

# Analiza svojstava betona velikih čvrstoća

---

**Kero, Emanuela**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:765424>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Emanuela Kero**

**Analiza svojstva betona velikih čvrstoća**  
***(Analysis of properties of high-strength concrete)***

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij  
Građevinski materijali**

**Emanuela Kero  
JMBAG:0114034223**

**Analiza svojstva betona velikih čvrstoća  
(*Analysis of properties of high-strength concrete*)**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

## IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



---

Emanuela Kero

U Rijeci, 29. lipnja 2023. godine

## **IZJAVA**

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta  
**Razdvajanje uticaja parametara u inženjerskom modeliranju  
s parametarskom identifikacijom (SEPAEMPI)**

Voditelj projekta	prof. dr. sc. Ivica Kožar
Šifra projekta	IP-2019-04-7926
Financijer projekta	Hrvatska zaklada za znanost
Pravna nadležnost	Republika Hrvatska

U Rijeci, 4. srpnja 2023.

Mentor:



---

izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Naslov rada: Analiza svojstva betona velikih čvrstoća

Student: Emanuela Kero

Mentor: izv. prof. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Kolegij: Građevinski materijali

### **Sažetak:**

Ovim radom izvršena je analiza svojstva betona velikih čvrstoća. Teorijski dio rada sadrži razradu svojstva svježeg i očvrsnulog betona velikih čvrstoća u odnosu na običan beton. Za potrebe analize u eksperimentalnom dijelu pripremljene su tri mješavine različitog udjela silicijske prašine, metakaolina i filera. Uzorci napravljeni od mješavina podvrgnuti su ispitivanjima tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i savijanjem te ispitivanju vodopropustnosti. U analizi podataka prikazana je međusobna usporedba dobivenih rezultata ispitivanja.

**Ključne riječi:** betoni velikih čvrstoća, tlačna čvrstoća, čvrstoća savijanjem / cijepanjem, vodopropustnost, silicijska prašina

### **Abstract:**

This work analyzed the properties of high-strength concrete. The theoretical part of the work contains an elaboration of the properties of fresh and hardened high-strength concrete compared to ordinary concrete. For the purposes of the analysis in the experimental part, 3 mixtures of different proportions of silica dust, metakaolin and fillers were prepared. Samples made from the mixture were subjected to tests of compressive strength, tensile strength by splitting and bending, and water permeability tests. In the data analysis, a mutual comparison of the obtained test results is presented.

**Key words:** high strength concrete, compressive strength, bending strength/flexural strength, water permeability, silica fume

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić na pomoći i strpljenju tijekom pisanja ovog završnog rada. Također zahvaljujem tehničkim suradnicima Dini Juriševiću i Dominiku Štroku na pomoći prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela rada u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Posebne zahvale mojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

# Sadržaj

POPIS TABLICA.....	1
POPIS SLIKA.....	2
1. UVOD.....	3
2. POBOLJŠANJE SVOJSTVA BETONA.....	4
3. SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA.....	5
3.1. Utjecaj na svojstva svježeg betona velikih čvrstoća.....	6
3.2. Obradljivost.....	7
3.3. Konzistencija.....	8
3.4. Segregacija i izdvajanje vode.....	9
3.5. Poroznost.....	9
3.6. Gustoća.....	10
4. SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA.....	11
4.1. Deformabilnost i čvrstoće betona.....	12
4.1.1. Tlačna čvrstoća betona.....	13
4.1.2. Vlačna čvrstoća betona.....	15
5. DIMENZIJSKA STABILNOST.....	16
5.1. Skupljanje betona.....	16
5.1.1. Autogeno skupljanje betona.....	17
5.2. Puzanje betona.....	18
5.3. Modul elastičnosti betona.....	19
6. SVOJSTVA VLAŽNOSTI.....	20
7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	21
7.1. Uvod.....	22
7.2. Sastojci betona.....	23
7.2.1. Agregat.....	23
7.2.3. Cement.....	25
7.2.4. Voda.....	26
7.2.5. Superplastifikator.....	27
Mineralni dodaci.....	28
7.2.6. Silicijska prašina.....	28
7.2.7. Metakaolin.....	29
7.2.8. Kameno brašno.....	30
7.3. Proračun sastava betona.....	31
7.4. Priprema betonskih mješavina.....	31



7.4.1. Ispitivanje svježeg betona .....	32
7.5. Ugradnja betona.....	33
7.6. Ispitivanja očvrstlog betona .....	34
7.6.1. Ispitivanja tlačne čvrstoće .....	34
7.6.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem.....	36
7.6.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem.....	38
7.6.4. Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom .....	40
7.7. Analiza rezultata ispitivanja .....	42
8. ZAKLJUČAK.....	46
9. POPIS LITERATURE .....	48

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Razredi slijeganja betona(izvor: [1]) .....	8
Tablica 2: Prikaz mješavina i ispitivanih uzoraka .....	22
<i>Tablica 3: Specifikacija agregata frakcije 0 – 4 mm</i> .....	23
Tablica 4: Specifikacija agregata frakcije 4 – 8 mm .....	24
Tablica 5: Fizikalna i kemijska svojstva CEM II/B-M(S-VLL) 42,5N (izvor: [2]) .....	25
Tablica 6: Sastavi betonskih mješavina .....	31
Tablica 7: Rezultati ispitivanja tlačne sile.....	35
Tablica 8: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem .....	37
Tablica 9: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem.....	39
Tablica 10: Rezultati ispitivanja prodora vode.....	41
Tablica 11: Vrijednosti gustoća uzoraka.....	45

## POPIS SLIKA

Slika 1: Silicijska prašina (izvor: [3]) .....	4
Slika 2: Cementna matrica (izvor: [4]) .....	11
Slika 3: Autogeno i kemijsko skupljanje (izvor:[4]).....	18
Slika 4: Usporedba idealiziranih krivulja naprežanja-deformacija (izvor: [4]).....	19
Slika 5: Superplastifikator (izvor: vlastita fotografija) .....	27
Slika 6: Ispitivanje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija).....	32
Slika 7: Njegovanje uzoraka ( izvor: vlastita fotografija) .....	33
Slika 8: Ispitivanje tlačne čvrstoće na uzorcima (izvor: vlastita fotografija).....	35
Slika 9: Vlačna čvrstoća savijanjem (izvor: vlastita fotografija).....	37
Slika 10: Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem u preši (izvor: vlastita fotografija) .....	39
Slika 11: Uređaj za ispitivanje vodopropustnosti (izvor: vlastita fotografija).....	40
Slika 12: Označavanje dubine prodora vode (izvor: vlastita slika).....	41
Slika 13: Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem slijeganjem .....	42
Slika 14: Prikaz usporedbe srednjih vrijednosti tlačnih čvrstoća uzoraka .....	43
Slika 15: Prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem.....	43
Slika 16: Prikaz usporedne srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća cijepanjem.....	44
Slika 17: Prikaz usporedbe dubine prodora vode .....	44
Slika 18: Prikaz odnosa srednjih vrijednosti dubine prodora vode i gustoće .....	45

## 1. UVOD

Najkorišteniji materijal današnjice je beton koji se primjenjuje u svim područjima građevinarstva. Ponekad korištenje običnog betona u visokogradnji i niskogradnji ne može ispuniti izazove koje nameće moderna gradnja stoga je potrebno poboljšanje njegovih svojstava. Betone velikih čvrstoća definiramo kao beton koji ima veće vrijednosti čvrstoća što se postiže uporabom mineralnih dodataka. Razvoj ove vrste betona započinje krajem 20 st. te prati trend razvoja kemijske industrije dodataka betonu.

U današnje vrijeme sve više raste upotreba betona velikih čvrstoća. U visokogradnji koriste se za izradu stupova i arhitektonski zahtjevnih elemenata. Pogodni su za izradu stropnih konstrukcija jer se postižu veći rasponi uz manju vlastitu težinu elemenata. Kod niskogradnje koriste se kod izrade mostova zbog smanjenih troškova održavanja, veće trajnosti i smanjenih gubitaka sile prednapinjanja.

Tema ovog završnog rada je analiza svojstava betona velikih čvrstoća s naglaskom na betone koji u svom sastavu sadrže veći postotak silicijske prašine. Utjecaj silicijske prašine i ostalih mineralnih dodataka promatran je na razini svojstva svježeg i očvrslog betona. Kako bi se provjerila svojstva očvrslog betona provedena su ispitivanja koja upućuju kako različiti omjeri silicijske prašine i metakaolina pridonose razvoju čvrstoća.

## 2. POBOLJŠANJE SVOJSTVA BETONA

Počeci primjene betona sežu daleko u prošlost te su njegova svojstva predmet mnogih istraživanja. Razvojem novih tehnologija betona uočeno je da upotrebom mineralnih i kemijskih dodataka možemo mijenjati svojstva običnog betona i time beton prilagođavati njegovoj namjeni. Iako betonu mijenjamo njegov sastav, svim betonima su zajednička svojstva poput: otpornosti na koroziju, otpornosti na habanje, kemijske otpornosti, otpornosti na visoke temperature, nepropusnosti i obradivosti u svježem stanju. Zbog povećanih zahtjeva gradnje i novih konstrukcijskih rješenja važno se pridržavati posebnih pravila prilikom projektiranja sastava i odabira komponenti betona kojim se poboljšavaju svojstva. Osim poboljšanja svojstava teži se smanjenju troškova gradnje i što manjem onečišćenju prilikom proizvodnje.

Sastav betona velikih čvrstoća od običnog betona razlikuju se u dodavanju silicijske prašine (Slika 1), metakolina i letećeg pepela u betonsku smjesu. Mineralni dodaci utječu na povećanje čvrstoće betona čime je moguće smanjenje potrebne armature i dimenzija konstruktivnih elemenata što gradnju čini jeftinijom [5]. Razvoju čvrstoća osim mineralnih dodataka pridonosi smanjeni vodocementni omjer što onda doprinosi smanjenju poroznosti betona. Dokazano je da promjene sastava utječu na povećanu trajnosti konstrukcije i njezino ponašanje u uvjetima okoliša [5].



Slika 1: Silicijska prašina (izvor: [3])

### 3. SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA

Svježi beton je tekuća smjesa agregata, cementa, vode i dodataka čije očvršćivanje još nije započelo. Smjesa treba ostati tekuća za vrijeme transporta, ugradnje i zbijanja stoga možemo zaključiti da svojstva svježeg betona utječu na dinamiku izvođenja betonskih radova i odabir opreme za ugradnju. Neki od uvjeta koje je potrebno zadovoljiti kako bi se beton sigurno ugradio su: homogenizacija u miješalici, pokretljivost u prijevozu i ugradnji te mala adhezija na oplatu i dobra adhezija na podlogu.

Svojstva koja pripisujemo svježem betonu su :

- stabilnost ili kohezivnost - betonska smjesa mora biti homogena bez odvajanja sastojaka
- kompaktnost - prilikom zbijanja vibratorom potrebno je ukloniti zahvaćeni zrak zbog utjecaja na stvaranje pora
- obradljivost - beton mora biti dovoljno tekuć da se može neometano ugraditi u oplatu i zbiti
- gustoća
- temperatura
- poroznost - udio pora ispunjenih zrakom u svježem betonu

Proizvodnja betona velikih čvrstoća odvija se u betonarama uz produljeno vrijeme miješanja smjese kako bi se postigla što bolja kompaktnost. Uslijed prevelike količine silicijske prašine i superplastifikatora moguće je da ćemo dobiti viskoznu i ljepljivu smjesu koja nije pogodna za ugradnju. Također ukoliko je vodocementni omjer prenizak mješavina će biti suha i neće se moći obrađivati.

