

Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona u morskom okruženju

Titulić, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:123:919505>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

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



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Valentina Titulić

Split, 2022.

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

Valentina Titulić

**Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona u
morskom okruženju**

Diplomski rad

Split, 2022.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Valentina Titulić

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083217575

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Diplomski rad

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona u morskom okruženju

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je istražiti utjecaj mineralnih dodataka (silikatne prašine i metakaolina) na fizikalno-mehanička i trajnosna svojstva betona u morskom okruženju. Potrebno je prikazati mehanizam korozije betona, principe projektiranja sastava betona uključivanjem trajnosti elemenata, te relevantne metode ispitivanja.

Projektirati sastav betona prema razredu izloženosti XS – korozija betona uzrokovana kloridima iz morske vode, s varijacijom tipa i količine mineralnog dodatka. Provesti relevantna laboratorijska ispitivanja betona u svježem i očvrslom stanju. Sve dobivene rezultate potrebno je analizirati i dati najvažnije zaključke rada.

U Splitu, 11.listopada 2021.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

izv.prof.dr.sc. Ivo Andrić

Zahvala

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Goranu Baloeviću na trudu i pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Najveća hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili školovanje i pružili beskrajnu ljubav i podršku te mojoj sestri na savjetima, strpljenju i ljubavi tijekom svih godina studiranja.

Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona u morskom okruženju

Sažetak:

Morsko okruženje spada među najagresivnije razrede izloženosti okoliša stoga je važno posebnu pažnju posvetiti projektiranju sastava betona. U ovom okruženju, trajnost betonskih konstrukcija se smanjuje jer se javljaju razni fizikalni, kemijski i biološki procesi koji dovode do razaranja betona. Mineralni dodaci upotrebljavaju se za poboljšanje svojstva betona te se postiže veća otpornost betona na kloride čime se produljuje vijek trajanja konstrukcija. U eksperimentalnom dijelu napravljeno je pet mješavina s različitim postotkom mineralnih dodataka na kojima su se provela difuzijska ispitivanja. Cilj rada je istražiti kako mineralni dodaci utječu na svojstva betona koji će se nalaziti u morskom okruženju.

Ključne riječi:

morsko okruženje, beton, difuzija, kloridi, mineralni dodaci, korozija, trajnost, metakaolin, silicijska prašina

Influence of mineral additives on the properties of concrete in the marine environment

Abstract:

The marine environment is one of the most aggressive environmental exposure classes, so it is important to pay special attention to the design composition of concrete. In this environment, the durability of concrete structures decreases as various physical, chemical and biological processes occur that lead to destruction of concrete. Mineral additives are used to improve the properties of concrete against chlorides and extending the service life of structures. In the experimental part, five mixtures were made with different percentages of mineral additives on which diffusion tests were performed. The aim of this study is to investigate how mineral additives affect properties of concrete in the marine environment.

Keywords:

marine environment, concrete, diffusion, chlorides, mineral additive, corrosion, durability, metakaolin, silica

Sadržaj

1	UVOD	1
2	PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONA	2
2.1	Svojstva svježeg i očvrsnulog betona.....	2
2.1.1	Svojstva svježeg betona	3
2.1.2	Svojstva očvrsnulog betona.....	4
2.2	Trajnost betona	6
2.3	Dodaci betonu.....	8
2.3.1	Silicijska prašina	9
2.3.2	Metakaolin.....	11
2.4	Utjecaj morske vode na beton	11
3	METODE ISPITIVANJA SVJEŽEG I OČVRSNULOG BETONA.....	16
3.1	Metode ispitivanja svježeg betona.....	16
3.1.1	Metoda određivanja konzistencije slijeganja	16
3.1.2	Metode određivanja konzistencije rasprostiranja.....	17
3.1.3	Ispitivanje količine zraka u svježem betonu	18
3.2	Metode ispitivanja očvrsnulog betona	18
3.2.1	Ispitivanje tlačne čvrstoće	18
3.2.2	Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa.....	19
3.2.3	Ispitivanje vodonepropusnosti.....	20
3.2.4	Ispitivanje plinopropusnosti	21
3.2.5	Metoda ispitivanja migracije klorida kroz betona – RCPT C1202	24
3.2.6	Metoda ispitivanja migracije klorida kroz beton - ASTM C1760	27
4	EKSPERIMENTALNI DIO RADA	29
4.1	Odabir komponenti	29
4.2	Materijali	30
4.2.1	Cement	30
4.2.2	Agregat	31
4.2.3	Aditiv.....	34
4.2.4	Silicijska prašina	35
4.2.5	Metakaolin.....	35
4.3	Priprema mješavina	36
4.4	Rezultati ispitivanja svježeg betona	38
4.4.1	Rezultati ispitivanja konzistencije slijeganja	38

4.4.2	Rezultati ispitivanja konzistencije razastiranja	40
4.4.3	Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu	42
4.5	Analiza rezultata ispitivanja svježeg betona.....	43
4.6	Rezultati ispitivanja očvrtnulog betona.....	44
4.6.1	Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće	44
4.6.2	Rezultati ispitivanja ultrazvuka.....	46
4.6.3	Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti	48
4.6.4	Rezultati ispitivanja plinopropusnosti	50
4.6.5	Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton ASTM C1202.....	51
4.6.6	Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton ASTM C1760.....	52
4.6.7	Odnos između metoda ASTM C1202 i ASTM C1760	53
4.7	Analiza rezultata ispitivanja očvrtnulog betona	54
5	ZAKLJUČAK	56
6	LITERATURA.....	57
7	PRILOZI.....	58

1 UVOD

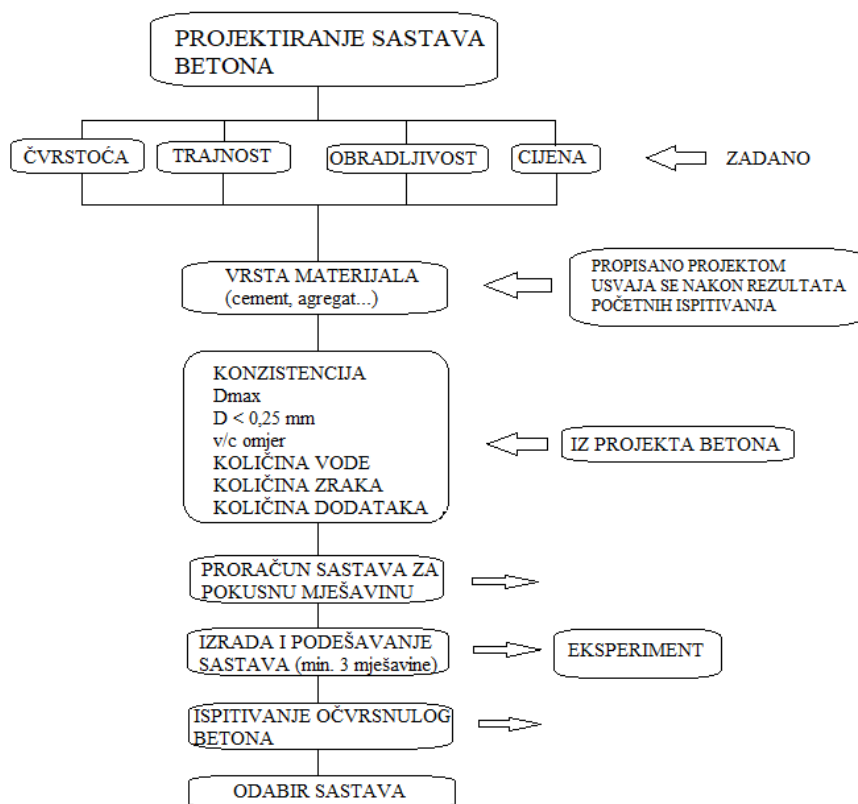
Od svih materijala beton ima najrašireniju primjenu u građevinarstvu. Uz dobru tehnologiju i ispravno projektiranje sastava, beton ima dobra trajnosna svojstva pa se primjenjuje u različitim područjima. Osnovne komponente za izradu betona su cement, agregat i voda. Beton ne zahtjeva velike troškove održavanja i u uobičajenim uvjetima je dugotrajan materijal. Otporan je i na djelovanje vrlo niskih i na djelovanje vrlo visokih temperatura. Mane betona su što ima veliku vlastitu težinu i zahtjeva njegu nakon ugradnje. Pravilnom njegom sprječava se nastanak pukotina. Pukotine nastale u ranoj fazi izgradnje jako negativno utječu na trajnost konstrukcija. Za poboljšanje svojstava u svježem i očvrslom stanju primjenjuju se mineralni i kemijski dodaci. Različiti mineralni i kemijski dodaci upotrebljavaju se za poboljšavanje svojstava betona, kao što su: poboljšanje obradivosti betona bez povećanja količine vode, smanjenje količine vode uz zadržavanje iste obradivosti, usporavanje ili ubrzavanje početka vezivanja, sprječavanje plastičnog skupljanja ili bubrenja i dr. Također je moguće utjecati na smanjenje segregacije, poboljšati mogućnost ugradnje, usporiti gubitak obradivosti, povećati čvrstoću, poboljšati trajnost betona, usporiti ili smanjiti razvoj toplinske hidratacije.

Cilj ovog rada je ispitati utjecaj mineralnih dodataka, silicijske prašine i metakaolina, na svojstva betona koji se koristi u konstrukcijama koje se nalaze u morskom okruženju. U laboratoriju je napravljeno pet različitih mješavina. Provedena standardna ispitivanja betona u svježem stanju su: slijeganje, razastiranje i ispitivanje količine zraka. Metode koje su se koristile u očvrslom stanju su tlačna čvrstoća, brzina ultrazvuka, vodonepropusnost, plinopropusnost, migracija klorida kroz beton. Sva ispitivanja provedena su sukladno normama.

Mnoge betonske konstrukcije danas se izvode sa specifikacijama koje zahtijevaju beton niske propusnosti. Prevladavajući uzrok propadanja konstrukcija u morskom okruženju, naročito mostova je pojava korozije, stoga je potreba za preciznijom metodom za procjenu osjetljivosti mosta na koroziju dovela do razvoja brzog testa propusnosti klorida kroz beton. Razvijene su tri metode ispitivanja, od kojih je prva metoda prema normi ASTM C1202. Ispitivanjem se određuje ukupni prolaz električnog naboja kroz zasićeni uzorak. Druga metoda je NORDTEST BUILD 492 kojom se ispituje dubina prodora klorida, a mjeri se nakon što je na uzorak primijenjen električni potencijal. Ovom metodom određuje se koeficijent migracije klorida koji prikazuje otpornost ispitnog uzorka na prodiranje klorida. Treća metoda prema normi ASTM C1760 je brza metoda koja određuje količinu električne vodljivosti ispitnih uzoraka.

2 PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONA

Prilikom projektiranja betonskih konstrukcija potrebno je definirati razred okoliša i zahtjeve za beton, a sve u cilju dostizanja projektnog uporabnog vijeka. Norma HRN EN 206 te Tehnički propis za betonske konstrukcije sadrže pravila projektiranja betona za postizanje uporabnog vijeka od 50 godina. Beton dolazi u kontakt s mnogo agresivnih medija koji značajno utječu na trajnost, stabilnost i sigurnost konstrukcija, stoga je vrlo važno ispravno projektiranje sastava betona. Na slici 2.1. shematski je prikazan postupak projektiranja sastava betona.



Slika 2.1. Postupak projektiranja sastava betona [1]

2.1 Svojstva svježeg i očvrsnulog betona

Trajnost, čvrstoća i deformabilnost su svojstva betona koja ovise o stupnju njegove zbijenosti i homogenosti koji se ostvaruju tijekom procesa ugrađivanja i završne njege. Za dobivanje kvalitetnog očvrsnulog betona potrebno je da se beton u svježem stanju lako transportira i ugrađuje, da se ne segregira i da se dobro zbije.

Beton kao materijal mora zadovoljiti dva najvažnija zahtjeva:

- u svježem stanju mora biti dovoljno gibljiv i podatljiv, kako bi mogao ispuniti sav prostor u oplati ili kalupu,
- u očvrnulom stanju mora imati potrebna fizikalno – mehanička svojstva.

2.1.1 Svojstva svježeg betona

Najvažnije svojstvo svježeg betona je obradivost, a mjera obradivosti je konzistencija. Konzistencija se određuje preko empirijskih postupaka, a to su: slijeganje, rasprostiranje, Vebe postupak i stupanj zbijenosti. Obradivost svježeg betona je relativno svojstvo koje obuhvaća namjenu, način miješanja i ugradnju betona. Može se definirati količinom energije koja je potrebna da se svlada unutarnji otpor između pojedinih čestica u betonu. Ostala važna svojstva su izdvajanje vode, vrijeme vezivanja, segregacija, homogenost betonske mješavine, sadržaj pora i temperatura.

Svježi beton treba zadovoljiti i sljedeće važne zahtjeve:

- brza homogenizacija u miješalici,
- pokretljivost u transportu i pri ugradnji, lagano zaobilaženje zapreka, bez unutrašnjeg razdvajanja mase,
- stabilnost betona za vrijeme transporta, ugradnje i zbijanja,
- što manja adhezija na kliznu oplatu odnosno cijev pumpe za transport betona,
- što bolja adhezija na podlogu,
- dobra kompatibilnost,
- plastičnost za završnu obradu. [2]

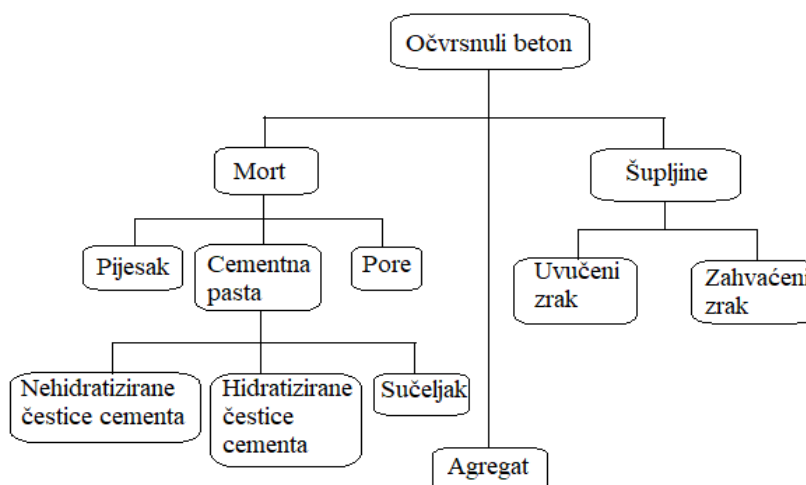
Na svojstva svježeg betona utječu mnogi čimbenici, a oni su prikazani u sljedećoj Tablici 2.1.

Parametar		Utjecaj
Sastav betona	Kemijski dodaci	Veliki
	Mineralni sastav	
Karakteristike cementa		Veliki
Agregat	Vrsta	Veliki
	Količina	
	Oblik	
Količina vode		Veliki
Miješanje betona	Vrsta	Srednji
	Način	
	Trajanje	
Temperatura		Srednji

Tablica 2.1. Utjecaji na svojstva svježeg betona [1]

2.1.2 Svojstva očvrslulog betona

Očvrsluli beton je kompozitni materijal koji se sastoji od čestica agregata, morta i šupljina. Šupljine u betonu mogu nastati miješanjem i uporabom kemijskog dodatka aeranta. Razna svojstva betona uvjetovana su porastom strukturom te njenom količinom i rasporedom u betonu. Porasta struktura betona ima utjecaj na: mehanička svojstva (tlačnu i vlačnu čvrstoću, modul elastičnosti), svojstva vlažnosti (prijenos vlage, sadržaj vlage), toplinska svojstva (vodljivost topline, toplinski kapacitet) i trajnosna svojstva (otpornost na zamrzavanje, otpornost na kemijske utjecaje). Pore nastaju u fazi pripreme svježeg betona, u procesu očvršćivanja te u očvrslulom betonu.

