

# Usporedba indirektnih vlačnih čvrstoća procjednog betona

---

**Kogej, Antea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:157:275838>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-19**



*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**

**Antea Kogej**

**Usporedba indirektnih vlačnih čvrstoća procjdnog betona  
(Comparison of indirect tensile strengths of pervious concrete)**

**Završni rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij  
Građevinski materijali**

**Antea Kogej  
JMBAG: 0114033273**

**Usporedba indirektnih vlačnih čvrstoća procjedinog betona**

**Završni rad**

**Rijeka, kolovoz 2022.**

## **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.

Antea Kogej

U Rijeci, 12. kolovoza 2022. godine

Naslov rada: Analiza vlačne čvrstoće procjdnog betona

Student: Antea Kogej

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

Studij: Preddiplomski stručni studij

Kolegij: Građevinski materijali

## SAŽETAK

U cilju analize vlačne čvrstoće procjdnog betona pripravljene su 4 mješavine. Kod ispitivanja se koristi metoda savijanja i metoda cijepanja. Dobivene rezultate uspoređeni su međusobno. U radu su opisana svojstva i primjena procjdnog betona, te njegove prednosti i nedostaci. Ukratko je opisana povijest procjdnog betona. Naglasak je na posebnostima sastava za ovakvu vrstu betona. Laboratorijska ispitivanja indirektnih vlačnih čvrstoća procjdnog betona prikazana su u eksperimentalnom dijelu kao i uspoređba dobivenih rezultata. Istraživanjem je dan doprinos u području ugrađivanja i ispitivanja procjdnog betona.

Ključne riječi: Procjdni beton, vlačna čvrstoća cijepanjem, vlačna čvrstoća savijanjem, duktilnost, Procjdni beton mikroarmiran polimernim vlaknima

Title of Thesis: Analysis of the tensile strength of porous concrete

Student: Antea Kogej

Mentor: Silvija Mrakovčić, PhD

Study programme: Vocational Undergraduate Study Programme in Civil Engineering

Subject: Construction materials

## ABSTRACT

In order to analyze the tensile strength of pervious concrete, 4 mixtures were prepared. The bending and splitting methods are used for testing. The obtained results were compared with each other. The paper describes the properties and application of percolated concrete, as well as its advantages and disadvantages. The history of percolated concrete is briefly described. The emphasis is on the particularities of the composition for this type of concrete. Laboratory tests of indirect tensile strength of percolated concrete are presented in the experimental part, as well as a comparison of the obtained results. The research is a contribution in the field of installation and testing of pervious concrete.

Key words: pervious concrete, porous concrete, splitting strength, bending strength, flexural strength, ductility, polymer fiber reinforced concrete

## ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Silviji Mrakovčić na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog završnog rada. Srdačno zahvaljujem tehničkom suradniku Dini Juriševiću na pomoći tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela rada u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci.

Najveće zahvale mojoj obitelji na iskazanoj ljubavi, razumijevanju i podršci tijekom studiranja.

**SADRŽAJ:**

## POPIS TABLICA

## POPIS SLIKA

1. UVOD.....	1
2. POVIJESNI RAZVOJ PROCJEDNOG BETONA.....	2
3. OPĆENITO O PROCJEDNOM BETONU.....	3
3.1. Primjena procjedinog betona.....	4
3.2. Prednosti i nedostaci procjedinog betona.....	5
3.3. Proizvodnja, transport i ugradnja procjedinog betona.....	6
3.4. Održavanje procjedinog betona.....	8
4. SASTAV PROCJEDNOG BETONA.....	9
4.1. Agregat.....	9
4.2. Veziva.....	10
4.3. Voda.....	11
4.4. Aditivi.....	11
4.5. Vlakna.....	12
5. SVOJSTVA PROCJEDNOG BETONA.....	13
6. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCJEDNOG BETONA.....	14
6.1. Istraživanje „Analiza svojstva procjedinog betona”.....	14
6.1.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem.....	15
6.1.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem.....	15
6.1.3. Zaključak.....	16
6.2. Istraživanje „Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjedinog betona”...	16
7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	18
7.1. Priprema mješavina.....	18
7.2. Ispitivanja svježeg procjedinog betona.....	21



7.2.1. Ispitivanje gustoće svježeg procjdnog betona.....	21
7.2.2. Ispitivanje poroznosti svježeg procjdnog betona.....	23
7.2.3. Ispitivanje konzistencije svježeg procjdnog betona metodom slijeganja.....	24
7.2.4. Ispitivanje konzistencije svježeg procjdnog betona metodom kuglice.....	26
7.3. Ispitivanja očvrstnalog procjdnog betona.....	26
7.3.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem.....	26
7.3.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem.....	30
8. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	34
9. ZAKLJUČAK.....	36
POPIS LITERATURE.....	37

**POPIS TABLICA:**

<i>Tablica 1: Sastav procjdnog betona [6].....</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 2: Sastav mješavina [12].....</i>	<i>17</i>
<i>Tablica 3: Sastava mješavina (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>18</i>
<i>Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>22</i>
<i>Tablica 5: Rezultati ispitivanja poroznosti svježeg betona (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>24</i>
<i>Tablica 6: Rezultati vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 1 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 7: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 2 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 8: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 3 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>29</i>
<i>Tablica 9: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 4 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 10: Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>30</i>
<i>Tablica 11: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavinu 3 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 12: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavinu 4 (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>32</i>
<i>Tablica 13: Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem (izvor: vlastiti prikaz).....</i>	<i>33</i>

**POPIS SLIKA:**

Slika 1: Procjedni beton [6] .....	3
Slika 2: Utjecaj procjednog betona na razinu podzemnih voda u urbanism [6].....	4
Slika 3: Primjena procjednog betona [5] .....	5
Slika 4: Usporedba kolnika od procjednog betona i asfaltnog kolnika [7].....	6
Slika 5: Automješalica za transport procjednog betona [8].....	6
Slika 6: Vibrirajuća ravnalica [5] .....	7
Slika 7: Zbijanje procjednog betona čeličnim [5].....	8
Slika 8: Pločnik prije i poslije dubinskog [6].....	8
Slika 9: Različite veličine agregata [9].....	10
Slika 10: Superplastifikator (izvor: vlastita fotografija).....	11
Slika 11: Polimerna vlakna (polipropilen) (izvor: vlastita fotografija).....	12
Slika 12: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem [3].....	15
Slika 13: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem [9].....	16
Slika 14: Ovisnost vlačne čvrstoće o udjelu pijeska u dvofrakcijskom procjednom [12].....	17
Slika 15: Krupni agregat (izvor: vlastita fotografija).....	19
Slika 16: Pijesak (izvor: vlastita fotografija).....	19
Slika 17: Cement (izvor: vlastita fotografija).....	20
Slika 18: Kalup u obliku prizme i valjka (izvor: vlastita fotografija).....	20
Slika 19: Uzorak procjednog betona u bazenu za njegovanje (izvor: vlastita fotografija).....	21
Slika 20: Postupak ispitivanja gustoće svježeg procjednog betona (izvor: vlastita fotografija)....	22
Slika 21: Postupak ispitivanja poroznosti svježeg procjednog betona (izvor: vlastita fotografija).....	23
Slika 22: Kalup za ispitivanje konzistencije procjednog betona slijeganjem (izvor: vlastita fotografija).....	25
Slika 23: Postupak ispitivanja konzistencije procjednog betona metodom slijeganja (izvor: vlastita fotografija).....	25
Slika 24: Formirana kuglica (izvor: vlastita fotografija).....	26
Slika 25: Uredaj za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem (izvor: vlastita fotografija).....	27
Slika 26: Uzorak procjednog betona za ispitivanje vlačne čvrstoće (izvor: vlastita fotografija).....	28
Slika 27: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem (izvor: vlastita fotografija).....	29
Slika 28: Uredaj za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem (izvor: vlastita fotografija).....	31

Slika 29: Shema raspodjele naprezanja [11].....	31
Slika 30: Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem (izvor: vlastita fotografija).....	34
Slika 31: Usporedba rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem (izvor: vlastita fotografija).....	35

## 1. UVOD

Beton kao građevinski materijal počinje se koristiti već u Antici kada ga rimski arhitekt Vitruvije spominje u djelu "O graditeljstvu". Vrlo brzo pokazuje se kao kvalitetan materijal, poprilično jednostavne pripreme, te se počinje koristiti u mnogo različitih svrha. [1]