### 3.1. Utjecaj na svojstva svježeg betona velikih čvrstoća

Na svojstva svježe betonske smjese uvelike ovise o njezinom sastavu. Tu se misli na kemijski, mineralni sastav betona te na karakteristike cementa i agregata koji se koristi.

U ovakvim betonima izbjegava se korištenje većih frakcija agregata, odnosno teži se što većem korištenju sitnih čestica. Koristi se veća količina zrna pijeska do 0,25 mm i smanjuje udio krupnih zrna. Poroznost agregata, oblik zrna i tekstura neka su od svojstva koji mogu utjecati na količinu potrebnog cementa i dodataka.

Utjecaj dodataka u betonima visoke čvrstoće osim poboljšanja svojstava čvrstog betona vidljiv je i kod svježeg betona. Ako je sadržaj silicijske prašine u betonu prevelik beton postaje ljepljiv te se teže obrađuje. Superplastifikatori povećavaju brzinu hidratacije što omogućuje betonima velike čvrstoće da imaju visoku ranu čvrstoću.

Vanjski uvjeti također utječu na svojstva svježeg betona. Poznato je da prevelika hladnoća ili toplina negativno utječu na svježi beton. Niske temperature uzrokuju smanjenu brzinu razvoja tlačne čvrstoće. Kako bi beton bio uporabljiv važno je održavati temperaturu betona iznad 5 stupnjeva u prvih 48 sati nakon betoniranja. Ako je potrebno ubrzati razvoj tlačne čvrstoće u betonsku mješavinu dodajemo ubrzivače vezivanja. Njihovo doziranje je potrebno provoditi s mjerom opreza jer mogu negativno djelovati na ostala svojstva betona kao što su skupljanje i puzanje.

Visoke temperature s druge strane ubrzavaju proces vezanja betona. Betoni velikih čvrstoća sami po sebi imaju veću toplinu hidratacije stoga visoke temperature okoliša mogu utjecati na njezino dodatno povećanje. Na taj način dodatno se smanjuje vrijeme za kvalitetnu ugradnju i zbijanje. Ukoliko je potrebno koriste se usporivači vezanja čija se količina predviđa prilikom projektiranja sastava beton.

### 3.2. Obradljivost

Obradljivost predstavlja količinu potrebnog mehaničkog rada za miješanje, prijevoz i ugradnju betona. Veća fluidnosti i homogenost povećavaju ovo svojstvo betona. Betoni velikih čvrstoća imaju veću plastičnu viskoznost što znači da betonska smjesa pruža veći otpor prilikom kretanja njezinih slojeva. Uzrok tomu je smanjeni vodocementni omjer, veliki udio superplastifikatora i veći udio sitnih čestica.

Vodocementni omjer u betonima visoke čvrstoće iznosi do 0,4 što daje kvalitetniji beton ali smanjuje obradljivost svježeg betona. Kako bi se zadržala ista obradljivost uz sniženu količinu vode koriste se superplastifikatori. Njih se može dodati u velikim količinama, do 1% na masu cementa bez da uzrokuju segregaciju i izdvajanje vode [4].

Mineralni dodaci koji se dodaju smjesi imaju sferični oblik čestica koje smanjuju unutarnje trenje. Smanjeno trenje čestica utječe na zadržavanje iste obradljivosti uz sniženi vodocementni omjer. Uporabom silicijske prašine ili letećeg pepela do 25% masenog udjela cementa uz dodatak superplastifikatora moguće je primijeniti vodocementni omjer manji od 0,35, da ne bude problema s obradljivosti [4].

Gubitak obradljivosti usporedan je s očvršćivanjem i vezivanjem betona te gubitkom slobodne vode u porama. Uzroci zbog kojih može doći do naglog gubitka su predugo vrijeme miješanja i prijevoza te prevelike temperature betona zbog topline hidratacije ili zbog korištenja komponenti koje su bile izložene velikim toplinama u okolišu. Optimalna temperatura betonske smjese je između 10 do 21°C, povećana temperatura uzrokuje brže vezivanje. Prilikom prevelikog gubitka obradljivosti betonskoj mješavini ne smije se dodavati dodatna voda jer svako dodavanje vode koje nije predviđeno prilikom projektiranja sastava betona utječe na smanjene poboljšanih svojstva. Dolazi do povećanja vodocementnog omjera što uzrokuje pojavu dodatnih pora ispunjenih vodom na čijim mjestima nakon evaporacije vode ostaju šupljine koje oslabljuju očvrsnuli beton.



### 3.3. Konzistencija

Konzistencija betona predstavlja mjeru obradljivosti betona, odnosno to je svojstvo betona da se odupire promjeni oblika. Definira se funkcijom naprezanje - tečenje. Prema Europskim normama može se ispitivati slijeganjem, rasprostiranjem, Ve-Be uređajem i metodom po Walz-u, no najčešće se provodi metodom slijeganja. Mjeri se razlika visina između najviše točke novonastalog oblika betona i vrha metalnog stošca koji koristimo prilikom ispitivanja. Pomoću vrijednosti razlike u visini možemo svrstati beton u 4 razreda slijeganja (Tablica 1). Betoni čiji je sastav dobar postupno se sliježu i zadržavaju izvorni oblik, lošiji sastav uzorkuje rušenje, odvajanje i raspadanje. Mala vrijednost konzistencije određene slijeganjem rezultira lošijim zbijanjem što može rezultirati lošijom čvrstoćom. Na konzistenciju utječe količina vode, udio pojedinih frakcija agregata, finoća i količina cementa i dodataka.

Razred slijeganja betona velikih čvrstoća ovisi o omjeru vode i superplastifikatora u smjesi. Zbog smanjene količine vode očekivano je da će slijeganje ovakvih betona biti vrlo malo no iako je vodocementni omjer manji mogu se postići sva 4 razreda slijeganja uz pravilno doziranje superplastifikatora.

Tablica 1: Razredi slijeganja betona(izvor: [1])

<b>Razred</b>	<b>Slijeganje</b>
S1	10 – 40 mm
S2	50 – 90 mm
S3	100 – 150 mm
S4	160 – 210 mm

### **3.4. Segregacija i izdvajanje vode**

Zbog razlika u volumenskoj masi i veličini agregata i cementa može doći do pojave odvajanja sastojaka svježeg betonske mješavine. Kod suhih mješavina dolazi do odvajanja morta od ostatka betonske mase, a kod pretekućih mješavina na površinu se podiže voda koja sa sobom nosi čestice cementa te na taj način tvori nekvalitetni gornji sloj betona.

Većim udjelom pijeska u betonima velikih čvrstoća i upotrebom silicijske prašine smanjuje se segregacija i izdvajanje vode.

### **3.5. Poroznost**

U trenutku miješanja cementa i vode dolazi do stvaranja pora. Smanjeni sadržaj pora u strukturi svježeg betona doprinosi većoj čvrstoći i poboljšanim uporabnim i trajnosnim svojstvima.

Iako su komponente betona velikih čvrstoća slične kao kod običnog betona korištenjem mineralni dodataka dobiva se homogenija struktura.

Silicijska prašina sudjeluje u reakciji hidratacije cementa i vode. Kemijski sastav silicijske prašine je u obliku amorfne čestice kugle veličine 0,1 – 0,15  $\mu\text{m}$  što je dvaput manje od veličine cementa, zbog tog pune praznine između cementne paste pa dolazi do smanjenja šupljina u cementnoj pasti što uzrokuje gušću i kompaktniju strukturu betona. Silicijska prašina u betonu reagira sa slobodnim vapnom te stvara CSH gel koji je vezivo između zrna agregata i daje betonu njegovu visoku čvrstoću

### 3.6. Gustoća

Gustoću betona definiramo kao omjer između mase i volumena svježe betonske smjese. Na gustoću utječu:

- vrsta cementa
- vodocementni omjer
- veličina zrna pijeska
- prisutnost aditiva
- omjeri komponenata
- način stvrdnjavanja betona (prirodnim putem ili zagrijavanjem)
- koeficijent skupljanja betona

Beton s mineralnim dodacima i smanjenim vodocementnim omjerom ima veću gustoću za 50 – 100 kg/m<sup>3</sup> nego obični beton [4]. Gušća smjesa osim na poboljšanje čvrstoća ima utjecaj na povećanu otpornost na habanje površine stoga su pogodni za npr. betoniranje površina koje imaju veliku gustoću prometa poput podova u industrijskim halama.

## 4. SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

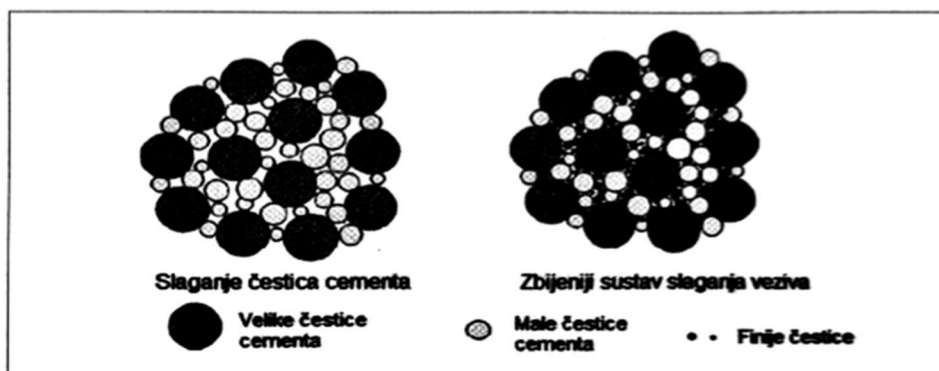
Za razumijevanje svojstava čvrstog betona važno je naglasiti da je beton heterogeni materijal, odnosno da njegovi sastojci nemaju svi jednaka svojstva.

Agregat zauzima od 65 do 75 % volumena betona te mu daje krutost i stabilnost ali nema direktan utjecaj na čvrstoću. Indirektno tako da nepravilan oblik i hrapavija površina agregata uzorkuju bolje prijanjanje agregata na cementni kamen.

Za proizvodnju običnog betona koristi se cement čija veličina čestica može varirati od 2 do 80  $\mu\text{m}$  [4]. Fino mljeveni mineralni dodaci (metakaolin, silicijska prašina i leteći pepeo) imaju veličinu čestica između 0,1 do 10  $\mu\text{m}$  pa djeluju kao punilo među česticama cementa (Slika 2) [4].

Kako bismo poboljšali svojstva betona važno je poboljšati sučeljak, odnosno područje prijelaza između cementnog kamena i zrna agregata. Veličina pora i mikropora sučeljka imaju velik utjecaj na krutost i modul elastičnosti betona.

Uporabom mineralnih dodataka smanjuje se poroznost sučeljka. Dodavanjem metakaolina u beton možemo postići vrlo rano poboljšanje sučeljka što je vidljivo u prvim danima starosti betona. Metakaolin kao i ostali mineralni dodaci djeluju na bolje slaganje čestica kompozita. Silicijska prašina uzrokuje smanjenje kristalne strukture i smanjenje dimenzija sučeljka. Smanjenjem dimenzija dolazi do boljeg prijenosa opterećenja između cementne matrice i zrna.



Slika 2: Cementna matrica (izvor: [4])

#### 4.1. Deformabilnost i čvrstoće betona

Za pravilno dimenzioniranje i oblikovanje betonskih elemenata i konstrukcija važno je poznavanje glavnih mehaničkih karakteristika odnosno čvrstoća (vlačna, tlačna i posmična) i deformabilnosti betona.