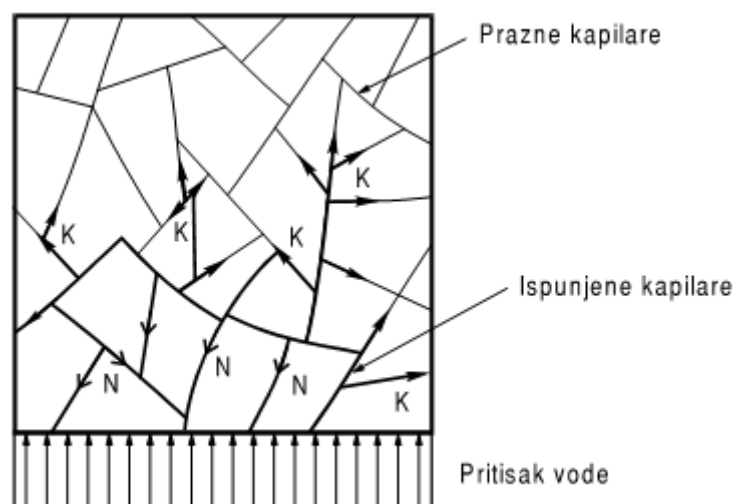


Slika 2.2. Struktura očvrslulog betona [1]

Radius (mm)	Vrsta	Udio (%)	Porijeklo
$10^{-5} - 10^{-6}$	Gel pore	28 - 2	Hidratacija cementa
$1 - 10^{-6}$	Kapilarne pore	0 - 10	Višak vode za obradivost
$10 - 10^{-1}$	Zračni mjehurići i šupljine	1 - 10	Zbijanje, izlučivanje vode, aerant

Tablica 2.2. Vrste, veličina, udio i porijeklo pora u betonu [3]

Zbog svoje poraste strukture, beton je izložen prodiranju raznih tekućina i plinova koje dovode do kemijskog razaranja betona. Difuzija je proces premještanja molekula vode od mjesta veće debljine adsorbiranog sloja do mjesta manje debljine. Na brzinu difuzije utječe razlika u debljini sloja i razlika u koncentraciji neke druge tvari u otopini. Ako pripremljena mješavina sadrži više vode nego što je potrebno za potpunu hidrataciju površinskog sloja čestica cementa, tada višak vode stvara kapilare i šupljine. Kod svih stabilnih betona, slobodna voda stvara kapilare, a kod nestabilnih betona slobodna voda se skuplja ispod krupnijih zrna agregata te se stvaraju veće šupljine. Cementni gel je homogena masa karakteristične poroznosti koju čine hidrati u obliku igličastih kristala koji se međusobno isprepliću i deformiraju, a nastaju hidratacijom cementa. Sićušne pore koje ostaju među kristalima nazivaju se gel pore. Finoća mliva je najvažnije svojstvo cementa o kojem ovisi struktura kapilarnih pora. Upotrebom finije mljevenog cementa dobiva se veći stupanj hidratacije. Volumna koncentracija pora u betonu se smanjuje, ali se povećava volumna koncentracija gel pora. Osim toga, dobivaju se sitnije kapilarne pore, a povećava se razgranatost. Slika 2.3. prikazuje shemu tečenja vode kroz kapilarne pore. [3]



Slika 2.3. Shema tečenja kroz kapilarne pore; K...kapilarna sila, N...viskozno trenje [3]

2.2 Trajnost betona

Trajnost betona predstavlja sposobnost betona da izdrži promjene svojstava uslijed raznih kemijskih, fizikalnih, mehaničkih i bioloških procesa razaranja iz okoliša. Sve betonske konstrukcije trebaju biti projektirane, izvedene i održavane tako da uslijed raznih utjecaja iz okoliša njihova svojstva u uporabi budu odgovarajuća i ekonomski prihvatljiva tijekom njihovog uporabnog vijeka. Tri najvažnije kategorije svojstava su sigurnost, uporabljivost i održivost.

Uzroci smanjenja trajnosti konstrukcija su:

- nedovoljna pozornost posvećena trajnosti u projektu konstrukcije,
- nepravilan izbor materijala,
- neredovito održavanje tijekom uporabe konstrukcije,
- nedovoljna pozornost posvećena trajnosti tijekom izvođenja konstrukcije,
- agresivno djelovanje okoliša (vjetar, sol i dr.).

Procesi oštećenja betona ovise o brzini kojom vlaga, zrak i druge agresivne tvari prodiru u njegovu strukturu. Najvažnije svojstvo trajnosti betona je propusnost i mehanizmi prolaska tvari u beton, a to su difuzija, tečenje pod tlakom i apsorpcija. Brzina tečenja ovisi o poroznosti, međusobnoj povezanosti pora i njihovoj veličini. Tečenje se događa zbog kretanja fluida uslijed razlike tlakova, kretanja iona, atoma ili molekula zbog razlike u koncentraciji, kapilarnog privlačenja tekućine u prazne ili djelomično ispunjene pore.

Beton zadovoljava uvjete trajnosti ako je:

- sukladan s graničnim vrijednostima za razrede izloženosti danim u HRN EN 206,
- pravilno ugrađen, zbijen i njegovan (HRN ENV 1360-1)
- ima najmanju debljinu zaštitnog sloja armature prema normi za projektiranje (HRN ENV 1992-1-1),
- odabran prikladan razred izloženosti,
- redovno održavan.

Projektiranje trajnosti provodi se pomoću normi HRN EN 206 i HRN EN 1990. Norme obuhvaćaju zahtjeve za projektiranje sastava betona (najveći vodocementni omjer, najmanji sadržaj cementa), zahtjeve za veziva i agregate (granulometrijski sastav), ugradnju i njegu betona. Prema normi postoje 24 razreda izloženosti okolišu. U Tablici 2.3. prikazana je razredba uvjeta okoliša prema HRN 1128. [1]

Razred izloženosti	Opis okoliša	Podrazredi
X0	Nema rizika korozije	-
XC	Korozija uzrokovana karbonizacijom	XC1, XC2, XC3, XC4
XD	Korozija uzrokovana kloridima koji nisu iz mora	XD1, XD2, XD3
XS	Korozija uzrokovana kloridima iz morske vode	XS1, XS2, XS3
XF	Korozija uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem sa soli za odleđivanje ili bez njih	XF1, XF2, XF3, XF4
XA	Kemijska korozija	XA1, XA2, XA3
XM	Korozija prouzročena habanjem	XM1, XM2, XM3

Tablica 2.3. Razredba uvjeta okoliša prema HRN 1128 [1]

Tablica 2.4. prikazuje razrede okoliša za beton koji je izložen kloridima iz mora.

Razred	Opis okoliša	Informativni primjer moguće pojave razreda izloženosti	Najmanj i razred tlačne čvrstoće betona	Minimalni zaštitni sloj: c_{min} (mm)	Maksimalni v/c omjer	Minimalna količina cementa (kg)	Ostali zahtjevi
4. Korozija armature uzrokovana kloridima iz mora							
XS1	Izloženi soli iz zraka, ali ne u dir. dodiru s morskom vodom	Vanjski elementi u blizini obale	C 30/37	55	0.50	300	-
XS2	Uronjeno	Stalno uronjeni elementi u lukama	C 35/45	55	0.45	320	-
XS3	U zonama plime i prskanja vode	Zidovi lukobrana i molova	C 35/45	55	0.45	340	-

Tablica 2.4. Razredi okoliša za beton izložen kloridima iz mora (HRN EN 206-1)

Kod betona izloženih djelovanju agresivne sredine, potrebno je koristiti cement odgovarajuće kemijske otpornosti i niži vodocementni faktor.

Unutarnji izvor napada sulfata nastaje kada se izvor sulfata (upotreba agregata bogatog sulfatom) ugradi u beton tijekom postupka miješanja. Glavni vanjski izvori sulfata su podzemne vode, sulfatima bogate soli, morska voda, reciklirani agregat koji sadrži gipsanu žbuku, agro-industrija.

Za postizanje projektirane trajnosti i osiguranje kvalitete armiranobetonskih konstrukcija, potreban je kvalitetni betonski zaštitni sloj koji štiti armaturu te otpornost betona na sljedeće parametre trajnosti: difuzija klorida, vodopropusnost, plinopropusnost, poroznost, kapilarna apsorpcija. [4]

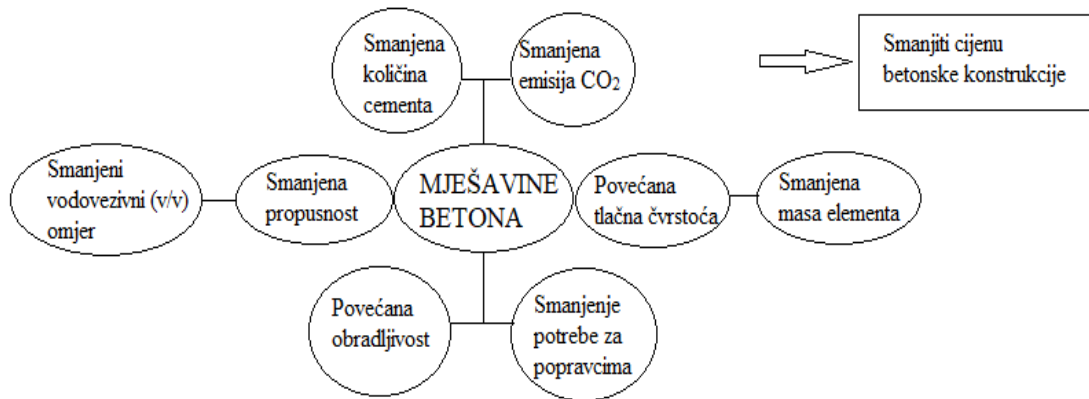


Slika 2.4. Oštećenje betona

2.3 Dodaci betonu

Dodaci betonu su tvari koje služe za poboljšanje svojstva svježeg i očvrnulog betona. Dodaju se prije ili za vrijeme pripreme betonske mješavine. Dodaci betonu dijele se na mineralne i kemijske. Uloga dodataka u betonu je da poboljša sljedeća svojstva: obradivost, smanjenje ili ubrzanje vezivanja, poboljšanje otpornosti na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja, smanjenje segregacije i izdvajanje vode, povećanje trajnosti, skupljanje i dr.

Mineralni dodaci se prema postanku dijele na prirodne (opal, čert, dijatomejske zemlje, vulkanski pepeli) i industrijske (leteći pepeo, granulirana zgura visokih peći, silicijska prašina, metakaolina), te prema TPBK, dijele se na tip I (punila i pigmenti) i tip II (leteći pepeo i silicijska prašina). [1]



Slika 2.5. Uloga dodataka u betonu [1]

Mineralni dodaci su praškasti materijali koji se doziraju u većim količinama u odnosu na masu cementa, dok su kemijski dodaci tekućine koje se doziraju u malim količinama. Učinkovitost dodataka ovisi o količini i o kompatibilnosti s drugim sastojcima u betonu. Mineralni dodaci poboljšavaju svojstva betona tako što fine čestice smanjuju veličinu i količinu šupljina. Dodaci, kao što su silicijska prašina i metakaolin, spadaju pod industrijski dobivene dodatke. [1]

2.3.1 Silicijska prašina

Silicijska prašina je jako fina prašina raznih nijansi sive boje. Sporedni je proizvod koji nastaje pri proizvodnji silicijskih i ferosilicijskih legura u elektrolučnim pećima. Sastoji se od nekristaliziranih sferičnih amorfnih čestica silicijevog dioksida, a nastaje u procesu redukcije kvarca u metalni silicij pri temperaturi od oko 2000 °C. U procesu topljenja kvarcne rudače u elektrodukcijskoj peći nastaju plinovi. Silicij reagira s kisikom formirajući nestabilni SiO_2 koji na temperaturi od 1100 °C s kisikom iz zraka daje fini dispergirani i amorfnu SiO_2 . Silicijska prašina dobiva se u procesu predsepariranja i filtriranja prašine iz proizvedenih otpadnih dimnih plinova na tehničkom sustavu za otprašivanje. Čestice silicijske prašine su vrlo male, čak 50 – 100 puta manje od čestice cementa. Kada se upotrebljava u betonu, vrlo je reaktivan materijal i to zbog finoće čestica, specifične ploštine i visokog sadržaja SiO_2 . U Tablici 2.5. prikazana su fizička svojstva silicijske prašine.

Veličina čestica	0,1 – 0,5 μm
Specifična ploština	15000 – 25000 m^2/kg
Gustoća	130 – 430 kg/m^3
Oblik zrna	sferičan
Boja	tamno siva

Tablica 2.5. Fizička svojstva silicijske prašine [1]

Silicijska prašina može se dodati u beton u količini od 15 %, a najčešće doziranje je između 7 – 10% na količinu cementa. Zbog velike specifične ploštine, silicijska prašina utječe na povećanje potrebe za vodom u betonu, stoga se preporuča koristiti ju zajedno s kemijskim dodatkom, kao što je plastifikator ili superplastifikator. Silicijska prašina poboljšava obradivost, povećava kohezivnost, popunjava unutrašnju strukturu, povećava čvrstoću, smanjuje propusnost betona i dr. U Tablici 2.6. prikazani su ukupni efekti dodatka silicijske prašine. [1]

Svojstva betona	Povećanje	Smanjenje	Poboljšanje
Tlačna čvrstoća	+		
Vlačna čvrstoća	+		
Tlačni modul elastičnosti	+		
Vlačni modul elastičnosti	+		
Žilavost	+		
Sadržaj pora	+		
Otpornost na zamrzavanje			+
Otpornost na habanje			+
Prionjivost armature i betona			+
Otpornost na kemijske utjecaje			+
Otpornost armature na koroziju			+
Skupljanje od sušenja		+	
Puzanje		+	
Propusnost		+	
Toplinski koeficijent		+	
Toplinska provodljivost		+	
Izdvajanje vode		+	

Tablica 2.6. Utjecaj dodatka silicijske prašine na svojstva betona [1]

2.3.2 Metakaolin

Metakaolin je jedan od najučinkovitijih pucolanskih materijala za upotrebu u betonu. To je proizvod koji se proizvodi za upotrebu, a ne nastaje kao nusproizvod. Rafinirana je kaolinska glina koja se zagrije na temperaturu između 700 - 900 °C s ciljem proizvodnje amorfnog aluminijevog silikata koji reagira u betonu. Prvi put je korišten 1960-ih za izgradnju brojnih brana u Brazilu. [5] Kao i ostali pucolani, u betonu reagira s produktima kalcijevog hidroksida koji nastaju tijekom hidratacije cementa. Obično se upotrebljava u količini od 5 – 15 % u odnosu na masu cementa. U Tablici 2.7. prikazana su fizička svojstva metakaolina.

Veličina čestica	~ 10 μm
Specifična ploština	12000 – 30000 m^2/kg
Specifična gustoća	~ 2500 kg/m^3
Nasipna gustoća	~ 0,5 kg/m^3
Oblik zrna	uglast
Boja	bijela

Tablica 2.7. Fizička svojstva metakaolina [1]

Metakaolin pridonosi:

- povećanju čvrstoće,
- olakšavanju završne obrade,
- smanjenju eflorescencije,
- smanjenju mogućnosti pojave alkalnosilikatne reakcije,
- smanjenju vodoupojnosti,
- smanjenju deformacije skupljanja,
- zadržavanju boje betona, naročito kod bijelih betona. [1]

2.4 Utjecaj morske vode na beton

U morskom okruženju, beton je izložen raznim degradacijskim procesima, kao što su:

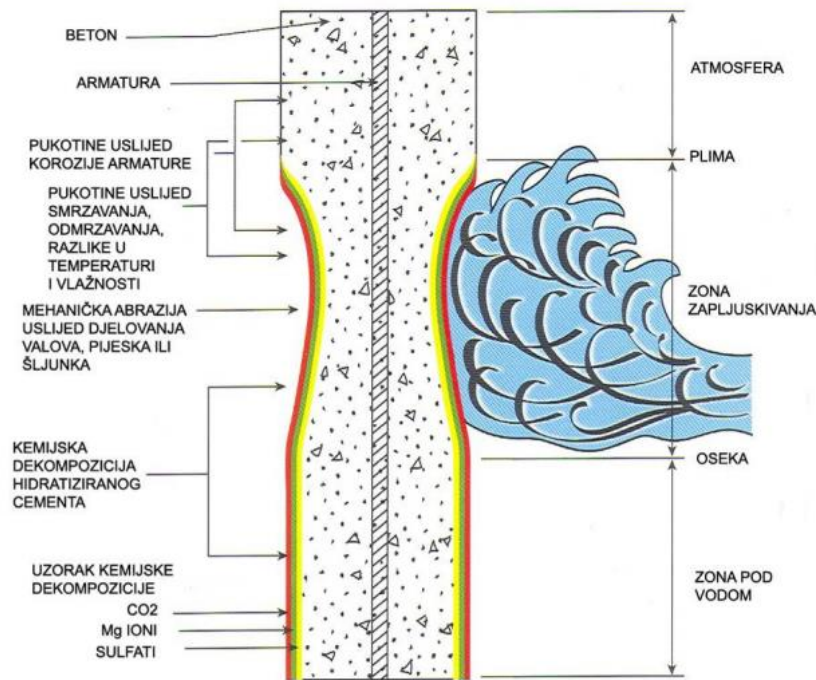
- kemijsko djelovanje morskih soli,
- sušenje i vlaženje u području zapljuskivanja i izmjene plime i oseke,
- abrazija od djelovanja valova i materijala nošenih valovima,
- djelovanje zamrzavanja i odmrzavanja (u nekim područjima).

