



Mario Vujica

SAMOZBIJAJUĆI EKOLOŠKI ODRŽIVI BETONI

Zagreb, 2011.

Ovaj rad izrađen je u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof.dr.sc. Marijana Skazlića, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2010./11.

Sadržaj

1. UVOD	8
2. BETON	10
2.1 Općenito o betonu	10
2.2 Cement.....	11
2.3 Voda	12
2.4 Agregat.....	12
2.5 Kemijski dodaci.....	13
2.6 Mineralni dodaci betonu.....	13
3. SAMOZBIJAJUĆI BETON	15
3.1 Razvoj samozbijajućeg betona	15
3.2 Poboljšanje radne okoline upotrebom SCC-a.....	16
3.2.1 Radni uvjeti i okolina građenja	17
3.2.2 Horizontalna ugradnja betona	19
3.3 Održivost	20
3.3.1 Smanjenje CO ₂	20
3.4 Primjeri primjene samozbijajućeg betona	22
3.5 Očekivana praktična primjena dobivenih rezultata	24
4. EKSPERIMENTALNI RAD	25
4.1 Cilj i program istraživanja	25
4.2 Metode istraživanja	25
4.3 Sastavi betonskih mješavina.....	26
4.4 Tehnologija spravljanja i njega uzoraka	27
4.5 Sastavne komponente	28
4.5.1 Cement.....	28
4.5.2 Leteći pepeo	28
4.5.3 Metakaolin	31
4.5.4 Filer	32
4.5.5 Agregat.....	32
4.5.6 Superplastifikator	34
4.5.7 Stabilizator smjese (viscosity modifying agent - VMA).....	35
4.5.8 Polipropilenska vlakna	36

4.6 Metode ispitivanja	38
4.6.1 Metode ispitivanja sastavnih komponenti	38
4.6.1.1 Prosijavanje agregata	38
4.6.1.2 Ispitivanja gustoće agregata i apsorpcije vode	41
4.6.2 Metode ispitivanja betona u svježem stanju	44
4.6.2.1 Ispitivanje gustoće svježeg betona	44
4.6.2.2 Ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu	46
4.6.2.3 Metoda rasprostiranja	47
4.6.2.4 L-kutija	50
4.6.2.5 V-lijevak	52
4.6.3 Ispitivanje betona u očvrslom stanju	54
4.6.3.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona	54
4.6.3.2 Ispitivanje savojne čvrstoće betona	55
4.6.3.3 Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa	56
4.6.3.4 Ispitivanje kapilarnog upijanja	57
4.6.3.5 Ispitivanje difuzije klorida prema NT BUILD 492	59
5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	63
5.1 Primjenjivost preporučenih metoda za projektiranje sastava na samozbijajući beton s različitim mineralnim dodacima	63
5.2 Utjecaj mineralnih dodataka i polipropilenskih vlakana na obradivost samozbijajućeg betona	64
5.3 Tlačna čvrstoća	69
5.4 Savojna čvrstoća betona	72
5.5 Brzina ultrazvučnog impulsa	73
5.5.1 Dinamički modul elastičnosti (prema HRN U.M1.026)	75
5.5 Kapilarno upijanje	77
5.6 Difuzija klorida	79
6. ZAKLJUČAK	82
7. ZAHVALE	84
8. LITERATURA	85
9. SAŽETAK	87
10. SUMMARY	88

POPIS SLIKA

Slika 1. Orijentacijski volumni udjeli osnovnih sastojaka u betonu [2].....	10
Slika 2. Proces proizvodnje cementa suhim postupkom [2].....	11
Slika 3. Drobljeni agregat.....	12
Slika 4. Distribucija radnog vremena građevinskog radnika, ispitana u Danskoj [5]..	17
Slika 5. Usporedba istrošenosti građevinskih radnika i opće populacije [5]	19
Slika 6. Proizvodnja cementa u svijetu 1995.-2010. godine[10].....	21
Slika 7. Proizvodnja cementa po vodećim zemljama svijeta 1995. godine[10].....	21
Slika 8. Proizvodnja cementa po vodećim zemljama svijeta 2010.godine[10].....	21
Slika 9. Emisija CO ₂ po kontinentima 2010.godine [10].....	22
Slika 10. Most Akashi Kaikyo.....	23
Slika 11. Utjecaj ljudskog faktora prilikom ugradnje običnog betona	24
Slika 12 Miješalica za spravljanje betona.....	28
Slika 13. Sferičan oblik čestica letećeg pepela (slika lijevo) omogućuje lakšu ugradnju i završnu obradu betona od čestica portland cementa (slika desno).....	29
Slika 14. Utjecaj letećeg pepela na kapilarno upijanje [9].....	30
Slika 15. Utjecaj letećeg pepela na čvrstoću betona [9]	30
Slika 16. Kaolin.....	31
Slika 17. Krivulje prosijavanja agregata	34
Slika 18. Usporedno betoniranje običnog i betona s dodatkom VMA	36
Slika 19. Polipropilenska fibrilirana vlakna	37
Slika 20. Uređaj za prosijavanje agregata.....	40
Slika 21. Uređaji za ispitivanje gustoće i vlažnosti agregata.....	44
Slika 22. Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu	47
Slika 23. Uređaj za ispitivanje konzistencije betona	48
Slika 24. Dimenzije uređaja za ispitivanje konzistencije betona	48
Slika 25. Tijek ispitivanja rasprostiranja (slump flow)	49
Slika 26. Dimenzije L-kutije.....	51
Slika 27. L-kutija	51
Slika 28. Izgled i unutarnje dimenzije V-lijevka.....	53
Slika 29. Uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava betona.....	56
Slika 30. Ultrazvučni uređaj TICO Proceq Testing Instruments	57
Slika 31. Ispitivanje kapilarnog upijanja.....	58
Slika 32. Uređaj za ispitivanje koeficijenta klorida	60
Slika 33. Shema prelomljenog uzorka.....	62
Slika 34. Rezultati gustoće samozbijajućih betona.....	65
Slika 35. Rezultati zahvaćenog zraka (pora) betona	66
Slika 36. Rezultati rasprostiranja	66
Slika 37. Rezultati viskoznosti t ₅₀₀ i V-lijevka.....	67
Slika 38. Rezultati L-kutije	67
Slika 39. L-kutija mješavine SCC-FMP	68
Slika 40. Prikaz rasprostiranja mješavine SCC-FMP (lijevo) i izgled krajeva uzorka prilikom ispitivanja rasporstiranja (desno)	68

Slika 41. Tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana	70
Slika 42. Ispitivanje tlačne čvrstoće	71
Slika 43. Ispitivanje savojne čvrstoće	72
Slika 44. Usporedva vrijednosti tlačne i savojne čvrstoće betona	73
Slika 45. Ispitivanje brzine ultrazvuka	75
Slika 46. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode	77
Slika 47. Grafički prikaz rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja	78
Slika 48. Izgled uzorka	79
Slika 49. Koeficijenti difuzije klorida	80
Slika 50. Dubina prodiranja klorida kod mješavine SCC (lijevo) i mješavine SCC-FMP (desno)	81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrsta mineralnih dodataka betonu	13
Tablica 2. Utjecaj mineralnih dodataka betonu.....	14
Tablica 3. Rezultati ispitivanja razine buke u Danskoj 2005. godine [5].....	18
Tablica 4. Sastavi betonskih mješavina	27
Tablica 5. Granulometrijski sastav filera.....	32
Tablica 6. Prosijavanje agregata 0-4 mm.....	32
Tablica 7. Prosijavanje agregata 4-8 mm.....	33
Tablica 8. Prosijavanje agregata 8-16 mm.....	33
Tablica 9. Tehnički podaci za superplastifikator	35
Tablica 10. Tehnički podaci za VMA	36
Tablica 11. Minimalne mase potrebne za ispitivanje ovisno o veličini zrna agregata	39
Tablica 12. Minimalne mase potrebne za ispitivanje ovisno o veličini zrna agregata	42
Tablica 13. Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja.....	49
Tabela 14. Razredi viskoznosti	50
Tablica 15. L-kutija razredi.....	52
Tablica 16. V-lijevak razredi.....	53
Tablica 17. Usporedba parametara sastava samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima u odnosu na preporučene vrijednosti (crvena boja - ne zadovoljava; zelena - zadovoljava).....	64
Tabela 18. Granične vrijednosti metoda ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju	64
Tablica 19. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju.....	65
Tablica 20. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana	70
Tabela 21. Rezultati savojne čvrstoće nakon 28 dana	72
Tablica 22. Razredba kvalitete betona prema brzini prolaza ultrazvuka	74
Tablica 23. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog vala.....	74
Tablica 24. Rezultati gustoće betona u očvrslom stanju.....	76
Tablica 25. Izračunate vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti	76
Tablica 26. Prikaz rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja.....	78
Tablica 27. Kriteriji ocjene rezultata ispitivanja koeficijenta difuzije klorida[14]	80
Tablica 28. Rezultati i ocjene ispitivanja difuzije klorida[14].....	80

1. UVOD

Godišnje se u svijetu proizvodi više od šest milijardi kubičnih metara betona čiji sastav ovisi o vrsti konstrukcije u koju se ugrađuje i o načinu ugradnje. No, prvi pravi beton sličan današnjem proizvodili su još oko 300. godina prije nove ere stari Rimljani koristeći za vezivno sredstvo pucolanski cement iz Puzzola kraj Napulja. Takvim su betonom izgradili mnoge puteve, podigli rimske toplice, Colosseum i Pantheon u Rimu kao i akvedukt Pont du Gard u južnoj Francuskoj. Gotovo dva stoljeća, koliko se beton primjenjuje, pokrivaio je oko 70% potreba u građenju i postao infrastrukturna i urbana osnova suvremenog života. Međutim, današnji ubrzani razvoj u svim područjima života ljudi prati i razvoj u građevinarstvu koji nameće nove zahtjeve kao što su veća trajnost, veća čvrstoća, lakša i brža ugradnja i veća ekonomičnost građevinskih konstrukcija. Obični beton teško je mogao ostvariti te zahtjeve što je rezultiralo u posljednjih dvadeset godina pojavom na tržištu inovativnih betona sa značajno razvijenijom tehnologijom proizvodnje.

Samozbijajući beton (eng. Self-compacting concrete, SCC) je inovativna vrsta betona koji smanjuje vrijeme građenja, potreban rad i opremu na gradilištu, olakšava gradnju gusto armiranih konstruktivnih elemenata i teško dohvatljivih područja, smanjuje buku i ozljede izazvane vibriranjem. Poboljšana fluidnost, dobra otpornost segregaciji komponenata tijekom tečenja, visoka čvrstoća u očvrslom stanju, lakša ugradnja i povećana trajnost samo su neke od karakteristika koje razlikuju samozbijajući beton od običnog.[16] Dosadašnja provedena ispitivanja pokazala su da samozbijajući beton ima bolja svojstva od običnog uz istu količinu veziva i vodocementnog omjera. Provedene analize mikrostrukture pokazale su da samozbijajući beton posjeduje manje defekata u strukturi od običnog betona.[18]

Životni vijek betonske konstrukcije izložene djelovanju agresivne sredine ovisi u većoj mjeri o izdržljivosti betona prema toj okolini nego o tlačnoj čvrstoći betona. Agresivnu okolinu u kojoj su smještene betonske konstrukcije čine klimatske okolnosti, prisustvo agresivnih tvari, te mehanički utjecaji kojima su konstrukcije izložene. Na pojavu oštećenja uslijed agresivnosti okoline nikada nema utjecaj samo jedan uzrok, već interaktivno djelovanje više čimbenika koji u većoj ili manjoj mjeri, a uvijek progresivno u funkciji vremena, učestvuju u smanjenju trajnosti i sigurnosti betonskog elementa.[1] Obzirom da agresivnu okolinu ne možemo mijenjati, za povećanje trajnosti elementa možemo odgovoriti na dva načina: projektiranjem dijelova konstrukcije koji će vrstom i kvalitetom materijala, te oblikovnim detaljima biti sposobni u najvećoj mogućoj mjeri odgovoriti na agresivne utjecaje okoline, te održavanjem konstrukcije tijekom projektiranog uporabnog razdoblja na način da održavamo početno (projektirano) stanje na prihvatljivoj razini.

Unutar ovog rada projektirani su sastavi samozbijajućih betona s različitim dodacima (leteći pepeo, metakaolin i polipropilenska vlakna). Leteći pepeo, metakalin i polipropilenska vlakna zbog svojih svojstva su veoma specifični dodaci. Dodatkom letećeg pepela povećava se trajnost betona, smanjuje se toplina

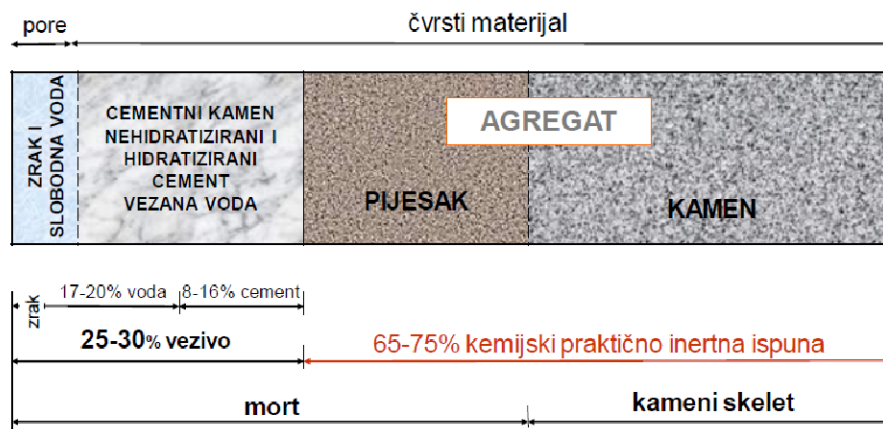
hidratacije (veoma bitna za masivne betone) i smanjuje se količina CO₂, polipropilenska vlakna smanjuju raspucavanja u mladom betonu. Metakaolin je nova vrsta mineralnog dodatka koji u Hrvatskoj još nije pronašao svoju primjenu u betonima, a ima velike prednosti u odnosu na leteći pepeo i silicijsku prašinu. Upravo ovim nepoznatim dodatkom za hrvatsku tehnologiju proizvodnje betona u kombinaciji s letećim pepelom i polipropilenskim vlaknima cilj nam je bio postići samozbijajuće betone koji će imati bolja trajnosna svojstva, širu mogućnost primjene u konstruktivnim elementima, smanjenu količinu CO₂, što bi ga činilo ekološki prihvatljivijim.

Na projektiranim mješavinama ispitani su utjecaji letećeg pepela, metakaolina i polipropilenskih vlakana na svojstva u svježem stanju, tlačnu čvrstoću nakon 1 i 28 dana, te na trajnosna svojstva koja su uspoređivana s komparativnom mješavinom samozbijajućeg betona bez dodataka. Na temelju dobivenih rezultata analizirana je opravdanost korištenja navedenih dodataka u samozbijajućim betonima, te dana mogućnosti praktične primjene.

2.BETON

2.1 Općenito o betonu

Beton je složeni građevni materijal izrađen miješanjem veziva (cementa, letećeg pepela, itd.), vode i agregata (šljunak i pijesak). Svježe pomiješani cementni prah s vodom tvori cementnu pastu. Odmah nakon miješanja počinje kemijski vrlo složeni proces hidratacije, koja traje godinama. Kemijsku reakciju prate određeni fizikalni procesi, pri čemu osobito važnu ulogu ima voda. Tim procesom cementna pasta prelazi u cementni kamen, koji očvršćava. Približno četvrtina prostora, koju ne zauzima agregat, ispunjena je cementnim kamenom. U očvrslom betonu cementni kamen ima dvije zadaće da slijepi zrna agregata i betonu da određenu čvrstoću, te da ispuni prostor među česticama agregata i s njime tvori nepropusnu masu.



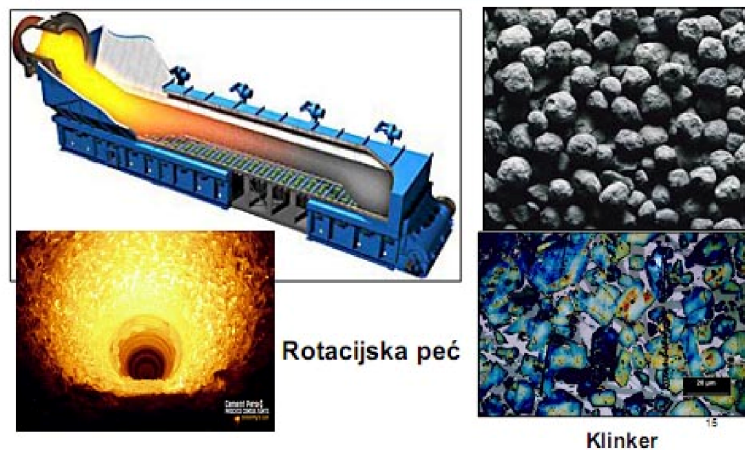
Slika 1. Orijeatcijski volumni udjeli osnovnih sastojaka u betonu [2]

Agregat čini približno tri četvrtine volumena određene mase betona. Veličine čestica agregata se mijenjaju obično kontinuirano od sitnog pijeska do najčešće 32 mm, podrijetlom su riječnog ili od stijene drobljenog zrna.

Dodaci betonu su beznačajni po volumenu, no vrlo djelotvorni na svojstva svježeg i očvrsllog betona. Doziraju se u promilima ili postocima od količine cementa. To su kemijski ili fizikalno vrlo aktivni materijali, koji se dodaju betonu prilikom miješanja, da bi se dobio obradljiviji svježi beton ili ubrao prirast čvrstoći ili poboljšala svojstva očvrslulog betona, itd.

2.2 Cement

Cement je hidrauličko vezivo dobiveno iz vapnenca i gline koji se peku u rotacionoj peći na temperaturi do 1400 °C gdje nastaje cementni klinker koji se nakon izlaska iz peći hladi i skladišti. Klinker se zatim uz dodatak gipsa melje i time istovremeno homogenizira u sitnu prašinu, portland cement.



Slika 2. Proces proizvodnje cementa suhim postupkom [2]

Prema hrvatskoj normi HRN EN 197 – 1 cement se definira na sljedeći način: "Cement je hidrauličko vezivo, to znači fino mljeveni anorganski materija koji, pomješšan s vodom, daje cementno vezivo koje procesom hidratacije veže i otvrdnjava, te nakon otvrdnjavanja ostaje postojanog volumena, također ispod vode"

Cement obuhvaća 10-20% ukupne mase betona i ima vrlo veliki utjecaj na svojstva betona. Izbor cementa se radi na osnovu njegovih sljedećih svojstava:

- čvrstoća i brzina rasta čvrstoće (klasa cementa)
- toplina hidratacije
- kemijska otpornost.

Za konstrukcije koje se nalaze u vlažnim sredinama koristi se cement s dodatkom pucolana. Minimalna količina cementa u armiranobetonskim konstrukcijama je:

- 250 kg/m³, za beton koji nije izložen atmosferalijama
- 300 kg/m³, za beton izložen atmosferalijama
- 350 kg/m³, za beton izložen agresivnim utjecajima.

U praksi, količina cementa se najčešće kreće u granicama 300-400 kg/m³.

2.3 Voda

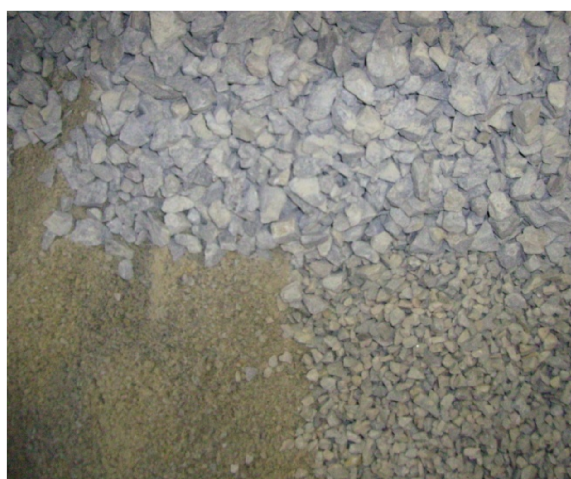
Dio mase betona čini voda sa svojih 5-10 %. Voda je dobra za izradu betona ako je:

- pH 4,5-9,5
- sulfatnih iona manje od 2700 mg/l
- kloridnih iona manje od 300 mg/l
- indeks organskih sastojaka manji od 200 mg/l
- ukupno rastopljenih soli manje od 5000 mg/l (ne odnosi se na morsku vodu).

Najčešće se smatra da je voda za piće dobra i za spravljanje betona, međutim ako ta voda sadrži veću količinu natrija ili kalija, postoji opasnost od alkalno agregatne reakcije. Isto tako voda koja nije pitka može biti prikladna za spravljanje betona. Najčešće je dovoljno da je pH između 5 i 8, te da nije slana (ne sadrži kloride).

2.4 Agregat

Agregat čini 70-80 % mase betona. Najčešće se koriste prirodni (riječni) šljunak i pijesak koji su jeftiniji i imaju bolje povezivanje zrna- veća adhezija s cementnim kamenom. Štetni sastojci u agregatu su: glina i druge sitne čestice, organske tvari i soli. Sadržaj gline i sitnih čestica određuje se mokrim sijanjem ili taloženjem. Dopuštena količina gline i sitnih čestica u agregatu je manje od 4,5% u riječnom i 7,5% u drobljenom agregatu, iznimno može biti do 10% i to ako se radi samo o sitnim česticama kamenog podrijetla u drobljenom agregatu.



Slika 3. Drobljeni agregat

2.5 Kemijski dodaci

Kemijski dodaci betonu su neobavezna komponenta betona, kojom se dodavanjem betonu prilikom spravljanja u vrlo maloj količini, mogu poboljšati neka svojstva svježeg ili očvrsnulog betona. Najčešće se radi o sljedećim vrstama aditiva:

- plastifikatori (superplastifikatori)-smanjenje površinske napetosti
- aeranti (uvlačivači zraka)-površinski aktivne tvari koje smanjuju površinsku napetost da bi omogućili stvaranje mjehurića te osigurali njihovu stabilnost
- akceleratori (ubrzivači vezivanja ili očvršćivanja)-kemijskim putem utječu na vezanje i očvršćivanje
- retarderi (usporivači vezanja) – usporavaju brzinu vezanja cementa
- antifrizi (dodaci za betoniranje na niskim temperaturama)-zaustavljena hidratacija.

Uz ove aditive idu i prospekti u kojima se daju tablice primjene i doziranja. Treba naglasiti da se tablice daju za primjenu sa čistim cementom, koji se koristi u ograničenim količinama, te aditive treba ispitati s cementom kojim će se primjenjivati

2.6 Mineralni dodaci betonu

Postoje materijali koji imaju pucolanska svojstva kao i materijali koji imaju latentna hidraulička svojstva. Ovi fino mljeveni materijali se dodaju betonu kako bi se unaprijedile njegove karakteristike ili da bi se zamijenio dio Portland cementa.

