

Olivera Đokić¹
Marko Ršumović²
Nikola Hrnjez³
Mirjana Vukosavić⁴
Uroš Belopoljac⁵
Dijana Trajković⁶
Marija Gojkov Milić⁷

OPTIMIZACIJA SADRŽAJA SITNIH ČESTICA I GLINENIH MINERALA U DROBLJENOM AGREGATU DACITA ZA PRIMENU U BETONU^{*)}

0352-2733, 56 (2024), p. 107-126
doi: 10.5937/GK24056107D

UDK: 666.972.12
ORIGINALNI NAUČNI RAD

Rezime

Eruptivne stene se, kao visokokvalitetni agregati, mogu koristiti za proizvodnju betona. Da bi se ovaj potencijal i ostvario, agregati moraju da prođu, između ostalih, i određene testove koji se tiču količine i kvaliteta sitnih čestica. Agregat dacita proizveden je na separaciji bez dodatnog pranja i otprašivanja. U sitnom agregatu utvrđen je povećan sadržaj sitnih čestica i štetnih minerala glina. U cilju utvrđivanja njihovog optimalnog sadržaja, laboratorijski su projektovane tri mešavine betona sa različitim sadržajem sitnih čestica. Na betonskim kockama ispitana je čvrstoća pri pritisku, savijanju i upijanje vode nakon 7 i 28 dana. Rezultati ispitivanja pokazali su koja mešavina pokazuje najbolja svojstva i data su preliminarne rešenja za uklanjanje viška sitnih čestica iz agregata.

¹ dr, vodeći inženjer, Institut za puteve ad, Beograd, o.djokic@highway.rs;

² mast.inž.građ., stručni saradnik, Institut za puteve ad, Beograd,
marko.rsumovic@highway.rs;

³ mast.inž.rud., upravnik kamenoloma, Lafarge, nikola.hrnjez@lafarge.com;

⁴ mast.inž.organiz.nauk., menadžer za agregate i asfalt, Lafarge,
mirjana.vukosavic@lafarge.com;

⁵ dipl.inž.rud., stručni saradnik II, Institut za puteve ad, Beograd,
u.belopoljac@highway.rs;

⁶ mast.geol., stručni saradnik II, Institut za puteve ad, Beograd, d.trajkovic@highway.rs

⁷ dipl. Inženjer građevinarstva, Institut za puteve ad, Beograd, m.gojkov@highway.rs

^{*)} Rad je u nešto izmenjenoj formi preuzet sa XXIX Kongresa DIMK-e i X Kongresa SGIP-a održanog u Sokobanji 21-23. maja 2025. godine.

Cljučne reči: silikatni agregat, ekvivalent peska, metilen-plavo, minerali glina, beton

OPTIMIZATION OF CONTENT FINES AND CLAY MINERALS IN DACITE AGGREGATE FOR CONCRETE PRODUCTION

Summary

Eruptive rocks, as high-quality aggregates, can potentially be used for concrete production. To realise this potential, aggregates must pass, among others, specific tests concerning the quantity and quality of fine particles. The dacite aggregate was produced on a separation plant without additional washing and dusting. An increased content of fines and harmful clay minerals was found in the fine aggregate. To determine their optimal content, three concrete mixtures with different content of fines were designed in the laboratory. Concrete blocks were tested for compressive strength, flexural strength and water absorption after 7 and 28 days. The test results showed which mixture showed the best properties, and preliminary solutions were given to remove excess fine particles from the aggregate.

Keywords: silicate aggregate, sand equivalent, methylene blue, clay minerals, concrete

1. UVOD

U našoj zemlji, u građevinskoj industriji, za proizvodnju betona i izradu asfaltnih mešavina uglavnom se koriste magmatske vulkanske (eruptivne) stene silikatnog sastava i sedimentne i/ili metamorfne stene karbonatnog sastava [4]. U drugim zemljama, agregati magmatskih plutonskih (dubinskih) stena glavni su izvor drobljenih agregata za proizvodnju betona. Bez obzira na poreklo i sastav, agregati proizvedeni od ovih stena moraju da zadovolje niz specifikacija koje se odnose na čvrstoću i trajnost. Brojni su standardni testovi koji se u današnje vreme koriste kako bi se osiguralo da agregati ispunjavaju odgovarajuće specifikacije. Petrografska analiza, na primer, predstavlja jedan od njih i smatra se važnim testom za predviđanje ukupnih performansi agregata za beton, naročito kada su u pitanju mehanička i hemijska svojstva betona [6].

Ocena kvaliteta sitnih čestica u agregatu za beton vrši se ispitivanjem na metilen-plavo. Ovaj test nije bio deo standardnih SRPS testova, već je sa usvajanjem evropskih standarda počeo kod nas da se sve češće koristi. Kameni agregati se smatraju prihvatljivim ako su vrednosti adsorpcije

metilen-plavog ispod granice propisanih vrednosti. Kod nas je ova granica data u dokumentu Smernice i pravila za primenu nacionalnih tehničkih zahteva za proizvodnju betona koji se ugrađuje u betonske, armiranobetonske i prethodno napregnute konstrukcije SRPS U.M1.206:2023 i iznosi $MB_{1,5}$ [18]. Osim za metilen-plavo, isti dokument propisuje i granice za sadržaj sitnih čestica (f) i ekvivalenta peska (SE). Ova tri testa smatraju se međusobno povezanim i krucijalnim kada je u pitanju ocena kvaliteta sitnih čestica u agregatu. Povećan sadržaj sitnih čestica često prate niže vrednosti ekvivalenta peska i povećane vrednosti za metilen-plavo. Odnosno, u frakciji agregata izgrađenoj od prašiniastih i glinovitih čestica, često je smanjen sadržaj peska a povećan sadržaj gline. U određenim slučajevima ovi testovi nisu u saglasnosti.