Čvrstoća betona je mjera otpornosti betona da se odupre djelovanjima koja mogu prouzročiti njegov lom. Ispitivanja se provode tako da se uzorci propisanih dimenzija na normirani način opterećuju do maksimalnog opterećenja koji mogu izdržati. Kao što je spomenuto betoni velikih čvrstoća imaju poboljšane parametre u odnosu na običan beton stoga su rezultati ispitivanja takvih uzoraka veći.

Deformabilnost je svojstvo materijala da se elastično i plastično deformira. Beton velikih čvrstoća ne deformira se na isti način kao i običan beton. Deformacije betona razlikujemo na volumenske deformacije i deformacije uzrokovane vanjskim opterećenjem.

Na mehanička svojstva betona velikih čvrstoća utječu čimbenici:

- manje korištenje krupnog zna u granulometrijskom sastavu
- smanjeni vodocementni faktor
- prirodne primjese u ispuni i vodi
- mineralni dodaci
- projektirani sastav smjese betona
- superplastifikatori
- način pripreme betona u betonari
- način ugradnje betona u oplatu
- načini njege ugrađenog betona

#### **4.1.1. Tlačna čvrstoća betona**

Tlačna čvrstoća jedno je od osnovnih svojstva betona na čijoj osnovi dijelimo betone u razrede. Razredi tlačne čvrstoće predstavljaju karakterističnu tlačnu čvrstoću betona starosti 28 dana u  $\text{N/mm}^2$ , odnosno to je omjer između maksimalne tlačne sile koja dovodi do loma materijala i normirane ploštine poprečnog presjeka kocki i valjka na kojima se primjenjuje sila.

Ako se radi o betonima velikih čvrstoća govorimo o razredima C55/67 do C100/115. Gdje prva brojka označava karakterističnu tlačnu čvrstoću u  $\text{N/mm}^2$  za valjak promjera 15 cm i visine 30 cm, a druga brojka karakterističnu tlačnu čvrstoću kocke brida 15 cm. Kod ispitivanja kocki dobiva se približno 20 % veća vrijednost čvrstoće nego prilikom ispitivanja valjaka. Što se više povećava razred tlačne čvrstoće omjer između čvrstoći valjaka i kocki se mijenja stoga prikazujemo vrijednosti čvrstoća za oba oblika [4].

Prilikom ispitivanja vrijednosti mogu varirati što je posljedica heterogenosti betona i vibriranja betonskih uzoraka.

Vezivanje cementa ovisi o finoći mliva cementa. Ako cement ima više čestica koje su veće od  $45 \mu\text{m}$  hidratacija je jako spora, ako su čestice veće od  $75 \mu\text{m}$  postoji mogućnost da nikad neće doći do hidratacije zbog čega dolazi do gubitka na čvrstoći [4]. Kao što je već prethodno spomenuto ovoj vrsti betona dodaju se mineralni dodaci koji su fino mljeveni. Sve to utječe na strukturu sučeljka na čije poboljšanje osim korištenja finije mljevenog cementa i mineralnih dodataka utječemo smanjenjem vode te manjim zrnom agregata. Poboljšana struktura sučeljka glavni je razlog veće vrijednosti tlačne čvrstoće.

Na povećanje tlačne čvrstoće utjecaj imaju superplastifikatori. Njihovim korištenjem bolje se raspršuju čestice cementa što utječe na povišenje tlačne čvrstoće do 25% u odnosu na betone kojima je samo snižen vodocementni omjer [4].

Kako bismo pravilno mogli projektirati i izvoditi betonske radove važno je poznavati razvoj čvrstoće betona.

Procijenjeno je da običan beton nakon 3 dana postigne 50%, a nakon 7 dana 70% 28-dnevne čvrstoće. Za razliku od običnog betona rast čvrstoće betona velike

čvrstoće u prvih 3 dana prelazi 50% zbog brzine vezanja [6]. Brzina vezanja ovisi o mineralnom dodatku koji se koristi. Uporabom silicijske prašine brzina vezanja je veća nego kod uporabe metakaolina [5].

Povećanjem tlačne čvrstoće raste krtost betona. Dolazi do bržeg odlamanja i drobljenja zaštitnog sloja plastičnih zglobova stoga se prilikom dimenzioniranja koriste modificirani proračuni [7].

#### **4.1.2. Vlačna čvrstoća betona**

Zbog izloženosti elemenata direktnim i indirektnim vlačnim naprezanjima važno je predvidjeti ponašanje betona na vlak. O ovom svojstvu ovise još i progib, raspucavanje i krutost konstrukcije. Vlačna čvrstoća betona predstavlja otpor materijala na kidanje. Kod projektiranja uzima se u obzir prilikom proračuna graničnog stanja nosivosti i graničnog stanja uporabljivosti. Njezina vrijednost može biti smanjena uslijed nepovoljnih uvjeta okoliša i ostalih faktora koji mogu uzrokovati pojavu pukotina.

Vlačna i tlačna čvrstoća usko su povezane te se njihov odnos može prikazati funkcijom. Ovisno o razredu tlačne čvrstoće vlačna čvrstoća se povećava iako je njezina vrijednost mnogostruko manja (iznosi od 1/11 do 1/8 tlačne). Utjecaj na vrijednost ima niz parametara koji utječu i na vrijednost tlačne čvrstoće. Ispitivanja se vrše na tri načina: direktnim vlakom, savijanjem ili cijepanjem.

Uporabom mineralnih dodataka poboljšavamo strukturu cementne matrice što mijenja odnos tlačne i vlačne čvrstoće betona. Istraživanjima je uočeno da je moguće ostvariti porast do 27% čvrstoće na cijepanje njihovom uporabom. Korištenjem udjela silicijske prašine do 9% utječemo na povećanje vlačne čvrstoće no prevelikim dodavanjem vlačna čvrstoća otpada [8].

Iako imaju poboljšana svojstva na vlak u betonske elemente od betona velikih čvrstoća još uvijek je potrebno dodati armaturu kako ne bi došlo do otkaza uslijed djelovanja prevelikog vlačnog naprezanja.



## 5. DIMENZIJSKA STABILNOST

Dimenzijska stabilnost betona je svojstvo zadržavanja prvobitnog oblika pod utjecajem vanjskih opterećenja i/ili hidrotermalnih uvjeta (topline i vlage). Prikazuje se deformacijskim svojstvima u području elastičnog ponašanja betona. Elastična svojstva su puzanje, skupljanje, modul elastičnosti, modul posmika i Poissonov koeficijent [4].

Ukoliko su deformacije u potpunosti spriječene dolazi do nastanka pukotina koje mogu uzrokovati slom betona. Deformacije dijelimo na volumenske i deformacije nastale pod opterećenjem.

Tijekom vezivanja i očvršćivanja beton mijenja svoj volumen stoga volumenske deformacije koje nastaju unutar prvih 24 sata nakon ugradnje mogu imati posljedice na očvrsnuli betona.

### 5.1. Skupljanje betona

Uzrokovano je hidratacijom cementa i evaporacijom vode koje uzrokuje pojavu kapilarnih sila koje dovode do skupljanja betona. Deformacije koje nastaju promatramo kao vremenske deformacije nastale smanjivanjem vlažnosti betona što se očituje smanjenjem dimenzija neopterećenih elemenata. Ako se betonski element ne može slobodno skupljati dolazi do pojave vlačnih naprezanja koja uzrokuju pukotine ako premaše vrijednost vlačne čvrstoće elementa.

Parametri koji utječu na skupljanje betona velikih čvrstoća su:

- smanjena količina vode za pripremu
- omjer dodataka i cementa
- granulometrijski sastav i svojstva upotrijebljenog agregata

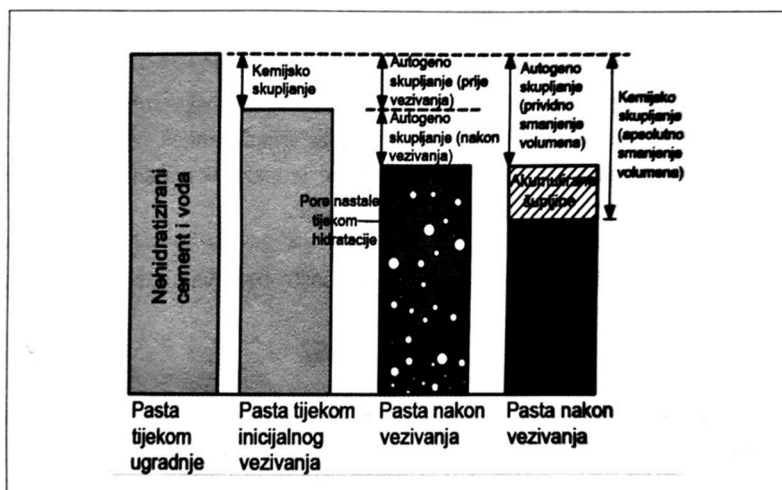
Kod betona deformacije nastale skupljanjem nisu posljedica samo jedne vrste skupljanja nego njihove kombinacije. Možemo razlikovati nekoliko vrsta skupljanja: kemijsko, autogeno, skupljanje od sušenja, toplinsko skupljanje, skupljanje od karbonizacije i plastično skupljanje. Betoni velikih čvrstoća imaju veliku sposobnost autogenog skupljanja stoga je njegovanje potrebno započeti što prije.

### **5.1.1. Autogeno skupljanje betona**

Elementi s dodatkom silicijske prašine betona pokazuju smanjeno ukupno skupljanje od elemenata običnog betona no izraženo je veće autogeno skupljanje. Autogeno skupljanje direktan je utjecaj smanjenog vodocementnog omjera zbog promjena volumena uzrokovanih hidratacijom cementa nakon početka vezivanja. Ne uključuje deformaciju volumena od prodiranja ili gubitka tvari, primjenom sile ili promjenom temperature.

Takvo skupljanje se javlja u prvom danu izrade betona i događa se kroz tri faze (Slika 3): tekuću fazu, fazu vezivanja i fazu očvršćivanja. U prvoj fazi dolazi do kemijskog skupljanja zbog smanjenja volumena reakcijskih produkata, beton je u tekućem stanju i autogeno skupljanje je proporcionalno stupnju hidratacije. Druga faza opisuje se kao faza vezivanja odnosno beton se odupire naprezanjima uzrokovanim kemijskim skupljanjem. Razvojem kapilarnog tlaka u trećoj fazi dolazi do kretanja vode između pora čijim gubljenjem se stvaraju dodatna naprezanja na stijenkama.

Kako je količina vode u betonu smanjena dolazi do pojave većih naprezanja te ako ne reguliramo skupljanje ono može biti jako štetno. Povećano autogeno skupljanje smanjuje se upotrebom sredstava za odbijanje i uporabom dodataka za smanjenje skupljanja od sušenja te pravilnom njegom.



Slika 3: Autogeno i kemijsko skupljanje (izvor: [4])

## 5.2. Puzanje betona

Ako je beton izložen dugotrajnom opterećenju ono dovodi do njegovog puzanja. Puzanje se definira kao deformacija betona uslijed konstantnog napreznja koje mijenja oblik betonske konstrukcije betona. Ako betonski element nakon određenog vremena rasteretimo dio deformacije je povratan, dolazi do trenutne elastične povratne deformacije nakon koje slijedi povratno puzanje. Dio deformacije je nepovratan Kod mladog betona puzanje je 3 - 5 puta veće nego kod betona većih starosti stoga da može zaključiti da se povećanjem tlačne čvrstoće ono smanjuje [4].

