

Utjecaj sitnih čestica agregata na otpornost na habanje betona

Babić, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:842566>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

ZAVRŠNI RAD

Marija Babić

Split, 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Utjecaj sitnih čestica agregata na otpornost na habanje betona

Završni rad

Split, 2023.

Utjecaj sitnih čestica agregata na otpornost na habanje betona

Sažetak:

Sitne čestice agregata mogu imati pozitivan, ali i štetan utjecaj na otpornost na habanje betona. Međutim, taj utjecaj ovisi o nekoliko čimbenika, kao što su vrsta agregata, njegova granulometrija, udio u mješavini betona, prisutnost aditiva te uvjeti izloženosti habanju. Zbog toga je važno provesti odgovarajuća ispitivanja kako bi se utvrdio točan utjecaj sitnih čestica agregata za određene slučajeve. Za potrebe ovog ispitivanja izrađeno je šest betonskih mješavina koje su međusobno različite po granulometrijskom sastavu i po vrsti agregata. Za svaku mješavinu ispitana je konzistencija, brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, tlačna čvrstoća i otpornost na habanje. Rezultati su prikazani u radu i komentirani.

Ključne riječi: beton, trajnost, otpornost na habanje, sitne čestice, kvarcni pijesak

The effect of small aggregate particles on the wear resistance of concrete

Abstract:

Small aggregate particles can have a positive, but also a harmful effect on the wear resistance of concrete. However, this influence depends on several factors, such as the type of aggregate, its granulometry, its share in the concrete mix, the presence of additives and conditions of exposure to wear. That is why it is important to carry out appropriate tests in order to determine the exact influence of small aggregate particles for certain cases. For the purposes of this test, six concrete mixes were made, which are different from each other in terms of granulometric composition and type of aggregate. Consistency, speed of ultrasound passage, dynamic modulus of elasticity, compressive strength and wear resistance were tested for each mixture. The results are presented in the paper and commented.

Keywords: concrete, durability, wear resistance, small particles, quartz sand

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Marija Babić

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083228406

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: utjecaj sitnih čestica agregata na otpornost na habanje betona

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti otpornost betona na habanje. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi 6 mješavina betona koje će se razlikovati po svom granulometrijskom sastavu i vrsti agregata. Dio mješavina je potrebno napraviti bez frakcije agregata manje od 0.125 mm. U svježem stanju betonu je potrebno odrediti konzistenciju metodom slijeganja, a u očvrslom stanju je potrebno odrediti tlačnu čvrstoću, brzinu prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti te otpornost na habanje. Rezultate je potrebno prikazati, usporediti i komentirati i dati prijedlog za upotrebu betona.

U Splitu 06.03.2023.

Voditelj završnog rada:

Prof.dr.sc. Sandra Juradin

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
1.1. Trajnost betona.....	1
1.2. Projektiranje trajnosti.....	4
2. OPĆI DIO.....	5
2.1. Habanje.....	5
2.2. Ispitivanje otpornosti na habanje.....	7
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	9
3.1. Uvod.....	9
3.2. Izbor komponenti.....	10
3.2.1. Cement.....	10
3.2.2. Agregat.....	12
3.2.3. Voda.....	20
3.2.4. Aditiv.....	21
3.3. Izrada uzoraka betona.....	22
3.3.1. Receptura betonskih mješavina.....	22
3.3.2. Priprema pokusnih mješavina.....	23
3.2.3. Ugradnja svježeg betona u kalupe.....	23
3.4. Ispitivanje svježeg betona.....	24
3.4.1. Ispitivanje konzistencije.....	24
3.4.2. Mjerenje temperature.....	25
3.5. Ispitivanje očvrslog betona.....	26
3.5.1. Mjerenje dinamičkog modula elastičnosti.....	26
3.5.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona.....	29
3.5.3. Ispitivanje otpornosti betona na habanje.....	32
4. ZAKLJUČAK.....	38
5. POPIS LITERATURE.....	39

1. UVOD

Beton je kompozitni materijal sastavljen od krupnog agregata (šljunak ili drobljeni kamen), sitnog agregata (pijesak), vode i cementa. Jedan je od najčešće korištenih materijala u građevinarstvu, zbog svoje visoke tlačne čvrstoće, trajnosti, širokog područja primjena i relativno malih troškova održavanja u odnosu na druge materijale. [1]

Dodavanjem vode cementu, dolazi do niza kemijskih reakcija koje rezultiraju hidratacijom cementa. Ovaj proces je ključan za stvrdnjavanje betona, jer se na taj način formira gusta mreža cementnih minerala, hidrata koji povezuju zrna agregata u kompaktnu cjelinu. Uloga sitnog agregata je da popuni šupljine između krupnijih zrna i da poboljšava obradivost betona. Krupna zrna osiguravaju čvrstoću i stabilnost. Voda sudjeluje u procesu hidratacije cementa i također pomaže samoj obradivosti betona. Međutim, voda se gubi u očvrslom betonu zbog isparavanja i za sobom ostavlja šupljine. Postoji i cijeli niz dodataka (aditiva) koji betona daju neka posebna, dodatna svojstva (plastifikatori, aeranti, regulatori vezanja...). Stoga se modificiranjem njegovog sastava, mogu dobiti različite vrste betona određenih svojstava koja odgovaraju zahtjevima građevinskog projekta.

Glavne mehaničke karakteristike betona su njegova čvrstoća (tlačna, vlačna i posmična) i deformabilnost. Deformabilnost materijala je njegovo svojstvo da se elastično i plastično deformira do trenutka razaranja. Faktori o kojima ta svojstva ovise: vrsta i čvrstoća cementa, čvrstoća i granulometrija agregata, vodocementni faktor, utjecaj aditiva, način pripreme, ugradnja, njega betona... [1]

1.1. Trajnost betona

Beton se kao građevinski materijal koristi u različitim klimatskim područjima, pri čemu je izložen djelovanju raznih agresivnih tvari i mehaničkih oštećenja. Sastav betona i njegova svojstva se moraju projektirati za tu promatranu sredinu. Ne postoji univerzalan beton koji je pogodan za svaku lokaciju. Jedan od prvih koraka u projektiranju betonske konstrukcije je detaljna analiza okoline i predviđanje svih mogućih uzroka oštećenja, kako bi se na temelju toga mogao odabrati beton s najpogodnijim svojstvima za to promatrano područje.

Trajnost betonske konstrukcije, izložene djelovanju neke jedinstvene agresivne sredine, više ovisi o izdržljivosti betona prema toj sredini nego o postignutoj čvrstoći. Danas

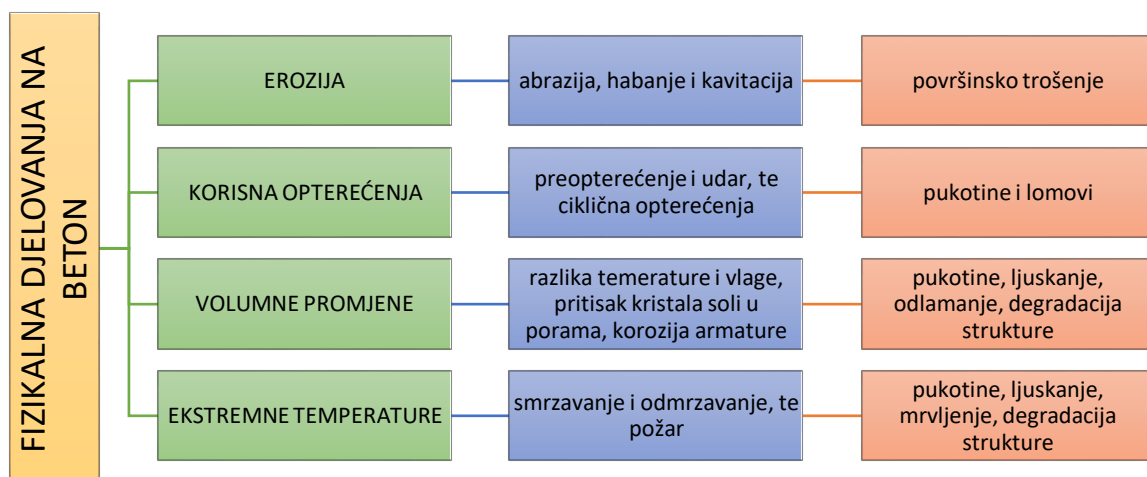
se u mnogim zemljama troši više na održavanje, popravke i sanacije nego na izgradnju same konstrukcije, zbog odabira neadekvatnog materijala.

Tako da je u novije vrijeme prilikom projektiranja i izvođenja betonskih konstrukcija, prihvaćen princip da njihova sigurnost i uporabljivost tijekom cijelog vijeka trajanja mora ostati takva da nisu potrebni visoki troškovi održavanja i popravaka. [2]

Sadašnji pristup građevinara problemima trajnosti betonskih konstrukcija je još uvijek zanatski, to znači da su u propisima, na osnovu iskustva, date upute o sastavu i tehnološkim postupcima ugrađivanja i njegovanja trajnog betona. Razumijevanje mehanizama razaranja betona je vrlo važno za građevinskog inženjera u pronalaženju optimalnih rješenja s tehničkog i ekonomskog aspekta. [3]

Betonska konstrukcija je tijekom izvođenja i same uporabe izložena najčešće istovremenom djelovanju niza nepovoljnih vanjskih čimbenika :

- 1) kemijski (korozija betona, korozija armature...)
- 2) fizički čimbenici – mogu se svrstati u četiri kategorije: mehanička djelovanja iz okoline, preopterećenje, volumne promjene i temperaturni utjecaji (uzroci i posljedice fizikalnih djelovanja na beton prikazani su u tablici 1.1.)



Tablica 1.1. Shema podjele fizičkih čimbenika razaranja betona [3]

- 3) biološki (nastanak vegetacije i mikroorganizama)
- 4) ostali čimbenici

Trajnost betona vezana je uz njegovu sposobnost da zadrži svoje mehaničke i kemijske karakteristike tijekom vremena uslijed djelovanja različitih vanjskih čimbenika i opterećenja. U tablici 1.2. prikazani su razredi izloženosti koji opisuju okolinu u kojoj će se beton nalaziti, odnosno definiraju moguće uzroke oštećenja.

Oznaka razreda	Razred izloženosti
X0	Bez korozijskog djelovanja
XC1-XC4	Korozija uzrokovana karbonatizacijom
XD1-XD3	Korozija kloridima koji nisu iz morske vode
XS1-XS3	Korozija kloridima iz morske vode
XF1-XF4	Smrzavanje i odmrzavanje
XA1-XA3	Kemijska korozija

Tablica 1.2. Razredi izloženosti HRN EN 206 [4]

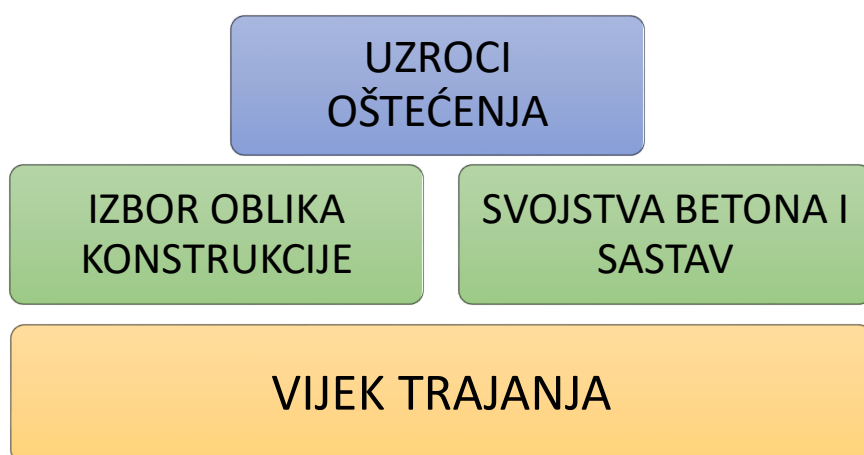
Projektirani uporabni vijek je vremensko razdoblje koje predviđa projektant, te tako određuje svojstva konstrukcije koja utječu na trajnost građevine. Tijekom izvođenja moraju se izvoditi svi elementi konstrukcije prema Projektu konstrukcije. Tijekom same uporabe, uporabni vijek građevine može se produljiti pravovremenim i odgovarajućim postupcima održavanja, a to u samome startu znači i izradu plana održavanja. [4] U tablici 1.3. prikazan je prosječan vijek trajanja betonskih konstrukcija koje su projektirane i izrađeno tako da zahtijevaju minimalno održavanje.