Istraživanja su pokazala da povećanje MB vrednosti u drobljenom pesku utiče na pucanje svežeg betona i povećano sušenje očvrslog betona. Kada je ova vrednost veća ili jednaka 1,45 g/kg, otpornost betona na pojavu pukotina usled skupljanja je niža. Može se zaključiti da na metilen-plavo ne utiče toliko sadržaj sitnih čestica, već sadržaj minerala glina [12]. Fina granularna struktura i površinska aktivnost minerala glina povećava količinu vode koja je potrebna da bi se postigla obradivost betona. Čak i kada je sadržaj sitnih čestica u agregatu mali, vrednost MB se povećava ako su u agregatu prisutni minerali glina. Sadržaj sitnih čestica (manjih od 0,063 mm) se ne reflektuje na svojstva betona. Odnosno, da bi se predvidelo ponašanje betona, potreban je metilen-plavo test, koji daje indikaciju kvaliteta sitnih čestica. Proizvođači agregata bi stoga trebalo da naprave određena poboljšanja u procesu proizvodnje betona uzimajući u obzir rezultate metilen-plavo testa [9].

Sa druge strane, postoje studije koje pokazuju da u agregatima andezita može da bude i povećan sadržaj sitnih čestica (14%) u sitnom agregatu 0/4 mm, a da je MB 0,75%, odnosno da je sadržaj štetnih minerala glina (montmorionita) ispod granice od 1% [2]. Isto je zapaženo i kod mermera koji se, kao mekanije stene u odnosu na magmatske, lakše drobe i često imaju povećan sadržaj sitnih čestica, ali je kvalitet tih čestica zadovoljavajući, odnosno vrednosti MB su niske. U isto vreme rezultati ekvivalenta peska pokazuju niže vrednosti (SE) pa se čini da testovi nisu u saglasnosti [19]. U ovom slučaju preporuke su da se pri oceni kvaliteta agregata prednost daje vrednosti metilen-plavog [13].

Test metilen-plavog ne funkcioniše tačno i zadovoljavajuće u svim litotipovima magmatskih stena. Sadržaj smektita u intermedijarnim stenama je snažno povezan sa vrednostima testa metilen-plavog zbog svojstva povećanog upijanja vode i bubrenja minerala iz grupe smektita. Tip i

procenat sadržaja hlorita ne utiče na vrednosti metilen-plavog u bazičnim stenama. Međutim, sadržaj serpentina u ultrabazičnim stenama je odlučujući faktor za tačnost testa MB (70% kritičan procenat) [8].

Cilj ove studije bio je da objasni kako sadržaj štetnih minerala glina i hlorita u sitnom agregatu dacića utiču na svojstva betona. Upoređena su svojstva betona pripremljena sa sitnim agregatom iz proizvodnje, opranim na situ 0,063 mm i kombinacijom ova dva agregata pri čemu je učešće krupnog agregata bilo nepromenjeno. U cilju poboljšanja svojstava betona, dodatno je pripremljen beton tako što je korigovan granulometrijski sastav opranog agregata sa prirodnim peskom. U radu su analizirane fizičko-mehaničke karakteristike ovako izrađenih betona. Istraživanja treba da pomognu proizvođaču u izboru metode otprašivanja i/ili pranja sitnih čestica na drobilično-separacionom postrojenju i/ili transporta do neke druge separacije gde će se agregati oprati i pripremiti za dalju upotrebu za proizvodnju betona.

2. PRIPREMA MATERIJALA I METODE

Iz kamenoloma "Ćeramide" dopremljeno je oko 500 kg agregata u frakcijama 0/4 mm, 4/8 mm i 8/16 mm koje su se koristile za izradu tri mešavine betona pripremljene po istoj recepturi. Frakcije su uzorkovane i dopremljene od strane proizvođača. Po dopremanju u laboratoriju sve frakcije su se sušile razasute na vazduhu u laboratorijskim uslovima. Frakcije 4/8 mm i 8/16 mm nisu prane, a frakcija 0/4 mm je korišćena u tri varijante i to kao:

- 100% frakcija iz proizvodnje na drobilično-separacionom postrojenju;
- 50% frakcija iz proizvodnje + 50% vodom oprana frakcija na situ 0,063 mm;
- 100% vodom oprana frakcija na situ veličine otvora 0,063 mm.

Ispitivanje karakteristika agregata izvršeno je pomoću standardizovanih metoda. Prvo je određen sadržaj vlage (SRPS B.B8.035:1984, povučen), oblik zrna krupnog agregata (SRPS B.B8.048:1987, povučen) i upijanje vode (SRPS ISO 6783:1999, povučen). Kvalitet sitnih čestica ispitan je preko ekvivalenta peska (SRPS EN 933-8:2016) i metilen-plavog (SRPS EN 933-9:2023). Ekvivalent peska rađen je na nekorigovanim frakcijama 0/2 mm ili 0/4 mm, a metilen-plavo na frakciji 0/2 mm i fileru 0/0,125 mm. Ispitivanja agregata izvršena su u Laboratoriji za kamen i kamene agregate Instituta za puteve ad, Beograd.

Metodom rendgenske difrakcije na polikristalnom materijalu utvrđeno je prisustvo nekoliko kristalnih faza [10]. Pored potvrđenih faza u uzorku je konstatovano prisutno i nekoliko različitih minerala iz grupe slojevitih silikata za čiju identifikaciju su urađene dodatne metode pripreme i analize na orijentisani preparatima [11]. Ispitivanja su izvršena na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Za izradu probnih betonskih mešavina upotrebljen je cement proizvođača LAFARGE BFC SRBIJA DOO BEOČIN: Portland kompozitni cement oznake PC 20M (S-L) 42,5R, ili CEM II/A-M (S-L) 42,5R, po Pravilniku o kvalitetu cementa [16].

Granulometrijski sastav frakcija agregata određen je metodom prosejavanja na suvo uz prethodno potapanje u vodu, ispiranje na situ veličine otvora 0,063 mm i sušenje agregata po metodi iz standarda SRPS EN 933-1:2013. Granulometrijski sastavi pripremljenih mešavina agregata za probe betona određeni su na osnovu učešća pojedinih frakcija. Ova ispitivanja kao i ispitivanja betonskih mešavina izvršena su u Laboratoriji za beton i veziva Instituta za puteve ad, Beograd. Sastav betonskih mešavina je projektovan tako da sadržaj cementa bude 380 kg/m^3 , a dodatak vode do postizanja konzistencije svežeg betona, mereno metodom sleganja, koja odgovara klasi konzistencije S3 (sleganje od 100 do 150 mm) i ispitan u skladu sa SRPS EN 12350-2:2019.

