 48h u vodi a zatim na temperaturi  $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  i  $\varphi\approx 70\pm 5\%$  za merenje skupljanja.

Ukupan broj spravljenih i ispitanih uzoraka iznosi 408, a za njihovu izradu je utrošeno približno  $2,0\text{m}^3$  betona.

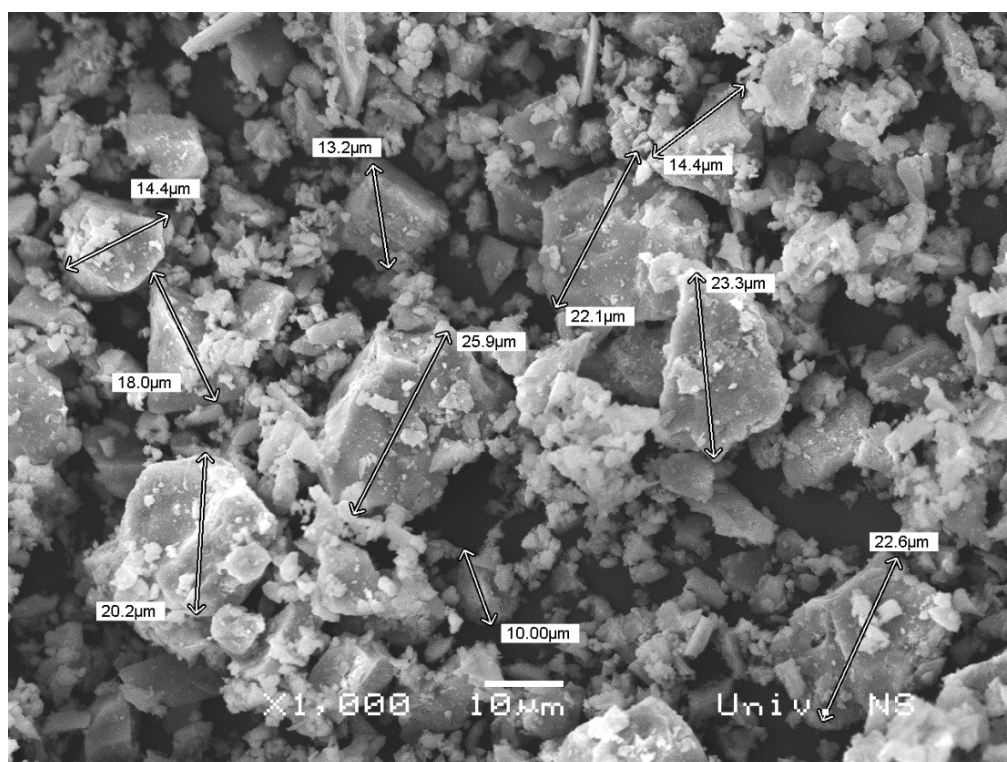
### 3. OPŠTI PODACI

#### 3.1. Podaci o komponentnim materijalima

##### 3.1.1. Cement

Provera fizičkih i mehaničkih svojstava cemenata izvršena je prema standardima SRPS EN 196-1 [78], SRPS EN 196-3 [79] i SRPS EN 196-6 [80]. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da obe vrste cementa (CEM I 42.5 i CEM II/B-M (S-V-L) 32.5 R) zadovoljavaju propisana fizičko-hemijska i mehanička svojstva definisana u standardu SRPS EN 197-1 [81]. Rezultati svih ispitivanja dati su u Prilogu 1.

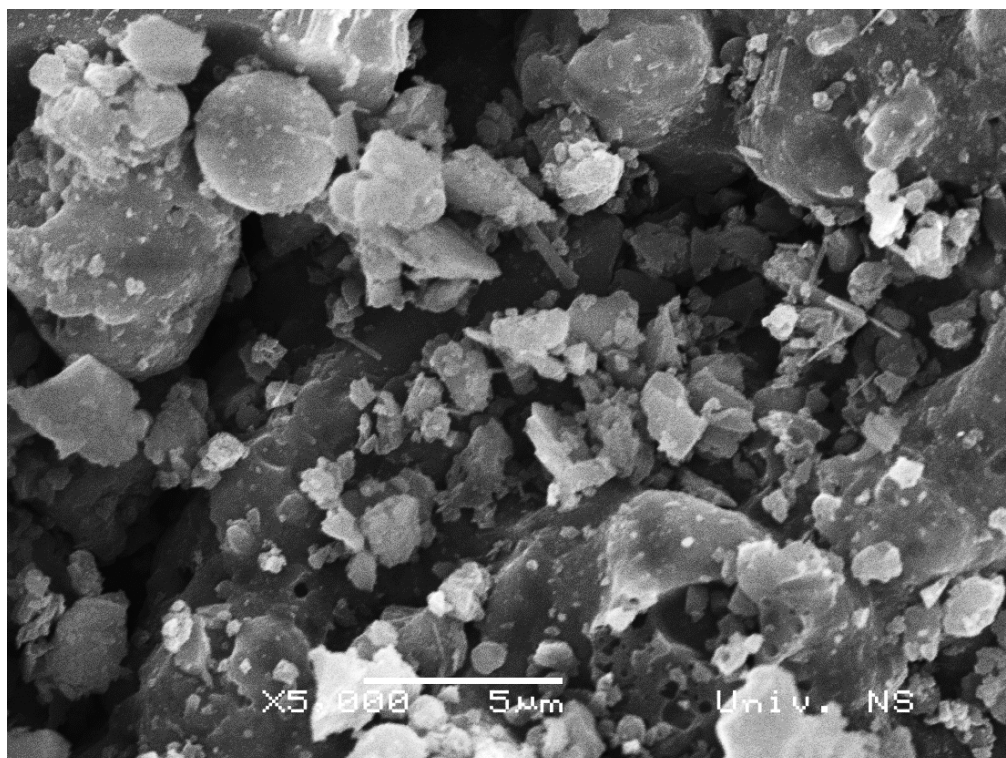
Pored uobičajenih, standardom definisanih ispitivanja, za obe vrste cementa urađena je i mikrostrukturalna (SEM)<sup>13</sup> analiza (slike V-1 i V-2). Kod obe vrste cementa je uočeno da se veličina zrna kreće u rasponu od 0,6 $\mu$ m do 25 $\mu$ m, pri čemu se kod cementa CEM II (Slika V-2) mogu uočiti i obla, staklasta zrna koja potiču od pepela.



Slika V-1. SEM snimak CEM I 42,5R

.....  
<sup>13</sup> SEM – Skenirajući elektronski mikroskop





*Slika V-2. SEM snimak CEM II/B-M (S-V-L) 32.5 R*

### 3.1.2. Agregat

Granulometrijski sastav frakcija i fizička svojstva rečnog i lakog agregata ispitana su prema standardima SRPS EN 1097-3 [82], SRPS EN 1097-6 [83], SRPS EN 933-1 [84] i SRPS EN 13055-1 [85]. Rezultati ispitivanja dati su u Prilogu 2.

#### 3.1.2.1. Rečni agregat

Rečni agregat upotrebljen u ovom istraživanju je poreklom iz reke Morave, pran i separisan u tri frakcije, 0/4mm, 4/8mm i 8/16mm (Slika V-3). Separacije sa kojih je agregat preuzet su "Beton Gradnja" i „Best izgradnja“ iz Novog Sada.



*Frakcija 0/4*

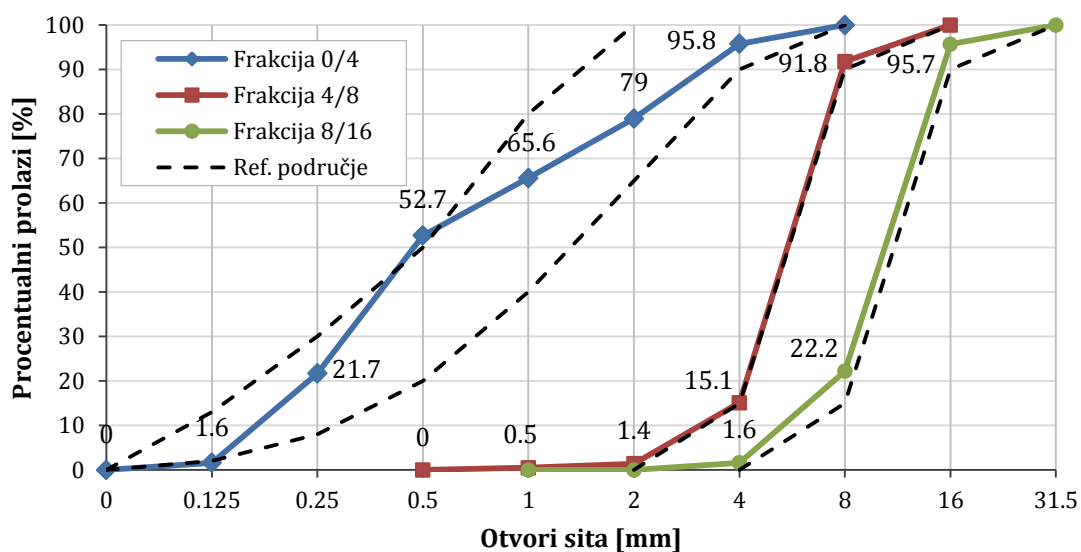


*Frakcija 4/8*



*Frakcija 8/16*

*Slika V-3. Izgled frakcija rečnog agregata*



Slika V-4. Granulometrijske krive frakcija rečnog agregata

Smatra se da je agregat pogodan za spravljanje betona ako se njegova granulometrijska kriva nalazi unutar referentnog područja. Sa slike V-4 se vidi da frakcija 0/4 ima nešto manji sadržaj zrna sitnijih od 0,125mm i veći sadržaj zrna krupnoće do 0,5mm. Frakcije 4/8 i 8/16 imaju nešto veći sadržaj podmerenih zrna od dozvoljene vrednosti (15,1% i 22%, respektivno).

Modul finoće (zrnivosti) sitnog agregata iznosi 2,84 i nalazi se u dozvoljenim granicama (od 2,3 od 3,6).

Sadržaj sitnih čestica (<0,09mm) određen je prema standardu SRPS B.B8.036 [86], metodom mokrog prosejavanja. Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da ispitivane frakcije zadovoljavaju kriterijume definisane standardom.

### 3.1.2.2. Laki agregat

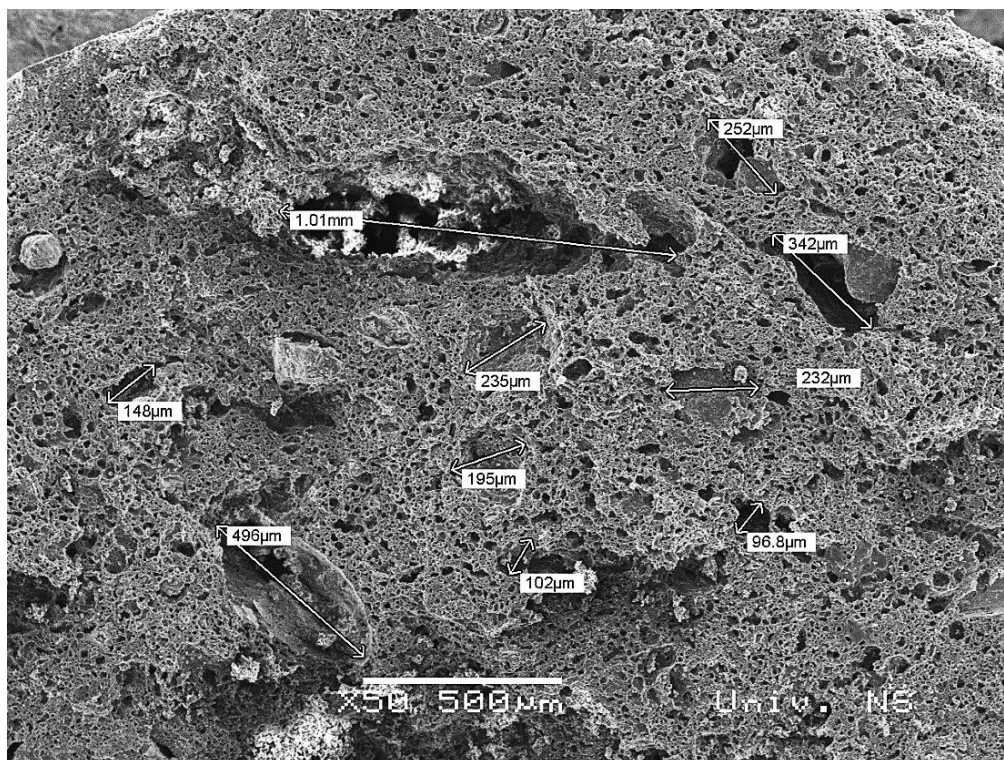
#### Leca-Laterlite (Italija)

Laki agregat na bazi ekspanzirane gline komercijalnog naziva „Leca-Laterlite“ isporučen je u obliku frakcije 2-3 (Slika V-5) i frakcije 0/15 koja je laboratoriji podeljena na frakcije 0/4 i 4/15mm (Slika V-5). Agregat granulacije 0/15 korišćen je samo u jednoj betonskoj mešavini koja je napravljena prema preporuci proizvođača lakog agregata, a u ostalim je korišćena frakcija 4/15. Frakcija 2/3 je korišćena za supstituciju dela sitnog agregata u betonima sa oznakom LSSL u cilju smanjenja zapreminske mase betona.

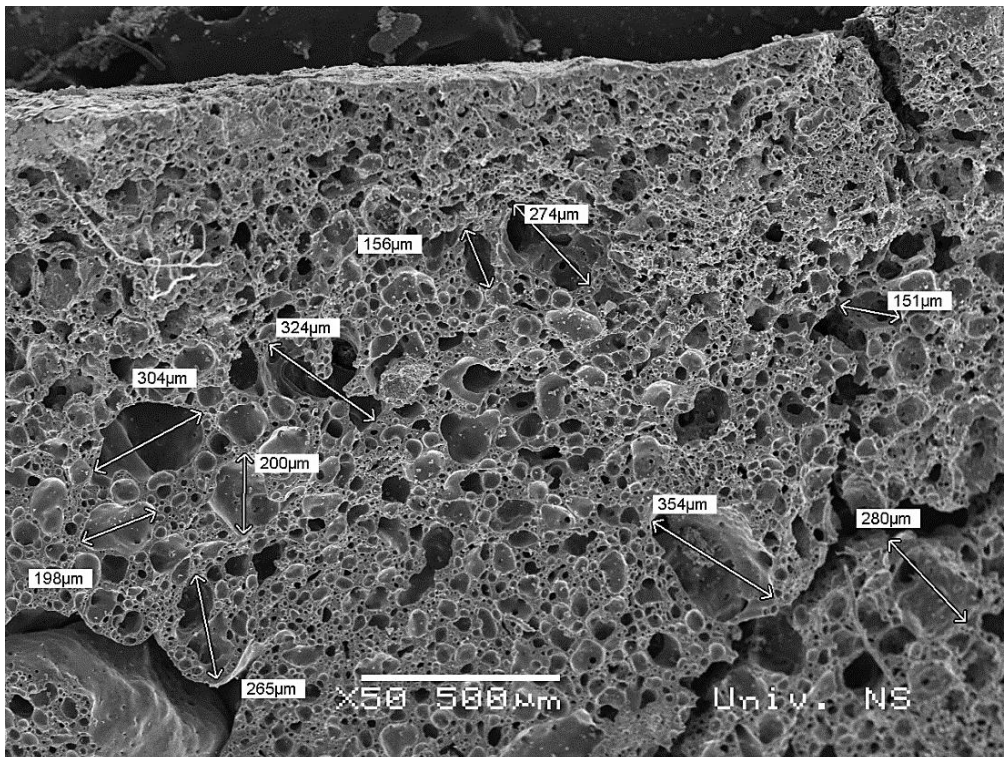


Slika V-5. „Leca-Laterlite“ frakcije 2/3 (gore) i 4/15 (dole)

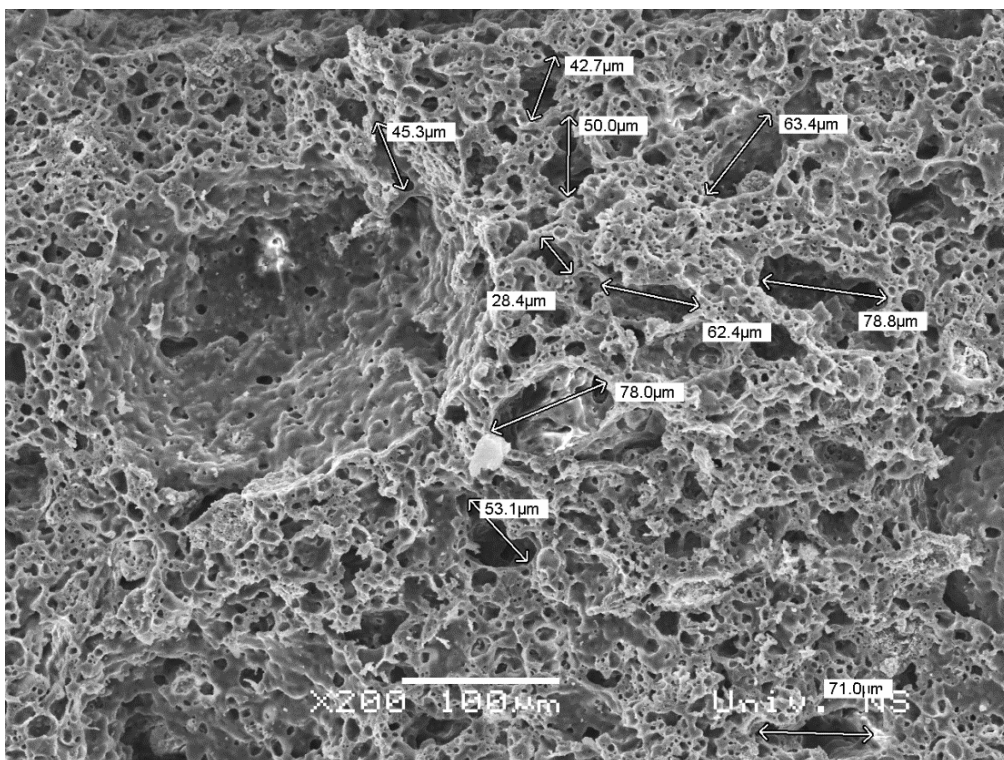
Na narednim slikama (Slike V-6 do V-16) prikazana je mikrostruktura predmetnih frakcija agregata.



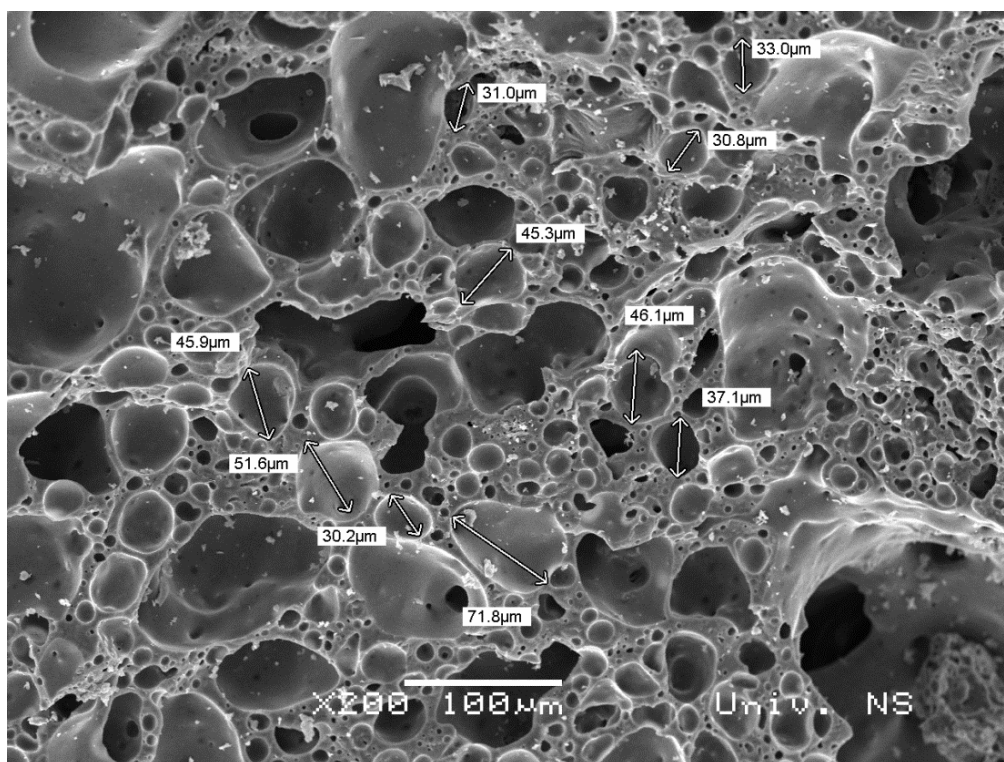
Slika V-6. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x50)



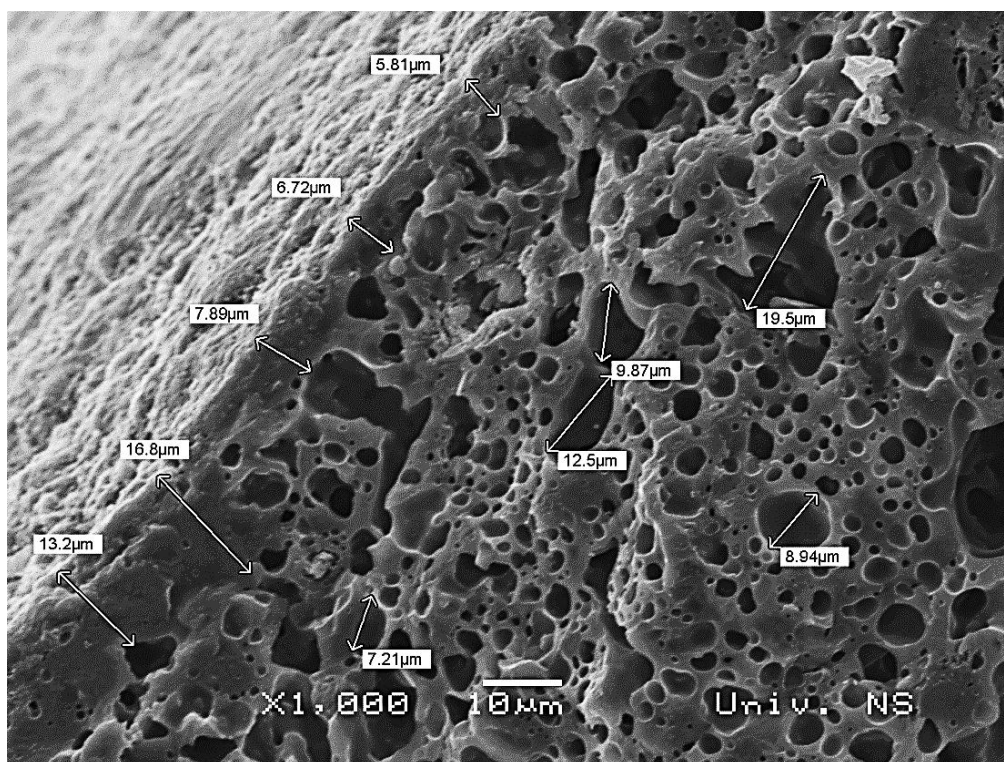
Slika V-7. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 4/15 (uvećanje x50)



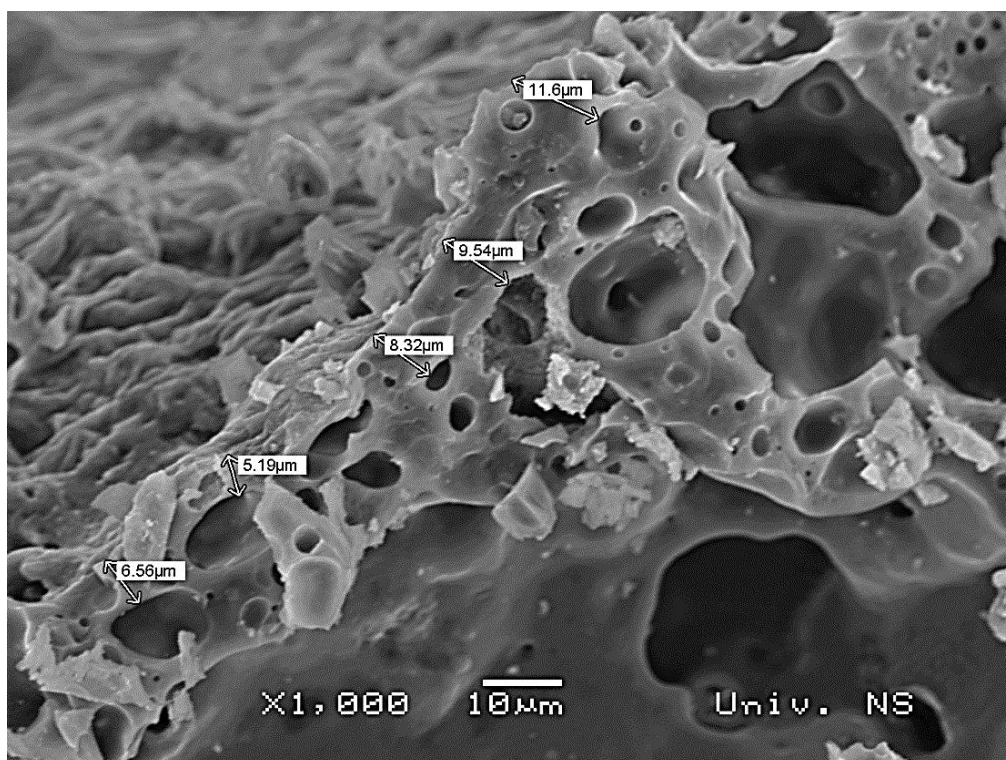
Slika V-8. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x200)



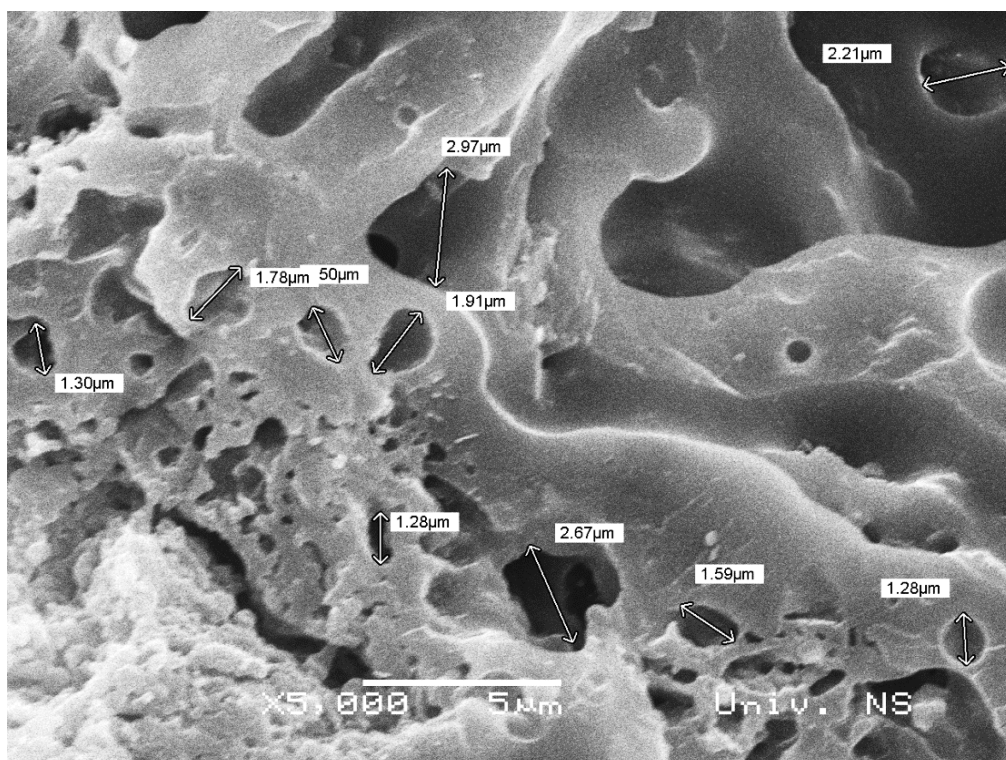
Slika V-9. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 4/15 (uvećanje x200)



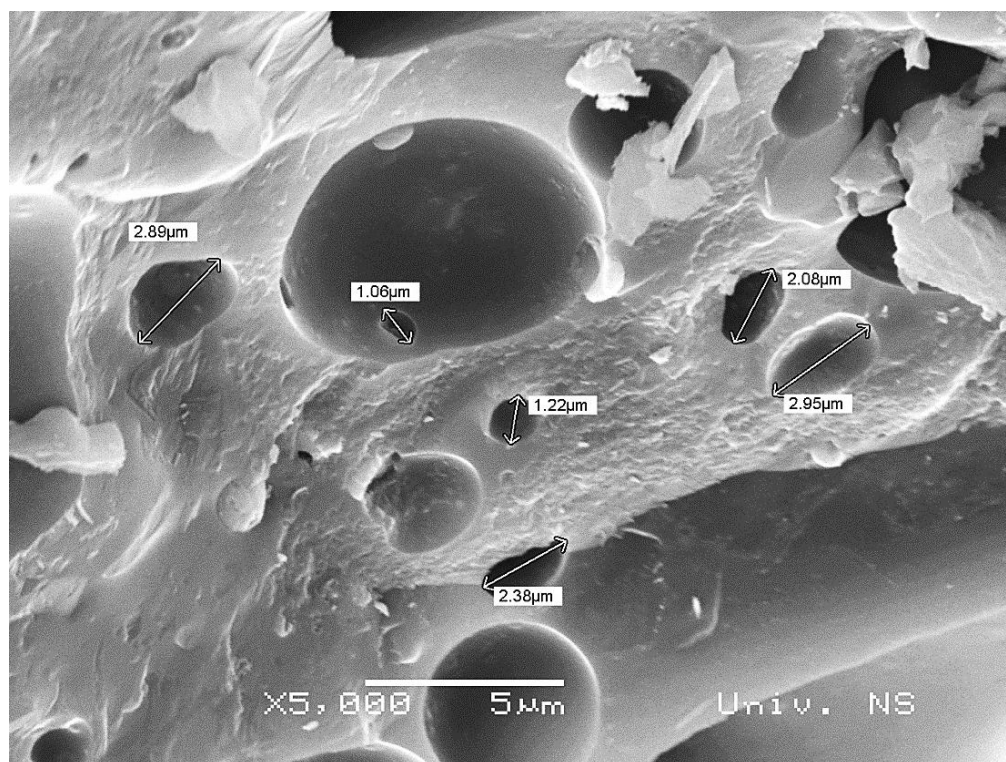
Slika V-10. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje 1000x)



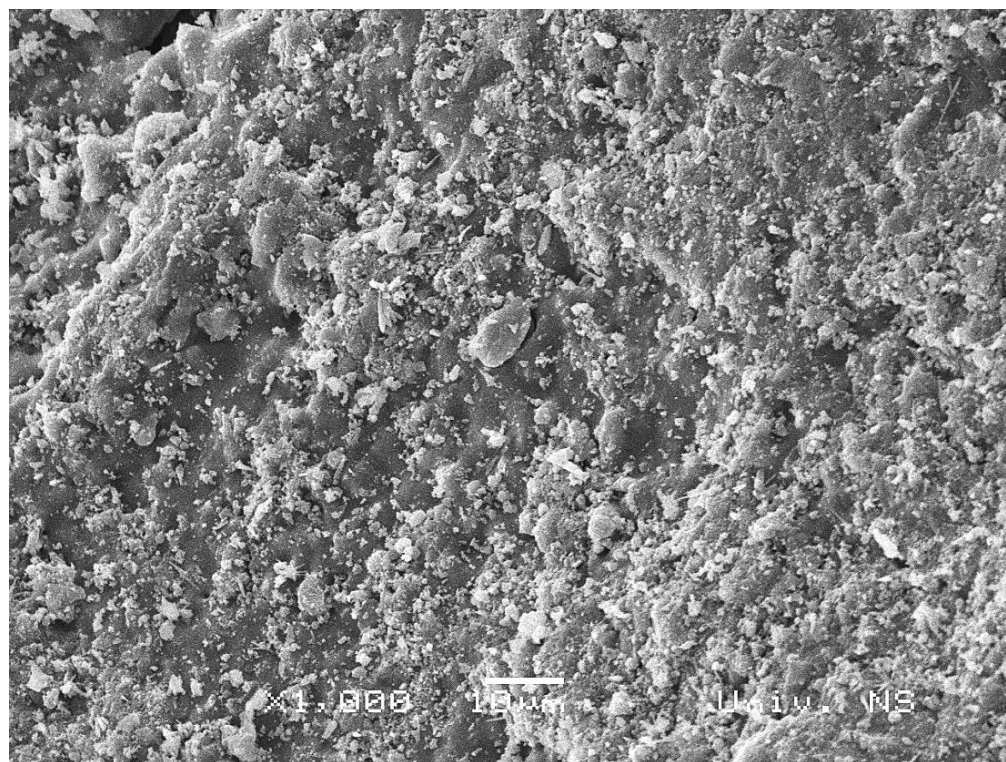
Slika V-11. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 4/15 (uvećanje x1000)



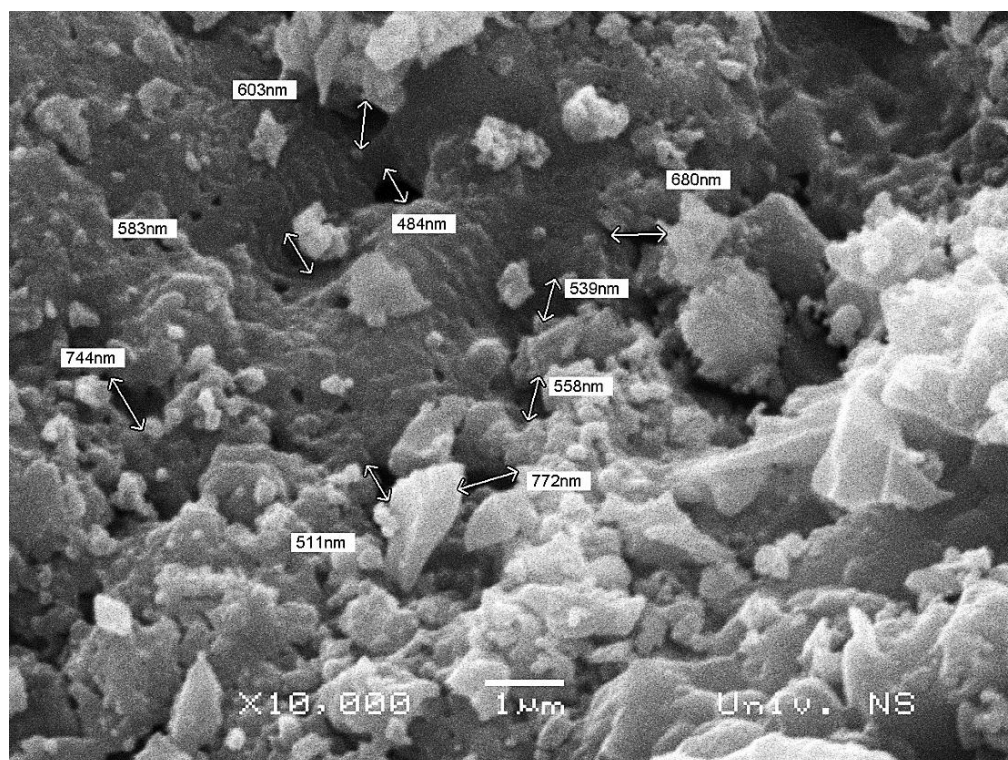
Slika V-12. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x5000)



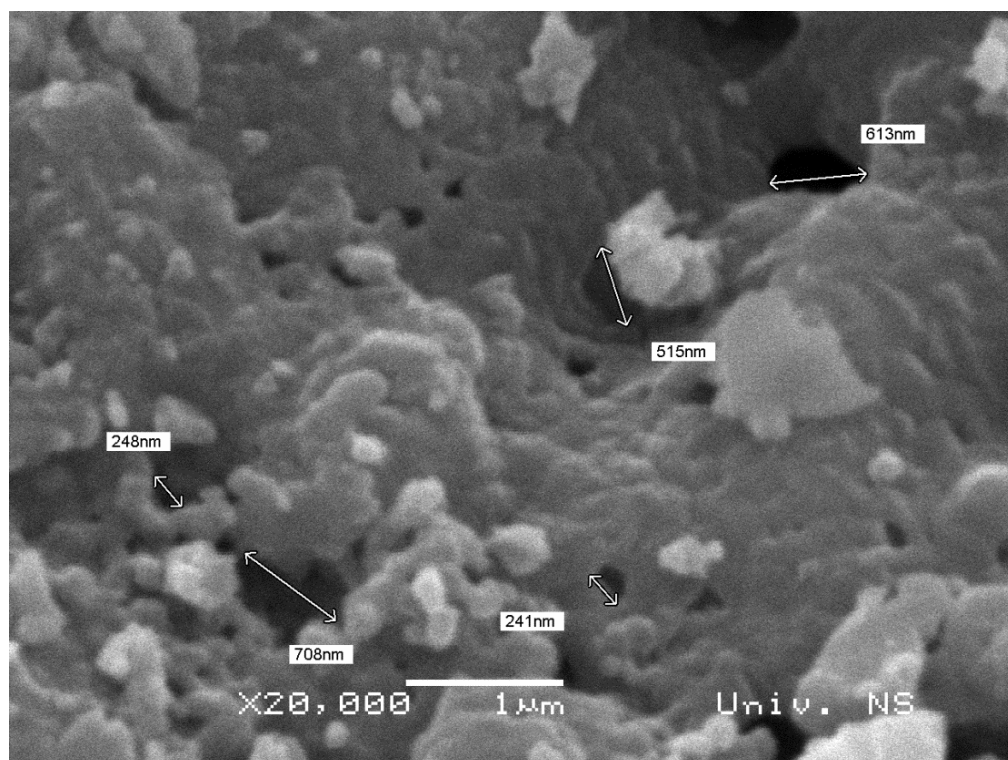
Slika V-13. SEM snimak agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x5000)



Slika V-14. SEM snimak površine agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x1000)



Slika V-15. SEM snimak površine agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x10000)



Slika V-16. SEM snimak površine agregata „Leca-Laterlite“ 2/3 (uvećanje x20000)



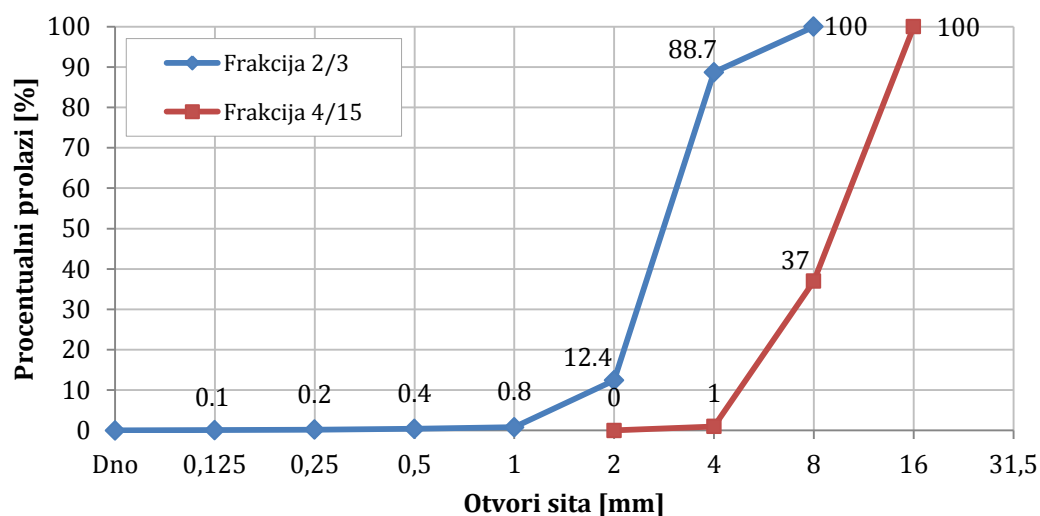
Analizom prikazanih slika može se videti da su pore približno loptastog oblika, različitog prečnika i različite debljine zidova. Površina zrna je neravna i delimično porozna. U strukturi zrna je, u zavisnosti od veličine, izdvojeno pet grupa pora:

- Najkrupnije pore veličine 0,1-1mm (Slike V-6 i V-7), pri čemu su kod frakcije 4/15 dominantne pore krupnoće 150-350 $\mu\text{m}$  (sa najvećom izmerenom porom 354  $\mu\text{m}$ ), dok su kod frakcije 2/3 dominantne pore krupnoće 100-200 $\mu\text{m}$ , sa nekoliko pora 0,5-1mm. Zidovi ovih pora su porozni.
- Krupne pore veličine 25-80 $\mu\text{m}$  (Slike V-8 i V-9). Udeo ovih pora u strukturi frakcije 4/15 znatno je veći nego kod frakcije 2/3. Kod obe frakcije se uočava poroznost zidova ovih pora.
- Srednje pore veličine 5-20 $\mu\text{m}$  (Slike V-10 i V-11). Na zidovima ovih pora nije uočena poroznost. Udeo predmetnih pora je kod frakcije 4/15 nešto manji u odnosu na frakciju 2/3.
- Sitne pore veličine 1-3 $\mu\text{m}$  (Slike V-12 i V-13). Na zidovima ovih pora nije uočena poroznost. Broj ovih pora je kod frakcije 4/15 nešto manji u odnosu na frakciju 2/3.
- Najsitnije pore veličine 0,2-0,7 $\mu\text{m}$  (Slike V-15 i V-16) uočene su i na površini zrna agregata.