Vrsta soli	Udio (%)
NaCl	77.1
MgCl	8.8
MgSO ₄	8.4
CaSO ₄	2.3
KCl	2.5
Ostalo	0.9

Tablica 2.8. Sastav soli u vodi Sredozemnog mora [3]

Primjer sastava soli u morskoj vodi Sredozemnog mora prikazan je u Tablici 2.7. U morskoj vodi prevladava NaCl koji kemijski ne reagira s betonom uronjenim u vodu. Morska voda bi trebala izazvati sulfatnu koroziju i razaranje betona zbog velikog postotka sulfata, ali zbog prisustva drugih soli, taj proces je usporen. Oštećenja koja će se dogoditi uslijed pojave korozije, zavise o kretanju morske vode uz beton, njegovim porama te o utjecaju zraka. Nastaju dva različita slučaja korozije betona, a ovise o tome je li beton stalno uronjen u more ili je beton iznad površine mora. Soli iz mora također utječu na alkalnoagregatne reakcije te na koroziju betona. Soli štetno djeluje na beton tako da stvara kristalizacijski pritisak prilikom taloženja u porama materijala i kemijskom reakcijom atoma metala i iona soli otopljenih u vodi. Soli mogu hidrolizom reagirati s vapnom i postepeno razarati vezivo, a novonastale soli voda zatim postepeno ispire.

Sulfatna korozija betona nastaje zbog prisustva MgSO₄ i CaSO₄ uz stvaranje etringita i sadre. Koncentracija NaCl u vodi je blizu granične vrijednosti, stoga nije moguće stvaranje novih spojeva te je cijeli proces usporen. Pri veoma usporenom procesu ne može doći do stvaranja potrebne količine kristala novih spojeva za nastanak kristalizacijskog pritiska. Ne dolazi do razaranja betona nego do postupnog popunjavanja pora kristalima, čime cijeli proces usporava i konačno se zaustavlja. Kako se proces zapunjavanja pora odvija brzo tako dolazi i do zaustavljanja izluživanja vapna. Zaključuje se da nema oštećenja dijelova betonskih konstrukcija koji se stalno nalaze ispod površine mora. Najveća oštećenja betonskih konstrukcija odvijaju se na dijelovima koji se izloženi stalnom vlaženju i sušenju, kao što prikazuje Slika 2.6.



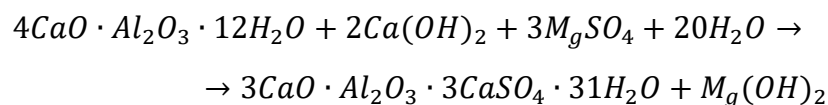
Slika 2.6. Mehanizmi prolaska tvari u različitim zonama izloženosti [1]

Gibanje mora nastaje zbog stalne izmjene plime i oseke te valova, koji uzrokuju stalne promjene pritiska vode na beton i naizmjenično ulaženje i izlaženje mora iz kapilarnih pora. U ovom području neizbježno je izluživanje vapna te je to početak razaranja betona. Na površinu betona, istodobno djeluje kišnica i CO_2 iz zraka koji uzrokuju karbonatnu koroziju i karbonatizaciju. Na konstrukcije najdublje prodire korozija izluživanja, pa sulfatna korozija, zatim karbonatna korozija te karbonatizacija. Razaranje kreće od srednjeg najnižeg nivoa oseke pa do srednje visine valova. U Jadranskom moru iznosi oko 1.0 m iznad srednjeg najvišeg nivoa plime, a amplituda plime i oseke ovisi o geografskom položaju. Također, nastaje i kapilarno dizanje morske vode pa u visokim betonskim konstrukcijama može doći do razaranja betona znatno iznad nivoa valova. Isti tip oštećenja mogu izazvati i kapljice morske vode koje su nošene vjetrom, stoga na područjima s jakim intenzitetom vjetra oštećenja nastaju i desetak metara iznad razine mora, a mogu doći i na udaljenost veću od stotinjak metara od obale. [3]

Sulfatna korozija

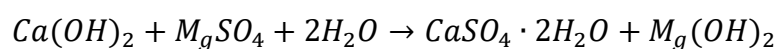
Sulfatne soli popunjavaju pore betona te reagiraju s cementnim hidratima, vežu na sebe vodu što dovodi do povećanja volumena i mehaničkog razaranja betona. Česti uzrok pojave sulfatne korozije nastaje zbog magnezijevog oksida koji se nalazi u sastavu morske vode. Moguća je

pojava dviju reakcija. Prvu reakciju omogućuje hidroaluminat iz cementnog kamena, uz prisustvo vapna:



Ovom reakcijom nastaje etringit koji ima više od 3 puta veći volumen od spojeva koji su ušli u proces, a razlog tome je velika količina vezane vode. Magnezijev oksid ostaje u porama betona jer se slabo otapa u vodi.

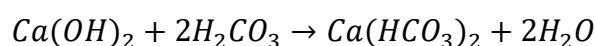
Istodobno nastaje i druga reakcija, kojoj je uzrok vapno iz betona:



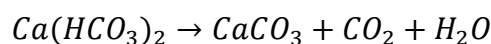
Nastala sadra je topiva u vodi te se može izlužiti iz betona ili reagirati s hidroaluminatom iz cementnog kamena pa stvara novi etringit. [3]

Karbonatna korozija

Karbonatna korozija je, zapravo, kiselinska korozija koja nastaje u prirodi. Kao u sulfatnoj koroziji, tako i u karbonatnoj nastaju dva slučaja. Prvi slučaj nastaje kada kišnica koja sadrži CO₂ otopljen u obliku ugljične kiseline, dođe u dodir s betonom.

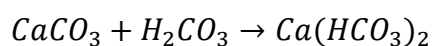


Kalcijev bikarbonat Ca(HCO₃)₂ nalazi se samo u otopini te ako se otopina procjeđuje kroz beton i izbije na površinu nastaje reakcija:

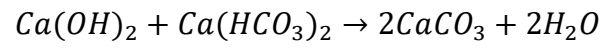


Ovom reakcijom nastaje CaCO₃ koji stvara bijele nakupine na površini betona koje jako nalikuju finom snijegu ili sigama. U ovim reakcijama voda iznosi vapno iz betona i nakon što se izluži većina vapna, ugljična kiselina reagira s cementnim hidratima.

Drugi slučaj karbonatne korozije pojavljuje se ako beton oplakuje voda koja dolazi iz terena karbonatnog porijekla. Ugljična kiselina koja se nalazi u kišnici će prvo reagirati s karbonatima što je prikazano sljedećom formulom:



Kada takva voda dođe u dodir s betonom, nastaje sljedeća reakcija s vapnom:



Reakcijom nastaje $CaCO_3$ koji kristalizira u porama te smanjuje propusnost betona. [3]

3 METODE ISPITIVANJA SVJEŽEG I OČVRSNULOG BETONA

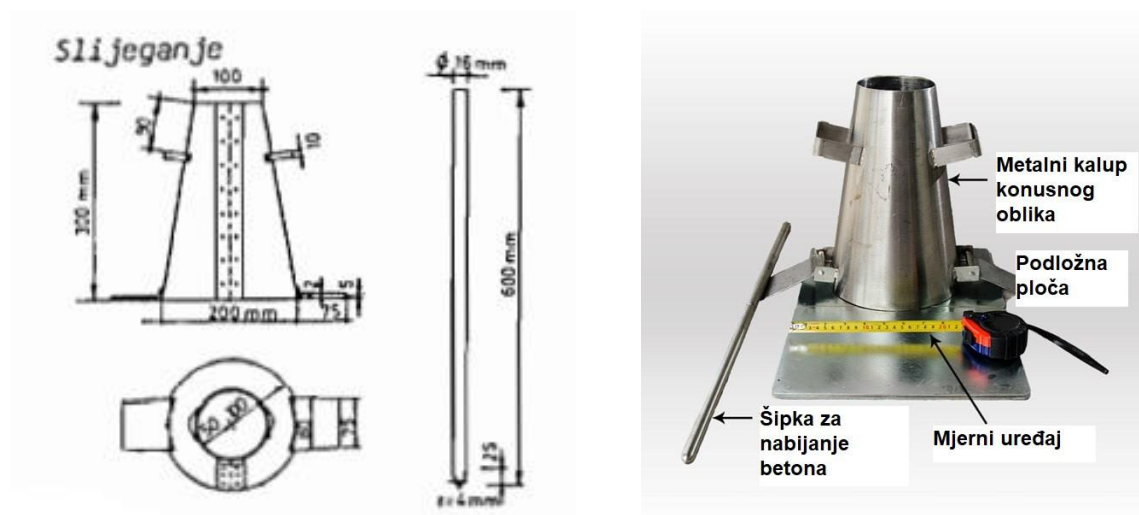
3.1 Metode ispitivanja svježeg betona

3.1.1 Metoda određivanja konzistencije slijeganja

Metoda konzistencije slijeganja provodi se po normi HRN EN 12350-2. Ispitivanje se provodi tako da se normirani kalup, oblika krnjeg stošca napuni betonom u tri nivoa. Na svakom nivou, beton se zbijaju čeličnom šipkom 25 puta. Kalup se tijekom punjenja treba čvrsto držati da ne dođe do izlivanja betona pri dnu. Zatim se kalup oprezno podigne i izmjeri se koliko se beton slegnuo. Razredi slijeganja betona su prikazani u Tablici 3.1. Slika 3.1. prikazuje potrebnu opremu za ispitivanje. [2]

Razred određen slijeganjem (mm)	
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

Tablica 3.1. Razredi slijeganja betona [1]



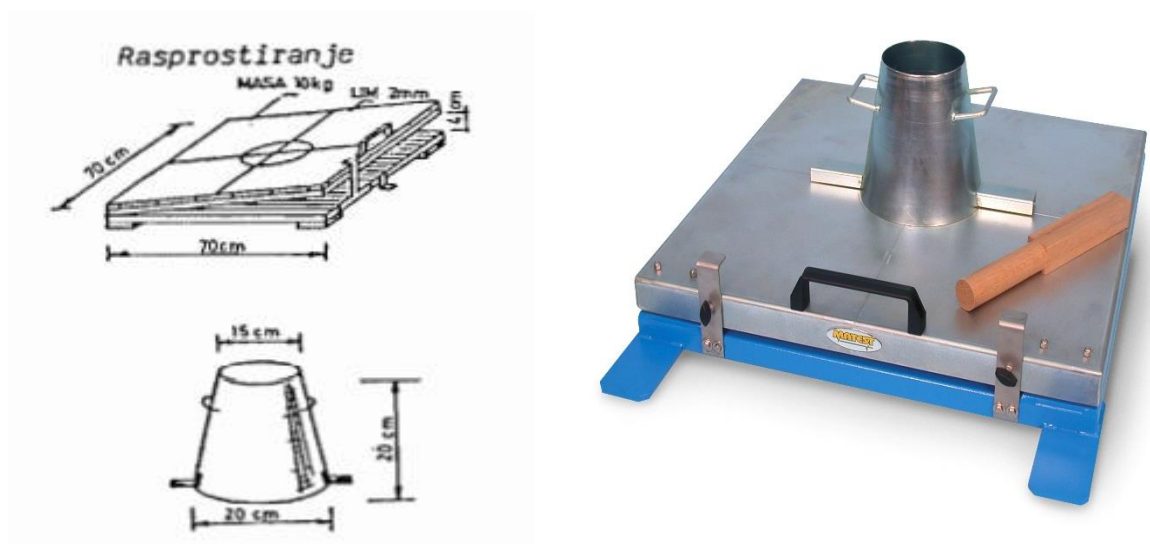
Slika 3.1. Oprema za ispitivanje slijeganja betona [2]

3.1.2 Metode određivanja konzistencije rasprostiranja

Metoda konzistencije rasprostiranja provodi se po normi HRN EN 12350-5. Za ispitivanje ove metode koristi se sličan kalup kao kod metode slijeganja, ali malo niži. Potrebno je koristiti podlogu, koja se može podići i spustiti. Kalup se, također, puni u 3 razine i lagano zbije. Nakon što se kalup napuni, pričekava se 30 sekunda i lagano se podigne. Zatim se podloga 15 puta podigne i spusti te se izmjeri promjer mješavine u dva smjera. Na slici 3.2. prikazana je oprema za provođenje ispitivanja, a u Tablici 3.2. prikazani su razredi rasprostiranja betona. [2]

Razred određen rasprostranjem (mm)	
F1	≤ 340
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	≥ 630

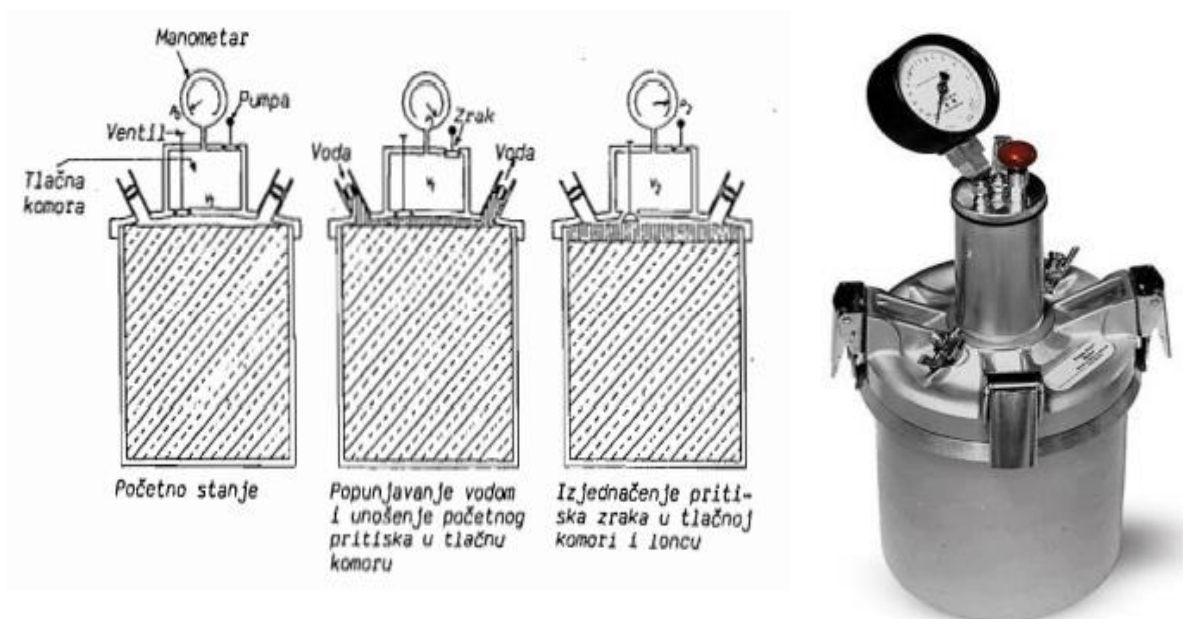
Tablica 3.2. Razredi rasprostiranja betona [1]



Slika 3.2. Oprema za ispitivanje rasprostiranja betona [2]

3.1.3 Ispitivanje količine zraka u svježem betonu

Za ispitivanje količine zraka u svježem betonu koristi se norma HRN EN 12350-7. Mjeri se porometrom (Slika 3.3.), koji se zasniva na principu Boyle – Mariotteovom zakonu. Mješavina se ugradi u lonac čiji je volumen 8 litara za normalne betone. Lonac se poklopi, a međuprostor između uzorka betona i komore na poklopcu popuni vodom. Pomoću pumpe se u tlačnoj komori na poklopcu poveća tlak zraka. Otvaranjem ventila prema loncu izjednači se tlak u komori i u loncu u kojem je jedini stlačivi dio pore zraka u betonu. [2]



Slika 3.3. Porometar za ispitivanje pora u svježem betonu [2]

3.2 Metode ispitivanja očvrnulog betona

3.2.1 Ispitivanje tlačne čvrstoće

Za ispitivanje tlačne čvrstoće betona koristi se norma HRN EN 12390-3. Ispitivanje se provodi u preši u koju se stavljaju ispitni uzorci kocke dimenzija 150x150x150 mm ili uzorci valjka promjera baze 150 i visine 300 mm. Uzorci se čuvaju 28 dana u uvjetima od 95 % vlažnosti ili u vodi i na temperaturi 20 ± 3 °C. Nakon toga se lome i određuje se njihova tlačna čvrstoća. Tlačna čvrstoća se može izračunati preko sljedeće formule:

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

gdje je:

F = maksimalna sila pri lomu,

A_c = površina uzorka na koju djeluje sila.