Nakon završenih ispitivanja i analize dobijenih rezultata, pripremili smo i četvrtu probu betona samo sa poboljšanim granulometrijskim sastavom oprane frakcije 0/4 mm na situ 0,063 mm, dodavanjem prirodnog peska 0/4 mm sa separacije "Duvanište" u količini od 25% u mešavini, odnosno 50% od ukupnog učešća frakcije 0/4 mm. Sadržaj ostalih frakcija, receptura betona i sadržaj cementa ostao je isti.

3. POVRŠINSKI KOP "ĆERAMIDE"

Petrografskim ispitivanjem utvrđeno je da stenska masa genetski pripada magmatskim vulkanskim (eruptivnim) stenama, dacitima porfirske strukture i masivne teksture koji se, zbog svog povoljnog mineralnog sastava i sklopa, mogu koristiti za proizvodnju agregata za spravljanje betona i izradu asfaltnih mešavina. Bližom petrološkom odredbom, na osnovu mineralnog i hemijskog sastava, ove stene su određene kao kvarclatiti. Fenokristali su predstavljeni kvarcom, plagioklasom, sanidinom, biotitom i amfibolom. Krupni fenokristali sanidina dimenzija do 10 cm retko su zahvaćeni mikroskopskim preparatom pri čemu se stena često određuje kao dacit. Osnovna masa je holokristalasta do

hipokristalasta. Sekundarni minerali su sericit i hlorit, [5], [7], [3]. Minerali glina se ne mogu identifikovati mikroskopskim ispitivanjem. Njihova identifikacija utvrđena je rendgenskim ispitivanjem i prikazana u odeljku 4.2. Na površinskom kopu kamenoloma "Ćeramide" (slika 1) je otvoreno je nekoliko etaža.



Slika 1. Čelo kamenoloma "Ćeramide" (a), makroskopski uzorak odminiranog bloka (b), mikrofotografija dacita porfirske strukture sa fenokristalima plagioklasa - pl, biotita – bi i osnovne mase - om (c), (Izvor: N.Hrnjez pod a i b, april 2025)

Tehnološki proces započinje otkopavanjem i uklanjanjem otkrivke (jalovine), bušenjem i miniranjem, utovarom odminiranog dacita i transportom do drobilnog postrojenja koji se nalazi neposredno do kamenoloma. Komadi kamena dimenzija 0-1500 mm se ubacuju u čeljusnu IBAG drobilicu na primarno drobljenje do 400 mm. Ovako izdrobljen materijal ide na sekundarno drobljenje konusnom drobilicom KUBRIA do 120 mm. Tercijalna drobilica OMNCOM ulazni materijal od 0-40 mm predrobljava na 0-22 mm. Drobično-separaciono postrojenje ima sledeći proizvodni program: frakcije 0/2 mm, 2/4 mm, 0/4 mm, 4/8 mm, 8/11 mm, 8/16 mm, 0/4 mm II kl; 31,5/63 mm; 0/31,5 mm; 0/63 mm; 31,5/125 mm.

Nusproizvodi su tamponi druge klase 0/31,5 mm II kl, 0/63 mm II i alterisani dacit. Po potrebi i zahtevu kupaca moguće je praviti i druge nestandardne frakcije. Kvalitet agregata se menja zavisno od vrste kamena i vremenskih uslova, od čega zavisi i upotrebljivost materijala. Godišnje se na separacionom postrojenju proizvede oko 300.000 t. Proizvodnja varira od godine do godine zavisno od potražnje kupaca i infrastrukturnih projekata. Problemi koji se u novije vreme javljaju vezani su za deponovanje velikih količina frakcija 0/2 mm, 0/4 mm, 4/8 mm i tampona druge klase. Neophodno je naći primenu ovih frakcija kako bi se smanjile deponovane količine i rasteretilo opterećenje na životnu sredinu.

Trenutno separacija poseduje važeće Sertifikate o stalnosti performansi za spravljanje betona i izradu asfaltnih mešavina (gornjeg nosećeg i habajućeg sloja kolovozne konstrukcije na putevima svih grupa saobraćajnog opterećenja) za frakcije 2/4 mm, 4/8 mm, 8/11 mm i 8/16 mm.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1 Agregati za izradu proba betona

Nakon sušenja frakcija agregata na vazduhu, određen im je sadržaj vlage. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 1. Zapaženo je da je frakcija 0/4 mm iz proizvodnje nakon prosušivanja zadržala dvostruko veći sadržaj vode u odnosu na opranu i na vazduhu sušenu frakciju.

Tabela 1. Sadržaj vlage u frakcijama agregata nakon sušenja na vazduhu

Karakteristika agregata	Metoda ispitivanja	Rezultati ispitivanja
Određivanje vlažnosti agregata (%)		
- frakcija 0/4 mm iz proizvodnje	SRPS B.B8.035:1984, povučen	1,68
- frakcija 0/4 mm vodom oprana na situ		0,86
- frakcija 0,063 mm i na vazduhu prosušena		1,25
- frakcija 4/8 mm iz proizvodnje		1,05
- frakcija 8/16 mm iz proizvodnje		

Granulometrijski sastavi frakcija sitnog agregata (iz proizvodnje i vodom oprane na situ 0,063 mm) i krupnog agregata prikazani su u tabeli 2. Sadržaj sitnih čestica u frakciji 0/4 mm iz proizvodnje malo prelazi maks. dozvoljenih 10% (f_{10}) prema SRPS U.M1.206:2023 Smernicama i pravilima za primenu nacionalnih tehničkih zahteva za proizvodnju betona koji se ugrađuje u betonske, armiranobetonske i prethodno napregnute

konstrukcije [18]. Oprana frakcija 0/4 mm ima mali sadržaj sitnih čestica (1,2%) koje su prošle kroz sito 0,063 mm, što je zanemarljiva količina obzirom da je oko 100 kg agregata oprano na najmanjem situ. Frakcija 4/8 mm takođe pokazuje povećan sadržaj sitnih čestica (maks. 1%) prema Pravilniku o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt [17]. Frakcija je uzorkovana u zimskom periodu sa deponije na separaciji gde je segregacija materijala moguća.

