Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona

Brnas, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:820407

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Brnas

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Ivan Brnas

Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona

Diplomski rad

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Ivan Brnas

BROJ INDEKSA: 551/2014

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali I

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti svojstva poroznog betona, kao i dosadašnja ispitivanja i uporabu ove vrste betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke betona koristeći sljedeće frakcije agregata: 8 – 16; 8 – 11,2; 11,2 – 16 i 16 – 22,4 mm. Svi uzorci trebaju imati isti vodocementni faktor, a količina cementa varira od 250 – 400 kg/m^3. Uzorci betona se ugrađuju na 3 načina: zbijanje čeličnom šipkom, drvenom letvom i vibriranjem. Na uzorcima svježeg betona potrebno je ispitati konzistenciju metodom slijeganja i "metodom kuglice", a na uzorcima očvrslog betona poroznost, propusnost, vlačnu čvrstoću metodom cijepanja te čvrstoću na pritisak. Za određivanje propusnosti betona treba koristiti dvije metode: metodu padajuće razine stupca vode i metodu stalne razine stupca vode. Od dvije najbolje recepture, prema dobivenim rezultatima propusnosti, potrebno je napraviti probne ploče dimenzija 80×80×15 cm na 3 različite podloge: zemljanu, travnatu i šljunčanu. Za odabrane recepture potrebno je odrediti i čvrstoću na savijanje. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 01.03.2016.

Voditelj Diplomskog rada:

Izv. prof. dr. sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Prof. dr. sc. Ivica Boko

Z A H V A L A

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Sandri Juradin na vodstvu, brojnim stručnim savjetima i izuzetnoj suradnji tijekom izrade rada.

Zahvaljujem svojoj zaručnici, prijateljici i kolegici na velikoj potpori tijekom izrade ovog rada te što je svojim prisustvom uljepšala moje studentsko razdoblje.

Najveće hvala mojim sestrama i roditeljima na iskazanoj ljubavi i omogućavanju studiranja izvan rodnog grada. Bez vas ovo postignuće ne bi bilo moguće.

Utjecaj sastava i načina ugradnje na svojstva poroznih betona

Sažetak:

Porozni beton ima glavnu namjenu da vodu s betonirane površine propušta u donje slojeve. Odlike kao što su smanjenje oborinskog otjecanja, poboljšanje kvalitete oborinskih voda, prihranjivanje rezervi podzemnih voda i slično, čine porozni beton održivim građevinskim materijalom. Cilj ovog istraživanja je ispitati kako sastav i način ugradnje utječu na svojstva poroznih betona. Na temelju dobivenih rezultata na prethodnim ispitivanjima poroznih betona potpuno je izostavljena sitna frakcija agregata. Izrađeno je 8 mješavina poroznog betona varirajući udjele, veličine i porijeklo agregata, sadržaj cementa te način ugradnje uzoraka. Ispitana su i analizirana sljedeća svojstva: konzistencija, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća te vlačna čvrstoća cijepanjem. Također, ugrađene su 4 probne ploče na kojima je ispitana propusnost i čvrstoća na savijanje.

Ključne riječi:

Porozni beton, sastav agregata, način ugradnje, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća

The impact of composition and method of installation on the properties of porous concrete

Abstract:

The main purpose of porous concrete is to leak the water from the paved surface to the lower layers. Features like reduction of runoff, improvement of quality of the rainwater, recharge of groundwater reserves etc., make the porous concrete sustainable construction material. The aim of this study is to examine how composition and method of installation affect on the properties of porous concrete. Based on the results of previous test of porous concrete there is completely absent of the tiny fraction of aggregate. There are made 8 mixtures of the porous concrete where share, size and source of the aggregate, cement content and method of installation are varied. The following properties are tested and analyzed: consistency, porosity, permeability, compressive strength and split tensile strength. Also, there are built in 4 test boards on which permeability and flexural strength are tested.

Keywords:

Porous concrete, composition of aggregate, method of installation, porosity, permeability, compressive strength, tensile strength

SADRŽAJ

1 UVOD 1

1.1 OPĆENITO O BETONU 1

1.2 ZELENA GRADNJA 1

1.2.1 Beton kao održivi materijal 2

1.3 POROZNI BETON 4

1.3.1 Općenito o poroznom betonu 4

2 POROZNI, BETONSKI KOLNIK 5

2.1 UVOD 5

2.1.1 Primjena 6

2.1.2 Svojstva 8

2.1.3 Prednosti za okoliš 8

2.2 TEHNIČKA SVOJSTVA 11

2.2.1 Svojstva u svježem stanju 11

2.2.2 Svojstva u očvrslom stanju 11

2.2.2.1 Gustoća i poroznost 11

2.2.2.2 Propusnost 12

2.2.2.3 Tlačna čvrstoća 12

2.2.2.4 Savojna čvrstoća 12

2.2.2.5 Skupljanje 12

2.2.3 Izdržljivost 13

2.2.3.1 Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje 13

2.2.3.2 Otpornost na sulfate 13

2.2.3.3 Otpornost na abraziju 13

2.3 OMJER MATERIJALA U MJEŠAVINI 14

2.3.1 Materijali 14

2.3.2 Cementni materijali 14

2.3.3 Agregat 14

2.3.4 Voda 14

2.3.5 Dodaci 15

2.4 PROJEKTIRANJE 15

2.4.1 Osnove projektiranja 15

2.4.2 Hidrološko razmatranje projektiranja 15

2.4.2.1 Oborine 16

2.4.3 Hidrološko projektiranje kolnika 16

2.4.3.1 Propusnost 16

2.4.3.2 Kapacitet skladištenja 16

2.4.3.3 Tamponski sloj i posteljica 18

2.4.4 Strukturalno projektiranje kolnika 19
2.4.4.1 Tamponski sloj i posteljica 19
2.4.4.2 Gline i ekspanzivna tla 20
2.4.4.3 Prometno opterećenje 20
2.4.4.4 Svojstva materijala koja se odnose na projekiranje kolnika 20
2.5 POSTAVLJANJE KOLNIKA 21
2.5.1 Priprema posteljice i tamponskog sloja 21
2.5.2 Doziranje materijala i miješanje 21
2.5.3 Transport poroznog betona 21
2.5.4 Ugradnja i zbijanje 22
2.5.5 Oblikovanje dilatacijskih reški 23
2.5.6 Završna obrada 24
2.5.7 Njega i zaštita betona 24
2.5.8 Puštanje u promet 25
2.6 KONTROLA I ODRŽAVANJE 25
2.6.1 Kontrola i ispitivanje 25
2.6.2 Održavanje 25
3 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA 27
3.1 ISTRAŽIVANJA O SASTAVU POROZNOG BETONA ZA PRIMJENU KOD KOLNIKA
(M. UMA MAGUESVARI, V. L. NARASIMHA) 27
3.1.1 Uvod 27
3.1.2 Materijali i svojstva 27
3.1.3 Udio materijala u mješavini 28
3.1.4 Priprema i ispitivanje uzoraka 29
3.1.4.1 Ukupne šupljine u agregatima 29
3.1.4.2 Tlačna čvrstoća 29
3.1.4.3 Savojna čvrstoća 29
3.1.4.4 Vlačna čvrstoća cijepanjem 29
3.1.4.5 Otpornost na abraziju 29
3.1.4.6 Propusnost 30
3.1.5 Rezultati i rasprava 30
3.1.5.1 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu na temelju koeficijenta oblika zrna agregata 30
3.1.5.2 Karakteristična čvrstoća 31
3.1.5.3 Propusnost 34
3.1.5.4 Otpornost na abraziju 35
3.1.5.5 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu i propusnost poroznog betona 35
3.1.5.6 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu i karakteristična čvrstoća 36
3.1.5.7 Optimalna mješavina za propusnost i tlačnu čvrstoću 37
3.1.6 Zaključak 37

3.2 GRANULOMETRIJA AGREGATA POROZNOG BETONA ZA PROPUSNU, CESTOVNU PODLOGU (Y. ZHIFENG, M. WEI, S. WEIGUO, Z. MINGKAI) ... 38
3.2.1 Uvod ... *38*
3.2.2 Materijali ... *38*
3.2.3 Priprema uzoraka ... *40*
3.2.3.1 Metoda ispitivanja ... 40
3.2.4 Rezultati istraživanja i rasprava ... *41*
3.2.4.1 Utjecaj sitnog agregata na svojstva poroznog betona ... 41
3.2.4.2 Utjecaj maksimalne veličine zrna agregata na svojstva betona ... 42
3.2.4.3 Utjecaj agregata frakcije 4,75 – 9,5 mm na svojstva poroznog betona ... 43
3.2.4.4 Optimalna granulacija poroznog betona ... 44
3.2.5 Zaključak ... *45*
3.3 STUDIJA O SUŽIVOTU POROZNOG, EKOLOŠKOG BETONA S BILJKAMA (HONGZHU QUAN) ... 46
3.3.1 Uvod ... *46*
3.3.2 Materijali ... *46*
3.3.2.1 Udio materijala u mješavini ... 46
3.3.2.2 Eksperimentalni postupci ... 46
3.3.3 Metode ispitivanja ... *47*
3.3.3.1 Ispitivanje poroznog betona ... 47
3.3.3.2 Vegetacija ... 47
3.3.4 Rezultati i rasprava ... *47*
3.3.5 Zaključak ... *52*
3.4 UTJECAJ RAZLIČITIH RAZREDA DROBLJENOG AGREGATA NA SVOJSTVA POROZNOG BETONA (I. RADELJA) ... 53
3.4.1 Uvod ... *53*
3.4.2 Eksperimentalni dio ispitivanja ... *53*
3.4.2.1 Uvod u eksperimentalni dio rada ... 53
3.4.2.2 Korišteni materijali ... 54
3.4.2.3 Izrada mješavina poroznog betona ... 54
3.4.3 Rezultati i analiza rezultata poroznog betona ... *56*
3.4.3.1 Ispitivanje poroznosti ... 56
3.4.3.2 Ispitivanje propusnosti ... 58
3.4.3.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće ... 59
3.4.3.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem ... 59
3.4.4 Zaključak ... *60*
4 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA ... 61
4.1 UVODNI DIO EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA ... 61
4.2 KORIŠTENI MATERIJALI ... 62
4.2.1 Cement ... *63*
4.2.1.1 Karakteristike ... 63

4.2.1.2 Preporuke za primjenu 63
4.2.1.3 Prikladnost 63
4.2.1.4 Transport i skladištenje 64
4.2.2 Agregat 65
4.2.3 Voda 70
4.3 IZRADA MJEŠAVINA POROZNOG BETONA 70
4.3.1 Proračun sastava poroznog betona 70
4.3.2 Ugradnja poroznog betona u kalupe oblika kocke i valjka 76
4.4 METODE ISPITIVANJA POROZNOG BETONA 79
4.4.1 Ispitivanje konzistencije 79
4.4.1.1 Metoda slijeganja 79
4.4.1.2 Metoda oblikovanja kuglice 80
4.4.2 Ispitivanje poroznosti 81
4.4.3 Ispitivanje propusnosti 82
4.4.3.1 Metoda stalne razine stupca vode 82
4.4.3.2 Metoda padajuće razine stupca vode 83
4.4.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće 85
4.4.5 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem 86
4.5 IZRADA MJEŠAVINA PROBNIH POROZNO – BETONSKIH PLOČA 87
4.5.1 Proračun debljine probnih ploča 87
4.5.2 Proračun sastava poroznog betona probnih ploča 90
4.5.3 Izrada probnih porozno-betonskih ploča 93
4.5.4 Ugradnja poroznog betona u kalupe oblika prizme 95
4.6 METODE ISPITIVANJA POROZNO – BETONSKIH PLOČA 96
4.6.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće pri savijanju 96
4.6.2 Ispitivanje brzine infiltracije probnih ploča 97
5 REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA 100
5.1 REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA U SVJEŽEM STANJU 100
5.1.1 Rezultati ispitivanja konzistencije metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice 100
5.2 REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA U OČVRSLOM STANJU 104
5.2.1 Rezultati ispitivanja poroznosti 104
5.2.2 Rezultati ispitivanja propusnosti 115
5.2.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće 118
5.2.4 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem 120
5.2.5 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju 122
5.2.6 Rezultati ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča 122
5.3 OVISNOSTI IZMEĐU ISPITANIH SVOJSTAVA POROZNOG BETONA 125
5.3.1 Veza između poroznosti i propusnosti 125

5.3.2 Veza između tlačne čvrstoće i poroznosti 126
5.3.3 Veza između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti 126
5.3.4 Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem 127
5.3.5 Veza između vodocementnog faktora i poroznosti 127

6 ZAKLJUČAK 128

7 LITERATURA 131

1 UVOD

1.1 Općenito o betonu

Beton je mnogokomponentni, polidisperzni, građevinski materijal, sastavljen od pijeska i krupnog agregata, međusobno vezanih cementnim kamenom, nastalim hidratacijom i očvršćivanjem cementa kao veziva. Beton predstavlja najviše upotrebljavan građevni proizvod, od mostova do zgrada, od hidrotehničkih i prometnih do industrijskih objekata. Od jednostavnih betona iz rimskih vremena, tehnologija betona se stalno razvijala i danas su na tržištu dostupne razne varijante ovog materijala. [1]

Razlozi za široku upotrebu betona vrlo su očiti – dostupni su, jeftiniji u odnosu na druge materijale, otporni na različite vremenske utjecaje i kao građevni materijal zadovoljava visoke tehničke i relativno niske tehnološke zahtjeve. [2]

1.2 Zelena gradnja

Zelena gradnja odnosi se na cjelovit, holistički proces osmišljavanja, izvedbe, održavanja, korištenja, upravljanja i obnove objekata temeljen na principu održivosti, a međunarodni certifikati pri ocjenjivanju stupnja njihove „zelenosti“ promatraju iznimno velik broj aspekata, od efikasnog iskorištenja građevinskog zemljišta, zbrinjavanja građevinskog otpada, recikliranja materijala, povezanost sa susjedstvom i servisima dostupnim korisnicima – posebno prometni. Također, certificiranjem se prate način i količina te efikasnost potrošnje voda, rješenja vezana za krajobraz i ambijent interijera, odabir i način upotrebe ekoloških materijala, emisija stakleničkih plinova iz objekta, energetska učinkovitost, korištenje obnovljivih izvora energije, odnosno u cjelini – funkcionalnost objekta tijekom čitavog životnog ciklusa. [3]

Zelena gradnja podrazumijeva iznalaženje načina za efikasno upravljanje vodnim resursima i učinkovito upravljanje pitkim i otpadnim vodama, sakupljanjem vode za sigurnu uporabu u zatvorenim prostorima na inovativan način i općenito umanjujući korištenje vode.

S obzirom na utjecaj izgrađenog okoliša na oborinske vode i sustav odvodnje, zelena gradnja osigurava primjenu tehnologija za najzdraviji odnos voda, tla i cjelokupnog okolišnog sustava. [4]

Globalno zatopljenje je neupitna činjenica i znak našeg vremena, a efekti negativnih klimatskih promjena izazvani ljudskom aktivnošću zbog povećane emisije stakleničkih plinova i potrošnje prirodnih resursa čije zalihe nisu neograničene, snažno utječu na prirodu i stanovništvo diljem svijeta.

S obzirom da građevinska industrija ima veliki utjecaj na prirodni okoliš, planiranje, projektiranje i izgradnja zelenih objekata je način da se istovremeno zaštite ljudsko zdravlje i okoliš. [5]

1.2.1 Beton kao održivi materijal

Kao globalno najraširenij građevinski materijal beton mora igrati važnu ulogu u svakoj uspješnoj tranziciji prema istinski održivom društvu. Bilo da se radi o primjeni generacije čiste i obnovljive energije, razvoju učinkovitije infrastrukture, gradnji novih prometnica ili održivih zgrada (uključujući i stambene zgrade) – sve ove aktivnosti trebaju beton.

Beton je integralni dio naše globalne budućnosti koji će omogućiti gradnju infrastrukture potrebne za razvoj društava u svjetlu porasta potrebe za podizanjem životnog standarda, naročito u zemljama u razvoju.

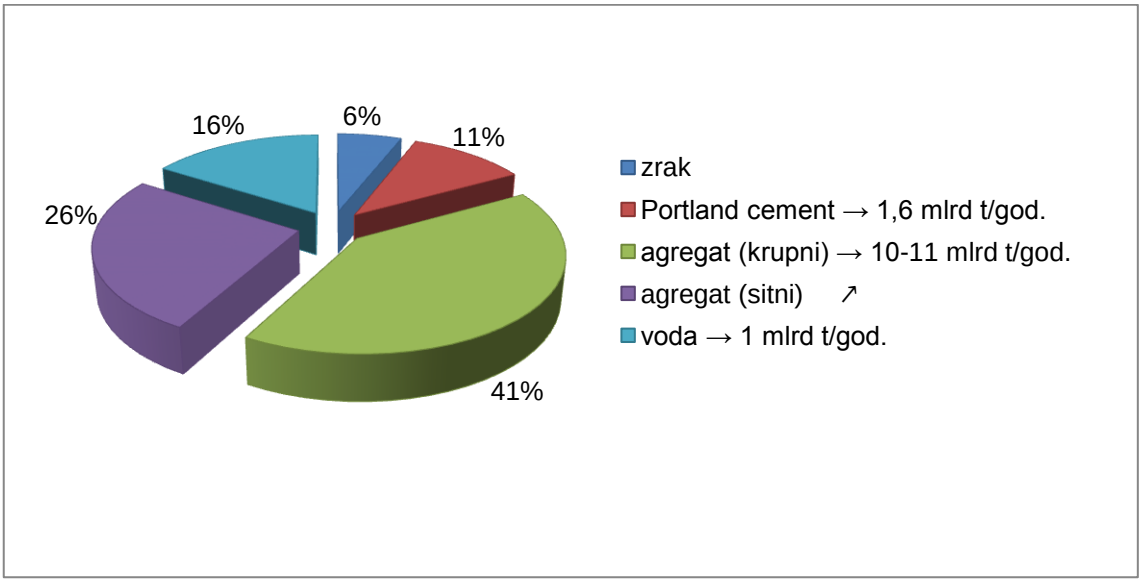
Stručnjaci procjenjuju da će se, u uvjetima standardne proizvodnje, do 2050. godine potrošnja betona udvostručiti od procijenjenih 7,5 milijardi kubnih metara upotrijebljenih u 2006. godini. Studije pokazuju da bi stroga ograničenja emisija CO_2 mogla povećati potražnju za betonom od 10 do 15% do 2050.

Prednosti za okoliš koje proizlaze iz korištenja betona tijekom životnog vijeka zgrade pretežu nad utjecajima koji proizlaze iz njegove proizvodnje i ulaznih sirovina. Ukoliko su dobro projektirane i izgrađene, betonske zgrade su izdržljive, traju desetljećima s minimalnim ulaganjima u održavanje te mogu izdržati nalete uragana, poplave, požare pa čak i potrese. Mogu također biti i energetski efikasne ukoliko imaju betonski plašt koji iskorištava prednosti toplinske mase betona, odnosno njegove sposobnosti da zadržava toplinu te karakteristike toplinske izolacije (sposobnosti da smanji protok topline).

Karakteristike produžene trajnosti i niske potrebe za održavanjem mogu se primijeniti i na izgradnju i održavanje betonskih prometnica. S životnim ciklusom od preko 30 godina, betonske prometnice nude prednosti, kao što su niže potrebe za održavanjem i niže količine potrošenog goriva u usporedbi s asfaltnim cestama, uslijed manjeg otpora vrtnji kotača. Još jedan važan čimbenik jest da beton ima svijetlu boju i da reflektira sunčevu svjetlost, što pomaže u održavanju nižih temperatura u urbanim područjima.

Generalno, beton je takvih izvedbenih karakteristika koje ga čine pogodnim za sve vrste građevina i infrastrukturnih projekata, s naglaskom na izdržljivost i smanjenje korištenja energije te okolišnog utjecaja. Tijekom svog životnog vijeka te u fazi rušenja, beton ponovno skuplja značajne razine CO_2 koje ostaju usađene u reciklirane agregate ugrađene u novosagrađene betonske strukture. [6]

Slika 1.1 prikazuje volumni udio i godišnju potrošnju pojedinih sastojaka betona u svijetu.



Slika 1.1 Volumni udio pojedinih sastojaka u betonu i njihova godišnja potrošnja u svijetu [7]

1.3 Porozni beton

1.3.1 Općenito o poroznom betonu

Porozni beton (poznat pod terminom procjedni ili propusni beton), kao što mu i sam naziv govori, ima glavnu namjenu da vodu s betonirane površine propušta u donje slojeve. Zbog svojih karakteristika (otvorene strukture i retencijskog učinka) omogućava da se racionalnije dimenzionira ili potpuno eliminira sustav za odvodnju površinske (oborinske) vode.

Zbog svoje otvorene strukture, kao i mogućnosti kombiniranja različitih tipova agregata i boja u betonu, propusni beton je kvalitetno rješenje i za arhitektonske izazove.

Primjena propusnog betona je vrlo široka. Najčešće se upotrebljava za izradu:

- pločnika i pješačkih staza
- kolničkih prilaza
- parkirališta
- trgova
- staza i puteva u prirodnom okruženju
- retencijskih polja
- akustičnih panela (bukobrani)
- područja uz plaže i bazene
- dekorativnih betona. [8]

2 POROZNI, BETONSKI KOLNIK

2.1 Uvod

Porozni, betonski kolnik je jedinstven i učinkovit način zadovoljenja rastućih zahtjeva zaštite okoliša. Zadržavanjem kišnice i njenim propuštanjem u tlo, porozni beton ima ulogu prihranjivanja podzemne vode i smanjenja oborinskog otjecanja. Ova tehnologija kolnika potiče učinkovitije korištenje zemljišta eliminirajući potrebu za retencijama, odvodnim kanalima i drugim uređajima za upravljanje oborinskim vodama. Na ovaj način propusni beton smanjuje ukupne troškove projekta.

Kod ove vrste betona, kontrolirana količina vode i cementnih materijala se koristi za izradu paste koja tvori gustu ovojnicu oko zrna agregata. Mješavina poroznog betona sadrži malo ili nimalo pijeska te se stvara znatna količina pora. Korištenje dovoljne količine paste za oblaganje i vezanje zrna agregata stvara sustav veoma propusnih, međusobno povezanih šupljina koje brzo odvode vodu. Sadržaj šupljina u očvrslom betonu se kreće od 15 do 25%, a propusnost vode kroz porozni beton je oko 0,34 cm/s, što je 200 l/m^2/min, iako može biti puno veća. Nizak sadržaj morta i visoka poroznost smanjuju čvrstoću poroznog betona u usporedbi s konvencionalnim betonskim mješavinama. Porozni beton ima puno područja primjene, ali njegova primarna upotreba je kod kolnika.

2.1.1 Primjena

Velika brzina procjeđivanja vode kroz porozni, betonski kolnik omogućava protjecanje oborina u tlo, smanjenje oborinskog otjecanja i prihranjivanje podzemne vode te podržava zelenu gradnju i pruža rješenja kod građevina osjetljivih na ekološka pitanja. Ova jedinstvena sposobnost poroznog betona ima mnoge prednosti za okoliš. Kontrolira kišnicu na licu mjesta i rješava pitanje oborinskog otjecanja. Od posebnog je interesa u urbanim područjima i na područjima gdje je zemlja jako skupa. Ovisno o lokalnim propisima i okolini, porozni, betonski kolnik i tamponski sloj mogu osigurati dovoljan kapacitet za pohranu vode i nema potrebe za retencijama, odvodnim kanalima i drugim strategijama za upravljanje oborinskim i procjednim vodama. Jedan od faktora koji je doveo do ponovnog interesa za poroznim betonom je i učinkovitije korištenje zemljišta.

Svojstvo visoke propusnosti poroznog betona se koristi pri odvodnji kod hidrotehničkih objekata, parkirališta, teniskih terena, staklenika i poroznih, podložnih slojeva ispod teško opterećenih kolnika. Visoka poroznost rezultira dobrim termoizolacijskim i akustičnim svojstvima. Porozni beton se primjenjuje kod zidova dvoetažnih kuća, nosivih zidova visokih zgrada (do 10 katova), ispuna ploča za visoke građevine, morskih regulacijskih pera, cesta i parkirališta.

Na slici 2.1 su prikazani primjeri primjene poroznog betona.



Slika 2.1 Primjeri primjene poroznog betona [9]

2.1.2 Svojstva

Nakon postavljanja, porozni beton ima ugodnu površinsku teksturu. Mali sadržaj morta i malo ili nimalo sitnog agregata daju mješavinu s veoma malim slijeganjem i konzistencijom koja je kruća od većine konvencionalnih mješavina betona. Unatoč visokom sadržaju šupljina, pravilno postavljeni porozni, betonski kolnici mogu postići tlačne čvrstoće veće od 20,5 MPa i savojne čvrstoće preko 3,5 MPa. Ova čvrstoća je više nego dovoljna za većinu kolnika malog prometnog opterećenja, uključujući visoka osovinska opterećenja teretnih vozila za otpad i vozila za hitne slučajeve, kao što su vatrogasna vozila.

Porozni beton nije teško ugraditi, ali se razlikuje od standardnog betona i potrebne su odgovarajuće tehnike postavljanja kako bi se postigla njegova učinkovitost. Ima relativno krutu konzistenciju koja nalaže uvjete rukovanja i postavljanja. Važna je upotreba vibrirajuće ravnalice da bi se postigla optimalna gustoća i čvrstoća. Nakon zaravnavanja ravnalicom, materijal se obično zbija valjcima i nije potrebna upotreba alata za zaglađivanje površine. Dilatacijske reške se mogu oblikovati ubrzo nakon konsolidacije ili urezati korištenjem uobičajene opreme za piljenje. Međutim, piljenje može izazvati pucanje betona na mjestu reške. Porozni, betonski kolnici mogu biti postavljeni i bez dilatacijskih reški. Vlažna njega prekrivanjem plastičnom folijom mora započeti odmah nakon postavljanja i treba trajati najmanje 7 dana.

2.1.3 Prednosti za okoliš

Nepropusni kolnici, naročito parkirališni, skupljaju ulje, antifriz i druge automobilske tekućine koje mogu biti isprane u potocima, jezerima i oceanima kada pada kiša. Kako bi se smanjila razina onečišćenosti u potocima i jezerima treba smanjiti ukupno površinsko otjecanje i razinu zagađenja sadržanu u otjecanju. Novim razvojem treba smanjiti količinu nepropusnih površina (uključujući parkirališta i krovne površine) i povećati broj zelenih površina. Neophodno je razvijanje sustava za prikupljanje početnog oborinskog otjecanja (obično oko 25 mm) koji „djeluju“ na onečišćenje prije otpuštanja. Porozni, betonski kolnik smanjuje ili otklanja otjecanje. Hvatanjem i omogućavanjem procjeđivanja u tlo prve količine oborina, kemijski i biološki sastav tla „djeluje“ prirodno na zagađenu vodu. Prema tome, retencije za zadržavanje oborinskih voda se mogu smanjiti ili ukloniti čime dolazi do povećanog korištenja zemljišta (slike 2.2 i 2.3). Nadalje, sakupljanjem oborina i infiltracijom, podzemna voda i vodonosnik se ubrzano prihranjuju, smanjuje se maksimalni protok vode odvodnih kanala, a mogućnost poplava je svedena na minimum.

Svijetla boja betonskih kolnika apsorbira manje topline sunčevog zračenja u odnosu na tamne kolnike i relativno otvorena struktura pora poroznog betona skladišti manje topline.

Na slici 2.2 prikazano je tradicionalno, asfaltno, automobilsko parkiralište pored kojeg se nalazi retencija za zadržavanje oborinskih voda koje se procjeđuju s parkirališta. Uvođenjem tehnologije poroznog betona smanjuje se broj rasvjetnih stupova zbog svjetlije boje parkirališne podloge (slika 2.3), što dovodi do manje potrošnje električne energije i manjih troškova održavanja. Također se smanjuje volumen retencije jer dio oborina koje padnu na porozni beton infiltrira u podzemlje. Nadalje, retencije se u potpunosti mogu eliminirati te na njihovo mjesto ugraditi porozno – betonski kolnik čime dobivamo 2 puta veće parkirališne površine nego kod tradicionalnih asfaltnih parkirališta (slika 2.4).



Slika 2.2 Tradicionalno asfaltno parkiralište [10]



Slika 2.3 Parkirališna mjesta od poroznog betona [10]



Slika 2.4 Moderno parkiralište od poroznog betona [10]

Zasađena stabla na parkiralištima i gradskim nogostupima pružaju hladovinu i stvaraju učinak hlađenja na tom području. Porozni, betonski kolnik je idealan za zaštitu stabala. Mnoge biljke imaju poteškoće u razvoju u područjima prekrivenim nepropusnim kolnicima i nogostupima jer voda teško dolazi do korijena. Porozni, betonski kolnik ili nogostup omogućuje stablima više zraka i vode, a još uvijek dopušta uporabu kolnika (slika 2.1). Iako se porozni beton ne koristi za prometno visoko opterećene pločnike, betonske površine mogu poboljšati sigurnost tijekom pljuskova eliminirajući cijeđenje, blještanje noću, prskanje i opasnost od proklizavanja.

2.2 Tehnička svojstva

2.2.1 Svojstva u svježem stanju

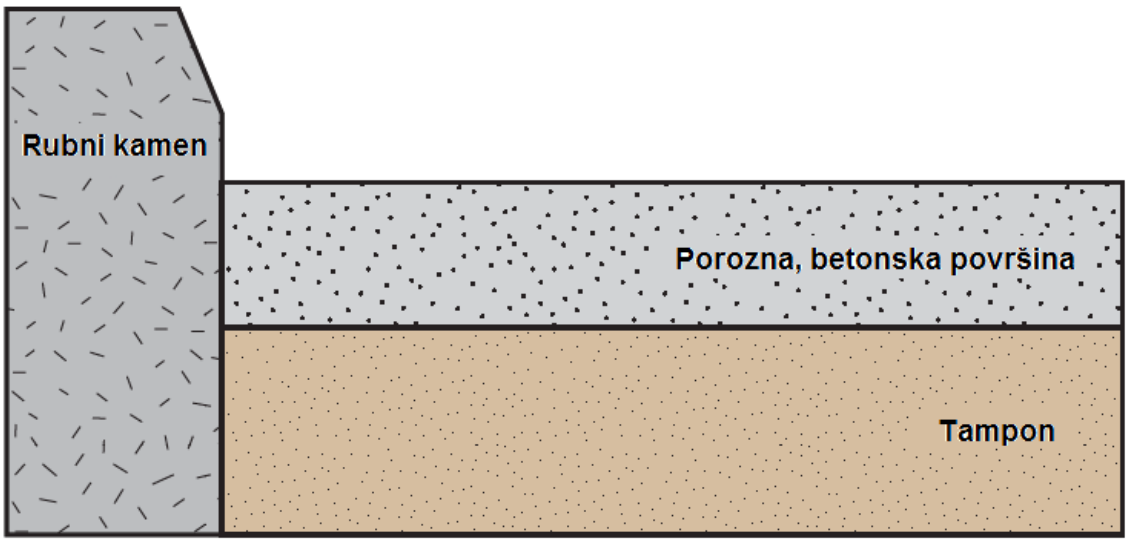
Mješavina poroznog betona je kruta u odnosu na tradicionalne betone. Kada je beton postavljen i zbijen, zrna agregata čvrsto međusobno prianjaju i tvore karakterističnu, otvorenu strukturu. Za kontrolu kvalitete ili osiguranje kvalitete poželjno je mjerenje specifične težine ili nasipne gustoće jer neka svojstva svježeg betona, kao što je je slijeganje, nisu značajna za porozni beton.

Preporučeno vrijeme između miješanja i ugradnje je jedan sat. Međutim, korištenjem usporivača i stabilizatora hidratacije, radno vrijeme betona se povećava za jedan i po sat, ovisno o dozi.

2.2.2 Svojstva u očvrslom stanju

2.2.2.1 Gustoća i poroznost

Gustoća poroznog betona ovisi o svojstvima i omjerima upotrijebljenih materijala te o načinu ugradnje. Gustoća je reda veličine 1600 kg/m^3 do 2000 kg/m^3 te spada u gornji raspon laganih betona. Kolnik debljine 125 mm i 20% šupljina može pohraniti 25 mm oborine prvog pljuska. Kada je postavljen na sloj šljunka debljine 150 mm ili tamponski sloj od drobljenog kamena, kapacitet pohrane se povećava za 75 mm oborina (slika 2.5).



Slika 2.5 Tipični presjek poroznog, betonskog kolnika [9]

2.2.2.2 Propusnost

Brzina protoka kroz porozni beton ovisi o materijalima i načinu ugradnje. Tipične brzine protoka vode kroz porozni beton su 120 l/m^2/min (0,2 cm/s) i 320 l/m^2/min (0,54 cm/s) pa sve do 700 l/m^2/min (1,2 cm/s).

2.2.2.3 Tlačna čvrstoća

Porozni beton može razviti tlačne čvrstoće u rasponu od 3,5 do 28 MPa, koji je pogodan za široko područje primjene. Tipične vrijednosti su oko 17 MPa. Kao kod svih betona, svojstva i omjeri pojedinih materijala, metode ugradnje i uvjeti okoliša diktiraju stvarnu čvrstoću.

2.2.2.4 Savojna čvrstoća

Čvrstoća na savijanje poroznog betona kreće se od 1 do 3,8 MPa. Mnogi čimbenici utječu na savojnu čvrstoću, osobito stupanj zbijenosti, poroznost i omjer agregata i cementa.

2.2.2.5 Skupljanje

Skupljanje sušenjem kod poroznih betona se razvija ranije, ali je mnogo manje nego kod standardnih betona. Specifične vrijednosti ovise o korištenim materijalima i njihovim udjelima. Vrijednosti su reda veličine 2×10^{-4}, otprilike pola manje nego kod konvencionalnih betona. Moguće objašnjenje je niski sadržaj cementne paste i morta. Približno 50 do 80% skupljanja se događa u prvih 10 dana, u usporedbi s 20 do 30% u istom razdoblju kod standardnih betona. Zbog nižeg skupljanja i površinske strukture, mnogi porozni betoni se izvode bez dilatacijskih reški i ostavljaju da ispucaju nasumično.

2.2.3 Izdržljivost

2.2.3.1 Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje

Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje ovisi o razini zasićenja šupljina poroznog betona u vrijeme smrzavanja. Karakteristika poroznog betona da brzo propušta vodu spriječava pojavu zasićenja. Isto tako, ova vrsta betona ima veoma malu količinu kapilarnih pora. Neslužbeni podaci također pokazuju da se porozni beton prekriven snijegom brže čisti, vjerojatno jer pore omogućuju brže otapanje nego na konvencionalnim kolnicima.

Struktura poroznog betona s velikim šupljinama se jasno razlikuje od mikroskopske strukture zračnih pora koje osiguravaju zaštitu paste standardnih betona u uvjetima smrzavanja i odmrzavanja. Kada su velike, otvorene pore zasićene, potpuno smrzavanje može uzrokovati ozbiljne štete u samo nekoliko ciklusa.

