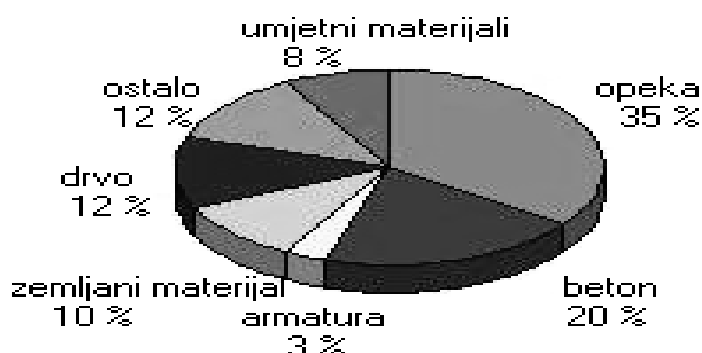


1. UVOD

Recikliranje (*Recycling*) je prerada građevinskog otpada i dobivanje komercijalne sirovine visoke kvalitete, koju je moguće dalje doraditi i plasirati na tržištu. Da bi se dobila takva sekundarna sirovina potrebno je provesti racionalnu razgradnju objekta, selekcionirati materijal i osigurati tehnički-tehnološko pogodno postrojenje, kontrolu kvalitete pri prijemu materijala u postrojenje i tokom prerade.

Ideja o preradi, odnosno ponovnoj upotrebi građevinskih materijala koji potječu iz porušenih objekata javila se nakon II. svjetskog rata. Međutim, tek 70-tih godina prošlog stoljeća prerada građevinskog otpada dobiva sve više na značenju, prvenstveno zbog sve manjih rezervi prirodnih sirovina, sve veće količine odloženog građevinskog otpada i porasta svijesti o potrebi zaštite okoliša. Prema nekim istraživanjima građevinski otpad čini oko 2/3 ukupnog otpada, a otprilike 80 % građevinskog otpada, ovisno o njihovu porijeklu i sastavu, uz određene tehnologije recikliranja, može se ponovo iskoristiti kao ekonomski vrijedna sekundarna sirovina za ponovnu upotrebu kao: dodatak za nove asfalt-betonske mješavine, materijal za nosive slojeve cesta, agregat za razne vrste betona, materijal za izradu betonskih elemenata. Krajnji cilj je upotrijebiti reciklirani materijal upravo tamo odakle je i potekao (na pr. reciklirani beton kao agregat za beton).

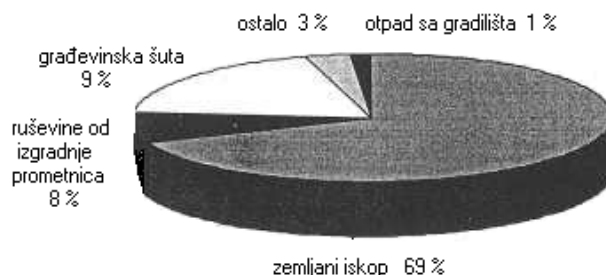


Slika 1. Sastav građevinskog otpada nastalog kod razgradnje stambenih objekata

Istraživanja u svijetu su usmjerena ka rješavanju pitanja kako je moguće optimalno preraditi građevinski otpad kao specifičnu vrstu tehnološkog otpada (dijelovi armiranog i nearmiranog betona, opeka, crijep i ostale vrste pokrova, gips, razni miješani iskopi, asfalt, šljunak i pijesak, kamenje, lagani građevinski materijali) radi dobivanja što vrijednih preradevina, te i na kraju koje su mogućnosti primjene tako dobivenih sekundarnih sirovina. Preradom otpada od građevinskih materijala povećava se i prostor za odlaganje komunalnog otpada, uz istovremenu uštedu prirodnih sirovina. Na žalost, kod nas građevinski otpad se još uvijek zbrinjava u okviru komunalnog otpada (praksa pokazuje da se građevinski otpad najčešće nekontrolirano odlaže).

Građevinski otpad urbanih sredina obuhvaća:

- iskope raznih miješanih zemljanih materijala,
- šutu, odnosno razni miješani otpad od rušenja starijih građevina, koji u najvećem postotku sadrži kamen, drvo, cigle, crijep, žbuku, manje betonske elemente i sl.,
- otpad pri građenju koji sadrži pored mineralnih tvari i razne materijale poput željeza, drva, stakla, papira, te materijala od ambalaže i sl.,
- otpad pri rekonstrukciji građevina koji je po svom sastavu sitniji; spoj šute i otpada pri građenju,
- otpad od asfalt-betonskih zastora i sličnih asfaltnih materijala,
- čisti industrijski otpad pojedinih građevinskih materijala kao što su cigle, keramika, preostali transportni beton.



Slika 2. Udio pojedinih vrsta građevinskog otpada

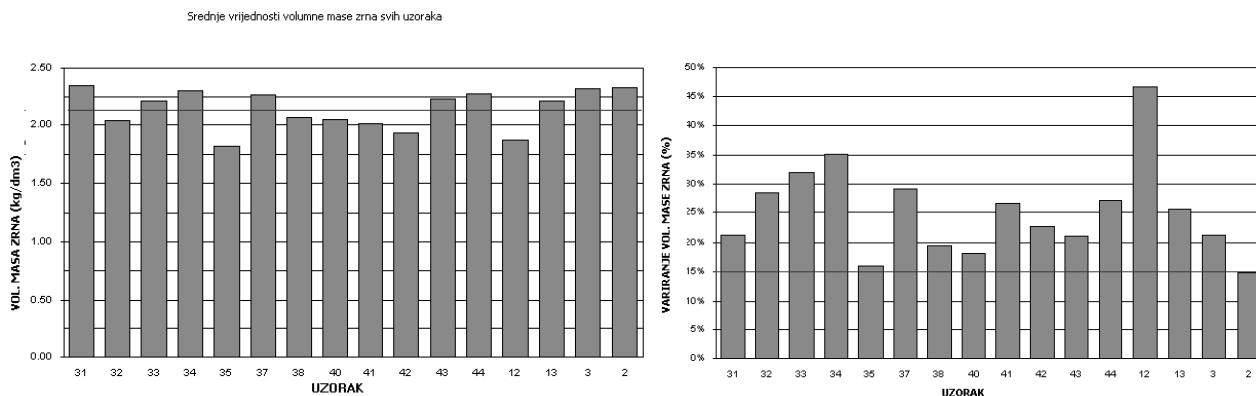
2. SVOJSTVA BETONA OD RECIKLIRANIH AGREGATA

2.1. SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA OD RECIKLIRANOG AGREGATA

Dakle, umjesto primarne sirovine - prirodnog agregata može se koristiti sekundarna - reciklirani agregat, koji po svojoj kvaliteti treba zadovoljiti zahtjeve koji su postavljeni za prirodni agregat. Dok je njegova upotreba danas uobičajena u cestogradnji (nosivi slojevi kolničke konstrukcije), to se ne može reći za upotrebu u visokogradnji, posebno kad je riječ o nosivim elementima. Glavni razlog je nesigurnost kada je u pitanju kvaliteta raspoloživih recikliranih materijala. Na kvalitetu prvenstveno utječe vrsta ulaznog materijala, odnosno građevinskog otpada, jer s obzirom na vrstu upotrijebljenog recikliranog agregata izrađuju se i različite vrste recikliranog betona. Rezultat toga je veliko rasipanje rezultata fizikalno-mehaničkih svojstava ovih betona. Također, vrlo bitna je i tehnologija prerade, od koje ovisi krajnji proizvod, tj. veličina zrna pojedinih frakcija, količina, stupanj čistoće, te naravno količina štetnih/sitnih čestica u recikliranom agregatu.