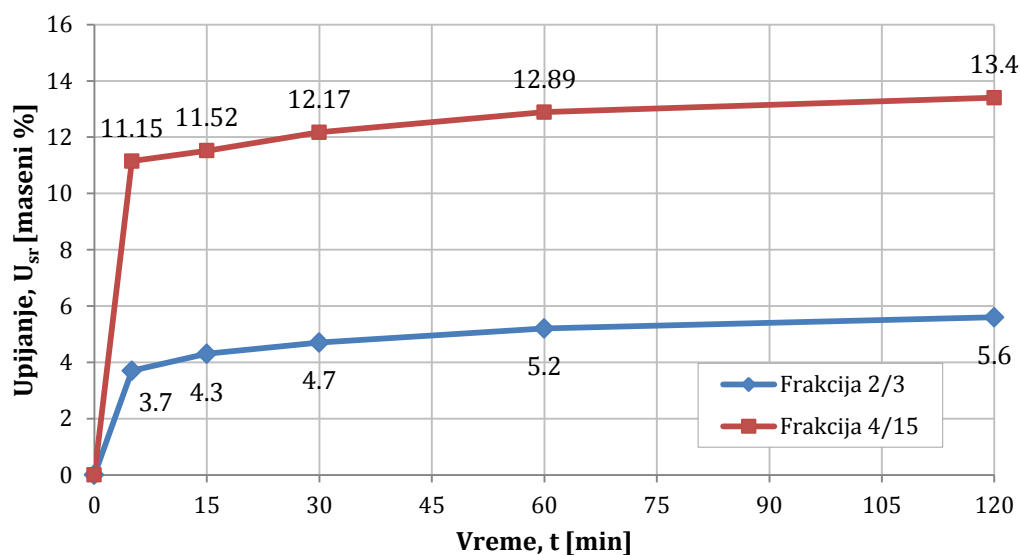
Analizom strukture zrna agregata se mogu objasniti razlike u fizičko-mehaničkim svojstvima ove dve frakcije agregata. Debljina zida opne obe frakcije je približno ista i iznosi od 5 $\mu\text{m}$  do 13 $\mu\text{m}$  (Slike V-10 i V-11), ali je kod frakcije 4/15 poroznost opne veća, a debljina zidova između pora manja, što utiče na veću drobljivost, tj. manju čvrstoću krupnije frakcije. Takođe, veća poroznost krupnije frakcije utiče i na manju zapreminsku masu. Sa druge strane, upijanje frakcije 2/3 je veće što ukazuje na veću otvorenu poroznost kao i na činjenicu da u strukturi pora kod frakcije 2/3 dominiraju sitnije pore sa sposobnošću kapilarnog upijanja.

Grafički prikaz granulometrijskog sastava frakcija lakog agregata „Leca-Laterlite“ dat je na slici V-17.

Kinetika upijanja vode lakog agregata „Leca-Laterlite“ je grafički prikazana na slici V-18.



Slika V-17. Granulometrijske krive frakcija lakog agregata „Leca-Laterlite“



Slika V-18. Kinetika upijanja vode lakog agregata „Leca-Laterlite“

### „ZAG“ (Slovenija)

Kao osnovna sirovina za proizvodnju ovog lakog agregata (Slika V-19) upotrebljen je silikatni-kameni mulj iz fabrike Termit d.d. u Sloveniji. Agregat je dobijen pečenjem mešavine kamenog mulja, papirnog mulja i letećeg pepela (Vipap). Procentualna učešća komponentnih materijala u mešavini iznose:

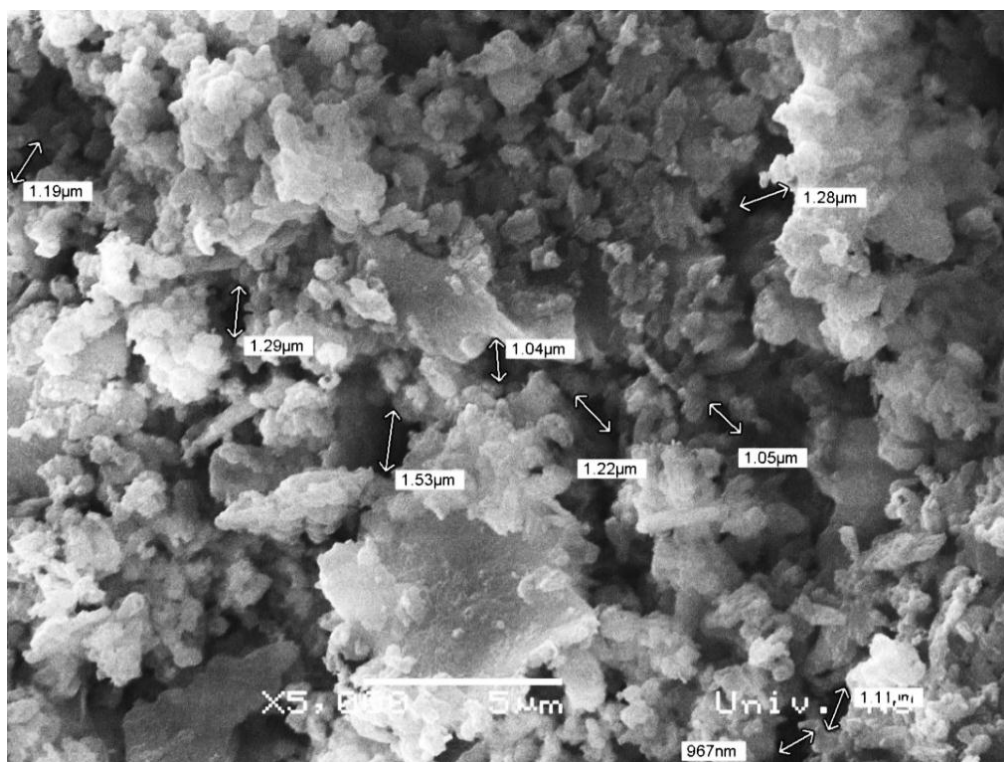
- kameni-silikatni mulj: 40%;
- papirni mulj: 40%;
- pepeo: 20%.

Pečenjem mešavine na temperaturi 950°C došlo je do sagorevanja papirnog mulja čime je obezbeđena potrebna količina gasa za formiranje poroznosti. Nakon hlađenja, agregat je drobljen i granulisan u frakciju 4/8. Svojstva agregata data su u Prilogu 2.

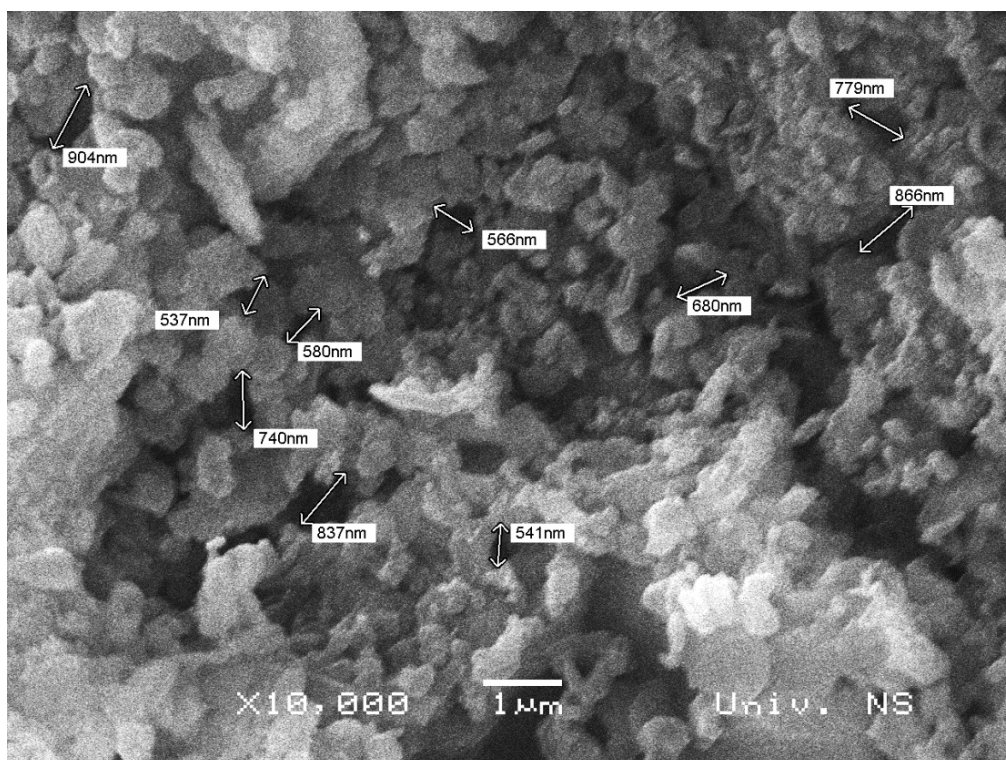


*Slika V-19. „ZAG“ frakcija 4/8*

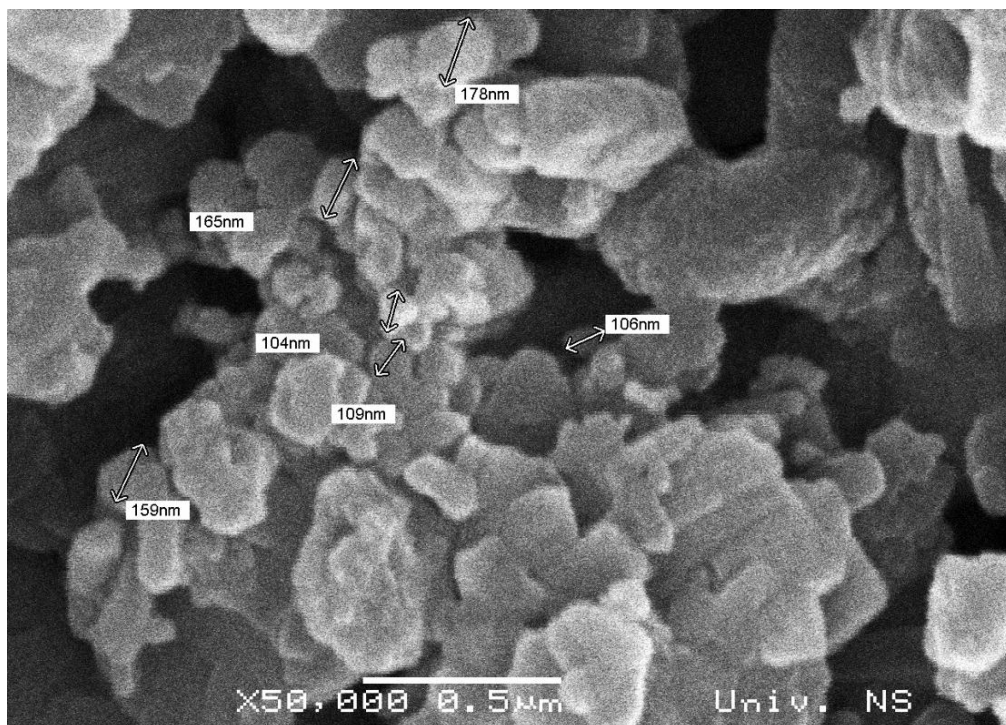
Na narednim slikama (Slike V-21 do V-23) prikazana je mikrostruktura agregata.



*Slika V-20. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x5000)*



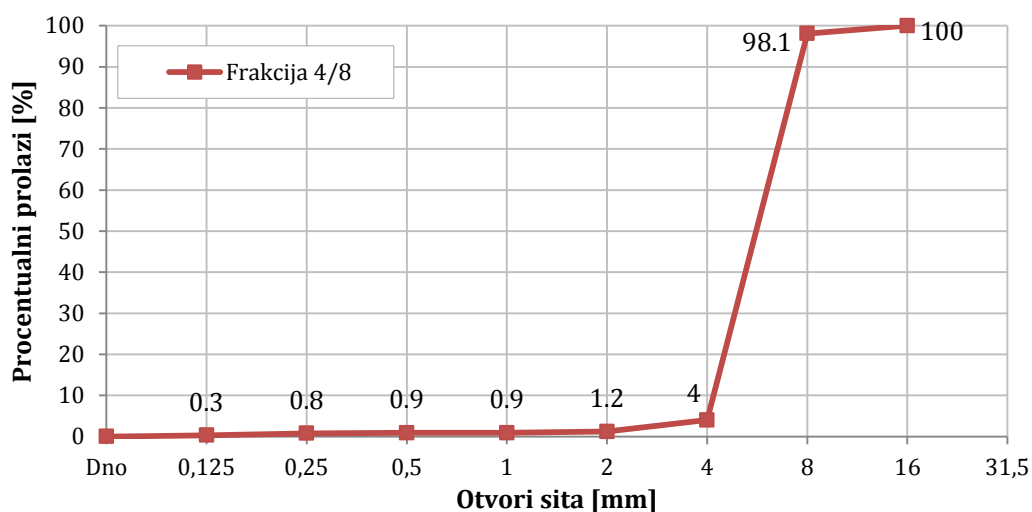
Slika V-21. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x10000)



Slika V-22. SEM snimak površine agregata „ZAG“ 4/8 (uvećanje x50000)

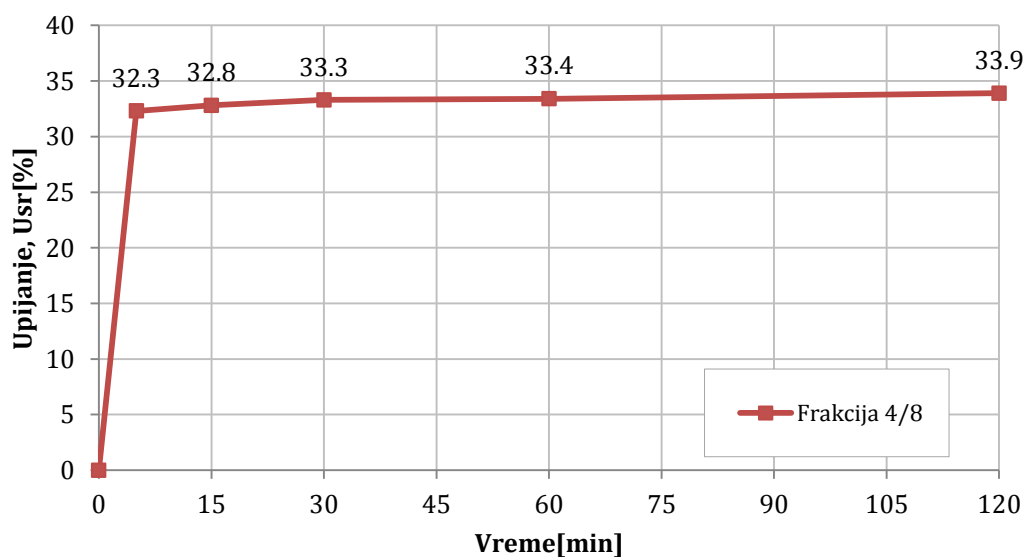
Mikrostruktura ovog agregata je formirana aglomeracijom zrna različite veličine između kojih se nalaze kanalske pore. Sa slika V-21 i V-22 se može videti da je veličina predmetnih pora od  $0,5\mu\text{m}$  do  $1,5\mu\text{m}$ , a sa slike V-23 da je veličina zrna od  $0,1\mu\text{m}$  do  $0,2\mu\text{m}$ . Agregat je dobijen drobljenjem i ima veliku otvorenu kapilarnu poroznost što se može zaključiti i na osnovu rezultata merenja kinetike upijanja vode datih u Prilogu 2.

Grafički prikaz granulometrijskog sastava frakcija lakog agregata „ZAG“ dat je na slici V-23.



Slika V-23. Granulometrijska kriva frakcija lakog agregata „ZAG“

Kinetika upijanja vode lakog agregata „ZAG“ je grafički prikazana na slici V-24.



Slika V-24. Kinetika upijanja vode lakog agregata „ZAG“

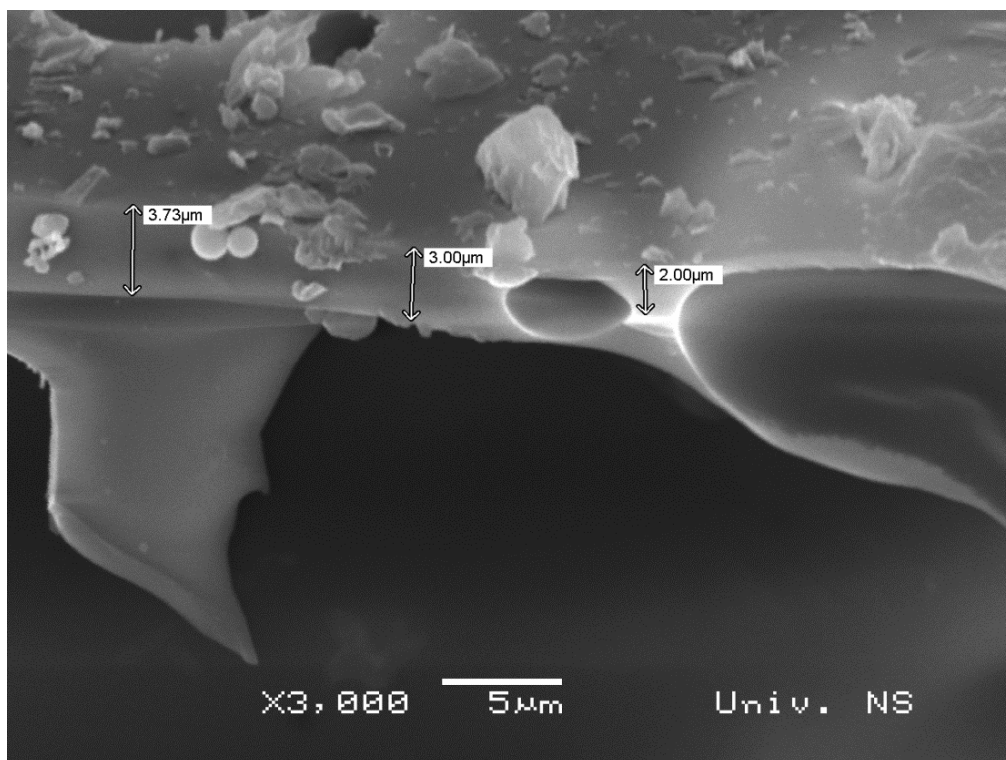
**„Poraver“ (Nemačka)**

Laki agregat na bazi ekspaniranog stakla komercijalnog naziva „Poraver“ (Nemačka) isporučen je u dve frakcije, 2/4 i 4/8 (Slika V-25).

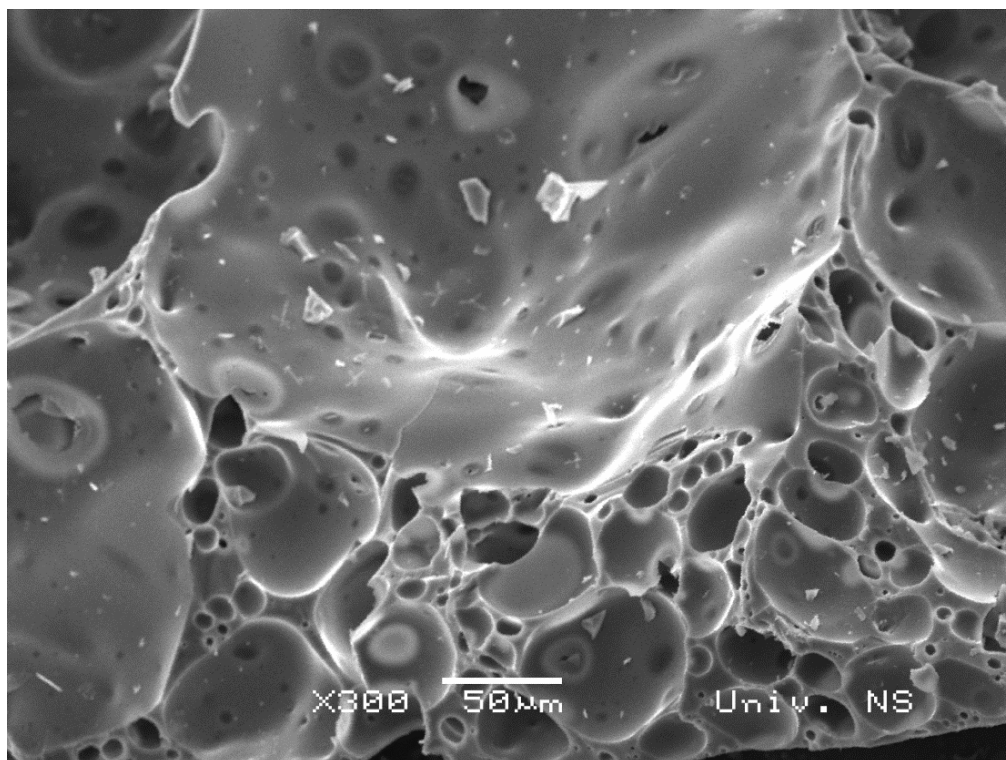


*Slika V-25. Poraver frakcije 2/4 (gore) i 4/8 (dole)*

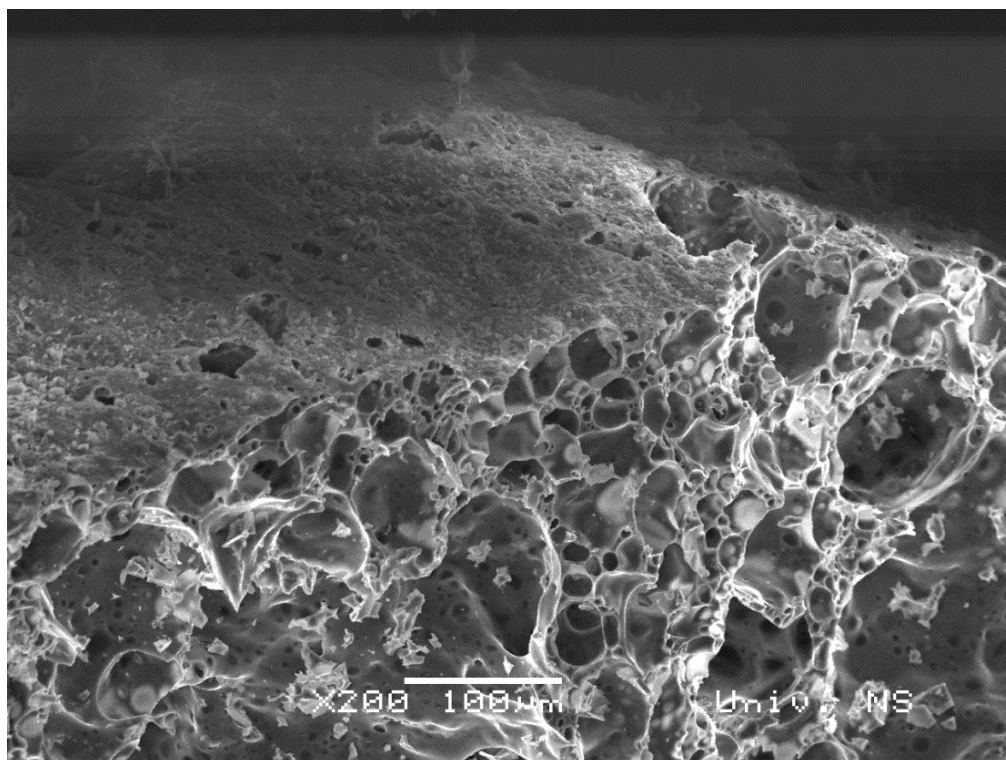
Na narednim slikama (Slike V-26 do V-31) prikazana je mikrostruktura predmetnih frakcija agregata.



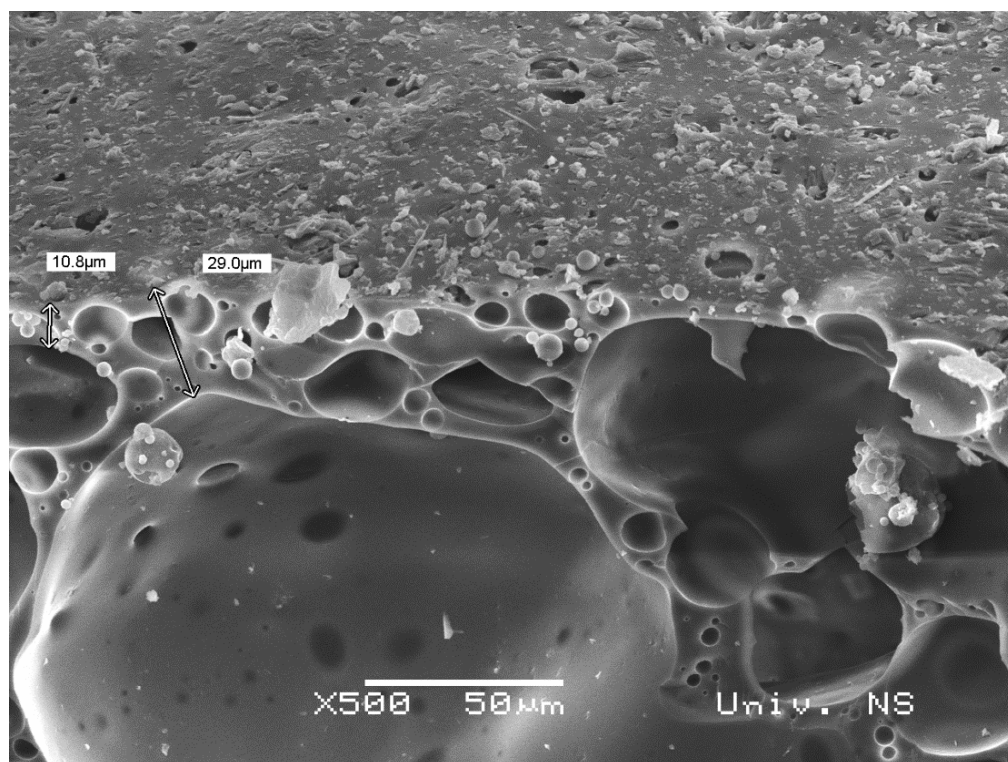
*Slika V-26. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x3000)*



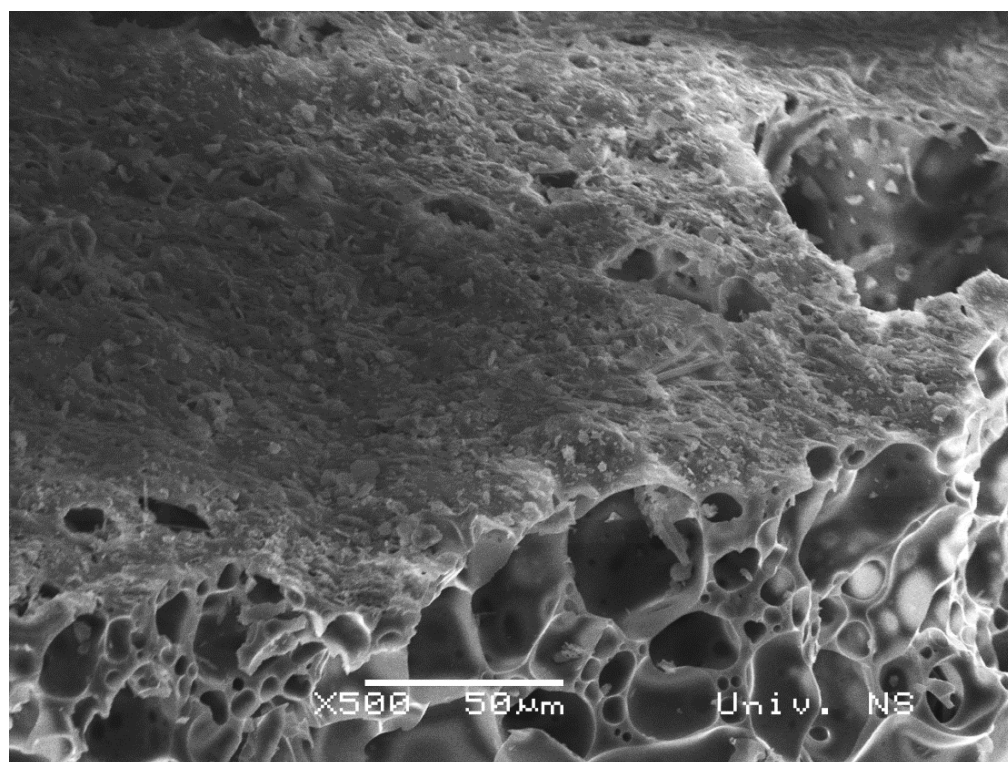
*Slika V-27. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x300)*



*Slika V-28. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x200)*

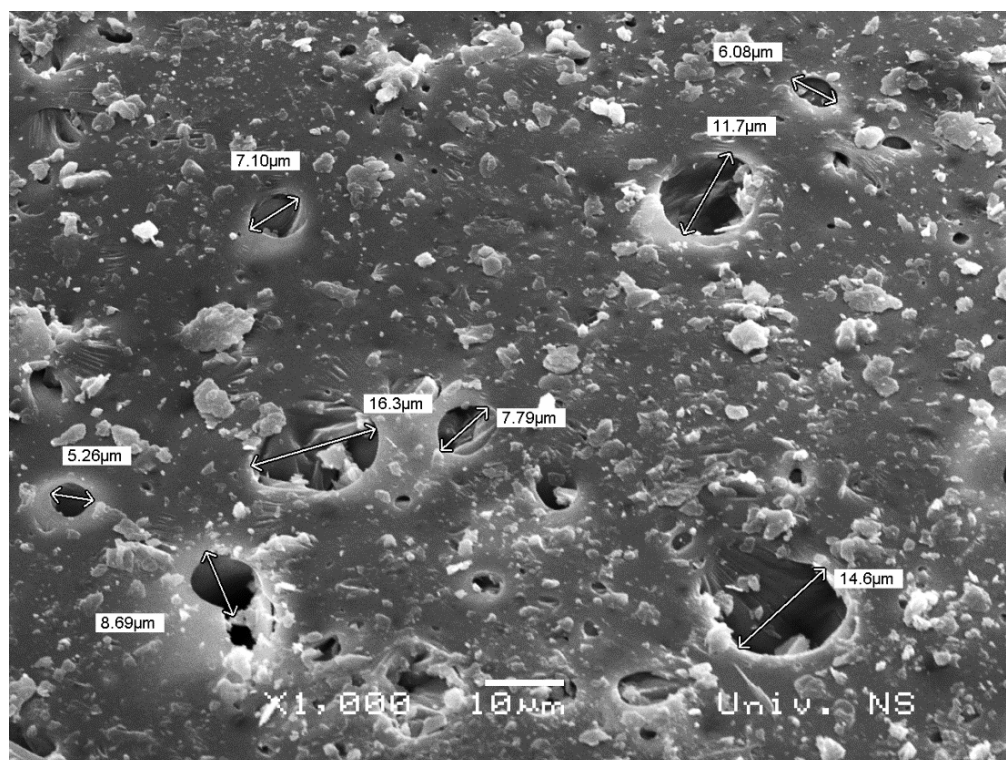


*Slika V-29. SEM snimak agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x500)*

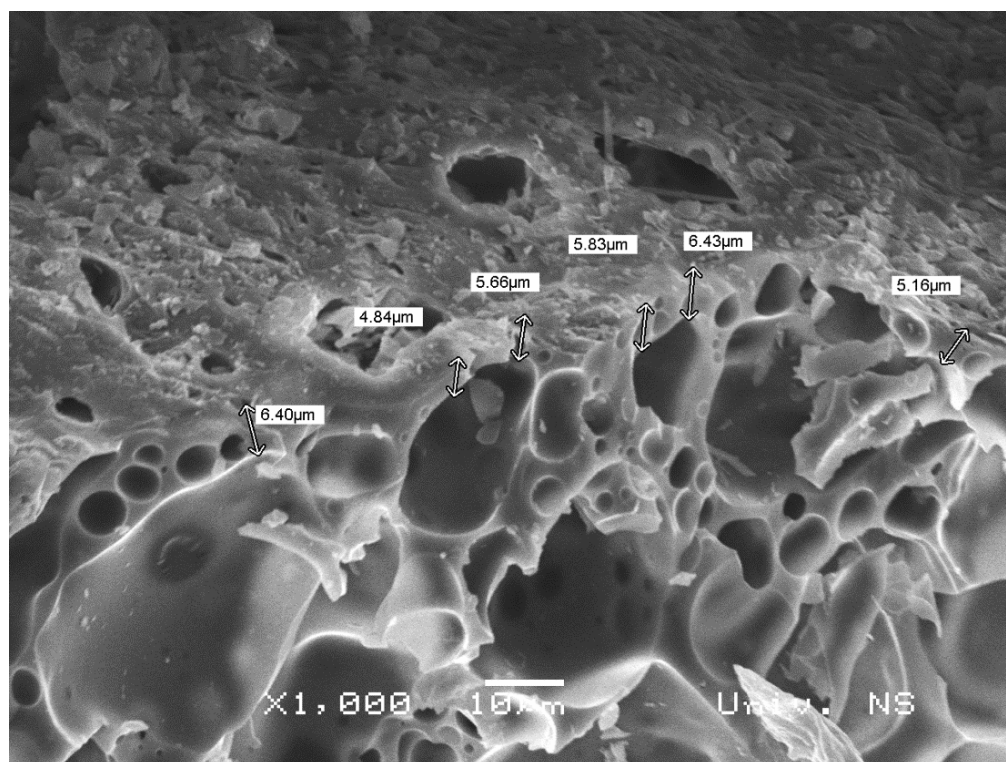


*Slika V-30. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x500)*





Slika V-31. SEM snimak površine agregata „Poraver“ 2/4 (uvećanje x1000)



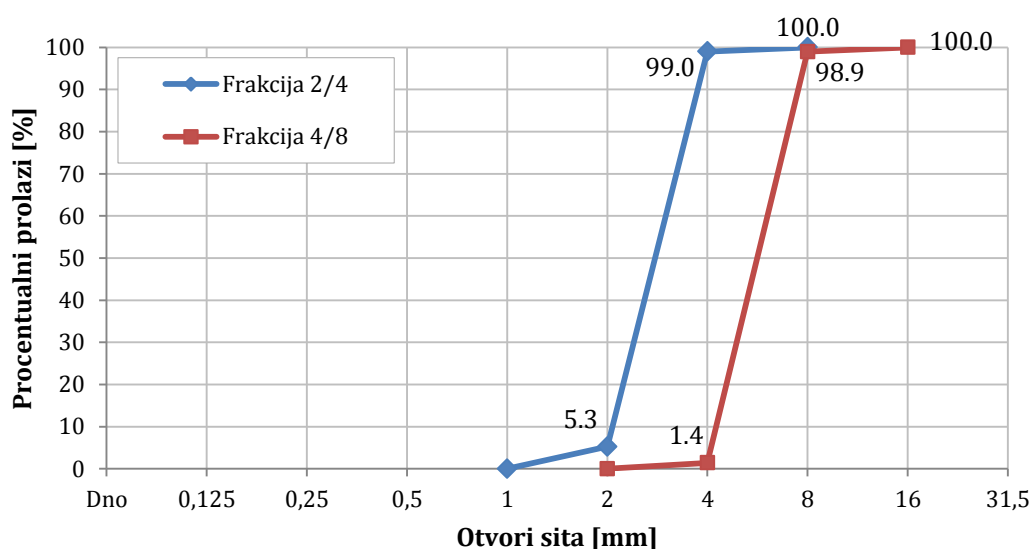
Slika V-32. SEM snimak agregata „Poraver“ 4/8 (uvećanje x1000)

Analizom prikazanih slika može se videti da pore imaju oblik mehurova različitog prečnika i različite debljine zidova. Površina zrna je staklasta i delimično porozna.

Debljina opne zrna je izuzetno mala, 2-4 $\mu\text{m}$  (Slika V-2). U mikrostrukturi zrna dominiraju pore krupnoće 10-50 $\mu\text{m}$  koje su raspoređene uz opnu zrna, a u unutrašnjosti su najzastupljenije pore krupnoće 100-250 $\mu\text{m}$  (Slike V-27 do V-32). Na površini opne zrna uočava se značajan broj pora veličine 5-15 $\mu\text{m}$  (Slika V-31).

Upoređenjem mikrostrukture frakcija 2/4 i 4/8 ne uočavaju se značajne razlike u veličini i rasporedu pora, što je potvrđeno i sličnim fizičko-mehaničkim svojstvima obe frakcije (Prilog 2).

Grafički prikaz granulometrijskog sastava frakcija lakog agregata „Poraver“ dat je na slici V-33.



Slika V-33. Granulometrijske krive frakcija lakog agregata „Poraver“

### Poređenje agregata

U tabeli V-1 dat je uporedni pregled osnovnih svojstava lakih agregata. Iz prethodno prikazane analize svojstava agregata i tabele V-1 može se uočiti da su za istraživanje odabrane tri vrste agregata koje se međusobno razlikuju po zapreminskoj masi, upijanju vode i mehaničkim karakteristikama.

Tabela V-1. Osnovna svojstva lakih agregata

Agregat	Frakcija	Prividna zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	Upijanje vode 30min [mas. %]	Upijanje vode 30min [zap. %]	Debljina opne [μm]	Veličina pora [μm]	Oblik pore
Leca-Laterlite	2/3	630	12,2	7,7	5-13	0,2-1000	loptaste
	4/15	1020	4,6	4,7			
ZAG	4/8	1301	33,9	44,1	-	0,5-1,5	kanalne
Poraver	2/4	300	23	6,9	2-4	5-250	loptaste
	4/8	291	20	5,8			

### 3.1.3. Hemijski i mineralni dodaci

Za poboljšanje ugradljivosti betona je predviđena upotreba superplastifikatora tipa HRWRA+SRA<sup>14</sup> proizvođača "Sika" – Švajcarska. U zavisnosti od potrebne redukcije vode za postizanje odgovarajuće konzistencije upotrebljeni su "Sika ViscoCrete 4000BP", „Sika ViscoCrete 3077“ ili „Sika ViscoCrete 5500“ (modifikovani polikarboksilati,  $\gamma_s \approx 1080 \text{ kg/m}^3$ )

Mineralni dodaci upotrebljeni u ovom istraživanju su leteći pepeo i metakaolin (Slika V-34). Hemijski sastav i fizička svojstva mineralnih dodataka dati su u Prilogu 3.



