

## OPTIMIZACIJA KOLIČINE VEZNEGA MATERIALA V BETONIH VISOKE TRDNOSTI

### OPTIMIZATION OF BINDING MATERIAL QUANTITY FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE

Barbara Treppo-Mekiš, Jana Šelih

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Prejem rokopisa - received: 1999-11-23; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20*

Kvaliteten beton visoke trdnosti mora imeti v svežem stanju dovolj veliko obdelavnost oz. vgradljivost. Obenem pa lahko tak beton izdelamo le, če je mešanica agregata takšna, da je v njej najmanjša možna količina praznin. Praznine tako optimizirane sestave agregata je treba zapolniti s cementno pasto ustreznosti kakovosti in dodati še neki presežek paste, ki zagotavlja primerno obdelavnost - konsistenco betona. Za izdelavo dovolj kakovostne cementne paste je treba uporabiti še mineralne in kemične dodatke. Članek prikazuje določanje minimalne vsebnosti cementne paste oz. kamna kot veznega materiala, ki hkrati še omogoča zadostno obdelavnost betona visoke trdnosti za praktično uporabo. Tlačne trdnosti tako proizvedenih betonov so okrog 70 MPa po 28 dnevih, pri njihovi pripravi pa smo uporabljali različne vrste agregata ter spremenljivo količino mineralnega dodatka.

Ključne besede: beton visoke trdnosti, cementna pasta, mikrosilika, konsistenca, optimizacija veziva

Fresh high-strength concrete has to be sufficiently workable if its quality is to be ensured. On the other hand, high-strength concrete can only be produced if aggregate mix contains minimum possible void quantity. The voids of the optimized aggregate mix have to be filled by cement paste with an overfill that ensures sufficient workability / consistency. Mineral and chemical admixtures have to be used in the production of high quality cement paste. The paper presents the determination of minimum cement paste quantity that ensures production of concrete that is sufficiently workable to be used on construction site. Compressive strengths are approximately 70 MPa at the age of 28 days. Different types of aggregate and variable mineral admixture quantities were employed in the composition of concrete.

Key words: high-strength concrete, cement paste, silica fume, consistency, optimization of binder

#### 1 UVOD

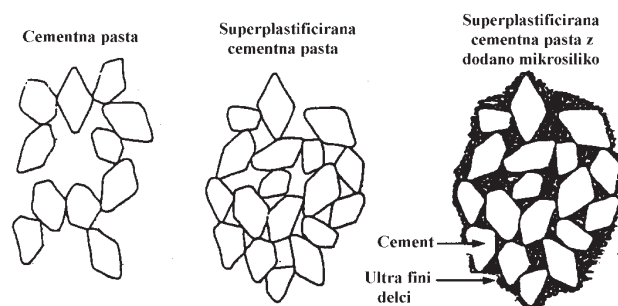
V zadnjih 20 letih se uporaba betona visoke trdnosti (BVT) po svetu močno povečuje, saj ta lahko njegova uporaba vodi k zmanjšani porabi vhodnih materialov in s tem zmanjša stroške konstrukcije ali pa omogoča gradnjo višjih zgradb na lokacijah, kjer je cena zemljišča visoka. Pri premostitvenih objektih omogoča uporaba BVT zmanjšanje velikosti presekov prekladne konstrukcije, obenem pa zagotavlja tudi visoko obstojnost betona in s tem daljšo trajnostno dobo konstrukcije. Tudi v Sloveniji narašča povpraševanje po takšnih betonih. Ob sprejemanju tujih izkušenj pa se moramo zavedati, da lahko taka raziskovalno-razvojne dognanja uporabljamo le posredno in da so lastne izkušnje z osnovnimi materiali, ki so na voljo pri nas, nujne.

Pred uvedbo betonov visokih trdnosti v široko uporabo je treba izpeljati raziskave, s katerimi se lahko ugotovi vedenje teh betonov, pripravljenih z razpoložljivimi domačimi materiali (z agregatom, s cementom, s kemičnimi in z mineralnimi dodatki) in se določijo njihove lastnosti, ki jih je treba poznati zaradi projektiranja in izvajanja konstrukcij.