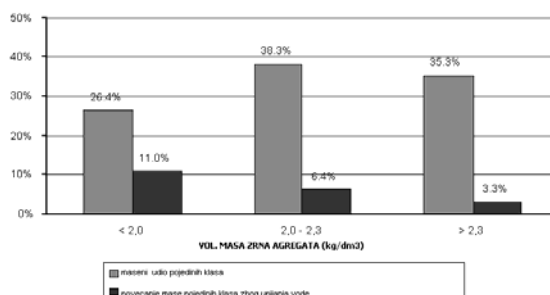
Reciklirani agregati imaju veliko upijanje vode. Zbog pojačanog upijanja vode proces očvršćavanja betona se odvija znatno brže i smanjuje se obradivost betonske mješavine. Ova pojava se može upotrebom aditiva kompenzirati.

Na Sl. 3.-5.[8] su dati literaturni rezultati ispitivanja uzoraka betona od recikliranog agregata koji su uzeti iz postrojenja za recikliranje u kojima nisu osigurane odgovarajuće tehničko-tehnološke mjere. Rezultati ispitivanja volumne mase zrna uzoraka recikliranog agregata na Sl. 3. pokazuju veliko variranje unutar pojedinih grupa (uzorci iz jednog postrojenja). Vodoravnom linijom na Sl. 4. označeno je dopušteno variranje (15 %) unutar jedne grupe. Vidljivo je da variranje volumne mase unutar pojedinih grupa iznosi i do 50 %. Iako uzorci 12 i 35 imaju iste vrijednosti srednje volumne mase zrna (1.800 kg/m^3) variranje volumne mase zrna unutar ove dvije grupe bitno različito. Ovo je pokazatelj različitih kvaliteta, odnosno sastava recikliranog agregata.



Slike 3.-4. Srednje vrijednosti volumne mase uzetih uzoraka i variranje volumne mase uzoraka izraženo u postocima

Na Sl. 5. je prikazana raspodjela klasa agregata s obzirom na volumne mase zrna agregata i utjecaj volumne mase agregata na upijanja vode agregata: klasa I : $\rho < 2.000 \text{ kg/m}^3$ ($< 2,0 \text{ g/cm}^3$), klasa II : $2.000 \leq \rho \leq 2.300 \text{ kg/m}^3$ ($2,0 \leq \rho \leq 2,3 \text{ g/cm}^3$) I klasa III : $\rho > 2.300 \text{ kg/m}^3$ ($> 2,3 \text{ g/cm}^3$).



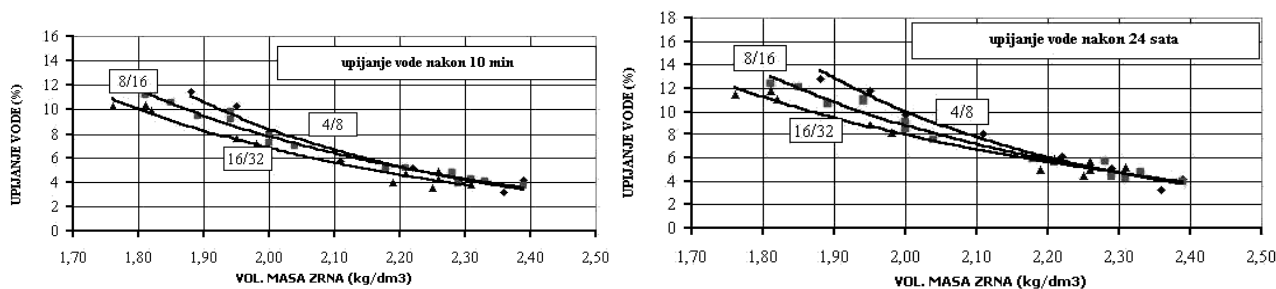
Slika 5. Raspodjela klasa agregata (s obzirom na volumnu masu) i upijanje vode pojedinih klasa (u %)

U usporedbi s prirodnim agregatom za beton reciklirani agregat pokazuje zbog veće poroznosti veće **upijanje vode**, što smanjuje obradivost betona. Ovaj problem je poznat iz tehnologije izrade lakih betona, s tim da je razlika u tome da se kod recikliranih agregata proces upijanja vode najvećim dijelom odvija u prvih 10 minuta nakon miješanja. Poslije ovog vremena upijanje vode je neznatno. Zbog toga je bitno poznavati, odnosno utvrditi količinu upijanja vode svakog reciklata. Prema DAFStb-smjernici preporuča se dodavanje aditiva u betonsku mješavinu radi povećanja obradivosti svježeg betona od recikliranog agregata.

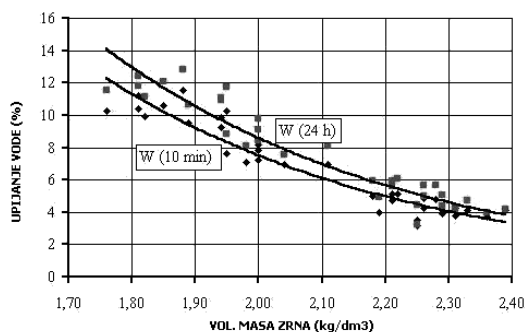
Upijanje vode recikliranog agregata ovisi od volumne mase agregata (Sl. 6.-7.[2]). Vidljivo je da s porastom volumne mase zrna recikliranog agregata opada količina upijene vode. Osim toga rezultati ispitivanja pokazuju da reciklirani agregat upije oko 90 % vode od ukupne količine u prvih 10 min. nakon dodavanja.

Poboljšanje obradivosti recikliranih betona može se postići i prethodnim kvašenjem agregata, s tim da treba voditi računa da ova mjera negativno utječe na skupljanje i puzanje betona, tj. povećava ove vrste deformacija.

Znatan utjecaj na konzistenciju i očvršćavanje recikliranih betona ima i **vlažnost agregata**. Ispitivanja su pokazala da kod betonskih mješavina spravljenih sa potpuno suhim recikliranim agregatom dolazi do bržeg očvršćavanja betona zbog upijanja vode u odnosu na betonske mješavine koje su spravljene sa zasićenim recikliranim agregatom.

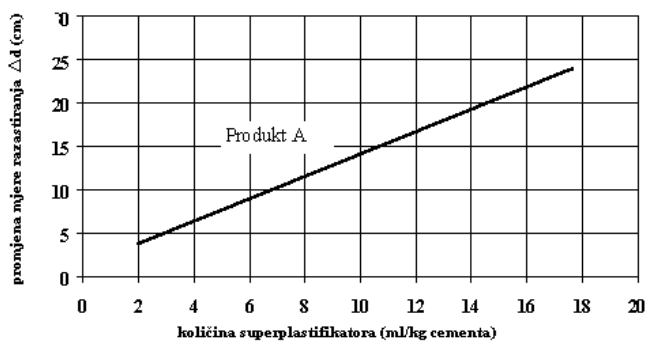


Slika 6. Upijanje vode nakon 10 min i 24 sata[9]



Slika 7. Utjecaj volumne mase agregata na upijanja vode[9]

Aditiv za bolju obradivost recikliranog betona treba najranije dodati 10 minuta nakon početka miješanja da bi se izbjegla mogućnost da ga agregat upije. Na Sl. 8. prikazana je potrebna količina superplastifikatora prema DAFStb-smjernici da bi se postigla željena konzistencija svježeg betona. Na okomitoj osi je prikazana promjena mjere rasprostiranja, kao razlika početne mjere rasprostiranja i u trenutku dodavanja aditiva.



Slika 8. Doziranje superplastifikatora u ovisnosti o mjeri rasprostiranja[10]

Temperatura i klasa cementa također utječu na proces očvršćavanja i konzistenciju betona. Proces očvršćavanja se brže odvija pri višim temperaturama, jer se i kemijski procesi hidratacije brže odvijaju. Kod upotrebe cementa više klase (CEM I 42,5 R) uočeno je veće rasprostiranje nakon 15 minuta, u odnosu na beton spravljen sa CEM I 32,5 R, ali se ono izjednačava nakon 90 minuta.

Da bi se poboljšala obradivost recikliranog betona preporuča se sitnu recikliranu frakciju (< 4 mm) zamijeniti prirodnim pijeskom.