Beton je smjesa dobivena miješanjem agregata, veziva i vode. Stvrđnjavanjem takve smjese nastaje materijal koji je moguće koristiti prilikom izgradnje objekata, temelja, nadvožnjaka, prometnica i slično. Jedna od prednosti betona je to što se u svježem stanju oblikuje po želji i taj oblik trajno zadržava. [2]

Procjedni beton posebna je vrsta betona koja sadrži veću količinu pora što omogućuje veću propusnost takve vrste betona. Sastav procjednog betona čini ujednačena frakcija krupnozrnatog agregata, mala količina sitnozrnatog agregata, cement, voda te po mogućnosti aditivi. Smatra se ekološki i ekonomski prihvatljivim betonom. Osnovna funkcija procjednog betona je propuštanje velikih količina vode u podzemne slojeve. [3]

Primjena procjednog betona u hladnijim klimatskim uvjetima ograničena je zbog njegove niske tlačne čvrstoće, slabe otpornosti na zamrzavanje i odmrzavanje te zbog mogućnosti začepjenja. Stoga se upotrebljava u zonama niskog prometnog opterećenja, kod izgradnje pločnika i drugih površina slične namjene. Procjedni beton koristi se i kod zidnih konstrukcija radi smanjenja težine konstrukcije i povećanja toplinske izolacije, zatim za teniske terene, prostore u zoološkim vrtovima, pregrade u konjušnicama i slično. [3]

## 2. POVIJESNI RAZVOJ PROCJEDNOG BETONA

Procjdn se beton upotrebljava otprilike 100 godina. Razaranja tijekom Drugog svjetskog rata pokrenula su početak razvoja procjdnog betona. Zbog manje količine cementa u smjesi smatrali su ga isplativom alternativom. To je bio početak istraživanja procjdnog betona. [6]

Prva upotreba procjdnog betona zabilježena je u Europi početkom 19. stoljeća. Prvobitno se koristio za izgradnju kolnika, parkirališta i nosivih zidova. Tek nakon 1923.godine započinje gradnja uz pomoć procjdnog betona kao održivog načina gradnje. [6]

Tijekom 1970-ih postao je široko prihvaćen u Sjedinjenim Američkim Državama. Florida je imala česte poplave, te je trebalo smisliti način kako se obraniti od njih. Tako su inženjeri došli do ideje da kod završnog sloja ceste upotrijebe procjdn beton, što je omogućilo brzo sušenje kolnika nakon oluje. [ 6 ]

Procjdn beton intenzivno se istražuje od 1980-ih pa do danas. [6] Treba temeljito ispitati učinkovitost ove nove vrste betona te proučiti njegova svojstva kako bi znali u koje se svrhe može upotrebljavati. [4]

### 3. OPĆENITO O PROCJEDNOM BETONU

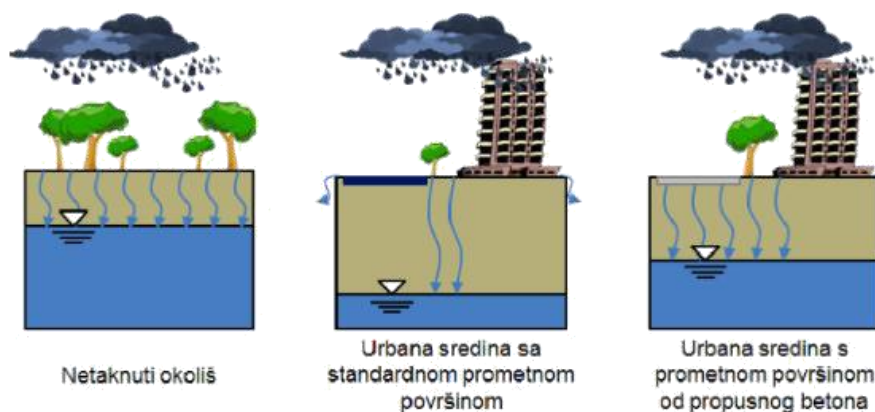
Beton koji zbog svog sastava sadrži znatno veću količinu pora naziva se procjedni beton. Možemo naići na termin propusni ili porozni beton. Da bi se dobio ovakav beton potrebno je izostaviti sitni agregat ili ga dodati u manjoj količini. Priprema se poprilično jednostavno, sve što je potrebno za smjesu procjednog betona jest cement, krupnozrnat agregat, mala količina sitnozrnatog agregata, voda i po mogućnosti aditiv. [4] Na slici 1 prikazan je uzorak procjednog betona.



Slika 1: Procjedni betona [6]

S obzirom na to da mu je glavna namjena propuštanje vode kroz betonirane površine u slojeve ispod njih, ovakva nam vrsta betona omogućuje eliminiranje sustava za odvodnju površinske (oborinske) vode. Stoga procjedni beton smatramo ekonomski prihvatljivom alternativom za obični beton. [4]

Danas se ovakva vrsta betona upotrebljava sve češće zbog karakteristika koje su u skladu s načelima održivosti, što je danas vrlo bitno s obzirom na rastuću potrebu za ekološkom osviještenosti. [4] Na slici 2 prikazan je utjecaj procjednog betona na razinu podzmenih voda u urbanim sredinama. [6]



Slika 2: Utjecaj procjdnog betona na razinu podzemnih voda u urbanim sredinama [6]

### 3.1.Primjena procjdnog betona

Zbog svoje jedinstvene strukture procjdni beton zadržavanjem kišnice i njenim propuštanjem u tlo ima ulogu prihranjivanja podzemne vode i smanjenja oborinskog otjecanja te podržava zelenu gradnju i pruža ekološko prihvatljiva rješenja. [6]

Primjena procjdnog betona vrlo je široka, međutim zbog svog sastava ovakav beton ima malu čvrstoću na savijanje pa je upravo zato pogodan za slabije opterećene prometne površine. [6] Na slici 3 prikazan je primjer primjene procjdnog betona. [5]

Najčešće se upotrebljava za izradu:

- pješačkih staza
- parkirališta
- područja uz plaže i bazene
- retencijskih polja
- akustičnih panela
- trgova
- staza i puteva u prirodnom okruženju [6]





Slika 3: Primjena procjednog betona [5]

### 3.2. Prednosti i nedostaci procjednog betona

Mnoge se biljke teško razvijaju u područjima prekrivenim nepropusnim kolnicima i nogostupima zbog toga što voda teško dolazi do korijena. Procjedni beton omogućuje više zraka i vode stoga je idealan za zaštitu stabala i drugih biljaka. Iako se procjedni beton ne može koristiti za visoko opterećene prometne površine, ipak poboljšava sigurnost tijekom pljuskova tako što eliminira cijedenje, prskanje, bliještanje noću i opasnost od proklizavanja. Također umanjuje buku koja nastaje tijekom kontakta kolnika i pneumatika, parkirališta održava suhim, kontrolira kišnicu i rješava pitanje oborinskog otjecanja. [5]

Osnovni nedostatak procjednog betona je čvrstoća. Ispitivanja na ovakvoj vrsti betona uglavnom se temelje na pronalaženju optimalnog sastava koji treba zadovoljiti kriterije tlačne čvrstoće. Kod procjednog betona potrebno je redovito održavanje kako bi se spriječila mogućnost začepjenja lišćem ili nečistoćama. Produženo vrijeme sušenja, nedostatak standardiziranih metoda ispitivanja i ograničenje upotrebe u hladnim područjima još su neki od nedostataka procjednog betona na koje treba obratiti pažnju. [6]

Na slici 4 prikazan je odnos brzine sušenja između kolnika od procjednog betona i asfaltnog kolnika za iste vremenske uvjete. Sa slike se vidi da je kolnik od procjednog betona suh i na njemu se ne zadržava voda, dok je asfaltni kolnik mokar i na njemu se voda zadržava. [6]



Slika 4: Usporedba kolnika od procjdnog betona i asfaltnog kolnika [7]

### 3.3. Proizvodnja, transport i ugradnja procjdnog betona

Zbog svoje jedinstvene smjese procjdnog betona zahtjeva strogu kontrolu sastojaka. Transport procjdnog betona do gradilišta obično se obavlja automješalicom (Slika 5). Ovakav beton moguće je transportirati do mjesta ugradnje uporabom transportne trake ili transportnih kolica. Mješavinu je potrebno potpuno isprazniti u roku od jednog sata nakon miješanja. [6]