Leteći pepeo



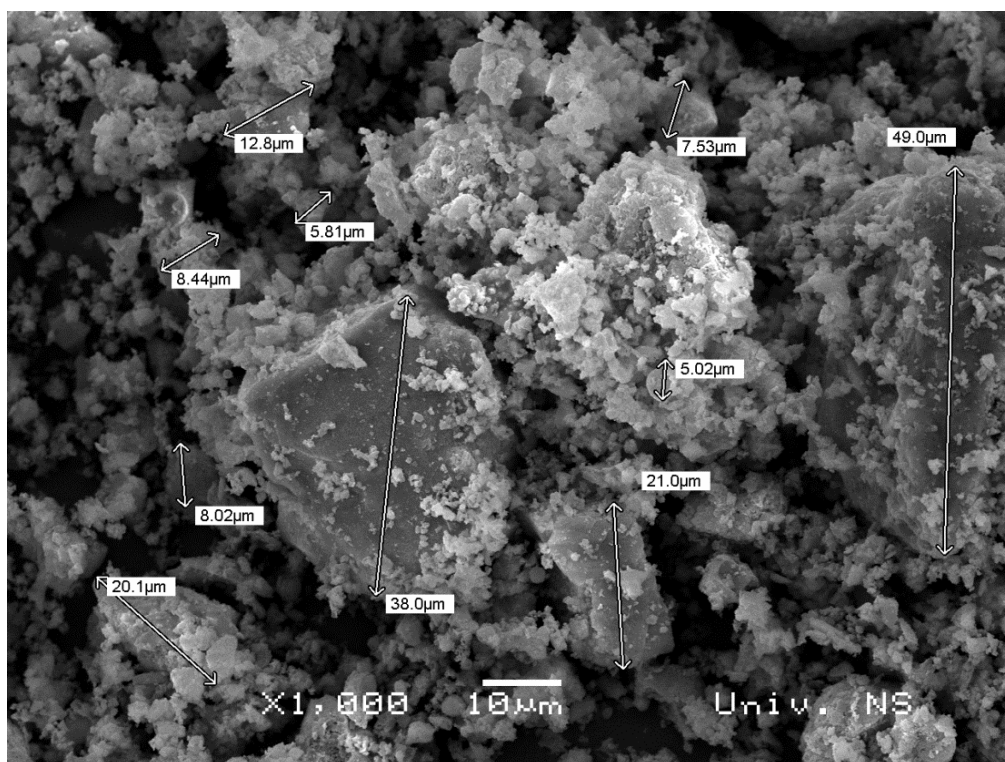
Metakaolin

Slika V-34. Mineralni dodaci: leteći pepeo i metakaolin

<sup>14</sup> HRWRA+SRA = High-Range Water-Reducing Admixture + Set-Retarding Agent = Hemijski dodatak visokog stepena redukcije vode + usporivač vezivanja (retarder)

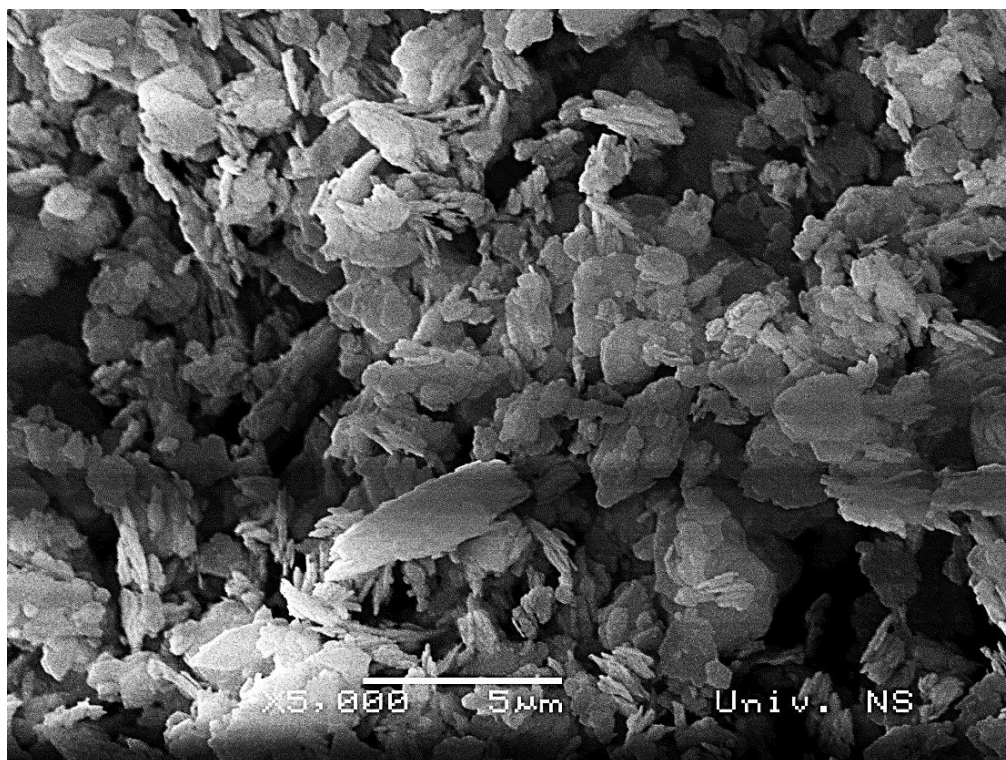
Leteći pepeo, tip „V“<sup>15</sup>, je poreklom iz termoelektrane "Nikola Tesla B" u Obrenovcu. Pre upotrebe u betonu, pepeo je aktiviran mehaničkim putem (mlevenjem) a zatim prosejan kroz sito otvora 0,125mm. Na slici V-34 se može videti da su zrna letećeg pepela nepravilnog, uglastog oblika i da se veličina zrna kreće u rasponu od 5µm do 50µm.

Metakaolin HR, američkog proizvođača „Metamax“, spada u grupu visoko reaktivnih alumosilikata. Sastoji od sitnih pločica debljine cca 50nm koje su delimično aglomerirane. Jedan deo pločica ima heksagonalni oblik što ukazuje na postojanje kaolinita, dok su ostala zrna nepravilnog oblika, ali takođe pločasta. Na slici V-36 dat je SEM snimak metakaolina.



Slika V-35. SEM snimak letećeg pepela

.....  
<sup>15</sup> Po hemijskom sastavu leteći pepeo Tip „V“ je pretežno silikat.



*Slika V-36. SEM snimak metakaolina*

#### **3.1.4. Voda**

Za spravljanje betona se koristi voda iz gradskog vodovoda, pa se može upotrebiti bez prethodnih ispitivanja.

#### 4. SASTAV BETONSKIH MEŠAVINA

Na osnovu polaznih uslova datih u programu eksperimentalnog istraživanja definisan je sastav 19 betonskih mešavina. U tabeli V-2 date su oznake betonskih mešavina usvojene radi lakše uporedne analize.

Tabela V-2. Oznake betonskih mešavina

Oznaka	Vrsta cementa	Masa cementa [kg/m <sup>3</sup> ]	Leteći pepeo + metakaolin [kg/m <sup>3</sup> ]	Vrsta agregata
NK	CEM I 42.5R	450	-	Rečni agregat 0/4, 4/8, 8/16
ELL-15*	CEM I 42.5R	450	-	Rečni agregat 0/4 Leca-Laterlite 0/15
LLK-1	CEM I 42.5R	450	-	
LLK-2	CEM II/B-M (S-V-L) 32.5R	450	-	
LLK-3	CEM I 42.5R	350	-	Rečni agregat 0/4
LLK-4	CEM I 42.5R	400	-	Leca-Laterlite 4/15
LLK-5	CEM I 42.5R	244	122	
LLK-6	CEM I 42.5R	278	139,2	
LSLL-1	CEM I 42.5R	450	-	
LSLL-2	CEM II/B-M (S-V-L) 32.5R	450	-	Rečni agregat 0/4
LSLL-4	CEM I 42.5R	400	-	Leca-Laterlite 2/3
LSLL-5	CEM I 42.5R	244	122	ZAG 4/8
LSLL-6	CEM I 42.5R	278	139,2	
LPE*	CEM I 42.5R	440	-	
LP-1	CEM I 42.5R	450	-	Rečni agregat 0/4
LP-2	CEM II/B-M (S-V-L) 32.5R	450	-	Rečni agregat 4/8
LP-4	CEM I 42.5R	400	-	Poraver 2/4
LP-5	CEM I 42.5R	244	122	Poraver 4/8
LP-6	CEM I 42.5R	278	139,2	

\* sastav usvojen prema preporuci proizvođača lakog agregata

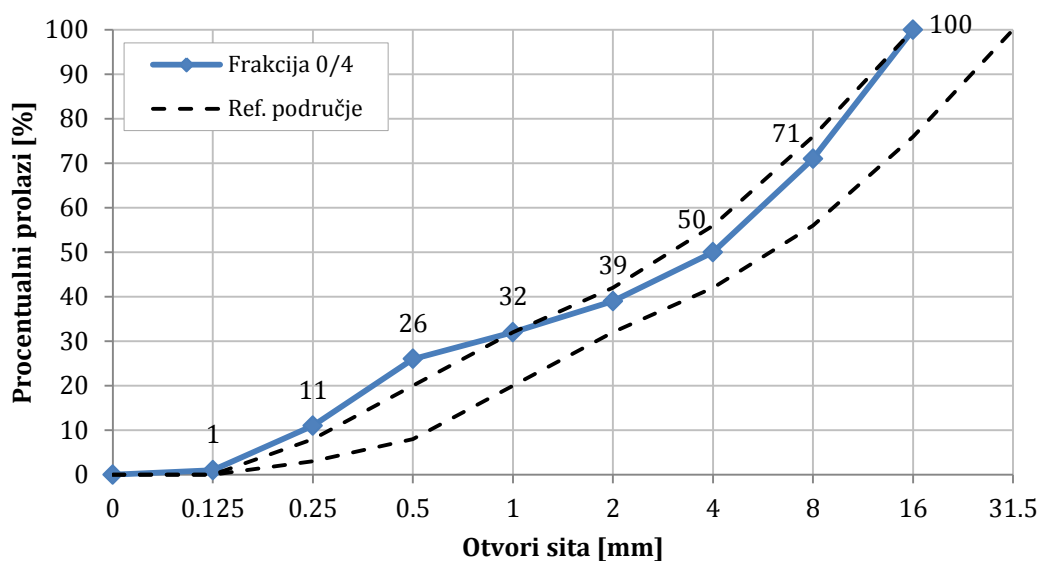
## 4.1. Primeri određivanja sastava betona

### 4.1.1. Određivanja sastava betona NK

Sastav betonske mešavina NK određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=450\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-cementog faktora  $m_v/m_c=0,4$  iznosi  $m_v=180\text{kg/m}^3$ ;
- učešća pojedinih frakcija agregata usvojena su tako da granulometrijski sastav mešavine frakcija agregata odgovara Fuller-ovoj krivi (Prilog 4). Učešća frakcija iznose:
  - frakcija 0/4 –  $X_{0/4}=49,3\%$ ;
  - frakcija 4/8 –  $X_{4/8}=14,5\%$ ;
  - frakcija 8/16 –  $X_{8/16}=36,2\%$ .

Na slici V-15 prikazane su vrednosti ordinata dobijene granulometrijske krive kao i referentne krive za povoljan granulometrijski sastav ( $A_{16}$  i  $B_{16}$ ).



Slika V-37. Granulometrijska kriva mešavine agregata i referentne krive

Minimalna količina cementa i zrna agregata manjih od 0,25mm za betone sa  $D_{\max}=16\text{mm}$  iznosi  $425\text{kg/m}^3$ . U ovom slučaju, uz pretpostavku da je masa agregata  $\approx 1750\text{kg/m}^3$ , količina sitnih čestica u agregatu iznosi  $\approx 193\text{kg/m}^3$  pa je minimalna količina cementa u betonu:

$$m_{c, \min} = 425 - 193 = 232 \text{ kg/m}^3$$

Količina agregata se dobija iz sume apsolutnih zapremina materijala u  $1\text{m}^3$  betona, uz pretpostavljenu količinu hemijskog dodatka od  $0,7\%m_c$  i uvučeni vazduh  $\Delta p=2\%$ .

$$\frac{450}{3100} + \frac{180}{1000} + \frac{m_a}{2660} + \frac{3,15}{1070} + 0,02 = 1 \Rightarrow m_a = 1734 \text{ kg/m}^3$$

Količine pojedinačnih frakcija u skladu sa usvojenim učešćima iznose:

- frakcija 0/4 –  $m_{0/4}=855\text{kg}$ ;
- frakcija 4/8 –  $m_{4/8}=251\text{kg}$ ;
- frakcija 8/16 –  $m_{8/16}=628\text{kg}$ .

#### 4.1.2. Određivanje sastava lakoagregatnog betona sa „Leca-Laterlite“ agregatom 4/15

Prilikom projektovanja sastava lakoagregatnih betona usvojeno je da apsolutna zapremina agregata u  $1\text{m}^3$  betona iznosi  $0,64-0,70\text{m}^3$ . Sastav betonske mešavina LLK-1 određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=450\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-cementog faktora  $m_v/m_c=0,40$  iznosi  $m_v=180\text{kg/m}^3$ ;
- dodatna voda potrebna za kvašenje agregata usvojena je da iznosi  $4,6\%$ , što je količina vode koju upije laki agregat nakon 30 minuta (Prilog 2);
- količina hemijskog dodatka iznosi  $0,5\%$  od mase cementa ( $m_c$ ).

Na osnovu datih parametara i učešća agregata datih u Prilogu 5, količina agregata iznosi:

$$\overline{V}_{0/4} + \overline{V}_{4/15} = 0,68\text{m}^3$$

$$\overline{V}_{0/4} = 0,52 \cdot 0,68 = 0,3536\text{m}^3 \Rightarrow m_{0/4} = 0,3536 \cdot 2660 = 940\text{kg}$$

$$\overline{V}_{4/15} = 0,48 \cdot 0,68 = 0,3264\text{m}^3 \Rightarrow m_{4/15} = 0,3264 \cdot 1020 = 333\text{kg}$$

Dodatna količina vode iznosi

$$m_{v,dod} = \frac{4,6}{100} \cdot 333 = 15,32\text{kg}$$



#### 4.1.3. Određivanje sastava lakoagregatnog betona sa „ZAG“ lakim agregatom

Prilikom projektovanja sastava lakoagregatnih betona, usvojeno je da apsolutna zapremina agregata u  $1\text{m}^3$  betona iznosi  $0,64\text{-}0,70\text{m}^3$ . Sastav betonske mešavina LSSL-1 određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=450\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-cementnog faktora  $m_v/m_c=0,40$  iznosi  $m_v=180\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- u cilju smanjenja zapreminske mase betona, deo sitnog rečnog agregata je zamenjen sitnim lakim agregatom „Leca-Laterlite“ 2/3;
- dodatna voda potrebna za kvašenje agregata usvojena je da iznosi 12,1% za agregat Leca-Laterlite 2/3 i 33,2% za agregat ZAG 4/8, što je količina vode koju upije laki agregat nakon 30 minuta (Prilog 2);
- količina hemijskog dodatka iznosi 0,5% od mase cementa ( $m_c$ ).

Na osnovu datih parametara i učešća agregata datih u Prilogu 6, količina agregata iznosi:

$$\overline{V}_{0/4} = 0,42 \cdot 0,68 = 0,2856\text{m}^3 \Rightarrow m_{0/4} = 0,2856 \cdot 2660 = 749\text{kg}$$

$$\overline{V}_{2/3} = 0,21 \cdot 0,68 = 0,1428\text{m}^3 \Rightarrow m_{2/3} = 0,1428 \cdot 630 = 90\text{kg}$$

$$\overline{V}_{4/8} = 0,37 \cdot 0,68 = 0,2516\text{m}^3 \Rightarrow m_{4/8} = 0,2516 \cdot 1301 = 327\text{kg}$$

Dodatna količina vode iznosi:

$$m_{v,dod} = \frac{12,1}{100} \cdot 90 + \frac{33,2}{100} \cdot 327 = 119,5\text{kg}$$

#### 4.1.4. Određivanje sastava lakoagregatnog betona sa „Poraver“ lakim agregatom

Prilikom projektovanja sastava lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Poraver“ kao referentna receptura usvojena je receptura data od strane proizvođača (u ovom istraživanju označena sa LPE). Ovde je jedan deo peska i jedan deo prirodnog krupnog agregata zamenjen sitnim lakim agregatom „Poraver“ krupnoće 2/4mm i krupnim lakim agregatom 4/8mm, u cilju smanjenja zapreminske mase betona. Sve recepture su usvojene tako da apsolutna zapremina agregata u  $1\text{m}^3$  betona iznosi  $0,64\text{-}0,70\text{m}^3$ , a količine pojedinih frakcija agregata određenu se tako da njihov međusobni odnos uvek bude isti kao kod referentnog betona LPE.

Sastav betonske mešavina LP-1 određen je na osnovu sledećih polaznih parametara:

- količina cementa  $m_c=450\text{kg/m}^3$ ;
- količina vode određena na osnovu usvojenog vodo-cementog faktora  $m_v/m_c=0,40$  iznosi  $m_v=180\text{kg/m}^3$ ;
- dodatna voda potrebna za kvašenje agregata usvojena je da iznosi 23% odnosno 20% što je količina vode koju upiju laki agregati 2/4 i 4/8 nakon 30 minuta (Prilog 2);
- količina hemijskog dodatka iznosi 1,1% od mase cementa ( $m_c$ ).

Na osnovu datih parametara i učešća agregata datih u Prilogu 7, količina agregata iznosi:

$$\overline{V}_{r0/4} = 0,58 \cdot 0,64 = 0,371\text{m}^3 \Rightarrow m_{r0/4} = 0,371 \cdot 2660 = 987\text{kg} \approx 990\text{kg}$$

$$\overline{V}_{r4/8} = 0,087 \cdot 0,64 = 0,0557\text{m}^3 \Rightarrow m_{r4/8} = 0,1428 \cdot 630 = 148,1\text{kg} \approx 150\text{kg}$$

$$\overline{V}_{p2/4} = 0,239 \cdot 0,64 = 0,153\text{m}^3 \Rightarrow m_{p2/4} = 0,153 \cdot 300 = 45,9\text{kg} \approx 46\text{kg}$$

$$\overline{V}_{p4/8} = 0,096 \cdot 0,64 = 0,061\text{m}^3 \Rightarrow m_{p4/8} = 0,1428 \cdot 291 = 17,8\text{kg} \approx 18\text{kg}$$

r - rečni agregat

p- Poraver

Dodatna količina vode iznosi:

$$m_{v,dod} = \frac{23}{100} \cdot 46 + \frac{20}{100} \cdot 18 = 14,18\text{kg}$$

## 4.2. Sastav betonskih mešavina

Na osnovu prethodno prikazanih postupaka proračuna, određeni su sastavi svih betonskih mešavina prikazanih u tabeli V-1. Količine komponentnih materijala za  $1\text{m}^3$  betona i računaska vrednost zapreminske mase betona u svežem stanju date su u tabeli V-3.

Tabela V-3. Količine komponentnih materijala u 1m<sup>3</sup> betona

Oznaka	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]		Voda [kg/m <sup>3</sup> ]		Agregat [kg/m <sup>3</sup> ]						Mineralni dodatak [kg/m <sup>3</sup> ]			Hem. dodatak [kg/m <sup>3</sup> ]		Zapreminska masa [kg/m <sup>3</sup> ]	
	CEM I	CEM II	m <sub>v</sub>	m <sub>v,dod</sub>	0/4	4/8	8/16	2/3	0/4	4/15	4/8	ZAG	Poraver	Leteći pepeo	Metakaolin		HRWRA
NK	450	-	180	-	855	251	628	-	-	-	-	-	-	-	-	3,15	2369
ELL-15*	450	-	180	-	770	-	-	-	54,6	365,4	-	-	-	-	-	2,25	1838
LLK-1	450	-	180	15,3	940	-	-	-	-	333	-	-	-	-	-	3,15	1942
LLK-2	-	450	180	15,3	940	-	-	-	-	333	-	-	-	-	-	2,4	1921
LLK-3	350	-	175	16,1	984	-	-	-	-	349	-	-	-	-	-	2,80	1907
LLK-4	400	-	180	15,6	955	-	-	-	-	339	-	-	-	-	-	2,4	1892
LLK-5	244	-	183	15,3	940	-	-	-	-	333	-	-	-	97,6	22,4	2,56	1838
LLK-6	278	-	163	15,3	940	-	-	-	-	333	-	-	-	111,4	27,8	2,5	1871
LSLL-1	450	-	180	119,5	749	-	-	-	90	-	-	327	-	-	-	2,25	1918
LSLL-2	-	450	180	119,5	749	-	-	-	90	-	-	327	-	-	-	2,7	1918
LSLL-4	400	-	180	121,2	771	-	-	-	91	-	-	332	-	-	-	2	1897
LSLL-5	244	-	183	119,5	760	-	-	-	90	-	-	327	-	97,6	22,4	3,29	1847
LSLL-6	278	-	163	119,5	760	-	-	-	90	-	-	327	-	111,4	27,8	3,05	1880
LPE*	450	-	190	-	990	150	-	-	-	-	-	-	46	18	-	-	1844
LP-1	450	-	180	14,18	990	150	-	-	-	-	-	-	46	18	-	5,8	1854
LP-2	-	450	180	14,18	990	150	-	-	-	-	-	-	46	18	-	5,2	1853
LP-4	400	-	180	14,33	990,8	151,6	-	-	-	-	-	-	46,4	18,3	-	5,2	1807
LP-5	244	-	183	14,18	990	150	-	-	-	-	-	-	46	18	97,6	4,797	1770
LP-6	278	-	163	14,18	990	150	-	-	-	-	-	-	46	18	110	7	1799

## 5. IZRADA BETONSKIH MEŠAVINA

Betonske mešavine su spravljene u protivstrujnoj laboratorijskoj mešalici za beton sa vertikalnom osovinom zapremine 50 litara, proizvođača ZRMK-Ljubljana. Vreme mešanja komponenta betona iznosilo je 3 minute. Kod svih receptura sa lakim agregatom, sem onih koje su spravljene prema preporuci proizvođača, laki agregat je prethodno kvašen količinom vode koju upije za 30 minuta (dodatna voda) u trajanju od 5 minuta. Nakon toga su dodavani ostatak agregata i veziva, mešani u suvo, a zatim je dodavana voda i hemijski dodatak uz kontinualno mešanje.

Prosečna temperatura u toku spravljanja betonskih mešavina iznosila je 25°C, a relativna vlažnost vazduha oko 55%.

Nakon merenja temperature svežeg betona određivane su konzistencija i količina uvučenog vazduha, a zatim je beton ugrađivan u metalne kalupe. Ugrađivanje je izvršeno vibriranjem na vibro-stolu u trajanju od 30 sekundi. Nakon kompaktiranja uzorci su držani u kalupima 24 sata, a zatim vađeni iz kalupa i negovani u skladu sa odgovarajućim režimom nege. Nakon vađenja iz kalupa, na svim uzorcima je označena vrsta betona i redni broj uzorka. Na slikama V-38, V-39 i V-40 prikazani su spravljena betonska mešavina, kompaktiranje na vibro-stolu i uzorci nakon ugrađivanja u kalupe.



*Slika V-38. Spravljanje betonske mešavine*



*Slika V-39. Kompaktiranje betona*

Pored uzoraka za ispitivanje svojstava betona, napravljeni su i blokovi u cilju provere mogućnosti izrade nosećih blokova za zidanje uz istovremeno zadovoljenje uslova niske toplotne provodljivosti. Blokovi su napravljeni od tri vrste betona: LLK-5, LSSL-5 i LP-5. Za formiranje šupljina je u procesu spravljanja ugrađen termoizolacioni materijal (EPS – ekspanzirani polistiren). Na slikama V-41 i V-42 prikazan je

postupak ugrađivanja i izgled betona u kalupima. Geometrijske karakteristike blokova date su u Prilogu 17.



*Slika V-40. Beton ugrađen u kalupe*



*Slika V-41. Ugrađivanje betona u kalupe za betonske blokove za zidanje*



*Slika V-42. Betonski blokovi ugrađeni u kalupe*

## 6. POSTUPCI I TOK ISPITIVANJA

### 6.1. Svojstva svežeg betona

#### 6.1.1. Konzistencija

Konzistencija svežeg betona određena je metodom sleganja u skladu sa standardom SRPS EN 12350-2 [87]. Kako bi se rezultati ispitivanja mogli upoređivati, sleganje je mereno u jednakim vremenskim intervalima, nakon 5 minuta i 15 minuta, a kod betona kod kojih je bio moguće, i nakon 30 minuta. Na slici V-43 prikazan je postupak određivanja konzistencije betona, a rezultati merenja dati su u Prilogu 8.



Slika V-43. Merenje konzistencije metodom sleganja za betone LLK-4 i LP-5

#### 6.1.2. Sadržaj uvučenog vazduha

Sadržaj uvučenog vazduha određen je prema standardu EN 12350-7 [88], 10 do 15 minuta nakon završenog mešanja betona. Na slici V-44 prikazana je aparatura za merenje uvučenog vazduha i sadržaj vazduha u betonu LSSL-4. Rezultati merenja dati su u Prilogu 8.



Slika V-44. Određivanje sadržaja zaostalog vazduha u betonu LSSL-4

### 6.1.3. Zapreminska masa

Zapreminska masa betona određena je prema standardu SRPS ISO 6276 [89] za svaku vrstu betona. Srednje vrednosti zapreminske mase u svežem stanju za svaku vrstu betona date su u Prilogu 9.

## 6.2. Svojstva očvrsllog betona

### 6.2.1. Čvrstoća betona pri pritisku

Čvrstoća betona pri pritisku određena je prema standardu SRPS EN 12390-3 [90] na uzorcima oblika kocke sa ivicom 15cm pri starostima 2, 7, 28 i 60 dana kao srednja vrednost čvrstoća dobijenih na tri uzorka, za svaku vrstu betona. Sila loma je određena pomoću hidraulične prese kapaciteta 3000kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je  $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ .

Neposredno pre ispitivanja sile loma, određene su dimenzije i masa uzoraka. Ispitivanje čvrstoće pri pritisku je prikazano na slici V-45, a rezultati merenja, sila loma i sračunate čvrstoće pri pritisku za svaki uzorak dati su u Prilozima 10 i 11.



*Slika V-45. Određivanje čvrstoće pri pritisku*

### 6.2.2. Modul elastičnosti

Statički modul elastičnosti je određen prema standardu SRPS ISO 6784 [91] na cilindrima prečnika 150mm i visine 300mm pri starosti betona od 28 od 35 dana. Reprezentativna vrednost modula elastičnosti za svaku vrstu betona je određena kao srednja vrednost modula elastičnosti dobijenih merenjem napona i deformacija na tri cilindra. Za nanošenje opterećenja (pritisak) upotrebljena je hidraulična presa kapaciteta 400kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je  $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ . Za merenje deformacija korišćen je jedan ekstenzometar tačnosti 0,001mm sa mernom bazom 250mm. Postupak određivanja statičkog modula elastičnosti sastoji se iz sledećih faza:

- određivanje čvrstoće betona pri pritisku na osnovu koje se određuje gornja granica opterećenja  $\sigma_a \approx 1/3 \cdot f_{c,28}$  dok se za donju granicu usvaja opterećenje pri kom dolazi do deformacije od 0,01mm;
- postavljanje opitnog tela u presu nakon čega se vrše tri ciklusa opterećenja i rasterećenja uzoraka („peglanje uzoraka“);
- opterećenje i rasterećenje uzoraka u dva ciklusa uz registrovanje sile i deformacije pri donjem i gornjem nivou opterećenja.

Ispitivanje modula elastičnosti prikazano je na slici V-46, a vrednosti merenja za svaki cilindar posebno date su u Prilogu 12.

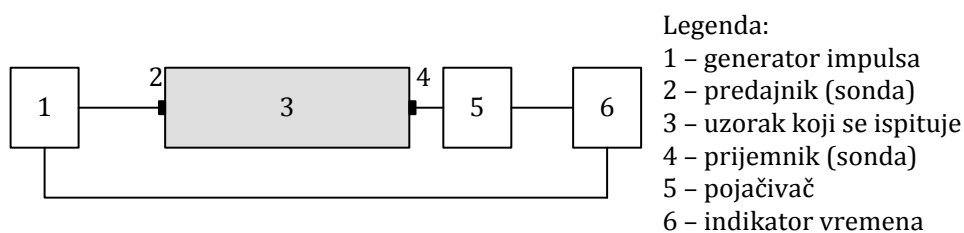


Slika V-46. Određivanje statičkog modula elastičnosti



Dinamički modul elastičnosti određen je na osnovu brzine ultrazvuka i zapreminske mase betona. Brzina ultrazvuka je dobijena merenjem vremena potrebnog da ultrazvučni talas prođe kroz betonski uzorak poznate dužine. Merenje je izvršeno pomoću ultrazvučnog aparata „Pundit“ sa sondama frekvencije 82kHz na istim uzorcima na kojima je određen statički modul elastičnosti ( $\varnothing 150$ ,  $H \approx 300$ mm).

Na slikama V-47 i V-48 prikazani su dispozicija mernog uređaja i ispitivanog elementa i ispitivanje brzine prolaska ultrazvuka, a rezultati merenja dati su u Prilogu 13.



Slika V-47. Dispozicija ispitivanja brzine prolaza ultrazvuka



Slika V-48. Ispitivanje brzine prolaza ultrazvuka

### 6.2.3. Zapreminske deformacije betona

Zapreminske deformacije betona (skupljanje betona) određene su u skladu sa SRPS U.M1.029 [92] na uzorcima dimenzija 100x100x400mm i UNI 11307 [93] na uzorcima dimenzija 100x100x500mm. Za registrovanje deformacija upotrebljeni su deformetri proizvođača Hugenberg (Švajcarska) i Insize (Kina). Tačnost oba uređaja iznosi 0,001mm.

Nakon vađenja iz kalupa uzorci su držani u vodi 48h, a zatim su negovani na vazduhu. Betoni spravljeni sa lakim agregatima „Leca-Laterlite“ i „ZAG“ (osim uzoraka sa oznakama LLK-6 i LSLL-6) negovani su na temperaturi  $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$  i relativnoj vlažnosti vazduha  $\varphi=50-80\%$ , dok su uzorci betona od lakog agregata „Poraver“, LLK-6 i LSLL-6

negovani u kondicioniranim termo-higrometrijskim uslovima ( $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$  i  $\varphi=70\pm 5\%$ ). Skupljanje je mereno pri starostima 3, 4, 7 dana, a zatim na svakih sedam dana.

Deformacije su merene na dve naspramne merne linije na podužnim stranama kod uzoraka ispitivanih prema SRPS U.M1.029 i u osi uzorka kod uzoraka ispitivanih prema UNI 11307.

Vrednost skupljanja je određena kao srednja vrednost rezultata dobijenih na tri prizme za svaku vrstu betona. Na slikama V-49 i V-50 prikazano je ispitivanje skupljanja, a u Prilogu 14 dati su rezultati mernja za svaku vrstu betona.



*Slika V-49. Merenje skupljanja prema SRPS U.M1.029*



*Slika V-50. Merenje skupljanja prema UNI 11307*

#### 6.2.4. Upijanje vode

Upijanje vode je ispitivano na dva načina:

- upijanje vode pod pritiskom (ispitivanje vodonepropusnosti betona) prema EN 12390-8 [94] (Slika V-29);
- upijanje kapilarnim putem prema SRPS U.M8.300 [95] (Slika V-30).



*Slika V-51. Ispitivanje upijanja vode pod pritiskom*



*Slika V-52. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode*

Upijanje vode je mereno na uzorcima oblika kocke ivice 150mm i uzorcima oblika kvadra osnove 150x150mm i visine  $\approx 60$ mm, a kao merodavan rezultat je uzeta srednja vrednost upijanja određena na tri uzorka za svaku vrstu betona.

Rezultati merenja upijanja vode pod pritiskom dati su u Prilogu 15, a kapilarnog upijanja u Prilogu 16.

### 6.3. Betonski blokovi za zidanje

Šuplji betonski blokovi za zidanje su nakon 24 sata vađeni iz kalupa i potopljeni u vodu. Pri starosti od 28 dana su izvađeni iz vode i pripremljeni za ispitivanje čvrstoće pri pritisku (Slika V-53).

Treba napomenuti da je ekspanzirani polistiren ostao u šupljinama blokova, što, takođe, predstavlja trend u proizvodnji i keramičkih i betonskih šupljih blokova, sa ciljem da se poprave njihova termoizolaciona svojstva.

Pojedinačne vrednosti čvrstoće pri pritisku ispitane su prema standardu SRPS U.N1.100 [96] na celim blokovima, a merodavna čvrstoća bloka pri pritisku je određena kao srednja vrednost od tri rezultata ispitivanja. Sila loma je određena pomoću hidraulične prese kapaciteta 3000kN, a brzina nanošenja opterećenja iznosila je  $0,6 \pm 0,2$ MPa/s.

Neposredno pre ispitivanja, određene su dimenzije i masa uzoraka, a rezultati merenja, sila loma i čvrstoća pri pritisku za svaki uzorak dati su u Prilogu 17.



Slika V-53. Izgled blokova za zidanje pripremljenih za ispitivanje

## 7. REZULTATI ISPITIVANJA

Na osnovu rezultata merenja datih u priložima, sračunate su vrednosti svih fizičko-mehaničkih svojstava betona planiranih programom ispitivanja. Karakteristične vrednosti svojstava svežeg i očvrslog betona prikazane su tabelarno u cilju što lakše analize i izvođenja zaključaka.

### 7.1. Svojstva svežeg betona

Na osnovu rezultata merenja datih u Priložima 8 i 9, u tabeli V-4 prikazane su vrednosti zapreminske mase, konzistencije i količine uvučenog vazduha.

*Tabela V-4. Svojstva svežeg betona*

Vrsta betona	$\gamma_{b,sv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Sleganje [mm]			$\Delta p$ [%]
		$\Delta h_{5min}$	$\Delta h_{15min}$	$\Delta h_{30min}$	
NK	2375	150	115	90	
ELL-15	1855	165	75	20	3,9
LLK-1	1905	160	100	50	5,4
LLK-2	1884	165	105	60	4
LLK-3	1879	160	120	75	10
LLK-4	1920	160	105	60	7,3
LLK-5	1865	175	125	70	5,6
LLK-6	1885	55	-	-	-
LSSL-1	1934	170	115	60	5,4
LSSL -2	1910	180	125	70	6,5
LSSL-4	1900	170	120	65	7
LSSL-5	1862	75	55	30	-
LSSL-6	1883	-	120	-	-
LPE	1830	10	-	-	-
LP-1	1827	30	50	-	-
LP-2	1775	65	145	-	-
LP-4	1805	70	125	-	-
LP-5	1765	75	120	-	-
LP-6	1831	-	35	-	-

Kako bi se omogućilo dobro ugrađivanje i kompaktiranje betona u kalupima, za neke vrste betona je mereno sleganje samo jednom (LLK-6, LSSL-6, LPE i LP-6).

Oznake u tabeli imaju sledeća značenja:

- $\gamma_{b,sv}$  – zapreminska masa svežeg betona;
- $\Delta h_{5min}$  – sleganje izmereno 5 minuta od početka spravljanja betona;
- $\Delta h_{15min}$  – sleganje izmereno 15 minuta od početka spravljanja betona;
- $\Delta h_{30min}$  – sleganje izmereno 30 minuta od početka spravljanja betona;
- $\Delta p$  – sadržaj uvučenog vazduha.

## 7.2. Svojstva očvrstlog betona

### 7.2.1. Čvrstoća pri pritisku

U poglavlju 6.2.1 prikazan je postupak određivanja čvrstoće pri pritisku, a rezultati pojedinačnih ispitivanja dati su u Prilogu 10 (Određivanje zapreminske mase očvrstlog, prirodno vlažnog betona) i Prilogu 11 (Određivanje čvrstoće pri pritisku). Sračunate srednje vrednosti zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku, za svaku vrstu betona, prikazane su u tabelama V-5, V-6 i V-7.

Oznake u tabelama imaju sledeća značenja:

- $\gamma_{b,pv}$  – zapreminska masa prirodno vlažnog betona;
- $f_{c,2}$  – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 2 dana;
- $f_{c,7}$  – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 7 dana;
- $f_{c,28}$  – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 28 dana;
- $f_{c,60}$  – čvrstoća betona pri pritisku pri starosti od 60 dana.

*Tabela V-5. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa rečnim krupnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“*

Vrsta betona	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_c$ [MPa]			
		$f_{c,2}$	$f_{c,7}$	$f_{c,28}$	$f_{c,60}$
NK	2334	40,8	53,0	60,2	67,3
ELL-15	1833	37,3	44,8	47,2	50,6
LLK-1	1888	39,3	45,6	50,3	52,9
LLK-2*	1860	23,8	35,8	45,3	52,5
LLK-3	1819	18,5	36,1	41,3	44,1
LLK-4	1854	32,6	39,4	47,0	48,5
LLK-5**	1811	17,6	32,8	43,4	45,2
LLK-6**	1874	18,6	33,4	49,6	-

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

V-6. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa lakim agregatom „ZAG“

Vrsta betona	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_c$ [MPa]			
		$f_{c,2}$	$f_{c,7}$	$f_{c,28}$	$f_{c,28}^{***}$
LSSL-1	1855	24,3	29,5	33,3	34,3
LSSL -2*	1843	13,6	22,0	31,6	29,4
LSSL -4	1804	21,0	26,1	29,4	30,1
LSSL -5**	1760	13,8	20,5	24,5	39,4
LSSL -6**	1838	20,3	27,7	34,3	-

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

\*\*\* Čvrstoća pri pritisku betona negovanog na vazduhu

Tabela V-7. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona sa lakim agregatom „Poraver“

Vrsta betona	$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Čvrstoća pri pritisku, $f_c$ [MPa]			
		$f_{c,2}$	$f_{c,7}$	$f_{c,28}$	$f_{c,28}^{***}$
LPE	1828	20,4	25,7	30,6	30,6
LP-1	1800	23,2	28,5	32,5	33,1
LP-2*	1760	16,9	21,3	25,1	27,5
LP-4	1794	18,6	22,8	28,0	25,9
LP-5**	1766	12,5	17,7	23,8	24,1
LP-6**	1819	18,4	26,8	37,0	-

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

\*\*\* Čvrstoća pri pritisku betona negovanog na vazduhu

### 7.2.2. Modul elastičnosti

Na osnovu izmerenih vrednosti deformacija pri definisanim vrednostima gornjeg i donjeg graničnog napona (Prilogu 12) sračunate su pojedinačne i srednje vrednosti statičkog modula elastičnosti za svaku vrstu betona i prikazane u tabelama V-8, V-9 i V-10. Takođe, date su i vrednosti dinamičkog modula elastičnosti određenog preko brzine prolaza ultrazvuka (Prilog 13).

Tabela V-8. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Vrsta betona	Statički modul elastičnosti E [GPa]				Dinamički modul elastičnosti E <sub>d</sub> [GPa]			
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>sr</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>d,sr</sub>
NK	35,30	34,80	35,55	<b>35,22</b>	49,30	48,78	49,63	<b>49,24</b>
ELL-15	21,60	23,27	22,20	<b>22,36</b>	31,58	32,28	32,07	<b>31,98</b>
LLK-1	23,15	22,86	23,62	<b>23,21</b>	33,51	34,11	34,32	<b>33,98</b>
LLK-2	21,55	20,62	22,39	<b>21,52</b>	31,97	31,97	32,10	<b>32,01</b>
LLK-3	21,82	20,59	21,71	<b>21,37</b>	31,35	30,93	31,03	<b>31,11</b>
LLK-4	22,12	22,26	21,98	<b>22,12</b>	31,33	31,50	31,55	<b>31,46</b>
LLK-6	22,71	21,33	-	<b>22,02</b>	30,96	31,30	-	<b>31,13</b>

Tabela V-9. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim agregatom „ZAG“

Vrsta betona	Statički modul elastičnosti E [GPa]				Dinamički modul elastičnosti E <sub>d</sub> [GPa]			
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>sr</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>d,sr</sub>
LSSL-1	18,30	17,88	17,89	<b>18,02</b>	28,20	27,95	27,74	<b>27,96</b>
LSSL-2	17,29	17,29	17,27	<b>17,28</b>	27,28	27,10	27,59	<b>27,32</b>
LSSL-4	15,47	15,16	15,19	<b>15,27</b>	25,92	25,91	25,61	<b>25,81</b>
LSSL-5	13,25	13,53	13,50	<b>13,43</b>	22,30	22,35	22,02	<b>22,22</b>
LSSL-6	15,90	16,20	-	<b>16,05</b>	25,5	25,42	-	<b>25,46</b>

V-10. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim agregatom „Poraver“

Vrsta betona	Statički modul elastičnosti E [GPa]				Dinamički modul elastičnosti E <sub>d</sub> [GPa]			
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>sr</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>d,sr</sub>
LPE	19,60	20,24	20,10	<b>19,99</b>	29,13	29,77	28,68	<b>29,19</b>
LP-1	19,15	20,08	20,87	<b>20,3</b>	29,78	30,28	30,75	<b>30,27</b>
LP-2	18,65	16,88	18,56	<b>18,03</b>	28,22	27,14	28,55	<b>27,97</b>
LP-4	17,42	17,70	17,61	<b>17,57</b>	27,88	27,97	28,15	<b>28,00</b>
LP-5	17,75	16,40	16,53	<b>16,90</b>	27,88	27,51	28,05	<b>27,81</b>
LP-6	21,83	21,77	-	<b>21,80</b>	31,50	31,29	-	<b>31,39</b>

### 7.2.3. Zapreminske deformacije

Na osnovu rezultata pojedinačnih merenja zapreminskih deformacija betona datih u Prilogu 14, u tabelama V-11, V-12 i V-13 sračunate su srednje vrednosti skupljanja za svaku vrstu betona u mm/m, za mernu bazu od 250mm odnosno 500mm.

*Tabela V-11. Zapreminske deformacije betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ [mm/m]*

Starost [dani]	Vrsta betona							
	NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2	LLK-3	LLK-4	LLK-5	LLK-6
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,044	0,083	0,088	0,063	0,055	0,047	0,103	0,070
7	0,129	0,153	0,211	0,178	0,155	0,135	0,176	0,136
14	0,213	0,247	0,292	0,259	0,217	0,229	0,338	0,194
21	0,278	0,293	0,324	0,348	0,270	0,290	0,390	0,240
28	0,316	0,352	0,357	0,402	0,329	0,352	0,434	0,264
35	0,356	0,363	0,396	0,441	0,396	0,393	0,469	0,282
42	0,386	0,384	0,430	0,485	0,446	0,426	0,492	0,290
49	0,393	0,383	0,468	0,523	0,478	0,482	0,496	0,296
56	0,439	0,401	0,487	0,537	0,499	0,498	0,509	0,302
63	0,452	0,427	0,509	0,544	0,509	0,508	0,513	0,306

*Tabela V-12. Zapreminske deformacije betona sa lakim agregatom „ZAG“ [mm/m]*

Starost [dani]	Vrsta betona				
	LSLL-1	LSLL-2	LSLL-4	LSLL-5	LSLL-6
3	0	0	0	0	0
4	0,046	0,040	0,029	0,055	0,050
7	0,107	0,137	0,090	0,152	0,096
14	0,175	0,318	0,239	0,294	0,158
21	0,251	0,471	0,402	0,430	0,202
28	0,342	0,576	0,525	0,526	0,234
35	0,408	0,675	0,598	0,572	0,258
42	0,484	0,719	0,671	0,602	0,278
49	0,508	0,776	0,730	0,611	0,296
56	0,533	0,814	0,771	0,618	0,310
63	0,547	0,846	0,786	0,620	0,320



Tabela V-13. Zapreminske deformacije betona sa lakim agregatom „Poraver“ [mm/m]

Starost [dani]	Vrsta betona					
	LPE	LP-1	LP-2	LP-4	LP-5	LP-6
3	0	0	0	0	0	0
4	0,046	0,051	0,038	0,053	0,045	0,110
7	0,183	0,177	0,142	0,151	0,085	0,154
14	0,281	0,276	0,264	0,293	0,163	0,245
21	0,341	0,325	0,397	0,360	0,206	0,282
28	0,385	0,373	0,442	0,401	0,233	0,306
35	0,405	0,411	0,479	0,430	0,255	0,326
42	0,417	0,429	0,493	0,453	0,267	0,330
49	0,427	0,447	0,509	0,476	0,287	0,332
56	0,434	0,457	0,519	0,491	0,291	0,336
63	0,442	0,463	0,530	0,495	0,314	0,340

#### 7.2.4. Upijanje vode

##### 7.2.4.1. Upijanje vode pod pritiskom

Rezultati merenja dubine prodora i količine upijene vode dati su Prilogu 15. U toku eksperimenta merena je masa uzorka pre i nakon izlaganja dejstvu vode pod pritiskom, na osnovu čega je upijanje izraženo u kg/m<sup>2</sup>. U tabelama V-14, V-15 i V-16 date su srednje vrednosti upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora za svaku vrstu betona.