Slika 3.4. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće betona

3.2.2 Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa

Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa provodi se po normi HRN EN 12504-4. Uređaj se sastoji od generatora električnih impulsa, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja koji mjeri vrijeme između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač. Ispitivanje se provodi tako da se pretvarači postave na glatku površinu uzorka i očitaju se brzine valova na tri mjesta na površini betona. Prednost ove metode je što je nerazorna, brza i daje podatke o svojstvu betona po dubini. Pomoću nje se mogu odrediti dimenzije pukotina i segregacija. Ultrazvučnim impulsom se može odrediti dinamički modul elastičnosti betona pomoću sljedeće formule:

$$E_{bd} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

gdje je:

E_{bd} = dinamički modul elastičnosti (GPa),

v = brzina ultrazvučnog vala izmjerena izravnim prolazom (km/s),

ρ = gustoća betona (kg/m^3),

μ = Poissonov koeficijent. [2]



Slika 3.5. Uređaj za ispitivanje brzine ultrazvučnih valova

Brzina ultrazvučnog vala (m/s)	Kvaliteta betona
< 1600	Vrlo slab
1600 – 2000	Slab
2000 – 2800	Zadovoljavajući
2800 – 3600	Dobar
3600 - 4400	Vrlo kvalitetan

Tablica 3.3. Ocjena kvalitete betona s obzirom na brzinu ultrazvučnog vala [6]

3.2.3 Ispitivanje vodonepropusnosti

Ova metoda služi za određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom u očvrnulom betonu. Ispitni uzorak mora biti dimenzija 150x150x150 mm. Nakon što se uzorak izvadi iz kalupa, potrebno je izbrusiti površinu koja će biti izložena pritisku vode. Ispitivanje može započeti kada uzorak bude star najmanje 28 dana. Uzorak se stavlja u uređaj pod pritiskom vode od 500 ± 50 kPa na 72 ± 2 h. Nepropusnost se osigurava gumenim brtvilom, a voda se utiskuje s donje

strane. Nakon 72 h, uzorak se izvadi iz uređaja i pobriše se višak vode. Zatim se uzorak cijepa na pola u preši, okomito na površinu na koju je primijenjen pritisak vode. Prilikom cijepanja uzorka i tijekom pregleda staviti površinu uzorka izloženu pritisku vode na dno. Na kraju se izmjeri i označi maksimalna dubina prodiranja vode i zabilježi na najbliži milimetar. U Tablici 3.4. prikazani su razredi vodonepropusnosti. [7]

Razred vodonepropusnosti	Dopušteni najveći prodor vode (mm)
VDP 1	50
VDP 2	30
VDP 3	15

Tablica 3.4. Razredi vodonepropusnosti [8]



Slika 3.6. Uređaj za ispitivanje vodonepropusnosti

3.2.4 Ispitivanje plinopropusnosti

Plinovi pod djelovanjem vanjskog tlaka prolaze kroz sustav pora i mikropukotina u betonu. Ova metoda ispituje se prema preporukama Cembureau (RILEM TC 116 - PCD). Ispitivanje se provodi mjerenjem protoka plina na izlazu iz uzorka i na temelju dobivenih rezultata izračuna se koeficijent propusnosti. Provodi se u prostoriji s kontroliranom temperaturom od $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Koriste se ispitni uzorci oblika diska debljine $50\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ i promjera $150\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$.

Potrebno je izmjeriti i zapisati promjere ispitnih uzoraka na četiri pozicije s preciznošću od 0,1 mm. Promjer D je srednja vrijednost četiri izmjenjenih vrijednosti. Zatim se ispitni uzorak postavi u ćeliju i sastavi uređaj. Postavi se minimalni pritisak od 7 bara (0,70 MPa) na gumu cijevi. Slika 3.7. prikazuje uređaj za ispitivanje plinopropusnosti. [9]



Slika 3.7. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti

Na svakom uzorku, mjerenje se provodi tri puta pod različitim tlakom. Prvo se podesi tlak od 150 kPa, zatim se tlak poveća na 200 kPa i na kraju na 300 kPa. Mjerenje se započne kada mjehurić dođe do najniže oznake na kalibriranoj cijevi, a završava kada dođe do najviše oznake. Mjerenje se ponovi tri puta za svaki tlak, svi rezultati se zapišu i izračuna se srednja vrijednost. Mjerni volumen odredi se tako da vrijeme prolaska mjehurića u cijevi bude između 20 s i 60 s. Uređaj se sastoji od tri cijevi volumena 100 ml, 25 ml i 10 ml.



Slika 3.8. Mjehurić u kalibriranoj cijevi



Slika 3.9. Uređaj i ispitni uzorak za ispitivanje plinopropusnosti

Nakon dobivenih podataka, koeficijent propusnosti K izračuna se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$K = \frac{2p_0 Q \eta L}{A(p^2 - p_0^2)}$$

gdje je:

K - koeficijent plinopropusnosti (m^2)

Q - protok plina (m^3/s)

η - viskoznost plina = $2,02 \cdot 10^{-5}$ (Pa/s)

L - debljina uzorka (m)

A - presjek uzorka (m^2)

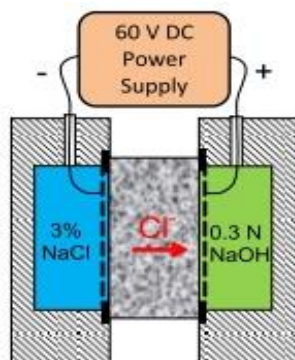
p - ulazni pritisak (Pa)

p_a - izlazni pritisak (Pa)

p_0 – mjerni pritisak (Pa) [10]

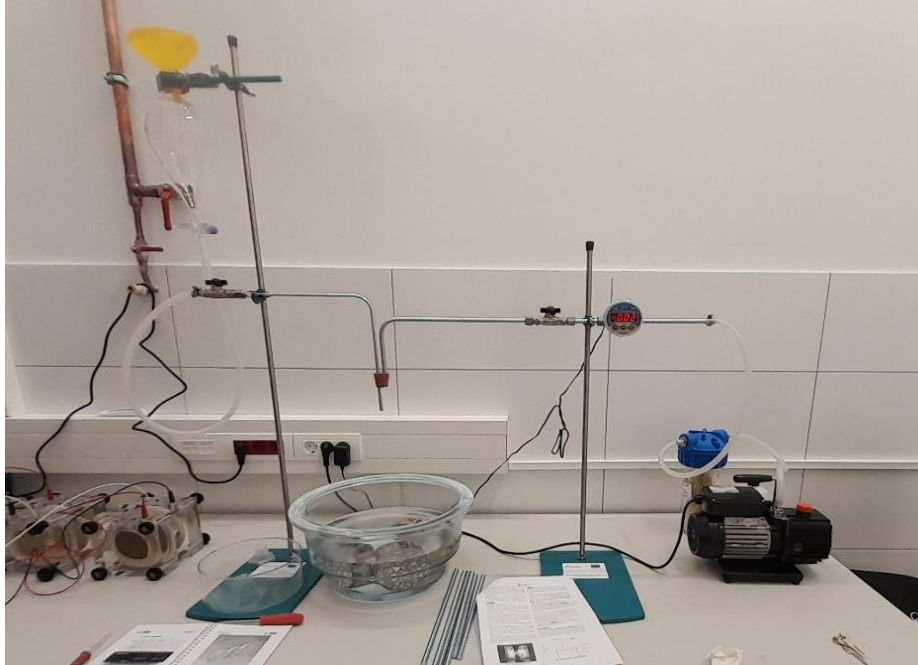
3.2.5 Metoda ispitivanja migracije klorida kroz betona – RCPT C1202

Ova metoda obuhvaća laboratorijsku procjenu električne vodljivosti betonskih uzoraka kako bi se dokazala njihova otpornost na prodiranje kloridnih iona. U ovom ispitivanju, potrebni su betonski uzorci zasićeni vodom, promjera 100 mm i debljine 50 mm. Betonski uzorci postavljaju se u ispitnu ćeliju koja sadrži spremnike tekućina na oba kraja. Jedan spremnik se puni s 3% otopinom NaCl (natrijev klorid), a drugi spremnik 0,3N otopinom NaOH (natrijev hidroksid). Prati se količina električne struje koja prođe kroz uzorak tijekom 6 sati. Potrebno je bilježiti struju najmanje svakih 30 min. Na ćeliju se primjenjuje električni potencijal od 60 V. Negativni potencijal spojen je na elektrodu u otopini NaCl, a pozitivni je spojen na elektrodu u otopini NaOH. Negativno nabijeni ioni će se kretati kroz uzorak prema pozitivnom terminalu što će rezultirati strujom. Ukupni pređeni naboj u kulonima određuje otpornost uzorka na prodiranje kloridnih iona. Što je beton propusniji, to će više iona prolaziti kroz uzorak i izmjerit će se veća struja. Starost uzorka ima značajan utjecaj na rezultate ispitivanja, a također i vrsta i njega betona. Većina betona postaju s vremenom manje propusna. [10]



Slika 3.10. Prikaz ispitnog uzorka između naponskih ćelija [11]

Prije početka ispitivanja potrebno je vakuumski zasititi uzorke. Na slici 3.11. prikazan je uređaj za vakumiranje ispitnih uzoraka.



Slika 3.11. Uređaj za vakumiranje uzoraka



Slika 3.12. Vakimirani ispitni uzorci

Materijali i uređaji koji se koriste za ovo ispitivanje su: brtvilo za ćelije uzoraka, otopina natrijevog klorida (3,0 % masenog udjela u destiliranoj vodi), otopina natrijevog hidroksida (0,3 N u destiliranoj vodi), naponska ćelija, uređaj za mjerenje temperature, uređaj za primjenu napona i očitavanje podataka, kabel (dva izolirana vodiča, 600 V).

Tijekom ispitivanja, temperatura zraka oko uzoraka mora se održavati u rasponu od 20 do 25 °C. Ako je struja zabilježena na 30 min u intervalima, može se koristiti sljedeća formula:

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

gdje je:

Q = preneseni naboj (C),

I_0 = struja (A) neposredno nakon primjene napona,

T_0 = struja (A) u t min nakon primjene napona.

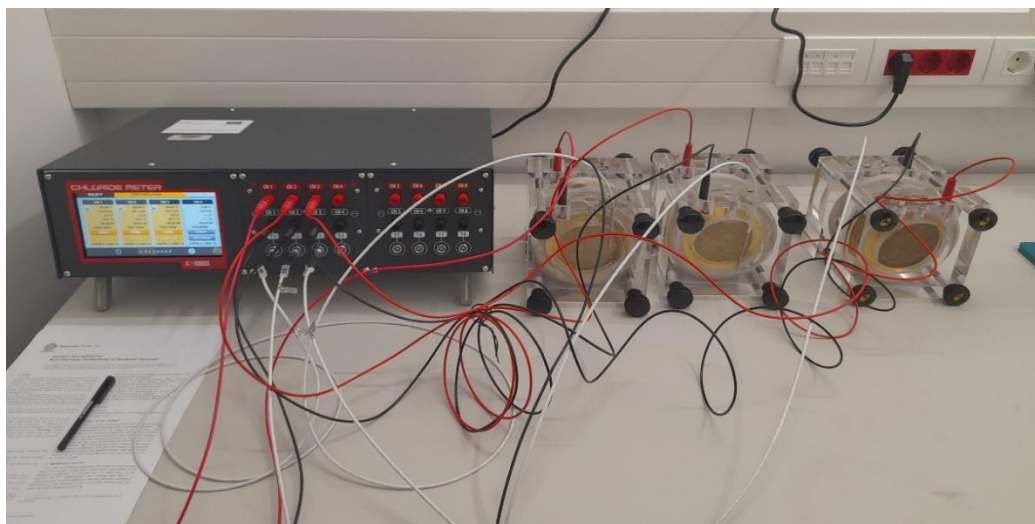
Nakon provedenog ispitivanja potrebno je dobiti krivulju s podacima i integrirati područje ispod krivulje kako bi se dobio naboj (kulon) koji je prošao tijekom 6-satnog ispitnog razdoblja. Ukupni pređeni naboj je mjera za električnu vodljivost betona tijekom razdoblja testa.

Na temelju izmjerenih vrijednosti uzorci betona se klasificiraju pomoću sljedeće tablice:

Kuloni (C)	Klasa propusnosti	Tipično
> 4000	Visoka	w/c > 0,5
4000 - 2000	Umjerena	w/c = 0.4 do 0.5
2000 - 1000	Niska	w/c < 0.4
1000 - 100	Vrlo niska	Beton modificiran lateksom
< 100	Neznatna	Polimer beton

Tablica 3.5. Klase propusnosti betona [10]

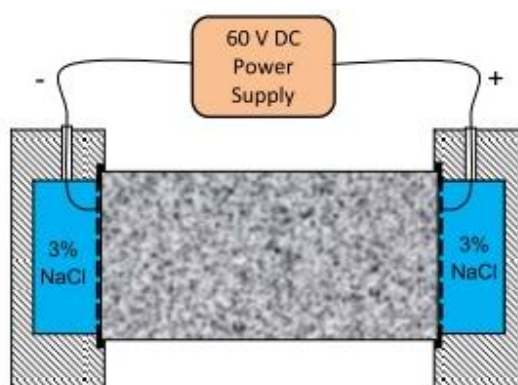
Čimbenici koji utječu na prodiranje kloridnih iona su: omjer vodocementnog faktora, vrsta i količina cementnih materijala, prisutnost polimernih dodataka, starost uzorka, šupljine, tip agregata, stupanj konsolidacije i vrsta njege betona. [10]



Slika 3.13. Uređaj za ispitivanje uzoraka na kloride

3.2.6 Metoda ispitivanja migracije klorida kroz beton - ASTM C1760

Ova metoda obuhvaća određivanje količine električne vodljivosti zasićenih uzoraka betona. Kao i u prošloj metodi promatra se otpornost betona na prodiranje kloridnih iona. Mjeri se koliko je električne struje prošlo kroz zasićeni betonski uzorak. Na krajevima uzorka je potencijal razlike od 60 V. Ispitni uzorci mogu biti cilindri promjera 100 mm i duljine 200 mm. Uzorci se postavljaju u ispitnu ćeliju i oba spremnika se napune sa 3% otopine NaCl (natrijev klorid). Struja se mjeri 1 minutu nakon prve primjene napona. Izmjerena struja, primijenjeni napon i dimenzije uzorka koriste se za izračun ukupne električne vodljivosti betona. Uzorci moraju biti dovoljno zasićeni za mjerenje električne vodljivosti. [12]



Slika 3.14. Prikaz ispitnog uzorka između naponskih ćelija [11]

Tijekom mjerenja temperature okoline i temperature uzorka i aparata moraju biti unutar raspona od 20 do 25 °C. Prisutnost armaturnog čelika u uzorku može dati nereprezentativne rezultate jer armatura povećava vodljivost, stoga test ne vrijedi za uzorke koji sadrže armaturni čelik.