Slika 5: Automješalica za transport procjdnog betona [8]

Kod ugradnje procjednog betona poznate su različite tehnike. Vrlo je važno da je ugradnja kontinuirana, a ravnanje brzo. Najčešće se upotrebljava uobičajena oplata. Prilikom ugradnje beton mora popuniti sav prostor u oplati. Nakon ravnanja letvama i razastiranja zbija se valjcima. Pri upotrebi vibrirajućih letvi bitno je smanjiti frekvenciju vibracija kako bi se izbjeglo blokiranje šupljina. [6] Na slici 6 prikazana je vibrirajuća letva. [5] Za razliku od uobičajenih betona kod kojih se gornja površina zaglađuje, procjedni beton pri završnoj obradi zahtjeva zbijanje uslijed kojeg se dobije hrapava površina. Također, zbijanje mora biti realizirano 15 minuta od trenutka ugradnje. [6] Na slici 7 prikazano je zbijanje procjednog betona čeličnim valjkom. [5]



Slika 6: Upotreba vibrirajuće letve [5]

Nakon ugradnje preporučuje se kontinuirana njega kolnika idućih 7 dana prije puštanja u promet. Njega betona uključuje osiguranje povoljnih uvjeta hidratacije, preventive od vjetra i oborina, mogućih oštećenja i naglih promjena temperature. [5]

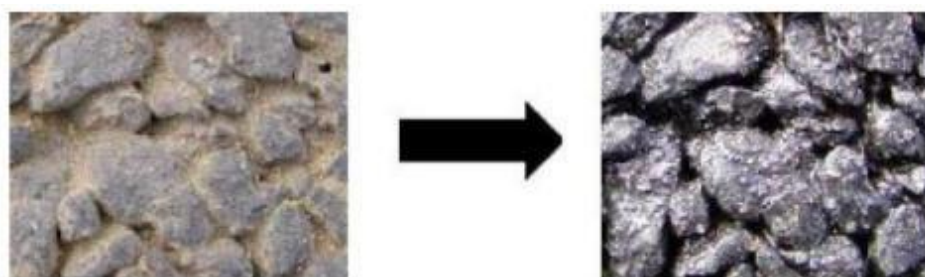


Slika 7: Zbijanje procjednog betona čeličnim valjkom [5]

### 3.4.Održavanje procjednog betona

Procjedni je beton glede otvorene strukture izloženiji nečistoćama pa tako zahtjeva dodatnu njegu i održavanje kako bi se spriječilo moguće začepljenje. Održavanje se uglavnom sastoji od pregleda površine kolnika te uklanjanja začepljenja koje s vremenom nastaje u šupljinama. Tretman čišćenja obuhvaća čišćenje uređajem za puhanje lišća, kamionom za pranje pločnikai suho vakumiranje. [6]

Ovakav način održavanja sprječava oštećenja koja mogu smanjiti njegovu propusnost i vijek trajanja, te se preporučuje provoditi barem jednom mjesečno kako bi se površina procjednog betona održala čistom. Pokazatelj za ponovno čišćenje je pojava lokvi. Kvalitetno i kontinuirano održavanje procjednog betona od velike je važnosti kako bi se izbjeglo obnavljanje ili ponovno građenje. [6] Na slici 8 prikazana je usporedba pločnika prije i poslije dubinskog čišćenja. [6]



Slika 8: Pločnik prije i poslije dubinskog čišćenja [6]

## 4. SASTAV PROCJEDNOG BETONA

Izrada procjedinog betona zahtjeva jednake materijale kao i klasični beton, a to su jedna ili dvije frakcije agregata, cement i voda. Ovakav beton također može sadržavati vlakna i dodatke. Zbog navedenog sastava, količina šupljina u ovakvom betonu iznosi od 15% do 35% ukupnog volumena. Ovaj jedinstveni sastav smanjuje čvrstoću betona i otpornost na habanje, ali se istovremeno ostvaruje mnoštvo ostalih prednosti kao što su manja volumna masa i bolja izolacijska svojstva. [6]

Gustoća procjedinog betona iznosi od 1600 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. Prilikom izrade procjedinog betonaključno je postići dovoljnu razinu šupljina koje će omogućiti procjeđivanje vode. Količina šupljina varira ovisno o karakteristikama i omjeru materijala, te slijevanju mase. [6] U tablici 1 prikazan je sastav procjedinog betona. [6]

Tablica 1: Sastav procjedinog betona [6]

KOMPONENTA BETONA	KOLIČINA MATERIJALA
Cement	270 - 415 kg/m <sup>3</sup>
Agregat	1190 - 1480 kg/m <sup>3</sup>
v/c	0,27 - 0,3
a/c	4 - 4,5 : 1
Sitne čestice / agregat	0 - 1 : 1

### 4.1. Agregat

Agregat čini gotovo tri četvrtine volumena betona, upravo zbog toga ima golemi utjecaj na svojstva svježeg i očvrstnalog betona. Dijelimo ih na prirodne i umjetne. Prirodni agregat proizvodi se iz vučenog nanosa koji se oblikuje procesom erozije ili drobljenjem velikih komada stijena. Umjetni se agregat proizvodi za specifičnu namjenu kao što je npr. lakoagregatni beton. [5]

Zrnca od 0,06 do 0,02 mm spadaju pod naziv kamene prašine, dok se sitnije česticu nazivaju glinom. Krupnija zrna agregata dijele se u frakcije. Podjela veličina zrna u ukupnom sastavu naziva se granulometrijski sastav. [5] Na slici 9 prikazane su različite veličine agregata. [9]

Standardne frakcije iznose:

- 0 – 4 mm
- 4 – 8 mm
- 8 – 16 mm
- 16 – 32 mm
- 32 – 63 mm
- 63 – 125 mm



Slika 9: Različite veličine agregata [9]

Kod izrade procjednog betona preporučuju se zrna agregata od 9,5 do 19 mm, te je potrebno izostaviti sitni agregat ili ga dodati u manjoj količini. Uslijed takvog granulometrijskog sastava teško se postiže veća tlačna čvrstoća, te se ona kreće od 2,8 do 28 MPa. [6]

#### 4.2. Veziva

Kod procjednog betona kao vezivo uglavnom se upotrebljava portland cement. Neke od karakteristika takvog cementa su visoka početna i konačna čvrstoća, smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina, izvrsna svojstva ugradivosti te povećanje čvrstoće pri većoj starosti betona. [5]

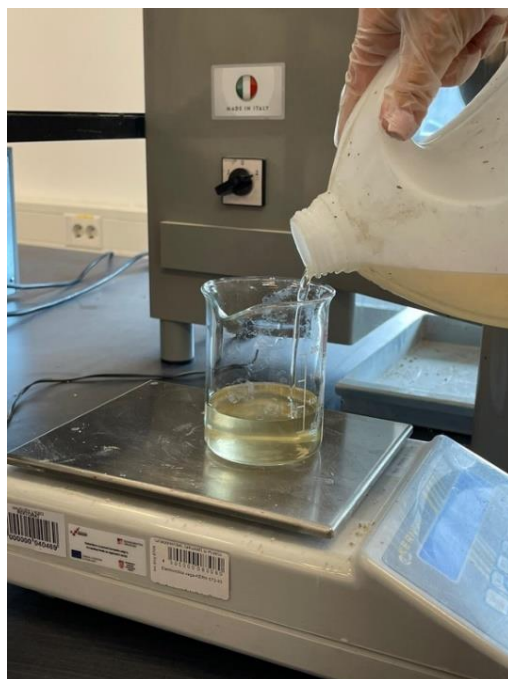
Kao zamjena dijela cementa upotrebljavaju se pucolani (leteći pepeo i silicijska prašina). Prije ugradnje betona preporučuje se ispitivanje svojstva materijala kako bi se ustanovio utjecaj dodanih materijala na svojstva procjednog betona. [6]

### 4.3. Voda

Kvaliteta vode iznimno je značajna za beton. U većini slučajeva pitka se voda smatra kvalitetnom kod izrade betona, voda koja nije pitka također može biti prikladna za izradu betona. Najvažnije je da se pH kreće od 6 do 8, te da voda nije slana. [5] Soli i ostale nečistoće mogu negativno utjecati na vrijeme vezivanja betona, smanjenje čvrstoće očvrstulog betona te mogu izazvati koroziju betona u očvrstulom stanju. Količina vode mora biti strogo kontrolirana. U procjednom betonu ne smije se dogoditi nedostatak vode, kao što je nedopustiv i višak vode. [6]