Tabela 2. Granulometrijski sastav frakcija agregata

Otvor sita (mm)	Prolaz na sitima za frakcije agregata (%), SRPS EN 933-1:2013			
	0/4 mm, iz proizvodnje	0/4 mm, vodom oprana	4/8 mm, iz proizvodnje	8/16 mm, iz proizvodnje
31,5	100,0	100,0	100,0	100,00
16,0	100,0	100,0	100,0	99,7
8,0	100,0	100,0	93,5	8,2
4,0	93,9	94,6	13,8	1,6
2,0	65,7	64,4	5,4	1,5
1,0	39,6	34,5	4,5	-
0,5	28,4	21,2	4,2	-
0,25	20,6	11,7	-	-
0,125	15,3	5,7	-	-
0,063	10,8	1,2	2,5	0,9

Tehničke karakteristike agregata prikazane su u tabeli 3. Oblik zrna agregata je kubičast. Sadržaj zrna nepovoljnog oblika je mali (6%). Prema Pravilniku za agregate oblik zrna se određuje preko zapreminskog koeficijenta. Smernice za proizvodnju betona propisuju evropski standard za oblik zrna SI_{20} .

Upijanje vode je rađeno na sitnom i krupnom agregatu. Tehnički uslovi po Pravilniku ograničavaju kamen za beton na 1%, ali uslova za upijanje vode agregata nema. Analizirajući rezultate upijanja vode sitnog agregata (tabela 3) može se zaključiti da oprana frakcija ima najveće vrednosti upijanja vode (1,78%).

Tabela 3. Tehničke karakteristike agregata

Karakteristika agregata	Metoda ispitivanja	Rezultati ispitivanja agregata			Pravilnik za agregat [17]	SRPS U.M1.206:2023 [18]
		proizvodnja	50%:50%	opran na situ 0,063 mm		
Oblik zrna 3:1 (%) - frakcija 4/8 mm - frakcija 8/16 mm	SRPS B.B8.048:1987, povučen (Prilog III-R)	6,0 6,3	-	-	-	SRPS EN 933-4:2010 SI ₂₀
Upijanje vode (%) - frakcija 0/4 mm - frakcija 4/8 mm - frakcija 8/16 mm	SRPS ISO 6783:1999, povučen	1,60 2,29 2,15	1,56 - -	1,78 - -	-	-
Ekvivalent peska (%) nekorigovan	SRPS EN 933-8:2016	SE (0/2)	44	61	91	-
		SE ₄	55	67	86	-
Metilen-plavo MB (g/kg)	SRPS EN 933-9:2023	0/2 mm	7,6	3,0	1,0	-
		0/0,125 mm	15,0	8,3	1,7	-

Obzirom da su čestice gline i prašine oprane, ova voda je vezana isključivo za vodu koja ulazi u pukotine zrna agregata. Upijanje vode frakcije 0/4 mm iz proizvodnje je manja brojčano (1,60%). Vrednost nije reprezentativna za poređenje, zato što se potapanjem uzorka u vodu gubi deo kamene prašine i gline iz agregata, odnosno njihovo upijanje ovom metodom nije moguće izmeriti.

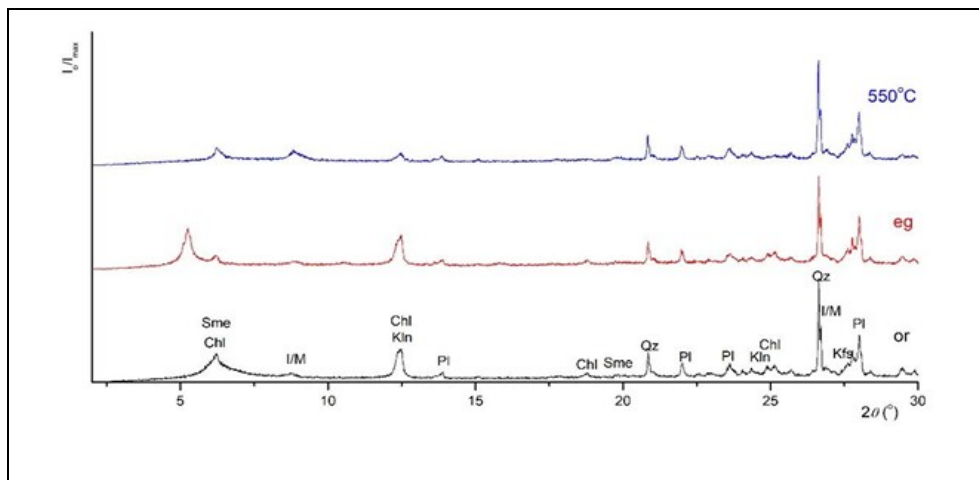
Kvalitet sitnih čestica izražen preko ekvivalenta peska u frakciji iz proizvodnje iznosi SE 44 u nekorigovanoj frakciji 0/2 mm, pri čemu je sadržaj metilena-plavog MB 7,6 g/kg, što je dosta povećana vrednost u odnosu na nacionalnu granicu (f_{16} , SE₆₀ i MB_{1,5} za krečnjake). Granica za prirodni agregat je takođe propisana (f_{10} , SE₇₀ i MB_{1,5}). Međutim, za drobljene agregate silikatnog sastava nije propisana granica za kvalitet sitnih čestica, osim f_{10} . Ovo je razumljivo imajući u vidu da se kod nas uglavnom koriste rečni agregati (šljunak i pesak) za proizvodnju betona. Obzirom da u zemljama u okruženju nije dozvoljena upotreba šljunka i peska, i da se evropska regulativa sve više inkorporira u našu regulativu, neophodno je u narednim revizijama standarda SRPS U.M1.206:2023 ove granice propisati. Prema preporučenim specifikacijama za granitne materijale kao sitne agregate u betonu, koje daje "Building and Construction Authority (BSA)", sadržaj sitnih čestica je kategorisan na f_3 , f_{10} i f_{16} , pri čemu je MB 0.8 g/kg [1]. U nacionalnim dodacima Slovenaca i Francuza ova granica je MB 1 g/kg [13], [15], [20].

Frakcija 0/4 mm mešavine zrna agregata 50% iz proizvodnje, a 50% oprane na situ 0,063 mm ima povećanu vrednost MB koja iznosi 3 g/kg.

Ovo ukazuje da će proizvođač teško delimičnim pranjem ili otprašivanjem agregata postići zadovoljavajući kvalitet ulazne sirovine za proizvodnju agregata i pored zadovoljavajuće vrednosti SE 61. Ovaj kvalitet se postiže potpunim pranjem agregata (SE 91 i MB₁) kao što se pere prirodni agregat na separacijama šljunkova.