Upijanje vode se računa prema izrazima:

$$U_{sr} = m_2 - m_1 [kg]$$

$$U_{sr} = \frac{m_2 - m_1}{A} [kg/m^2] \quad (4)$$

Oznake u datim izrazima imaju sledeća značenja:

- $U_{sr}$  – srednja vrednost upijanja u kg ili kg/m<sup>2</sup>;
- $m_1$  – masa uzorka pre ispitivanja;
- $m_2$  – masa uzorka nakon delovanja vode pod pritiskom;
- $A$  – kontaktna površina (krug prečnika 7.5cm).

Tabela V-14. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Vrsta betona	Upijanje vode		Dubina prodora
	$U_{sr}$ [kg]	$U_{sr}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d_{max,sr}$ [mm]
NK	0,0117	2,641	24,0
ELL-15	0,0167	3,773	23,3
LLK-1	0,0150	3,395	26,3
LLK-2*	0,0217	4,904	31,7
LLK-3	0,0200	4,527	18,7
LLK-4	0,0217	4,904	18,7
LLK-5**	0,0183	4,150	17,0
LLK-6**	0,0120	2,728	18,5

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

Tabela V-15. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa lakim agregatom „ZAG“

Vrsta betona	Upijanje vode		Dubina prodora
	$U_{sr}$ [kg]	$U_{sr}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d_{max,sr}$ [mm]
LSLL-1	0,0325	7,349	10,0
LSLL-2	0,0468	10,586	15,7
LSLL-4	0,0432	9,771	26,7
LSLL-5**	0,0393	8,888	28,7
LSLL-6**	0,0060	1,358	17,0

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

Tabela V-16. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom betona sa lakim agregatom „Poraver“

Vrsta betona	Upijanje vode		Dubina prodora
	$U_{sr}$ [kg]	$U_{sr}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$d_{max,sr}$ [mm]
LPE	0,0135	3,048	13,3
LP-1	0,0070	1,577	15,0
LP-2	0,0127	2,882	15,3
LP-4	0,0148	3,342	23,7
LP-5**	0,0249	5,629	25,7
LP-6**	0,0086	1,954	14,7

\* Beton spravljen sa CEM II

\*\* Beton spravljen sa CEM I + leteći pepeo + metakaolin

### 7.2.4.2. Kapilarno upijanje vode

Merenje kapilarnog upijanja vode ispitivanih vrsta lakoagregatnog betona određeno je prema odredbama standarda SRPS U.M8.300. Rezultati pojedinačnih merenja kapilarnog upijanja vode na tri uzorka za svaku vrstu betona dati su u Prilogu 16, a u tabelama V-17, V-18 i V-19 date su srednje vrednosti izražene u  $\text{kg}/\text{m}^2$  (osnova uzorka  $150 \times 150 \text{mm}$ ) kao i sračunate vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode određeni su prema izrazima (5) i (6).

$$U_k = \frac{m_{v,k}}{A} [\text{kg}/\text{m}^2] \quad (5)$$

$$A_i = \frac{U_{k,25}}{\sqrt{t}} [\text{kg}/\text{m}^2 \text{h}^{1/2}] \quad (6)$$

U prethodnim izrazima, oznake imaju sledeća značenja:

- $U_k$  – kapilarno upijanje;
- $m_{v,k}$  – masa kapilarno upijene vode;
- $A_i$  – koeficijent kapilarnog upijanja;
- $U_{k,25}$  – kapilarno upijanje vode nakon  $t=25\text{h}$  od početka ispitivanja.

*Tabela V-17. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa krupnim rečnim agregatom i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“*

Vreme, t [h]	$t^{1/2}$ [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona							
		NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2	LLK-3	LLK-4	LLK-5	LLK-6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.017	0,13	0,033	0,031	0,045	0,085	0,059	0,054	0,076	0,183
0.083	0,29	0,058	0,091	0,104	0,138	0,122	0,100	0,162	0,297
0,25	0,5	0,089	0,132	0,156	0,217	0,202	0,159	0,236	0,361
0,5	0,71	0,119	0,169	0,193	0,286	0,263	0,205	0,297	0,431
1	1	0,151	0,216	0,229	0,356	0,334	0,285	0,361	0,510
4	2	0,224	0,327	0,348	0,524	0,513	0,425	0,561	0,687
9	3	0,298	0,391	0,405	0,650	0,648	0,540	0,668	0,819
25	5	0,359	0,471	0,494	0,806	0,831	0,651	0,848	1,004
49	7	0,404	0,522	0,550	0,898	0,958	0,737	0,925	1,164
73	8,54	0,446	0,535	0,564	0,939	1,033	0,771	0,968	1,237
<b><math>A_i</math> [kg/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]</b>		<b>0,072</b>	<b>0,094</b>	<b>0,099</b>	<b>0,161</b>	<b>0,166</b>	<b>0,130</b>	<b>0,170</b>	<b>0,201</b>

Tabela V-18. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa lakim agregatom „ZAG“

Vreme, t [h]	$t^{1/2}$ [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona				
		LSLL-1	LSLL-2	LSLL-4	LSLL-5	LSLL-6
0	0	0	0	0	0	0
0.017	0,13	0,282	0,273	0,171	0,203	0,212
0.083	0,29	0,421	0,461	0,278	0,351	0,392
0,25	0,5	0,530	0,612	0,398	0,476	0,571
0,5	0,71	0,612	0,731	0,499	0,593	0,705
1	1	0,705	0,886	0,610	0,714	0,855
4	2	0,913	1,172	0,907	1,034	1,139
9	3	1,026	1,355	1,103	1,253	1,335
25	5	1,171	1,537	1,376	1,498	1,537
49	7	1,251	1,567	1,518	1,599	1,688
73	8,54	1,253	1,592	1,600	1,656	1,740
<b>A<sub>i</sub> [kg/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]</b>		<b>0,234</b>	<b>0,307</b>	<b>0,275</b>	<b>0,300</b>	<b>0,307</b>

Tabela V-19. Kapilarno upijanje i koeficijent kapilarnog upijanja vode betona sa lakim agregatom „Poraver“

Vreme, t [h]	$t^{1/2}$ [h <sup>1/2</sup> ]	Vrsta betona					
		LPE	LP-1	LP-2	LP-4	LP-5	LP-6
0	0	0	0	0	0	0	0
0.017	0,13	0,058	0,056	0,077	0,094	0,154	0,115
0.083	0,29	0,111	0,118	0,181	0,185	0,279	0,182
0,25	0,5	0,190	0,204	0,317	0,301	0,428	0,248
0,5	0,71	0,274	0,286	0,415	0,413	0,557	0,308
1	1	0,337	0,370	0,542	0,510	0,687	0,395
4	2	0,545	0,581	0,820	0,865	1,030	0,613
9	3	0,660	0,689	0,962	1,053	1,204	0,654
25	5	0,784	0,795	1,124	1,277	1,392	0,881
49	7	0,898	0,910	1,203	1,484	1,503	0,956
73	8,54	0,940	0,958	1,246	1,557	1,554	0,981
<b>A<sub>i</sub> [kg/m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]</b>		<b>0,157</b>	<b>0,159</b>	<b>0,225</b>	<b>0,255</b>	<b>0,278</b>	<b>0,176</b>

### 7.3. Betonski blokovi za zidanje

Na osnovu rezultata merenja datih u Prilogu 17 sračunate su srednje vrednosti zapreminskih masa i čvrstoće blokova pri pritisku za svaku vrstu betona. Rezultati proračuna su dati u tabeli V-20.

*Tabela V-20. Karakteristike betonskog bloka za zidanje*

Vrsta betona	$\gamma_{bl}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_p$ [dN/cm <sup>2</sup> ]	
		$f_{p, min}$	$f_{p, sr}$
LLK-5	1055,1	134,4	148,4
LSLL-5	1057,9	86,4	91,5
LP-5	1030,5	82,6	87,7



**VI**

**ANALIZA I DISKUSIJA  
REZULTATA**

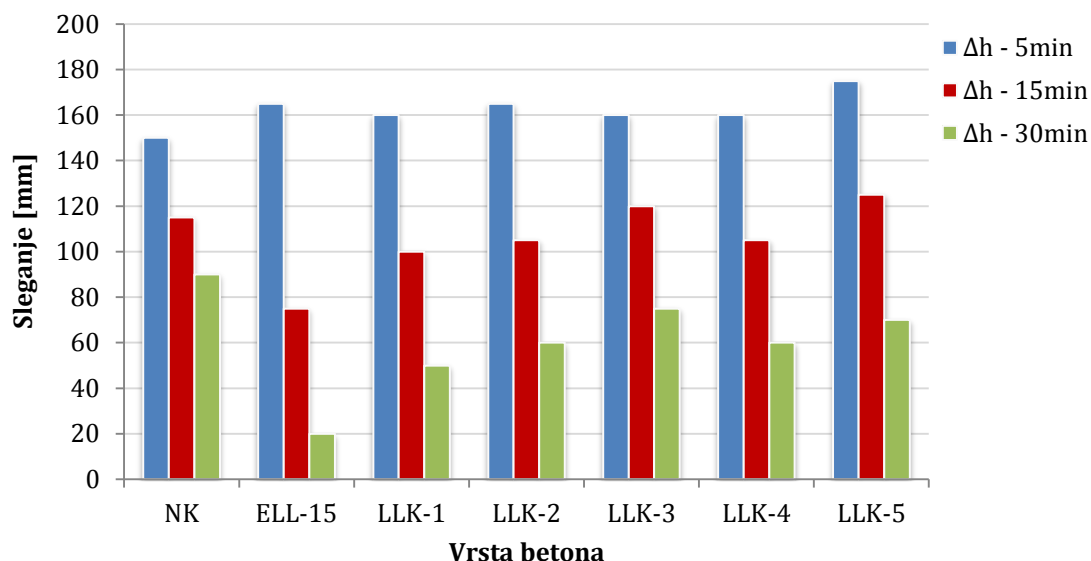




## 1. BETON SA LAKIM AGREGATOM „LECA-LATERLITE“

### 1.1. Konzistencija betona

Rezultati merenja konzistencije ispitivanih vrsta betona dati su tabeli V-4, a radi lakšeg sagledavanja promene konzistencije kroz vreme, rezultati merenja su grafički prikazani na slici VI-1.



Slika VI-1. Promena konzistencije običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ u toku prvih 30 minuta

Najveću promenu konzistencije u toku 30 minuta pokazuje beton ELL-15, što je i očekivano. Naime, u preporuci za određivanje sastava lakoagregatnog betona koju je definisao proizvođač lakog agregata ne uočava se dodatna količina vode potrebna zbog upijanja poroznog agregata. Za upotrebljeni laki agregat je izmereno upijanje od 4,6% (nakon 30 minuta) što znači da deo slobodne vode u cementnoj matrici upija agregat. Ovo se direktno odražava na brzo smanjenje mere sleganja, odnosno smanjenje ugradljivosti betona.

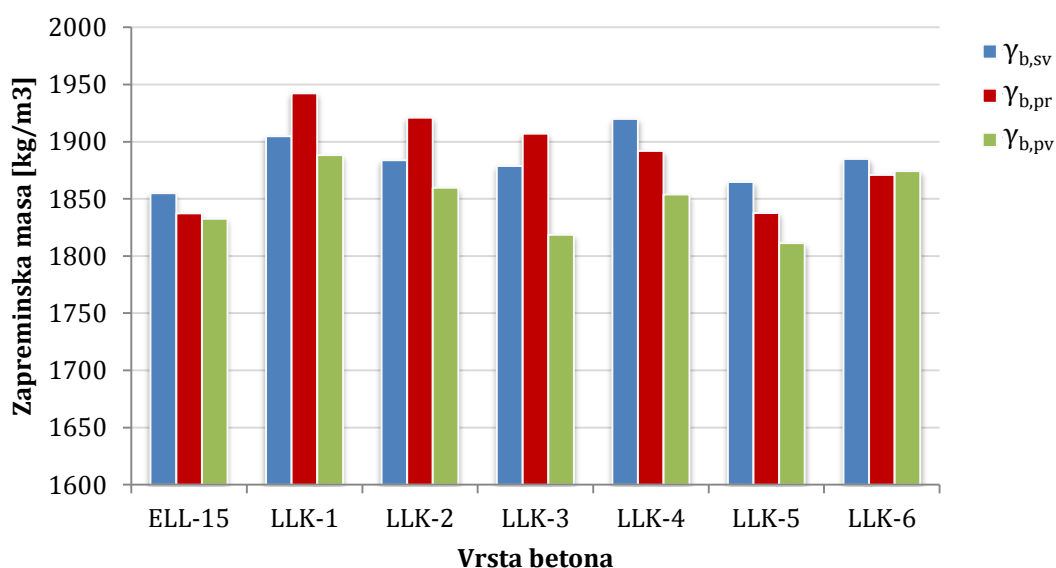
Poređenjem promene konzistencije lakoagregatnih betona sa običnim betonom (beton NK), može se videti videti uticaj poroznosti (otvorene) na promenu konzistencije. Naime, beton NK je spravljen sa rečnim agregatom koji ima zanemarljivu otvorenu poroznost, pa samim tim i upijanje vode, što za posledicu ima i najmanju promenu konzistencije.

Ostale betonske mešavine imaju sličnu promenu konzistencije kroz vreme.

Kod betona kod kojih je primenjen postupak prethodnog kvašenja poroznog agregata, dodavanjem vode koju bi ovaj agregat trebalo da upije u toku 30min, pad konzistencije kroz vreme je ublažen, a ugradljivost betona je očuvana u dužem vremenskom periodu.

## 1.2. Zapreminska masa

U cilju provere tačnosti određivanja sastava betonskih mešavina, izvršeno je poređenje vrednosti projektovane ( $\gamma_{b,pr}$ ) i dobijene ( $\gamma_{b,sv}$ ) zapreminske mase svežeg betona. Dobijene vrednosti prikazane su grafički na slici VI-2, zajedno sa projektovanim vrednostima (Tabela V-3). Upoređenjem projektovanih i izmerenih vrednosti zapreminskih masa betona u svežem stanju, konstatovano je da su razlike između njih prihvatljive i da se u analizi ostalih svojstava betona mogu koristiti projektovane količine komponentnih materijala.



Slika VI-2. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Na slici VI-2 prikazane su i vrednosti zapreminskih masa očvrslih, prirodno osušenih ispitivanih vrsta betona ( $\gamma_{b,pv}$ ). Na osnovu dobijenih vrednosti može se zaključiti da ispitivane vrste lakoagregatnih betona spadaju u konstrukcione lake betone.

## 1.3. Čvrstoća pri pritisku

U tabeli VI-1 dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od starosti, mase cementa i vodo- vezivnog faktora.

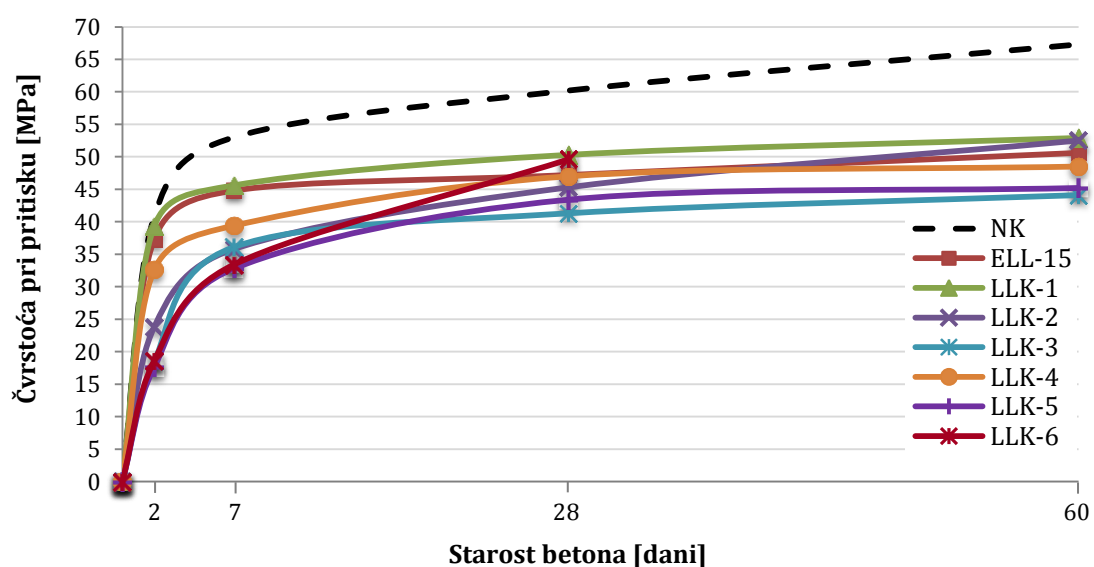
Tabela VI-1. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ( $f_c$ ) običnog betona i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Vrsta betona	NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2*	LLK-3	LLK-4	LLK-5**	LLK-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	450	350	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	<0,40	0,40	0,40	0,50	0,45	0,50	0,40
$f_{c,2}$ [MPa]	40,8	37,3	39,3	23,8	18,5	32,6	17,6	18,6
$f_{c,7}$ [MPa]	53	44,8	45,6	35,8	36,1	39,4	32,8	33,4
$f_{c,28}$ [MPa]	60,2	47,2	50,3	45,3	41,3	47	43,4	49,6
$f_{c,60}$ [MPa]	67,3	50,6	52,9	52,5	44,1	48,5	45,2	-

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin

Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena prikazana je na slici VI-3.



Slika VI-3. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Uticaj agregata na početne čvrstoće se može analizirati poređenjem dvodnevni čvrstoća pri pritisku betona koji sadrže istu količinu cementa CEM I (NK, ELL-15, LLK-1). Kako se iz tabele VI-1 može videti, vrednosti čvrstoće variraju u rasponu  $\pm 1,76$  MPa u odnosu na srednju vrednost (39,1 MPa) što znači da agregat nema značajniji uticaj na čvrstoću pri pritisku mladih betona (betona čija je starost dva dana). Ovakav zaključak se može potvrditi i analizom karaktera loma betonskih uzoraka. Kod normalnog betona je do loma došlo kroz cementnu matricu i tranzitnu zonu, a kod lakoagregatnih betona kroz cementnu matricu i zrna lakog agregata.

Odavde se može zaključiti da pri malim starostima cementna matrica i laki agregat imaju isti kvalitet, što je u skladu i sa prethodno navedenim teorijskim razmatranjima i eksperimentalnim rezultatima drugih autora.

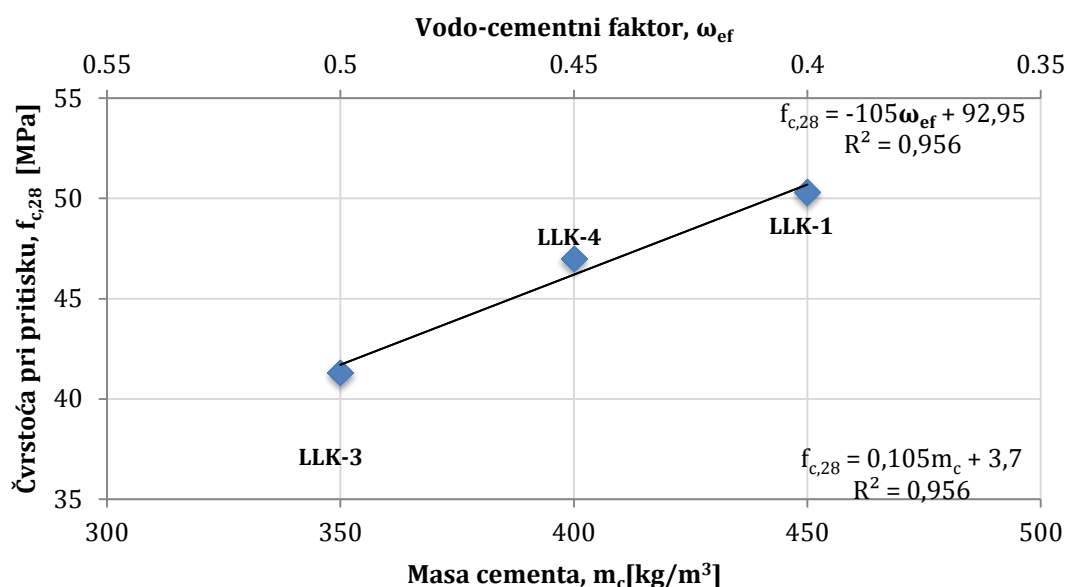
Sa povećanjem starosti povećava se i razlika u čvrstoći pri pritisku između NK i lakoagregatnih betona, što se objašnjava postepenim uključivanjem zrna krupnog rečnog agregata u prenošenje opterećenja. Ako se uzme u obzir činjenica da betoni NK i LLK-1 imaju istu vrstu i količinu "malterske" komponente i istu količinu krupnog agregata, a da je jedina razlika između njih vrsta krupnog agregata, tada se upoređenjem čvrstoća  $f_{c,7}$ ,  $f_{c,28}$  i  $f_{c,60}$  može sagledati uticaj lakog agregata na čvrstoću pri pritisku. Upotrebom lakog agregata tipa Leca-Laterlite frakcije 4-15 u betonu dobijaju se, u zavisnosti od starosti, za cca 7,4MPa, 9,9MPa i 14,4MPa niže čvrstoće pri pritisku u odnosu na beton spravljen sa rečnim agregatom. Sa slike VI-3 se vidi da je, pri starostima većim od 28 dana, kod lakoagregatnog betona trend prirasta čvrstoće znatno niži nego kod običnog betona.

Uticaj vrste/kalse cementa na čvrstoću pri pritisku može se analizirati poređenjem betona LLK-1 i LLK-2 (betoni sa istim količinama ali različitim vrstama cementa). Sa slike VI-3 se može zaključiti da se, sa povećanjem starosti betona, uticaj vrste/kalse cementa na čvrstoću pri pritisku lakoagregatnih betona značajno smanjuje. Razlika u čvrstoći je značajna kod betona male starosti i iznosi 16.6MPa i postepeno se smanjuje, tako da za betone starosti 28 dana iznosi 5.1MPa, sa tendencijom daljeg smanjenja. Ovakav rezultat se može objasniti različitim brzinama hidratacije čistog cementa i portland-kompozitnih cementa.

Na sličan način se objašnjava i uticaj zamene cementa mineralnim dodacima u betonu. Poređenjem čvrstoća LLK-1, LLK-5 i LLK-6 uočava se da se razlika u čvrstoći značajno smanjuje sa povećanjem starosti. Betoni LLK-5 i LLK-6 nakon dva dana imaju 54% manju čvrstoću, nakon sedam dana 27% manju čvrstoću da bi nakon 28 dana čvrstoća betona LLK-5 bila 14%, a betona LLK-6 1% manja. Sa dijagrama se uočava i dalji trend rasta čvrstoće, pa bi pri većim starostima čvrstoća LLK-6 mogla biti i veća. Razlike u početnim čvrstoćama se mogu objasniti sporijom hidratacijom, dok pri većim starostima na razlike utiču količina veziva, vodo-vezivni faktor kao i pucolansko svojstvo primenjenih mineralnih dodataka.

Uticaj količine cementa, a takođe i vodocementnog faktora, može se analizirati poređenjem vrednosti čvrstoća betona LLK-1, LLK-3 i LLK-4. Na slici VI-4 date su

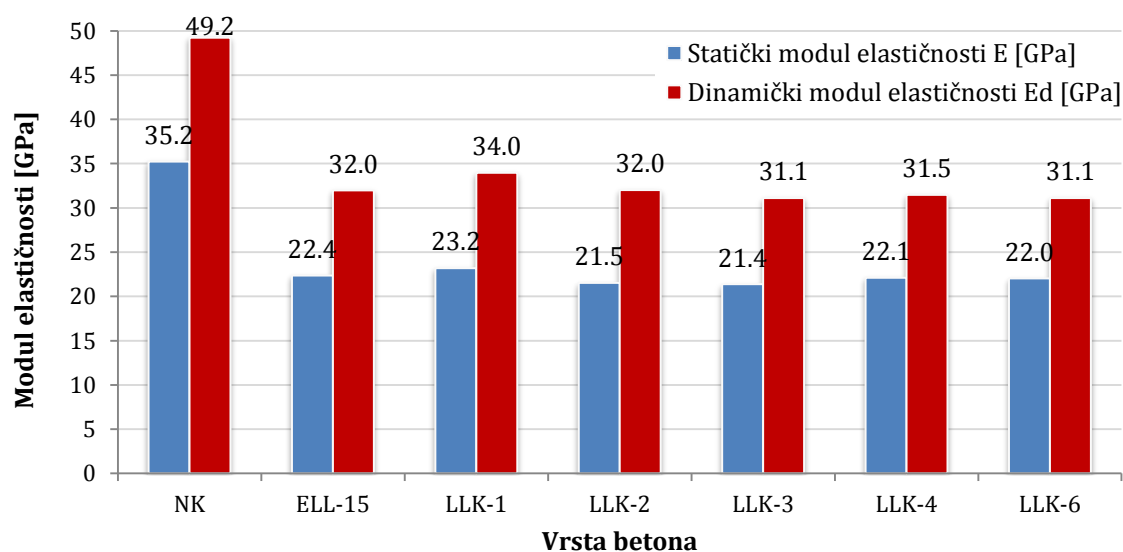
vrednosti čvrstoće u funkciji količine cementa i vodo-cementnog faktora i može se videti da se sa povećanjem količine cementa (odnosno sa smanjenjem vodo-cementnog faktora) povećava čvrstoća pri pritisku. Ova zavisnost je za analizirane količine cementa (između 350kg/m<sup>3</sup> i 450 kg/m<sup>3</sup>) gotovo linearna. Ipak, treba primetiti da se i sa količinom cementa od 350kg/m<sup>3</sup> dobijaju čvrstoće > 40MPa.



Slika VI-4. Zavisnost čvrstoće pri pritisku od količine cementa i vodo-cementnog faktora lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

#### 1.4. Modul elastičnosti

Vrednosti statičkog i dinamičkog modula elastičnosti prikazane su na slici VI-5.



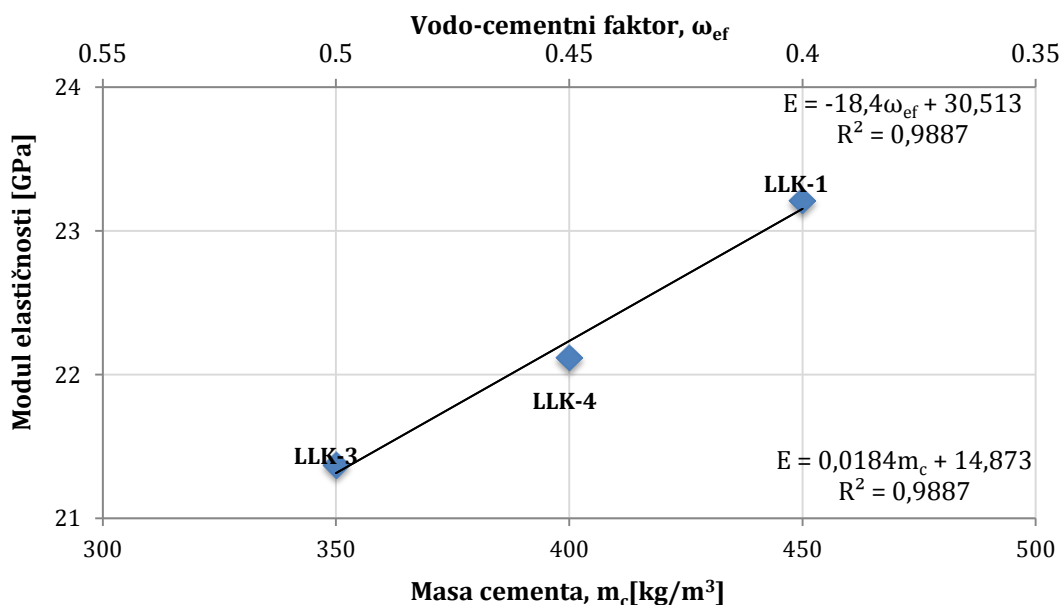
Slika VI-5. Statički i dinamički modul elastičnosti betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Poznato je da na modul elastičnosti betona utiču moduli elastičnosti njegovih komponenti kao i njihov zapreminski udeo. Kako se u betonima NK i LLK-1 razlikuje samo vrsta krupnog agregata, 44% niža vrednost modula elastičnosti lakoagregatnog betona se može objasniti manjim modulom elastičnosti lakog agregata.

Uticao količine lakog agregata može da se vidi poredeći vrednosti modula elastičnosti betona ELL-15 i LLK-1. ELL-15 ima nešto niže vrednosti modula elastičnosti što je posledica zamene dela sitnog rečnog agregata lakim agregatom lošijih mehaničkih karakteristika.

Uticao vrste/klase primenjenog cementa se može analizirati upoređenjem vrednosti modula elastičnosti betona LLK-1 i LLK-2. Sa slike VI-5 se može videti da beton LLK-2 ima 1,7GPa (7%) manji modul elastičnosti što je posledica lošijih deformacionih karakteristika cementne matrice spravljene sa cementom CEM II 32,5.

Uticao količine cementa i vodo-cementnog faktora na modul elastičnosti može da se analizira poređenjem betona LLK-1, LLK-3 i LLK-4 spravljenih sa istom vrstom ali različitim količinama cementa. Kako se sa slike VI-6 može videti, količina cementa i vodo-cementni faktor utiču na vrednost modula elastičnosti na isti način kao kod čvrstoće pri pritisku.



Slika VI-6. Zavisnost modula elastičnosti lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ od količine cementa i vodo-cementnog faktora

Upoređujući analizirane module elastičnosti za sve ispitivane betone može se uočiti da postoji direktna zavisnost između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti. Vrednosti statičkog modula elastičnosti ( $E$ ) se dosta pouzdano mogu odrediti na osnovu poznate vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ( $E_d$ ) pomoću sledećeg izraza:

$$E = 0,7 \cdot E_d \text{ [GPa]} \quad (7)$$

Rezultati poređenja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti dati su u tabeli VI-2.

*Tabela VI-2. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti običnog i lakoagregatnih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“*

	NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2	LLK-3	LLK-4	LLK-6
$E$ [GPa]	35,22	22,36	23,21	21,52	21,37	22,12	22,02
$E_d$ [GPa]	49,24	31,98	33,98	32,01	31,11	31,46	31,13
$E/E_d$ [%]	71,53	69,92	68,30	67,23	68,69	70,31	70,74
$0,7 E_d$	34,47	22,39	23,79	22,41	21,78	22,02	21,79
$\Delta E$ [%]	<b>2,14</b>	<b>-0,12</b>	<b>-2,48</b>	<b>-4,12</b>	<b>-1,90</b>	<b>0,44</b>	<b>1,04</b>

U poglavlju III dato je nekoliko modela za analitičko određivanje modula elastičnosti betona sa lakim agregatom u zavisnosti od zapreminske mase i čvrstoće betona pri pritisku. U ovom istraživanju su za određivanje  $f_c$  korišćeni uzorci oblika kocke ivice 150mm, pa je za računanje modula elastičnosti odabran izraz:

$$E_{lcm} = 0,04 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\gamma_{b,pv}^3 \cdot f_c} \text{ [GPa]} \quad (8)$$

gde su:

- $E_{lcm}$  – računski statički modul elastičnosti u GPa
- $\gamma_{b,pv}$  – zapreminska masa prirodno vlažnog betona u  $\text{kg/m}^3$
- $f_c$  – čvrstoća pri pritisku u MPa

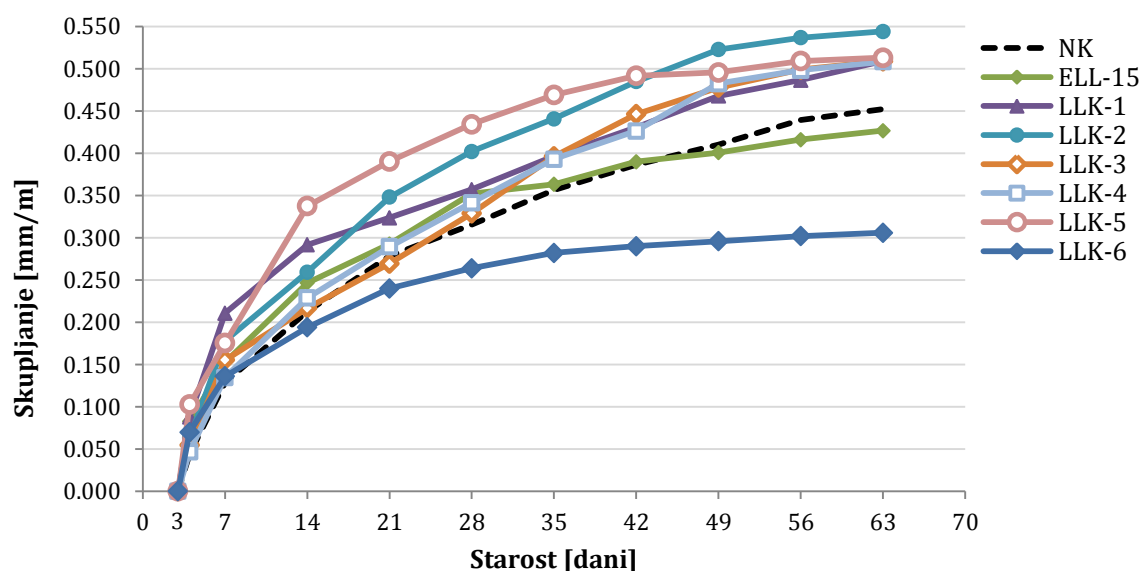
Sračunate vrednosti modula elastičnosti (na osnovu  $\gamma_{b,pv}$  i  $f_c$ ), kao i njihovo poređenje sa stvarnim (izmerenim) vrednostima modula elastičnosti, date su u tabeli VI-3. Komparativna analiza pokazuje da postoji veoma dobra zavisnost između statičkog modula elastičnosti, zapreminske mase i čvrstoće pri pritisku za lakoagregatne betone spravljene sa agregatom od ekspanirane gline. Razlike između eksperimentalno utvrđenih vrednosti statičkog modula elastičnosti ( $E$ ) i računskih vrednosti statičkog modula elastičnosti ( $E_{lcm}$ ) su <5%.

Tabela VI-3. Eksperimentalne i analitički određene vrednosti modula elastičnosti običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

	NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2	LLK-3	LLK-4	LLK-6
$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2351	1817	1902	1906	1872	1916	1858
$f_c$ [Mpa]	60,2	47,2	50,3	45,3	41,3	47,0	49,6
E [GPa]	35,22	22,36	23,21	21,52	21,37	22,12	22,02
$E_{icm}$ [GPa]	35,38	21,28	23,53	22,40	20,82	23,00	22,56
$\Delta E$ [%]	-0,45	4,81	-1,39	-4,10	2,57	-3,97	-2,46

### 1.5. Zapremske deformacije (skupljanje)

Zapremske deformacije (skupljanje) usled sušenja u toku vremena prikazane su na slici VI-7, dok su vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona, u odnosu na običan beton sa rečnim agregatom date u tabeli VI-4.



Slika VI-7. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Tabela VI-4. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ pri starosti od 63 dana

Vrsta betona	NK	ELL-15	LLK-1	LLK-2*	LLK-3	LLK-4	LLK-5**	LLK-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	450	350	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	<0,40	0,40	0,40	0,50	0,45	0,50	0,40
$\epsilon_s/\epsilon_{s,NK}$	1,00	0,94	1,13	1,20	1,13	1,12	1,13	0,68

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin



Na osnovu analize maksimalnih vrednosti izmerenih deformacija skupljanja uočava se da svi ispitivani lakoagregatni betoni imaju skupljanje u uskim granicama, odnosno 0,3–0,55mm/m. Dobile vrednosti su u skladu sa istraživanjima drugih autora, koji su za lakoagregatne betone sa agregatom od ekspandirane gline dobijali vrednosti skupljanja u granicama od 0,4-0,6mm/m.

Analizom vrednosti skupljanja pri starosti od 63 dana, može se uočiti da svi betoni spravljani sa cementom CEM I i vodo-cementnim faktorom između 0,4 i 0,5 imaju približno isto skupljanje. Pri manjim starostima, razlike u vrednostima skupljanja između pojedinih vrsta ispitivanih lakoagregatnih betona su posledica vrste upotrebljenog veziva i vodo-cementnog odnosa, dok je pri većim starostima uočljiva tendencija prestanka skupljanja.

Lakoagregatni beton ELL-15, u poređenju sa ostalim vrstama betona (sem LLK-6), ima cca 20% manju vrednost skupljanja pri sušenju, dok u poređenju sa običnim betonom NK ima cca 5% manje skupljanje. Iako je ovakav rezultat očekivan, s obzirom na to da je  $\omega_{ef} < 0,4$ , moraju se uzeti u obzir i uslovi sredine u kojima su uzorci negovani. Naime, kod betona NK i ELL-15 je vlažnost sredine varirala u rasponu 55-81% ( $\varphi_{sr}=70\%$ ), pri čemu je uglavnom iznosila više od 66% (Prilog 14), dok je kod ostalih vrsta betona vlažnost sredine uglavnom bila manja ( $\varphi_{sr}=65\%$ ), što je uslovalo brže sušenje a samim tim i veća skupljanja.

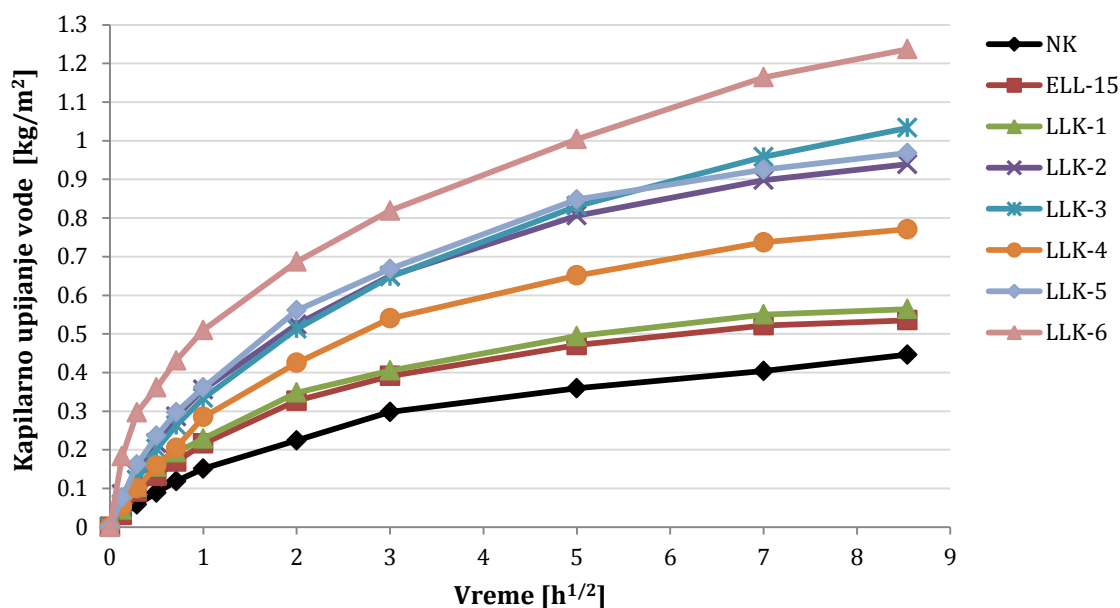
Kod betona LLK-6 izmerena skupljanja su 1,4-1,7 puta manja u odnosu na ostale vrste, što se može objasniti i manje poroznom strukturom zbog „pakovanja“ zrna, zahvaljujući i metakaolinu i letećem pepelu, ali i kontrolisanim uslovima nege ( $\varphi=70\pm 5\%$ ).

U odnosu na beton sa prirodnim agregatom NK, može se zaključiti da betoni grupe LLK uglavnom imaju 10% do 20% veća skupljanja, sem ELL-15 sa 6% i LLK-6 sa 32% manjim skupljanjem. Veće skupljanje se može pripisati kombinovanom uticaju uslova nege, vrste cementa i vodo-vezivnog faktora, dok je kod betona ELL-15 i LLK-6 skupljanje manje zbog nižeg vodo-vezivnog faktora, odnosno manje kapilarne poroznosti usled primene mineralnih dodataka.