Vrsta elementa ili konstrukcije	Vijek trajanja, godina
Nosive konstrukcije u visokogradnj	Više od 80
Betonski crijep, azbestcement	30-50
Mostovi	60-110
Hidrotehnički tuneli i brane	100-200
Konstrukcije u moru	30-50
Rashladni tornjevi u termoelektranama	25-40

Tablica 1.3. Prosječni vijek trajanja betonskih konstruktivnih elemenata uz minimalne troškove održavanja [2]

1.2. Projektiranje trajnosti

Jedan od glavnih kriterija kod projektiranja trajnosti betonskih konstrukcija je razred tlačne čvrstoće betona. U uvjetima neagresivne okoline, čvrstoća na pritisak je dosta dobar, ako ne i dovoljan pokazatelj trajnosti, ali to nije slučaj sa agresivnom okolinom. Takva pretpostavka može rezultirati smanjenom vijeku trajanja konstrukcije jer u obzir nisu uzeti svi parametri trajnosti. U tablici 1.4. prikazan je model operacija koje je potrebno obaviti kako bi se postigla odgovarajuća trajnost betonske konstrukcije.



Tablica 1.4. Model proračuna vijeka trajanja betonske konstrukcije [2]

Iz modela je vidljivo da je prilikom projektiranja trajnosti betona nužno definiranje mogućih uzroka oštećenja koji nastaju kao posljedica djelovanja okoline. Na temelju određene razine izloženosti betonske konstrukcije i zahtijevanog vijeka trajanja odabire se beton odgovarajućih svojstava. Svaki građevinski projekt je upravo zbog toga i jedinstven. Ista vrsta konstrukcija se mora projektirati drugačije, zbog jedinstvenih uvjeta okoliša, odnosno jedinstvenih fizikalnih i kemijskih djelovanja (npr. most u morskom okruženju i most iznad rijeke).

Studij trajnosti ima jednaku važnost kao i proračun stabilnost, jer stabilnost opada s napredovanjem oštećenja. Sastavni dio studija su i tehnički uvjeti izvedbe, njege i održavanja betona, posebno ako se radi o većim klasama izloženosti. [2]

2. OPĆI DIO

2.1. Habanje

U procese trošenja betona spadaju habanje, erozija i abrazija. Habanje, kao oblik mehaničkog trošenja betona, jedan je od fizičkih uzroka njegovog razaranja. To je pojava karakteristična za sve vrste prometnih površina. Oštećenja od habanja nastaju uslijed interakcije nekog drugog objekta ili materijala sa betonskom površinom. Dakle, riječ je o površinskim oštećenjima betona.

Na površinama gdje je potrebno postići bolju otpornost na habanje, površinski sloj betona izvodi se s agregatom od kvarca, eruptivca, diabaza ili granita. Često se u završni sloj dodavaju čelična ili druga vlakanca. [3]

Istraživanja su pokazala da postoji dosta dobra linearna korelacija između tlačne čvrstoće i otpornosti na habanje. Kod normalnog betona, cementni kamen se brže troši od agregata. Na temelju toga, definirana su neka osnovna pravila za projektiranje sastava betona otpornog na habanje.

Agregat mora biti od kamena koji sam po sebi ima visoku otpornost prema habanju i veliku žilavost, uz visoki udio najkrupnijih zrna. Za krupni agregat najpogodniji kamen je diabaz, a zatim granit. Sitan agregat može biti od kvarca, korunda i slično. [2]

Poželjno je da beton sadrži što manje cementnog kamena i da taj cementni kamen postiže što veću čvrstoću. Najveću čvrstoću postiže cementni kamen od veziva bez sitnih čestica agregata. Naime, ubacivanjem zrna agregata u smjesu cementa dolazi do opadanja njegove čvrstoće zbog koncentracije naprezanja oko tih ubačenih zrna. Međutim, to smanjene čvrstoće cementnog kamena je neophodna, jer je agregat sastavni dio betona. Opadanje čvrstoće cementnog kamena kao dijela betona, ne mora nužno imati veliki značaj na čvrstoću betona kao cjeline.

Budući da beton mora imati određenu obradivost, minimalna količina cementa iznosi 350 kg/m^3 . Što se tiče same granulometrije, najbolji rezultati se postižu kod krivulja s blažim tipom diskontinuiteta. [2]

Dobra granulometrija može poboljšat obradivost betona, smanjiti šanse za formiranje pukotina i povećati otpornost na habanje. Veće čestice agregata pružaju dodatan otpor prema bilo kakvom obliku mehaničkog trošenja, a sitne čestice ispunjavaju prazan prostor između

krupnijih zrna te tako smanjuju volumnu koncentraciju pora i šupljina, odnosno povećavaju gustoću betonu.

Veći sadržaj vode u betonu povećava njegovu obradivost, ali smanjuje čvrstoću zbog povećane koncentracije pora i šupljina. Zbog toga bi vodocementni faktor trebao biti što manji, a obradivost se može poboljšati korištenjem odgovarajućih dodataka.

Tablica 2.1. predstavlja razrede izloženosti betona u slučaju habanja. Njome je definiran intenzitet habanja koji promatrani beton može podnijeti i područje njegove primjene.

7 Korozija prouzročena habanjem.		
Kada je površina betona izložena mehaničkom habanju razrede izloženosti treba svrstati kako slijedi:		
XM1	Umjereno habanje	Prometne površine za vozila s pneumatskim kotačima.
XM2	Jako habanje	Prometne površine za vozila s punim gumenim kotačima, za lako i teško prometno opterećenje i brzi protok vode.
XM3	Vrlo jako habanje	Prometne površine za viljuškare s plastičnim kotačima, za vrlo teško prometno opterećenje i za brzi protok vode koja nosi pijesak.

Tablica 2.1. Beton izložen habanju – klasifikacija djelovanja prema HRN EN 206-1 [5]

Definiraju se četiri načina na koja habanje može utjecati na beton:

- istrošenost uzrokovana prolaskom ljudi
- istrošenost zbog prometa vozila s gumama s čavlima i lancima
- abrazivni materijali u vodi koji utječu na hidrauličke strukture
- brzina vode koja stvara kavitaciju na površini betona [6]

U najgorem slučaju habanje može u potpunosti istrošiti beton. Međutim, habanje ne uzrokuje samo mehaničko trošenje betona, već također povećava njegovu izloženost drugim štetnim tvarima. Oštećenjem površinskog sloja, olakšava se ulaz vode i drugih agresivnih tvari, koje rezultiraju kemijskim (korozija betona i armature) i drugim oblicima razaranja (kavitacija).

Habanje predstavlja jedno od brojnih mogućih uzroka oštećenja betona, zbog čega je potrebno detaljno poznavanje okoline i intenziteta habanja kako bi se mogao projektirati beton odgovarajućih svojstava.

2.2. Ispitivanje otpornosti na habanje

Ispitivanje otpornosti betona na habanje izvodi se brušenjem ispitnog tijela po Bohme-u, u skladu sa HRN 1128—annex M. Uzorci su oblika kocke duljine brida $71 \pm 1,5$ mm. Nakon sušenja i postizanja dovoljno visoke čvrstoće, uzorke je potrebno izvagati i izmjeriti njihove dimenzije prije samog ispitivanja.

Na rotacijsku brusnu ploču posipa se oko 20 g abrazivnog pijeska. Uzorak je potrebno fiksirati za jedno mjesto, pri čemu će se, prilikom okretanja brusne ploče, uzorak brusiti s donje strane, kao što je prikazano na slici 2.2.1. Ispitivanje se obavlja u 16 ciklusa po 22 okretaja (slika 2.2.2.).

Nakon jednog završenog ciklusa potrebno je prikupiti izbrušeni materijal, dodati novu količinu abrazivnog pijeska i kocku okrenuti na novu stranu (najčešće u smjeru kazaljke na satu). Vaganje se obavlja svako 4 ciklusa, pri čemu se habaju samo 4 strane kocke (jedna dimenzija ostaje nepromijenjena). Dimenzije se ponovno mjere nakon zadnjeg ciklusa.

Prikupljeni podaci unose se u tablicu. Iz njih se, korištenjem odgovarajuće formule, za svaki uzorak dobiva mjera otpornosti na habanje ($\text{cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$). Na temelju toga rezultata, uzorci se svrstavaju u odgovarajući razred izloženosti prouzročene habanjem. Navedeni postupak proveden je u poglavlju 3.5.3.

Slika 2.2.1. Rotacijska brusna ploča za ispitivanje otpornosti na habanje (slika zabilježena tijekom ispitivanja)



Slika 2.2.2. Mjerenje ciklusa habanja i broja okretaja (slika zabilježena tijekom ispitivanja)



3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Uvod

Tema završnog rada je ispitati utjecaj sitnih čestica agregata (manje od 0.125 mm) na habanje betona. Za potrebe ispitivanja izrađeno je 6 različitih pokusnih mješavina. U recepturi svake promatrane mješavine betona, mijenja se samo granulometrijski sastav i podrijetlo sitnog agregata. Za potrebe nekih mješavina, agregat je oštro frakcioniran i podijeljen u frakcije koje sadrže samo zrna jednog razreda, odnosno razredi ne sadržavaju nadmijerna i podmijerna zrna. Budući da se promatra samo utjecaj agregata na habanje, ostale komponente ostaju nepromijenjene u svakoj mješavini.

Odabrani sastav agregata i oznake mješavina prikazane se u tablici 3.1.

OZNAKA	SITNI AGREGAT				KRUPNI AGREGAT	
M1	65 % frakcije drobljenog vapnenca 0/4 mm		nije oštro frakcioniran		35 % frakcije 4/8 mm	nije oštro frakcioniran
M2	65 % frakcije drobljenog vapnenca 0.125/4 mm		oštro frakcioniran		35 % frakcije 4/8 mm	oštro frakcioniran
M3	65% frakcije kvarca 0.3/1 mm		nije oštro frakcioniran		35 % frakcije 4/8 mm	oštro frakcioniran
M4	50% frakcije drobljenog vapnenca 1/4 mm	15% frakcije kvarca 0.3/1 mm	oštro frakcioniran	nije oštro frakcioniran	35 % frakcije 4/8 mm	oštro frakcioniran
M5	50% frakcije drobljenog vapnenca 0/4 mm	15% frakcije kvarca 0.3/1 mm	nije oštro frakcioniran	nije oštro frakcioniran	35 % frakcije 4/8 mm	nije oštro frakcioniran
M6	35% frakcije drobljenog vapnenca 0/4 mm		nije oštro frakcioniran		65 % frakcije 4/8 mm	nije oštro frakcioniran

Tablica 3.1. Oznake ispitnih mješavina i sastav agregata

Betonskim mješavinama ispitala su se svojstva u svježem stanju. Mjerilo se slijeganje svježeg betona i njegova temperatura. Nakon ugradnje uzoraka u kalupe, stavljanja u vodu i čuvanja do starosti od 28 dana, u očvrslom stanju ispitala se brzina prolaska ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, tlačna čvrstoća i otpornost prema habanju.

3.2. Izbor komponenti

3.2.1. Cement

Cement predstavlja vezivnu komponentu betona koja se dobiva pečenjem osnovnog materijala (vapnenca i gline) na visokim temperaturama, najčešće u rotacijskim pećima. Pečenjem nastaje klinker koji se onda melje u fini prah, a kao konačan proizvod dobiva se cement. Za izradu svih pokusnih mješavina korišten je cement CEM I 42.5 R. Tablica 3.2.1.1. prikazuje sastav korištenog portland cementa.

TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K)	95-100%	95-100
Sporedni sastojci (S)	0-5%	0-5

Tablica 3.2.1.1. Sastav portland cementa CEM I 42.5 R [7]

Karakteristike:

- vrlo visoka rana i konačna čvrstoća
- kratak period početka vezivanja
- optimalna obradivost
- znatan razvoj topline hidratacije

Primjena:

- svi betoni s visokim zahtjevima za početnom mehaničkom otpornošću
- izgradnja zahtjevnih konstrukcija infrastrukturnih objekata od betona visokih marki
- izgradnja javnih i poslovnih objekata
- predgotovljeni i montažni elementi
- prednapregnute konstrukcije

Osobito prikladan:

- za betonske radove pri niskim temperaturama
- za izgradnju objekata gdje se traže brzo skidanje oplata, manipulacija elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi
- za izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje

Transport i skladištenje:

- transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage
- transportna sredstva prije punjenja cementa moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa
- skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage
- cement se može uporabiti 3 mjeseca nakon isporuke

U tablici 3.2.1.2. prikazane su neke bitne značajke cementa CEM I 42.5 R koje zadovoljavaju vrijednosti propisane normama i standardima.

Bitna značajka	Svojstvo	Harmonizirana tehnička specifikacija
Oznaka i sastav	CEM I	EN 197-1:2011
Tlačna čvrstoća (rana i normirana)	42.5 N	
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	
Postojanost volumena: -Le Chatelier -udjel SO ₃	zadovoljava	
Udjel klorida	zadovoljava	
Netopljivi ostatak	zadovoljava	
Gubitak žarenjem	zadovoljava	

Tablica 3.2.1.2. *Sastav portland cementa CEM I 42.5 R [7]*

3.2.2. Agregat

Agregat je ispuna betona koja može biti prirodnog ili umjetnog podrijetla. Promatrani ispitni uzorci međusobno se razlikuju u granulometriji, ali i u podrijetlu samog agregata. Za sve betonske mješavine korištena je frakcija 4-8 mm koja je izrađena od drobljenog vapnenca. Dakle, sve mješavine imaju isto maksimalno zrno. Međutim, za sitni agregat, u nekim mješavinama je korišten onaj vapnenačkog podrijetla, kod nekih je korišten kvarcni pijesak, a za neke uzorke napravljena je i kombinacija tih dvaju materijala.

Korišteni drobljeni vapnenac potječe iz nalazišta u Planom pokraj Trogira. Za izradu nekih mješavina upotrijebljen je kvarcni pijesak Min2C, odnosno pijesak za fuge, granulometrije 0.3-1 mm.

Jedna od glavnih prednosti kvarca kao materijala je njegova ujednačena kvaliteta, odnosno konstantna kristalna struktura. Kvarcni pijesak ima izvrsnu otpornost na habanje i čvrstoću zrna. Kristali kvarca daju materijalu koji je izrađen od njega izvrsna eksploatacijska svojstva, a tu spadaju i snaga, otpornost na kiseline i lužine, mraz i atmosferilije. Upotrijebljen u odgovarajućim omjerima, idealan je dodatak betonu i mortu jer im poboljšava čvrstoću i tvrdoću. Nalazišta kvarcnog pijeska u RH su na području između Drave i Save, oko Sinja, na otoku Visu i u Lipiku.

Agregat se dijeli na dvije osnovne skupine (s obzirom na sklonost segregaciji):

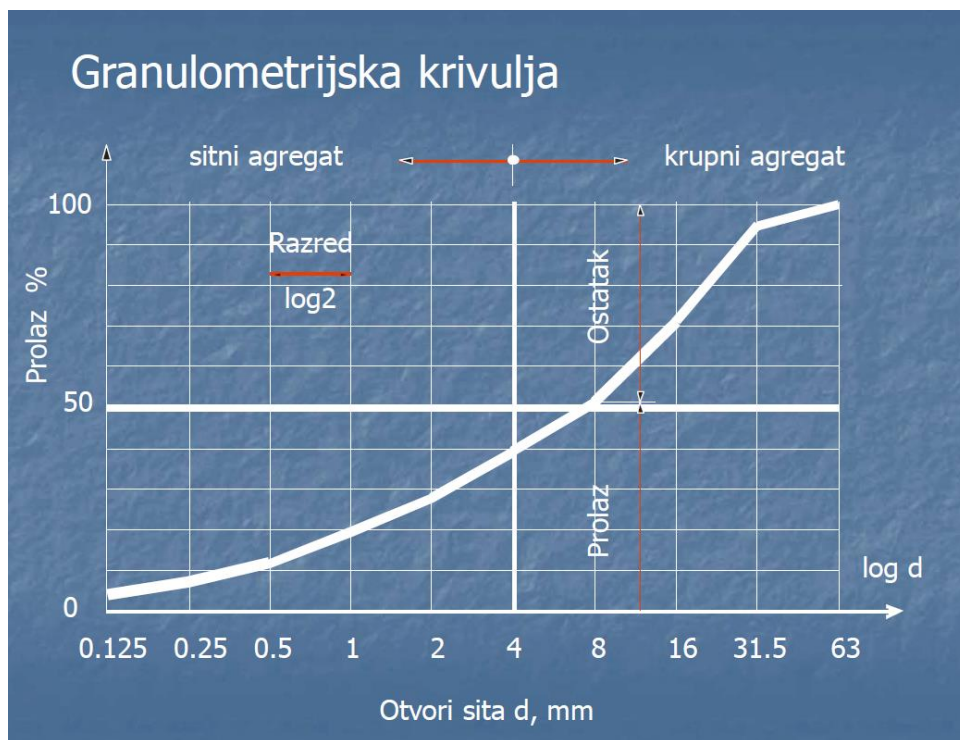
1. SITNI AGREGAT, zrna sitnija od 4 mm
2. KRUPNI AGREGAT, zrna krupnija od 4 mm

Općenito, podaci kojima se definira veličina zrna od kojih se sastoji agregat i koliko je udio svake pojedine veličine zrna u njegovom ukupnom sastavu, naziva se granulometrijski sastav ili granulacija agregata. Ispituje se prosijavanjem potpuno suhog uzorka agregata, na sitima standardiziranih veličina. Utvrđuje se masa agregata koja je prošla kroz svako sito, te se izražava u postotcima ukupne mase promatranog uzorka agregata. [2] Prema ISO (International Standard Organization) za ispitivanje agregata upotrebljava se standardna serija sita sa sljedećim otvorima (u milimetrima):

0,063 0,125 0,25 0,5 1 2 4 8 16 31,5 63 125 [2]

Granulometrijska krivulja

Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava mogu se prikazati dijagramom, kao što je vidljivo na slici 3.2.2. Prolaz kroz sito (u postotcima) nanosi se na ordinatu, a veličina otvora na apscisu (u milimetrima). Otvori na situ nanose se u logaritamskom mjerilu. Za svaku betonsku mješavinu priložena je odgovarajuća granulometrijska krivulja.



Slika 3.2.2. Prikaz granulometrijske krivulje agregata [2]

Frakcioniranje agregata

Svaki agregat nema granulometrijski sastav koji je pogodan za izradu betona. Naime, beton koji sadrži zrna različitih veličina, ima veću sklonost segregaciji. Međutim, korištenjem zrna jednakih ili sličnih veličina dolazi do povećanja koncentracije pora i šupljina unutar samog agregatnog skeleta, koje bi inače ispunila sitnija zrna.

Granulometrijski sastav agregata treba biti takav, da se postigne što gušće pakiranje, odnosno raspored zrna koji u betonu daje minimum šupljina. [3]

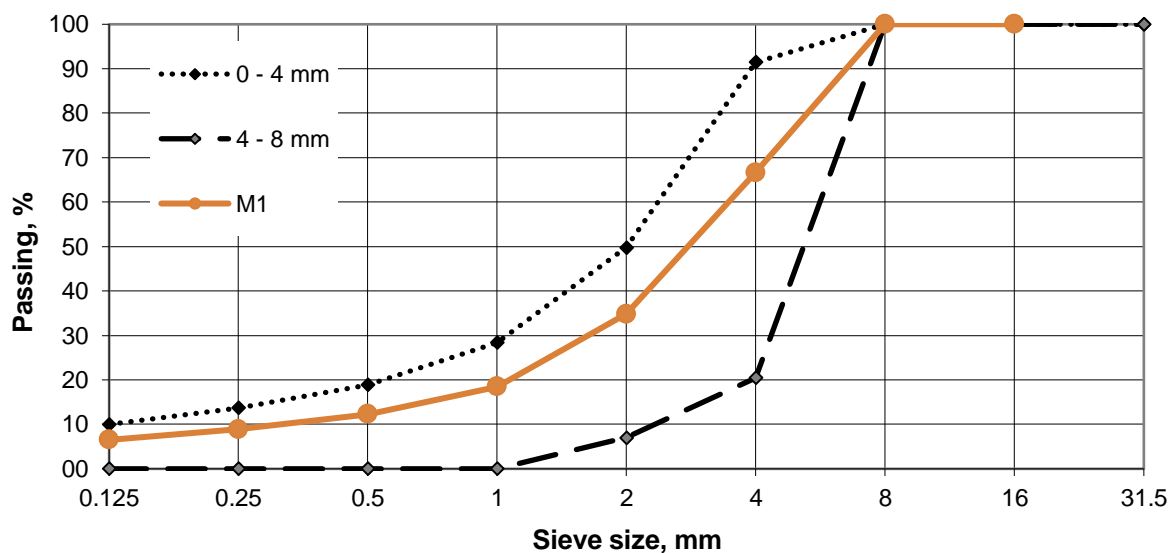
Promatrani agregat se s obzirom na veličinu zrna razdvaja u nekoliko dijelova. Ti dijelovi koji sadržavaju zrna određenih veličina nazivaju se frakcije. Granica razdvajanja odabire se tako, da frakcija sadrži samo onoliko različitih veličina zrna agregata da

segregacija pojedine frakcije bude prihvatljiva. Općenito, sitnije frakcije imaju manju sklonost segregaciji, te je granica razdvajanja u tom području dosta šira, odnosno sitnije frakcije sadrži više različitih veličina zrna. [2]

Oštrina frakcioniranja

Kada bi se frakcioniranje vršilo u laboratorijskim uvjetima, svaka frakcija bi sadržavala samo zrna veličine između donje i gornje nazivne granice (idealna krivulja). Ovakvo frakcioniranje bilo bi veoma skupo. Prilikom industrijskog prosijavanja svaka frakcija sadrži nešto zrna susjednih frakcija. Zrna veća od gornje nazivne veličine zovu se nadmjerna zrna, a zrna manja od donje nazivne veličine podmjerna zrna. Podmjerna i nadmjerna zrna predstavljaju onečišćenje frakcije. Ako svaka frakcija sadrži malu količinu onečišćenja, kaže se da je agregat oštro frakcioniran. Frakcija agregata ne smije sadržavati više od 15% nadmjernih zrna, te više od 10% podmjernih zrna. [2]

Betonska mješavina M1



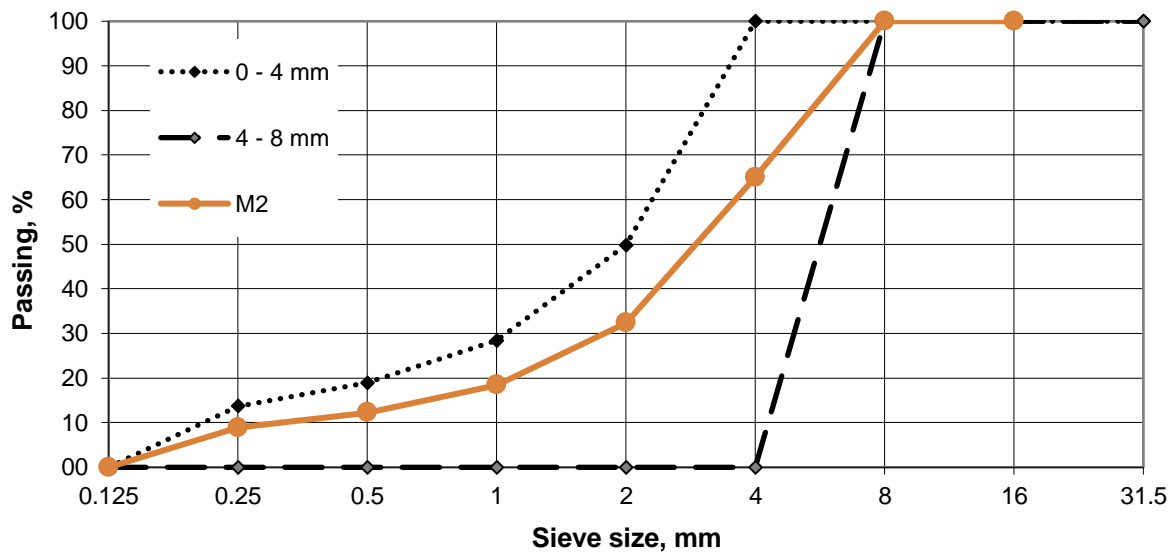
Graf 3.2.2.1. *Granulometrijska krivulja za mješavinu M1*

Betonska mješavina M1 sastavljena je od dvije frakcije: 0-4 mm (65%) i 4-8 mm (35%). Iz grafa 3.2.2.1., koji prikazuje granulometriju promatrane mješavine, vidljivo je da frakcija 0-4 mm sadržava zrna agregata sitnija od 0.125 mm, jer je prolaz na tom situ 10 %.

