

# Analiza parametara betona s recikliranim asfaltnim agregatom

---

Gorek, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:157:316429>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



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**

**Dario Gorek**

**ANALIZA PARAMETARA BETONA S RECIKLIRANIM ASFALTNIM  
AGREGATOM**

**Završni rad**

**Rijeka, 2021. g**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Preddiplomski stručni studij Građevinarstvo  
Visokogradnje  
Građevinski materijali**

**Dario Gorek  
JMBAG: 0016107041**

**ANALIZA PARAMETARA BETONA S RECIKLIRANIM ASFALTNIM  
AGREGATOM**

**Završni rad**

**Rijeka, srpanj 2021. godine**

***Ovdje ubaciti zadatak ! GFRI***

## ***IZJAVA***

Završni rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i komentoricom 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.

---

Dario Gorek

U Rijeci, 29. lipnja 2021.

***Ovdje ubaciti izjavu za znanstveni projekt!***

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svim djelatnicima Građevinskog fakulteta u Rijeci na proteklih 3 godine studiranja, a posebno doc. dr. sc. Silviji Mrakovčić i doc. dr. sc. Neiri Torić Malić za pomoć u izradi završnog rada. Nipošto ovdje ne mogu izostaviti laborante Građevinskog fakulteta, Dinu Juriševića i Dominika Štroka, koji su svojim doprinosom uvelike pomogli da se ovaj rad izradi prema svim normama i propisima, a za to im veliko hvala.

Zahvala na velikim količinama doniranog materijala za izradu eksperimentalnog dijela ide g. Dejanu Dekoviću iz tvrtke Istarske ceste d.o.o. Pula i g. Arsenu Maškarinu iz tvrtke Strabag d.o.o. Zagreb.

Najveća zahvala od svih ide mojoj obitelji i djevojci. Hvala vam na svemu kroz ove godine studiranja, hvala za svu podršku i osjećaje. Hvala za sreću, radost, smijeh, bodrenje i svaku suzu radosnicu koju je ovo razdoblje iznjedrilo. Hvala.

*Budimo promjena koju želimo vidjeti u svijetu.*

Dario.

## SAŽETAK

U ovom radu analizirana su svojstva svježeg i očvrsnulog betona s udjelom od 70% recikliranog asfalta. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa svojstvima referentnog betona izrađenog od prirodnog drobljenog agregata i sa svojstvima betona izrađenog s agregatom od recikliranog betona. Na uzorcima svježeg betona određena je konzistencija betona rasprostiranjem, udio pora i gustoća betona. Na uzorcima očvrsnulog betona određena je gustoća betona, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem i cijepanjem, te vodopropusnost i koeficijent toplinske provodljivosti.

Na temelju analize dobivenih rezultata možemo odrediti optimalni postotak zamjene prirodnog drobljenog agregata recikliranim asfaltom uz zadržavanje zadovoljavajućih svojstava svježeg ili očvrsnulog betona.

Ključne riječi: beton, asfalt, reciklirani agregat, reciklirani beton, reciklirani asfalt, ispitivanje rasprostiranjem, tlačna čvrstoća betona, vlačna čvrstoća betona savijanjem, vlačna čvrstoća betona cijepanjem



## **ABSTRACT**

In this paper, properties of fresh and hardened concrete with 70% replacement with recycled asphalt aggregate are analyzed. Obtained results were compared with the properties of reference concrete made from natural crushed stone and with the properties of concrete made from recycled concrete aggregate. Flow table test, air content and density were determined on fresh concrete samples. Density, compressive strength, flexural and tensile splitting strength were determined on the samples of hardened concrete, as well as water permeability and thermal conductivity were determined too on this samples.

Based on the analysis of given results, we can determine optimal percentage of replacement of natural crushed stone with recycled asphalt aggregate, while maintaining fresh or hardened concrete properties.

Keywords: concrete, asphalt, recycled aggregate, recycled concrete, recycled asphalt, flow test, concrete compressive strength, concrete flexure strength, concrete tensile splitting strength

# SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O BETONU	3
2.1. Sastav betona	3
2.1.1. Agregat	4
2.1.2. Cement	6
2.1.3. Voda	8
2.1.4. Aditivi	9
2.2. Projekt betona	10
2.3. Svojstva svježeg betona	11
2.3.1. Ispitivanje svojstava svježeg betona	12
2.4. Svojstva očvrslulog betona	15
2.4.1. Ispitivanje svojstava očvrslulog betona	17
3. OPĆENITO O ASFALTU	21
3.1. Proizvodnja i ugradnja	21
3.2. Glodanje asfalta – završetak životnog ciklusa	24
4. AGREGAT OD RECIKLIRANOG ASFALTA	26
4.1. Proizvodnja	26
4.2. Svojstva agregata od recikliranog asfalta	28
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	30
5.1. Uvod u eksperimentalni dio	30
5.2. Svojstva sastojaka betona	31
5.3. Projektiranje betona	36
5.3.1. Projektirani sastavi betonskih mješavina	39
5.4. Svojstva svježeg betona	41
5.5. Svojstva očvrslulog betona	44

6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	54
7. ZAKLJUČAK	58
LITERATURA	59

## **Popis slika:**

Slika 1: Volumni udio sastojaka u betonu [10]

Slika 2: EMPA i Fuller krivulje

Slika 3: Aditivi za beton

Slika 4: Kalup za izvođenje ispitivanja slijeganjem

Slika 5: Prikaz izvođenja Flow testa

Slika 6: Prikaz baždara porometra

Slika 7: Kalupi za izradu uzoraka

Slika 8: Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Slika 9: Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem [21]

Slika 10: Ciklička asfaltna baza tvrtke Strabag d.o.o. [18]

Slika 11: Ugradnja asfalta finišerom

Slika 12: Glodalica za asfalt u radu

Slika 13: Mobilna drobilica za asfalt [19]

Slika 14: Razlika neobrađenog i obrađenog materijala

Slika 15: Volumni udio sastojaka betona po mješavinama

Slika 16: Izjava o svojstvima za prirodni agregat

Slika 17: Dijeljenje agregata na četvrtine

Slika 18: Granulometrijska krivulja recikliranog agregata

Slika 19: Planetarna miješalica u laboratoriju za materijale

Slika 20: Ispitivanje konzistencije svježeg betona rasprostiranjem

Slika 21: Obilježavanje prodora vode u uzorak

Slika 22: Postav opreme za ispitivanje toplinske provodljivosti

Slika 23: Priprema uzorka i položaj postavljenih senzora

Slika 24: Graf rezultata ispitivanja toplinske provodljivosti

Slika 25: Graf koeficijenta toplinske provodljivosti "k" i toplinske provodljivosti "U"

Slika 26: Prikaz rezultata ispitivanja na tlak

Slika 27: Prikaz rezultata ispitivanja na vlak savijanjem

## **Popis tablica:**

*Tablica 1: Podjela cementa prema HRN EN 197-1 [10]*

*Tablica 2: Ispitivanje fizikalnih parametara recikliranog agregata*

*Tablica 3: Rezultati ispitivanja konzistencije svježeg betona*

*Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona*

*Tablica 5: Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti*

## 1. UVOD

Važnost teme gospodarenja otpadom povećava se iz godine u godinu, pa tako i naglasak na sustavno gospodarenje otpadom, njegovu reciklažu i ponovnu uporabu. Građevinski otpad u Hrvatskoj svoje mjesto pronalazi na uređenim i neuređenim odlagalištima, te manjim dijelom u postrojenjima za oporabu. Problem te vrste otpada ne zahvaća samo Hrvatsku, već cijelu Europsku Uniju koja je kao jedan od glavnih ciljeva zaštite i očuvanja okoliša postavila rješavanje problema deponiranja i obrade građevinskog otpada. Prema podacima iz 2016. g, stopa oporabe u Hrvatskoj iznosi 39,8%, dok je samo 7% te količine građevinskog otpada reciklirano [1]. Prema podacima iz 2019. godine proizvedena količina recikliranog asfalta iznosila je 210 tisuća tona [6]. Reciklirani asfalt danas se koristi kao: sirovina za proizvodnju novih asfaltnih mješavina na asfaltnim bazama, sirovina za hladni postupak reciklaže na samom gradilištu, materijal za izradu bankina uz prometnice te materijal za razastiranje po makadamskim, najčešće raznim poljoprivrednim i lokalnim putevima. Upotrebom recikliranog asfalta kao agregata za izradu betonskih mješavina doprinosimo očuvanju i zaštiti okoliša kroz smanjenu uporabu prirodnih agregata, dok istovremeno pozitivno djelujemo na smanjenje emisije CO<sub>2</sub> i smanjenje količine deponiranog neiskorištenog materijala. Upotreba recikliranog asfalta kao zamjene za prirodni agregat u izradi betonskih mješavina javlja se kao rješenje problema skladištenja i oporabe ove vrste građevinskog otpada. Iskustva iz prakse govore da većina ovog otpada na području Republike Hrvatske nastaje u tvrtkama koje se bave redovnim održavanjem i zaštitom prometnica, te prilikom redovnog, pojačanog ili izvanrednog održavanja uklanjaju stari asfalt s prometnica. Prometnice u Republici Hrvatskoj su u vlasništvu državnih tvrtki za upravljanje prometnicama: Hrvatskih autocesta, Hrvatskih cesta i Županijskih cesta. Prema podacima Hrvatskih cesta razvrstane prometnice u 2020. godini čine mrežu ukupne duljine 26906,2 km [14]. Uzevši u obzir da je u Hrvatskoj 2020. godine bilo registrirano ukupno oko 2,3 miliona vozila [14], trošenje prometnica je veliko uz prometovanje samo tuzemnog prometa, bez uzimanja u obzir inozemnog prometa koji nastaje zbog turizma, prijevoza roba i slično.

Održavanje prometnica uključuje postavljanje i zamjenu opreme ceste koja u pojedinim stavkama ubraja i izradu betonskih temelja za odbojne ograde, smjerokazne

stupiće, znakove i ostalo. Proizvodnja temelja za navedene elemente obavlja se u pogonima tvrtke za održavanje prometnica, a knjiga općih tehničkih uvjeta Hrvatskih Cesta propisuje minimalnu klasu betona i ostala svojstva koja temelji moraju ispunjavati. Klase betona za temelj, ovisno o vrsti opreme ceste koja će se postaviti, kreću se od C 16/20 do C 30/37 [15]. Uključivanje recikliranog asfalta u izradu temelja, uz prethodna ispitivanja svojstava betona, povećava se udio ponovno uporabljenog građevinskog otpada zajedno sa svim benefitima koje ponovna uporaba donosi, a koji su navedeni ranije.

Uporaba ove vrste recikliranog agregata pri izradi betonskih mješavina nije evidentirana u Hrvatskoj, pa zbog toga predstavlja zanimljivo područje koje je potrebno dodatno istražiti. Korištenje recikliranog asfalta kao agregata pri izradi betonskih mješavina ispitano je u nekoliko dostupnih stranih znanstvenih radova [3, 4, 9, 13]. Dostupnost ovih znanstvenih radova omogućuje definiranje ciljeva i očekivanja ovog rada, te omogućuje uspoređivanje određenih svojstava recikliranog agregata.

Rezultati dostupnih istraživanja, bez iznimke, govore o slabijim svojstvima svježeg i očvrsnulog betona. Prvenstveno je to zbog velikog utjecaja svojstava agregata na svojstva betona, a reciklirani agregat u pravilu ima lošija svojstva zbog prisutnosti drugog materijala na površini zrna. Kod recikliranog asfalta radi se o prekrivenosti zrna bitumenom iz asfaltne mješavine, dok je kod recikliranog betona zrno prekriveno cementnim kamenom.

## 2. OPĆENITO O BETONU

### 2.1. Sastav betona

Beton je kompozitni materijal sastavljen od agregata, cementa i vode. Agregat čini približno tri četvrtine volumena mase betona, a sastoji se od pijeska i krupnog kamenog agregata. Obični beton u  $m^3$  sadrži od 1500 do 1800 kg agregata koji ima volumni udio od 65% do 75%. Prilikom izrade betona najčešće se koristi agregat riječnog ili stijenskog drobljenog podrijetla, veličine zrna do 32 mm. Uobičajene količine cementa za  $m^3$  betona kreću se od 200 do 400 kg, što odgovara volumnom udjelu od 8% do 16%. Cement pomiješan s vodom tvori cementnu pastu koja odmah nakon miješanja procesom hidratacije očvršćava i prelazi u cementni kamen. Cementni kamen kao temeljni materijal betona omogućuje sljepljivanje zrna agregata i davanje određene čvrstoće betonu, zauzima otprilike četvrtinu prostora. Također, cementni kamen ispunjava prostor među česticama agregata i s njima tvori nepropusnu masu. Voda koja se koristi za izradu betona mora biti dobre kvalitete, a u  $m^3$  njen volumni udio iznosi 17% do 20%, odnosno 160 do 200 litara.

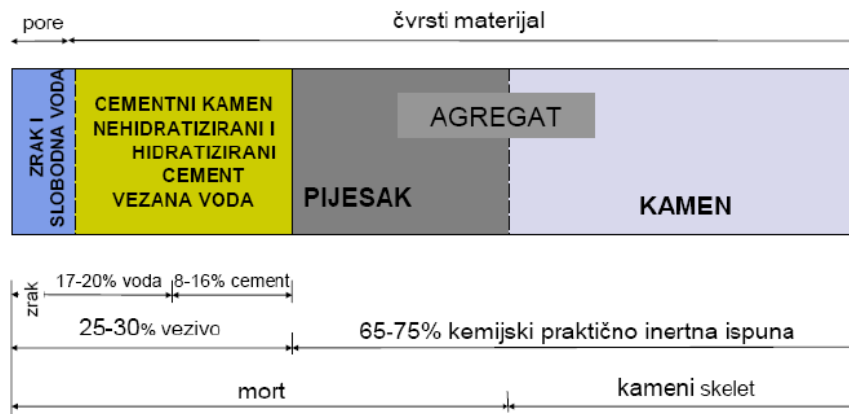
Nakon ugradnje betona, čak i uz poštivanje svih pravila struke, u cementnom kamenu ostaje određena količina zahvaćenog zraka koji se nalazi u porama. Pore su nepoželjne šupljine u betonu, a njihov postotak u dobro sastavljenom svježem betonu ne prelazi 2% do 5% volumena [5].

Osim navedenih sastojaka danas se često upotrebljavaju razni aditivi koji ciljano utječu na određena svojstva svježeg ili očvrsnulog betona. Aditivi se doziraju u ovisnosti o masi cementa, a njihov volumni udio je zanemariv. Iako volumno zanemarivi, aditivi imaju velik utjecaj na obradivost svježeg betona, produljenje i skraćenje vremena vezanja, poboljšanje trajnosti očvrsnulog betona, itd. Shematski prikaz volumnih udjela navedenih sastojaka u betonu prikazan je na slici 1.



Sastav betona projektira se na način da se postignu :

- zadovoljavajuća svojstva svježeg betona prilikom miješanja, transporta i ugrađivanja na gradilištu,
- zadovoljavajuća svojstva očvrstnalog betona s obzirom na čvrstoću i druge mehaničke karakteristike,
- što manji troškovi za istu kakvoću betona.



Slika 1: Volumni udio sastojaka u betonu [10]

### 2.1.1. Agregat

Agregat je smjesa kamenih zrna raznih veličina. Agregate s obzirom na njihovo podrijetlo dijelimo na prirodne i umjetne. Prirodni agregati proizvode se ili prerađuju na dva osnovna načina: kopanjem i prosijavanjem šljunkovitih nanosa rijeka, mora i jezera, te miniranjem, drobljenjem i separiranjem stijenskog materijala. Umjetni agregati nastaju kao otpad u industrijskoj proizvodnji (leteći pepeo, zgura) ili su specijalno proizvedeni za uporabu u betonu (ekspandirana glina). Praksa pokazuje da se u posljednje vrijeme pojavljuje i uporaba umjetnih agregata u obliku recikliranog građevinskog otpada, što je najviše izraženo u cestogradnji kroz uporabu recikliranog asfalta u izradi novih asfaltnih mješavina.