Kao i kod skupljanja dolazi do različite kombinacije mehanizama koji uzrokuju ovu pojavu u betonu. Agregat nema utjecaj na puzanje pa se ono prepisuje strukturi cementne paste. Opisano je već da su svojstva cementne paste poboljšana pa je rezultat toga smanjeno puzanje betona velikih čvrstoća. Puzanje se odvija istovremeno s deformacijom skupljanja te su parametri koji na njega utječu slični parametrima skupljanja.

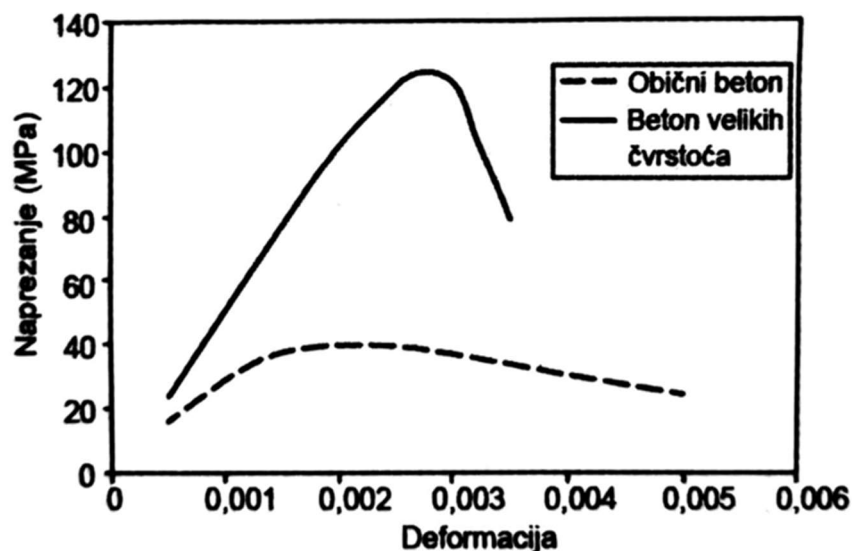
### 5.3. Modul elastičnosti betona

Poznato je da beton nije elastičan materijal. Ne postoji direktna ovisnost između čvrstoće i modula elastičnosti no na oba svojstva utječe sastav agregata, cementna matrica i svojstva sučeljka cementnog kamena i agregata.

Poroznost agregata i cementne matrice pridonose smanjenom modulu elastičnosti. Ukoliko je udio letećeg pepela u betonu velik beton ima manji modul elastičnosti u ranoj starosti i kasnije ima kruću strukturu.

Betoni većih čvrstoća imaju veće module elastičnosti. Povećanjem udjela silicijske prašine u smjesi povećava se modul elastičnosti do određene granice stoga može se reći da porast tlačne čvrstoće ne prati linearan rast modula elastičnosti.

Elastični dio  $\sigma$ - $\epsilon$  krivulje iznosi do 85% tlačne čvrstoće (Slika 4), nakon prelaska te granice dolazi do formiranja mikropukotina uzrokovanih naprezanjem. Povećanjem naprezanja mikropukotine proširuju svoj oblik te se spajaju i počinju tvoriti makro pukotine.



Slika 4: Usporedba idealiziranih krivulja napreznja-deformacija (izvor: [4])

## 6. SVOJSTVA VLAŽNOSTI

Ako se beton nalazi u okruženju punom vode i vlage dolazi do prodiranja u njegovu strukturu što ima utjecaj na njegovu trajnost. Mjera u kojoj će beton upiti vodu iz okoline i brzina upijanja vode o strukturi i količini pora. Na prisutnost međusobno povezanih pora najveći utjecaj ima vodocementni omjer i hidratacija cementa. Hidratacijom cementa u prvih nekoliko dana nastaju produkti koji blokiraju putove za prodor vanjske vode ali nakon nekoliko tjedana dolazi do povećanja propusnosti. Tečenje vode događa se kroz kapilarne pore hidratizirane cementne paste, porozni sučeljak i unutrašnje pukotine.

Primjenom mineralnih dodataka letećeg pepela, silicijske prašine i metakaolina povećava se gustoća betona što smanjuje kapilarne pore i propusnost. Betoni velikih čvrstoća imaju veću količinu pora koje su manje od 150 nm kroz koje voda ne može proći stoga je tečenje vode ograničeno.

Granulometrijski sastav također uvelike utječe na svojstva vlažnosti. Stijena od koje se dobiva agregat u većini slučajeva ima istu propusnost kao i cement. Ukoliko je to moguće poželjno je koristiti agregat što oblije oblika. Korištenjem sitnijeg agregata i okruglog zrna olakšava se ugradnja i zbijanje, a veći stupanj zbijenosti utječe na smanjenje vodopropusnosti. Mali vodocementni omjer smanjuje kapilarnu poroznost odnosno povećava vodonepropusnost. Međutim premali vodocementni omjer može dovesti do problema s ugradljivosti betona i pojavu gnijezda.

Za vodonepropusnost betona važna je odgovarajuća njega. Njegu je potrebno započeti što prije kako bi minimalizirali skupljanje. Što beton postiže veću čvrstoću dolazi do oslobađanja više topline pa je preporučljivo da se ovakva vrsta betona njeguje oko 10 dana. Nedovoljna njega uzrokuje mali stupanj hidratacije na površinskom dijelu te tako uzrokuje propuštanje.

## **7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA**

## 7.1. Uvod

U eksperimentalnom dijelu ovog završnog rada obrađivat će se utjecaj mineralnih dodataka na vlačnu i tlačnu čvrstoću te vodopropusnost betona velikih čvrstoća.

Za potrebe ispitivanja projektirane su tri mješavine betona čiji se sastav razlikuje u količini mineralnih dodataka. Tablica 2 prikazuje količinu i oblik uzorka za pojedino ispitivanje.

Tablica 2: Prikaz mješavina i ispitivanih uzoraka

Broj mješavine		1	2	3
Sadržaj		Bez dodatka	Silicijska prašina + punilo	Silicijska prašina + metakaolin
	UZORAK	KOM	KOM	KOM
TLAČNA ČVRSTOĆA	kocka	9	9	9
VDP I ČVRSTOĆA CIJEPANJEM	kocka	6	6	6
ČVRSTOĆA SAVIJANJEM	prizma	6	6	6

Svojstva svježeg betona ispitivana su metodom slijeganja prema HRN EN 12350-2:2019.

Uzorci su nakon jednog dana izvađeni iz kalupa i ostavljeni u vodi 27 dana.

Nakon 27 dana njegovanja na uzorcima su vršena ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće.

Uzorci na kojima se provodilo ispitivanje vodopropusnosti su dvadesetpeti dan od miješanja uklonjeni iz vode i postavljeni u uređaj za ispitivanje vodopropusnosti gdje su se nalazili 72 sata pod tlakom od 5 bara.

## 7.2. Sastojci betona

### 7.2.1. Agregat

Za potrebe izrade mješavina betona korišten je drobljeni agregat proizvođača Holcim. Korišten je agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm i 8 – 16 mm.

Specifikacija agregata frakcija 0 – 4 mm vidljiva je iz Tablice 3, a agregata 4 – 8 mm iz Tablice 4.

Tablica 3: Specifikacija agregata frakcije 0 – 4 mm

Granulometrijski sastav	Oznaka	Gc 89
Oblik zrna - indeks oblika	Kategorija	NPD
Oblik zrna - indeks plosnatosti	Kategorija	NPD
Gustoća zrna	Deklarirana vrijednost	
Prividna gustoća		2,72 Mg/m <sup>3</sup>
Gustoća osušenih zrna		2,6 Mg/m <sup>3</sup>
Gustoća površinskih suhih zrna		2,65 Mg/m <sup>3</sup>
Upijanje vode	Deklarirana vrijednost	1,7% WA
Sadržaj sitnih čestica	Kategorija	f 1,5
Kvaliteta sitnih čestica	Deklarirana vrijednost	NPD
Sadržaj školjaka	Kategorija	NPD
Otpornost na drobljenje	Kategorija	LA90
Otpornost na habanje	Kategorija	MDF19
Otpornost na poliranje	Kategorija	NPD
Otpornost na površinsku abraziju	Kategorija	NPD
Sastav krupnog recikliranog agregata	Kategorija	NPD
Kloridi	Deklarirana vrijednost	≤0,01% C
Sulfati topivi u kiselini	Kategorija	AS 0,2
Sadržaj ukupnog sumpora	Deklarirana vrijednost	≤ 1% S
Sulfati topivi u vodi	Kategorija	NPD
Sastavi koji utječu na brzinu vezanja i očvršćavanja	Kategorija	NPD
Utjecaj recikliranog agregata na početak vezivanja cementa	Kategorija	NPD
Sadržaj karbonata	Kategorija	NPD
Skupljanje pri sušenju	Kategorija	0,026% WS
Sastavi koji utječu na stabilnost volumena zrakom hlađene zgure	Kategorija	NPD
Oslobađanje teških metala	Kategorija	NPD
Oslobađanje poliaromatskih ugljika	Kategorija	NPD
Oslobađanje drugih opasnih tvari	Kategorija	NPD
Otpornost na smrzavanje	Deklarirana vrijednost	MS 28
MPA	Deklarirana vrijednost	Vapnenac



Tablica 4: Specifikacija agregata frakcije 4 – 8 mm

Granulometrijski sastav	Oznaka	Gc 85/20
Oblik zrna - indeks oblika	Kategorija	5I15
Oblik zrna - indeks plosnatosti	Kategorija	NPD
Gustoća zrna	Deklarirana vrijednost	
Prividna gustoća		2,7 Mg/m <sup>3</sup>
Gustoća osušenih zrna		2,59 Mg/m <sup>3</sup>
Gustoća površinskih suhih zrna		2,63 Mg/m <sup>3</sup>
Upijanje vode	Deklarirana vrijednost	1,5% WA
Sadržaj sitnih čestica	Kategorija	f 1,5
Kvaliteta sitnih čestica	Deklarirana vrijednost	NPD
Sadržaj školjaka	Kategorija	NPD
Otpornost na drobljenje	Kategorija	LA30
Otpornost na habanje	Kategorija	MDF15
Otpornost na poliranje	Kategorija	NPD
Otpornost na površinsku abraziju	Kategorija	NPD
Sastav krupnog recikliranog agregata	Kategorija	NPD
Kloridi	Deklarirana vrijednost	≤0,01% C
Sulfati topivi u kiselini	Kategorija	A5 0,2
Sadržaj ukupnog sumpora	Deklarirana vrijednost	≤ 1%S
Sulfati topivi u vodi	Kategorija	NPD
Sastavi koji utječu na brzinu vezanja i očvršćavanja	Kategorija	NPD
Utjecaj recikliranog agregata na početak vezivanja cementa	Kategorija	NPD
Sadržaj karbonata	Kategorija	NPD
Skupljanje pri sušenju	Kategorija	0,026% WS
Sastavi koji utječu na stabilnost volumena zrakom hladene zgure	Kategorija	NPD
Oslobađanje teških metala	Kategorija	NPD
Oslobađanje poliaromatskih ugljika	Kategorija	NPD
Oslobađanje drugih opasnih tvari	Kategorija	NPD
Otpornost na smrzavanje	Deklarirana vrijednost	MS28
MPA	Deklarirana vrijednost	Vapnenac

### 7.2.3. Cement

Za potrebe izrade mješavina betona korišten je CEM II/B-M(S-VLL) 42,5N čija su fizikalna i kemijska svojstva prikazana Tablicom 5. To je miješani portlandski cement koji se sastoji od 65-79% portlandskog cementnog klinkera, 21-35% miješanog dodatka (granulirana zgura visoke peći (S), silicijski leteći pepeo (V) i vapnenac (LL)), te do 5% filtarske prašine koja se dobiva proizvodnjom portlandskog cementnog klinkera. Regulator vezivanja je industrijski gips.