Beton je kompozit, sestavljen iz agregatnih zrn, ki ležijo v matriki cementnega kamna. Mehanske karakteristike betona so odvisne od lastnosti obeh komponent, od njunega količinskega razmerja in od fizikalnih in

kemijskih vezi med njima. Mehanske lastnosti betona lahko izboljšamo z doslednejšim zgoščanjem trdnih delcev in z izboljšanjem vezi med cementnim kamnom in agregatom.

Za izboljšanje strukture in s tem za zmanjšanje povprečne velikosti por se uporablja mikrosilika (silicijev dioksid, SiO<sub>2</sub>). Delci le-te so za dva velikostna razreda manjši od zrn cementa, zato zapolnijo praznine med večjimi, nepravilno oblikovanimi zrn. Visoki odmerki superplastifikatorja zmanjšujejo površinsko napetost, kar omogoča dobro zgostitev (**slika 1**). Tako se doseže tudi manjša poraba vode, kar omogoča proizvodnjo cementnega kamna z zelo nizkim razmerjem



Slika 1: Zgradba cementne paste v svežem betonu<sup>4</sup>  
Figure 1: Cement paste constitution in fresh concrete<sup>4</sup>

med vodo in cementom (vodocementno razmerje; w/c razmerje).

Članek opisuje del širšega raziskovalnega projekta, katerega namen je razvoj betonov visoke trdnosti v Sloveniji, možnosti njihove proizvodnje ter ugotavljanje njihovih lastnosti, ki jih zahtevamo med trajnostno dobo tega materiala. Prvi cilj tega projekta, ki ga opisujemo v tem članku, je torej optimizacija sestave mešanice za beton visoke trdnosti.

## 2 NAČELA PROJEKTIRANJA MEŠANIC BETONOV VISOKIH TRDNOSTI

Tako sestava kot tudi način določanja le-te za betone visokih trdnosti se razlikujeta od konvencionalnih postopkov. Za izdelavo kvalitetnega cementnega kamna moramo znižati w/c razmerje, uporabiti plastifikatorje oziroma superplastifikatorje, cimente visokih trdnosti ter mineralne dodatke, zlasti mikrosiliko, ki gostijo strukturo matrike. Visoka trdnost betona se doseže, če je:

- pretočnost cementne paste maksimalna, kar omogoča bistveno znižanje w/c razmerja;
- delež cementne paste v betonu čim manjši, hkrati pa vsaj tolikšen, da obvijsa vsa zrna agregata in zapolni vse vmesne prostore med posameznimi zrni in
- če je zrnastost sestava agregata taka, da omogoča maksimalno zbitost, to pomeni, da je v mešanici agregata količina praznin minimalna.

Iz zgoraj navedenega sledijo splošna načela projektiranja betonov visokih trdnosti, ki temeljijo na treh korakih, in sicer:

1. določitev potrebne količine superplastifikatorja za cementno pasto določenega w/c razmerja in določene vsebnosti mikrosilike;
2. določitev optimalnega razmerja med grobim in finim agregatom ter
3. določitev votlin oziroma praznih prostorov v agregatu, ki jih bo treba zapolniti s cementno pasto.

Vsi trije koraki vodijo k optimizaciji količine veznega materiala v betonu, ki je poleg kvalitetnega agregata ključnega pomena za doseganje visokih trdnosti betona.

### 2.1 Določitev potrebne količine superplastifikatorja

Sveža cementna pasta je sestavljena iz cementa, vode, mineralnega dodatka in superplastifikatorja. Od lastnosti paste so odvisne tako lastnosti sveže betonske mešanice kot tudi lastnosti strjenega betona v smislu njegovih mehanskih lastnosti, prepustnosti in dolgoročnih deformacij.