Agregat u betonu ima tri osnovne zadaće:

- zrna agregata čine skelet koji daje krutost betonu
- daje dimenzionalnu stabilnost betonu, tj. umanjuje dugotrajne volumne promjene koje su svojstvene cementnom kamenu (skupljanje i puzanje)
- jeftin je materijal, pa time osigurava ekonomičnost betonskih konstrukcija.

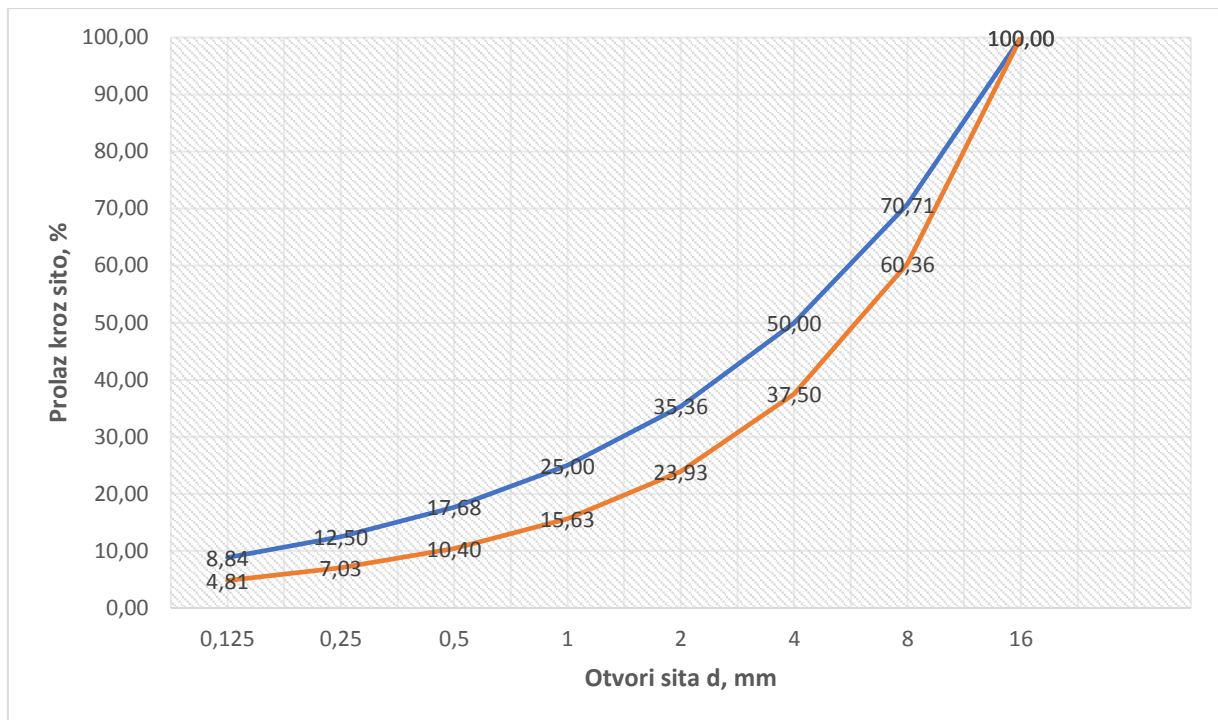
Udio zrna agregata po veličini i količini, odnosno udio u cjelokupnoj masi nazivamo granulometrijskim sastavom agregata. Idealni granulometrijski sastav agregata ne postoji, već se izvodi optimalna mješavina agregata koja postiže određena svojstva u betonskim mješavinama. Prvenstveno se pod tim svojstvima misli na raspored koji daje minimum šupljina u betonu, tj. količinu zahvaćenog zraka i obradivost svježeg betona.

Ugradivost i obradivost betona, a samim time i svojstva očvrsnulog betona, višestruko se poboljšavaju kombiniranjem nekoliko frakcija agregata. Ovim načinom dolazi do značajnog smanjenja trenja u masi i omogućuje se ispunjavanje međuprostora između krupnijih zrna agregata sitnijim zrnima [10]. Granica između pijeska i krupnog zrna u agregatu je veličina zrna 4 mm. Tako da je za frakciju 0/4 mm utvrđeno da pripada sitnim zrnima, pijesku, dok se zrna koja ostaju na sitima krupnijim od 4 mm ubrajaju u krupna zrna. Krupna zrna agregata čine kostur betona i preko njih se, zbog njihove veće krutosti od cementnog kamena, prenose sile u betonu. Eksperimentalno je empirijskim metodama dokazano da su omjeri između frakcija zadovoljavajući ako se njihova granulometrijska krivulja nalazi u omeđenom prostoru EMPA (Švicarski institut za materijale) krivuljom i Fullerovom krivuljom. Vrijednosti na ordinati dobiju se izračunom prema izrazu (1) za EMPA krivulju i (2) za Fuller krivulju:

$$A = 50 \left( \frac{d}{d_m} + \sqrt{\frac{d}{d_m}} \right) (\%) \quad (1)$$

$$B = 100 * \sqrt{\frac{d}{d_m}} (\%) \quad (2)$$

gdje oznake "A" i "B" u formulama određuju ordinate granulometrijske krivulje, "d" označava otvor sita izražen u milimetrima, a "d<sub>m</sub>" označava nazivno najkrupnije zrno agregata. Područje između krivulja EMPA i Fuller, prikazano na slici 2, smatra se najpovoljnijim za uobičajene količine cementa u betonu (280 do 360 kg) [7].



Slika 2: EMPA i Fuller krivulje

Svojstva određenih vrsta agregata koja bitno utječu na svojstva betona, a ovise prvenstveno o podrijetlu samog agregata su sljedeća:

- mineraloško petrografski sastav koji utječe na mehaničke karakteristike i trajnost očvrnulog betona
- granulometrijski sastav koji utječe na obradivost svježeg betona, te gustoću i ekonomičnost betona
- oblik i tekstura zrna koji utječu na obradivost svježeg betona te prionljivost cementnog kamena i agregata u očvrnulom betonu.

### 2.1.2. Cement

Cement je hidrauličko vezivo, fino mljeveni anorganski materijal koji pomiješan s vodom daje cementno vezivo koje procesom hidratacije otvrdnjava i veže. Hidratacijom cement postepeno razvija kohezijska i adhezijska svojstva koja povezuju zrna agregata u čvrstu masu betona, čiji je volumen nakon otvrdnjavanja postojan i pod

vodom (prema HRN EN 197-1). Hidraulični cementi dijele se na: portland cement i posebne cemente (pucolanske, ekspanzivne, cemente sa zgurom, itd.).

Portland cement proizvodi se mljevenjem klinkera koji se sastoji od hidrauličkih kalcijevih silikata i male količine jednog ili više kalcijevih sulfata uz do 5% vapnenca (prema ASTM C 150-94). S obzirom na sastav i tehnologiju proizvodnje razlikujemo: cemente s udjelom dodataka  $\leq 30\%$  (portlandski i miješani portlandski cement) i cemente s udjelom dodataka  $> 30\%$  (metalurški, pucolanski i miješani cement).

Tablicom 1 naznačena je podjela cementa i njegove oznake prema HRN EN 197-1. Prikazane oznake cementa pronalazimo na tehničkim listovima materijala, kao i trgovinskim pakiranjima.

*Tablica 1: Podjela cementa prema HRN EN 197-1 [10]*

Glavne vrste	Naziv	Oznaka
CEM I	Portland cement	CEM I
CEM II	Portland cement s dodatkom zguze	CEM II/A-S
		CEM II/B-S
CEM II	Portland cement s dodatkom pucolana	CEM II/A-P
		CEM II/B-P
		CEM II/A-Q
		CEM II/B-Q
CEM II	Portland cement s dodatkom SiO <sub>2</sub> prašine	CEM II/A-D
CEM II	Portland cement s dodatkom letećeg pepela	CEM II/A-V
		CEM II/B-V
		CEM II/A-W
		CEM II/B-W
CEM II	Portland cement s dodatkom pečenog škriljevca	CEM II/A-T
		CEM II/B-T

<b>CEM II</b>	Portland cement s dodatkom vapnenca	CEM II/A-L
		CEM II/B-L
		CEM II/A-LL
		CEM II/B-LL
<b>CEM II</b>	Portland miješani cement	CEM II/A-M
		CEM II/B-M
<b>CEM III</b>	Metalurški cement s 35-65 % zgure	CEM III/A
	Metalurški cement s 66-80 % zgure	CEM III/B
	Metalurški cement s 81-95 % zgure	CEM III/C
<b>CEM IV</b>	Pucolanski cement s 11-35 % pucolana	CEM IV/A
	Pucolanski cement s 36-55 % pucolana	CEM IV/B
<b>CEM V</b>	Miješani cement s 16-30 % zgure i 18-30 % pucolana	CEM V/A
	Miješani cement s 31-50 % zgure i 31-51 % pucolana	CEM V/B

### **2.1.3. Voda**

Voda omogućuje hidrataciju cementa i regulira obradivost svježeg betona, odnosno regulira njegovu viskoznost. Voda koju koristimo za piće najčešće je dobra i za spravljanje betona, no ako koristimo vodu s neispitanih izvora zahtjeva se njena kemijska analiza i svjedodžba o kvaliteti. Kvaliteta vode je bitna u cijelom životnom ciklusu betona, od njegovog spravljanja do njegovanja i eksploatacije.

Štetne tvari koje se najčešće pojavljuju u vodi i štetne su za pripravu betona su: sulfati, spojevi klora, anorganske i organske soli te organske tvari [7]. Estetski gledano potrebno je paziti da voda ne sadržava željezne okside ili organske nečistoće koje negativno utječu na izgled betona. Navedene tvari štetno utječu na vrijeme vezanja, razaranje i postojanost betona te smanjenje njegove čvrstoće. Tako se u očvrslom betonu, koji je pripremljen s vodom koja sadrži sulfate, pojavljuje reakcija s aluminatima i stvaranje etringita. Etringit je kao pojava pozitivan u svježem betonu

gdje ima pozitivno djelovanje prema hidrataciji, no u očvrslom betonu njegova pojava je štetna. Ovi spojevi na sebe vežu velike količine vode i imaju veći volumen od spojeva koji su ušli u reakciju, pa zbog toga dolazi do razaranja cementnog kamena. Spojevi klora koje nalazimo u morskoj vodi produljuju vrijeme vezanja betona, čine beton higroskopskim i utječu na koroziju armature. Kako morska voda ne utječe bitno na čvrstoću betona, može se uporabiti za spravljanje ne armiranog betona za nekonstruktivne dijelove [7].

Količina vode u pripravi svježeg betona ovisi o vodocementnom faktoru, odnosno omjeru mase vode i cementa ( $v/c$  faktor). Povećanje količine pora u očvrslom betonu nastaje pri povećanju količine vode preko one koja nije potrebna za hidrataciju cementa. Povećana količina pora posljedično utječe na smanjenje čvrstoće i trajnosti betona. Poboljšanje obradivosti svježeg betona bez dodavanja velikih količina vode postiže se kemijskim aditivima, plastifikatorima ili superplastifikatorima.

#### **2.1.4. Aditivi**

Aditivi su tvari koje se dodaju u svježu mješavinu betona tijekom miješanja ili transporta. Oni modificiraju svojstva svježeg ili očvrslulog betona, morta ili cemente paste [5]. Njihov utjecaj na svojstva betona ne ovisi isključivo o njima, već ovisi i o svojstvima agregata i cementa te međusobnom odnosu svih komponenti u sastavu betona. Aditivi se primjenjuju ako se dokaže njegova tehnička i ekonomska opravdanost. Važno je spomenuti kako aditivi mogu znatno poboljšati svojstva za koja su predviđeni, no ne mogu ispraviti pogreške u projektiranju sastava betona i tehnološkom procesu pripreme, te pogreške pri transportu i ugradnji betona.



Slika 3: Aditivi za beton

## 2.2. Projekt betona

Projektiranje sastava betona je postupak utvrđivanja relativnog udjela sastojaka betona potrebnih za spravljanje jediničnog volumena ugrađenog (zbitjenog) betona, zadanih svojstava u svježem i očvrslulom stanju [7]. Početni uvjet pri projektiranju betona je da svježi beton mora imati takvu obradivost da se može uz dostupna transportna sredstva, kao i sredstva za zbijanje, kvalitetno ugraditi i zbiti do propisane gustoće. Projekt betona sadrži zahtijevana svojstva betona u eksploataciji, prema kojima se određuju uvjeti za izbor, dobavu i rukovanje sastojcima betona. Postupci spravljanja i rukovanja svježim betonom i betonom u fazi očvršćivanja također su kao i načini, kriteriji te učestalost kontrole kvalitete i osiguranja kvalitete, sadržaj projekta betona.

Podatke o raspoloživim materijalima i tehnologijama potrebno je prikupiti prije projektiranja sastava betona zbog njihovog utjecaja na svojstva svježeg i očvrslulog betona. Podaci koji su vezani uz redosljed projektiranja su podaci o komponentama betona, podaci o raspoloživim tehnologijama i podaci iz projekta konstrukcije.

Podaci o komponentama betona:

- cement: prikuplja se od proizvođača (čvrstoća, standardna konzistencija, vrijeme vezanja, naknadno upijanje vode, volumna postojanost, gustoća, vrsta i količina dodataka)
- agregat: prikuplja se od proizvođača uz dio vlastitih ispitivanja (granulometrijski sastav, udio sitnih čestica, volumna masa, apsorpcija vode i vlažnost)
- voda: ispituje se ako ne koristimo vodu za piće (kemijski sastav i svjedodžba o kvaliteti)
- aditivi: prikuplja se od proizvođača uz dio vlastitih ispitivanja (djelovanje pri interakciji s cementom i agregatom).

Podaci o raspoloživim tehnologijama obuhvaćaju: način miješanja, sredstva vanjskog i unutarnjeg transporta, ugradnju, postupke zbijanja i kontrolu kvalitete. Vrsta presjeka, postotak armiranja, tehnologija izvedbe i namjena objekta te njegov okoliš vezani su uz podatke iz projekta konstrukcije.

### **2.3. Svojstva svježeg betona**

Svojstva svježeg betona definiraju se i mjere prema sljedećim pojmovima [5]:

- obradivost,
- konzistencija,
- izdvajanje vode,
- segregacija,
- temperatura betona,
- homogenost betonske mješavine,
- vrijeme vezanja betona,
- udio pora u svježem betonu.

Beton mora zadovoljavati svojstva za svježi beton kako bi na mjestu ugradnje bio dovoljno podatan i gibljiv da popuni sav prostor unutar oplata.



Pojam obradivosti betona, koji obuhvaća svojstva tijekom miješanja, transporta i ugradnje, preko njege do konačnog oblika i gustoće, relativan je zbog činjenice da beton koji je dobro obradiv za jedan konstruktivni element, ne mora zadovoljavati obradivost za drugi. Obradivost betona može se definirati kao količina energije koja je potrebna da se svlada unutarnji otpor između pojedinih čestica u betonu [7]. Konzistencija betona je svojstvo koje u praksi koristimo za izražavanje obradivosti betona, a ona se određuje nekom od empirijskih metoda. Konzistenciju, odnosno tečenje i preoblikovanje uzorka betona definiramo kao mjerenje promjene dimenzije i oblika uzorka pod utjecajem vanjskih sila.