### 4.4. Aditivi

Kao i kod klasičnog betona, korištenjem kemijskih dodataka moguće je dobiti neka od posebnih svojstava. Aditivi koji se koriste pri izradi procjednog betona imaju utjecaj na obradljivost betona (plastifikatori i superplastifikatori (Slika 10)). Također mogu se koristiti dodaci koji olakšavaju zaštitu i postavljanje poroznih kolnika. Vrlo je važno prije upotrebe bilo kakvih dodataka pomno proučiti preporuke proizvođača. [5]

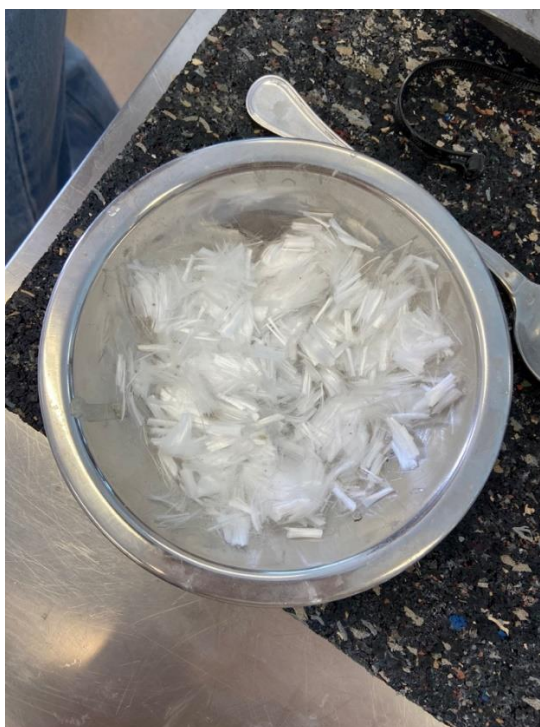


Slika 10: Superplastifikator (izvor: vlastita fotografija)

#### 4.5. Vlakna

Vlakna se upotrebljavaju kako bi se poboljšala sama svojstva betona. Ona mogu biti polimerna, staklena i prirodna. Kod procjednog betona ne koriste se čelična vlakna jer bi u doticaju s vodom korodirala i izgubila svoja svojstva. [6]

Polimerna vlakna mogu biti polietilenska, poliesterska, polipropilenska i aramidna. (Slika 11) U usporedbi s čeličnim vlaknima prednost im je što su fleksibilna i ne oštećuju strojeve. Koriste se kod izrade različitih građevinskih elemenata.



Slika 11: Polimerna vlakna (polipropilen) (izvor: vlastita fotografija)

Staklena vlakna proizvode se od rastaljenog stakla centrifugalnim postupkom uz puhanje s tlačenim zrakom ili izvlačenjem niti i nametanjem na brzorotirajući valjak. Takva vlakna generalno su negoriva, čvrsta, otporna na kemikalije i sjajnih su izolacijskih svojstava.

Prirodna vlakna kao što im samo ime govori, nalazimo u prirodi. Koristi se drvo, bambus, juta, agava, kokosov orah i slično. Izbor vrste vlakana ovisi o svojstvima betona na koje treba utjecati. [6]



## 5. SVOJSTVA PROCJEDNOG BETONA

Svojstva procjednog betona znatno se razlikuju od klasičnog betona. Ispitivanja se provode na prethodno izrađenim očvrnulim uzorcima koji zahtjevaju njegovanje. Svojstva ovakvog tipa betona ovise o nekoliko različitih faktora, a to su: odnos udjela sastavnih komponenti, uvjeti u eksploataciji i tehnološki faktori. [6]

Svojstva koja se obično ispituju su:

- otpornost na habanje
- apsorpcija zvuka
- tlačna i vlačna čvrstoća
- brzina procjeđivanja
- gustoća i sadržaj šupljina očvrnulog betona
- otpornost na smrzavanje sa ili bez soli za odmrzavanje [6]

## 6. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA PROCJEDNOG BETONA

Procjedni beton počeo se detaljnije istraživati zadnjih pedesetak godina. U istraživanjima se analiziraju svojstva procjednog betona poput tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće, gustoće, propusnosti, otpornosti na habanje i slično. Ispitivanja se temelje na kombinacijama različitih udjela agregata i cementa, iz kojih se dobivaju rezultati koji se kasnije međusobno analiziraju.

Do danas već postoje mnoga istraživanja na ovu temu. Cilj je pronaći beton odgovarajuće čvrstoće, poroznosti i propusnosti. Optimalan sastav procjednog betona još uvijek nije definiran. Iz tog razloga potrebno je napraviti još mnogo istraživanja kako bi bilo moguće napisati normative za izradu i ispitivanje procjednog betona. [6]

U nastavku su prikazani rezultati nekih ispitivanja procjednog betona koja su napravljena do sada.

### 6.1. Istraživanje „Analiza svojstava procjednog betona” [3]

Kako bi se postigao kvalitetan procjedni beton na što ekonomičniji način potrebno je odabrati odgovarajuće sastojke betona i odrediti njihove međusobne odnose. Cilj rada je istražiti hidraulička i mehanička svojstva primjenom različitih parametra. Parametri koji se mijenjaju su količina i veličina krupnozrnatog agregata, dok količina vode i cementa ostaje ista. [3]

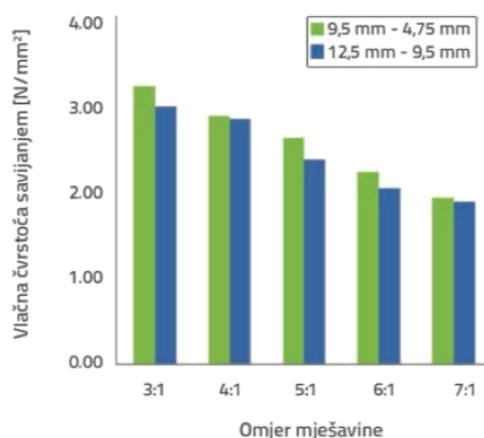
Procjedni beton priprema se miješanjem krupnozrnatog agregata cementa i vode. Miješanje se obavlja u miješalici za beton. Smjesu se zatim stavlja u kalupe i zbija uz pomoć ručnog nabijača. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i njeguju sve do ispitivanja. Uzorci su pripremljeni u skladu s normom ASTM C192. [3]

Važno je napomenuti da oznaka S1 označuje agregat čija zrna prolaze kroz sito 9,5 mm, a zadržavaju se na situ veličine 4,75 mm. Oznaka S2 označuje agregat čija zrna prolaze kroz sito 12,5 mm, a zadržavaju se na situ veličine 9,5 mm. [3]

### 6.1.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Uzorci za ispitivanje prizmatičnog su oblika dimenzija 150 mm x 150 mm x 700 mm prema normi ASTM C78-C496. [3]

Rezultati pokazuju da se vlačna čvrstoća savijanjem kreće od 3,21 N/mm<sup>2</sup> do 1,93 N/mm<sup>2</sup> za agregat tipa S1. Za agregat tipa S2 vlačna čvrstoća varira od 2,96 N/mm<sup>2</sup> do 1,88 N/mm<sup>2</sup>, s različitim omjerom cementa i agregata od 3:1 do 1:7. Razlika između dvije veličine agregata iznosi 6%. [3] Dijagram na slici 12 prikazuje rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem. [3]

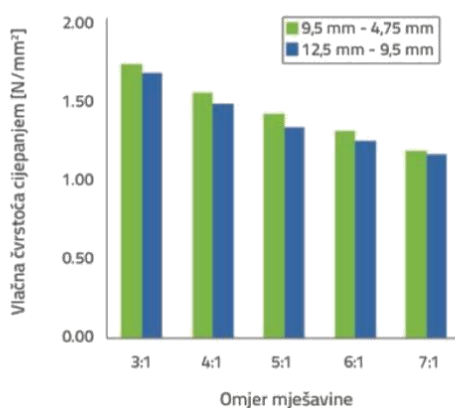


Slika 12: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem [3]

### 6.1.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Uzorci za ispitivanje valjkastog su oblika promjera 150 mm i visine 300 mm. Njegovani su 28 dana prema normi ASTM C496. [3]