Holcim Ekspert cement je posebno prilagođen za nosive betonske konstrukcije i betonske radove više završne čvrstoće.

Svojstva cementa: umjeren zahtjev za vodom; mali gubitak optimalne početne konzistencije; optimalno vrijeme vezanje cementa, prilagođeno za mnoge konstrukcije; srednji razvoj čvrstoće; vrlo umjeren razvoj topline hidratacije; dobra otpornost na umjereno agresivne utjecaje zbog dodatka granulirane zgure i silicijskog letećeg pepela

Preporučuje se za: proizvodnju transportnih i pumpanih betona; radove u cestogradnji i izradu cestovnih objekata, tunela, mostova i vijadukata; podzemne radove kod temeljenja; betonske konstrukcije velikog presjeka i zapremine; izradu raznih industrijskih podloga i glazura; izradu gotovih betonskih proizvoda i armiranog betona; izgradnju nosivih betonskih konstrukcija stambenih, poslovnih i industrijskih objekata viših razreda završne tlačne čvrstoće [9].

Tablica 5: Fizikalna i kemijska svojstva CEM II/B-M(S-VLL) 42,5N (izvor: [2])

#### Tipična fizikalna i kemijska svojstva i usporedba s normom HRN EN 197-1

Fizikalna svojstva	JM	Holcim Ekspert® cement CEM II/B-M (S-V-LL) 42,5 N	Uvjet normi
Postojanost volumena (Le Chatelier)	mm	0,3	≤ 10
Početak vezivanja	min	218	≥ 60
Tlačna čvrstoća na 2 dana	MPa	29,0	≥ 10
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	56,0	≥ 42,5 ≤ 62,5
Specifična težina cementa	g/cm <sup>3</sup>	3,00	-
<b>Kemijska svojstva</b>			
SO <sub>3</sub>	%	3,00	≤ 3,5
Cl	%	0,057	≤ 0,1

#### **7.2.4. Voda**

Voda koja se koristi za piće smatra se ispravnom za pripremu betona. Mogu se upotrebljavati i druge vrste voda no prije upotrebe potrebno je povesti ispitivanja njihovih sastava.

Zahtjevi za kvalitetu vode koja je pogodna za izradu betona su [4]:

- pH veći od 4,5
- ne smije sadržavati nečistoće koje mogu utjecati na kvalitetu i boju betona
- udio sulfata mora biti do 0,3%,
- ne smije sadržavati šećer, ulja, naftu, mazulite itd.,
- udio soli u morskoj vodi treba biti do 2% za uporabu u nearmiranim konstrukcijama

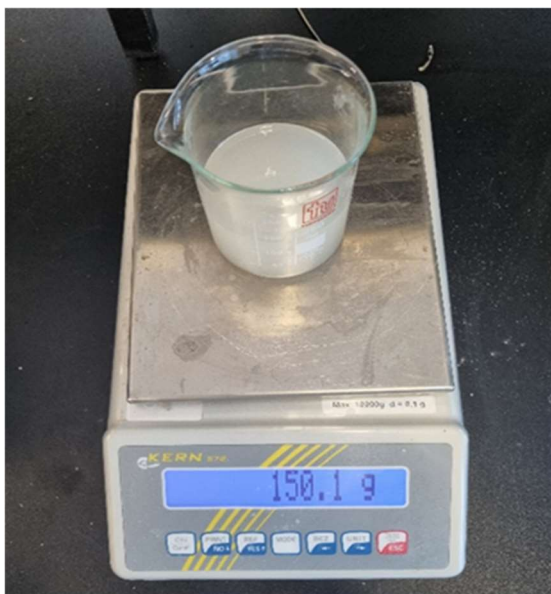
Prilikom izrade mješavina korištena je voda iz slavine koja odgovara svim zahtjevima vode pogodne za izradu betona.

### 7.2.5. Superplastifikator

Superplastifikatori su kemijski dodaci koji se dodaju betonu zbog utjecaj na konzistenciju svježeg betona. Molekule superplastifikatora se nalaze u velikim lancima koji prilikom adsorpcije na čestice cementa stvaraju negativan naboj što utječe na smanjene površinske napetosti okolne vode. Njihovom uporabom u odnosu na plastifikatore moguće je još veće smanjenje vodocementnog omjera uz zadržavanje iste obradljivosti betonske smjese. Osim utjecaja na konzistenciju njihova primjena kod izrade betona ima i ostale prednosti, a to su:

- dobra disperzija cementnih čestica
- ubrzanje hidratacije
- veća čvrstoća betona u ranoj starosti
- povećanje tlačne čvrstoće
- povećanje čvrstoće na savijanje
- ušteda vode
- bolja zagladivost i izgled površine

U ovom ispitivanju prilikom izrade referentne mješavine korišteno je 0,5%, a za izradu ostale dvije mješavine 0,7% superplastifikatora u odnosu na masu korištenog cementa (Slika 5).



Slika 5: Superplastifikator (izvor: vlastita fotografija)

## ***Mineralni dodaci***

Mineralni dodaci su fino usitnjeni prah mineralnih stijena čija veličina čestica je manja od 0,16 mm. U beton se mogu dodavati u velikim količinama ovisno o projektiranom sastavu betona. Na beton utječu:

- učinkom punila
- učinkom nukleusa
- pucolanskom reakcijom

Prilikom izrade betona korišteni su silicijska prašina, metakaolin i kameno brašno.

### ***7.2.6. Silicijska prašina***

Silicijska prašina je fina prašina sive boja koja nastaje kao sporedni proizvod pri proizvodnji ferosilicijskih i silicijskih legura u elektrolučnim pećima. Sastoji se od nekristaliziranih čestica silicijevog dioksida koje nastaju u otpadnim dimovima pri temperaturi od 2000 stupnjeva.

Na svojstva betona utječe mehanizmima: učinkom sitnih čestica i pucolanskim reakcijama.

Čestice silicijske prašine su 50 - 100 puta manje od čestica cementa pa popunjavaju pore nastale u cementnoj matrici.

Zbog svoje velike ploštine i sadržaja silicija spada u pucolane (silicijski i aluminijski materijali koji nemaju cementna svojstva ali kemijski reagiraju s vodom). Pucolanskim reakcijama utječe na povećavanje količina C-S-H gela što povećava čvrstoće i smanjuje poroznost.

Velika ploština čestica povećava potrebu za vodom pa se iz tog razloga betonu dodaje zajedno sa plastifikatorima ili superplastifikatorima. Betonu se dodaje u količini do 15% jer preveliko dodavanje utječe na povećanu reakciju s kalcijevim hidroksidom što može imati negativan učinak [4].

### **7.2.7. Metakaolin**

Metakaolin se smatra novijim mineralnim dodatkom jer je u upotrebi za proizvodnju betona od devedesetih godina dvadesetog stoljeća. Sirovina koja se koristi za njegovu proizvodnju je kaolinska gina koja se zagrijava na temperaturama od 700 do 900 °C u procesu proizvodnje aluminijskog silikata. Dehidracijom kaolitina pod kontroliranim uvjetima nastaje metakaolin. Za proizvodnju mogu se još koristiti sirovine otpadnog taloga industrije reciklaže papira i lateriti.

Veličina čestica metakaolina se kreće od 1 do 2 µm te se koristi kao zamjena do 15% portlandskog cementa [4].

Kemijska formula mu je  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  i u prosjeku sadrži 50 - 55 %  $SiO_2$  i 40 - 45 %  $Al_2O_3$ . U betonu se ponaša kao i drugi pucolani. Reagira sa kalcijevim hidroksidom tijekom hidratacije cementa prilikom čega nastaju kristali koji ukoliko su u betonu prisutni slobodni karbonati mogu dovesti do formiranja karbo-aluminata.

Osim što doprinosi porastu čvrstoća i smanjenu vodopropustnosti smanjuje deformacije skupljanja i olakšava zadržavanje boje betona (posebno kod bijelih betona).

### **7.2.8.. Kameno brašno**

Kameno brašno Šumber proizvodi se od horizontalnih naslaga bijelih i sivih vapnenaca. Gusti, masivno-homogeni vapnenci sastoje se uglavnom od mikrozrnatog minerala kalcita (sadržaj minerala kalcita  $\text{Ca CO}_3$  u stijenskoj masi je do 97,5 %). Stijena eksploatirana iz kamenoloma „Šumber“ u svom sastavu sadrži respektabilan udio kalcija, te neznatan udio teških metala, elemenata u tragovima i silicija pa je stoga pogodna kao sirovina u proizvodnji punila koja se upotrebljavaju u proizvodnji podnih obloga, industriji stakla i plastike, farmaceutskoj industriji, te industriji stočne hrane [10].

U proizvodnji betona kameno brašno se koristi kao mineralni dodatak jer zbog svoje veličine i oblika čestica utječe na poboljšanje obradljivosti. Može se još koristiti kao dodatak pri izradi habajućih slojeva prometnih konstrukcija od asfaltbetona i gornjih nosećih slojeva od bitumeniziranih materijala.

### 7.3. Proračun sastava betona

U Tablici 6 prikazani su sastavi mješavina koje su korištene za izradu uzoraka. Sve mješavine imaju  $v/c = 0,3$ .

Tablica 6: Sastavi betonskih mješavina

SASTOJAK	MASA ZA 1 m <sup>3</sup> BETONA		
	Mješavina 1	Mješavina 2	Mješavina 3
Cement	550 kg	550 kg	550 kg
Voda	167,2 l	167,2 l	167,2 l
Superplastifikator	2,75 kg	3,85 kg	3,85 kg
Agregat 0-4 mm	840,1 kg	754,6 kg	754,6 kg
Agregat 4-8 mm	332,7 kg	297,6 kg	297,6 kg
Agregat 8-16 mm	499 kg	448,2 kg	448,2 kg
Silicijka prašina	-	55 kg	55 kg
Punilo	-	110 kg	-
Metakaolin	-	-	110 kg

### 7.4. Priprema betonskih mješavina

Količine sastojaka betonskih mješavina vagane su na preciznoj vagi. Prvo su u laboratorijsku miješalicu dodani suhi sastojci, a kasnije voda pomiješana s superplastifikatorom. Vrijeme miješanja betona je iznosilo 2 minute nakon čega je uslijedilo mjerenje konzistencije slijeganjem.



#### **7.4.1. Ispitivanje svježeg betona**

Nakon pripreme betonskih mješavina provedeno je ispitivanje konzistencije metodom slijeganja (engl. slump test) prema normi HRN EN 12350-2:2019. Korišten je kalup oblika krnjeg stošca, visine 30 cm, koji je punjen betonom u približno tri jednaka sloja. Svaki sloj betona je zbijan čeličnom šipkom. Prilikom zbijanja prvog sloja šipka nije smjela udarati o podlogu, a kod svakog sljedećeg sloja šipka je malo ulazila u prethodni. Zbijanje čeličnom šipkom provedeno je s 25 udaraca za svaki sloj. Površina ispunjenog kalupa je poravnata te je uslijedilo podizanje stošca. Od početka punjenja kalupa do njegovog podizanja nije prošlo više od 150 sekundi. Nakon uklanjanja kalupa izmjereno je slijeganje betona određivanjem razlike u visini između visine kalupa i najviše točke slegnutog betona (Slika 6).