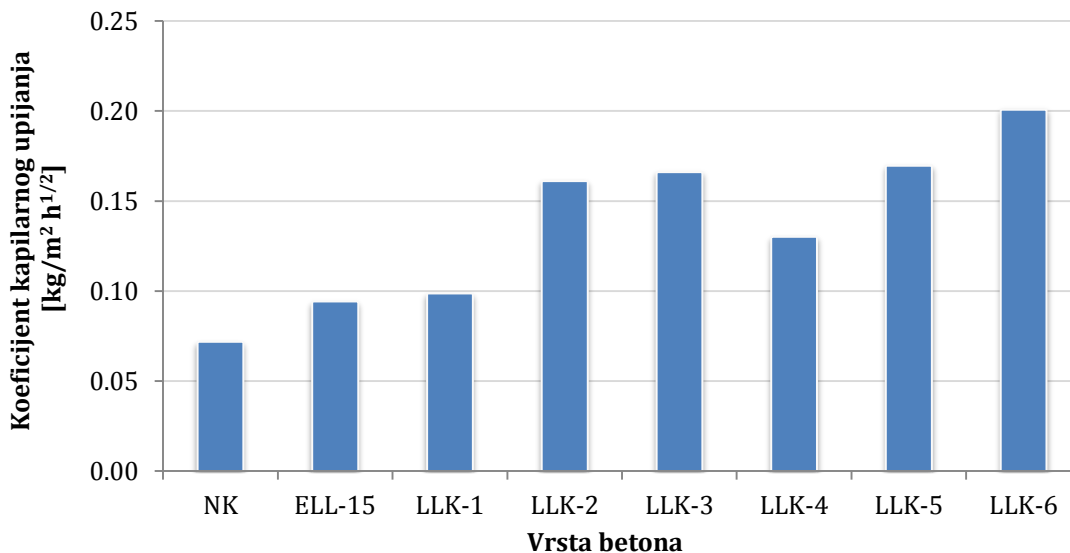
### **1.6. Kapilarno upijanje vode**

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u poglavlju V, na slici VI-8 prikazana je kinetika kapilanog upijanja vode betona iz grupe LLK i betona NK u periodu od 73 časa. Na osnovu količine kapilarno upijene vode u periodu do 25 sati, primenom

obrasca (6) sračunate su vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja. Dobijeni rezultati prikazani su na slici VI-9.



Slika VI-8. Kapilarno upijanje vode običnog i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ u periodu od 73 sata



Slika VI-9. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog betona i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Najmanje kapilarno upijanje vode pokazuje beton NK što je posledica primenjene vrste agregata. Za spravljanje ove betonske mešavine korišćen je rečni i sitan i krupan agregat koji se smatraju za neporozne agregate. Ostale vrste betona, koje su spravljenе sa lakim agregatom, pokazuju veće kapilarno upijane vode. Pri tome slične

vrednosti kapilarnog upijanja imaju betoni ELL-15 i LLK-1 i betoni LLK-2, LLK-3 i LLK-5.

Uticaj vrste agregata na upijanje vode može se sagledati poređenjem betona LLK-1 i NK. Analizom vrednosti merenja količine upijene vode tokom vremena (Slika VI-8) može se videti da beton LLK-1 ima  $\approx 80\%$  veće upijanje nakon 5 minuta i  $\approx 55\%$  veće upijanje nakon 4 sata, dok se razlika upijanja nakon toga ne menja značajno i iznosi cca 36%, pa se može zaključiti da je dalje povećanje količine kapilarno upijene vode posledica mehanizma kapilarnog upijanja cementnog kamena.

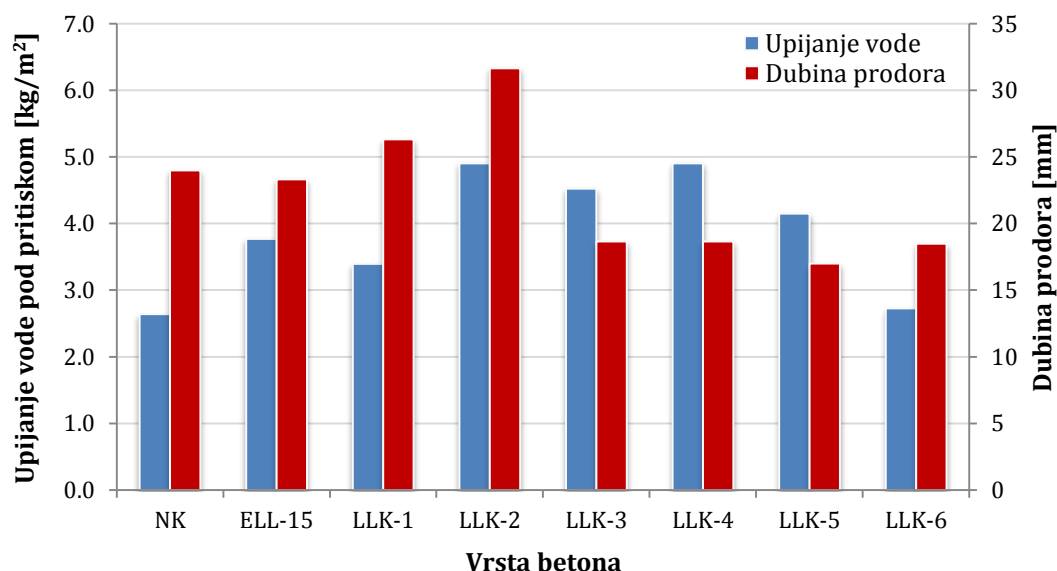
Uticaj količine cementa na veličinu kapilarnog upijanja vode može se sagledati upoređenjem betona LLK-1, LLK-3 i LLK-4. Najveći udeo cementne matrice (uz najmanju vrednost vodo-cementog faktora) u jediničnoj zapremini betona ima beton LLK-1, a najmanji udeo (uz najveći vodocementi faktor) ima beton LLK-3. Analizom vrednosti upijanja se vidi da beton LLK-4 pokazuje cca 34% veće upijanje nakon 73h, dok beton LLK-3 pokazuje cca 80% veće upijanje u odnosu na beton LLK-1. Na osnovu ovog se može zaključiti da sa povećanjem udela cementnog kamena količina kapilarno upijene vode opada. Takođe, uočava se da sa porastom vodocementog faktora, raste i količina kapilarno upijene vode.

Vrednost kapilarnog upijanja vode zavisi i od vrste primenjenog veziva. Poređenjem betona LLK-1, LLK-2, LLK-5 i LLK-6 uočava se da beton LLK-1, koji je spravljen sa cementom CEM I pokazuje najmanje kapilarno upijanje, a LLK-2 (CEM II) i LLK-5 i LLK-6 (CEM I+leteći pepeo+metakaolin) veće kapilarno upijanje. U poređenju sa betonom LLK-1, beton LLK-2 pokazuje  $\approx 66\%$  veće upijanje, beton LLK-5 pokazuje  $\approx 71\%$ , dok beton LLK-6 ima značajno veće ( $\approx 120\%$ ) upijanje. Kako svi beton imaju približno isti zapreminski udeo vezivne matrice u jediničnoj zapremini betona, ovakvi rezultati mogu da se objasne bržom hidratacijom i samim tim manjom kapilarnom poroznošću vezivnih matrica na bazi čistog portland cementa.

Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode kod analiziranih betona ukazuju na različitu kinetiku kapilarnog upijanja vode. Ako se iz analize izuzmu rezultati kapilarnog upijanja vode betona LLK6, najveću kinetiku kapilarnog upijanja vode imaju betoni LLK-2, LLK-3 i LLK-5 ( $A_{i,sr}=0.166\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ), zatim beton LLK-4 ( $A_{i,sr}=0.130\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ) a najmanju kinetiku upijanja vode imaju betoni ELL-15 i LLK1 ( $A_{i,sr}=0.096\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ). U poređenju sa običnim betonom NK ( $A_{i,sr}=0.072\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ ), sve vrste lakoagregatnog betona imaju 1,3-2,3 puta veće vrednosti kapilarnog upijanja.

### 1.7. Upijanje vode pod pritiskom

Dobijeni rezultati merenja upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora prikazani su na slici VI-10.



Slika VI-10. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“

Upoređenjem rezultata merenja dubine prodora vode pod pritiskom u betonu sa „Leca-Laterlite“ agregatom sa kriterijumima za ocenu klase vodonepropustljivosti (SRPS U.M1.206-1/1) zaključeno je da betoni LLK-3, LLK-4, LLK-5 i LLK-6 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-III, za koju je najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton ograničena na 20mm, dok betoni ELL-15, LLK-1 i LLK-2 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-II, za koju najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton iznosi 30mm. Beton NK ima nešto veće vrednosti dubine prodora vode u odnosu na betone LLK-3, LLK-4, LLK-5 i LLK-6, što se objašnjava upotrebom neporoznog agregata. Prema kriterijumima za ocenu klase vodonepropustljivosti, beton NK pripada klasi vodonepropustljivosti V-II.

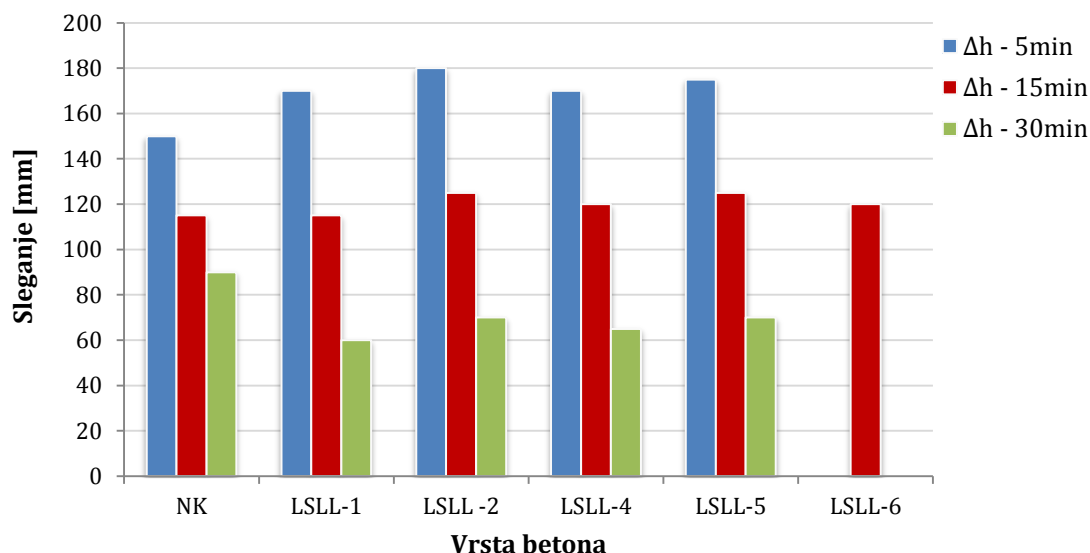
Ukoliko se betoni upoređuju sa aspekta količine upijene vode, može se uočiti da betoni iz grupe LLK imaju veće upijanje vode u odnosu na beton NK, što je posledica otvorene poroznosti upotrebljenog agregata za spravljanje betona.

Opšti zaključak je da se betoni grupe LLK imaju najčešće manju ili jednaku dubinu prodora vode kao i beton NK, ali imaju veću količinu upijene vode zbog veće poroznosti i većeg upijanja vode upotrebljenog agregata.

## 2. BETON SA LAKIM AGREGATOM „ZAG“

### 2.1. Konzistencija betona

Dobijeni rezultati merenja konzistencije ispitivanih vrsta betona prikazani su na slici VI-11.



Slika VI-11. Promena konzistencije običnog i betona sa lakim agregatom „ZAG“ u toku prvih 30 minuta

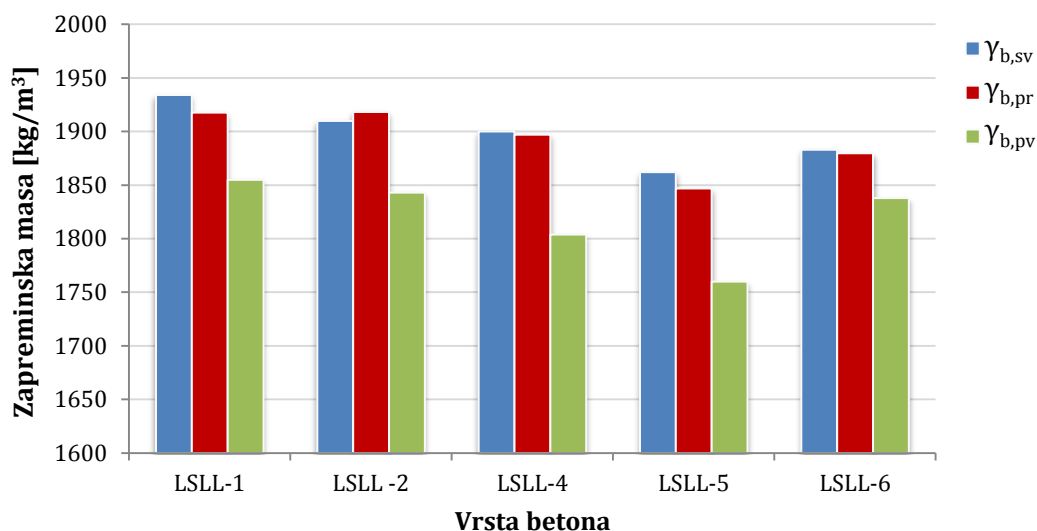
Poređenjem promene konzistencije lakoagregatnih betona sa običnim betonom (beton NK), može se videti uticaj otvorene poroznosti agregata na promenu konzistencije. Naime, beton NK je spravljen sa rečnim agregatom koji ima zanemarljivu otvorenu poroznost, pa samim tim i upijanje vode, što za posledicu ima i najmanju promenu konzistencije.

Ostale betonske mešavine imaju sličnu promenu konzistencije kroz vreme, što je posledica primenjenog postupka prethodnog kvašenja poroznog agregata. Dodavanjem vode koju bi ovaj agregat trebalo da upije u toku 30min, pad konzistencije kroz vreme je ublažen, a ugradljivost betona je očuvana u dužem vremenskom periodu.

### 2.2. Zapreminska masa

Dobijene vrednosti projektovane ( $\gamma_{b,pr}$ ) i dobijene ( $\gamma_{b,sv}$ ) zapreminske mase svežeg betona prikazane su grafički na slici VI-12. Kako su razlike između projektovanih i izmerenih vrednosti zapreminskih masa betona u svežem stanju prihvatljive, u analizi

ostalnih svojstava betona mogu se koristiti projektovane količine komponentnih materijala.



Slika VI-12. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „ZAG“

Na slici VI-12 prikazane su i vrednosti zapreminskih masa očvrstlih, prirodno osušenih ispitivanih vrsta betona ( $\gamma_{b,pv}$ ). Na osnovu dobijenih vrednosti može se zaključiti da ispitivane vrste lakoagregatnih betona spadaju u konstrukcione lake betone.

### 2.3. Čvrstoća pri pritisku

U tabeli VI-5 dati su rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku u zavisnosti od starosti, mase cementa i vodo-vezivnog faktora.

Tabela VI-5. Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku ( $f_c$ ) običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

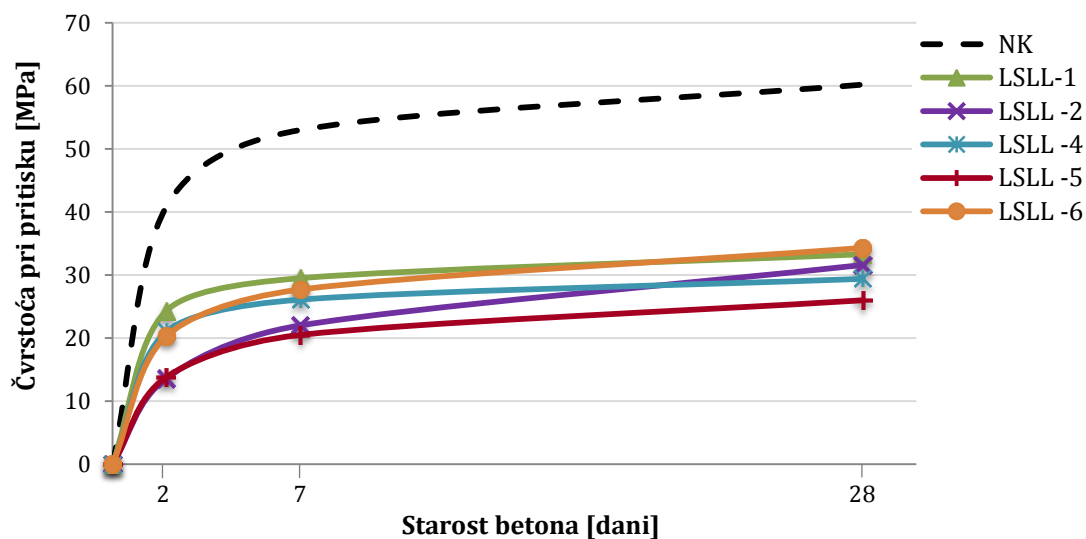
Vrsta betona	NK	LSLL-1	LSLL-2*	LSLL-4	LSLL-5**	LSLL-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,40
$f_{c2}$ [MPa]	40,8	24,3	13,6	21	13,8	20,3
$f_{c7}$ [MPa]	53	29,5	22	26,1	20,5	27,7
$f_{c28}$ [MPa]	60,2	33,3	31,6	29,4	26,0	34,3
$f_{c28}^{***}$ [MPa]	-	34,3	29,4	30,1	28,5	-

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin

\*\*\* uzorci negovani na vazduhu

Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena prikazana je na slici VI-13.



Slika VI-13. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

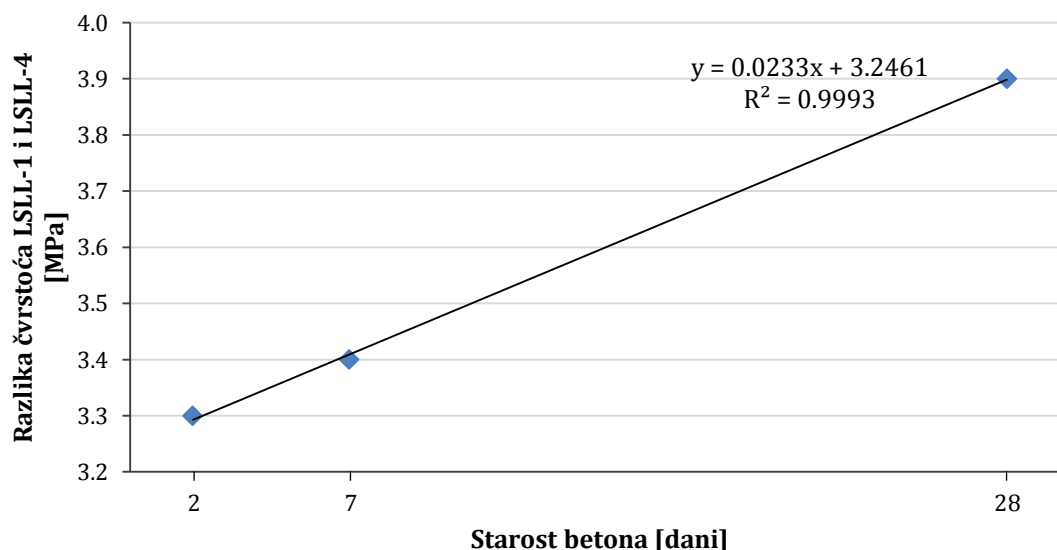
Uticaj agregata na čvrstoću pri pritisku može se analizirati poređenjem čvrstoća betona koji sadrže istu vrstu/klasu i količinu cementa CEM I (LSSL-1 i NK). Iako bi se za početne čvrstoće ( $f_{c,2}$  i  $f_{c,7}$ ) očekivalo da budu približno iste, kako se sa slike VI-13 može videti, ovde je razlika cca 60% što se objašnjava razlikama u kvalitetu malterske matrice. Kod betona LSSL malterska matrica ima lošije mehaničke karakteristike u odnosu na beton NK, jer je jedan deo rečnog peska u betonima LSSL supstituisan sitnozrnim lakim agregatom (Leca Laterlite 2-3mm). Sa povećanjem starosti povećava se i razlika u čvrstoći pri pritisku između NK i LSSL-1, što se objašnjava postepenim uključivanjem zrna krupnog rečnog agregata u prenošenje opterećenja, za razliku od lakih agregata čiji se doprinos čvrstoći betona kroz vreme smanjuje.

Sa povećanjem starosti betona, uticaj vrste/klase cementa na čvrstoću pri pritisku lakoagregatnih betona se postepeno smanjuje. Predmetni zaključak se potvrđuje poređenjem betona LSSL-1 i LSSL-2. Razlika u čvrstoći je značajna kod betona male starosti (dva dana) i iznosi 10.7MPa, dok kod betona starosti 28 dana iznosi 1.7MPa što je posledica različite brzine hidratacije čistog cementa i portland-kompozitnih cementa.

Na sličan način se objašnjava i uticaj zamene cementa mineralnim dodacima u betonu. Poređenjem čvrstoća LSSL-1, LSSL-5 i LSSL-6 uočava se da se razlika u čvrstoći značajno smanjuje sa povećanjem starosti. Nakon dva dana, beton LSSL-5 ima 43%, a

beton LSSL-6 16% nižu čvrstoću. Nakon sedam dana, razlika u čvrstoćama iznose 30% i 6%, da bi nakon 28 dana LSSL-5 imao 22% manju čvrstoću, a beton LSSL-6 3% veću čvrstoću. Razlike u početnim čvrstoćama se mogu objasniti sporijom hidratacijom zbog prisustva mineralnih dodataka. Pri većim starostima, manja čvrstoća betona LSSL-5 uslovljena je znatno manjom količinom cementa u odnosu na LSSL-1 (razlika u količini cementa iznosi 206kg) i većim vodo-cementim faktorom. Iako je i u betonu LSSL-6 masa cementa manja (razlika u količini cementa iznosi 132kg), mala razlika u čvrstoćama betona LSSL-1 i LSSL-6 se može objasniti istim vodo-vezivnim faktorom i pucolanskim svojstvom mineralnih dodataka.

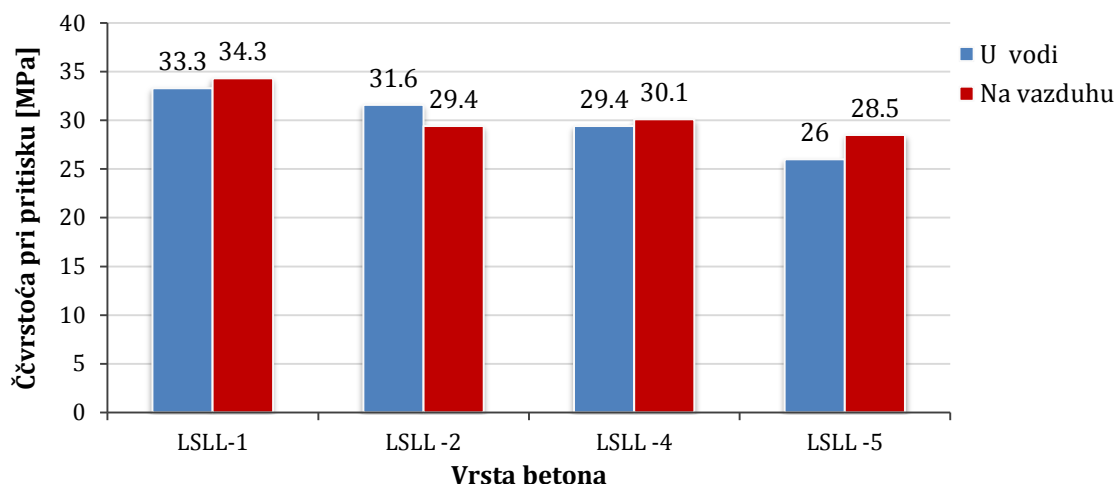
Uticaj količine cementa, a takođe i vodo-cementnog faktora, se može analizirati poređenjem vrednosti čvrstoća betona LSSL-1 i LSSL-4. Sa slike VI-13 može da se vidi da sa povećanjem količine cementa (odnosno smanjenjem vodo-cementnog faktora) raste čvrstoća pri pritisku. Upoređenjem vrednosti početnih i kasnijih čvrstoća, uočava se da se razlika čvrstoća vrlo malo menja (od 3,3MPa za  $f_{c,2}$  do 3,9MPa za  $f_{c,28}$ ) i da je promena skoro linearna (Slika VI-14), što je posledica kvalitetnijeg cementnog kamena i manjeg zapreminskog udela lakog agregata kod betona LSSL-1. Ipak, treba obratiti pažnju na to da je i sa 400kg/m<sup>3</sup> cementa postignuta čvrstoća pri pritisku od ≈30MPa.



Slika VI-14. Razlika čvrstoća betona LSSL-1 i LSSL-4 u zavisnosti od starosti betona

Upoređenjem 28-dnevnih čvrstoća lakoagregatnih betona koji su različito negovani (u vodi i na vazduhu), može se sagledati uticaj "samonegovanja" betona (Slika VI-15).



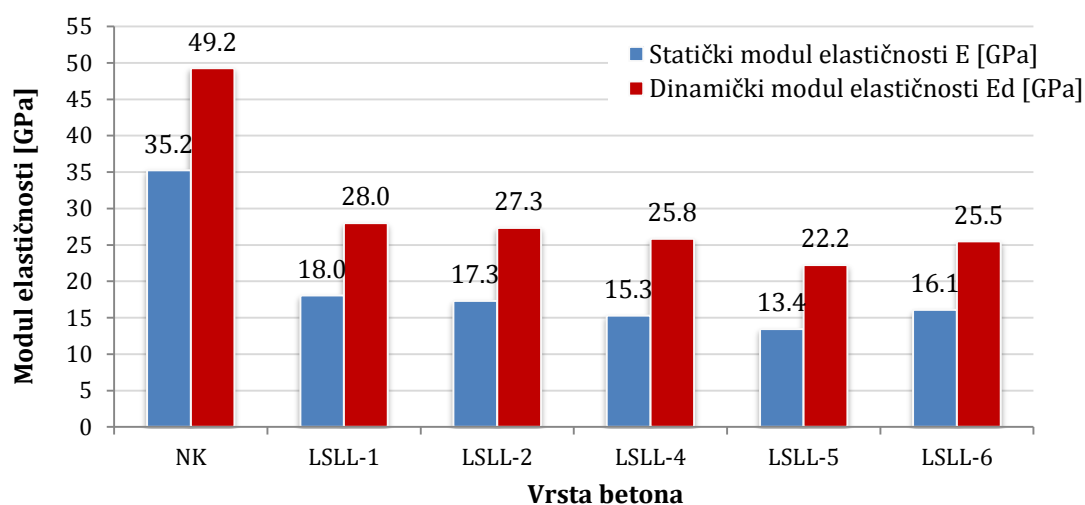


Slika VI-15. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji načina negovanja betona sa lakim agregatom „ZAG“

Upoređenjem predmetnih čvrstoća pri pritisku, uočava se da je razlika u čvrstoćama mala i kreće se od -2,5MPa do 2,2MPa, pa se može zaključiti da su laki agregati prethodnim kvašenjem akumulirali dovoljnu količinu vode koja je omogućila normalno odvijanje procesa hidratacije i bez negovanja betona u vlažnoj sredini. Nešto veće čvrstoće su dobijene na uzorcima koji su negovani na vazduhu, što je posledica stanja u kome su uzorci ispitani. Naime, poznato je da voda u porama betona ima negativan uticaj na vrednost čvrstoće pri pritisku, odnosno smanjuje čvrstoću, a uzorci betona koji su negovani u vodi ispitani su u vodom zasićenom stanju.

## 2.4. Modul elastičnosti

Vrednosti statičkog i dinamičkog modula elastičnosti prikazane su na slici VI-16.



Slika VI-16. Statički i dinamički modul elastičnosti običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

Kao i kod betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ i ovde je evidentan uticaj krupnog agregata na modul elastičnosti. Razlika vrednosti za betone NK i LSSL-1 još veća (49%), a posledica je lošijih karakteristika krupnog lakog agregata i povećanja deformacionih karakteristika cementne matrice usled zamene dela sitnog rečnog agregata sitnozrnim lakim agregatom.

Uticaj vrste/klase cementa se može videti poređenjem betona LSSL-1 i LSSL-2. Kako je beton LSSL-2 spravljen sa cementom CEM II, cementa matrica ima lošije deformacione karakteristike, pa je nešto niža vrednosti modula elastičnosti (razlika iznosi 0,74GPa, odnosno 4%) i očekivana.

Uticaj količine cementa i vodo-cementog faktora na modul elastičnosti može da se analizira poređenjem betona LSSL-1, LSSL-4 koji su spravljeni sa istom vrstom ali različitim količinama cementa. Kako se sa slike VI-16 može videti, sa smanjenjem količine cementa (odnosno povećanjem vodo-cementog faktora), vrednost modula elastičnosti opada.

Upoređujući analizirane module elastičnosti za sve ispitivane betone može se uočiti da postoji direktna zavisnost između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti. Vrednosti statičkog modula elastičnosti ( $E$ ) se dosta pouzdano mogu odrediti na osnovu poznate vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ( $E_d$ ), korišćenjem sledećeg izraza:

$$E = 0,62 \cdot E_d \text{ [GPa]} \quad (9)$$

Rezultati poređenja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti dati su u tabeli VI-6.

*Tabela VI-6. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „ZAG“*

	<b>LSSL-1</b>	<b>LSSL-2</b>	<b>LSSL-4</b>	<b>LSSL-5</b>	<b>LSSL-6</b>
E [GPa]	18,02	17,28	15,27	13,43	16,05
$E_d$ [GPa]	27,96	27,32	25,81	22,22	25,46
$E/E_d$ [%]	64,45	63,25	59,16	60,44	63,04
$0.62 E_d$	17,34	16,94	16,00	13,78	15,79
<b><math>\Delta E</math> [%]</b>	<b>3,80</b>	<b>1,98</b>	<b>-4,80</b>	<b>-2,58</b>	<b>1,65</b>

Kako je u svim recepturama udeo lakog agregata približno isti, a odstupanja vrednosti statičkog modula elastičnosti od srednje vrednosti u granicama  $\pm 1,8\text{GPa}$  ( $\approx 11\%$ ) i dinamičkog modula  $\pm 2,2\text{GPa}$  ( $\approx 8,7\%$ ), razlike koje se javljaju u vrednostima modula elastičnosti mogu da se pripišu prvenstveno svojstvima vezivne matrice.

Sračunate vrednosti modula elastičnosti na osnovu izraza (8), kao i njihovo poređenje sa stvarnim (izmerenim) vrednostima modula elastičnosti, date su u tabeli VI-7.

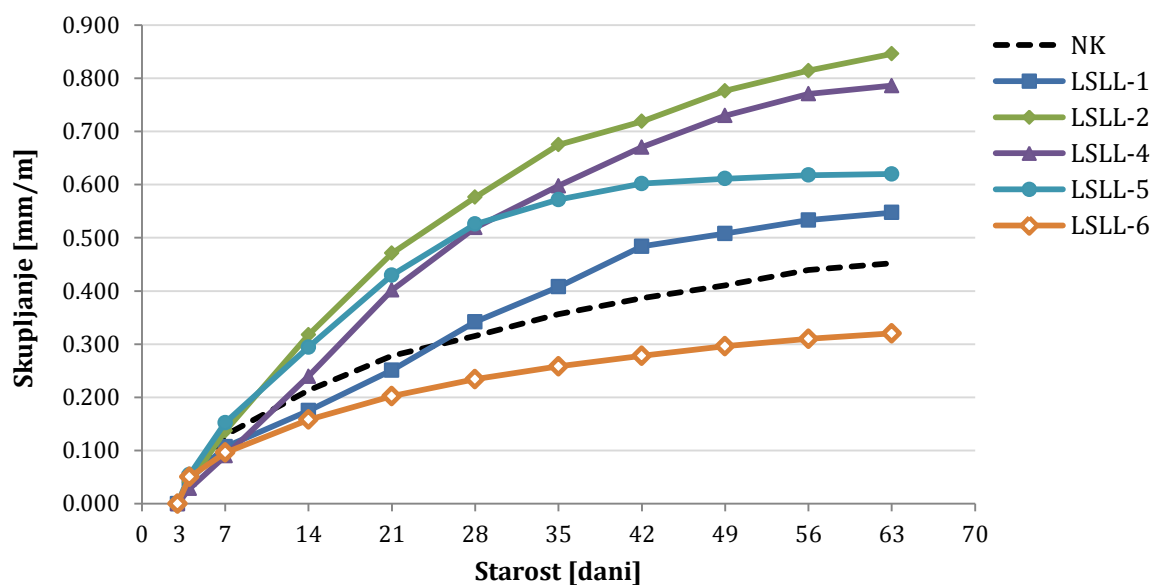
Tabela VI-7. Eksperimentalne i analitički određene vrednosti modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „ZAG“

	LSLL-1	LSLL-2	LSLL-4	LSLL-5	LSLL-6
$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1924	1915	1888	1866	1847
$f_c$ [Mpa]	33,3	31,6	29,4	26,0	34,3
E [GPa]	18,02	17,28	15,27	13,43	16,05
$E_{cm}$ [GPa]	19,48	18,84	17,79	16,44	18,60
$\Delta E$ [%]	-8,10	-9,05	-16,52	-22,42	-15,86

Komparativna analiza prikazana u tabeli VI-7 pokazuje da su analitičke vrednosti 8-22% veće od eksperimentalno određenih, odnosno da se primenom analitičkog izraza dobijaju veće vrednosti modula elastičnosti od stvarnih, bez obzira na sastav betona sa „ZAG“ lakim agregatom.

## 2.5. Zapreminske deformacije (skupljanje)

Zapreminske deformacije (skupljanje) betona usled sušenja u toku vremena prikazane su na slici VI-17, dok su vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona u odnosu na običan beton sa rečnim agregatom date u tabeli VI-8.



Slika VI-17. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

Tabela VI-8. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „ZAG“ pri starosti od 63 dana

Vrsta betona	NK	LSLL-1	LSLL-2*	LSLL-4	LSLL-5**	LSLL-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,40
$\epsilon_s / \epsilon_{s,NK}$	<b>1,00</b>	<b>1,21</b>	<b>1,87</b>	<b>1,74</b>	<b>1,37</b>	<b>0,57</b>

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin

Kao i kod betona LLK, i ovde je uočljiv uticaj uslova sredine u kojoj su negovani uzorci. Sve vrste betona LSLL (sem LSLL-6) negovane su u sredini sa relativnom vlažnošću koja je varirala u rasponu 51-61% ( $\varphi_{sr}=55\%$ ), dok je beton LSLL-6 negovan u kontrolisanim uslovima ( $\varphi=70\pm 5\%$ ). Na osnovu analize vrednosti izmerenih deformacija skupljanja uočava se da ispitivani lakoagregatni betoni iz grupe LSLL imaju skupljanje u relativno uskim granicama, odnosno 0.55 - 0.85mm/m, sem betona LSLL-6 čije je skupljanje znatno manje i iznosi 0,32mm/m.

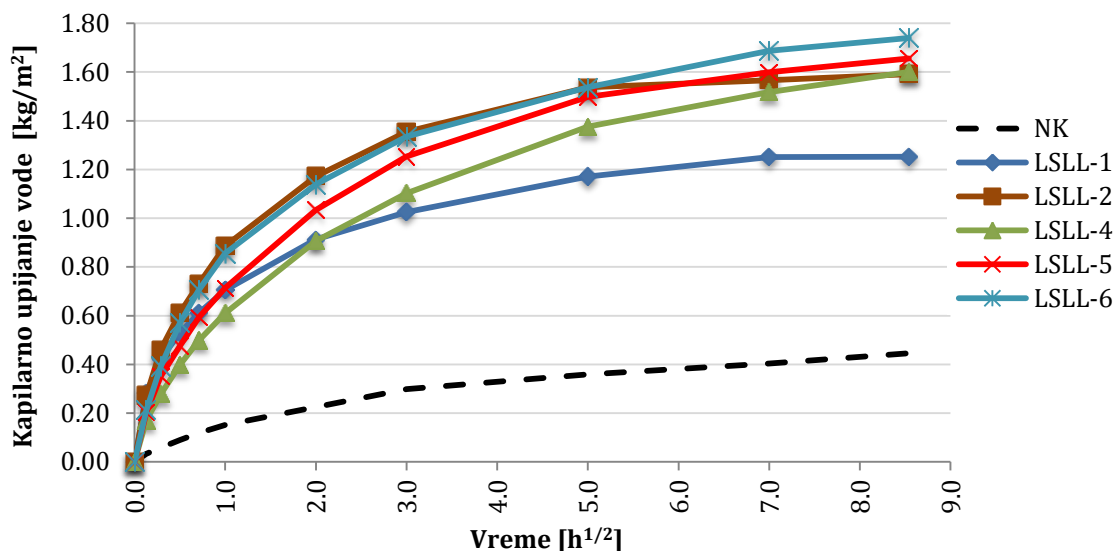
Razlike u vrednostima skupljanja između pojedinih vrsta ispitivanih lakoagregatnih betona grupe LSLL posledica su vrste upotrebljenog veziva i vodo-vezivnog odnosa. Lakoagregatni beton LSLL-1 sa cementom CEM I i vodo-cementnim faktorom  $\omega_{ef}=0,4$  ima najmanju vrednost skupljanja pri sušenju, dok najveću vrednost skupljanja ima beton LSLL-2 sa cementom CEM II zbog sporije hidratacije cementa, odnosno veće kapilarne poroznosti.

Upoređujući vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona sa cementom CEM I, ali sa različitim vodo-cementnim faktorima (LSLL1 i LSLL4), zaključeno je da se sa povećanjem vodo-cementnog faktora povećava skupljanje betona.

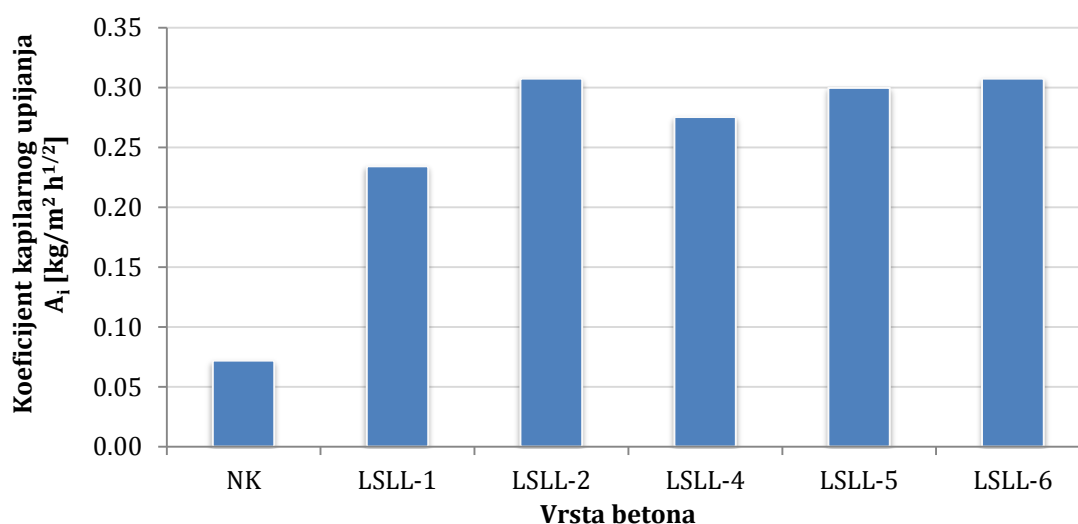
U odnosu na beton sa prirodnim agregatom NK, može se zaključiti da betoni grupe LSLL imaju povećano skupljanje. Povećanje skupljanja se kreće od 20% pa do 90%, ali treba napomenuti da je beton NK negovan u sredini sa  $\varphi_{sr}=70\%$ , pa je veće skupljanje betona sa „ZAG“ agregatom posledica kombinovanog uticaja uslova nege, vrste veziva i vodo-vezivnog faktora.

## 2.6. Kapilarno upijanje vode

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u poglavlju V, na slici VI-18 prikazana je kinetika kapilarnog upijanja vode betona iz grupe LSSL i betona NK u periodu od 73 časa. Na osnovu količine kapilarno upijene vode u periodu do 25 sati, primenom obrasca (6) sračunate su vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja. Dobijeni rezultati prikazani su na slici VI-19.



Slika VI-18. Kapilarno upijanje vode običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“ u periodu od 73 sata



Slika VI-19. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

Upoređenjem vrednosti kapilarnog upijanja LSSL betona, uočava se da najmanje kapilarno upijanje pokazuje beton LSSL-1. Ostale vrste LSSL betona pokazuju veće

kapilarno upijanje vode, pri čemu betoni LSSL-2, LSSL-4 i LSSL-5 imaju slične konačne vrednosti kapilarnog upijanja ( $U_{sr} \approx 1,62 \text{ kg/m}^2$ ).

Uticao vrste agregata na upijanje vode može se sagledati poređenjem betona LSSL-1 i NK. Analizom vrednosti merenja količine upijene vode tokom vremena (Slika VI-18), može se videti da beton LSSL-1 ima cca sedam puta veće upijanje nakon 5 minuta i 2,8 puta veće upijanje nakon 73h. Velika razlika upijanja u početku je posledica kinetike upijanja lakog agregata (Prilog 2, Tabela 12), dok kasnije agregat ne pokazuje značajnu promenu količine upijene vode, pa se može zaključiti da je dalje povećanje količine kapilarno upijene vode posledica poroznosti cementnog kamena.