Na situ od 4 mm, prolaz iznosi samo 90 %, što znači da frakcija sadržava čak 10 % zrna većih od gornje nazivne granice. Riječ je o nadmjernim zrnima.

Što se tiče frakcije 4-8 mm, ona ne sadržava nadmjerna zrna, ali zato ima prolaz i na situ od 4 mm i na situ od 2 mm. To znači da frakcija 4-8 mm ima čak 20 % podmjernih zrna, odnosno zrna manjih od donje nazivne granice.

Betonska mješavina M2

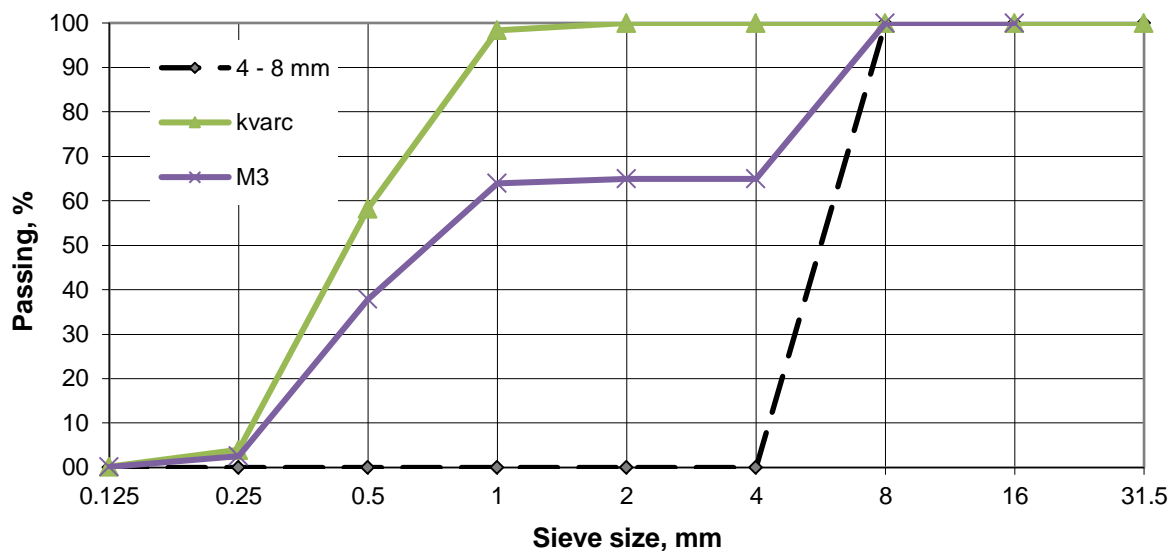


Graf 3.2.2.2. *Granulometrijska krivulja za mješavinu M2*

Betonska mješavina M2 sastavljena je od istih frakcija kao i prva mješavina: 0-4 mm (65%) i 4-8 mm (35%).

Graf 3.2.2.2. prikazuje da betonska mješavina M2 nema zrna sitnija od 0.125 mm (zapravo je riječ o frakciji 0.125-4 mm), a obje frakcije sadržavaju samo zrna veličine između njihove donje i gornje nazivne granice, odnosno nema ni nadmjernih ni podmjernih zrna. U tome je zapravo razliku između mješavina M1 i M2.

Betonska mješavina M3

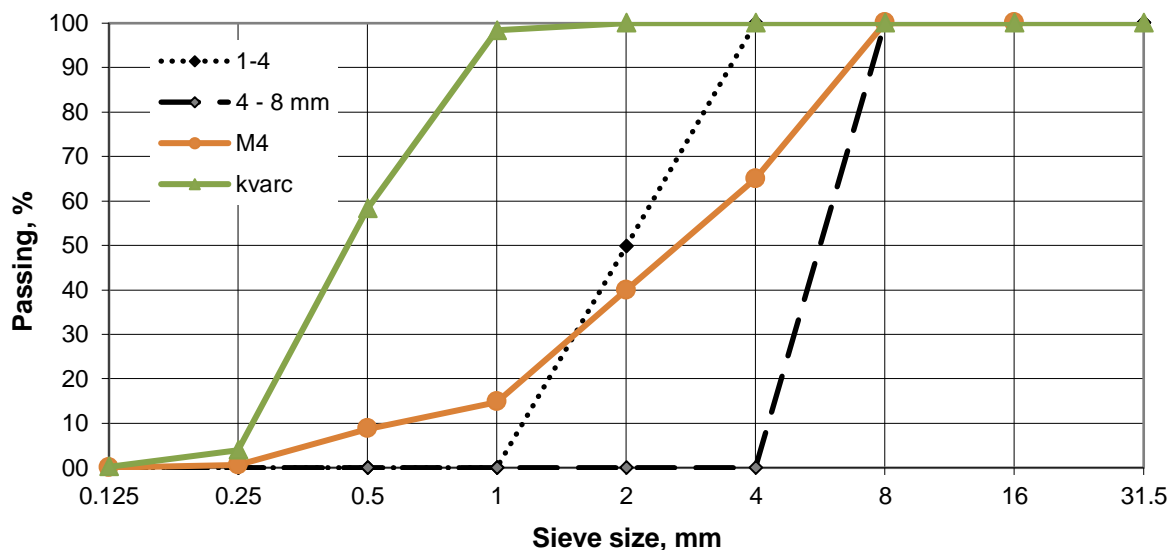


Graf 3.2.2.3. Granulometrijska krivulja za mješavinu M3

Betonska mješavine M3 sastavljena je od: kvarcnog pijeska veličine zrna 0.3-1 mm (65%) i frakcije 4-8 mm (35%).

Iz grafa 3.2.2.3. vidljivo je da frakcija 4-8 mm nema ni nadmjernih ni podmjernih zrna. Što se tiče kvarcnog pijeska, na situ od 1 mm ne postoji 100 postotni prolaz, što znači da pijesak sadržava nešto malo zrna većih od 1 mm, ali zato ne postoje čestice kvarca sitnije od 0.125 mm.

Betonska mješavina M4

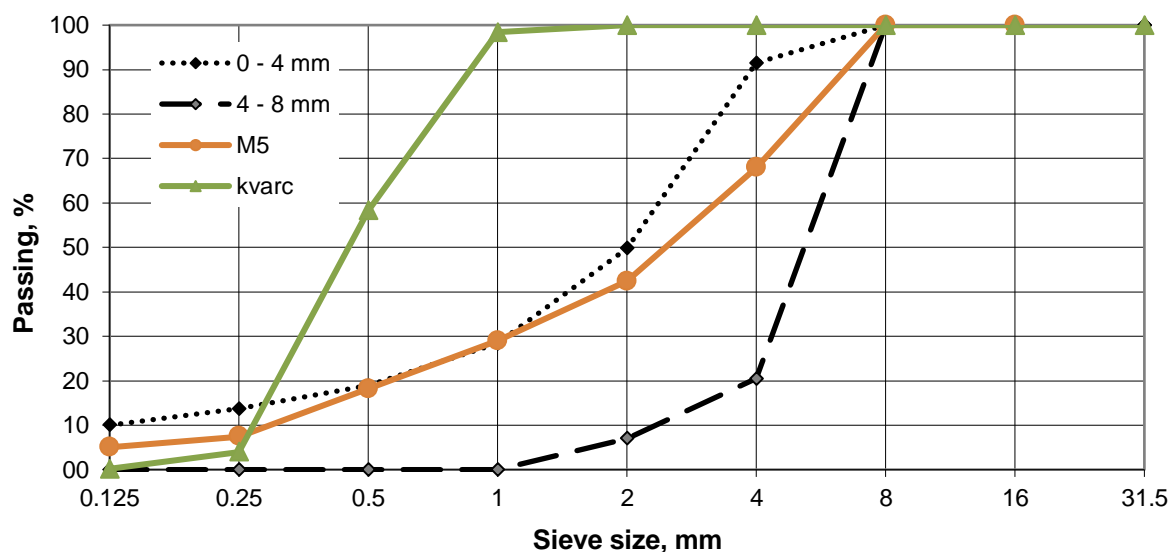


Graf 3.2.2.4. Granulometrijska krivulja za mješavinu M4

Betonska mješavina M4 sastoji se od: kvarcnog pijeska veličine zrna 0.3-1 mm (15%), frakcije 1-4 mm (50%) i frakcije 4-8 mm (35%).

Graf 3.2.2.4. prikazuje sve frakcije. Korišten je isti kvarcni pijesak kao i u mješavini M3, bez zrna sitnijih od 0.125 mm. Korištene vapnenačke frakcije sadržavaju samo zrna veličine između njihovih donjih i gornjih nazivnih granica.

Betonska mješavina M5

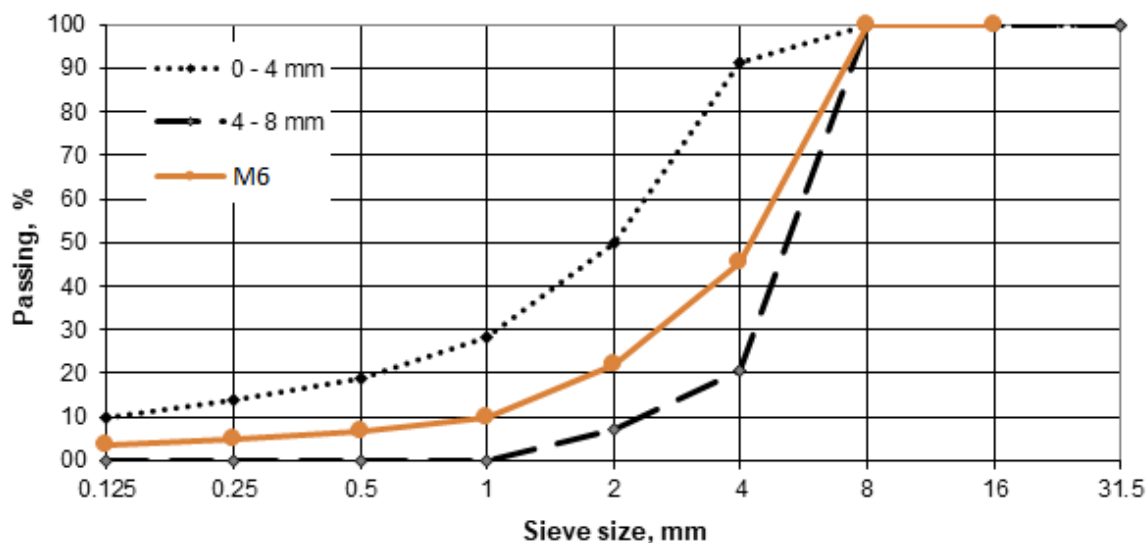


Graf 3.2.2.5. Granulometrijska krivulja za mješavinu M5

Betonska mješavina M5 sastoji se od: kvarcnog pijeska veličine zrna 0.3-1 mm (15%), frakcije 0-4 mm (50%) i frakcije 4-8 mm (35%).

Iz grafa 3.2.2.5. vidljivo je da se javljaju iste frakcije sa onečišćenjima kao i u betonskoj mješavini M1, samo što je ovdje dodatno korišten i kvarc koji je iste granulometrije u svim mješavinama gdje se koristi. Dakle, postoje zrna agregata sitnija od 0.125 mm.

Betonska mješavina M6



Graf 3.2.2.6. *Granulometrijska krivulja za mješavinu M6*

Za mješavinu M6 korištene su iste frakcije kao i u mješavine M1, a razlika se javlja jedino u omjerima krupnog i sitnog agregata: 0-4 mm (35%) i 4-8 mm (65%).