Volumna masa svježeg recikliranog betona izravno ovisi o volumnoj masi zrna recikliranog agregata. Pošto reciklirani agregati imaju niže vrijednosti volumne mase od prirodnih agregata, kod primjene recikliranih agregata treba računati sa 3-10 % nižom vrijednosti volumne mase svježeg betona od normalnih betona.

Na znima recikliranog agregata od betona ostaje zalijepljeno nešto cementnog morta pa zbog toga ona ima hrapaviju površinu i samim tim manju volumnu masu zrna. Reciklirani agregat od građevinske šute ima još manju volumnu masu zrna zbog heterogenog sastava i poroznosti samog agregata. Mala volumna masa zrna je naročito izražena kod recikliranih agregata s velikim udjelom opeke (jako porozan materijal), pa je volumna masa svježeg betona manja i za 15%.

Količina zahvaćenog zraka u svježem betonu od recikliranog agregata je ovisna od hrapavosti samog agregata, pa je i sadržaj zraka kod ovih betona u odnosu na uobičajeni beton veći. Ispitivanja pokazuju da reciklirani betoni imaju i do 3 puta veću količinu zahvaćenog zraka u odnosu na uobičajene betone.

1.2. OSOBINE OČVRSLOG BETONA OD RECIKLIRANOG AGREGATA

Prikazani dijagrami su rezultat ispitivanja iz izvještaja E 03 koji je raden u okviru BIM (*Baustoffkreislauf im Massivbau*). Cilj ispitivanja je bio ciljanim variranjem vrste agregata i granulometrijskog sastava utvrditi utjecaj recikliranog agregata na osobine očvrslog betona i dobivene rezultate usporediti s osobinama očvrslog referentnog betona. Kao agregat za reciklirani beton korišteni su drobljeni beton i drobljena opeka. Za frakciju 0/4 kod svih uzoraka korišten je prirodni agregat, tj. pijesak.

Tablica 2. Projektirani sastav recikliranog betona

SASTAV SVJEŽE BETONSKE MJEŠAVINE		
cement	CEM I 32.5 R, 320 kg/m ³	
voda	176 l/m ³	
w/c	0.55	
agregat	0/4 mm	prirodni agregat
	4/8 mm	prirodni agregat, drobljeni beton, drobljena opeka
	8/16 mm	prirodni agregat, drobljeni beton, drobljena opeka

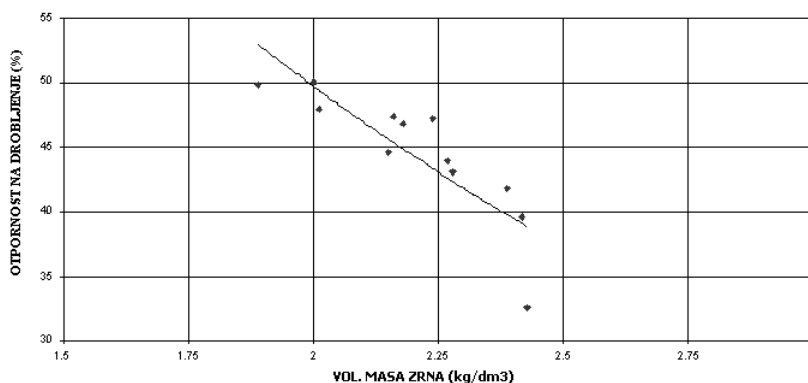
Tablica 3. Volumne mase recikliranih agregata

VRSTA AGREGATA	VOL. MASA AGREGATA (kg/m ³)		
	frakcija 0/4	frakcija 4/8	frakcija 8/16
Prirodni agregat	2.460	2.530	2.560
Drobljeni beton	-	2.150	2.370
Drobljena opeka	-	1.870	1.840

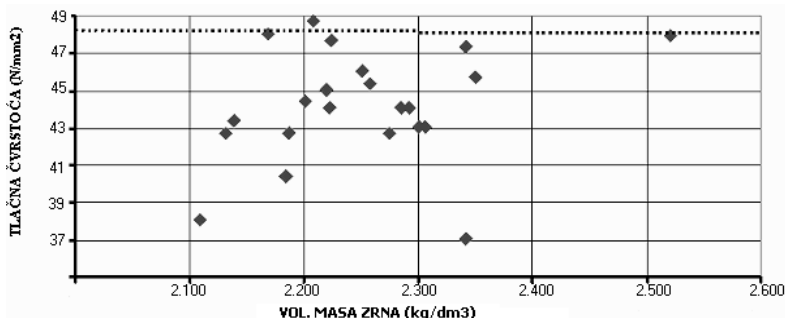
Istraživanja pokazuju da se razlike svojstava između običnog i recikliranog betona mogu ukloniti tehnološkim mjerama. Tako na pr. pad tlačne čvrstoće recikliranog betona u odnosu na izvorni beton (reciklirani agregat je od «starog» betona) se može smanjiti povećavanjem količine cementa ili smanjenjem w/c-omjera.

Općenito za reciklirane betone vrijedi da je rasipanje rezultata, naročito kod čvrstoća, jako veliko. Rasipanja su veća što je reciklirani agregat nehomogeniji. To znači da je najveće rasipanje rezultata kod agregata dobivenih preradom građevinske šute, dok se kod recikliranog agregata od betona dobivaju najsigurniji rezultati.

Tlačna čvrstoća recikliranog betona ne ovisi o tlačnoj čvrstoći izvornog betona, već tlačna čvrstoća upotrijebljenog recikliranog agregata (ispituje se neizravno - metodom «Los Angeles») izravno utječe na tlačnu čvrstoću od njega spravljenog betona. «Čvrstoća agregata» je opet u vezi sa volumnom masom zrna agregata (Sl. 9). Pošto reciklirani agregati imaju, kao što je već navedeno, manju volumnu masu zrna od prirodnih agregata to je i tlačna čvrstoća recikliranih betona u usporedbi s običnim betonom manja. Pad tlačne čvrstoće je 10-30 %. Da bi se postigla ekvivalentna tlačna čvrstoća kao kod izvornog betona potrebno je staviti 10-15 % više cementa u betonsku mješavinu ili smanjiti w/c-omjer dodatkom aditiva.



Slika 9. Veza čvrstoće agregata i volumne mase agregata



Slika 10. Utjecaj volumne mase zrna recikliranog agregata na tlačnu čvrstoću betona[12]

Na Sl. 10. je prikazan utjecaj volumne mase zrna agregata na tlačnu čvrstoću betona spravljenog s variranim udjelom recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće recikliranog betona su i upoređeni s referentnim betonom (vodoravna crta na dijagramu) tlačne čvrstoće 48 MPa i volumne mase zrna agregata 2.560 kg/dm^3 .

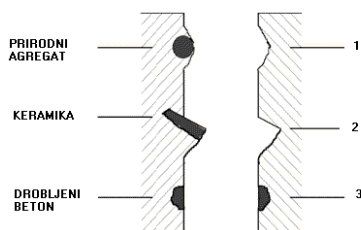
Reciklirani betoni mogu postići jednake vrijednosti tlačne čvrstoće kao i obični betoni ako je “čvrstoća agregata” zadovoljavajuća, tj. “čvrstoća agregata” je veća ili približna čvrstoći cementnog kamena.

U ovisnosti od čvrstoće i teksture površine zrna agregata javljaju se različiti tipovi loma plohe (Sl. 11.). Analiziranjem plohe loma kod uzoraka recikliranog betona uočeno je da se javljaju sljedeći tipovi sloma:

I - ploha sloma prolazi kroz cementni kamen i kontaktnu zonu sa zrnima agregata. Reciklirani agregat se ponaša kao i prirodni agregat. Znači, do sloma dolazi zbog prekoračenja čvrstoće cementnog kamena, dok je čvrstoća agregata u biti neiskorištena. Na površini sloma nema slomljenih zrna agregata.