Tablica 1. Vrsta mineralnih dodataka betonu

Tip 1	Inertni ili poluinertni	<ul style="list-style-type: none"> • mineralni filer (vapnenac, dolomit itd.) • pigmenti
Tip 2	Pucolanski	<ul style="list-style-type: none"> • leteći pepeo • silicijska prašina • metakaolin (u Hrvatskoj se još uvijek ne koristi)
	Hidraulički	<ul style="list-style-type: none"> • Zgura visokih peći

Tablica 2. Utjecaj mineralnih dodataka betonu

PREDNOSTI	OPIS
Veća čvrstoća	<ul style="list-style-type: none"> rana čvrstoća betona nešto je niža nego kod običnog betona, ali s vremenom tlačna čvrstoća raste sporiji prirast čvrstoće može se očekivati u prvih nekoliko sati ili dana, ovisno o vrsti mješavine nakon 28 dana tlačna čvrstoća je znatno veća
Bolja obradljivost	<ul style="list-style-type: none"> svojstvo obradljivosti povećava se upotrebom letećeg pepela čije se čestice vežu za čestice cementa i na taj način oslobađaju električni naboj koji uzrokuje grupiranje čestica cementa
Veća otpornost na prodor klorida, sulfata i druge kemijski agresivne tvari	<ul style="list-style-type: none"> dodaci cementu reagiraju s kalcij hidroksidom koji je osjetljiv na djelovanje sulfata, tvoreći kalcij silikat hidrat, snažnije i kemijski otpornije sredstvo
Manja propusnost	<ul style="list-style-type: none"> dodaci cementu imaju različitu veličinu rasprostiranja čestica nego portland cement, te zbog toga cement dobiva pucolanske karakteristike koje stvaraju dodatne cementne spojeve ti spojevi smanjuju nastanak pora i na taj način smanjuje se propusnost očvrstnalog betona određeni dodaci smanjuju v/c omjer i tako smanjuju slaba kapilarna područja sporija hidratacija cementa rezultira ravnomjernijim prirastom čvrstoće, a posljedica toga je smanjenje topline hidratacije i temperaturnih naprezanja konačni rezultat je nepropustan beton i manja opasnost od pojave pukotina
Smanjenje izdvajanja vode	<ul style="list-style-type: none"> zbog većeg volumena finih čestica i smanjenog udjela vode manja je vjerojatnost pojave slabijih zona u betonu uzrokovanih izdvajanjem vode
Kontrola alkalno silikatne reakcije	<ul style="list-style-type: none"> dodaci cementu pridonose kontroliranju alkalno silikatne reakcije u betonu, ali njihova učinkovitost ovisi o svojstvima i kemijskom sastavu
Niža cijena	<ul style="list-style-type: none"> dodaci cementu kao industrijski nusprodukti imaju nižu cijenu od samog cementa, što rezultira smanjenjem ukupnih troškova proizvodnje betona

3. SAMOZBIJAJUĆI BETON

Samozbijajući beton opisuje se i danas smatra najrevolucionarnijim razvojem u građenju betonom posljednjih nekoliko desetljeća. Ovaj revolucionaran građevinski materijal sastoji se od cementa, agregata, vode i aditiva kao i obični beton, te još nekoliko novih sastavnica kao što su koloidni silikati, pucolanski materijali, portlandski leteći pepeo (PFA), mikrosilika, metakaolin, kemijski dodaci koji doprinose posebnim zahtjevima kao što su tečenje, čvrstoća, visoka obradljivost, otpornost na kemijske i mehaničke utjecaje, smanjenje popuštanja, trajnost i otpornost segregaciji.

Svojom sposobnošću tečenja samo pod utjecajem vlastite težine bez segregacije, tijekom čega se deaerira (nema zarobljenih mjehurića zraka) i u potpunosti popunjava oplatu zaobilazeći armaturu, te na kraju zadržava horizontalnu površinu bez upotrebe vibracijskih uređaja. Zbog svojih svojstava samozbijajući beton svrstava se u betone visoke kvalitete i izvedbe, te ima mnoge prednosti:

- lagano se ugrađuje i ekonomičan je
- pogodan za sve primjene koje zahtijevaju vrhunsku izvedbu i završnu obradu
- smanjuje opseg poslova koji su potrebni za ugradnju, izravnavanje i završnu obradu
- primjeren za teške konstrukcije i složene kalupe
- povećana izvedivost i odlična rana čvrstoća
- samoizravnavanje smanjuje vrijeme ugradnje
- nije potrebno zbijanje
- smanjena buka i problemi u vezi sa zdravljem i sigurnošću
- glatka površina koja zahtijeva minimalnu daljnju završnu obradu
- u skladu ili bolji od relevantnih hrvatskih i europskih standarda. [3]

3.1 Razvoj samozbijajućeg betona

Krajem 80-tih godina diljem svijeta su krenula intenzivna istraživanja trajnosti betona. Betonske konstrukcije, masovno građene 50-tih počele su trpjeti znatna oštećenja uslijed djelovanja iz okoline. Jedan od razloga kraće trajnosti betona je veliki utjecaj same ugradnje betona na njegova svojstva u upotrebi. Upravo radi toga, bilo je potrebno aktivirati veći broj kvalificiranih radnika da bi se umanjile pogreške prilikom ugradnje i njegovanja betona.

Rješenje za navedene probleme prvi je iznio profesor Hajima Okamura 1986. godine na Sveučilišta u Tokiju. Ponudio je prvi prototip samozbijajućeg betona. To je bio beton visokih uporabnih svojstava (HPC) koji je koristio najnovije

superplastifikatore i stabilizatore smjese (Viscosity modifying agents), te napredne tehnike miješanja sastojaka.[4]

Cilj je bio poboljšati kvalitetu betona eliminirajući potrebu za vibriranjem, zbog štetnog djelovanja vibriranja na unutarnju strukturu betona. To je posebno bilo potrebno kod građevina koje koriste beton visokih uporabnih svojstava, jer je kod njih armatura bila postavljena vrlo gusto, te najčešće grade u lošim i teškim uvjetima. Svojstva tog betona bila su definirana kao:

- u svježem stanju mora imati svojstvo samozbijanja
- u ranoj starosti traži se izbjegavanje inicijalnih defekata
- u očvrslom stanju mora biti otporan na vanjske utjecaje.[3]

Kasnije studije razvoja samozbijajućeg betona, uključujući osnovnu studiju obradljivosti betona, iznijeli su Ozawa i Maekawa.

Krajem 90-ih godina samozbijajući se beton prema japanskim iskustvima počeo primjenjivati i u Europi. 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. Sredinom 2010. godine samozbijajući beton specificirale su i europske norme za proizvodnju betona i izvedbu betonskih konstrukcija (EN 206-1 i ENV 12350).

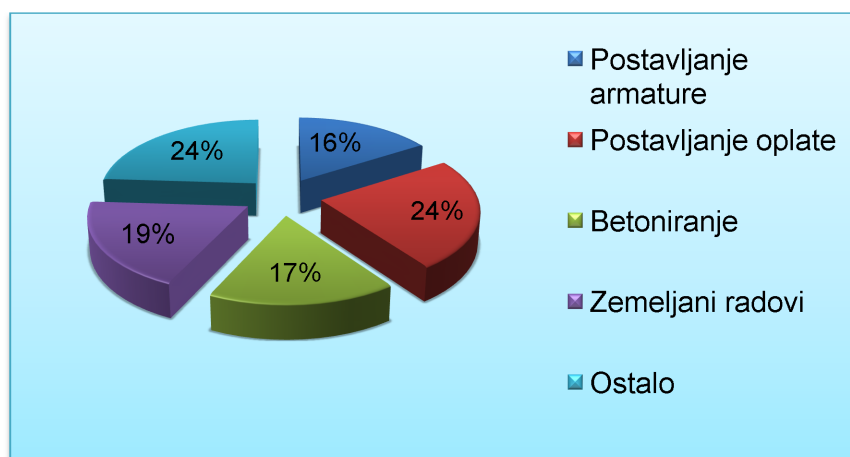
3.2 Poboljšanje radne okoline upotrebom SCC-a

Radna okolina i uvjeti rada građevinskih radnika je među najtežim i najstresnijim radnim okolinama. Posljedica toga je veća starosna dob i lošije opće stanje zdravlja građevinskih radnika od ostale populacije. Razvoj i primjena samozbijajućeg betona (SCC) se uglavnom fokusirao na kvalitetu i produktivnost, što je od velike važnosti za izvođača i vlasnika objekta, ali SCC ima i ulogu u poboljšanju radnih uvjeta.

Znanstvenik Claus V. Nielsen, sa Danskog tehnološkog instituta, je proveo istraživanje o utjecaju prelaska sa betona normalne obradivosti na samozbijajući beton na kvalitetu radne okoline. Proučavali su razinu buke, radne pozicije tijela, ergonomiju, i izloženost vibracijama.[5]

3.2.1 Radni uvjeti i okolina građenja

Dobro je poznato da je radna okolina i uvjeti građevinskih radnika među najtežim, najstresnijim i najopasnijim radnim okolinama. Rad sa velikim težinama, na velikim visinama i neudobnim radnim pozicijama tijela. Rad na otvorenom ima za posljedicu čestim izloženošću kiši i vjetru, te promjenama temperature. Visoka temperatura zraka kod teških fizičkih radnika može dovesti do toplinskih grčeva, udara i toplinske iscrpljenosti. Iako su današnja moderna gradilišta opremljena dizalicama i kranovima, te imaju stroge propise o zaštiti na radu, i teži se što boljoj organizaciji rada i radnih procesa rad je još uvijek težak i stresan.



Slika 4. Distribucija radnog vremena građevinskog radnika, ispitana u Danskoj [5]

Na slici 4. je prikazana distribucija radnog vremena građevinskih radnika, ispitano u Danskoj krajem 20. stoljeća.[6] Iako su se tehnike armiranja i postavljanja oplata svaki dan poboljšavaju, vjeruje se da ova podjela radnog vremena još uvijek vrijedi.

Danski nacionalni centar za radnu okolinu je proveo istraživanje 2005.g., ispitujući oko 10.000 ljudi iz 11 industrijskih grana i sa 64 različitih vrsta poslova, o njihovim fizičkim i psihičkim uvjetima radne okoline. Iz usporedbe podataka iz 2000 i 2005. godine, pokazalo se da razina buke se povećala, ali su se dizanje teških tereta, vibracije i neugodne radne poze tijela malo smanjile ili ostale iste.

Istraživanje je podijelilo ljude u 3 kategorije s obzirom na njihove funkcije:

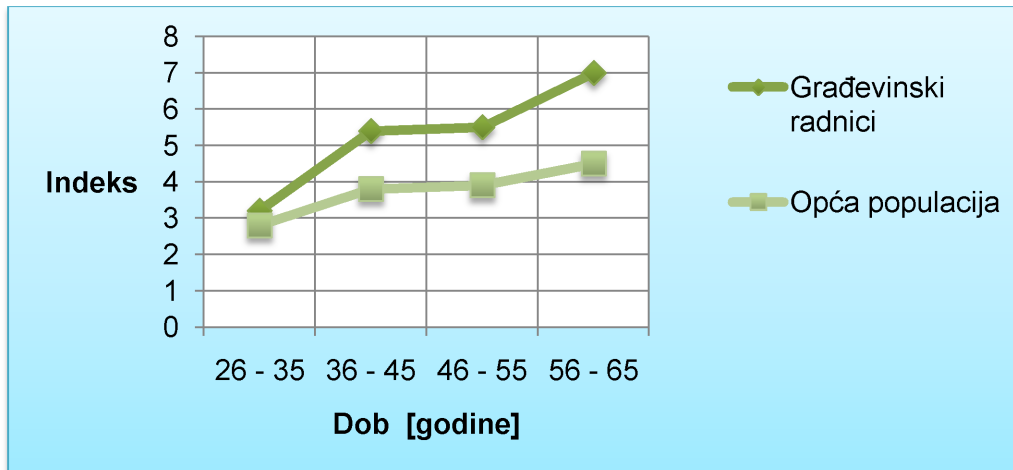
- oni koji se bave informacijama
- koji se bave ljudima
- oni koji rade sa materijalima.

Prve dvije grupe karakterizira niska razina fizičke aktivnosti, ali velika mogućnost za razvoj i napredovanje. Treću grupu karakterizira visoka razina fizičke aktivnosti, te mala mogućnost razvoja i napredovanja. Građevinarstvo spada u treću grupu.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja razine buke u Danskoj 2005. godine [5]

Tip utjecaja	Prosjek svih industrija	Građevina	Napomene
Visoka razina buke	33%	46%	Najniži postotak je 15%, kod uredskih radnika.
Razina buke opasna po zdravlje	9%	19%	Najniži postotak je 2%, kod uredskih radnika.
Vibracije	5%	25%	Nekoliko grana s 0% izloženosti
Rad u sagnutom položaju	33%	57%	Najniži postotak je 14%, kod uredskih radnika.
Rad u čučućem položaju	14%	51%	
Podizanje tereta >10 kg	14%	32%	Najniži postotak je 2%, kod uredskih radnika.

Znanstvenici Danskog instituta su izvršili ispitivanje uspoređujući opće stanje zdravlja, tj. fizičku istrošenost radnika uspoređujući je sa stanjem opće populacije. Otkrivena je veća istrošenost kod građevinskih radnika nego opće populacije, te da se razlika povećava sa starosti radnika. Povećanje razlike je logična, jer se istrošenost i umor polako akumulira sa godinama rada. Pokazalo se da i kvaliteta sluha opada sa godinama brže za građevinske radnike nego ostalu populaciju, to također vrijedi i za rizik od utrnutih ruku i prstiju kao posljedica rukovanja sa ručnim vibrirajućim alatom.



Slika 5. Usporedba istrošenosti građevinskih radnika i opće populacije [5]

3.2.2 Horizontalna ugradnja betona

SCC se u Danskoj uglavnom primjenjuje za betoniranje ploča u razini tla. Oko 30% betona proizvedenog u Danskoj je SCC. Tako su znanstvenici Danskog instituta dali veliku važnost betoniranju ploča, te su pratili i ispitivala uvjete radne okoline. Nakon detaljnog praćenja betoniranja jedne ploče, došli su do sljedećih zaključaka:

- Previbrator je težak 5 kg i registrirano je da se svaki previbrator spusti i digne u beton oko 480 puta na sat. Iako, zbog uspravnog položaja radnika pri rukovanju previbratorom, smatra se da ta radnja nije štetna za zdravlje radnika.
- Izmjerene vibracije od previbratora su oko $3,4 \text{ m/sec}^2$. Radnici su izloženi ovoj razini vibracija skoro 8 sati dnevno. Većina uređaja ima izolirajuće ručke, te se rukovanje sa njim ne smatra opasnost po zdravlje radnika.
- Vađenje previbratora iz betona nije teška radnja, ali položaj tijela i otežano kretanje dovode do rizika od pada te ozljede radnika.

Tako da su zaključili da radnje pri betoniranju horizontalnih ploča nisu direktno štetne za zdravlje radnika, ali razina buke je znatno smanjenja ako se beton ne vibrira.[5]

3.3 Održivost

Pojam održivosti je 1992. godine na Earth Summitu u Rio de Janeiru definiran kao gospodarstvena djelatnost koja je u skladu sa zemljinim ekosustavom.[7] Osnovni princip održivog razvoja je korištenje što manje prirodnih resursa i stvaranje što manje po Zemlju štetnih otpada.

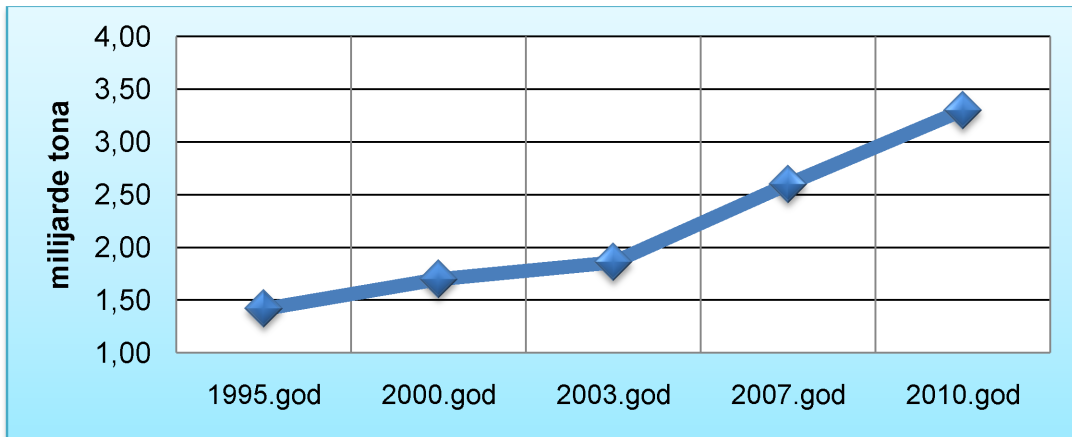
Beton je nedvojbeno bio građevinski materijal 20. stoljeća, a zbog njegovih prednosti pred drugim građevinskim materijalima, njegova masovna upotreba je neizbježna i u 21. stoljeću. Godišnje se u Europi proizvede preko 750 milijuna m³ betona, što bi značilo da stanovnik Europe godišnje upotrijebi 4 tone betona. Iako beton, kao gotovi materijal, sam po sebi ne šteti okolišu, proizvodnja njegovih sastojaka šteti. Tehnologija betona je danas najveći potrošač prirodnih resursa i jedan od najvećih proizvođača otpada. Upravo zato, potrebno ju je unaprijediti u održivu i ekološki savjesnu tehnologiju proizvodnje.[1,9]

SCC se dugo vremena smatrao skupim materijalom zbog velikog udjela vezivnih materijala i skupih kemijskih dodataka. Zato se i u početku nije smatrao održivim materijalom. Posljednjih godina, razvojem SCC je postao jaka konkurencija betonu normalne konzistencije, jer se više ne povezuje sa visokim udjelima cementna i stoga lošim utjecajem na prirodu. Razlozi toga poboljšanja su:

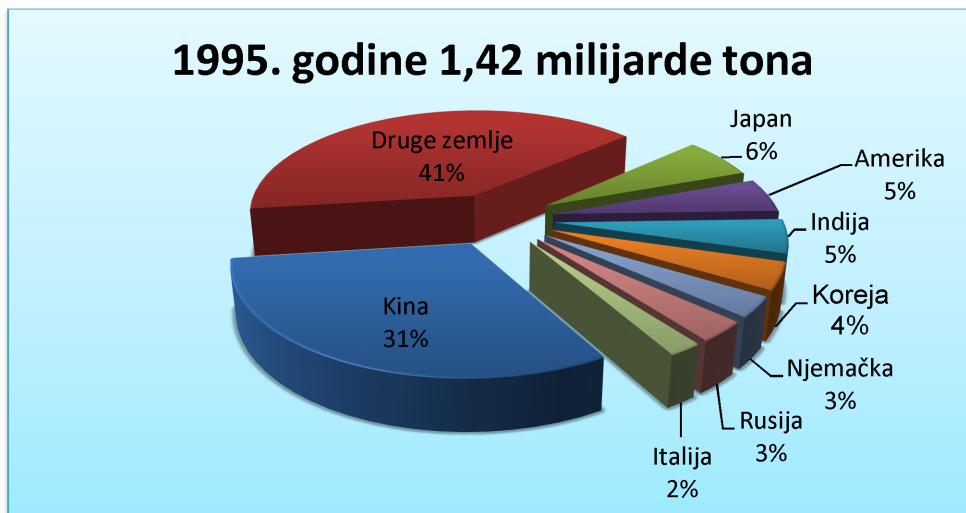
- dodavanjem većih količina filer materijala kao što su vapnenac, leteći pepeo, zgura i ostalih pucolanskih materijala, tako da se ne može više tvrditi da SCC proizvodi veće količine emisije CO₂
- SCC povećava produktivnost tako što je smanjen broj radnji u radnom procesu, a to je dodatan motiv izvođačima jer povećava se produktivnost po radnom satu radnika
- korištenjem SCC-a poboljšavaju se radni uvjeti i okolina, što je jako dobro za građevinske radnike i njihovo bolje zdravstveno stanje, također je i manje nesreća na radu.

3.3.1 Smanjenje CO₂

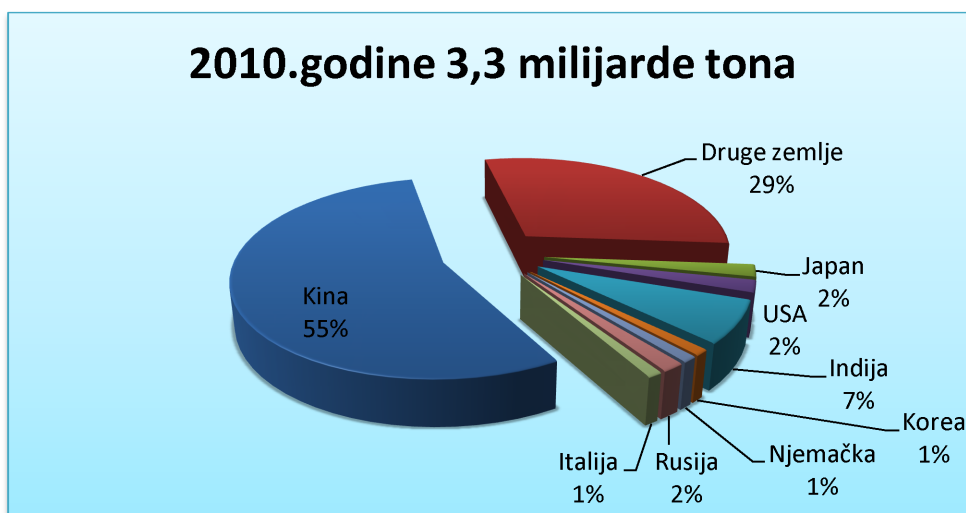
Godišnja svjetska potrošnja portlandskog cementa iznosi oko 3 milijarde tona te se očekuje da će ta brojka zbog industrijalizacije zemalja u razvoju u budućnosti još i rasti. U razdoblju od 1995.-2010. godine godišnja proizvodnja cementa se i više nego udvostručila (1995.godine iznosila je 1,42 milijardi tona, a 2010.godine 3,3 milijarde tona).[10]



Slika 6. Proizvodnja cementa u svijetu 1995.-2010. godine[10]



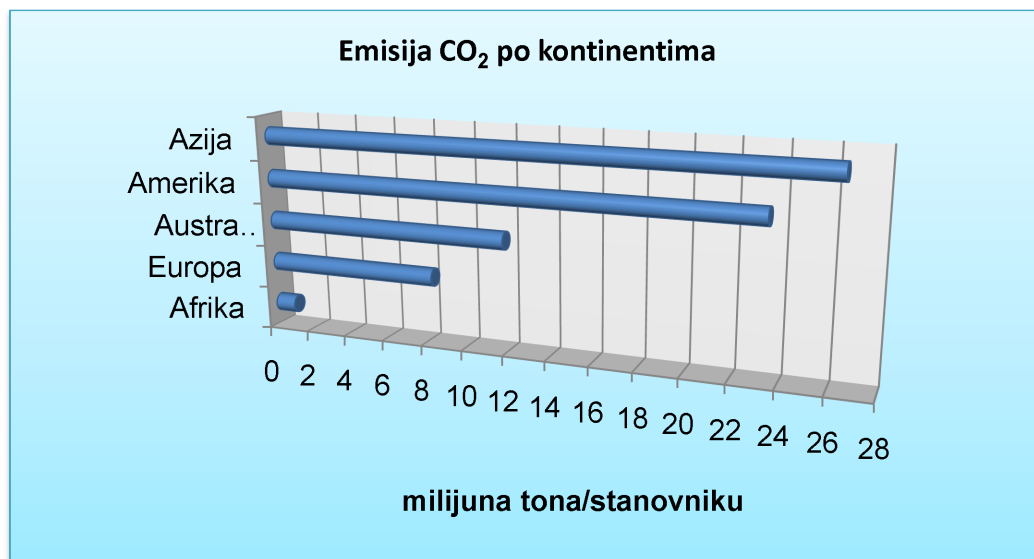
Slika 7. Proizvodnja cementa po vodećim zemljama svijeta 1995. godine[10]



Slika 8. Proizvodnja cementa po vodećim zemljama svijeta 2010.godine[10]

Prilikom proizvodnje jedne tone klinkera portlandskog cementa 0,80 tona CO₂ se emitira u okoliš.[2,21] Istraživanja su pokazala de je upravo cementna industrija odgovorna za 7% ukupno svjetske emisije CO₂. Poznato je da je upravo emisija CO₂ u okoliš glavni razlog osnovnog ekološkog problema današnjice – globalnog zatopljenja.