Na grafu 3.2.2.6. vidljivo je da je granulometrija frakcije identična kao i za mješavinu M1, s istim udjelom nadmjernih i podmjernih zrna. Razlika je vidljiva tek u samoj granulometrijskoj krivulji agregata.

U tablici 3.2.2. prikazana su neke od karakteristika agregata za svaku betonsku mješavinu. Svaka mješavina predstavlja drugačiju kombinaciju tih svojstava (mješavine M1 i M6 razlikuju se u omjerima sitnog i krupnog agregata), a u poglavlju 3.5.3 promatra se kakav utjecaj imaju te kombinacije na otpornost betona prema habanju.

<i>Mješavina</i>	<i>Čestice manje od 0.125 mm</i>	<i>Kvarcni pijesak</i>	<i>Podrijetlo sitnog agregata</i>
M1	sadržava	ne sadržava	vapnenac
M2	ne sadržava	ne sadržava	vapnenac
M3	ne sadržava	sadržava	kvarc
M4	ne sadržava	sadržava	kombinacija kvarca i vapnenca
M5	sadržava	sadržava	kombinacija kvarca i vapnenca
M6	sadržava	ne sadržava	vapnenac

Tablica 3.2.2. *Prikaz betonskih mješavina*

Za dobar sastav betona, koji se pri obradi neće segregirati i neće pretjerano izdvajati vodu nakon zbijanja, nije dovoljno sastaviti dobar granulometrijski sastav, nego se još mora osigurati dovoljna količina sitnih čestica. Njih čini ukupna količina cementa i najsitnija zrnca pijeska do 0.25 mm. Potrebne količine sitnih čestica za metar kubni svježeg betona zavise od maksimalnog zrna agregata. [2]

Sitne čestice u svježem betonu daju potrebnu kohezivnost mješavine. Čvrstoća kontaktne zone između agregata i cementnog kamena je najmanja u usporedbi sa čvrstoćom samog agregata ili cementnog kamena. Sitni agregat poboljšava svojstva vezivne paste.

3.2.3. Voda

Kvaliteta vode za izradu, ali i za njegu već očvrstlog betona ima važnu ulogu u postizanju njegovih željenih svojstava. Korištenje vode koja ne odgovara propisanim standardima za izradu betona može rezultirati nizom štetnih (uglavnom kemijskih) pojava u samom betonu čime se smanjuje njegova kvaliteta i trajnost.

Za izradu betona smije se koristiti samo čista voda. Za beton su posebno štetni šećer, masti, ulja i deterdženti (kanalizacijske vode i ispusti iz industrijskih postrojenja).

U vodi također mogu biti prisutne različite kemikalije kao što su sulfati, spojevi klora te organske i anorganske soli koji su štetni jer mogu: utjecati na vezanje, smanjiti čvrstoću betona, učiniti beton volumenski nepostojanim, razoriti ga. [2]

Spomenute štetne tvari mogu uzrokovati pojavu različitih vrsta korozije betona koje stvaraju mehanička ili kemijska oštećenja. Tu se dodatno javlja opasnost i od korozije armature.

Voda za pripremu betona mora imati pH-faktor između 4.5 i 9.5. Općenito, pitka voda može se upotrijebiti za pripremu betona bez prethodnih ispitivanja.

3.2.4. Aditiv

Superplastifikator se koristi za izradu betona, morta ili paste vrlo visoke čvrstoće, kada glavni cilj nije ušteda u sadržaju paste, već postizanje čim veće čvrstoće. Takav beton izrađuje se s velikim sadržajem cementa, ali dodatkom superplastifikatora, vodocementni faktor se može smanjiti ispod 0.40, a katkada i ispod 0.30. Superplastifikator, u slučaju nedovoljne količine cementa, štetno djeluje na svojstva betona, zbog čega je granična količina cementa 350 kg/m^3 . [2]

Za izradu pokusnih mješavina korišten je superplastifikator MasterGlenium ACE 770. Posebna molekularna konfiguracija MasterGlenium ACE 770 ubrzava hidrataciju cementa. Ubrzana apsorpcija njegovih molekule za čestice cementa, u kombinaciji s učinkovitim disperzijskim učinkom, izlaže sada povećanu površinu zrna cementa djelovanju molekula vode. Kao rezultat, moguće je dobiti raniji razvoj topline hidratacije, brz razvoj proizvoda hidratacije i, kao posljedica toga, veće snage u vrlo ranoj dobi. [8]

MasterGlenium ACE 770 ne sadrži kloride, zadovoljava UNI EN 934-2, UNI EN 480 (1-2) i ASTM C 494-92 zahtjeva za tip F. Može se koristiti za sve cemente koji ispunjavaju UNI EN 197-1 i ASTM standarde.

U usporedbi s tradicionalnim superplastifikatorima, poboljšana su brojna svojstva betona: rana i konačna čvrstoća, čvrstoća na pritisak i savijanje, prionjivost uz čelik, modul elastičnosti, skupljanje, puzanje i nepropusnost. [8]

3.3. Izrada uzoraka betona

3.3.1. Receptura betonskih mješavina

Za potrebe ispitivanja izrađeno je ukupno šest betonskih mješavina različitog granulometrijskog sastava agregata. Za svaku mješavinu korištena je jednaka količina cementa, vode, aditiva i zraka. Receptura svih ispitnih mješavina prikazana je u tablici 3.3.1.

BETONSKA MJEŠAVINA		CEMENT	VODA	ADITIV	ZRAK	AGREGAT			
						0-4	1-4	4-8	kvarc
M1	volumen	129	180	2.6	30	427.9	/	230.4	/
	masa	400	180	2.8	/	1146.9	/	617.5	/
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						65	0	35	0
M2	volumen	129	180	2.6	30	427.9	/	230.4	/
	masa	400	180	2.8	/	1146.9	/	617.5	/
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						65	0	35	0
M3	volumen	129	180	2.6	30	/	/	230.4	427.9
	masa	400	180	2.8	/	/	/	617.5	1155.4
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						0	0	35	65
M4	volumen	129	180	2.6	30	/	329.2	230.4	98.8
	masa	400	180	2.8	/	/	882.2	617.5	266.6
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						0	50	35	15
M5	volumen	129	180	2.6	30	329.2	/	230.4	98.8
	masa	400	180	2.8	/	882.2	/	617.5	266.6
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						50	0	35	15
M6	volumen	129	180	2.6	30	230.4	/	427.9	/
	masa	400	180	2.8	/	617.5	/	1146.9	/
POSTOTAK POJEDINE FRAKCIJE						35	0	65	0

Tablica 3.3.1. Receptura svih mješavina

3.3.2. Priprema pokusnih mješavina

Sve mješavine su izrađene u laboratoriju za građevinske materijale na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, prema propisanim standardima. Svi sastojci su precizno dozirani. Miješalici se prvo dodaje agregat, postepeno po frakcijama, a zatim i sam cement. Suhi sastojci se miješaju zajedno 90 s, a nakon toga suhoj mješavini dodavaju se voda i aditiv. Svi sastojci se zajedno miješaju još 180 s.

3.2.3. Ugradnja svježeg betona u kalupe

Nakon završenog miješanja, prvo se provjerava slijeganje i temperatura svježeg betonske mješavine. Beton se zatim ugrađuje u standardne kalupe oblika kocke 15x15x15 cm. Zbijanje svježeg betona u kalupe obavlja se korištenjem uranjajućeg vibratora. Vibriranje betona traje sve dok iz njega izlaze veći mjehurići zraka, odnosno sve dok se na površini betona ne počne izlučivati voda ili pasta.

Nakon završetka vibriranja uzorci stoje u kalupima 24 sata, nakon čega se vade iz njih i stavljaju u vodu na čuvanje, idućih 28 dana, na sobnoj temperaturi od $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

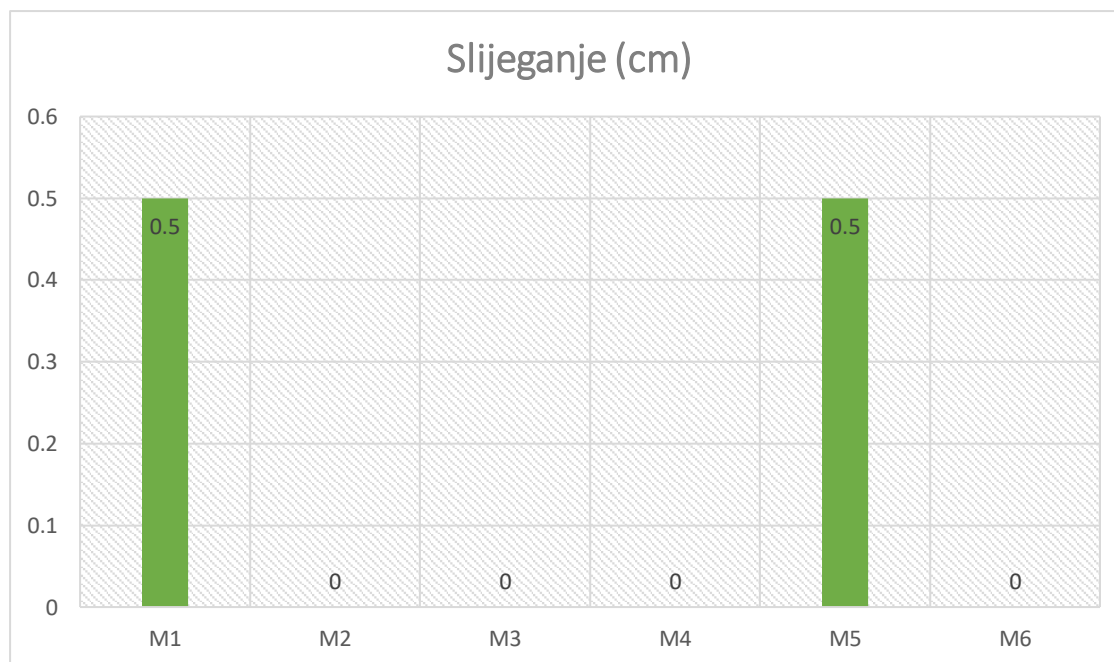
3.4. Ispitivanje svježeg betona

3.4.1. Ispitivanje konzistencije

Metoda slijeganja je najstarija i najjednostavnija metoda određivanja konzistencije svježeg betona. Ispitivanje se obavlja tako da se u kalup, oblika krnjeg stošca (Abramsov kalup) i visine 30 cm, dodaje beton u tri sloja. Kalup je potrebno prethodno navlažiti s unutarnje strane. Nakon ugradnja svakog sloja potrebno je dodatno zbijati beton korištenjem čelične šipke koja se zabija u njega 25 puta. Kod zbijanja prvog sloja, šipka ne smije dodirivati samu podlogu, a kod drugog i trećeg sloja šipka ne treba prodirati u donji, već zbijeni sloj. [9]

Na kraju je površinu betona potrebno samo zagladiti. Kalup je nakon toga potrebno podignuti vertikalno prema gore. Nakon podizanja kalupa mjeri se slijeganje betona u odnosu na početnu visinu. Na vrh kalupa, koji je sada prazan, postavlja se čelična šipka te se mjeri visinska razlika između donjeg dijela šipke i vrha slegnutog betona.

Rezultati slijeganja za sve ispitne mješavine prikazani su na grafu 3.4.1.