### ***2.3.1. Ispitivanje svojstava svježeg betona***

Normirani postupci empirijskih metoda određivanja konzistencije svježeg betona su:

- ispitivanje slijeganjem – Slump test (HRN EN 12350-2)
- ispitivanje rasprostiranjem – Flow test (HRN EN 12350-4)
- Vebe postupak (HRN EN 12350-3)
- stupanj zbijenosti po Walzu (HRN EN 12350-5)

Parametri konzistencije koji se određuju navedenim metodama ovise o vrsti i obliku aparature.

Ispitivanje slijeganjem – Slump test je postupak koji se najčešće koristi na gradilištima zbog svoje praktičnosti i malih zahtjeva za opremom. Konzistenciju na ovaj način izražavamo veličinom slijeganja krnjeg stošca betona koji se po normiranom postupku ugrađuje u konusni kalup standardnih dimenzija, prikazan na slici 4.



Slika 4: Kalup za izvođenje ispitivanja slijeganjem

Ispitivanje konzistencije svježeg betona rasprostiranjem – Flow test, izvodi se na potresnom stolu. Ovo ispitivanje provodi se na uzorcima svježeg betona koji su izrađeni u eksperimentalnom dijelu ovog rada. Postupak provođenja ovog ispitivanja opisan je u normi za ispitivanje svježeg betona:

- kalup oblika krnjeg stošca puni se betonom u dva sloja i svaki sloj se zbija batom s 10 udaraca,
- nakon zbijanja posljednjeg sloja po potrebi se dopunjava kalup,
- nakon 30 sekundi kalup se podiže vertikalno, a podložna ploča se podiže i spušta 15 puta gdje svaki ciklus traje od 2 do 5 sekundi,
- promjer rasprostiranja betona mjeri se u 2 okomita smjera.

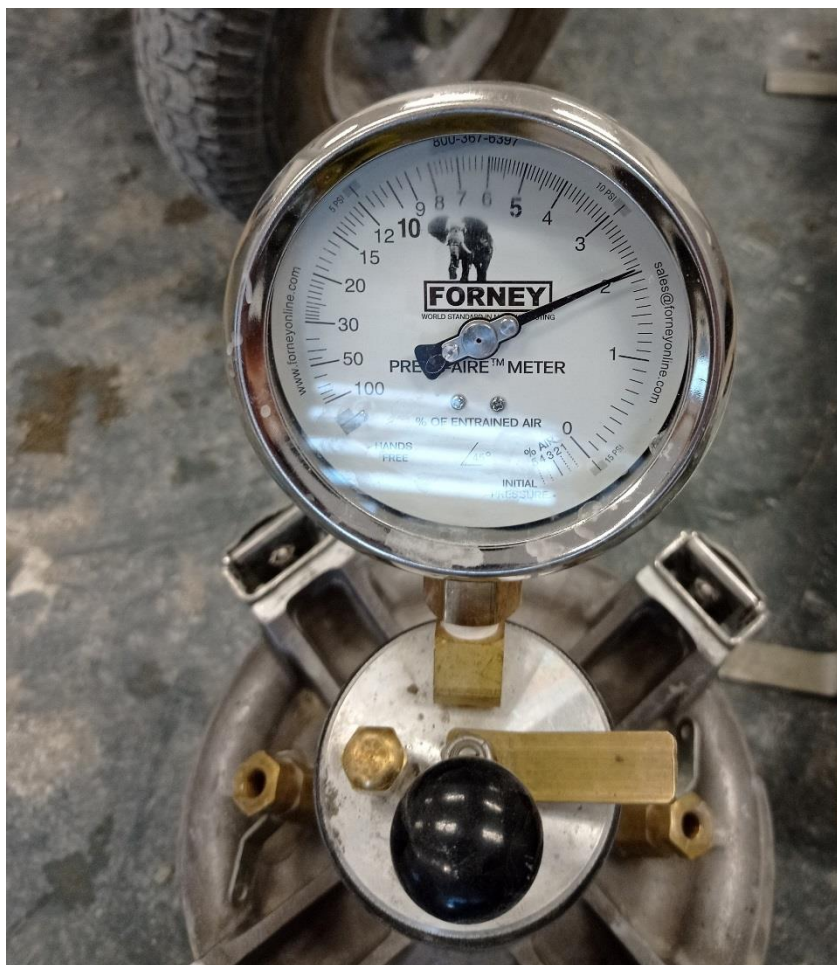
Izvođenje ispitivanja konzistencije svježeg betona rasprostiranjem prikazano je na slici 5.



Slika 5: Prikaz izvođenja Flow testa

Ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu prema normi HRN EN 12350-7 provodi se uporabom porometra koji radi na principu Boyle – Marriottovog zakona. Poznati volumen zraka pri poznatom tlaku graniči s nepoznatim volumenom zraka u uzorku betona u zabrtvljenom spremniku [11]. Spremnik porometra puni se svježim betonom u tri sloja i svaki sloj se nakon punjenja zbija batom kako bi se što više zraka maknulo iz uzorka. Spremnik se nakon potpunog punjenja vibrira, a prije postavljanja poklopca na spremnik kontaktne površine moraju biti čiste kako bi spoj bio nepropustan.

Brojčanik porometra baždaren je kao na slici 6, odnosno rezultirajući tlak se prikazuje kao postotak zraka. Dobiven i očitani rezultat nakon injektiranja vode i upumpavanja zraka je postotak pora u svježem betonu.



Slika 6: Prikaz baždara porometra

## 2.4. Svojstva očvrsnulog betona

Svojstva očvrsnulog betona ovise o svojstvima sastavnih komponenti (agregat, cement, voda i aditivi), njihovom međudjelovanju prilikom miješanja betona te kvantitativnom odnosu udjela. Osim toga, na svojstva očvrsnulog betona utječe i postupak izrade betona kao i uvjeti eksploatacije.

Neka od svojstava očvrsnulog betona koja se ispituju sukladno normama su sljedeća [7]:

- tlačna čvrstoća
- vlačna čvrstoća
- gustoća očvrsnulog betona
- modul elastičnosti

- skupljanje i puzanje
- vodopropusnost
- otpornost na smrzavanje sa ili bez soli za odmrzavanje
- ostala trajnosna svojstva.

Beton prije preuzimanja projektiranog opterećenja mora imati određenu starost, a proces očvršćivanja betona traje određeno vrijeme. Za većinu mehaničkih svojstava očvršnulog betona mjerodavna je 28 – dnevna starost, te se pri toj starosti ispituje. Svojstva očvršnulog betona utvrđuju se i dokazuju ispitivanjem uzoraka koji se pripremaju i njeguju na način propisan normom.

Čvrstoća običnog nearmiranog betona na vlak ili smicanje je otprilike deset puta manja od čvrstoće na tlak [12]. Beton je kvazi kruti materijal kod kojeg pri prekoračenju čvrstoće dolazi do naglog loma bez pojave prethodnih uočljivih deformacija, no unutar uzorka se pri nanošenju maksimalnog naprezanja pojavljuje mnogo mikropukotina. Čvrstoća betona na tlak je njegovo osnovno mjerilo kvalitete, a ona je linearno proporcionalna čvrstoći cementa kod jednakih ostalih sastojaka betona.

Čvrstoća betona na tlak ovisi o sljedećim faktorima:

- vrsti i čvrstoći cementa
- svojstvima agregata (tekstura, tip loma,  $v_a$  )
- vodocementnom ( $v/c$ ) i agregatnocementnom ( $a/c$ ) faktoru
- načinu ugradnje
- vlažnosti uzorka pri ispitivanju
- utjecaju aditiva
- načinu njege i starosti betona
- poroznosti
- prirodnim primjesama u vodi i agregatu.

Zahtjev na tlačnu čvrstoću propisuje se projektom, a oznaka za klasu betona označava se slovom C.

### **2.4.1. Ispitivanje svojstava očvrsnulog betona**

Svojstva očvrsnulog betona dokazujemo ispitivanjem koje može biti razorno ili nerazorno. Razorna ispitivanja se obavljaju u laboratorijima na uzorcima pripremljenim i njegovanim za tu svrhu prema normi ili uzorcima uzorkovanim na dijelu konstrukcije. Nerazorna ispitivanja se većinom provode na konstrukciji zbog zahtjeva da se ne utječe na njenu funkcionalnost i stabilnost.

Nerazorna ispitivanja se provode na uzorcima uzetim prilikom betoniranja konstrukcije ili naknadno uzorkovanim uzorcima iz dijela konstrukcije, a njima se mjeri fizikalni parametar koji je u funkcijskoj zavisnosti s tlačnom čvrstoćom betona. U ove metode ubrajaju se pull-out metoda, ultrazvučna ispitivanja te sklerometriiranje. Do tlačne čvrstoće betona se u ovim metodama dolazi indirektno preko baždarnih krivulja.

Razorna ispitivanja provode se na uzorcima čiji su oblik, izrada ili uzorkovanje normirani. Uzorci uzorkovani prilikom betoniranja ugrađuju se u plastične ili čelične kalupe poznatih dimenzija, koji se prethodno pripremaju kako se beton ne bi lijepio za stjenke kalupa. Kalupi su oblika kocke, valjka ili prizme. Obje metode su normirane i u skladu su s važećim pravilnicima, a rezultati su usporedivi.

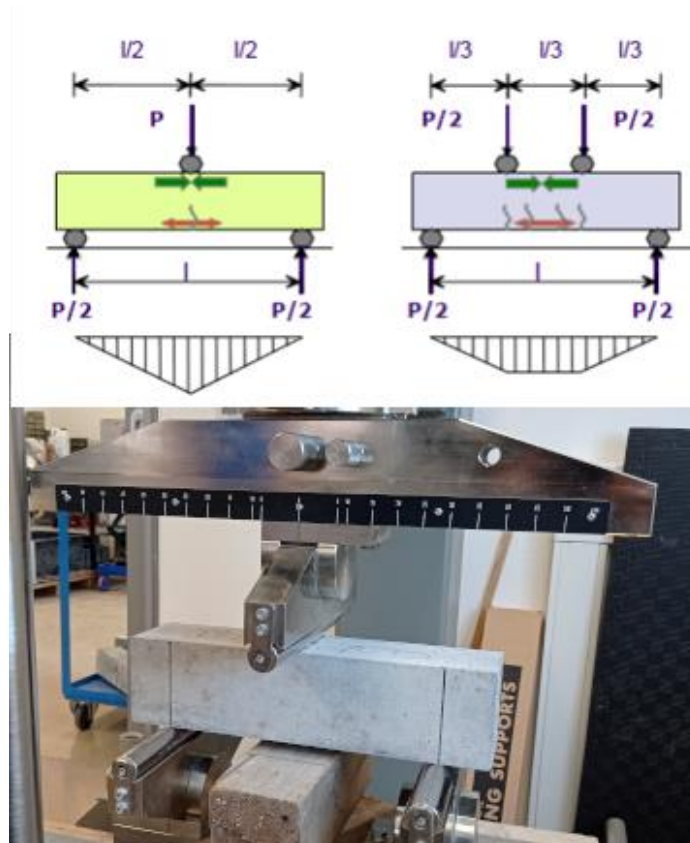
Na slici 7 prikazani su kalupi za izradu ispitnih uzoraka betonske mješavine koji se upotrebljavaju pri ispitivanju tlačne i vlačne čvrstoće betona. Kalupi su dimenzija 150 x 150 x 150 mm za kocku i 100 x 100 x 400 mm za prizmu. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona provodi se prema HRN EN 12390-3, koja propisuje ispitivanje u tlačnim prešama nakon 28 dana sazrijevanja betona. Važno je napomenuti da ispitana tlačna čvrstoća betona mora biti veća ili jednaka minimalnoj karakterističnoj tlačnoj čvrstoći projektiranog betona.



Slika 7: Kalupi za izradu uzoraka

Ispitivanja vlačne čvrstoće betona provode se na nekoliko načina. Indirektna ispitivanja na uzorcima cijepanjem i savijanjem najzastupljeniji su načini ispitivanja zbog svoje praktičnosti, dok se direktno vlačno ispitivanje provodi u manje slučajeva zbog načina pripreme uzorka (složen oblik uzorka i posljedično njegova kompliciranija izvedba).

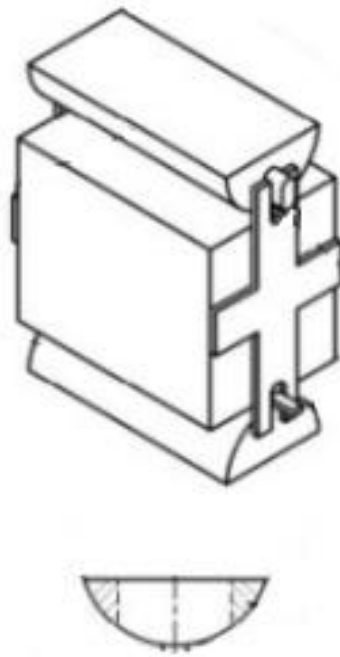
Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provodi se prema HRN EN 12390-5 na uzorcima prizme. Norma definira način ispitivanja s jednom ili dvije koncentrirane sile uz mogućnost praćenja pomaka. Dimenzije kalupa prizme za ispitivanje po navedenoj normi mogu biti 100 x 100 x 400 mm ili 100 x 100 x 500 mm. Na slici 8 prikazana su oba načina kroz skicu, dok je ispitivanje s jednom koncentriranom silom fotografirano prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada.



Slika 8: Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provodi se prema HRN EN 12390-6 na uzorcima valjka ili kocke. Uzorci su jednakih dimenzija kao i kod ispitivanja betona na tlak, odnosno promjera 150 mm i visine 300 mm za valjak, te 150 x 150 x 150 mm za kocku. Takav uzorak se opterećuje tlačnom silom po izvodnici valjka ili koncentriranom tlačnom silom po stranici kocke, a u njemu se javljaju naprezanja okomita na pravac djelovanja opterećenja kako je prikazano na slici 9.





Slika 9: Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem [21]

### 3. OPĆENITO O ASFALTU

#### 3.1. Proizvodnja i ugradnja

Asfaltne mješavine proizvode se u asfaltnim bazama od veziva, kamenog brašna i agregata. Tehnološka obilježja asfaltne baze utvrđuju način spravljanja asfaltne mješavine, pa tako razlikujemo cikličke i kontinuirane asfaltne baze. Spravljanje mješavina u cikličkim bazama je kvalitetnije zbog postupka vaganja koji se koristi prilikom dodavanja sastavnica u asfalt. Na slici 10 prikazana je ciklička asfaltna baza tvrtke Strabag d.o.o. koja se nalazi na Kukuljanovu kod Rijeke. Prikazani su elementi: 1 - otvorena skladišta prirodnog agregata, 2 - otvoreni spremnici agregata s automatskim doziranjem, 3 - bubanj za sušenje agregata s otprašivanjem, 4 - separator za izdvajanje punila iz prašine, 5 - silosi punila, 6 - vruće sijanje, doziranje sastavnica i miješanje, 7 - upravljačka jedinica s operaterom.