Potrebni uređaji za ispitivanje su: naponske ćelije, uređaj za primjenu napona i očitavanje podataka. Materijali koji se koriste su: otopina natrijevog klorida (3,0 % masenog udjela u destiliranoj vodi), brtvilo za ćelije uzorka.

Ukupna električna vodljivost izračunava se pomoću jednadžbe :

$$\sigma = K \frac{I_1 L}{V D^2}$$

gdje je:

σ = električna vodljivost, (mS/m);

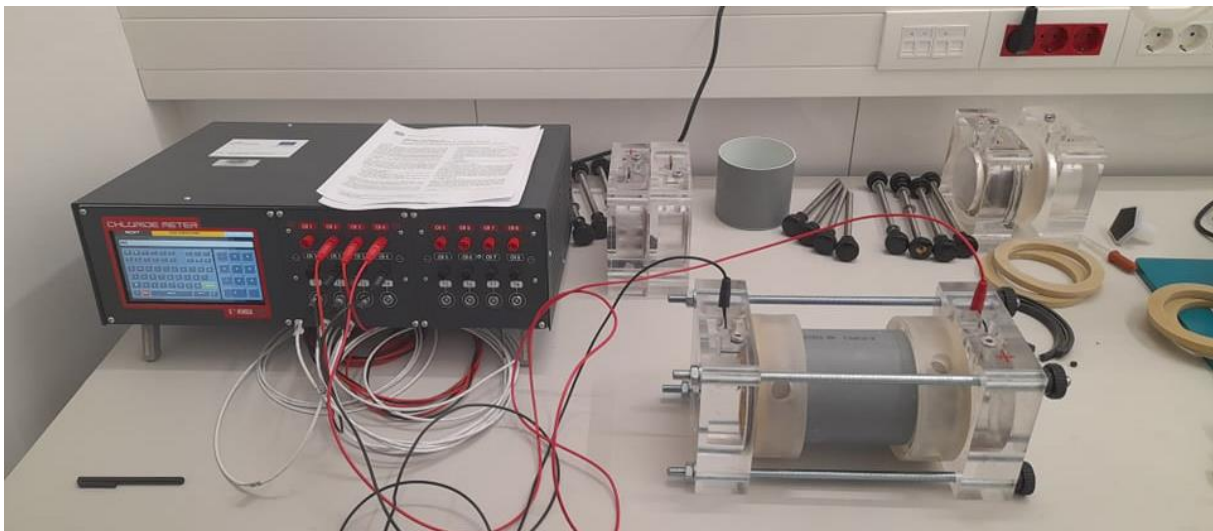
I_1 = struja u 1 min, (mA);

V = primijenjeni napon, (V);

L = prosječna duljina uzorka, (mm);

D = prosječni promjer uzorka, (mm);

K = faktor konverzije = 1273,2. [12]



Slika 3.15. Uređaj za ispitivanje uzoraka na kloride

4 EKSPERIMENTALNI DIO RADA

Cilj ovog rada je istražiti utjecaj mineralnih dodataka, silicijske prašine i metakaolina, na svojstva betona koji će se upotrebljavati u morskom okolišu, stoga su se za projektiranje sastava betona koristile preporuke po normi.

4.1 Odabir komponenti

Odabir komponenti betona provodi se preko uvjeta čvrstoće, trajnosti te obradivosti.

Uvjet trajnosti

Razred izloženosti je XS, što odgovara okolišu u kojem je korozija uzrokovana kloridima iz morske vode kako je prikazano u Tablici 2.4. u poglavlju Projektiranje sastava betona, podnaslov Trajnost betona. Tablica prikazuje preporučene vrijednosti koje se zahtijevaju pri projektiranju, a to su: najmanji razred tlačne čvrstoće betona, minimalni zaštitni sloj, maksimalni v/c omjer te minimalna količina cementa.

Opis okoliša: U zonama plime i prskanja vode

Razred izloženosti	Max. W/C omjer	Min. razred tlačne čvrstoće	Min. količina cementa (kg/m ³)	Min. zaštitni sloj c_{min} (mm)	Drugi zahtjevi
XS3	0.45	C 35/45	340	55	-

Tablica 4.1. Preporučene vrijednosti za razred izloženosti XS3

Uvjet čvrstoće

Zadana je klasa betona: C35/45

Uvjet: $f_{cm} > f_{ck} + (6 \text{ do } 12)$

$$f_{cm} > 45 + 8 = 53 \text{ N/mm}^2$$

Uvjet obradivosti

Odabrani razred konzistencije svježeg betona: S2

- za drobljeni agregat, granulometrijsku krivulju B16 i razred konzistencije S2 očitano je: količina vode potrebna za 1m^3 betona je 185 lit.

LITARA VODE ZA 1m^3 SVJEŽEG BETONA						
Granična linija	Drobljeni agregat			Riječni agregat		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
A 63	120	145	160	95	125	140
A 32	130	155	175	105	135	150
A 16	140	170	190	120	155	175
A 8	155	190	210	150	185	205
B 63	135	160	180	115	145	165
B 32	140	175	195	130	165	185
B 16	150	185	205	140	180	200
B 8	175	205	225	170	200	220
C 63	145	180	200	135	175	190
C 32	165	200	220	160	195	215
C 16	185	215	235	175	205	225
C 8	200	230	250	185	215	235

Tablica 4.2. Približna količina vode za 1 m^3 Betona u ovisnosti D_{max} i konzistencije slijeganjem

4.2 Materijali

Za izradu ispitnih mješavina upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- portland cement CEM I 42,5 R,
- voda (iz vodovoda),
- drobljeni agregat iz kamenoloma "Plano", frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm,
- aditiv Glenium Sky 658 (1% na masu cementa),
- silicijska prašina,
- metakaolin.

4.2.1 Cement

Za izradu ispitnih uzoraka korišten je portland cement CEM I 42,5 R, s udjelom 95 – 100 % klinkera. Certificiran je prema zahtjevima HRN EN 197-1, HRN EN 197-2, BAS EN 197-1 i BAS EN 197-2. Cement je hidraulično vezivo koji u doticaju s vodom tvori pastu. Hidratacijskim reakcijama i procesima, pasta se vezuje i nakon očvrnuća zadržava čvrstoću i

stabilnost. Osobito je prikladan za betoniranje pri niskim temperaturama, za izgradnju objekata koji zahtijevaju brzo skidanje oplata, za izradu vodonepropusnih betona, za otpornost betona na mraz i soli.

Karakteristike cementa CEM I 42,5 R su:

- vrlo visoka rana i konačna čvrstoća,
- kratak period početka vezivanja,
- optimalna obradivost,
- znatan razvoj topline hidratacije. [13]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	2,5 ± 0,5 %	≤ 5,0
Netopivi ostatak	0,2 ± 0,10 %	≤ 5,0
% SO ₃	3,0 ± 0,2 %	≤ 4,0
Kloridi	0,01 %	≤ 0,10
Postojanost volumena (Le Chatelier)	1 mm	≤ 10,0
Vrijeme vezivanja* (početak)	180 ± 25 min	≥ 60
Rana čvrstoća** (2 dana)	30 MPa	≥ 20
Normirana čvrstoća** (28 dana)	54 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5;
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) +gips (G)	95-100%	95-100
Sporedni sastojci	0-5%	0-5

*pri temperaturi od 20 °C

**odstupanja u okviru std. devijacije ≤ 2

Tablica 4.3. Svojstva cementa CEM I 42,5 R [13]

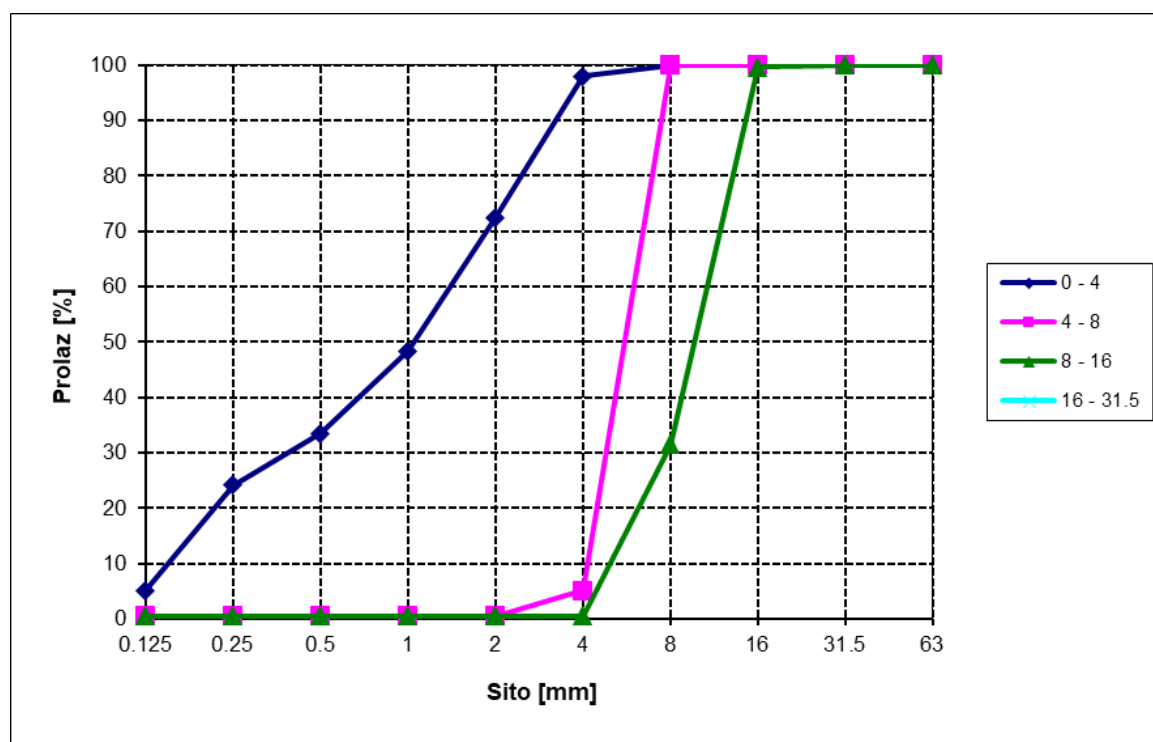
4.2.2 Agregat

Za pripremu mješavina korišten je drobljeni agregat frakcija 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm, iz kamenoloma Plano. Agregat je u laboratoriju prosijan te su dobiveni prolazi na sitima prikazani u Tablici 4.4., a slika 4.1. prikazuje granulometrijske krivulje po frakcijama. U tablici

4.5. proračunata je granulacija agregata u postotcima te je dobivena kumulativna krivulja (Slika 4.2.) koja odgovara Fuller-ovoj krivulji B16.

Sito [mm]	Frakcija 0 - 4 mm			Frakcija 4 - 8 mm			Frakcija 8 - 16 mm		
	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]	Ostatak [g]	Prolaz [g]	Prolaz [%]
63	0,0	836,7	100,0%	0,0	1848,4	100,0%	0,0	2871,9	100,0%
31,5	0,0	836,7	100,0%	0,0	1848,4	100,0%	0,0	2871,9	100,0%
16	0,0	836,7	100,0%	0,0	1848,4	100,0%	10,2	2861,7	99,6%
8	0,0	836,7	100,0%	0,0	1848,4	100,0%	1957,1	904,6	31,5%
4	16,8	819,9	98,0%	1752,0	96,4	5,2%	889,6	15,0	0,5%
2	214,4	605,5	72,4%	85,5	10,9	0,6%	0,0	15,0	0,5%
1	200,9	404,6	48,4%	0,0	10,9	0,6%	0,0	15,0	0,5%
0,5	124,2	280,4	33,5%	0,0	10,9	0,6%	0,0	15,0	0,5%
0,25	78,0	202,4	24,2%	0,0	10,9	0,6%	0,0	15,0	0,5%
0,125	158,7	43,7	5,2%	0,0	10,9	0,6%	0,0	15,0	0,5%
Tava	43,7			10,9			15,0		
Ukupno	836,7			1848,4			2871,9		
Početno	850,7			1852,5			2873,2		

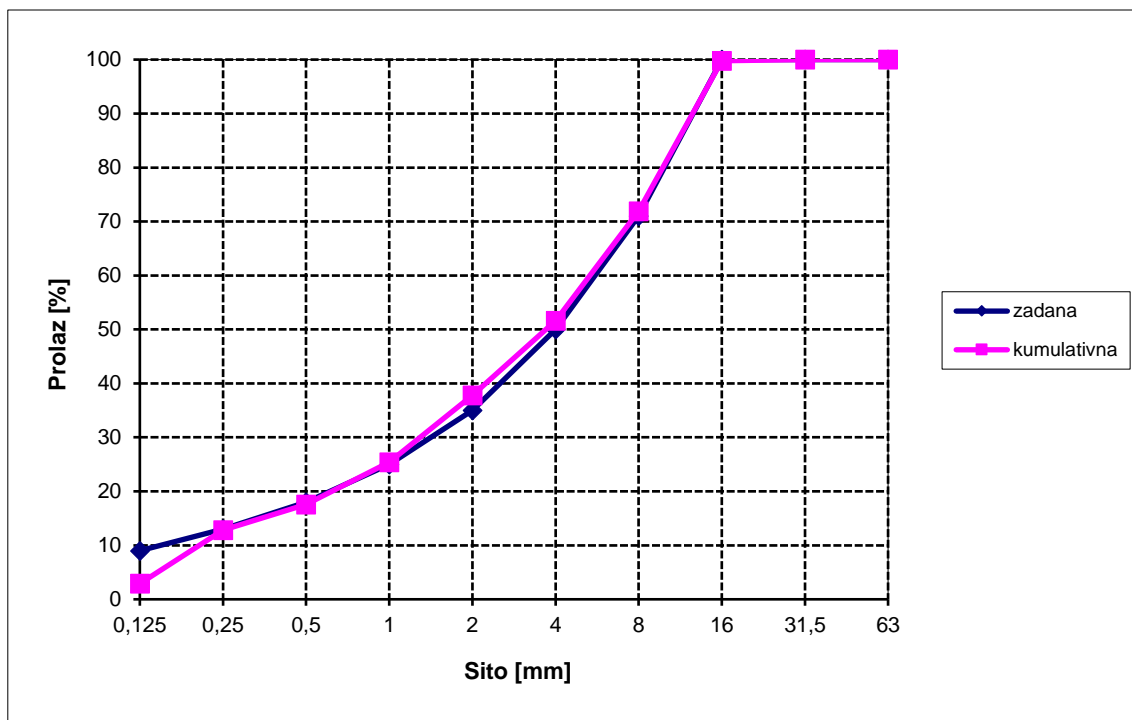
Tablica 4.4. Granulometrija agregata



Slika 4.1. Granulometrijska krivulja frakcija agregata

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
1	0 - 4	5.2	24.2	33.5	48.4	72.4	98	100	100	100	100
2	4 - 8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	5.2	100	100	100	100
3	8 - 16	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	31.5	99.6	100	100
4	16 - 31.5										
Frak.br.	%	PRORAČUNATA GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
1	50	2.6	12.1	16.8	24.2	36.2	49	50	50	50	50
2	21	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1	21	21	21	21
3	29	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	9.1	28.9	29	29
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UKUPNO		2.8	12.3	17	24.4	36.4	50.2	80.1	99.9	100	100
RAZLIKA		-6.2	-0.7	-1	-0.6	1.4	0.2	9.1	-0.1	0	0
1	52	2.7	12.6	17.4	25.2	37.6	51	52	52	52	52
2	10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	10	10	10	10
3	38	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	12	37.8	38	38
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UKUPNO		3	12.9	17.7	25.5	37.9	51.7	74	99.8	100	100
RAZLIKA		-6	-0.1	-0.3	0.5	2.9	1.7	3	-0.2	0	0
1	52	2.7	12.6	17.4	25.2	37.6	51	52	52	52	52
2	7	0	0	0	0	0	0.4	7	7	7	7
3	41	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	12.9	40.8	41	41
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
UKUPNO		2.9	12.8	17.6	25.4	37.8	51.6	71.9	99.8	100	100
RAZLIKA		-6.1	-0.2	-0.4	0.4	2.8	1.6	0.9	-0.2	0	0
Idealna krivulja: Fuller											
		9	13	18	25	35	50	71	100	100	100

Tablica 4.5. Iterativni proračun granulometrijske krivulje agregata



Slika 4.2. Kumulativna krivulja

4.2.3 Aditiv

Upotrijebljen aditiv za pripremu ispitnih uzoraka je MasterGlenium Sky 658 koji se dodaje 1 % na masu cementa. Ovo je superplastifikator s umjerenim učinkom plastificiranja te vrlo dobre konzistencije. Neke od prednosti su: mogućnost velike uštede vode, optimiziran sadržaj veziva, mali gubitak konzistencije svježeg betona, visoka rana i konačna čvrstoća betona. MasterGlenium Sky 658 dodaje se mješavini nakraju dodavanja izmiješane vode, a minimalno vrijeme miješanja je 1 minuta.