Rezultati pokazuju da se vlačna čvrstoća cijepanjem kreće od 1,70 N/mm<sup>2</sup> do 1,17 N/mm<sup>2</sup> za agregat S1. Za agregat S2 vlačna čvrstoća varira od 1,66 N/mm<sup>2</sup> do 1,15 N/mm<sup>2</sup>, s različitim omjerom cementa i agregata od 3:1 do 7:1. Razlika između dvije veličine agregata iznosi 4%. [3] Dijagram na slici 13 prikazuje rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem. [3]



Slika 13: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem [3]

### 6.1.3. Zaključak

Nakon ispitivanja ustanovljeno je da se vlačna čvrstoća mijenja ovisno o količini i veličini agregata. Također je ustanovljeno da je upotreba procjednog betona primjereno rješenje u slučajevima gdje čvrstoća nije primarna. [3]

## 6.2. Istraživanje „Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjednog betona” [12]

U radu je analizirana zavisnost vlačne čvrstoće o granulometrijskom sastavu. Ispitivanje se provodi na uzorcima gdje udio frakcije pijeska 0-2 mm ne prelazi 15%. [12]

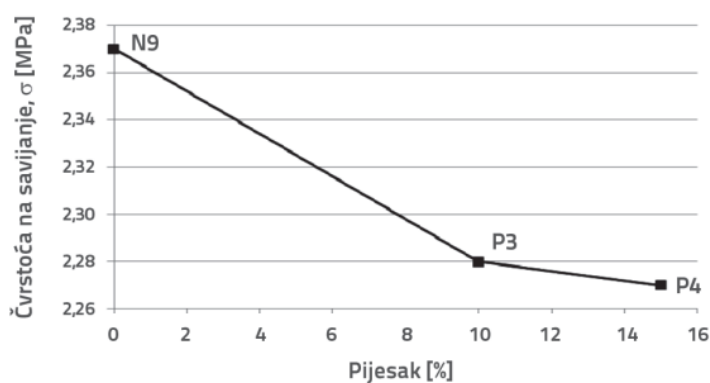
Za izradu mješavina korišten je portland cement opće namjene, drobljeni vapnenac koji se proizvodi u kamenolomu na otoku Krku i pitka voda iz vodovoda. Mješavine su izrađene u Laboratoriju za materijale u sklopu Građevinskog fakulteta u Rijeci. Za ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje izrađene su 3 prizme dimenzija 100x100x400mm. Njegovanje uzoraka traje 28 dana, od čega se prva 24 sata čuvaju u kalupu, nakon čega ih je potrebno raskalupiti i njegovati 28 dana u vodi temperature 20-22°C. [12]

Sastav mješavina prikazan je u tablici 2.

Tablica 2: Sastav mješavina [12]

P1	0,35	20	8-16 / 90	0-4 / 10
P2	0,3	20	4-8 / 50 16-22 / 50	
P3	0,35	20	4-8 / 45 16-22 / 45	0-4 / 10
P4	0,35	20	4-8 / 40 16-22 / 45	0-4 / 15
V1	0,35	20	4-8 / 45 16-22 / 45	0-4 / 10
V2	0,35	20	11-16 / 90	0-2 / 10
V3	0,35	20	4-8 / 45 16-22 / 45	0-2 / 10
V4	0,35	20	4-8 / 40 16-22 / 45	0-2 / 15

Vlačna čvrstoća ispitana je na uzorcima od P1 do P4 I od V1 do V4. Na slici 12 prikazani su dobiveni rezultati ispitivanja na uzorcima dvofrakcijskog poroznog betona (4-8 I 16-22) s drugačijim udjelom dodanog pijeska granulacije 0-4. Zaključeno je da se vlačna čvrstoća smanjuje dodavanjem pijeska što je vidljivo iz dijagrama na slici 14. [12]



Slika 14: Ovisnost vlačne čvrstoće o udjelu pijeska u dvofrakcijskom procjednog betonu [12]

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U eksperimentalnom dijelu rada na svježem betonu provedena su ispitivanja gustoće, poroznosti i konzistencije procjdnog betona. Konzistencija je ispitana metodom slijeganja i metodom kuglice. Glavni cilj rada bio je ispitivanje i usporedba indirektnih vlačnih čvrstoća procjdnog betona. Na očvrnulom betonu provedena su ispitivanja vlačne čvrstoće metodom savijanja i metodom cijepanja.

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za materijale na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Laboratorij je specijaliziran za ispitivanje betona i njegovih komponenti.

### 7.1. Priprema mješavina

Za potrebe eksperimentalnog dijela rada napravljene su četiri mješavine procjdnog betona različitog sastava. Svaka od njih razlikuje se po svom jedinstvenom sastavu. (Tablica 3)

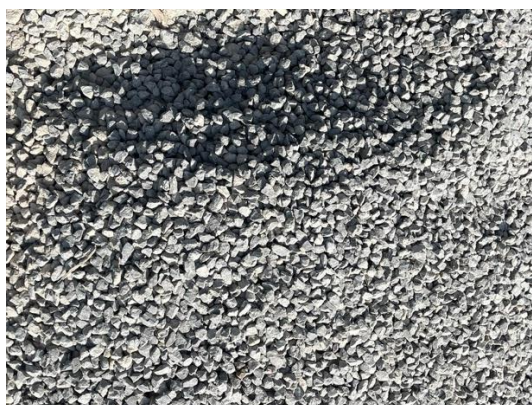
Tablica 3: Sastav mješavina za 1m<sup>3</sup> betona

SASTAV MJEŠAVINA						
Oznaka mješavine	Veličina agregata [kg]	Cement [kg]	Voda [kg]	Agregat [kg]	Superplastifikator [kg]	Mf vlakna [kg]
1	0-4 8-16	334	118	156 1356	1	
2	0-4 8-16	334	118	156 1356	1	2(0,2%)
3	0-4 8-16	359	122,5	148 1333		
4	0-4 8-16	350	122,5	148 1333		2(0,2%)

Prilikom pripreme mješavina procjednog betona korištena je sljedeća oprema, a to je:

- vaga
- posude za vaganje
- lopatice
- štoperica
- Abrahamsov konus, ravnjača i metalna šipka
- posude od 5 i 7 l
- metar
- Proctor čekić

Najprije su izvagani svi sastojci pojedine mješavine, zatim je u miješalicu stavljen krupni agregat (Slika 15), pijesak (Slika 16) i cement (Slika 17), te je provedeno suho miješanje u trajanju od jedne minute. Nakon suhog miješanja dodana je voda ili voda s aditivom. Na posljetku je provedeno miješanje od tri minute ili s ručnim dodavanjem vlakana šest minuta.



Slika 15: Krupni agregat (izvor: vlastita fotografija)



Slika 16: Pijesak (izvor: vlastita fotografija)



Slika 17: Cement (izvor: vlastita fotografija)

Sve četiri mješavine procjednog betona ugrađene su u kalupe. Kod ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem upotrijebljene su prizme, a kod ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem valjci. (Slika 18)



Slika 18: Kalup u obliku prizme i valjka (izvor: vlastita fotografija)

Nakon 48 sati procjedni beton je raskalupljen. Zatim se uzorci njeguju 28 dana u bazenu za njegovanje na temperaturi od 20-22°C. (Slika 19)





Slika 19: Uzorak procjdnog betona u bazenu za njegovanje (izvor:: vlastita fotografija)

## 7.2. Ispitivanja svježeg procjdnog betona

Prije ugradnje mješavina procjdnog betona u kalupe ispitana su tri svojstva svježeg betona, a to su:

- gustoća
- poroznost
- konzistencija metodom kuglice i metodom slijeganja

### 7.2.1. Ispitivanje gustoće svježeg procjdnog betona

Ispitivanje gustoće procjdnog betona provodi se tako da se posuda volumena 7 litara puni u 3 sloja koja se zbijaju s 20 udaraca metalnom šipkom. (Slika 20) Kada je posuda puna, površina se ravna metalnim ravnalom. Zatim je izvagana masa betona u posudi, te se zapisuje vrijednost koju pokazuje vaga. Ispitivanje je provedeno sukladno normi HRN EN 12350-6. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3.