Slika 10: Ciklička asfaltna baza tvrtke Strabag d.o.o. [18]

Kao vezivo u asfaltnim mješavinama najčešće se koristi bitumen, organsko ugljikovodično vezivo koje ima dobru adhezijsku prionjivost na kamenu agregat, hidrofobno je i plastično. Katran i prirodni asfalt su veziva koja se također koriste u proizvodnji asfaltnih mješavina, no zbog svoje proizvodne cijene nisu najprihvatljiviji odabir za masovne asfaltnerske radove. Kameno brašno sačinjava mljevena kamena sitnež veličine zrna do 0,25 mm, čijih 60% - 85% granulometrijskog sastava čini punilo. Zrna kamene sitneži do 0,063 mm ubrajaju se u punilo i ono u kombinaciji s bitumenom čini bitumenski mort koji služi međusobnom povezivanju zrna i ispunjavanju međuprostora. Nominalno najveća veličina zrna u proizvodnji asfaltnih mješavina kreće se u rasponu od 32 mm za nosive slojeve asfalta, primjer AC 32 base 50/70, do veličine zrna 4 mm za habajući sloj AC 4 surf 50/70. Agregati za proizvodnju asfaltnih mješavina mogu biti: prirodni sijani ili nesijani pijesak i šljunak, drobljeni šljunak ili drobljena i sijana kamena sitnež, te njihove mješavine. Ovisno o projektnim zahtjevima za asfaltne zastore, u asfaltnu mješavinu mogu se miješati dodaci koji služe: snižavanju temperature proizvodnje i ugradnje asfaltnih mješavina, povećanje otpornosti bitumenskog veziva na starenje te poboljšanje prionjivosti bitumenskog veziva.

Zbog utjecaja na viskoznost veziva i bolji rezultat cjelokupnog tehnološkog procesa ugradnje, svi sastojci asfaltne mješavine se zagrijavaju. Proizvodna temperatura iznosi od 160° C do 180° C ( $\pm 10^\circ$  C), a preporučena temperatura ugradnje 130° C do 160° C ( $\pm 10^\circ$  C). Navedeni parametri postavljaju ograničenje na duljinu i trajanje transporta od mjesta proizvodnje do mjesta ugradnje asfaltnih mješavina. Iskustva u praksi pokazuju da transport ne bi trebao trajati dulje od 1,5 sati, odnosno oko 70 kilometara. Kako bi se hlađenje asfaltne mješavine usporilo, tovarni prostor transportnog sredstva obavezno se pokriva posebnim tkaninama.

Radna grupa strojeva prilikom izvođenja masovnih asfaltnerskih radova obavezno mora sadržavati: finišer, glatki čelični tandem valjak i gumeni valjak za asfalt. Finišer je poseban stroj namijenjen ugradnji asfaltne mješavine, a sastoji se od: prostora za prihvatanje asfaltne mješavine - bunkera, transportne trake za dobavu materijala do razdjeljivača, razdjeljivača - oblika beskonačnog vijka te ploče za početno ravnanje i sabijanje asfalta - pegle.

Ovisno o tehnološkoj opremljenosti finišera i dodatnim modulima koji se na njemu nalaze, moguća je izrada jednosmjernih ili dvosmjernih nagiba ugrađenog asfalta, određivanje visine ugradnje pomoću GPS sustava ili ultrazvučnih senzora.

Valjci koji sudjeluju u izradi asfaltnog zastora važan su dio sustava prvenstveno zbog zbijanja asfaltne mješavine, ali i utjecaj na ravnost gotovog asfaltnog zastora. Prvi valjak koji obrađuje ugrađeni asfalt nakon finišera je čelični tandem valjak, a nakon njega dolazi gumeni. Izvođači radova u praksi često umjesto običnog gumenog valjka za asfalt koriste kombinirani čelično - gumeni valjak. Uporaba ovog valjka omogućuje istovremeno uštedu i zadržavanje kvalitete izvedbe. Na slici 11 prikazana je ugradnja asfaltne mješavine finišerom.



Slika 11: Ugradnja asfalta finišerom

Prema tehničkom propisu za asfalte koji je još uvijek u fazi savjetovanja i izmjena, te samim time nije službeni dokument, svojstva izvedene površinske obrade asfalta moraju zadovoljavati prema HRN EN 12272-1 - količinu doziranja veziva, preciznost

razastiranja veziva te količinu i preciznost doziranja agregata. Prema HRN EN 12272-2 određuje se vizualna procjena oštećenja, a ravnost asfalta prema HRN EN 13036-7. Prema normi HRN EN 13036-1 potrebno je zadovoljiti još i makroteksturu, dok su za visinu, poprečni pad i položaj sloja postavljene granične vrijednosti u koje se potrebno uklopiti.

### 3.2. Glodanje asfalta – završetak životnog ciklusa

Glodanje asfalta je postupak kojim se posebnim strojevima uklanjaju stari slojevi asfalta. Takve strojeve nazivamo glodalice, odnosno freze za asfalt koja je u radu prikazana na slici 12. Glavni dijelovi glodalice su: bubanj za glodanje, sustav hlađenja bubnja, istovarna traka te sustav za regulaciju dubine i nagiba glodanja. Bubanj za glodanje ima promjenjive šiljke izrađene od metalnih legura kako bi se povećala njihova otpornost. Uslijed procesa glodanja asfalta šiljci su izloženi visokim temperaturama i naprezanjima, pa se zbog toga relativno brzo troše. Brzina trošenja ovisi prvenstveno o materijalu šiljka i materijalima na kojima se koristi glodalica.



Slika 12: Glodalica za asfalt u radu

Sustav hlađenja bubnja glodalice je zbog visokih temperatura koje se pojavljuju prilikom glodanja asfalta neizostavan dio stroja. Glodalice se hlade vodom koja ujedno pomaže pri smanjivanju količine prašine koja nastaje glodanjem.

Rotacija bubnja suprotna je smjeru kretanja glodalice, a kućište u kojem se nalazi bubanj služi sakupljanju materijala i njegov prijenos na istovarnu traku koja se kod većine današnjih glodalica nalazi s prednje strane. Osim praktičnosti kod utovara glodanog materijala – recikliranog asfalta, ovakva konfiguracija omogućuje da sav materijal koji u procesu ispadne s trake, bude ponovno utovaren na nju. Ovisno o tehnološkoj opremljenosti glodalice za asfalt, sustav regulacije dubine i nagiba glodanja može biti u različitim izvedbama – laserski, mehanički i slično. Dubina i nagib glodanja vrlo su bitna stavka zbog ponovnog polaganja asfalta na obrađenu površinu.

## 4. AGREGAT OD RECIKLIRANOG ASFALTA

### 4.1. Proizvodnja

Proizvodnja agregata od recikliranog asfalta započinje njegovim uklanjanjem s površina na koje je položen, a to su pretežno prometnice i površine za parkiranje vozila. Svojstva agregata najviše ovise o stanju asfalta u trenutku glodanja. Vrsta asfaltne mješavine, kvaliteta agregata i njegova veličina te sabijenost asfalta i količina bitumena u asfaltu stvaraju značajne razlike u kvaliteti recikliranog asfalta [4]. Agregat od recikliranog asfalta proizvodi se drobljenjem materijala koji je dobiven glodanjem, te njegovim prosijavanjem na traženu frakciju koja ovisi o daljnjoj namjeni. Drobljenje i sijanje materijala obavlja se na postrojenjima koja se mogu koristiti kao drobilice za proizvodnju prirodnog drobljenog agregata, a ona mogu biti mobilna i stacionarna. Na slici 13 vidimo mobilno postrojenje za drobljenje asfalta koje se sastoji od: 1 – prostora za prihvata materijala, 2 - uređaja za drobljenje materijala, 3 – magnetnog separatora, 4 – transportne trake, 5 – sita za odvajanje na tražene frakcije.



Slika 13: Mobilna drobilica za asfalt [19]

Neobrađeni, odnosno nedrobljeni i nesijani agregat može se koristiti kao sirovina za hladni postupak reciklaže na gradilištu, kao materijal za izradu bankina uz prometnice i kao materijal za razastiranje po makadamskim, najčešće raznim poljoprivrednim i lokalnim putevima. Takav materijal nije pogodan za izradu betonskih mješavina zbog krupnih frakcija i nečistoća u frezanom asfaltu.

Na slici 14 jasno se vidi razlika obrađenog i neobrađenog materijala. Glodalica, ovisno o količini šiljaka na bubnju, proizvodi finiji ili krupniji agregat. Određen dio zrna agregata asfalta nakon glodanja ostaje spojen zbog bitumena koji ih veže, te je iz tog razloga potrebno drobljenje i sijanje agregata kako bi se on mogao koristiti u izradi novih asfaltnih ili betonskih mješavina. Također vrlo je važno izdvojiti sve nečistoće koje u procesu glodanja dopijevaju u neobrađeni agregat.



Slika 14: Razlika neobrađenog i obrađenog materijala

Skladištenje ove vrste agregata nakon obrade drobljenjem i sijanjem mora biti u natkrivenim skladištima zbog utjecaja kiše i sunca na ponovno povezivanje čestica agregata. Izloženost visokim temperaturama može uzrokovati zagrijavanje vezanog bitumena na česticama agregata i posljedično ponovno djelomično vezanje. Prema iskustvima iz prakse ovome su sklonije sitnije čestice agregata zbog male površine i velike količine bitumena koji je potrebno ugrijati.



## 4.2. Svojstva agregata od recikliranog asfalta

Svojstva koja opisuju agregat od recikliranog asfalta uspoređujemo sa svojstvima prirodnog agregata zbog nepostojanja standarda koji definira ispitivanje ove vrste agregata. Tako koristimo HRN EN 12620:2002, standard za prirodni agregat koji je u svakodnevnoj upotrebi i prihvaćen u zemljama Europske unije.

Agregat od recikliranog asfalta u proizvodnji novih mješavina koristi se većinom kod proizvodnje asfaltnih mješavina. Prema Tehničkim uvjetima za asfaltne kolnike ne zahtjeva se izjava o svojstvima, odnosno potpuno poznavanje svojstava recikliranog agregata za primjenu u izradi novih asfaltnih mješavina, već se obavezuje proizvođača mješavina da prethodnim ispitivanjima utvrdi granulometrijski sastav, te količinu i vrstu bitumena koji se nalazi na česticama agregata.

Svojstva agregata ponajviše ovise o stanju asfalta prilikom uklanjanja, vrsti i kvaliteti agregata korištenog za izradu asfalta te količini bitumena vezanog na čestice agregata. Svojstva recikliranog asfalta ispitana u dostupnim istraživanjima [3, 9, 13] svojim rezultatima pobijaju osnovne pretpostavke o upojnosti i zapreminskoj težini materijala kod recikliranih agregata. Zbog količine organskog materijala, bitumena, veziva koje se koristilo pri izradi asfaltne mješavine osnovna pretpostavka je da će ova vrsta agregata imati manje upijanje vode, no pokazuje se upravo suprotno [3, 9, 13]. Istraživanja pokazuju veće upijanje vode u rasponu od 1,5 do 2,5 puta više od prirodnog agregata, što može biti posljedica skladištenja agregata recikliranog asfalta i hvatanja praškastih čestica na vezani bitumen [13].

Ispitivanje svojstava recikliranog asfalta u provedenim istraživanjima pokazuju svojstva koja se razlikuju od svojstava prirodnog agregata, a ona su:

- veće upijanje vode,
- veća količina praškastih čestica,
- neznatno manja zapreminska težina,
- manja otpornost prema habanju,
- veća količina prisutnih organskih materijala (zbog prisutnosti bitumena).

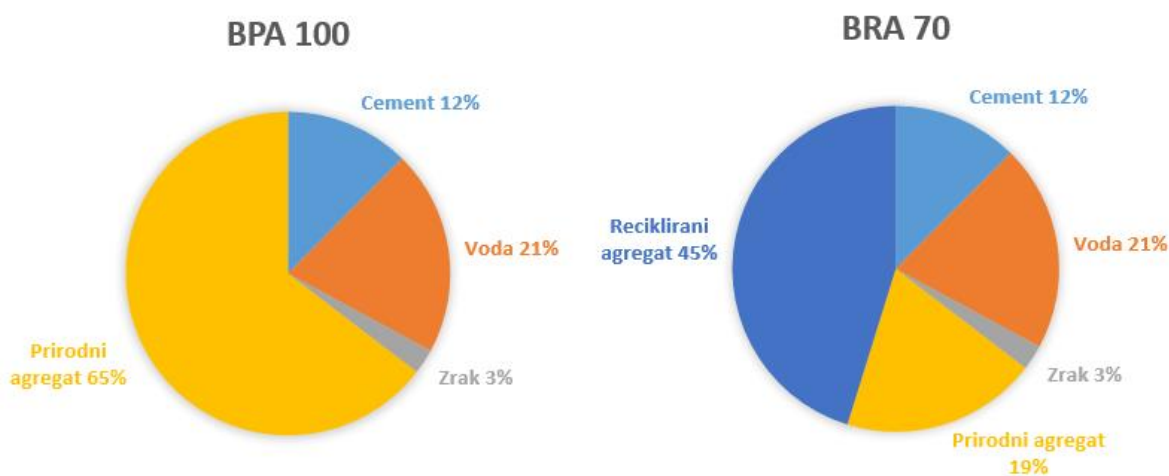
Količina prisutnih organskih materijala, odnosno bitumena, u volumnom udjelu mase kreće se od 2,5% - 6% i varira ovisno o frakciji [3].

Sitnija frakcija sadržava više vezanog bitumena na česticama, a kako se krećemo prema krupnijoj frakciji sadržaj bitumena je manji. Podjela na sitni i krupni agregat ista je kao i kod prirodnog agregata. Čestice manje od 4 mm svrstavaju se u sitni agregat, dok sve čestice veličine veće od 4 mm ulaze u krupni agregat.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

### 5.1. Uvod u eksperimentalni dio

U ovom radu napravljena su ispitivanja svojstva agregata recikliranog asfalta (frakcija 0-4, 4-8 i 8-16), dok za svojstva prirodnog drobljenog agregata postoje izjave o sukladnosti, te njegova svojstva nije bilo potrebno ispitati. Kontrolna ispitivanja svojstava prirodnog drobljenog agregata odrađena su za gustoću zrna i upijanje vode kod frakcije 8-16. Prirodni agregat dobavljen je sa kamenoloma i separacije Podberam u Pazinu, te posjeduje proizvođačku izjavu o svojstvima koju je izradila ovlaštena tvrtka Ramtech d.o.o.. Od prirodnog agregata projektirana je i napravljena referentna mješavina betona oznake BPA 100. Kako bi svojstva betona bila usporediva, uvjeti za projektiranje betona određeni su prema stručnom članku koji obrađuje temu izrade betona uz uporabu recikliranog betonskog agregata [5]. Definirani su uvjeti namjene betona (zidovi, armirane ploče, stupovi i temelji) i razred izloženosti XC3. Prema HRN EN 206-1:2006 razred izloženosti XC3 obuhvaća umjerenu vlažnost, odnosno dijelove do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup, te prostorije s atmosferom visoke vlažnosti [16]. Od recikliranog agregata projektirana je i napravljena mješavina betona oznake BRA 70, koja uključuje 70% zamjenu svih frakcija prirodnog agregata recikliranim. Uvjeti namjene betona i razred izloženosti isti su kao i kod projektiranja mješavine referentnog betona. Shematski prikaz udjela sastojaka betona u pojedinoj mješavini, zajedno s njenom oznakom, prikazan je na slici 15.



Slika 15: Volumni udio sastojaka betona po mješavinama

Nakon izrade betonskih mješavina, a prije ugradnje u kalupe, pristupilo se ispitivanju svojstava svježeg betona. Konzistencija svježeg betona ispitana je rasprostiranjem prema HRN EN 12350-5, a ispitivanje gustoće prema HRN EN 12350-6. Sadržaj pora u svježem betonu ispitan je tlačnom metodom prema HRN EN 12350-7. Uzorci su nakon pravilne ugradnje u kalupe i njege betona u laboratorijskim uvjetima 28 dana ispitani na svojstva očvrsnulog betona. Tlačna čvrstoća očvrsnulog betona i vlačna čvrstoća cijepanjem ispitana su na kockama prema HRN EN 12390-3 i HRN EN 12390-6. Vlačna čvrstoća savijanjem ispitana je prema HRN EN 12390-5, te je na uzorcima očvrsnulog betona ispitana i vodonepropusnost, odnosno dubina prodora vode, prema HRN EN 12390-8.

