



## TEHNOLOGIJA DOBIVANJA I ISTRAŽIVANJE BETONA VISOKIH MARKI SA AMORFNOM MIKROSILIKOM I SUPERPLASTIFIKATORIMA (BETON SA MIKROSILIKOM — BMS)

prof.dr.sc. **Vinko Rogić**, dipl.ing.kem. (sa skupinom autora)

Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

U izradi članka sudjelovali su:

Prof. Dr. BORIS MATKOVIĆ, dipl. ing. kem.

Doc. KEMAL BUBALO, dipl. ing. građ.

DANIEL DASOVIĆ, arh. građ. tehn.

Doc. NERKEZ MACKIĆ, dipl. ing. građ.

Prof. Mr. MUSTAFA SELIMOVIĆ, dipl. ing. građ.

KREŠIMIR ŠARAVANJA, dipl. ing. građ.

SEAD ZEBIĆ, građ. tehn.

### Sažetak:

U prvom dijelu ovog rada prikazan je osvrt na literaturne podatke o korištenju Silica fume ( $\text{SiO}_2$  prašina) ili mikrosilike u betonima visokih čvrstoća. Istovremenim korištenjem mikrosilike, superplastifikatora i kvalitetnih agregata mogu se dobiti betoni čvrstoće i preko 200 MPa; korištenjem ova dva dodatka može se smanjiti v/c faktor do 0,15, što značajno smanjuje poroznost betona, a tim povećava vodonepropusnost, otpornost na mraz, agresivne utjecaje itd. Niskim v/c faktorom postižu se visoke rane čvrstoće, što je dokazano i našim istraživanjima, prikazanim u eksperimentalnom dijelu ovog rada (nakon 12 sati  $\beta_p = 38$  MPa, nakon 24 sata 60 MPa), što pruža veliku mogućnost primjene ovih betona za interventne radove u građevinarstvu, brzo skidanje oplata i općenito u proizvodnji elemenata bez zaparivanja. Betoni sa mikrosilikom i superplastifikatorom i kod v/c faktora 0,30 imaju jako tekuću konzistenciju, pa su pogodni za niz radova u građevinarstvu — zalivni betoni i sl. U posljednjem dijelu ovog rada prikazane su prognozistički detaljnije izvanredne mogućnosti primjene betona sa mikrosilikom (BMS) u različitim područjima u građevinarstvu — od hidrotehničkih objekata do betonske galanterije.

### Ključne riječi:

Beton visokih marki, Silica fume, mikrosilika, Beton sa mikrosilikom (BMS)

## TECHNOLOGY OF PRODUCTION AND RESEARCH OF HIGH STRENGTH CONCRETE WITH AMORFIC MICROSILICA AND SUPERPLASTICIZER (CONCRETE WITH MICROSILICA - BMS)

### Abstract:

In the first part of this paper it was presented an review of the literature about the use of silica fume or microsilica in the concretes with high strength. By the simultaneous use of microsilica, superplasticizer and qualitative aggregates one can get concretes with the strength over 200 MPa; by using these two additives' one can reduce w/c factor up to 0,15, which reduces the



porosity of the concrete very much, makes the water impermeability, frost resistance, and the resistance to the chemical attacks greater. With the low w/c factor one receives high early strengths, which was proved in the process of our research work, whose results are

presented in the experimental parts of this paper (after 12 hours  $\beta_p = 38$  MPa, and after 24 hours 60 MPa); this fact gives many possibilities for the application of these concretes for fast interventions in civil engineering, for very fast removing of shuttering and also in the production of elements without vapors in general. Concretes with microsilica and superplasticizer also by the w/c factor 0,30 have the high liquid consistence, for that reason they are applicable for many works in civil engineering, shuted concrete, etc.

In the last part of this paper the great prognostic possibilities of the application of concrete with microsilica in different areas in civil engineering are given starting with hydroengineering structures to the different concrete elements.

**Key words:**

Concretes with high strength, Silica fume, Concretes with microsilica



## 1. UVOD

Posljednjih 10—15 godina betonima se redovito dodaju plastifikatori ili superplastifikatori. Ti materijali su zaokupili pažnju tehnologa betona zbog svojstava da čine smjesu za beton tekućom i smanjuju potrebu vode, pa je njihovo korištenje u betonima velike čvrstoće postalo uobičajeno.

SiO<sub>2</sub> prašina, amorfná mikrosilika (u daljem tekstu: mikrosilika), kao dodatak betonima intenzivno se istražuje posljednjih nekoliko godina kao što su se superplastifikatori istraživali prije 6—7 godina. Istovremeno djelovanje mikrosilike i superplastifikatora u betonima omogućava da se dobiju betoni vrlo visokih marki u odnosu na klasični beton (tablica 1).

U ovom radu dani su preliminarni rezultati istraživanja betona s drobljenim eruptivnim agregatom (gabro iz Jablanice), portland cementom (bez dodataka) TC Kakanj (PC 45), mikrosilikom (SF) iz tvornice silicija i ferosilicija RO „Elektrobosna“ (Jajce) i superplastifikatora 600 — Chromos, Zagreb.

Tablica 1. Moguće vrijednosti čvrstoće koja se postiže u betonima ili malterima, s uobičajenim agregatima.

Dodatak	Raspon čvrstoće
Nikakav	20—40 MPa
leteći pepeo + konvencionalni plastifikator	20—70 MPa
Superplastifikatori	30—100 MPa
amorfná mikrosilika + superplastifikator	20—200 MPa

U prvom dijelu rada prikazan je literaturni osvrt na maltere i betone sa mikrosilikom i superplastifikatorom, svojstva tih maltera i betona i dosadašnja njihova primjena u svijetu.

U drugom dijelu rada prikazani su rezultati dosadašnjih istraživanja s diskusijom. U zaključnim razmatranjima navedene su moguće primjene betona visokih marki s mikrosilikom i superplastifikatorom (BMS) — „beton sa mikrosilikom.“

## 2. LITERATURNI PREGLED O MALTERIMA I BETONIMA SA MIKROSILIKOM I SUPER-PLASTIFIKATORIMA

### 2.1. Superplastifikatori

U većini zemalja proizvode se, uglavnom, dvije vrste superplastifikatora:

a) sulfonirani naftalen — formaldehidni kondenzati, koji su prvi upotrijebljeni kao dodatak betonu šezdesetih godina. Prvo su proizvedeni u Japanu, („Mighty 150“), a kasnije u SAD-u („Lomar D“ i „Sika-ment“). Obično su korišteni kao 42%-tna vodena otopina gustoće 1200 kg/m<sup>3</sup>;

b) melaminsko-formaldehidni kondenzati, razvijeni u Zapadnoj Njemačkoj istovremeno kad i „Mighty 150“ u Japanu, pod nazivom „Melment L 10“. Obično su korišteni kao 20%-tna vodena otopina gustoće 1100 kg/m<sup>3</sup>.





Prva primjena superplastifikatora bila je za proizvodnju betona tekuće konzistencije, za betoniranje teško pristupačnih mjesta s vrlo gustom armaturom.

Ako se koristi pretjerano velika doza superplastifikatora, može doći do segregacije, koja može biti jače izražena nego kod normalnog betona. Konzistencija betona sa superplastifikatorom, pored ostalih faktora umnogome ovisi od sadržaja  $C_3A$  u cementu, jer je dokazano da  $C_3A$  jako adsorbira superplastifikator čime se nepovratno uklanja dio aditiva iz otopine, pa samo mali dio doze služi za deflokulaciju čestica.

Korištenjem plastifikatora može se smanjiti količina vode 5—10%, a korištenjem superplastifikatora to smanjenje može iznositi 15—30% pa i više, a da se zadrži normalna obradivost betona. Smanjenjem količine vode znatno se povećavaju čvrstoće (Tablica 2).

Brzina razvoja čvrstoće je veća nego kod normalnih betona, što znači da se superplastificirani betoni mogu korisno upotrijebiti za prefabricirane betonske elemente gdje se žele brzo mijenjati kalupi ili postići rano prednaprezanje elemenata. U mnogim slučajevima, visoka čvrstoća je relativan pojam: i 40 MPa se može smatrati visokom čvrstoćom. Isto tako, lakoća punjenja kalupa nekada može biti od velikog značaja. U Tablici 3 prikazana je uobičajena receptura za superplastificirani beton.

Tablica 3. Receptura za superplastificirani beton

Komponente	Uobičajena mješavina	Mješavina sa superplastifikatorom
Cement /kg m <sup>-3</sup> /	360	340
voda /kg m <sup>-3</sup> /	180	155
agregat /kg m <sup>-3</sup> /	1835	1915
superplastifikator /l m <sup>-3</sup> /	—	5
$\beta_p^{28}$ MPa/	40	45

Superplastifikatori se mogu koristiti i sa cementima s dodatcima tako da se vodocementni faktor može smanjiti do 0,30 (omjer voda/cement + leteći pepeo), a da 28-dnevne čvrstoće na pritisak idu i preko 70 MPa.