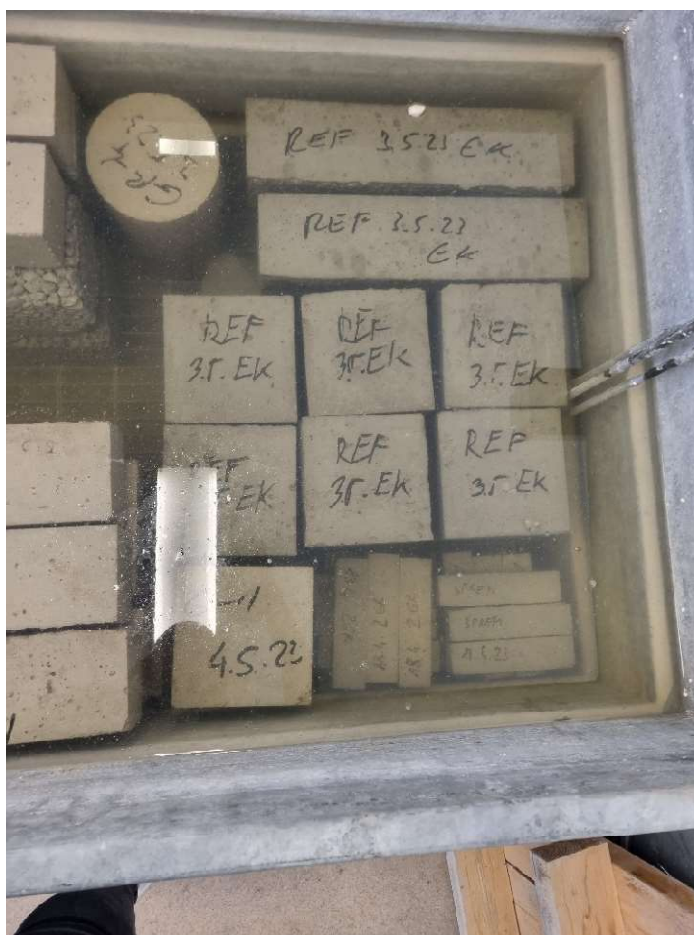
Slika 6: Ispitivanje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija)

## 7.5. Ugradnja betona

Nakon provedenog ispitivanja slijeganja beton je ugrađen u kalupe uz vibriranje i zaglađivanje gornje površine zidarskom žlicom. Cilj vibriranja je bilo izbacivanje viška zahvaćenog zraka i zbijanje betona u kalupu.

Dimenzije kalupa koji se koriste za ispitivanja iznose 15x15x15 cm za kocke i 40x10x10 cm za prizme. Prije upotrebe stranice kalupa su namazane uljem za oplatu.

Nakon 24 sata uzorci su izvađeni iz kalupa te stavljeni u vodu temperature  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  na njegovanje (Slika 7).



Slika 7: Njegovanje uzoraka ( izvor: vlastita fotografija)

## 7.6. Ispitivanja očvrstlog betona

### 7.6.1. Ispitivanja tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betonskih uzoraka ispitivana je prema normi HRN EN 12390-3:2019. Ispitivanje je provedeno na 9 uzoraka oblika kocke izgrađenih i njegovanih prema normi HR EN 12390-2:2019, oblika i dimenzija definiranih normom HRN EN 12390-1:2012. Na dan ispitivanja uzorci su izvađeni iz vode u kojoj su stajali 27 dana. Nakon što više nije bilo vidljivih tragova vode na površini kocki uzorci su izvagani i određene su im dimenzije. Iako je beton ugrađen u kocke stranica 15 cm zbog vibriranja duljine stranica variraju stoga su stranice kocki su izmjerene pomoću pomične mjerke te je uzeta njihova srednja vrijednost. Za ispitivanje je korištena preša za određivanje tlačne čvrstoće do 3000 kN. Uzorci koji su ispitivani postavljeni su u sredinu preše te je opterećivani brzinom 0,6 MPa/s do sloma (Slika 8).

Tlačna je čvrstoća uzoraka izračunata je na temelju izraza (7.1):

$$f_k = \frac{F}{A} \tag{7.1}$$

gdje je:

$f_k$ - tlačna čvrstoća (MPa)

$F$ -sila u trenutku sloma (kN)

$A$ -površina poprečnog presjeka u sredini ispitnog tijela (mm<sup>2</sup>)



Slika 8: Ispitivanje tlačne čvrstoće na uzorcima (izvor: vlastita fotografija)

Tablica 7 prikazuje očitane rezultate napreznja uzorcima u trenutku sloma. Prilikom obrade rezultata uzeta je srednja vrijednost tlačnih čvrstoća svih ispitanih kocki određene mješavine.

Tablica 7: Rezultati ispitivanja tlačne sile

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće (MPa)			
Broj uzorka	Mješavina		
	1	2	3
1	57,34	65,16	37,75
2	58,87	67,59	48,88
3	58,66	67,71	34,81
4	56,3	53,69	52,62
5	58,81	69,13	41,39
6	56,19	67,51	49,01
7	52,1	67,99	56,11
8	58,85	62	49,96
9	53,69	68,51	36,08
Srednja vrijednost (MPa)	56,76	65,48	45,18

### 7.6.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provedeno je sukladno normi HR EN 12390-5:2019 na uzorcima u obliku prizmi, dimenzija 40x10x10 cm prema normama HRN EN 12350-1:2019 i HRN EN 12390-2:2019. S uzoraka je prije ispitivanja obrisani višak vode te su prizmama izmjerene dimenzije i mase. Dimenzije su određene pomičnom mjerkom i metrom te su označene površine na koje će se nanositi opterećenje. Uzeta je srednja vrijednost bridova prizmi. Opterećenje se ne smije nanositi na stranici s koje je vršena ugradnja.

Uzorci su centrirani na način da se duža os prizmi postavila okomito na uzdužne osi oslonca. Duljina između dva donja valjka oslonca je iznosila 30 cm.

Nakon centriranja uslijedilo je upisivanje podataka o duljinama stranica i masi u računalni program za ispitivanje. Pomoću uređaja za ispitivanje savijanja gornjim valjkom nanošena je koncentrirana sila uslijed koje se javlja moment savijanja i dolazi do sloma (Slika 9). Opterećenje je nanošeno bez udara brzinom od 0,05 MPa/s.

Za uzorke opterećene jednom koncentriranom silom čvrstoća na savijanje izračunata je prema izrazu (7.2):

$$f_{ct} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

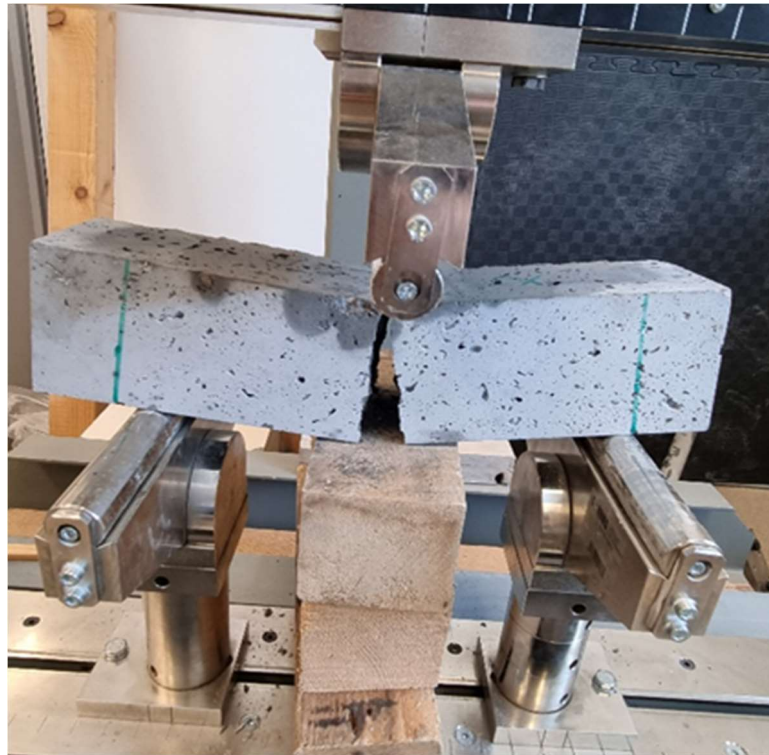
gdje je: (7.2)

$f_{ct}$ -čvrstoća na savijanje (MPa)

$F$  -najveće opterećenje (N)

$l$ -udaljenost između oslonaca (mm)

$d_1$  i  $d_2$ -bočne dimenzije uzoraka (mm)



Slika 9: Vlačna čvrstoća savijanjem (izvor: vlastita fotografija)

Ispitivanje je provedeno na 6 uzoraka prizmi za svaku mješavinu. Rezultati ispitivanja svih uzoraka prikazani su u Tablici 8. Radi jednostavnosti prikaza konačnih rezultata uzeta je srednja vrijednost čvrstoće na savijanje svih prizmi ispitivane mješavine.

Tablica 8: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem (MPa)			
Broj uzorka	Mješavina		
	1	2	3
1	1,82	7,32	7,64
2	7,89	6,15	5,32
3	7,01	7,75	7,17
4	6,36	8,05	5,55
5	6,36	6,67	7,48
6	6,26	7,52	7,34
Srednja vrijednost (MPa)	5,95	7,24	6,75

### 7.6.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Metoda ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem provedena je usporedno s metodom određivanja vodopropustnosti betona. Ispitivanje je provedeno na tri uzorka za svaku mješavinu u skladu s normom HRN EN 12390-6:2010. Uzorci su bili 72 h u uređaju za ispitivanje vodopropustnosti, sukladno normi HRN EN 12390-8:2019 stoga nije bilo površinske vode koju je trebalo obrisati. Izmjerene su im dimenzije i masa uzoraka te određene stranice na koje će se nanositi opterećenje.

Nakon centriranja uzoraka u preši za ispitivanje uslijedilo je nanošenje tlačne sile po izvodnici kocke uslijed kojih se javilo naprezanje okomito na smjer djelovanja opterećenja. Brzina nanošenja je iznosila 0,06 MPa/s. Tijekom ispitivanja bilježeno je maksimalno opterećenje sile  $F(N)$  koja je dovela do sloma (Slika 10).

