

UDK 666.97.033.1.0011

Primljeno 20. 1. 2009.

Projektiranje sastava samozbijajućeg betona

Nina Štirmer, Ivana Banjad Pečur

Ključne riječi

samozbijajući beton, projektiranje sastava, postupci ispitivanja, primjena, ponašanje, reološke osnove

Key words

self-compacting concrete, mix design, testing procedures, application, behaviour, rheological bases

Mots clés

béton auto-compactant, étude de composition, procédés analytiques, application, comportement, bases rhéologiques

Ключевые слова

самоуплотняющийся бетон, проектирование системы, процедуры испытаний, применение, поведение, реологические основы

Schlüsselworte

selbstverdichtender Beton, Entwurf der Zusammensetzung, Prüfungsverfahren, Anwendung, Verhalten, rheologische Grundlagen

N. Štirmer, I. Banjad Pečur

Pregledni rad

Projektiranje sastava samozbijajućeg betona

U radu su pregledno prikazani postupci ispitivanja, mogućnosti primjene i reološke osnove ponašanja svježeg samozbijajućeg betona. Prikazane su preporučene metode ispitivanja i zahtjevi za samozbijajući beton u svježem stanju. Uz navedeno također su prikazani rezultati provedenih vlastitih laboratorijskih ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona. Dane su preporuke za projektiranje sastava kako bi se postigla zahtijevana svojstva samozbijajućeg betona za određenu namjenu.

N. Štirmer, I. Banjad Pečur

Subject review

Mix design for self-compacting concrete

Testing procedures, application possibilities, and rheological behaviour of the fresh self-compacting concrete, are presented in the paper. Recommended test methods are presented, and requirements for the fresh self-compacting concrete are given. In addition, the results the authors obtained by testing properties of self-compacting concrete in laboratory conditions are presented. Mix design recommendations, enabling definition of use-specific properties of self-compacting concrete, are also given.

N. Štirmer, I. Banjad Pečur

Ouvrage de synthèse

Etude de composition de béton auto-compactant

Les procédés analytiques, les applications possibles, et le comportement rhéologique du béton frais auto-compactant, sont présentés dans l'ouvrage. Les méthodes d'analyse recommandées sont présentées, et les exigences pour le béton frais auto-compactant sont fournies. En outre, les résultats obtenus par les auteurs suite à l'analyse des propriétés de béton auto-compactant en laboratoire, sont présentés. Les recommandations pour l'étude de composition, visée à définir les propriétés du béton auto-compactant appropriées pour usages individuels, sont également fournies.

Н. Штурмер, И. Баньяд Печур

Обзорная работа

Проектирование системы самоуплотняющегося бетона

В работе приведены процедуры исследования, возможность применения и реологические основы поведения свежего самоуплотняющегося бетона. Приведены рекомендуемые методы испытаний и требования, предъявляемые к самоуплотняющемуся бетону в свежем состоянии. Помимо указанного, приведены результаты проведенных в собственных лабораториях испытаний свойств самоуплотняющегося бетона. Приведены рекомендации по проектированию системы для достижения требуемых свойств самоуплотняющегося бетона в зависимости от его предназначения.

N. Štirmer, I. Banjad Pečur

Übersichtsarbeit

Entwurf der Zusammensetzung von selbstverdichtendem Beton

Im Artikel sind die Prüfungsverfahren, Anwendungsmöglichkeiten und rheologische Grundlagen des Verhaltens des frischen selbstverdichtenden Betons übersichtlich dargestellt. Dargestellt sind empfohlene Prüfungsverfahren und Forderungen für selbstverdichtenden Beton im frischen Zustand. Ausserdem sind auch Ergebnisse durchgeführter eigener Laboruntersuchungen der Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton dargestellt. Ausgelegt sind Empfehlungen für den Entwurf der Zusammensetzung um die verlangten Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons für bestimmte Zwecke zu erreichen.

Autori: Doc. dr. sc. **Nina Štirmer**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ivana Banjad Pečur**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

Razvoj tehnologije betona u nekoliko posljednjih desetljeća bio je usmjeren prvenstveno na svojstva materijala bilo u svježem bilo u očvrnulom stanju. Postignuta su znatna poboljšanja u razumijevanju svojstava betona kao što su čvrstoća i trajnost. No, za postizanje zahtjevanih svojstava betona u konstrukciji, važne su i pojedine faze u procesu proizvodnje betona kao što su transport, ugradnja i njega koje čine i veliki udio u ukupnim troškovima izvedbe betonskih konstrukcija. Između ostalog, povećanje produktivnosti odnosno smanjenje troškova i povećanje brzine rada te poboljšanje uvjeta rada uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona postali su prioritet u građevinarstvu [1].

Samozbijajući beton (*self compacting concrete*, SCC) je vrsta betona koji tečenjem u potpunosti popunjava oplatu bez upotrebe vibracijskih uređaja. Razvoj tehnologije samozbijajućeg betona počeo je ispunjenjem sljedećih uvjeta: kontrolom reoloških svojstava betona primjenom kemijskih dodataka, potrebom za održivim tehnologijama te nedostacima u primjeni betona visokih performansi primarno nastalim zbog zbijanja vibracijskim uređajima [2]. Smatra se da je samozbijajući beton razvijen u Japanu u kasnim 1980-ima, zbog uočenih problema trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Na mnogim uzorcima betona izvađenim iz konstrukcije uočene su pojave segregacije na makrorazini, a na mikrorazini potpuna dezintegracija strukture. Ispočetka se smatralo da će postupak izrade samozbijajućih betona biti jednostavan jer se beton tekuće konzistencije već upotrebljavao za betoniranje pod vodom [3]. No, takva vrsta betona nije se mogla primijeniti na zraku iz sljedećih razloga: nije bilo moguće eliminirati zahvaćene mjehuriće zraka zbog velike viskoznosti i nije se mogla postići željena zbiječnost u području s gusto složenom armaturom. Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi [4]. Ključni sastojak za izradu samozbijajućih betona jest nova generacija superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera koja je omogućila projektiranje sastava betonske mješavine potrebne viskoznosti i granice tečenja [5, 6].