## 2.2. Mikrosilika

Pri proizvodnji silicija i fero-silicijskih legura javlja se kao nusprodukt vrlo fina prašina koja se u inozemnoj literaturi spominje pod raznim imenima: „Condensed silica fume” (CSF), „silica fume” (SF), „microsilica” itd, što bi se moglo prevesti kao  $SiO_2$  — prašina, ili, s obzirom na svojstva, amorfni silicij-dioksid. Taj se materijal stvara u procesu redukcije kvarca u metalni silicij pri temperaturi od 2000°C. U plinovima koji nastaju silicij reagira s kisikom dajući nestabilni  $SiO$  koji na temperaturi od 1100°C s kisikom iz zraka daje vrlo fini, dispergirani i amorfni  $SiO_2$ . Specifična površina ovog vrlo finog materijala (određena BET-metodom, apsorpcijom dušika) iznosi od 11 do 40 m<sup>2</sup>/g. Kako su zrna mikrosilika po veličini 1/50 do 1/100 zrna cementa, a imaju oblik kugle prosječnog promjera 0,1 μm (oko 20% zrna veličine 0,01-0,05 μm, 50% veličine 0,05-0,1 μm, 25% veličine 0,1-0,2 μm i 5% >0,2 μm), cijela je površina raspoloživa (Slika 2) za kemijsku reakciju i popunjava praznine između zrna cementa. Ova svojstva daju prednost  $SiO_2$  prašini pred letećim pepelom koji se u svijetu i u Jugoslaviji



često koristio kao umjetni pucolan. Specifična površina letećeg pepela iznosi svega 0,2 do 0,5 m<sup>2</sup>/g (Tablica 4).

Tablica 4. Karakteristična svojstva mikrosilike i letećeg pepela

Svojstva	Mikrosilika		leteći pepeo
	iz proizvodnje Si metala	iz proizvodnje Si-Fe legura	
Oblik	100% amorfne kuglice	100% amorfne kuglice	90-95% staklene kuglice
Sadržaj SiO <sub>2</sub> /mas %/	94-98	85-95	40-70
Spec.površina /m <sup>2</sup> /g/	15-30	15-30	0,3-0,8
sred. veličina cestica /μ m/	0,1-0,2	0,1-0,2	10-20
spec. masa /kg/m <sup>3</sup> /	2200	2200	2400
Boja	tamnosiva	tamnosiva	tamnosiva ili svijetlosmeđa
znatni doprinos pucolanske aktivnosti/dana/	2	2	60

Pri proizvodnji jedne tone ferosilicija nastaje 400-600 kg SiO<sub>2</sub> prašine tako da se u svijetu javlja godišnje oko 1.200.000 tona ovog otpadnog materijala, koji zbog svoje prirode predstavlja opasan ekološki problem (300.000 tona - SAD, 150.000 t - SSSR, 120.000 t - Norveška, itd.). Jugoslavenska industrija silicija i legura silicija davala je kao nusprodukt SiO<sub>2</sub> prašinu dobre kvalitete; sadrži 90 - 95% SiO<sub>2</sub> za koji je na temelju ispitivanja metodom rendgenske difrakcije utvrđeno da je amorfan.

Premda u literaturi ima prilično mnogo podataka o laboratorijskim istraživanjima vezanim za korištenje SiO<sub>2</sub> prašine kao dodatka betonu, malo je izvještaja o njezinoj primjeni u širokoj praksi.

Uz zadani v/c omjer već mala količina dodatka SiO<sub>2</sub> prašine (10% u odnosu na cement) poboljšava stabilnost i obradivost betona, smanjuje tendenciju odvajanja vode („krvavljenje” - „bleeding”) i segregaciju. Dodavanjem veće količine SiO<sub>2</sub> prašine malteru ili betonu, smanjuje se obradivost, ako se ne poveća v/c omjer ili ne upotrijebi superplastifikator.

Primjenom poznatih metoda za određivanje pucolanske aktivnosti dodataka cementu (Frattinij-ev test, termička analiza, topljivost SiO<sub>2</sub>) dokazano je da je SiO<sub>2</sub> prašina, kad se koristi kao dodatak cementu u količini od 10%, vrlo aktivan pucolan (5).

Tako se SiO<sub>2</sub> prašina upotrebljava u betonu preko 15 godina (Norveška), tek je u posljednjih pet godina postala zanimljiva ostalim zemljama i to zbog sve brojnijih istraživanja potaknutih brigom za zaštitu okoline; istraživanja su jasno ukazala na izvanredna svojstva ovog otpadnog materijala.

Budući da mikrosilika povećava potrebu za vodom, ako joj se doda više od 5% treba upotrijebiti plastifikator, dok je za dodatak od 15-20% (na masu cementa) poželjan superplastifikator.



Budući da se mikrosilika sastoji od vrlo finih čestica, teško se njome rukuje; vrlo su joj male nasute zapreminske mase (oko  $230 \text{ kg/m}^3$ ), slaba sposobnost tečenja, a osim toga jako praši.

Firma Elkem Chemicals koristi je u obliku vodenog mulja, što je njezin standardni proizvod u SAD.

Primjenom mulja moguće je miješati plastifikatore ili superplastifikatore s mikrosilikom u jedinstveni proizvod. Rezultati naših istraživanja pokazuju da se mikrosilika može uspješno koristiti za izradu betona i u praškastom obliku. U Tablici 5. prikazani su oblici amorfnе mikrosilike na inozemnom tržištu.

Tablica 5. Oblici amorfnе mikrosilike na tržištu

Proizvod	Zapreminska masa u nasutom stanju $\text{kg/m}^3$	Svojstva tečenja	Raspoloživost
nezgusnut	150-250	slabo	svugdje/vreće ili rinfuzno/
zgusnut	300-700	dobro	svugdje /vreće ili rinfuzno/
vodeni mulj	1350-1400	vrlo dobro	SAD, VB /posude ili rinfuzno/
modificirani mulj	1350-1400	vrlo dobro	SAD, VB
modificirana prašina	650-750	vrlo dobro	

### 2.2.1. Običan beton s mikrosilikom

Kada se mikrosilika koristi kao zamjena za portland cement, djelovanje joj je takvo da se tri dijela cementa mogu zamijeniti jednim dijelom mikrosilike, a da se dobiju iste čvrstoće. Uz određenu vrijednost čvrstoće, međutim, dodatkom mikrosilike dobija se nepropusniji beton koji je otporniji na kemijsku agresiju. Razlog veće nepropusnosti je u preraspodjeli veličine pora. Pore su znatno manje, ali je ukupna poroznost skoro ista. Zbog fine raspodjele čestica mikrosilike dobija se beton u plastičnom stanju otporniji na segregaciju i „bleeding“ („krvavljenje“). Svježi betoni s velikim sadržajem mikrosilike imaju bitno drugačije reološke karakteristike; prilično su „ljepljivi“, ali dobro teku kad ih se vibrira.

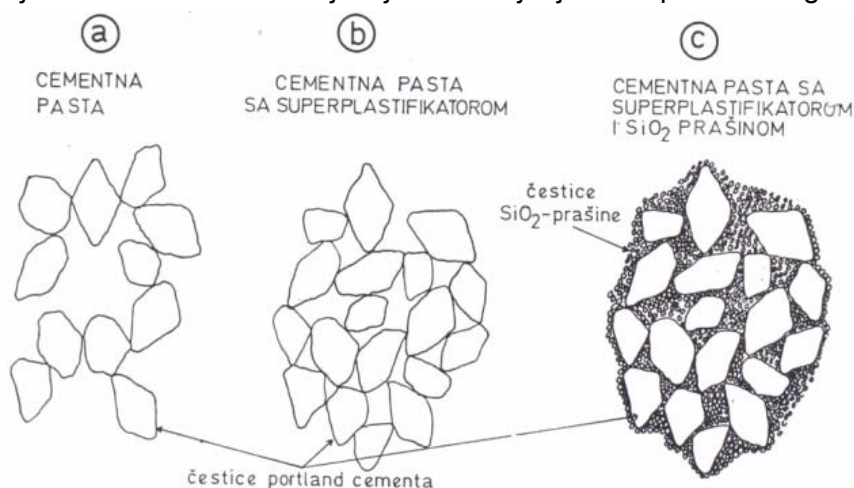
Pucolanska aktivnost mikrosilike je nedvojbeno dokazana. Naime, smanjenje količine  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (nastao hidratacijom alita u ranijem periodu i belita u kasnijem periodu) utvrđeno je već poslije dva dana, (dakle pucolanska reakcija počinje već poslije dva dana, a kod pucolanskih letećih pepela od uglja značajnija pucolanska reakcija počinje nakon 60 dana — Tablica 4), a u odležaloj pasti srazmjerno je količini dodane mikrosilike. Ima podataka koji govore da mikrosilika počinje reagirati od samog početka hidratacije, što je teško utvrditi, jer mikrosilika ubrzava hidrataciju alita. Ovo govori u prilog činjenici da dodavanje mikrosilike ne utječe na početne čvrstoće, jer ima podataka u literaturi da mikrosilika u prva dva dana ne doprinosi razvoju čvrstoća.



### 2.2.2. Beton visokih čvrstoća s mikrosilikom

Kada se mikrosilika upotrebljava da bi se postigle velike čvrstoće, najčešće se dodaje uz normalni sadržaj cementa, (do  $350 \text{ kg/m}^3$ ). I u ovom slučaju tri dijela cementa ekvivalentna su jednom dijelu mikrosilike.