4.2 Rendgenska ispitivanja agregata

U ispitivanom uzorku agregata 0/4 mm, rendgenskom analizom utvrđeno je prisustvo nekoliko kristalnih faza - mineral kvarc, mineral iz grupe plagioklasa, mineral iz grupe kalijumskih feldspata (ortoklas) i mineral kalcit. Pored potvrđenih faza u uzorku je prisutno i nekoliko različitih minerala iz grupe slojevitih silikata za čiju identifikaciju su urađene dodatne metode pripreme i analize (slika 2) [10].



Slika 2. Difraktogrami orijentisanih preparata uzorka agregata 0/4 mm sa kamenoloma "Ćeramide". Legenda: Sme – mineral iz grupe smektita, Chl – mineral iz grupe hlorita, I/M – mineral iz grupe ilit/liskun, Kln – mineral iz grupe kaolinita, Qz – kvarc, Pl – mineral iz grupe plagioklasa, Kfs – mineral iz grupe kalijumskih feldspata.

Analizom orijentisanih i različito tretiranih preparata koji su snimljeni u karakterističnom opsegu 2–30° 2θ (slika 2) potvrđeno je prisustvo minerala glina iz grupe smektita, minerala iz grupe hlorita, minerala iz grupe ilit/liskuna i minerala iz grupe kaolinita [11].

Prisustvo minerala glina (smektitiska i kaolinitska grupa) i minerala iz grupe ilita/liskuna vezano je za procese hidrotermalne alteracije feldspata,

dok su minerali iz grupe hlorita rezultat hidrotermalne alteracije biotita i amfibola. Ovi sekundarni minerali prisutni su kako u fenokristalima, tako i u osnovnoj masi stene. U krupnom agregatu dacita sekundarni minerali su čvrsto vezani u strukturi stene i ne bi trebalo da značajno utiču na karakteristike betona. Problemi nastaju u sitnom agregatu, kada dolazi do drobljenja osnovne mase i oslobađanja sekundarnih minerala koji su štetni za kvalitet betona.

4.3 Mešavine agregata za izradu proba betona

Sastav mešavine frakcija agregata za izradu proba betona je bio sa sledećim učešćem pojedinih frakcija, prikazanim u tabeli 4.

Tabela 4. Sastav mešavina agregata za izradu proba betona

Mešavina	Učešće pojedinih frakcija u mešavini za probu betona			
	0/4 mm, iz proizvodnje	0/4 mm, vodom oprana	4/8 mm, iz proizvodnje	8/16 mm, iz proizvodnje
I	50%	0%	16%	34%
II	25%	25%	16%	34%
III	0%	50%	16%	34%
IV	0%	25% + 25% (prirodni pesak)	16%	34%

Granulometrijski sastav pripremljenih mešavina agregata za probe betona je prikazan u tabeli 5.

Tabela 5. Granulometrijski sastav mešavina agregata

Otvor sita (mm)	Prolaz na sitima (%), SRPS EN 933-1:2013		
	Mešavina I	Mešavina II	Mešavina III
31,5	100,0	100,0	100,0
16,0	99,9	99,9	99,9
8,0	67,8	67,8	67,8
4,0	49,7	49,9	50,1
2,0	34,2	33,9	33,6
1,0	20,5	19,2	18,0
0,5	14,9	13,1	11,3
0,25	10,3	8,1	5,8
0,125	7,6	5,2	2,8
0,063	6,1	3,7	1,3

4.4 Karakteristike upotrebljenog cementa

Ispitane su osnovne karakteristike upotrebljenog uzorka cementa, a rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 6.

Tabela 6. Karakteristike upotrebljenog cementa CEM II/A-M (S-L) 42,5R

Karakteristika cementa	Metoda ispitivanja [16]	Rezultat ispitivanja
Gubitak žarenjem (%)	SRPS EN 196-2:2015, т.4.4.1	7,14
Nerastvorljivi ostatak u HCl/Na ₂ CO ₃ (%)	SRPS EN 196-2:2015, т.4.4.3	0,29
Sadržaj sulfata, SO ₃ (%)	SRPS EN 196-2:2015, т.4.4.2	3,61
Sadržaj hlorida, Cl ⁻ (%)	SRPS EN 196-2:2015, т.4.4.16	0,041
Voda za standardnu konzistenciju (%)	SRPS EN 196-3:2017	28,8
Vreme početka vezivanja (minuta)	SRPS EN 196-3:2017	165
Vreme kraja vezivanja (minuta)	SRPS EN 196-3:2017	220
Finoća mliva, prosejavanjem 90µm (%)	SRPS EN 196-6:2019	0,45
Čvrstoća pri savijanju (MPa), - na 2 dana - na 7 dana - na 28 dana	SRPS EN 196-1:2017, т.9.1	5,2
		7,2
		8,4
Čvrstoća pri pritisku (MPa), - na 2 dana - na 7 dana - na 28 dana	SRPS EN 196-1:2017, т.9.2	24,6
		39,0
		51,4

4.5 Rezultati ispitivanja betona

Rezultati ispitivanja cementbetonskih mešavina prikazani su u tabeli 7.

Tabela 7. Rezultati ispitivanja betona

Karakteristika betona	Metoda ispitivanja	Mešavina I	Mešavina II	Mešavina III	Mešavina IV
Cement (kg/m ³)		380	384	378	384
Vodocementni faktor, W/C		0,776	0,713	0,710	0,629
Konzistencija, sleganje (mm)	SRPS EN 12350-2:2019	140	130	100	155
Zapreminska masa svežeg betona (kg/m ³)	SRPS EN 12350-6:2019	2186	2217	2262	2272
Zapreminska masa betona na 7 dana (kg/m ³)	SRPS EN 12350- 7:2019; /AC:2021	2176	2206	2250	2271
Čvrstoća pri pritisku na 7 dana (MPa)	SRPS EN 12390-3:2019	15,2	19,2	21,2	26,4
Čvrstoća pri savijanju na 7 dana (MPa)	SRPS EN 12390-5:2019	2,9	3,0	3,5	-
Ukupno upijanje vode na 28 dana (%)	SRPS EN 1338:2012, Прилог Е	12,9	12,0	10,3	-
Zapreminska masa betona na 28 dana (kg/m ³)	SRPS EN 12350- 7:2019; /AC:2021	2186	2213	2254	-
Čvrstoća pri pritisku na 28 dana (MPa)	SRPS EN 12390-3:2019	23,1	29,1	31,5	35,4
Čvrstoća pri savijanju na 28 dana (MPa)	SRPS EN 12390-5:2019	3,9	4,1	4,2	-
Ukupno upijanje vode na 28 dana (%)	SRPS EN 1338:2012, Прилог Е	12,7	11,2	9,7	-