Prema Kyoto protokolu, u razdoblju od 2008.-2012. ukupna emisija stakleničkih plinova razvijenih zemalja mora se smanjiti najmanje za 5 % u odnosu na razinu ostvarenu 1990. godine. U Hrvatskoj, proizvodnja portland cementa uzrokuje 8 % - 9 % ukupne emisije stakleničkih plinova. S obzirom na visok udio u ukupnoj emisiji stakleničkih plinova, veliki naponi uloženi su u smjeru pronalaska novih materijala koji bi omogućili smanjene potrebe za cementom.



Slika 9. Emisija CO₂ po kontinentima 2010.godine [10]

3.4 Primjeri primjene samozbijajućeg betona

Moćan Japanski most Akashi Kaikyo najviši, najduži i najskuplji viseći most na planetu. Prkoseći nepovoljnim okolnostima, sagrađen gdje mostu nije mjesto, na milost i nemoilost vjetrova koji dosežu zapanjujuću brzinu od 290 km/h, snagu koja odnosi krovove i čupa korijenje drveća. Nalazi se na jednom od najprometnijih i najopasnijih brodskih ruta na svijetu, a još je u samoj zoni velikih potresa. To je most za koji se govorilo da se nikad neće moći izgraditi.

Kolosalan most Akashi opterećen je ogromnom autocestom od 6 traka, koja povezuje užurbanu metropolu Kobe na kopnu sa otokom Awaji koji je smješten južnije. U Japanu ovaj most se simbol nacionalnog ponosa. Njegova dva pilona

visine 280 m izgledaju poput zgrade od 80 katova. Glavni raspon između stupova 1991 m, ukupne duljine 3911 m. Most je gradilo 2 milijuna radnika, a za izgradnju utrošeno je 4,3 milijarde dolara. More koje premošćuje bila je noćna mora za graditelje, prevlaka Akashi barijera je uzburkanog mora od četiri kilometra, duboka preko 110 m sa strujama koje djeluju brzinom od 14 km/h i to u vrijeme mirnog mora.



Slika 10. Most Akashi Kaikyo

Upravo zbog dubine na kojoj se nalazilo tlo i brzine morskih struja nije bilo moguće primijeniti uobičajen postupak betoniranja temelja pod vodom. Graditelji su se odlučili na podizanje temeljnog tla nasipavanjem kako bi se popeli na visinu 60 m ispod razine mora. No međutim usprkos postignutoj dubini na kojoj je moguće izvesti normalno podvodno betoniranje, problem su im zadavale jake morske struje. Odlučili su se na izgradnju ogromnih čeličnih kalupa na kopnu po jedan za svaki temelj mosta. Izgrađeni kalupi su se teglili na more i potopili s velikom preciznošću. Šuplji čelični prsteni sa dvije oplata bili su visoki 70 m, promjera 80 m i težine 15 000 t, što je težina 40 mlažnjaka. Prstene su morali potopiti 60 m u dubinu mora na način da jednako merno napune morskom vodom vanjsku oplatu čeličnih prstena.

Da bi se dovršili temelji čelične prstene trebalo je napuniti betonom, međutim problem je bio u tome što zbog svoje masivnosti temelja i nemogućnosti vibriranja u čeličnim prstenovima bilo nemoguće koristiti običan beton. Zbog nemogućnosti korištenja običnog betona, graditelji su se odlučili na samozbijajući beton. U svaki

temelj ugrađeno je 265 000 m³ samozbijajućeg betona što je ukupno 530 000 m³ samozbijajućeg betona ugrađenog samo u temeljima mosta. To je do sada najviše upotrijebljena količina samozbijajućeg betona na jednom mjestu. Samozbijajući beton je postizao čvrstoću nakon jednog dana od 80 MPa. U prvih 72 h u svaki kalup ugrađeno je 90 000 m³ samozbijajućeg betona, a cijeloukupno betoniranje temelja je trajalo 4 godine i 3 mjeseca. Projektirani vijek trajanja ovog mosta je nevjerovatnih 200 godina.[11]

3.5 Očekivana praktična primjena dobivenih rezultata



a) utjecaj ljudskog faktora na vibriranje običnog betona te pojava mjesta u oplati na koja beton nije ugrađen



b) pojava oslabljenja konstrukcije zbog lošeg izvođenja vibriranja na mjestima spoja oplata s postojećom konstrukcijom



c) utjecaj propadanja armature na oplatu, čest slučaj kod armiranobetonskih zbog vibriranja i hoda radnika po armaturi za vrijeme ugradnje betona



d) segregacija betona i pojava „gnijezda“ koja dovodi do oslabljenja konstrukcije

Slika 11. Utjecaj ljudskog faktora prilikom ugradnje običnog betona

Upotrebom samozbijajućih betona primjeri kao što su navedeni u slici 11. biti će izbjegnuti, jer kod samozbijajućih betona nema velikog utjecaja ljudskog faktora prilikom ugradnje betona, te nema potrebe za vibriranjem betona. Pored toga samozbijajućí betoni kvalitetno popunjavaju presjek elementa, te nakon skidanja oplata nisu vidljiva oštećenja na površinama betona.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

4.1 Cilj i program istraživanja

Ciljevi su istraživanja sljedeći:

- eksperimentalnim istraživanjem dobiti samozbijajućí beton s različitim mineralnim dodacima (leteći pepeo, metakaolin i polipropilenskim vlaknima) koristeći se komponentama dostupnim na hrvatskom tržištu
- analizirati primjenjivost postojećih preporuka za projektiranje sastava na samozbijajućí beton
- utvrditi utjecaj mineralnih dodataka na utjecaj svojstva samozbijajućeg betona u svježem stanju
- odrediti utjecaj mineralnih dodataka i polipropilenskih vlakana na količinu kemijskih dodataka (superplastifikator, VMA-stabilizator smjese)
- odrediti utjecaj mineralnih dodataka i polipropilenskih vlakana na mehanička i trajnosna svojstva betona
- usporediti svojstva između običnog samozbijajućeg betona i samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima.

4.2 Metode istraživanja

Na mješavinama su ispitana sljedeća svojstva u svježem stanju:

- gustoća (HRN EN 12350-6)
- sadržaj pora (HRN EN 12350-7)
- temperatura
- konzistencija rasprostiranjem (HRN EN 12350-8)
- metoda L-posudom (HRN EN 12350-10)
- metoda V-lijevkom (HRN EN 12350-9)

Za ispitivanja svojstva u očvrnulom stanju upotrijebljene su sljedeće metode ispitivanja:

- tlačna čvrstoća (HRN EN 12390-3)
- savojna čvrstoća (HRN EN 12390-5)
- brzina ultrazvučnog impulsa (HRN EN 12504-4)
- kapilarno upijanje (HRN - U.M8.300)
- difuzija klorida (NT BUILD 492).

Eksperimentalan rad je proveden u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu.

4.3 Sastavi betonskih mješavina

Istraživanje je provedeno na pet betonskih mješavina. Sastavi betonskih mješavina prikazani su u tablici 4. Sve su mješavine imale isti vodovezivni omjer (0,44) i istu količinu veziva, a korišten je trofrakcijski drobljeni agregat. Projektiranje sastava mješavina vršeno je uzevši u obzir uvjet izloženosti XD3, razred tlačne čvrstoće C50/60 mjera slijeganja SF3 sa vremenom $t_{500} < 2,0$ sec (VS1). Mješavine su se međusobno razlikovale po vrsti i količini mineralnih dodataka, a komparativno njima napravljena je mješavina običnog samozbijajućeg betona bez mineralnih dodataka.

Za pripremanje samozbijajućeg betona upotrijebljene su komponente sastava dostupne na hrvatskom tržištu.

Oznake mješavina:

- **SCC** - samozbijajući beton bez dodataka
- **SCC-F** – samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela
- **SCC-M** – samozbijajući beton s dodatkom metakaolina
- **SCC-FM** – samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela i metakaolina
- **SCC-FMP** – samozbijajući beton s dodatkom letećeg pepela, metakaolina i polipropilenskih vlakana.

Tablica 4. Sastavi betonskih mješavina

Sastavne komponente [kg/m ³]		SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Sastav betona za 1m ³						
Cement		450	250	405	205	205
Leteći pepeo		-	200	-	200	200
Metakaolin		-	-	45	45	45
PP vlakna		-	-	-	-	1
Voda		198	198	198	198	198
v/c		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
SP, %		2,40	1,32	3,90	3,60	4,50
VMA, %		0,77	0,77	0,77	0,95	0,88
Filer		150	150	150	150	150
0 - 4	50%	816	818	814	814	813
4 - 8	21%	328	329	328	328	327
8 - 16	29%	468	469	467	467	467

4.4 Tehnologija spravljanja i njega uzoraka

Sve mješavine su spravljanje u laboratorijskoj miješalici zapremnine 100 litara. Za svaku mješavinu napravljeno je po tri uzorka dimenzije 100×100×400 mm za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem i ultrazvuk, tri kocke 150×150×150 mm za određivanje tlačne čvrstoće, te tri valjka $\varnothing 10 \times 20$ cm.

Nakon ugradnje uzorci su prekriveni najlonom i držani su 24 sati na temperaturi od 20 ± 2 °C. Nakon raskalupljanja obavljena su ispitivanja koja su bila predviđena nakon jednog dana. Ostatak neispitanih uzoraka stavljen je na njegu u vlažnu komoru do starosti 28 dana.



Slika 12 Miješalica za spravljanje betona

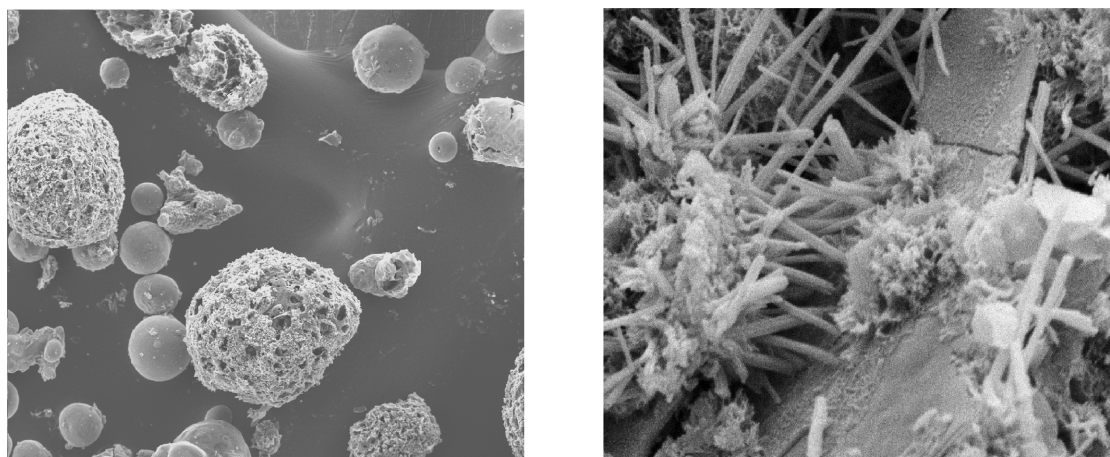
4.5 Sastavne komponente

4.5.1 Cement

U mješavinama je korišten cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N izrađen prema HRN EN 197-1. Cement CEM II/B-M (S-V) je miješani portlandski cement koji sadrži 65-79% portlandskog cementnog klinkera, 21-35% granulirane zgure visoke peći i letećeg pepela iz termoelektrane kao glavnih sastojaka, te 0-5 % filterske prašine iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera kao sporednog sastojka, zajednički mljevenih u kugličnom mlinu uz dodatak industrijskog gipsa dihidrata iz termoelektrane, kao regulatora vezivanja.

4.5.2 Leteći pepeo

Ugljen je materijal koji se najčešće upotrebljava kao pogonsko gorivo u termoelektranama. Ovisno o vrsti ugljena, u njemu je prisutno između 10 i 40% nezapaljivih nečistoća, u obliku gline, škriljevca, kvarca i vapnenca. Prilikom gorenja ugljena i gorive tvari na visokim temperaturama u peći, većina mineralnih nečistoća izgori, te postane dio otpadnog dima. Nakon izlaska iz područja izgaranja, čestice pepela se naglo hlade, te očvršćavaju u sferične, staklaste čestice. Krupnije čestice sedimentiraju u pepeo pri dnu, dok ih većina odlazi s otpadnim plinom po čemu je i dobio naziv leteći pepeo.



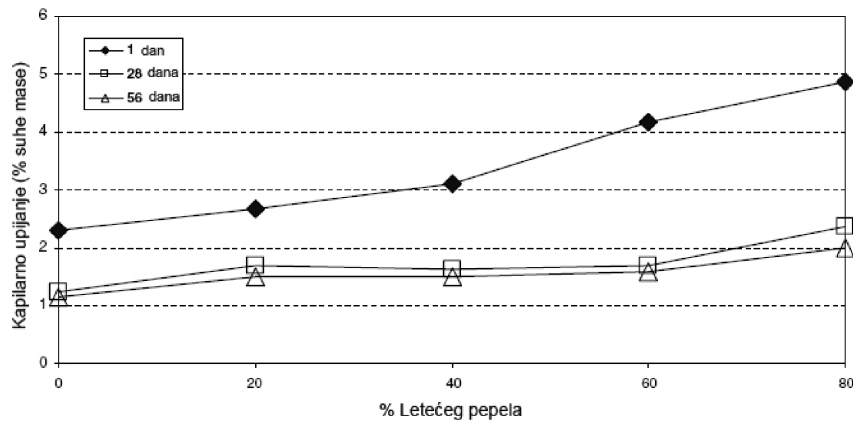
Slika 13. Sferičan oblik čestica letećeg pepela (slika lijevo) omogućuje lakšu ugradnju i završnu obradu betona od čestica portland cementa (slika desno)

Čestice letećeg pepela su staklaste i sferične te su zbog svoje malene veličine i specifične površine od 2000-4000 cm²/g, pogodne za dodavanje cementu nakon mljevenja. Kod betona koji se proizveo s cementom s dodatkom letećeg pepela možemo očekivati ova svojstva:

- bolja obradljivost
- smanjenje količine vode potrebne za izradu betona
- smanjenje topline hidratacije
- veća čvrstoća
- veća otpornost na prodor kemijski agresivnih tvari
- manja propusnost
- niža cijena.

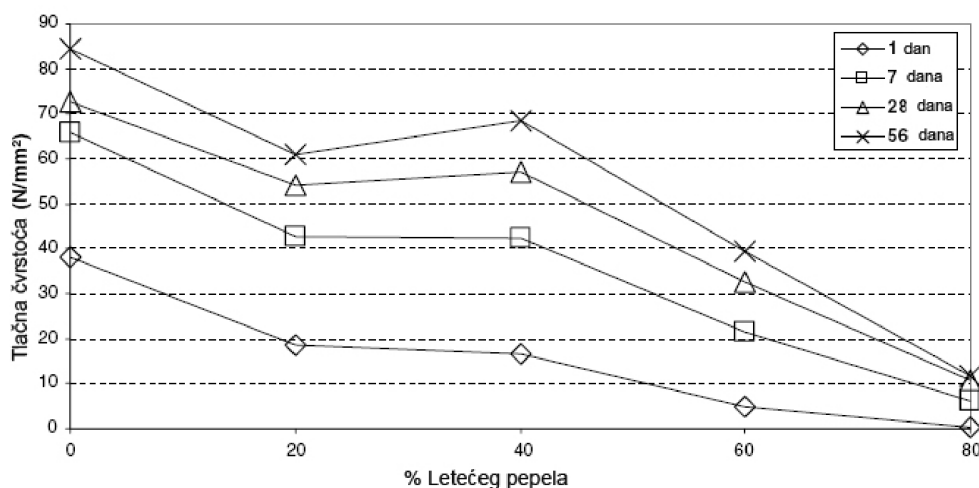
Ispitivanjima je već utvrđeno da se korištenjem letećeg pepela povećava obradivost svježeg te se pridonosi povećanju čvrstoće očvrstnalog betona. Dodavanjem FA smanjuje se potrebna količina superplastifikatora potrebnog za dostizanje određene vrijednosti Slump flow testa. Također je poznato da se korištenjem FA u betonu, smanjuje potreba za vodom te se uz dodavanje FA postiže bolja obradivost uz konstantni vodovezivni omjer. Čvrstoća i skupljanje SCC betona koji sadrži veće količine FA su podjednake kao i normalnih betona.[9]

FA ima manju gustoću od Portland cementa, što znači da se uz jednaku količinu kemijskih dodataka u betonu, dodavanjem većih količina FA, smanjuje gustoća betona. Iako su udjeli sastojaka SCC betona drugačiji od običnog, gustoća im je podjednaka, što pokazuje dobru zbijenost samozbijajućeg betona.



Slika 14. Utjecaj letećeg pepela na kapilarno upijanje [9]

Slika 14. pokazuje utjecaj dodavanja FA, u postocima u odnosu na cement, na vrijednost kapilarnog upijanja betona. Kapilarno upijanje znatno opada sa starosti betona između 1 i 28 dana, nakon toga opada manjom brzinom. Pokazano je da kapilarno upijanje lagano raste s povećanjem postotka FA, iako betoni i s dodatkom 80% FA imaju vrijednost kapilarnog upijanja manju ili jednaku 2%, što se smatra niskim kapilarnim upijanjem vode. Nisko kapilarno upijanje je i znak dobre zbijenosti SCC betona, koja se postiže samo gravitacijom, tj. vlastitom težinom SCC betona. Zbijenost se povećava sa dodatkom FA zbog povećanja obradivost.



Slika 15. Utjecaj letećeg pepela na čvrstoću betona [9]

Utjecaj omjera dodavanja FA u postocima na tlačnu čvrstoću je pokazana na slici 15. Beton koji sadrži 40% FA pokazuje veću čvrstoću nego betoni sa drugačijim omjerima. Uz isti vodo-vezivni omjer (w/b), povećanjem količine FA u betonu, smanjuje mu se čvrstoća. Iako i sa velikim postotkom FA (60%) postižu se čvrstoće i

do 40 N/mm² uz isti vodo-vezivni omjer. Veće čvrstoće možemo očekivati ako dodavanjem FA postignemo istu obradivost i sposobnost ugrađivanja, ali sa smanjenim vodo-vezivnim omjerom (w/b).

4.5.3 Metakaolin

Metakaolin je proizvod koji se dobiva pečenjem glinenog materijala kaolinita. Pečenje kaolinita vrši se na temperaturi između 600° i 850°C gdje se pretvara u amorfne faze. Veličina čestica metakaolina je manja od čestica cementa. Može reagirati s cementom i vapnom. [13]



Slika 16. Kaolin

Metakaolin je novi mineralni dodatak koji se pojavio na tržištu i ubrzo našao svoju primjenu na u različitim sastavima betona i mortova. Međutim primjena ove vrste mineralnog dodatka u Hrvatskoj do sad još nije zabilježena. Zbog svog specifičnog kemijskog sastava pridonosi poboljšanju svojstva betona i mortova kako u svježem ta i u očvrslom stanju. Metakaolin ima utjecaj na sljedeća svojstva beton:

- smanjuje ukupnu količinu pora, postizanje veće gustoće i otpornosti na kiseline
- dodatkom do 15% metakaolina na masu veziva značajno se povećavatlčna čvrstoća i otpornost betona na sulfate
- velika otpornost na soli te je pogodan za korištenje u konstrukcijam koje se nalaze u moru ili uz more
- kod malenih vodovezivnih omjera pokazuje jako dobru otpornost na smrzavanje i odmrzavanje
- prilikom proizvodnje metakaolina emisija CO₂, je daleko manja od cementa čime postaje i ekološki prihvatljiviji.

4.5.4 Filer

Filer spada u grupu inertnih, poluinertnih mineralnih dodataka (dolomit, vapnenac, itd). Punilom se smatraju sve sitne čestice koje prolaze kroz otvor sita 0,063 mm.[17]

Tablica 5. Granulometrijski sastav filera

Sito [mm]	Prolaz [%]
0	
0,063	64
0,09	81
0,125	91
0,25	99

4.5.5 Agregat

Agregat je drobljeni vapnenac u tri frakcije, od 0 do 4 mm, 4 do 8 mm, 8 do 16 mm.