II - ploha sloma prolazi kroz kontaktnu zonu cementni kamen-površina zrna agregata. Do ove vrste sloma dolazi zbog nedovoljne prionljivosti zrna agregata za cementni kamen.

III - ploha sloma prolazi kroz cementni kamen i zrno agregata. Ovaj tip sloma se javlja u slučaju da su cementni kamen i agregat približne čvrstoće. Znak je i dobre prionljivosti zrna agregata, ali je ujedno i pokazatelj male “čvrstoće agregata”.



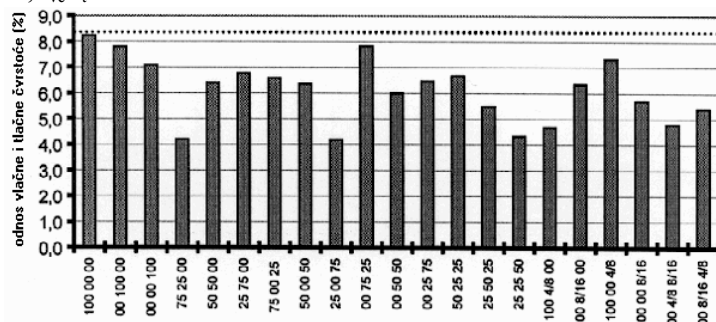
Slika 11. Tipovi sloma kod recikliranog betona

I. tip sloma javlja se, kao što je rečeno, kod betona spravljenog od prirodnog agregata i kod recikliranih betona odnosno agregata s malom količinom «starog» cementnog morta. Kod ovog tipa sloma mjerodavna je čvrstoća cementnog kamena «novog» betona.

II. tip sloma karakterističan je za reciklirane betone s agregatom dobivenim iz građevinske šute, gdje ima duguljastih, pljosnatih zrna s glatkom površinom, npr. dijelovi keramičkih pločica.

III. tip sloma znak je da je agregat male čvrstoće, tj. približno jednake vrijednosti kao i cementni kamen. Javlja se kada se koristi drobljeni beton kao agregat. Zbog približnih vrijednosti čvrstoća i dobre prionljivosti zrna agregata beton od ove vrste recikliranog agregata je prilično homogen.

Vlačna čvrstoća ovisna je o vlačnoj čvrstoći cementnog kamena i recikliranog agregata, kao i o samoj povezanosti cementnog kamena i agregata. Na Sl. 12. prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem, predstavljeni odnosom f_{vc}/f_t . Na vodoravnoj osi dijagrama nanoseni su podaci granulometrijskog sastava ispitanih uzoraka (prvi broj je masena količina prirodnog agregata; drugi broj predstavlja količinu drobljenog betona, a treći drobljene opeke; svi podaci su u %). Vodoravnom crtom označen je odnos f_{vc}/f_t za beton od prirodnog agregata. Ovaj uzorak ima najveći odnos vlačne/tlačne čvrstoće, $f_{vc}/f_t=8\%$.



Slika 12. Odnos vlačne čvrstoće cijepanjem i tlačne čvrstoće[12]

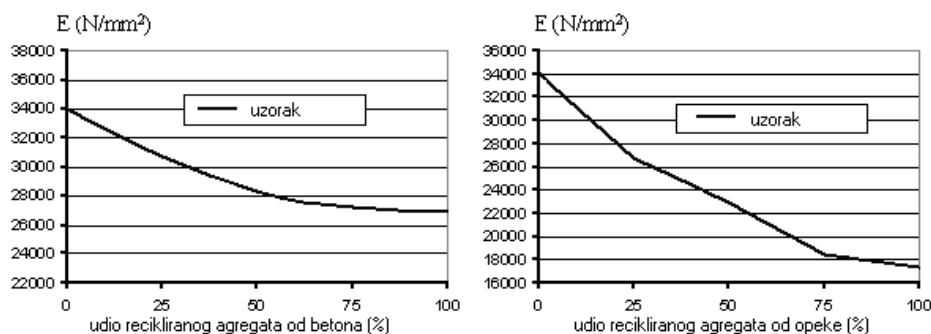
Općenito su rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća ispitnih tijela od recikliranog betona kontradiktorni. Neki rezultati u usporedbi s vlačnim čvrstoćama referentnog betona pokazuju porast ovih čvrstoća, dok druga istraživanja daju rezultate koji prikazuju opadanje vlačne čvrstoće (pri savijanju i cijepanju) i to do 60 %. Općenito se može uzeti da je vlačna čvrstoća recikliranog betona u usporedbi s običnim manja za 20-40 %. Ovakvo rasipanje rezultata se objašnjava variranjem količine «starog» cementa koji je zalijepljen za zrna recikliranog agregata.

Mikropukotine na površini zrna, nastale zbog velikog mehaničkog napreznja recikliranog agregata u procesu prerade, negativno utječu na vlačnu čvrstoću recikliranog betona. Pri opterećivanju recikliranog betona dolazi do preuranjenog sloma ispitnog tijela upravo zbog mikropukotina na površini zrna, koje su slabe točke u strukturi betona.

Porast vlačne čvrstoće betona od recikliranih agregata u odnosu na obični beton se može objasniti hrapavijom površinom samog zrna agregata (zbog ostataka «starog» cementnog kamena) koja omogućava bolju vezu zrna i cementa. To je i razlog zašto betoni s agregatom male volumne mase zrna, velike poroznosti (agregati s velikim udjelom opeke) postižu veću vlačnu čvrstoću u odnosu na obični beton.

Modul elastičnosti betona od recikliranih agregata je u prosjeku za oko 30 % manji u odnosu na običnog betona. Opada sa povećavanjem udjela recikliranog agregata u mješavini agregata. Ovisno o vrsti i udjelu recikliranog agregata smanjenje iznosi od 10-50 %.

Na Sl. 13. je jasno vidljivo da s porastom udjela recikliranog agregata (recikliranog betona i reciklirane opeke) u mješavini agregata modul elastičnosti opada u odnosu na obični beton. Pri zamjeni prirodnog agregata recikliranim beton E-modul opada za oko 20 % a kod zamjene recikliranom opekom oko 50 %.

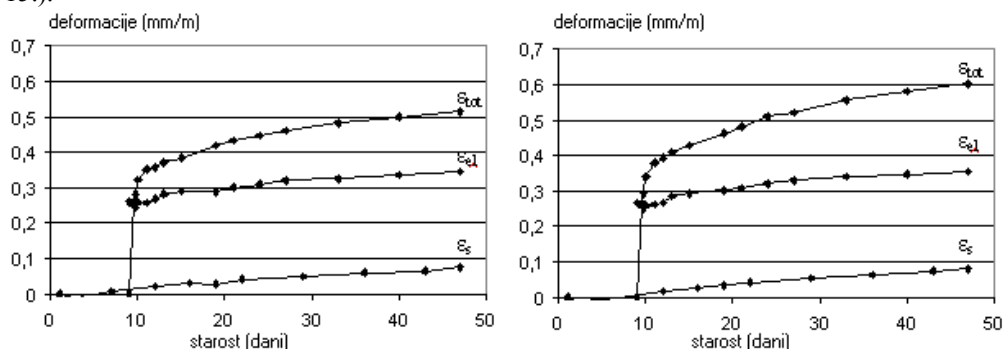


Slika 13. Utjecaj vrste i udjela recikliranog agregata u granul. sastavu na modul elastičnosti[13]