2.2.3.2 Otpornost na sulfate

Agresivne kemikalije u tlu i vodi, kao što su kiseline i sulfati, imaju sličan mehanizam djelovanja na standardne i propusne betone. Međutim, otvorena struktura poroznog betona je osjetljivija zbog djelovanja preko veće površine. Porozni betoni mogu se koristiti na područjima gdje prevladavaju sulfatna tla i podzemne vode ako se izoliraju od njih. Sloj agregata s maksimalnim zrnom 25 mm i debljine 15 cm, iznad kojeg je postavljen porozni beton, osigurava kolničku podlogu, skladištenje vode i izolaciju poroznog betona. Ukoliko nisu poduzete ove mjere opreza, u agresivnim sredinama treba se strogo pridržavati preporučenih vrijednosti vodocementnog faktora, vrste i udjela materijala.

2.2.3.3 Otpornost na abraziju

Zbog hrapavije površine i otvorene strukture poroznog betona, abrazija i odvajanje zrna agregata mogu predstavljati problem, posebice na kolnicima gdje se ralice koriste za uklanjanje snijega. To je razlog zašto porozni beton nije pogodan za autoceste.

Većina poroznih, betonskih kolnika, u ranim tjednima nakon otvaranja za promet, ima malo rastresitog agregata na površini. Ta zrna su u početku slabo vezana za površinu i odvajaju se zbog prometnog opterećenja. Nakon prvih nekoliko tjedana, odvajanje je puno manje, a kolnik postaje znatno stabilniji. Odgovarajuće tehnike zbijanja i vlažne njege smanjuju pojavu površinskog odvajanja čestica.

2.3 Omjer materijala u mješavini

2.3.1 Materijali

Za izradu poroznog betona koriste se isti materijali kao kod standardnog betona, uz iznimku sitnog agregata, koji se obično u potpunosti eliminira, a granulacija krupnog agregata je uska čime se onemogućava ispunjavanje šupljina. To osigurava korisna svojstva u očvrslom stanju, ali također rezultira mješavinom koja zahtijeva drugačiji pristup miješanja, postavljanja, ugradnje, zbijanja i vlažne njege.

2.3.2 Cementni materijali

Kod pripravljanja poroznog betona koriste se Portland cementi i miješani cementi kao i kod tradicionalnih betona. Mogu se koristiti dodatni cementni materijali kao što su leteći pepeo, pucolan i zgura. Preporučuje se ispitivanje materijala prije ugradnje tako da se mogu odrediti svojstva (vrijeme postavljanja, brzina razvoja čvrstoće, poroznost i propusnost) bitna za ugradnju.

2.3.3 Agregat

U poroznom betonu sadržaj sitnog agregata je ograničen, a krupni agregat ima usku granulaciju. Veća zrna agregata daju hrapavu površinu. Porozni beton se koristi za parkirališta, nisko opterećene kolnike i pješačke staze. Omjer agregata i cementa je u rasponu od 4 do 4,5 iz čega proizlazi da se sadržaj agregata kreće od 1300 do 1800 kg/m^3. Treba naglasiti da je kod poroznih, betonskih mješavina važna kontrola vode. Voda koju iz mješavine upija suhi agregat može dovesti do suhe smjese koja se ne može dobro ugraditi i zbijati. Međutim, dodatna voda iz agregata povećava vodocementni faktor.

2.3.4 Voda

Vodocementni faktor se obično kreće od 0,27 do 0,30 uz pravilno dodavanje kemijskih dodataka, a uspješno se koriste i vodocementni faktori 0,34 do 0,40. Veza između čvrstoće i vodovezivnog faktora kod poroznih betona nije jasna kao kod konvencionalnog betona jer je ukupni sadržaj paste manji od sadržaja pora između agregata. Sadržaj vode treba biti strogo kontroliran. Pravilna količina vode daje mješavinu u kojoj voda ne otječe s agregata. Dlanovima formirana kuglica se neće raspasti ili izgubiti svoju poroznu strukturu dok se pasta ulijeva u

šupljine između agregata. Općenito je pravilo da je voda koja je pitka, pogodna za korištenje u betonu.

2.3.5 Dodaci

Kemijski dodaci koriste se kod poroznih betona za dobivanje posebnih svojstava, kao i kod standardnog betona. Zbog brzog vremena vezanja poroznog betona, obično se koriste usporivači ili stabilizatori hidratacije. Pri korištenju aditiva treba pomno pratiti preporuke proizvođača. Aeranti mogu smanjiti utjecaj smrzavanja i odmrzavanja na porozni beton. Također se koriste dodaci koji olakšavaju postavljanje i zaštitu poroznih kolnika.

2.4 Projektiranje

2.4.1 Osnove projektiranja

Dva faktora određuju debljinu poroznih kolnika:

- Hidraulička svojstva (propusnost i volumen šupljina)
- Mehanička svojstva (čvrstoća i krutost).

Porozni beton koji se koristi kod kolničkih sustava treba biti projektiran da izdrži prometno opterećenje i pozitivno utječe na strategiju upravljanja oborinskim vodama. Istovremeno se odabiru odgovarajuća svojstva materijala, debljine kolnika i druge karakteristike potrebne za ispunjenje hidroloških zahtjeva i predviđenog prometnog opterećenja. Potrebne su analize hidrauličkih i strukturalnih zahtjeva, a veća od te dvije vrijednosti određuje konačnu debljinu kolnika.

2.4.2 Hidrološko razmatranje projektiranja

Pri projektiranju poroznog, betonskog kolnika brojni čimbenici se moraju uzeti u obzir. Tri glavna razmatranja su očekivane količine padalina, karakteristike kolnika i svojstva podložnog tla. Međutim, kontrolni hidrološki faktor kod projektiranja poroznog betona je dopušteni intenzitet površinskog otjecanja. Količina otjecanja je manja od ukupne količine oborina jer dio oborine ostane u udubinama na površini, dio infiltrira u tlo, a dio prekine pokrov tla. Otjecanje ovisi o svojstvima tla, naročito o brzini infiltracije; pješčana, suha tla će brzo upiti vodu dok nepropusne gline ne mogu apsorbirati vodu.

U mnogim situacijama, porozni beton jednostavno zamjenjuje nepropusnu površinu. U drugim slučajevima porozni, betonski kolnik mora biti projektiran da podnese mnogo veće količine oborina od onih koje padnu na sami kolnik. Ova dva zahtjeva mogu se nazvati „pasivno“ i „aktivno“ smanjenje otjecanja. „Pasivni“ sustav smanjenja otjecanja može prihvatiti prvi pljusak, ali nije namijenjen za prihvaćanje viška otjecanja sa susjednih, nepropusnih površina. Porozni beton korišten kod „aktivnog“ smanjenja otjecanja mora prihvatiti i oborine koje dolaze sa susjednih zgrada i površina od standardnog, nepropusnog betona.

2.4.2.1 Oborine

U obzir treba uzeti količinu i raspodjelu padalina u određenom vremenskom periodu. Npr. očekivana količina padalina u vremenskom periodu od 24 sata iznosa 90 mm će se pojaviti, u prosjeku, jednom u dvije godine na nekom mjestu. Na istoj lokaciji, maksimalna očekivana količina oborina u trajanju od 2 sata iznosa 50 mm će se pojaviti svake dvije godine.

Izbor odgovarajućeg povratnog perioda je važan jer određuje količinu padalina s kojima se ulazi u proračun.

2.4.3 Hidrološko projektiranje kolnika

Pri projektiranju propusnih, betonskih sustava za upravljanje oborinskim vodama, u obzir se trebaju uzeti dva uvjeta: propusnost i kapacitet skladištenja. Višak površinskog otjecanja uzrokovan niskom propusnošću ili nedovoljnim kapacitetom skladištenja, mora se spriječiti.

2.4.3.1 Propusnost

Općenito, propusnost nije odlučujući kriterij pri projektiranju. Treba osigurati da je propusnost dovoljna za upijanje oborine na površini poroznog betona. Brzina protoka kroz podlogu na kojoj se nalazi porozni beton može biti važniji faktor od propusnosti samog betona.

2.4.3.2 Kapacitet skladištenja

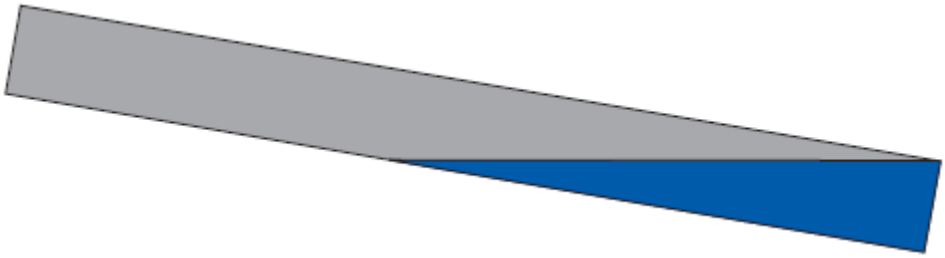
Ukupni kapacitet skladištenja poroznog, betonskog sustava uključuje kapacitet porozno – betonskog kolnika, kapacitet tamponskog sloja i količinu vode koja izlazi iz sustava infiltracijom u podložno tlo. Teoretski kapacitet skladištenja poroznog betona je njegova efektivna poroznost. Ako beton ima 15% efektivnih pora, onda na svakih 25 mm dubine, kolnik može primiti 4 mm padalina. Npr. kolnik debljine 10 cm s 15% efektivnih pora koji se nalazi na sloju nepropusne gline može prihvatiti do 15 mm kiše prije otjecanja viška oborine po površini.

Drugi važan element pohrane je tamponski sloj. Čisti, zbijeni kamen, korišten za tamponski sloj, ima 40% poroznosti dok klasični tamponski sloj od agregata s većim sadržajem finih čestica ima manju poroznost (oko 20%). Iz gore navedenog primjera, ako je porozni beton debljine 10 cm s 15% efektivnih pora postavljen na sloj čistog, zbijenog kamena debljine 15 cm, kapacitet skladištenja iznosi 75 mm kiše:

$0.15 \times 100 + 0.4 \times 150 = 75$ mm.

Učinak tamponskog sloja na kapacitet skladištenja poroznog, betonskog kolnika može biti značajan.

Ključna pretpostavka u ovom izračunu je da je cijeli sustav horizontalan. Ako gornji dio ploče nije u ravnini, a premaši se brzina infiltracije podloge, viši dijelovi ploče se neće ispuniti i dodatne količine oborina otječu u najniže djelove. Nakon što je ispunjen, kiša otječe s kolnika te se na taj način ograničavaju djelotvorni učinci poroznog betona. Npr. ako kolnik debljine 15 cm i dužine 30 m ima nagib od 1%, razlika u visini krajeva kolnika iznosi 30 cm te se samo 25% volumena može koristiti za pohranu oborina nakon što se prekorači brzina infiltracije posteljice (slika 2.6).



Slika 2.6 Raspodjela pohranjene vode kod kolnika u nagibu [9]

Ovi gubici korisnog volumena zbog neravne podloge mogu biti značajni te ukazuju na osjetljivost projektiranja nagiba. Kada površina nije ravna, debljine kolnika i tamponskog sloja moraju biti projektirane da se zadovolji količina željenog otjecanja. Porozni betonski kolnici u primjeni su uspješno postavljeni s padom do 16%. U tim slučajevima se izvode poprečni, drenažni jarci (slike 2.7 i 2.8).



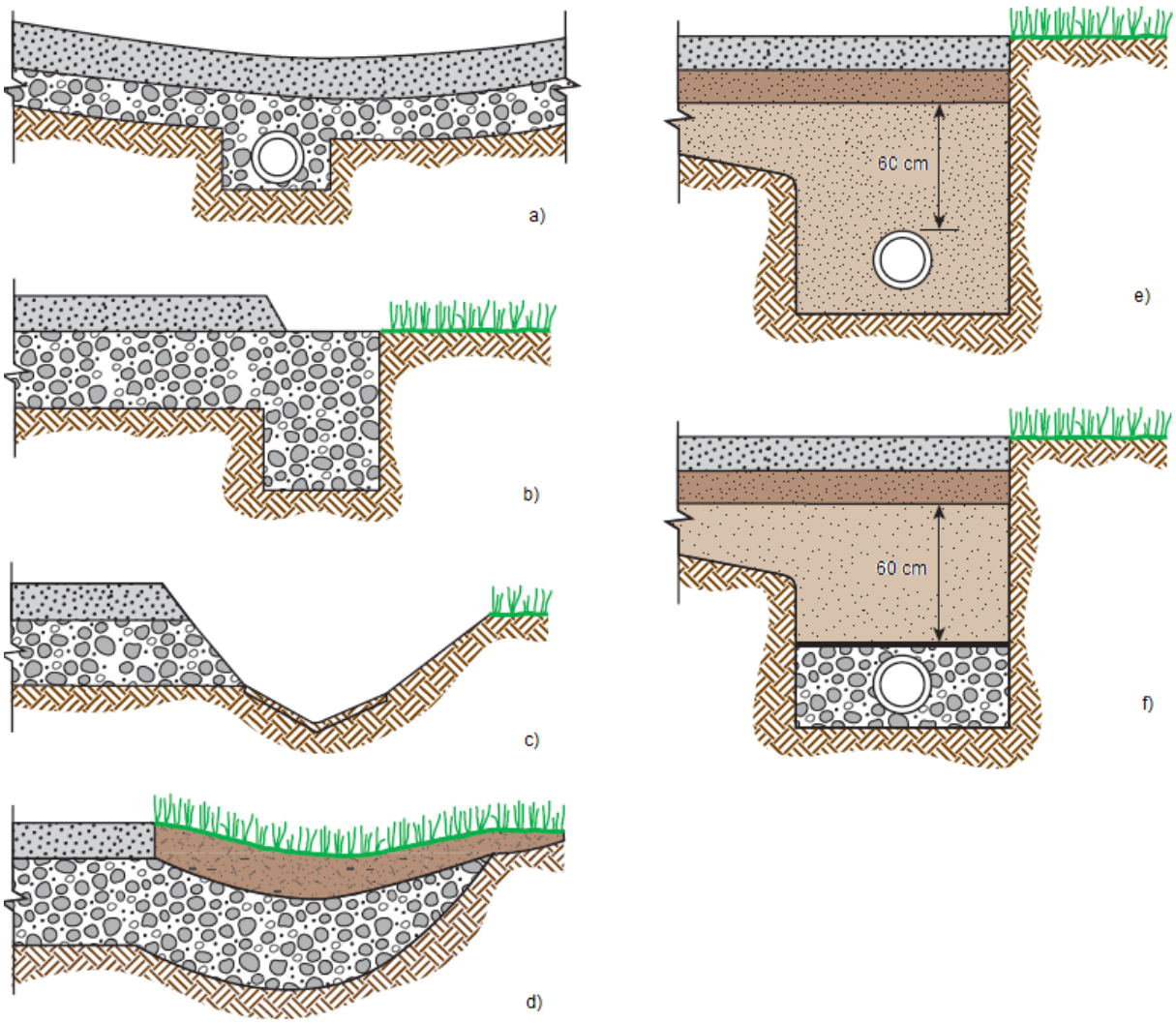
Slika 2.7 Priprema podloge kod ugradnje kolnika pod kutom [9]

Veliko strujanje vode kroz drenažne kanale može isprati posteljicu te oslabiti kolnik. U tim slučajevima preporučuje se korištenje filterskih tkanina.

2.4.3.3 Tamponski sloj i posteljica

Općenito, pravilo je da su tla s brzinom upijanja od 12 mm/sat pogodna za podlogu poroznih kolnika. Gline i drugi nepropusni slojevi mogu spriječiti pravilno funkcioniranje poroznog kolnika pa je možda potrebno mijenjati takve slojeve da bi se omogućilo pravilno zadržavanje i procjeđivanje oborina. Ako je tlo nepropusno, potrebno je postaviti deblje slojeve tampona iznad njih.

Još jedna mogućnost u područjima sa slabo propusnim tlima je postavljanje bunara ili odvodnih kanala kroz posteljicu koji vode do više propusnih slojeva. Odvodni kanali su ispunjeni s usko frakcioniranim agregatom kroz koji struji oborinska voda i obnavlja podzemne vode (slika 2.8). U tom slučaju treba obratiti pažnju na zagađivače koji se šire vodom.



Slika 2.8 Poprečni presjeci alternativnih rješenja odvodnje za uporabu kod nepropusnih tala [9]

2.4.4 Strukturalno projektiranje kolnika

Porozni beton je jedinstven materijal kod kojeg se struktura i karakteristike razlikuju od klasičnog Portland cementnog betona i drugih kolničkih materijala. Pri projektiranju u obzir treba uzeti smjernice za posteljicu, svojstva tla, karakteristike materijala od kojih se izrađuje porozni beton i prometno opterećenje.

2.4.4.1 Tamponski sloj i posteljica

Pri projektiranju porozno – betonskog kolnika treba osigurati tamponski sloj debljine 150 do 300 mm. Najveća frakcija agregata za tamponski sloj iznosi 25 mm. Pretpostavka je da modul reakcije posteljice *k* ne smije prelaziti 54 MPa/m. Utvrđivanje modula reakcije posteljice na terenu u zasićenom stanju može povećati pouzdanost pri projektiranju. Ako posteljica nije

zasićena kada se izvode terenska ispitivanja, laboratorijskim ispitivanjima se može razviti korigirani faktor zasićenja.

2.4.4.2 Gline i ekspanzivna tla

Pri projektiranju porozno – betonskog kolnika u područjima koja sadrže značajne količine gline i mulja visoke stišljivosti i ekspanzivna tla, treba uzeti u obzir posebne odredbe. Preporučuje se da se organski materijali iskopaju i zamjene s tlima koja sadrže velike količine krupnijeg materijala. Još jedno rješenje je pješčana posteljica postavljena preko kolničke drenaže.

2.4.4.3 Prometno opterećenje

Budući da kamionski promet ima veći utjecaj od automobilskog, njegovo uzimanje u obzir je ključno pri projektiranju dugotrajnog kolnika.

2.4.4.4 Svojstva materijala koja se odnose na projekiranje kolnika

Čvrstoća na savijanje krutog, betonskog kolnika je važna pri projektiranju. Projektiranje krutog kolnika temelji se na čvrstoći kolnika, koja opterećenje ravnomjerno raspodjeljuje na posteljicu. Međutim, savojna čvrstoća pri ispitivanju poroznog betona može imati veliku varijabilnost, stoga je uobičajeno da se mjeri tlačna čvrstoća i koriste empirijski izrazi za procjenu savojne čvrstoće. S obzirom da čvrstoća određuje karakteristike kolnika i njegov uporabni vijek, treba pažljivo vrednovati svojstva poroznog betona.

Udio materijala u mješavini poroznog kolnika daje široki raspon čvrstoća i propusnosti, ovisno o stupnju zbijenosti. Ispitivanjem prije ugradnje treba utvrditi odnos između tlačne čvrstoće, vlačne čvrstoće cijepanjem i čvrstoće na savijanje, kao i specifičnu težinu i/ili poroznost materijala koji će biti upotrijebljeni.

2.5 Postavljanje kolnika

2.5.1 Priprema posteljice i tamponskog sloja

Ujednačenost posteljice je ključni kriterij za postavljanje poroznog kolnika. Kao i kod drugih vrsta kolnika, tragovi kotača i druge nepravilnosti se trebaju zagladiti i zbiti prije postavljanja. Preporučuje se zbijanje posteljice u iznosu 90 do 95% teoretske gustoće, međutim povećanjem gustoće smanjuje se propusnost.

Kako porozni kolnik sadrži malu količinu vode i veliku poroznost, mora se voditi računa da se nakon ugradnje kolnik ne isušuje. Posteljica prije postavljanja mora biti vlažna (bez samostojeće vode) kako bi se spriječilo isušivanje vode iz nižih dijelova kolnika. To se preporučuje i pri ugradnji konvencionalnih, betonskih kolnika u uvjetima velikog isparavanja, ali je važnije pri ugradnji poroznog betona koji ima visoki sadržaj šupljina koje omogućuju brže sušenje da ne bi došlo do naknadnog smanjenja čvrstoće i trajnosti.

2.5.2 Doziranje materijala i miješanje

Zbog svojih specifičnih svojstava porozni beton zahtjeva strožu kontrolu sastojaka. To se posebno odnosi na sadržaj vode, čijim se pravilnim doziranjem osigurava odgovarajuća čvrstoća i propusnost te spriječava otjecanje paste s agregata i zatvaranje otvorene strukture. Vlažnost agregata treba pažljivo pratiti, jer višak vode isporučen s agregatom može biti štetan. Izvođači radova i proizvođači betona moraju surađivati kako bi se osigurala odgovarajuća mješavina betona prije isporuke na gradilište. U nekim slučajevima na gradilištu može doći do određene korekcije sadržaja vode kako bi se postigla odgovarajuća konzistencija i to treba učiniti s oprezom jer je dodavanje vode na gradilištu teško kontrolirati. Tipične gustoće poroznog betona iznose 1600 do 2000 kg/m^3.

Za miješanje se koristi oprema kao i kod standardnih betona, iako se vrijeme miješanja može produljiti u odnosu na konvencionalni beton.

2.5.3 Transport poroznog betona

Budući da porozni beton ima mali sadržaj vode, posebna pažnja je potrebna tijekom transporta i ugradnje. Zbog malog slijeganja, pražnjenje iz automiješalice može biti sporije nego kod standardnih betona. Mješavina poroznog betona treba biti u potpunosti ispražnjena u roku jednog sata nakon prvog miješanja. Upotreba usporivača i stabilizatora hidratacije može

produljiti vrijeme pražnjenja do jednog i pol sata ili više. Treba uzeti u obzir da visoka temperatura i vjetroviti uvjeti imaju izraženije učinke na porozni kolnik u odnosu na standardne kolnike.

2.5.4 Ugradnja i zbijanje

Za ugradnju porozno – betonskog kolnika mogu se koristiti razne tehnike. Kao i kod konvenconalnih betona, tehnike ugradnje su razvijene kako bi odgovarale specifičnim uvjetima na gradilištu. Treba napomenuti da propusne, betonske mješavine ne mogu biti pumpane. Prije ugradnje treba provjeriti pripremljeni tamponski sloj.

Ugradnja treba biti kontinuirana, a rasprostiranje i ravnanje brzo (slika 2.9). Upotrebljava se uobičajena oplata. Obično se koriste mehaničke (vibrirajuće) i ručne ravnalice. Pri uporabi vibrirajućih ravnalica mora se voditi računa da se frekvencija vibracija smanji kako bi se izbjeglo pretjerano zbijanje ili zatvaranje površinskog sloja, što rezultira blokiranjem šupljina.



Slika 2.9 Upotreba vibrirajuće ravnalice [9]

Zbijanje betona se postiže čeličnim valjcima do predviđene visine (slike 2.10 i 2.11). Zbog brzog stvrdnjavanja i visokog isparavanja zbijanje mora biti dovršeno 15 minuta od trenutka postavljanja.



Slika 2.10 Porozni beton nakon ravnanja (lijevo) i nakon zbijanja (desno) [9]



Slika 2.11 Zbijanje poroznog betona čeličnim valjkom [9]

2.5.5 Oblikovanje dilatacijskih reški

Kontrolne dilatacijske reške trebaju se oblikovati da se spriječi nasumično pucanje kolnika. Razmak između reški je obično veći nego kod standardnih, betonskih kolnika jer porozni beton ima manje skupljanje. Preporučeni razmak između reški je 6 m, iako neki porozni sustavi s razmakom od 13,5 m nemaju nekontrolirane pukotine. Prevencija nastajanja pukotina se postiže postavljanjem dilatacijskih reški na istom mjestu kao i kod susjednog elementa (slika 2.10).

Zbog ubrzanog sušenja poroznog, betonskog kolnika, reške treba napraviti ubrzo nakon zbijanja, valjkom za dilataciju (slika 2.12).



Slika 2.12 Upotreba valjka za oblikovanje dilatacijskih reški [9]

Rezanjem pilom moguće je oblikovati reške, ali nije poželjno jer ostaci piljenja mogu blokirati pore, što rezultira pucanjem dilatacijskih reški.

2.5.6 Završna obrada

Kod uobičajenih betona gornja površina se zaglađuje kako bi se sve pore zatvorile. Kod poroznih betona zadnji korak pri obradi je zbijanje. Na taj način dobiva se hrapava površina i poboljšava funkcija propusnih betona.

2.5.7 Njega i zaštita betona

Zbog otvorene strukture i relativno krupnih pora poroznog betona, površina je izloženija isparavanju od cementne paste klasičnih betona pa je njega poroznog betona važnija. U nekim područjima je uobičajena upotreba usporivača isparavanja prije zbijanja da se umanji potencijalni gubitak površinske vode.

Njega poroznog betona počinje i prije postavljanja. Posteljicu treba navlažiti kako bi se spriječilo upijanje vlage iz betona. Nakon ugradnje, površina se prekriva plastičnom folijom najmanje 7 dana, što je prikazano na slici 2.13

Njega treba početi ubrzo nakon postavljanja i zbijanja betona te oblikovanja dilatacijskih reški, najkasnije 20 minuta nakon navedenih postupaka.



Slika 2.13 Prekrivanje porozog betona plastičnom folijom [9]

2.5.8 Puštanje u promet

Preporuka je da se porozni kolnici kontrolirano njeguju 7 dana nakon ugradnje prije puštanja u promet.

2.6 Kontrola i održavanje

2.6.1 Kontrola i ispitivanje

Nakon 7 dana uzimaju se uzorci te im se mjeri debljina i gustoća. Obično se uzimaju 3 uzorka na svakih 75 m^3. Ispitivanje tlačne čvrstoće nije preporučljivo zbog njene ovisnosti o zbijenosti. Uvjeti nalažu da prosječna gustoća iznosi ± 80 kg/m^3 projekirane gustoće. Porozni, betonski kolnici mogu imati veće varijabilnosti debljine u usporedbi s konvencionalnim, betonskim kolnicima.

2.6.2 Održavanje

Većina poroznih, betonskih kolnika funkcionira s malo ili nimalo održavanja. Održavanje se sastoji prvenstveno u sprječavanju začepljenja strukture šupljina. Okoliš i drenaža bi trebali biti uređeni na način da spriječe pojavu raznih materijala na kolničkim površinama. Tlo, kamenje, lišće i druge nečistoće mogu dospjeti u šupljine i ometati protok vode, smanjujući korisnost kolnika.

Potrebno je jednom godišnje ili češće, uklanjanje prljavštine s površine kolnika. Čišćenje uključuje propuhivanje i pranje pod tlakom. Pranje pod tlakom u nekim slučajevima obnavlja propusnost 80 do 90%.

3 DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA

3.1 Istraživanja o sastavu poroznog betona za primjenu kod kolnika (M. Uma Maguesvari, V. L. Narasimha)

3.1.1 Uvod

Zbog ubrzane urbanizacije većina mjesta je pokrivena s nepropusnim površinama poput cementnog betona. To ima veliki utjecaj na razinu podzemne vode. Propusni, betonski kolnik je učinkovit način smanjenja ovog problema. Propusni beton je otvorena, graduirana struktura s međusobno povezanim šupljinama kroz koje se kiša i oborinske vode nesmetano procjeđuju u vodonosnik. Sastoji se od cementa, krupnog agregata, određenog postotka sitnog agregata i vode. Propusni beton je ekološki građevinski materijal i EPA (Agencija za zaštitu okoliša) ga prepoznaje kao najbolji način upravljanja oborinskim vodama.

Može se koristiti za manje opterećene prometnice, bankine, nogostupe i parkirališta. Uporabom održivih materijala kod upravljanja oborinskim vodama, smanjuje se onečišćenje podzemnih voda. Cementna pasta kod poroznog betona u tankom sloju veže krupni agregat. Vodocementni faktor je ključna veličina za tlačnu čvrstoću betona. Raspon vodocementnog faktora za postizanje optimalne čvrstoće i propusnosti je od 0,30 do 0,38. Poroznost poroznog betona varira između 15 i 30% volumena, a ovisi o načinu zbijanja i vrsti agregata.

Važan parametar koji utječe na šupljine u agregatu je koeficijent oblika zrna agregata[1], koji se odlikuje oštrim rubovima. Ako je agregat uglat, šupljine u njemu će se povećati. Ovo svojstvo površine je jako značajno u procjeni volumena šupljina u agregatu. Međutim, u dostupnoj literaturi nije pronađeno istraživanje o utjecaju koeficijenta oblika zrna agregata na sadržaj šupljina u betonu.

3.1.2 Materijali i svojstva

U sastavu betona koriste se cement, drobljeni šljunak kao krupni agregat, sitni agregat i voda. Portland cement, Tip I, koji je u skladu s ASTM C 150, korišten je u svim mješavinama. Četiri veličine krupnog agregata, 4,75 mm do 9 mm, 9 mm do 12,5 mm, 12,5 mm do 16 mm i 16

[1] Agregat za beton mora imati koeficijent oblika zrna između 0 – 11.

mm do 19,5 mm su korištene u ovom istraživanju. Tablica 3.1 predstavlja fizikalna svojstva materijala.

Tablica 3.1 Fizikalna svojstva materijala [11]

Svojstva	Vrijednost
Specifična težina krupnog agregata (SSD)	2.71
Specifična težina krupnog agregata (OD)	2.70
Specifična težina sitnog agregata	2.62
Specifična težina cementa	3.15

3.1.3 Udio materijala u mješavini

Eksperimentalni dio se bazira na prethodnom istraživanju (C. Lian i Y. Zhuge, 2010), a napravljen je sa sadržajem cementa 400 kg/m^3 i vodocementnim faktorom 0,34. Četiri kontrolne mješavine odgovaraju četirima veličinama agregata po apsolutnoj metodi volumena. Kontrolne mješavine su dizajnirane kao M1FC, M2FC, M3FC i M4FC. Sadržaj sitnog agregata navedenih mješavina je odabran kao jedan od parametara studije. Pokušalo se kvantificirati utjecaj sitnog agregata na ukupni sadržaj šupljina. Prema tome, sitni agregat varira između 0 i 50 %. Za konstantan volumen su ponovno napravljene referentne mješavine. Ispitane su ukupno 24 mješavine. Pojedinosti tih mješavina prikazane su u tablicama 3.2. i 3.3

Tablica 3.2 Oznake mješavina [11]

Postotak sitnog agregata	16.0 - 19.5 mm	12.5 - 16.0 mm	9.0 - 12.5 mm	4.75 - 9.0 mm
Kontrolna mješavina	M1FC	M2FC	M3FC	M4FC
50	M1F50	M2F50	M3F50	M4F50
40	M1F40	M2F40	M3F40	M4F40
30	M1F30	M2F30	M3F30	M4F30
20	M1F20	M2F20	M3F20	M4F20
10	M1F10	M2F10	M3F10	M4F10
0	M1F0	M2F0	M3F0	M4F0

Tablica 3.3 Omjeri mješavina poroznog betona[2][11]

Oznaka mješavine	Omjer materijala u mješavini	Količina materijala (kg/m^3)	
		Sitni agregat	Krupni agregat
M1F0, M2F0, M3F0, M4F0	1:0:4.75	0	1916
M1F10, M2F10, M3F10, M4F10	1:0.1875:4.56	75	1841
M1F20, M2F20, M3F20, M4F20	1:0.375:4.575	150	1766
M1F30, M2F30, M3F30, M4F30	1:0.56:4.19	224	1692
M1F40, M2F40, M3F40, M4F40	1:0.75:4	299	1617
M1F50, M2F50, M3F50, M4F50	1:0.935:3.855	374	1542
M1FC, M2FC, M3FC, M4FC	1:1.87:2.92	748	1168

3.1.4 Priprema i ispitivanje uzoraka

3.1.4.1 Ukupne šupljine u agregatima

Ukupni sadržaj šupljina agregata je određen metodom oblika zrna.

3.1.4.2 Tlačna čvrstoća

Ispitivanje tlačne čvrstoće je provedeno u skladu s ASTM C 39. Uzorci kocki veličine 100×100×100 mm su pripremljeni za svaku mješavinu. Nakon 24 sata primjerci su izvađeni iz kalupa i uronjeni u vodu temperture 24ºC do ispitivanja. Tlačna čvrstoća je uzeta kao srednja vrijednost triju uzoraka.

3.1.4.3 Savojna čvrstoća

Čvrstoća na savijanje je dobivena metodom tri točke u skladu s ASTM C 78. Ispitivanje je provedeno 28 dana nakon vlažne njege betona na uzorcima dimenzija 100×100×500 mm.

3.1.4.4 Vlačna čvrstoća cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem je dobivena u skladu s ASTM C 496. Cilindrični uzorci dimenzija 100×200 mm su testirani 28 dana nakon vlažne njege betona.

3.1.4.5 Otpornost na abraziju

Otpornost na abraziju poroznog betona određena je na uzorcima veličine 60×60×25 mm koji su testirani nakon 28 dana vlažne njege betona.

[2] Napomena: oznaka M – mješavina, znamenke 1 – 4 označavaju veličinu agregata, F – sitni agregat, sljedeće dvije znamenke označavaju postotak sitnog agregata, C – označava kontrolnu mješavinu

3.1.4.6 Propusnost

Propusnost mješavina određena je pomoću metode padajuće razine stupca vode u odnosu na ranije istraživanje (Narayanan Neithalath, Jason Weiss i Jan Olek, 2006). Uzorci promjera 80 mm i dužine 150 mm su testirani nakon 28 dana vlažne njege betona.

3.1.5 Rezultati i rasprava

3.1.5.1 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu na temelju koeficijenta oblika zrna agregata

Tablica 3.4 prikazuje oblik zrna za četiri veličine agregata. Kada se oblik zrna povećava, povećava se i postotak šupljina prisutnih u agregatu. Iz tablice 3.4 je vidljivo smanjenje oblika zrna u mješavinama M1F0 do M4F0.

Također je uočeno da veličina zrna agregata utječe na šupljine (tablica 3.5). Na temelju oblika zrna, ukupne šupljine prisutne u agregatu određene su za sve mješavine zajedno sa sitnim agregatom. Očigledno je da se s povećanjem sitnog agregata smanjuje sadržaj šupljina.

Tablica 3.4. Oblik zrna za različite veličine agregata [11]

Mješavina	Oblik zrna
M1F0	8
M2F0	7
M3F0	6
M4F0	4

Tablica 3.5. Sadržaj šupljina u agregatu [11]

	M1	M2	M3	M4
F0	40.91	39.51	39.34	37.42
F10	39.54	37.55	37.45	35.81
F20	37.04	35.67	35.63	33.93
F30	33.46	33.08	32.70	31.84
F40	31.19	30.63	30.67	30.01
F50	28.88	28.30	28.19	28.13

3.1.5.2 Karakteristična čvrstoća

Tablice 3.6 i 3.7 prikazuju tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i vlačnu čvrstoću cijepanjem uzoraka različite starosti. Uzorci sa sve četiri odabrane veličine agregata ponašaju se po istom zakonu. Povećavanje sitnog agregata u mješavini rezultira povećanjem tlačne čvrstoće. Opaženo je da se sa smanjenjem krupnog agregata povećava tlačna čvrstoća. To se događa povećanjem dodirne površine koja se povećava zbog smanjenja veličine agregata. Još važnije, kohezivna sredstva, kao što su pijesak i produkti hidratacije cementa, stvaraju dvije mješavine koje se udružuju, što rezultira poboljšanom čvrstoćom (Baoshan Huang, Hao Wu, Xiang Shu i Edwin G. Burdette, 2010). Prosječno povećanje tlačne čvrstoće na uzorcima starima 7 do 28 dana iznosi 27%. Uzorcima starima 28 do 56 dana tlačna čvrstoća se povećava 24%. Iz tablice 3.7 je vidljivo da se smanjenjem oblika zrna u uzorcima M1F0 do M3F0 izaziva stalan prirast tlačne čvrstoće u iznosu od 0,5 N/mm^2. Slično se ponašaju čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća cijepanjem, kao što je prikazano na slikama 3.1. i 3.2.