Vlačna čvrstoća cijepanjem za uzorke kocki izračunata je prema izrazu (7.3):

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d^2}$$

(7.3)

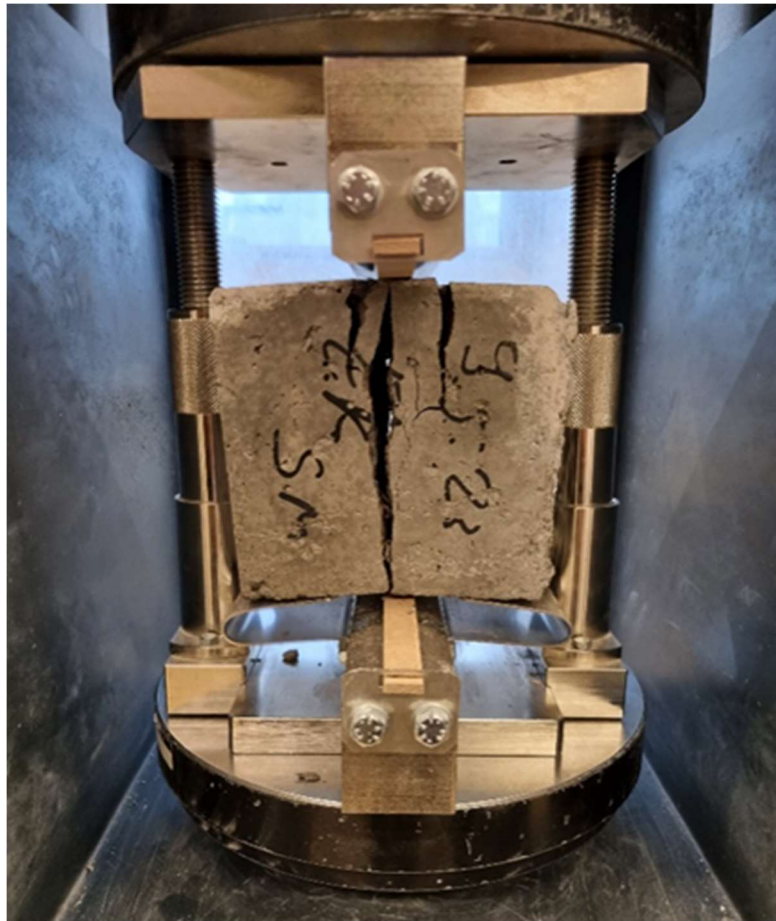
gdje je:

$f_{ct}$ -vlačna čvrstoća cijepanjem (MPa)

$F$ -najveće opterećenje (N)

$d$ -projektirana dimenzija poprečnog presjeka (mm)





Slika 10: Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem u preši (izvor: vlastita fotografija)

Tablicom 9 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem.

Tablica 9: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem (MPa)			
Broj uzorka	Mješavina		
	1	2	3
1	3,77	1,82	2,99
2	2,75	3,08	2,17
3	2,57	2,81	4,05
Srednja vrijednost (MPa)	3,03	2,57	3,07



#### 7.6.4. Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom

Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom provedeno je prema normi HRN EN 12390-8 na uzorcima kocke. Budući da se prodor vode mjeri nakon cijepanja uzoraka, bilježena je sila cijepanja te je rezultat korišten za određivanje vlačne čvrstoće cijepanjem. Uzorci su se nalazili u stroju za utiskivanje vode pod tlakom od 500 kPa (Slika 11). Sa donje strane u uzorke je utiskivana voda prilikom čega se vodilo računa kako ne bi došlo do popuštanja vode kroz brtvenu gumu. Nakon 72 sata uzorci su uklonjeni iz stroja te je obrisani višak vode s površine kroz koju se vršilo utiskivanje.



Slika 11: Uređaj za ispitivanje vodopropustnosti (izvor: vlastita fotografija)

Poslije cijepanja uzorci su postavljeni na laboratorijska kolica te je markerom obilježen vidljiv trag vode (Slika 12). Nakon obilježavanja izmjerene su visine prodora u mm. Za svaku mješavinu mjerodavna je srednja vrijednost prodora vode u uzorke što je prikazano Tablicom 10.



Slika 12: Označavanje dubine prodora vode (izvor: vlastita slika)

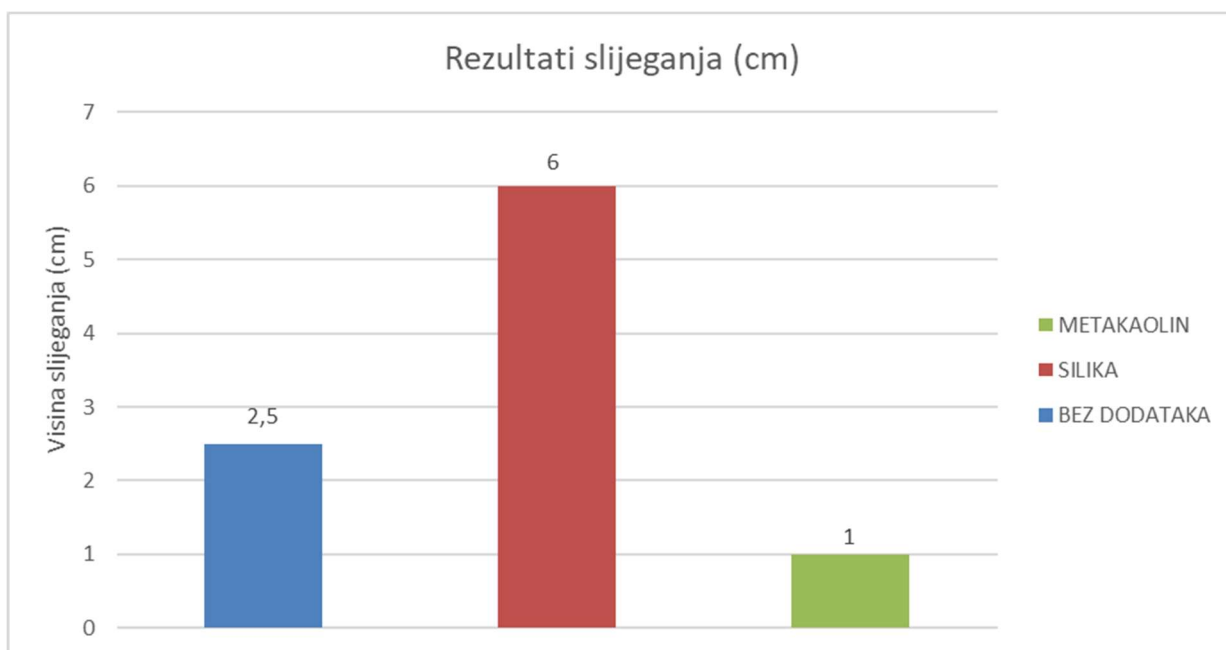
Tablica 10: Rezultati ispitivanja prodora vode

Rezultati ispitivanja prodora vode (mm)			
	Mješavina		
Broj uzorka	1	2	3
1	26	19	8
2	19	15	17
3	17	10	15
Srednja vrijednost (mm)	20,7	14,7	13,3

## 7.7. Analiza rezultata ispitivanja

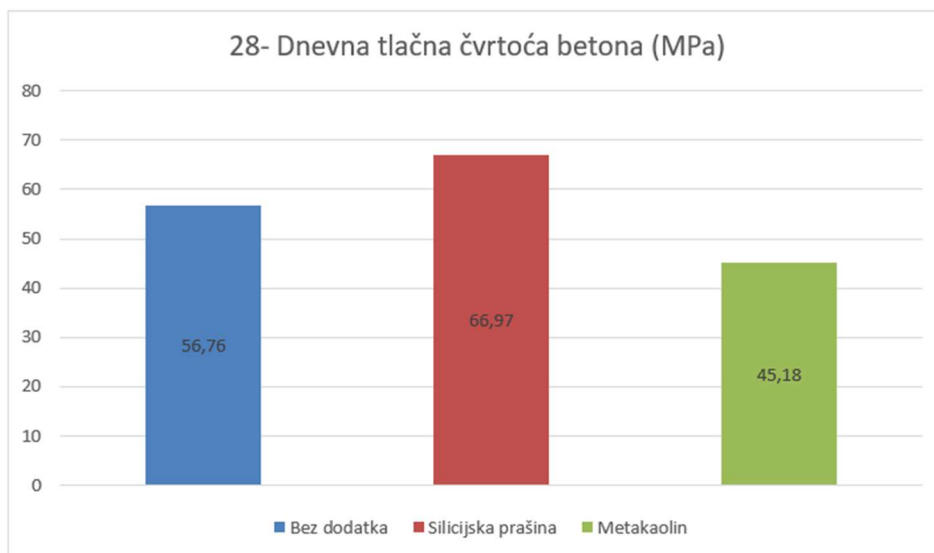
Nakon provedenih ispitivanja tlačnih i vlačnih čvrstoća te vodopropustnosti napravljena je analiza rezultata ispitivanja.

Dijagramom na Slici 13 prikazani su rezultati ispitivanja konzistencije slijeganjem iz kojih je vidljivo da mješavine imaju vrlo malo slijeganje. Najbolji rezultat ima mješavina kod koje je kao dodatak korištena silicijska prašina. Može se zaključiti da finoća čestica silicijske prašine pri vodocementnom omjeru 0,3 i količini superplastifikatora od 0,7% mase korištenog cementa pridonosi slijeganju betona. Najnižu vrijednost slijeganja ima mješavina sa metakaolinom i silicijskom prašinom. Sve mješavine pripadaju prvom razredu slijeganja.



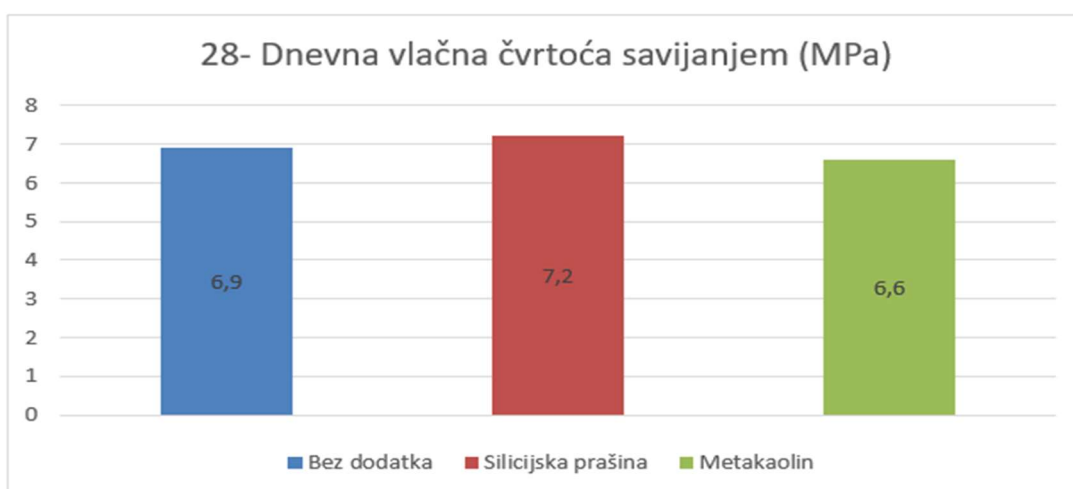
Slika 13: Prikaz rezultata dobivenih ispitivanjem slijeganjem

Na Slici 14 prikazana je usporedba 28-dnevnih srednjih čvrstoća ispitivanih uzoraka triju mješavina. Najveću čvrstoću imaju uzorci sa silikatnom prašinom. Porast čvrstoće uzoraka sa silicijskom prašinom 18% je veći u odnosu na referentnu mješavinu bez uporabe dodataka. Uzorci s metakaolinom i silicijskom prašinom imaju najmanju čvrstoću koja iznosi 80% čvrstoće referentne mješavine.