Tablica 6. Prosijavanje agregata 0-4 mm

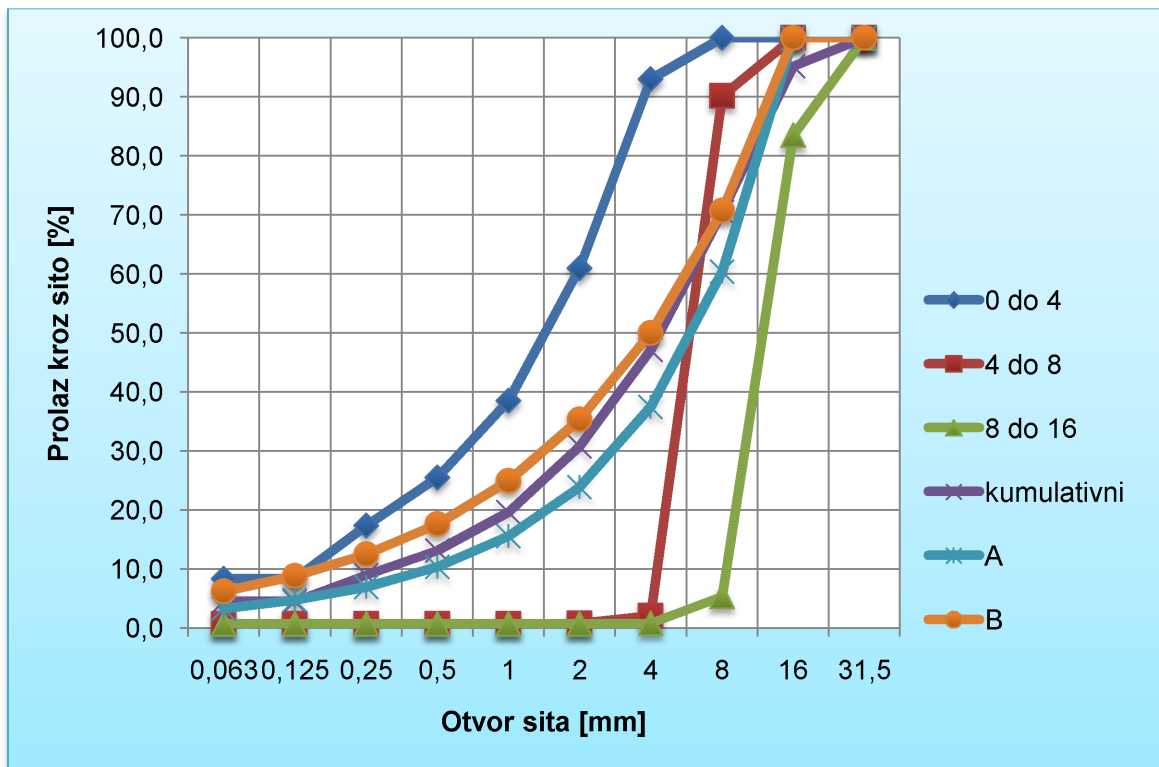
Frakcija agregata 0-4 mm			
Ukupna masa M1(g)=		532,7	
Suha masa uzorka nakon ispiranja M2(g)=		490,9	
Suha masa čestica uklonjenih ispiranjem M1-M2=		41,8	
Veličina otvora sita(mm)	Masa preostalog materijala na situ Ri	Postotak preostalog materijala na situ (Ri/M1)x100	Kumulativni postotak prolaska kroz sito 100-(Ri/M1)x100
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	100,0
4	37,3	7,0	93,0
2	170,7	32,0	61,0
1	119,2	22,4	38,6
0,5	69,3	13,0	25,6
0,25	43,5	8,2	17,4
0,125	48,2	9,0	8,4
0,063	0,0	0,0	8,4
Materijal u posudi P:	1,5		
Postotak sitnih čestica koje prolaze kroz sito 0,063mm=	8,1		
$\sum Ri+P=$	489,7	Apsorpcija =	1,6
Valjanost ispitivanja gubitak mase (%)<1	0,244	Vlažnost=	1,39
		$\rho_{zsp}=$	2,88

Tablica 7. Prosijavanje agregata 4-8 mm

Frakcija agregata 4-8 mm			
Ukupna masa M1(g)=		1100	
Suha masa uzorka nakon ispiranja M2(g)=		1095,3	
Suha masa čestica uklonjenih ispiranjem M1-M2=		4,7	
Veličina otvora sita(mm)	Masa preostalog materijala na situ Ri	Postotak preostalog materijala na situ (Ri/M1)x100	Kumulativni postotak prolaska kroz sito 100-(Ri/M1)x100
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	107,6	9,78	90,22
4	968,8	88,07	2,15
2	15,2	1,37	0,77
1	0,3	0,03	0,75
0,5	0,2	0,02	0,73
0,25	0,2	0,02	0,71
0,125	0,1	0,01	0,70
0,063	0,1	0,01	0,69
Materijal u posudi P:	0,1		
Postotak sitnih čestica koje prolaze kroz sito 0,063mm=	0,44		
$\sum Ri+P=$	1092,5	Apsorpcija =	0,34
Valjanost ispitivanja gubitak mase (%)<1	0,256	Vlažnost=	0,24
		$\rho_{zsp}=$	2,76

Tablica 8. Prosijavanje agregata 8-16 mm

Frakcija agregata 8-16 mm			
Ukupna masa M1(g)=		1500	
Suha masa uzorka nakon ispiranja M2(g)=		1492,3	
Suha masa čestica uklonjenih ispiranjem M1-M2=		7,7	
Veličina otvora sita(mm)	Masa preostalog materijala na situ Ri	Postotak preostalog materijala na situ (Ri/M1)x100	Kumulativni postotak prolaska kroz sito 100-(Ri/M1)x100
31,5	0,0	0,0	100,0
16	247,5	16,5	83,5
8	1171,6	78,1	5,4
4	68,7	4,6	0,8
2	0,9	0,1	0,8
1	0,2	0,0	0,7
0,5	0,1	0,0	0,7
0,25	0,1	0,0	0,7
0,125	0,0	0,0	0,7
0,063	0,0	0,0	0,7
Materijal u posudi P:	1,3		
Postotak sitnih čestica koje prolaze kroz sito 0,063mm=	0,6		
$\sum Ri+P=$	1490,4	Apsorpcija =	0,67
Valjanost ispitivanja gubitak mase (%)<1	0,127	Vlažnost=	0,13
		$\rho_{zsp}=$	2,85



Slika 17. Krivulje prosijavanja agregata

4.5.6 Superplastifikator

Superplastifikatori su kemijski dodaci koji betonu uobičajene konzistencije uz istu količinu vode daju ekstremnu obradivost, ili omogućavaju drastično sniženje količine vode uz istu obradivost. Smanjenjem količine vode u betonu, superplastifikatori su značajno doprinijeli smanjenju poroznosti betona, te općenito pridonijeli povećanju tlačne čvrstoće i trajnosti betona.

Dugo vremena je poznato da je čvrstoća betona obrnuto proporcionalna vodocementnom faktoru (što je vodocementni faktor niži, čvrstoća betona je veća).

Uloga vode, kao osnovnog sastojka betona, je dvojaka:

- daje betonu zahtijevana reološka svojstva
- sudjeluje u hidrataciji cementa.

Međutim, idealan beton bi trebao sadržavati minimalnu količinu vode potrebnu za razvijanje maksimalne čvrstoće cementa te ujedno i biti dovoljno obradljiv pri ugradnji. Višak vode u betonu se neće nikada iskoristiti u procesu hidratacije, već će uzrokovati poroznost unutar hidratizirane cementne paste te ujedno umanjiti kako mehanička, tako i trajnosna svojstva.

Superplastifikatori su snažni disperzivni agensi. Poput svih disperzivnih agenasa u vodenim otopinama, oni se najprije adsorbiraju na površinu čestica cementa. Adsorpcija negativno nabijenih čestica superplastifikatora je moguća zbog prisutnosti kalcijevih iona u cementu. Način djelovanja superplastifikatora je takav da tek malo smanjuju površinsku napetost tekuće faze, te zbog jačeg negativnijeg naboja na površini, djeluju jače dispergirajuće na čestice. Čestice postaju pokretljivije, te se oslobođena voda ponaša kao mazivo u mješavini, te time povećava obradljivost

U eksperimentalnom dijelu rada korišten je superplastifikator **BASF GLENIUM SKY 510**. To je superplastifikator novije generacije na osnovi polimera polikarboksilnog etera (PCE), dizajniran za transportni beton. Preporučena količina doziranja iznosi **0,8 do 1,5 %** od ukupnog sadržaja veziva. Dodaje se u betonsku smjesu nakon što je dodano 80% vode, odnosno kada se namoče čvrsti materijali.

Tablica 9. Tehnički podaci za superplastifikator

Tehnički podaci/Tipična svojstva BASF GLENIUM SKY 510	
Izgled	Homogen, smeđa tekućina
Specifična težina kod 20°C	1,060 ± 0,020 g/cm ³
pH vrijednost	5 - 7
Sadržaj iona klorida	< 0,1 %
Sadržaj alkalija (ekvivalentno Na ₂ O)	< 1,0 %

4.5.7 Stabilizator smjese (viscosity modifying agent - VMA)

Stabilizator smjese je kemijski dodatak koji povećava kohezivnost, ali ne utječe znatno na tečnost betona. Ovaj dodatak se koristi kod samozbijajućih betona da bi se umanjio utjecaj grešaka prilikom određivanja vlažnosti sastojaka betona. Tako samozbijajući beton postaje manje osjetljiv na male varijacije vlažnosti agregata i filera. Dodavanje VMA ne bi trebalo zamijeniti pravilno projektiranje sastava samozbijajućeg betona i detaljan odabir komponenata. Još važnija uloga VMA je da poveća viskoznost betonu i tako spriječi segregaciju, izdvajanje vode i blokiranje.

U eksperimentalnom dijelu rada se koristio stabilizator smjese **BASF RheoMATRIX 100**. RheoMATRIX se dozira između **0,1 – 1,5 %** na masu finih čestica (<0,1mm). Optimalno djelovanje i svojstva postižu se u kombinaciji sa GLENIUM superplastifikatorima.

Tablica 10. Tehnički podaci za VMA

Tehnički podaci/Tipična svojstva BASF <i>RheoMATRIX 100</i>	
Izgled	Homogen, smeđa tekućina
Specifična težina kod 20°C	1,00 - 1,02 g/cm ³
pH vrijednost	6 - 9
Sadržaj iona klorida	< 0,1 %



Slika 18. Usporedno betoniranje običnog i betona s dodatkom VMA

4.5.8 Polipropilenska vlakna

Polipropilenska se vlakna mogu proizvoditi raznih duljina i promjera. Polipropilen je polimer iz grupe plastomera ili termoplasta. Svojstva ove grupe polimera zagrijani do temperature omekšanja postaju plastična i prikladna za obradu ne mijenjajući pri tome svoju kemijsku strukturu niti mehanička svojstva. Ona se proizvode postupkom ekstrudiranja. To je postupak kontinuiranog protiskivanja zagrijanog i omekšanog polimera kroz mlaznicu. Na kraju mlaznice je usnik kojim se formira željeni oblik polimera, tj. željeni oblik i veličina poprečnog presjeka i izgled površine vlakna.

Polipropilenska se vlakna proizvode:

- kao monofilamentna, različitih poprečnih presjeka (kružna, elipsasta, x presjeka) i različite obrade površine, glatka, valovita i
- kao mrežica (fibrilirana), koju čine veliki broj vlakana vrlo malog promjera.

Vlakna se sastoje od 100% polipropilena sa specijalnim omotačem koji poboljšava obradivost betona, osigurava dobru homogenost mase, a u otvrdnutom betonu poboljšava prijanjanje vlakana i cementa.

Primjenjuju se u mlaznom betonu za primarnu tunelsku oblogu posebno u II. tunelskoj kategoriji umjesto armaturnih mreža, betone sekundarne obloge tunela za povećanje vatrootpornosti i smanjenje mikropukotina u mladom betonu, industrijske podove, estrihe, montažne elemente, podrumске zidove, zaštitni beton, vatrootporni beton i sl.

Prednosti primjene polipropilenskih vlakana u betonu su sljedeće:

- jednostavno se doziraju
- povećavaju žilavost betona
- povećavaju otpornost na požar
- nevidljiva su na betonskim površinama
- smanjuju mikropukotine, posebno kod mladog betona, a s tim u vezi
- povećavaju trajnost betona i armature
- homogeno se raspodjeljuju u betonu beton s vlaknima ima dobra svojstva pumpabilnosti
- proizvode se u svim duljinama i promjerima
- u betonu mikroarmiranom betonu povećavaju otpornost betona na abraziju, koroziju, habanje i udarce.[12]

U mješavini SCC-FMP primijenjena su fibrilirana vlakna duljine 12 mm.



Slika 19. Polipropilenska fibrilirana vlakna

4.6 Metode ispitivanja

4.6.1 Metode ispitivanja sastavnih komponenti

4.6.1.1 Prosijavanje agregata

Ispitivanje granulometrijskog sastava agregata i određivanje količine sitnih čestica prema normi HRN 933-1 (*Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata-1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sisanja*)

Područje primjene

- ova norma specificira metodu koja se koristi sitima kako bi se procijenila količina sitnih čestica i odredio granulometrijski sastav agregata
- agregat koji se koristi je veličine zrna do 63mm, a može biti prirodan ili drobljeni, uključujući i lagani agregat.

Oprema za ispitivanje

- svi uređaji koji se koriste u normi HRN 933-1 trebaju biti u skladu s normom HRN EN 932-5 (Ispitivanje općih svojstava agregata – Uobičajena oprema i umjeravanje), osim ako nije zahtijevano drugačije
- oprema koja se koristi u normi:
 - a) Sita za prosijavanje sa standardnim otvorima prema normi HRN EN 933-2
 - b) Sušionik- podešen da održava temperaturu na (110 ± 5) °C
 - c) oprema za ispiranje agregata
 - d) vaga-s točnošću $\pm 0,1\%$
 - e) posude
 - f) četke
 - g) stroj za sisanje (ručni ili mehanički).

Priprema uzoraka

Uzorci se uzimaju i pripremaju u skladu s normom HRN EN 932-2 (ispitivanja općih svojstava agregata –Metode smanjivanja).

Agregat treba osušiti na temperaturi (110 ± 5) °C do konstante mase, pustiti ga da se ohladi, izvagati ga i zabilježiti kao masu M_1 .

Tablica 11. Minimalne mase potrebne za ispitivanje ovisno o veličini zrna agregata

Promjer zrna (D) maksimum(mm)	Masa uzorka minimum (kg)
63	40
31,5	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

Postupak ispitivanja

a) mokro sijanje (ispitivanje količine sitnih čestica agregata)

- pripremljene uzorke frakcija agregata treba staviti u posude napunjene vodom i držati ga pod vodom ($24 \pm 0,5$)h
- uzorak prosijavamo kroz sito od 0,063 mm
- postavlja se zaštitno sito od 1 ili 2 mm
- prosijavanje obavljamo ispiranjem sve dok voda koja prolazi kroz sito od 0,063 mm ne postane bistra
- sadržaj koji se zadržao na situ od 0,063 mm treba osušiti do konstantne mase pustiti ga da se ohladi, izvagati i zabilježiti kao masu M_2
- suhu masu sitnih čestica uklonjenih ispiranjem trebamo također zabilježiti kao masu $M_1 - M_2$
- postupak treba ponoviti za sve frakcije agregata koje ispitujemo.

b) suho sijanje (ispitivanje granulometrijskog sastava agregata)

- isprani i osušeni materijal treba staviti na red sita poredanih prema HRN EN 933-2
- red sita treba tresti (ručno ili mehanički)
- nakon toga treba skloniti sita, jedno po jedno i treba se uvjeriti da materijal nije izgubljen
- proces prosijavanja može se smatrati gotovim kad se materijal koji se nalazi na pojedinim sitima, ne mijenja više od 1% tijekom jedne minute sijanja
- nakon prosijavanja važu se ostaci na pojedinim sitima, označavaju se sa R_1, R_2, R_3, R_i itd.,
- ako nakon suhog sijanja primijetimo da su određene čestice prošle kroz sva sita u posudu na dnu, izvažemo ga i zabilježimo kao masu P.

Obrada rezultata

- nakon prosijavanja važu se ostaci masa na pojedinim sitima, zabilježavaju se na prilog norme i računa se njihov postotak od ukupne mase M_1 .
- izračunava se kumulativni postotak prolaza zrna agregata kroz svako pojedino sito.
- izračunava se postotak sitnih čestica prema izrazu:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100; [\%]$$

gdje je:

- M1 - masa suhog uzorka
- M2 - masa suhog uzorka nakon ispiranja
- P - masa čestica koje su ostale na dnu posude



Slika 20. Uređaj za prosijavanje agregata

4.6.1.2 Ispitivanja gustoće agregata i apsorpcije vode

Područje primjene

Ovom normom se ispituje, te određuje gustoća agregata i upijanje vode. Postoje dvije metode koje se koriste:

Metoda sa žičanom košarom – za agregat veličine zrna od 31,5 mm do 63 mm, a može se koristiti i za agregat od 4 mm do 31,5 mm

Metoda pomoću piknometra – za agregat veličine zrna između 0,063 mm i 4 mm te agregat između 4 mm i 31,5 mm

Oprema za ispitivanje:

1. Sušionik za agregat – podešen tako da zadržava temp. na 110 ± 5 °C
2. Vaga – s točnošću od $\pm 0,1\%$
3. Posuda s vodom – termostatski kontrolirana na temp. 22 ± 5 °C
4. Termometar – s točnošću od ± 5 °C
5. Sita za prosijavanje – 0,063 mm; 4 mm; 16 mm
6. Posude – koje se mogu grijati u sušioniku bez promjene mase
7. Suhe, mekane krpe za upijanje
8. Oprema za ispiranje
9. Zaporni sat.

Oprema za metodu piknometrom

1. Piknometar – između 1000 i 5000 ml za čestice agregata od 4 mm do 31,5 mm te između 500 i 5000 ml za čestice agregata od 0,063 mm do 4 mm
2. Metalni kalup – u obliku krnjeg stošca, (40 ± 3 mm) na vrhu i (90 ± 3 mm) na dnu, te visine (75 ± 3 mm). Minimalna debljina metalnog kalupa je 0,8 mm
3. Metalna šipka – masa (340 ± 15) g; promjer (25 ± 3) mm
4. Plitka posuda – od materijala koji ne apsorbira vodu s površinom ne manjom od $0,1 \text{ m}^2$ i rubom ne manjim od 50 mm visine
5. Izvor toplog zraka – npr. fen ili plin.

Oprema za metodu pomoću žičane košare

1. Žičana košara – otporna na koroziju
2. Posuda za vodu – treba sadržavati vodu temperature (22 ± 3) °C. Između rubova posude i žičane košare koja je u njoj treba biti razmak od najmanje 50 mm.

Priprema uzorka

Agregat od 0,063 do 4 mm

- Uzorci agregata se uzimaju u skladu s normom HRN EN 932-1 (Ispitivanje općih svojstava agregata – 1. dio: Metode uzorkovanja), a smanjuju se u skladu s normom HRN EN 932-2 (Ispitivanja općih svojstava agregata – 2. dio: Metode smanjivanja)

- Masa uzorka ne smije biti manja od 1 kg
- Uzorak treba mokro prosijati na sitima od 4 mm i 0,063 mm kako bi se uklonile sitnije i krupnije čestice
- Nakon toga uzorak treba ostaviti da se ocijedi
- Uzorak se zatim treba mokro prosijati na sitima od 31,5 mm i 4 mm kako bi se uklonile sitnije i krupnije čestice. Nakon toga uzorak treba ostaviti da se ocijedi.

Tablica 12. Minimalne mase potrebne za ispitivanje ovisno o veličini zrna agregata

Max. veličina zrna (mm)	Min. masa uzorka (kg)
31,5	5
16	2
8	1

Postupak ispitivanja

Metoda piknometra

(Agregat od 0,063 do 4 mm)

1. Pripremljeni uzorak treba uroniti u vodu temperature $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ i ostaviti ga da se natapa $(24 \pm 0,5)$ h. Na kraju natapanja agregat treba premjestiti u piknometar.
2. Agregat zatim treba prelitati vodom i lagano promiješati dok svi mjehurići zraka ne izađu na površinu.
3. Tada napunimo piknometar vodom do vrha (označenog nivoa poznatog volumena) i pokrijemo ga tako da ne zarobimo zrak u posudu.
4. Osušimo piknometar izvana i izvažemo ga kao masu M_2 . Zabilježiti temperaturu vode.
5. Tada napunimo piknometar vodom do vrha i pokrijemo ga poklopcem kao prije, osušimo izvana i izvažemo kao masu M_3 . Zabilježimo temperaturu vode. Razlika u temperaturi kod vaganja masa M_2 i M_3 ne smije biti veća od $2 ^\circ\text{C}$.
6. Natopljeni uzorak, zatim, raširimo po površini plitke posude u sloju ujednačene debljine i izložimo struji toplog zraka (sušionik, fen ili plin).
7. Sušimo uzorak sve dok površinska vlažnost ne ispari.
8. Tada se kalup, u obliku krnjeg stošca, položi širom bazom na podlogu, napuni pijeskom i nabije šipkom sa 25 udaraca. Ako pijesak ima još površinske vlage, nabijeni uzorak će zadržati oblik stošca nakon što se kalup dignu.
9. Sušenje treba nastaviti, a ispitivanje ponavljati sve dok se zbijeni uzorak nakon podizanja kalupa ne počne osipati kako je prikazano na Slici 1, tj. u Aneksu F norme (zasićen površinski suh).
10. Zasićen površinski suh agregat treba se izvagati i zabilježiti kao M_1 .
11. Na kraju postupka uzorak treba osušiti u sušioniku na temperaturi od $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sve do konstantne mase i masu zabilježiti kao M_4 .

Metoda žičane košare

(Agregat od 4 do 31,5 mm)

1. Pripremljeni uzorak treba uroniti u vodu temperature $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ i to $(24 \pm 0,5)$ h.
2. Nakon što se agregat ocijedio, treba ga premjestiti u žičanu košaru i potopiti u vodu temperature $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ koja se nalazi u plastičnoj prozirnoj posudi. Agregat mora biti uronjen u vodu barem 50 mm.
3. Odmah nakon uranjanja uzorka, mora se osloboditi zarobljeni zrak i to tako da se žičana košara podiže na visinu od 25 mm iznad dna posude i pušta da slobodno padne na dno, 25 puta, jednom u sekundi.
4. Uzorak se važe pod vodom, a masa se zabilježava kao M_2 . Treba zabilježiti i temperaturu vode.
5. Zatim se agregat izvadi iz košare i premjesti na apsorbirajuću krpu, a košara se vrati u posudu i izvaže pod vodom.
6. Rezultat se zabilježi kao masa M_3 . Zabilježi se temperatura vode.
7. Agregat se premjesti na atmosferski zrak dalje od direktnog Sunčevog svjetla ili bilo kakvog izvora topline, te se ostavi da se suši.
8. Agregat mora biti zasićen površinski suh. Tako zasićen površinski suh agregat se stavi u posudu i izvaže kao masa M_1 .
9. Na kraju postupka agregat se stavlja u sušionik, te se suši na temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do konstantne mase, važe i zabilježava kao masa M_4 .

Obrada rezultata

Prividna gustoća čestica:

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}; [\text{Mg/m}^3]$$

Gustoća suhих čestica:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}; [\text{Mg/m}^3]$$

Gustoća zasićenih površinski suhих čestica:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}; [\text{Mg/m}^3]$$

Upijanje vode (kao postotak od suhe mase) nakon uranjanja od $24 \pm 0,5$ h:

$$\text{WA}_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}; [\text{Mg/m}]$$



a) Piknometar



b) Sušionik za sušenje agregat



c) Vaga s žičanom košarom



d) Stožac s šipkom za određivanje zasićenog površinski suhog agregata

Slika 21. Uređaji za ispitivanje gustoće i vlažnosti agregata

4.6.2 Metode ispitivanja betona u svježem stanju

4.6.2.1 Ispitivanje gustoće svježeg betona

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12350-6. Norma specificira metodu određivanja gustoće zbijenog svježeg betona u laboratoriju i na gradilištu.