Graf 3.4.1. Rezultati ispitivanja slijeganja

Razredi konzistencije:

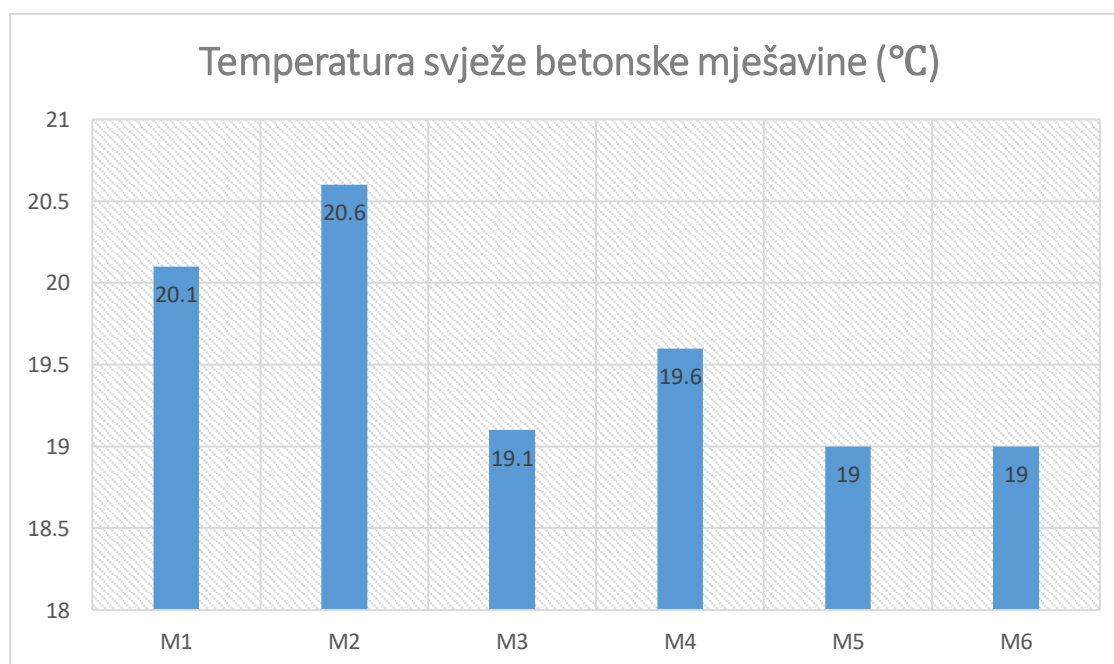
- slijeganje 10-40 mm → S1
- slijeganje 50-90 mm → S2
- slijeganje 100-150 mm → S3 [6]

Svi ispitni uzorci pokazuju minimalno ili nepostojeće slijeganje. Stoga ne pripadaju nijednom od gore navedenih razreda konzistencije betona.

Jedan od mogućih razloga je korištenje superplastifikatora. Naime, već oko 20 minuta nakon pripreme betona, njegovo djelovanje na svježi beton naglo slabi. To se manifestira kao veliki gubitak konzistencije betona. [2]

3.4.2. Mjerenje temperature

Temperatura svježe betonske mješavine mjeri se korištenjem digitalnog termometra, a izmjerene temperature prikazane se na grafu 3.4.2.



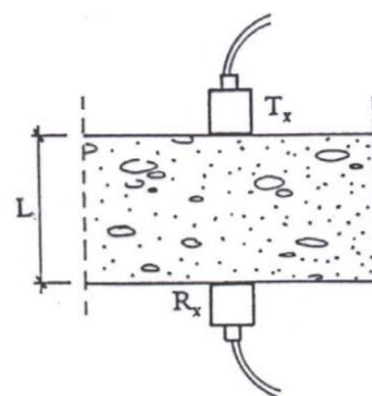
Graf 3.4.2. Rezultati mjerenja temperature

3.5. Ispitivanje očvrslag betona

3.5.1. Mjerenje brzine prolaska ultrazvuka i određivanje dinamičkog modula elastičnosti

Ultrazvučna metoda jedna je od nedestruktivnih metoda ispitivanja materijala. Ultrazvučni impuls provodi se prema normi HRN EN 12504-4. Metoda se temelji na prolasku longitudinalnih valova kroz površine uzorka betona. Ispitivanje se vrši na 3 mjesta po visini uzorka: dno uzorka, sredina i pri vrhu. Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta prvu sondu pa do trenutka primanja impulsa u drugu sondu (prikazano na slici 3.5.1) predstavlja vrijeme prolaska impulsa (t) kroz uzorak betona duljine (l).

Prednost ove metode je njezina brza primjena i dobivanje prilično točnih rezultata vezano uz dimenzije pukotine i segregaciju uzorka. [10] Ova metoda, također služi za određivanje dinamičkoga modula elastičnosti



Slika 3.5.1. Prolazak ultrazvuka kroz uzorak betona [11]

Rezultati mjerenja vremena prolaska ultrazvuka prikazani su u tablici 3.5.1.1.

Uzorak	a [mm]	b [mm]	c [mm]	masa [g]	t_1 [μ s]	t_2 [μ s]	t_3 [μ s]
M1	153	150	150	8146,9	36,2	36,5	36,3
M2	154	150	150	8242,4	36,5	36,5	36,2
M3	152	150	150	7678,0	37,8	37,7	37,3
M4	152	150	150	8088,7	36,2	36,5	36,4
M5	152	150	150	8124,3	36,6	36,7	36,5
M6	152	150	150	8128,1	36,5	36,5	36,3

Tablica 3.5.1.1. Rezultati mjerenja prolaska ultrazvuka

Brzina ultrazvuka predstavlja omjer duljine uzorka i srednje vrijednosti izmjerenog vremena:

$$v = \frac{l}{t} \text{ (m/s)}$$

U tablici 3.5.1.2. prikazane su izračunate vrijednosti brzine prolaska ultrazvuka za svaki uzorak betona, zajedno sa pripadajućim volumenom i gustoćom.

Uzorak	Brzina v [m/s]	Volumen [m ³]	Gustoća [kg/m ³]
M1	4128,44	0,003443	2366,565
M2	4120,88	0,003465	2378,759
M3	3989,36	0,00342	2245,029
M4	4124,66	0,00342	2365,117
M5	4098,36	0,00342	2375,526
M6	4117,11	0,00342	2376,637

Tablica 3.5.1.2. Izračunate vrijednosti brzine prolaska ultrazvuka, gustoća i volumen betonskog uzorka

Prema Neville-u kvaliteta betona ovisi o brzini kretanja ultrazvuka kroz beton. U tablici 3.5.1.3. prikazuje se ocjena kvalitete betona korištenjem ultrazvuka.

Brzina ultrazvuka [km/s]	Kvaliteta betona
>4.5	Odlična
3.5-4.5	Dobra
3.0-3.5	Sumnjiva
2.0-3.0	Loša
<2,0	Potpuno loša

Tablica 3.5.1.3. Ocjena kvalitete betona prema Neville-u [11]

Iz priložene tablice je vidljivo da svi ispitni uzorci betona imaju dobru kvalitetu.

Dinamički modul elastičnosti:

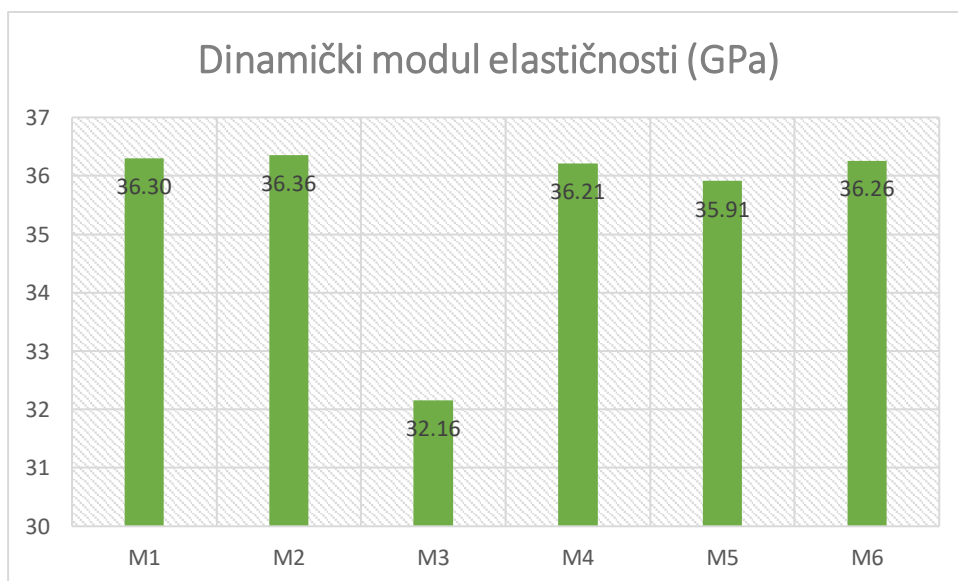
$$E_{din} = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{1-\mu} \quad \mu = 0.2 \rightarrow \text{dinamički Poissonov koeficijent}$$

Tablica 3.5.1.4. prikazuje izračunate dinamičke module elastičnosti za svaki uzorak.

Uzorak	Dinamički modul elastičnosti E_{din} [GPa]
M1	36,30
M2	36,36
M3	32,16
M4	36,21
M5	35,91
M6	36,26

Tablica 3.5.1.4. Izračunati dinamički modul elastičnosti

Graf 3.5.1. prikazuje izračunate vrijednosti dinamičkoga modula elastičnosti za svaki ispitni uzorak. Sva tri uzorka koja nisu sadržavala kvarcni pijesak našli su se u boljoj polovici rezultata.



Graf 3.5.1. Dinamički modul elastičnosti svih ispitnih uzoraka

3.5.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

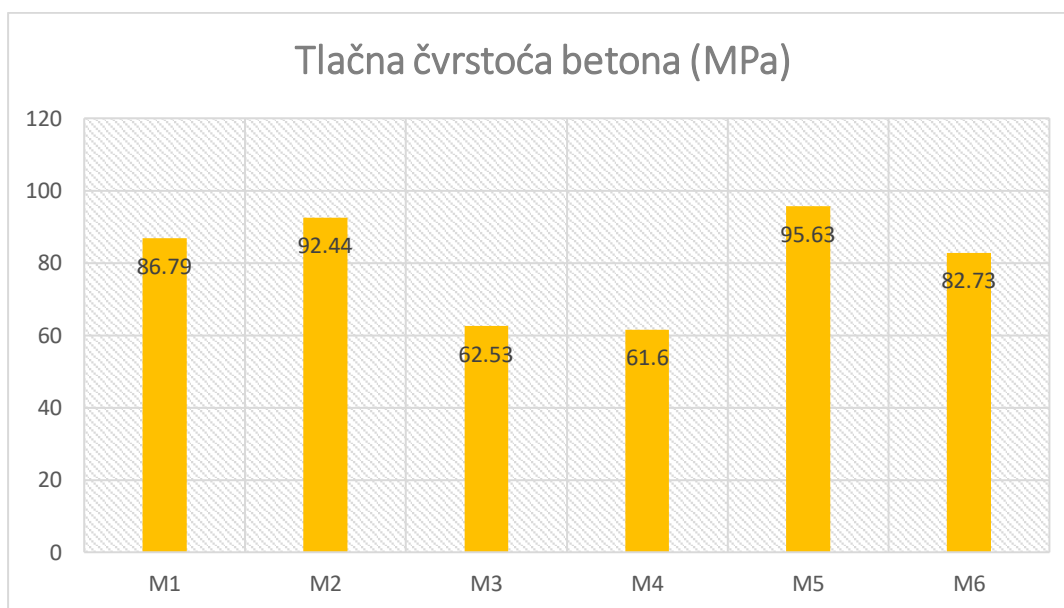
Ispitivanje čvrstoće na pritisak obavlja se standardnim postupkom, u području između 0.2 i 0.8 kapaciteta preše. U prešu se stavljaju ispitna tijela oblika kocke, duljine brida 15 cm i starosti 28 dana. Preciznost preše, ravnost pritisnih ploča i drugo propisuju standardi. Ispitno tijelo mora se nalaziti u vodom zasićenom stanju, pri čemu je potrebno obrisati sve vanjske površine. Potrebno je izmjeriti masu i dimenzije ispitnog tijela te izračunati volumnu masu uzorka. Zatim se tijelo stavlja u prešu brzinom od 0.6 ± 0.4 MPa/s do trenutka loma. [2]

$$f_k = \frac{F}{A} \text{ (MPa)}$$

F - sila u trenutku loma

A - površina poprečnog presjeka u sredini ispitnog tijela

Graf 3.5.2.1. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće betonskih uzoraka.



Graf 3.5.2.1. Tlačna čvrstoća svih ispitnih uzoraka

Čvrstoće betonskih mješavina kod kojih nije korišten kvarcni pijesak

Za izradu betonskih mješavina M1 i M6 korištene su identične frakcije, ali u drugim omjerima, te tako dolazi do razlike u čvrstoći. Kod običnog betona zrna agregata imaju veću čvrstoću od cementnog kamena kada ih promatramo kao odvojene materijale. Međutim, kada govorimo o betonu, odnosno kompozitnom materijalu, ovisnost čvrstoće o volumnim koncentracijama agregata i cementa, nije tako jednostavna. Naime, povećanjem udjela agregata, ne dolazi do povećanja čvrstoće, iako bi se intuitivno to trebalo dogoditi.