Tablica 3.6 Čvrstoća kontrolne mješavine [11]

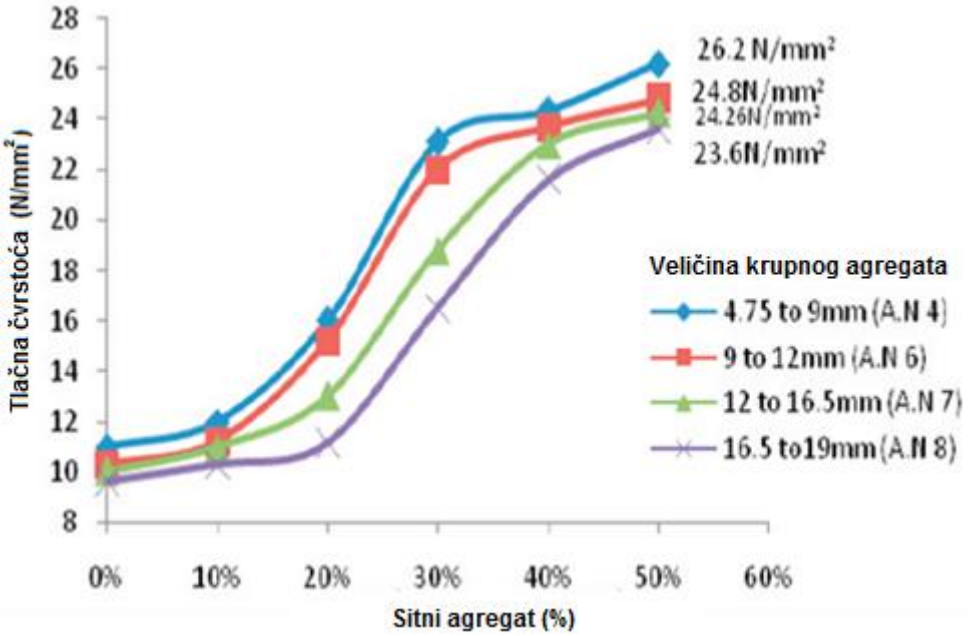
Mješavina	Tlačna čvrstoća (N/mm^2)			Savojna čvrstoća (N/mm^2)	Vlačna čvrstoća cijepanjem (N/mm^2)
	7 dana	28 dana	56 dana	28 dana	28 dana
M1FC	24.9	34.4	42.73	3.8	3.75
M2FC	25.2	34.6	43.17	4.0	3.82
M3FC	25.5	36.63	44.70	4.4	3.94
M4FC	27.63	41.9	48.40	5.2	4.21

Tablica 3.7 Tlačne čvrstoće poroznog betona različitih starosti [11]

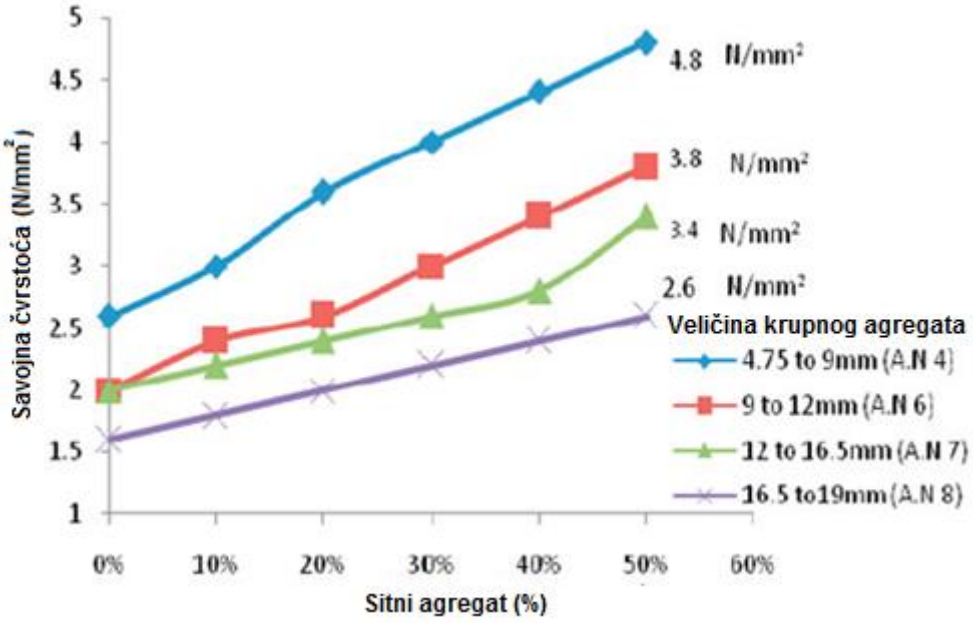
Mješavina	Tlačna čvrstoća (N/mm^2)		
	7 dana	28 dana	56 dana
M1F0	5	9.6	11.53
M1F10	7.17	10.3	14.80
M1F20	9.3	11.13	19.33
M1F30	11.6	16.5	23.57
M1F40	11.9	21.56	28.07
M1F50	14.43	23.6	31.77
M2F0	6.2	10.03	12.17
M2F10	7.21	11	16.97
M2F20	10.4	13	20.83
M2F30	12.2	18.8	23.37
M2F40	14.4	23	28.10
M2F50	15.2	24.26	34.40

Mješavina	Tlačna čvrstoća (N/mm^2)		
	7 dana	28 dana	56 dana
M3F0	6.53	10.3	12.07
M3F10	7.36	11.23	15.30
M3F20	10.9	15.2	20.27
M3F30	13.2	22	25.70
M3F40	15.3	23.7	29.07
M3F50	16.23	24.8	34.33
M4F0	6.6	11	12.70
M4F10	8.1	12	15.90
M4F20	11.3	16	20.67
M4F30	13.4	23.12	28.13
M4F40	15.6	24.32	29.57
M4F50	18.1	26.2	35.47

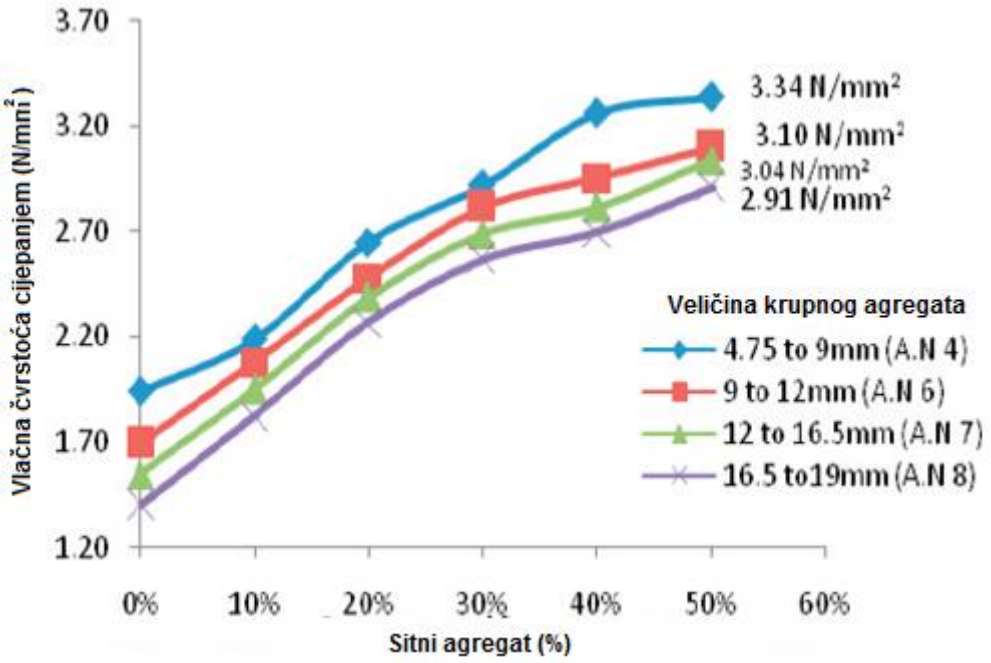
Čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća cijepanjem se povećavaju s povećanjem postotka sitnog agregata. U tablici 3.5 je vidljivo da se koeficijent oblika zrna agregata smanjuje s utjecajem sitnog agregata u mješavinama. Šupljine, koje su pokazatelj oblika zrna, utječu na čvrstoću mješavina, što je prikazano na slikama 3.1, 3.2 i 3.3. U mješavinama M2 i M3 bez sitnog agregata porast tlačne čvrstoće iznosi 2,6%, a u mješavinama M3 i M4 6,4%. Sa smanjenjem koeficijenta oblika zrna agregata u gore navedenim mješavinama dolazi do povećanja tlačne čvrstoće. Dodavanjem sitnog agregata u mješavine M1 i M2 dolazi do povećanja tlačne čvrstoće u iznosu od 7,7%, za mješavine M2 i M3 povećanje iznosi 7,1%, a za mješavine M3 i M4 13,5%. Ovo pokazuje da postoji jasna povezanost između oblika zrna, šupljina prisutnih u agregatu i njegove odgovarajuće čvrstoće.



Slika 3.1 Varijacija tlačne čvrstoće (28 dana) ovisno o sadržaju sitnog agregata [11]



Slika 3.2 Varijacija savojne čvrstoće (28 dana) ovisno o sadržaju sitnog agregata [11]



Slika 3.3 Varijacija vlačne čvrstoće cijepanjem (28 dana) ovisno o sadržaju sitnog agregata [11]

3.1.5.3 Propusnost

Rezultati propusnosti mješavina poroznog betona prikazani su u tablici 3.8. Mješavine poroznog betona s malim frakcijama agregata su manje propusne u usporedbi s mješavinama koje sadrže krupna zrna agregata. Propusnost uglavnom ovisi o veličini međusobno povezanih pora u poroznom betonu. Tablica 3.8 pokazuje da kod mješavina M1, M2 i M3 dolazi do postupnog smanjenja propusnosti. Mješavina M4 ima jako malu propusnost u usporedbi s ostalim mješavinama, što ovisi o obliku zrna agregata.

Tablica 3.8 Rezultati propusnosti poroznog betona [11]

Postotak sitnog agregata	Propusnost (cm/s)			
	M1	M2	M3	M4
F0	1.258	1.182	1.094	0.907
F10	1.175	1.106	0.984	0.726
F20	1.096	1.029	0.940	0.705
F30	0.876	0.862	0.834	0.597
F40	0.771	0.741	0.671	0.480
F50	0.579	0.533	0.508	0.401

Vidljivo je da su rezultati propusnosti u skladu s oblikom zrna. Koeficijent oblika zrna agregata i propusnost su jako korelirane veličine. Propusnost ovisi o veličini agregata i o utjecaju dodatka sitnog agregata. Propusnost raste s uporabom velikih zrna agregata, a opada s povećanjem sadržaja pijeska. Iz tablice 3.8 je vidljivo da se za sve mješavine propusnost kreće

između 0,401 cm/s i 1,258 cm/s, što je dovoljno za drenažni sloj kolnika. Smanjenje propusnosti različitih mješavina s odgovarajućim veličinama prikazano je u tablici 3.8. Usporedbom mješavina M1 i M2 postotak smanjenja propusnosti je 6%, kod mješavina M2 i M3 smanjenje iznosi 7,45%, a kod mješavina M3 i M4 bez sitnog agregata, smanjenje iznosi 17%. Smanjenje oblika zrna rezultira smanjenjem propusnosti. U mješavinama M1 i M2 smanjenje propusnosti iznosi oko 5%, za M2 i M3 smanjenje je 7,8%, a za mješavine M3 i M4 smanjenje propusnosti je vrlo visoko i iznosi 26%. U mješavinama s i bez sitnog agregata uočen je isti trend s obzirom na oblik zrna.

3.1.5.4 Otpornost na abraziju

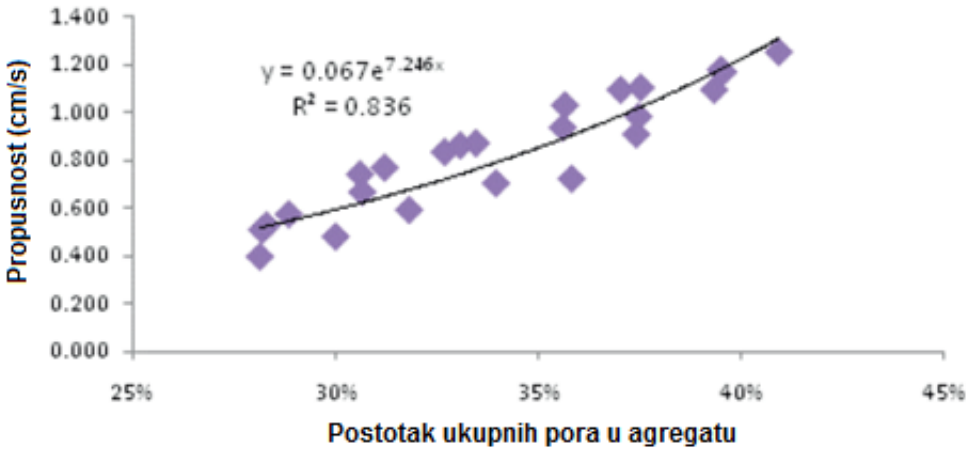
Abrazija je bitno svojstvo kod kolnika. Rezultati otpornosti na habanje prikazani su u tablici 3.9. Pokazalo se da je postotak trošenja veći kada je oblik zrna manji. To se pripisuje većoj kontaktnoj površini između uzorka i abrazijske površine. Postotak trošenja varira od 4% do 6,67%. Međutim, primjećeno je da nema značajnije korelacije između oblika zrna i otpornosti na habanje.

Tablica 3.9 Rezultati otpornosti na habanje (postotak trošenja) [11]

Postotak sitnog agregata	Otpornost na habanje (% trošenja)			
	M1	M2	M3	M4
F0	4	4.47	4.47	4.55
F10	4.23	4.92	4.93	4.74
F20	4.71	4.95	4.98	5.29
F30	4.96	5.68	5.58	5.88
F40	5.51	5.73	5.8	6.19
F50	5.73	6.19	5.96	6.67

3.1.5.5 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu i propusnost poroznog betona

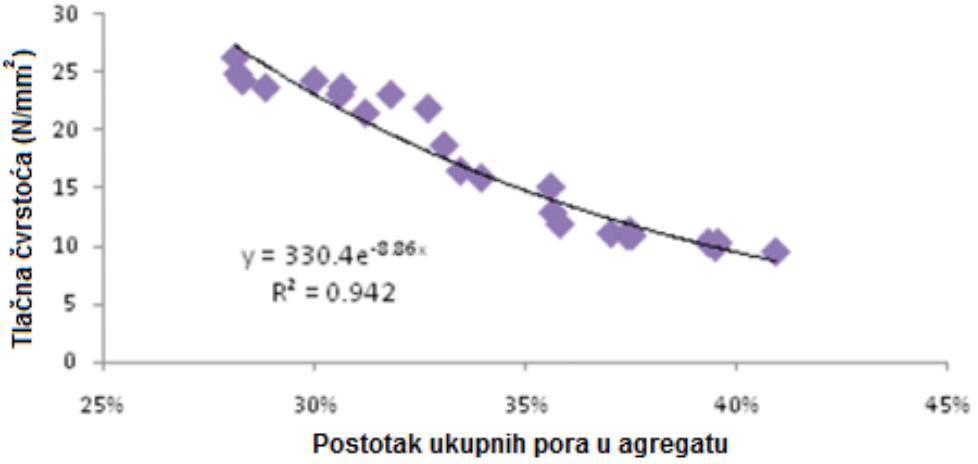
Slika 3.4 predstavlja odnos između sadržaja ukupnih šupljina u agregatu i koeficijenta propusnosti poroznog betona. Šupljine povećavaju propusnost poroznog betona bez obzira na veličinu agregata i postotak sitnog agregata. Koeficijent propusnosti eksponencijalno raste sa sadržajem šupljina. Rezultati označavaju važnost sadržaja šupljina u agregatu i postotka sitnog agregata, bez obzira na veličinu agregata i sadržaj cementa.



Slika 3.4 Utjecaj sadržaja šupljina u agregatu na propusnost [11]

3.1.5.6 Sadržaj ukupnih šupljina u agregatu i karakteristična čvrstoća

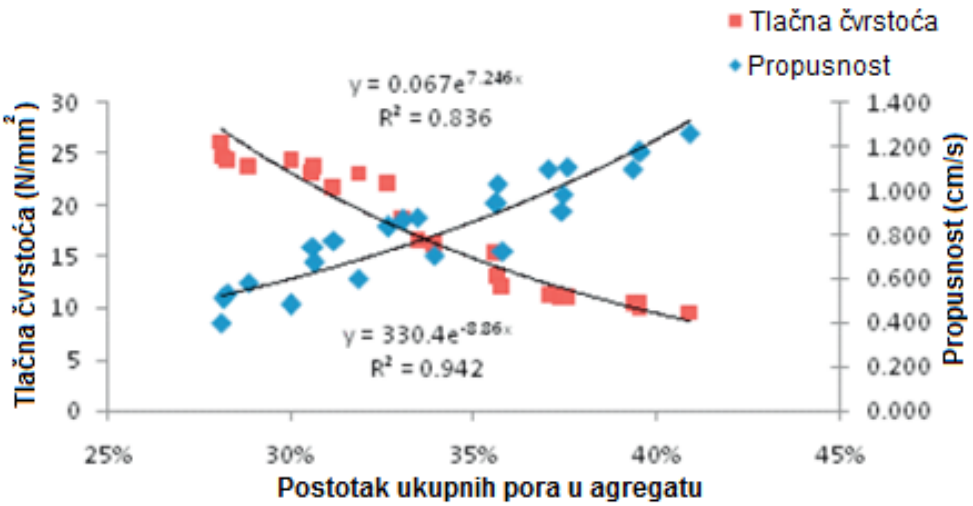
Odnos između sadržaja ukupnih šupljina u agregatu i tlačne čvrstoće prikazan je na slici 3.5. Pokazuje da se povećanjem sadržaja šupljina tlačna čvrstoća smanjuje. Dodavanjem određenog postotka sitnog agregata u mješavinu povećava se tlačna čvrstoća. Tlačna čvrstoća varira od 9,6 do 26,2 N/mm^2, bez obzira na veličinu agregata i dodatak sitnog agregata. Sadržaj šupljina u agregatu varira između 28,13 i 40,91%. Postoji određena korelacija između sadržaja šupljina i tlačne čvrstoće.



Slika 3.5 Utjecaj sadržaja šupljina u agregatu na tlačnu čvrstoću [11]

3.1.5.7 Optimalna mješavina za propusnost i tlačnu čvrstoću

Slika 3.6 prikazuje odnos između tlačne čvrstoće, propusnosti i postotka šupljina u agregatu s ciljem određivanja optimalne mješavine. Kada se sadržaj šupljina povećava, tlačna čvrstoća se smanjuje, a propusnost raste. Oblik zrna se povećava kada sadržaj šupljina u mješavini raste. Dodatkom sitnog agregata u mješavinu, smanjuje se sadržaj šupljina, povećava čvrstoća i smanjuje propusnost. Balansiranjem tlačne čvrstoće i propusnosti određuje se optimalna mješavina. Utvrđeno je da se tlačna čvrstoća kreće između 15 i 20 N/mm^2, a propusnost između 0,6 i 0,8 cm/s. S obzirom na gore navedene vrijednosti mješavine M1F30, M2F30, M3F20 i M4F20 su identificirane kao optimalne.



Slika 3.6 Optimalna mješavina temeljena na sadržaju šupljina u agregatu, tlačnoj čvrstoći i propusnosti [11]

3.1.6 Zaključak

Ova studija pokazuje koeficijent oblika zrna agregata, koji utječe na svojstva i ponašanje poroznog betona sa sitnim agregatom i krupnim agregatom. Opaženo je da povećanje sitnog agregata rezultira smanjenjem volumena pora koje povećavaju tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i vlačnu čvrstoću cijepanjem. Koeficijent oblika zrna agregata je viši za veće veličine agregata, a niži za manje veličine agregata. Raspon tlačne čvrstoće varira između 10 i 26 N/mm^2 kada se koeficijent oblika zrna agregata kreće između 4 i 8. Povećanjem veličine agregata povećava se oblik zrna. Koeficijent propusnosti se povećava od 0,4 do 1,26 cm/s kada je koeficijent oblika zrna agregata u rasponu 4 – 8. Optimalne mješavine, M1F30, M2F30, M3F20 i M4F20, određene su za svaku veličinu krupnog agregata na temelju tlačne čvrstoće, šupljina u agregatu (na temelju oblika zrna) i propusnosti. Međutim, ne može se utvrditi utjecaj oblika zrna na veličinu habanja poroznog betona.

3.2 Granulometrija agregata poroznog betona za propusnu, cestovnu podlogu (Y. Zhifeng, M. Wei, S. Weiguo, Z. Mingkai)

3.2.1 Uvod

Postoje oštećenja kolnika uzrokovana vodom koja se saniraju jednom godišnje, neovisno o njegovoj strukturi, a razlikuju se samo po stupnju oštećenja. Voda koja je ušla u strukturu kolnika i ne može se drenirati je glavni razlog koji uzrokuje oštećenja materijala i strukture kolnika. Postoje tri vrste poroznih, nosivih slojeva ceste koji se proučavaju i koriste dosad, koji su pogodni za gradaciju granuliranog materijala, veziva pogodnog za gradaciju zrnatog materijala i poroznog, cementnog betona. Porozni beton ima mnoge prednosti, kao što su visoka tlačna čvrstoća, niska cijena, malo skupljanje itd. Porozni beton koji se također naziva grubi beton sadrži malo ili nimalo sitnog agregata te se njegova porozna struktura formira dodavanjem krupnog agregata, a čvrstoća poroznog betona ovisi o vezanju cementne paste za površinu ugrađenog agregata. Ugrađeno stanje krupnog agregata ovisi o granulometriji, obliku i teksturi zrna agregata. Granulometrija agregata je jedan od glavnih faktora koji kontroliraju svojstva poroznog betona, koji ne određuje samo njegovu čvrstoću, nego i propusnost. Ova dva svojstva su glavni faktori pri izradi propusnih, betonskih, nosivih slojeva ceste. Općenito, porozni beton sadrži velike (više od 200 kg/m^3) količine cementa da postigne razumnu čvrstoću zbog male granulacije. U ovom radu se proučava utjecaj granulacijskih faktora agregata, kao što su maksimalna veličina, sadržaj sitnog agregata i sadržaj agregata od 4,75 do 9,5 mm na svojstva betona. Prema podacima utjecaja granulometrije agregata na svojstva betona i teoretskog proračuna, preporučena je optimalna, granična granulacija agregata propusnih, betonskih, nosivih slojeva ceste.

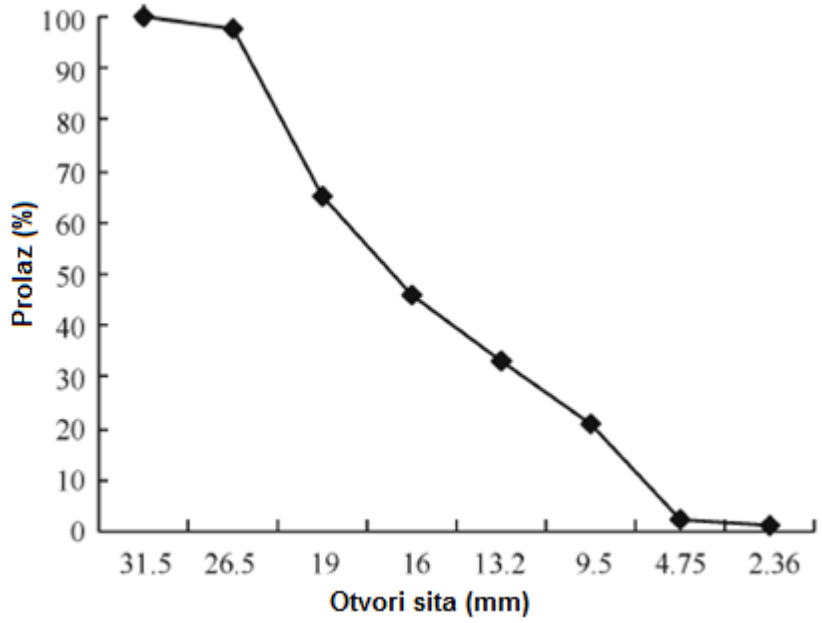
3.2.2 Materijali

Svojstva cementa korištenog u ovom ispitivanju prikazana su u tablici 3.10

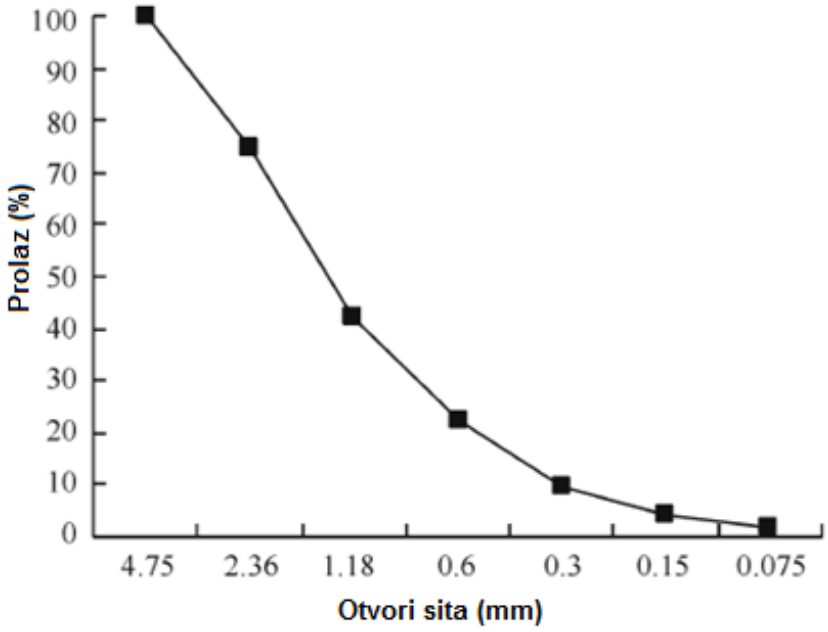
Tablica 3.10 Fizikalna svojstva cementa [12]

Finoća (%)	Normalna konzistencija (%)	Vrijeme vezanja (min)		Starost	Savojna čvrstoća (MPa)			Tlačna čvrstoća (MPa)		
		Početak vezanja	Kraj vezanja		3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
0.6	25.2	140	195		5.1	6.7	9.5	21.5	31.1	47.8

Drobljeni kamen je vapnenac raspona veličine od 4,75 do 26,5 mm, a raspodjela veličine zrna drobljenog kamena je prikazana na slici 3.7. Udjel veličina čestica proizvedenog pijeska je prikazan na slici 3.8.



Slika 3.7 Granulometrijska krivulja drobljenog agregata 4,75 – 26,5 mm [12]



Slika 3.8 Granulometrijska krivulja tvorničkog pijeska [12]

U ovom radu sadržaj cementa svih mješavina je 150 kg/m^3. Postotak prolaza agregata na situ veličine 4,75 mm u testiranoj grupi A varira od 2,55 do 20% dodavanjem različitog sadržaja proizvedenih pijesaka. Granulacija agregata testne grupe B ima različite maksimalne veličine zrna od 19 do 31,5 mm odabirom različitih vrsta krupnog agregata, a prolaz na situ veličine 4,75 mm u istoj ispitnoj skupini je podešen na 10%. Granulacija krupnog agregata u ispitnoj skupini C je podešena različitim veličinama agregata u rasponu od 9,5 do 26,5 mm i 4,75 do 9,5 mm, a prolaz na situ veličine 4,75 mm u ovoj skupini je također podešen na 10%.

3.2.3 Priprema uzoraka

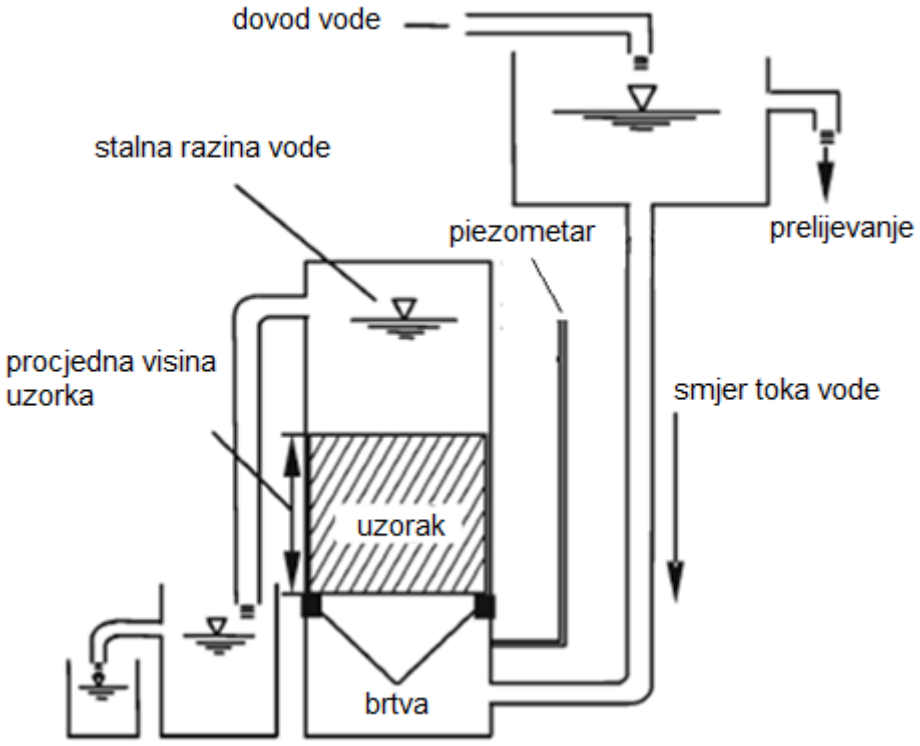
Testni uzorci poroznog betona su oblika valjka, promjera 150 mm i visine 150 mm, koji se vibriraju na vibrostolu s opterećenjem težine 5 kg na vrhu cilindra, a proces vibriranja traje 40 sekundi za svaki uzorak.

3.2.3.1 Metoda ispitivanja

Propusnost poroznog betona je mjerena opremom koja je shematski prikazana na slici 3.9. Koeficijent propusnosti betona se računa pomoću Darcyjeva zakona prema formuli:

$$K_T = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h \cdot t} \tag{1}$$

Gdje je K_T koeficijent propusnosti pri temperaturi T (cm/s), Q je količina vode (cm^3), L (cm) je vertikalna udaljenost mjernih točaka piezometarskih cijevi, Δh je piezometarska visina (cm), t je vrijeme prodiranja (s), a A (cm^2) je površina poprečnog presjeka uzorka.

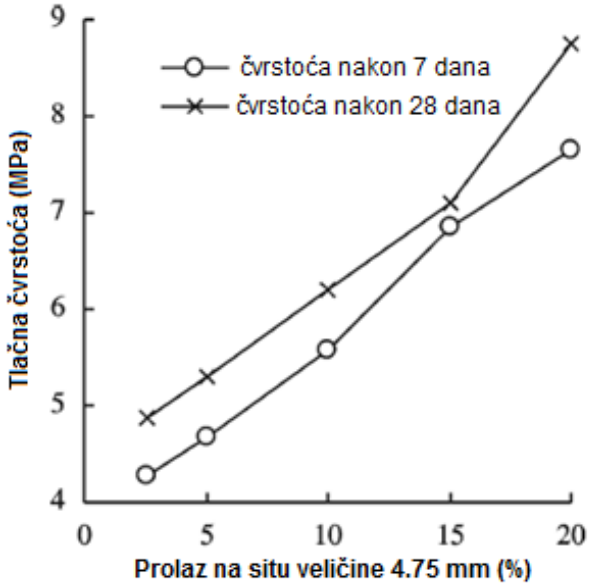


Slika 3.9 Prikaz opreme i postupka mjerenja propusnosti betona [12]

3.2.4 Rezultati istraživanja i rasprava

3.2.4.1 Utjecaj sitnog agregata na svojstva poroznog betona

Glavni, nosivi, propusno – betonski sloj ceste je vrsta „grubog betona“ pa su spojne točke između agregata male i slabe. Potrebna je količina od 200 kg/m^3 cementa kako bi se postigla tlačna čvrstoća u iznosu 5 MPa. Dodavanje određene količine sitnog agregata može dodati spojne točke i povećati snagu poroznog betona. Utjecaj postotka agregata frakcije 4,75 mm na tlačnu čvrstoću poroznog betona prikazan je na slici 3.10.

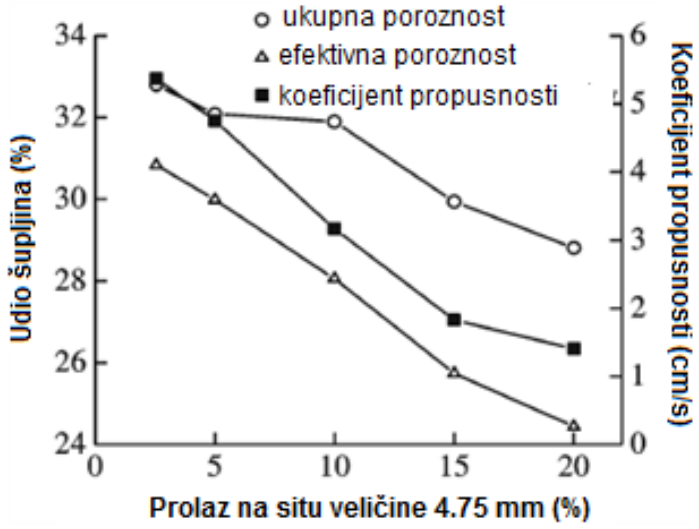


Slika 3.10 Utjecaj prolaska zrna veličine 4,75 mm na tlačnu čvrstoću poroznog betona [12]

Iz slike 3.10 je jasno vidljivo da se tlačna čvrstoća betona nakon 7 i 28 dana povećava s povećanjem postotka agregata frakcije 4,75 mm, tako da prisutnost sitnog agregata doprinosi stvaranju čvrstoće. Sitni agregat koji se nalazi u šupljinama između krupnog agregata i cementna pasta na površini agregata povezuju krupni agregat, što daje poboljšanu strukturu i čvrstoću poroznog betona.