PODACI O PROIZVODU	
Oblik	tekućina
Boja	smeđa
Gustoća	1,05 g/cm ³ ± 0,02 na 20 °C
PH vrijednost	5,5 ± 1,0

Tablica 4.6. Podaci o proizvodu MasterGlenium Sky 658

4.2.4 Silicijska prašina

Vrsta silicijske prašine koja se upotrebljavala u izradi mješavina je MEYCO MS 610. Silicijska prašina primjenjuje se za betone pod vodom, betone visoke otpornosti, u betonima s niskom dozom cementa, injektiranje tunela. Neke od prednosti upotrebe silicijske prašine su: omogućuje veću otpornost u bilo kojoj vrsti betona, povećava izdržljivost protiv mehaničkih i kemijskih razaranja, povećava vodonepropusnost betona, sprječava ispuštanje vode i segregaciju u svježem stanju te smanjuje propusnost klorida. U Tablici 4.7. prikazana su svojstva silicijske prašine MEYCO MS10 te je jedan od važnijih svojstva finoća mliva.

Boja	Siva
Gustoća	0,55 – 0,70 kg/l
Količina klora (EN 480-10)	< 0,1 %
Finoća	> 15000 m ² /kg
SiO ₂	> 85 %
CaO	< 1 %
SO ₃	< 2 %
0,045 < omjer čestica	< 40 %
Indeks aktivnosti	> 95 %
Specifična težina	2300 kg/m ³

Tablica 4.7. Svojstva silicijske prašine MEYCO MS 610

4.2.5 Metakaolin

Metakaolin MetaverTM N ima mnoge prednosti u betonskim konstrukcijama koje zahtijevaju visoku čvrstoću, gustoću i otpornost. Njegove kemijske i fizikalne karakteristike su prikazane u Tablici 4.8.

KEMIJSKE KARAKTERISTIKE	
SiO ₂	52-54 %
Al ₂ O ₃	41-44 %
Fe ₂ O ₃	< 1,5 %
TiO ₂	< 1,0 %
CaO	< 0,5 %
MgO	< 0,4 %
Na ₂ O	< 0,1 %
K ₂ O	< 2,0 %

FIZIKALNE KARAKTERISTIKE	
Boja	Bijela
Gustoća	2,6 g/cm ³
Raspodjela veličine čestica	
d ₅₀	~ 3,4-4,5 μm
D ₉₅	~ 12-18 μm
Finoća	> 22000 cm ² /g

Tablica 4.8. Svojstva metakaolina MetaverTM N

4.3 Priprema mješavina

U laboratoriju je pripremljeno pet različitih mješavina. Prva mješavina je standardni etalon, dvije mješavine sadrže metakaolin, a preostale dvije silicijsku prašinu. Zamjenom dijela cementa mineralnim dodatcima smanjuje se količina ekološki neprihvatljivog klinkera.. Svi sastojci trebaju biti precizno izvagani. Za potrebe ovog ispitivanja predviđeno je da su potrebne količine betona za ispitivanje u svježem i očvrslulom stanju jedne mješavine 23,0 l. Nakon završetka miješanja, svježi beton se ugrađuje u kalupe uz vibriranje. Vibriranje se provodi kako bi se beton zbio i da se izbac i višak zahvaćenog zraka. Korišteni su kalupi dimenzija kocke 150x150x150 mm, valjci 100x200 mm te valjak 150x300 mm. Nakon 24 h od miješanja, uzorci se trebaju razdvojiti iz kalupa, a sve kalupe očistiti i nauljiti kako bi bili spremni za iduće ispitivanje. Uzorci se zatim stavljaju u vlažnu komoru.

Kod proračuna receptura, korišten je koncept k-vrijednosti. Za recepture sa silicijskom prašinom i metakaolinom uzeto je $k = 2$.

$$W/B = M_w / (M_c + k \cdot M_{\text{dodataka}})$$

Tablica 4.9. prikazuje količinu mineralnih dodataka u svakom uzorku.

Dodatak	Oznaka
Etalon	E
5 % silicijske prašine	S5
10 % silicijske prašine	S10
5 % metakaolina	M5
10 % metakaolina	M10

Tablica 4.9. Oznake ispitnih uzoraka

Sve recepture prikazane su u Tablici 4.10., a sve recepture su detaljno prikazane u prilogima.

za 1 m ³								
Mješavine	Cement	Voda	W/B	Agregat	Aditiv	Zrak	Silicijska prašina	Metakaolin
E	380 kg	171 kg	0.45	1844 kg	3.8 kg	2.0 %	-	-
S5	361 kg	180 kg	0.45	1758 kg	3.8 kg	2.0 %	19.0 kg	-
S10	342 kg	188 kg	0.45	1673 kg	3.8 kg	2.0 %	37.96 kg	-
M5	361 kg	180 kg	0.45	1790 kg	3.8 kg	3.0 %	-	19.0 kg
M10	342 kg	188 kg	0.45	1764 kg	3.8 kg	3.0 %	-	38.0 kg

Tablica 4.10. Recepture mješavina za 1 m³ betona

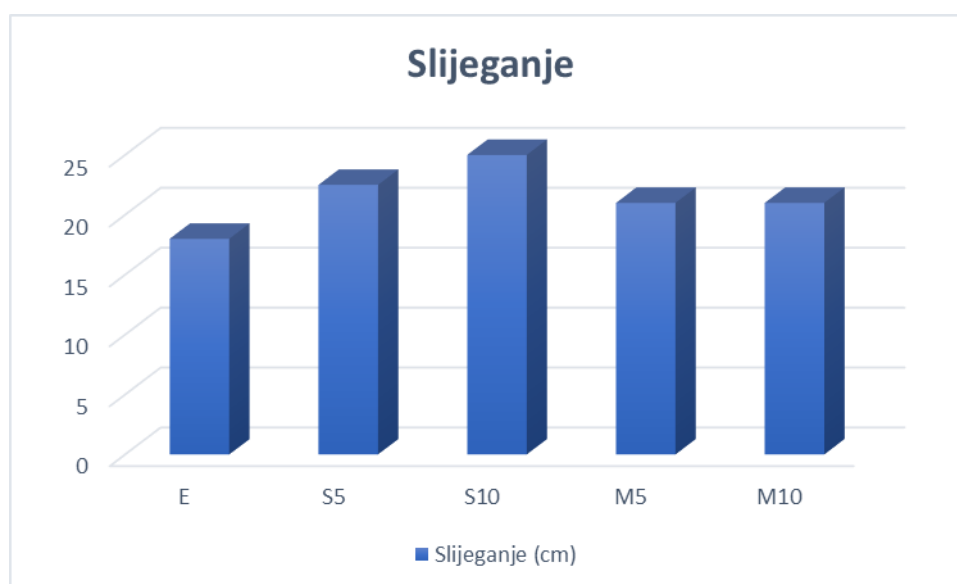
4.4 Rezultati ispitivanja svježeg betona

4.4.1 Rezultati ispitivanja konzistencije slijeganja

U Tablici 4.11. prikazani su rezultati rasprostiranja slijeganjem.

Mješavina	Mineralni dodaci (%)	Slijeganje (cm)	Razred
E	0	18	S4
S5	5	22.5	S5
S10	10	25	S5
M5	5	21	S4
M10	10	21	S4

Tablica 4.11. Rezultati rasprostiranja slijeganjem



Slika 4.3. Rezultati rasprostiranja slijeganjem

Najveće slijeganje imaju mješavine S5 i S10 koje spadaju pod razred S5, a ostalo mješavine E, M5 te M10 spadaju u razred S4. Iz rezultata je vidljivo da se dodavanjem mineralnih dodataka mješavini povećava slijeganje te je silicijska prašina imala veće djelovanje od metakaolina.



a) E



b) S5



c) S10



d) M5



e) M10

Slika 4.4. Ispitivanje slijeganja mješavina

4.4.2 Rezultati ispitivanja konzistencije razastiranja

U Tablici 4.12. prikazani su rezultati konzistencije razastiranja. Kao i u prethodnom ispitivanju, mješavine S5 i S10 imaju najveće razastiranje, dok najmanje ima etalonska mješavina. Upotrebom mineralnih dodataka povećala se obradivost betona, te je silicijska prašina imala veći utjecaj od metakaolina. Slika 4.5. grafički prikazuje dobivene rezultate razastiranja, a Slike 4.6. prikazuju pripremljene mješavine u laboratoriju.

Mješavina	Dodatak - mineralni dodaci (%)	Promjer 1 (cm)	Promjer 2 (cm)	Srednja vrijednost (cm)	Razred
E	0	30	31	30.5	F1
S5	5	46	47	46.5	F3
S10	10	52	53	52.5	F4
M5	5	41	38	39.5	F2
M10	10	42	42	42.0	F3

Tablica 4.12. Razastiranje mješavina



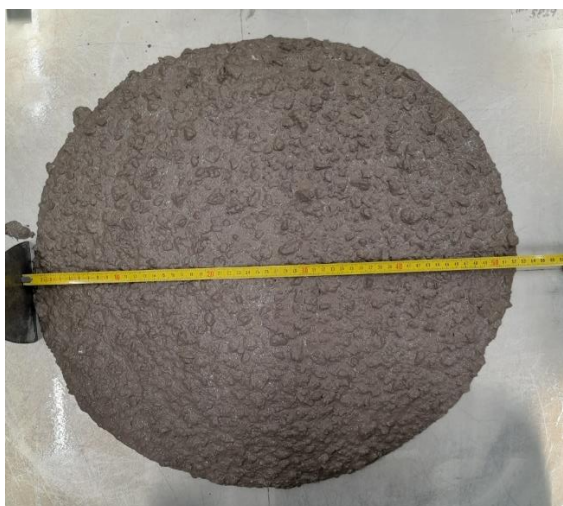
Slika 4.5. Rezultati razastiranja mješavina



a) E



b) S5



c) S10



d) M5



e) M10

Slika 4.6. Ispitivanje razastiranja mješavina

4.4.3 Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Nakon provedenog ispitivanja u porometru dobiveni su podaci o sadržaju zraka u svih pet mješavina koji su prikazani u Tablici 4.13.

Ispitni uzorak	Sadržaj zraka (%)
E	2.2
S5	3.6
S10	4.6
M5	2.8
M10	2.6

Tablica 4.13. Prikaz sadržaja zraka u svježem betonu



Slika 4.7. Udio pora u svježem betonu

Mješavina sa najmanjim postotkom sadržaja zraka je etalonska mješavina, slijede je obje mješavine s dodatkom metakaolina dok najveći sadržaj zraka imaju mješavine S5 i S10 s dodatkom silicijske prašine.

4.5 Analiza rezultata ispitivanja svježeg betona

Ispitivanja koja su se provela na betonu u svježem stanju su slijeganje, rasprostiranje te ispitivanje sadržaja zraka u mješavinama. Analizom dobivenih vrijednosti ispitivanja mješavina može se zaključiti kako upotreba mineralnih dodataka povećava obradivost svježeg betona, ali i povećava sadržaj zraka. Mješavine s dodatkom silicijske prašine imaju najveće slijeganje i razastiranje i najveći sadržaj zraka. Također, povećanjem mineralnih dodataka s 5% na 10% u mješavinama, povećava se obradivost. Mješavina s 10% silicijske prašine ima 10% veće slijeganje i razastiranje od mješavine s 5% silicijske prašine. Sadržaj zraka najveći je upravo kod mješavina sa silicijskom prašinom te mješavina S10 ima za 1% veći udio pora od mješavine S5. Kod mješavina s metakaolinom mješavina M5 imala je veći sadržaj zraka od mješavine M10 te se u ovom slučaju sadržaj zraka smanjio s većim postotkom dodatka u mješavini. U odnosu na etalonsku mješavinu, sve mješavine koje sadrže mineralne dodatke imaju veći sadržaj zraka.

4.6 Rezultati ispitivanja očvrsnulog betona

4.6.1 Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka provedeno je 28 dana nakon ugrađivanja. Ispitni uzorci su dimenzija 150x150x150 mm. Ispitani su u vodom zasićenom stanju, a sve površine su obrisane tako da su uzorci površinski suhi. Ispitivanje je provedeno na 3 uzorka za svaku mješavinu.

Receptura	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Masa (g)	Gustoća (g/cm ³)	f _c (MPa)	F (kN)
E ₁	02.11.	30.11.	28	8180.3	2.42	70.9	1595.3
E ₂	02.11.	30.11.	28	8195.8	2.43	70.7	1590.6
E ₃	02.11.	30.11.	28	8200.5	2.43	71.7	1599.1
Srednja vrijednost						71.7	
S5 ₁	03.11.	01.12.	28	7961.4	2.36	68.4	1538.6
S5 ₂	03.11.	01.12.	28	7935.9	2.35	67.5	1518.0
S5 ₃	03.11.	01.12.	28	7942.2	2.35	63.8	1436.6
Srednja vrijednost						66.6	
S10 ₁	04.11.	02.12.	28	7876.2	2.33	65.1	1464,1
S10 ₂	04.11.	02.12.	28	7860.5	2.33	68.3	1537,3
S10 ₃	04.11.	02.12.	28	7892.9	2.34	62.4	1405,0
Srednja vrijednost						65.3	
M5 ₁	08.11.	06.12.	28	8143.1	2.41	70.0	1575.4
M5 ₂	08.11.	06.12.	28	8145.0	2.41	69.9	1572.4
M5 ₃	08.11.	06.12.	28	8132.1	2.41	70.4	1583.6
Srednja vrijednost						70.1	
M10 ₁	09.11.	07.12.	28	7910.5	2.34	70.6	1589.1
M10 ₂	09.11.	07.12.	28	7995.7	2.37	71.2	1601.0
M10 ₃	09.11.	07.12.	28	8032.7	2.38	71.6	1610.3
Srednja vrijednost						71.1	

Tablica 4.14. Prikaz tlačnih čvrstoća ispitnih uzoraka



Slika 4.8. Ispitni uzorak E nakon ispitivanja tlačne čvrstoće



Slika 4.9. Prikaz vrijednosti tlačnih čvrstoća

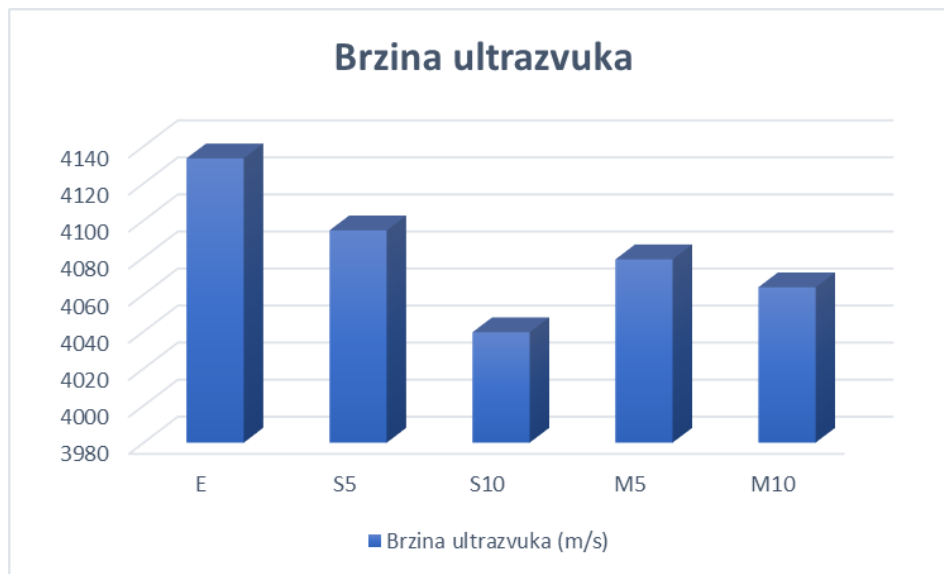
Ispitivanjem je dobiveno da su ispitni uzorci E najveće tlačne čvrstoće, a najmanje uzorci S5 i S10. U ovom ispitivanju mineralni dodaci nisu imali značajan utjecaj na povećanje čvrstoće te su ispitni uzorci M5 i M10 imali podjednaku čvrstoću kao i uzorak E. Mogući uzrok pada čvrstoće kod ispitnih uzoraka s dodatkom silicijske prašine je veći udio pora u odnosu na ostale uzorke.