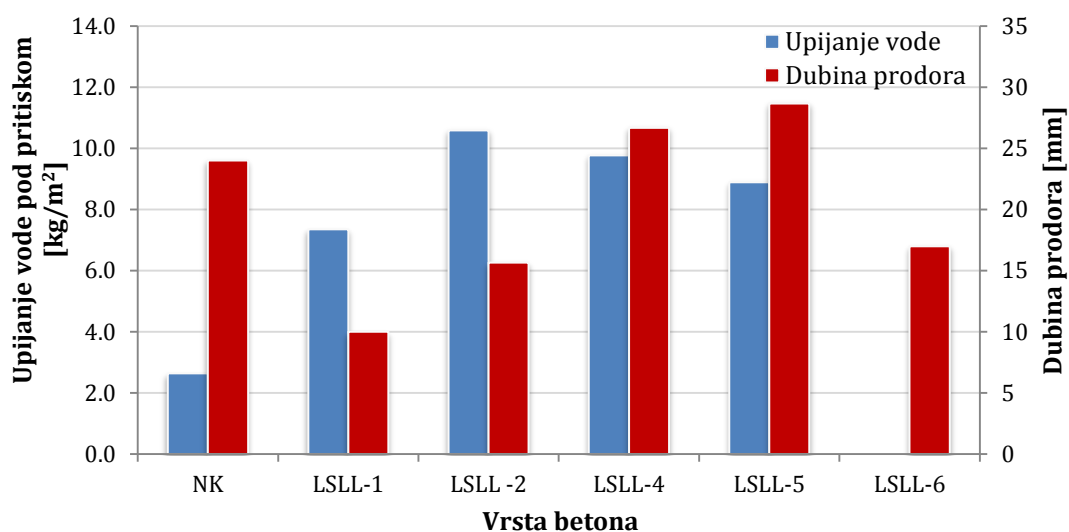
Uticao količine cementa na veličinu kapilarnog upijanja vode može se sagledati upoređenjem betona LSSL-1 i LSSL-4. Analizom vrednosti upijanja se vidi da beton LSSL-4 pokazuje cca 30% veće upijanje nakon 73h, što se može pripisati nešto većem učešću krupnog agregata i većoj poroznosti cementnog kamena.

Vrednost kapilarnog upijanja vode zavisi i od vrste primenjenog veziva. Poređenjem betona LSSL-1, LSSL-2, LSSL-5 i LSSL-6 uočava se da beton LSSL-1, koji je spravljen sa cementom CEM I ima najmanje kapilarno upijanje, a LSSL-2 (CEM II) i LSSL-5 i LSSL-6 (CEM I+leteći pepeo+metakaolin) pokazuju veće kapilarno upijanje. U poređenju sa betonom LSSL-1, beton LSSL-2 pokazuje  $\approx 27\%$  veće upijanje, beton LSSL-5 pokazuje  $\approx 32\%$ , dok beton LSSL-6 ima  $\approx 39\%$  veće upijanje. Kako svi beton imaju približno isti zapreminski udeo vezivne matrice u jediničnoj zapremini betona, najmanje kapilarno upijanje betona LSSL-1 može se objasniti najmanjom kapilarnom poroznošću što je posledica najveće brzine hidratacije.

Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode kod analiziranih betona ukazuju na različitu kinetiku kapilarnog upijanja vode. Betoni LSSL-2, LSSL-5 i LSSL-6 imaju najveću kinetiku kapilarnog upijanja vode ( $A_{i,sr} = 0,305 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ ), zatim beton LSSL-4 ( $A_{i,sr} = 0,275 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ ) a najmanju kinetiku upijanja vode ima beton LSSL-1 ( $A_{i,sr} = 0,234 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ ). U poređenju sa običnim betonom NK ( $A_{i,sr} = 0,072 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0.5}$ ), sve vrste lakoagregatnog betona imaju 3,2-4,3 puta veće vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja.

## 2.7. Upijanje vode pod pritiskom

Dobijeni rezultati merenja upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora prikazani su na slici VI-20.



Slika VI-20. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „ZAG“

Upoređenjem rezultata merenja dubine prodora vode pod pritiskom u betonu sa „ZAG“ agregatom sa kriterijumima za ocenu klase vodonepropustljivosti (SRPS U.M1.206-1/1) zaključeno je da betoni LSSL-1, LSSL-2 i LSSL-6 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-III za koji je najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton ograničena na 20mm, a betoni LSSL-4 i LSSL-5 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-II za koju najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton iznosi 30mm. Ovakvi rezultati su u potpunosti u korelaciji sa vrednostima vodo-cementnog, odnosno vodo-vezivnog faktora. Betoni LSSL-1, LSSL -2, i LSSL-6 imaju iste vrednosti vodovezivnog faktora i pripadaju istoj klasi VDP. Razlike u dubini prodora vode u okviru ove grupe betona su u granicama dozvoljenih vrednosti za predmetnu klasu vodonepropustljivosti, tj. nesignifikante su. Betoni LSSL-4 i LSSL-5 imaju veće vrednosti vodo-vezivnog faktora, pa samim tim i veću dubinu prodora vode pod pritiskom. Beton NK pripada klasi VDP V-II, a nešto veće vrednosti dubine prodora vode u beton u odnosu na betone LSSL-1, LSSL-2 i LSSL-6 se mogu objasniti upotrebom neporoznog agregata

Ukoliko se betoni upoređuju sa aspekta količine upijene vode, uočeno je da betoni iz grupe LSSL imaju značajno veće upijanje vode u odnosu na beton NK, što je posledica velike otvorene poroznosti upotrebljenog agregata za spravljanje betona LSSL.

Opšti zaključak je da se betoni grupe LSSL imaju manju ili jednaku dubinu prodora vode kao i beton NK, ali imaju veću količinu upijene vode zbog velike otvorene poroznosti i upijanja vode upotrebljenog agregata.

### 3. BETON SA LAKIM AGREGATOM „PORAYER“

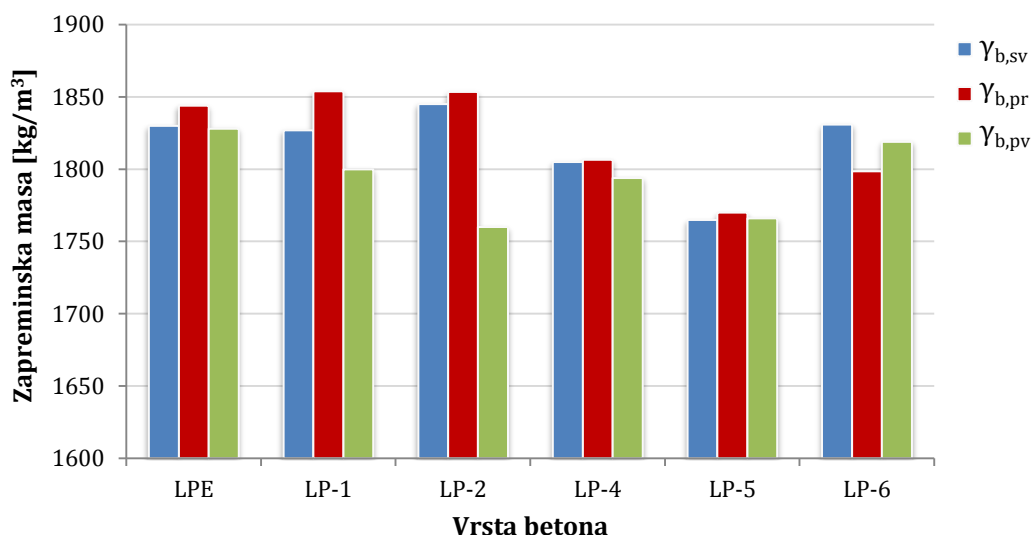
#### 3.1. Konzistencija betona

Rezultati merenja konzistencije ispitivanih vrsta betona dati su tabeli V-3. S obzirom na to da je prilikom spravljanja betona, mera sleganja nakon 5 minuta iznosila 10-75mm, bilo je neophodno da se naknadno doda superplastifikator u cilju obezbeđenja dobre ugradljivosti nakon čega je beton ugrađivan u kalupe.

Potreba za većom količinom superplastifikatora može da se objasni nešto većom količinom sitnog agregata (većom specifičnom površinom) u odnosu na betone sa ostalim vrstama lakog agregata.

#### 3.2. Zapreminska masa

Dobijene vrednosti vrednosti projektovane ( $\gamma_{b,pr}$ ) i dobijene ( $\gamma_{b,sv}$ ) zapreminske mase svežeg betona prikazane su grafički na slici VI-21. Upoređenjem projektovanih i izmerenih vrednosti zapreminskih masa betona u svežem stanju konstatovano je da su razlike između njih prihvatljive i da se u analizi ostalih svojstava betona mogu koristiti projektovane količine komponentnih materijala.



Slika VI-21. Zapreminske mase betona sa lakim agregatom „Porayer“

Na slici VI-21 prikazane su i vrednosti zapreminskih masa očvrslih, prirodno osušenih ispitivanih vrsta betona ( $\gamma_{b,pv}$ ). Na osnovu dobijenih vrednosti može se zaključiti da ispitivane vrste lakoagregatnih betona spadaju u konstrukcione lake betone.



### 3.3. Čvrstoća pri pritisku

U tabeli VI-9 dati su rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku u zavisnosti od starosti, mase cementa i vodo-vezivnog faktora.

Tabela VI-9. Rezultati ispitivanja čvrstoće betona pri pritisku ( $f_c$ ) običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“

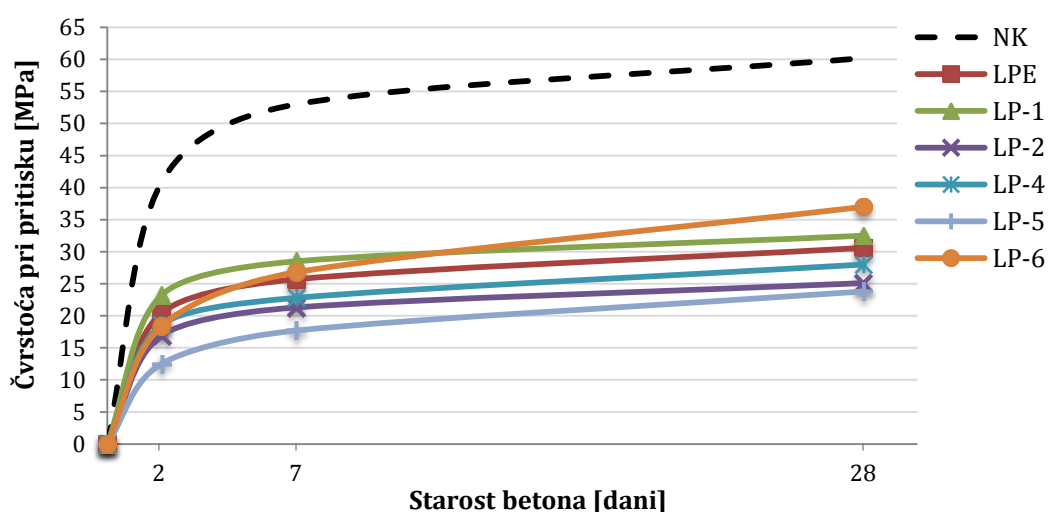
Vrsta betona	NK	LPE	LP-1	LP-2*	LP-4	LP-5**	LP-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	450	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	<0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,40
$f_{c,2}$ [MPa]	40,8	20,4	23,2	16,9	18,6	12,5	18,4
$f_{c,7}$ [MPa]	53,0	25,7	28,5	21,3	22,8	17,7	26,8
$f_{c,28}$ [MPa]	60,2	30,6	32,5	25,1	28	23,8	37,0
$f_{c,28}^{***}$ [MPa]	-	30,6	33,1	27,5	25,9	24,1	-

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin

\*\*\* uzorci negovani na vazduhu

Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena prikazana je na slici VI-22.



Slika VI-22. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji vremena običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“

Uticaj agregata na čvrstoću pri pritisku može se analizirati poređenjem čvrstoća betona koji sadrže istu količinu cementa CEM I (LPE, LP-1 i NK). Iako bi se za početne čvrstoće ( $f_{c,2}$  i  $f_{c,7}$ ) očekivalo da budu približno iste, dobijena je razlika cca 40% što se objašnjava kvalitetom malterske matrice koja je kod betona LPE i LP-1 nižih mehaničkih karakteristika u odnosu na beton NK jer je jedan deo rečnog peska zamenjen sitnozrnim lakim agregatom. Sa povećanjem starosti povećava se i razlika u

čvrstoći pri pritisku između NK i LPE i LP-1, što se objašnjava postepenim uključivanjem zrna krupnog rečnog agregata u prenošenje opterećenja, za razliku od lakih agregata čiji se doprinos čvrstoći betona kroz vreme smanjuje.

Sa povećanjem starosti betona, uticaj vrste/klase cementa na čvrstoću pri pritisku lakoagregatnih betona postaje izraženiji. Predmetni zaključak se potvrđuje poređenjem betona LP-1 i LP-2. Razlika u čvrstoći kod betona starosti 2 dana iznosi 6,3MPa, a kod betona starosti 28 dana iznosi 7,4MPa. Upoređenjem ovih vrednosti uočava se sličan prirast čvrstoće kroz vreme, što znači da agregat ne doprinosi povećanju čvrstoće pri većim starostima. Nešto veća razlika pri starosti od 28 dana je posledica različite brzine hidratacije čistog cementa i portland-kompozitnih cemenata, ali i klase čvrstoće.

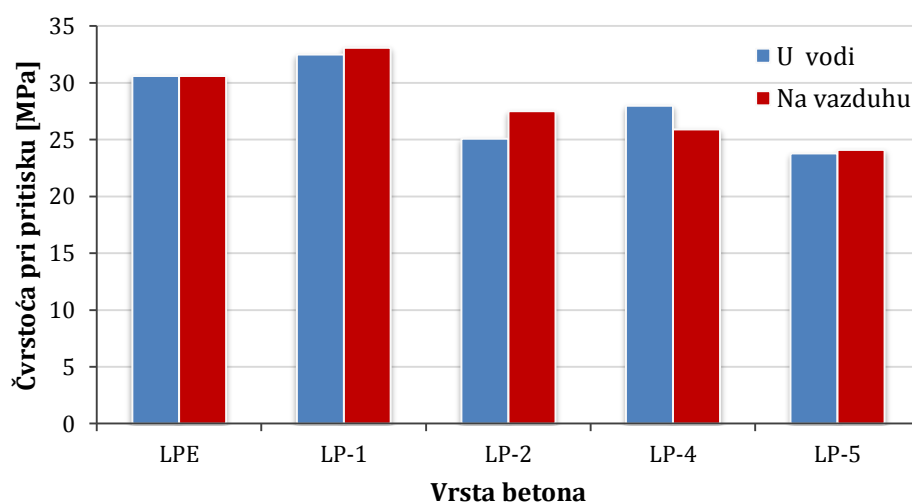
Na sličan način se objašnjava i uticaj zamene cementa mineralnim dodacima u betonu. Poređenjem čvrstoća LP-1, LP-5 i LP-6 uočava se da se razlika u čvrstoći značajno smanjuje sa povećanjem starosti. Nakon dva dana, beton LP-5 ima 46%, a beton LP-6 21% nižu čvrstoću. Nakon sedam dana, razlika u čvrstoćama iznosi 38% i 6%, da bi nakon 28 dana LP-5 imao 27% manju čvrstoću, a beton LP-6 14% veću čvrstoću. Razlike u početnim čvrstoćama se mogu objasniti sporijom hidratacijom betona LP-5 i LP-6 zbog prisustva velike količine mineralnih dodataka, odnosno zbog značajno manje količine cementa (LP-5, 244kg i LP-6, 275kg). Smanjenje razlike u čvrstoći pri pritisku pri većim starostima se objašnjava pucolanskim svojstvom mineralnih dodataka (letećeg pepela i metakaolina).

Uticaj vodo-vezivnog faktora na vrednosti čvrstoće pri pritisku u betonima sa visokim sadržajem mineralnih dodataka može se sagledati upoređenjem rezultata ispitivanja betona LP-5 ( $\omega_{ef}=0,5$ ) i LP-6 ( $\omega_{ef}=0,4$ ). Razlike u čvrstoćama za starosti 2, 7 i 28 dana su respektivno: 5,9 MPa, 9,1MPa i 13,2MPa, što ukazuje na to da se kod betona sa malim vodo-vezivnim faktorom dobija kvalitetnija vezivna matrica sa bržim prirastom čvrstoće kroz vreme.

Uticaj količine cementa, a takođe i vodocementnog faktora se može analizirati poređenjem vrednosti čvrstoća betona LP-1 i LP-4. Sa slike VI-22 može da se vidi da sa povećanjem količine cementa (odnosno smanjenjem vodo-cementog faktora) raste čvrstoća pri pritisku, ali se ta razlika ne menja kroz vreme (od 4,6MPa za  $f_{c,2}$  do 4,5MPa za  $f_{c,28}$ ). Izvedeni zaključak se objašnjava primenom iste vrste cementa.

Upoređenjem 28-dnevnih čvrstoća lakoagregatnih betona koji su različito negovani (u vodi i na vazduhu) može se sagledati uticaj "samonegovanja" betona. Sa slike VI-23 se

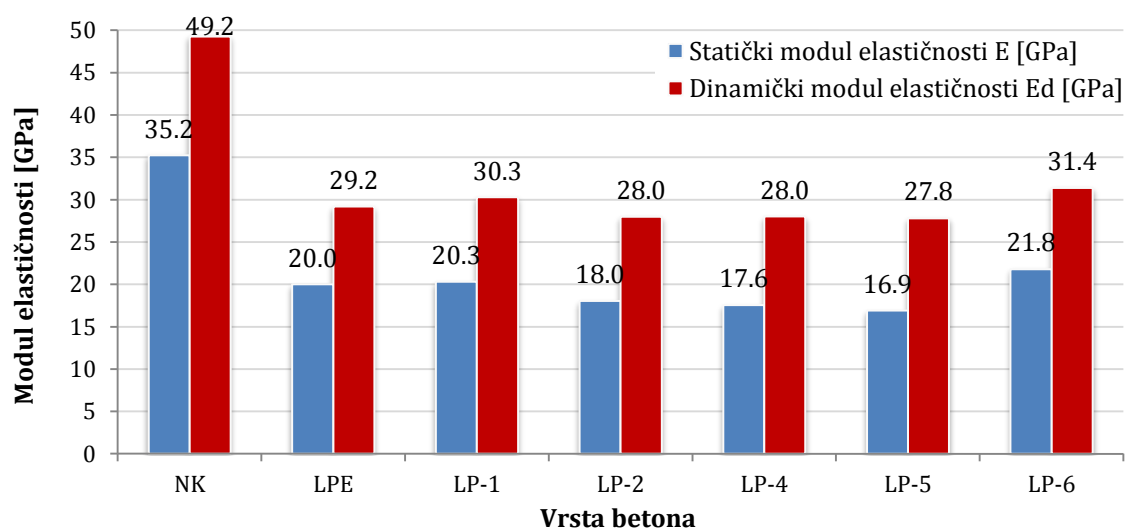
uočava da je razlika u čvrstoćama mala i kreće se od -2,4MPa do 2,1MPa, pa se može zaključiti da su laki agregati prethodnim kvašenjem akumulirali dovoljnu količinu vode koja je omogućila normalno odvijanje procesa hidratacije i bez negovanja betona u vlažnoj sredini. Mala razlika u ostvarenim čvrstoćama između ove dve grupe uzoraka može se pripisati i uticaju stanja uzoraka u trenutku ispitivanja. Naime, poznato je da voda u porama betona ima negativan uticaj na vrednost čvrstoće pri pritisku, odnosno smanjuje čvrstoću, a uzorci betona koji su negovani u vodi, ispitani su u vodom zasićenom stanju.



Slika VI-23. Promena čvrstoće pri pritisku u funkciji načina negovanja betona za lakim agregatom „Poraver“

### 3.4. Modul elastičnosti

Vrednosti statičkog i dinamičkog modula elastičnosti prikazane su na slici VI-24.



Slika VI-24. Statički i dinamički modul elastičnosti običnog i betona sa lakim agregatom „Poraver“

Uticaoj vrste agregata na vrednost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti se može sagledati upoređenjem rezultata ispitivanja betona NK i LP-1. Oba modula elastičnosti su značajno manja kod betona LP-1. Smanjenja modula elastičnosti su 14,9GPa (42%) za statički modul i 19GPa (39%) za dinamički modul elastičnosti.

Uticaoj količine cementa i vodo-cementog faktora na modul elastičnosti može da se analizira poređenjem betona LP-1 i LP-4 koji su spravljani sa istom vrstom ali različitim količinama cementa. Kako se sa slike VI-24 može videti, sa smanjenjem količine cementa (odnosno povećanjem vodo-cementog faktora), vrednost modula elastičnosti opada.

Kako je u svim recepturama udeo lakog agregata približno isti, a odstupanja vrednosti statičkog modula elastičnosti od srednje vrednosti u granicama  $\pm 1,9\text{GPa}$  ( $\approx 10\%$ ) i dinamičkog modula  $\pm 1,5\text{GPa}$  ( $\approx 5\%$ ), razlike koje se javljaju u vrednostima modula elastičnosti mogu da se pripišu prvenstveno svojstvima vezivne matrice.

Upoređujući analizirane module elastičnosti za sve ispitivane betone može se uočiti da postoji direktna zavisnost između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti. Vrednosti statičkog modula elastičnosti ( $E$ ) se dosta pouzdano mogu odrediti na osnovu poznate vrednosti dinamičkog modula elastičnosti ( $E_d$ ), korišćenjem sledećeg izraza:

$$E = 0,65 \cdot E_d [\text{GPa}] \quad (10)$$

Rezultati poređenja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti dati su u tabeli VI-10.

*Tabela VI-10. Poređenje statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „Poraver“*

	<b>LPE</b>	<b>LP-1</b>	<b>LP-2</b>	<b>LP-4</b>	<b>LP-5</b>	<b>LP-6</b>
$E$ [GPa]	19,99	20,3	18,03	17,57	16,9	21,8
$E_d$ [GPa]	29,19	30,27	27,97	28	27,81	31,39
$E/E_d$ [%]	68,48	67,06	64,46	62,75	60,77	69,45
$0,65 E_d$	19,27	19,68	18,18	18,20	18,08	20,40
<b><math>\Delta E</math> [%]</b>	<b>3,62</b>	<b>3,08</b>	<b>-0,83</b>	<b>-3,59</b>	<b>-6,96</b>	<b>6,41</b>

Sračunate vrednosti modula elastičnosti na osnovu izraza (8), kao i njihovo poređenje sa stvarnim (izmerenim) vrednostima modula elastičnosti, date su u tabeli VI-11.

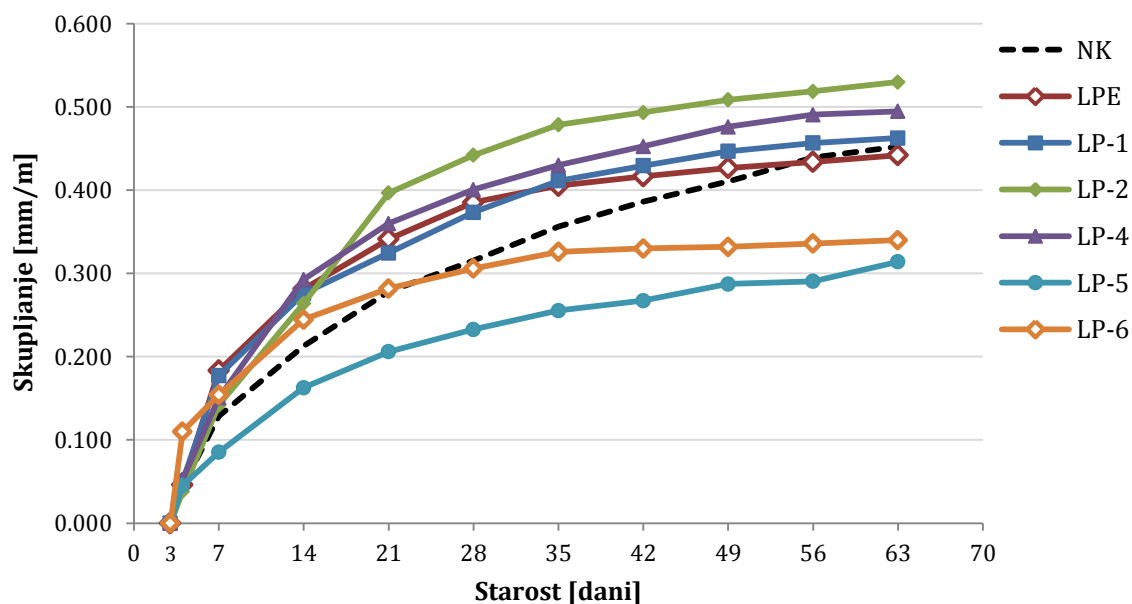
Tabela VI-11. Eksperimentalne i analitički određene vrednosti modula elastičnosti betona sa lakim agregatom „Poraver“

	LPE	LP-1	LP-2	LP-4	LP-5	LP-6
$\gamma_{b,pv}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1811	1816	1758	1776	1754	1823
$f_c$ [Mpa]	30,6	32,5	25,1	28	23,8	37,0
E	19,99	20,3	18,03	17,57	16,9	21,8
$E_{lcm}$ [GPa]	17,05	17,65	14,77	15,84	14,33	18,94
$\Delta E$ [%]	<b>14,69</b>	<b>13,06</b>	<b>18,06</b>	<b>9,86</b>	<b>15,20</b>	<b>13,12</b>

Komparativna analiza, prikazana u tabeli VI-11, pokazuje da su analitičke vrednosti 9-18% manje od eksperimentalno određenih, odnosno da se primenom analitičkog izraza dobijaju manje vrednosti modula elastičnosti od stvarnih, bez obzira na sastav betona sa „Poraver“ lakim agregatom.

### 3.5. Zapremske deformacije (skupljanje)

Zapremske deformacije (skupljanje) usled sušenja u toku vremena prikazane su na slici VI-25, dok su vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona u odnosu na običan beton sa rečnim agregatom date u tabeli VI-12.



Slika VI-25. Skupljanje pri sušenju običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“

Na osnovu analize maksimalnih vrednosti izmerenih deformacija skupljanja uočava se da svi ispitivani lakoagregatni betoni imaju skupljanje u uskim granicama, odnosno 0,3–0,55mm/m.

*Tabela VI-12. Relativne vrednosti skupljanja betona sa lakim agregatom „Poraver“ pri starosti od 63 dana*

Vrsta betona	NK	LPE	LP-1	LP-2*	LP-4	LP-5**	LP-6**
$m_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450	450	450	450	400	244	278
$\omega_{ef}$	0,40	<0,40	0,40	0,40	0,45	0,50	0,40
$\epsilon_{s,}/\epsilon_{s,NK}$	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>	<b>1,02</b>	<b>1,21</b>	<b>1,09</b>	<b>0,69</b>	<b>0,75</b>

\* beton spravljen sa CEM II

\*\* beton spravljen sa CEM I+leteći pepeo+metakaolin

Razlike u vrednostima skupljanja između pojedinih vrsta ispitivanih lakoagregatnih betona grupe LP posledica su vrste upotrebljenog veziva i vodo-vezivnog odnosa. Kod betona kod kojih je kao vezivo upotrebljen samo cement, najmanju vrednost skupljanja pri sušenju ima beton LPE ( $\omega_{ef}<0,4$ ), dok najveću vrednost skupljanja ima laki beton LP-2 sa cementom CEM II, zbog sporije hidratacije cementa odnosno veće kapilarne poroznosti.

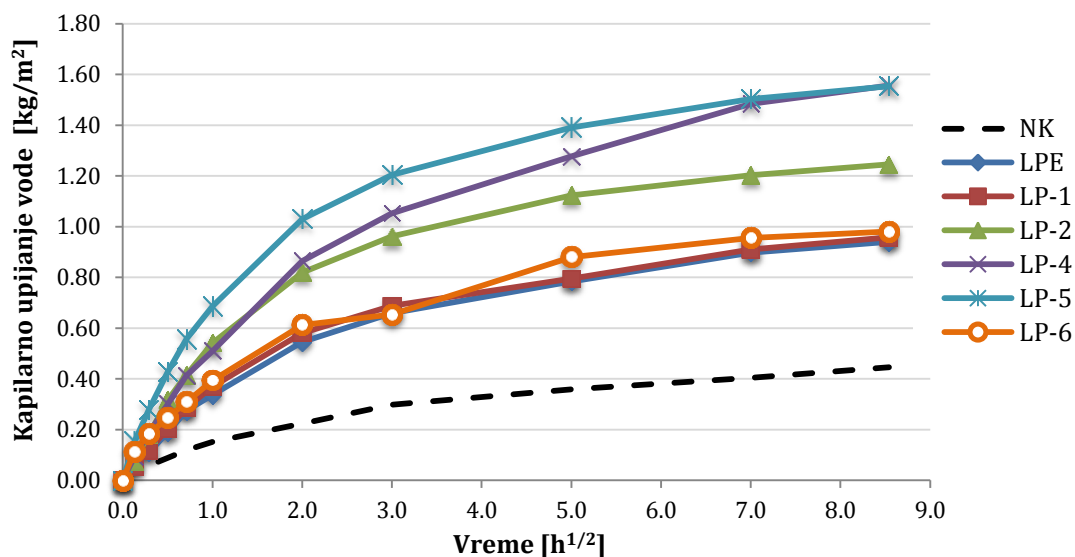
Upoređujući vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona sa cementom CEM I, ali sa različitim vodo-cementnim faktorima  $\omega_{ef}$  (LP-1 i LP-4), zaključeno je da se sa povećanjem  $\omega_{ef}$  povećava i skupljanje betona.

Uticaj mineralnih dodataka se može videti poređenjem skupljanja betona LP-5 i LP-6 sa ostalim vrstama betona.

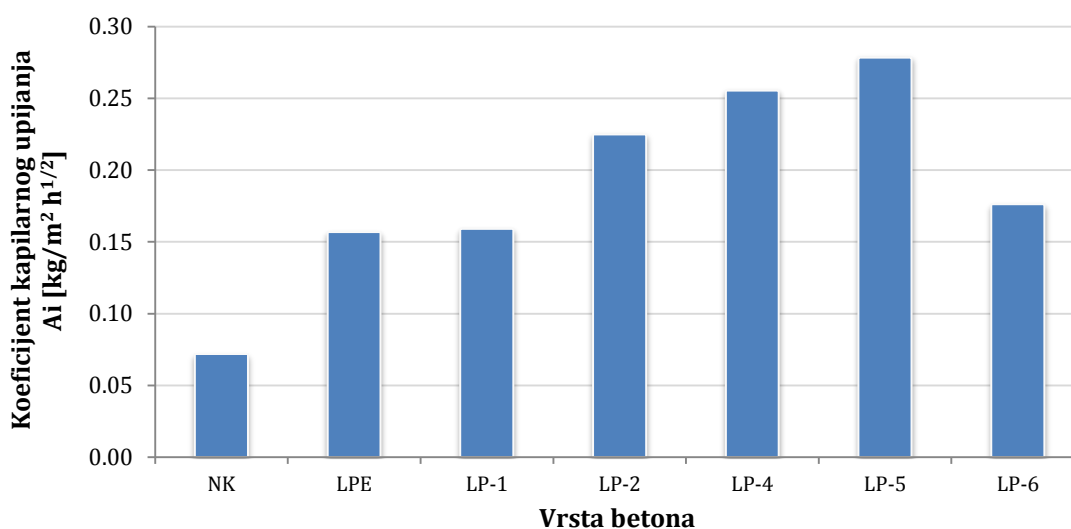
U odnosu na beton sa prirodnim agregatom NK, može se zaključiti da betoni grupe LP uglavnom imaju 2% do 17% veća skupljanja, sem LPE sa 2% i LP-5 i LP-6 sa 31% odnosno 25% manjim skupljanjem. Veće skupljanje lakoagregatnog betona se može pripisati uticaju vrste cementa i vodo-vezivnog faktora, dok se kod betona LPE, LP-5 i LP-6 manja skupljanja mogu objasniti finijom mikrostrukturom vezivne matrice usled primene mineralnih dodataka, što za posledicu ima manju kapilarnu poroznost i sporiju desorpciju vode iz betona.

### 3.6. Kapilarno upijanje vode

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u poglavlju V, na slici VI-26 prikazno je kapilano upijanje betona u periodu od 73 časa, dok su vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja, sračunati na osnovu upijanja vode nakon 25 časova, prikazane na slici VI-27.



Slika VI-26. Kapilarno upijanje vode običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“ u periodu od 73 sata



Slika VI-27. Koeficijenti kapilarnog upijanja vode običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“

Upoređenjem vrednosti kapilarnog upijanja LP betona, uočava se da najmanje kapilarno upijanje pokazuju betoni LPE, LP-1 i LP-6 ( $U_{sr} \approx 0,98 \text{ kg/m}^2$ ). Ostale vrste betona pokazuju veće kapilarno upijanje vode, pri čemu betoni LP-4 i LP-5 imaju slične konačne vrednosti kapilarnog upijanja ( $U_{sr} \approx 1,55 \text{ kg/m}^2$ ).

Uticao vrste agregata na upijanje vode može se sagledati poređenjem betona LP-1 i NK. Analizom vrednosti merenja količine upijene vode tokom vremena, može se videti da beton LP-1 ima cca 2,2 puta veće upijanje nakon 73h.

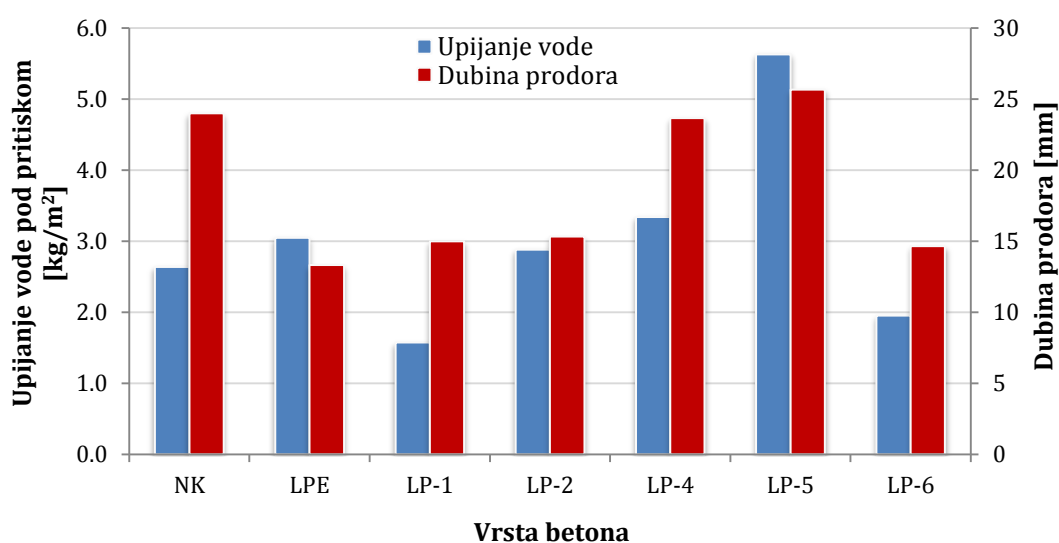
Uticaoj količine cementa na veličinu kapilarnog upijanja vode može se sagledati upoređenjem betona LP-1 i LP-4. Analizom vrednosti upijanja se vidi da beton LP-4 pokazuje cca 60% veće upijanje nakon 73h, što se, s obzirom na to da oba betona imaju približno istu količinu agregata, može pripisati većoj poroznosti cementnog kamena.

Vrednost kapilarnog upijanja vode zavisi i od vrste primenjenog veziva. Poređenjem betona LP-1 i LP-2 uočava se da beton LP-1, koji je spravljen sa cementom CEM I ima  $\approx 32\%$  manje upijanje od betona LP-2 (CEM II). U poređenju sa betonom LP-5, 60% manje upijanje betona LP-1 se može objasniti manjom kapilarnom poroznošću što je posledica veće brzine hidratacije, ali i nižeg vodo-cementnog faktora.

Vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja vode kod analiziranih betona ukazuju na različitu kinetiku kapilarnog upijanja vode. Betoni LP-2, LP-4 i LP-5 imaju najveću kinetiku kapilarnog upijanja vode ( $A_{i,sr}=0,25\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ), dok betoni LPE, LP1 i LP-6 imaju praktčno istu ( $A_{i,sr}=0,160\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ ). U poređenju sa običnim betonom NK ( $A_{i,sr}=0.072\text{ kg/m}^2\text{ h}^{0.5}$ ) sve vrste lakoagregatnog betona imaju 2,2-3,9 puta veće vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja.

### 3.7. Upijanje vode pod pritiskom

Dobijeni rezultati merenja upijanja vode pod pritiskom i dubine prodora prikazani su na slici VI-28.



Slika VI-28. Upijanje i dubina prodora vode pod pritiskom običnog betona i betona sa lakim agregatom „Poraver“



Upoređenjem rezultata merenja dubine prodora vode pod pritiskom u betonu sa „Poraver“ agregatom sa kriterijumima za ocenu klase vodonepropustljivosti (SRPS U.M1.206-1/1) zaključeno je da betoni LPE, LP-1, LP-2 i LP-6 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-III, za koji je najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton ograničena na 20mm, dok betoni LP-4 i LP-5 pripadaju klasi vodonepropustljivosti V-II za koju najveća dubina prodora vode pod pritiskom u beton iznosi 30mm. Ovakvi rezultati su u potpunosti u korelaciji sa vrednostima vodo-cementnog, odnosno vodo-vezivnog faktora. Betoni LPE, LP-1, LP-2 i LP-6 imaju iste vrednosti vodovezivnog faktora i pripadaju istoj klasi VDP. Razlike u dubini prodora vode u okviru ove grupe betona su u granicama dozvoljenih vrednosti za predmetnu klasu vodonepropustljivosti, tj. nesignifikante su. Betoni LP-4 i LP-5 imaju veće vrednosti vodo-vezivnog faktora, pa samim tim i veću dubinu prodora vode pod pritiskom. Beton NK pripada klasi VDP V-II, a nešto veće vrednosti dubine prodora vode u beton u odnosu na betone LPE, LP-1, LP-2 i LP-6 se mogu objasniti upotrebom neporoznog agregata.

Ukoliko se betoni upoređuju sa aspekta količine upijene vode, uočiće se da betoni iz grupe LP uglavnom imaju veće upijanje vode u odnosu na beton NK, što je posledica otvorene poroznosti upotrebljenog lakog agregata.

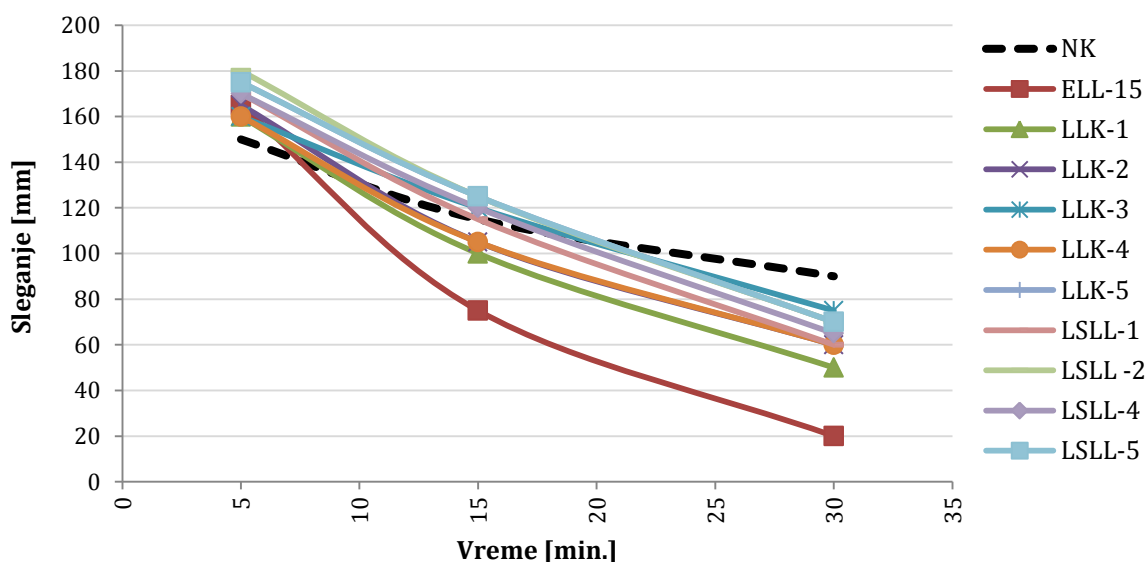
Opšti zaključak je da se betoni grupe LP imaju manju ili jednaku dubinu prodora vode kao i beton NK, ali imaju uglavnom veću količinu upijene vode zbog veće poroznosti i većeg upijanja vode upotrebljenog lakog agregata.

## 4. KOMPATIVNA ANALIZA

U prethodnom delu prikazana je analiza rezultata ispitivanja svojstava betona za svaku vrstu agregata pojedinačno. Komparativna analiza ima za cilj da pored analize uticaja agregata i vrste i količine veziva na analizirana svojstva betona, dobijene rezultate uporedi sa rezultatima do kojih su došli drugi autori u svojim istraživanjima.