Na slici 3.11 je prikazana količina pora i propusnost poroznog betona s različitim sadržajem sitnog agregata. Jasno je da količina pora i propusnost poroznog betona opadaju s porastom sadržaja sitnog agregata. Dok je postotak prolaska agregata frakcije 4,75 mm 2,55%, propusnost iznosi 5,37 cm/s te drastično opada na 1,41 cm/s kada je prolazak 20%. Sitni agregati popunjavaju praznine između krupnih agregata, tako da volumen šupljina opada, a sitni agregat blokira puteve između šupljina krupnog agregata. Smanjenjem propusnosti, volumni udio efektivnih šupljina ostaje između 20 i 30% i stalno je veći od projektiranog volumnog udjela šupljina propusnih, betonskih, nosivih slojeva ceste (ne manje od 20%). Iz rezultata ispitne

skupine A, pogodan postotak prolaska agregata na situ veličine otvora 4,75 mm je u rasponu 10 do 15%. Kada je udjel krupnog agregata 15%, čvrstoća betona je 40% veća nego kod kontrolnog betona, a propusni beton s čvrstoćom većom od 6 MPa je pripremljen s udjelom cementa 150 kg/m^3. Ako se koristi slobodna granulacija, da bi se postigla čvrstoća od 6 MPa potrebno je 200 kg/m^3 cementa.



Slika 3.11 Utjecaj sitnog agregata na sadržaj pora i propusnost [12]

3.2.4.2 Utjecaj maksimalne veličine zrna agregata na svojstva betona

Utjecaj maksimalne veličine zrna agregata na svojstva betona je prikazan u tablici 3.11 Jasno je da se s povećanjem maksimalnog zrna agregata čvrstoća poroznog betona značajno smanjuje, a udjel šupljina i propusnost betona se neznatno povećavaju. Povećanjem promjera agregata, dodirne točke između agregata se smanjuju, kontaktne sile između krupnog agregata slabe, smanjuje se čvrstoća poroznog betona, ali u isto vrijeme sadržaj efektivnih šupljina i propusnost poroznog betona se povećavaju. Prikladna maksimalna veličina zrna agregata za propusne, betonske, nosive slojeve ceste iznosi 26,5 mm.

Tablica 3.11 Utjecaj veličine agregata na svojstva poroznog betona [12]

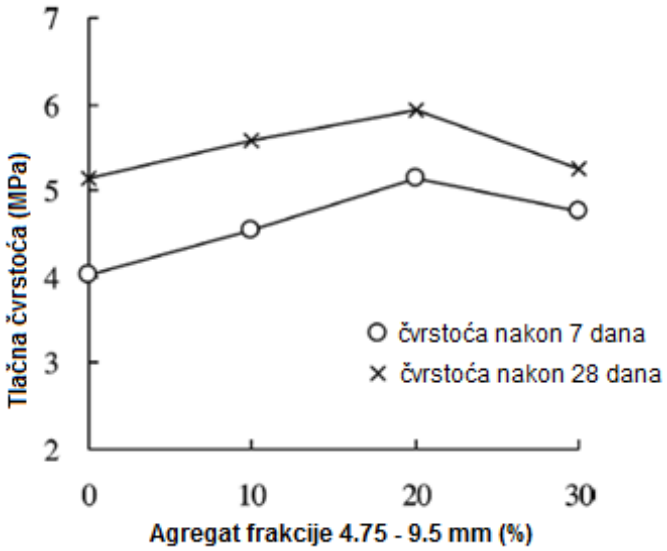
Br.	Agregat (mm)	Tlačna čvrstoća (MPa) 7 d	28 d	Koeficijent propusnosti	Ukupna poroznost (%)	Efektivna poroznost (%)
B1	19~37.5	3.13	5.22	4.69	32.39	29.86
B2	16~31.5	4.38	5.75	4.31	32.07	29.41
B3	13.2~26.5	5.39	6.17	3.22	32.01	28.12
B4	9.5~19	6.05	6.51	2.70	30.90	27.75

3.2.4.3 Utjecaj agregata frakcije 4,75 – 9,5 mm na svojstva poroznog betona

Utjecaj agregata frakcije 4,75 – 9,5 mm na svojstva poroznog betona prikazan je na slici 3.12. Vidljivo je da tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana ima maksimalnu vrijednost kada udio frakcije 4,75 – 9,5 mm iznosi 20%. Granulacija se računa prema Weymouthovoj teoriji miješanja čestica. U ovoj teoriji fenomen miješanja sitnije frakcije od promatrane s drobljenim agregatom se ne događa kada je promjer dodane sitnije čestice manji od srednje udaljenosti (t) među većim česticama, koji se može opisati pomoću sljedeće formule:

$$t = \left[\left(\frac{d_0}{d_a}\right)^{1/3} - 1\right] \cdot D \tag{2}$$

Gdje je d_0 zbijeni volumni udio agregata, d_a je stvarni volumni udio agregata, a D je srednji promjer zrna agregata.



Slika 3.12 Utjecaj zrna agregata veličine 4,75 – 9,5 mm na tlačnu čvrstoću [12]

U tablici 3. su navedene granulacije agregata i Weymouthova kritična granulacija. Prema izračunu, kritični postotak miješanja je 34%. Kada je postotak prolaza niži od ove vrijednosti, čestice veće od 9,5 mm se čvrsto ugrađuju zajedno bez miješanja pa se snaga povećava s povećanjem sadržaja frakcije agregata 4,75 – 9,5 mm jer se povećava broj dodirnih točaka između krupnog agregata.

Tablica 3.12 Granulacija agregata veličine 4,75 – 9,5 mm i Weymouthova granulacija [12]

Br.	Veličina otvora sita/prolaz (mm/%)			
	37.5	19	9.5	4.75
C-00	100	60. 64	10.52	10
C-10	100	64.42	19.01	10
C-20	100	68.25	27.59	10
C-30	100	72.1	36.23	10
Weymouthova granulacija	100	63.6	34	10

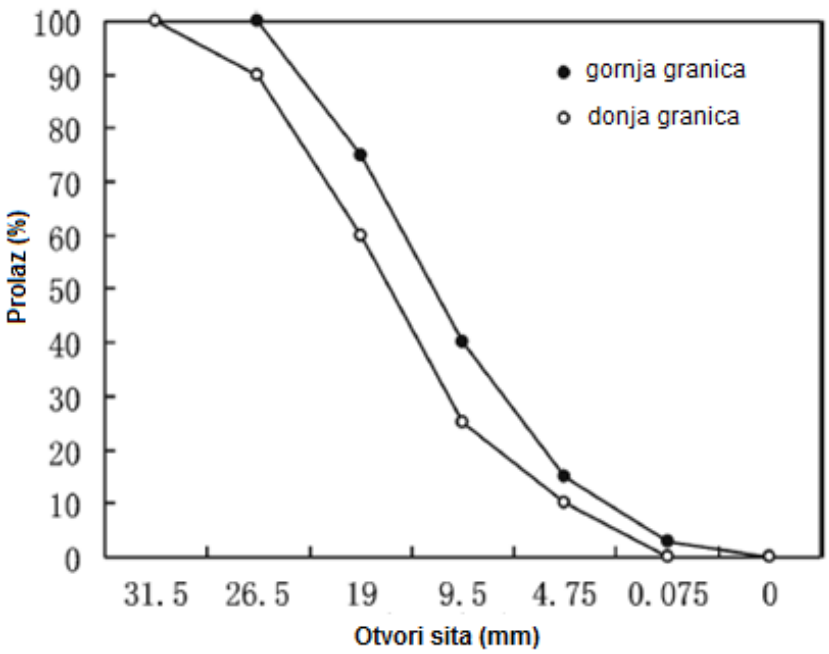
3.2.4.4 Optimalna granulacija poroznog betona

Prema rezultatima iznad, pogodan postotak prolaska agregata na situ veličine otvora 4,75 mm je 10 – 15, tako da porozni beton ima veću snagu i razumnu propusnost. U tablici 3.13 su navedene dvije teorijske granulacije izračunate Weymouthovom teorijom koje su uspoređene sa stvarnom granulacijom nekoliko ispitnih uzoraka te su prikazani rezultati istog, realnog ispitivanja. Također je vidljivo da je granulacija testnih uzoraka veoma slična izračunatoj granulaciji i ispitni uzorci imaju veliku čvrstoću i propusnost.

Tablica 3.13 Izračunata granulacija, eksperimentalna granulacija i svojstva [12]

Veličina otvora sita (mm)	Prolaz (%)					
	Weymouth 1	Weymouth 2	A2	A3	C3	C4
31.5	100	100	100	100	100	100
19.0	63.6	65.6	67.7	69.5	68.3	72.1
9.5	34.0	37.7	26.9	30.9	27.6	36.2
4.75	10.0	15.0	10.0	15.0	10.0	10.0
Tlačna čvrstoća nakon 7 dana (MPa)	—	—	5.58	6.85	5.14	4.75
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)	—	—	6.21	7.09	5.94	5.25
Ukupna poroznost (%)	—	—	31.9	29.94	31.75	31.23
Efektivna poroznost (%)	—	—	28.06	25.74	28.12	27.81
Koeficijent poroznosti (cm/s)	—	—	3.17	1.83	3.25	2.76

Preporučena, optimalna granica granulacije poroznog betona za nosivi sloj ceste dana je na slici 3.13. U usporedbi s otvorenom granulacijom, kontinuirana granulacija daje porozni beton visoke čvrstoće s malim sadržajem cementa.



Slika 3.13 Preporučeni raspon granulacije agregata [12]

3.2.5 Zaključak

a) Povećanjem sadržaja sitnog agregata, raste čvrstoća poroznog betona, a propusnost mu se smanjuje te je sačuvano oko 50 kg/m^3 cementa u usporedbi s običnim poroznim betonom za nosivi sloj ceste.

b) Povećanjem maksimalne veličine agregata u poroznom betonu, čvrstoća betona se smanjuje dok propusnost raste.

c) Pogodni sadržaj krupnog agregata frakcije 4,75 – 9,5 mm je oko 20% tako da krupniji agregati imaju malo miješanje s dodanom sitnijom frakcijom, stoga porozni beton ima visoku čvrstoću i zadovoljavajuću poroznost.

3.3 Studija o suživotu poroznog, ekološkog betona s biljkama (Hongzhu Quan)

3.3.1 Uvod

Uporaba poroznog betona kao ekološkog materijala uvedena je u Japanu. Prijavljeno je nekoliko metoda za proizvodnju poroznog betona. U jednoj metodi se koristi lagani agregat. U drugoj se uvode mjehurići zraka u svježi beton ili mort da se proizvede materijal s plinovitom strukturom. U još jednoj, sitni agregat je izostavljen iz smjese, tako da je prisutan veliki broj povezanih šupljina. U tom slučaju porozni beton je poznat kao grubi beton i sadrži pore velikih dimenzija. Uski raspon frakcija agregata osigurava visoki sadržaj povezanih šupljina koji doseže 50% u rahlom stanju. Posljednja metoda se uglavnom koristi za proizvodnju ozelenjenog, ekološkog, poroznog betona zbog lakoće s kojom se porozni beton može ugraditi. Međutim, do danas utjecaj omjera pojedinih materijala u mješavini na svojstva ekološkog, poroznog betona i njegov suživot s biljkama nije u potpunosti shvaćen. Opisani su učinci sadržaja šupljina, tipa agregata, granulometrije i vodocementnog faktora na svojstva ekološkog, propusnog betona. Ispitivanje je prošireno da se ispita utjecaj debljine poroznih, ekoloških, betonskih blokova i gornjeg sloja tla na rast biljaka.

3.3.2 Materijali

Obični Portland cement (gustoće 3,16 g/cm^3 i specifične površine 335 m^2/kg) je korišten za vezivanje krupnog agregata i drobljenog vapnenca. Fizikalna svojstva krupnog agregata (gustoća nakon sušenja u peći 2,60 g/cm^3 i apsorpcija 3,05%) su mjerena u skladu s odgovarajućim Kineskim nacionalnim standardima (GB). Kao biljne vrste korištene su visoka vlasulja i višegodišnji ljulj.

3.3.2.1 Udio materijala u mješavini

Mješavine trebaju imati minimalno 25% sadržaja šupljina i minimalnu tlačnu čvrstoću od 5 MPa. Sadržaj agregata je konstantan zbog gustoće u suhom, zbijenom stanju i sadržaj cementa je promijenjen. Vodocementni faktor je u rasponu od 0,25 do 0,55. Udjeli materijala u mješavini ekološkog, poroznog betona dani su u tablici 3.14.

3.3.2.2 Eksperimentalni postupci

Beton se miješa u cirkulirajućoj 50 litarskoj miješalici koja je gotovo 3 minute ispunjena na 75% kapaciteta. Obradivost svježeg betona je vizualno ispitana kako bi se osiguralo da

cementna pasta oblaže agregat, da nije previše suha, niti previše vlažna. Beton je stavljen u kalupe u slojevima oko 100 mm. Porozni, ekološki beton se pažljivo ručno zbija da bi se osigurala njegova jednolika raspodjela i kako bi se izbjegao lom agregata. Korišten je pravokutni, drveni, ručni nabijač kako bi se osiguralo ujednačeno zbijanje u kutovima betonskih bokova. Vidljive površine su zaglađene lopaticom. Nakon vađenja iz kalupa, uzorci su njegovani u vodi na temperaturi 20±2 ℃. Ekološki, porozni, betonski blokovi držani su na otvorenom bez posebnih mjera opreza oko dva mjeseca da se njihove izložene površine karboniziraju.

3.3.3 Metode ispitivanja

3.3.3.1 Ispitivanje poroznog betona

Šupljine čine ukupni volumen kroz kojeg korijenje trave može doći do prirodnog tla ispod betona i kroz kojeg voda može teći unutar uzorka. Ispitni uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće su dimenzija 150×150×150 mm. Koeficijent propusnosti je određen pomoću metode stalne razine stupca vode na uzorcima dimenzija 150×150 mm. Ispitivanje upijanja vode je provedeno na uzorcima koji su prethodno ispitani na propusnost i zatim osušeni u peći. Uzorci su izmjereni prije i nakon uranjanja u vodu na 24 sata.

3.3.3.2 Vegetacija

Ekološki, porozni, betonski blokovi su izrađeni s različitim granulacijama drobljenog vapnenca. Ugrađeni, betonski blokovi su debljine 5, 10, 15 i 20 cm, a tanki pokrov tla je debljine 3, 6 i 10 cm. Pore ekološkog, poroznog betona su ispunjene mješavinom mahovine, tla, gnojiva i vode. Svježi beton ima pH vrijednost oko 12, a mješavina pH vrijednost 4,75.

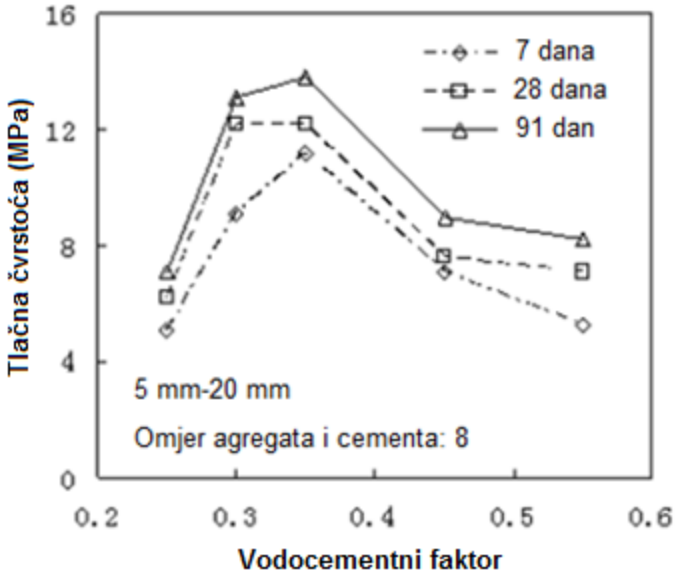
3.3.4 Rezultati i rasprava

Velike pore u ekološkom, poroznom betonu spadaju među najvažnije čimbenike koji utječu na njegova svojstva i primjenu. Tablica 3.14 daje prikaz svojstava ekološkog, poroznog betona koristeći lomljeni vapnenac različitih granulacija i različit sadržaj cementa. Ovi rezultati jasno pokazuju da se prosječni promjer pora povećava s povećanjem granulacije agregata. Smanjenjem debljine cementne paste, promjer pora se povećava, čvrstoća poroznog, ekološkog betona se smanjuje i on postaje propusniji. Za dani omjer agregata i cementa bilježi se prirast propusnosti s povećanjem veličine zrna agregata.

Tablica 3.14 Omjer materijala u mješavini i svojstva poroznog, ekološkog betona (vodocementni faktor iznosi 0,25) [13]

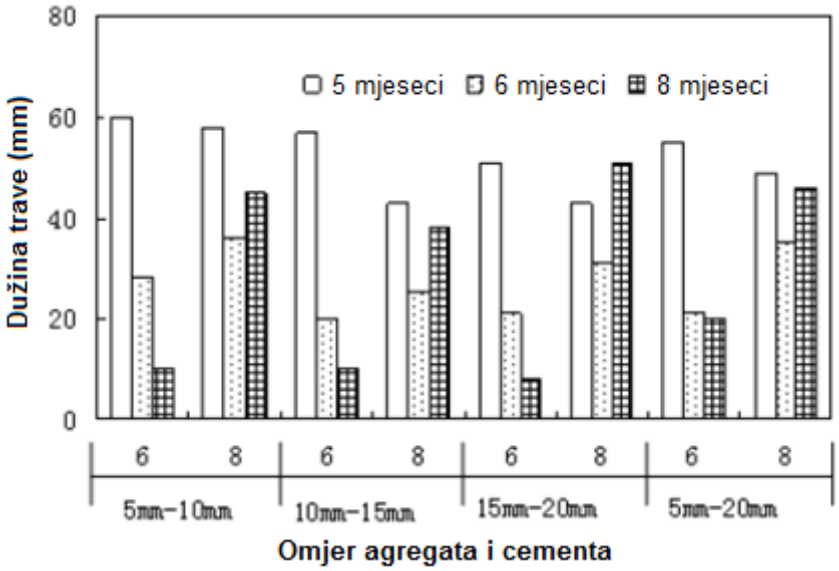
Br.	Veličina agregata (mm)	Omjer agregata i cementa	Sadržaj cementa (kg/m^3)	Prosječni promjer pore (mm)	Sadržaj pora (%)	Tlačna čvrstoća nakon 28 dana (MPa)	Propusnost (cm/s)
1	5-10	6	323	1.68	27.1	10.6	1.48
2		8	242	1.73	33.0	5.6	2.37
3	10-15	6	310	2.32	29.5	10.9	1.56
4		8	233	2.64	34.9	5.1	2.89
5	15-20	6	308	3.26	29.2	11.2	2.45
6		8	231	3.44	34.6	5.7	3.75
7	5-20	6	318	3.02	25.8	12.5	1.22
8		8	239	3.17	33.8	6.2	2.70

Slika 3.14 predstavlja omjer vodocementnog faktora i tlačne čvrstoće betona s rasponom zrna agregata od 5 do 20 mm. Kao što je prikazano grafički, prirast vodocementnog faktora od 0,1 do 0,25 značajno povećava tlačnu čvrstoću. Povećanjem vodocementnog faktora za 0,1, smanjuje se sadržaj šupljina za oko 2,5% i pH vrijednost lagano pada na 11,6. Nije primjećen značajniji utjecaj na kontinuitet šupljina. Vodocementni faktor u iznosu 0,35 je usvojen za sve mješavine.



Slika 3.14 Veza između vodocementnog faktora i tlačne čvrstoće [13]

Slika 3.15 prikazuje duljinu trave u odnosu na omjer agregata i cementa. Do 5 mjeseci, rast trave je gotovo nemoguće razlikovati za sve omjere agregata i cementa. Međutim, nakon tog perioda, rast trave se značajno smanjuje za sve granulacije agregata kada je omjer agregata i cementa jednak 6. Stoga, smanjenje rasta trave može biti posljedica više pH vrijednosti površine ekološkog, poroznog betona i vrlo niskog kapilarnog dizanja s većim sadržajem cementa. Osim toga, kao što je prikazano u tablici 3.14, kada je omjer agregata i cementa jednak 8, tlačna čvrstoća i sadržaj pora ispunjavaju tražene uvjete ozelenjavanja betona. Iz tog razloga usvojen je srednji sadržaj cementa.

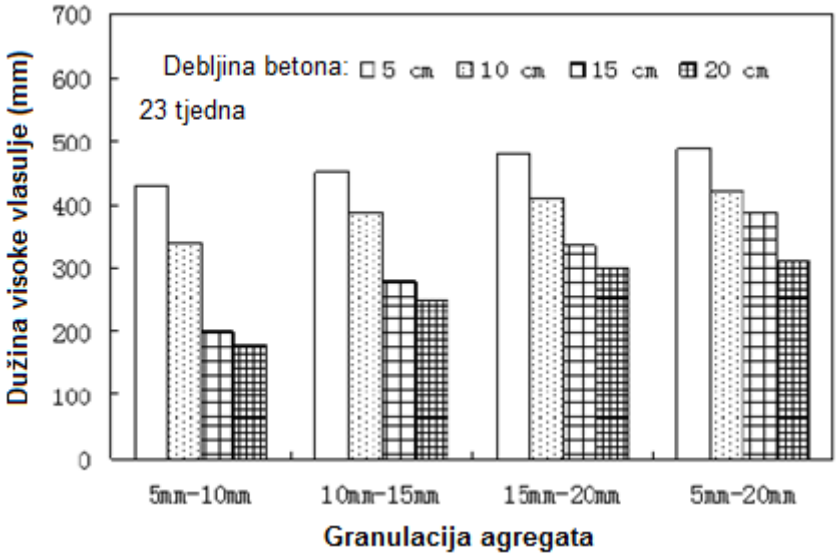


Slika 3.15 Utjecaj omjera agregata i cementa na dužinu trave [13]

Da se smanji pH vrijednost na površini ekološkog, poroznog betona povećan je vodocementni faktor i utiskivanje mješavine treseta mahovine, tla i gnojiva.

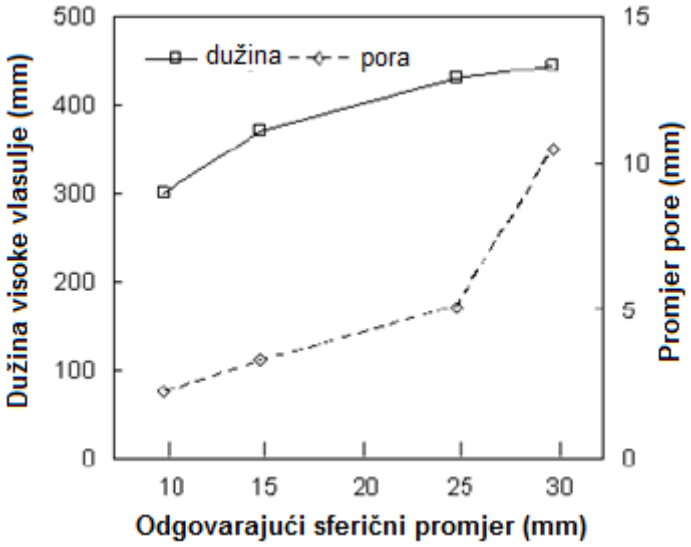
U ovom istraživanju ekološki, porozni beton je prekriven s tlom debljine 6 cm. Tanji blokovi daju bolji rast trave.

Slika 3.16 prikazuje utjecaj granulacije agregata na teksturu ekološkog, poroznog betona s drobljenim vapnencem i na rast visoke vlasulje.



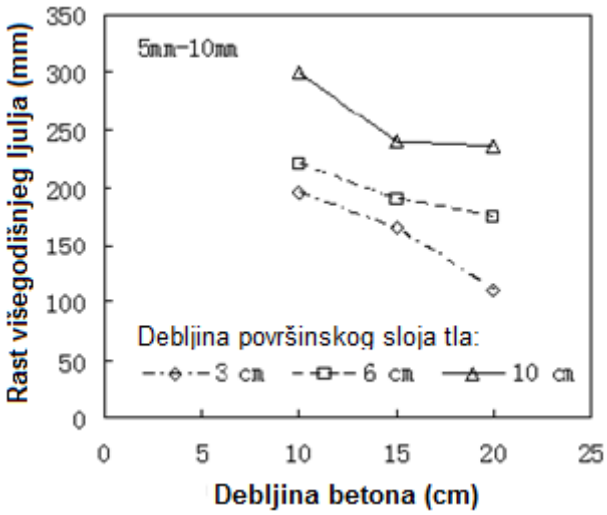
Slika 3.16 Utjecaj granulacije agregata i debljine betona na rast visoke vlasulje [13]

Slika 3.17 je grafički prikazana korištenjem rezultata prikazanih u tablici 3.14, pošto se povećanjem vodocementnog faktora za 0,1 srednja veličina pora značajno ne smanjuje. Uporaba većih, krupnih agregata daje veće pore i bolji rast trave. Međutim, povećanje prosječnog promjera pora s 5 na 10 mm ne pridonosi poboljšanom rastu trave.



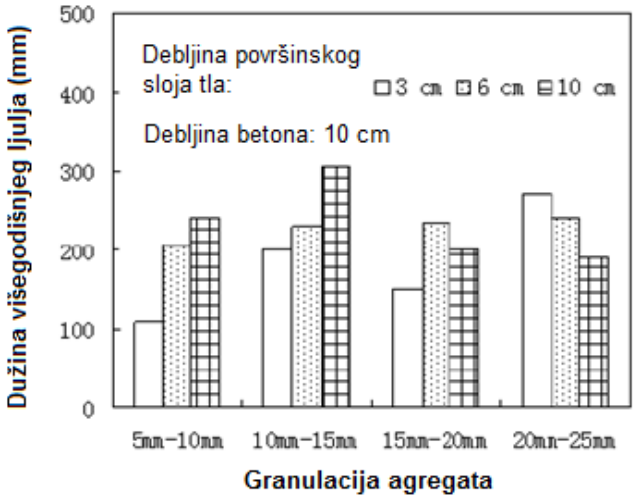
Slika 3.17 Utjecaj granulacije agregata na rast visoke vlasulje [13]

Slika 3.18 prikazuje utjecaj poroznog, ekološkog betona i debljine površinskog sloja tla na rast višegodišnjeg ljulja. Prikazani su rezultati rasta biljaka 23 tjedna poslije sadnje. Kod poroznih, ekoloških, betonskih blokova iste debljine, rast trave je bolji za blokove prekrivene debljim slojem tla.



Slika 3.18 Utjecaj poroznog, ekološkog betona i debljine površinskog sloja tla na rast višegodišnjeg ljulja [13]

Slika 3.19 prikazuje odnos rasta višegodišnjeg ljulja 23 tjedna nakon sadnje i granulacije agregata ekološkog, poroznog betona izrađenog s drobljenim vapnencem, prekrivenog s tlom različitih debljina. Kao što je prikazano, utjecaj površinskog sloja tla na rast višegodišnjeg ljulja je značajan samo za manje granulacije agregata. Povećanje debljine površinskog sloja tla ne rezultira boljim rastom biljaka kod ekološkog, poroznog betona napravljenog s agregatom većih granulacija. Povećanjem površinskog sloja tla za 6 cm nije primjećena značajna razlika na rast biljaka. Nadalje, zanimljivo je primjetiti da promjena boje biljaka od zelene do žute ovisi o debljini ekološkog, poroznog betona i debljini površinskog sloja tla. Rast biljaka se povećava s povećanjem debljine ekološkog, poroznog betona i smanjenjem debljine površinskog sloja tla.



Slika 3.19 Odnos rasta višegodišnjeg ljulja 23 tjedna nakon sadnje i granulacije agregata prekrivenog s tlom različitih debljina [13]

3.3.5 Zaključak

U radu se istražuje utjecaj udjela pojedinih materijala u mješavini na svojstva poroznog, ekološkog betona i njegov suživot s biljkama, koji je proširen da procjeni utjecaj debljine betonskih blokova i gornjeg sloja tla na rast biljaka, što je dovelo do sljedećih zaključaka.

Čvrstoća ekološkog, poroznog betona je određena omjerom vodocementnog faktora i sadržaja cementa.

Propusnost se povećava s povećanjem granulacije agregata i sa smanjenjem cementne paste. Granulacija agregata, sadržaj cementa i utjecaj vodocementnog faktora utječu na teksturu poroznog betona, a time značajno i na njegov suživot s biljkama. Omjer agregata i cementa jednak 8 i vodocementni faktor otprilike 0,35 preporučuju se za ozelenjavanje poroznih, ekoloških, betonskih proizvoda.

Rast biljaka povećava se povećanjem debljine ekološkog, poroznog betona i smanjenjem debljine površinskog sloja tla.

3.4 Utjecaj različitih razreda drobljenog agregata na svojstva poroznog betona (I. Radelja)

3.4.1 Uvod

Agregat čini približno tri četvrtine volumena betona, pa iz tog razloga i ima veliki utjecaj na svojstva svježeg i očvrslog betona. Agregati za beton se mogu podijeliti na prirodne, umjetno drobljene i specijalne agregate (lagani agregat).

Svojstva agregata bitno utječu na svostva betona, a konačna ocjena o prikladnosti agregata se treba donositi na osnovu ispitivanja betona. Vještim projektiranjem sastava betona, pri čemu se koriste različiti dodaci, pravilan izbor cementa i drugim postupcima proizvodnje betona, mogu se postići zadovoljavajuća svojstva.

Krupna zrna agregata čine skelet betona preko kojeg se, zbog znatno veće krutosti od krutosti cementnog kamena, prenose sile. Sitna zrna agregata zajedno s cementnom pastom čine mort. Premda je uloga krupnih zrna i pijeska u svježem i očvrslom betonu različita, oni se pri ispitivanju svojstava agregata i projektiranju sastava betona promatraju zajednički.

3.4.2 Eksperimentalni dio ispitivanja

3.4.2.1 Uvod u eksperimentalni dio rada

Cilj ovog istraživanja je ispitati svojstva poroznog betona od drobljenog agregata. Svrha rada je izraditi beton koji ima dobru vodopropusnost i poroznost, a ujedno i dovoljno veliku čvrstoću. To će se nastojati postići upotrebom optimalnog sadržaja agregata i ostalih komponenti (vode, cementa i drugih dodataka).

U skladu s time napravljeno je 8 mješavina[3]. Mješavine sadrže jednaku količinu cementa (350 kg/m^3 betona), a razlikuju se po udjelu, porijeklu i veličini zrna agregata (2 – 4 mm, 4 – 8 mm, 7 – 12 mm, 8 – 11,2 mm i 11,2 – 16 mm).

Mješavine poroznog betona su sljedeće:

- I-2 – mješavina napravljena od drobljenog agregata, frakcije 8 – 11,2 mm
- I-3 – mješavina napravljena od drobljenog agregata, frakcije 11,2 – 16 mm.

[3] U daljnjem tekstu su navedene samo mješavine I-2 i I-3 koje imaju najveće koeficijente propusnosti mjerene metodama stalne i padajuće razine stupca vode.

U očvrslom stanju na uzorcima poroznog betona su izvedena sljedeća ispitivanja

- Ispitivanje poroznosti
- Ispitivanje propusnosti
- Ispitivanje tlačne čvrstoće (nakon 28 dana)
- Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem.

3.4.2.2 Korišteni materijali

U pripravljanju pokusnih mješavina upotrebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/ A-S 42,5 R
- Agregat
- Voda
- Leteći pepeo.

3.4.2.3 Izrada mješavina poroznog betona

U sljedećim tablicama su prikazani sastavi mješavina poroznog betona za količinu od 1m^3 betona.

Oznaka : PC2- I2

Tablica 3.15 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu [14]

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTO]A r [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3 [dm^3]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

Tablica 3.16 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata [14]

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLA`NOST		1 m^3	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11	100	1486,3	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
11 - 16	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		11,15		1,5	132	2,64

Oznaka : PC3- I3

Tablica 3.17 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu [14]

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTO]A r [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3 [dm^3]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,07	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,16	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
AGREGAT		1486	2,68	555	29,73
UKUPNO		1959		1000	39,18

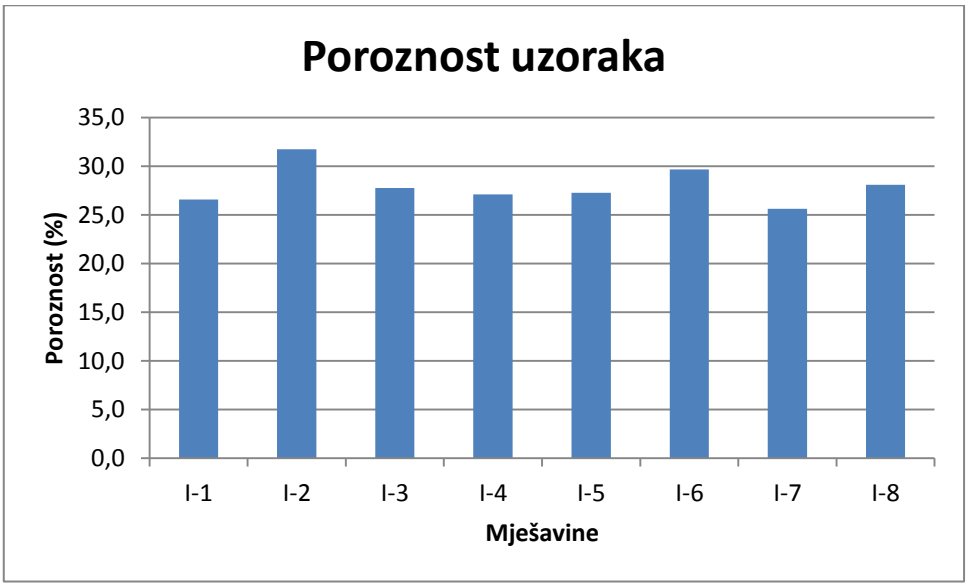
Tablica 3.18 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata [14]

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA: APSORPCIJU		VLA`NOST		KORIGIRANA MASA ZA: 1 m^3	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0	0	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11	0	0	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11 - 16	100	1486,3	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		11,15		1,5	132	2,64

3.4.3 Rezultati i analiza rezultata poroznog betona

3.4.3.1 Ispitivanje poroznosti

Najveću poroznost ima mješavina I-2 koja sadrži frakciju od 8 – 11,2 mm. Iako se realno očekivalo da će najveću poroznost imati mješavina koja sadrži najveća zrna agregata, frakcije 11,2 – 16 mm.



Slika 3.20 Poroznost uzoraka [14]

Druga mješavina I-2 ima najveću poroznost (31,7%). Ona sadrži krupniji agregat, frakcije 8 – 11,2 mm pa je bilo realno za očekivati da će imati veću poroznost.



Slika 3.21 Mješavina I-2 [14]

Treća mješavina I-3 ima manju poroznost od druge mješavine (27,7%), iako sadrži krupniji agregat frakcije 11,2 – 16 mm.