Za primjenu samozbijajućih betona velik je napredak napravljen donošenjem Europskih smjernica koje su definirale zahtjeve, metode ispitivanja te preporuke za proizvodnju i ugradnju [7]. U ovome radu pregledno su prikazani postupci ispitivanja, mogućnosti primjene i reološke osnove ponašanja svježeg samozbijajućeg betona te su prikazani rezultati vlastitih ispitivanja samozbijajućih betona s lokalnim materijalima.

2 Svojstva i metode ispitivanja prema Europskim smjernicama za samozbijajući beton

Postoji više različitih pristupa projektiranju sastava samozbijajućeg betona, a općenito se zasnivaju na sljedećem:

- odrediti količinu vode i optimizirati tečenje i stabilnost paste
- odrediti udio pijeska i dodatka betonu
- ispitati osjetljivost na male varijacije u količinama sastojaka
- odrediti potrebnu količinu krupnog agregata
- proizvesti beton u laboratoriju i ispitati zahtijevana svojstva u svježem stanju
- ispitati svojstva betona u očvrnulom stanju
- proizvesti probne mješavine u betonari.

2.1 Zahtjevi za samozbijajući beton

Osnovni zahtjevi za samozbijajući beton u skladu s Europskim smjernicama jesu:

- Razred tlačne čvrstoće (HRN EN 206-1)
- Razred izloženosti ili granične vrijednosti sastava
 - Maksimalni vodocementni omjer
 - Minimalna količina cementa
- Najveća veličina zrna agregata, D_{max}

Dodatni su specifični zahtjevi samozbijajućeg betona:

- Vrijednost T_{500} (rasprostiranje slijeganjem) ili V-lijevak
- Ispitivanje L kutijom
- Otpornosti segregaciji
- Temperatura svježeg betona, ako se razlikuje od HRN EN 206-1
- Drugi tehnički zahtjevi.

U usporedbi s običnim betonom, kod samozbijajućeg betona obično je manji udio krupnog agregata, manji je vodovezivni omjer, povećan je udio paste te je povećan udio superplastifikatora, a prema potrebi može se upotrijebiti i dodatak za promjenu viskoznosti [8, 9]. Fluidnost i viskoznost betonske mješavine postižu se pažljivim odabirom cementa i dodataka, uz ograničavanje omjera vode i sitnih čestica te dodavanje superplastifikatora i eventualno dodatka za promjenu viskoznosti. Preporučuje se uporaba najvećeg zrna $D_{max}=12-20$ mm. Često se upotrebljavaju inertni i pucolanski, odnosno hidraulični dodaci. Leteći pepeo je vrlo učinkovit za povećanje kohezivnosti i smanjenje osjetljivosti na promjenu količine vode. Silicijska prašina zbog svojih sitnih čestica sferičnog oblika osigurava dobru koheziju i poboljšanu otpornost na segregaciju te je učinkovita za eliminiranje izdvajanja vode. Hidraulički dodaci (kao što je zgura) već su djelomično sadržani u cementima CEM II ili CEM III, ali se također mogu dodati i u beton. Dodaci za promjenu viskoznosti rabe se za smanjivanje utjecaja varijacije vlažnosti ili raspodjele zrna u ukupnom

sastavu agregata, a beton je tada manje osjetljiv na male varijacije u omjeru sastojaka [10, 11]. Vlakna za mikroarmiranje mogu smanjiti sposobnost tečenja pa treba posebno ispitati njihov utjecaj na svojstva betona. Polimerna vlakna sprječavaju slijeganje i pukotine od plastičnog skupljanja.

2.2 Tečenje

Za mjerenje tečenja preporučuje se metoda rasprostiranja slijeganjem, ali se može primijeniti i ispitivanje s pomoću Kajimaine kutije.

Ispitivanjem prema metodi rasprostiranja slijeganjem opisuje se tečenje betona bez prepreka i upotrebljava se kao primarna provjera konzistencije betona. Dodatne se informacije dobivaju vizualnim pregledom i mjerenjem vrijednosti T_{500} . U tablici 1. prikazani su razredi rasprostiranja slijeganjem. Samozbijajući beton razreda SF3 obično se proizvodi s maksimalnim zrnom agregata $D_{max} < 16$ mm i uglavnom daje bolji izgled površine nego beton razreda SF2, ali se tada teže kontrolira pojava segregacije.