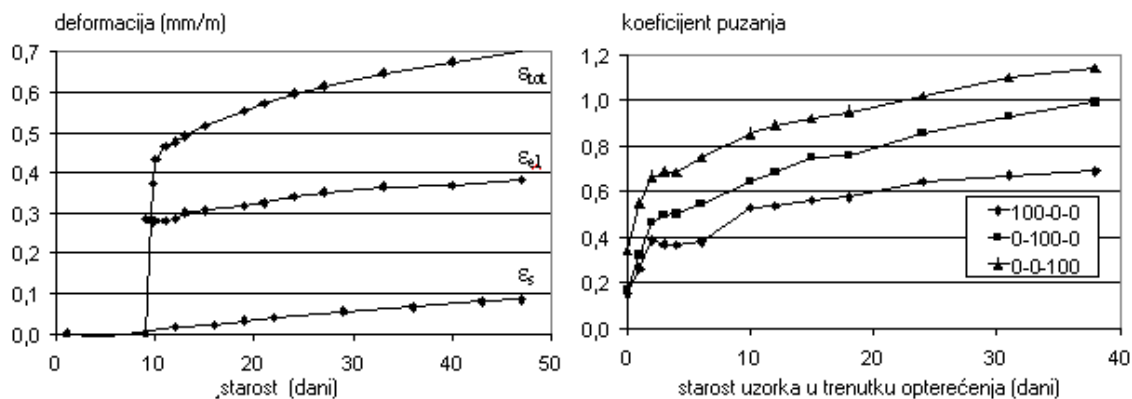
Deformacije betona ovise od deformacija agregata i cementnog kamena. Kod običnog betona zrna agregata imaju najčešće znatno veću čvrstoću od cementnog kamena, pa do sloma uzorka dolazi zbog prekoračenja napreznja unutar cementnog kamena. Međutim, kod betona od recikliranog agregata agregatni skelet je, zbog manje «čvrstoće agregata», popustljivija komponenta. Samim tim je i cementni kamen više opterećen. Napreznja uslijed deformacija se koncentriraju upravo u cementnom kamenu, pa se može zaključiti da se E-modul recikliranog betona približava E-modulu cementnog kamena.

Reciklirani agregati u odnosu na prirodne agregate imaju manji modul elastičnosti. Jedan razlog je taj što imaju i manju volumnu masu zrna i čvrstoću, dok je drugi razlog ostatak «starog» cementa zalijepljenog na površini zrna.

Na Sl. 14.-17. [22] je prikazan utjecaj vrste upotrijebljenog agregata na razvoj skupljanja i pužanja. Jasno je uočljivo da deformacije betona rastu s porastom udjela recikliranog betona odnosno reciklirane opeke. Koefficient pužanja je kod betona od recikliranog betona veći za 43 %, kod betona od reciklirane opeke za 65% u odnosu na beton od prirodnog agregata (Sl. 15.).

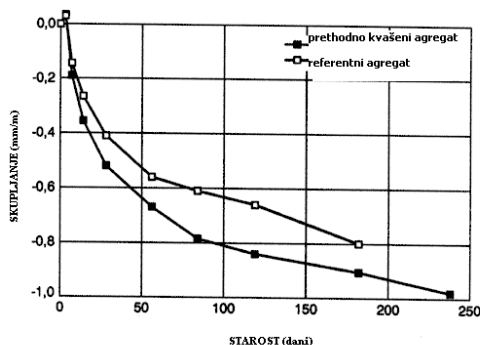


Slika 14.-15. Utjecaj agregata na skupljanje i pužanje (100 % prirodni agregat, odnosno 100 % reciklirani beton)



Slika 16.-17. Utjecaj agregata na skupljanje i puzanje, odnosno veličina puzanja (100% reciklirana opeka)

Skupljanje recikliranog betona je 40-60 % veće nego kod običnog betona. Skupljanje raste s povećanjem udjela recikliranog agregata. To je posljedica zaostataka «starog» cementa i povećanog upijanja vode od strane agregata, odnosno većeg w/c omjera u odnosu na obični beton. Manji E-modul recikliranih agregata isto doprinosi većem skupljanju recikliranog betona, jer je manji otpor agregatnog skeleta deformaciji. Ako se agregat prije spravljanja mješavine kvasi tada je skupljanje betona još veće, jer prethodno kvašenje dovodi do bubrenja agregata, što kod sušenja betona dovodi opet do još većeg skupljanja betona (Sl. 18).



Slika 18. Skupljanje betona od prethodno kvašenog recikliranog agregata[14]

Koeficijent puzanja betona od recikliranog agregata je za oko 50 % veći nego kod običnog betona. Deformacije puzanja rastu s povećanjem udjela recikliranog agregata, jer reciklirani agregat ima manji modul elastičnosti od prirodnog agregata (za oko 30%). Osim toga i ostatak «starog» cementa puže i tako doprinosi povećanju deformacijama puzanja.

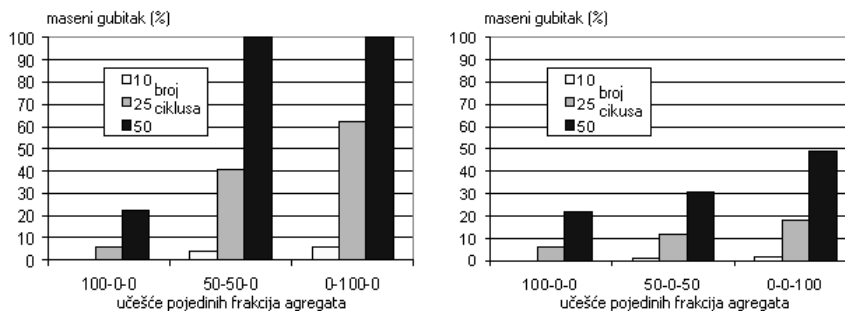
Reciklirani betoni imaju veću poroznost od običnih betona, jer su reciklirani agregati porozniji u odnosu na prirodni agregat. Kao posljedica toga reciklirani betoni su podložniji procesu karbonizacije. Dubina karboniziranog sloja betona se povećava s povećanjem udjela recikliranog agregata u mješavini agregata. Proces karbonizacije je neovisan od vrste recikliranog agregata i prethodne pripreme agregata kod spravljanja mješavine.

Vodopropusnost betona od recikliranog agregata se ne razlikuje od vodopropusnosti običnog betona. Ispitivanja pokazuju da opor betona prodiranju vode ne ovisi od vrste i udjela recikliranog agregata. Rezultati ispitivanja također pokazuju da se reciklirani agregati mogu upotrebljavati za vodonepropusne betone. U tom slučaju je bitno, prema DAfStb-smjernici za betone od recikliranih agregata, potrebno je poznavati porijeklo agregata, odnosno građevinskog otpada i ispitati osjetljivost recikliranog agregata na djelovanje alkalija.

Otpornost recikliranog betona **na mraz** ovisi od vrste recikliranog agregata. Različita istraživanja dokazuju da se može dobiti reciklirani beton koji je otporan na mraz, iako je za njegovu proizvodnju upotrijebljen agregat koji nije otporan na djelovanje mraza. To je na pr. slučaj kod upotrebe reciklirane opeke. Pošto je opeka veoma porozan materijal voda se raspoređuje po porama tako da prilikom smrzavanja ne dolazi do bubrenja, odnosno razaranja strukture betona.

Na Sl. 19. su prikazani rezultati ispitivanja uzoraka betona od recikliranog agregata (drobljenog betona i drobljene opeke) na djelovanje mraza. Prikazani rezultati predstavljaju gubitak mase uzoraka nakon 10, 25 i 50 ciklusa smrzavanja-odmrzavanja. Iz dobivenih rezultata vidi se da je otpornost na mraz veća kod uzoraka s agregatom od reciklirane opeke (II), nego sa drobljenim betonom (I), kod kojeg je nakon 50 ciklusa došlo do raspadanja .

Djelovanje soli na betone od recikliranih agregata prije svega ovisi od prethodno upijene količine soli, koja opet ovisi od vrste i količine recikliranog agregata. Kao i kod običnih betona i kod recikliranih otpornost na mraz i soli prvenstveno ovisi od poroznosti samog betona.



Slika 19. Maseni gubitak b. uzoraka s različitim udjelom agregata od recikliranog betona (I), odnosno opeke (II)[13]

Prema DAfStb-smjernici za betone od recikliranih agregata da bi reciklirani agregat mogao upotrijebiti za spravljanje betona otpornog na mraz potrebno je poznavati njegovo porijeklo i ispitati osjetljivost na alkalije.