Glede na želene mehanske lastnosti betona se navadno vnaprej izbere količina mikrosilike in w/c razmerje cementne paste. Pri izbranem w/c razmerju in potrebni količini mikrosilike ostaja zato edina možna spremenljivka količina superplastifikatorja. Treba količino superplastifikatorja se lahko določi s preprostim

preskusom pretočnosti cementne paste. Daljši kot je čas pretakanja določene količine cementne paste, slabša je njena pretočnost. Pri primerjalnih meritvah je treba paziti na enake pogoje glede načina mešanja paste in trenutka izvajanja meritev, saj je pretočnost zelo odvisna od časa po zamešanju paste.

Za določitev optimalne količine superplastifikatorja proti količini cementa se primerja čas pretoka določene količine različnih cementnih past z različnim deležem superplastifikatorja. V splošnem velja, da se pretočnost ne izboljšuje več, ko je doseženo neko razmerje med superplastifikatorjem in cementom. Ta količina, imenovana tudi doza zasičenosti, se jemlje kot maksimalna količina superplastifikatorja. Dozo zasičenosti določujemo za cementne paste različnih w/c razmerij in različnih vsebnosti mikrosilike. V splošnem velja, da se doza zasičenosti povečuje z večanjem vsebnosti mikrosilike in z nižanjem w/c razmerja<sup>9</sup>.

### 2.2 Določitev zrnastostne sestave agregata

Za doseganje visokih trdnosti betona je treba sestaviti mešanico agregata take zrnastosti, pri kateri bo količina praznin najmanjša<sup>8</sup>. Kot izhodišče nam navadno rabi ugodno območje, kot ga določa veljavni standard JUS U.M1.057. Pripadajoči mejni krivulji dopuščata variiranje deleža peska od 36 do 56% glede na celotno maso agregata. Tako velik razpon deležev finih frakcij močno vpliva na vsebnost praznin v agregatu. Zato je za natančnejšo izbiro deleža finega agregata do 4 mm priporočljivo uporabiti metodo ASTM C 29/C 29M - 97<sup>6</sup>, s katero lahko za različne deleže peska določimo količino praznin v suhi mešanici finega in grobega agregata. Če prikažemo rezultate določevanja praznin v suhi mešanici finega in grobega agregata v obliki grafa, kjer je vsebnost praznin funkcija vsebnosti peska v njem, dobimo konkavno krivuljo, iz katere lahko odčitamo optimalni delež peska in pripadajoči minimalni odstotek praznin v agregatu.

### 2.3 Določanje vsebnosti cementne paste v betonu

Količina paste v betonu naj ne bo večja od tistega minimuma, ki je potreben za zagotavljanje trdnosti in obdelavnosti<sup>9</sup>. To je zlasti pomembno, ker preobilica paste privede do zmanjšanja trdnosti, povečanja krčenja in do povečanja stroškov, povezanih s cementom. Kljub temu pa mora biti paste za zagotovitev homogene, kohezivne matrice za agregat več, kot je je treba za zapolnitev vseh praznin, ugotovljenih v predhodnem koraku. Ta presežek paste je razlika med tisto količino, ki bi natančno zapolnila vse praznine in med dejansko treba količino, ki še omogoča dobro obdelavnost. V literaturi najdemo podatek za priporočeni presežek cementne paste od 5 do 15%<sup>7</sup>. Večji kot je presežek paste, večja je obdelavnost betona, bolj plastična je njegova konsistenca, obenem pa prevelik presežek paste povzroča padec trdnosti betona. Potrebni

presežek paste za doseganje izbrane konsistence narašča z nižanjem w/c razmerja pri konstantni količini dodatnega superplastifikatorja.