Slika 20: Postupak ispitivanja gustoće svježeg procjedinog betona (izvor: vlastita fotografija)

Gustoća svježeg procjedinog betona dobivena je prema izrazu (1):

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća svježeg procjedinog betona [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$m$  – masa svježeg procjedinog betona u posudi [kg]

$v$  – volumen posude [ $\text{m}^3$ ]

Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona

GUSTOĆA SVJEŽEG BETONA		
Oznaka mješavine	Masa betona u posudi volumena 7 [kg]	Gustoća svježeg betona [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
1	13,30	1899,29
2	12,94	1848,57
3	12,77	1824,29
4	13,17	1881,43
Vrijednost srednje gustoće		1863,40

### 7.2.2. Ispitivanje poroznosti svježeg procjedinog betona

Poroznost procjedinog betona ispitala se tako da se posuda volumena 7 litara punila u 2 sloja koja se zbijaju s 20 udaraca Proctor čekićem kojim je visina padanja 305 mm. (Slika 21) Kod zbijanja zadnjeg sloja obraćena je pažnja da beton bude 3 mm preko ruba posude. Zatim se beton zbijao 10 puta, pa je ponovno dodano dok ne bude viška betona iznad ruba posude. Površina se zatim ravna metalnim ravnalom. Nakon toga izvagana je posuda s betonom, te zabilježena vrijednost koju pokazuje vaga. Ispitivanje je provedeno prema normi (ASTM C 1688-08).



Slika 21: Postupak ispitivanja poroznosti svježeg procjedinog betona (izvor: vlastita fotografija)

Izračun šupljina procjedinog betona dobiven je prema izrazu (2)::

$$U = \frac{T - \rho}{T} \times 100 \% \quad (2)$$

gdje je:

U – sadržaj šupljina u svježem procjedinom betonu [%]

T – teoretska gustoća svježeg procjedinog betona [kg/m<sup>3</sup>]

ρ - gustoća svježeg procjedinog betona [kg/m<sup>3</sup>]

Teoretska gustoća procjedinog betona dobivena je prema izrazu (3):

$$T = \frac{M_s}{V_s} \quad (3)$$

gdje je:

T - teoretska gustoća svježeg procjedinog betona [kg/m<sup>3</sup>]

M<sub>s</sub> – ukupna masa sastojaka procjedinog betona [kg]

V<sub>s</sub> – suma apsolutnih volumena sastojaka procjedinog betona [m<sup>3</sup>]

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja poroznosti svježeg betona

SADRŽAJ ŠUPLJINA U SVJEŽEM BETONU				
Oznaka mješavine	Srednja masa betona u posudi volumena 7 litara [kg]	Srednja gustoća svježeg betona [kg/m <sup>3</sup> ]	Teoretska gustoća svježeg betona [kg/m <sup>3</sup> ]	Sadržaj šupljina u svježem betonu [%]
1	14,28	2040,00	2497,14	18,31
2	13,35	1907,14	2495,88	23,59
3	14,29	2041,43	2493,62	18,13
4	13,38	1911,43	2489,18	23,21

### 7.2.3. Ispitivanje konzistencije svježeg procjedinog betona metodom slijeganja

Kod postupka ispitivanja konzistencije betona metodom slijeganja najprije je unutrašnjost kalupa i podloga navlažena mokrom krpom, te se kalup postavio na horizontalnu podlogu širim krajem prema dolje. Kalup se punio u 3 sloja koja su se zbijajala s 25 udaraca šipkom za zbijanje. (Slika 22) Udarci su bili ravnomjerno raspoređeni.



Slika 22: Kalup za ispitivanje konzistencije slijeganjem (izvor: vlastita fotografija)

Nakon zbijanja posljednjeg sloja odstranjen je višak betona sa podloge. Kalup se zatim pažljivo uklonio, proces traje od 2 do 5 sekundi. Odmah nakon uklanjanja kalupa zabilježio se dobiveni rezultat. (Slika 23) Odredila se razlika između visine najviše točke slegnutog ispitnog uzorka i kalupa. Vrijednost je zaokružena na bližih 10 mm.



Slika 23: Postupak ispitivanja konzistencije procjedinog betona metodom slijeganja (izvor: vlastita fotografija)

Ispitivanje je pokazalo da nije došlo do slijeganja zbog velikog udjela krupnog agregata. Beton je ostao kohezivan i plastičan. Uzorak se nije pomaknuo.

#### ***7.2.4. Ispitivanje konzistencije procjednog betona metodom kuglice***

Kod ispitivanja konzistencije betona metodom kuglice odvojena je manja količina mješavine koja je zatim oblikovana u kuglicu. Kuglica se promatra u raširenom dlanu. Ako ona zadržava svoj oblik i ne dolazi do dovajanja zrna, može se zaključiti da mješavina ima zadovoljavajuću konzistenciju. Na slici 18 prikazano je kako formirana kuglica zadržava svoj oblik što znači da beton ima zadovoljavajuću konzistenciju. (Slika 24)



Slika 24: Formirana kuglica (izvor: vlastita fotografija)

### **7.3. Ispitivanja očvrslulog procjednog betona**

Ispitivanja koja su se provodila na očvrslulom betonu su:

1. Ispitivanje vlačne čvrstoće metodom savijanja
2. Ispitivanje vlačne čvrstoće metodom cijepanja

Mješavine procjednog betona ugrađene su u kalupe u kojima stoje 48h. Zatim su njegovane 28 dana. Dobiveni uzorci koristili su se za ispitivanja vlačne čvrstoće procjednog betona.

### 7.3.1. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provedeno je prema normi EN 12390-5 na uzorcima u obliku prizme dimenzija 10 x 10 x 40 cm. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši kapaciteta 300 kN (model 50-C1601/FR). (Slika 25). U ovom ispitivanju prizme su opterećene jednom koncentriranom silom u sredini raspona.



Slika 25: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem (izvor: vlastita fotografija)

Nakon 28 dana uzorci su izvađeni iz vode, obrisani je višak površinske vode, te su očišćeni. Nakon toga prizmama su izmjerene dimenzije i masa. Važno je izmjeriti širinu, duljinu i visinu svake prizme na način da se izmjere dimenzije nasuprotnih strana svakog uzorka, te se odredi srednja vrijednost.

Nakon toga uzorak je postavljen na postolje hidrauličke preše. Prilikom postavljanja uzorka obraćena je pažnja da bude simetrično postavljen na oslonce postolja. Razmak između dva oslonca iznosi 30 cm. Prizmu je postavljena tako da strana prizme koja nije bila u kalupu ne smije biti oslonjena na oslonac. (Slika 26)



Slika 26: Uzorak procjednog betona za ispitivanje vlačne čvrstoće (izvor: vlastita fotografija)

Ispitivanje je provedeno za sve 4 mješavine procjednog betona korištenjem softvera DataManager pod kontrolom sile s konstantnim prirastom od 0,04 MPa/s. Pri ispitivanju se konstantno bilježi vlačna čvrstoća uzorka i sila u vremenu.

Vlačna čvrstoća savijanjem dobivena je prema izrazu (4):

$$f_{ct} = \frac{3Fl}{2xd_1xd_2^2} \quad (4)$$

gdje je:

$f_{ct}$  – vlačna čvrstoća savijanjem [MPa]

$F$  – maksimalna sila sloma uzorka [kN]

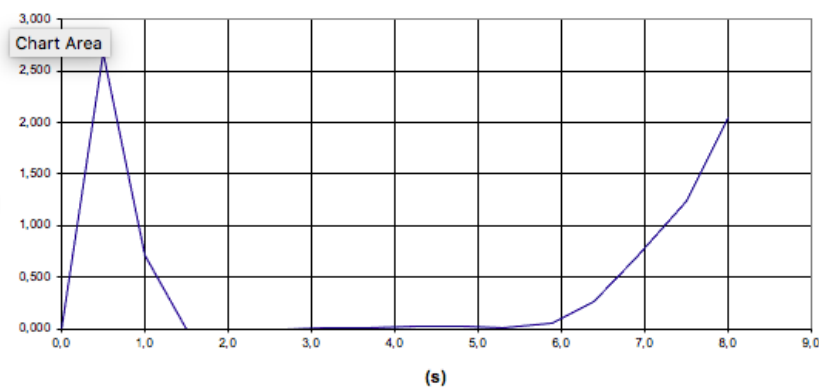
$l$  – razmak oslonca postolja preše [mm]

$d_1$  – širina prizme koja se ispituje [mm]

$d_2$  – visina prizme koja se ispituje [mm]

Na slici 27 prikazan je dobiveni dijagram ispitanog uzorka pod brojem 1.2. mješavine 1. Na osi y nalazi se vrijednost sile u kN, a na osi x nalazi se vrijeme u sekundama. Sa slike je vidljivo da sila loma iznosi 2,95 kN, a vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 1,43 MPa.