Na temelju navedenih ispitivanja prikazani su obrađeni podaci, te su uspoređeni s rezultatima stručnog članka [5]. Nakon usporedbe podataka doneseni su i određeni zaključci o uporabi recikliranog asfalta kao zamjene za prirodni agregat u proizvodnji betona. Cijeli proces izrade betonskih mješavina, od ispitivanja sastojaka betona preko izrade svježeg betona do ispitivanja svojstava očvrsnulog betona proveden je na opremi i u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci.

## **5.2. Svojstva sastojaka betona**

Sastojci korišteni pri izradi betona u ovom radu su: agregat, cement i voda. Svojstva svakog sastojka treba ispitati ukoliko za njega ne postoji izjava o svojstvima koju izdaje proizvođač, odnosno dobavljač.

Svojstva prirodnog agregata u skladu su sa izjavom o svojstvima koju izdaje tvrtka Cesta d.o.o. Pula, a izrađuje ovlaštena tvrtka Ramtech d.o.o.. Svojstva prirodnog agregata usklađena su prema HRN EN 12620:2008. Na slici 16 prikazana su svojstva agregata navedena u izjavi o svojstvima.

## Objavljena svojstva:

Bitne značajke	Svojstvo	Usklađena tehnička specifikacija
Fracija	0/4 mm	EN 12620:2002+A1:2008 (HRN EN 12620:2008)
Granulometrijski sastav	G <sub>c</sub> 85	
Krupnoća/ sitnoća	CP	
Sadržaj sitnih čestica	f <sub>10</sub>	
Metilensko modriilo	1,0 g/kg	
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	AS <sub>0,2</sub>	
Sadržaj ukupnog sumpora	0,1%	
Sadržaj klorida	0,00%	
Nasipna gustoća	1,55 Mg/m <sup>3</sup>	
Gustoća zrna	2,71 Mg/m <sup>3</sup>	
Upijanje vode	0,4 %	
Sadržaj humusa	nema	
Petrografski opis	Vapnenjački agregat	

## Objavljena svojstva:

Bitne značajke	Svojstvo	Usklađena tehnička specifikacija
Fracija	4/8 mm	EN 12620:2002+A1:2008 (HRN EN 12620:2008)
Granulometrijski sastav	G <sub>c</sub> 85/20	
Sadržaj sitnih čestica	f <sub>1,5</sub>	
Oblik zrna – Indeks oblika	SI <sub>15</sub>	
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	AS <sub>0,2</sub>	
Sadržaj ukupnog sumpora	0,1%	
Sadržaj klorida	0,00%	
Nasipna gustoća	1,39 Mg/m <sup>3</sup>	
Gustoća zrna	2,71 Mg/m <sup>3</sup>	
Upijanje vode	0,4 %	
Sadržaj humusa	nema	
Petrografski opis	Vapnenjački agregat	

## Objavljena svojstva:

Bitne značajke	Svojstvo	Usklađena tehnička specifikacija
Fracija	8/16 mm	EN 12620:2002+A1:2008 (HRN EN 12620:2008)
Granulometrijski sastav	G <sub>c</sub> 85/20	
Sadržaj sitnih čestica	f <sub>1,5</sub>	
Oblik zrna – Indeks oblika	SI <sub>15</sub>	
Otpornost na drobljenje	LA <sub>30</sub>	
Sadržaj sulfata topivog u kiselini	AS <sub>0,2</sub>	
Sadržaj ukupnog sumpora	0,1%	
Sadržaj klorida	0,00%	
Nasipna gustoća	1,39 Mg/m <sup>3</sup>	
Gustoća zrna	2,74 Mg/m <sup>3</sup>	
Upijanje vode	0,2 %	
Sadržaj humusa	nema	
Petrografski opis	Vapnenjački agregat	
Ispitivanje magnezijevim sulfatom	MS <sub>15</sub>	

Slika 16: Izjava o svojstvima za prirodni agregat

Svojstva recikliranog agregata ispitana su u laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Postupak ispitivanja prema HRN EN 206-1:2006 koristi se za ispitivanje granulometrije agregata, a započinje pripremom referentnog uzorka agregata za ispitivanje. Uzorci za ispitivanje uzeti su s deponije materijala, te su do referentne veličine smanjeni četvrtanjem. Referentna veličina odnosi se na minimalnu količinu agregata koja je potrebna za određivanje granulometrijske krivulje, ovisno o veličini najvećeg zrna (D). Četvrtanje se provodi u fazama:

- miješanje agregata: agregat se s dna hrpe uzima i sipa na vrh kako bi se formirao stožac
- dijeljenje agregata: agregat se poravna metalnom šipkom i razdijeli na četvrtine, kako je prikazano na slici 17

- odbacivanje agregata: dvije nasuprotne četvrtine se odbacuju i postupak se ponavlja dok se ne dobije propisana količina agregata za ispitivanje.

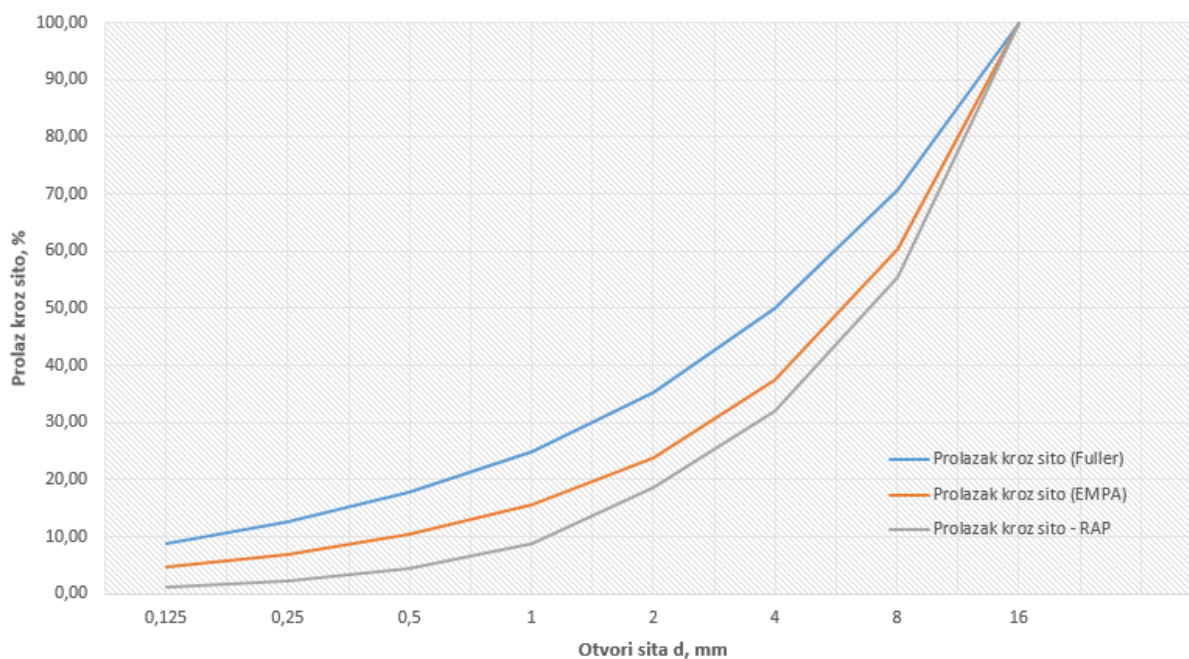


Slika 17: Dijeljenje agregata na četvrtine

Osnovni standardni set sita za prosijavanje materijala sadrži sita otvora:

- 0,125 mm,
- 0,25 mm,
- 0,50 mm,
- 1,0 mm,
- 2,0 mm,
- 4,0 mm,
- 8,0 mm,
- 16,0 mm,
- 31,5 mm.

Podaci dobiveni prosijavanjem referentnog uzorka materijala kroz osnovni set sita korišteni su za izradu granulometrijske krivulje agregata, a ona je prikazana na slici 18. Granično područje omeđeno EMPA i Fuller krivuljama, koje se smatra najpovoljnijim za uobičajene količine cementa u betonu, također je prikazano na slici 19. Iz prikazanog dijagrama vidimo kako se krivulja prosijanog recikliranog agregata nalazi ispod granice optimalne krivulje materijala.



Slika 18: Granulometrijska krivulja recikliranog agregata

Ispitanim svojstvima fizikalnih parametara recikliranog agregata određuje se: gustoća agregata, volumenska masa suhog i zasićenog površinski suhog agregata, poroznost, apsorpcija vode i vlažnost agregata. U tablici 2 prikazani su rezultati ispitivanja.

Tablica 2: Ispitivanje fizikalnih parametara recikliranog agregata

	pijesak (0/4 mm)	šljunak (4/16 mm)
masa vlažnog, $m_{wv}$	426,95 g	2351,80 g
masa ZPS vagano na zraku, $m_z$	402,85 g	2280,80 g
masa ZPS vagano pod vodom, $m_{zw}$	-	1361,80 g
masa suhog, $m_d$	385,28 g	2271,20 g
masa piknometra s vodom, $m_{bw}$	962,76 g	-
masa piknometra, vode, pijeska, m	1191,53 g	-

<b>gustoća, <math>\rho_0</math></b>	2,46 g/cm <sup>3</sup>	2,50 g/cm <sup>3</sup>
<b>volumenska masa suhog, <math>\rho_{z(d)}</math></b>	2,21 g/cm <sup>3</sup>	2,47 g/cm <sup>3</sup>
<b>volumenska masa ZPS, <math>\rho_{z(ZPS)}</math></b>	2,31 g/cm <sup>3</sup>	2,48 g/cm <sup>3</sup>
<b>poroznost, % mase</b>	10,16 %	1,2 %
<b>apsorbirana voda, <math>A_w</math>, % mase</b>	4,56 %	3,11 %
<b>apsorbirana voda, <math>A_w</math>, % volumena</b>	11,23 %	7,77 %
<b>površinska vlažnost, <math>A_s</math>, % mase</b>	6,26 %	3,13 %
<b>površinska vlažnost, <math>A_s</math>, % volumena</b>	15,39 %	7,82 %
<b>vlažnost, <math>W</math>, % mase</b>	10,82 %	3,55 %
<b>vlažnost, <math>W</math>, % volumena</b>	26,64 %	8,87 %

Analizom prikazanih rezultata ispitanih svojstava fizikalnih parametara recikliranog asfalta uočeno je da je gustoća materijala manja od gustoće prirodnog drobljenog agregata. Ovaj rezultat ispitivanja mogao se očekivati zbog podrijetla agregata, odnosno zbog prisutnosti organskog veziva na zrnima agregata. Bitumen kao organsko vezivo prekriva zrna recikliranog agregata, te njegova svojstva utječu na ukupnu poroznost, količinu zarobljenog zraka i u konačnici na gustoću materijala. Ispitivanja pokazuju od 9% do 12% smanjenje gustoće materijala, dok podaci dostupni u literaturi [3, 4, 13] govore o smanjenju gustoće od 2% do 14%.

Rezultati ispitivanja i usporedba s prirodnim agregatom pokazala su povećanu apsorpciju vode kod recikliranog agregata. Apsorpcija vode veća je 11 puta kod sitne frakcije agregata, te 9 puta veća u usporedbi s prirodnim agregatom krupne frakcije. Konkretno se upijanje vode kod prirodnog agregata kreće od 0,2% do 0,4% mase, ovisno o frakciji, a kod recikliranog asfalta od 3% do 5% mase.

Reciklirani agregat u pravilu ima veću upojnost vode i manju gustoću zbog prisutnosti više materijala (npr. cementne paste ili bitumena) koji djelomično ili u potpunosti prekrivaju zrna agregata. Uspoređivanjem rezultata ispitivanja svojstava recikliranog asfalta s rezultatima ispitivanja svojstava agregata od recikliranih betonskih kocki, dolazi se do istog zaključka [5].



Apsorpcija vode kod recikliranog agregata od betonskih kocki kreće se u rasponu od 6% do 7%, što ponajviše ovisi o svojstvima cementne paste. Cementna pasta sadrži veću količinu zarobljenog zraka koji nastaje prilikom miješanja, a istovremeno je sama po sebi više porozna. Gustoća recikliranih betonskih kocki bliža je gustoći prirodnog drobljenog agregata zbog boljeg utjecaja svojstava cementne paste, te se gustoća tog agregata kreće oko  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Gustoća recikliranog asfalta kreće se oko  $2,5 \text{ g/cm}^3$  prema rezultatima ispitivanja, dok se u literaturi pronalaze podaci o gustoći ovog agregata od  $2,4 \text{ g/cm}^3$  do  $2,7 \text{ g/cm}^3$  [3, 4, 13].

Cement korišten za izradu betonske mješavine je Holcim Ekspert čija su svojstva preuzeta iz tehničke upute za proizvod. Holcim Ekspert je trgovački naziv za miješani portlandski cement, oznake CEM II/B-M (S-V) 42,5 N. Oznaka "CEM II/B-M" označava portland cement koji se sastoji od 65% do 79% portlandskog cementnog klinkera i 21% do 35% miješanog dodatka. Granulirana zgura visokih peći označena je oznakom "S", a oznakom "V" silicijski leteći pepeo. Svi cementi mogu sadržavati do 5% drugih mineralnih dodataka, a prema tehničkoj uputi ova vrsta cementa sadrži do 5% filtarske prašine dobivene iz procesa proizvodnje portlandskog cementnog klinkera i industrijskog gipsa dihidrat. Oznaka klase cementa i oznaka brzine prirasta čvrstoće označena je kao "42,5 N", što deklarira normalan prirast čvrstoće i razred čvrstoće 42,5 MPa.

Za izradu betonskih mješavina upotrijebljena je voda iz gradske vodoopskrbne mreže na sobnoj temperaturi. Upotrebljavanjem vode pogodne za piće, nije potrebna izrada kemijske analize i svjedodžbe o kvaliteti vode.

### **5.3. Projektiranje betona**

Sastav betona izražava se u količinama sastavnih materijala u  $\text{m}^3$  ugrađenog betona, a u pravilu se određuje kako bi se zadovoljila sva svojstva u svježem i očvrslulom stanju. Svojstva proizlaze iz potreba [17]:

- proračuna i dimenzioniranja (fizikalno-mehanička svojstva)
- upotrebe betonske konstrukcije u uvjetima okoliša (trajnosna svojstva)
- transporta i ugradnje (svojstva svježeg betona)

- njege u različitim uvjetima.

Svrha projektiranja betona je utvrđivanje optimalnih količina cementa, agregata, vode i dodataka u m<sup>3</sup> ugrađenog betona zahtijevanih svojstava. Projektirana, odnosno zahtijevana svojstva svode se na obradivost, čvrstoću i trajnost betona, a sastav betona se prilagođava tako da zadovolji sva tri projektirana zahtjeva na što ekonomičniji način [17].

Kao polaznu točku projektiranja betona, u eksperimentalnom dijelu rada, uzeti su isti uvjeti koji se koriste u dostupnoj literaturi [5], kako bi rezultati ispitivanja svojstava betona bili usporedivi. Odabrani beton namijenjen je ugradnji u konstrukcijske elemente kao što su armirani zidovi, temelji, stupovi i ploče. Razred izloženosti prema HRN EN 206-1:2006 je XC3, odnosno okoliš umjerene vlažnosti, gdje su svrstani dijelovi do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup te prostorije s atmosferom visoke vlažnosti, poput javnih kuhinja, kupališta i zgrada otvorenih oblika. Za odabran razred izloženosti preporučuju se vrijednosti sastava i svojstava betona, te se tako za razred XC 3 preporučuje maksimalni v/c omjer 0,55 i minimalni razred čvrstoće C30/37. Preporučuje se minimalna količina cementa u m<sup>3</sup> betona u količini 280 kg.