### 3 IZVEDENI PRESKUSI

Pri pripravi betonov smo uporabili različne kombinacije osnovnih materialov. Mešanice betona z vnaprej določenimi lastnostmi smo pripravili iz dveh vrst kamenega agregata iz različnih nahajališč v Sloveniji, in sicer okroglozrnatega in drobljenega agregata, saj je vpliv tipa agregata občuten tudi pri lastnostih svežega in trdnega betona. Za okroglozrnati material smo izbrali dravski prod iz separacije Dogoše, za drobljeni material pa apnenčasti drobljenec iz separacije Črni Kal. Druge osnovne sestavine so za vse mešanice enake. Uporabili smo cement PC 45B cementarne Trbovlje ter v Sloveniji komercialno dostopni silikatni prah in superplastifikator (SP). Najprej smo določili treba količino superplastifikatorja s preskusi pretočnosti cementne paste različnih w/c razmerij in različnih vsebnosti mikrosilike (MS), to pomeni takih kombinacij, kot smo jih nameravali uporabiti pri pripravi betona. Nato smo za vsakega izmed obeh vrst agregata ugotovili po metodi ASTM C 29/C 29M - 97<sup>6</sup> delež praznin v njem, ki ga je treba zapolniti, iz česar smo določili minimalno treba količino paste v betonu in glede na želeno konsistenčno stopnjo še potrebni presežek cementne paste. Z uporabo krivulj odvisnosti med tlačno trdnostjo in w/c razmerjem smo za dve kombinaciji osnovnih materialov (z dvema vrstama agregata) ugotovili osnovne odvisnosti svežega in strjenega betona od vodovezivnega (w/v) oziroma w/c razmerja, namreč:

- potrebno količino veziva (cementa in MS) ter dodatka SP in
- doseženo tlačno trdnost pri različnih starostih betona.

V ta namen smo za vsako kombinacijo pripravili tri nize mešanic s po tremi različnimi w/c razmerji. Vsak niz se je razlikoval po vsebnosti MS, ki je bil 0, 4 in 9% mase cementa. Masne deleže materialov v posameznih mešanicah smo prilagajali projektiranim w/c vrednostim in izbrani konsistenčni stopnji. Na temelju dobljenih rezultatov smo se odločili za eno izmed mešanic, ki smo jo nato zamešali v stacionarni betonarni, da bi s tem dokazali dejansko uporabnost laboratorijsko pridobljenih podatkov.

#### 3.1 Opis postopka

##### 3.1.1 Določanje pretočnosti cementne paste

Osnova vsake cementne suspenzije je bilo 2000 g cementa. Pripravili smo jih s tremi različnimi w/c razmerji (0,30, 0,33 in 0,35) in s štirimi različnimi količinami dodane mikrosilike (0%, 4%, 9% in primerjalno še 7% glede na maso cementa). Količina dodanega superplastifikatorja je bila od 1,0 do 2,0% suhe snovi glede na maso cementa.

V odmerjeno količino vode in dodatka, ki vsebuje 82% tekoče faze superplastifikatorja, se med počasnim mešanjem v 1 minuti postopoma enakomerno vsuje cement, nato se postopek nadaljuje s počasnim mešanjem še 1,5 minute, in še nadaljnje 2,5 minute s hitrim mešanjem. Skupen čas mešanja je 4 minute. Takoj po zamešanju (najkasneje v 3 minutah) se izmeri čas pretoka določene količine paste skozi normiran lijak, suspenzijo se nato prelije nazaj v mešalno posodo in s

**Tabela 1:** Sestava preskušanih cementnih suspenzij in izmerjene pretočnosti

**Table 1:** Fresh cement paste composition and measured flow-times

Oznaka susp.	w/c	MS	w/v	% superplastifikatorja			Izmerjena pretočnost (s)			
				skupaj	dodan	dodan po 30	takoj	po 30 minutah	po 60	
		(%)			takoj	minutah		pred dod.	po dod.	minutah
1	0,35	0	0,35	1,1	1,1	0	12,0	13,0	B	11,3
2	0,35	0	0,35	1,6	1,6	0	9,0	10,6	B	10,0
3	0,30	0	0,30	1,2	1,2	0	60,0	A	A	A
4	0,30	0	0,30	1,6	1,6	0	51,0	A	A	A
5	0,35	4	0,337	1,0	1,0	0	9,4	12,0	B	15,2
6	0,35	4	0,337	1,5	1,5	0	8,0	9,3	B	9,6
7	0,33	4	0,317	1,0	1,0	0	17,1	26,2	B	32,5
8	0,33	4	0,317	1,5	1,5	0	15,8	16,6	B	20,0
9	0,35	9	0,321	1,5	1,5	0	15,2	18,6	B	20,3
10	0,35	9	0,321	1,5	1,0	0,5	24,3	32,5	9,8	11,6
11	0,35	9	0,321	2,0	2,0	0	6,1	6,5	B	6,9
12	0,35	9	0,321	2,0	1,5	0,5	17,6	24,5	10,2	11,9
13	0,33	9	0,303	2,0	2,0	0	46,0	49,1	B	49,5
14	0,33	7	0,311	2,0	2,0	0	38,6	42,4	B	47,4