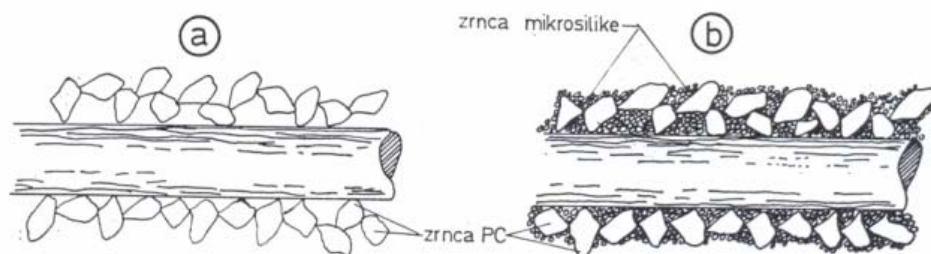
Čvrstoća, trajnost i nepropusnost betona zavise od prisutnih velikih pora u hidratiziranom cementu i od prisutnosti mikropukotina u graničnoj zoni između cementnog kamena i agregata; znači da je povećanje čvrstoća i trajnost betona kojima je dodana mikrosilika u uskoj vezi sa smanjenjem veličine pora u hidratiziranoj cementnoj pasti i sa smanjenjem mikropukotina u graničnoj zoni između paste i agregata. Istraživanja su pokazala da produkt hidratacije cementa s dodatkom mikrosilike ima manje pore od onog u hidratiziranom cementu kojem nije dodana mikrosilika, što utječe na povećanje čvrstoće i nepropusnost. Totalni porozitet i količina zatvorenih pora u cementnom malteru i betonu važni su faktori za njihove mehaničke karakteristike, ali ne utječu bitno na njihovu propusnost. Smatra se da relativno velike (veće od  $90 \text{ nm}$ ) pore u betonu bitno utječu na njegovu trajnost. U normalnom malteru i betonu na bazi čistog portland cementa ima granična zona između paste i agregata veći porozitet od cementne paste i sadrži veću količinu pločastih kristala kalcij hidroksida. Time se objašnjava nastajanje mikropukotina u graničnoj zoni između paste



Sl. 2. Struktura paste u svježem betonu sa: (a)—portland cementom, (b)—portland cementom + superplastifikatorom i (c)—portland cementom + superplastifikatorom +  $\text{SiO}_2$  prašinom (mikrosilikom)<sup>3</sup>

Slika 2. Struktura paste u svježem betonu

Sl. 3. Armatura u (a)—običnom cementnom malteru [prionjivost  $2 \text{ kN}$ ] i (b)—cementnom malteru sa mikrosilikom i superplastifikatorom [prionjivost  $9 \text{ kN}$ ]; Armatura  $\text{Ø} 6 \text{ mm}$ , dužine  $60 \text{ mm}$  u malteru.<sup>3</sup>



Slika 3. Armatura

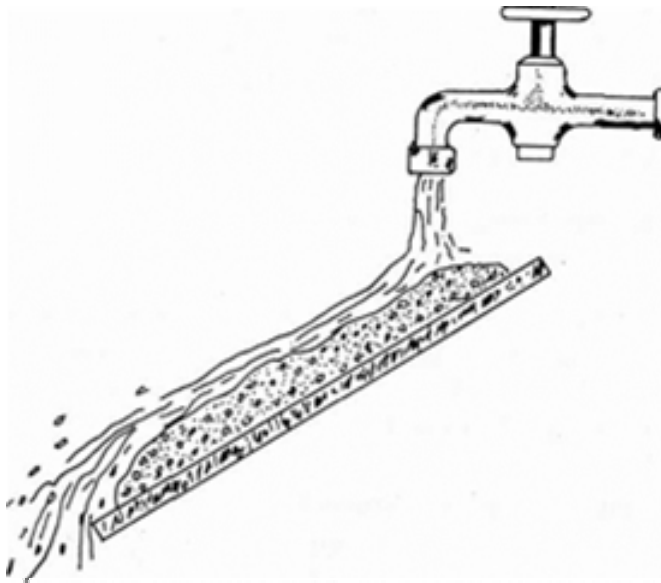




i agregata, koje su posljedica naprezanja nastalih zbog promjene temperature i vlage. Dodatkom mikrosilike smanjuje se u produktu hidratacije veličina pora i debljina graničnog sloja između paste i agregata, kao i količina  $\text{Ca(OH)}_2$  zbog pucolanske reakcije. Zbog manjeg broja velikih pora u produktu hidratacije, manje količine  $\text{Ca(OH)}_2$  i manjeg broja mikropukotina u graničnoj zoni, kao i boljeg prijanjanja gela uz agregat i armaturu (Slika 3), imat će malteri i betoni pripremljeni s dodatkom mikrosilike veće čvrstoće i bit će trajniji od maltera i betona na bazi čistog portland cementa. Zbog ovih će svojstava ti betoni biti otporniji na sulfatnu agresiju i na druga kemijska djelovanja, kao i na procese smrzavanja i odmrzavanja.

Razvoj čvrstoća u malteru i betonu s dodatkom mikrosilike zavisi od kinetike hidratacije, odnosno od procesa ispunjavanja pora produktima hidratacije. Budući da je amorfni  $\text{SiO}_2$  vrlo reaktivan pucolan, pucolanska se reakcija počinje odmah nakon što se počne stvarati  $\text{Ca(OH)}_2$ . Prema podacima iz literature, do pucolanske reakcije, a time i do poboljšanja svojstava maltera i betona, dolazi na  $20^\circ\text{C}$  u periodu od 2 do 14 dana. U slučaju betoniranja u velikim masama (npr. pri izradi brana) oslobođena toplina hidratacije se polagano odvodi i temperatura u masi betona poraste, pa pucolanska reakcija počinje i ranije.

Čvrstoće betona zavise i od količine cementa, omjera v/c i stupnja hidratacije cementa. Poznato je da betoni na bazi čistog portland cementa s visokim sadržajem cementa (oko  $500\text{kg/m}^3$ ) ne postižu čvrstoće mnogo veće od 50MPa (5), zbog velike količine  $\text{Ca(OH)}_2$ , velikih pora u gelu i mikropukotina u graničnoj zoni između paste i agregata. (U istraživanjima Instituta za materijale i konstrukcije (IMK) Sarajevo rađeni su betoni s agregatom od gabra, PC 45 u dozaži od  $400\text{kg/m}^3$  i uz dodatak 1,2% superplastifikatora: dobivena čvrstoća na pritisak iznosila je 50 MPa). Dodatkom mikrosilike smanjuje se količina CH i veličina pora i povećava čvrstoća granične zone između gela i agregata, a rezultat su gotovo udvostručene konačne čvrstoće. Upotrebom posebnog agregata, npr. granita, dijabaza ili korunda, određenog granulometrijskog sastava, uz dodatak superplastifikatora mogu se pripremiti betonske smjese v/c + mikrosilika omjera oko 0,2 pa i niže do 0,15!, pa se tada postižu čvrstoće i preko 200 MPa. Ovakvi izvanredno niski v/c mogući su zbog male veličine čestica mikrosilike koje omogućuju bolje slaganje čestica i koje popunjavaju praznine između zrna cementa, jer cement nema idealno klasificirane čestice (idealnu granulometriju) za maksimalnu gustoću (Slika 2). Teorijski bi se mogle upotrijebiti i vrlo male čestice krute tvari, no budući da su čestice mikrosilike reaktivne, one naknadno postaju dio mikrostrukture očvrslje paste i daju gustu matricu velike čvrstoće. Ovakvi sistemi u literaturi se zovu „Densified Systems containing homogenously arranged ultrafine Particles“ ili DSP („zgusnuti sistemi koji sadrže homogeno raspoređene vrlo fine čestice“). Superplastifikator je nužna komponenta kada se koristi mikrosilika, i to naročito u većim dozažama, najčešće od 2 do 4% aktivne komponente (na masu cementa i mikrosilike). Općenito, reologija betona i maltera sa superplastifikatorom i mikrosilikom je znatno drugačija od običnih betona i maltera. Ovi betoni i malteri su vrlo kohezivni i u svježem stanju (Slika 4).