Prema kriteriju obradivosti odabran je razred rasprostiranjem F3, rasprostiranje od 420 mm do 480 mm. Količina vode u m<sup>3</sup> betona prema razredu konzistencije i maksimalnom zrnu agregata pri odabranoj graničnoj liniji B iznosi 205 litara. Količina pora u svježem betonu za maksimalno zrno agregata 16 mm i neaerirani beton iznosi od 2% do 5%.

Prema uvjetu zahtijevane srednje čvrstoće za projektirani razred C30/37 i odabranom cementu, CEM II/B-M (S-V) 42,5 N iz Walzovog dijagrama očitani je v/c faktor 0,57. Očitavanje se provelo uz uvjet  $f_{cm} > f_{ck} + 2 \cdot 4 = 42$  MPa.

Iz navedenih uvjeta odabrane su sljedeće vrijednosti za izradu betonske mješavine:

- konzistencija rasprostiranjem, razred F3, rasprostiranje od 420 mm do 480 mm
- maksimalni v/c faktor 0,55
- maksimalna količina vode 205 l/m<sup>3</sup> betona
- minimalna količina cementa CEM II/B-M (S-V) 42,5 N 280 kg/m<sup>3</sup> betona
- najveće zrno agregata  $d_{max} = 16$  mm, drobljeni agregat gustoće 2,74 kg/dm<sup>3</sup>

- količina pora 2,5 %

Potrebna količina betona koja se izrađuje u jednom miješanju određena je prema unaprijed definiranom broju potrebnih uzoraka za ispitivanje betona. Količini za potrebne uzorke dodani su gubici betona koji nastaju pri ispitivanju količine pora u svježem betonu i gubici pri miješanju. Ispitivanje sadržaja pora u svježem betonu provodi se prema HRN EN 12350-7, a normirani postupak uključuje dodavanje vode u spremnik s betonom, te zbog toga količina betona upotrijebljena za to ispitivanje nije pogodna za daljnju ugradnju.

Određena je izrada dvije vrste betonskih mješavina, oznaka BPA 100 i BRA 70. Mješavina BPA 100 je referentna mješavina sa udjelom 100 % prirodnog agregata. Mješavina BRA 70 je mješavina sa 70 % zamjenom prirodnog agregata recikliranim. Zamjena agregata obavlja se za sve frakcije u jednakom omjeru.

### 5.3.1. Projektirani sastavi betonskih mješavina

Oznaka mješavine: BPA 100

	masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	volumen (m <sup>3</sup> )	masa za miješalicu (kg)
<b>vol. miješalice</b>				<b>0,031</b>
<b>cement</b>	372,73	3,00	124,24	11,55
<b>voda</b>	205,00	1,00	205,00	6,36
<b>v/c</b>	0,55			
<b>dodatak</b>	0	0	0	0
<b>zrak</b>	2,50		25,00	0,00
<b>agregat</b>	1769,38	2,74	645,76	54,85
<b>ukupno</b>	2347,11		<b>1000</b>	72,76

	apsorpcija		vlažnost		korigirana masa		
	%	masa	%	kg	%	kg	kg
<b>0 do 4</b>	38,00	20,84	0,40	0,08	1,1	0,23	20,67
<b>4 do 8</b>	22,00	12,07	0,40	0,05	0,10	0,13	12,15
<b>8 do 16</b>	40,00	21,94	0,40	0,09	0,10	0,24	22,09
<b>16 do 32</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>ukupno</b>	100,00	54,85		0,22		0,60	54,91

<b>korekcija vode</b>	<b>6,30 kg</b>
<b>ukupno</b>	
<b>volumen</b>	0,031 m <sup>3</sup>
<b>br. mješanja</b>	1,00
<b>cement</b>	11,55 kg
<b>voda</b>	6,30 kg
<b>aerant</b>	0,00 kg
<b>0 do 4</b>	20,67 kg
<b>4 do 8</b>	12,15 kg
<b>8 do 16</b>	22,09 kg
<b>16 do 32</b>	0,00 kg

Oznaka mješavine: BRA 70

	masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	volumen (m <sup>3</sup> )	masa za miješalicu (kg)
<b>vol. miješalice</b>				<b>0,039</b>
<b>cement</b>	372,73	3,00	124,24	14,54
<b>voda</b>	205,00	1,00	205,00	7,99
<b>v/c</b>	0,55			
<b>dodatak</b>	0	0	0	0
<b>zrak</b>	2,50		25,00	0,00
<b>agregat</b>	1769,38	2,74	645,76	69,01
<b>ukupno</b>	2347,11		<b>1000</b>	91,54

	apsorpcija				vlažnost		korigirana masa
	%	masa	%	kg	%	kg	kg
<b>0 do 4</b>	11,40	7,867	0,40	0,031	1,10	0,087	7,923
<b>4 do 8</b>	6,60	4,554	0,40	0,018	0,10	0,005	4,541
<b>8 do 16</b>	12,00	8,280	0,40	0,033	0,10	0,008	8,255
<b>16 do 32</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RAP 0 do 4</b>	26,60	18,356	4,56	0,837	0,80	0,147	17,666
<b>RAP 4 do 8</b>	15,40	10,627	3,11	0,330	0,10	0,011	10,308
<b>RAP 8 do 16</b>	28,00	19,322	3,11	0,600	0,10	0,019	18,741
<b>ukupno</b>	100,00	69,01		1,849		0,277	67,434

<b>korekcija vode</b>	<b>9,567 kg</b>
<b>ukupno</b>	
<b>volumen</b>	0,039 m <sup>3</sup>
<b>br. mješanja</b>	1,00
<b>cement</b>	14,536 kg
<b>voda</b>	9,567 kg
<b>aerant</b>	0,00 kg
<b>0 do 4</b>	7,923 kg
<b>4 do 8</b>	4,541 kg
<b>8 do 16</b>	8,255 kg
<b>RAP 0 do 4</b>	17,666 kg
<b>RAP 4 do 8</b>	10,308 kg
<b>RAP 8 do 16</b>	18,741 kg

#### **5.4. Svojstva svježeg betona**

Nakon završetka projektiranja sastava betona i definiranja točnih količina potrebnih sastojaka, pristupilo se izradi betonskih mješavina. Doziranje sastojaka u mješavinu provodi se:

- tariranjem posude za vaganje
- vaganjem svih sastojaka
- dodavanjem u miješalicu.

Betonske mješavine izrađene su na planetarnoj miješalici, prikazanoj na slici 19, koja se nalazi u prostoru laboratorija Građevinskog fakulteta u Rijeci.



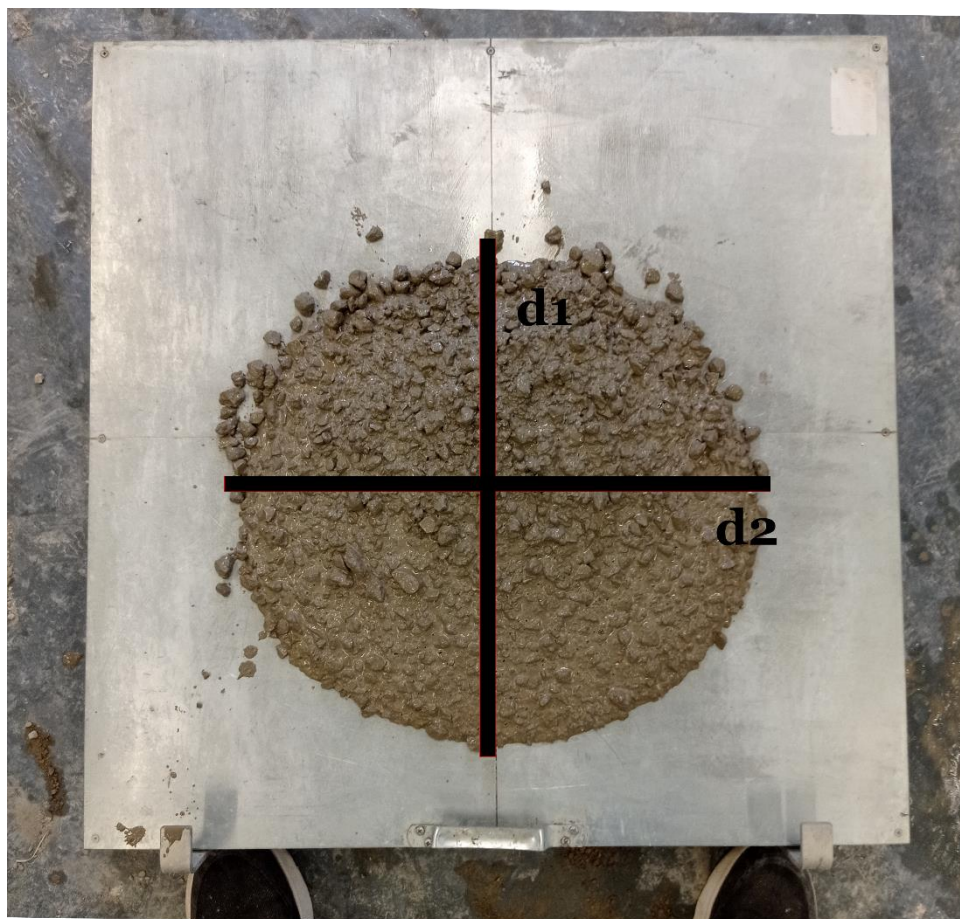
Slika 19: Planetarna miješalica u laboratoriju za materijale

Betonske mješavine izrađivane su uobičajenim načinom miješanja koji podrazumijeva suho miješanje čvrstih komponenta mješavine, a zatim dodavanje projektirane količine vode i nastavak miješanja u trajanju od 120 sekundi.

Na svježem betonu provedena su sljedeća ispitivanja svojstava:

- ispitivanje konzistencije rasprostiranjem prema HRN EN 12350-5
- ispitivanje sadržaja pora tlačnom metodom prema HRN EN 12350-7
- ispitivanje gustoće svježeg betona prema HRN EN 12350-6

Ispitivanje konzistencije rasprostiranjem provodi se prema postupku opisanom u potpoglavlju 2.3.1. Ispitivanje svojstava svježeg betona, a mjera rasprostiranja je srednja vrijednost promjera zaokružena na bližih 10 milimetara. Na slici 20 prikazano je provedeno ispitivanje na mješavini svježeg betona oznake BRA 70.



Slika 20: Ispitivanje konzistencije svježeg betona rasprostiranjem

Rezultati ispitivanja rasprostiranjem za sve mješavine, BPA 100 i BRA 70, nalaze se malo izvan granica uvjeta obradivosti, te stoga mješavine nisu postigle zahtijevanu konzistenciju rasprostiranjem. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 3.

Tablica 3: Rezultati ispitivanja konzistencije svježeg betona

Naziv mješavine	Rezultat ispitivanja rasprostiranjem prema HRN EN 12350-5
BPA 100	400 mm
BRA 70	510 mm

Ispitivanje sadržaja pora tlačnom metodom provodi se pomoću porometra prema HRN EN 12350-7, a postupak je opisan u potpoglavlju 2.3.1. ovog rada. Dobiveni rezultati ispitivanja nalaze se u granicama za neaerirani beton od 2% do 5%. Udio pora u svježem betonu oznake BPA 100 iznosi 2%, a u svježem betonu oznake BRA 70 udio iznosi 4%.



Na uzorcima svježeg betona ispitana je gustoća materijala njegovim vaganjem u posudi poznatih dimenzija i težine, a u tablici 4 prikazani su rezultati ispitivanja.

*Tablica 4: Rezultati ispitivanja gustoće svježeg betona*

Naziv mješavine	Težina svježeg betona	Rezultat ispitivanja gustoće
BPA 100	7,905 kg	2342,22 kg/m <sup>3</sup>
BRA 70	7,350 kg	2177,78 kg/m <sup>3</sup>

### 5.5. Svojstva očvrsnulog betona

Nakon provedenih ispitivanja svojstava svježeg betona i njegove ugradnje u kalupe standardnih dimenzija, uzorci su pohranjeni na sobnoj temperaturi u trajanju od 24 sata. Protekom ovog vremena uzorci su raskalupljeni i pohranjeni u vodu na 7 dana, a zatim u vlažnu komoru u kojoj se drže do ispitivanja svojstava očvrsnulog betona, odnosno do proteka 28 dana. Vlažnost zraka u komori iznosi 95%, a temperatura  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Na uzorcima očvrsnulog betona provedena su sljedeća ispitivanja:

- ispitivanje tlačne čvrstoće betona prema HRN EN 12390-3
- indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće betona savijanjem prema HRN EN 12390-5
- indirektno ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem prema HRN EN 12390-6
- ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom prema HRN EN 12390-8
- ispitivanje toplinske provodljivosti prema HRN EN ISO 6946:2008

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona provedeno je na kockama dimenzija 150 x 150 x 150 mm, a ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem provedeno je na prizmama dimenzija 100 x 100 x 400 mm, odnosno 100 x 100 x 500 mm. Razlike u dimenzijama prizmi prvenstveno su prisutne zbog dostupnosti kalupa prilikom izrade betonskih mješavina. Prema normi ove razlike u dimenzijama ne čine razliku jer su dimenzije poprečnih presjeka i razmak oslonaca pri ispitivanju jednaki, pa su rezultati ispitivanja usporedivi. Ispitivanje vlačne čvrstoće betona cijepanjem provedeno je na kockama dimenzija 150 x 150 x 150 mm.

U nastavku su prikazani rezultati ispitivanja na tlak i vlak provedenih u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci.