Tablica 1. Razredi rasprostiranja slijeganjem, SF

Razred	Tečenje betona (mm)	Primjena
SF1	550-650	nearmirani ili slabo armirani betonski elementi ugradnja pumpama (npr. tunnelska obloga) elementi malih dimenzija koji ne zahtijevaju veliko horizontalno tečenje betona
SF2	660-750	prikladno za većinu radova (zidovi, stupovi)
SF3	760-850	za elemente s gusto složenom armaturom, složenog oblika

2.3 Viskoznost

Viskoznost betonske mješavine se osim mjerenjem u reometru može odrediti empirijskim postupcima, od kojih je preporučeno ispitivanje s pomoću V-lijevka, a mogu se primijeniti i druge metode, kao što su određivanje parametra T_{500} , O-lijevak i Orimet. U tablici 2. prikazani su kriteriji za pojedine razrede viskoznosti samozbijajućeg betona. Beton male viskoznosti (VS2/VF2) imat će vrlo brzo početno tečenje, ali će nakon kratkog vremena doći do potpunog zaustavljanja tečenja. Velika viskoznost (VS1/VF1) imat će za posljedicu dulje tečenje betona.

Tablica 2. Razredi viskoznosti samozbijajućeg betona

Razred	T_{500} (s)	V-lijevak (s)	Karakteristike
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8	prikladno za gusto složenu armaturu vrlo dobra završna površina betona, ali može doći do izdvajanja vode i segregacije
VS2/VF2	> 2	9 - 25	moguća pojava tiksotropnih efekata (povoljno za smanjenje pritiska na oplatu) poboljšanje otpornosti na segregaciju, ali lošiji izgled površine (šupljine) i veća osjetljivost pri nastavku betoniranja (radne reške)

2.4 Sposobnost zaobilaženja prepreka

Sposobnost zaobilaženja prepreka najčešće se određuje L-kutijom, a mogu se primijeniti i metode: U-kutija, J-prsten i Kajimaina kutija. U tablici 3. prikazani su uvjeti za ispitivanje L kutijom.

Tablica 3. Razredi ispitivanja L kutijom

Razred	Uvjet	Primjena
PA1	$H2/H1 \geq 0,80$ 2 šipke	razmak 80-100 mm
PA2	$H2/H1 \geq 0,80$ 3 šipke	razmak 60-80 mm

2.5 Otpornost segregaciji

Pojava segregacije može biti osobito izražena u visokim betonskim elementima. Otpornost segregaciji, SR izražava se kao postotak količine betona koja je prošla kroz sito otvora 5 mm u odnosu na ukupnu masu. Otpornost segregaciji definira se samo za veće razrede slijeganja rasprostiranjem (SF) i/ili za više razrede viskoznosti (VS/VF) (tablica 4.).

Tablica 4. Razredi otpornosti segregaciji

Razred	Otpor segregaciji (%)	Primjena
SR1	≤ 20	tanke ploče vertikalna primjena za udaljenost < 5 m i razmak > 80 mm
SR2	≤ 15	vertikalna primjena za udaljenost > 5 m i razmak > 80 mm visoke vertikale – ako je razmak < 80 mm i udaljenost < 5 m, a ako je veća od 5 m smanjiti vrijednost SR za 10 %

2.6 Poteškoće pri izradi i ugradnji samozbijajućeg betona

Uzimajući u obzir osnovne principe projektiranja sastava samozbijajućeg betona, izbjegavaju se neželjene pojave segregacije i izdvajanja vode. No, upotreba kemijskih dodataka u samozbijajućem betonu može dovesti do ranog gubitka obradljivosti u kombinaciji s produženim vremenom vezivanja. To razdoblje je kritično, jer može doći do hidrostatskog tlaka u sustavu pora neočvrstalog betona [2]. Većina kemijskih dodataka za samozbijajući beton uvlači više zraka u betonsku mješavinu nego što je poželjno. Iz tog razloga dodaci mogu imati ukomponiranu komponentu otpjenjivača koji su katalizatori pa u određenoj mjeri reduciraju formiranje pora. Također se razmatra tlak betona na oplatu. Oplata mora biti dimenzionirana tako da može podnijeti hidrostatski tlak betona. Pojedinih je istraživanjima utvrđeno da je pritisak na oplatu približno jednak hidrostatskom tlaku svježeg betona, premda su neki autori izmjerili puno manje vrijednosti, ali Walraven to objašnjava razlikom u načinu mjerenja [4].

3 Projektiranje sastava samozbijajućeg betona

Jedna od prvih metoda za projektiranje sastava samozbijajućeg betona nastala je na temelju opsežnih istraživanja provedenih na Sveučilištu u Tokiju, a razvili su je Okamura i Ozawa [12]. Metoda je ograničena na uporabu japanskih materijala za izradu betona s cementom male topline hidratacije i velikim sadržajem dikalcijeva silikata (C₂S). Osnovni principi projektiranja sastava prema ovoj su metodi sljedeći:

- volumen krupnog agregata u betonu je 50 %
- sve čestice agregata veće od 0,09 mm smatraju se agregatom, a manje od 0,09 mm vezivom
- vodovezivni omjer i količina superplastifikatora određuju se ispitivanjem morta s pomoću V-lijevka
- preporučuje se vrijednost rasprostiranja slijeganjem 650 mm te se prema tome prilagođava udio superplastifikatora.