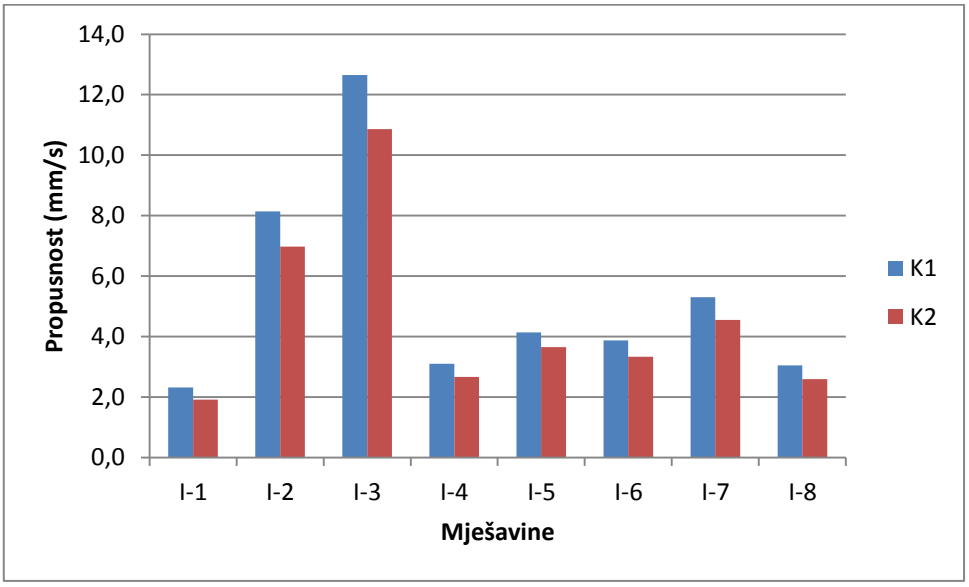


Slika 3.22 Mješavina I-3 [14]

3.4.3.2 Ispitivanje propusnosti

Koeficijenti propusnosti K_1 kod prve metode kreću se u rasponu od 2,31 – 12,65 mm/s, a kod druge metode K_2 iznosi od 1,91 – 10,86 mm/s.

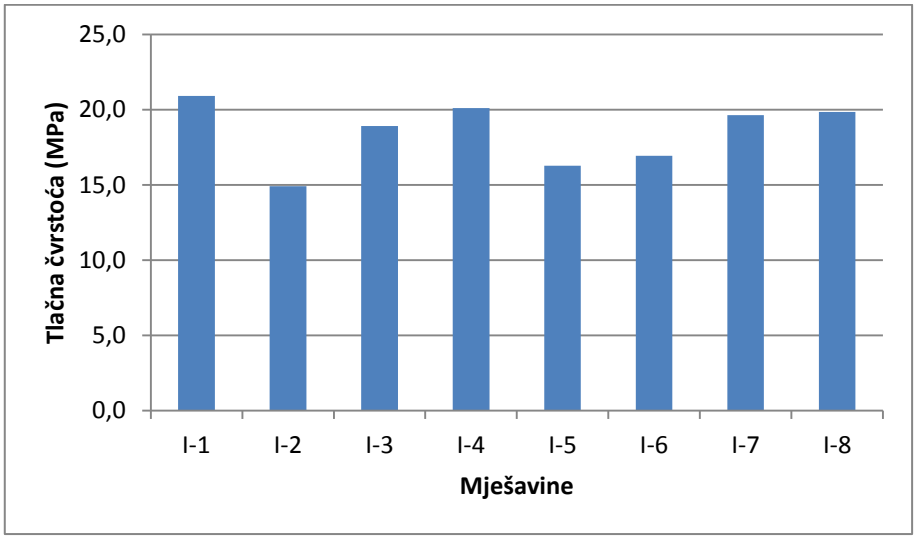
Kod mješavina s jednofrakcijskim agregatom, veću su propusnost imali betoni veće nazivne frakcije. Najveću propusnost ima mješavina I-3. To je bilo realno za očekivati jer mješavina sadrži krupni agregat frakcije 11,2 – 16 mm koji stvara veći sadržaj pora.



Slika 3.23 Propusnost uzoraka po metodi 1 i metodi 2 [14]

3.4.3.3 Ispitivanje tlačne čvrstoće

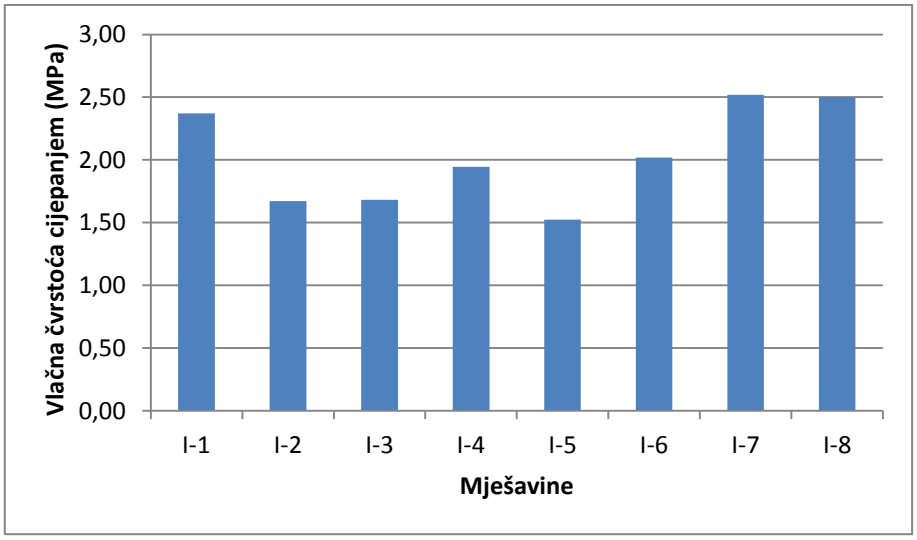
Najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina I-1 koja sadrži sitniji agregat, frakcije 4 – 8 mm. Najmanju tlačnu čvrstoću ima mješavina I-2 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 8 – 11,2 mm.



Slika 3.24 Tlačna čvrstoća uzoraka [14]

3.4.3.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Najmanju tlačnu čvstoću ima mješavina I-5 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 4 – 8 mm i 11,2 – 16 mm u omjeru 70/30. Najveću vlačnu čvrstoću ima mješavina I-7 koja sadrži drobljeni agregat frakcije 2 – 4 mm i mramorne dekorativne granule 7 – 12 mm, u omjeru 15/85. Razlog tome je što ova mješavina sadrži sitnije čestice agregata koje pozitivno utječu na vlačnu čvstoću.



Slika 3.25 Vlačna čvrstoća cijepanjem [14]

3.4.4 Zaključak

Sve mješavine zadovoljavaju kriterijima poroznosti. Pokazalo se da mješavine koje sadrže veća zrna agregata imaju bolju poroznost od mješavina sa sitnijim frakcijama agregata.

Definirano je da najveću propusnost daju jednofrakcijske mješavine koje sadrže najveće zrno agregata veličine 11,2 – 16 mm. Time je zaključeno da se propusnost povećava s povećanjem veličine agregata.

Kod ispitivanja tlačne čvrstoće, mješavina koja sadrži najmanju nazivnu frakciju 4 – 8 mm ima najveću tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća se dodatno povećava dodatkom 15% sitnijih zrna veličine 2 – 4 mm, što se vidi na primjeru mješavine I-7.

Najveću vlačnu čvrstoću ima mješavina koja sadrži mramorne dekorativne granule frakcije 7 – 12 mm i 15% agregata veličine 2 – 4 mm. Razlog tome je što sitnije čestice pozitivno utječu na vlačnu čvrstoću.

4 EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA SVOJSTAVA POROZNOG BETONA

4.1 Uvodni dio eksperimentalnih ispitivanja

Cilj ovog istraživanja je odrediti optimalnu mješavinu poroznog betona koja daje najpovoljniji omjer propusnosti i čvrstoće koristeći različite udjele, veličine i vrste agregata te različite sadržaje cementa i vode. Mješavine su ugrađivane na tri različita načina da bi se vidjelo kako način ugradnje utječe na svojstva poroznog betona.

U diplomskom radu [14], ispitana su svojstva poroznog betona različitih razreda drobljenog agregata. Izrađeno je više mješavina od kojih su se najboljima pokazale mješavine oznaka I-2 (mješavina napravljena od drobljenog agregata, frakcije 8 – 11,2 mm) te I-3 (mješavina napravljena od drobljenog agregata, frakcije 11,2 – 16 mm). Naime, spomenute mješavine su imale najveće koeficijente propusnosti mjerene s obje ispitne metode (metoda stalne i padajuće razine stupca vode). Na temelju tih rezultata, spomenute mješavine su odabrane kao polazne za ispitivanja u ovom diplomskom radu.

Nakon proračuna sastava mješavina, u laboratoriju za građevinske materijale Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, napravljeno je osam mješavina poroznog betona:

- B_1 – mješavina frakcije 8 – 11,2 mm, napravljena od prirodnog agregata, ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom
- B_2 – mješavina frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od prirodnog agregata, ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom (sadržaj cementa iznosi 350 kg/m^3)
- B_3 – mješavina frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od prirodnog agregata, ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom (sadržaj cementa iznosi 400 kg/m^3)
- B_4 – mješavina frakcije 8 – 11,2 mm s udjelom 40% i mješavina frakcije 16 – 22,4 mm s udjelom 60% prirodnog agregata, ugrađena vibriranjem na vibrostolu (sadržaj cementa iznosi 250 kg/m^3)
- B_5 – mješavina frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata, ugrađena vibriranjem na vibrostolu
- B_6 – mješavina frakcije 11,2 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata, ugrađena zbijanjem drvenom letvom

- B_7 – mješavina frakcije 8 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata, ugrađena zbijanjem drvenom letvom
- B_8 – mješavina frakcije 8 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata, ugrađena vibriranjem na vibrostolu.

Prve četiri mješavine sadrže prirodni agregat, a preostale su izrađene s drobljenim agregatom. Vodocementni faktor s kojim ulazimo u proračun isti je za sve mješavine i iznosi 0,35. Sadržaj cementa iznosi 350 kg/m^3, osim u mješavinama B_3 i B_4.

U svježem stanju, konzistencija betona je ispitana metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice. Mješavine su zatim ugrađene u četiri kalupa oblika kocke, dimenzija 150×150×150 mm i dva kalupa oblika valjka, dimenzija 100×200 mm. 24 sata nakon ugradnje uzorci oblika kocke su izvađeni iz kalupa i njegovani u vlažnoj komori na temperaturi 20±2 ℃, dok su uzorci oblika valjka njegovani u kalupima.

U očvrslom stanju ispitana je propusnost, poroznost, tlačna čvrstoća nakon 28 dana i vlačna čvrstoća cijepanjem.

Također, ugrađene su četiri probne ploče dimenzija 80×80×15 cm na kojima je ispitana propusnost prema ASTM C 1701 standardu. Tri ploče istog sastava ugrađene su na travnatu, zemljanu i šljunčanu podlogu, a jedna ploča s drugačijim sastavom ugrađena je na zemljanu podlogu s ciljem da se ispita razlika rezultata dobivenih na terenu i rezultata mjerenih na laboratorijskim uzorcima. Za ove dvije recepture određena je i čvrstoća na savijanje na uzorcima oblika prizme.

4.2 Korišteni materijali

Prilikom izrade pokusnih mješavina poroznog betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/ B-S 42,5 N
- Agregat
- Voda.

4.2.1 Cement

Cement je hidraulično vezivo, tj. fino mljeveni anorganski materijal koji pomiješan s vodom tvori pastu, koja se hidratacijskim reakcijama i procesima vezuje i očvršćuje i koja nakon očvrsnuća zadržava čvrstoću i stabilnost i pod vodom. CEM II/ B-S 42,5 N je portlandski cement s dodatkom zgure koji sadrži 65 – 79% klinkera te 21 – 35% visokokvalitetne zgure. [15]

4.2.1.1 Karakteristike

- Visoka početna i konačna čvrstoća
- Povećanje čvrstoće pri većoj starosti betona (nakon 28 dana)
- Smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina
- Umjeren razvoj topline hidratacije
- Izvrsna svojstva ugradivosti
- Svjetlija boja prikladnija za kombiniranje s pigmentima
- Povećana otpornost na agresivne medije zahvaljujući dodatku kvalitetne zgure

4.2.1.2 Preporuke za primjenu

- Betoni za široku primjenu
- Radovi u cestogradnji i cestovne građevine (tuneli, vijadukti, mostovi)
- Izgradnja poslovnih,stambenih i industrijskih objekata
- Podzemni radovi temeljenja i podloga te stabilizacije tla
- Izrada gotovih elemenata od betona, armiranoga i prednapregnutog betona u normalnoj i termički tretiranoj proizvodnji
- Transportni, pumpani beton
- Industrijski podovi, estrisi i betonski kolnici
- Individualni radovi

4.2.1.3 Prikladnost

- Za izgradnju zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturalnih objekata od betona visokih marki
- Za izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje
- Armiranobetonske konstrukcije izložene djelovanju mora i/ili solima za odmrzavanje

4.2.1.4 Transport i skladištenje

- Transportirati u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage
- Transportna sredstva prije punjenja cementom moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa
- Skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja, posebice od utjecaja vlage
- Pri skladištenju u silos osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima
- Uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke [15]

U sljedećoj tablici su prikazana tipična svojstva i sastav upotrijebljenog cementa.

Tablica 4.1 Svojstva i sastav cementa s dodatkom zgure CEM II/ B-S 42,5 N [15]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
$\%SO_3$	3.0±0.2%	≤3.5
Kloridi	0.05+0.02%	≤0.10
Vrijeme vezivanja* (početak)	170±30 min	≥60.0
Rana čvrstoća (2 dana)	24±2 MPa	≥10.0
Normirana čvrstoća (28 dana)	53±2 MPa	≥42.5; ≤ 62.5;
TIPIČAN SASTAV		**ZAHTJEV NORME**
Klinker (K) + gips (G)	70-78%	65-79
Zgura	22-28%	21-35
Ostalo	0-5%	0-5

U Tablici 4.2 su prikazane bitne značajke i svojstva upotrijebljenog cementa.

Tablica 4.2 Značajke i svojstva portlandskog cementa CEM II/ B-S 42,5 N [15]

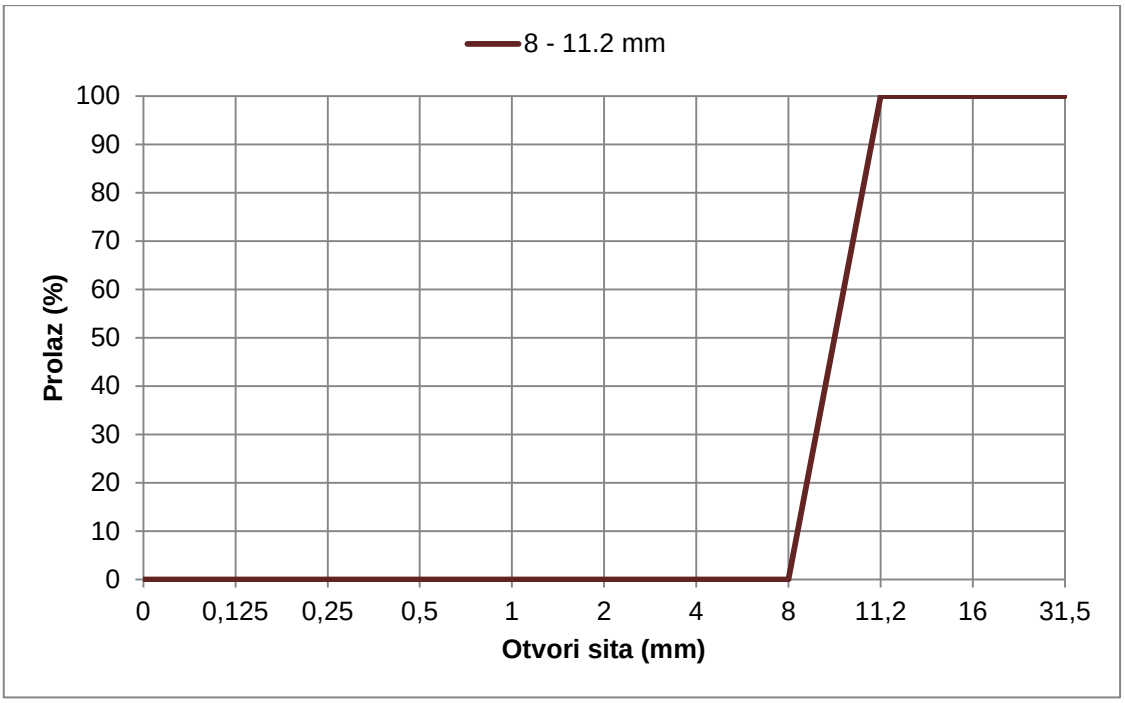
BITNA ZNAČAJKA	SVOJSTVO	HARMONIZIRANA TEHNIČKA SPECIFIKACIJA
Oznaka i sastav	CEM II/B-S	EN 197-1:2011
Tlačna čvrstoća (rana i normirana)	42.5 N	
Vrijeme vezivanja	zadovoljava	
Postojanost volumena:		
- Le Chatelier	zadovoljava	
- udjel SO_3	zadovoljava	
Udjel klorida	zadovoljava	
Netopljivi ostatak	zadovoljava	
Gubitak žarenjem	zadovoljava	

4.2.2 Agregat

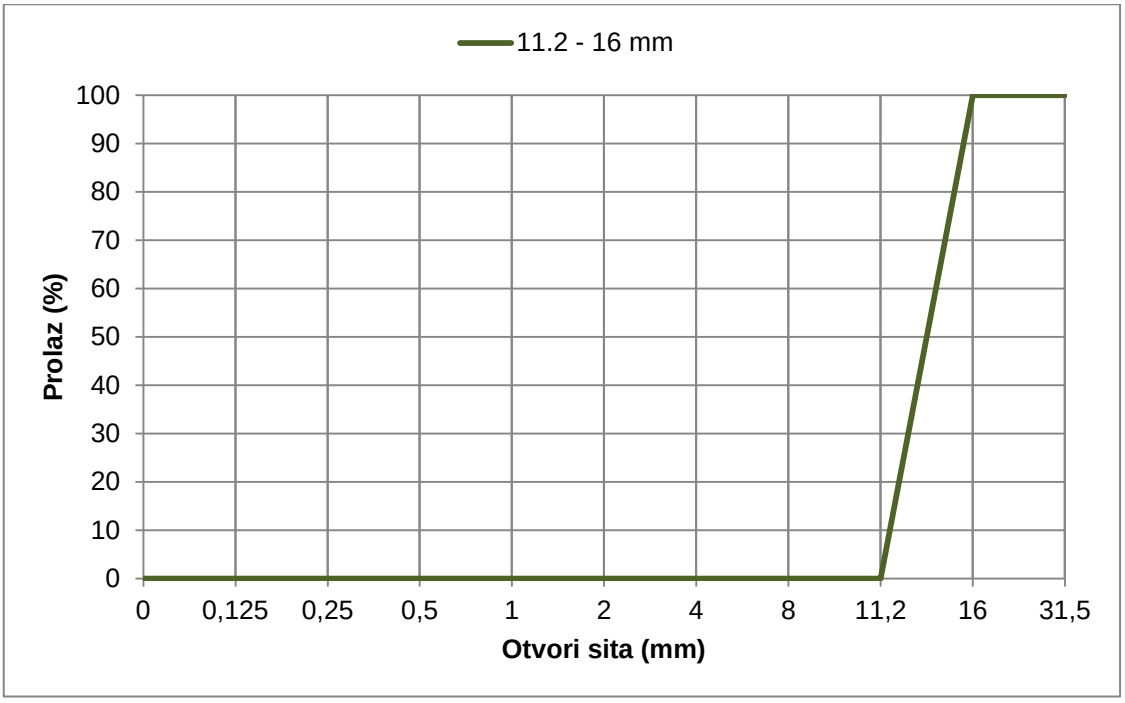
Krupniji agregat daje hidrološke prednosti zbog velikih pora i propusnosti. Dodavanje sitnog agregata može povećati tlačnu čvrstoću i gustoću, ali zato smanjuje brzinu protoka vode kroz masu propusnog betona. Najveće preporučene veličine čestica su oko 9,5 – 19 mm, što je dovoljno veliko kako bismo dobili otvorene pore i brzo prodiranje vode. [16]

U ovom diplomskom radu korištene su frakcije prirodnog agregata 8 – 11,2 mm, 11,2 – 16 i 16 – 22,4 mm te frakcije drobljenog agregata 8 – 11,2 mm, 11,2 – 16 mm i 8 – 16 mm.

Frakcija agregata 8 – 16 mm je rastavljena na dvije frakcije 8 – 11,2 mm i 11,2 – 16 mm. Prirodni agregat je donirao Cemex, a drobljeni agregat je iz kamenoloma Klis – Kosa. Na sljedećim slikama su prikazane granulometrijske krivulje svih upotrijebljenih frakcija prirodnog i drobljeng agregata.

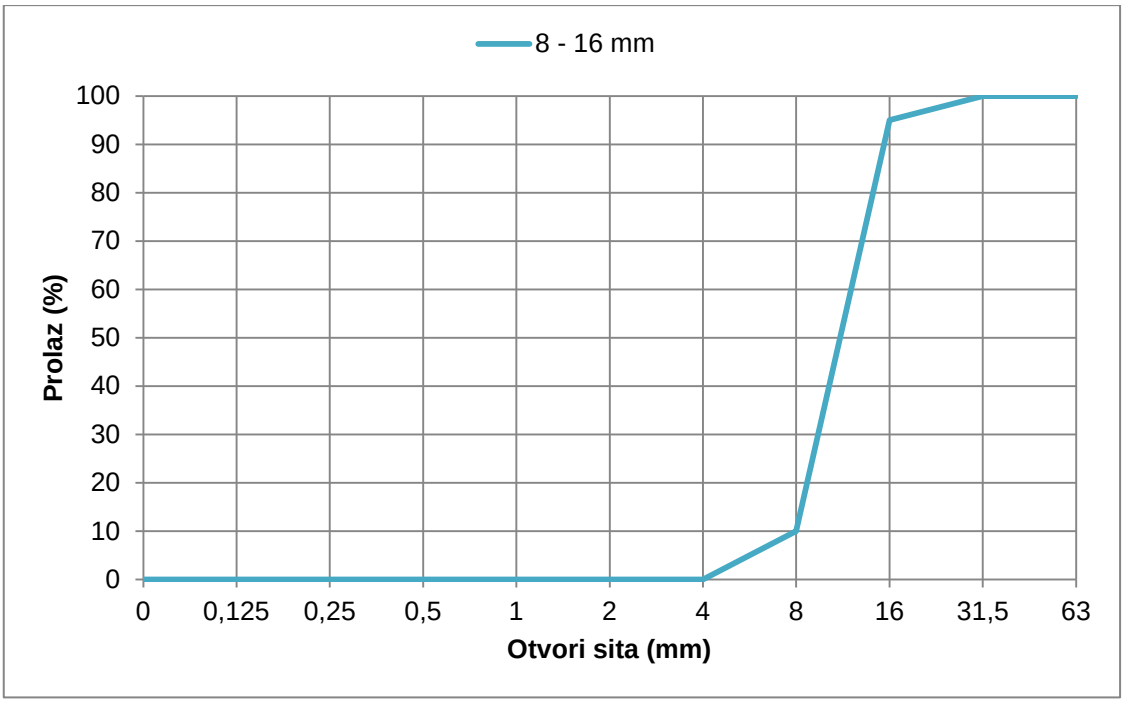


Slika 4.1 Granulometrijska krivulja agregata frakcije 8 – 11,2 mm

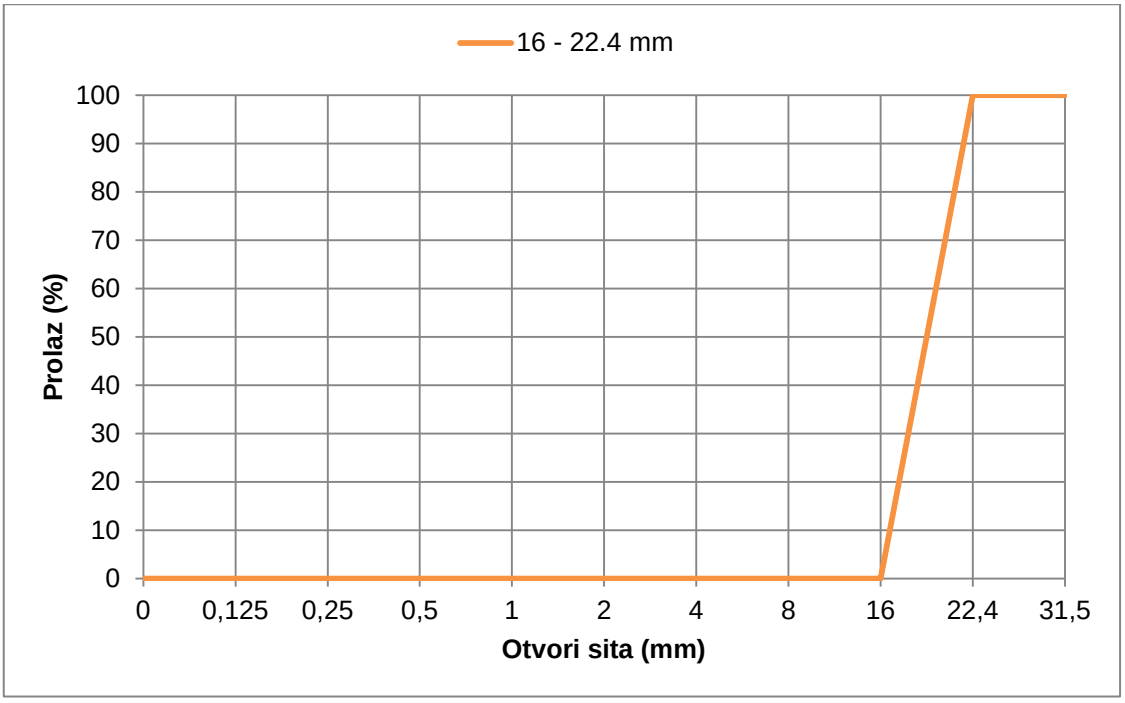


Slika 4.2 Granulometrijska krivulja agregata frakcije 11,2 – 16 mm

U laboratoriju se vršilo oštro frakcioniranje dok se industrijskim frakcioniranjem dobiju podmjerna i nadmjerna zrna koja moraju biti u dozvoljenim granicama.



Slika 4.3 Granulometrijska krivulja agregata frakcije 8 – 16 mm



Slika 4.4 Granulometrijska krivulja agregata frakcije 16 – 22 mm

Prosijavanje se najprije vršilo strojno na normiranim sitima kvadratnih otvora u trajanju 3,5 minute, a zatim ručno u trajanju oko 20 sekundi u svrhu što boljeg frakcioniranja.

Na sljedećim slikama je prikazan postupak strojnog i ručnog prosijavanja.



Slika 4.5 Uređaj za strojno prosijavanje agregata



Slika 4.6 Ručno prosijavanje agregata na sitima kvadratnih otvora

Nakon prosijavanja izmjerene su nasipne gustoće svih frakcija drobljenog i prirodnog agregata. Na slici 4.7 je vidljiv način mjerenja nasipne gustoće agregata.



Slika 4.7 Mjerenje nasipne gustoće agregata

Metalna, cilindrična posuda se ispuni vodom i izmjeri se njen volumen *V*, koji je ujedno i volumen posude. Zatim se posuda napuni agregatom iznad razine prelijevanja, a ostatak agregata se ukloni šipkom. Naposljetku se agregatu koji preostane u cilindričnoj posudi izmjeri masa *M*. Nasipna gustoća se računa po formuli: $\rho_n = \frac{M}{V}$ [17]

Tablica 4.3 Nasipne gustoće frakcija drobljenog agregata

Veličina zrna (mm)	8 - 11.2	11.2 - 16	8 - 16
Masa (g)	10583	10689	9645
Volumen (cm^3)	7073	7073	7073
Nasipna gustoća (g/cm^3)	1.50	1.51	1.36

Tablica 4.4 Nasipne gustoće frakcija prirodnog agregata

Veličina zrna (mm)	8 - 11.2	11.2 - 16	16 - 22.4
Masa (g)	10308	11035	11204
Volumen (cm^3)	7073	7073	7073
Nasipna gustoća (g/cm^3)	1.46	1.56	1.58

4.2.3 Voda

Za pripravljanje mješavina poroznog betona korištena je pitka voda iz vodovoda čiju kvalitetu prate Laboratorij za pitke vode Vodovoda i kanalizacije i Nastavni Zavod za javno zdravstvo županije Splitsko – dalmatinske pa nisu potrebna dodatna ispitivanja. [18]

4.3 Izrada mješavina poroznog betona

Izrađeno je 8 mješavina poroznog betona od prirodnog i drobljenog agregata različitih veličina i udjela. Sadržaj cementa se kreće od 250 kg/m^3 do 400 kg/m^3, a ulazni vodocementni faktor za sve mješavine iznosi 0,35. Prve tri mješavine su ugrađene zbijanjem čeličnom šipkom, dvije zbijanjem drvenom letvom, dok su ostale mješavine poroznog betona ugrađene vibriranjem na vibrostolu. Međutim, uvidom u vizualno stanje (izlučivanje vode na površini betona) i provjerom konzistencije prilikom miješanja betona, kod svih mješavina je došlo do smanjenja predviđene količine vode, a samim tim i korekcije vodovezivnog faktora.

4.3.1 Proračun sastava poroznog betona

Tablica 4.5 prikazuje recepturu mješavine B_1, napravljene od prirodnog agregata frakcije 8 – 11,2 mm, ugrađene zbijanjem čeličnom šipkom.

Tablica 4.5 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_1

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTOĆA [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3[dm^3]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	7,00
VODA		122,50	1,00	122,50	2,45
V/C	0,35				
ZRAK [%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO		1958,82		1000,00	39,18

Tablica 4.6 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
11,2 - 16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Nakon izrade mješavine preostalo je 276,3 g vode pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,34.

U tablici 4.7 je prikazana receptura mješavine B_2, frakcije 11,2 – 16 mm, napravljene od prirodnog agregata te ugrađene zbijanjem čeličnom šipkom.

Tablica 4.7 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_2

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTOĆA [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3[dm^3]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	7,00
VODA		122,50	1,00	122,50	2,45
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO		1958,82		1000,00	39,18

Tablica 4.8 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 783,3 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,27.

Tablica 4.9 prikazuje recepturu mješavine B_3, napravljene od prirodnog agregata frakcije 11,2 – 16 mm, ugrađene zbijanjem čeličnom šipkom.

Tablica 4.9 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_3

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³[dm³]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		400,00	3,10	129,03	8,00
VODA		140,00	1,00	140,00	2,80
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1396,19	2,68	520,97	27,92
UKUPNO		1936,19		1000,00	38,72

Tablica 4.10 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m³	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1396,19	0,00	0,00	0,00	0,00	1396,19	27,92
CEMENT		400,00					400,00	8,00
VODA		140,00		0,00		0,00	140,00	2,80

Nakon izrade mješavine preostalo je 701,0 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine 0,26.

U tablici 4.11 je prikazana receptura mješavine B_4, frakcije 8 – 11,2 mm s udjelom 40% i frakcije 16 – 22,4 mm s udjelom 60% prirodnog agregata, ugrađene vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 4.11 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_4

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³[dm³]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		250,00	3,10	80,65	5,00
VODA		87,50	1,00	87,50	1,75
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1666,57	2,68	621,85	33,33
UKUPNO		2004,07		1000,00	40,08

Tablica 4.12 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	40,00	666,63	0,75	5,00	0,10	0,67	662,30	13,25
16 - 22,4	60,00	999,94	0,00	0,00	0,00	0,00	999,94	20,00
CEMENT		250,00					250,00	5,00
VODA		87,50		5,00		0,67	91,83	1,84

Nakon izrade mješavine preostalo je 236,6 g vode pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,32.

Tablica 4.13 prikazuje recepturu mješavine B_5, pripravljene s drobljenim agregatom frakcije 11,2 – 16 mm, ugrađene vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 4.13 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_5

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTOĆA [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3[dm^3]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	7,00
VODA		122,50	1,00	122,50	2,45
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO		1958,82		1000,00	39,18

Tablica 4.14 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 717,2 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,28.

Tablica 4.15 prikazuje recepturu mješavine B_6, napravljene od drobljenog agregata frakcije 11,2 – 16 mm, ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.15 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_6

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³ [dm³]	MASA ZA 20 LITARA [kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	7,00
VODA		122,50	1,00	122,50	2,45
V/C	0,35				
ZRAK [%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO		1958,82		1000,00	39,18

Tablica 4.16 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m³	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 717,2 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,28.

Tablica 4.17 prikazuje recepturu mješavine B_7, napravljene od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm, ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.17 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_7

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³ [dm³]	MASA ZA 20 LITARA [kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	7,00
VODA		122,50	1,00	122,50	2,45
V/C	0,35				
ZRAK [%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	29,73
UKUPNO		1958,82		1000,00	39,18

Tablica 4.18 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	29,53
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	7,00
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	2,64

Nakon izrade mješavine preostalo je 603,1 g vode pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,29.

U tablici 4.19 je prikazana receptura mješavine B_8, napravljene od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm te ugrađene vibriranjem na vibrostolu.

Tablica 4.19 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu B_8

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTOĆA [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3[dm^3]	MASA ZA 20 LITARA[kg]
CEMENT		250,00	3,10	80,65	5,00
VODA		87,50	1,00	87,50	1,75
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1666,57	2,68	621,85	33,33
UKUPNO		2004,07		1000,00	40,08

Tablica 4.20 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	20 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1666,57	0,75	12,50	0,10	1,67	1655,74	33,11
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CEMENT		250,00					250,00	5,00
VODA		87,50		12,50		1,67	98,33	1,97

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 202,8 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,35.

4.3.2 Ugradnja poroznog betona u kalupe oblika kocke i valjka

U kalupe oblika kocke i valjka mješavine poroznog betona ugrađene su na sljedeće načine:

- Zbijanjem čeličnom šipkom
- Zbijanjem drvenom letvom
- Vibriranjem na vibrostolu.

Uzorci ugrađeni zbijanjem čeličnom šipkom su zbijani u 3 sloja s 25 udaraca po sloju. Pri tom se pazilo da pri zbijanju prvog sloja šipka ne dotiče dno kalupa, a pri ugradnji sljedećih slojeva ne ulazi u prethodno ugrađene slojeve. Pridržavanjem gore navedenog ne bi trebalo doći do segregacije cementne paste. Postupak ovog načina ugradnje je prikazan na slici 4.8.



Slika 4.8 Ugrađivanje uzoraka čeličnom šipkom

Uzorci ugrađeni zbijanjem drvenom letvom su također zbijani u 3 sloja s 25 udaraca po sloju. Letva dimenzija 30×10×5 cm pri ugradnji prva dva sloja položena je plohom dimenzija 10×5 na svježi beton i udarana čekićem (slika 4.9), a kod zadnjeg sloja ploha dimenzija 30×10 cm polegnuta je na zadnji sloj betona i udarana čekićem (slika 4.10).