Opombi: A - prevelika gostota za nadaljnje meritve

B - celotna količina superplastifikatorja se je dodala na začetku mešanja

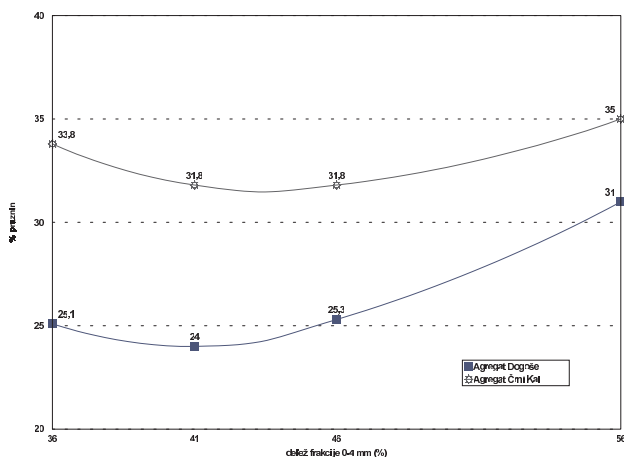
počasni obrati ročno meša do preteka skupaj 30 minut, od pričetka mešanja. Takrat se ponovno izmeri pretok, nato pa enako, kot prej do 30 minut, meša do 60 minut, ko se pretok ponovno izmeri. Če suspenzija ni pregosta, se v primeru dodajanja superplastifikatorja po 30 minutah izmeri čas pretoka pred dodajanjem in nato takoj po njem.

V tabeli 1 so prikazane količine osnovnih sestavin ter izmerjene vrednosti za 14 cementnih suspenzij, pri katerih smo merili pretočnost.

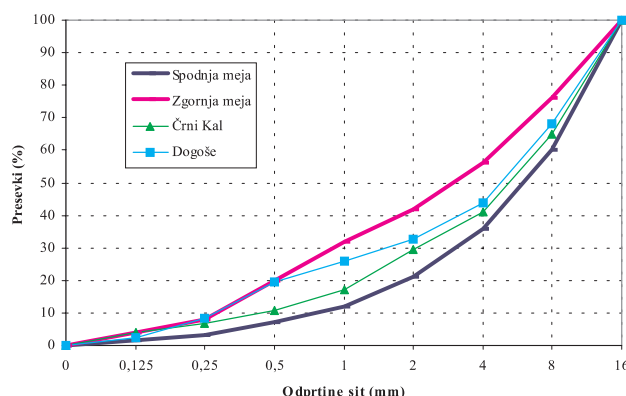
### 3.1.2 Določitev optimalne mešanice agregata

Izbrano maksimalno zrno mešanice agregata je bilo 16 mm. Ker je treba za doseganje visokih trdnosti betona sestaviti agregat take zrnivosti, pri kateri bo količina praznin kar najmanjša, smo za izhodišče izbrali ugodno območje po JUS U.M1.057, pri čemer je bila mešanica grobega agregata sestavljena iz frakcij zrnivosti 8-16 mm in 4-8 mm. Glede na podatke izsejanosti smo ju mešali v razmerju 7 delov frakcije 8-16 mm in 5 delov frakcije 4-8 mm za agregat iz separacije Dogoše oziroma v razmerju 4 deli frakcije 8-16 mm in 3 deli frakcije 4-8 mm za agregat iz separacije Črni Kal. Mejne krivulje po JUS U.M1.057 za delež peska 0-4 mm dopuščajo variiranje od 36 do 56% glede na celotno količino agregata. Zato smo za natančnejšo izbiro količine finega agregata do 4 mm uporabili metodo ASTM C 29/C 29M - 97 "Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate", s katero smo za različne deleže peska (36%, 41%, 46% in 56%) določili praznine v suhi mešanici finega in grobega agregata za oba uporabljena agregata (separaciji Dogoše in Črni Kal).