Na temelju ove metode nastale su mnogobrojne druge modificirane metode koje se mogu primijeniti za širi raspon materijala [13]. Edamatsu, Nishida i Ouchi razvili su metodu kojom se može odrediti potreban udio sitnog agregata u mortu za sitni agregat različitog oblika zrna i granulometrijskog sastava. Također su za ispitivanje upotrijebili V-lijevak, za koji se smatra da daje pouzdanije rezultate od ispitivanja s pomoću U-kalupa. Zatim je Ouchi predložio još racionalniju metodu određivanja zadovoljavajuće kombinacije vodovezivnog omjera i udjela superplastifikatora. Na Sveučilištu u Delftu provedena su istraživanja samozbijajućeg betona zasno-

vana na modelu Ozawe i Okamure, ali s nizozemskim materijalima. Na University College London također su provedena opsežna istraživanja samozbijajućeg betona, a glavne su se razlike odnosile na povećani udio pijeska u mortu i mogućnost variranja većeg raspona udjela agregata. Razvijene su i druge metode projektiranja sastava, kao što su CBI metoda, JSCE metoda, LCPC pristup [12-14].

3.1 Model projektiranja samozbijajućeg betona – CBI metoda

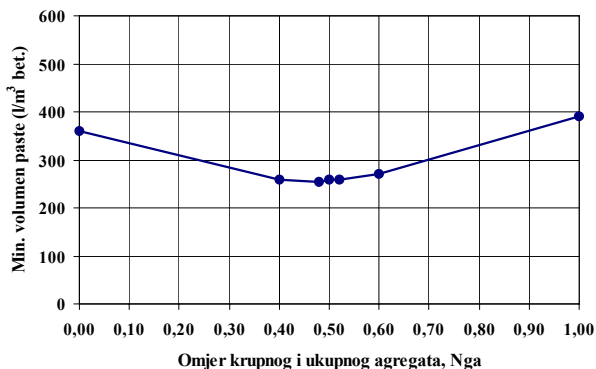
CBI metoda za projektiranje sastava samozbijajućeg betona razvijena je u Švedskom institutu za istraživanje cementa i betona [15]. Najvažnija je razlika između ove i ostalih metoda u određivanju sadržaja agregata i paste. Prednost je ove metode što uzima u obzir granulometriju kombiniranog agregata (drobljenog i riječnog), primjenjiva je za bilo koju specificiranu veličinu krupnog i sitnog agregata i uzima u obzir uvjete ugradnje.

3.1.1 Određivanje minimalnog volumena paste

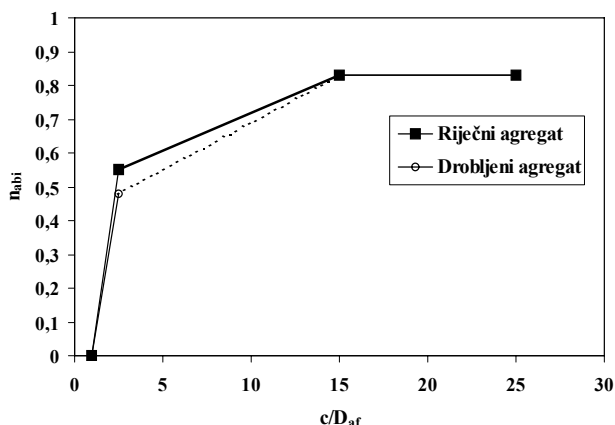
Princip projektiranja prema CBI metodi sastoji se u tome da se samozbijajući beton promatra kao zbroj tekuće faze, faze paste i krute faze - agregata. Pri projektiranju sastava potrebno je uzeti u obzir nekoliko kriterija:

1. *Projektni zahtjevi*, koji se temelje na specifičnim zahtjevima iz projekta, a odnose se na minimalnu tlačnu i vlačnu čvrstoću. Ovim kriterijem su obično uvjetovani v/c omjer i parametri trajnosti.
2. *Kriterij detalja* odnosi se na razmještaj armature te oblik presjeka koji uvjetuju minimalni potrebni volumen paste kontroliranjem razmaka krupnih zrna agregata.
3. *Kriterij sadržaja šupljina* odnosi se na određivanje minimalnog udjela paste prema omjeru količine krupnog agregata i ukupnog agregata (Nga). No, volumen potreban za ispunjavanje šupljina između zrna agregata nije dovoljan, s obzirom da volumen paste mora biti veći od sadržaja šupljina kako bi beton mogao teći, pa se ovaj kriterij primjenjuje za određivanje optimalnoga volumnog omjera između krupnog i ukupnog agregata. Na slici 1. prikazan je primjer za mješavinu riječnog agregata 0-8 mm i drobljenog agregata 8-16 mm.
4. *Kriterij blokiranja* zasniva se na geometriji presjeka, a proračunom se dobiva minimalni potrebni volumen paste kako bi se izbjeglo blokiranje zrna agregata između armaturnih šipki. Povećanjem udjela paste povećava se unutrašnji razmak između zrna agregata. Na slici 2. prikazani su rezultati studije o riziku blokiranja agregata dobiveni ispitivanjima pri

institutu CBI. Dvije krivulje na slici predstavljaju ovisnost između omjera blokiranja volumena agregata (n_{abi}) i između slobodnog prostora i promjera zrna agregata (c/D_{af}) za riječni i drobljeni agregat.