Najveću čvrstoću ima čisti cementni kamen, a povećanjem volumne koncentracije agregata dolazi do opadanje čvrstoće cementnoga kamena. Naime, ako se u ispitno tijelo ugradi čelična šipka dovoljno velikog promjera, pri opterećivanju, šipka se manje deformira nego beton, te tako dolazi do koncentracije naprezanja na mjestu šipke. Zbog toga lom nastaje u ravnini šipke, te je na taj način smanjena čvrstoća na pritisak. Sličan efekt, iako u znatnoj manjoj mjeri nastaje na mjestu svakog zrna agregata u cementnoj pasti. [2] Naravno, koncentracija naprezanja će biti veća što je veće zrno agregata. To se upravo dogodilo sa betonskim mješavinama M1 i M6. Naime, betonska mješavina M6 ima veći sadržaj krupnog agregata (čak 65%), pa se tu javila i veća koncentracija naprezanja. To je rezultiralo malo manjom čvrstoćom na pritisak u odnosu na uzorak M1 koji ima smanjen sadržaj krupnog agregata (samo 35%).

Mješavina M2 ima isti sadržaj kao i M1 (65% sitnog agregata i 35% krupnog agregata), ali razlika je u tome što su korištene frakcije bez nadmjernih i podmjernih zrna. Također, nema čestica sitnijih od 0.125 mm. Čvrstoća mješavine M2 je za 6.5 % veća od mješavine M1 a za 9.3 % veća od M6.

Čvrstoće betonskih mješavina kod kojih je korišten kvarcni pijesak

Kod ovih mješavina se postižu najbolji (M5) i najlošiji rezultati (M4 i M3) ispitivanja tlačne čvrstoće. U ovom slučaju kvarcni pijesak se koristi kao zamjena za sitni agregat vapnenačkog podrijetla manje čvrstoće u različitim postotcima:

M3→ 100% zamjena sitnog agregata

M4→ 50% frakcije 1-4 mm i 15% kvarca

M5→ 50% frakcije 0-4 mm i 15% kvarca

Kod mješavina M3 i M4, koje imaju najniže rezultate ispitivanja, nema čestica sitnijih od 0.125 mm, dok ih mješavina M5 sadržava. Mješavina M5 ima za 52.9 % veću čvrstoću od M3 i za 55 % veću čvrstoću od M4. Granulometrijski sastav mješavine M3 ima određeni diskontinuitet, dok kod M4 nema sitnih čestica agregata što je utjecalo na konačne čvrstoće betona. Pri tome moramo naglasiti da su svi betoni postigli jako dobre čvrstoće, samo što čvrstoća mješavine M5 odskače.

Usporedba rezultata

Ukupno gledano, bolje rezultate su imale mješavine kod kojih nije korišten kvarcni pijesak, jer su njihove tlačne čvrstoće po vrijednostima bile jedna iza druge. U toj grupi rezultata, najbolja je bila mješavina M2 koja nije imala sitne čestice.

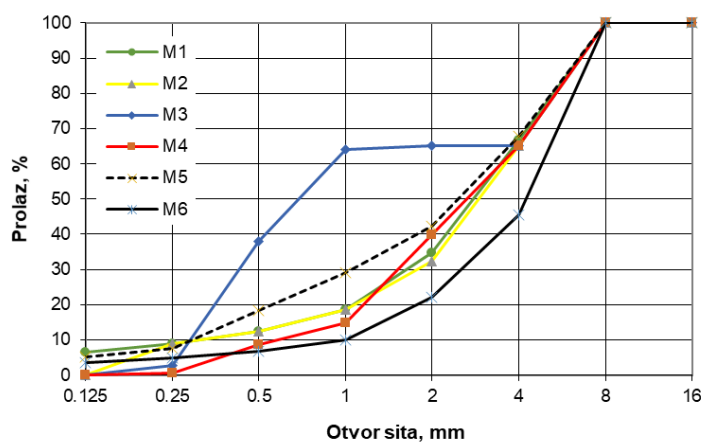
S druge strane, mješavina M5 ima određeni udio i kvarcnog pijeska i zrna manjih od 0.125 mm, a ona je pak pokazala najbolji rezultat. Iz toga slijedi, da kvarcni pijesak može poboljšati čvrstoću na pritisak, naravno ako je upotrijebljen u odgovarajućim omjerima.

Tablica 3.5.2. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti složene prema veličini. Plava polja su uzorci bez kvarcnog pijeska, a roza polja su uzorci koji ga sadržavaju.

TLAČNA ČVRSTOĆA		DINAMIČKI MODUL ELASTIČNOSTI	
M5	95,63	M2	36,36
M2	92,44	M1	36,30
M1	86,79	M6	36,26
M6	82,73	M4	36,21
M3	62,53	M5	35,91
M4	61,6	M3	32,16

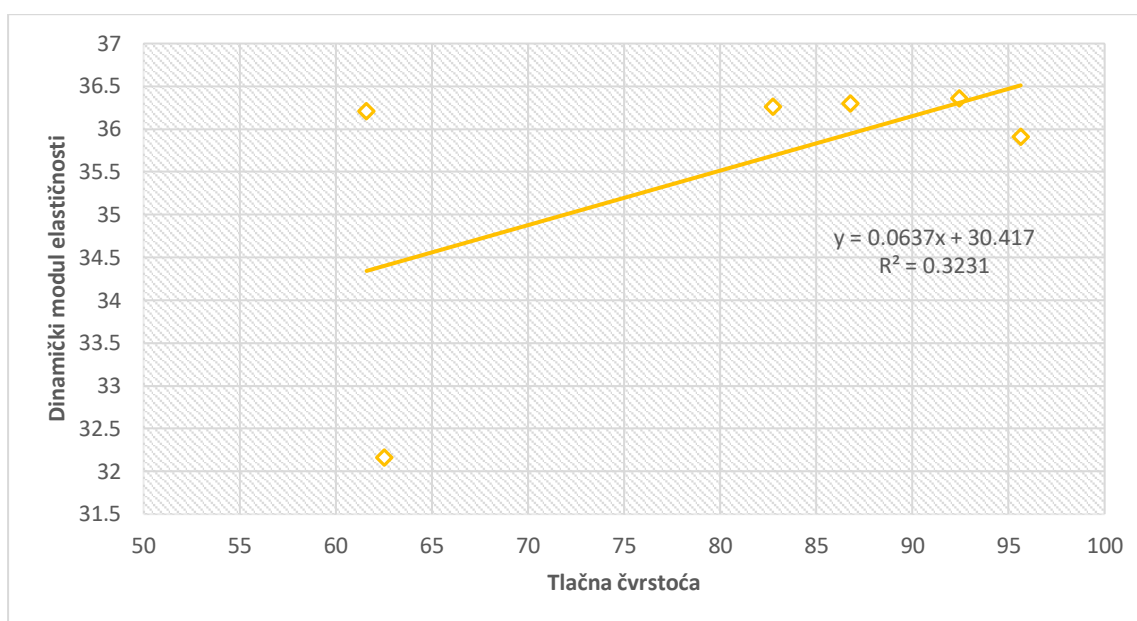
Tablica 3.5.2. Odnos tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti

Uz tablicu se nalaze i granulometrijske krivulje svih mješavina (graf 3.5.2.2.)



Graf 3.5.2.2. Granulometrijske krivulje svih mješavina

Na grafu 3.5.2.3. prikazan je odnos između tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti.



Graf 3.5.2.3. Odnos tlačne čvrstoće i dinamičkog modula elastičnosti

Koeficijent korelacije je $R = 0.568$ što ne ukazuje na veliku povezanost rezultata kao je vidljivo na grafu 3.5.2.2. Najveća razlika uočava kod betonske mješavine M5. Korelacija bi se vjerojatno uočila na većem broju uzoraka

3.5.3. Ispitivanje otpornosti betona na habanje

Nakon 28 dana od ugradnje betona u kalupe, ispitana je otpornost uzoraka na habanje. Ispitivanje je obavljeno po unaprijed objašnjenom postupku u 2. poglavlju. Prvo su izmjerene početne mase i dimenzije betonskih uzoraka. Nakon toga mjere se mase uzoraka nakon 4, 8, 12 i 16 ciklusa habanja. Dimenzije se mjere samo na kraju ispitivanja, odnosno nakon 16 ciklusa. Za svaku betonsku mješavinu ispitana su po dva uzorka. U priloženoj tablici 3.5.3.1. prikazani su rezultati ispitivanja.

UZORAK	POČETNA MASA	DIMENZIJE A-B-C	MASA NAKON 4 CIKLUSA	MASA NAKON 8 CIKLUSA	MASA NAKON 12 CIKLUSA	MASA NAKON 16 CIKLUSA	DIMENZIJE NAKON 16 CIKLUSA
M1	796.8	71.38 70.61 71.06	783.7	771.9	759.5	746.5	68.54 70.61 68.30
M1	840.6	74.27 71.05 70.50	825.6	811.2	797.7	784.3	71.69 71.05 67.87
M2	856.1	70.71 74.27 71.12	840.2	826.2	812.7	799.5	68.24 74.27 68.66
M2	802.1	70.28 70.99 71.0	786.2	771.8	757.6	744.1	67.70 70.99 67.90
M3	796.3	74.50 71.08 71.39	783.1	770.9	759.3	747.4	72.26 71.08 68.89
M3	781.2	71.26 70.76 71.31	768.6	757.0	747.1	737.0	68.90 70.76 69.29
M4	793.4	71.05 71.08 69.85	777.5	763.1	748.9	735.2	68.17 71.08 67.44
M4	845.8	71.60 74.08 71.18	832.1	818.7	804.7	790.7	69.22 74.08 68.62
M5	808.0	70.57 71.29 71.30	796.6	786.5	773.7	762.6	68.57 71.29 69.31
M5	847.9	71.11 74.10 71.61	833.2	821.0	809.2	796.1	69.04 74.10 68.79

M6	861.0	74.32	844.4	830.3	817.1	804.3	71.76
		71.52					71.52
		71.08					68.55
M6	813.6	70.69	795.8	779.9	762.5	750.6	67.59
		70.90					70.90
		71.15					68.41

Tablica 3.5.3.1. Rezultati ispitivanja koji su potrebni za određivanje otpornosti betona na habanje

Otpornost na habanje računa se prema izrazu:

$$H = \frac{\Delta V}{50 \text{ cm}^2} = \frac{\frac{\Delta m}{\rho}}{50 \text{ cm}^2} = \frac{m_0 - m_{16}}{50 \text{ cm}^2 \rho}$$

Ocjenjuje se gubitak volumena prema površini stranice ispitane kocke. Beton se svrstava u razrede prema najvećoj dopuštenoj količini obrušenog betona kao što je vidljivo u tablici 3.5.3.2.

Razred otpornosti na habanje	Najveća dopuštena količina obrušenog betona (cm ³ / 50 cm ²)
XM 1	25
XM 2	21
XM 3	18

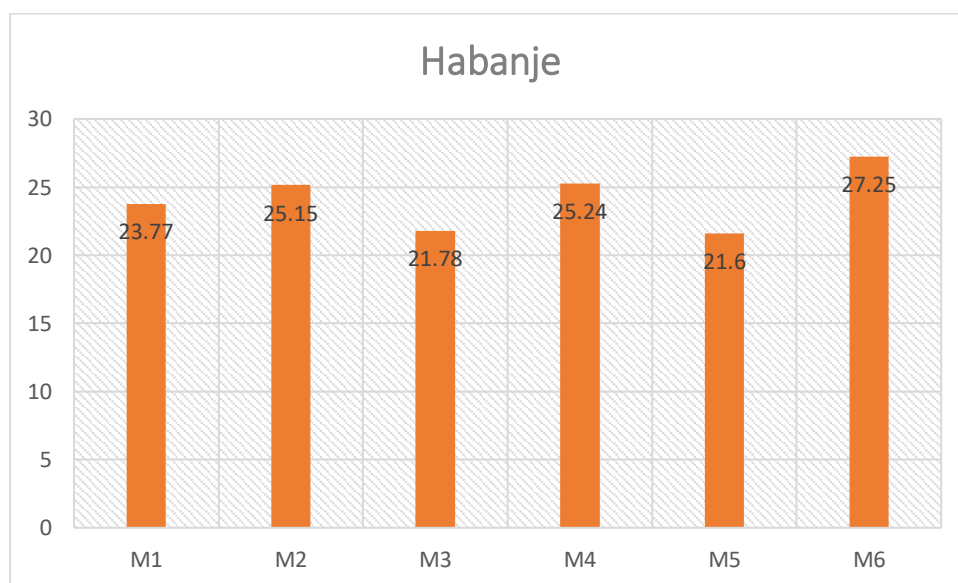
Tablica 3.5.3.2. Razredi otpornosti na habanje prema HRN 1128:2007 [6]

Tablica 3.5.3.3. prikazuje otpornost betonskih uzoraka na habanje koja je izračunata prema gore navedenoj formuli. Za mjerodavnu otpornost uzima se srednja vrijednost dvaju rezultata.