Slika 4.9 Zbijanje uzoraka pri ugradnji prva dva sloja poroznog betona



Slika 4.10 Zbijanje zadnjeg sloja betona drvenom letvom

Treći način ugradnje korišten u ovom radu je vibriranje na vibrostolu (slika 4.11). Svježi beton je ugrađivan u 3 sloja na način da su prva dva sloja vibrirana po 5 sekundi, a zadnji sloj 30 sekundi. Treći sloj poroznog betona je ugrađen u kalupe tako da se mješavina u početnom trenutku nalazi iznad kalupa za 10% njegove visine. Pri vibriranju zadnjeg sloja svježi beton je

opterećen konstantnom silom. Kod ovog načina ugradnje moguća je segregacija cementne paste na dnu kalupa. Vibriranje uzoraka kao i ukupno vrijeme vibriranja temelji se na rezultatima ispitivanja obrađenih u članku [12].



Slika 4.11 Ugrađivanje uzoraka vibriranjem na vibrostolu

Na slici 4.12 su vidljiva, redom, 3 ugrađena sloja poroznog betona visine jedne trećine uzorka koja su ista kod svih načina ugradnje i u svim uzorcima.



Slika 4.12 Slojevi pri ugradnji poroznog betona

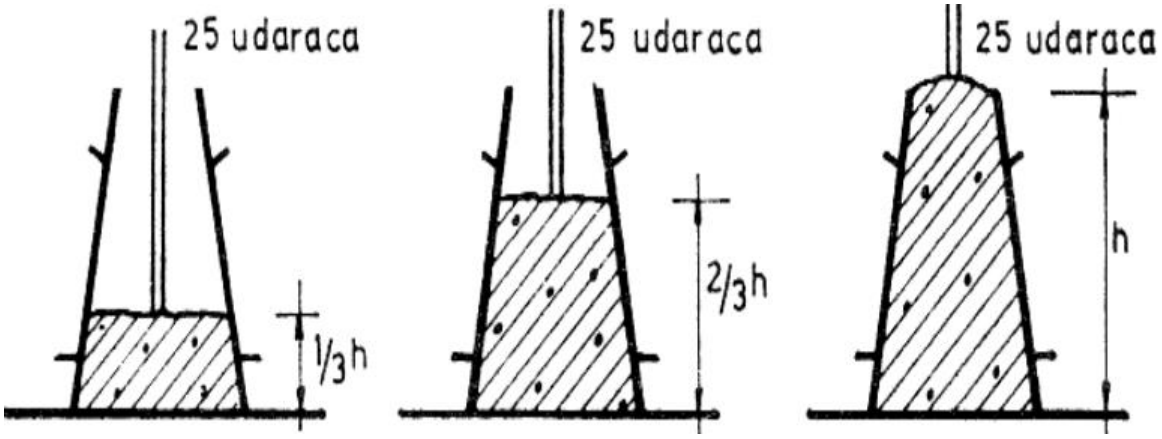
4.4 Metode ispitivanja poroznog betona

Mješavine poroznog betona ispitane su u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju, konzistencija betona je ispitana metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice, a u očvrslom stanju ispitana je poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća nakon 28 dana i vlačna čvrstoća cijepanjem.

4.4.1 Ispitivanje konzistencije

4.4.1.1 Metoda slijeganja

Svježi beton se zbija u limenom kalupu oblika šupljeg krnjeg stošca načinjenog od metala koji nije tanji od 1,5 mm, a kojeg ne nagriza cementna pasta. Promjer baze stošca je 200 ± 2 mm, promjer vrha stošca 100 ± 2 mm, a visina iznosi 300 ± 2 mm. Podloga na koju se postavlja kalup mora biti čvrsta, ravna i načinjena od neupijajućeg materijala. Unutrašnjost kalupa i podloga navlaže se mokrom krpom i kalup se postavi na horizontalnu podlogu širim krajem prema dolje. Tijekom punjenja kalup se čvrsto drži uz podlogu stojeći na papučicama. Kalup se puni uzorkom svježeg betona u 3 sloja gdje je svaki otprilike visine 1/3 kalupa kada je zbijen. Svaki sloj se zbija s 25 udaraca šipke za zbijanje (slika 4.13). [19]



Slika 4.13. Punjenje i nabijanje betona u kalup [19]

Udarci trebaju biti ravnomjerno raspoređeni po cijelom poprečnom presjeku sloja. Za zbijanje donjeg sloja nužno je nagnuti šipku te zbijati beton okretima šipke spiralno prema središtu kalupa. Drugi sloj i gornji sloj zbijaju se svojom cijelom visinom tako da nabijanja prodru samo u sloj koji je neposredno ispod. Gornji sloj (zadnji) treba napuniti preko ruba kalupa prije zbijanja šipkom. Ako nakon zbijanja fali betona do gornjeg ruba kalupa, potrebno je dopuniti kalup betonom. Nakon zbijanja gornjeg sloja, potrebno je izravnati površinu betona valjanjem šipke za nabijanje. Višak betona s podloge potrebno je ukloniti. Kalup se pažljivo

ukloni podizanjem prema gore. Podizanje kalupa treba trajati od 2 do 5 sekundi i mora biti mirno pazeći da se ne dotakne formirani stožac betona da ne bi došlo do bočnog ili torzijskog kretanja betona. Cijeli postupak, od punjenja do podizanja kalupa, ne bi trebao trajati dulje od 150 sekundi. Odmah nakon uklanjanja kalupa mjeri se i bilježi slijeganje (h) tako da se odredi razlika između visine kalupa i najviše točke slegnutog ispitnog uzorka (slika 4.14). Izmjerena vrijednost zaokružuje se na bližih 10 mm. [19]



Slika 4.14 Mjerenje slijeganja

4.4.1.2 Metoda oblikovanja kuglice

Ova metoda je pogodnija za ispitivanje poroznih betona od klasične metode slijeganja jer uzima u obzir njegova specifična svojstva.



Slika 4.15 Ispitivanje konzistencije metodom oblikovanja kuglice

Manja količina poroznog betona je zahvaćena rukom i oblikovana je kuglica koja se promatra na raširenom dlanu (slika 4.15). Ako kuglica zadržava svoj oblik i pri tome ne dolazi do odvajanja zrna i cementnog mlijeka, mješavina ima zadovoljavajuću konzistenciju. [20]

Prilikom izrade mješavina, ovom metodom pratilo se vizualno stanje izlučivanja vode na površini zrna agregata na temelju čega je došlo do smanjenja predviđene količine vode u mješavinama.

4.4.2 Ispitivanje poroznosti

Da bi se izračunao sadržaj pora u betonu potrebno je najprije izračunati volumen uzorka koji je prethodno bio u vlažnoj komori najmanje 7 dana. Zatim se izmjeri masa uzorka potopljenog u vodi, a onda se nakon 24 sata sušenja na temperaturi od 100 °C do stalne mase izmjeri masa suhog uzorka.



Slika 4.16 Mjerenje mase uzorka uronjenog u vodu i sušenje u pećnici

Poroznost uzoraka računa se prema izrazu: $$P = 1 - \left(\frac{\frac{M_1 - M_2}{\rho_v}}{V}\right) \cdot 100\ (\%)$$

pri čemu je:

P- ukupna poroznost betona (%)

M_1- masa uzorka na zraku (kg)

M_2- masa uzorka potopljenoga u vodi (kg)

ρ_v- gustoća vode (kg/m^3)

V- volumen uzorka (mm^3).

4.4.3 Ispitivanje propusnosti

Propusnost poroznog betona ispitana je na uzorcima oblika valjka dimenzija 100×200 cm. Uzorci su držani u vodi minimalno 7 dana kako bi bili potpuno saturirani pa voda slobodno teče bez otpora zraka u porama.

Ispitivanje se vrši pomoću dvije metode:

- Metoda stalne razine stupca vode
- Metoda padajuće razine stupca vode.

4.4.3.1 Metoda stalne razine stupca vode

Metoda s konstantnim padom potencijala, odnosno metoda stalne razine vode, koristi se za mjerenje koeficijenta propusnosti poroznih materijala. Kod ove metode uspostavlja se stacionarno strujanje vode kroz uzorak i mjeri se protok q uz konstantnu razliku hidrauličkih potencijala.

Stalnim dolijevanjem vode do označene razine na uređaju održava se konstantna razlika potencijala, kao što je prikazano na slici 4.17.



Slika 4.17 Ispitivanje propusnosti metodom stalne razine stupca vode [14]

Mjerenjem volumena vode V koja je protekla u nekom vremenskom intervalu Δt, dobije se protok vode:

$$q = \frac{V}{\Delta t}$$

Korišteni vremenski interval Δt iznosi 30 sekundi.

Primjenom Darcyevog zakona slijedi:

$$k = \frac{V \cdot L}{H_g \cdot A \cdot \Delta t}$$

pri čemu je:

k- koeficijent propusnosti (mm/s)

V- volumen uzorka (mm^3)

L- visina uzorka (mm)

H_g- razina gornje vode (mm)

A- površina poprečnog presjeka uzorka (mm^2)

Δt- vremenski interval u kojem se mjeri količina vode koja je istekla (s). [21]

4.4.3.2 Metoda padajuće razine stupca vode

Metoda s promjenjivim padom potencijala, odnosno metoda padajuće razine stupca vode, koristi se za mjerenje koeficijenta propusnosti kod slabo poroznih materijala. Ova metoda se razvila zbog problema mjerenja veoma malog protoka kod slabo poroznih materijala. Kod njih je protok toliko mali da bi više vode koja se ulijeva isparilo, nego što bi se sakupilo u posudi za mjerenje vode koja izlazi iz uzorka.



Slika 4.18 Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom padajuće razine stupca vode [14]

Kod mjerenja propusnosti ovom metodom poznata je površina vertikalne cijevi i površina uzorka, koje su u ovom slučaju jednake. U cijev se ulije voda do oznake te se mjeri vrijeme potrebno da voda dođe s razine gornje vode H_g do razine donje vode H_d. [21]

Koeficijent propusnosti se računa prema izrazu:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{t} \cdot log \frac{H_g}{H_d}$$

gdje je:

k- koeficijent propusnost (mm/s)

L- visina uzorka (mm)

t- vrijeme potrebno da razina vodnog stupca dođe s gornje do donje razine vode (s)

H_g- gornja razina vode (mm)

H_d- donja razina vode (mm). [21]

4.4.4 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona definira se kao prosječna tlačna sila koja u ispitivanom uzorku betona nakon određenog vremena hidratacije, 3, 7, 28 ili 90 dana, dovodi do loma njegove strukture. Tlačna čvrstoća svake od mješavina je ispitana na 3 uzorka oblika kocke, dimenzija 150×150×150 cm, 28 dana nakon spravljanja, a mjerodavna veličina je srednja vrijednost. Svim uzorcima su prije ispitivanja izmjerene dimenzije i mase. Uzorak se zatim postavi između tlačnih ploča preše, (slika 4.19), tako da svojim glatkim stranama koje su bile u kalupu (okomito na smjer ugradnje ispitnih tijela), naliježe na tlačne ploče. Sila se nanosi jednolikom brzinom prirasta sile brzinom 0,6 ± 0,4 N/mm^2/s, bez udara, sve do sloma ispitnog tijela.



Slika 4.19 Hidraulička preša za ispitivanje tlačne čvrstoće

Kod poroznih betona, vrlo je bitan postupak brušenja površina preko kojih se nanosi opterećenje. Zbog veličine pora, veća je vjerojatnost da površina nije ravna i da se opterećenje neće prenositi preko cijele površine, nego preko izbočenog zrna ili nekoliko zrna agregata. Preša evidentira lom uzorka uslijed pomaka zrna agregata te je na taj način moguće dobiti tlačnu čvrstoću poroznog betona koja je manja od stvarne tlačne čvrstoće. [22]

Vrijednost tlačne sile ili sile na pritisak određuje se primjenom izraza:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

gdje je:

f_c- tlačna čvrstoća betona (N/mm^2)

F- maksimalno opterećenje pri lomu (N)

A- površina ispitnog tijela (mm^2).

4.4.5 Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća svake od mješavina ispitana je na uzorcima oblika valjka, visine 200 cm i promjera 100 cm, kod 28-dnevne starosti uzoraka. Uzorak se postavlja u prešu s posebnim uloškom s kojim se uzorak opterećuje poprečno po izvodnici, što je vidljivo na sljedećoj slici.



Slika 4.20 Opterećenje uzorka poprečno po izvidnici

Pri ispitivanju bilježi se vrijednost maksimalne sile pri kojoj dolazi do cijepanja uzorka te se računa vlačna čvrstoća na temelju sljedećeg izraza:

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

gdje je:

f_{ct}- vlačna čvrstoća uzorka (N/mm^2)

F- sila pri kojoj dolazi do sloma uzorka (N)

L- duljina uzorka (mm)

d- promjer uzorka (mm). [22]

4.5 Izrada mješavina probnih porozno – betonskih ploča

Ispitivanjem propusnosti mješavina poroznog betona na uzorcima oblika valjka metodom stalne i padajuće razine stupca vode, najveći koeficijenti propusnosti su dobiveni kod mješavina B – 6 i B – 7 koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom te kod mješavine B – 8 ugrađene vibriranjem na vibrostolu. Na temelju ovih rezultata, mješavine B – 6 i B – 7 odabrane su kao ulazne veličine za izradu probnih ploča.

Ugrađene su 4 porozne, betonske ploče dimenzija 80×80×15 cm na travnatu, zemljanu i šljunčanu podlogu kako bi se ispitala razlika između propusnosti dobivenih u laboratoriju i na terenu, kao i utjecaj različitih podloga na infiltraciju. Također, na uzorcima oblika prizme ispitana je čvrstoća na savijanje.

4.5.1 Proračun debljine probnih ploča

Za strukturno projektiranje parkirališnih površina, prema American Concrete Institute, koriste se tablice 4.21 i 4.22. Betonski kolnici mogu biti armirani ili nearmirani. Nearmirani mogu biti s moždanicima u razdjelnicama ili bez njih. Da li je betonska ploča armirana ili ne utjecat će na raspored razdjelnica, a ne na nosivost ploče. Korištenjem moždanika može se reducirati debljina ploče, međutim, to značajno povećava cijenu izvođenja te se moždanici uglavnom ne koriste za kolnike s predviđenim lakim prometnim opterećenjem. Tablice 4.21, 4.22, i 4.23 služe za odabir prikladne debljine ploče kolnika za najčešće tipove prometnog opterećenja i uvjete tla na parkirališnim površinama.

U tablici 4.21 prikazane su četiri kategorije prometnog opterećenja od osobnih i lakih teretnih vozila do teških teretnih vozila. [23]

Tablica 4.21 Kategorije prometa [23]

1. Površine za parkiranje osobnih automobila i pristupni trakovi – KATEGORIJA A		
2. Ulazni i uslužni trakovi za trgovačke centre – KATEGORIJA B		
3. Površine za parkiranje autobusa: • Površine za parkiranje i unutarnji trakovi – KATEGORIJA B • Ulazni i vanjski trakovi – KATEGORIJA C		
4. Površine za parkiranje kamiona – KATEGORIJA B, C ili D		
Tip kamiona	Površine za parkiranje i unutarnji trakovi	Ulazni i vanjski trakovi
Kamioni bez prikolica	Kategorija B	Kategorija C
Kamioni s prikolicom	Kategorija C	Kategorija D

Tablica 4.22 daje detaljnu raspodjelu osovina za svaku kategoriju prometa iz tablice 4.21.

Tablica 4.22 Detaljni prikaz raspodjele osovina za različite kategorije prometa iz tablice 4.21 [23]

Osovinsko opterećenje (kN)	Broj osovina na 1.000 kamiona*			
	Kategorija prometa A	Kategorija prometa B	Kategorija prometa C	Kategorija prometa D
Jednostruke osovine				
18	1693.31	1693.31	-	-
27	732.28	732.28	-	-
36	483.10	483.10	233.60	-
44	204.96	204.96	142.70	-
53	124.00	124.00	116.76	-
62	56.11	56.11	47.76	-
71	38.02	38.02	23.88	1000
80	-	15.81	16.61	-
89	-	4.23	6.64	-
98	-	0.96	2.60	-
107	-	-	1.60	-
116	-	-	0.07	-

*Kamioni s dvostrukim osovinama s četiri kotača nisu uključeni.

U tablici 4.23 dane su preporučene debljine ploča kolnika bez moždanika, ovisno o dnevnom broju prijelaza kamiona s najmanje 6 kotača, za četiri različite kategorije prometa (A, B, C i D iz tablice 4.21) i šest različitih kategorija nosivosti posteljice. Debljine su određene na temelju 28-dnevnih vlačnih čvrstoća betona savijanjem (3,5 do 4,5 MPa). Usporedbom troškova pokazalo se da je u slučajevima gdje nema opasnosti od djelovanja ciklusa smrzavanja i

odmrzavanja opravdano korištenje betona niže čvrstoće. Projektant mora odrediti je li isplativije povećati debljinu ploče ili čvrstoću betona, uzimajući u obzir druge prednosti više čvrstoće betona, kao što je njegova trajnost. Vrijednosti u tablici 4.23 dane su za 20-godišnje projektno razdoblje, s pouzdanošću od 95%. [23]

Tablica 4.23 Preporuke za debljine ploča (bez moždanika), cm, za dvadesetogodišnji projektni period [23]

f_{sav} (MPa):		k = 54 MPa/m (CBR = 10)				k = 27 MPa/m (CBR = 3)				k =13,5 MPa/m (CBR = 2)			
		4,5	4,1	3,8	3,5	4,5	4,1	3,8	3,5	4,5	4,1	3,8	3,5
Kategorija prometa	A (ADTT=1)	10	10	10	11	10	11	11	13	11	13	13	14
	A (ADTT=10)	11	11	13	13	11	13	13	14	13	14	14	15
	B (ADTT=25)	13	13	14	15	14	14	15	15	15	15	17	18
	B (ADTT=300)	14	14	15	17	15	15	17	18	17	18	18	19
	C (ADTT=100)	14	15	15	17	15	17	17	18	17	18	19	19
	C (ADTT=300)	15	15	17	17	17	17	18	19	18	19	19	20
	C (ADTT=700)	15	17	17	18	17	18	18	19	18	19	20	22
	D (ADTT=700)	18	18	18	18	20	20	20	20	23	23	23	23

ADTT- prosječni dnevni promet kamiona s najmanje 6 kotača

k- modul reakcije posteljice

CBR- kalifornijski indeks nosivosti

R- koeficijent otpornosti

f_{sav}- vlačna čvrstoća savijanjem.

Porozni, betonski kolnici većinom se koriste u svrhu parkirnih površina osobnih automobila s malim osovinskim opterećenjem (tablice 4.21 i 4.22, kategorija A). Pravilno postavljeni porozno – betonski kolnici mogu postići tlačne (20,5 MPa) i savojne čvrstoće (3,5 MPa) koje su dovoljne za većinu kolnika malog prometnog opterećenja, uključujući visoka opterećenja teretnih vozila, kao što su vatrogasna vozila i vozila za otpad. S obzirom na gore navedeno odabrana je debljina ploče 15 cm koja zadovoljava uporabu i pri malim modulima reakcije posteljice.

4.5.2 Proračun sastava poroznog betona probnih ploča

Tablica 4.24 prikazuje recepturu mješavine probne ploče postavljene na zemljanu podlogu, napravljene od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm, ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.24 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu probne ploče B_{7-1}

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³ [dm³]	MASA ZA 36 LITARA [kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	12,60
VODA		122,50	1,00	122,50	4,41
V/C	0,35				
ZRAK [%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	53,51
UKUPNO		1958,82		1000,00	70,52

Tablica 4.25 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m³	36 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	53,16
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	12,60
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	4,76

Nakon izrade mješavine preostalo je 552,2 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine 0,33.

U tablici 4.26 je prikazana receptura mješavine probne ploče postavljene na travnatu podlogu, napravljene od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm te ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.26 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu probne ploče $B_{7\text{-}2}$

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³[dm³]	MASA ZA 36 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	12,60
VODA		122,50	1,00	122,50	4,41
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	53,51
UKUPNO		1958,82		1000,00	70,52

Tablica 4.27 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m³	36 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	53,16
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	12,60
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	4,76

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 1033,3 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,30.

Tablica 4.28 prikazuje recepturu mješavine probne ploče postavljene na šljunčanu podlogu, napravljene od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm, ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.28 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu probne ploče $B_{7\text{-}3}$

SASTOJAK		MASA ZA 1 m³ [kg]	GUSTOĆA [kg/dm³]	VOLUMEN ZA 1 m³[dm³]	MASA ZA 36 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	12,60
VODA		122,50	1,00	122,50	4,41
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	53,51
UKUPNO		1958,82		1000,00	70,52

Tablica 4.29 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	36 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	53,16
16 - 32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
CEMENT		350,00					350,00	12,60
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	4,76

Ostatak vode pri izradi ove mješavine iznosi 1049,6 g pa korigirani vodocementni faktor iznosi 0,29.

Tablica 4.30 prikazuje recepturu mješavine probne ploče postavljene na zemljanu podlogu, napravljene od drobljenog agregata frakcije 11,2 – 16 mm, ugrađene zbijanjem drvenom letvom.

Tablica 4.30 Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu probne ploče $B_{6\text{-}1}$

SASTOJAK		MASA ZA 1 m^3 [kg]	GUSTOĆA [kg/dm^3]	VOLUMEN ZA 1 m^3[dm^3]	MASA ZA 36 LITARA[kg]
CEMENT		350,00	3,10	112,90	12,60
VODA		122,50	1,00	122,50	4,41
V/C	0,35				
ZRAK[%]	21,00	0,00	0,00	210,00	0,00
AGREGAT		1486,32	2,68	554,60	53,51
UKUPNO		1958,82		1000,00	70,52

Tablica 4.31 Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA AGREGATA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m^3	36 litara
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
0 - 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0 - 4	0,00	0,00	1,50	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00
4 - 8	0,00	0,00	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
8 - 11,2	0,00	0,00	0,75	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
11,2 - 16	100,00	1486,32	0,75	11,15	0,10	1,49	1476,66	53,16
CEMENT		350,00					350,00	12,60
VODA		122,50		11,15		1,49	132,16	4,76

Nakon izrade mješavine preostalo je 1033,1 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine 0,30.

4.5.3 Izrada probnih porozno-betonskih ploča

Probne ploče su ugrađene na horizontalnu, prethodno pripremljenu:

- Zemljanu podlogu
- Travnatu podlogu
- Šljunčanu podlogu.

Na slici 4.21 je vidljiva zemljana podloga na koju su ugrađene dvije probne ploče različitih frakcija i istih količina cementa.



Slika 4.21 Zemljana podloga

Jedna probna ploča je ugrađena na travnatu podlogu (slika 4.22) da se ispita kako vegetacija utječe na propusnost poroznog betona.



Slika 4.22 Travnata podloga

Slika 4.23 prikazuje šljunčanu podlogu debljine 5 cm postavljenu na prethodno pripremljenu zemljanu podlogu.



Slika 4.23 Šljunčana podloga

Ugradnja se vršila zbijanjem drvenom letvom i čekićem u 3 sloja. Beton je pri ugradnji svakog sloja jednoliko raspoređen i zbijen unutar oplate, što je vidljivo na sljedećim slikama.



Slika 4.24 Ugradnja porozno – betonskih ploča



Slika 4.25. Horizontalna površina poroznih, betonskih ploča

Naposljetku, ploče su zaštićene od vanjskih utjecaja plastičnom folijom i vlažno njegovane do ispitivanja propusnosti, kako nalažu pravila struke prema [9].

4.5.4 Ugradnja poroznog betona u kalupe oblika prizme

U uzorke oblika prizme, beton je ugrađen drvenom letvom i čekićem u 3 sloja, kao što je opisano u poglavlju 4.3.2. Prizme su načinjene u svrhu ispitivanja vlačne čvrstoće betona koja je važna kod kolničkih konstrukcija. Na slici 4.26 je vidljiv način ugradnje, a na slici 4.27 slojevi ugrađivanog, poroznog betona.



Slika 4.26 Ugradnja i zbijanje betona drvenom letvom i čekićem u kalupe



Slika 4.27 Slojevi pri ugradnji betona u kalupe oblika prizme

4.6 Metode ispitivanja porozno – betonskih ploča

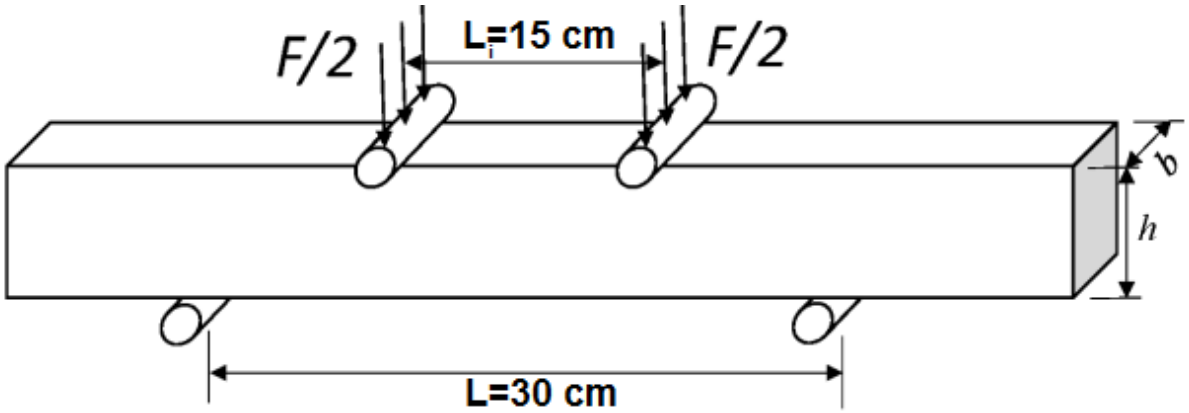
4.6.1 Ispitivanje vlačne čvrstoće pri savijanju

Čvrstoća na savijanje ispitana je na uzorcima oblika prizme dimenzija 120×120×450 mm 28 dana nakon ugradnje. Do trenutka ispitivanja uzorci su čuvani u vlažnoj komori na temperaturi 20 ± 2 °C. Ispitana su dva uzorka različitih receptura mješavina koji su opterećivani stalnim opterećenjem do 0,2 N/mm^2/s, kako je prikazano na slici 4.28.



Slika 4.28 Opterećenje uzorka smještenog između valjaka

Udaljenost između potpornih valjaka iznosi 30 cm, a udaljenost između valjaka preko kojih se opterećenje prenosi na uzorak iznosi 15 cm, što je prikazano na slici 4.29.



Slika 4.29 Shema ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju

Čvrstoća na savijanje za opterećenje silama koje djeluju na polovici raspona potpornih valjaka računa se prema izrazu:

$$R_{ms} = \frac{3 \cdot F_m \cdot L}{4 \cdot b \cdot h^2}$$

gdje je:

R_{ms}- čvrstoća na savijanje (N/mm^2)

F_m- sila loma (N)

L- udaljenost između potpornih valjaka (mm)

b, h- dimenzije bridova (mm). [24]

4.6.2 Ispitivanje brzine infiltracije probnih ploča

Brzina infiltracije je ispitana najmanje 7 dana nakon postavljanja prema ASTM C 1701 standardu. Prije početka ispitivanja, horizontalne površine betonskih ploča su očišćene kako bi pore bile prohodne.

Čelični prsten, kojeg je donirao Brodosplit, unutarnjeg promjera 30,48 cm (12 in) postavljen je na središte ploče i brtvljen glinamolom, kao što je prikazano na slici 4.30.

Prethodno su na unutrašnjoj stijenci prstena označene dvije horizontalne linije udaljene od dna 1, odnosno 1,5 cm.



Slika 4.30 Brtvljeni, infiltracijski prsten postavljen na porozno – betonsku ploču

Probno ispitivanje se vrši na način da se 3,6 litara vode iz posude izlijeva u sredinu prstena, pritom pazeći da vodno lice bude između dvije označene linije, te se mjeri vrijeme od prvog kontakta vode i betona do trenutka kada beton upije svu vodu, odnosno kada nema vidljive vode na površini. Proteklo vrijeme određuje količinu vode koja se koristi u stvarnom testu. Ako je proteklo vrijeme kraće od 30 sekundi, u stvarnom ispitivanju se koristi 18 litara vode, a ako je vrijeme dulje koristi se 3,6 litara.

U ovom ispitivanju sve ploče su u probnom ispitivanju propustile vodu u trajanju manjem od 30 sekundi pa je u stvarnom ispitivanju korištena količina vode od 18 litara.

Zatim se unutar 2 minute od probnog testa vrši stvarno ispitivanje, u ovom slučaju s 18 litara vode, te mjeri vrijeme na isti način kao kod probnog ispitivanja (slika 4.31).



Slika 4.31 Mjerenje brzine infiltracije prema ASTM C 1701 standardu

Brzina infiltracije određuje se prema izrazu:

$$I = \frac{K \cdot M}{D^2 \cdot t}$$

gdje je:

I- brzina infiltracije (mm/h)

M- masa infiltrirane vode (kg)

D- unutarnji promjer infiltracijskog prstena (mm)

t- vrijeme potrebno da izmjerena količina vode prođe kroz beton

K- konstanta iznosa 4583666000. [25]

5 REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA POROZNOG BETONA

5.1 Rezultati ispitivanja svojstava poroznog betona u svježem stanju

U svježem stanju, konzistencija betona ispitana je:

- Metodom slijeganja
- Metodom oblikovanja kuglice.

Metoda slijeganja je karakteristična za klasične betone, dok je metoda oblikovanja kuglice pogodnija za ispitivanje poroznih betona.

5.1.1 Rezultati ispitivanja konzistencije metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice

Na slici 5.1 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine B_1 metodom slijeganja i oblikovanja kuglice. Vidljivo je da dolazi do odvajanja zrna agregata i nije moguće oblikovati kuglicu pa konzistencija nije zadovoljavajuća. Slijeganje iznosi 0,3 do 0,5 cm na rubovima konusa.



Slika 5.1 Ispitivanje konzistencije mješavine B_1

Slika 5.2 prikazuje ispitivanje konzistencije mješavine B_2. Ne dolazi do odvajanja zrna agregata te se lako oblikuje kuglica. Slijeganje iznosi do 0,5 cm pa je konzistencija zadovoljavajuća.



Slika 5.2 Ispitivanje konzistencije mješavine B_2

Slika 5.3 prikazuje ispitivanje konzistencije porozno – betonske mješavine B_3. Nema slijeganja konusa i kuglica se s lakoćom oblikuje. Ispitivanjem po obje metode konzistencija je zadovoljavajuća.



Slika 5.3 Ispitivanje konzistencije mješavine B_3

Na slici 5.4 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine B_4 metodom slijeganja i oblikovanja kuglice. Slijeganje iznosi do 0,2 cm. Ne dolazi do izdvajanja cementnog mlijeka ni zrna pa se kuglica lako oblikuje dlanovima te je konzistencija zadovoljavajuća.



Slika 5.4 Ispitivanje konzistencije mješavine B_4

Slika 5.5 prikazuje ispitivanje konzistencije mješavina B_5 i B_6 koje su istog sastava, a različitog načina ugradnje. Kuglica se lako oblikuje i ne dolazi do izdvajanja cementnog mlijeka. Konzistencija je pravilna i nema slijeganja.



Slika 5.5 Ispitivanje konzistencije mješavina B_5 i B_6

Slika 5.6 prikazuje ispitivanje konzistencije mješavine B_7. Nema slijeganja, a kuglica se s lakoćom formira iz čega slijedi da je konzistencija zadovoljavajuća.



Slika 5.6 Ispitivanje konzistencije mješavine B_7

Na slici 5.7 prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine B_8 metodom slijeganja i oblikovanja kuglice. Slijeganje je u početku iznosilo 0,5 cm, nakon čega je došlo do smičnog slijeganja u iznosu 12 cm. Dolazi do odvajanja zrna pa se kuglica ne može oblikovati dlanovima i konzistencija nije zadovoljavajuća.



Slika 5.7 Ispitivanje konzistencije mješavine B_8

5.2 Rezultati ispitivanja svojstava poroznog betona u očvrslom stanju

U očvrslom stanju ispitana je:

- Poroznost
- Propusnost
- Tlačna čvrstoća nakon 28 dana
- Vlačna čvrstoća cijepanjem
- Vlačna čvrstoća pri savijanju
- Brzina infiltracije poroznih ploča prema ASTM C 1701.

Prikazani su rezultati ispitivanja svojstava 8 mješavina napravljenih u ovom radu i 2 mješavine napravljene u prethodnom istraživanju [14] na kojima se temelji ovaj rad.

Također, prikazani su rezultati ispitivanja svojstava probnih, porozno – betonskih ploča.

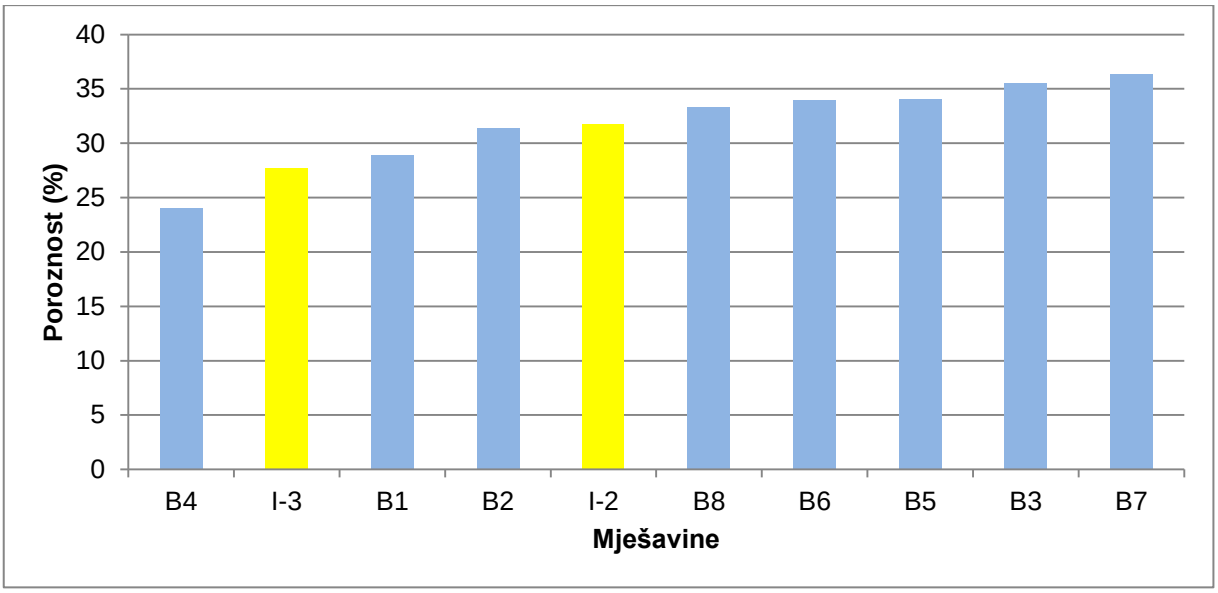
5.2.1 Rezultati ispitivanja poroznosti

U poglavlju 4.4.2 je opisan postupak ispitivanja poroznosti.