Slika 27: Prikaz rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem prikazani su redom u: Tablici 6, Tablici 7, Tablici 8 i Tablici 9.

Tablica 6: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 1

MJEŠAVINA 1							
Broj uzorka	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	max. sila[kN]	Čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost čvrstoće [MPa]
1.1.	99,36	100	401	7,17	4,39	1,99	1,65
1.2.	95,77	99,03	399	7,11	2,95	1,43	
1.3.	96,52	100,46	402	7,37	3,20	1,53	

Tablica 7: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 2

MJEŠAVINA 2							
Broj uzorka	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	max. sila[kN]	Čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost čvrstoće [MPa]
2.1.	99,87	100,09	401	7,21	3,53	1,59	1,27
2.2.	100,12	99,84	399	7,15	2,60	1,17	
2.3.	98,67	101,16	400	7,06	2,32	1,04	

Tablica 8: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 3

MJEŠAVINA 3							
Broj uzorka	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	max. sila[kN]	Čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost čvrstoće [MPa]
3.1.	97,06	100,67	399	7,13	2,77	1,27	1,23
3.2.	100,34	100,03	401	7,23	2,85	1,28	
3.3.	100,17	99,97	398	7,42	2,53	1,14	

Tablica 9: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem za mješavinu 4

MJEŠAVINA 4							
Broj uzorka	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [kg]	max. sila [kN]	Čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost čvrstoće [MPa]
4.1.	100,85	100,51	400	7,48	2,12	0,94	1,19
4.2.	98,85	100,74	399	7,46	3,33	1,49	
4.3.	101,07	100,19	399	7,56	2,73	1,13	

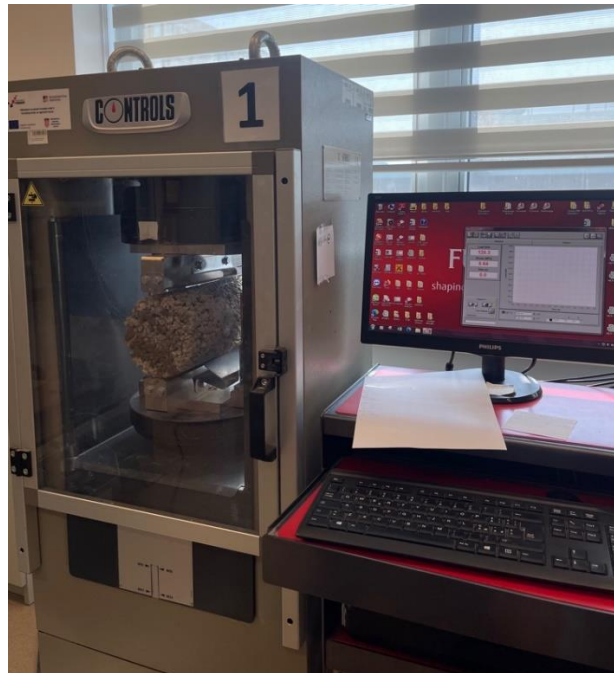
U tablici 10 prikazane su srednje vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem za sve 4 mješavine. Iz tablice je vidljivo da minimalna vrijednost iznosi 1,19MPa, a maksimalna 1,65MPa.

Tablica 10: Srednje vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem

VLAČNA ČVRSTOĆA SAVIJANJEM	
Oznaka mješavine	Srednja vrijednost vlačne čvrstoće savijanjem [MPa]
1	1,65
2	1,27
3	1,23
4	1,19

### 7.3.2. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

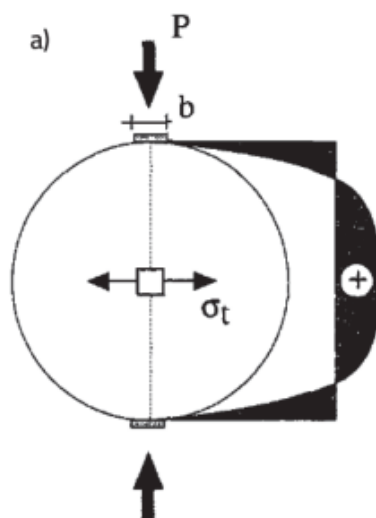
Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provedeno je prema normi EN 12390-6 na uzorcima u obliku valjka dimenzija 150 x 30 cm. Ispitivanje je napravljeno na hidrauličkoj preši kapaciteta 300 kN (model 50-C1601/FR). (Slika 28)



Slika 28: Uređaj za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem (izvor: vlastita fotografija)

Nakon njegovanja uzoraka u trajanju od 28 dana, određene su im dimenzije i masa. Prije samog ispitivanja obrisan je višak vode i nečistoće svakog uzorka.

Kod ispitivanja vlačne čvrstoće metodom cijepanja ostvaruje se pritisak cilindra duž njegove izvodnice. Raspodjela naprezanja prikazana je na slici 29. Uslijed Poissonovog djelovanja dolazi do pojave vlačnih naprezanja u smjeru okomitom na djelovanje sile. Pošto je vlačna čvrstoća u odnosu sa tlačnom čvrstoćom manja, do loma dolazi pojavom vlačne pukotine. [11]



Slika 29: Shema raspodjele naprezanja [11]

Ispitivanje je provedeno za mješavinu 3 i mješavinu 4 procjedinog betona korištenjem softvera DataManager pod kontrolom sile s kontantnim prirastom od 0,06 MPa/s. Pri ispitivanju se konstantno bilježi vlačna čvrstoća uzorka i sila u vremenu.

Vlačna čvrstoća cijepanjem dobivena je prema izrazu (5):

$$f_{cq} = 0.3 \times F \left(1 - \frac{d_0}{d_1}\right) \quad (5)$$

gdje je:

$f_{cq}$  – vlačna čvrstoća cijepanjem [MPa]

F – maksimalna sila sloma uzorka [kN]

$d_0$  – širina valjka koja se ispituje [mm]

$d_1$  – visina valjka koja se ispituje [mm]

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su u Tablici 11 i Tablici 12.

Tablica 11: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavinu 3

VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM					
Oznaka mješavine	L [mm]	d [mm]	m [kg]	Max. sila [kN]	Čvrstoća [MPa]
3	297	152	9,12	57,6	1,28

Tablica 12: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavinu 4

VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM					
Oznaka mješavine	L [mm]	d [mm]	m [kg]	Max. sila [kN]	Čvrstoća [MPa]
4	295	150	8,63	59,4	1,35

U tablici 13 prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavine 3 i 4. Iz tablice je vidljivo da minimalna vrijednost iznosi 1,28MPa, a maksimalna 1,35MPa.

*Tablica 13: Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanjem*

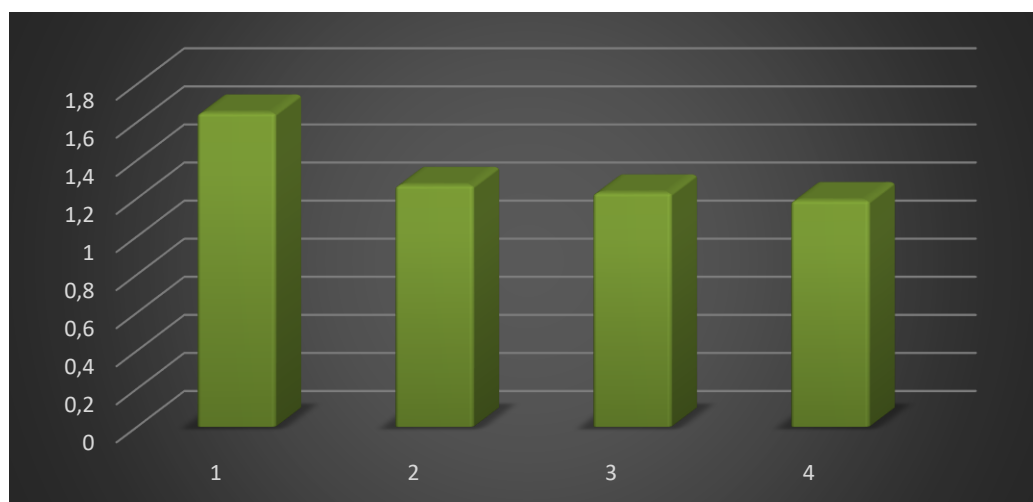
<b>VLAČNA ČVRSTOĆA CIJEPANJEM</b>	
<b>Oznaka mješavine</b>	<b>Srednja vrijednost vlačne čvrstoće cijepanjem [MPa]</b>
3	1,28
4	1,35

## 8. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Nakon provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata, napravljena je analiza rezultata ispitivanja.