Rezultate določanja praznin po metodi ASTM C 29/C 29M - 97 prikazujemo z grafom na sliki 2. Ugotovimo lahko, da so za agregat iz separacije Dogoše praznine najmanjše (24%) pri 41odstotnem deležu finega agregata, oziroma za agregat iz separacije Črni Kal so praznine najmanjše (31,7%) pri 44 odstotnem deležu finega agregata.



Slika 2: Deleži praznin v različnih sestavah agregata  
Figure 2: Void fractions for different aggregate compositions



Slika 3: Zrnavostni krivulji izbranih mešanice agregata  
Figure 3: Cumulative aggregate size distribution for selected aggregate mixes

Na temelju dobljenih rezultatov ter standarda JUS U.M1.057 smo izbrali suho mešanico agregatov, ki je navedena v tabeli 2. Končni zrnavostni krivulji izbranih mešanice agregatov prikazujemo na sliki 3.

Tabela 2: Izbrane mešanice agregatov  
Table 2: Selected aggregate mixtures

Frakcija	Agregat iz separacije Črni Kal (%)	Agregat iz separacije Dogoše (%)
8 / 16	32	35
4 / 8	24	24
0 / 4	44	41

### 3.1.3 Določitev sestavin in količine cementne paste

Cementna pasta je bila v vseh primerih sestavljena iz cementa, vode, mikrosilike in superplastifikatorja. Količino potrebne cementne paste so določale praznine v izbrani mešanici agregata, k temu smo dodali še neki presežek paste, ki je zagotavljal primerno obdelavnost betona. Merilo konsistence sta bili vrednosti poseda stožca po standardu JUS U.M8.050 in razleza po JUS U.M8.052, kjer sta bila ciljani posed 16 - 24 cm, razlez pa 40 - 50 cm.

Iz enačbe:

$$\frac{m_a}{\gamma_a} + \frac{m_c}{\gamma_c} + \frac{m_v}{\gamma_v} + \frac{m_{SP}}{\gamma_{SP}} + \frac{m_{MS}}{\gamma_{MS}} + \%_{por} = 1$$

kjer pomeni:

- $m_a$  masa agregata (kg)
- $m_c$  masa cementa (kg)
- $m_v$  masa vode (kg)
- $m_{SP}$  masa superplastifikatorja (kg)
- $m_{MS}$  masa mikrosilike (kg)
- $\gamma_a$  specifična masa agregata ( $kg/m^3$ )
- $\gamma_c$  specifična masa cementa ( $kg/m^3$ )
- $\gamma_v$  specifična masa vode ( $kg/m^3$ )
- $\gamma_{SP}$  specifična masa superplastifikatorja ( $kg/m^3$ )
- $\gamma_{MS}$  specifična masa mikrosilike ( $kg/m^3$ )
- $\%_{por}$  predvidena poroznost betona (absolutno),

**Tabela 3a:** Lastnosti in tlačne trdnosti mešanic iz agregata separacije Črni Kal**Table 3a:** Properties of concrete mixes based on Črni Kal aggregate