Dobijeni rezultati ispitivanja cementbetonskih mešavina su pokazali da je W/C faktor izuzetno visok ukoliko se koristi frakcija 0/4 mm iz proizvodnje. Zamenom dela (50%) frakcije 0/4 mm iz proizvodnje sa frakcijom 0/4 mm koja je oprana na situ otvora 0,063 mm postiže se slična konzistencija svežeg betona pri nešto manjem W/C faktoru (za 8%). Kada je upotrebljena samo oprana frakcija 0/4 mm nije došlo do daljeg pada W/C faktora ali je došlo do izvesnog pada ugradljivosti betona na osnovu izmerene konzistencije metodom sleganja.

Zapreminska masa svežeg i očvrslog betona ima najniže vrednosti kod mešavine I gde je upotrebljena samo frakcija 0/4 mm iz proizvodnje, a

raste do mešavine II i dalje do mešavine III (gde je upotrebljena samo oprana frakcija 0/4 mm).

Dobijene vrednosti za čvrstoću pri pritisku betona na 7 i 28 dana kod mešavine I su značajno niske, obzirom da je mešavina sa 380 kg cementa po m³ betona i klasom konzistencije S3, što je posledica visokog sadržaja po beton štetnih minerala glina. Zamenom dela (50%) frakcije 0/4 mm iz proizvodnje sa opranom frakcijom 0/4 mm, kod mešavine II dobija se značajno povećanje vrednosti od 26% za čvrstoću pri pritisku betona na 7 i 28 dana. Kada je u mešavini III upotrebljena oprana frakcija 0/4 mm, dobijeno je povećanje čvrstoće pri pritisku u odnosu na mešavinu I od oko 38% a u odnosu na mešavinu II samo za 8-10%, uz navedeni pad ugradljivosti betona.

Čvrstoća pri savijanju betona raste od mešavine I do mešavine III, a vrednosti za ukupno upijanje vode betona opadaju. Ukupno upijanje vode betona na 28 dana je nešto manje od upijanja vode na 7 dana, kod sve tri mešavine.

Za mešavinu IV, gde je oprana frakcija 0/4 mm delom (50%) zamenjena sa separisanom prirodnom rečnom frakcijom 0/4 mm postignuta je značajno bolja ugradljivost betona (sleganje 155 mm) pri manjem W/C faktoru, a na 7 dana dobijena je čvrstoće pri pritisku betona od 26,4 MPa, što je poboljšanje u odnosu na mešavinu III za 25%, a u odnosu na mešavinu I za 74%. Čvrstoća pri pritisku betona nakon 28 dana je 35,4 MPa.

5. MOGUĆA REŠENJA

Analizom dobijenih rezultata karakteristika betona (tabela 7) zaključeno je da mešavina betona III, koja je uključila frakciju 0/4 mm opranu na situ 0,063 mm, postiže najveće vrednosti čvrstoće pri pritisku na 7 dana (21,2 MPa) i na 28 dana (31,5 MPa). Međutim, obzirom da je granulometrijski sastav oprane frakcije bio krupnozrn, odnosno da su nedostajale sitne čestice dobrog kvaliteta, granulometrijski sastav je korigovan dodavanjem 0/4 mm frakcije prirodnog agregata količini od 25% u mešavini, odnosno 50% od ukupnog učešća frakcije 0/4 mm. Čvrstoća pri pritisku tako projektovanog betona nakon 7 dana nege u vodi iznosila je 26,4 MPa.

Rešenja koje proizilaze iz ovih ispitivanja ukazuju da proizvođač mora da ukloni sa drobljenog agregata dacita sadržaj sitnih čestica koje u sebi sadrže štetne minerale glina i hlorita (smektit, ilit/liskun, kaolinit, hlorit). Uklanjanje može da učini na jedan od sledećih načina:

- Nastaviti proizvodnju frakcija bez pranja na drobilično-separacionom postrojenju. Neoprane frakcije transportovati do separacionog

postrojenja u blizini fabrike betona gde bi se frakcije drobljenog agregata oprale. Pri pravljenju betona dodavati prirodni pesak u cilju korekcije granulometrijskog sastava ulaznih komponenti betona.

- Otprašivati sitne čestice na samom separacionom postrojenju ciklonom ili hidrociklonom odmah nakon drobljenja [14]. Pronaći rešenja za dalju upotrebu ovako nastalog nusproizvoda koji se sastoji od smeše kaolinita, smektita i hlorita kao što je npr. građevinska keramika (cigle, blokovi), geobarijere (visok sadržaj smektita), aditivi (potencijal za nano primene uz obradu) itd.

Ekonomska opravdanost ponuđenih rešenja ukazuju na sledeće:

- Frakcija 0/4 mm u stanju gde ne zadovoljava standarde kvaliteta, cena se okvirno kreće oko 2-3 €/t, sto je ispod proizvodne cene koja se kreće oko 6 €/t, jer se ne može koristiti u betonima i asfaltima, vec isključivo za nasipanje ili zapunjavanje kanala cevovoda ili podzemnih rezervoara.
- U slučaju delimičnog pranja ove frakcije i njenog korišćenja za proizvodnju betonskog crepa, koji Lafarge planira da proizvodi u Obrenovcu, cena bi mogla da bude oko 10 €, s tim da je potrebno probama potvrditi ove pretpostavke.
- Bilo bi korisno da se kroz betonske probe razmotre procenti mešanja eruptivne (delimično oprane ili oprane) frakcije sa rečnom frakcijom, ali tako da beton, odnosno finalni proizvod ne poskupljuje, tj. da količina cementa koja se koristi u mešavini ostane u najmanju ruku ista kao kod betona iste klase čvrstoće koji se proizvodi isključivo od rečne frakcije.
- S tim u vezi, ukoliko bi se potvrdilo da je moguće mešanje od 25-30% eruptivne frakcije u recepturama za beton, takođe bi cena ovakve frakcije mogla da bude od 8-10 € (u zavisnosti od više faktora od kojih su najznačajniji udaljenost betonskih baza tj. pripadajući trošak transporta, kao i uslovi, odnosno trošak mešanja frakcija na samim bazama).
- Iz ovih proba koje su rađene, jasno je da se oprana frakcija mnogo bolje ponaša u odnosu na frakciju 0/4 mm u izvornom stanju, međutim, 380 kg cementa za postizanje betona klase čvrstoće C25/30 je verovatno veći utrošak cementa u odnosu na beton iste klase čvrstoće spravljen od rečnog materijala, te je potrebno razmotriti ekonomsku isplativost ovog rešenja i eventualno upotrebu hemijskih dodataka betonu, tipa superplastifikatora.