Metoda nije primjenjiva za veoma kruti beton koji ne može biti zbijen običnim vibriranjem.

Oprema za ispitivanje:

- a) Spremnik (lonac) - najmanja dimenzija spremnika treba biti barem četiri puta veća od najveće nazivne veličine krupnog agregata u betonu, ali ne manja od 150 mm. Volumen spremnika ne smije biti manji od 5 l
- b) Uređaj za zbijanje betona - vibro-stol: s najmanjom frekvencijom od približno 40 Hz (2400 ciklusa u minuti)
- c) Vaga – s točnošću od $\pm 0,1 \%$
- d) Ravni nožasti strugač – 100 mm duži od unutrašnje dimenzije na vrhu
- e) spremnika
- f) Grabilica i gladilica – za punjenje spremnika i zaglađivanje vrha
- g) Spremnik za premješavanje betona
- h) Kvadratna lopata – za premješavanje betona.

Priprema uzoraka

Uzorci se pripremaju u skladu s normom HRN EN 12350-1 (Ispitivanje svježeg betona – 1. dio: Uzorkovanje).

Uzorak nakon vađenja iz miješalice treba biti ponovno izmiješan u posudi za premješavanje.

Postupak ispitivanja

1. Spremnik se kalibrira prema Prilogu A norme da se dobije njegov volumen (V).
2. Izvaži se spremnik, odredi masa (m_1) i zabilježi dobivenu vrijednost.
3. Zatim se spremnik puni betonom i zbija ručno (pomoću šipke), pervibratorom ili vibro-stolom.
4. Nakon što je gornji sloj zbijen, poravna se površina betona s vrhom spremnika. Skine se višak s površine i ruba spremnika nožastim strugačem i očisti vanjska strana spremnika.
5. Izvaži se spremnik zajedno s betonom da bi se odredilo masu (m_2) i zabilježi se vrijednost.

Obrada rezultata

Gustoća svježeg betona računa se prema izrazu:

$$\frac{m_2 - m_1}{V} \rho_b = ; [\text{kg/m}^3]$$

Gdje je:

- ρ_b - gustoća svježeg betona; $[\text{kg/m}^3]$
 m_1 - masa spremnika; $[\text{kg}]$

- m_2 - masa spremnika i masa uzorka betona u spremniku; [kg]
 V - volumen spremnika; [m³]

Gustoću svježeg betona se zaokružuje na najbližih 10 kg/m³.

4.6.2.2 Ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12350 – 7. Ova norma specificira metodu određivanja sadržaja zraka u svježem betonu, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće, te maksimalne veličine zrna agregata od 63 mm.

Oprema za ispitivanje:

- a) Porometar - može biti volumena od 1000 cm³ do 8000 cm³, a sastoji se od posude, poklopca, mjerača tlaka i zračne pumpe
- b) Vibrirajući stol - za zbijanje uzroka u porometru
- c) Lopatica – za punjenje posude porometra
- d) Zidarska žlica
- e) Lopata (četvrtasta) – za miješanje uzorka
- f) Boca za vodu s cjevčicom
- g) Zaporni sat.

Priprema uzoraka

Uzorak se uzima u skladu s normom HRN EN 12350-1 (Ispitivanje svježeg betona – 1. dio: Uzorkovanje).

Prije nego što uzorak stavimo u porometar treba ga promiješati.

Nakon što se porometar napuni, stavlja ga se na vibrirajući stol kako bi se dobila kompaktnost.

Postupak ispitivanja

1. Nakon vibriranja posuda porometra se može zatvoriti poklopcem.
2. Kroz jedan otvor na poklopcu nalije se voda i napuni se prostor između posude i poklopca.
3. Poslije punjenja otvor se zaklopi i u porometar se ubacuje zrak.
4. Nakon nekoliko sekundi, pošto se zrak prilagodio na temperaturu unutar porometra, treba stabilizirati kazaljku na manometru na početnom (nultom) položaju, dodavajući ili otpuštajući zrak iz porometra.
5. Zatim se svi ventili na uređaju zatvore, a otvori se glavni zračni ventil i nakon nekoliko sekundi očita se vrijednost koju pokazuje kazaljka na manometru.

6. Ta vrijednost predstavlja sadržaj pora u svježem betonu.



Slika 22. Uređaj za ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu

4.6.2.3 Metoda rasprostiranja

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12350-8. Ova norma specificira metodu određivanja sposobnosti punjenja i viskoznosti samozbijajućih betona, napravljenog od agregata normalne težine i gustoće, te maksimalne veličine zrna agregata od 40 mm.

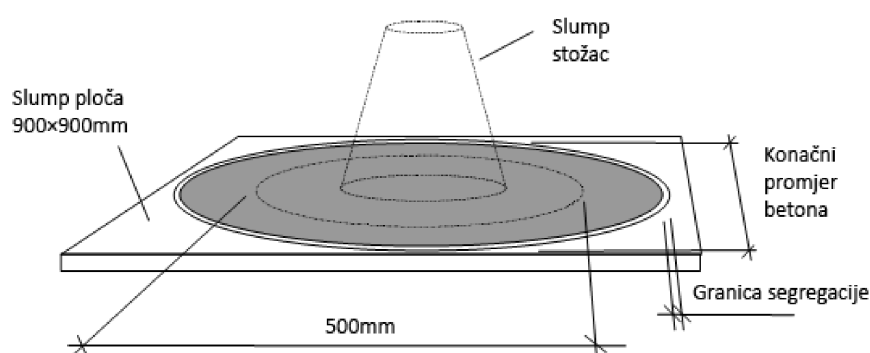
Oprema za ispitivanje

Za izvođenje ispitivanja potrebno je sljedeće:

- Ravna ploča min. dimenzija 90×90 cm, minimalne debljine 2mm. Površina ploče mora biti ravna, glatka i od materijala koji neće upijati neku od komponenata betona. Centar ploče mora biti obilježen i oko njega moraju biti opisane dvije kružnice. Jedna promjera 20 cm, na koju postavljamo kalup s betonom, te drugi promjera 50 cm, koji služi za mjerenje t_{500} vremena.
- Kalup oblika krnjeg stošca. Gornjeg promjera 10 cm, donjeg promjera 20 cm i visine 30 cm.



Slika 23. Uređaj za ispitivanje konzistencije betona

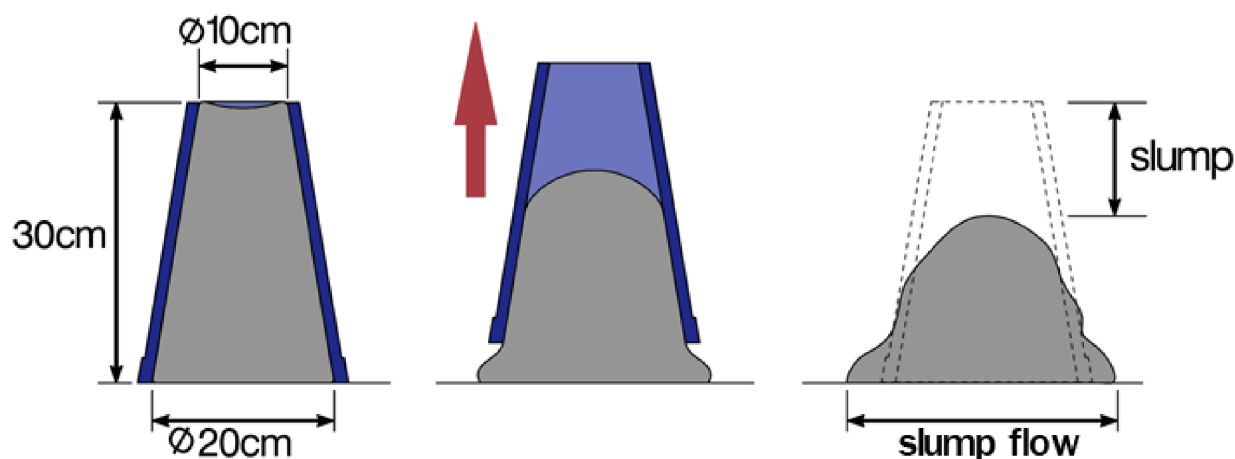


Slika 24. Dimenzije uređaja za ispitivanje konzistencije betona

Postupak ispitivanja

1. Ploča treba biti postavljena horizontalno na podu, te pravilno nivelirana. Kružnica promjera 50 cm mora biti jasno vidljiva.
2. Navlažiti površinu ploče, ali ne smije biti slobodne vode na njoj.
3. Postavi se stožac na sredinu ploče, tj. na kružnicu 200 mm promjera.
4. Držeći stožac pritisnuto uz ploču, napuni se betonom, bez nabijanja ili vibriranja.
5. Nakon što očistimo beton koji smo eventualno prolili po ploči prilikom ulijevanja u stožac, dignemo stožac vertikalno gore u jednom potezu i tako omogućimo betonu da istekne iz kalupa.
6. Čim odignemo stožac počinjemo mjeriti vrijeme (t_{500}) potrebno betonu da dođe do kružnice promjera 50 cm i to u bilo kojoj točki.

7. Nakon što beton prestane teći, mjeri se ukupan promjer betona, tako što se prvo izmjeri najveći promjer, te onda promjer okomit na najveći. Ako je došlo do segregacije, zabilježimo je i izmjerimo njenu vrijednost (prema slici). Potrebno je pregledati distribuciju krupnog agregata, tj. da li je krupni agregat ostao u središtu uzorka ili su krupna zrna tekla skupa sa pastom i mortom, te došla do samog ruba uzorka.



Slika 25. Tijek ispitivanja rasprostiranja

Obrada rezultata

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

Gdje je:

SF – Razred rasprostiranja [mm]

d_1 – najveći promjer od rasprostiranja [mm]

d_2 – najveći okomiti promjer na d_1 [mm]

Tablica 13. Uvjeti za konzistenciju betona metodom rasprostiranja

Razred	Tečenje betona (mm)	Primjena
SF1	550-650	Nearmirani i lagano armirani elementi. Elementi koji nisu velikih dimenzija (širine i dužine) i ne zahtijevaju veliko tečenje betona
SF2	660-750	Prikladan za većinu radova (stupovi, zidovi)
SF3	760-850	Za elemente sa gusto postavljenom armaturom, složenog oblika

Konačni promjer karakterizira tečnost betona tj. njegovu posmičnu čvrstoću, a vrijeme t_{500} (0.8-3.8 sek.) karakterizira viskoznost. Kod betona normalne konzistencije, dolazi samo do slijeganja stošca (slika gore), zbog velike posmične čvrstoće. Kod samozbijajućih betona, posmična čvrstoća je mala te dolazi do tečenja betona i povećanja promjera rasprostiranja betona (slika gore). Za samozbijajući beton, zahtijeva se rasprostiranje od oko 700mm, ali sa stabilnom smjesom bez segregacije i izdvajanja vode.

Tabela 14. Razredi viskoznosti

Razred	t_{500} (s)	Primjena
VS1	<2,0	Elementi s guto posatavljenom aramturom, horizontalni elementi, elemnti složenog poprečnog presjeka i oblika (velikih širina i dužina)
VS2	≥2,0	Prikladan za većinu radova (zidovi, stupovi)

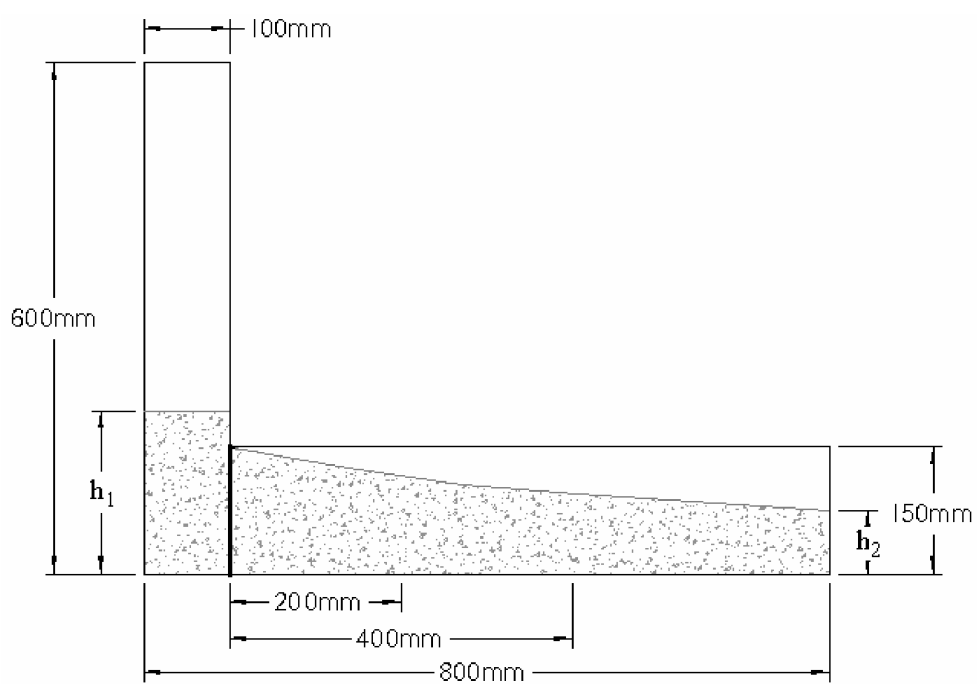
4.6.2.4 L-kutija

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12350-10. Ova norma specificira metodu određivanja sposobnosti prolaznosti samozbijajućeg betona kroz uske otvore između dvije ili tri armaturne šipke bez segregacije i blokiranja.

Oprema za ispitivanje

Osnovni dio je kalup u obliku slova L. Za izradu kalupa može se koristiti ljepljeno drvo, ali bolja izvedba je od čelika. Kalup mora biti čvrste konstrukcije, površine čiste, ravne, bez hrđe ili ostatka cementne paste. Volumen dijela u koji se ulijeva beton je 12,6 – 12,8 litara (visina 0,60 × širina 0,20 × dubina 0,10 = 12 litara + 0,6÷0,8 litara dodatka iza vrata). Vertikalni i horizontalni dio kalupa odjeljeni su vratima koja se podižu. Iza vrata se nalaze armaturne šipke, u prvoj verziji dvije glatke šipke Ø12mm razmaknute 59mm, a u drugoj tri glatke šipke Ø12 razmaknute 41mm. Izmjena armaturnih šipki treba biti omogućena. Na horizontalnom dijelu kalupa trebaju biti označena mjesta udaljena od 200 i 400 mm od vrata. Ona služe da bi se izmjerila vrijeme koje je potrebno betonu da uslijed tečenja dođe do tih markiranih udaljenosti. Izmjerena vremena t_{200} i t_{500} su pokazatelj brzine tečenja betona.



Slika 26. Dimenzije L-kutije



Slika 27. L-kutija

Postupak ispitivanja

1. Kalup se postavi na čvrstu i horizontalnu podlogu
2. Spusti se pregrada između horizontalnog i vertikalnog dijela kalupa, te se ulije beton u kalup i pusti da miruje 60 ± 10 s. Vizualno se provjeri i zabilježi da li je došlo do segregacije.
3. Podigne se pregrada i pusti beton da isteče u horizontalni dio, pri tome mjereći vrijeme T_{20} i T_{50} .
4. Nakon što se zaustavi tečenje betona, izmjere se visine H_2 i H_1 (slika 22)

Obrada rezultata

Sposobnost prolaza betona izračuna se po formuli:

$$P_A = \frac{H_2}{H_1}$$

Tablica 15. L-kutija razredi

Razred	P_A
PA1	$\geq 0,80$ (test s 2 šipke)
PA2	$\geq 0,80$ (test s 3 šipke)

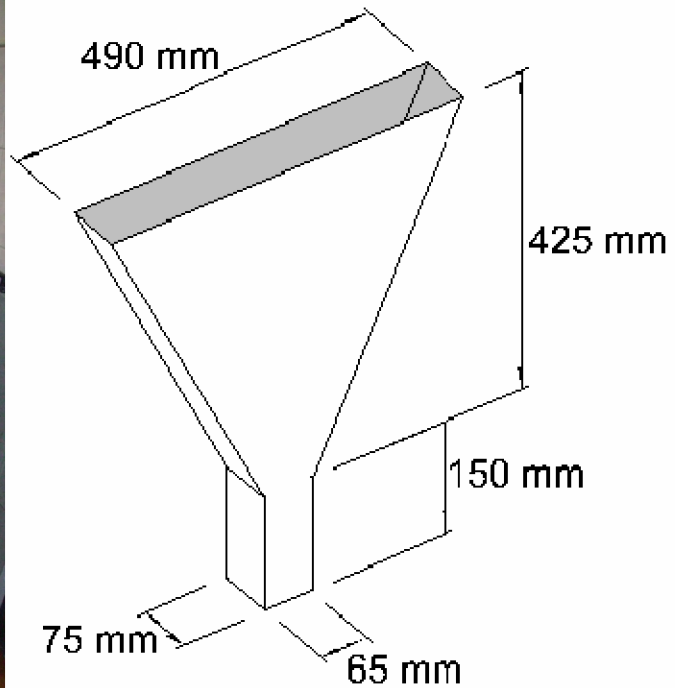
4.6.2.5 V-lijevak

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12350-9. Ova norma specificira metodu ispitivanja viskoznosti i punjenja samozbijajućih betona.

Oprema za ispitivanje:

- V-lijevak s dimenzijama prikazanim na slici 28
- štoperica.



Slika 28. Izgled i unutarnje dimenzije V-lijevka

Postupak ispitivanja:

1. Postavi se V-lijevak na horizontalnu i ravnu površinu.
2. Navlaže se unutarnje stjenke sa vlačnom krpom, ne smije biti slobodne vode na stjenkama.
3. Zatvore se vrata na dnu kalupa, te se postavi posuda (>12l) u koju će beton teći.
4. Napuni se V-lijevak sa betonom bez bilo kakvog zbijanja.
5. Odstrani se višak betona sa vrha posude.
6. Nakon što je prošlo 10 sekundi, otvaraju se vrata i pokreće mjerenje vremena.
7. Kada beton isteče zaustavi se mjerenje vremena. Da bi znali kada je sav beton istekao, za vrijeme tečenja betona gledamo u unutarnji do lijevka i kada se kroz lijevak vidi na drugu stranu zaustavimo vrijeme. Izmjereno vrijeme je vrijeme tečenja t_v kroz V-lijevak.

Tablica 16. V-lijevak razredi

Razred	Vrijeme tečenja [s]
VF1	<9,0
VF2	9,0 - 25,0

4.6.3 Ispitivanje betona u očvrslom stanju

4.6.3.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12390-3. Ova norma specificira metodu određivanja tlačne čvrstoće uzoraka očvrslulog betona.

Priprema uzoraka

- Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2 (*Ispitivanje očvrslulog betona – 2.dio: Izradba i njegovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće*)
- Uzorci su oblika kocke ili cilindra, a dimenzije su određene normom HRN EN 12390-1 (*Ispitivanje očvrslulog betona – 1.dio: Oblik, dimenzije i drugi zahtjevi za uzorke i kalupe*)
- Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Oprema za ispitivanje

- Preša – podešena u skladu s normom HRN EN 12390-4 (*Ispitivanje očvrslulog betona – 4. dio: Uređaji za ispitivanje tlačne čvrstoće*).

Postupak ispitivanja

1. Prije postavljanja uzoraka u prešu, treba se očistiti površina gdje će se uzorak pozicionirati.
2. Uzorci kocke se u prešu postavljaju okomito na smjer ugradnje i moraju se postaviti u sredinu preše (s točnošću od $\pm 1\%$), kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno.
3. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i mora biti između 0,2 MPa/s i 1,0 MPa/s.
4. Maksimalno opterećenje (F) pri kojem je došlo do sloma se zabilježi kao rezultat pokusa.
5. Ako je došlo nezadovoljavajućeg tipa sloma prema normi, treba ga zabilježiti.
6. Uzroci nezadovoljavajućeg tipa sloma mogu biti:
 - a) nedovoljna pažnja kod postupka ispitivanja, osobito prilikom centriranja uzorka,
 - b) kvar preše.

Obrada rezultata

- Tlačna čvrstoća betona se računa prema izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

- Gdje je:
 - f_c – tlačna čvrstoća betona [N/mm²]
 - F – maksimalno opterećenje pri slomu [N]
 - A_c – površina uzorka [mm²]

4.6.3.2 Ispitivanje savojne čvrstoće betona

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12390-5. Ova norma specificira metodu određivanja savojne čvrstoće betona.

Priprema uzoraka

- Uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2 (*Ispitivanje očvrstnalog betona – 2.dio: Izradba i njegovanje uzoraka za ispitivanje čvrstoće*)
- Uzorci su oblika prizme, a dimenzije su određene normom HRN EN 12390-5
- Prije ispitivanja s uzorka se briše površinska vlažnost.

Oprema za ispitivanje

- Preša – podešena u skladu s normom HRN EN 12390-5 za ispitivanje savojne čvrstoće očvrstnalog betona.

Postupak ispitivanja

1. Prije postavljanja uzoraka u prešu, treba postaviti ležajeve na propisanu udaljenost.
2. Uzorci prizme se u prešu postavljaju tako da ih centriramo na ležajeve, okomito na smjer kako bi opterećenje koje se nanosi bilo ujednačeno.
3. Uzorak se opterećuje sa dvije koncentrirane sile na razmaku od 100 mm.
4. Opterećenje se mora nanositi jednoliko, bez udara i mora biti između 0,04 i 0,06 MPa/s.



Slika 29. Uređaj za ispitivanje mehaničkih svojstava betona

4.6.3.3 Ispitivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Područje primjene

Prema normi HRN EN 12504-4. Ova norma specificira metodu za određivanje brzine širenja impulsa ultrazvučnih longitudinalnih valova u betonu koja se upotrebljava za brojne primjene.

Priprema uzoraka

Nakon njegovanja uzoraka u trajanju od 28 dana u vlažnoj komori.

Oprema za ispitivanje

Uređaj se sastoji od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka dolaska na prijemni pretvarač. Mjerenje brzine omogućuje kalibracijska šipka.

Postupak ispitivanja

1. Površine betona na koje se postavljaju lica pretvarača moraju biti čista i dovoljno glatka.
2. Za osiguranje dobrog akustičnog spoja između betona i pretvarača površina se premaže jednim od medija za spajanje kao što je tovatna mast, mazivo, mekani sapun i kaolinska/glicerolska pasta.
3. Unošenje podataka u uređaj o duljini ispitnog uzorka.

4. Pretvarači se postavljaju na mjesta koja su premazana medijem za spajanje uz lagano pritiskanje.



Slika 30. Ultrazvučni uređaj TICO Proceq Testing Instruments

4.6.3.4 Ispitivanje kapilarnog upijanja

Područje primjene

Prema normi DIN-U.M8.300. Ova norma specificira metodu mjerenja kapilarnog upijanja vode homogenih građevinskih materijala bez podloga i građevinskih materijala na podlogama.