**Sl. 4. Ilustracija kohezivnosti svježeg maltera od portland cementa + superplastifikatora i zrnocikla ACS maltera koji je ostajao pod mlaz vode (brzina oko 4 l/min); a protok od 30 l/min nije razlijeva ništa iz isprazne komponenti što je vrlo pogodno kod ispitivanja stijega u svim poravnanim i neravnim podzemnim vodama — epoha osvećenja referent**

Slika 4. Ilustracija kohezivnosti svježeg maltera od portland cementa

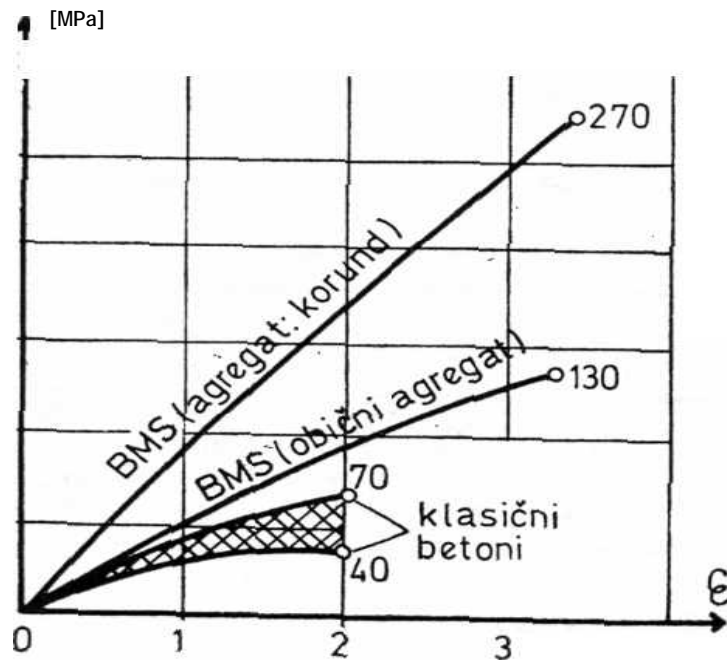
Ovi betoni, iako imaju velike čvrstoće, ujedno su i vrlo kruti bez armature. Čvrstoća na savijanje je u pravilu tek približno 1/10 do 1/20 čvrstoće na pritisak.  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagram za ove betone u usporedbi sa klasičnim betonima prikazan je na slici 5.

U Tablici 6. prikazana su mehanička svojstva nekih betona i maltera s različitim vrstama agregata. Rezultati su dobiveni na cilindričnim uzorcima 100/200 mm. Radi usporedbe: dinamički modul elastičnosti za betone HE Salakovac je 40 000 do 47 000 MPa.

Tablica 6. Mehanička svojstva betona i maltera s različitim agregatima (cilindri 100/200 mm)

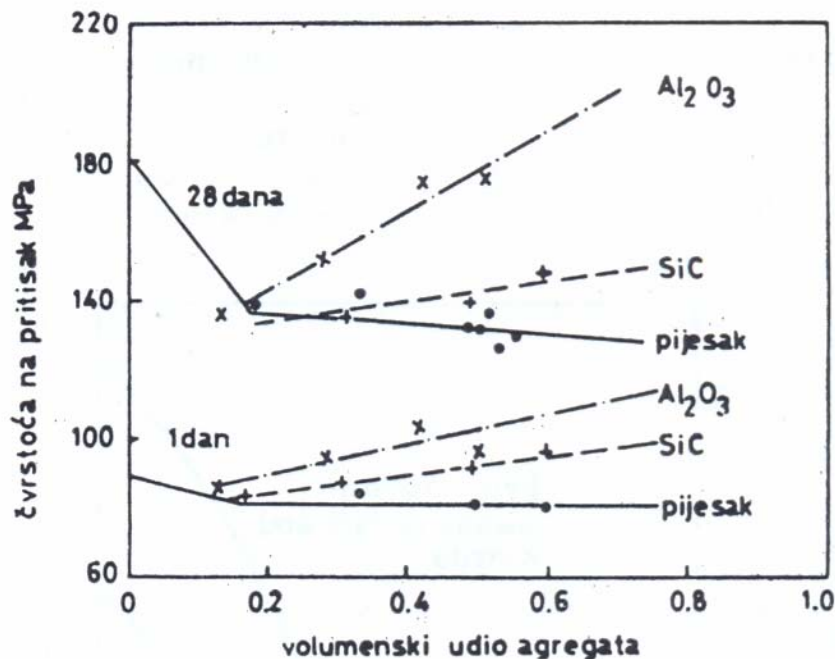
D maks/mm/ Agregat	Zapr. masa Kg/m <sup>3</sup>	Čvrst, prit. 28/3 <sub>p</sub> MPa	Brzina zvuka m/s	Dinam. modul elast. MP <sub>a</sub>	Naprez. zapr. mas. m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup>
16 /granit/**	2 500	* 124,6	5 200	68 000	49 840
16 /dijabaz/	2 566	168,1	4 890	65 000	63 050
10/kalc.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /	2 878	217,5	6150	109 000	75 573
4/kalc.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /	2 857	268,3	6153	108 000	93 910

\* nakon 1080 dana (3 godine) čvrstoća na pritisak je iznosila 150 MPa



Slika 5. Odnos naprezanja/deformacije pri pritisku u usporedbi s klasičnim betonima

Da bi se postigla elastičnost, mogu se koristiti vlakna. Budući da je cementni kamen kod BMS velike čvrstoće, čvrstoća BMS se određuje prema tipu i količini upotrijebljenog agregata. (Slika 6).



Slika 6. Utjecaj različitih agregata na čvrstoću BMS



Ostale osobine BMS s niskim v/c prikazane su u Tablici 7.

Na osobine BMS niskog v/c utječu ovi elementi:

- odsutnost krupnih kapilarnih pora,
- smanjenje sadržaja  $\text{Ca(OH)}_2$
- nepotpuna hidratacija.

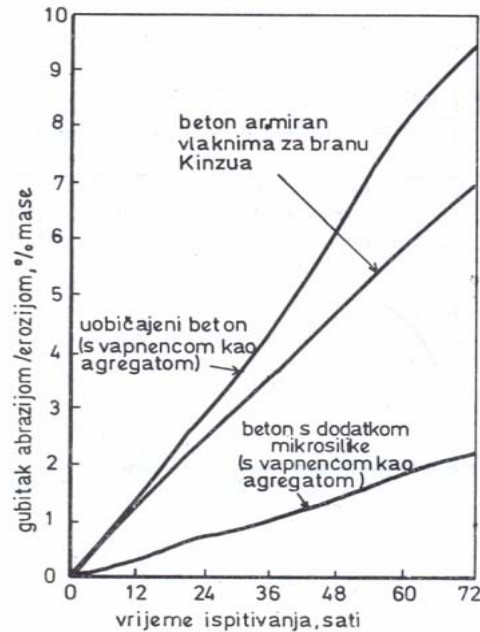
Porozitet nije eliminiran, no pore koje ostaju su vrlo fine i voda se kod normalnih okolnosti u njima neće smrznuti (ni na  $-20^\circ\text{C}$ ), pa se pretpostavlja da se BMS s vrlo niskim v/c neće oštetiti smrzavanjem i odmrzavanjem. Izvanredno male pore ukazuju na vrlo nisku propusnost koja je ispod granice većine laboratorijskih mjerenja, a to govori da će biti i visoka kemijska otpornost na agresiju, posebno na difuziju  $\text{Cl}^-$  iona.

Smanjenje CH još više doprinosi kemijskoj postojanosti ovih betona, a zbog nepotpune hidratacije (zbog ograničenog prostora) može doći do autogenog zacjeljivanja mikronaprslina. Prisustvo velikih nehidratiziranih zrna cementa ojačava matricu.

Vrlo dobra osobina BMS s niskim v/c je velika otpornost na abraziju i habanje. Ispitivanje abrazije na betonima, koji su korišteni za popravak slapišta brane Kinzua kod Pittsburga u SAD, ukazuje da je ovaj beton znatno otporniji na eroziju od uobičajenog betona i betona s vlaknima (Slika 7). Receptura betona za popravak slapišta brane Kinzua prikazana je u Tablici 8. O skupljanju i puzanju betona pripremljenih s dodatkom mikrosilike nema u literaturi mnogo podataka. Neki autori<sup>10</sup> izvještavaju da su betoni koji su sadržavali 5, 10, 15 i 20% mikrosilike u odnosu na masu cementa imali u periodu do 84 dana manje skupljanje od betona na bazi čistog cementa.

Tablica 7. Svojstva betona sa mikrosilikom

Svojstvo	Uobičajeni beton	BMS velike čvrstoće	BMS niskog v/c
v/c	0,45 – 0,65	0,30 – 0,45	<0,30
$\beta_p$ MPa nakon:			
1 dan	5 – 10	15 -50	70 -10
7 dana	15 -30	35 -70	90 – 150
28 dana	20 -40	45 -85	120 – 180
$\beta_z$ MPA nakon:			
28dana	5	10	10 -20
VDP m/s	$10^{-8} - 10^{-12}$	$10^{-12} - 10^{-15}$	$<10^{-15}$



Slika 7. Otpornost različitih betona na abraziju (eroziju)

Tablica 8. Karakteristike betona s mikrosilikom primljenog za popravak brane Kinzua

Sadržaj cementa	391 kg/m <sup>3</sup>
Sadržaj mikrosilike	18 % na masu cementa
v/c omjer	0,29
rasprostiranje (ASTM)	180 mm
betoniranje	pumpanjem
opseg betoniranja	1 570 m <sup>3</sup>
čvrstoća na pritisak MPa:	
7 dana	64
28 dana	97

Korozija čelične armature\* u betonu javlja se zbog smanjenog alkaliteta cementnog kamena do kojeg dolazi zbog karbonatizacije CH djelovanjem CO<sub>2</sub> iz atmosfere.