Na slici 30 prikazana je usporedba rezultata srednje vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem po mješavinama.

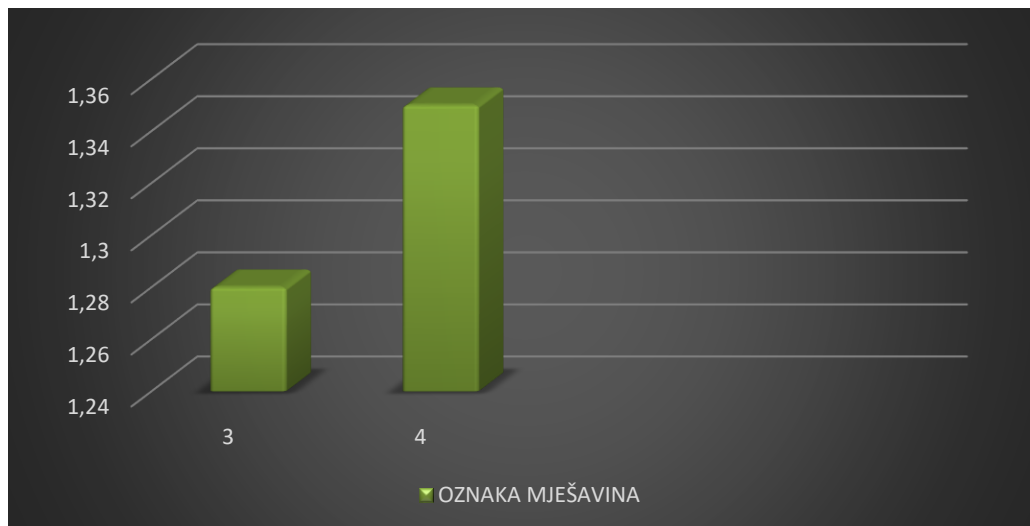
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da se kod mješavina 1 i 2 dodavanjem monofilamentnih vlakana vlačna čvrstoća na savijanje smanjila za 23.03%, a kod mješavina 3 i 4 dodavanjem monofilamentnih vlakana vlačna čvrstoća na savijanje smanjila se za 3.25%



Slika 30: Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće savijanjem

Na slici 31 prikazana je usporedba rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem za mješavinu 3 i mješavinu 4.

Na slici je vidljivo da mješavina 4 koja sadrži monofilamentna vlakna ima veću vlačnu čvrstoću na cijepanje u odnosu na mješavinu 3 koja u sebi ne sadrži monofilamentna vlakna. Također je zaključeno da mješavina sa većim postotkom pora ima veću vlačnu čvrstoću. Trebalo bi napraviti ispitivanje na više uzoraka kako bi se dobilo više podataka o vlačnoj čvrstoći procjednog betona na cijepanje, te kako bi se mogao donijeti točniji zaključak.



Slika 31: Usporedba rezultata vlačne čvrstoće cijepanjem

## 9. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada bio je napraviti pregled stanja područja te ispitati i analizirati vlačnu čvrstoću mješavina procjednog betona od kojih su mješavine 1 i 2 odnosno 3 i 4 bile jednake recapture s ili bez polimernih vlakana.

Procjedni beton koristi se već nekoliko stotina godina, no njegova je primjena ograničena zbog premale tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje. Nažalost još uvijek ne postoji pravilnik za projektiranje ovakve vrste betona. Zadnjih pedesetak godina ušao je u razdoblje intenzivnijih ispitivanja kako bi se pronašao optimalan sastav koji će istovremeno imati dovoljno veliku poroznost i zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću. Kako bi se ovakva vrsta betona mogla koristiti sve češće potrebno je dobro poznavati strukturu i svojstva procjednog betona.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena su ispitivanja na svježem i očvrslom procjednom betonu. Od ispitivanja svježeg procjednog betona radeno je ispitivanje gustoće, poroznosti i konzistencije. Na očvrslim uzorcima procjednog betona ispitana je vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem.

Zaključeno je sljedeće:

- procjedni beton nije pogodan za visoko opterećene prometnice, te se za sada koristi kod izgradnje prilaza, nogostupa i parkirališta gdje čvrstoća nije primarna
- potiče se primjena procjednog betona zbog toga što je ekonomski i ekološki prihvatljiva alternativa
- dodavanjem monofilamentnih vlakana u mješavine vlačna čvrstoća na savijanje se smanjuje i to značajnije kod mješavina sa superplastifikatorom.
- trebalo bi ispitati uzorke na savijanje s kontrolom pomaka da se vidi kakav je utjecaj dodatka vlakana na žilavost procjednog betona
- u budućnosti bi trebalo poraditi na razvijanju procjednog betona, nove tehnologije i materijala



## LITERATURA

- [1] Ladan, Tomislav: *Beton*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7337>, pristup 17.04.2022.
- [2] Bračun, Nenad: *Što je beton?*, <https://apolonia-beton.hr/sto-je-beton/>, pristup 17.04.2022.
- [3] Mahalingam, Rama i Vaithiyalingam Mahalingam, Shanthi: *Analiza svojstava procjednog betona*, <https://hrcak.srce.hr/file/238523>, pristup 17.04.2022.
- [4] Mahajan, Bhushan: *Pervious concrete*, <https://civiconcepts.com/blog/pervious-concrete>, pristup 17.04.2022.
- [5] Prolić, Marina: *Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva poroznih betona*, <https://repositorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A708/datastream/PDF/view>, pristup 17.04.2022.
- [6] Vuljanić, Dario: *Analiza svojstava procjednog betona s polimernim vlaknima*, [https://docs.google.com/document/d/0B3JmhfYIWO1zVkNBRXpLWmdMSk5IREZUYnN\\_QMHZoU3NwUVU0/edit?resourcekey=0-VVd39yZXmse5vOojWtrIPA#heading=h.23ckvvd](https://docs.google.com/document/d/0B3JmhfYIWO1zVkNBRXpLWmdMSk5IREZUYnN_QMHZoU3NwUVU0/edit?resourcekey=0-VVd39yZXmse5vOojWtrIPA#heading=h.23ckvvd), pristup 17.04.2022.
- [7] T. Kavern, John: *Pervious concrete adjacent to conventional concrete during a storm*, [https://www.researchgate.net/figure/Pervious-Concrete-Darker-Adjacent-to-Conventional-Concrete-Lighter-During-a-Storm\\_fig3\\_269233170](https://www.researchgate.net/figure/Pervious-Concrete-Darker-Adjacent-to-Conventional-Concrete-Lighter-During-a-Storm_fig3_269233170), pristup 17.04.2022.
- [8]. Vrga, Goran: *Automiješalica IVECO STRALIS X-WAY AD340X42Z*, <https://www.mineral.com.hr/1957/Automijesalica-IVECO-STRALIS-X-WAY-AD340X42Z>, pristup 18.04.2022.
- [9] Crnojevac, Josip: *Agregat*, <https://docplayer.gr/98616293-Agregat-asistent-josip-crnojevac-mag-ing-aedif-sveuciliste-josipa-jurja-strossmayera-u-osijeku.html>, 18.04.2022.
- [10] Singh Seeni, Bright i Madasamy, Murugan: *Factors influencing performance of pervious concrete*, <https://hrcak.srce.hr/file/385774>, pristup 19.04.2022.
- [11] Tvrtko Renić, prof.dr.sc. Tomislav Kišiček: *Izravni postupak ispitivanja vlačne čvrstoće betona*, <http://master.grad.hr/phd-simpozij/2018/proceedings/09.pdf>, pristup 29.08.2022.
- [12] Dr.sc. Silvija Mrakovčić, mag.ing.aedif, Nina Čeh, mag.ing.aedif., Vedrana Jugovac, mag.ing.aedif.: *Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjednog betona*, <https://hrcak.srce.hr/file/173011>, pristup 29.08.2022.