4.6.2 Rezultati ispitivanja ultrazvuka

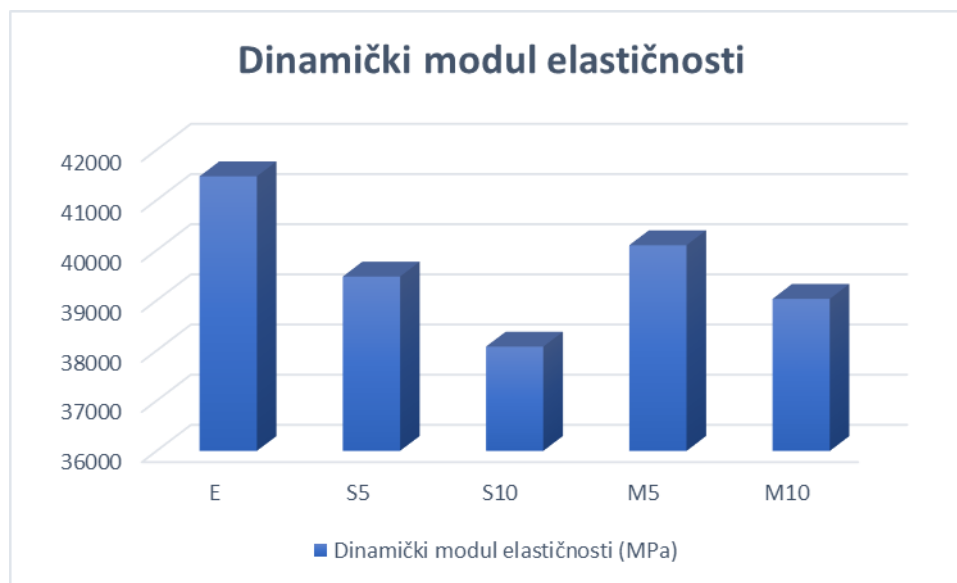
Ispitivanje brzine ultrazvuka izvršilo se na uzorcima kocke dimenzija 150x150x150 mm nakon 28 dana. Za svaki uzorak dobivene vrijednosti brzine ultrazvuka prikazane su u tablici, a zatim je određena kvaliteta betona i izračunat dinamički modul elastičnosti. Analizom rezultata brzine ultrazvuka svi uzorci se mogu klasificirati kao vrlo kvalitetni. Najveću brzinu su ostvarili ispitni uzorci E, a najmanji uzorci S10. Rezultati brzine ultrazvuka i dinamičkog modula elastičnosti, također, su prikazani i grafički na slikama 4.10. te 4.11. Iz rezultata je vidljivo da dinamički modul elastičnosti prati tlačnu čvrstoću betona.

Uzorak	Datum izrade	Datum ispitivanja	Starost (dani)	Vrijeme ultrazvuka (μ s)	Brzina ultrazvuka (m/s)	Dinamički modul elastičnosti (MPa)	Kvaliteta betona
E ₁	02.11.	30.11.	28	36.03	4163.2	42009,7	Vrlo kvalitetan
E ₂	02.11.	30.11.	28	36.57	4101.7	40855,5	
E ₃	02.11.	30.11.	28	36.27	4135.6	41557,9	
Srednja vrijednost				36.29	4133.5	41474,4	
S5 ₁	03.11.	01.12.	28	36.60	4098.4	39622,0	Vrlo kvalitetan
S5 ₂	03.11.	01.12.	28	36.63	4095.0	39430,4	
S5 ₃	03.11.	01.12.	28	36.67	4090.5	39375,7	
Srednja vrijednost				36.63	4094.6	39476,0	
S10 ₁	04.11.	02.12.	28	36.87	4068.3	38564,9	Vrlo kvalitetan
S10 ₂	04.11.	02.12.	28	37.43	4007.5	37419,6	
S10 ₃	04.11.	02.12.	28	37.1	4043.1	38251,7	
Srednja vrijednost				37.13	4039.6	38078,7	
M5 ₁	08.11.	06.12.	28	36.43	4117.5	40858,4	Vrlo kvalitetan
M5 ₂	08.11.	06.12.	28	36.70	4087.2	40259,4	
M5 ₃	08.11.	06.12.	28	37.20	4032.3	39184,4	
Srednja vrijednost				36.78	4079.0	40100,7	
M10 ₁	09.11.	07.12.	28	36.87	4068.3	38730,4	Vrlo kvalitetan
M10 ₂	09.11.	07.12.	28	36.83	4072.8	39312,2	
M10 ₃	09.11.	07.12.	28	37.03	4050.8	39052,8	
Srednja vrijednost				36.91	4063.9	39031,8	

Tablica 4.15. Prikaz rezultata dobivenih metodom ultrazvuka



Slika 4.10. Prikaz rezultata dobivenih metodom ultrazvuka



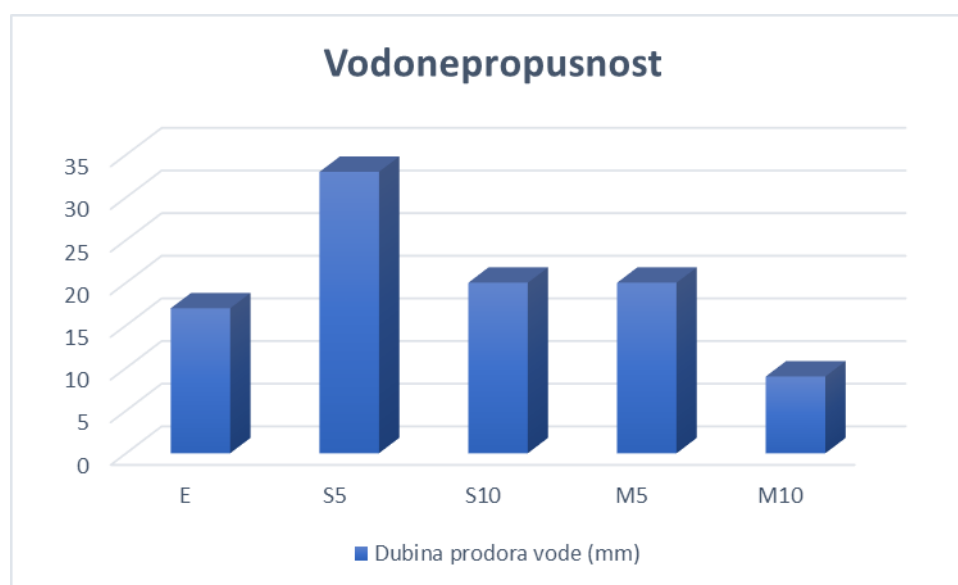
Slika 4.11. Prikaz dinamičkog modula elastičnosti

4.6.3 Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti

Nakon provedenog ispitivanja vodonepropusnosti dobiveni su sljedeći podaci za svih pet uzoraka:

Ispitni uzorak	Dubina prodiranja vode (mm)
E	17
S5	33
S10	20
M5	20
M10	9

Tablica 4.16. Dubina prodiranja vode u ispitnim uzorcima

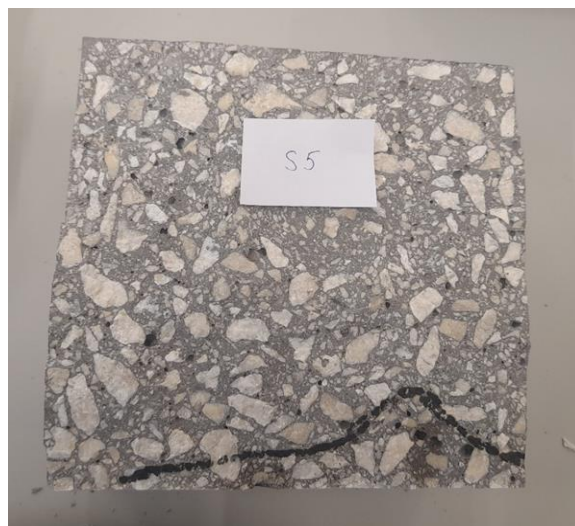


Slika 4.12. Rezultati ispitivanja dubine prodora vode pod tlakom

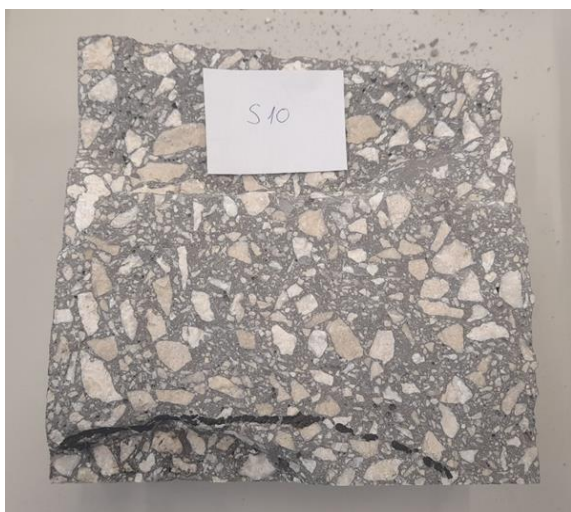
Svaki ispitni uzorak može se svrstati u razred vodonepropusnosti. U razred VDP 3 spada uzorak M10, uzorci E, S10 te M5 spadaju u razred VDP2, dok se uzorak S5 nalazi u razredu VDP 1. Najmanju propusnosti ima ispitni uzorak M10 te ga slijedi etalonski uzorak. Iz rezultata je vidljivo da se povećanjem postotka mineralnih dodataka (s 5 % na 10 %) dvostruko smanjuje prodiranje vode u uzorcima. Slike 4.13. prikazuju dubinu prodiranja vode na svim ispitnim uzorcima.



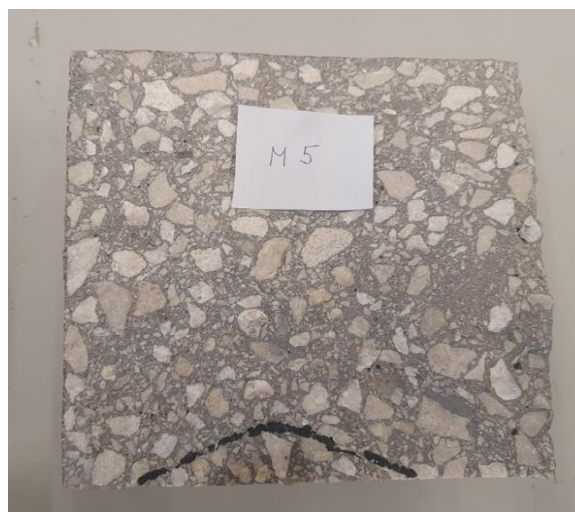
a) E



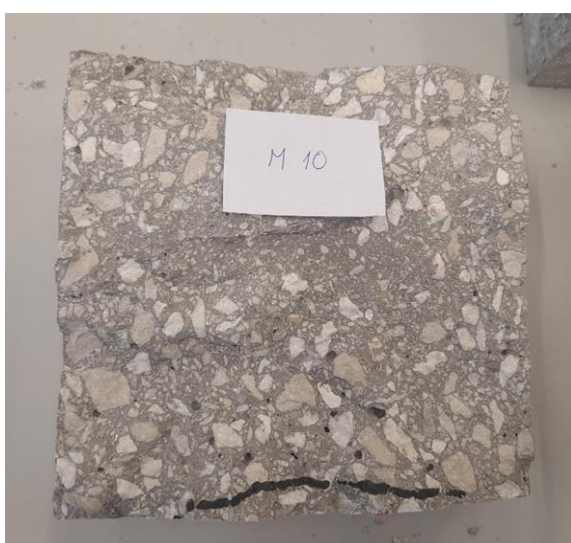
b) S5



c) S10



d) M5



e) M10

Slika 4.13. Dubina prodiranja vode na ispitnim uzorcima

4.6.4 Rezultati ispitivanja plinopropusnosti

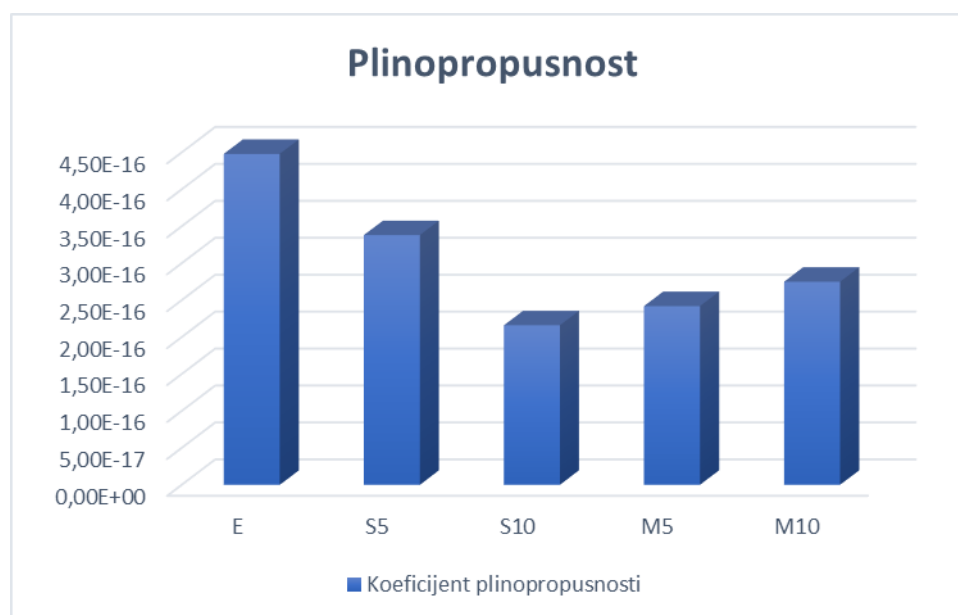
Nakon završetka ispitivanja uzoraka na plinopropusnost, dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 4.17., a koeficijenti plinopropusnosti izračunati su za sve uzorke u Tablici 4.18. Analizom rezultata zaključeno je da najveću plinopropusnost ima uzorak E, dok uzorci S5, S10, M5 te M10 imaju manji koeficijent plinopropusnosti što dokazuje da se upotrebom mineralnih dodataka smanjuje propusnost zraka kroz beton. Slika 4.14. prikazuje grafički dobivene rezultate ispitivanja.