Pasta hidratiziranog cementa sadrži oko dvadeset posto kalcij-hidroksida (CH), pa je bazicitet sredine u kojoj se nalazi čelik dovoljan da se spriječi njegova korozija. Dodatkom mikrosilike betonskoj smjesi reducira se količina CH. Teoretski je dovoljno 25% mikrosilike

da se veže ukupni CH koji je nastao hidratacijom alita i belita iz portland cementa. Smanjeni alkalitet betona predstavljao bi opasnost za koroziju armature da se dodatkom mikrosilike nije smanjila količina i veličina velikih pora i mikropukotina; time se smanjila i propusnost betona pa je armatura bolje zaštićena od agresije CO<sub>2</sub> iz atmosfere.



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

#### 3.1. Komponentni materijali

##### 3.1.1. Cement

Ispitivanja su provedena sa čistim PC Tvornice cementa Kakanj, koji je namjenski proizveden za ova istraživanja. Rezultati kemijske analize cementa kao i fizičko-mehaničke osobine date su niže:

— Kemijska analiza cementa:

g.ž.	1,61%	SiO <sub>2</sub>	18%
n.o.	4,07%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,31%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,26%	CaO	61,24%
MgO	0,62%	SO <sub>3</sub>	2,25%
	Suma		99,34%
	Slob. CaO		0,58%

- Mineraloški sastav, izračunat po metodi Bogu-a:

C <sub>3</sub> S	50,23%
C <sub>2</sub> S	14,50%
C <sub>3</sub> A	9,52%
C <sub>4</sub> AF	12,95%
CSH <sub>2</sub>	4,9%

— Fizičko-mehaničke osobine cementa:

Uzorak br.	Blaine cm <sup>2</sup> /g	Sp. masa g/cm <sup>3</sup>	Sito 0.09 mm %	Stand.konz. %
1.	2 766	3,05	1,04	26,66
2.	2 816	3,05	1,90	27,00
3.	2 846	3,05	1,92	27,00
4.	2 894	3,04	2,06	27,33

uzorak	početak vezivanja		kraj vezivanja	
	/h/		/h/	
1	2,10		3,15	
2	2,00		3,20	
3	2,30		3,10	
4	2,00		3,00	



čvrstoće /MPa/:

uzorak	savijanje nakon			pritisak nakon		
	3	7	28	3	7	28
1	5,4	6,5	7,5	31,2	50,6	48,1
2	5,3	6,4	7,4	30,6	40,0	46,9
3	5,5	6,5	7,8	31,5	41,2	48,7
4	5,5	6,0	7,5	31,8	37,9	46,9

### 3.1.2. Mikrosilika

Za ova istraživanja korištena je mikrosilika iz Tvornice silicija i ferosilicija RO „Elektrobosna“ Jajce. Rendgenskom analizom je utvrđeno da je potpuno amorfna, a kemijskom analizom da sadrži 96,2% SiO<sub>2</sub>. Specifična površina određena BET-metodom (niskotemperaturna apsorpcija dušika) iznosi 19,6 m<sup>2</sup>/g<sup>12</sup>. Zapreminska masa u nasutom stanju je 260 kg/m<sup>3</sup>, a u zbijenom 350 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.1.3. Superplastifikator

Za ova istraživanja korišten je superplastifikator „superfluidal 600“ (proizvođač „Chromos“ Zagreb). Po sastavu je naftalen-formaldehidna smola, molekulske mase oko 600, otopljena u vodi (oko 45% suhe tvari; pri računanju v/c uzimana je u obzir i voda iz superplastifikatora). Pri izradi betona u okviru ovih istraživanja na kraju miješanja dodavan je superplastifikator sa 1/3 preostale potrebne vode. Količina superplastifikatora (maseno) dodavana je u odnosu na količinu cementa i mikrosilike.

### 3.1.4. Agregat (jablanički gabro)

Jablanit, vrsta intruzivne magmatske stijene gabra, zbog svojih osobitosti dobila je ovaj stručni naziv po mjestu Jablanici u čijoj se neposrednoj blizini nalazi intruzija koja obuhvaća površinu od 11 km<sup>2</sup>.

Eksploatacija masiva gabra otpočela je odmah poslije Prvog svjetskog rata, dok je suvremenija tehnologija eksploatacije uvedena 1947. godine.

Stijena ima karakterističnu „gabro“ strukturu kod koje mineralna zrna zalaze jedna u druge, što ovoj stijeni daje izuzetnu čvrstoću i žilavost.

Homogena tekstura je uglavnom karakteristična za tamne vrste, a paralelna za vrste u kojima se makroskopski zapaža stratifikacija ili folijacija.

Glavni minerali su plagioklasi koji u mineralnom sastavu sudjeluju s preko 50%, a zatim pirokseni, amfiboli i biotit.

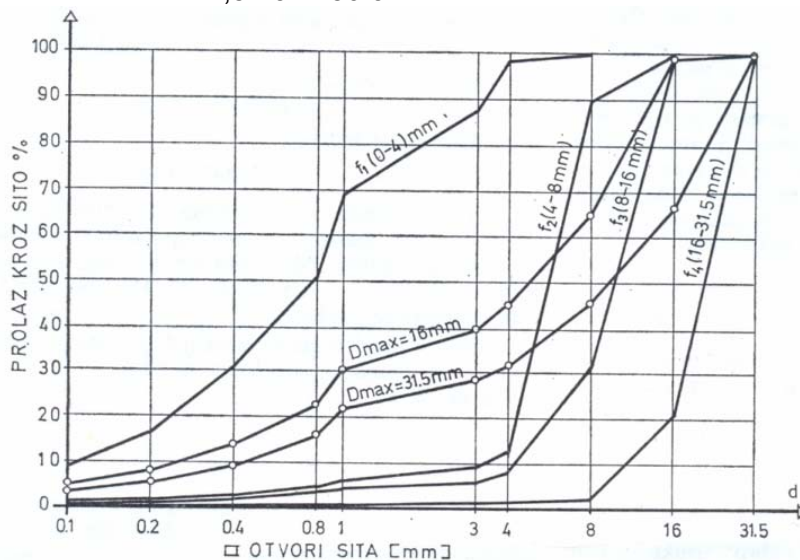
Sporedni minerali su klorit, hornblenda, epidot, magnetit, apatit, a registriran je i pirit. U pukotinama se mogu naći kvarc, kalcit, zeolit.

Način pojavljivanja, mineralni sastav, struktura i tekstura gabra uvjetovali su izuzetno povoljne fizičko-mehaničke karakteristike koje se naročito očituju u visokim vrijednostima čvrstoće na pritisak, otporu na habanje, stupnju žilavosti i dr.

Način eksploatacije i stupanj iskoristivosti pojedinih ležišta zavisni su naročito od grubificiranosti, stratifikacije, folijacije, pukotina lučenja i tektonskih pukotina. Ove pojave su u tijesnoj vezi s genezom jablaničkog gabra, te određenim singenetskim i postgenetskim promjenama u tektonskoj evoluciji prostora. Studija ovih pojava može unijeti više svjetlosti u mnoge hipoteze o uzrocima facijelne raznovrsnosti i anizotropnosti gabra masiva. Ispitivanje gabra iz okoline Jablanice pokazuju sljedeće vrijednosti osnovnih fizičko-mehaničkih karakteristika stijene:



- zapreminska masa sa porama i šupljinama:  
2970 kg/m<sup>3</sup>
- zapreminska masa bez pora i šupljina:  
3021 kg/m<sup>3</sup>
- koeficijent zapreminske mase:  
0,983
- koeficijent poroznosti:  
1,70%
- čvrstoća na pritisak u suhom stanju: 215,3 MPa  
u vodom zasićenom stanju: 183,1 MPa  
poslije ispitivanja otpornosti na mraz:  
172,2 MPa
- upijanje vode:  
0,27
- koeficijent habanja:  
7,51 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup>.



Sl. 8. Dijagram granulometrijskog sastava frakcija i dviju mješavina agregata sa  $D_{max} = 16$  mm i  $D_{max} = 31,5$  mm.

Slika 8. Dijagram granulometrijskog sastava frakcija i dviju mješavina agregata sa  $D_{max} = 16$  mm i  $D_{max} = 31,5$  mm

Za potrebe realizacije Programa oko 20 m<sup>3</sup> gabra zdrobljeno je i separirano na postrojenju RO „Ukras--kamen“ u Posušju. Zdrobljeni agregat separiran je u četiri frakcije: 0,4, 4/8, 8/16 i 16/31,5 mm. Oblik zrna agregata je kockast.

Tabelarni pregled granulometrijskog sastava agregata sa krivuljama prosijavanja za  $D_{max} = 16$  i  $D_{max} = 31,5$  dat je uz Sliku 8.

### 3.2. Malter

Ispitivanje nekih fizičko-mehaničkih svojstava izvršeno je na serijama maltera sa sljedećim komponentama:

- čisti PC, proizvod Tvornice cementa Kakanj,
- standardni trofrakcijski pijesak,
- superplastifikator: superfluidal 600/2% na masu cement + mikrosilika,
- mikrosilika: 0, 5, 10, 15, 20, 25 i 30% na masu cementa,
- voda; različite dozaže vode za približno istu konzistenciju maltera.



Rezultati ispitivanja pokazuju da je vezanje najbrže (Slika 9) kad je vodocementni faktor najniži (Slika 10) kod dozaže 20% mikrosilike, što je u skladu sa računatom optimalnom količinom mikrosilike (Slika 11).