Priprema uzoraka

Nakon njegovanja uzoraka u trajanju od 28 dana u vlažnoj komori, uzorci se osuše u sušioniku na $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ do stalne mase. Nakon sušenja uzoraka do stalne mase uzorci drže 24h na relativnoj vlažnosti iznad 90%.

Oprema za ispitivanje

Za mjerenje se upotrebljava ova oprema:

- posuda za vodu s rešetkastim podešavajućim nosačem
- spužva za uklanjanje grubo vezane vlage
- sredstvo za brtvljenje
- vaga točnosti $d=0,01\text{g}$
- štoperica.

Postupak ispitivanja

1. Uzorci se sa strane brtve na minimalnoj visini od 10 mm.
2. Vodoupojna površina uranja se u posudu s vodom stabilizirane temperature, na dubini 2 do 5 mm.
3. Uzorci se uranjaju koso u odnosu na vodeno lice kako bi se onemogućilo stvaranje mjehurića zraka.
4. Početna mjerenja obavljaju se u vremenskim intervalima od 1, 5, 15, i 30 min na temelju čega se određuju ostali vremenski intervali.
5. Određena vrijednost (m_v) unosi se za vrijeme mjerenja u dijagram, zavisno od kvadratnog korijena iz vremena (t).
6. Mjerenje se prekida kada se mjerne točke mogu povezati s dovoljnom točnošću mogu povezati ravnom crtom u protivnom slučaju postupak se nastavlja i preko 24 sata.

Obrađena rezultata

Ako je zavisnost između kapilarnog upijanja vode m_v i \sqrt{t} linearna, tada se koeficijent upijanja izračunava prema jednadžbi:

$$A = \frac{\Delta m_v}{\Delta \sqrt{t}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}^{0.5}} \right]$$

Ako je zavisnost između $\frac{m_v}{\sqrt{t}}$ nelinearna, tada se ispitivanje produžuje preko 24 h. u tom slučaju se koeficijent upijanja izračunava iz izmjenjenog upijanja poslije 24 sata, prema jednadžbi:

$$A = \frac{m_{v24}}{4,9} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}^{0.5}} \right]$$



Slika 31. Ispitivanje kapilarnog upijanja

4.3.6.5 Ispitivanje difuzije klorida prema NT BUILD 492

Ova metoda ispitivanja primjenjuje se za utvrđivanje koeficijenta migracije klorida na bazi nestacionarnog ispitivanja, a primjenjuje se za beton, mort i proizvode za popravak betonskih konstrukcija na bazi cementa. Namijenjena je za ispitivanje očvrslih uzoraka u laboratoriju.[14] Dobiveni koeficijent migracije klorida prikazuje otpor prodoru klorida testnog uzorka. Koeficijent dobiven ovom metodom ne može se direktno usporediti s koeficijentom difuzije klorida dobivenim drugim metodama. Ovaj način ispitivanja difuzije klorida predstavlja gibanje iona pod utjecajem vanjskih električnih polja, odnosno gibanje molekula ili iona iz područja veće koncentracije u područje niže koncentracije.

Kod betonskih elemenata izloženih difuziji agresivnih tvari uglavnom se koncentracija klorida po presjeku betona s vremenom mijenja. Stoga, takav proces se može opisati Fickovim drugim općim zakonom difuzije.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \times \frac{\partial C}{\partial x}$$

gdje je:

$\frac{\partial C}{\partial t}$ - promjena koncentracije klorida s vremenom

$\frac{\partial C}{\partial x}$ - promjena koncentracije klorida po presjeku betona

D - koeficijent difuzije

C - koncentracija tvari pri površini betona, odnosno u dubini $x(C_x)$

Za konkretne rubne i početne uvjete jednadžba se rješava numerički, a za jednostavnije geometrijske oblike rješenja su moguća u zatvorenom obliku.

$$C_x = (C_{\max} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl} \times t}} \right) \right]$$

gdje je:

C_x - dubina difuzije klorida

C_{\max} - najveća moguća koncentracija klorida

C_0 - početna koncentracija klorida, $C_0 \leq C_{\max}$

$erf\left(x/2\sqrt{D_t}\right)$ - funkcija pogreške

D_{cl^-} - koeficijent difuzije klorida (cm^2 / s)

t – starost konstrukcije (*god*)



Slika 32. Uređaj za ispitivanje koeficijenta klorida

Postupak pripreme uzoraka za ispitivanje

1. Destilirana voda se prokuha pola sata da se deaerira i zatim pusti da se ohladi.
2. Uzorke staviti u eksikator.
3. Rub eksikatora očistiti i pemazati silikonskim uljem.
4. Provjeriti je li ventil za vodu zatvoren.
5. Postaviti poklopac eksikatora.
6. Uključiti pumpu i otvoriti ventil na pumpi te pustiti da radi 3h.
7. Nakon 3h pumpu isključiti i zatvoriti ventil.

8. Crijevo za vodu uroniti u vodu zasićenom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ otopinom i polako otvoriti ventil za vodu. Otopina u potpunosti treba prekriti uzorke u eksikatoru.
9. Uključiti vakuum pumpu i otvoriti ventil te pustiti da radi još sat vremena.
10. Nakon toga ugasi pumpu, otvoriti ventil da ulazi zrak u eksikator, te uzorci moraju ostati još minimalno 18 h u otopini.

Postupak ispitivanja difuzije klorida

1. Uzorke izvaditi iz eksikatora i obrisati krpom.
2. Ugraditi uzorke u ćelije sa rashladnom komorom.
3. Jedan rezervoar ćelije napuniti 10%-tnom otopinom NaCl, a drugi 0,3 N otopinom NaOH.
4. Ćelije spojiti na potenciostat i uključiti na napon 30V.
5. Nakon 10 minuta očitati struju u mA kroz sva tri uzorka, a zatim prema tablici koja se nalazi u uputama za rad uređaja, te odrediti koliki napon dalje uključiti i koliko je vrijeme trajanja testa (6 – 96 sati). Tijekom ispitivanja potrebno je održavati temperaturu u rasponu od 20-25°C.
6. Kada je ispitivanje završeno uzorke je potrebno izvaditi iz ćelija, oprati ih vodom o obrisati.
7. Na preši prelomiti uzorke na dva poluvaljka.
8. Nakon loma uzoraka odabrati površinu koja je ravnija, pošpricati je 0,1 M otopinom srebro nitrat.
9. Na djelu gdje su prodrli kloridi uzorak će pobijeliti.
10. Pomoću ravnala s točnošću 0,1 mm od sredine na lijevu i desnu stranu na razmaku 10 mm izmjeriti dubinu prodiranja klorida.

Proračun koeficijenta difuzije

Nakon provedenog ispitivanja na uzorcima i izmjerene dubine prodora klorida, provodi se postupak proračuna koeficijenta difuzije/migracije klorida prema sljedećem izrazu:

$$D_{nsm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left[X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right]$$

Gdje je:

D_{nssm} - koeficijent migracije klorida, $\times 10^{-12} m^2 / s$

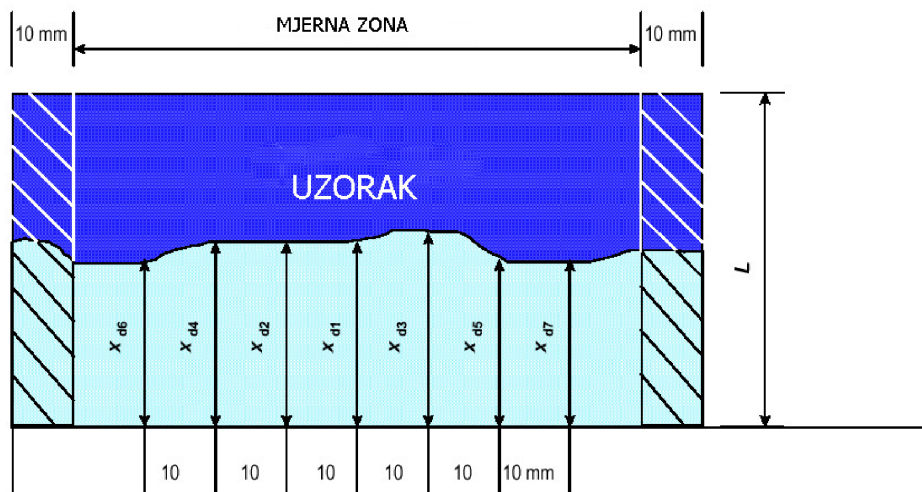
U - apsolutna vrijednost napona, V

T - prosječna temperatura u stupnjevima, $^{\circ}C$

L - debljina uzorka, mm

X_d - prosječna vrijednost dubine prodiranja, mm

t - vrijeme trajanja testa, h



Slika 33. Shema prelomljenog uzorka

5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

5.1 Primjenjivost preporučenih metoda za projektiranje sastava na samozbijajući beton s različitim mineralnim dodacima

Tablica 17. pokazuje usporedbu preporučenih parametara za projektiranje sastava samozbijajućeg betona s istim parametrima pri izradi samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima. Svi parametri uvelike ovise i o sastavnim komponentama betona.

U radu je primijenjena metoda projektiranja sastava samozbijajućeg betona uporabom i punila i stabilizatora mješavine.

U ovom je slučaju u eksperimentalnom radu upotrijebljen agregat s frakcijama koje su imale veliku količinu nadzrna i podzrna agregata. Pokazalo se da volumen paste ima velik utjecaj na svojstvo tečenja i svojstvo punjenja betona. Zbog toga se kod samozbijajućih betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima preporučuje količina paste veća od 40 %, a što prvenstveno ovisi o agregatu. Omjer vode i praškastih komponenti je bitan parametar svojstva, jer ukoliko samozbijajući beton ima dostatnu količinu praškastih komponenti i paste on ipak neće imati zahtijevano svojstvo tečenja ako nema i dostatnu količinu vode. U odnosu na druge parametre sastava pokazalo se da je vrlo bitno da agregat ima veću količinu sitnog nego krupnog agregata. Može se zaključiti da u slučaju samozbijajućeg betona bez dodataka i samozbijajućeg betona s dodatkom metakaolina ne vrijede nužno preporuke za ukupnu količinu praškastih komponenti, te omjera masa pijeska i paste. Kod mješavina sa kombinacijom mineralnih dodataka i polipropilenskih vlakana također ne vrijede preporuke za omjer vode i praška. Parametri sastava koji se obvezatno moraju poštovati kod samozbijajućih betona i betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima je količina slobodne vode koja mora biti manja od 200 l jer ona znatno utječe na izdvajanje vode i segregaciju prilikom tečenja i punjenja betona.[15]

Tablica 17. Usporedba parametara sastava samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima u odnosu na preporučene vrijednosti (crvena boja - ne zadovoljava; zelena - zadovoljava)

Parametar sastava	Preporuka	Oznaka samozbijajućeg betona				
		SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Praškaste komponente	400-600 kg	698	498	698	498	498
Krupni agregat	<50%	49,40	49,40	49,40	49,40	49,40
Voda/prašak	0.8-1.0	0,84	1,0	0,84	1,17	1,17
Pijesak/mort	>40%	40	40	39	39	39
Pijesak/pasta	<50%	61	71	60	71	71
Pijesak/agregat	>50%	50	50	50	50	50
Slobodna voda	<200 l	198	198	198	198	198
Pasta	>40%	46,60	39,90	46,60	40,1	40,2

5.2 Utjecaj mineralnih dodataka i polipropilenskih vlakana na obradivost samozbijajućeg betona

U tablici 19. prikazani su rezultati ispitivanja svojstva betona u svježem stanju. Samozbijajući beton u svježem stanju mora imati sljedeća svojstva:

- svojstvo punjenja
- svojstvo prolaza
- otpornost na segregaciju.[18,19,20]

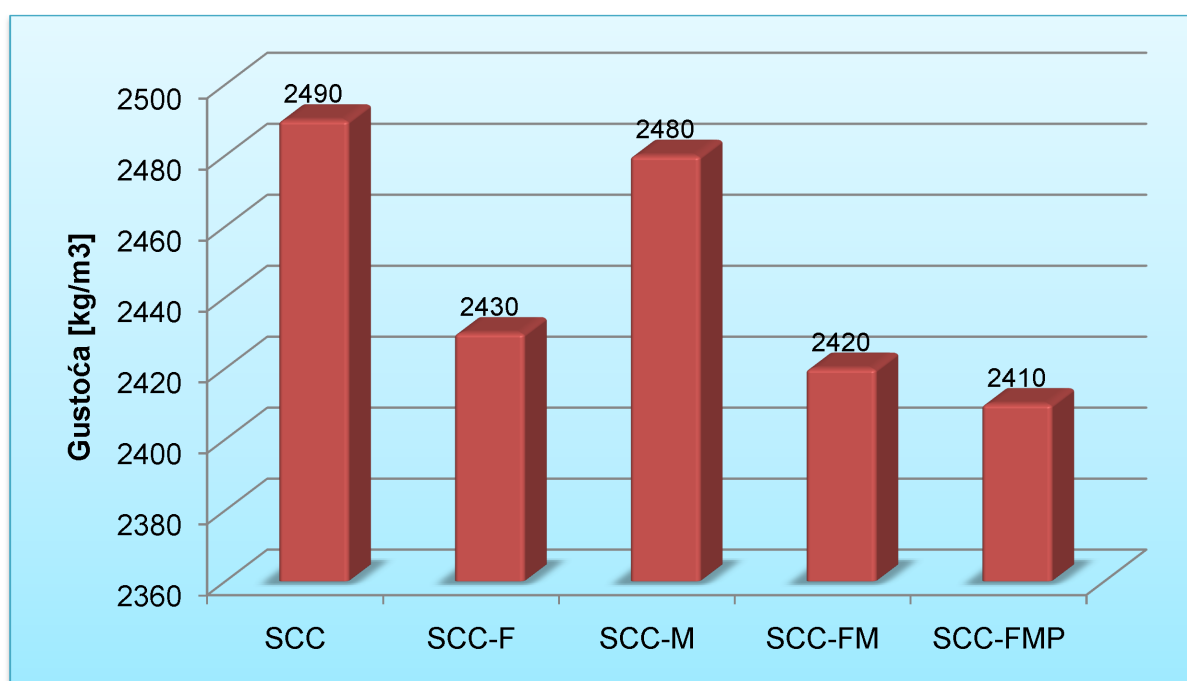
Na temelju provedenog eksperimentalno rada može se reći da je moguće postići svojstva u svježem stanju kod samozbijajućeg betona s mineralnim dodacima i polipropilenskim vlaknima. Također možemo reći da je moguće postići svojstva samozbijajućeg betona sa velikim udjelom mineralnih dodataka. U mješavinama SCC-F zamijenili smo dio cementa (veziva) sa velikim udjelom letećeg pepela (45%), SCC-FM zamijenili smo količinu cementa sa 55% mineralnih dodataka (leteći pepeo 45%, metakaolin 10%).

Tabela 18. Granične vrijednosti metoda ispitivanja samozbijajućih betona u svježem stanju

Metoda ispitivanja	Granične vrijednosti	Razred
Rasprostiranje [mm]	550-650	SF1
	660-750	SF2
	760-850	SF3
Viskoznost t_{500} [s]	<2	VS1
	≥ 2	VS2
L-kutija	$\geq 0,80$	PL1(2 rebra) PL2 (3 rebra)
V-lijevak [s]	<9,0	VF1
	9,0-25,0	VF2

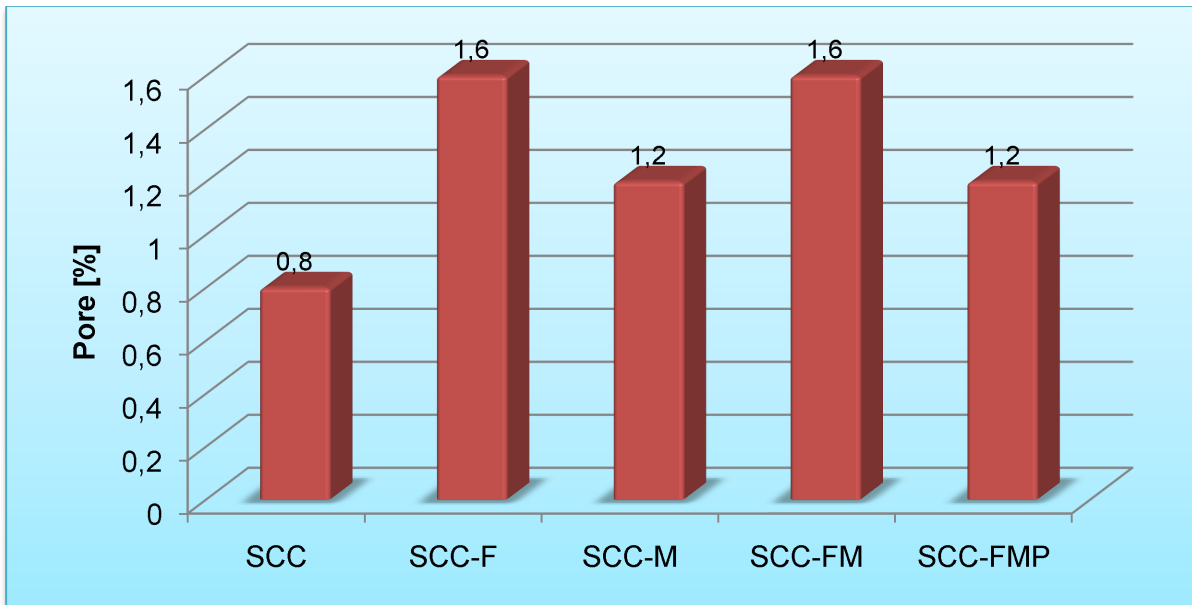
Tablica 19. Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju

Metoda ispitivanja	Razred	Svojstvo	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Rasprostrane [mm]	SF3	punjenje	760	790	760	785	775
Viskoznost t_{500} [s]	VS1	punjenje	1,18	1,44	1,28	1,53	1,15
L-kutija	PL2	prolaz	0,80	0,86	0,82	0,90	0,83
V-lijevak [s]	VF1	punjene	5,48	7,44	6,44	8,48	8,18
Sadržaj zraka [%]	-	-	0,70	1,60	1,20	1,60	1,20
Gustoća [kg/m ³]	-	-	2490	2430	2480	2420	2410
Temperatura [°C]	-	-	22,00	23,00	21,80	23,50	23,60



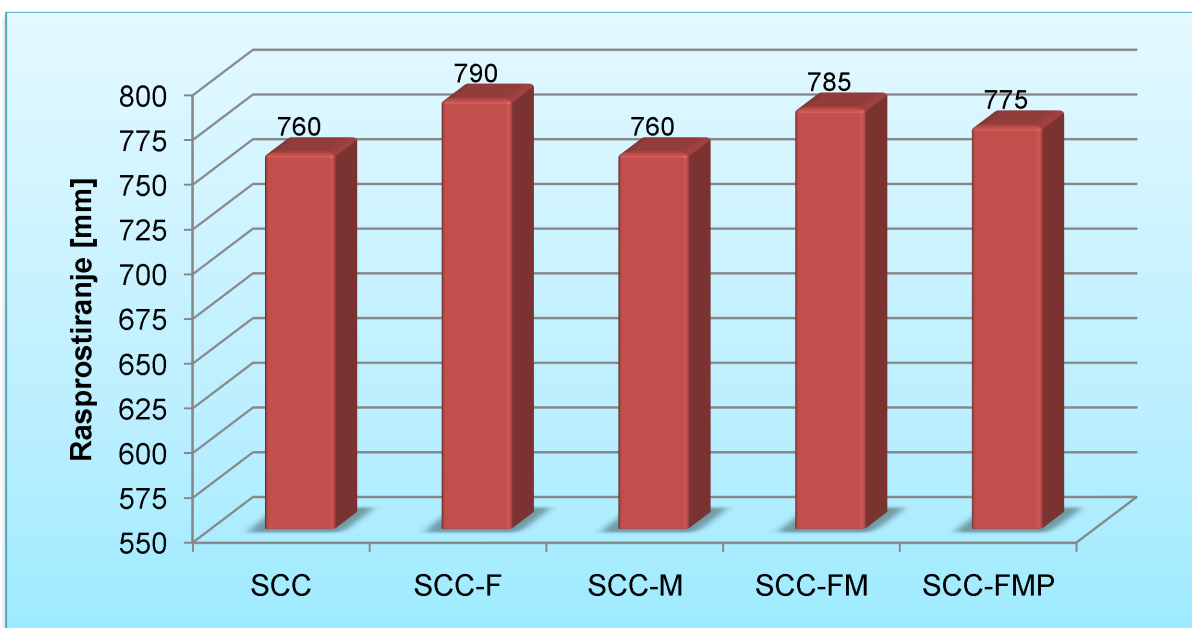
Slika 34. Rezultati gustoće samozbijajućih betona

Mješavine SCC-F, SCC-FM, imaju znatno manju gustoću od mješavine SCC zbog velike količine mineralnih dodataka koji zbog svoje manje gustoće od cementa utječu na gustoću betona u svježem stanju. Najmanju gustoću ima mješavina SCC-FMP što je vidljivo na slici 34 koja je pored velike količine mineralnih dodataka (55% veziva) sadržavala i polipropilenska vlakna.