Slika 1. Primjer određivanja minimalnog volumena paste prema kriteriju sadržaja šupljina [15]



Slika 2. Ovisnost između volumena zaglavljeno agregata, nabi i omjera slobodnog prostora i promjera zrna agregata, c/D_{af} [15]

$$n_{abi} = V_{abi} / V_t$$

V_{abi} - volumen zaglavljeno agregata

V_t - ukupni volumen betona

c - slobodni prostor između armaturnih šipki ili drugih prepreka

$$D_{af} = M_{i-1} + 0,75 (M_i - M_{i-1})$$

M_i, M_{i-1} - najveća i najmanja veličina zrna agregata

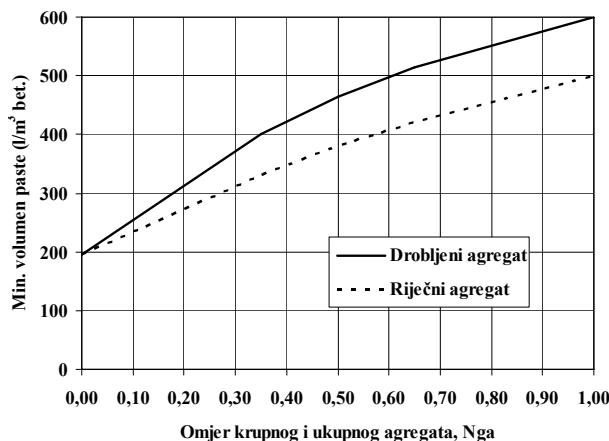
Prema ovom modelu moguće je izračunati najveću količinu agregata (ili najmanji volumen paste) za izbjegavanje blokiranja agregata:

$$\text{Rizik blokiranja} = \sum_{i=1}^n (n_{ai} / n_{abi}) = \sum_{i=1}^n \frac{(V_{ai} / V_t)}{(V_{abi} / V_t)} = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ai}}{V_{abi}} = 1$$

V_{ai} - volumen agregata

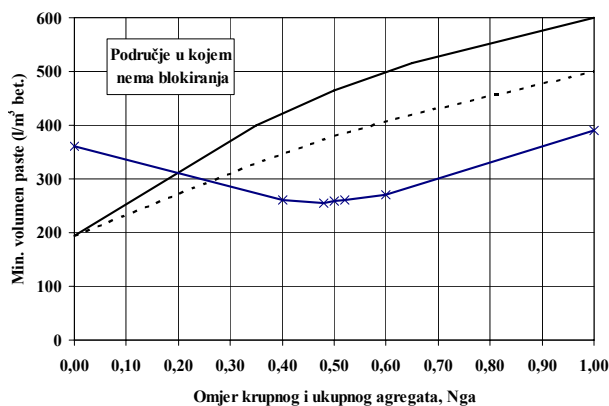
V_{abi} - volumen zaglavljeno agregata

Primjenom ove jednadžbe, uz variranje količine krupnih zrna u odnosu na ukupnu količinu agregata (Nga) i upotrebom stvarne granulometrije agregata iz preliminarnih istraživanja, dobiva se dijagram kao na slici 3. Iz prikazanog se dijagrama za omjer krupnog agregata u ukupnom agregatu, Nga , može odrediti minimalni potreban volumen paste.



Slika 3. Određivanje minimalnog volumena paste prema kriteriju blokiranja zrna agregata [15]

Iz sumarnog dijagrama, prikazanog na slici 4., vidljivo je da je za udio krupnog agregata do približno 20 % mjerodavan kriterij sadržaja šupljina, a kod većeg udjela agregata dominira kriterij blokiranja. Na dijagramu se također vidi da je minimalna količina paste potrebna za vrijednost $Nga = 0,4-0,55$. Proračun minimalne količine paste za izbjegavanje pojave blokiranja zrna agregata pretpostavlja razmak armature od 34 mm, vrijednost koja se uzima kao reprezentativna za građevine kao što su primjerice mostovi [15].



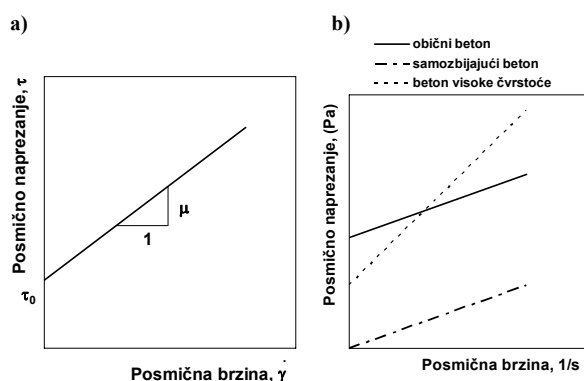
Slika 4. Minimalni volumen paste [15]

3.1.2 Određivanje reoloških svojstava

Prethodnim koracima određeni su sljedeći parametri:

- minimalni volumen paste
- maksimalni dopušteni v/c omjer
- vrsta cementa
- sadržaj zraka.

Odabere li se količina cementa i vode, samo je djelomično definiran sastav paste jer u njega ulaze i ostale sitne čestice. Pod pretpostavkom da je određen sadržaj cementa u betonu, moguće je proračunati dodatni volumen potreban za postizanje ukupnog minimalnog volumena paste koji čine punila i drugi mineralni dodaci. Zbog toga se u ovoj fazi projektiranja mjere reološka svojstva morta i zatim se bira najpovoljniji sastav.