1.3. Projektiranje betona od recikliranog agregata

Upute za spravljanje betona od recikliranog agregata (drobljeni beton)[10]:

- Sitne reciklirane frakcije zamijeniti prirodnim pijeskom da bi se dobila bolja obradivost recikliranog betona;
- Čestice recikliranog agregata < 2 mm dobro je odstraniti da bi se smanjio gubitak čvrstoće (tlačne i vlačne);
- Preporučljivo je reciklirani agregat prije spravljanja betonske mješavine izmiješati u suho da bi se poboljšao oblik zrna, odstranjuje se «stari» cementni mort;
- Mješavina s recikliranim agregatom (sitne i krupne frakcije) traži 15 % više vode. Ako se sitne frakcije recikliranog agregata zamijene prirodnim pijeskom treba samo 5 % više vode;
- U mješavini prirodnog agregata može se 30 % prirodnog agregata zamijeniti krupnim recikliranim agregatom bez posljedica za armirani beton.

Prema DAfStb-smjernici (Deutscher Aufschuss fuer Stahbeton) reciklirani agregat za beton je građevinski materijal koji ima sljedeći sastav:

- drobljeni beton – frakcije 4/16(32) mm,
- udio drobljenog betona u ukupnom recikliranom agregatu $\geq 95\%$ mase agregata,
- mineralni sastojci (npr. opeka) i asfalt,
- udio mineralnih sastojaka i asfalta u ukupnom recikliranom agregatu je od $\leq 5\%$ mase agregata,
- nemineralni sastojci,
- udio nemineralnih sastojaka u ukupnom recikliranom agregatu je $\leq 0.2\%$ mase agregata.

Također, prema navedenoj Smjernici, ako je poznato porijeklo izvornog betona i u njemu sadržanog agregata i ako je od strane nadležnog organa utvrđeno da ne postoji opasnost odnosno osjetljivost izvornog betona na djelovanje alkalija, tada se prerađeni izvorni beton (drobljeni beton) može koristiti kao agregat za:

- beton za unutrašnje konstruktivne elemente,
- beton za vanjske konstruktivne elemente,
- vodonepropusni beton,
- beton velike otpornosti na djelovanje mraza,
- beton velike otpornosti na djelovanje slabih kemikalija.

Reciklirani betoni se mogu proizvoditi do MB 35. Potpuna zamjena prirodnog agregata recikliranim agregatom nije dopuštena.

Tablica 3. Maksimalno dopušteni udio recikliranog agregata u mješavini agregata

Vrste konstruktivnih elemenata/ vrste betona	drobljeni beton i sitne reciklirane frakcije ¹⁾ >2 mm [volumno%]	sitne reciklirane frakcije ¹⁾ ≤ 2 mm [volumno%]
unutarnji konstruktivni elementi MB ≤ 25 ²⁾	35	7
unutarnji konstruktivni elementi MB 35 ²⁾	25	
vrste konstruktivnih elemenata/ vrste betona	drobljeni beton i sitne reciklirane frakcije ¹⁾ >2 mm [volumno%]	sitne reciklirane frakcije ¹⁾ ≤ 2 mm [volumno%]
MB ≤ 35 ²⁾ beton za vanjske konstruktivne elemente vodonepropusni beton beton velike otpornosti na djelovanje mraza beton velike otpornosti na djelovanje «slabih»kemikalija	20	0

¹⁾ sitne reciklirane frakcije moraju potjecati od prerade betona frakcije veće od 32 mm

²⁾ prema DIN 1045

2. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru eksperimentalnog dijela diplomskog rada zadatak je bio ispitati mogućnost korištenja slučajno izabranih komada «starog» betona i armiranog betona iz jedne devastirane stambene zgrade u Mostaru, kao recikliranog agregata, za spravljanje betona. Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada je bio utvrditi da li postignuta tlačna čvrstoća nakon 28 dana odgovara projektiranoj MB-30. Također je trebalo utvrditi utjecaj recikliranog agregata na obradivost svježeg betona, s obzirom da je kod upotrijebljenog agregata (predrobljenog betona) upijanje vode jako veliko, što je i za očekivati kad je riječ o recikliranom agregatu.

Betonski komadi su prerađeni na separaciji «Mokri Do» u Miljkovićima, kod Mostara. Pošto je veličina ulaznih betonskih komada bila nešto manja, prvi stupanj prerade kroz primarnu – čeljusnu drobilicu nije urađen, već su komadi «starog» betona odmah stavljeni mlin za sekundarnu preradu materijala, u cilju usitnjavanja. Usitnjeni materijal je zatim prosijavanjem na vibracijskim sitima separiran na frakcije 0/4, 4/8, 8/16 i 16/32 i ispitan u Centralnom laboratoriju «IGH-Mostar» d.o.o. Mostar, prije korištenja za spravljanje betona.

2.1. Ispitivanje agregata od predrobljenog betona

U eksperimentalnom dijelu ovog rada trebalo je ispitati utjecaj upijanja vode agregata na obradivost svježeg betona, kao i tlačnu čvrstoću ovog betona nakon 28 dana. Urađena su sljedeća ispitivanja agregata od predrobljenog betona: oblik zrna agregata, upijanje vode, volumna masa zrna agregata i granulometrijski sastav. Određivanje čvrstoće, agregata odnosno otpornosti agregata protiv drobljenja prema normi U.M8.030 u okviru ovog rada nije urađeno.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja agregata od predrobljenog betona

FRAKCIJA	VOLUMNI KOEF. OBLIKA		VOL. MASA AGR. [kg/m ³]		UPIJANJE VODE (%)			
	Dobiven	Uvjet kvalitete	Dobivena	Uvjet kvalitete	U _{10min} ²⁾	U _{24 sata}	Uvjet kvalitete	
							PBAB '87	DSfStB ¹⁾
0/4	-	-	2.570	2.000-3.000	6.45	7,21	> 1,5	zadovoljen
4/8	0,30	> 0,18	2.460	2.000-3.000	3.20	3,39	> 1,5	zadovoljen
8/16	0,30	> 0,18	> 0,18	2.000-3.000	2.77	3,10	> 1,5	zadovoljen
16/32	0,33	> 0,18	2.440	2.000-3.000	3.30	3,54	> 1,5	zadovoljen

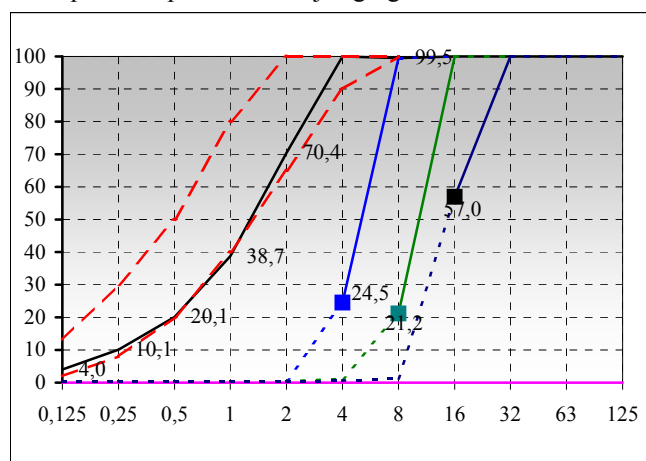
¹⁾ prema DAfStB- smjernice max. dopušteno upijanje vode za frakciju 0/4 je 10 %, a za krupnije frakcije 5 %

²⁾ vidjeti poglavlje 3.1.1

Rezultati ispitivanja volumnog koeficijenta oblika pokazuju da agregat zadovoljava uvjet kvalitete, tj. agregat od predrobljenog betona ima povoljan oblik. Rezultati ispitivanja volumne mase zrna agregata su pokazala da se radi o drobljenom betonu koji zadovoljava normom zahtijevani uvjet kvalitete. Upijanje vode, kao što je bilo i za očekivati, je znatno veće nego što je prema važećim propisima dopušteno, ali je u okviru dopuštenih granica prema DAfStB-smjernici (uvjet kvalitete je prema japanskim normama sličan - max. dopušteno upijanje vode za frakciju 0/4 je 13 %, a za krupnije frakcije 7 %). Dobiveni rezultati ispitivanja, s obzirom na ove dvije osobine, su pokazali da se ovaj agregat može koristiti za proizvodnju betona.