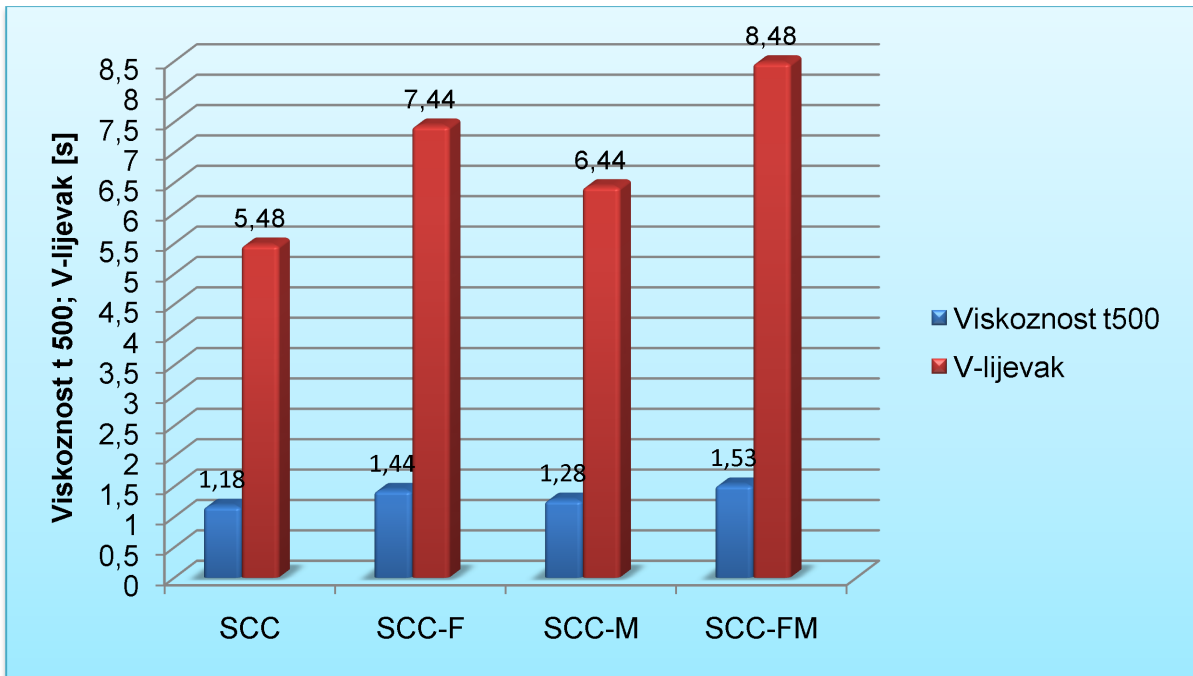
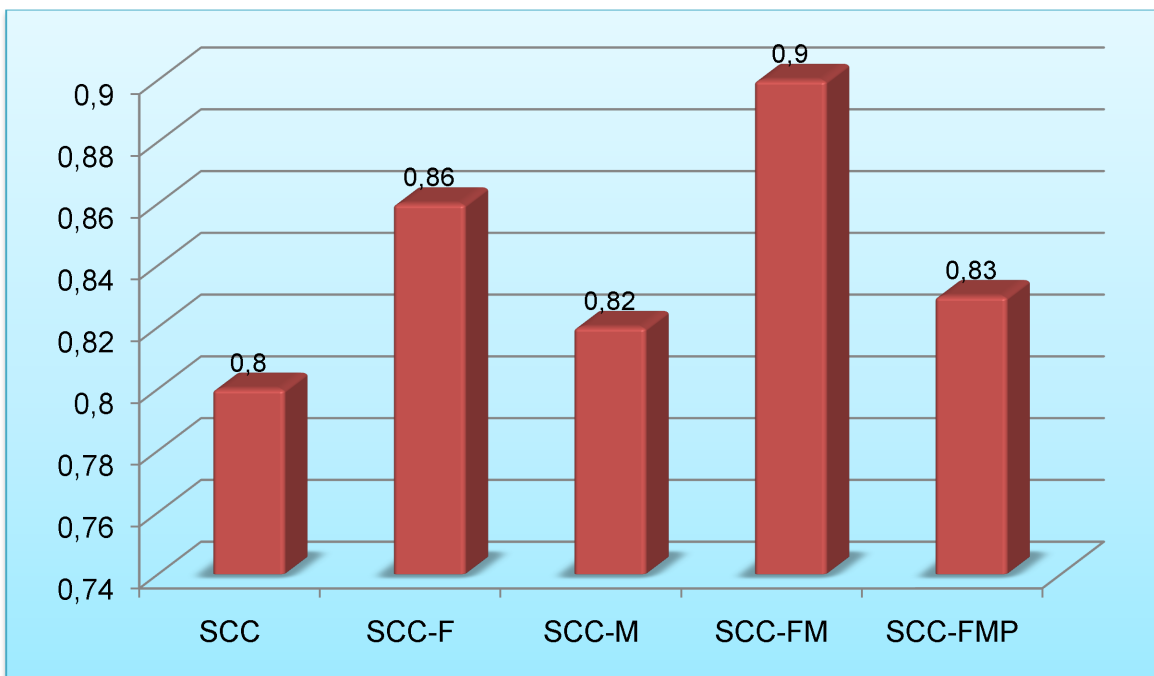


Slika 35. Rezultati zahvaćenog zraka (pora) u betona

Sve mješavine s dodacima imaju veću količinu zahvaćenog zraka od mješavine bez dodataka. Mješavine SCC-F, SCC-FM imaju najveće količine zahvaćenog zraka zbog utjecaja letećeg pepela i specifičnog sferičnog oblika čestica (slika 12), iako u mješavini SCC-FM metakaolin nema utjecaja na povećanje zahvaćenog zraka kao u mješavini SCC-M. Analizom mješavine SCC-FMP koja uz istu količinu mineralnih dodataka kao i mješavine SCC-F i SCC-FM sadrži i fibrilirana polipropilenska vlakna sadrži i manju količinu zahvaćenog zraka od komparativnih mješavina, što dovodi do zaključka da vlakna smanjuju količinu zahvaćenog zraka.



Slika 36. Rezultati rasprostiranja

Slika 37. Rezultati viskoznosti t_{500} i V-lijevka

Slika 38. Rezultati L-kutije

Analizom dobivenih rezultata grafički prikazanih na slikama 35., 36., 37. također vidljiv je znatan utjecaj dodataka na svojstva samozbijajućih betona u svježem stanju. Usporedimo li svojstva samozbijajućih betona s dodacima sa komparativnom mješavinom samozbijajućeg betona bez dodataka vidljiv je utjecaj dodataka na sposobnost prolaza, punjenja i viskoznosti. Mješavine s dodacima imali su znatno veću viskoznost od komparativne mješavine što je vidljivo iz slike 37. Povećanjem

viskoznosti dovodi do smanjenja vjerojatnosti segregacije betona što je veoma bitno za samozbijajuće betone. Također iz grafičkog prikaza rasprostiranja i L-kutije na slikama 36. i 38. vidljivo je da betoni s dodacima imaju bolju sposobnost punjenja od samozbijajućeg betona bez dodataka.



Slika 39. L-kutija mješavine SCC-FMP

Na slici 39. prilikom ispitivanja mješavine SCC-FMP metodom L-kutije vidljivo je da nema blokiranja nikakvog blokiranja kod prolaza između armature.



Slika 40. Prikaz rasprostiranja mješavine SCC-FMP (lijevo) i izgled krajeva uzorka prilikom ispitivanja rasporstiranja (desno)

Slika 40. prikazuje izgled mješavine SCC-FMP prilikom rasprostiranja. Na slici se vidi da su i zrna krupnog agregata pravilno raspoređena po uzorku, a posebno da su prisutna i na krajevima uzorka nakon obavljenog ispitivanja. Na taj način se vidi da nije došlo do izdvajanja vode i segregacije.

Sveukupno gledajući mješavine s dodacima imaju znatno bolja svojstva od komparativne mješavine bez dodataka. Možemo zaključiti da samozbijajući betoni s dodacima mogu se upotrijebiti u konstruktivnim elementima složenog oblika i veoma guste armature što dokazuju i dobiveni razredi svježeg stanja betona ispitanih prema normama za samozbijajuće betone.

5.3 Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća i ostala mehanička svojstva betona koja uvjetuju upotrebu tog materijala u građevinarstvu ovise o vrlo velikom broju čimbenika, od kojih su najvažniji:

- kakvoća cementa
- kakvoća i granulometrijski sastav agregata
- vodocementni faktor
- prirodne primjese u agregatu i vodi, te posebni dodaci cementu ili betonskoj smjesi da bi se postigla posebna svojstva;
- način pripreme i ugradnje betona u konstrukciju njega betona.

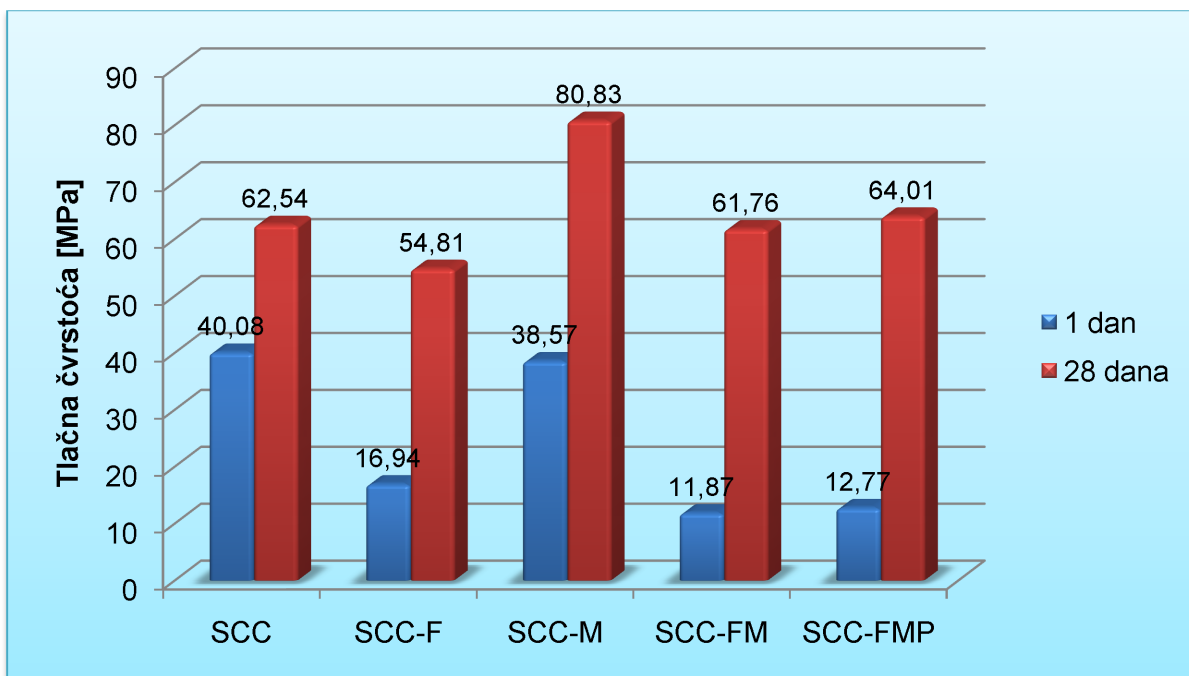
U praksi se često broj faktora reducira te se smatra da tlačna čvrstoća prvenstveno ovisi o vodocementnom faktoru i stupnju zbijenosti. To je točno, ali ne treba zanemariti i ostale navedene čimbenike. Općenito se može kazati da čvrstoća betona ovisi o čvrstoći očvrstle cementne paste i njegove povezanosti s krupnim agregatom te o čvrstoći te ispune.

Karakteristična tlačna čvrstoća mora biti jednaka ili veća od minimalne karakteristične tlačne čvrstoće tražene za zahtijevani razred tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća betona ispituje se prema normi HRN EN 12390-3 na valjcima $d/h=150/300\text{mm}$ ili na kockama brida 150mm, pri starosti betona od 28 dana.

U tablici 20. prikazane su vrijednosti ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana, na temelju čega je izračunata srednja vrijednost tlačnih čvrstoća mješavina samozbijajućih betona. Ispitivanje je vršeno na kockama $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$. Ispitivanje nakon 1 dana vršeno je na dva uzorka, dok je ispitivanje nakon 28 dana provedeno na tri uzorka kocki.

Tablica 20. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana

	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Pojedinačne tlačne čvrstoće nakon 1 dana [MPa]	39,93	16,88	39,52	11,89	12,27
	40,23	17,00	37,62	11,85	13,27
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće nakon 1 dana [MPa]	40,08	16,94	38,57	11,87	12,77
Pojedinačne tlačne čvrstoće nakon 28 dana [MPa]	62,98	54,37	79,06	61,23	64,84
	63,44	54,50	85,62	62,75	63,36
	61,21	55,56	77,82	61,31	63,83
Srednja vrijednost tlačne čvrstoće nakon 28 dana [MPa]	62,54	54,81	80,83	61,76	64,01



Slika 41. Tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana

Analizom grafičkog prikaza tlačnih čvrstoća betona na slici 41. vidljiv je utjecaj pojedinih dodataka na prirast tlačne čvrstoće nakon 1 i 28 dana. Nakon jednog dana najveću tlačnu čvrstoću postigla je mješavina SCC, a slijedi je mješavina SCC-FM sa nešto manjom tlačnom čvrstoćom, Najniže tlačne čvrstoće nakon jednog dana

postigle su mješavine sa dodatkom letećeg pepela. Usporedimo li mješavine SCC-FM i SCC-FMP možemo doći do zaključka da su na tlačnu čvrstoću kod mješavine SCC-FMP u maloj mjeri utjecala i polipropilenska vlakna.

Ispitivanjem nakon 28 dana najveću tlačnu čvrstoću postigla je mješavina SCC-M i to znatno višu u odnosu na druge mješavine. Mješavina SCC-M postigla je tlačnu čvrstoću za oko 20 MPa veću nego što je predviđena u projektu sastava betona. Projektiranje mješavina vršeno je za razred tlačne čvrstoće C50/60, dok mješavina SCC-M zadovoljava razred tlačne čvrstoće C60/75. Sve mješavine osim mješavine SCC-F zadovoljile su projektiranu tlačnu čvrstoću nakon 28 dana.

Pregledom prirasta čvrstoća između prvog i dvadesetosmog dana vidljivo je da mješavina SCC-FMP postigla najveći prirast tlačne čvrstoće u odnosu na druge mješavine. Najmanji prirast čvrstoće ostvarila je mješavina SCC.

Na temelju cjelokupne analize može se nešto više reći o utjecaju dodataka na tlačnu čvrstoću betona. Dodatkom metakaolina u količini od 10 % na masu cementa smanjuje se prirast tlačne čvrstoće u početku za oko 4% dok je njegov utjecaj na porast tlačne čvrstoće pri starosti betona od 28 dana znatno veći i iznosi oko 23% (što je i vidljivo na slici 38). Utjecaj letećeg pepela u količini od 45% na smanjenje prirasta tlačne čvrstoće u početku je znatno veći od utjecaja metakaolina i iznosi oko 58% i mješavine nakon 28 dana ne postižu projektirani razred čvrstoće betona. Mješavine sa dodatkom letećeg pepela i metakaolina u početku imaju najmanji prirast tlačne čvrstoće no međutim nakon 28 dana postižu projektirani razred tlačne čvrstoće betona.



Slika 42. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Može se zaključiti da mješavina SCC-FMP s dodatkom letećeg pepela, meta kaolina i polipropilenskih vlakna zadovoljava projektirani razred tlačne čvrstoće nakon 28 dana iako smo zamijenili masu cementa (veziva) s 45% letećeg pepela i 10%

metakaolina. Ova mješavina betona ima više prednosti u odnosu na ostale. Velikom količinom dodataka u odnosu na cement mješavina betona SCC-FMP postala ekonomičnija i ekološki prihvatljivija u odnosu na ostale.

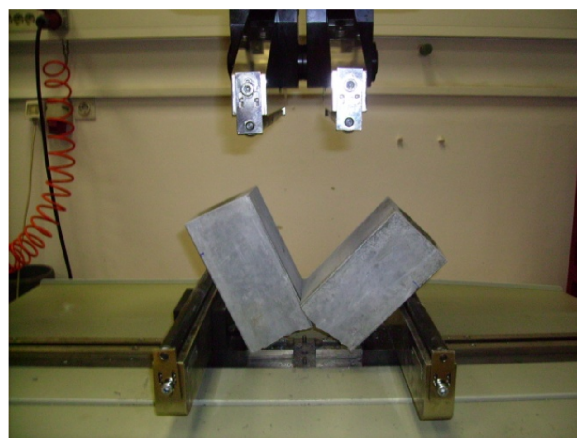
5.4 Savojna čvrstoća betona

Savojna čvrstoća pokazuje sposobnost betona na preuzimanje vlačnih naprezanja koje se mogu javiti u betonskim elementima. Ispitivanje savojne čvrstoće vršeno je na tri prizmama starosti 28 dana dimenzija 100 × 100 × 400 mm. U tablici 21. prikazani su dobiveni rezultati savojnih čvrstoća na temelju čega je dobivena srednja vrijednost savojne čvrstoće.

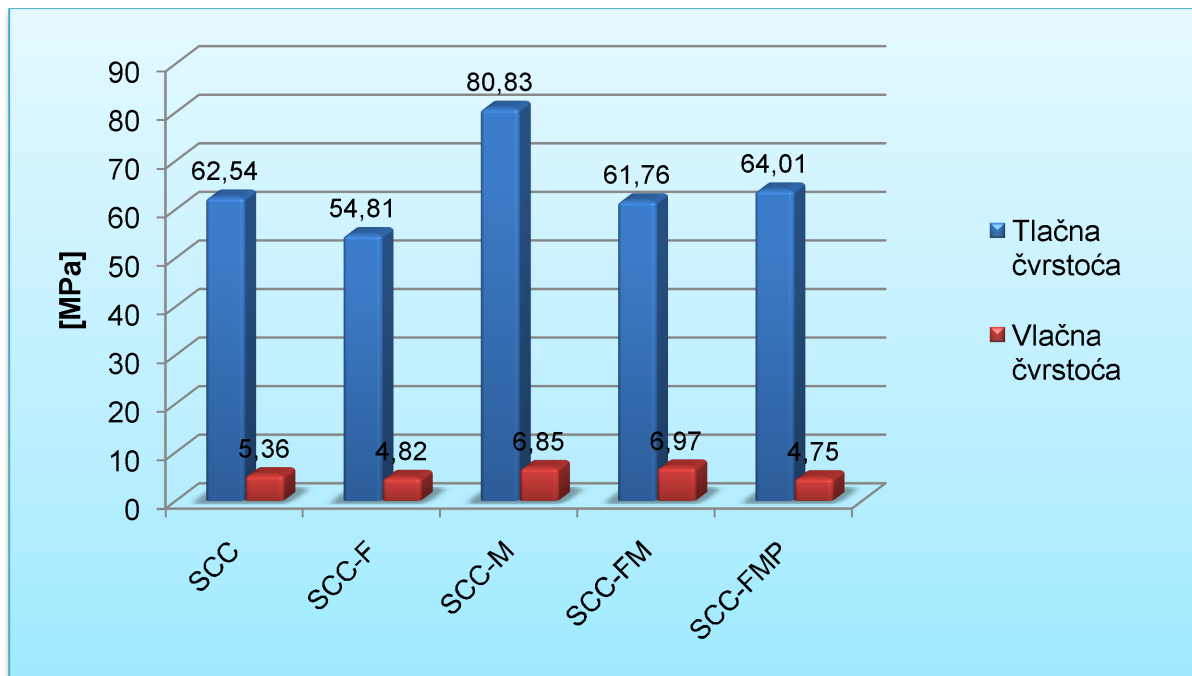
Tabela 21. Rezultati savojne čvrstoće nakon 28 dana

	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Pojedinačna savojna čvrstoća [MPa]	5,94	4,63	6,81	7,71	4,08
	5,23	4,92	6,97	6,79	4,68
	4,91	4,90	6,77	6,41	5,49
Srednja savojna čvrstoća [MPa]	5,36	4,82	6,85	6,97	4,75

Mješavina SCC-FM postigla je najveću vrijednost savojne čvrstoće u odnosu na ostale. Usporedimo li vrijednosti tlačnih čvrstoća iz tablice 20. sa dobivenim savojnim čvrstoćama možemo zaključiti da nisu posve u uzročno posljedičnoj vezi. Što je i vidljivo u grafu koji slijedi.



Slika 43. Ispitivanje savojne čvrstoće



Slika 44. Usporediva vrijednosti tlačne i savojne čvrstoće betona

Iz grafičkog prikaza rezultata vlačne i tlačne čvrstoće betona na slici 44. može se vidjeti da je najveću savojnu čvrstoću postigla mješavina SCC-FM iako je imala najmanju tlačnu čvrstoću od mješavina koje su zadovoljile projektirani razred tlačne čvrstoće C50/60. Što dokazuje da nisu tlačna i savojna čvrstoća u uzročno posljedičnom odnosu. Može se reći iz prikazanih rezultata da također mineralni dodaci utječu na savojnu čvrstoću betona.

5.5 Brzina ultrazvučnog impulsa

Ultrazvuk spada u nerazorni postupak određivanja tlačne čvrstoće betona pomoću kalibracijskih krivulja, a ima primjenu kod:

- određivanja ujednačenosti kvalitete betona
- procjene čvrstoće u konstrukciji
- praćenja napredovanja čvrstoće
- procjene oštećenja betona
- utvrđivanja pukotina i gnijezda
- određivanje dinamičkog modula elastičnosti
- određivanja efikasnosti sanacije pukotina.

Prednost ispitivanja betona ultrazvukom je uvid u ujednačenost kvalitete po cijelom presjeku ili u većoj dubini ako se ispituje s površine.

Ovisno o brzini prolaza ultrazvuka izvršena je razredba kvalitete betona (tablica 21).

Tablica 22. Razredba kvalitete betona prema brzini prolaza ultrazvuka

Brzina ultrazvučnog vala [m/s]	Kvaliteta betona
<1600	Vrlo slab
s1600-2000	Slab
2000-2800	Zadovoljavajući
2800-3600	Dobar
3600-4400	Vrlo kvalitetan

Brzinu ultrazvuka mjerena je na tri prizme od svake mješavine dimenzija 100 × 100 × 400 mm starosti 28 dana. U tablici 23. prikazane su vrijednosti prolaza brzine ultrazvuka na temelju kojih je izračunata karakteristična vrijednost prolaza ultrazvučnog vala i određeni razred kvalitete betona.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja brzine ultrazvučnog vala

Mješavina	Brzina ultrazvučnog vala [m/s]			Srednja vrijednost brzine ultrazvučnog vala [m/s]
SCC	5110	5110	5120	5077,78
	5050	5060	5060	
	5060	5060	5070	
SCC-F	4640	4650	4910	4850,00
	4880	4900	4880	
	4930	4930	4930	
SCC-M	5070	5060	5060	5056,67
	5050	5090	5080	
	5040	5020	5040	
SCC-FM	4760	4770	4760	4713,33
	4670	4660	4670	
	4670	4680	4680	
SCC-FMP	4770	4770	4770	4751,11
	4840	4820	4840	
	4660	4650	4640	

Analizom rezultata srednjih vrijednosti brzine ultrazvučnog vala sve mješavine betona možemo prema tablici 22. svrstati u razred vrlo kvalitetnih betona. Vidimo da je najveću brzinu postigla mješavina SCC-M sa najvećom tlačnom čvrstoćom, pa se može reći da navedena mješavina posjeduje i najhomogeniju strukturu betona.



Slika 45. Ispitivanje brzine ultrazvuka

5.5.1 Dinamički modul elastičnosti (prema HRN U.M1.026)

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzina ultrazvučnih valova odrediti ćemo dinamički modul elastičnosti mješavina prema normi sljedećoj formuli:

$$E_{bd} = \frac{v^2 \rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \text{ [GPa]}$$

gdje je:

- v - brzina ultrazvučnog vala [m/s],
- ρ – gustoća betona [kg/m^3],
- μ - poissonov koeficijent [$\mu = 0,16$]

U tablici 24. prikazane su vrijednosti gustoća betona u očvrsлом stanju koje su nam potrebne pri proračunu dinamičkog modula elastičnosti betona.

Tablica 24. Rezultati gustoće betona u očvrsлом stanju

	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Gustoća betona u očvrsлом stanju [kg/m ³]	2473,94	2430,35	2474,28	2383,15	2391,05
	2474,89	2402,40	2489,48	2401,63	2389,55
	2460,75	2396,58	2490,45	2389,3	2391,33
Srednja vrijednost gustoće betona u očvrsлом stanju [kg/m ³]	2469,86	2409,78	2484,74	2391,36	2390,64

Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti brzine ultrazvučnih valova i gustoća betona u očvrsлом stanju izračunom su dobivene vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti prikazanih u tablici 25.