Oznaka mešanice	w/c	w/v	MS	PP	SP	DC	spec. masa bet.	posed	razlez	TT 28-dni
			(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(cm)	(cm)	(MPa)
CK 1	0,306	0,306	0	6,0	1,3	561	2440	18	41×42	68,1
CK 2	0,347	0,347	0	2,5	1,0	480	2430	18	50×51	66,5
CK 3	0,390	0,390	0	2,5	0,7	451	2415	20	57×58	58,5
CK 4	0,300	0,288	4	6,5	1,5	555	2425	18	42×43	84,4
CK 5	0,338	0,325	4	3,2	1,3	479	2451	20	41×42	83,9
CK 6	0,389	0,373	4	2,8	0,7	443	2418	16	42×42	67,6
CK 7	0,301	0,275	9	6,1	2,0	524	2429	18,5	44×45	95,6
CK 8	0,340	0,312	9	3,1	1,6	460	2459	17	43×43	91,7
CK 9	0,384	0,352	9	2,2	1,3	422	2438	18	44×45	83,2

**Tabela 3b:** Lastnosti in tlačne trdnosti mešanic iz agregata separacije Dogoše**Table 3b:** Properties of concrete mixes based on Dogoše aggregate

Oznaka mešanice	w/c	w/v	MS	PP	SP	DC	spec. masa bet.	posed	razlez	TT 28-dni
			(%)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(cm)	(cm)	(MPa)
D 1	0,324	0,324	0	12,3	1,3	514	2439	24	54×55	61,1
D 2	0,343	0,343	0	9,3	1,5	457	2439	23	56×56	53,2
D 3	0,394	0,394	0	6,0	1,3	383	2439	21	53×52	46,9
D 4	0,323	0,310	4	10,3	1,5	470	2439	24	52×52	70,4
D 5	0,352	0,339	4	7,0	1,5	410	2449	25	55×56	69,9
D 6	0,398	0,383	4	5,1	1,3	362	2452	21,5	45×46	65,5
D 7	0,328	0,301	9	9,9	1,8	448	2435	22	50×50	72,4
D 8	0,343	0,315	9	7,2	1,6	401	2459	20	43×43	72,1
D 9	0,394	0,362	9	5,3	1,3	353	2435	20,5	45×45	69,5

in znanega deleža praznin med zrni agregata smo izračunali treba količino cementne paste. Nato določimo na podlagi predhodno izbranega w/c razmerja, izbranega presežka paste, odstotka dodanega superplastifikatorja in izbrane količine dodane mikrosilike vse druge potrebne količine. Specifične mase osnovnih materialov ter delež suhe snovi v superplastifikatorju, ki jih v izračunu še potrebujemo, so navedene v<sup>10</sup>.

### 3.1.4 Betoni

Vsi betoni so se mešali v 50-litrskem protitočnem mešalniku. Suha mešanica agregata, cementa in mikrosilike se je mešala 30 sekund. Voda in superplastifikator sta se dodajala skupaj, čas mešanja od trenutka dodajanja tekočine je bil tri minute. Iz dobljenega betona smo pripravili preskušance v obliki valjev premera 15 cm in višine 30 cm ter kock s stranico 15 cm.

V tabelah 3a in 3b so navedene sestave posameznih mešanic in glavne značilnosti svežega ter otrdelega betona za obe vrsti uporabljenega agregata:

- vodocementno razmerje (w/c) (izmerjeno s sušenjem)
- vodovezivno razmerje (w/v) (izmerjeno s sušenjem)

- % dodane mikrosilike glede na količino cementa (MS)
- uporabljeni presežek cementne paste (PP)
- % dodanega superplastifikatorja - suhe snovi glede na količino cementa (PP)
- količina cementa v 1m<sup>3</sup> betona (DC)
- specifična masa betona (izmerjena s tehtanjem)
- konsistenca (posed in razlez)
- tlačna trdnost (TT) po 28 dnevih, izmerjena na valjih

Rezultati v tabeli 3 kažejo, da pri konstantnem odstotku mikrosilike potrebni presežek cementne paste za vnaprej specificirano konsistenco pada z naraščajočim vodocementnim razmerjem. Presežki paste so večji, če uporabimo okroglozrnat agregat.

Za oba uporabljena tipa agregata lahko ugotovimo, da pri nespremenjenem w/c razmerju potrebni dodatek SP raste z naraščajočo količino mikrosilike. Potrebni dodatek superplastifikatorja prav tako narašča s padajočim vodocementnim razmerjem ob konstantnem odstotku mikrosilike.