Sadržaj šupljina u očvrslom betonu iznosi 15 do 25% [9] pa sve mješavine zadovoljavaju kriterij poroznosti te se njihove vrijednosti kreću od 24 do 36,4%, što je vidljivo u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Prikaz rezultata ispitivanja poroznosti

Oznaka	Dimenzije			Volumen	Masa pod vodom	Masa na zraku	Poroznost	Gustoća
-	a (mm)	b (mm)	c (mm)	(mm^3)	(g)	(g)	(%)	(kg/m^3)
B_7	150	150	151,5	3408750	3675,4	5843,9	36,4	1714,38
B_3	150	150	150,0	3375000	3645,1	5820,3	35,5	1724,53
B_5	150	150	152,0	3420000	3812,3	6066,1	34,1	1773,71
B_6	150	150	151,5	3408750	3827,1	6077,1	34,0	1782,79
B_8	150	150	154,0	3465000	3830,0	6141,0	33,3	1772,29
I-2	150	150	152,5	3431250	3878,0	6220,0	31,7	1812,75
B_2	150	150	152,5	3431250	3899,2	6252,8	31,4	1822,31
B_1	150	150	153,0	3442500	3925,5	6371,8	28,9	1850,92
I-3	150	150	151,5	3408750	4091,0	6554,0	27,7	1922,70
B_4	150	150	152,5	3431250	4187,0	6794,7	24,0	1980,24



Slika 5.8 Poroznost mješavina

Na slici 5.8 je vidljivo da mješavina B_7 frakcije 8 – 16 mm, napravljena od drobljenog agregata i ugrađena zbijanjem drvenom letvom i čekićem ima najveću poroznost iznosa 36,4%, dok vibrirana mješavina B_4 napravljena od prirodnog agregata ima najmanju poroznost koja iznosi 24%. Vibriranje i sastav mješavine B_4 (frakcija 8 – 11,2 mm s udjelom 40% i frakcija 16 – 22,4 mm s udjelom 60%) uzrokuju nisku propusnost u odnosu na ostale mješavine. Naime, zrna niže nazivne frakcije popunjavaju nastale pore između krupnijih frakcija agregata, a vibriranje pospješuje taj proces.

Usporedbom mješavina B_5 (ugrađena vibriranjem) i I-3 (ugrađena čeličnom šipkom) koje su napravljene od drobljenog agregata frakcije 11,2 – 16 mm, vidljivo je da mješavina B_5 ima značajno veću poroznost.

Osim toga, vidljivo je da se s povećanjem sadržaja cementa poroznost također povećava. Mješavina B_2 u odnosu na mješavinu B_3 ima za 4,1% manju poroznost te 50 kg manje cementa. Obe mješavine su napravljene od prirodnog agregata istog udjela i sadržaja te su ugrađene na isti način.

Mješavina B_5 koja je ugrađena vibriranjem i B_6 koja je ugrađena zbijanjem drvenom letvom, istih sastava, imaju gotovo istovjetne poroznosti unatoč različitim načinima ugradnje.

Također je vidljivo da mješavine ugrađene vibriranjem na vibrostolu i zbijanjem drvenom letvom imaju veće poroznosti od onih ugrađenih zbijanjem udarcima šipkom.

Slike 5.9 do 5.16 prikazuju presjeke i lica uzoraka svih mješavina, dobivenih cijepanjem valjka po izvidnici, na kojima je vidljiva količina i raspored šupljina prisutnih u pojedinim uzorcima.

Mješavina B_1 ima treću najmanju poroznost (28,9%) i napravljena je od prirodnog agregata frakcije 8 – 11,2 mm.



Slika 5.9 Raspored i količina šupljina mješavine B_1

Mješavina B_2 ugrađena je čeličnom šipkom kao i prethodna mješavina te sadrži 31,4% šupljina. Napravljena je od prirodnog agregata frakcije 11,2 – 16 mm. Uočava se porast poroznosti s porastom veličine zrna agregata.



Slika 5.10 Raspored i količina šupljina mješavine B_2

Treća mješavina, B_3, sadrži 50 kg/m^3 više cementa od prethodne mješavine. Vidljivo je da su zrna u većoj količini prekrivena cementnom pastom. Poroznost ove mješavine je druga najveća te iznosi 35,5%.



Slika 5.11 Raspored i količina šupljina mješavine B_3

Mješavina B_4 se sastoji od frakcije 8 – 11,2 mm s udjelom 40% i frakcije 16 – 22,4 mm s udjelom 60%. Napravljena je od prirodnog agregata i vibrirana na vibrostolu. Ova mješavina ima najmanju poroznost u iznosu 24%.



Slika 5.12 Raspored i količina šupljina mješavine B_4

Slika 5.13 prikazuje mješavinu B_5 napravljenu od drobljenog agregata sa sadržajem pora u iznosu 34,1%.



Slika 5.13 Raspored i količina šupljina mješavine B_5

Šesta ugrađena mješavina, B_6, frakcije 11,2 – 16 mm koja je ugrađena zbijanjem drvenom letvom i čekićem ima za 0,1 manji postotak poroznosti od prethodne mješavine. Sva zrna agregata su obavijena cementnom pastom i pore među njima su jasno vidljive.



Slika 5.14 Raspored i količina šupljina mješavine B_6

Mješavina B_7 ima najveći sadržaj pora koji iznosi 36,4%. Napravljena je od drobljenog agregata frakcije 8 – 16 mm i zbijena drvenom letvom. Ovaj način ugradnje daje najbolje rezultate poroznosti i lako se može primjeniti u praksi.



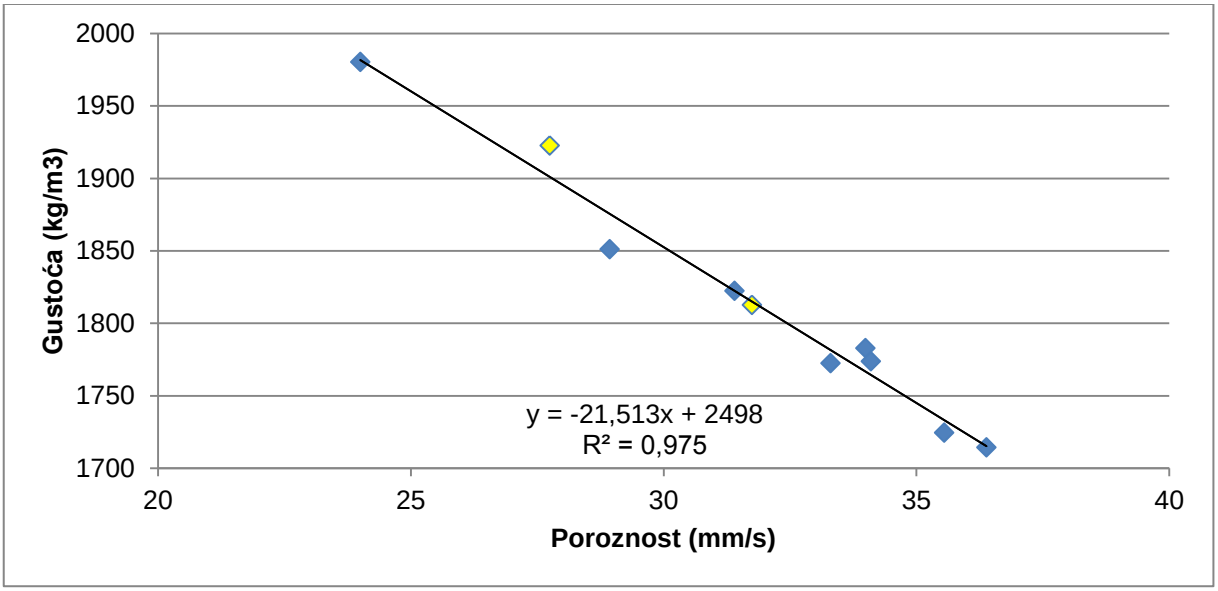
Slika 5.15 Raspored i količina šupljina mješavine B_7

Zadnja napravljena mješavina, B_8, ima isti sastav kao prethodna mješavina. Ugrađena je vibriranjem na vibrostolu i ima za 3,1% manju poroznost od mješavine B_7.



Slika 5.16 Raspored i količina šupljina mješavine B_8

Promatranjem ovisnosti gustoće i poroznosti svih mješavina, prikazane na slici 5.17, uočava se linearna veza. Korelacija je negativna, a koeficijent korelacije iznosi 0,99. Vidljiva je jasna veza između gustoće i poroznosti. Povećanjem jedne vrijednosti dolazi do smanjenja druge i obrnuto.



Slika 5.17 Veza između poroznosti i gustoće

5.2.2 Rezultati ispitivanja propusnosti

Propusnost uzoraka poroznog betona ispitana je metodama padajuće i stalne razine stupca vode u poglavlju 4.4.3.

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.2, gdje vrijednost koeficijenta k_1 predstavlja koeficijent propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode, a koeficijent k_2 daje vrijednosti propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode.

Tablica 5.2 Prikaz rezultata ispitivanja propusnosti

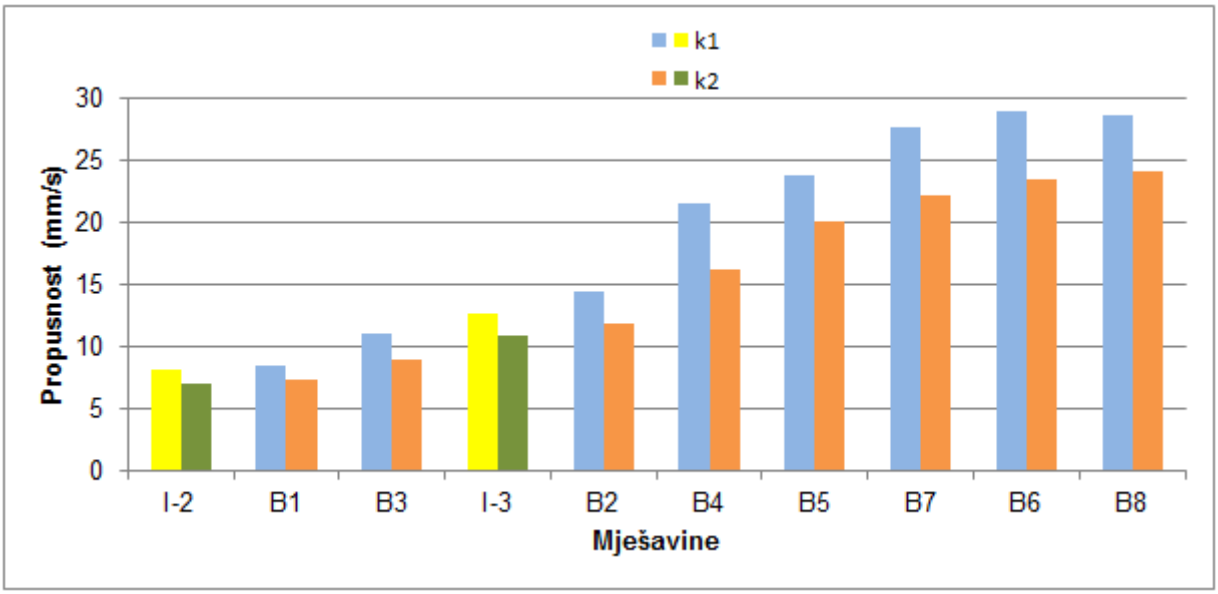
	Uzorak			Metoda padajuće razine				Metoda stalne razine		
Oznaka	Promjer	Visina	Površina	H_g	H_d	Vrijeme	k_1	Volumen	Vrijeme	k_2
-	(mm)	(mm)	(mm^2)	(mm)	(mm)	(s)	(mm/s)	(mm^3)	(s)	(mm/s)
B_8	103	204	8332,3	300	100	7,80	28,70	8867000	30	24,12
B_6	103	203	8332,3	280	80	8,76	29,00	8115000	30	23,54
B_7	103	200	8332,3	280	80	9,03	27,72	7768000	30	22,20
B_5	103	211	8332,3	280	80	11,10	23,79	6680000	30	20,14
B_4	103	202	8332,3	280	80	11,70	21,60	5628000	30	16,24
B_2	103	199	8332,3	280	80	17,23	14,45	4168000	30	11,85
I-3	103	196	8332,3	300	100	17,00	12,65	4156000	30	10,86
B_3	103	206	8332,3	290	90	21,98	10,95	3120000	30	8,87
B_1	103	211	8332,3	300	100	27,65	8,37	2579000	30	7,26
I-2	103	200	8332,3	300	100	27,00	8,13	2610000	30	6,96

Koeficijenti propusnosti kod metode padajuće razine stupca vode kreću se u rasponu 8,13 – 29 mm/s, a po metodi stalne razine vode koeficijent propusnosti k_2 uzima vrijednosti od 6,96 – 24,12 mm/s (slika 5.18). Tipične brzine protoka vode kroz porozni beton su 2 do 12 mm/s [9] pa sve mješavine ispunjavaju ili premašuju kriterij propusnosti.

U usporedbi s prethodnim istraživanjima [12] i [14], propusnosti po obje korištene metode su znatno veće.

Najveću vrijednost koeficijenta propusnosti ima mješavina $B_{8,}$ frakcije 8 – 16 mm, koja je vibrirana na vibrostolu po uzoru na prethodno ispitivanje [12], unatoč preporukama da to nije pogodan način ugradnje poroznog betona, prema [20] te dokazuje suprotno.

Najmanju propusnost po obje mjerene metode imaju mješavine I-2 (napravljena od drobljenog agregata) i B_1 (napravljena s prirodnim agregatom) koje sadrže frakciju 8 – 11,2 mm. Ugrađene su zbijanjem čeličnom šipkom u 3 sloja. Bilo je očekivano da će mješavine manjih frakcija imati manje propusnosti.



Slika 5.18 Propusnost mješavina

Uočljivo je da mješavine B_1, B_2, B_3, I-2 i I-3 imaju najmanje koeficijente propusnosti. Naime, sve navedene mješavine su ugrađene udarcima čeličnom šipkom.

Mješavine B_6 i B_7, ugrađene drvenom letvom u 3 sloja, imaju najveće propusnosti (izuzevši mješavinu B_8) te se ovaj način pokazao najboljim. Iz tog razloga su recepture i način ugradnje tih mješavina odabrani kao polazni za ugradnju porozno – betonskih ploča na kojima je ispitana brzina infiltracije.

Na slici 5.19 su vidljive baze valjaka na kojima su ispitivane propusnosti.

Na prva tri uzorka ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom je vidljiva mala segregacija cementne paste na dnu uzoraka.

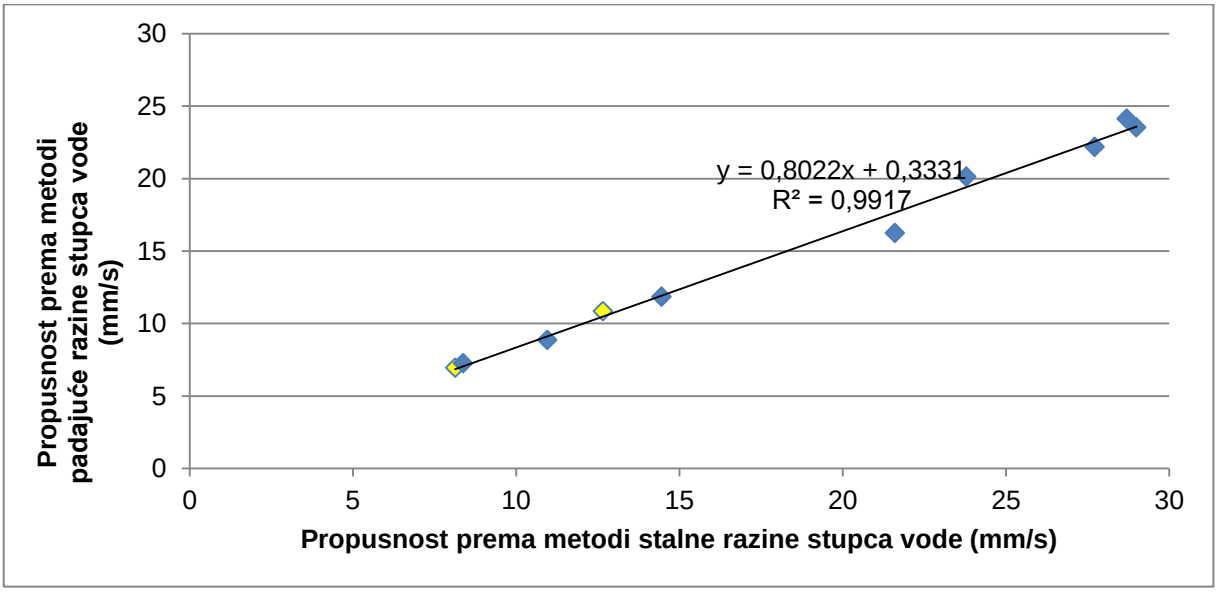
Uzorci mješavina B_4, B_5 i B_8 su vibrirani i na dnu uzoraka se vidi tanki, segregirani sloj cementne paste. Unatoč tomu, koeficijenti propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode vibriranih mješavina variraju od 21,6 – 28,7 mm/s, a prema metodi stalne razine stupca vode od 16,24 – 24,12 mm/s.

Na uzorcima mješavina ugrađenih drvenom letvom (B_6 i B_7), vidljiva je pojava cementne paste na pojedinim mjestima.



Slika 5.19 Segregacija cementne paste na uzorcima oblika valjka

Slika 5.20 prikazuje ovisnost koeficijenata propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode i koeficijenata propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode. Veza je linearna s pozitivnom korelacijom. Koeficijent korelacije iznosi gotovo 1,0.



Slika 5.20 Veza propusnosti po obje primjenjene metode

5.2.3 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

U poglavlju 4.4.4 opisan je postupak ispitivanja tlačne čvrstoće pomoću hidrauličke prese.

Tablica 5.3 prikazuje osrednjene tlačne čvrstoće triju uzoraka po mješavini koje su uzete kao mjerodavne. Iz osrednjenih masa i volumena dobivene su gustoće pojedinih mješavina.

Porozni beton može razviti tlačne čvrstoće u rasponu 3,5 do 28 MPa, koji je pogodan za široko područje primjene [9], pa sve napravljene mješavine upadaju u taj raspon.

Mješavina B_1 napravljena od prirodnog agregata, frakcije 8 – 11,2 mm i ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom ima najveću tlačnu čvrstoću, dok mješavina B_3 frakcije 11,2 – 16 mm, istog načina ugradnje i vrste agregata kao mješavina B_1, ima najmanju tlačnu čvrstoću. Očigledno je da kod jednofrakcijskih mješavina veću tlačnu čvrstoću imaju uzorci manjih nazivnih frakcija, što je potvrđeno i u prethodnim istraživanjima [11] i [12].

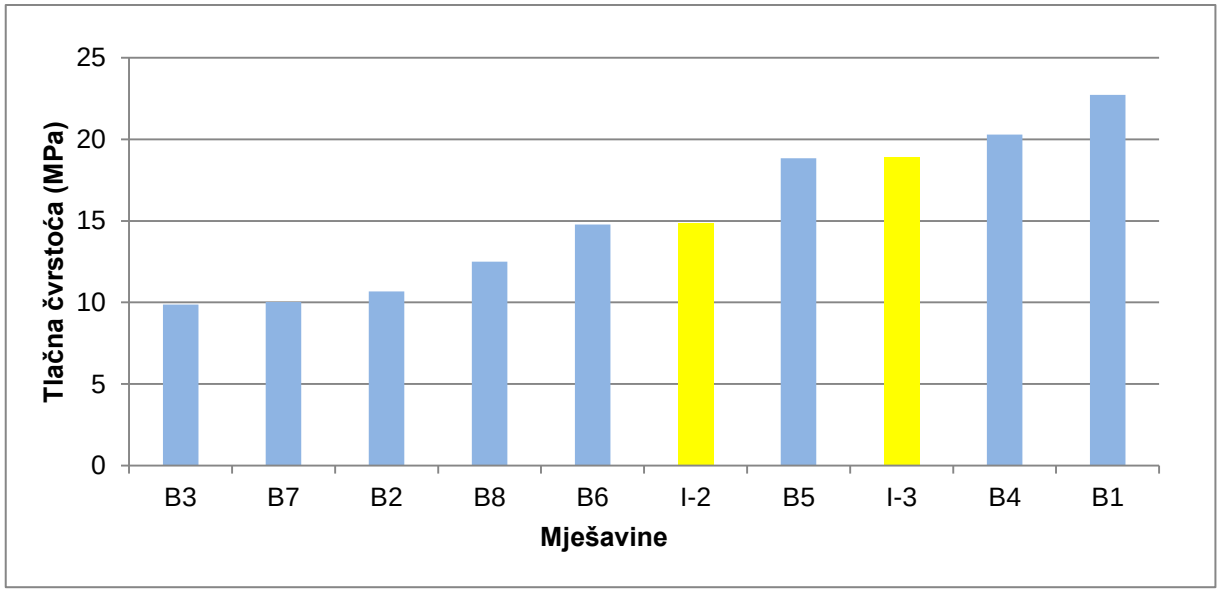
Tablica 5.3 Prikaz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka	Masa (g)		Tlačna čvrstoća fc (MPa)		Sila loma F (N)		Dimenzije			Volumen	Gustoća
							a (mm)	b (mm)	c (mm)	(mm^3)	(kg/m^3)
B_1	7109	7124,67	20,5	22,73	453,3	508,70	150,00	150,00	153,00	3442500	2069,62
	7144		25,2		566,1						
	7121		22,5		506,7						
B_4	6997	7106,03	20,2	20,30	454,0	456,70	150,00	150,00	152,67	3435075	2068,67
	7066		18,9		426,0						
	7256		21,8		490,1						
I-3	6788	6887,30	17,8	18,90	444,6	425,33	150,00	150,00	151,67	3412575	2018,21
	6901		19,8		398,3						
	6972		19,1		433,1						
B_5	6583	6677,00	18,0	18,83	405,4	423,93	150,00	150,00	152,00	3420000	1952,34
	6599		18,0		404,7						
	6849		20,5		461,7						
I-2	6503	6557,70	13,9	14,90	312,5	335,30	150,00	150,00	152,33	3427425	1913,30
	6573		15,4		341,2						
	6597		15,4		352,2						
B_6	6281	6332,00	14,0	14,77	315,8	332,30	150,00	150,00	151,33	3404925	1859,66
	6335		15,3		343,8						
	6380		15,0		337,3						
B_8	6287	6317,67	11,9	12,50	267,8	281,40	150,00	150,00	154,33	3472425	1819,38
	6398		12,5		280,9						
	6268		13,1		295,5						
B_2	6670	6637,30	10,6	10,67	237,8	240,17	150,00	150,00	152,67	3435075	1932,21
	6560		10,2		230,6						
	6682		11,2		252,1						
B_7	6123	6123,67	8,6	10,03	192,8	225,47	150,00	150,00	151,67	3412575	1794,44
	6206		11,7		262,2						
	6042		9,8		221,4						
B_3	6220	6220,53	10,0	9,87	225,7	222,13	150,00	150,00	149,33	3359925	1851,39
	6216		10,1		226,7						
	6226		9,5		214,0						

Mješavina B_2 ima za 0,8 MPa veću tlačnu čvrstoću od mješavine B_3, što je vidljivo na slici 5.21. Obje mješavine su ugrađene istom metodom, imaju istu količinu, vrstu i frakciju agregata, s tim da mješavina B_2 ima 50 kg/m^3 više cementa. Prethodno istraživanje [12] pokazuje da smanjenjem sadržaja cementa u mješavini raste tlačna čvrstoća, što se dokazalo i u ovom radu.

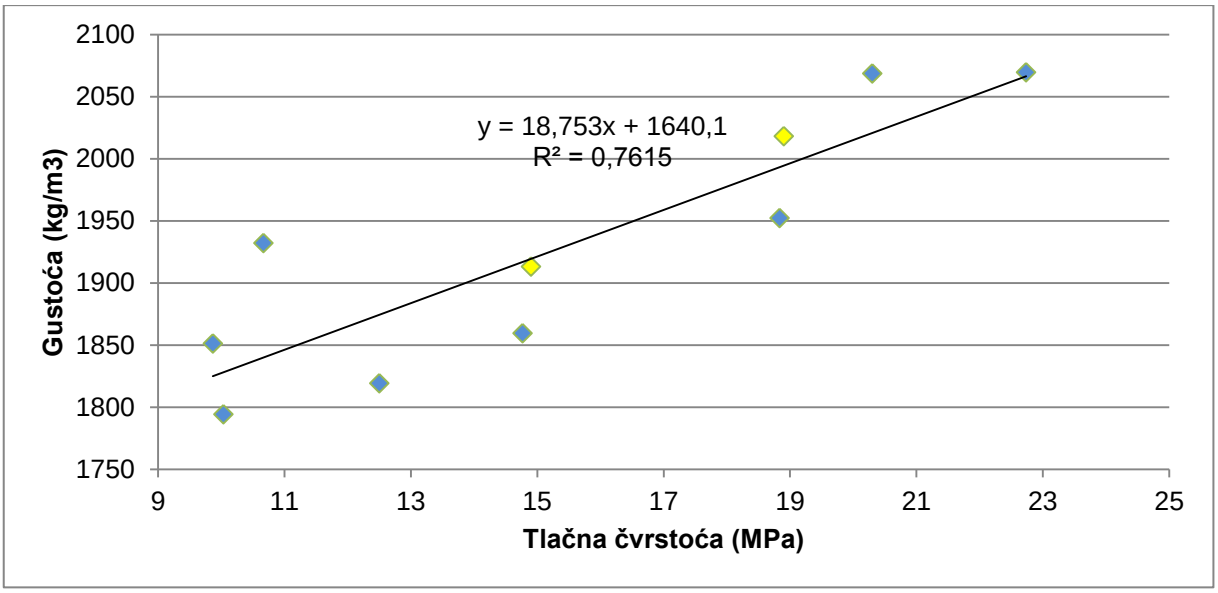
Vibrirana mješavina B_4 koja sadrži najmanju količinu cementa (250 kg/m^3), frakcije agregata 8 – 11, 2 i 16 – 22,4 mm ima za 7,8 MPa veću tlačnu čvrstoću od mješavine B_8, napravljene od frakcije 8 – 16 mm, što potvrđuje činjenicu da mješavine s većim diskontinuitetom frakcija imaju veću tlačnu čvrstoću.

Mješavine B_1 (frakcija 8 – 11,2 mm) i B_2 (11,2 – 16 mm) napravljene su od prirodnog agregata, a mješavine I-2 (frakcija 8 – 11,2 mm) i I-3 (11,2 – 16 mm) od drobljenog agregata. Sve navedene mješavine ugrađene su čeličnom šipkom. Zanimljivo je primjetiti da mješavina B_1 ima veću tlačnu čvrstoću od mješavine I-2, a mješavina I-3 od mješavine B_2 pa nema jasnog pokazatelja koja vrsta agregata daje veću tlačnu čvrstoću.



Slika 5.21 Tlačna čvrstoća mješavina

Na slici 5.22 prikazana je veza između gustoće i tlačne čvrstoće. Može se uočiti da su podaci raspršeni, a mješavina B_2 najviše odstupa od pozitivne, linearne zakonitosti. Koeficijent korelacije, R, iznosi 0,87.



Slika 5.22 Ovisnost gustoće i tlačne čvrstoće

5.2.4 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća cijepanjem ispitana je u poglavlju 4.4.3.

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem prikazani su u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Oznaka	Masa	Promjer	Visina	Volumen	Gustoća	F	f_{ct}
	(g)	(mm)	(mm)	(cm^3)	(kg/m^3)	(N)	(MPa)
B_1	4683	111	230	2224,6	2105,3	91,6	2,29
B_5	4291	112	230	2264,8	1894,6	73,9	1,83
B_4	4635	112	230	2264,8	2046,7	71,8	1,78
I-3	4632	114	232	2366,8	1957,0	69,8	1,68
I-2	4592	114	231	2356,6	1948,5	69,1	1,67
B_6	4218	113	229	2295,4	1837,6	67,3	1,66
B_3	4587	112	229	2255,0	2034,3	63,8	1,58
B_8	4210	113	230	2305,4	1826,1	62,8	1,54
B_2	4427	111	230	2224,6	1990,1	48,6	1,21
B_7	4058	113	229	2295,4	1767,9	47,3	1,16

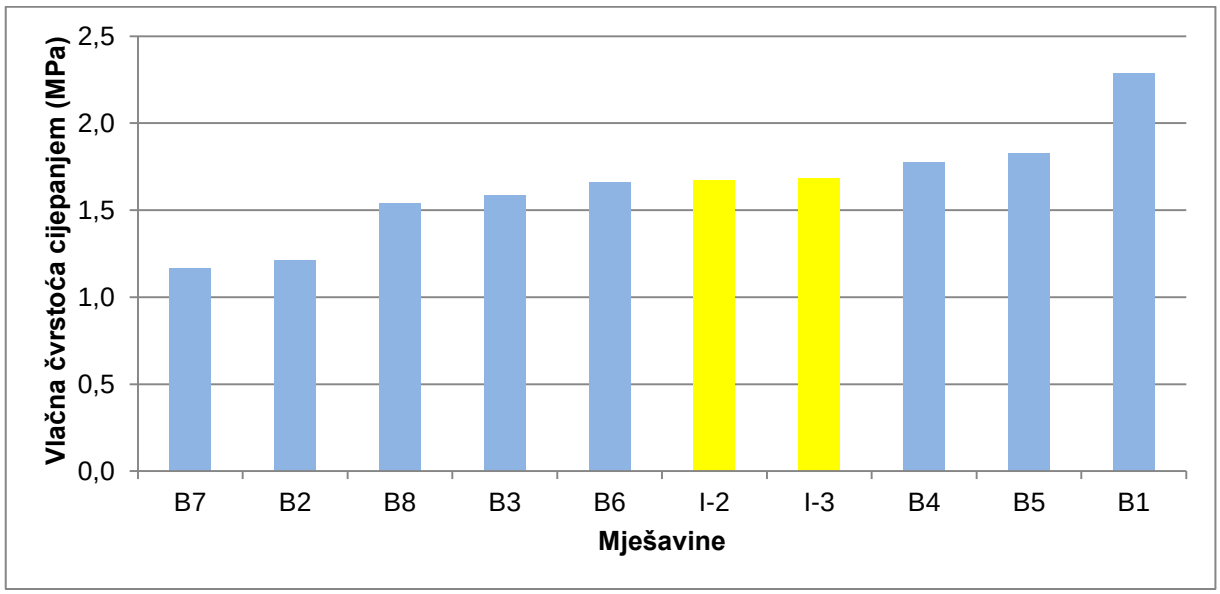
Mješavina B_1, frakcije 8 – 11,2 mm, napravljena od prirodnog agregata i ugrađena zbijanjem čeličnom šipkom, ima najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem koja iznosi 2,28 MPa, a najmanju vlačnu čvrstoću cijepanjem, iznosa 1,16 MPa, ima mješavina B_7 frakcije 8 – 16 mm koja je napravljena od drobljenog agregata i ugrađena zbijanjem drvenom letvom.

Promotre li se mješavine B_6 i B_7, koje su ugrađene zbijanjem drvenom letvom, vidljivo je da mješavina B_6, koja je napravljena s užim rasponom frakcije, ima veću čvrstoću cijepanjem.

Također, mješavina $B_{8,}$ frakcije 8 – 16 mm, ima manju vlačnu čvrstoću cijepanjem od mješavine $B_{5,}$ frakcije 11,2 – 16 mm. Obje navedene mješavine su vibrirane i napravljene od drobljenog agregata.

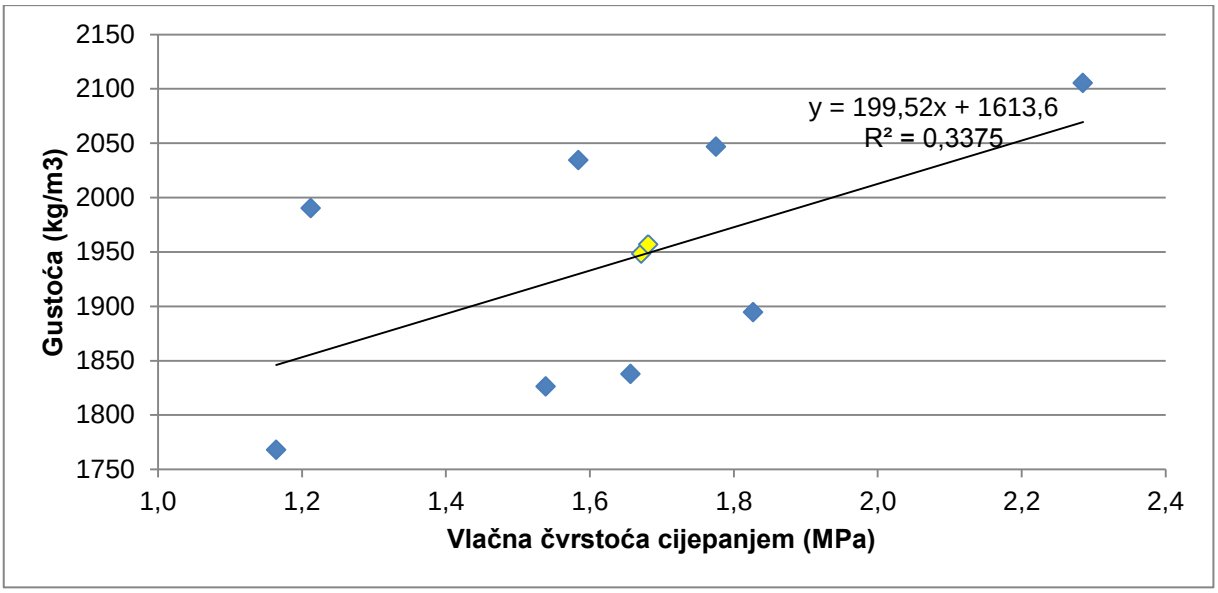
Mješavina B_3 ima veću vlačnu čvrstoću od mješavine B_2 koja sadrži 50 kg/m^3 manje cementa. Povećanjem udjela cementa u mješavini dolazi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem.

Kao i kod tlačne čvrstoće, nije jasno koja vrsta agregata daje bolje rezultate vlačne čvrstoće cijepanjem. Kada je u pitanju frakcija 8 – 11,2 mm, veću čvrstoću ima uzorak napravljen od prirodnog agregata (B_1 > I-2), a kod frakcije 11,2 – 16 mm bolji rezultat postiže uzorak izrađen s drobljenim agregatom (I-3 > B_2), što prikazuje slika 5.23.



Slika 5.23 Vlačna čvrstoća cijepanjem svih mješavina

Na slici 5.24 prikazana je ovisnost gustoće i tlačne čvrstoće cijepanjem. Povećanjem gustoće dolazi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem pa je korelacija pozitivna. Koeficijent korelacije, R, iznosi 0,58. Podaci su poprilično rapršeni, a mješavine iz prethodnog istraživanja [14] najmanje odstupaju.



Slika 5.24 Veza između gustoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

5.2.5 Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju

Način ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju prikazan je u poglavlju 4.6.1.

Tablica 5.5 prikazuje rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće pri savijanju na uzorcima oblika prizmi.