Tablica 25. Izračunate vrijednosti dinamičkih modula elastičnosti

	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
Dinamički modul elastičnosti E _{bd} [GPa]	67,82	60,36	67,66	56,57	57,47

Izračunom dobiven je najveći dinamički modul elastičnosti kod mješavine SCC iako je to bilo za očekivati kod mješavine SCC-M iz razloga jer je ona postigla najveću tlačnu čvrstoću, možemo zaključiti da na dinamički modul elastičnosti utječe količina pora u svježem stanju mješavina SCC imala je najmanju količinu pora (0,80%) što je vidljivo na slici 34. odnosno veličina dinamičkog modula elastičnosti pokazuje homogenost strukture betona veći modul veća homogenost betona.

5.5 Kapilarno upijanje

Jedan od načina mjerenja mogućnosti penetracije agresivnih tvari u beton jest ispitivanje upijanja vode u beton. Vodoupojnost betona je svojstvo da beton u dodiru s vodom istu upija u svoju masu. Upijanje vode ovisit će o volumenu pora u betonu, njihovom obliku, dimenzijama statističkoj raspodjeli i razmještaju. Beton s finim i povezanim porama upija vodu naglašenije od betona čije pore mogu biti po dimenzijama i veće ako one nisu povezane. Isto tako beton s uvučenim zrakom i uz primjenu aeranta manje upija vodu.

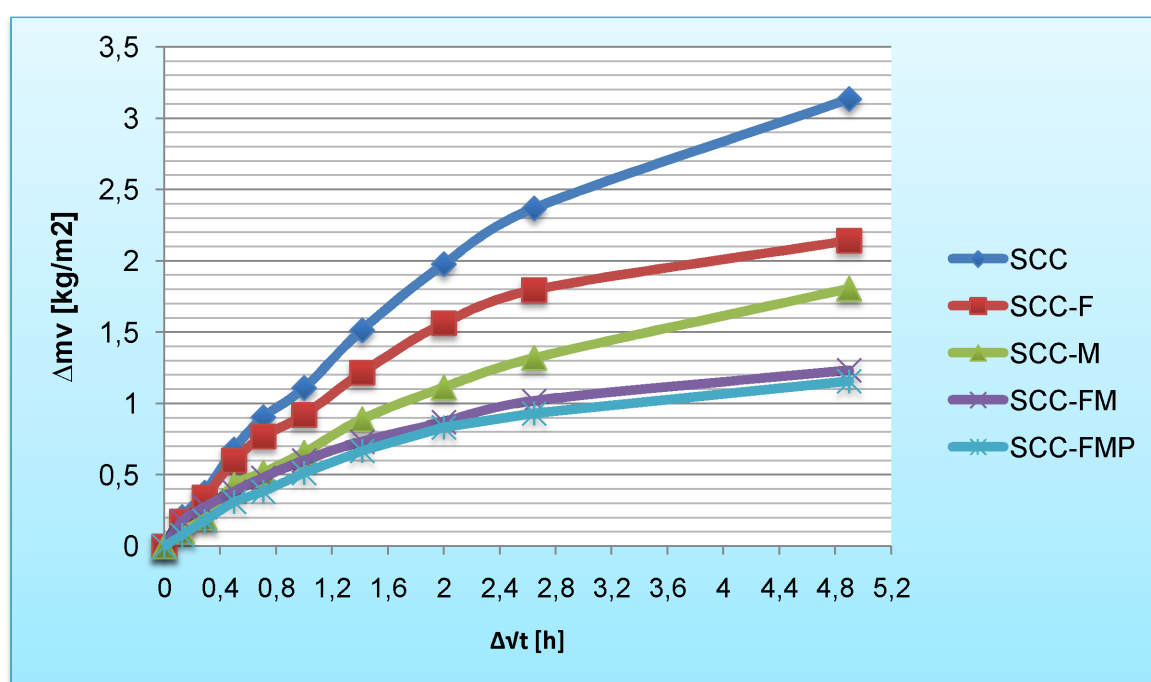


Slika 46. Ispitivanje kapilarnog upijanja vode

U tablici 26. dani su rezultati ispitivanja kapilarnog upijanja vode na temelju kojih su izračunati koeficijenti kapilarnog upijanja nakon 1 h i 24 h.

Tablica 26. Prikaz rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja

	SCC	SCC-F	SCC-M	SCC-FM	SCC-FMP
m_d [g]	917,73	905,43	944,37	903,67	893,33
t=1 min	919,30	906,77	945,17	905,07	893,97
t=5 min	920,63	908,07	945,93	905,83	894,73
t=15 min	922,97	910,07	947,70	906,67	895,80
t=30min	925,50	911,37	948,40	907,43	896,37
t=60 min	926,27	912,53	949,50	908,37	897,40
t=2 h	929,40	914,80	951,23	909,40	898,63
t=4 h	932,97	917,47	953,07	910,47	899,93
t= 7 h	935,97	919,27	954,67	911,63	900,70
t=24 h	941,87	921,93	958,47	913,30	902,47
P [m ²]	0,0077	0,0077	0,0078	0,0078	0,0079
Δm_{v1} [g]	8,54	7,10	5,13	4,70	3,43
Δm_{v24} [g]	24,14	16,50	14,10	9,63	9,14
Izračunati koeficijenti kapilarnog upijanja nakon 1 h i 24 h; $A = \frac{\Delta m_v}{\Delta \sqrt{t}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{h}^{0,5}} \right]$	$A_1 = 1,09$	$A_1 = 0,90$	$A_1 = 0,65$	$A_1 = 0,60$	$A_1 = 0,44$
	$A_{24} = 0,63$	$A_{24} = 0,43$	$A_{24} = 0,37$	$A_{24} = 0,25$	$A_{24} = 0,23$



Slika 47. Grafički prikaz rezultata ispitivanja kapilarnog upijanja

Slika 47. daje jasan prikaz količine upijene vode Δm_v [kg/m²] u vremenu $\Delta \sqrt{t}$ [h], koeficijenti nagiba pravaca prikazuju koeficijente kapilarnog upijanja vode. Najmanju masu kapilarno upijene vode po m² površine u 24 h ima mješavina SCC-FMP, dok najveću količinu mješavina bez dodataka (SCC). Vidljivo je da pravci kod mješavina SCC-FM i SCC-FM lagano padaju prema konstanti, što je povoljno je će ovi betoni ubrzo prestati upijati vodu. Usporedbom mješavine SCC-FMP sa komparativnom mješavinom SCC vidljiva je velika razlika u količini upijene vode u istom vremenskom intervalu (24h) što i pokazuju koeficijenti kapilarnog upijanja izračunati nakon 1h i 24h u tablici 25. Možemo zaključiti da dodaci leteći pepeo, metakaolin i polipropilenska vlakna povoljno djeluju na smanjenje kapilarnog upijanja. Usporedbom mješavina SCC-F i SCC-M vidljivo je da metakaolin ima veći utjecaj na smanjenje kapilarnog upijanja od letećeg pepela, iako se metakaolin dodaje u znatno manjoj količini od letećeg pepela u sastav betona.

5.6 Difuzija klorida

Koeficijent difuzije je osnovni parametar kvalitete materijala u pogledu trajnosti u morskoj okolini. Penetracija klorida u beton odvija se procesom difuzije prema drugom Fickovom zakonu difuzije, te su pri maritimnim uvjetima kloridi uvijek mjerodavno pobudno opterećenje. Difuzija je kretanje tvari kroz beton uslijed hidrauličkog gradijenta, razlike u koncentracijama iona, vlage ili temperature. Proces difuzije javlja se u slučaju da su dvije otopine, koje su u neposrednom dodiru, različitih koncentracija zbog čega se njihove koncentracije nastoje izjednačiti. Pritom otapalo iz otopine manje koncentracije difundira u otopinu veće koncentracije, a otopljeni tvar difundira u suprotnom smjeru. [14]

Ispitivanje je povedeno na tri cilindrična uzorka promjera 100 mm i visine 50 mm prikazanog na slici 48.



Slika 48. Izgled uzorka

U tablici 27. prikazani su kriteriji ocjene rezultata ispitivanja koeficijenta difuzije klorida prema normi NT BUILD 492.

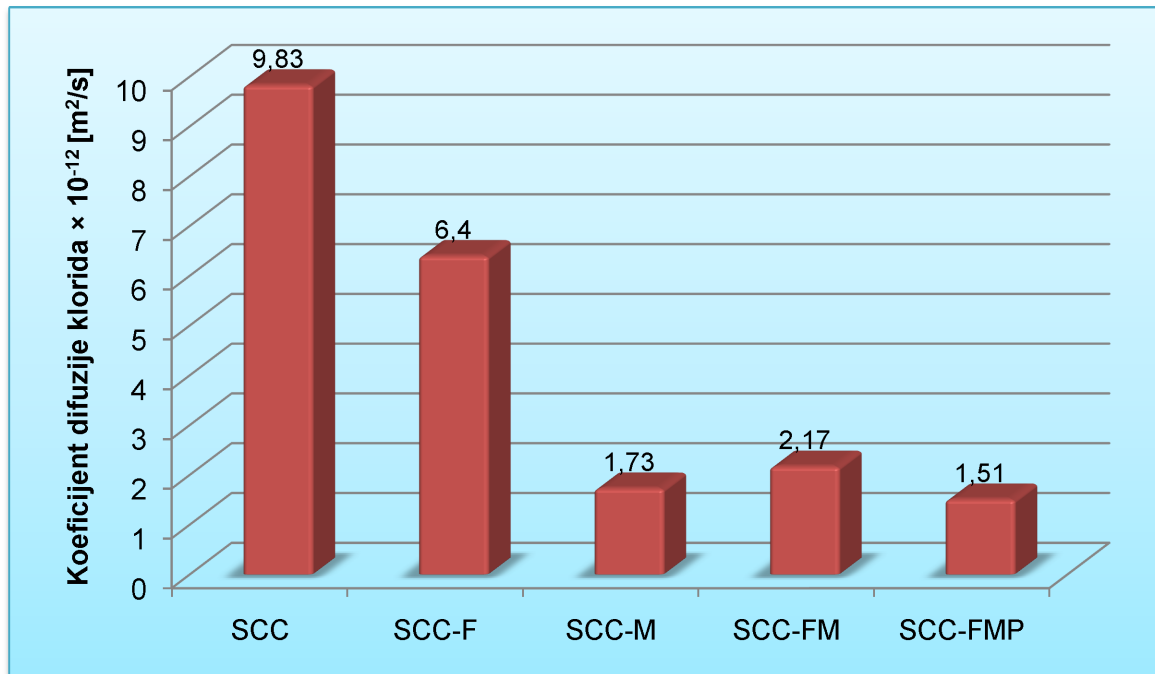
Tablica 27. Kriteriji ocjene rezultata ispitivanja koeficijenta difuzije klorida[14]

Otpornost prodora klorida	D_{cl} [m^2/s]
Vrlo dobra	$< 2 \times 10^{-12}$
Dobra	$2 \times 10^{-12} > D_{cl} < 8 \times 10^{-12}$
Srednja	$8 \times 10^{-12} > D_{cl} < 16 \times 10^{-12}$
Loša	$> 16 \times 10^{-12}$

U tablici 28. prikazani su rezultati i ocjene ispitivanja koeficijenta difuzije klorida.

Tablica 28. Rezultati i ocjene ispitivanja difuzije klorida[14]

	D_{cl} [$10^{-12} m^2/s$]	Ocjena
SCC	9,83	Srednja
SCC-F	6,40	Dobra
SCC-M	1,73	Vrlo dobra
SCC-FM	2,17	Dobra
SCC-FMP	1,51	Vrlo dobra

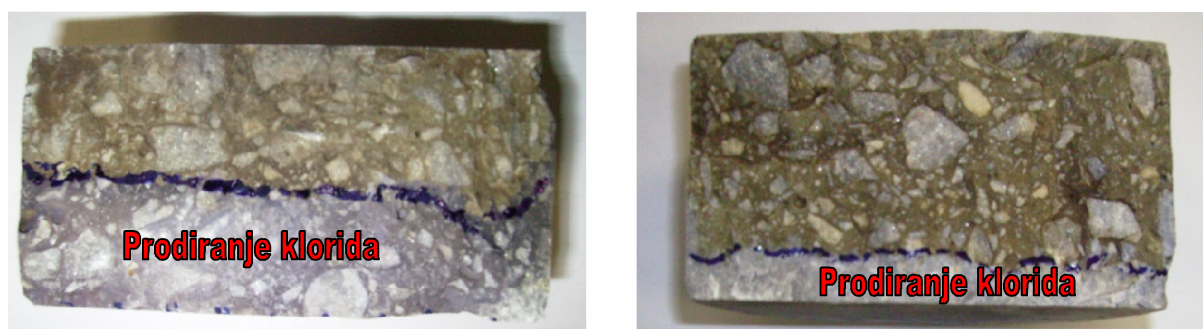


Slika 49. Koeficijenti difuzije klorida

Analizom dobivenih koeficijenta difuzije klorida prikazanih na slici 49. i u tablici 28 može se zaključiti da su betoni s mineralnim dodacima postigli manje koeficijente

difuzije klorida u odnosu na komparativnu mješavinu bez dodataka. Vidljivo je da je mješavina SCC-FMP postigla najmanji koeficijent difuzije klorida.

Iz usporedbe mješavina SCC-F i SCC-M može se zaključiti da metakaolin ima veći utjecaj na smanjenje koeficijenta difuzije klorida od letećeg pepela, također usporedbom mješavina SCC-FM i SCC-FMP vidljiv je dodatni utjecaj fibriliranih polipropilenskih vlakana na smanjenje koeficijenta difuzije klorida.



Slika 50. Dubina prodiranja klorida kod mješavine SCC (lijevo) i mješavine SCC-FMP (desno)

6. ZAKLJUČAK

Analizom dobivenih rezultata iz provedenih eksperimentalnih istraživanja mehaničkih i trajnosnih svojstava samozbijajućih betona s različitim mineralnim dodacima (leteći pepeo, metakaolin) i komparativnog betona bez dodataka može se zaključiti:

- Projektiranje sastava samozbijajućih betona s različitim mineralnim dodacima se razlikuje od projektiranja sastava običnih samozbijajućih betona. Potrebno je poštovati preporuke za omjer masa vode i praškaste komponente, omjer sitnog i krupnog agregata, omjer pijeska i morta, te ukupnu količinu paste.
- Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja mješavina u svježem stanju vidljiv je utjecaj mineralnih dodataka na svojstva obradivosti, prolaznosti, punjenja i otpornost segregaciji. Samozbijajući betoni s dodacima postigli su u svježem stanju bolja svojstva od komparativnog samozbijajućeg betona bez dodataka.
- Ispitivanjem tlačne čvrstoće vidljiv je utjecaj letećeg pepela na smanjenje tlačne čvrstoće odnosno utjecaj metakaolina na povećanje tlačne čvrstoće nakon 28 dana, ali i smanjenje nakon 1 dana.
- Samozbijajući beton s dodacima ima manje kapilarno upijanje i manji prodor difuzije klorida od komparativnog samozbijajućeg betona bez dodataka, u slučaju istog vodovezivnog omjera i količine veziva. Ovaj rezultat posljedica je poboljšanja mikrostrukture uporabom mineralnih dodataka.
- Na temelju dobivenih rezultata o trajnosti betona dolazimo do zaključka da trajnost betona ne ovisi o tlačnoj čvrstoći već o mikrostrukтури betona koju dodaci leteći pepeo, metakaolin i polipropilenska vlakana znatno poboljšavaju i tako samozbijajući beton čine trajnijim.
- Metakaolin poboljšava svojstva trajnosti samozbijajućih betona u većoj mjeri od letećeg pepela, iako se dodaje u bitno manjoj količini od letećeg pepela.
- Dodatkom mineralnih dodataka samozbijajući beton postao je i ekološki prihvatljiviji zbog smanjene količine cementa, te na taj način i manje emisije CO₂ u atmosferu prilikom proizvodnje cementa.

- Na temelju dobivenih rezultata može se za pojedine mješavine samozbijajućih betona možemo preporučiti sljedeću praktičnu primjenu:

SCC – predgotovljeni betonski elementi (zbog brzog prirasta tlačne čvrstoće).

SCC-F – masivni betoni (zbog smanjenja topline hidratacije).

SCC-M – elementi u agresivnom okolišu.

SCC-FM – masivni betoni u agresivnom okolišu.

SCC-FMP – betoni u agresivnom okolišu, betoniranje pri nepovoljnim klimatskim uvjetima, jer polipropilenska vlakna sprječavaju raspucavanje mladog betona.

Sveukupno gledajući može se reći da samozbijajući betoni s dodacima u odnosu na obične imaju sljedeće prednosti:

- smanjenje broja radnika kod betoniranja
- smanjenje utjecaja ljudskog faktora na kvalitetu ugradnje betona
- smanjenje buke (nema vibriranja)
- bolji izgled betonskih površina
- veća trajnost
- šire područje primjene
- smanjenje količine CO₂ čini ih ekološki održivim.

7. ZAHVALE

Zahvaljujem se Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu koji mi je omogućio izradu ovog rada.

Posebno se želimo zahvaliti svojem mentoru prof. dr. sc. Marijanu Skazliću, dipl. ing. građ. koji me cijelo vrijeme usmjeravao svojim savjetima, te laborantima Zvezdani Matuzić i Miri Matuziću koji su mi nesebično pomagali tijekom laboratorijskih ispitivanja i uvijek mi bili na raspolaganju.

8. LITERATURA

- [1] Mehta, P.K., 1999. "Concrete Technology for Sustainable Development", Concrete International, Vol.21, No. 11, pp. 47-53
- [2] Separati s predavanja iz kolegija „Osnove tehnologije betona“ Građevinski fakultet, Zagreb, 2010.
- [3] Ouchi, M.: Self-compacting concrete – development, applications and investigations, Proceedings of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, str. 29-34, Reykjavik, 1999.
- [4] <http://www.infobeton.com/clanci/scc.php>
- [5] Damlund, M., Goth, S., Hasle, P., Munk, K. Wearing down construction workers, Denmark, 1983, 211 str.
- [6] Vision 2030 & Strategic Research Agenda, Focus Area Materials, Version 1, European Construction Technology Platform, September, 2005.
- [7] Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. The Use of Crushed Limestone Dust in Production of Self-Consolidating Concrete (SCC), Recycling Concrete and other Materials for Sustainable Development, SP-219, ACI Publications, 2004, 164 str.
- [8] Malhotra, V.M. Role of supplementary cementing materials in reducing greenhouse gas emissions, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century, edited by O.E.Gjorv and K. Sakai, E & FN Spon, UK, 2000, str. 226 – 235
- [9] <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>
- [10] Dokumentarni film „Akashi_Kaikyo_Bridge“ National Geographic
- [11] Seferović, E.: Izvješće br. 348 o primjeni PP vlakana u primarnoj podgradi tunela Sveti Rok, 1999.
- [12] www.metakaolin.info

- [13] Stipanović, M. Serdar; Upute za rad mjernim uređajem Proove'it za određivanje koeficijenta difuzije klorida prema NT BUILD 492
- [14] Marijan Skazlić, Ružica Rosković, Ivana Banjad Pečur : Svojstva samozbijajućeg betona s velikim udjelom letećeg pepela, Građevinar 60 str. 945-952, Zagreb, 2008
- [15] Kordts, S.; Grube, H.: Controlling the workability properties of self compacting concrete used as ready-mixed concrete, 2002
- [16] Okamura H.; Ouchi M.: Self-compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Tehnology, br.1, str. 5-15, 2003.
- [17] Zhu, W., Bartos, P.J.M.: Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005, str. 319-328.
- [18] Beslač, J., Skazlić, M.: Posebni betoni, Betonske konstrukcije-građenje, Secon, Andris, HDGK, Hrvatska sveučilišna naklada, Građevinski fakultet Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007., str.262-268.
- [19] Bartos, P.J.M.: Testing-SCC: Towards new European standards for fresh SCC, Proceedings of the First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Changsha, Hunan, Kina, 2005., str 25-46.
- [20] Brouwers, H.J.H., Radix, H.J.: Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, Cement and Concrete Research 35 (2005)11, str. 2116-2136.
- [21] Rosković, R., Bjegović, D.: Role of mineral additions in reducing CO₂ emission, Cement and Concrete Research 35 (2005) 5, str. 974-978.

9. SAŽETAK

Vujica, Mario

Samozbijajući ekološki održivi betoni

Samozbijajući beton je inovativna vrsta betona koja ne zahtjeva vibriranje prilikom ugradnje, te se time dobiva izvanredna kvaliteta površina. Pored toga, veći udio mineralnih dodataka utječe na ekološku održivost ovog betona.

U radu su opisana svojstva, struktura, metode ispitivanja i razvoj tehnologije samozbijajućeg betona. Eksperimentalnim dijelom rada obuhvaćeno je projektiranje i izrada mješavina samozbijajućih betona sa ciljem određivanja utjecaja različitih mineralnih dodataka cementu (leteći pepeo, metakaolin) na svojstva samozbijajućeg betona u svježem i očvrslom stanju. U radu su prikazani rezultati ispitivanja u svježem i očvrslom stanju, te je napravljena usporedba između mješavina samozbijajućih betona. Na temelju dobivenih rezultata dana je praktična primjena ove nove posebne tehnologije betona. Treba također napomenuti da su mješavine rađene s velikim postotkom mineralnih dodataka (letećeg pepela 45% i metakaolina 10% od mase cementa), što znači da je potrebno relativno malo cementa da se dobije velika čvrstoća, a time znatno više čuvamo okoliš i atmosferu, pa je takav beton ekološki puno prihvatljiviji od običnog (5-7% svjetske emisije CO₂ u atmosferu otpada na industriju cementa).

KLJUČNE RIJEČI: Samozbijajući, tehnologija, mineralni dodaci, ekološki

10. SUMMARY

Vujica, Mario

Self compacting environmentally sustainable concretes

Self compacting concrete is an innovative type of concrete that does not demand vibration when installing the application, and thus gets an excellent surface quality. In addition, a higher proportion of mineral supplements affect the environmental sustainability of concrete.

This paper describes the properties, structures, test methods and technology development of self-compacting concrete. Experimental part of the paper describes the design and manufacture of mixtures of self compacting concrete in order to determine the influence of different mineral supplements to cement (fly ash, MK) on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state. The paper presents the results of analysing concrete in fresh and hardened state, and comparison between the self - compacting concrete mixtures. Based on the gained results, it is given the potential use of this special concrete design technology. It should also be noted that the mixtures were made with a large percentage of mineral supplements (fly ash 45% and MK 10% by weight of cement). This means that it takes relatively little cement to get a great strength, and thus much more protects the environment and atmosphere, and such a concrete is ecologically more acceptable than an ordinary (5-7% of global CO₂ emissions contributes the cement industry).

KEY WORDS: Self compacting, technology, mineral additives, ecological