6. ZAKLJUČCI

Zaključci izvedeni iz gore pomenutih istraživanja su sledeći:

- sa povećanjem sadržaja sitnih čestica u frakciji 0/4 mm drobljenog agregata dacita, povećava se sadržaj štetnih minerala glina i hlorita;
- minerali iz grupe smektita i hlorita u agregatu dacita (eruptivnog porekla) drastično utiču na povećanje MB, odnosno smanjenje SE i SE₄;
- delimičnim pranjem frakcije 0/4 mm, kada je sadržaj sitnih čestica f₅ u agregatu, ne postiže se MB_{1.5};
- potpunim pranjem frakcije 0/4 mm, kada je sadržaj sitnih čestica f₁ u agregatu, postiže se MB_{1.5}, ali su zbog manjka sitnih čestica čvrstoće betona < 35 MPa;
- dodavanjem peska opranoj frakciji 0/4 mm, odnosno korigovanjem granulometrijskog sastava frakcije 0/4 mm postiže se čvrstoća betona nakon 28 dana nege u vodi (35,4 MPa);
- proizvođač ne može samo otprašivanjem na separacionom postrojenju postići zadovoljavajući kvalitet agregata, već mora kombinovati otprašivanje i pranje ili samo pranje agregata;
- analiza ekonomske opravdanosti ponuđenih rešenja ukazala su da je neophodno nastaviti istraživanja u pravcima delimičnog pranja ove frakcije i njenog korišćenja za proizvodnju betonskog crepa, kao i razmatranja mešanja eruptivne sa rečnom frakcijom, ali tako da beton, odnosno finalni proizvod ne poskupljuje;
- oprana frakcija se mnogo bolje ponaša u odnosu na frakciju 0/4 mm u izvornom stanju, međutim, 380 kg cementa za postizanje betona klase čvrstoće C25/30 je verovatno veći utrošak cementa u odnosu na beton iste klase čvrstoće spravljen od rečnog materijala, te je potrebno razmotriti ekonomsku isplativost ovog rešenja i eventualno upotrebu hemijskih dodataka betonu, tipa superplastifikatora;
- u narednoj reviziji standarda SRPS U.M1.206:2023 izvršiti dopunu graničnih vrednosti MB i SE za drobljeni agregat eruptivnog porekla.

Zaključci u prezentovanom radu izvedeni su iz jednog uzorka agregata. Potrebno je uraditi više analiza agregata proizvedenih sa različitih mesta na kamenolomu. Paralelno sa istraživanjima agregata potrebno je izvršiti optimizaciju načina uklanjanja sitnih čestica iz agregata na drobilično-separacionom postrojenju, pronaći rešenja za dalju upotrebu ovako nastalog nusproizvoda koji se sastoji od smeše kaolinita, smektita i hlorita, kako bi se uskladila istraživanja i realizovala njihova primenljivost.

7. OSVRT NA PROBLEMATIKU U PROIZVODNJI BETONA

Kako se u Srbiji već dugo koriste u najvećoj mogućoj meri rečni kameni agregati u proizvodnji betona dugo nije primećen uticaj finih čestica gline na karakteristike sveže betonske mešavine.

Zbog sve većih zahteva građevinske operative da se radovi izvode što brže i zbog nedostatka kvalifikovane radne snage za njegovu ugradnju, nova generacija hemijskih dodataka betonu, čiju hemijsku osnovu čine polikarboksilati, daje znatno izraženije efekte plastifikacije betonske mešavine, čime se olakšava ugradnja betona i povećava njegova čvrstoća pri pritisku, uz povećanje dužine vremena mešanja na betonskoj bazi. Sa početkom upotrebe ovih aditiva primećena je povećana osetljivost betonskih mešavina na uslove spoljašnje sredine. Osim toga, povremeno se dešavalo da primenom višestruko proverene recepture betonske mešavine rezultat ispitivanja konzistencije betona ne ispuni očekivanja. Nakon dodatne provere karakteristika svih korišćenih komponenti u proizvodnji betonske mešavine, nije bilo moguće ustanoviti izvor problema. Svaka od korišćenih komponenti je bila sertifikovana prema Naredbama o obaveznom atestiranju, a i same komponente su proveravane u skladu sa zahtevima PBAB 87 i standarda SRPS U. M1. 050 i SRPS U.M1.051. Svi parametri, uključujući i karakteristike kamenog agregata su bili u zahtevanim granicama. Uvođenjem metode ispitivanja sadržaja finih čestica metodom metilen-plavog omogućen je bolji uvid u njihovo prisustvo u agregatu. Konačno je bilo moguće prepoznati i mikro čestice gline, nevidljive do tada uobičajenim metodama ispitivanja.

Ovaj primer je samo jedan od pokazatelja da je došlo vreme za temeljno, multidisciplinarno preispitivanje dosadašnjih iskustava u proizvodnji betona i regulativi koja se odnosi na nju, pre svega sa stanovišta primene u praksi.