Dobljene vrednosti tlačnih trdnosti po 28 dneh se gibljejo od 61 do 95 MPa, kar pomeni, da presegajo mejne vrednosti, ki določajo beton visoke vrednosti.

Tlačna trdnost je izrazito odvisna od količine dodane mikrosilike, še zlasti je to vidno pri betonu, pripravljenem z drobljenim agregatom iz Črnega Kala, katerega trdnosti so precej višje od betona, pripravljenega z dogoškim prodrom. To potrjuje rezultate študij iz tujine, ki pripisujejo višje trdnosti betonu, pripravljenem iz drobljenega agregata, bolj kvalitetni stični coni med cementnim kamnom in hrapavim agregatnim zrnom.

#### 4 SKLEP

Eden ključnih parametrov pri določevanju sestave BVT je določevanje optimalne količine presežka cementne paste, ki mora biti čim manjša, da dosežemo čim večjo trdnost, hkrati pa dovolj velika, da zagotovi zadostno obdelavnost svežega betona, ki omogoča uspešno vgrajevanje BVT v kalupe. Pogosto je pri uporabi BVT projektirana armatura, ki jo moramo zaliti z betonom, gosta, kar še dodatno poveča potrebo po dobri vgradljivosti betona.

Za določitev sestave betona visoke trdnosti smo razvili in uporabili postopek, ki sloni na določitvi primerne količine cementne paste v odvisnosti od optimalne zbitosti mešanice agregata. V postopku najprej ugotovimo praznine v optimalno zbiti mešanici agregata in nato določimo ustrezno količino cementne paste, ki mora biti tolikšna, da v mešanici agregata zapolni ugotovljene praznine in z nekim presežkom tudi zagotavlja betonu izbrano obdelavnost. Pri tem so pomembne tudi značilnosti paste same, predvsem njena pretočnost, od katere je odvisno, kolikšen presežek paste bo potreben za doseganje izbrane obdelavnosti betona.

Dobljeni rezultati kažejo, da je možno izdelati BVT na osnovi slovenskih materialov s tlačno trdnostjo po 28 dneh med 60 in 95 MPa. Pri tem so značilni presežki cementne paste nad minimalno treba količino, ki zagotavljajo vnaprej izbrano konsistenco (posed 16 do 24 cm ter razlez 40 do 50 cm), med 5,3 in 12,3% za prodnati agregat iz Dogoš ter 2,2 in 6,5% za drobljeni agregat iz Črnega Kala.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> P.K. Mehta, *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, **1986**
- <sup>2</sup> A.M. Neville, *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York, **1963**
- <sup>3</sup> CEB Bulletin N° 228: *High Performance Concrete*, Comite Euro-International du Beton, Lausanne, **1995**
- <sup>4</sup> FIP/CEB Bulletin N° 197: *High Strength Concrete*, Comite Euro-International du Beton, Lausanne **1990**
- <sup>5</sup> Strategic Highway Research Program N° 629: *Cement Paste Aggregate Interface Microstructure*, National Research Council, Washington DC, **1993**
- <sup>6</sup> ASTM Standard C 29/C 29M - 97 "Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate", ASTM, Philadelphia, Pa, **1997**
- <sup>7</sup> B. Toralles-Carbonari, *A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete*, *4<sup>th</sup> International Symposium on the Utilization of High Strength / High Performance Concrete*, Paris, France, **1996**, 161-167
- <sup>8</sup> P. Goltermann, *Packing of Aggregates: High Performance and Low Price*, *Nordic Concrete Research Meeting*, Espoo, Finland, **1996**, 3-5
- <sup>9</sup> F. de Larrard, *A Method for Proportioning High-Strength Concrete Mixtures*; *Cement, Concrete and Aggregates*, 12 (**1990**) 2, 47-52
- <sup>10</sup> B. Treppo Mekiš, *High performance concrete: mix-design and technology of production*, Master thesis, Univerza v Mariboru, **1999**