### 4.1. Konzistencija betona

U poređenju sa rečnim agregatom, promena konzistencije u funkciji vremena lakoagregatnih betona znatno je izraženija zbog poroznosti lakog agregata, odnosno većeg upijanja vode. Kako se sa slike VI-29 može videti, sve vrste lakog betona za koje je merena konzistencija nakon 5, 15 i 30 minuta i kod kojih je izvršeno prethodno kvašenje agregata, imaju sličnu brzinu promene konzistencije.



Slika VI-29. Promena konzistencije u funkciji vremena

Postupak prethodnog kvašenja poroznog agregata vodom u količini koju bi ovaj agregat trebalo da upije u toku 30min ublažava pad konzistencije kroz vreme, a ugradljivost betona ostaje očuvana u dužem vremenskom periodu. Ovu konstataciju potvrđuje i ponašanje betona ELL-15, gde nije primenjen postupak prethodnog kvašenja lakog agregata, tako da je registrovana najveća promena konzistencije u prvih 30 minuta.

Sve vrste lakog agregata u betonu zahtevaju upotrebu hemijskih dodataka tipa superplastifikatora. Na osnovu analize sastava ispitivanih vrsta betona (Tabela V-3) i ostvarene konzistencije, bez obzira na vrstu lakog agregata, može se uočiti da je kod

betona kod kojih je deo cementa zamenjen mineralnim dodacima za postizanje odgovarajuće konzistencije potrebno dodati veću količinu superplastifikatora ili upotrebiti „moćniji“ superplastifikator (hiperplastifikator). Ovakav rezultat je očekivan, s obzirom na to da primenjeni mineralni dodaci imaju znatno veću specifičnu površinu (Prilog 3).

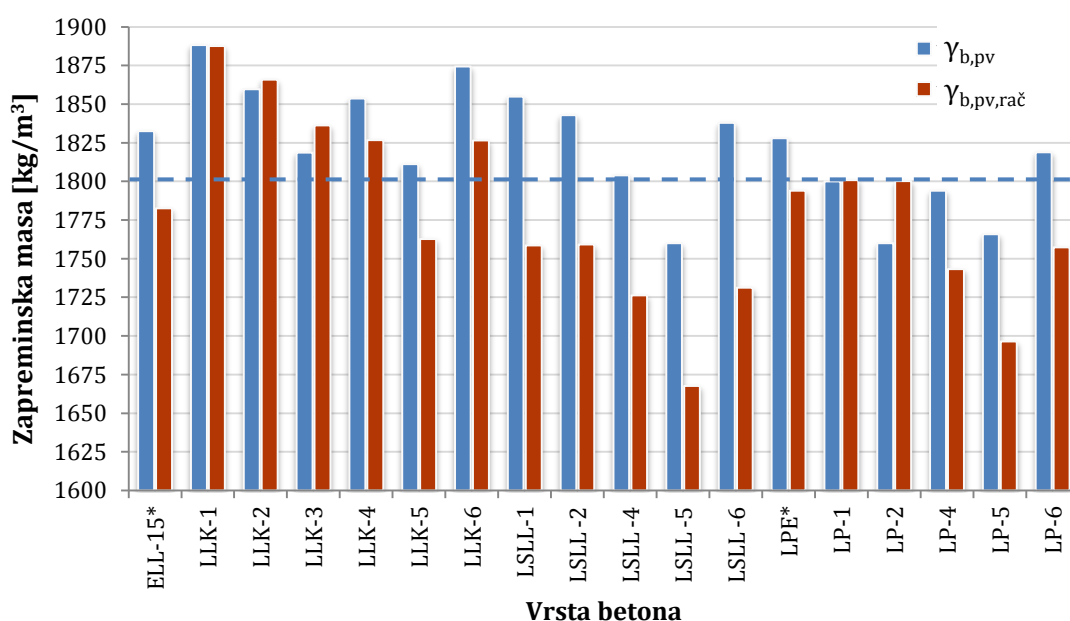
## 4.2. Zapreminska masa

### 4.2.1. Zapreminska masa u svežem stanju

Upoređenjem vrednosti projektovanih i izmerenih zapreminskih masa u svežem stanju svih ispitivanih lakoagregatnih betona (Slike VI-2, VI-12, i VI-21), zaključeno je da su odstupanja mala, tj. da se u analizi ostalih svojstava mogu koristiti projektovane količine komponentnih materijala.

### 4.2.2. Zapreminska masa očvrslog betona

Na slici VI-30 prikazane su vrednosti izmerenih zapreminskih masa u prirodno vlažnom stanju svih vrsta betona i vrednosti zapreminskih masa prirodno vlažnog betona određenih prema izrazu (2). S obzirom na to da su razlike izmerenih i sračunatih zapreminskih masa male (do 6%), može se zaključiti da se obrazac (2) može dovoljno pouzdano koristiti za određivanje zapreminske mase očvrslog lakoagregatnog betona, bez obzira na vrstu upotrebljenog lakog agregata.



Slika VI-30. Zapreminske mase lakoagregatnih betona u prirodno vlažnom stanju

Najmanja izmerena zapreminska masa u prirodno vlažnom stanju iznosi  $1760\text{kg/m}^3$ , a najveća  $1888\text{kg/m}^3$ . Osnovni statistički parametri u ovoj analizi su:

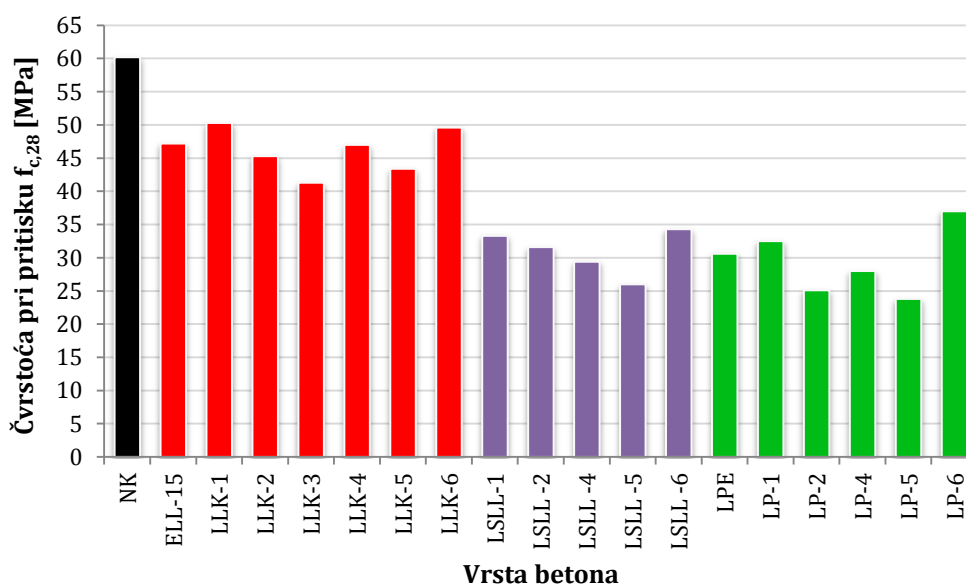
- $\gamma_{b,pv,sr}=1823\text{kg/m}^3$  - srednja vrednost zapreminske mase prirodno vlažnog betona;
- $\sigma =37,63\text{ kg/m}^3$  - standardna devijacija;
- $k_v=2,06\%$  - koeficijent varijacije.

Sračunata standardna devijacija i koeficijent varijacije ukazuju da sve analizirane vrste betona, prema vrednostima izmerenih zapreminskih masa, pripadaju istom skupu betona.

Klasifikacija lakoagregatnih betona u zavisnosti od zapreminske mase urađena je prema EN 206. Prema kriterijumima datim u predmetnom standardu, betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca –Laterlite“ i sa agregatom „ZAG“ pripadaju klasi D2,0 ( $1800\text{ kg/m}^3 < \gamma_b \leq 2000\text{kg/m}^3$ ), a betoni spravljeni sa lakim agregatom „Poraver“ mogu pripadati i klasi D1,8 ( $1600\text{ kg/m}^3 < \gamma_b \leq 1800\text{kg/m}^3$ ) i klasi D2,0, što zavisi od učešća makrostrukturnih komponenti u sastavu betona.

### 4.3. Čvrstoća pri pritisku

Na slici VI-31 dat je uporedni pregled ostvarenih čvrstoća betona pri pritisku za starosti od 28 dana.



Slika VI-31. 28-dnevne čvrstoće pri pritisku svih ispitivanih betona

Analizom 28-dnevnih čvrstoća pri pritisku za 19 ispitivanih vrsta betona jasno se uočava:

- Svi ispitivani lakoagregatni betoni se na osnovu klasifikacije date u [9] mogu svrstati u konstrukcijske lakoagregatne betone.
- Vrsta agregata ima direktan uticaj na vrednost čvrstoće betona pri pritisku
- Svi lakoagregatni betoni imaju manje čvrstoće pri pritisku u odnosu na referentni beton (NK).
- Najveće čvrstoće betona pri pritisku u okviru grupe lakoagregatnih betona spravljenih samo sa cementom imaju betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ (prosečna vrednost 48MPa).
- Preostale dve grupe lakoagregatnih betona imaju približno jednake čvrstoće pri pritisku za betone spravljene samo sa cementom (prosečna vrednost za betone sa agregatom „ZAG“ – 31MPa, a za betone sa agregatom „Poraver“ – 29MPa).
- U grupi betona spravljenih sa visokim sadržajem mineralnih dodataka, najveće čvrstoće pri pritisku imaju betoni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ (prosečna vrednost 44,3MPa), dok betoni spravljeni sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ imaju približno jednake čvrstoće pri pritisku (prosečna vrednost za betone sa agregatom „ZAG“ – 28MPa, a za betone sa agregatom „Poraver“ – 29MPa).

Na osnovu srednjih vrednosti 28-dnevnih čvrstoća pri pritisku, ispitivane vrste lakoagregatnih betona spravljene samo sa cementom svrstane su u sledeće klasa čvrstoće definisane u EN 206 (Tabele VI-13 do VI-15):

*Tabela VI-13. Klase čvrstoće betona sa „Leca-Laterlite“ lakim agregatom*

Vrsta betona	ELL-15	LLK-1	LLK-2	LLK-3	LLK-4	LLK-5	LLK-6
$f_{c,28}$ [MPa]	47,2	50,3	45,3	41,3	47,0	43,4	49,6
Klasa čvrstoće	LC 40/44	LC 45/50	LC 40/44	LC 35/38	LC 40/44	LC 35/38	LC 40/44

*Tabela VI-14. Klase čvrstoće betona sa „ZAG“ lakim agregatom*

Vrsta betona	LSSL-1	LSSL-2	LSSL-4	LSSL-5	LSSL-6
$f_{c,28}$ [MPa]	33,3	31,6	29,4	26	34,3
Klasa čvrstoće	LC 30/33	LC 25/28	LC 25/28	LC 20/22	LC 30/33

*Tabela VI-15. Klase čvrstoće betona sa „Poraver“ lakim agregatom*

Vrsta betona	LPE	LP-1	LP-2	LP-4	LP-5	LP-6
$f_{c,28}$ [MPa]	30,6	32,5	25,1	28	23,8	37
Klasa čvrstoće	LC 28/25	LC 25/28	LC 20/22	LC 25/28	LC 20/22	LC 30/33

U tabeli VI-16 date su vrednosti specifične čvrstoće (odnos 28-dnevne čvrstoće pri pritisku i zapreminske mase u prirodno vlažnom stanju) za betone spravljene samo sa cementom, a u tabeli VI-17 za betone sa visokim sadržajem mineralnih dodataka.

*Tabela VI-16. Specifična čvrstoća ispitivanih betona spravljenih sa cementom*

	<b>NK</b>	<b>LLK (1,2,3,4)</b>	<b>LSLL (1,2,4)</b>	<b>LP (1,2,4)</b>
$f_{c,28}$ [MPa]	60,2	48,5	31,4	28,5
$\gamma_{b,pv}$ [MPa]	2339	1876	1884	1783
$f_{c,28}/\gamma_{b,pv}$ [Nm/kg]	<b>25735</b>	<b>25851</b>	<b>16665</b>	<b>15982</b>

*Tabela VI-17. Specifična čvrstoća ispitivanih lakoagregatnih betona sa visokim sadržajem mineralnih dodataka*

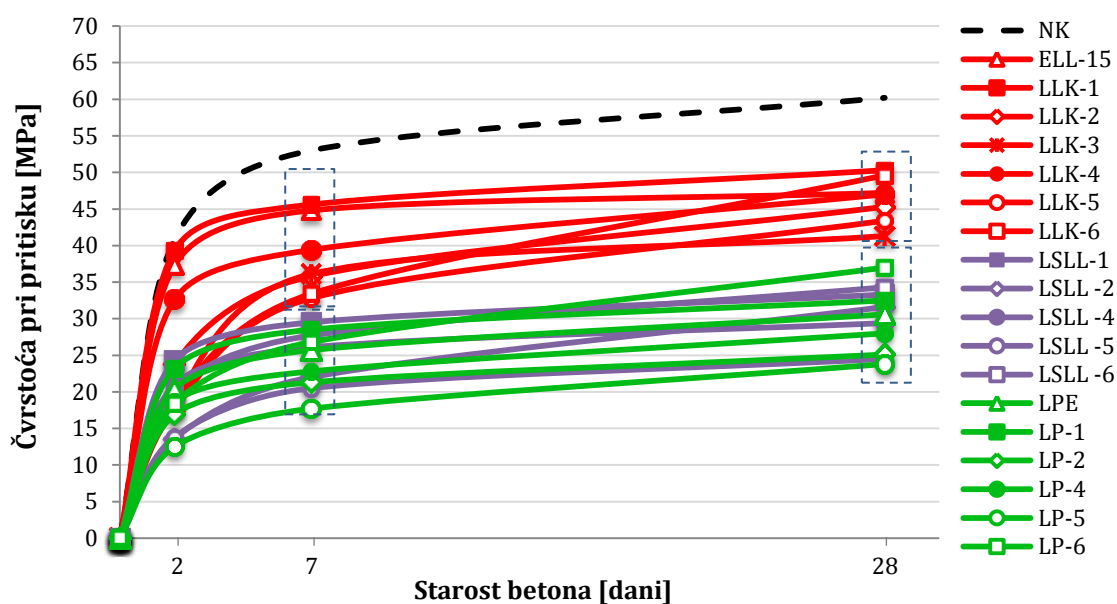
	<b>LLK (5,6)</b>	<b>LSLL (5,6)</b>	<b>LP (5,6)</b>
$f_{c,28}$ [MPa]	44,3	27,8	28,7
$\gamma_{b,pv}$ [MPa]	1861	1838	1788
$f_{c,28}/\gamma_{b,pv}$ [Nm/kg]	<b>23817</b>	<b>15125</b>	<b>16051</b>

Upoređujući specifične čvrstoće betona spravljenih samo sa cementom, može se zaključiti da se sve ispitivane vrste betona mogu svrstati u dve grupe:

- Grupa sa višim vrednostima specifične čvrstoće u koju spadaju referentni beton i betoni spravljani sa „Leca-Laterlite“ lakim agregatom.
- Grupa sa nižim vrednostima specifične čvrstoće u koju spadaju betoni sa „ZAG“ lakim agregatom i „Poraver“ lakim agregatom.

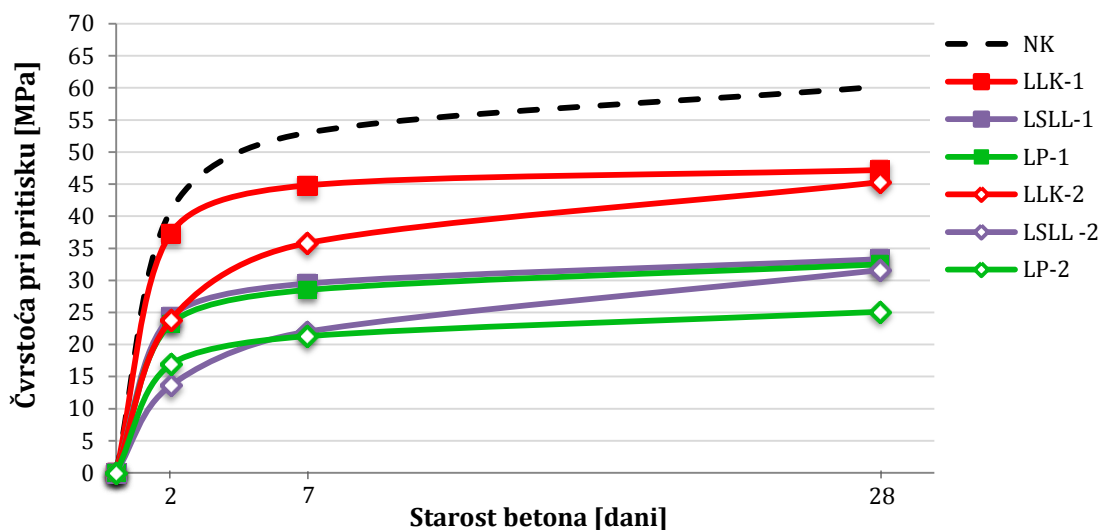
Isti zaključak može se izvesti i za betone sa visokim sadržajem mineralnih dodataka.

Na slici VI-32 dat je grafički prikaz promene čvrstoća pri pritisku u toku vremena svih ispitivanih vrsta lakoagregatnih betona. Ovde se jasno uočava uticaj vrste primenjenog agregata. Naime, već pri starosti od 7 dana, u okviru lakoagregatnih betona uočavaju se dve grupe, a te razlike su evidentne i pri starosti od 28 dana. Grupu sa većim čvrstoćama čine betoni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“, a drugu, sa manjim čvrstoćama, betoni sa „ZAG“ i „Poraver“ lakim agregatima.



Slika VI-32. Promena čvrstoće pri pritisku ispitivanih vrsta betona kroz vreme

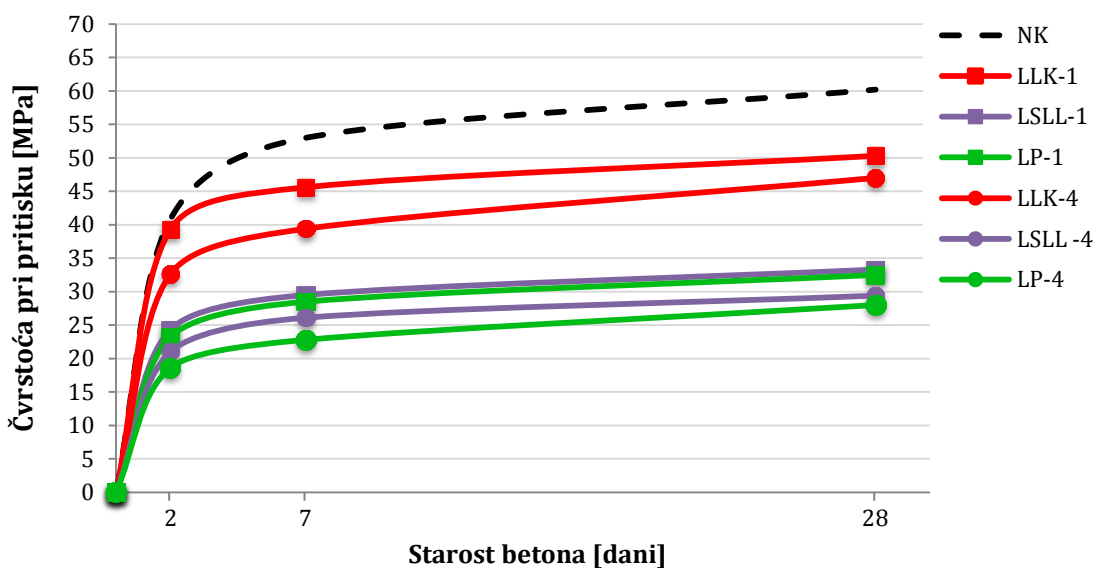
Radi lakšeg sagledavanja uticaja ostalih variranih parametara na čvrstoću betona pri pritisku, u nastavku su formirane posebne grupe betona.



Slika VI-33. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa 450kg cementa CEM I ili CEM II

Analizom rasporeda krivih na slici VI-33 zaključeno je:

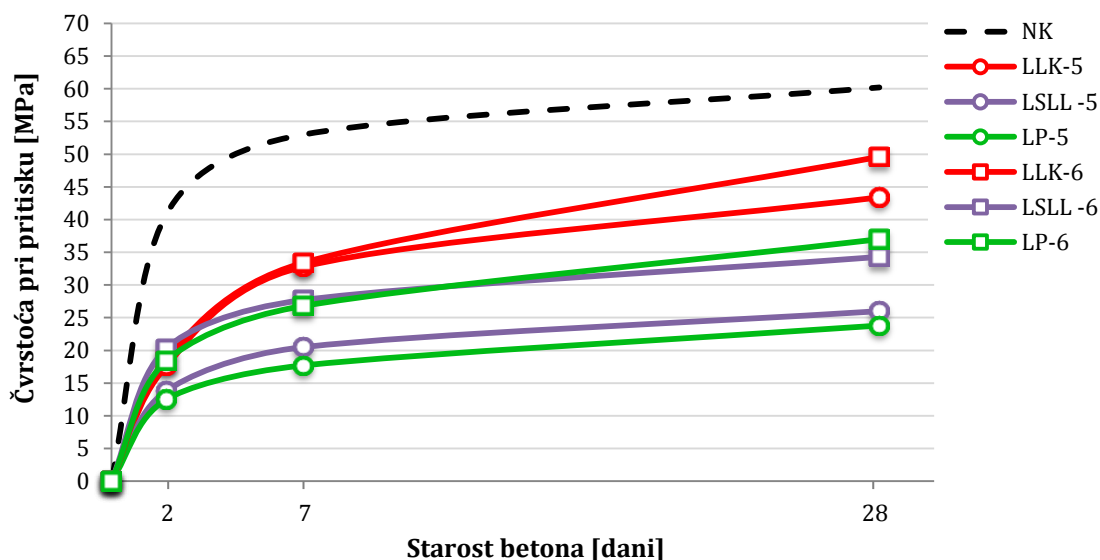
- Betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ imaju veće čvrstoće bez obzira na vrstu primenjenog cementa u odnosu na ostale lakoagregatne betone.
- Vrsta cementa ima uticaj na čvrstoću pri pritisku betona spravljenih sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“, odnosno, veće čvrstoće se dobijaju sa CEM I bez obzira na vrstu lakog agregata.



Slika VI-34. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa CEM I i različitim vodo-cementnim faktorima

Analizom rasporeda krivih na slici VI-34 zaključeno je:

- Betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ imaju veće čvrstoće bez obzira na vrednost vodo-cementnog faktora u odnosu na ostale lakoagregatne betone.
- Kod betona spravljenih sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ vodo-cementni faktor ima izraženiji uticaj na čvrstoću pri pritisku u odnosu na uticaj vrste lakog agregata.



Slika VI-35. Promena čvrstoće pri pritisku kroz vreme betona sa visokim sadržajem mineralnih dodataka

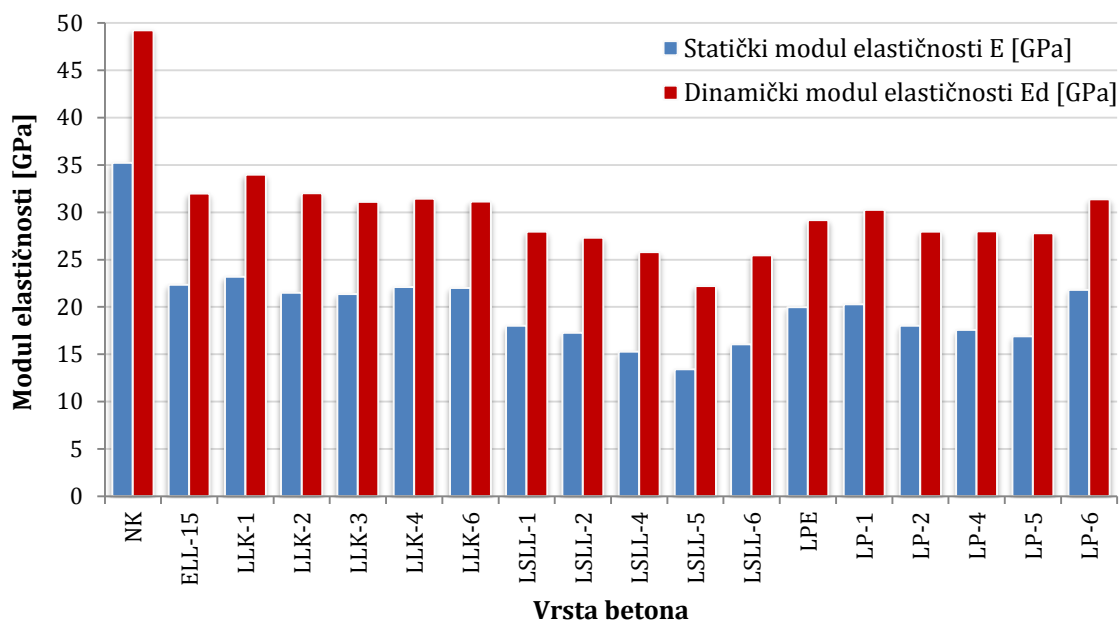


Analizom rasporeda krvih na slici VI-35 zaključeno je:

- Betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ imaju veće čvrstoće bez obzira na vrednost vodo-vezivnog faktora u odnosu na ostale lakoagregatne betone.
- Kod betona spravljenih sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ vodo-vezivni faktor ima izraženiji uticaj na čvrstoću pri pritisku u odnosu na uticaj vrste lakog agregata.

#### 4.4. Modul elastičnosti

Uporedna analiza statičkih i dinamičkih modula elastičnosti za sve vrste betona data je na slici VI-36.



Slika VI-36. Statički i dinamički modul elastičnosti ispitivanih betona

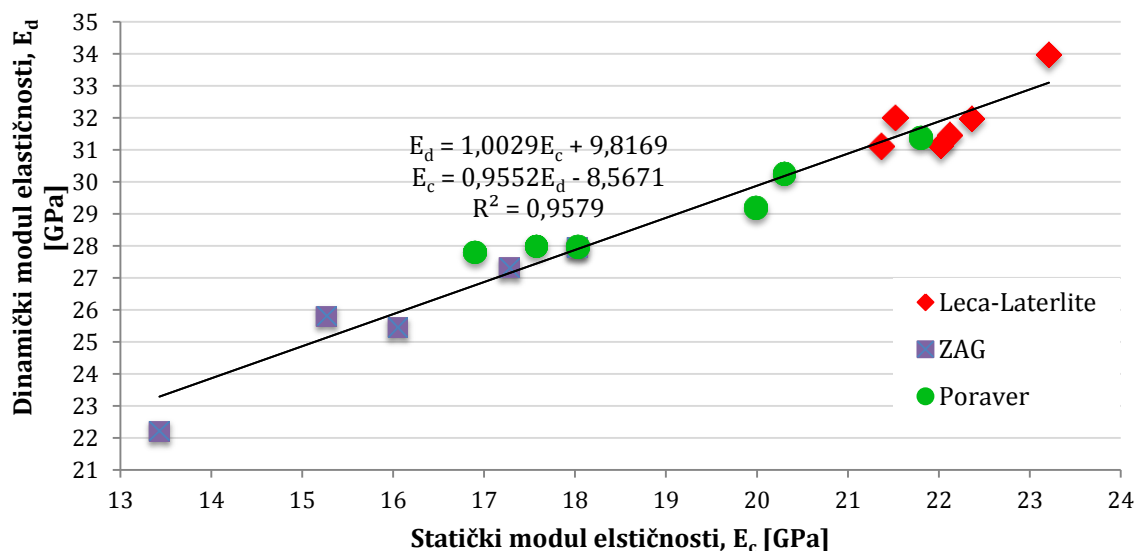
Od svih variranih parametara (vrsta agregata, vrsta i količina cementa, vodo-vezivni faktor i količina mineralnih dodataka) najveći uticaj na modul elastičnosti ima vrsta agregata. Evidentno je da svi lakoagregatni betoni imaju značajno manji modul elastičnosti u odnosu na referentni beton sa prirodnim agregatom. Srednja vrednost statičkog modula elastičnosti ispitivanih vrsta lakoagregatnih betona iznosi 19,2GPa, što predstavlja 55% od statičkog modula elastičnosti referentnog betona NK.

U okviru grupe lakoagregatnih betona najveće vrednosti modula elastičnosti imaju betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“. Uticaj variranih parametara kod betona sa ovom vrstom agregata nije izražen. Vrednosti statičkog modula elastičnosti se nalaze u rasponu od 21,4GPa do 23,2GPa.

Kod preostale dve grupe lakoagregatnih betona uticaj ostalih variranih parametara na vrednost statičkog modula elastičnosti je izraženiji. Vrednosti statičkog modula elastičnosti kod betona sa lakim agregatom „ZAG“ se kreću u rasponu 13,4-18,2GPa, a kod betona sa lakim agregatom „Poraver“ u rasponu 16,9-21,8GPa. Ovakav rezultat se može objasniti analizom udela komponenti betona. Poznato je da na modul elastičnosti betona utiču moduli elastičnosti komponenti kao i njihov zapreminski udeo. Iako su mehaničke karakteristike lakog agregata „Poraver“ znatno niže od ostalih vrsta lakih agregata, u betonima LP, za razliku od betona LLK i LSSL, jedan deo krupnog agregata ( $\approx 47\%$  po zapremini) čini rečni agregat znatno veće krutosti.

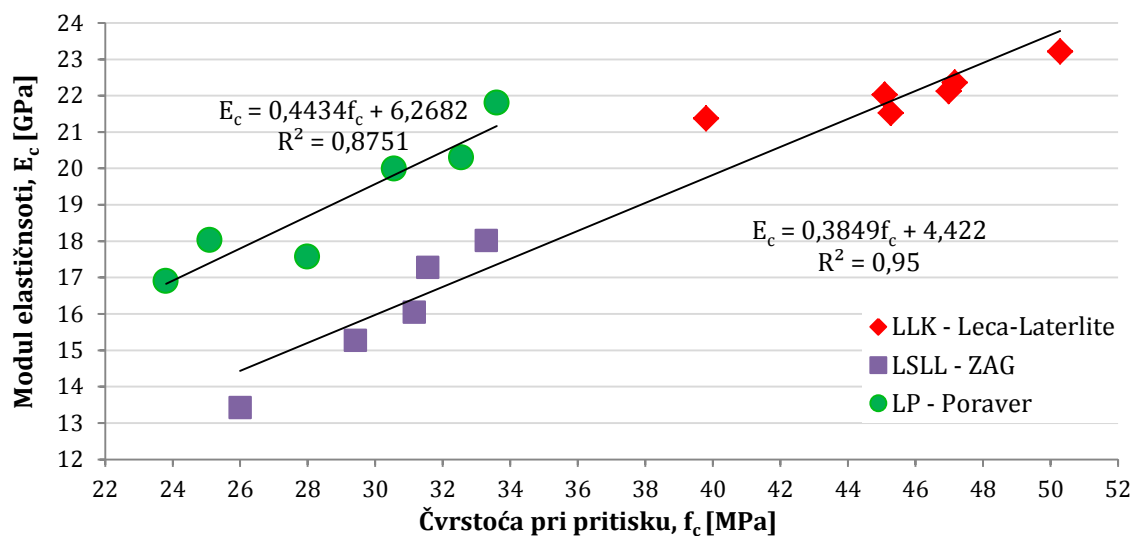
Sličan zaključak se može izvesti i za uticaj svih variranih parametara na dinamički modul elastičnosti.

Analizirajući zavisnost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti za svaku vrstu agregata posebno, pokazano je da se njihov odnos kreće u granicama  $E_c/E_d=0,6-0,7$  što je u skladu sa podacima pronađenim u literaturi. Na slici VI-37 prikazana je zavisnost između statičkog i dinamičkog modula za sve analizirane vrste betona. Kao korelaciona veza koja najbolje opisuje predmetnu zavisnost odabrana je jednačina prave, a vrednost koeficijenta korelacije ukazuje na to da se radi o vrlo jakoj korelaciji između statičkog i dinamičkog modula elastičnosti.



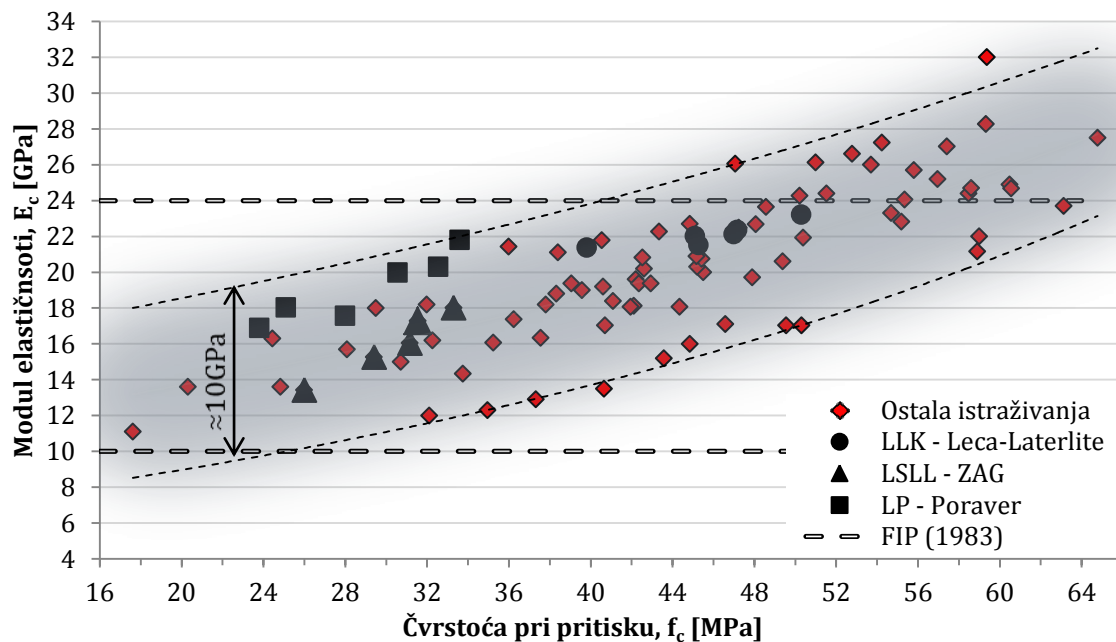
Slika VI-37. Zavisnost  $E_d$  i  $E_c$  za betone sa različitim vrstama lakih agregata

Na slici VI-38 prikazane su zavisnosti modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku. Jasno se mogu uočiti dve funkcionalne zavisnosti. Prva obuhvata betone sa „Leca-Laterlite“ i „ZAG“ lakim agregatima, a druga betone sa „Poraver“ lakim agregatom. U oba slučaja su uspostavljene vrlo jake funkcionalne zavisnosti.



Slika VI-38. Zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku ispitivanih betona

Eksperimentalna istraživanja zavisnosti modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku drugih autora, kao i rezultati ovog istraživanja prikazani su na slici VI-38. Razlike u vrednostima modula elastičnosti variraju u velikom rasponu (cca 10GPa za istu čvrstoću pri pritisku) što se može objasniti različitim karakteristikama i udelima komponentnih materijala u betonu.

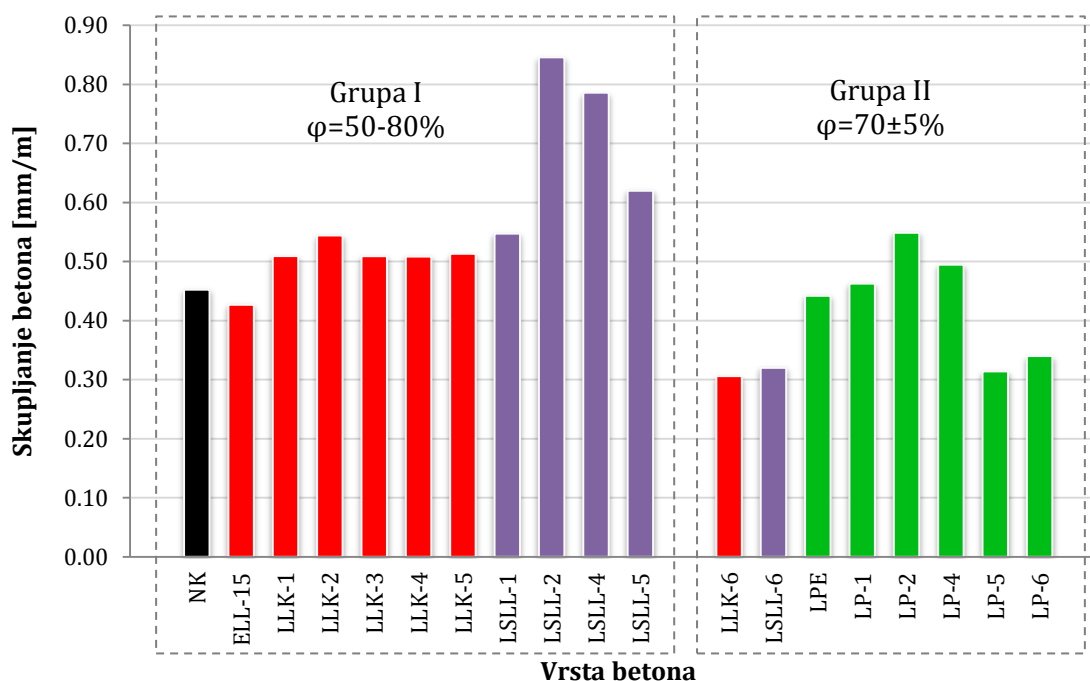


Slika VI-39. Poređenje zavisnosti modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku sopstvenih eksperimentalnih rezultata sa rezultatima drugih autora

Kako se sa slike VI-38 vidi, dobijene vrednosti modula elastičnosti za ispitivane lakoagregatne betone u okviru ovog istraživanja nalaze se unutar granica definisanih FIP-om [97].

#### 4.5. Zapreminske deformacije

Uporedni prikaz izmerenih vrednosti skupljanja pri starosti od 63 dana, dat je na slici VI-36. S obzirom na to da merenje skupljanja i uslovi sredine nisu bili isti za sve uzorke, vrednosti su podeljene u dve grupe. U prvoj grupi se nalaze rezultati merenja skupljanja betona negovanih u nekontrolisanim uslovima (grupa I - promenljiva relativna vlažnost vazduha  $\varphi=50-80\%$ ), dok su u drugoj grupi rezultati merenja skupljanja betona u kontrolisanim uslovima sredine (grupa II - relativna vlažnost vazduha  $\varphi=70\pm 5\%$ ).



Slika VI-40. Skupljanje ispitivanih betona pri starosti od 63 dana

Poređenjem izmerenih vrednosti skupljanja grupe betona spravljanih sa istom količinom cementa CEM I i sa istim vodo-cementnim faktorom, bez obzira na uslove u kojima su negovani uzorci, može se videti da betoni LLK-1, LSLL-1 i LP-1 imaju, respektivno, 10%, 20% i 2,4% veće skupljanje u odnosu na beton NK. Ovom analizom uočava se uticaj vrste lakog agregata na veličinu skupljanja betona.

Vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona su u većini slučajeva veće u odnosu na skupljanje referentnog betona. Ovaj zaključak se odnosi na lakoagregatne betone spravljene samo sa cementom, bez obzira na vrstu i količinu upotrebljenog cementa. Lakoagregatni betoni sa visokim sadržajem mineralnih dodataka i malim vodo-vezivnim faktorom, imaju manje vrednosti skupljanja u odnosu na referentni beton.

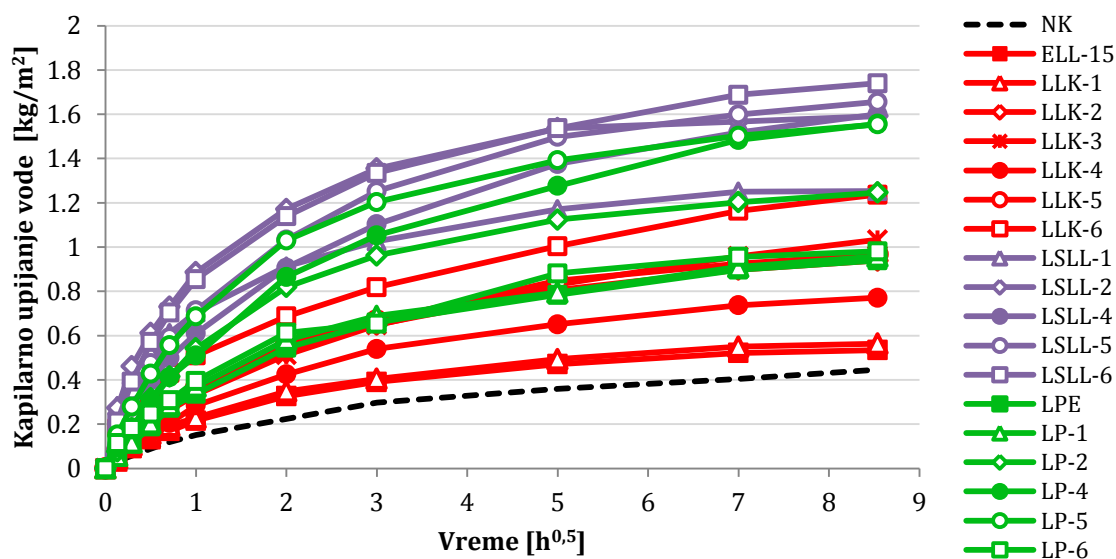
Za različite vrednosti vodo-vezivnog faktora, betoni LLK (LLK-1, LLK-3, LLK-4 i LLK-5) imaju približno isto skupljanje, dok je kod betona LSLL (LSLL-1, LSLL-4 i LSLL-5) i betona LP (LP-1, LP-4, LP-5, LP-6) razlika u skupljanjima značajna.