Slika 5. a) Binghamov reološki model, b) razlika u ponašanju običnog betona, betona velike čvrstoće i samozbijajućeg betona [16]

Svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju mogu se dobro opisati Binghamovim modelom (slika 5.a). Materijal se do granice tečenja (τ_0) ponaša kao kruto tijelo, a nakon toga dolazi do posmičnog popuštanja i materijal počinje teći. Povećanje brzine tečenja prouzročit će povećanje otpora, a nagib μ nazivamo plastična viskoznost i ona označuje mjeru otpora povećanju brzine tečenja. Kod samozbijajućeg betona je granica tečenja niža, pa je potrebna velika viskoznost matrice da ne dođe do segregacije (slika 5.b) [16]. Za postizanje stabilnosti betonske mješavine potrebno je formirati što viskozniju matricu (pasta i sitne čestice), a betonski kompozit što manje viskoznosti [16-20]. Ako pasta ima premalu viskoznost, doći će do problema segregacije, a ako je viskoznost prevelika, smanjit će se obradljivost mješavine. To može dovesti do pojave da beton teče

presporo, prerano dolazi do skrućivanja betona (tikotropije), a posljedica je brzi prestanak tečenja.

3.1.3 Zahtjev naručitelja

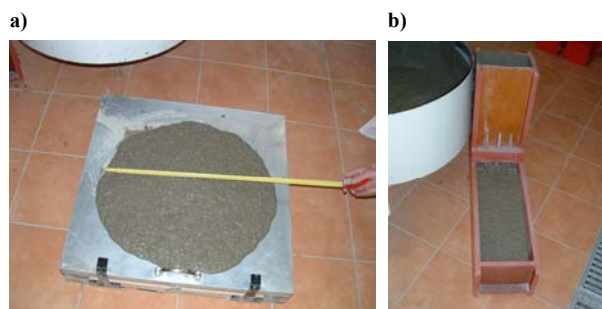
Pri projektiranju sastava također treba poštivati i zahtjeve naručitelja koji se odnose na razvoj čvrstoće ili vrijeme ugradnje te ostale zahtjeve koji mogu biti bitni za određenu namjenu (npr. proizvodnja predgotovljenih elemenata).

3.1.4 Verificiranje svojstava samozbijajućeg betona

Nakon određivanja sastava, potrebno je ispitati svojstva samozbijajućeg betona prema metodama prikazanim u poglavlju 2. te prema potrebi korigirati udjele pojedinih komponenata.

4 Laboratorijska ispitivanja svojstava samozbijajućeg betona s lokalnim materijalima

Cilj laboratorijskih ispitivanja bio je istražiti utjecaj komponenata na svojstva samozbijajućeg betona izrađenog s lokalnim materijalima. Ispitani su tečenje i viskoznost betona metodom rasprostiranja slijeganjem te sposobnost zaobilazanja prepreka s pomoću L-kutije (slika 6.). Također je ispitana tlačna čvrstoća betona nakon 7 i 28 dana.



Slika 6. a) Ispitivanje rasprostiranja slijeganjem, b) ispitivanje L-kutijom

Laboratorijska su ispitivanja provedena na 10 različitih sastava betona [21-23]. Pri tome su varirani vodocemen-

Tablica 5. Sastavi ispitanih betona

Sastav	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Cement CEM II/A-S 42,5 (kg)	480	480	480	480	480	480	480	480	480
v/c	0,48	0,40	0,33	0,25	0,38	0,41	0,34	0,32	0,29
Sika ViscoCrete 5-800 (% m_{cem})	-	-	-	-	-	-	-	0,5	0,5
Superplastifikator (% m_{cem})	-	2	1	1	1	1	1	-	-
Filer (kg)	70	70	70	70	40	40	40	-	70
Silicijska prašina (kg)	-	-	-	-	-	-	30	-	-
Hidratizirano vapno (kg)	-	-	-	-	30	30	-	-	-
Stiren butadijenski lateks (kg)	8	4	12	12	12	8	8	-	-
Agregat (kg) $D_{max}=16$ mm	1425	1532	1619	1713	1548	1547	1608	1711	1689
Pijesak (%)	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Krupni agregat (%)	45	45	45	45	45	45	45	45	45

tni omjeri i komponente betona (tablica 5.). Za izradu betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

1. Cement CEM II/A-S 42,5, gustoće 3,08 g/cm³
2. Silicijska prašina, gustoće 2,59 g/cm³
3. Hidratizirano vapno „Kamen Sirac“, gustoće 2,3 g/cm³
4. Punilo, gustoće 2,65 g/cm³
5. Za povećanje kohezivnosti stiren butadijenski lateks SB-50, gustoće 1,0 g/cm³
6. Superplastifikator, gustoće 1,09 g/cm³ s 35,2 % suhe tvari
7. Prirodni frakcionirani agregat „Novo Čiče“, D_{max}=16 mm, gustoće 2,68 g/cm³
8. Sika ViscoCrete 5-800 – superplastifikator na osnovi polikarboksilnih etera, gustoće 1,09 g/cm³ (preporučljivo doziranje za samozbijajući beton – 0,3-1,0 %).

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja betona

Ispitivanje	Svojstvo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Rasprostiranje slijeganjem	D _{max} (mm)	500	600	700	720	500	540	600	710	720
	T ₅₀₀ (s)	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	1,3	1,0	2,5	3,5
	razred SF	-	SF1	SF2	SF2	-	-	SF1	SF2	SF2
	razred VS	-	VS1	VS1	VS1	-	-	VS1	VS2	VS2
	vizualni pregled	-	izdvajanje vode	malo izdvajanje vode	izdvajanje vode	-	-	-	nema segregacije, malo izdvajanje vode	nema segregacije, nema izdvajanja vode
L-kutija	H1	5,7	6,5	7,0	6,5	nema tečenj a	7,5	8,0	6,3	6,5
	H2	4,8	6,4	6,4	6,4		5	5,2	6,0	5,9
	H2/H1	0,84	0,99	0,91	0,99		0,67	0,65	0,95	0,91
Tlačna čvrstoća (N/mm ²)	7 dana	15,8	25,1	26,0	26,7	25,3	25,1	29,8	28,7	32,7
	28 dana	28,4	34,7	37,3	36,9	40,9	40,4	42,9	45,3	49,3