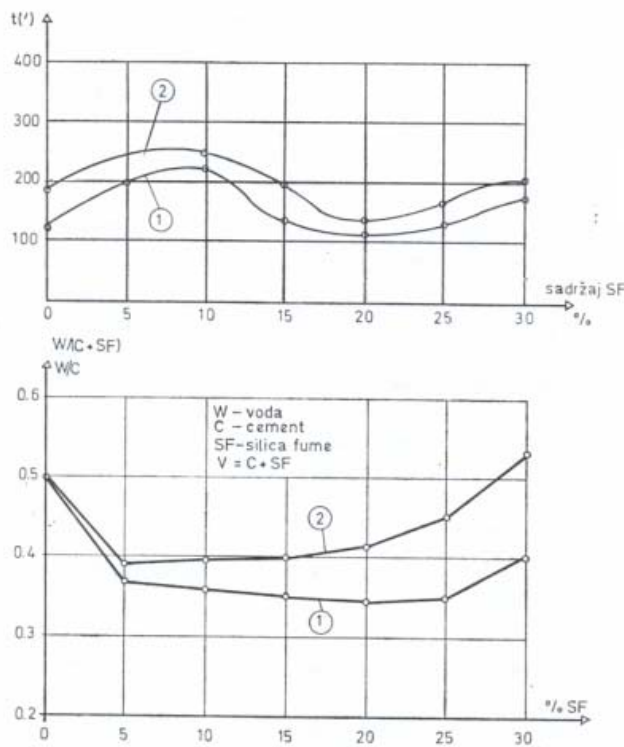
Čvrstoće na pritisak maltera ispitane su i pri različitim dozažama superplastifikatora (superfluidal 600) od 1 do 4% (Slika 12). Optimalne vrijednosti postignute su kod dozaže od 2% .

### 3.3. Beton sa mikrosilikom i superplastifikatorom BMS

Tablica 9. Numerički granulometrijski sastav frakcija i dviju mješavina agregata, sa  $D_{max} = 16$  mm i  $D_{max}=31,5$  mm

FRAKCIJA (mm)	% PROLAZA KROZ SITO OTVORA (mm):											
	0,02	0,09	0,1	0,2	0,4	0,8	1	3	4	8	16	31,5
0— 4 mm	3,34	6,62	9,3	17,0	30,2	50,8	68,7	87,6	97,8	100		
4— 8 mm	0,46	0,89	1,3	1,7	2,6	4,8	6,7	9,1	12,9	89,8	99,3	100
8—16 mm	0,27	0,48	0,9	1,2	2,0	3,5	4,9	6,5	8,1	31,2	99,0	100
16—31,5 mm	0,23	0,37	0,5	0,5	0,7	0,8	1,1	1,2	1,3	1,7	20,7	99,3
Dmax=16 mm	—	—	4,3	7,6	13,3	22,6	30,6	39,2	44,5	64,6	99,4	100
Dmax=31,5 mm	—	—	3,3	5,6	9,7	16,2	22,0	28,1	31,8	45,2	66,4	99,7

Laboratorijski BMS (spravljeni sa  $350 \text{ kg/m}^3$  čistog PC +  $150 \text{ kg/m}^3$  mikrosilike + 2% superfluidal a 600 + jablanički gabro + voda) spravljeni s različitim v/c faktorima, imali su i različite konzistencije (Slika 13). Rezultati ispitivanja pokazuju da v/c faktor značajnije utiče na početni prirast čvrstoće betona, a u manjoj mjeri na čvrstoće u kasnijem periodu.

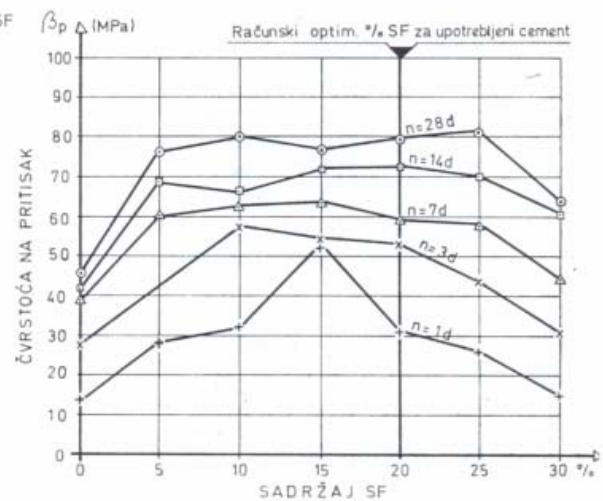


Slika 10. Dijagram ovisnosti vodocementnog faktora (1) i „vo-

Slika 10. Dijagram ovisnosti vodocementnog faktora

Sl. 9. Dijagram vremena početka (1) i kraja (2) vezanja u zavisnosti od dozaže mikrosilike za maltere sa približno istom konzistencijom.

Slika 9. Dijagram vremena i kraja vezanja

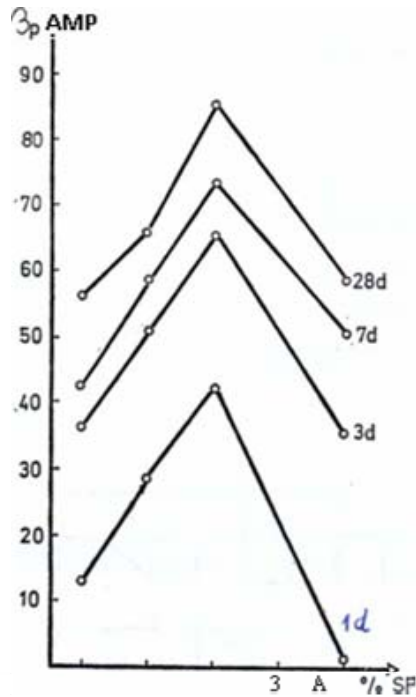


Slika 11. Dijagram ovisnosti čvrstoće na pritisak

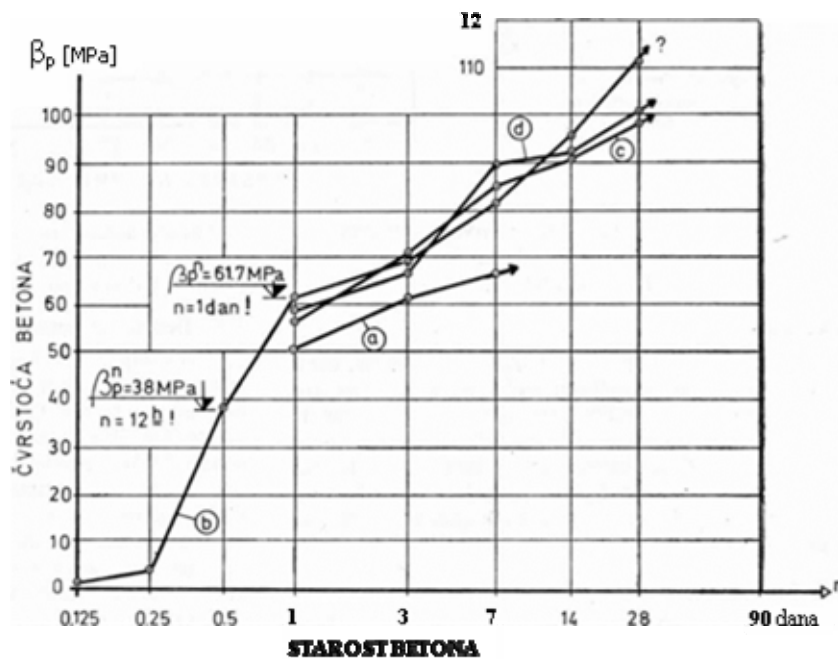


Svi laboratorijski BMS ispitivani su pri starosti od jedan i više dana, a beton iz serije b (Slika 14) i poslije 3, 6 i 12 sati. Rane čvrstoće betona iz ove serije iznosile su:

- poslije 3 sata 0,65 MPa
- poslije 6 sati 3,00 MPa
- poslije 12 sati 38,10 MPa
- poslije 1 dan 61,70 MPa