Tablica 5.5 Prikaz rezultata ispitivanja savojne čvrstoće

Oznaka	Dimenzije bridova			Volumen	Masa	Gustoća	F_m	R_{ms}
	b (mm)	h (mm)	l (mm)	(cm^3)	(g)	(kg/m^3)	(N)	(MPa)
B_6	120	120	450	6480,0	13595	2098,0	26	3,4
B_7	120	120	450	6480,0	14363	2216,5	32,8	4,3

Čvrstoća na savijanje poroznog betona kreće se od 1 do 3,8 MPa [9] pa obje mješavine zadovoljavaju ovaj kriterij.

Mješavina B_6, frakcije 11,2 – 16 mm, ima manju savojnu čvrstoću od mješavine B_7, koja je napravljena od agregata frakcije 8 – 16 mm. Manja zrna agregata zapunjavaju šupljine koje se nalaze između krupnijih zrna pa se stvara kompaktna, čvršća struktura.

5.2.6 Rezultati ispitivanja brzine infiltracije probnih ploča

Brzina infiltracije ispitana je prema ASTM C 1701 standardu u poglavlju 4.6.2.

Prema [26], preporučena minimalna brzina infiltracije novih objekata iznosi 0,7 mm/s pa sve probne ploče zadovoljavaju kriterij infiltracije te se brzine kreću od 3,8 – 26,3 mm/s.

Tablica 5.6 prikazuje rezultate probnog i stvarnog ispitivanja brzine infiltracije probnih porozno – betonskih ploča, postavljenih na različite podloge.

Tablica 5.6 Prikaz rezultata ispitivanja brzine infiltracije

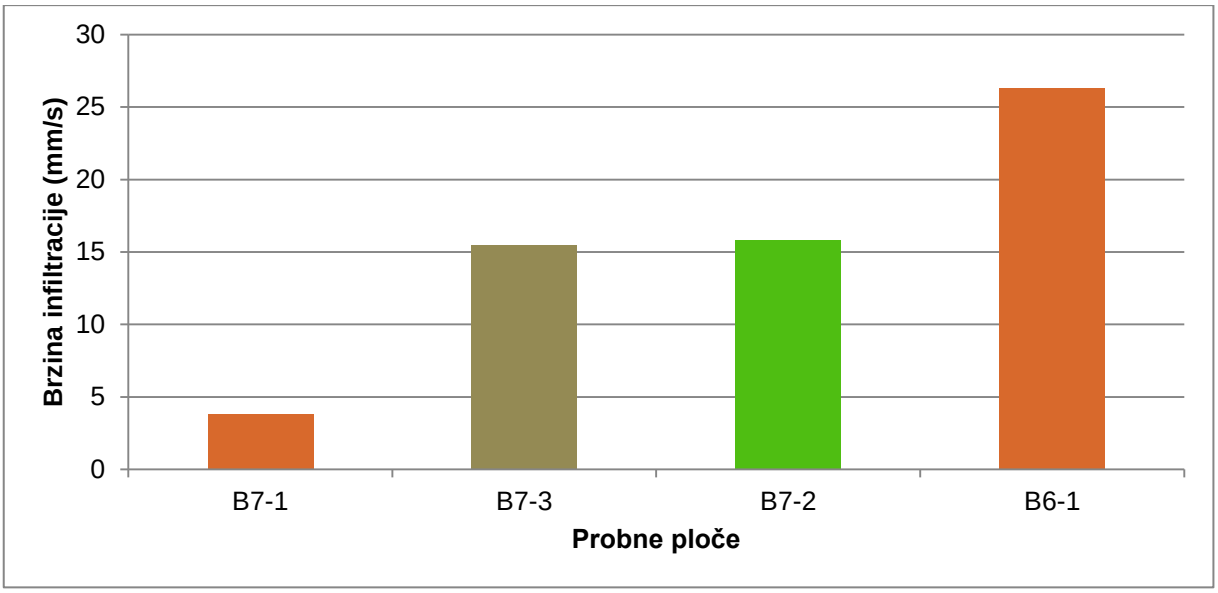
Oznaka	Podloga	Probno ispitivanje		Stvarno ispitivanje			
		Količina vode	Proteklo vrijeme	Količina vode	Proteklo vrijeme	Brzina infiltracije	
		(l)	(s)	(l)	(s)	(mm/sat)	(mm/s)
B_{6-1}	Zemljana	3,63	3,06	18,14	9,45	94708	26,3
B_{7-2}	Travnata	3,63	4,97	18,14	15,74	56861	15,8
B_{7-3}	Šljunčana	3,63	4,71	18,14	15,99	55972	15,5
B_{7-1}	Zemljana	3,63	14,54	18,14	66,03	13554	3,8

Najveću brzinu infiltracije ima probna ploča $B_{6-1,}$ frakcije 11,2 – 16 mm, koja je postavljena na zemljanu podlogu, a najmanju brzinu infiltracije ima probna ploča $B_{7-1,}$ frakcije 8 – 16 mm, postavljena također na zemljanu podlogu (slika 5.25).

Zbog velike razlike vremena infiltracije ploče B_{7-1} u odnosu na ostale probne ploče, postupak ispitivanja ove ploče je ponovljen. Dobiveno je neznatno manje vrijeme od prvobitnog, što potvrđuje da je prvo ispitivanje bilo u skladu s ASTM C 1701 standardom. Mogući uzrok niske razine infiltracije je nepropusna podloga ispod ploče B_{7-1} jer je teren na kojeg je instalirana napravljen od nasipnog materijala.

Očekivalo se da će ploča $B_{7-2,}$ koja je postavljena na sloj šljunka, imati veću brzinu infiltracije od ploča postavljenih na travnatu i zemljanu podlogu zbog mogućnosti skladištenja veće količine vode.

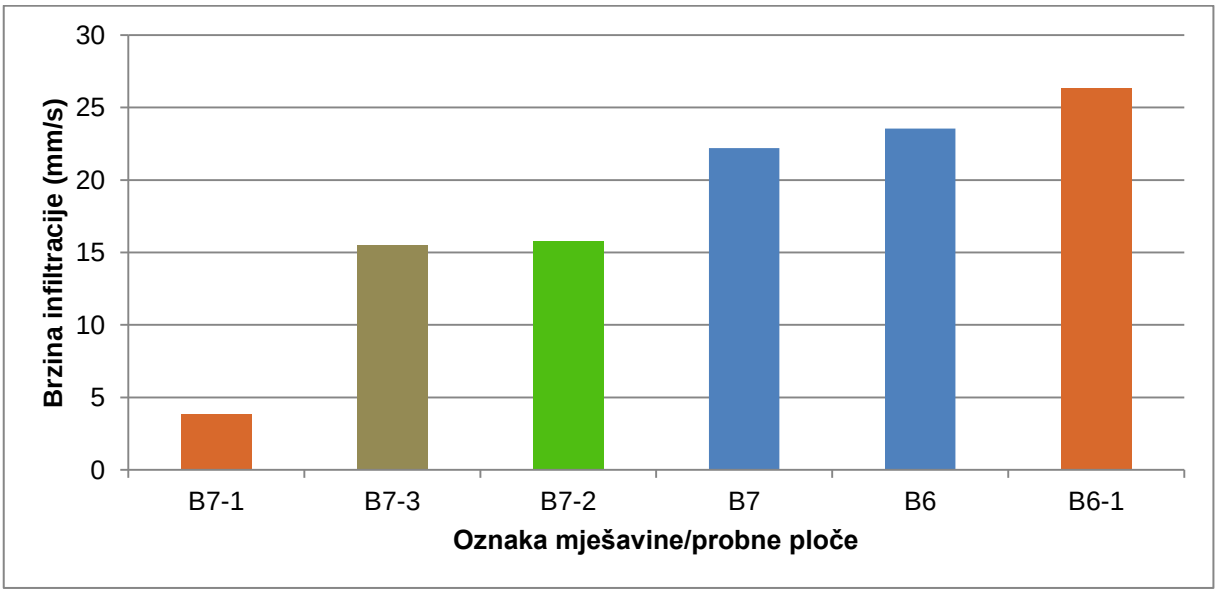
Također, ako usporedimo ploče B_{7-2} i $B_{7-3,}$ uočava se da vegetacija ispod probne ploče B_{7-2} nije značajnije utjecala na brzinu infiltracije. Naprotiv, ploča B_{7-2} ima za 0,3 mm/s veću infiltraciju. Mogući razlog je korijenje uz koje voda brže infiltrira u tlo kroz pukotine.



Slika 5.25 Brzina infiltracije probnih ploča

Na slici 5.26 prikazana je usporedba rezultata propusnosti na terenu (probne ploče) i vrijednosti propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode mjerene u laboratoriju na uzorcima oblika valjka. Naime, mješavine B_6 i B_7 su dale najbolje rezultate propusnosti te su bile polazište za izradu recepture probnih ploča.

Vidljivo je da probna ploča $B_{6\text{-}1,}$ postavljena na zemljanu podlogu, ima bolju propusnost od mješavine $B_{6,}$ ispitane u laboratoriju, dok probne ploče izrađene po uzoru na mješavinu B_7 imaju manju propusnost od nje same.

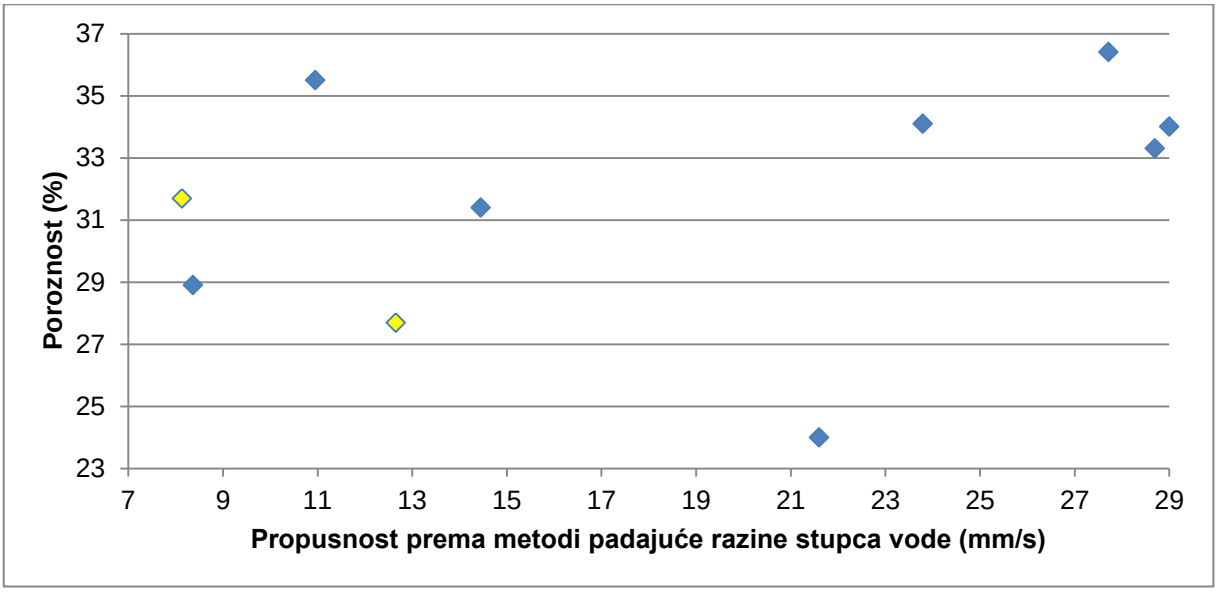


Slika 5.26 Usporedba brzine infiltracije mješavina i probnih ploča

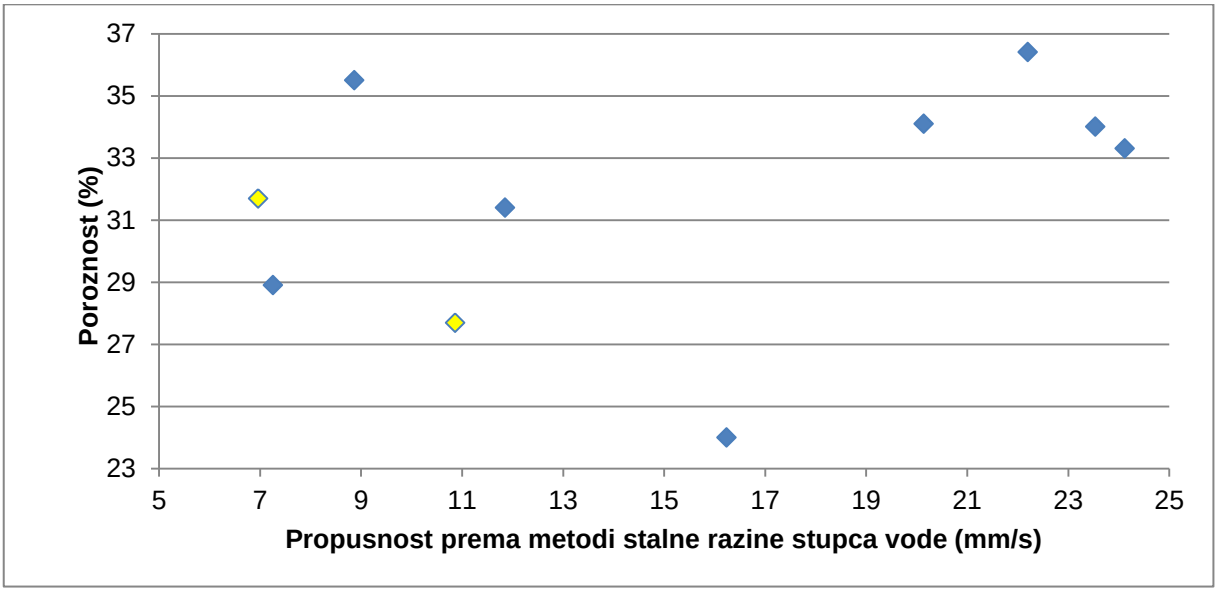
5.3 Ovisnosti između ispitanih svojstava poroznog betona

5.3.1 Veza između poroznosti i propusnosti

Na slikama 5.27 i 5.28 prikazana je veza između ukupne poroznosti i propusnosti prema obje mjerene metode. Naime, prema definiciji, efektivna poroznost je prostor u poroznoj formaciji raspoloživ za protok vode. Ukupna poroznost nije mjerodavna za usporedbu s propusnošću pa su podaci jako raspršeni i nije moguće uspostaviti vezu među njima, ali je vidljivo da s porastom ukupne poroznosti raste i propusnost.



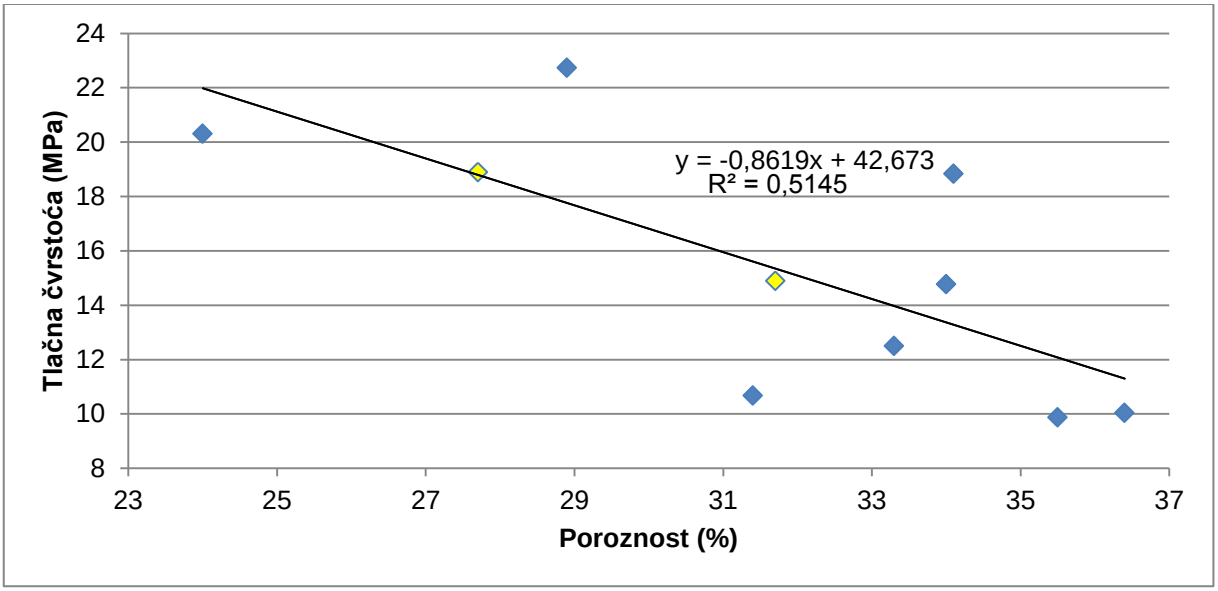
Slika 5.27 Veza između poroznosti i propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode



Slika 5.28 Veza između poroznosti i propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode

5.3.2 Veza između tlačne čvrstoće i poroznosti

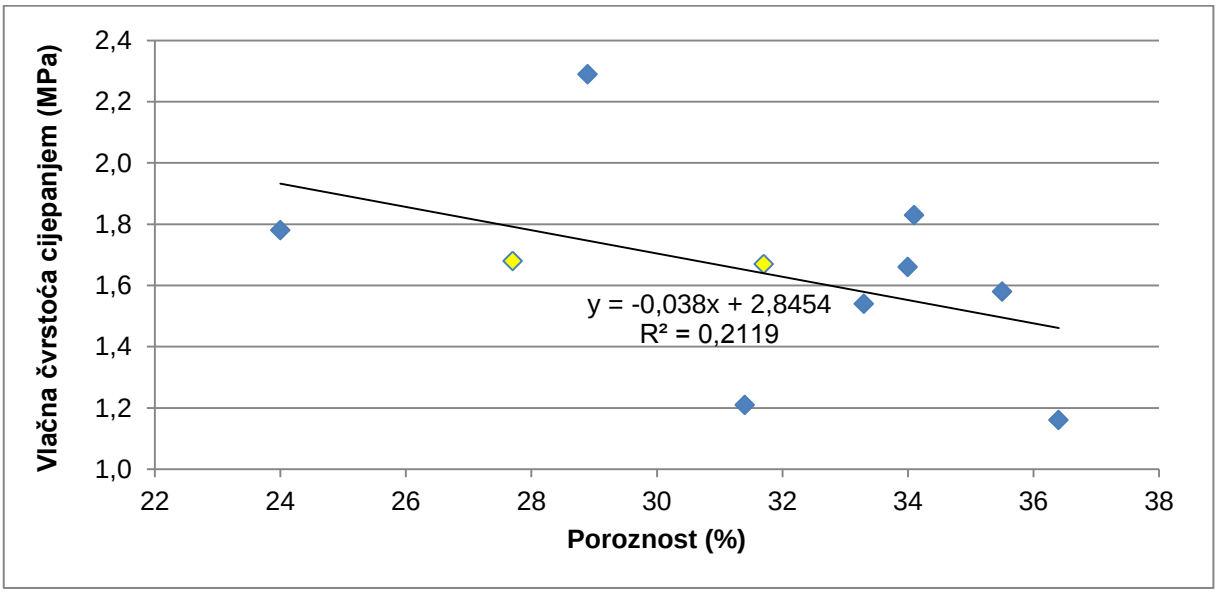
Slika 5.29 prikazuje odnos tlačne čvrstoće i ukupne poroznosti. Općenito vrijedi da se povećanjem tlačne čvrstoće smanjuje poroznost i obrnuto, što je potvrđeno i u ovom radu. Korelacija je negativna, veza linearna, a koeficijent korelacije iznosi 0,72.



Slika 5.29 Veza između tlačne čvrstoće i poroznosti

5.3.3 Veza između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti

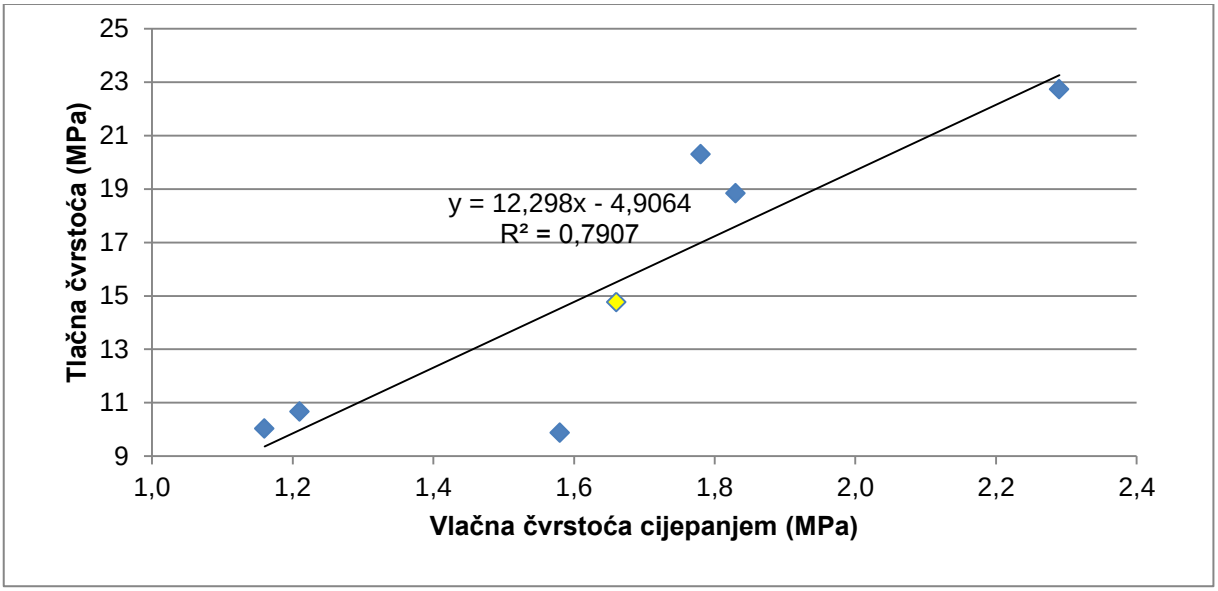
Na slici 5.30 prikazan je odnos vlačne čvrstoće cijepanjem i ukupne poroznosti. Koeficijent korelacije, R, iznosi 0,46. Veza nije linearna, a korelacija je negativna.



Slika 5.30 Veza između vlačne čvrstoće cijepanjem i poroznosti

5.3.4 Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

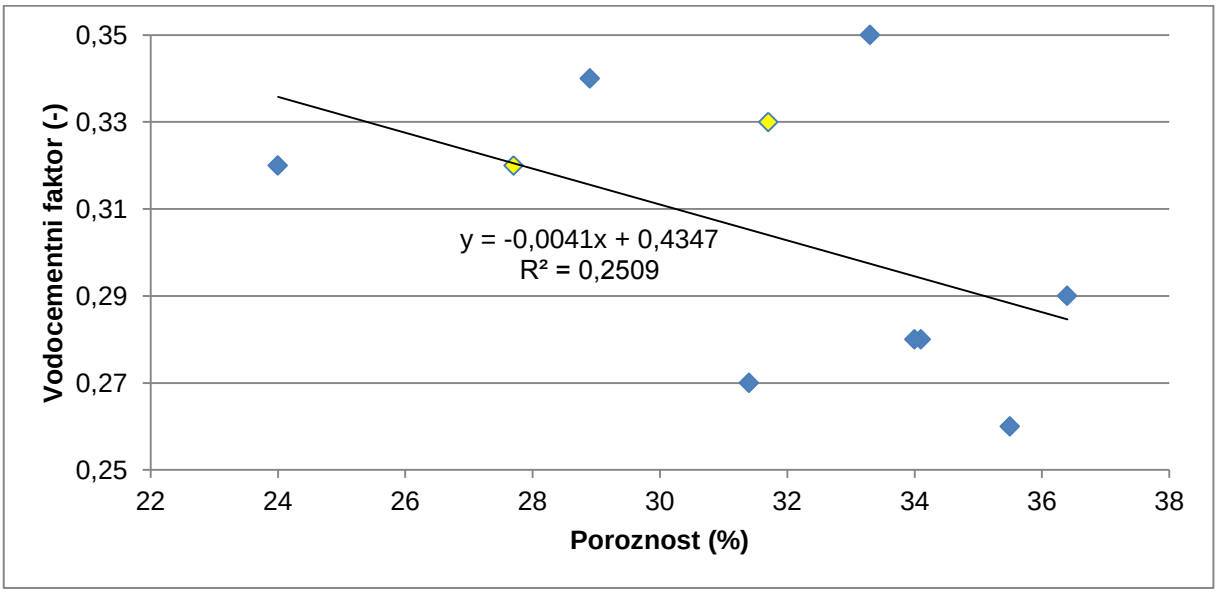
Na slici 5.31 prikazan je odnos između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem. Potvrđeno je da povećanjem vlačne čvrstoće cijepanjem dolazi do povećanja tlačne čvrstoće betona uz visoki koeficijent korelacije 0,89.



Slika 5.31 Veza između tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem

5.3.5 Veza između vodocementnog faktora i poroznosti

Na slici 5.32 vidljivo je da je korelacija negativna i ne prati linearnu zakonitost. Koeficijent korelacije, R, iznosi 0,50 te ne postoji jasna veza između vodocementnog faktora i poroznosti.



Slika 5.32 Veza između vodocementnog faktora i poroznosti

6 ZAKLJUČAK

Zelena gradnja podrazumijeva iznalaženje načina za efikasno upravljanje vodnim resursima i učinkovito upravljanje pitkim i otpadnim vodama.

Glavna namjena poroznog betona je da vodu s betonirane površine propušta u donje slojeve te omogućava da se racionalnije dimenzionira ili potpuno eliminira sustav za odvodnju oborinske (površinske) vode.

Koristeći različite udjele, veličine i vrste agregata, različite sadržaje cementa i vode te tri različita načina ugradnje pokušalo se dobiti optimalnu mješavinu poroznog betona koja daje najpovoljniji omjer propusnosti i čvrstoće. Na temelju rezultata prethodnog istraživanja napravljeno je osam mješavina frakcije agregata u rasponu 8 – 16 mm.

U svježem stanju ispitana je konzistencija metodom slijeganja i metodom oblikovanja kuglice. U očvrslom stanju ispitana je poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća cijepanjem.

Ugrađene su i četiri probne ploče na travnatu, zemljanu i šljunčanu podlogu na kojima je ispitana propusnost te je određena vlačna čvrstoća na savijanje za dvije recepture probnih ploča.

Iz rezultata ispitivanja proizlaze sljedeći zaključci:

- Ispitivanjem konzistencije metodom slijeganja utvrđeno je da slijeganje svih mješavina iznosi 0 – 0,5 cm, osim kod mješavine B_8, kod koje je došlo do smičnog slijeganja u iznosu 12 cm. Kod metode oblikovanja kuglice, prva i zadnja mješavina nemaju zadovoljavajuću konzistenciju i nije moguće dlanovima oblikovati kuglicu.
- Poroznost mješavina se kreće od 24 – 36,4% te sve zadovoljavaju kriterij poroznosti. Najbolje rezultate poroznosti pokazuju mješavine ugrađene drvenom letvom i čekićem, a slijede ih mješavine ugrađene vibriranjem. U narednim istraživanjima bi trebalo smanjiti vrijeme vibriranja od 40 sekundi (5 + 5 + 30) te odrediti optimalno vrijeme kod kojeg nema pojave segregacije, a da se pri tome dobiju zadovoljavajuće vrijednosti poroznosti, čvrstoća i propusnosti poroznog betona. Nije moguće ustanoviti da li veću poroznost imaju mješavine napravljene od prirodnog ili drobljenog agregata. Poroznost se povećava povećanjem sadržaja

cementa. Promatranjem ovisnosti poroznosti i gustoće uočena je jasna, linearna veza među njima. Koeficijent korelacije iznosi 0,99, a korelacija je negativna.

- Postignuti su odlični rezultati propusnosti po obje mjerene metode koji se kreću od 7,26 – 29 mm/s. Najmanje propusnosti imaju mješavine ugrađene udarcima čeličnom šipkom. Najveću propusnost ima mješavina B_8, ugrađena vibriranjem, unatoč preporukama da to nije pogodan način ugradnje poroznog betona, a slijede mješavine ugrađene zbijanjem drvenom letvom te se ovaj način ugradnje treba detaljnije ispitati zbog postignutih izvrsnih rezultata. Također, smanjenjem vremena vibriranja očekuje se smanjenje/spriječavanje segregacije cementne paste na dnu kalupa. Mješavine napravljene s manjim frakcijama agregata imaju manje propusnosti. Povećanjem sadržaja cementa dolazi do povećanja propusnosti. Mješavine napravljene od prirodnog agregata imaju veću propusnost od mješavina s drobljenim agregatom. Promatranjem ovisnosti koeficijenata propusnosti prema metodi padajuće razine stupca vode i koeficijenata propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode uočava se pozitivna korelacija s linearnom vezom, a koeficijent korelacije iznosi gotovo 1,0.
- Sve mješavine imaju zadovoljavajuću tlačnu čvrstoću cijepanjem koja se kreće u rasponu 9,87 – 22,73 MPa. Očekivano, najveće tlačne čvrstoće postižu mješavine ugrađene vibriranjem na vibrostolu i zbijanjem čeličnom šipkom. Kod jednofrakcijskih mješavina uzorci manjih nazivnih frakcija imaju veću tlačnu čvrstoću. Tlačna čvrstoća raste smanjenjem sadržaja cementa, vjerojatno zbog načina ugradnje uzoraka. Usporedbom mješavina izrađenih od različitih vrsta agregata nije ustanovljeno koja daje veću tlačnu čvrstoću. Veza između tlačne čvrstoće i gustoće je linearna, a koeficijent korelacije, R, iznosi 0,87.
- Najveću vlačnu čvrstoću cijepanjem ima mješavina B_1, a najmanju mješavina B_7. Kao i kod tlačne čvrstoće, najveće vlačne čvrstoće cijepanjem imaju uzorci koji su vibrirani i zbijani čeličnom šipkom. Mješavine napravljene s užim rasponom frakcija agregata imaju veće čvrstoće cijepanjem. Usporedbom mješavina napravljenih s prirodnim i drobljenim agregatom, istog načina ugradnje, sadržaja agregata i vodocementnog faktora, nije zaključeno koja vrsta agregata daje bolje rezultate vlačne čvrstoće cijepanjem. Povećanjem udjela cementa u mješavini dolazi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem. Povećanjem gustoće dolazi do

povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem. Podaci su raspršeni, a koeficijent korelacije iznosi 0,58.

- Vlačne čvrstoće pri savijanju dviju ispitanih mješavina probnih ploča iznose 3,4 i 4,3 MPa te zadovoljavaju kriterij savojne čvrstoće poroznog betona za uporabu. Mješavina većeg raspona frakcije agregata ima veću vlačnu čvrstoću pri savijanju jer manja zrna agregata zapunjavaju šupljine koje se nalaze između krupnijih zrna pa se stvara čvršća, kompaktna struktura.
- Postignute su izvrsne brzine infiltracije porozno – betonskih ploča koje se kreću od 3,8 do čak 26,3 mm/s. Nisku razinu infiltracije probne ploče $B_{7\text{-}1}$ vjerojatno uzrokuje teren napravljen od nasipnog materijala na kojeg je postavljena. Suprotno očekivanjima, ploča $B_{7\text{-}2}$ instalirana na šljunčanu podlogu nema najveću propusnost.
- Porastom ukupne poroznosti raste i propusnost, ali nije moguće uspostaviti jasnu vezu među njima. Efektivna poroznost je ta koja propušta vodu kroz poroznu formaciju. Nadalje, povećanjem tlačne čvrstoće došlo je do smanjenja poroznosti, uz koeficijent korelacije 0,72. Usporedbom vlačne čvrstoće cijepanjem i ukupne poroznosti nije dobivena jasna veza između njih. U ovom radu je potvrđeno da povećanjem tlačne čvrstoće dolazi do povećanja vlačne čvrstoće cijepanjem i obrnuto. Veza je linearna, a koeficijent korelacije iznosi 0,89. Nije ustanovljena jasna veza između vodocementnog faktora i poroznosti.

7 LITERATURA

[1] http://puo.mzoip.hr/UserDocsImages/Sazetak_19_01_2011_1.pdf

[2] http://www.gradimo.hr/clanak/beton-jeftin-i-dostupan/21894

[3] http://www.gbccroatia.org/stranice/definicija-zelene-gradnje/48.html

[4] http://www.gbccroatia.org/stranice/vaznost-zelene-gradnje/49.html

[5] http://www.gbccroatia.org/stranice/zasto-graditi-zeleno/50.html

[6] http://www.betoni.hr/Odr%C5%BEivi-razvoj/Detalj/ArtMID/870/ArticleID/32/Beton-%E2%80%93-odr%C5%BEivi-materijal

[7] http://e-gfos.gfos.hr/index.php/arhiva/broj-5/clanak-1-doksanovic-farkas-njegovanovic

[8] http://www.betoni.hr/Beton/Detalj/ArtMID/864/ArticleID/36/Propusni-beton

[9] P. D. Tennis, M. L. Leming, D. J. Akers: *Pervious Concrete Pavements*, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, SAD, 36 pages, 2004.

[10] http://www.docfoc.com/s34-pervious-concrete-ltc2013

[11] M. U. Maguesvari, V. L. Narasimha: *Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications*, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Volume 104, 2 December 2013, Pages 198-207, 2013.

[12] Y. Zhifeng, M. Wei, S. Weiguo, Z. Mingkai: *The Aggregate Gradation for the Porous Concrete Pervious Road Base Material*, Jun 2008.

[13] Hongzhu Quan: *Study on the Coexistence of Porous Ecological Concrete with Plants*, Advanced Materials Research Vols. 311-313, 16 August 2011, Pages 1551-1554, 2011.

[14] I. Radelja: *Utjecaj različitih razreda drobljenog agregata na svojstva poroznog betona*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2015.

[15] http://www.cemex.hr/

[16] http://hrcak.srce.hr/file/127819

[17] http://civilblog.org/2015/01/09/how-to-test-aggregate-for-bulk-density-and-voids/

[18] http://www.vodovod-st.hr/Onama/Djelatnost/Vodoopskrba/Laboratorijzapitkevode/tabid/81/Default.aspx

[19] https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Primjer_-_uputa_zs_ispitivanje.pdf

[20] S. Mrakovčić, N. Čeh, V. Jugovac: *Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjednog betona*, Građevinar 66 (2014) 2 pp. 107-113.

[21]http://info.grad.hr/!res/gf_osoblje/1120041065/doc/1.%20mehanika%20tla%20i%20stijena%20-%20preddiplomski/052.5._predavanje_mt.pdf

[22] N. Torić, I. Boko, B. Peroš: *Smanjenje mehaničkih svojstava betona velike čvrstoće nakon požara*, Građevinar 63 (2011) 12, 1033-1041.

[23] http://www.cemex.hr/Userfiles/pdf/Smjernice-betonskikolnici.pdf

[24] https://en.wikipedia.org/wiki/Flexural_strength

[25] I. A. Anderson, M. Suozzo, M. M. Dewoolkar: *Laboratory and Field Evaluations of Pervious Concrete,* College of Engineering and Mathematical Sciences, Burlington, October 28, 2013.

[26] D. R. Smith, K. Earley, J. M. Lia: *Potential Application of ASTM C1701 for Evaluating Surface Infiltration of Permeable Interlocking Concrete Pavements*, SAD, 2011.