5 Analiza rezultata ispitivanja

Cilj laboratorijskih istraživanja bio je odrediti utjecaj komponenata na svojstva samozbijajućeg betona te analizirati uzroke pojave segregacije i izdvajanja vode kod svježeg betona. Za potrebe laboratorijskih istraživanja izrađeno je 9 betonskih mješavina kod kojih su varirane različite komponente sastava te njihovi udjeli. Uspoređene su karakteristike betona izrađenih s različitim dodacima (punila, silicijska prašina, hidratizirano vapno, stiren butadijenski lateks i superplastifikatori na osnovi naftalen sulfonata te na bazi polikarboksilnih etera).

Iz rezultata ispitivanja prema preporučenim metodama za samozbijajuće betone (tečenje, viskoznost, sposobnost zaobilazanja prepreka) može se zaključiti da betonski sastavi VIII i IX zadovoljavaju propisane zahtjeve za samozbijajući beton. Prema dobivenim rezultatima ispitivanja, sastavi betona VIII i IX mogu se primijeniti za

većinu betonskih radova (zidovi, stupovi). Kod betonskog sastava VIII vizualnim je pregledom uočeno neznatno izdvajanje vode, što je kod sastava IX eliminirano dodatkom punila te je taj sastav u potpunosti zadovoljio ispitana svojstva samozbijajućeg betona.

Kod sastava kod kojih je upotrijebljena druga vrsta superplastifikatora, koja nije na osnovi polikarboksilnih etera, a koja se inače rabi za poboljšanje obradljivosti i postizanje tekuće konzistencije betona, također su postignuta potrebna svojstva s obzirom na tečenje pri ispitivanju rasprostiranja slijeganjem (II, III i IV). No iz izmjerenih vrijednosti T₅₀₀ kojima se opisuje viskoznost betonske mješavine vidi se da je beton brže tekao nego kod mješavina VIII i IX, a ujedno su uočene i pojave izdvajanja vode. Vrijednosti T₅₀₀ izmjerene kod mješavina II, III i IV pokazuju malu viskoznost betona s vrlo brzim početnim tečenjem, a nakon kratkog vremena došlo je do potpunog zaustavljanja tečenja. Prema izmjerenim

vrijednostima brzine tečenja, betoni takvih karakteristika mogli bi se upotrebljavati u slučajevima gusto složene armature, no kao što je poznato iz literature, a što je potvrđeno i laboratorijskim istraživanjima, tada dolazi do problema izdvajanja vode.

Betonske mješavine V i VI nisu zadovoljile ispitivanja s pomoću rasprostiranja slijeganjem i L-kutije. Ti su sastavi izrađeni s dodatkom hidratiziranog vapna koje je upotrijebljeno radi smanjenja pojave izdvajanja vode, no to je nepovoljno utjecalo na tečenje betona. Isto tako sastav VII, kod kojega je dio punila zamijenjen silicijskom prašinom, nije zadovoljio ispitivanje sposobnosti zaobilazanja prepreka L-kutijom.

6 Zaključak

Sastav samozbijajućeg betona moguće je projektirati na više načina. Osobito treba paziti na reološka svojstva kao što su granica tečenja i plastična viskoznost. Naime,

komponente sastava betonske mješavine imaju velik utjecaj na plastičnu viskoznost. To su udio vode, količina zraka, dodatak silicijske prašine te ostali čimbenici kao što su oblik zrna agregata te volumen matrice (pasta). Za praktičnu su primjenu razvijeni empirijski postupci ispitivanja osnovnih parametara samozbijajućih betona kojima se dobiva uvid u osnovne karakteristike samozbijajućeg betona. Laboratorijskim istraživanjima prikazanim u radu željelo se utvrditi utjecaj lokalnih materijala na svojstva samozbijajućeg betona. Za postizanje potrebnih svojstava samozbijajućih betona nužna je uporaba superplastifikatora na osnovi polikarboksilnih etera, a dodatkom punila izbjegavaju se pojave izdvajanja vode i segregacije krupnih zrna agregata. Metodama ispitivanja koje se temelje na empirijskim postupcima, moguće je na jednostavan način analizirati utjecaj varijacije pojedinih komponenata na svojstva svježeg betona. Iako se kod samozbijajućeg betona primarno analiziraju svojstva svježem stanju, uporabom različitih kemijskih i mineralnih dodataka u sastavu betonske mješavine, posredno se utječe i na svojstva betona u očvrslom stanju. Pri projektiranju sastava samozbijajućih betona valja imati na umu da male varijacije u sastavu mogu značajno utjecati na svojstva tečenja i viskoznosti betonske mješavine.