### ***Ispitivanje tlačne čvrstoće, HRN EN 12390-3***

*Uzorak: kocka 150 x 150 x 150mm, BPA 100*

<b>Naziv mješavine</b>	BPA 100	<b>Operator</b>	Dario Gorek
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	28 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	9. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)			masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	sila kN	čvrstoća sloma MPa
	a	b	c				
<b>1</b>	149,14	149,91	150,01	7,96	2370,96	881,3	39,43
<b>2</b>	149,91	149,71	149,84	8,00	2378,92	906,2	40,38
<b>3</b>	149,93	149,65	149,84	7,92	2356,87	920,3	41,02
<b>srednja vrijednost</b>					2368,92	902,6	40,28
<b>standardna devijacija</b>					11,16	19,75	0,80

### ***Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje, HRN EN 12390-5***

*Uzorak: prizma 100x100x400mm, BPA 100*

<b>Naziv mješavine</b>	BPA 100	<b>Operator</b>	Dario Gorek
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	28 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	9. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)			masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	sila kN	čvrstoća sloma MPa
	b	h	l				
<b>1</b>	100,34	100,20	399,88	9,49	2360,73	13,14	5,87
<b>2</b>	98,32	100,91	399,88	9,36	2359,55	11,03	4,96
<b>3</b>	99,98	100,22	399,5	9,48	2367,87	10,97	4,92

<b>srednja vrijednost</b>	2362,72	11,71	5,25
<b>standardna devijacija</b>	4,50	1,24	0,54

**Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem, HRN EN 12390-6**

Uzorak: kocka 150 x 150 x 150mm, BPA 100

<b>Naziv mješavine</b>	BPA 100	<b>Operator</b>	Dino Jurišević
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	29 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	10. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)			masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	sila sloma kN	čvrstoća MPa
	L	d					
7	150,4	150,5		7,950		62,5	2,76
<b>srednja vrijednost</b>						62,5	2,76

**Ispitivanje tlačne čvrstoće, HRN EN 12390-3**

Uzorak: kocka 150 x 150 x 150mm, BRA 70

<b>Naziv mješavine</b>	BRA 70	<b>Operator</b>	Dario Gorek
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	28 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	9. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)			masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	sila sloma kN	čvrstoća MPa
	a	b	c				
4	149,91	147,81	149,78	7,18	2163,51	291,4	13,15
5	149,95	149,32	149,84	7,37	2197,07	353,9	15,81
6	149,91	149,2	149,89	7,38	2200,26	321,7	14,38
<b>srednja vrijednost</b>					2186,95	322,3	14,45

<b>standardna devijacija</b>	20,36	31,25	1,33
------------------------------	-------	-------	------

### ***Ispitivanje vlačne čvrstoće na savijanje, HRN EN 12390-5***

*Uzorak: prizma 100x100x500mm, BRA 70*

<b>Naziv mješavine</b>	BRA 70	<b>Operator</b>	Dario Gorek
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	28 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	9. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)			masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	silna čvrstoća sloma	
	b	h	l			kN	MPa
4	97,99	100,05	500,00	10,63	2168,65	6,38	2,93
5	98,02	100,35	500,00	10,82	2199,71	6,84	3,12
6	97,53	99,93	502,5	10,63	2171,07	6,83	3,16
<b>srednja vrijednost</b>					2179,81	6,68	3,07
<b>standardna devijacija</b>					17,28	0,26	0,12

### ***Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem, HRN EN 12390-6***

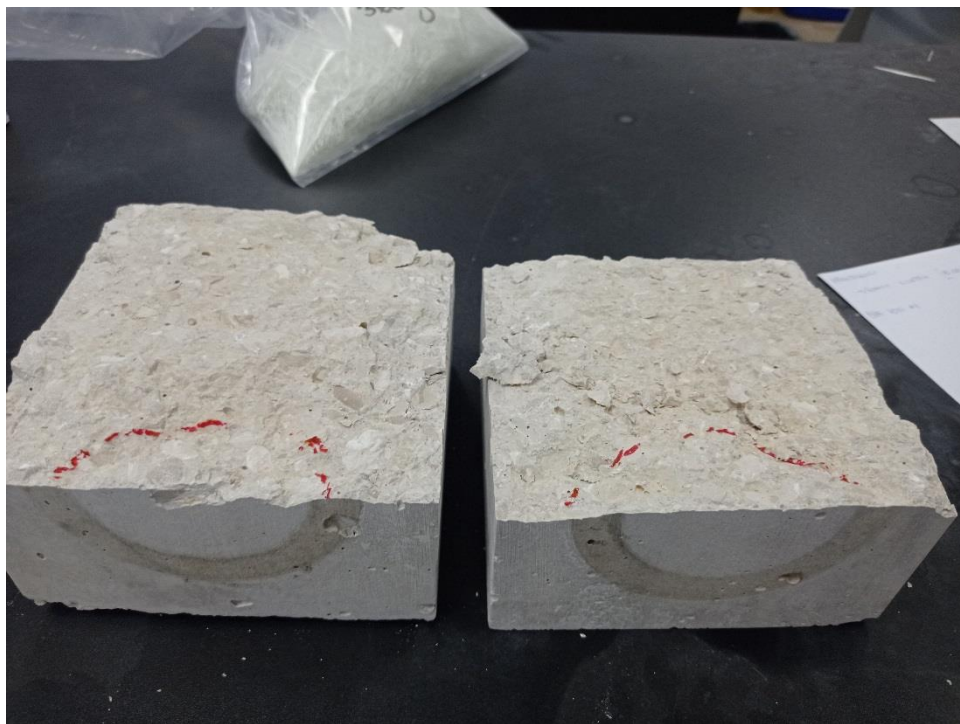
*Uzorak: kocka 150 x 150 x 150mm, BRA 70*

<b>Naziv mješavine</b>	BRA 70	<b>Operator</b>	Dino Jurišević
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	29 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	10. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

r. br.	dimenzije (mm)		masa (kg)	gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	silna čvrstoća sloma	
	L	d			kN	MPa
8	150,5	151,1	7,323		47,1	2,07
9	150,3	151,5	7,294		45,4	1,99

<b>10</b>	150,4	151,5	7,136	29,1	1,28
<b>srednja vrijednost</b>				40,53	1,78
<b>standardna devijacija</b>				9,94	0,43

Ispitivanje dubine prodora vode provedeno je na uzorcima kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm starih minimalno 28 dana. Pri ispitivanju je korištena oprema koja na postavljeni uzorak utiskuje vodu pod tlakom od  $500 \pm 50$  kPa u trajanju od  $72 \pm 2$  sata. Nakon proteka 72 sata uzorci su cijepani u tlačnoj preši okomito na smjer djelovanja vode. Prodor vode u uzorak označen je markerom radi vidljivosti, kao na slici 21, te je kasnije izmjeren, a rezultati su prikazani u nastavku. Kao mjerodavan rezultat prodora vode uzima se najveća izmjerena vrijednost na uzorcima iste mješavine.



Slika 21: Obilježavanje prodora vode u uzorak

### ***Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom prema HRN EN 12390-8***

*Uzorak: kocka 150x150x150 mm, BPA 100*

<b>Naziv mješavine</b>	BPA 100	<b>Operator</b>	Dino Jurišević
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	29 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	10. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

<b>r. br.</b>	<b>dubina prodora vode</b>
	(mm)
7	33,24
<b>mjerodavan prodor vode</b>	33,24

### ***Ispitivanje dubine prodora vode pod tlakom prema HRN EN 12390-8***

*Uzorak: kocka 150x150x150 mm, BRA 70*

<b>Naziv mješavine</b>	BRA 70	<b>Operator</b>	Dino Jurišević
<b>Datum izrade</b>	12. svibnja 2021.	<b>Starost uzorka</b>	29 dana
<b>Datum ispitivanja</b>	10. lipnja 2021.	<b>Razred čvrstoće</b>	C 30/37

<b>r. br.</b>	<b>dubina prodora vode</b>
	(mm)
8	43,29
9	55,60
10	54,37
<b>mjerodavan prodor vode</b>	55,60

### ***Ispitivanje toplinske provodljivosti***

Ispitivanje toplinske provodljivosti vrlo je važno u polju građevinarstva zbog poznavanja toplinsko-izolacijskih svojstava materijala. U građevinarstvu materijale koji imaju manje koeficijente toplinske provodljivosti i propusnosti nazivamo izolatorima. Svojstvo izolatora je također i visok koeficijent toplinskog otpora, odnosno otpora materijala prolasku topline.

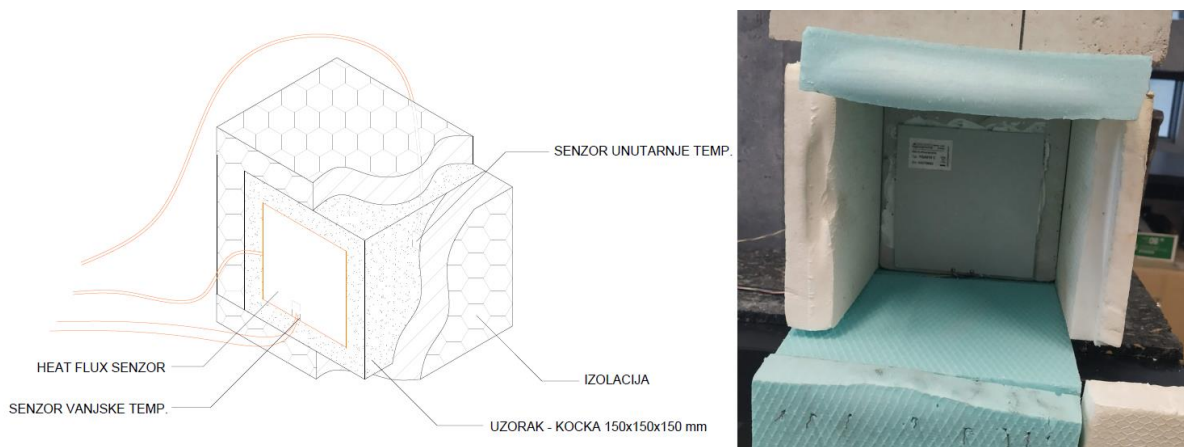
Za potrebe ovog rada ispitani su koeficijent toplinske provodljivosti i toplinska propusnost na uzorku kocke dimenzija 150 x 150 x 150 mm mješavine BRA 70. Ispitivanje se provodilo zagrijavanjem izoliranog uzorka halogenom lampom, odnosno prijenosom topline radijacijom. Postav opreme za ispitivanje prikazan je na slici 22.



Slika 22: Postav opreme za ispitivanje toplinske provodljivosti

Ispitivanje toplinske provodljivosti provedeno je korištenjem uređaja ALMEMO, senzora za mjerenje površinske temperature i toplinskog toka, te softvera AMR WinControl za očitavanje, bilježenje i pregled izmjenjenih podataka. Na slici 23 prikazana je priprema uzorka i položaj postavljenih senzora tijekom ispitivanja. Uzorak je izoliran kako bi se postigli minimalni gubici topline na bočnim stranama, te kako bi se simulirao prolaz topline u jednom smjeru. Uzorak je izoliran ekspanziranom polistirenom, kako je prikazano na slici 23. Tijekom testa se jedna strana uzorka zagrijavala, dok se druga istovremeno hladila, pri čemu je bilo potrebno postići razliku od minimalno 20°C u temperaturi na dvije suprotne strane uzorka. Cijelo vrijeme trajanja ispitivanja postavljeni senzori mjere temperature na suprotnim stranama. Istovremeno na jednoj strani senzor toplinskog toka mjeri količinu toplinske energije u  $W/m^2$  koja je prošla kroz uzorak s toplije prema hladnijoj strani.

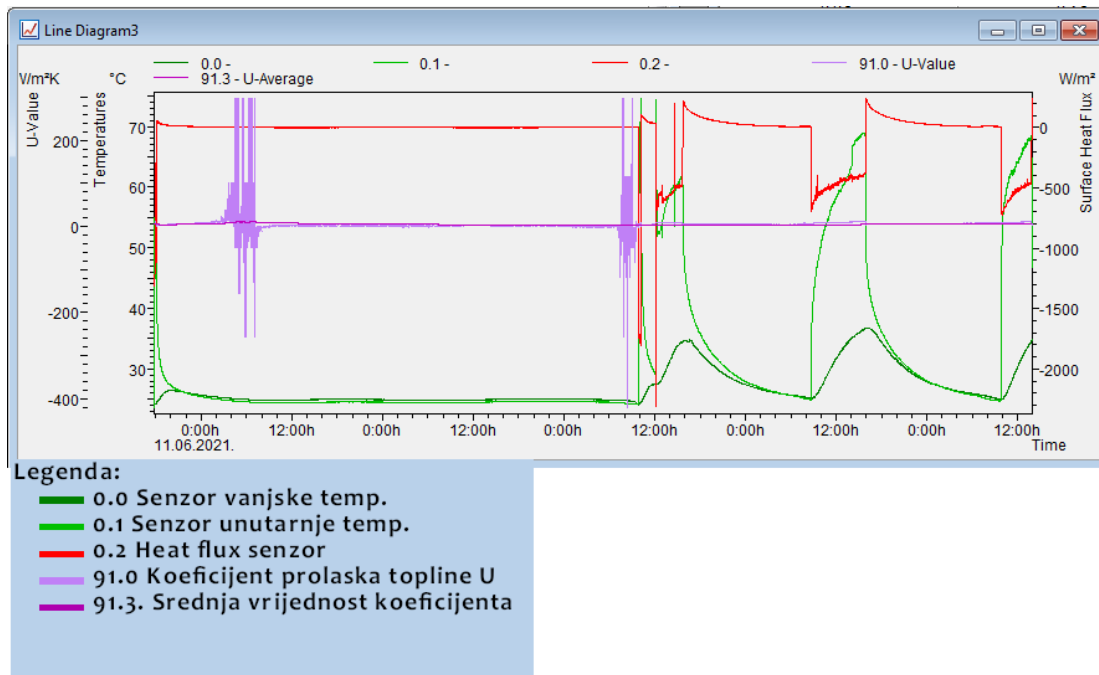
Iz poznate količine toplinskog toka i debljine uzorka kroz koji je toplina prošla, te razlici u temperaturi koja je uzrokovala toplinski tok, može se izračunati toplinska vodljivost materijala.



Slika 23: Priprema uzorka i položaj postavljenih senzora

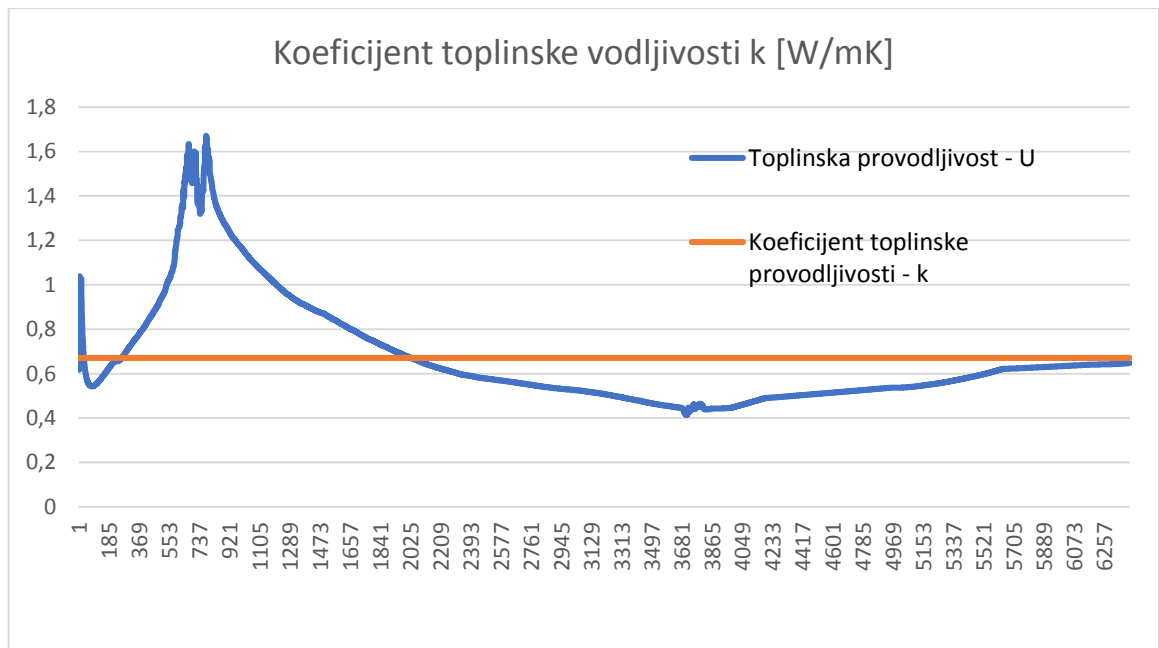
Kako uzorak nije u idealnim izoliranim uvjetima, ovdje je zapravo simulirano in-situ ispitivanje, te se uzorak u ciklusima zagrijavao i slobodno hladio, što odgovara ciklusima izmjene dnevne i noćne temperature. Zbog razlike u temperaturi koja zbog toga nije stalna potrebno je osigurati da ispitivanje traje što duže, minimalno 72 sata, kako bi se dobio što veći raspon podataka iz kojih se može pouzdano utvrditi toplinska vodljivost. Važno je naglasiti da je ova metoda približna zbog uvjeta koji nisu idealni, te da je ispitivanje trajalo ukupno 116 sati kako bi se generirao što veći raspon podataka. Rezultati ispitivanja su dani u obliku zajedničkog grafa na kojem su prikazane mjerene temperature na dvije strane uzorka, toplinski tok, te izračunata vrijednost toplinske vodljivosti, a prikazani su na grafu na slici 24.