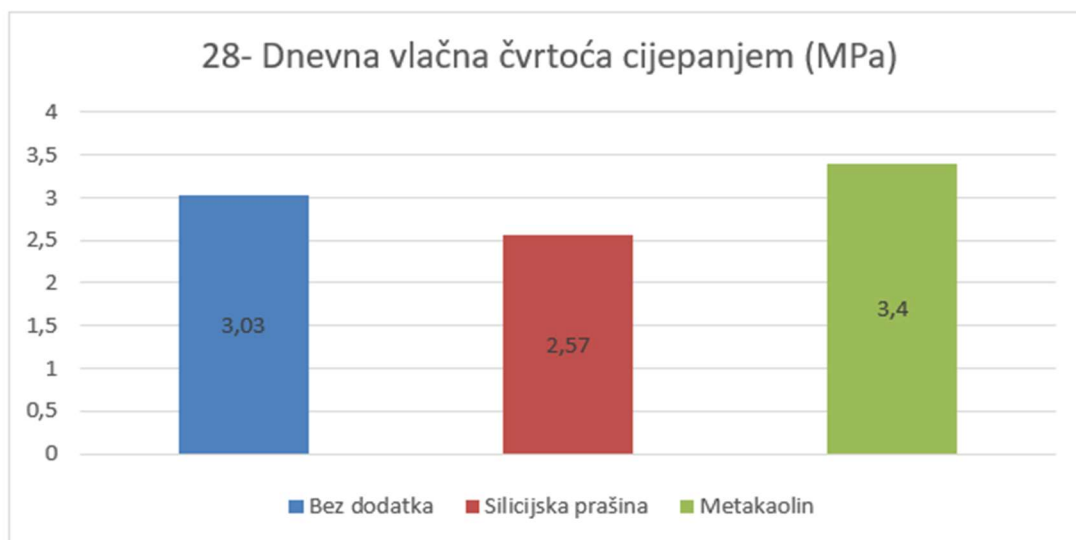
Slika 14: Prikaz usporedbe srednjih vrijednosti tlačnih čvrstoća uzoraka

Usporedbom čvrstoća savijanjem, što je vidljivo na Slici 15, može se zaključiti da najveću čvrstoću imaju uzorci sa dodatkom silicijske prašine. Silicijska prašina utječe na poboljšanje svojstva sučeljka što pridonosi porastu čvrstoća. Najnižu čvrstoću na savijanje imaju uzorci sa metakaolinom, nižu od referentne mješavine.



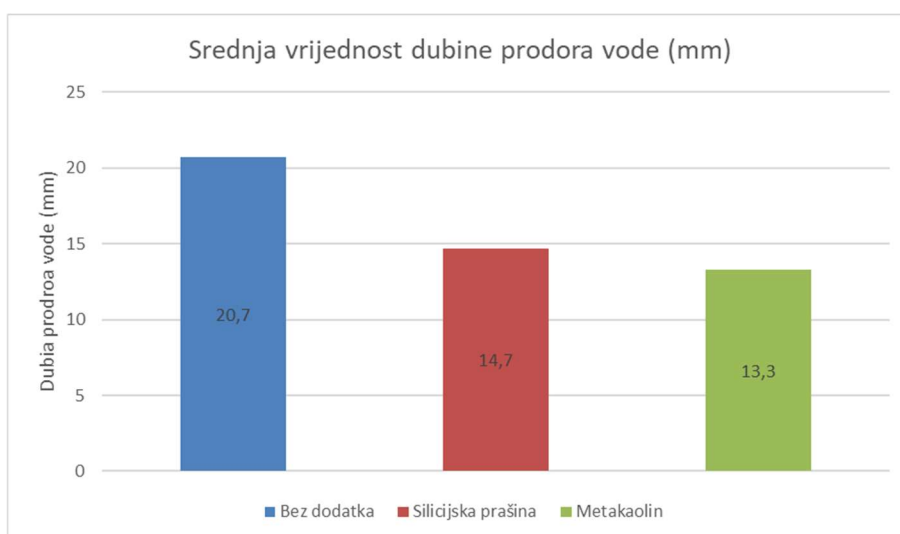
Slika 15: Prikaz srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća savijanjem

Iz dijagrama (Slika 16) koji prikazuje rezultate ispitivanja vlačnih čvrstoća cijepanjem vidljivo je da mješavina s dodatkom metakaolina i silicijske prašine ima najveću čvrstoću cijepanjem. Beton samo s silicijskom prašinom pokazuje najnižu vrijednost koja iznosi 85% vlačne čvrstoće referentne mješavine.



Slika 16: Prikaz usporedne srednjih vrijednosti vlačnih čvrstoća cijepanjem

Usporedbom dubine prodora što je prikazano dijagramom na Slici 17 utvrđeno je da najmanju vodopropustnost imaju uzorci napravljeni od mješavine s dodatkom silicijske prašine i metakaolina. Najveću vodopropustnost imaju uzorci referentne mješavine.



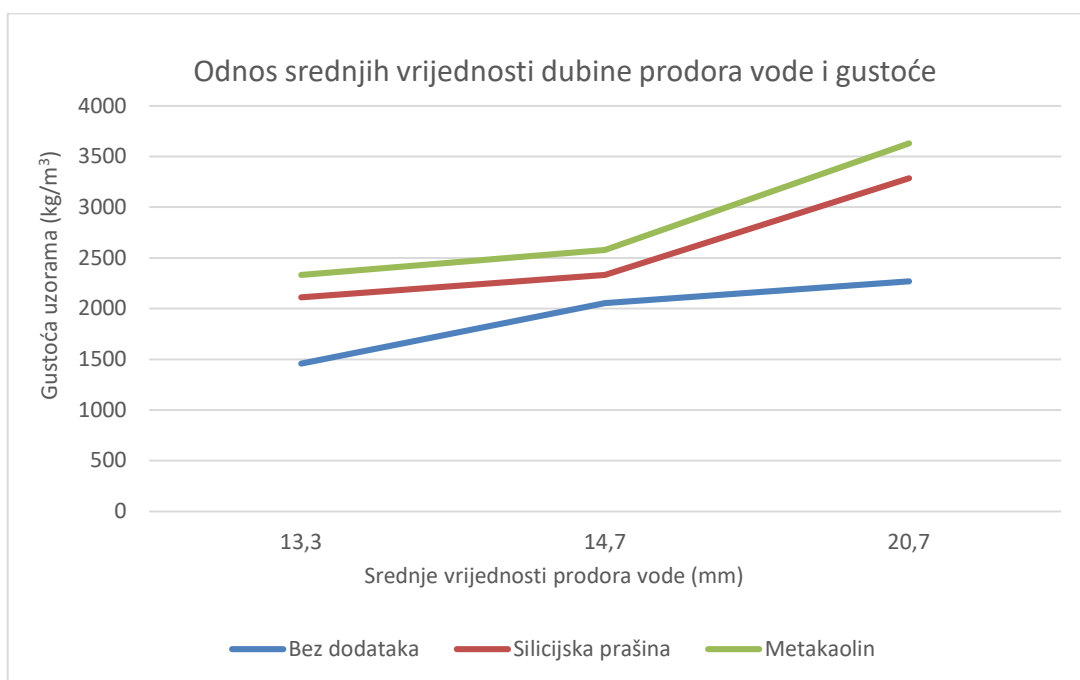
Slika 17: Prikaz usporedbe dubine prodora vode

Povećanjem vrijednosti gustoće uzoraka prikazanih Tablicom 11 i rezultatima dobivenih mjerenjem dubine prodora vode može se primijetiti da što uzorak ima veću gustoću vodopropustnost uzorka je manja (Slika 18).

Tablica 11: Vrijednosti gustoća uzoraka

Gustoća uzoraka (kg/m <sup>3</sup> )			
Broj uzorka	Mješavina		
	1	2	3
1	2283,77	2316,35	2325,24
2	2284,66	2341,82	2366,71
3	2239,34	2343,01	2310,43
Srednja vrijednost (kg/m <sup>3</sup> )	2269,3	2333,7	2334,1

Slika 18: Prikaz odnosa srednjih vrijednosti dubine prodora vode i gustoće



## 8. ZAKLJUČAK

Današnja gradnja predstavlja izazov za proizvodnju betona. Uporabom mineralnih dodataka i aditiva dobivamo betone koji se mogu koristiti u složenim konstrukcijama. Poznavanjem svojstva betona možemo lakše odrediti količinu mineralnih dodataka prilikom projektiranja njihovih sastava.

U ovom radu prilikom projektiranja sastava betona težilo se zadržavanju vodocementnog omjera 0,3 uz promjene masenog udjela silicijske prašine i metakaolina. Napravljeno je ispitivanje slijeganjem na svježem betonu, te nakon 28 dana ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće te vodopropustnosti.

Međusobnom usporedbom podataka ispitivanja utvrđeno je da najveće slijeganje ima svježi beton koji sadrži samo silicijsku prašinu. Takav ishod nije očekivan jer je uporaba metakaolina u prijašnjim istraživanjima davala beton više konzistencije slijeganja.

Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem najviše vrijednosti imali su također uzorci betona sa silicijskom prašinom. Takvi rezultati ispitivanja su bili očekivani zbog velikog pucolanskog djelovanja silicijske prašine. Nižu vrijednost čvrstoća od referentne mješavine imali su uzorci metakaolina i silicijske prašine što nije u skladu sa povećanjem čvrstoće do koje treba doći njihovom uporabom.

Za razliku od vlačne čvrstoće savijanjem gdje je beton sa silicijskom prašinom i metakaolinom pokazivao najniže vrijednosti kod ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem se pokazao kao najčvršći. Ispitivanja vodopropustnosti pokazala su očekivane rezultate jer uzorci metakaolina i silicijske prašine imali najveću masu što upućuje na veliku gustoću koja smanjuje vodopropustnost.

Kao zaključak cijelog istraživanja može se navesti da uporaba metakaolina od 20% u kombinaciji sa 10% silicijske prašine pri vodocementnom omjeru od 0,3 ne pokazuje očekivane povećane vrijednosti čvrstoća. Prema mom mišljenju uzrok tomu može je premal vodocementni omjer jer metakaolin i silicijska prašina povećavaju potrebu za vodom. Betonska mješavina je prilikom izrade bila suha te se nije mogla na adekvatan način ugrađivati i vibrirati. U daljnjim istraživanjima

trebalo mijenjati omjer između mineralnih dodataka te vidjeti utjecaj vodocemetnog omjera u odnosu na njihovu količinu.



## 9. POPIS LITERATURE

[1]

[https://www.samoborka.hr/upload/dokumenti\\_i\\_cjenici/oznacavanje\\_svjezeg\\_beto\\_na\\_prema\\_hrn\\_en\\_206-1\\_2006\\_151731.pdf](https://www.samoborka.hr/upload/dokumenti_i_cjenici/oznacavanje_svjezeg_beto_na_prema_hrn_en_206-1_2006_151731.pdf) , pristup 17.06.2023.

[2] <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati/sumber> , pristup 15.06.2023.

[3] <https://hsamaterial.com/undensified-silica-fume/92-undensified-silica-fume>, pristup 21.05.2023.

[4] Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 2015.

[5] Smarzewski, P.: Influence of silica fume on mechanical and fracture properties of high performance concrete, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321619302069>, pristup 01.06.2023.

[6] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Beton ultravisoke čvrstoće pojačan staklenim vlaknima sa silicijskom prašinom, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 10, pp. 849-856, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>

[7] Skazlić, M., Tomićić, I.: Armiranobetonski elementi od betona velikih čvrstoća naprezani savijanjem, <https://hrcak.srce.hr/file/10469>, pristup 04.05.2023.

[8] Zhang, H., Liu, X., Wei, D.: Influence of Silica Fume Content on Performance of High Performance Concrete, [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/13/e3sconf\\_arfee2021\\_03039.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/13/e3sconf_arfee2021_03039.pdf) , pristup 01.06.2023.

[9] [https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/2023-05/2023\\_05\\_20-izjava-o-svojstvima-ekspert-s-v-ll.pdf](https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/2023-05/2023_05_20-izjava-o-svojstvima-ekspert-s-v-ll.pdf), pristup 05.06.2023.

[10] <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/agregati/sumber>, pristup 05.06.2023.