Općenito pri projektiranju sastava samozbijajućeg betona vrijede sljedeća pravila:

- Okamura i Ozawa predložili su da udio krupnog agregata bude približno 50 % vol. betona, a pojedinim istraživanjima je pokazano da udio krupnog agregata može biti od 30 do 34 %
- najveće upotrijebljeno zrno agregata D_{max} treba biti 20 mm
- vodovezivni omjer je obično manji od 0,5, uobičajeno 0,30 do 0,36 (0,85 do 1,10 po volumenu)
- potrebno je upotrijebiti superplastifikator, a kod većih vodovezivnih omjera i dodatak za promjenu viskoznosti
- sadržaj vode je u rasponu od 150 do 175 l za 1 m³ betona, te do 210 l uz upotrebu dodatka za promjenu viskoznosti
- volumen paste čini oko 40 % volumena betona
- udio sitnog agregata čini 40 do 50 % volumena morta
- dodaci kao što su zgura i leteći pepeo poboljšavaju obradljivost i smanjuju pojavu segregacije betona.

Pri izradi samozbijajućeg betona treba uzeti u obzir utjecaj lokalnih materijala na svojstva betona, i to osobito svojstva agregata, kao što su granulometrija, udio sitnih čestica te oblik i tekstura zrna. Ako upotrijebljeni agregat nema dovoljno sitnih čestica, potrebno je u sastav betonske mješavine dodati druge sitne čestice kao što su vapnenac, zgura, silicijska prašina i leteći pepeo.

LITERATURA

- [1] Skarendahl, Å.: *Market Acceptance of Self-Compacting Concrete, the Swedish Experience*, Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting concrete, Tokyo, Japan, 2001, ed. Ozawa, K.; Ouchi, M., 1-12
- [2] Henrichsen, A.: *Application of SCC – Motivation, Application and Problem Areas*, Ph.D. course - Rheology of Cementitious Materials – Self-Compacting -Concrete, DTU – Technical University of Denmark, Lingby, 19-24 August, 2002
- [3] Collepardi, M.: *Self-compacting concrete: What is new?*; Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Germany, 2003., pp. 1-16
- [4] Walraven, J.: *State of the Art on Self-Compacting concrete in The Netherlands*, Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting concrete, Tokyo, Japan, 2001, ed. Ozawa, K.; Ouchi, M., 13-24
- [5] Kordts, S.; Breit, W.: *Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton*, 113-124; <http://www.vdz-online.de>
- [6] Collepardi, M.; Valente, M.: *Recent Developments in Superplasticizers*; Proceedings of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006., ed. Malhotra, V. M., pp. 1-14
- [7] *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use*, May 2005.
- [8] Kordts, S.; Grube, H.: *Steuerung der Verarbeitbarkeits-eigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton*, 103-112; <http://www.vdz-online.de>
- [9] Spiratos, N.; Page, M.; Mailvaganam, N.; Malhotra, V. M.; Jolicoeur, C.: *Superplasticizers for Concrete, Fundamentals, Technology and Practice*, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2003
- [10] Khayat, K. K.; Hwang, S.-D.: *Effect of High-Range Water-Reducing Admixture Type on Performance of Self-Consolidating concrete*, Proceedings of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006., ed. Malhotra, V. M., pp. 1-14
- [11] Borsoi, A.; Collepardi, M.; Collepardi, S.; Croce, E. N.; Passuelo, A.: *Influence of a Viscosity Modifying Admixture on the Composition of SCC*, Supplementary Papers of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006., ed. Malhotra, V. M., pp. 253-261
- [12] Bui, V.: *Mix-Design of Self-Compacting Concrete –Overview and Description of Selected Methods*, Ph.D. course - Rheology of Cementitious Materials – Self-Compacting -Concrete, DTU – Technical University of Denmark, Lingby, 19-24 August, 2002
- [13] *Self-Compacting Concrete*, State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC Self Compacting Concrete, ed. Skarendahl, Å.; Petersson, Ö., RILEM Publications S.A.R.L., the Publishing Company of RILEM, 2000
- [14] *Advanced Concrete Technology - Processes*, ed. Newman, J.; Seng Choo, B., Elsevier, Ltd., 2003

- [15] Billberg, P.: *CBI Mix Design Model for Self-Compacting concrete*, Ph.D. course - Rheology of Cementitious Materials – Self-Compacting -Concrete, DTU – Technical University of Denmark, Lingby, 19-24 August, 2002
- [16] Wallevik, O. H.: *Rheology of cement suspensions*, Ph.D. course - Rheology of Cementitious Materials – Self-Compacting - Concrete, DTU – Technical University of Denmark, Lingby, 19-24 August, 2002
- [17] Bird, R. B.; Armstrong, R. C.; Hassager, O.: *Dynamics of Polymeric Liquids, Vol. 1: Fluid Mechanics*, 2nd ed., A Wiley-Interscience Publication, 1987.
- [18] de Larrard, F.: *Concrete Mixture Proportioning – A Scientific Approach*, E & FN SPON, London, Chapter 2.1, 1999
- [19] Bui, V.; Akkaya, Y.; Shah, S. P.: *Rheological Model for Self-Consolidating Concrete*, *ACI Materials Journal*, V. 99, No. 6, Nov.-Dec. 2002, 549–559
- [20] Tangtermsirikul, S.; Van Bui, K.: *Blocking Criteria for Aggregate Phase of Self-Compacting High Performance Concrete*, *Infrastructure Development in Civil Engineering*, December 19-20, 1995, Bangkok, Thailand
- [21] Dropulić, I.: *Samougradljivi beton*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2001
- [22] Udovčić, A.; Majdak, M.: *Utjecaj superplastifikatora na bazi polikarboksilata na svojstva betona izrađenih s cementima proizvedenim u Hrvatskoj*, natječajni rad za Rektorovu nagradu, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005
- [23] Kvež, H.: *Samozbijajući beton*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2006