Slika 24: Graf rezultata ispitivanja toplinske provodljivosti

Izračunata srednja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti iznosi 0,67 W/mK, a odnos s toplinskom provodljivosti prikazan je na grafu na slici 25. Ovaj koeficijent najviše ovisi o vrsti materijala, odnosno o njegovoj gustoći, sastavu, vlažnosti i poroznosti [20]. Koeficijent toplinske provodljivosti je odnos brzine prolaska topline kroz materijal i brzine promjene temperature. Prema dostupnim podacima u literaturi [20, 21] izračunati koeficijent toplinske provodljivosti nalazi se ispod referentne vrijednosti za beton, odnosno ispod raspona od 0,9 W/mK do 1,0 W/mK.

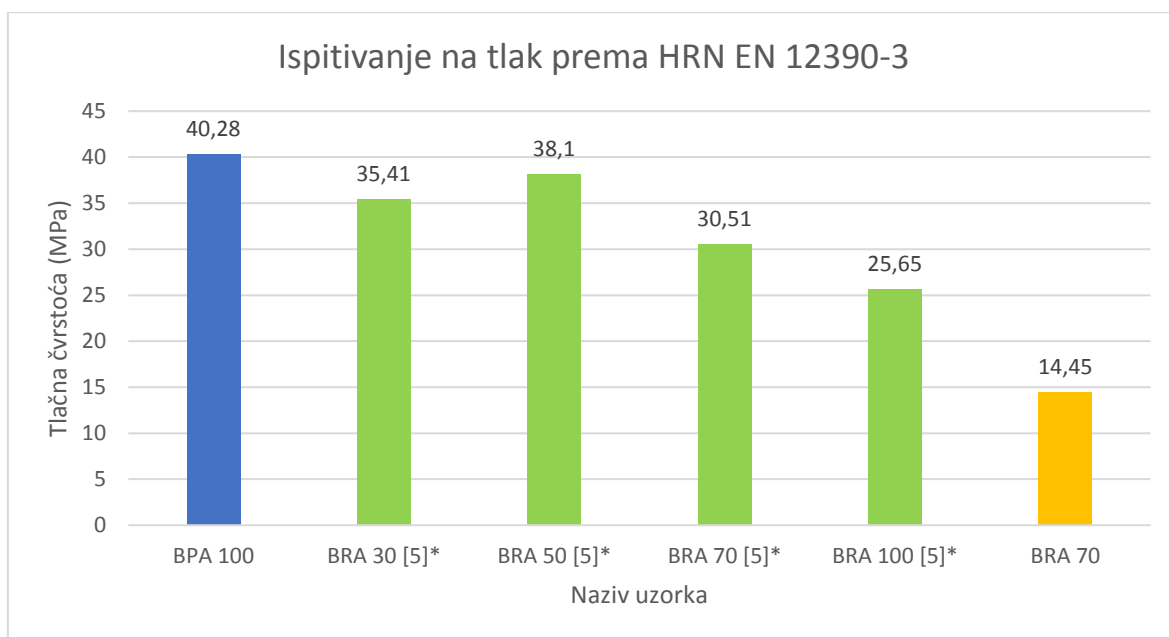


Slika 25: Graf koeficijenta toplinske provodljivosti "k" i toplinske provodljivosti "U"

## 6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja provedenih u eksperimentalnom dijelu ovog rada prilično su očekivani i podudaraju se s podacima dostupnim u literaturi [3, 4, 5, 9, 13]. Dodavanjem recikliranog agregata slabijih svojstava izravno se utječe na svojstvo čvrstoće očvrstnulog betona, koje je prema svim autorima osnovno svojstvo betona. Slabija svojstva recikliranog agregata pripisuju se prisutnosti raznih nečistoća na površini zrna agregata, ali i ostataka organskog veziva.

Analizom dobivenih rezultata ispitivanja i usporedbom s dostupnim istraživanjem [5] vrlo je lako uočiti isti trend smanjenja osnovnog svojstva betona, tlačne čvrstoće, s obzirom na udio dodanog recikliranog agregata. Trend smanjenja prikazan je dijagramom na slici 26. Konkretno se svojstva betona izrađenog s recikliranim betonskim agregatom, prikazana na dijagramu zelenom bojom, smanjuju u manjem postotku od svojstava betona s recikliranim asfaltom kao agregatom, prikazana narančastom. Projektirani i izrađeni uzorci referentnog betona, klase čvrstoće C30/37, odstupaju u malom postotku, što se može pripisati razlici u kvaliteti i svojstvima dostupnog prirodnog agregata, te načinu spravljanja. Razlike u referentnim betonima nisu velike, a ispitivanja uzoraka betona u oba rada nalaze se u granicama dopuštenih čvrstoća.



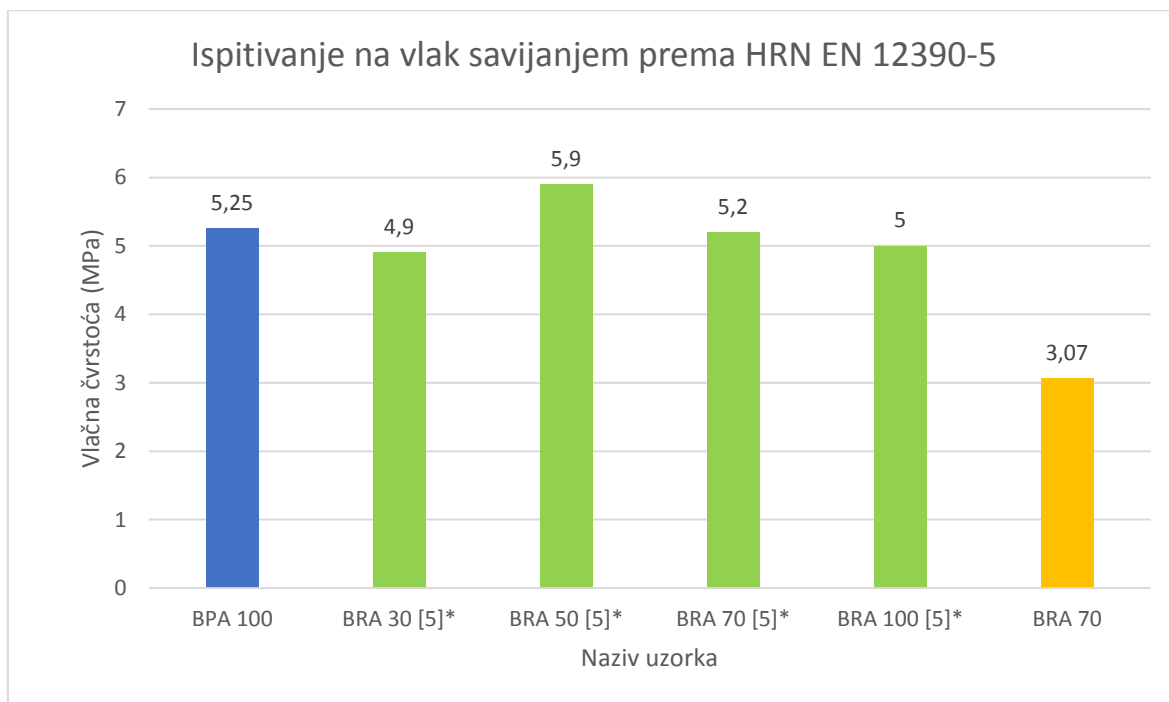
Slika 26: Prikaz rezultata ispitivanja na tlak

Smanjenje tlačne čvrstoće betona u mješavini BRA 70 ispitivane u ovom radu iznosi 64%, dok se smanjenje čvrstoće u mješavini gdje se koristi reciklirani beton kao agregat, kreće oko iznosa od 25%. Utjecaj agregata na gustoću betona primjetan je zbog prisutnosti drugih materijala na površini čestica agregata, odnosno zahvaćenog zraka u porama takvih materijala.

Reciklirani agregati u pravilu imaju nešto manju gustoću, pa se vrijednosti kod betona izrađenih s recikliranim asfaltom kreću oko  $2186,95 \text{ kg/m}^3$ , dok one kod betona s agregatom od recikliranog betona iznose  $2253,77 \text{ kg/m}^3$ . Ovi rezultati ukazuju na to da su betoni proizvedeni s recikliranim agregatom nešto lakši u odnosu na običan beton, a gledano kroz postotke beton s recikliranim asfaltom lakši je od običnog za oko 7%. Razlika u volumenskoj masi dva promatrana betona s recikliranim agregatima je 3% na stranu lakšeg betona s recikliranim asfaltom.

Utjecaj recikliranog asfalta na svojstvo vlačne čvrstoće betona manji je nego utjecaj na tlačnu čvrstoću. Rezultati ispitivanja govore o smanjenju u iznosu od 41,5% vlačne čvrstoće savijanjem u odnosu na referentni beton.

Dostupni podatci za beton izrađen sa 70% zamjenom prirodnog agregata recikliranim betonskim agregatom govore o smanjenju vlačne čvrstoće za 18% [5], što je prihvatljivije od rezultata koji se pojavljuje primjenom recikliranog asfalta. Usporedba je prikazana dijagramom na slici 27.



Slika 27: Prikaz rezultata ispitivanja na vlak savijanjem

Prema literaturi [12] čvrstoća običnog nearmiranog betona na vlak ili smicanje je otprilike 10 puta manja od čvrstoće na tlak, što se kod referentnog uzorka betona potvrdilo. Razlika između vlačne i tlačne čvrstoće je nešto manja od osam puta. Kod uzoraka betona s recikliranim agregatom ovaj odnos je manji pri ispitivanju na vlak savijanjem i rezultat je oko pet puta manja vlačna čvrstoća. Pri ispitivanju na vlak cijepanjem ova vrijednost doseže osam puta manju vlačnu čvrstoću od tlačne.

Analiza ispitivanja vodonepropusnosti betona provedena je ispitivanjem dubine prodora vode pod tlakom. Razredi vodonepropusnosti betona definirani su prema HRN 1128:2007 Beton – Smjernice za primjenu norme HRN EN 206-1:2006, a prikazani su u tablici 5.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti

Razred vodonepropusnosti	Dopušten najveći prodor vode [mm]
<b>VDP 1</b>	50
<b>VDP 2</b>	30
<b>VDP 3</b>	15

Rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci betonske mješavine BRA 70 ne zadovoljavaju uvjet vodonepropusnosti, zbog toga jer srednja vrijednosti prodora vode u uzorak iznosi 55,6 mm. Referentna mješavina zadovoljila je uvjet vodonepropusnosti, no ispitan je samo jedan uzorak, te stoga rezultati nisu relevantni.

Koeficijent toplinske provodljivosti mješavine BRA 70 iznosi 0,67 W/mK i nalazi se ispod referentne veličine koeficijenta za normalni beton. Analizom prikupljenih podataka kroz eksperimentalni dio ovog rada utvrđena je manja gustoća i veći udio pora u mješavini betona BRA 70 u odnosu na referentni beton. Koeficijent toplinske provodljivosti je veće vrijednosti kod gušćih materijala s manjom poroznošću, dok je kod materijala manje gustoće i veće poroznosti ovaj koeficijent manje vrijednosti, što je prikazano i ovim ispitivanjem.

## 7. ZAKLJUČAK

Iz prikazanih rezultata eksperimentalnog ispitivanja svojstava svježeg i očvrsnulog betona s prirodnim agregatom i betona s udjelom recikliranog agregata kao zamjenom za prirodni agregat, može se zaključiti:

- tlačna čvrstoća betona se smanjuje povećanjem udjela agregata od recikliranog asfalta
- volumenska masa betona s recikliranim agregatom manja je od mase betona s prirodnim drobljenim agregatom zbog prisutnosti drugih materijala poput organskog veziva na česticama recikliranog agregata
- vodonepropusnost betona s recikliranim agregatom se znatno razlikuje od referentne mješavine, odnosno pojavilo se veliko smanjenje vodonepropusnosti

Uzorci betonske mješavine BRA 70 pokazuju veliko pogoršanje svojstava očvrsnulog betona u odnosu na referentni, te se tako pokazuje da betoni s ovim omjerom zamjene prirodnog agregata recikliranim nisu dobro rješenje. Prethodna ispitivanja [3, 4, 9] navode zamjenu prirodnog agregata u udjelu do 40%, a ovisno o traženim svojstvima očvrsnulog betona predlažu se aditivi koji poboljšavaju tražena svojstva.

Upotreba takvih betona, do 40% zamjene agregata, može zadovoljiti tražene uvjete definirane u knjizi Općih tehničkih uvjeta [15] za izradu temelja opreme ceste, jer se u njima zahtjeva klasa čvrstoće betona C 16/20. Korištenje recikliranih agregata može u određenoj mjeri smanjiti troškove poslovanja tvrtke kroz ponovnu upotrebu i manju potrebu za skladištenjem ove vrste otpada. Kako bi se odredio optimalni udio zamjene prirodnog agregata recikliranim asfaltom, istraživanja je potrebno ciljano provoditi za zamjene manje ili jednake udjelu od 40%.

## LITERATURA

- [1] Horvatić, Katarina, *Gospodarenje građevinskim otpadom u Republici Hrvatskoj*, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2018.
- [2] Keller, Miroslav: *Stari asfalt – resurs, a ne otpad*, <https://www.hgk.hr/documents/hgk-asfalti5cf11e6054f83.pdf>, datum pristupa 19. travanj 2021.g.
- [3] S.M. Abraham, G.D.R.N. Ransinchung, *Strength and permation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates*, *Construction and Building Materials* 167: 700-706, 2018.
- [4] M. Tia, N. Hossiney, Y-M. Sue, Y. Chen, T.A. Do, *Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Concrete Pavement Slabs*. University of Florida, Gainesville, 2012.
- [5] S. Mrakovčić, K. Macan, T. Žuža, *Concrete with Recycled Concrete Aggregate*, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta u Rijeci*, **XVI**: 333-343, 2014.
- [6] European Asphalt Pavement Association, *Asphalt in Figures 2019*, EAPA, Brusseles, 2020.
- [7] S. Mrakovčić, *Građevinski materijali, predavanja 2018/2019.g*
- [8] <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=9763> ; pristup 01.05.2021.
- [9] C.T. Griffiths, J.M. Krstulovich, *Utilization of Recycled Materials in Illionis Highway Construction*, Illinois Department of Transportation, Springfield, 2002.
- [10] <https://www.scribd.com/document/508358184/Teorija-betona-1> ; pristup 18.05.2021.
- [11] D. Vouk, D. Nakić, N. Štirmer, M. Serdar, A. Baričević, *Reuse of Sewage Sludge in Concrete Industry – from Microstructure to Innovative Construction Products*, Građevinski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [12] Ž. Smolčić, *Betonske i zidane konstrukcije, predavanja 2020/2021.g*



- [13] S.M. Abraham, G.D.R.N. Ransinchung, *Laboratory Research on Reclaimed Asphalt Pavement-Inclusive Cementitious Mixtures*, ACI Materials Journal, Michigan, 2020.
- [14] M. Božić, D. Kopic, J. Gršetić, N. Marold, *Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2020.*, Prometis d.o.o., Zagreb, 2021.
- [15] Z. Duplančić, A. Divić, S. Kljajić, D. Stamać, *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama – Knjiga VI – Oprema ceste*, HC – HAC, Zagreb, 2001.
- [16] S. Mrakovčić, Građevinski materijali, materijali za vježbe 2018/2019.g
- [17] J. Radić i suradnici, *Betonske konstrukcije: priručnik*, Hrvatska sveučilišna naklada Sveučilište u Zagrebu - Građevinski fakultet, Zagreb, 2006.
- [18] <https://strabag.hr/>; pristup 16.04.2021.
- [19] <https://www.rubblemaster.com/en/user-reports/recycling/asphalt/great-rm-crusher-performance-in-finland/>; pristup 01.05.2021.
- [20] D. Jakša, *Određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti EPS betona*, Završni rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2020.
- [21] HRN EN 12390-6:2010 Ispitivanje očvrsloga betona - 6. dio: Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitnih uzoraka (EN 12390-6:2009)