Kao generalni zaključak se može reći da betoni sa lakim agregatom „ZAG“ pokazuju najveće deformacije skupljanja, dok betoni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ i „Poraver“ imaju približno iste vrednosti, što je posledica svojstava lakih agregata (Tabela V-1).

Izmerene vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona su dominantno u granicama 0,4-0,6mm/m što je u skladu sa istraživanjima drugih autora.

#### 4.6. Kapilarno upijanje vode

Na slici VI-41 prikazani su rezultati upijanja vode svih ispitivanih betona. Svi lakoagregatni betoni imaju veće upijanje vode od referentnog betona. Veličina upijanja je u rasponu od 0,5kg/m<sup>2</sup> do 1,8kg/m<sup>2</sup>, a analizom pojedinačnih vrednosti može se videti da betoni sa agregatom „ZAG“ imaju najveća upijanja kao posledicu otvorene poroznosti lakog agregata i povećane poroznosti malterske komponente zbog zamene dela sitnog rečnog agregata sitnim lakim agregatom.

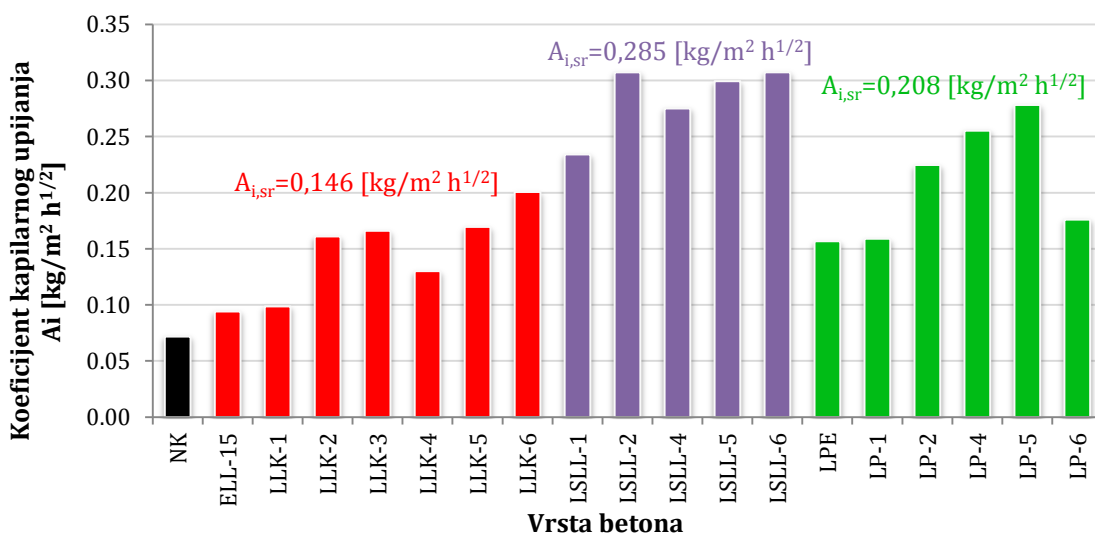


Slika VI-41. Kapilarno upijanje ispitivanih betona

Od svih betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“, najbliže vrednosti upijanja vode referentnom betonu imaju betoni ELL-15 i LLK-1, a kod betona sa „Poraver“ lakim agregatom betoni LPE i LP-1. Kako je zapreminski udeo lakog agregata u betonima LPE i LP1 manji u poređenju sa betonima ELL-15 i LLK-1 (Tabela V-3), a obe vrste lakog agregata imaju slično upijanje vode (Tabela V-1), značajna razlika u upijanjima

vode se može pripisati većoj poroznosti malterske komponente betona LPE i LP-1 zbog supstitucije jednog dela sitnog rečnog agregata sitnim lakim agregatom i većem udelu sitnog agregata mešavini. Kod ostalih vrsta betona nije moguće izdvojiti koji od variranih parametara najviše utiče na kapilarno upijanje vode.

Isti zaključci se mogu izvesti i o kinetici upijanja vode analizom koeficijenata kapilarnog upijanja (Slika VI-42). Najveće vrednosti koeficijenta kapilarnog upijanja imaju betoni sa lakim agregatom „ZAG“. Vrednost koeficijenta kapilarnog upijanja vode blisku referentnom betonu imaju betoni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ i najkvalitetnijom cementnom matricom (ELL-15 i LLK-1). Ostali betoni iz ove grupe lakoagregatnih betona imaju koeficijent kapilarnog upijanja vode sličan betonima sa lakim agregatom „Poraver“ i najkvalitetnijom vezivnom matricom.



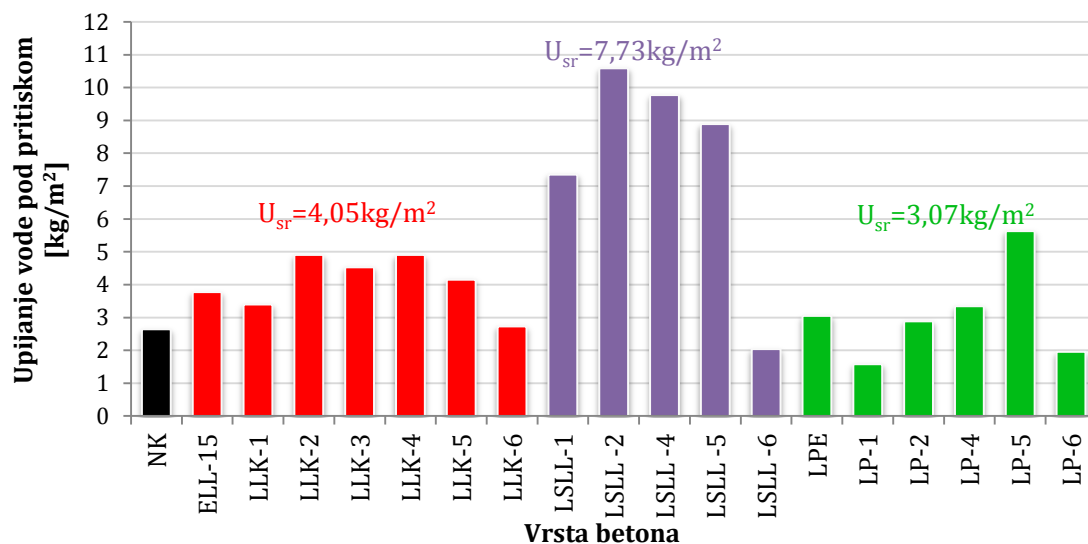
Slika VI-42. Koeficijent kapilarnog upijanja ispitivanih betona

#### 4.7. Upijanje vode pod pritiskom

Na slici VI-43 prikazane se vrednosti upijanja vode pod pritiskom svih analiziranih betona. U poređenju sa običnim betonom, prosečno upijanje vode betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ je 1,5 puta veće, betona sa lakim agregatom „ZAG“ 2,9 puta veće, a betona sa lakim agregatom „Poraver“ 1,2 puta veće. Razlog za veća upijanja lakoagregatnih betona se može naći velikoj otvorenoj poroznosti lakog agregata, za razliku od prirodnog rečnog agregata kod kog se smatra da je otvorena poroznost zanemarljiva.

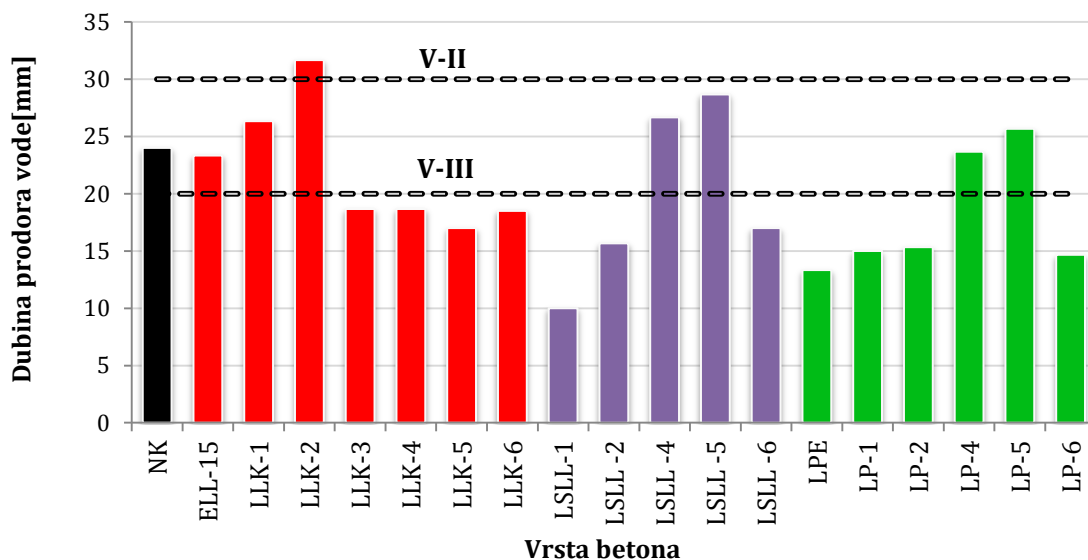
Međusobne razlike u upijanjima lakoagregatnih betona se takođe mogu objasniti razlikama u strukturi zrna agregata. Agregati na bazi otpadnog kamenog mulja (laki agregat „ZAG“) imaju najveću otvorenu poroznost, što se može videti na osnovu

ispitivanja kinetike upijanja (Prilog 2). Nešto manju otvorenu poroznost imaju zrna agregata na bazi ekspanzirane gline (laki agregat „Leca-Laterlite“) dok najmanju otvorenu poroznost imaju zrna na bazi ekspanziranog otpadnog stakla (laki agregat „Poraver“) zbog staklaste strukture kao i zbog najmanjeg zapreminskog udela lakog agregata.



Slika VI-43. Upijanje vode pod pritiskom ispitivanih betona

Na slici VI-44 prikazane su dubine prodora vode ispitivanih vrsta betona.



Slika VI-44. Dubina prodora vode pod pritiskom ispitivanih betona

U poređenju sa običnim betonom, dubina prodora vode kod lakoagregatnih betona je uglavnom manja. Objašnjenje za ovakav zaključak leži u činjenici da se kod normalnih betona sa prirodnim agregatom prodor vode odvija kroz vezivnu matricu, jer su zrna

agregata poraktično neporozna. Kod lakoagregatnih betona zrna su porozna i ponašaju se kao svojevrsan „rezervoar“ u kojima se zadržava deo vode, pa usporavaju prodor vode kroz vezivnu matricu. Kod lakoagregatnih betona kod kojih je dubina prodora veća nego kod običnog betona, dubina prodora je posledica kobinovanog uticaja ostalih variranih parametara.

Sa slike VI-44 se može videti da se dubina prodora vode kreće u rasponu od 10mm do 32mm, pri čemu je kod 11 vrsta lakoagregatnog betona (preko 60% od ukupnog broja) dubina prodora vode manja od 20mm, dok ostale vrste imaju prodor vode između 20 i 30mm. Ovakav rezultat upućuje na zaključak da lakoagregatni betoni sa analiziranim vrstama agregata mogu postići i najviše klase vodonepropusnosti betona prema SRPS U.M1.206-1/1 [98].

## **5. BLOKOVI ZA ZIDANJE**

Na osnovu rezultata ispitivanja čvrstoće pri pritisku blokova (Tabela V-20), određena je marka bloka prema standardu SRPS U.N1.100 [96]. Blokovi od betona LLK-5 ispunjavaju uslove za MB100, dok blokovi od betona LSSL-5 i LP-5 ispunjavaju uslove za MB75. Na osnovu ocenjenih marki blokova i kriterijuma iz standarda SRPS U.N1.100, zaključeno je da blokovi izrađeni od betona sa sve tri vrste lakog agregata spadaju u grupu nosećih blokova.

Kao i u analizi svojstava betona, i ovde je uočljiv uticaj svojstava lakog agregata na mehaničke karakteristike bloka.



## 6. ZAKLJUČAK

Kao što se iz prethodnog dela može videti, analiza prikazanih rezultata istraživanja je sprovedena u dve faze. U prvoj fazi su na betonima spravljanim sa svakom od tri vrste agregata posebno analizirani uticaj vrste i količine veziva, dok je u drugoj fazi kroz komparativnu analizu svih vrsta betona, analiziran uticaj agregata na osnovna fizičko-mehanička svojstva betona. Izvedeni zaključci prikazani su u nastavku.

### 6.1. Svojstava svežeg betona

U poređenju sa betonom sa rečnim agregatom, promena konzistencije lakoagregatnih betona je znatno izraženija zbog poroznosti lakog agregata. Radi sprečavanja naglog gubitka ugradljivosti lakoagregatnih betona u prvih 30 minuta, obavezno je prethodno kvašenje agregata. Određivanjem količine upijene vode i kinetike upijanja vode može se dosta precizno definisati potrebna količina dodatne vode, kao i optimalno vreme prethodnog kvašenja lakog agregata.

Sve vrste lakog agregata u betonu zahtevaju upotrebu hemijskih dodataka tipa superplastifikatora u cilju postizanja zahtevane konzistencije betona i smanjenja vodo-vezivnog faktora. U slučaju primene većih količina mineralnih dodataka preporučena je primena hiperplastifikatora.

### 6.2. Svojstva očvrslog betona

Za analitičko određivanje zapreminske mase prirodno vlažnog betona se može koristiti izraz  $\gamma_{b,pv}=1,2 \cdot m_c + m_a + 50$  (kg/m<sup>3</sup>).

U konstrukcijskim betonima sa lakim agregatom na bazi ekspandirane gline „Leca-Laterlite“ nije obavezna primena sitnog lakog agregata jer se preporučene vrednosti zapreminske mase lakoagregatnih betona mogu ostvariti bez njegove primene. Zbog velike zapreminske mase zrna agregata od industrijskih otpadnih materijala („ZAG“) zapreminska masa očvrslog betona može biti veća od granične vrednosti za lakoagregatne betone, pa se preporučuje supstitucija jednog dela rečnog sitnog agregata sitnim lakim agregatom. U betonima sa lakim agregatom „Poraver“, u cilju poboljšanja mehaničkih karakteristika deo lakog poroznog agregata mora se zameniti krupnim rečnim agregatom, što značajno povećava zapreminsku masu ovih lakoagregatnih betona.

Betoni spravljeni sa lakim agregatima „Leca-Laterlite“ i „ZAG“ pripadaju klasi D2,0 ( $1800\text{kg/m}^3 < \gamma_b \leq 2000\text{kg/m}^3$ ) prema zapreminskoj masi u prirodno vlažnom stanju, a betoni spravljeni sa lakim agregatom „Poraver“ mogu pripadati i klasi D1,8 ( $1600\text{kg/m}^3 < \gamma_b \leq 1800\text{kg/m}^3$ ) i klasi D2,0, što zavisi od učešća makrostrukturnih komponenti u sastavu betona.

Postignute 28-dnevne čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona kreću se od 25MPa do 50MPa pa se svi ispitivani betonski kompoziti mogu svrstati u konstrukcijske lakoagregatne betone.

Vrsta agregata ima direktan uticaj na vrednost čvrstoće betona pri pritisku.

Najveće čvrstoće betona pri pritisku u okviru grupe lakoagregatnih betona imaju betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“. Betoni sa ovom vrstom agregata pripadaju klasi čvrstoće od LC35/38 do LC45/50, pri čemu se sa dovoljnom pouzdanošću može pretpostaviti da će ova vrsta betona zadovoljiti uslove za klasu čvrstoće LC40/44.

Betoni sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ imaju približno jednake čvrstoće pri pritisku i pripadaju klasi čvrstoće od LC20/22 do LC 30/33.

Supstitucijom dela cementa mineralnim dodacima u kojima dominira leteći pepeo mogu se postići čvrstoće pri pritisku koje su bliske vrednostima čvrstoća lakoagregatnih betona spravljenih samo sa cementom, uz uslov smanjenja vodo-vezivnog faktora. Zbog opasnosti od niskih početnih čvrstoća preporučuje se primena metakaolina ili tehnika za aktivaciju pucolana.

Betoni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ imaju specifičnu čvrstoću koja je čak neznatno veća od specifične čvrstoće običnog betona, što ih čini konkurentnim u grupi konstrukcijskih betona.

Čvrstoće pri pritisku betona sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ su osetljivije na varijacije vrste i količine veziva, kao i vodo-vezivnog faktora u odnosu na betone sa „Leca-Laterlite“ lakim agregatom.

Režim nege betona nema značajnijeg uticaja na vrednost čvrstoće pri pritisku lakoagregatnih betona kod kojih je primenjen postupak prethodnog kvašenja agregata.

Lakoagregatni betoni imaju značajno manji modul elastičnosti u odnosu na beton sa prirodnim agregatom zbog manjeg modula elastičnosti lakog agregata. Vrednosti statičkog modula elastičnosti lakih betona kreću se između 13GPa i 23GPa. Najveće vrednosti modula elastičnosti imaju betoni spravljeni sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ i iznose 21,4-23,2GPa. Vrednosti statičkog modula elastičnosti kod betona sa lakim agregatom „ZAG“ iznose 13,4-18,2GPa, a kod betona sa lakim agregatom „Poraver“ 16,9-21,8GPa. Veće vrednosti u okviru svake grupe se postižu primenom cementa CEM I i nižih vrednosti vodo-cementnog faktora.

Vrednost modula elastičnosti se često određuje na osnovu poznate vrednosti čvrstoće pri pritisku. Zbog toga su, za ispitivane vrste lakoagregatnih betona, formirane funkcionalne zavisnosti, koje se mogu koristiti u praksi. Za betone sa lakim agregatima „Leca-Laterlite“ i „ZAG“ usvojena je zavisnost  $E_c=0,3849f_c+0,422$ , a za betone sa lakim agregatom „Poraver“  $E_c=0,4434f_c+6,2682$ .

Izraz koji je predložen od strane FIP-a,  $E_{icm}=0,04\sqrt{\rho^3f_{cu}}$ , može se upotrebiti za analitičko određivanje statičkog modula elastičnosti lakoagregatnih betona na bazi ekspanzirane gline („Leca-Laterlite“), dok kod betona sa lakim agregatom „ZAG“ i „Poraver“ daje precenjenu (8-22%) odnosno podcenjenu (9-18%) vrednost.

Za sve vrste ispitivanih lakoagregatnih betona vrednost statičkog modula elastičnosti iznosi 60-70% od vrednosti dinamičkog modula elastičnosti. Kao korelaciona veza koja najbolje opisuje zavisnost statičkog i dinamičkog modula elastičnosti usvojena je jednačina prave u obliku  $E_c=0,9552E_d-8,5671$ .

Betoni kod kojih je kao vezivo upotrebljen samo cement imaju veća skupljanja, a betoni kod kojih je deo cementa zamenjen mineralnim dodacima pokazuju manja skupljanja u odnosu na beton sa prirodnim agregatom. Primenom mineralnih dodataka tipa II i malih vrednosti vodo-vezivnog faktora može se ublažiti, ili čak eliminisati, negativan uticaj vrste lakog agregata na skupljanje lakoagregatnih betona.

Izmerene vrednosti skupljanja lakoagregatnih betona su dominantno u granicama 0,4-0,6mm/m.

Lakoagregatni betoni imaju veće kapilarno upijanje vode od običnog betona. Veličina upijanja je u rasponu od 0,5kg/m<sup>2</sup> do 1,8kg/m<sup>2</sup>. Betoni sa agregatom „ZAG“ imaju najveća upijanja kao posledicu otvorene poroznosti lakog agregata i povećane

poroznosti malterske komponente zbog zamene dela sitnog rečnog agregata sitnim lakim agregatom.

Lakoagregatni betoni imaju veće upijanje vode pod pritiskom od običnog betona. Betoni sa agregatom „ZAG“ upijaju najveću količinu vode pod pritiskom. Uzroci ovakvog ponašanja betona su opisani u okviru kapilarnog upijanja vode.

U poređenju sa običnim betonom, dubina prodora vode kod lakoagregatnih betona je uglavnom manja. Objašnjenje za ovakav zaključak leži u činjenici da se kod normalnih betona sa prirodnim agregatom prodor vode odvija kroz vezivnu matricu, jer su zrna agregata poraktično neporozna. Kod lakoagregatnih betona zrna su porozna i ponašaju se kao „rezervoar“ u kojima se zadržava deo vode, pa usporavaju prodor vode kroz vezivnu matricu.

Prema dubini prodora vode pod pritiskom, lakoagregatni betoni pripadaju klasama vodonepropusnosti V-II i V-III prema SRPS U.M1.206-1/1.

### **6.3. Blokovi za zidanje**

Od svih ispitivanih vrsta lakoagregatnih betona, za spravljanje šupljih blokova za zidanje, odabrani su betoni kod kojih je 50% cementa zamenjeno letećim pepelom i metakaolinom. Ispitivanjem ovih blokova zaključeno je se od betona sa lakim agregatom „Leca-Laterlite“ mogu dobiti noseći blokovi marke MB100, a od betona sa lakim agregatima „ZAG“ i „Poraver“ noseći blokovi marke MB75.

## **VII**

# **ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA**



## 1. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Razvoj savremenog, održivog građevinarstva zasniva se u najvećoj meri na primeni novih, kvalitetnijih materijala ali i usavršavanju karakteristika postojećih. Zbog toga su istraživanja u oblasti teorije i tehnologije betona, kao osnovnog građevinskog materijala, i te kako aktuelna i neophodna.

U toku eksperimentalnog istraživanja u oblasti primene lakih agregata koji su proizvedeni od industrijskih otpadnih materijala ukupno je napravljeno i ispitano 19 različitih betonskih mešavina:

- NK - jedna referentna betonska mešavina sa kompaktnim rečnim sitnim i krupnim agregatom;
- LLK - sedam betonskih mešavina za čije spravljenje su upotrebljeni sitni rečni agregat i krupan laki agregat od ekspandirane gline („Leca-Laterlite“);
- LSSL - pet betonskih mešavina za čije spravljenje su upotrebljeni sitnan rečni agregat, sitan laki agregat od ekspandirane gline „Leca-Laterlite“ i krupan laki agregatom od silikatnog-kamenog mulja („ZAG“);
- LP - šest betonskih mešavina za čije spravljenje su upotrebljeni sitnan rečni agregat, sitan i krupan laki agregat od ekspandiranog stakla („Poraver“).

U prvom delu istraživanja napravljene su i ispitane betonske mešavine NK i LLK sa ciljem da se upoznaju specifičnosti projektovanja sastava i svojstva konstrukcijskih betona spravljenih sa lakim agregatom koji se može nabaviti na evropskom tržištu. Iskustva stečena ovim prethodnim ispitivanjima iskorišćena su za proveru mogućnosti primene lakih agregata spravljenih od industrijskih otpadnih materijala u konstrukcijskim betonima. Prilikom sastavljanja programa ispitivanja konstrukcijskih betona sa odabranom vrstom lakog agregata, želeo se sagledati i doprinos vrste i količine cementa na svojstva svežeg i očvrstlog lakoagregatnog betona, kao i uticaj lakog agregata na predmetna svojstva u odnosu na obični - rečni agregat, pa su, iz tih razloga, u betonskim mešavinama varirane vrste i količine cementa (odnosno vezivnih materijala). U drugom delu istraživanja napravljene su i ispitane betonske mešavine LSSL i LP.

Za izvođenje zaključaka o ispitivanim svojstvima, korišćena je komparativna analiza rezultata ispitivanja svih vrsta betona. Na osnovu zaključaka koji su dobijeni na ovaj način, izvedeni su opšti zaključci za projektovanje sastava, pojedina analizirana svojstva i mogućnost primene ispitivanih lakih betona u građevinskoj praksi:

- Za projektovanje sastava betonskih mešavina sa komercijalnim lakim agregatima („Leca-Laterlite“ i „Poraver“) i lakim agregatom od industrijskih

otpanih materijala („ZAG“) mogu se koristiti preporuke date u FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete [97].

- Laki betoni sa komercijalnim konstrukcijskim lakim agregatom „Leca-Laterlite“, mogu se spravljati i sa količinom cementa od oko 350kg/m<sup>3</sup>, bez opasnosti od pojave segregacije i smanjenja stabilnosti betonskih mešavina, a da se pri tome mogu ostvariti čvrstoće pri pritisku >40MPa. Takođe se mogu koristiti i cementi klase 32.5R. Ova vrsta betona ima specifičnu čvrstoću istog reda veličine kao obični beton čvrstoće pri pritisku 60MPa.
- Laki betoni sa agregatom od silikatnog-kamenog mulja („ZAG“) i ekspaniranog stakla („Poraver“) su sitnije granulacije (dvofrakcijski 0/4 i 4/8) i imaju veću specifičnu površinu zrna, pa je preporučena minimalna količina cementa od 400kg/m<sup>3</sup>. Sa ovom količinom cementa dobijene su 28-čvrstoće pri pritisku oko 30MPa.
- Pre početka spravljanja betona, neophodno je prethodno kvasiti agregat. Količina vode za kvašenje i vreme kvašenja se mora odrediti eksperimentalno i zavisi od kinetike upijanja lakog agregata.
- Moduli elastičnosti lakoagregatnih betona su značajno manji (35-60%) u odnosu na modul elastičnosti običnih betona o čemu se posebno mora voditi računa prilikom projektovanja konstrukcijskih elemenata izloženih savijanju.
- Posebno ohrabrujuće deluje mogućnost zamene dela cementa mineralnim dodacima koji predstavljaju industrijske otpadne materijale kao što je, na primer, leteći pepeo. Na taj način se doprinosi očuvanju zdrave životne sredine.
- Lakoagregatni betoni sa visokim sadržajem letećeg pepela se mogu koristiti za proizvodnju nosećih termo-blokova za zidanje. Ove vrste betona se mogu upotrebiti i za proizvodnju šupljih blokova i elemenata za izradu polumontažnih međuspratnih konstrukcija, košuljica...

Može se reći da primena lakoagregatnih betona, kroz rezultate prikazanog istraživanja, u potpunosti prati trend održivog građevinarstva. Kao posledica manje zapreminske mase, može se smanjiti ukupna težina konstrukcije, a samim tim su potrebne i manje količine materijala za građenje. Pored toga, primenom mineralnih dodataka od industrijskih nus-proizvoda i otpada, može se znatno uticati na smanjenje emisije štetnih gasova, očuvanje prirodnih neobnovljivih resursa i smanjenje potrošnje energije.



## 2. PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Istraživanja sprovedena u okviru ove disertacije pokazala su da je moguće napraviti konstrukcijski lakoagregatni beton sa zadovoljavajućim fizičko-mehaničkim karakteristikama sa komercijalnim lakim agregatom ali i sa lakim agregatom dobijenim od otpadnog materijala. Takođe, pokazano je da se zahtevana svojstva mogu postići i sa značajno manjom količinom cementa uz upotrebu mineralnih dodataka.

Buduća istraživanja na temu primene lakoagregatnih betona u konstrukcijama, i pored postojećih, širokih saznanja, i dalje imaju veliki potencijal. Iako su fizičko-mehanička svojstva lakoagregatnih betona uglavnom dosta dobro istražena, uočljive su značajne razlike u zavisnosti od primenjene vrste i količine kako lakog agregata tako količine veziva. To znači da bi bilo potrebno sprovesti dodatna istraživanja uz kontrolisanu varijaciju količina komponentnih materijala u cilju definisanja pouzdanijih zavisnosti između različitih svojstava betona.

Takođe, istraživanja bi u budućnosti trebalo nastaviti u pravcu ispitivanja mogućnosti primene drugih vrsta lakih agregata, prvenstveno dobijenih od obnovljivih ili otpadnih materijala organskog ili neorganskog porekla.

Iako se zamenom prirodnog agregata industrijskim ili prirodnim lakim agregatima smanjuje potrošnja neobnovljivih izvora, pozitivan uticaj primene lakoagregatnih betona na aspekt održivosti je diskutabilan. Ovo se pre svega ogleda u činjenici da je za postizanje visokih mehaničkih karakteristika potrebna veća količina čistog portland cementa čija proizvodnja ima izuzetno veliki negativan uticaj na životnu sredinu, kao i znatno manjoj vrednosti modula elastičnosti što, i pored manje sopstvene težine elemenata, zahteva povećanje dimenzija poprečnog preseka, a samim tim i količina materijala. U cilju dobijanja jasnije slike o održivosti, potrebno je sprovesti opširnu analizu uticaja proizvodnje i primene konstrukcijskih lakoagregatnih betona na životnu sredinu, primenom metodologije ocene životnog ciklusa (LCA – Life Cycle Analysis).



**VIII**

**LITERATURA**



---

**LITERATURA**

1. Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*. 2009; 31(8): p. 601-605.
2. Chandra S, Berntsson L. *Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications*, Norwich: Noyes Publications; 2002.
3. Shetty MS. *Concrete technology - Theory and practice*. 6th ed.: S. Chand; 2005.
4. Gerwick BC. *Construction of Marine and Offshore Structures*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2007.
5. Hsien-Sheng P, How-Ji C, Chao-Wei T, Yi-Ping C. Fire Performance and Thermal Insulation of Reinforced Lightweight Aggregate Concrete. *Advanced Materials Research*. 2011 Jul: p. 1065-1069.
6. Faust T. *Herstellung, Tragverhalten und Bemessung von konstruktivem Leichtbeton – Dissertation (In German)*. Leipzig; 2000.
7. FIP. *Manual of Lightweight Aggregate Concrete*. 2nd ed.: Surrey University Press; 1983.
8. ACI Committee. *ACI 213R-87: Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Farmington Hills; 1999.
9. RILEM. *Functional classification of lightweight concretes: Recommendation LC2*. 2nd ed.; 1978.
10. Newman J, Owens P. *Advanced Concrete Technology - Processes* Newman J, Choo BS, editors. Oxford: Elsevier Ltd.; 2003.
11. EuroLightCon. *LWAC Material Properties: State of the Art*. ; 1998.
12. Malešev M, Radonjanin V. *Građevinski materijali 2 - Materijal sa predavanja*. 2013..
13. Expanded shale, clay and slate institute. *Lightweight Concrete - History, Application, Economics*: Expanded shale, clay and slate institute; 1971.
14. Carolina Stalite Company. *STALITE - ROTARY KILN EXPANDED SLATE LIGHTWEIGHT AGGREGATE*. [Online].; 2009 [cited 2014 9 25. Available from: [http://www.stalite.com/project\\_details.php?id=17](http://www.stalite.com/project_details.php?id=17)
15. Buildex Incorporated. *Haydite Expanded Slate Lightweight Aggregate*. [Online].; 2010 [cited 2014 12 13. Available from: <http://www.buildex.com/index.html>
16. Lytag® LWA. [Online]. [cited 2014 7 5. Available from: <http://www.lytag.net/projects/>

17. European committee for standardization. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and. 2000..
18. Owens PL, Newman JB. Lightweight aggregate manufacture. In Newman J, Choo BS, editors. *Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials.*: Elsevier Ltd; 2003. p. 7/1-7/12.
19. Đorđević V, Đorđević P, Milovanović D. *Osnovi petrologije* Beograd: Nauka; 1991.
20. Grupa autora. *Geološka terminologija i nomenklatura – IV - Petrologija* Petković K, editor.: Zavod za regionalnu geologiju i paleontologiju, Beograd; 1975.
21. Spitzner J. A Review of the Development of Lightweight Aggregate - History and Actual. In I. Holand ea, editor. *CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*; 1995; Sandefjord, Norway. p. 13-21.
22. How-Ji C, Tsong Y, Kuan-Hung C. Evaluating Elastic Modulus of Lightweight Aggregate. *ACI Materials Journal*. 2003; 100(2): p. 108-113.
23. Bremner TW, Holm TA. Elastic Compatibility and the Behaviour of Concrete". *ACI Journal Proceedings*. 1986 March; 83(2).
24. Muravljov M. *Osnovi teorije i tehnologije betona* Beograd: Građevinska knjiga; 2000.
25. ISS. SRPS EN 934-2: Dodaci za beton, malter i injekcionu masu — Deo 2: Dodaci za beton — Definicije, zahtevi, usaglašenost, označavanje i obeležavanje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2014.
26. Mehta KP, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*: McGraw-Hill; 2006.
27. Mehta PK. High-Performance High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development. In *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development & Concrete Technology*; 2004; Beijing, China. p. 3-14.
28. ASTM International. *ASTM C618 - 12a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* ; 2012.
29. Oriol M, Pera J. Pozzolanic activity of metakaolin under microwave treatment. *Cement and Concrete Research*. 1995 Februar; 25(2).
30. NBM Media Pvt. Ltd. NBM Media. [Online].; 2010 [cited 2014 7 12. Available from: <http://www.nbmcw.com/articles/concrete/563-self-curing-concrete-an-introduction.html>
31. Newman JB. *Structural Lightweight Aggregate Concrete* Clarke J, editor. Glasgow: Blackie Academic & Professional; 2005.

32. Lydon. Concrete mix design. 2nd ed.: Applied Science Publishers; 1982.
33. Malohtra VM. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. *Concrete International*. 2002; 24(7).
34. Gebler SH, Klieger P. Effect of fly ash on some of the physical properties of concrete. Research and development bulletin. Portland Cement Association; 1986.
35. <http://www.ce.memphis.edu>. [Online]. [cited 2014 7 28. Available from: [http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA\\_manual/Chap03.pdf](http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap03.pdf)
36. Lewis R, Sear L, Wainwright P, Ryle R. Cementitious additions. In Newman J, Choo BS, editors. *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*.: Elsevier Ltd; 2003. p. 3/3-3/66.
37. Owens PL, Newman JB. *Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials* Newman J, Choo BS, editors. Oxford: Elsevier Ltd; 2003.
38. RILEM Technical Committee 108-ICC. *The Interfacial Transition Zone in Concrete* Maso JC, editor. London: E & FN Spoon; 2004.
39. ACI Committee. ACI 211.2-98: Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete. Farmington Hills;; 1998.
40. CEN. EN 206-1: Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity. Brussels;; 2000.
41. Pauw A. Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density. *ACI Journal*. 1960 Dec.; 57(6): p. 679-687.
42. CEB/FIP. *Model Code for concrete structures*. ; 1978.
43. ACI Committee. ACI 318-95: Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills;; 1995.
44. CEN. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures: General Rules and Rules for Buildings. Brussels;; 2010.
45. BSI. BS 8110: Part II. London;; 1985.
46. Holm TA. *Lightweight Concrete and Aggregates - Standard Technical Publication STP 169C*. Philadelphia;; 1995.
47. Lopez M. Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: a multi-scale investigation. PhD Thesis. Atlanta: School of Civil and Environmental Engineering; 2005.
48. ACI Committee. ACI 209R-08: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Farmington Hills;; 2008.

49. Bogas JA, Gomes A. Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction. *Materials and Design*. 2013; 46: p. 832-841.
50. Lijiu , Shuzhong , Guofan Z. Investigation of the mix ratio design of lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. 2005; 35(5): p. 931-935.
51. Bogas A, Gomes MG, Gomes A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*. 2013; 53(5): p. 962-972.
52. Lo TY, Tang WC, Cui HZ. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*. 2007; 42(8): p. 3025-3029.
53. Chi JM, Huang R, Chang JJ. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete. *Cement & Concrete Composites*. 2003; 25(2): p. 197-205.
54. Ke Y, Beaucour AL, Ortola S, Dumontet H, Cabrillac R. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2009; 23(8): p. 2821-2828.
55. Nguyen LH, Beaucour AL, Orola S, Noumowe A. Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. *Construction and Building Materials*. 2014; 51(31): p. 121-132.
56. Cui HZ, Lo TY, Memon SA, Xu W. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2012 October; 35: p. 149-158.
57. Yang CC, Huang R. A two-phase model for predicting the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996; 26(10): p. 1567-1577.
58. Al-Khaiat H, Haque MN. Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 1998; 28(6): p. 859-866.
59. Lo TY, Cui HZ, Li ZG. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. *Waste Management*. 2004; 24(4): p. 333-338.
60. Ozyildirim HC. *Laboratory Investigation of Lightweight Concrete Properties*. Charlottesville;; 2011.



61. Surbasi S. The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Scientific Research and Essay*. 2009; 4(4): p. 275-288.
62. Kockal NU, Ozturan T. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. *Materials & Design*. 2011; 32(4): p. 2396-2403.
63. Bogas JA, Gomes A. Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica—characterization and normalization. *IJCE*. 2014; 12(2): p. 268-278.
64. Pfeifer DW. Sand replacement in structural lightweight concrete -- Creep and shrinkage studies. *Journal of the American Concrete Institute*. 1968; 65(2): p. 131-140.
65. ACI Committee. ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete. Farmington Hills;; 2003.
66. Kohno K, Okamoto T, Isikawa Y, Mori H. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Research*. 1999; 29(4): p. 611-614.
67. Kabay N, Aköz F. Effect of prewetting methods on some fresh and hardened properties of concrete with pumice aggregate. *Cement & Concrete Composites*. 2012; 34(4): p. 503-507.
68. Bogas JA, Nogueira R, Almeida NG. Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete. *Materials & Design*. 2014; 56: p. 1039-1047.
69. Smeplass S. Drying of LWAC. In Helland S, Holand I, Smeplass S, editors. *Second International Symposium on on Structural Lightweight Aggregate Concrete*; 2000; Kristiansand, Norway: Helli Grafisk. p. 833–843.
70. Henkensiefken R, Castro J, Bentz D, Nantung T, Weiss J. Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*. 2009 October; 39(10): p. 883–892.
71. Bentz DP, Halleck PM, Grader AS, Roberts JW. Water Movement during Internal Curing: Direct Observation Using X-ray Microtomography. *Concrete International*. 2006 October; 28(10): p. 39-45.
72. Bogas JA, Gomes MG, Real S. Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete. *Materials and Structures*. 2014;; p. 1-15.
73. Bozkurt N, Yazicioglu S. Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions. *Indian Journal of Engineering &*

- Material Sciences. 2010; 17: p. 145-151.
74. Liu X, Chia KS, Zhang MH. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(1): p. 335-343.
75. Chia KS, Zhang MH. Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. 2002; 32(4): p. 639-645.
76. Haque N, AL-Khaiat H. Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions. *Materials and Structures*. 1999 August-September; 32: p. 533-538.
77. DIN 1048. Test Methods of Concrete Impermeability to Water, Part 2. Berlin;; 1978.
78. ISS. SRPS EN 196-1: Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2008.
79. ISS. SRPS EN 196-3: Metode ispitivanja cementa - Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
80. ISS. SRPS EN 196-6: Metode ispitivanja cementa — Deo 6: Određivanje finoće mliva. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011.
81. ISS. SRPS EN 197-1: Cement — Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
82. ISS. SRPS EN 1097-3: Ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 3: Određivanje šupljina i zapreminske mase u rastresitom stanju. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2009.
83. ISS. SRPS EN 1097-6: Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata - Deo 6: Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2007.
84. ISS. SRPS EN 933-1: Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata — Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava — Metoda prosejavanja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2013.
85. ISS. SRPS EN 13055-1: Laki agregati - Deo 1: Laki agregati za beton, malter i injekcione smese. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2007.
86. ISS. SRPS B.B8.036: Kameni agregat - Određivanje količine sitnih čestica metodom mokrog sejanja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1982.

- 
87. ISS. SRPS EN 12350-2: Ispitivanje svežeg betona - Deo 2: Ispitivanje sleganja. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
  88. ISS. SRPS EN 12350-7: Ispitivanje svežeg betona - Deo 7: Sadržaj vazduha - Metode pritiska. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
  89. ISS. SRPS ISO 6276: Beton - Zbijeni sveži beton - Određivanje zapreminske mase. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1997.
  90. ISS. SRPS EN 12390-3: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 3: Čvrstoća pri pritisku uzoraka za ispitivanje. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
  91. ISS. SRPS ISO 6784: BETON - Određivanje statičkog modula elastičnosti pri pritisku. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2000.
  92. ISS. SRPS U.M1.029: Beton - Određivanje zapreminskih deformacija. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1983.
  93. UNI. UNI 11307: Testing for hardened concrete: Shrinkage determination. Milano; 2008.
  94. ISS. SRPS EN 12390-8: Ispitivanje očvrslog betona - Deo 8: Dubina penetracije vode pod pritiskom. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2010.
  95. ISS. SRPS U.M8.300: Merenje kapilarnog upijanja vode i utvrđivanje koeficijenta kapilarnog upijanja vode građevinskih materijala. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 1985.
  96. ISS. SRPS U.N1.100: Građevinski prefabrikovani elementi - Šuplji betonski blokovi za zidanje - Tehnički uslovi i metode ispitivanja. Beograd; 1989.
  97. FIP. FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete. 2nd ed.: Surrey University Press; 1983.
  98. ISS. SRPS EN 206-1: Beton — Deo 1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usaglašenost. Beograd: Institut za standardizaciju Srbije; 2011.
  99. Ramachandran VS. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology. 2nd ed.: Cambridge University Press; 1996.
  100. Rossignolo JA, Agnesini MAC, Morias JA. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. Cement and Concrete Composites. 2003 Jan; 25(1): p. 77-82.