Granulometrijski sastav agregata se određuje prema HRN B.B8.029 metodom suhog prosijavanja.

Na Sl. 20. su prikazani rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava frakcija agregata od drobljenog betona koji je korišten za spravljanje recikliranog betona u okviru eksperimentalnog dijela ovog rada. Na vodoravnu osu su nanijeti otvori sita u mm, a na okomitu osu postotak prolaza frakcija agregata u %.



Slika 20. Granulometrijski sastav agregata od drobljenog betona

Sitna frakcija 0/4 mm ima neznatno lošiji sastav prema ovim graničnim krivuljama prosijavanja prema normi B.B8.010. Dobiveni modul zrnitosti za ovu frakciju se nalazi na granici i iznosi $MF = 3.6$ (2.3-3.6).

Pošto postrojenje na separaciji nije prilagođeno preradi «starog» betona, dobivene su frakcije s mnogo većom količinom podmjernih zrna od dopuštene (4/8 - 24.5 % podmjernih zrna, 8/16 - 21.2 % i 16/32 - 57.0 %). Zbog vrlo velike količine podmjernih zrna frakcija 16/32 nije ni korištena za spravljanje recikliranog betona.

2.2. Projektirani sastav betona

Da bi se mogla ispitati tlačna čvrstoća betonskih uzoraka od recikliranog betona odnosno utjecaj ovog agregata na ovu osobinu, što je bio i zadatak ovo dijela diplomskog rada, spravljene su sljedeće mješavine betona i to:

- betonska mješavina I (RC-B I): sve frakcije agregata su od predrobljenog betona,
- betonska mješavina II (RC-B II): za sitnu frakciju (0/4 mm) korišten je riječni agregat «Interinvest» sa separacije Rodoč, dok su ostale frakcije agregata od predrobljenog betona,
- betonska mješavina III - referentni beton (B III): sve frakcije agregata su od riječnog agregata «Interinvest» sa separacije Rodoč.

Da bi bilo moguće ispitati utjecaj predrobljenog betona na tlačnu čvrstoću sastav betonskih mješavina je tako projektiran da su količina cementa, vode, odnosno w/c omjer za sve 3 mješavine isti. S obzirom da je projektirana marka betonskih mješavina MB-30 preporučena je količina cementa od 350 kg/m^3 . Volumne masa zrna agregata koji su korišteni za spravljanje betonskih mješavina date su u tablici 6. Prema uvjetu projektirane MB odabran je w/c omjer = 0.6 (za obične betone - u granicama od 0.45 do 0.55), s obzirom da se radilo o agregatu kod kojeg se očekivalo upijanje vode. Varirana je vrsta i udio pojedinih frakcija agregata. Sve 3 mješavine imaju isti volumne agregata u 1 m^3 betona ($V_a = 0.662 \text{ m}^3$) i krivulju granulometrijskog sastava agregata u području između A16/B16, prema normi U.M1.057.

Tablica 5. Sastavi betonskih mješavina

KOMPONENTE	B. MJEŠAVINA I		B. MJEŠAVINA II		B. MJEŠAVINA III	
	masa za 1 m^3 (kg)					
cement PC 30z 45 S	350		350		350	
voda	210		210		210	
w/c = 0,6	-		-		-	
agregat	100 % predrobljeni	1668	100 % miješani	1713	100 % riječni	1790
0/4 mm	50 % predrobljeni	834	47 % riječni	805	46 % riječni	823
4/8 mm	20 % predrobljeni	334	20 % predrobljeni	343	20 % riječni	534
8/16 mm	30 % predrobljeni	500	33 % predrobljeni	565	34 % riječni	430
pore 1.5 %	0		0		0	
UKUPNO	2228		2273		2350	

Tablica 6. Volumne mase zrna agregata

Vrsta agregata	VOL. MASA ZRNA SUHOAG AGREGATA (kg/m^3)		
	frakcija 0/4	frakcija 4/8	frakcija 8/16
riječni agregat	2.720	2.690	2.690
predrobljeni beton	2.570	2.450	2.470

2.3. Ispitivanje osobina svježeg i očvrsllog betona

Betonske mješavine su spravljene u Centralnom laboratoriju «IGH Mostar» d.o.o. Mostar Korištena je protustrujna laboratorijske miješalica, kapaciteta 150 l. Postupak spravljanja projektiranih betonskih mješavina se odvijao ovako:

- vaganje potrebnih količina cementa i agregata po frakcijama,
- ubacivanje u miješalicu prvo krupnih frakcija agregata, potom cementa i na kraju sitnog agregata,
- homogeniziranje sastojaka miješanjem u suho (najmanje 30 s),
- naknadno dodavanje prethodno izmjerene količine vode u tijeku miješanja, uz dopunsko miješanje u trajanju od 60 s.

Tablica 7. Tablični prikaz dobivenih rezultata ispitivanja svježeg i očvrsllog betona I, II i III

ISPITIVANJE		BETONSKA MJEŠAVINA			
		RC-B I	RC-B II	B III	
svježi beton	Slump (cm)	0	7	12.5	
	Konzistencija	kruta (KS)	plastična (KR)	tekuća (KF)	
	Poroznost (%)	2.7	1.8	1.3	
	Vol. masa (kg/m^3)	2.307	2.340	2.360	
očvrsl beton	Tlačna čvrstoća (MPa)	3 dana	18,1	27,1	34,4
		7 dana	27,1	30,8	40,3
		28 dana	40.3	34.4	41.5

	Vol. masa (kg/m ³)	28 dana	2.301	2.344	2.370
--	-----------------------------------	---------	-------	-------	-------

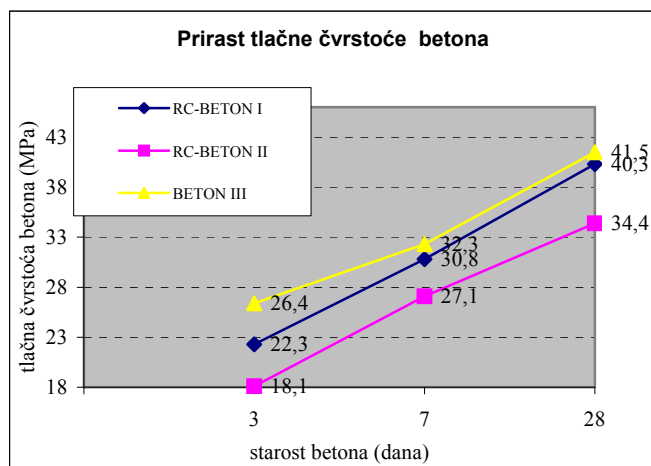
Analizom dobivenih rezultata ispitivanja obradljivosti svježeg betona za spravljene mješavine može se zaključiti:

- **Obradljivost betonskih mješavina** izražena mjerom slijeganja (Slump) je bila bitno različita: od krute za betonsku mješavinu I (0 cm), plastične za betonsku mješavinu II (7 cm), do tekuće za betonsku mješavinu III (12,5 cm), tj. referentni beton. Ova razlika konzistencija betonskih mješavina je rezultat upijanja vode recikliranog agregata iz betonske mješavine tokom pripreme (naročito sitne frakcije), što se može zaključiti iz usporedbe rezultata ispitivanja konzistencije betonskih mješavina. Smanjenje količine slobodne vode negativno je utjecalo na obradljivost svježeg betona I. Dakle, samo zamjenom sitna frakcija recikliranog agregata riječnim kod betonske mješavine II postignuta je plastična konzistencija – beton koji je ugradljiv;

- Velika razlika između **volumne mase svježeg betona** I, II i računske volumne mase navedenih betona je posljedica razlike volumne mase zrna recikliranog agregata u trenutku spravljanja betonskih mješavina od vrijednosti koje su dobivene ispitivanjem volumne mase zrna suhog agregata i s kojim je računata receptura betona. Naime, betonske mješavine su pripravljene s «prirodno» vlažnim agregatom. Zbog toga masu suhog agregata treba povećati za količinu vode u porama. Vlažnost agregata prije spravljanja mješavina nije ispitana, pa nije moguće korigirati volumnu masu zrna recikliranog agregata;

- Rezultati ispitivanja **poroznosti** recikliranog **betona** pokazuju da je količina zraka u recikliranom betonu veća nego kod običnih betona. Betonska mješavina I ima veću količinu zraka od betonske mješavine II. Ovakav rezultat se mogao očekivati, s obzirom na krutu konzistenciju betonske mješavine I, tj. veći sadržaj zraka zbog nedovoljnog zbijanja betona.