Uzorak	Obrušeni beton (cm ³ /50 cm ²)	Mjerodavno
M1	22,62	23,77
M1	24,92	
M2	24,69	25,15
M2	25,61	
M3	23,22	21,78
M3	20,34	
M4	25,88	25,24
M4	24,60	
M5	20,15	21,6
M5	23,05	
M6	24,88	27,25
M6	27,61	

Tablica 3.5.3.3. Izračunata vrijednost otpornosti na habanje

Graf 3.5.3.1. prikazuje mjeru otpornosti svih ispitanih betonskih uzoraka. Na temelju tih podataka može se zaključiti da se ispitni uzorci koji pripadaju boljoj polovici rezultata mogu svrstati u razred XM1 (umjereno habanje), dok druga polovica uzoraka ostaje nesvrstana (M2, M4 i M6)



Graf 3.5.3.1. Otpornost na habanje svih ispitanih uzoraka

Najbolju otpornost prema habanju pokazuju mješavine M5 i M3. Mješavina M5 ima zrna sitnija od 0.125 mm, a kao sitni agregat koristi kombinaciju kvarca i dominantnog vapnenca. S druge strane, uzorak M3 nema sitnih zrna, ali koristi samo kvarc kao sitni agregat.

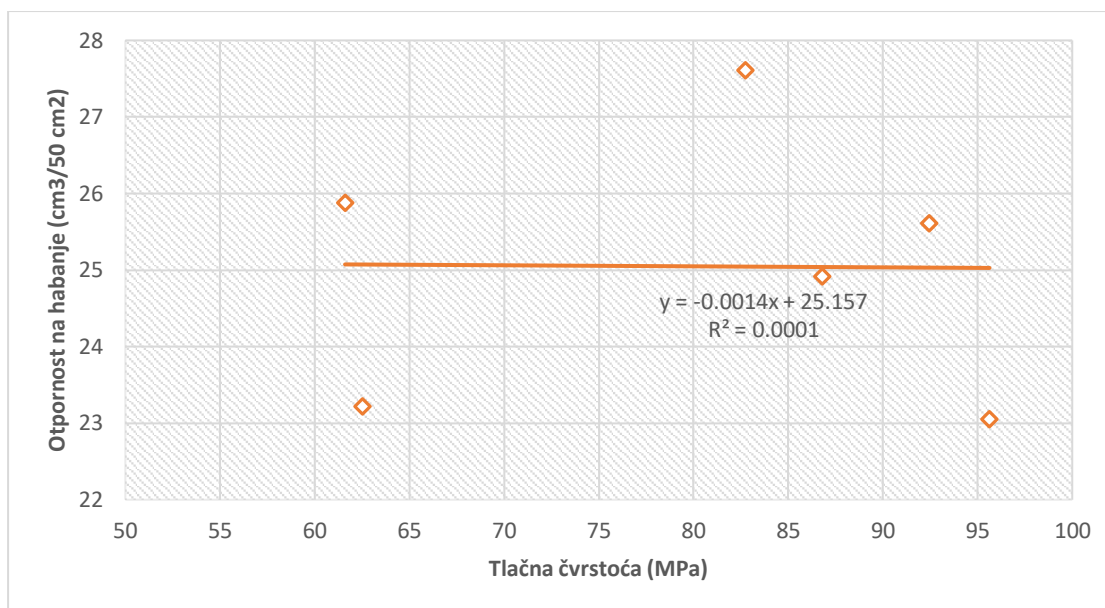
Najlošiji rezultat pokazuje mješavina M6 kod koje je bio dominantan krupni agregat. Ta mješavina nije imala kvarca, ali je imala sitnih čestica. Loš rezultat pokazala je i mješavina M4 koja je sadržavala kvarcni pijesak, ali ne i sitne čestice. Ona je po tom pitanju ista kao i mješavina M3 koja je pokazala bolju otpornost, ali je mješavina M4 kao sitni agregat imala i kvarc i drobljeni vapnenac.

Što se tiče mješavina M1 i M2, koje su imale jednak odnos krupnog i sitnog agregata te su oba bila vapnenačkog podrijetla, bolji rezultat imala je mješavina M1 koja sadržava zrna sitnija od 0.125 mm.

Tablica 3.5.3.4. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće i otpornosti na habanje složene prema veličine. Zelena polja su uzorci koji ne sadržavaju kvarcni pijesak, a narančasta polja su uzorci koji ga imaju. U boljoj polovici nalazili su se uzorci koji sadržavaju kvarcni pijesak (iznimka mješavina M4). Kod mješavine koje su imale drobljeni vapnenac kao sitan agregat, najbolji rezultat imala je mješavina M1 koja ima sitne čestice i po sastavu dominantan sitan agregat.

TLAČNA ČVRSTOĆA		OTPORNOST NA HABANJE	
M5	95,63	M5	23,05
M2	92,44	M3	23,22
M1	86,79	M1	24,92
M6	82,73	M2	25,61
M3	62,53	M4	25,88
M4	61,6	M6	27,61

Tablica 3.5.3.4. *Odnos tlačne čvrstoće i otpornosti na habanje*



Graf 3.5.3.2. *Odnos tlačne čvrstoće i otpornosti na habanje*

Iako je kod ispitivanja tlačne čvrstoće i otpornosti na habanje, ista betonska mješavina M5 pokazala najbolje rezultate, kada se usporede rezultati ostalih uzoraka, ne postoji dobra korelacija između tih svojstava betona za ove promatrane mješavine (graf 3.5.3.2.). Na primjer, mješavina M3 pokazuje dobru otpornost na habanje, ali malu tlačnu čvrstoću, dok M2 ima dobru tlačnu čvrstoću, ali relativno malu otpornost na habanje. Koeficijent korelacije je $R=0.01$, što ne ukazuje na veliku povezanost rezultata. Međutim, korelacija bi vjerojatno bila vidljiva kada bi se ispitivao veći broj uzoraka.

4. ZAKLJUČAK

Beton je najrašireniji materijal u svijetu. Godišnje se potroši više od deset milijardi tona betona. Beton ima izrazito široko područje primjene, zbog čega dolazi do neprestane prilagodbe njegove recepture kako bi se dobila željena svojstva. To rezultira poboljšanjem nekih, ali istovremeno i pogoršanje drugih karakteristika. Zbog toga je izrazito bitno poznavanje okoline u kojoj se koristi promatrani beton, kako bi se utvrdilo koja svojstva moraju biti dominantna u odnosu na druga.

Otpornost na habanje predstavlja jedno od njegovih karakteristika. Naravno, za beton koji se koristi za izvođenje podloga za promet ljudi i vozila to predstavlja dominantno svojstvo. U ovom ispitivanju istražuje se utjecaj sitnih čestica, ali i kvarcnog pijeska na otpornost betona na habanje.

Za potrebe ispitivanja izrađeno je 6 betonskih mješavina različitog granulometrijskog sastava i podrijetla agregata. Svojstva betona ispitivala su se u svježem i u očvrslom stanju.

Konzistencija svih betonskih mješavina je bila minimalna ili nepostojeća, a jedan od mogućih razloga je korištenje superplastifikatora. Iako, kod ove vrste betona sposobnost slijeganja nije toliko važna. Naravno, beton se obavezno mora ugrađivati tako da bude u zbijenom stanju, ali onda se ugradnja obavlja korištenjem vibratora. Upravo to je i učinjeno nakon ispitivanja konzistencije, kada su se betonske mješavine zbijale u kalupe.

U očvrslom stanju se naravno ispitivala otpornost betona prema habanju, ali i neka dodatna svojstva, odnosno tlačna čvrstoća i dinamički modul elastičnosti, s ciljem da se utvrdi njihova moguća povezanost.

Najbolju otpornost na habanje pokazale su mješavine koje su u svom sastavu imale kvarcni pijesak. Najbolji rezultat ima mješavina koja sadržava zrna agregata sitnija od 0.125 mm, a za sitni agregat ima kombinaciju kvarca i vapnenca u odgovarajućim omjerima. Međutim, dobru otpornost pokazala je i mješavina koja nije imala sitnih čestica, ali je kod nje sitni agregat bio sastavljen samo od kvarca. Dok je s druge strane loš rezultat imala mješavina bez sitnih čestica, ali sa kombinacijom kvarca i vapnenca za sitni agregat.

Beton s najboljim rezultatima može se svrstati u razred XM1. Takav beton izložen je umjerenom habanju, odnosno pogodan je za izradu prometnih površina za prolazak vozila s pneumatskim kotačima.

Kod ispitivanja tlačne čvrstoće, isti je uzorak pokazao najbolji rezultat. Međutim, što se tiče ostalih uzoraka nije utvrđena dobra korelacija između otpornosti na habanje i tlačne čvrstoće. Razlog tome je vjerojatno činjenica da je za ispitivanje korišteno samo 6 uzoraka.

U ovom ispitivanju nije uočeno štetno djelovanje sitnih čestica na otpornost betona za habanje. Razlog je vjerojatno mali udio sitnih čestica u agregatu koji nije negativno utjecao na čvrstoću cementnog kamena. Za kvarcni pijesak je s druge strane poznato da povećava otpornost betona na habanje, što je pokazano i u ovom ispitivanju. Za još bolje rezultate, koji bi imali i veću otpornost na habanje trebalo bi ispitati nove mješavine s drugim udjelom kvarcnog pijeska, drugačijim granulometrijskim sastavom, maksimalnim zrnom i porijeklom agregata.

5. POPIS LITERATURE

[1] Alen Harapin, Jure Radnić, Nikola Grgić, Marija Smilović Zulim, Marina Sunara, Ante Buzov: Osnove betonskih konstrukcija, interna skripta, skripta, 2020.

[2] Krstulović, P.: *Svojstva i tehnologija betona*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu i Institut Građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.

[3] Ukrainczyk, V.: *Beton, struktura, svojstva, tehnologija*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994

[4] Jure Galić, Donka Würth, Željko Lebo: Trajnost konstrukcija u kemijski agresivnom okolišu – greške u projektiranju

Dostupno na:

https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2019/prezentacije/Kongresna%20dvorana%202/26.%20Odravanje%20gra%C4%91evina/26.4.%20DaniHKIG_OG_TrajnostKonstrukcijaUKemijskiAgresivnomOkolisuGreskeUProjektiranju_GalicWurthLebo.pdf (18.6.2023.)

[5] HRN EN 206-1, Beton -- Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A2:2021)

Dostupno na:

https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_11_139_3381.html (20.6.2023.)

[6] Boban Ivana: Otpornost na habanje betona ojačanog otpadnim polipropilenskim maskama za lice, Sveučilište u Split, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, završni rad, Split 2022.

[7] Tehnička uputa za cement

Dostupno na:

<https://www.cemex.hr/documents/47380066/47381413/Tehnicka%20uputa%20CEM%20I%2042,5%20R%20Sv%20Juraj%202023.pdf/f2770720-d66c-ce06-b925-12a704b8a75>

(4.7.2023.)

[8] Tehnički opis aditiva

Dostupno na:

https://www.google.com/search?q=Master+glenium+ace+770&rlz=1C1GCEA_enHR975HR975&oq=Master+glenium+ace+770&aqs=chrome..69i57.7232j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (6.7.2023.)

[9] Mršić-Božinović Frane: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona, Sveučilište u Split, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, završni rad, Split 2015.

[10] Milišić Krešimir: Utjecaj dodatak na svojstva betona izloženog habanju, Sveučilište u Split, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, diplomski rad, Split 2022.

[11] Materijali s vježbi: Ispitivanje materijala metodama bez razaranja