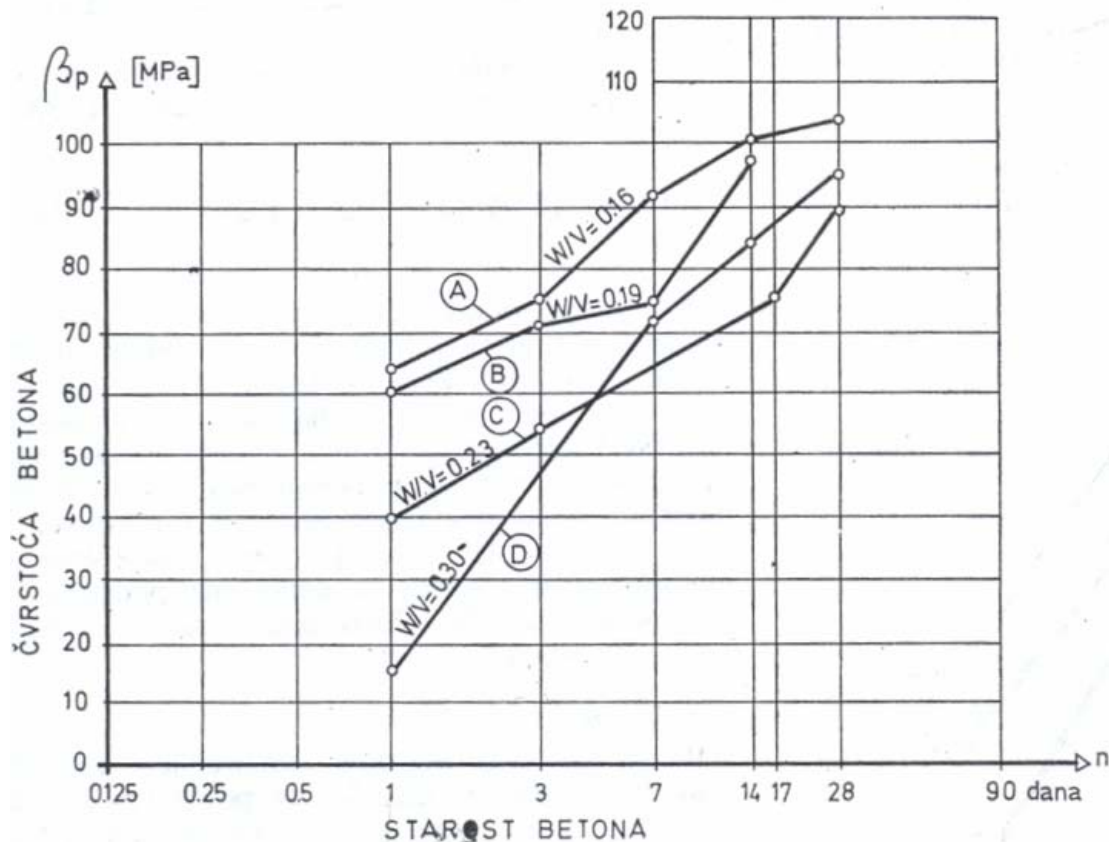
Slika 12. Utjecaj dozaže superplastifikatora na čvrstoće maltera na pritisak



Slika 13. Dijagram prirasta čvrstoće betona ( $350 \text{ kg/m}^3 \text{ PC} + 150 \text{ kg/m}^3 \text{ mikrosilike} + 2\% \text{ superfluidala } 600 + \text{gabro} + \text{voda}$ ) za beton zemljovlažne (A) / (B) plastične (C) i vrlo tečne konzistencije (D).  $D_{\text{max}}$  agregata 16 mm za (A) i (B), a 31,5 mm za (C) i (D).



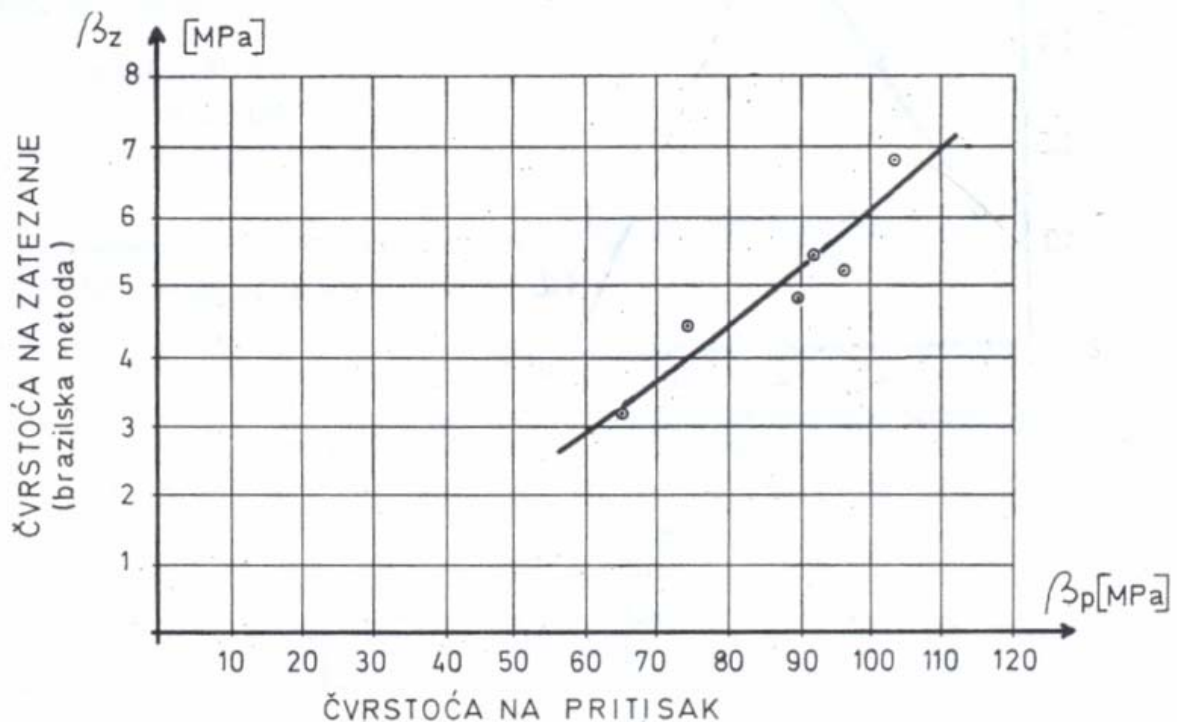
Ovaj beton imao je čvrstoću na pritisak 112,0 MPa poslije 28 dana. Na Slici 15 prikazan je dijagram čvrstoća na pritisak i na zatezanje (brazilska metoda) na BMS.



Slika 14. Dijagram prirasta čvrstoće betona sa ili bez dodatka mikrosilike, sa 2% superfluidala 600, sa dozažama veziva po m<sup>3</sup> betona: 500 kg PC (a), 400 kg PC+100 kg SF (b), 400 kg PC+80 kg SF (c) i sa 350 kg PC+150 kg SF (d).

#### 4. INTERPRETACIJA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Realizacija Istraživačkog projekta „Tehnologija dobivanja i istraživanje betona visokih marki od MB 100 do MB 250“, koja obuhvata BMS - „beton sa mikrosilikom“ nije završena, što se može zaključiti i po dijagramima u kojima nedostaju neki rezultati ispitivanja pri većoj starosti betona (za vrijeme pisanja ovog rada neki uzorci betona nisu bili dovoljno „stari“ za sva planirana ispitivanja), zbog čega se interpretacijom obuhvaćaju samo ona područja za koja postoji dovoljan fond prezentiranih i drugih rezultata ispitivanja.



Slika 15. Dijagram čvrstoće na pritisak i na zatezanje brazilskom metodom na BMS.

#### 4.1. Cement

Prema našim standardima, upotrijebljeni čisti PC odgovara kvalitetnoj klasi 45, sa povišenim sadržajem feritne faze i nešto nižim sadržajem alita, što je nepovoljno za dobivanje betona velikih čvrstoća sa mikrosilikom i niskim v/c faktorom.

#### 4.2. Mikrosilika

Mikrosilika iz Jajca uobičajenog je kemijskog i mineraloškog sastava, kao i specifične površine, u usporedbi s inozemnim industrijskim otpadcima ove vrste.

#### 4.3. Superplastifikator

„Superfluidal 600“, proizvod „Chromos“, Zagreb pokazao je da izvanredno snižava v/c faktor i u kombinaciji sa mikrosilikom daje sveži beton drugačije reologije od standardnog, veliku ljepljivost, a dobro vibriranje. Korištenjem ovog superplastifikatora dobiven je vrlo niski v/c faktor, kakav se i u literaturi spominje (v/c = 0,15!).

#### 4.4. Gabro

Vrlo kvalitetna i specifična eruptivna stijena, čvrsta za drobljenje, s povoljnim oblikom zrna, ima značajne raspoložive zalihe (godišnje cca 80 000 m<sup>3</sup> otpadnog lomljenog gabra, nusprodukta pri proizvodnji blokova). Granulometrijski sastav je uglavnom kontinuiran u područjima primijenjenih frakcija, bez značajnijeg deficita i suficita pojedinih zrna agregata.





#### 4.5. Malteri

Malteri su ispitivani samo u cilju optimizacije sadržaja mikrosilike i superfluidala 600. Istraživačkim projektom predviđena su posebna istraživanja maltera s mikrosilikom, čiji je cilj primjena maltera na sanacionim i drugim radovima.

#### 4.6. Betoni sa mikrosilikom sa niskim v/c (BMS)

Varijacije v/c faktora, od 0,16 do 0,30 (od zemljo-vlažne do vrlo tekuće konzistencije) značajno utiču na rane čvrstoće ( $\beta_p^1=63,7—15,5$  MPa). Utjecaj na čvrstoće poslije 28 dana je znatno manji ( $\beta_p^{28}=104,1—89,6$  MPa); predviđa se još manji utjecaj varijacije v/c faktora na „starijim“ betonima. Ova osobina BMS može se koristiti kod betoniranja elemenata sa vrlo gustom armaturom (beton sa mikrosilikom koji ima vrlo tekuću konzistenciju, postiže dvostruko veću MB od klasičnih betona!). BMS sa niskim v/c faktorom omogućava rano skidanje skele i oplata (čvrstoća na pritisak poslije 12 sati — 38 MPa, poslije 24 sata — 60 MPa!), što omogućava širok spektar njegove primjene.