Tlačna čvrstoća betonskih tijela izrađenih od svježeg betona ispitna je nakon 3, 7 i 28 dana. Ukupno je ispitano 27 betonskih kocki tj. izrađeno je po 9 kocki za svaku betonsku mješavinu, za svaki termin ispitivanja po 3 kocke. Rezultati ispitivanja prirasta tlačne čvrstoće recikliranih betona i referentnog betona dati su na Sl. 21.



Slika 21. Rezultati ispitivanja prirasta tlačne čvrstoće betonskih mješavina I, II, III

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja očvrstlog betona za spravljene mješavine može se zaključiti:

- Dobiveni rezultati **tlačne čvrstoće** za obe betonske mješavine spravljene sa recikiranim agregatom (RC-B I, RC-B II) pokazuju da je zadovoljena tražena MB-30. Betonska mješavina I, spravljena sa 100 % udjelom recikliranog agregata, postigla je veću tlačnu čvrstoću od betonske mješavine II. Uzrok ovakvog rezultata je u upijanju vode sitne frakcije recikliranog agregata koja je korištena za spravljanje betonske mješavine I (Slump=0). Zbog velikog upijanja vode ove frakcije došlo je do smanjenja efektivnog w/c omjera, što je utjecalo je na porast i razvoj tlačne čvrstoće u odnosu na razvoj tlačne čvrstoće betonske mješavine II. Iz prethodne slike je vidljivo da beton III ima najveću tlačnu čvrstoću, što je i očekivano s obzirom da je ova betonska mješavina spravljena sa 100% udjelom riječnog agregata. Uočljiv je ujednačen prirast tlačne čvrstoće recikliranih betona. Prirast čvrstoće recikliranih betona nakon 3 dana je bio sporiji u odnosu na referentni, dok je nakon 7 dana postignut prirast kao i kod referentnog betona;

- Dobiveni rezultati **volumne mase** po partijama za betonske mješavine I i II manje od volumne mase referentnog betona. Ovakav rezultat je bio za očekivati ako se uzme u obzir da je i volumna masa zrna agregata u betonskim mješavinama I i II manja od volumne mase zrna prirodnog agregata u betonskoj mješavini III. Također je i vidljivo da je variranje vrijednosti volumne mase betona za betonske mješavine I i II jako malo, što je pokazatelj ujednačenosti kvaliteta/sastava recikliranog agregata u ovim betonskim mješavinama.

3. ZAKLJUČCI I PREPORUKE

Predmet obrade u ovom radu su svojstva svježeg i očvrstlog recikliranog betona u usporedbi s običnim (referentnim) betonom. Općenito, s obzirom na vrstu recikliranog agregata čvrstoće betona (tlačna, vlažna i savojna) se znatno razlikuju, za razliku od deformacijskih osobina (skupljanje, puzanje i modul elastičnosti) koje su slične, bez velikog utjecaja vrste recikliranog agregata.

Na osnovi dobivenih rezultata može zaključiti da:

- upijanje vode, odnosno poroznost upotrijebljenog recikliranog agregata od predrobljenog betona nema negativan utjecaj na razvoj tlačne čvrstoće betona. To nije slučaj kada je u pitanju obradivost svježeg betona, pošto je veliko upijanje vode sitne frakcije recikliranog agregata smanjilo obradivost svježeg betona;
- betonska mješavina I, iako zadovoljava što se tiče postignute tlačne čvrstoće, nije beton koji se može koristiti jer je praktično neugradljiv. Betonska mješavina II zadovoljava sve uvjete kvalitete koji su definirani za obične betone. Postignuta je zahtjevana tlačna čvrstoća (34,3 MPa) uz dobru ugradljivost (Slump=7 cm), poroznost (1,8 %) i volumnu masu (2.344 kg/m³) koja odgovara običnom betonu.

Preporuke za daljnja istraživanja betonske mješavine II:

- Zamjeniti prirodni riječni agregat drobljenim i usporediti svojstva svježeg i očvrstlog betona;
- U cilju dobivanja stvarnog w/c omjera pripremiti reciklirani agregat u površinski suhom vodozasićenom stanju prethodnim kvašenjem zrna agregata;
- U ispitivanje svojstava svježeg betona uključiti i ispitivanje vremena vezanja betona;
- U ispitivanje uključiti i odgovarajuće aditive;
- U cilju provjere mogućnosti primjene ovakvog betona ispitati i provjeriti ostala svojstva očvrstlog betona (vlačnu čvrstoću, savojnu čvrstoću, deformacijske karakteristike, otpornost na mraz, itd.)

4. LITERATURA

- [1] Linarić, Z.: Prerada građevnog otpada urbanih sredina, Građevinar 46 (1994)
- [2] Lončarić, R.: Tehnologija rušenja i recikliranja građevina, Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, Sabor hrvatskih graditelja '96, Cavtat 1996.
- [3] Bedić, N.: Upravljanje građevinskim otpadom u zemljama EU, Mineral 1/2001
- [4] Nikolić, S., Milanović, Z.: Gospodarenje građevnim otpadom grada Zagreba- prijedlog rješenja, Građevinar 46 (1994)
- [5] Informacija o tehnološkim mogućnostima društva EURCO d.d – Vinkovci; Uklanjanje građevinskih objekata i reciklaža građevinskog materijala
- [6] Linarić, Z., Radujković, M.: Zbrinjavanje građevinskih ruševina, Sabor hrvatskih graditelja '96, Crikvenica 1993.
- [7] Kohler, G.: Recyclingpraxis Baustoffe, Verlag TUEV Rheinland, Koeln 1997.
- [8] Gruebl, P., Ruehl M.: Bestandaufnahme der heute am Markt befindlichen aus Bauschutt gewonnenen sekundaer Zuschlage, TP D/05 Juni 1997
- [9] Ruehl, M.: Water absorbtion capacity of recycled demolition rubbish, Darmstadt Concrete 1997
- [10] Gruebl, P., Nealen, A.: Industrielle Betonherstellung zur Erstellung von Bauwerken unter Verwendung von Beton mit Sekundaerzuschlagen aus Bauschutt, TP G/01 September 1998
- [11] Ruehl, M.: Herstellung und Eigenschaften von Beton unter Verwendung rezyklierten Zuschlags, Beitrag zum Darmstaedter Massivbau-Seminar 1997, Band 18
- [12] Gruebl, P., Ruehl, M.: Der Einfluss von Recyclingzuschlagen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung fuer Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045, TP E/03 Januar 1998
- [13] Gruebl, P., Ruehl, M.: Der Einfluss von Recyclingzuschlagen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung fuer Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045, TP E/03 September 1998
- [14] Siebl, E., Kerhof, B.: Einfluss von Recyclingzuschlaegen aus Altbeton auf die Eigenschaften insbesondere die Dauerhaftigkeit des Betons, TP E/02 Januar 1998, Statusseminar BMBF Vorhaben «BIM»
- [15] [http://: www.b-i-m.de](http://www.b-i-m.de)