Teme koje treba razmotriti i proveriti putem istraživačkih programa bi se u grubim crtama mogle svesti na:

- ograničavanje upotrebe rečnog agregata, radi očuvanja rečnih tokova
- sagledavanje potrebnih dodatnih zahteva za upotrebu drobljenih kamenih agregata sa domaćih kamenoloma u proizvodnji betona
- sagledavanje mogućnosti upotrebe u postojećem ili modifikovanim oblicima deponovanih materijala, kao i propisivanje odgovarajućih okvira za primenu
- razmotriti postojeće proizvode – cemente i hemijske dodatke betonu, za slučajeve upotrebe drobljenog agregata ili recikliranih agregata, kao i eventualne mogućnosti njihove modifikacije

- razmotriti i uključiti u nacionalne dodatke standardima ili izraditi uputstva za pravilan odabir komponentnih materijala u odnosu na zahtevane karakteristike betona prema klasi izloženosti
- pokrenuti stvaranje baze podataka o proizvedenim i ugrađenim betonskim mešavinama, sa posebnim osvrtom na karakteristike vezane za trajnost betona, čime bi se omogućilo pravilno vrednovanje rezultata ispitivanja betona i komponenti betona novim metodama ispitivanja
- u okviru projektovanja i praćenja projekata po načelima BIM modelovanja uneti i podatke o konkretnim betonskim mešavinama, kao i dobijenim rezultatima kontrolnih ispitivanja na gradilištu, tokom izgradnje i kasnije, tokom održavanja objekta

Težište ovih istraživanja i analiza prikupljenih podataka bi imalo za cilj da bolje definiše zahteve za betone proizvedene sa lokalnim materijalima, te da omogući proizvođačima betona da izaberu prikladan asortiman proizvoda (betonskih mešavina), koji bi bili pod procesom sertifikacije. Isto tako, to bi pomoglo projektantima betonskih konstrukcija da bolje definišu zahteve za beton i izvođačima građevinskih radova da lakše odaberu odgovarajuću recepturu, odnosno, proizvođača betona. Osim toga, definisalo bi i mogućnosti iskorišćenja materijala koji su do sada deponovani, bez vizije šta sa njima dalje, kao i mogućnosti i raspone upotrebe recikliranih agregata.

Zahvalnice

Zahvaljujemo se Institutu za puteve ad, Beograd i Lafarge BFC Srbija na finansiranju dela laboratorijskog rada. Autori se zahvaljuju Rudarsko-geološkom fakultetu, Laboratoriji za kristalografiju, na mineraloškoj analizi odabranog uzoraka i komponenti gline. Takođe se zahvaljujemo Kristini Šarić na mikrofotografiji stene.

8. LITERATURA

- [1] Building and Construction Authority (BCA), Recommended Specification and Use on Granite Fines as fine aggregates in Concrete, (n.d.).
- [2] Çelik Mustafa Yavuz, Akbulut Hüseyin, Şahbaz Ahmet, The Characterization of Crushed Natural Stone Aggregates, JICIVILTECH 3 (2021) 55–77.
- [3] V. Cvetković, K. Šarić, Z. Pécskay, A. Gerdes, The Rudnik Mts. volcano-intrusive complex (central Serbia): An example of how magmatism controls metallogeny, Geol Cro 69 (2016) 89–99.
- [4] O. Djokic, V. Milicevic, Main technical characteristics of rocks used in road construction in Serbia, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 72 (2013) 137–141.
- [5] Đokić Olivera, Matović Nenad, Извештај о резултатима laboratorijskih ispitivanja kamena poreklom iz kamenoloma Ćeramide, Institut za puteve ad, Beograd, 2021.
- [6] Figueroa Madero NP, Mendoza Ortiz SP, Ríos Reyes CA, Castellanos Alarcón OM., Characterization and testing of rock aggregates of the Santa Marta Batholith, Revista ION 27 (2014) 87–104.
- [7] Filipović Ivan, Marković Branislav, Pavlović Zoran, Rodin Vladimir, Marković Olivera, Tumač za list Gornji Milanovac L 34-137, Savezni geološki zavod, Beograd, Beograd, 1978.
- [8] P.P. Giannakopoulou, P. Petrounias, A. Rogkala, P. Lampropoulou, E. Gianni, D. Papoulis, P. Koutsovitis, B. Tsikouras, K. Hatzipanagiotou, Does the Methylene Blue Test Give Equally Satisfactory Results in All Studied Igneous Rocks Relative to the Identification of Swelling Clay Minerals?, Minerals 10 (2020) 283.
- [9] İlker Bekir Topçu, Abdullah Demir, Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties, Canadian Journal of Civil Engineering 35 (2008) 379–383.
- [10] Kovač Sabina, Ispitivanje uzoraka metodom rendgenske difrakcije na polikristalnom materijalu, RGF Univerziteta u Beogradu, 2025.
- [11] Kovač Sabina, Ispitivanje uzoraka metodom rendgenske difrakcije na polikristalnom materijalu, dodatak Izveštaju 354 od 19.2.2025., 2025.
- [12] Li Beixing, Zhou Mingkai, Wang Jiliang, Effect of the Methylene Blue Value of Manufactured Sand on Performances of Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology 9 (2011) 127–132.

- [13] A.M. Nikolaides E., Sarafidou, M., Sand equivalent and methylene blue value of aggregates for highway engineering, *Foundations of Civil and Environmental Engineering* 10 (2007) 111–121.
- [14] N. Omerovic, R. Avdic, N. Alic, Optimization of operation the plant for washing (hydrocyclone) in treatment the eruptive aggregate 0/2 mm from the aspect of required filler content (fraction -0.063 mm), *Rudarski Radovi Bor* (2012) 115–134.
- [15] SIST 1026:2016, Beton — Deo1: Specifikacija, performanse, proizvodnja i usklađenost Pravila za implementaciju SIST EN 206-1, (2016).
- [16] Sl.glasnik RS br. 34/2013 i 44/2014, Pravilniku o kvalitetu cementa, *Službeni glasnik RS*, 2013.
- [17] Službeni glasnik RS, broj 78, Pravilnik o tehničkim zahtevima za frakcionisani agregat za beton i asfalt, (2020) 19–19.
- [18] SRPS U.M1.206:2023, Beton – Smernice i pravila za primenu nacionalnih tehničkih zahteva za proizvodnju betona koji se ugrađuje u betonske, armiranobetonske i prethodno napregnute konstrukcije, Institut za standardizaciju Srbije, 2023.
- [19] Stefanović Suzana, Đokić Olivera, Milić Bratislav, Usaglašavanje tehničkih uslova iz projekta sa kvalitetom dostupnih kamenih agregata, in: *Prvi Srpski Kongres o Putevima*, Srpsko društvo za puteve “VIA-VITA,” Beograd, 2014: p. 12.
- [20] XP P18-540:1997, Granulats Définitions, conformité, spécifications, (1997).