Odnos čvrstoće na pritisak i čvrstoće na zatezanje je u uobičajenim granicama. Taj odnos se može smanjiti korištenjem vlakana, koja se inače koriste za „fibro“ betone (beton armiran vlaknima).

Izvršeni opiti rezanja (dijamantskim reznim alatom) i poliranja pri starosti betona od samo 24 sata, pokazuju njegovu primjenljivost kao vještačkog kamena: ima finu strukturu, teksturu i boju i samo dobri poznavaoči mogu ga razlikovati od prirodnog gabra.

Kvalitativni skok u dobivanju betona vrlo visokih čvrstoća je u razjašnjenju mikrostrukture očvrstlog cementnog kamena sa mikrosilikom i niskim v/c faktorom, što je jedino moguće pratiti sa scanning elektronskim mikroskopom.

### 5. MOGUĆNOST PRIMJENE BETONA SA MIKROSILIKOM (BMS)

Dosadašnja istraživanja betona s mikrosilikom i sa superplastifikatorima i rezultati naših istraživanja, otvaraju široki spektar mogućnosti njegove primjene i istovremeno rješavaju dio ekoloških i ekonomsko-tehničkih problema deponiranja nekih industrijskih otpadnih materijala. Povoljna svojstva komponentnih materijala, primijenjenih u našim istraživanjima, omogućavaju proizvodnju betona sa novim, znatno boljim svojstvima. Očekivati je da će ovaj beton značajno utjecati na smanjenje rokova građenja, na modernizaciju industrijskog načina građenja i na niz drugih primjena u građevinarstvu, pa i u nekim drugim oblastima tehnike.

Značajnija primjena betona sa mikrosilikom, u građevinarstvu, očekuje se za sljedeće namjene:

#### 5.1. Hidrotehničke konstrukcije

Visoke čvrstoće na pritisak i zatezanje, izvanredna gustoća, mala vodopropusnost, velika otpornost na kavitaciju, abraziju i eroziju, stvaraju realnu pretpostavku primjene ovih betona na prelivima, slapištima, evakuacijskim organima, sifonima, tunelima, betonskim spiralama, zalivnim betonima i sl.

U sadašnjoj praksi na evakuacijskim organima uz brane koriste se „specijalni betoni“ otporni na kavitaciju, abraziju i habanje, zbog čega se često upotrebljavaju i polimer betoni. Ovim zahtjevima betoni s mikrosilikom mnogo bolje udovoljavaju od standardnih betona, zbog čega je u svijetu posljednjih godina počela njihova primjena za ovakve namjene (Branja Kinzua, Pittsburg).



Tunelske obloge su u posljednje vrijeme predmet šireg razmatranja, počevši od statičkog tretmana do analize jesu li su uopće potrebne, kojih dimenzija i kakvog obima odnosno načina izvođenja. Polazeći od nekoliko osnovnih karakteristika BMS — brzo očvršćivanje, visoka čvrstoća na pritisak i zatezanje, vodonepropusnost, dobra zaštita armature od korozije, laka ugradljivost — cijeni se mogućnost izrade tunelskih obloga znatno manje debljine u odnosu na standardni beton, koja bi u svakom slučaju zavisila od tehničko-tehnoloških mogućnosti izvođenja. Beton bi se praktično mogao nalijevati pri vodocementnom faktoru 0,30 i ostvariti visoke čvrstoće, dobru vodonepropusnost i „ljepljivost“.

Poseban značaj primjene betona sa mikrosilikom zbog njegove reologije izražen je kod špricanog betona s dodatkom 5 do 10% mikrosilike. Prianjanje za podlogu je dobro, ne dolazi do odvajanja špricanog materijala. Da bi se poboljšala elastičnost betona dodaju se različita vlakna, čime se i veza sa podlogom poboljšava. Ovakav špricani beton ima posebnu primjenu kod izrade podgrade u suvremenim metodama građenja tunela, kao i u drugim slučajevima zaštite stjenovitih pokosa nakon otkopavanja. Pored spomenutog, špricani beton s mikrosilikom imao bi značajnu primjenu kod izrade obloga hidrotehničkih tunela.

## 5.2. Industrijski način građenja

Kao materijal visoke nosivosti, brzog očvršćivanja i visoke otpornosti na razaranje usljed mraza ili agresivnih utjecaja, BMS može naći široku primjenu u izgradnji objekata visokogradnje. Na ovakvim objektima BMS nudi povoljna tehnička rješenja u svim elementima izloženim visokim naprezanjima, koja za rezultat daju vitkiju i lakšu konstrukciju.

Velika početna čvrstoća i jednostavno ugrađivanje omogućavaju racionalnu primjenu ovog materijala u različitim sistemima montažnog građenja i u izradi raznih prefabriciranih elemenata. Mogućnost ranijeg demontiranja skele i oplata značajna je kako u klasičnom, tako i u industrijskom načinu građenja. Njegova dobra svojstva omogućavaju primjenu i za izradu različitih elemenata u visokogradnji, kao što su stepenice, „izgubljena“ oplata nadvratnika, nadprozornika, stupova, zatim za betonski crijep, elemente ograda, ploče za podove i zidove, te ukrasni kamen za različite namjene.

Za nosive čelične konstrukcije beton visokih marki može naći primjenu u izradi oslonca čeličnih konstrukcija, kao i maltera za podlijevanje i zalijevanje ankera.

## 5.3. Prometnice

Fizičko-mehaničke osobine i otpornost na agresivne utjecaje omogućavaju primjenu BMS za izradu betonskog kolovoza na putovima i aerodromima, zaštitnih ograda na putovima (New Jersey), betonskih pragova na željeznicama i dr.

Zahvaljujući brzom očvršćivanju, primjena BMS naročito je značajna u postupcima sanacije oštećenih kolovoznih objekata na prometnicama.

U sklopu prometnica značajna je primjena ovog materijala i u postupku izrade mostova, propusta, osiguranja trupa i dr., naročito imajući u vidu da se svi ovakvi objekti danas masovno rade iz prefabriciranih elemenata, kod kojih je upravo naglašena prednost primjene BMS-a. Ovdje je važno napomenuti i primjenu u konstrukcijama od prednapregnutog betona, u kojima BMS omogućava ranije prednaprezanje, kvalitetno injektiranje kablova (zbog bolje prionjivosti), te skraćuje tehnološko vrijeme od injektiranja kablova do punog opterećivanja prednapregnutih elemenata.

Za pomoć i vrlo uspješnu suradnju u realizaciji Istraživačkog projekta „Tehnologija dobivanja i istraživanje betona visokih marki“, čiji su dosadašnji rezultati prikazani u ovom radu, zahvaljujemo RO GIK „Hidrogradnja“, Sarajevo, RO „Industrija granita“, Jablanica i RO „Ukras-kamen“ Posušje.





## LITERATURA

1. Young, F.J. Upotreba superplastifikatora i amorfne SiO<sub>2</sub> prašine (mikrosilike) u malterima i betonima velike čvrstoće.
2. Cement, (Zagreb 1984/85) Br. 2, 51—60. [2] Malhorta, V.M., Superplasticizers: Their effect on Fresh and hardened Concrete, *Concrete International*, 3 (5) (1981) 66—81.
3. Bashe, H.H., Densified Cement/ultra fine particle-based Materials, The Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, June 10—12 Ottawa, Ontario, Canada 1981.
4. Popović, K., Ukrainčik, V., Đureković, A., SiO<sub>2</sub> prašina iz proizvodnje ferolegura kao pucolanski dodatak cementu, *Kem. ind.*, 34 (9) (1985) 575—581.
5. Matković, B., Gaćeša, T., Rus, A., Čvrstoća i svojstva cementa sa dodatkom amornog SiO<sub>2</sub> i superplastifikatora, XI stručni sastanak proizvođača cementa i azbest cementa, Našice (1984)
6. Sellevold, E.J., Bager, D.H., Klitgaard, E., Kundsén, T., Silica fume — Cement Pastes: Hydratation and Pore Structure, 19—50 u: *Condensed Silica Fume in Concrete*, urednik Gjdry, Odd E., Loland, Kjell, E., Proc. Nordic Research Seminar on Condensed Silica Fume in Concrete, Trondheim 1981 Report BML 82—610, Trondheim, Norway 1982.
7. Malhorta, V.M., Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, Vol. I i II., V.M. Malhorta, Publication SP-79, American Concrete Institute, Detroit (1983) (a) Feldman, R.F.: Significance of Viscosity Measurements on Blended Cement Performance, Vol. I, 415—434 (b) Metha, P.K.: Pozzolan and Cementitious Byproducts and Mineral Admixtures for Concrete — A critical Review, Vol. I, 1—46
8. Knežević, N. i Stanivuković B., Elaborat, Izrada betona sa agregatom od gabra za potrebe ŽTO Sarajevo (1982).
9. Hjorth, L., *Phil. Trans. R. (London)*, A310 (1983) 167; Reprint 10 (Aalborg Portland, Danska).
10. Garette, G.G., Malhorta, V.M.: Silica Fume in Concrete — Preliminary Investigation, CAM MET Report 82—IE, (1982) 1—15.
11. Ivanković, T., Privatno saopćenje
12. Škundrić, B., Tehnološki fakultet Banja Luka, Privatno priopćenje.