Uzorak, dimenzije	P = 150 kPa			P = 200 kPa			P = 300 kPa		
E L = 5,19 cm 5,08 cm 5,07 cm 5,07 cm	V _f = 25 ml			V _f = 25 ml			V _f = 100 ml		
	36,93	36,50	36,28	26,22	25,88	25,90	48,63	48,94	49,63
	36,57			26,00			49,07		
S5 L = 4,86 cm 4,88 cm 4,95 cm 4,87 cm	V _f = 25 ml			V _f = 25 ml			V _f = 100 ml		
	46,59	45,44	45,46	31,53	31,37	31,69	68,78	67,88	68,16
	45,83			31,53			68,27		
S10 L = 4,97 cm 5,02 cm 5,06 cm 4,98 cm	V _f = 10 ml			V _f = 25 ml			V _f = 25 ml		
	29,22	28,96	28,75	49,87	50,75	50,22	28,31	28,69	28,62
	28,98			50,28			28,54		
M5 L = 4,97 cm 5,04 cm 5,11 cm 5,04 cm	V _f = 10 ml			V _f = 25 ml			V _f = 25 ml		
	25,59	25,62	26,06	45,16	46,35	45,37	26,63	26,12	25,91
	25,76			45,63			26,22		
M10 L = 4,91 cm 4,90 cm 4,93 cm 4,95 cm	V _f = 10 ml			V _f = 25 ml			V _f = 25 ml		
	21,94	22,18	22,06	39,50	39,84	39,22	22,19	22,00	22,50
	22,06			39,52			22,23		

Tablica 4.17. Rezultati ispitivanja plinopropusnosti

Uzorak	L (cm)	K 150 (m ²)	K 200 (m ²)	K 300 (m ²)	Ksr (m ²)
E	5,10	$6,61 \cdot 10^{-16}$	$3,82 \cdot 10^{-16}$	$3,02 \cdot 10^{-16}$	$4,48 \cdot 10^{-16}$
S5	4,89	$5,05 \cdot 10^{-16}$	$3,02 \cdot 10^{-16}$	$2,08 \cdot 10^{-16}$	$3,38 \cdot 10^{-16}$
S10	5,01	$3,27 \cdot 10^{-16}$	$1,94 \cdot 10^{-16}$	$1,27 \cdot 10^{-16}$	$2,16 \cdot 10^{-16}$
M5	5,04	$3,71 \cdot 10^{-16}$	$2,15 \cdot 10^{-16}$	$1,40 \cdot 10^{-16}$	$2,42 \cdot 10^{-16}$
M10	4,92	$4,23 \cdot 10^{-16}$	$2,43 \cdot 10^{-16}$	$1,61 \cdot 10^{-16}$	$2,75 \cdot 10^{-16}$

Tablica 4.18. Koeficijenti plinopropusnosti ispitnih uzoraka



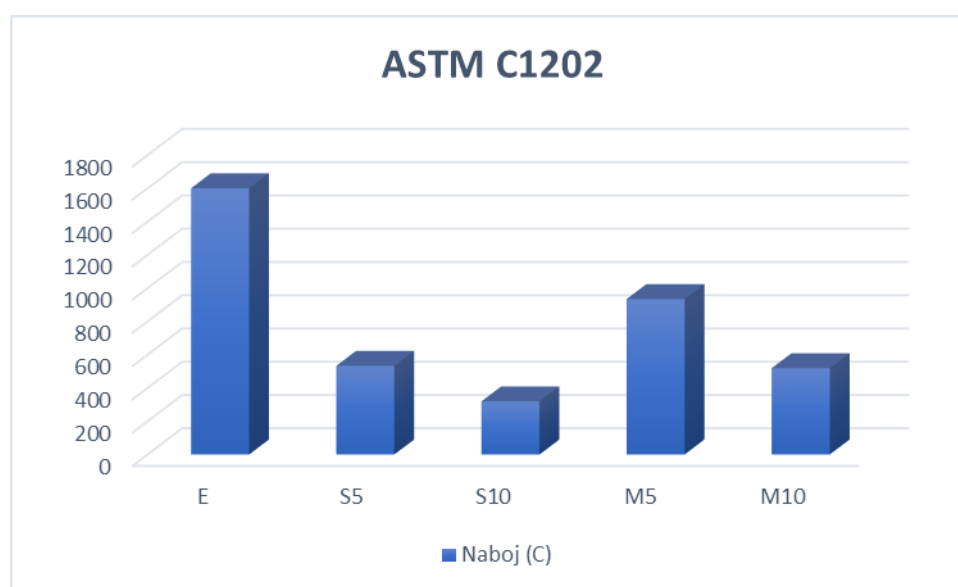
Slika 4.14. Grafički prikaz koeficijenta plinopropusnosti

4.6.5 Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton ASTM C1202

Dobivene rezultate ispitivanja uzoraka na prodiranje klorida kroz beton prikazuje Tablica 4.19. Upotreba mineralnih dodataka je znatno poboljšala svojstva betona na prodiranje klorida, a naročito silicijska prašina. Najnižu propusnost ima uzorak S10, dok, očekivano, etalonski uzorak ima najvišu propusnost. Slika 4.15. grafički prikazuje dobivene rezultate.

Redni broj	Oznaka	Datum ispitivanja	D	L	Q	Klasa propusnosti
-	-	-	(mm)	(mm)	(C)	-
1	E	21.12.	100	50	1600,9	Niska
2	S5	21.12.	100	50	533,3	Jako niska
3	S10	21.12.	100	50	319,4	Jako niska
4	M5	10.01.	100	50	934,6	Jako niska
5	M10	10.01.	100	50	519,1	Jako niska

Tablica 4.19. Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton



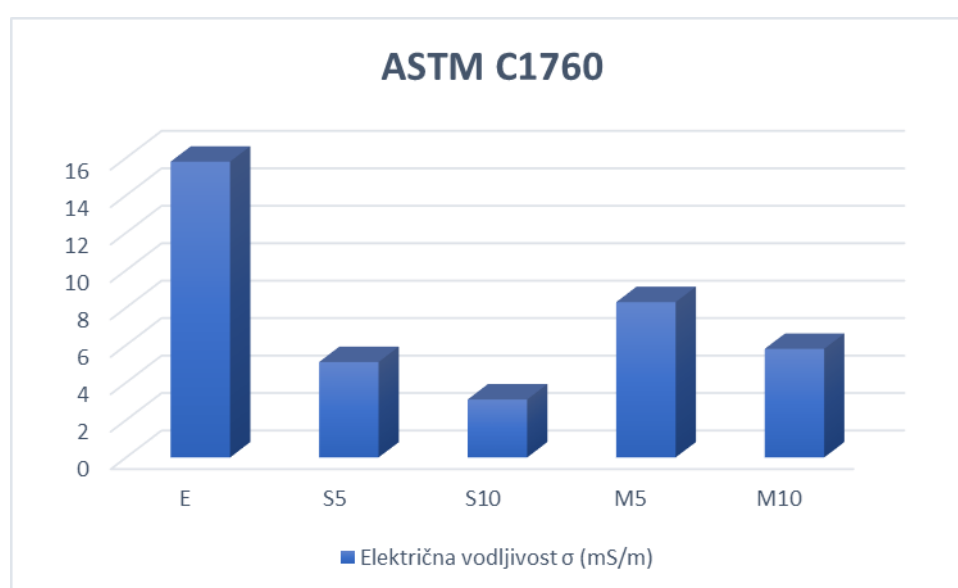
Slika 4.15. Grafčki prikaz rezultata ispitivanja

4.6.6 Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton ASTM C1760

Nakon provedene prve metode uzoraka na kloride, isti rezultati dobiveni su i u ovoj metodi. Ispitni uzorak S10, također ima najnižu električnu vodljivost, a etalonski uzorak najvišu. Može se zaključiti da se upotrebom mineralnih dodataka smanjuje poroznost betona, stoga je i smanjen prodor klorida te se sprječava nastanak korozije.

Redni broj	Oznaka	Datum ispitivanja	D	L	I ₁	σ
-	-	-	(mm)	(mm)	(mA)	(ms/m)
1	E	18.01.	100	199	37,5	15,8
2	S5	18.01.	100	195	12,2	5,1
3	S10	18.01.	100	197	7,4	3,1
4	M5	18.01.	100	197	20,0	8,3
5	M10	18.01.	100	197	14,0	5,8

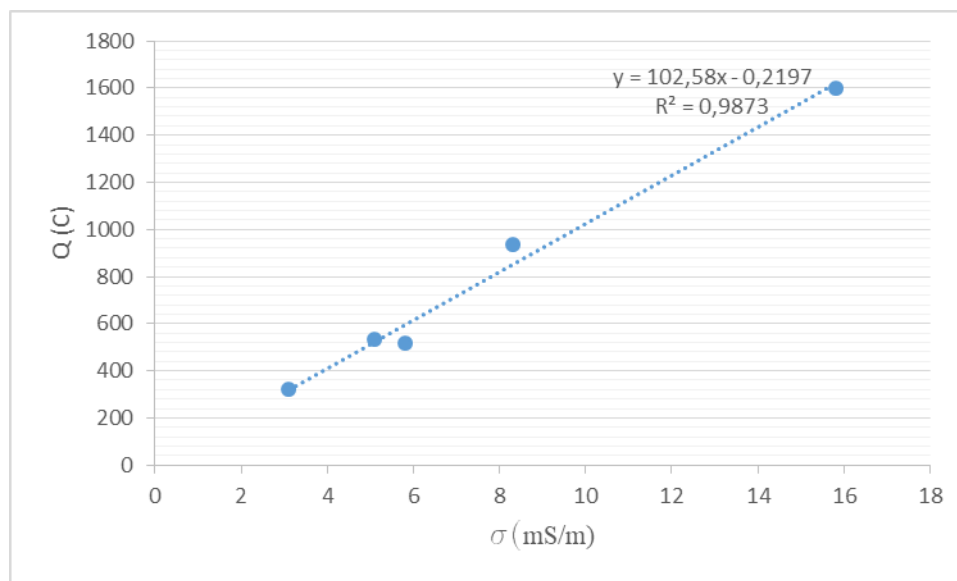
Tablica 4.20. Rezultati ispitivanja migracije klorida kroz beton



Slika 4.16. Grafički prikaz rezultata ispitivanja

4.6.7 Odnos između metoda ASTM C1202 i ASTM C1760

Odnos između prve metode u kojoj je dobiven preneseni naboj i druge metode u kojoj je određena električna vodljivost ispitnih uzoraka prikazuje Slika 4.17. Dobiveni odnos prikazuje dobru podudarnost između naboja i električne vodljivosti te je koeficijent korelacije $R^2 = 0,9873$.



Slika 4.17. Odnos između naboja i električne vodljivosti

4.7 Analiza rezultata ispitivanja očvrsnulog betona

Analizom provedenih ispitivanja ispitnih uzoraka u očvrsnulom stanju mogu se donijeti sljedeći zaključci. Provedena su ispitivanja svih pet uzoraka na tlačnu čvrstoću, brzinu ultrazvuka, vodonepropusnost, plinopropusnost te propusnost klorida kroz beton.

Najveću gustoću ima etalonski uzorak dok ostali uzorci s mineralnim dodacima imaju manju gustoću. Rezultati dokazuju da se upotrebom mineralnih dodataka u betonu smanjuje gustoća betona. Ispitivanjem tlačne čvrstoće podjednake rezultate su prikazali ispitni uzorci E, M5 i M10 dok su ispitni uzorci s dodatkom silicijske prašine imali najmanju tlačnu čvrstoću. Ispitivanjem nije zabilježen očekivani doprinos korištenja mineralnih dodataka na razvoj tlačne čvrstoće te se može zaključiti da je povećani udio pora u svježem betonu pridonio smanjenju čvrstoće. Rezultati dobiveni ispitivanjem uzoraka na brzinu ultrazvuka pokazuju da najveći rezultat ispitivanja ima etalonski uzorak, te ga slijede uzorci s 5% mineralnih dodataka, a zatim uzorci s 10%. Iz grafičkog prikaza Slika 4.10. vidljivo je da se brzina ultrazvuka smanjuje povećanjem mineralnih dodataka. Iz podataka o brzini ultrazvuka izračuna se preko formule dinamički modul elastičnosti koji prati dobivene rezultate brzina.

Najmanju vodonepropusnost ima uzorak M10 te E koji su imali i najveću tlačnu čvrstoću od 71,1 MPa, dok najveću vodonepropusnost ima uzorak S5. Slijede rezultati ispitivanja uzoraka na plinopropusnost koji su pokazali slične podatke kao i rezultati uzoraka na vodonepropusnost.

Najveću plinopropusnost ima etalonski ispitni uzorak, dok ostali uzorci s mineralnim dodacima imaju manju propusnost. Uzorci sa silicijskom prašinom su pokazali da se povećanjem postotka dodataka smanjuje dodatno propusnost, dok su uzorci s dodatkom metakaolina pokazali obratne rezultate, plinopropusnost se povećala s većim postotkom dodatka. Na kraju su se provela ispitivanja na prodiranje klorida kroz beton te su rezultati pokazali očekivane vrijednosti. Upotrebom, a zatim i povećanjem mineralnih dodataka propusnost klorida kroz ispitne uzorke se znatno smanjila. Ispitivanjem ispitnih uzoraka po metodi RCPT C1202 svi uzorci s mineralnim dodacima klasificiraju se u jako nisku klasu propusnosti dok je etalonski uzorak u niskoj klasi. Najmanji pređeni naboj kroz ispitne uzorke dobio se u ispitnom uzorku S10. Nakon provedene metode ASTM C1760 u kojoj se mjeri prolazak električne struje, a zatim se preko formule izračuna električna vodljivost svakog ispitnog uzorka, dobiveni rezultati su pokazali identične vrijednosti ispitivanja. Najveću električnu vodljivost ima etalonski uzorak, a uzorak s 10% silicijske prašine ima najmanju vodljivost. U radu je dijagramom dokazana veza između dobivenog naboja te električne vodljivosti u ove dvije provedene metode te je dobiven vrlo visok koeficijent korelacije. Iz grafičkih prikaza Slika 4.15. te Slika 4.16. vidljivo je da se dvostrukim povećanjem postotka mineralnih dodataka, približno za dvostruko smanjuje i propusnost klorida kroz uzorke.

Finoća mliva je jedan od bitnijih svojstava koja utječe na veličinu kapilarnih pora. Iz podataka o svojstvima cementa, silicijske prašine i metakaolina uočava se da mnogo veću finoću mliva imaju mineralni dodaci u odnosu na cement te su dobiveni rezultati to i dokazali.

5 ZAKLJUČAK

Kod projektiranja sastava betona najvažnija svojstva su čvrstoća, trajnost, obradivost i cijena. Sigurnost i uporabljivost betonskih konstrukcija trebaju tijekom cijelog uporabnog vijeka ostati takva da ne dođe do velikih troškova održavanja i da se očuva sigurnost, stoga je važno uzeti u obzir razrede izloženosti okoliša.

U ovom radu razmatra se utjecaj morskog okoliša na djelovanje betona te su se provela ispitivanja kako mineralni dodaci, silicijska prašina i metakaolin, utječu na svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju. Ispitivanja koja su se provela u svježem stanju su slijeganje, razastiranje, te ispitivanje sadržaja zraka, a u očvrslulom stanju ispitivanje tlačne čvrstoće, brzine ultrazvuka, vodonepropusnosti, plinopropusnosti te dviju metoda prodiranja klorida kroz beton. Iz dobivenih rezultata, ustanovljeno je da mineralni dodaci poboljšavaju svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju te da se mogu koristiti u područjima jako agresivnog okoliša, kao što je morska voda. Djelovanje morske vode na beton dovodi do pojave korozije zbog svog sastava u kojem se nalazi više vrsta soli pa nastaju razni kemijski i fizikalni procesi. Treba uzeti u obzir da se upotrebom mineralnih dodataka ne može u potpunosti spriječiti razaranje betona, ali se može smanjiti i na taj način mu produljiti vijek trajanja.

Također, upotrebom mineralnih dodataka smanjuje se potrebna količina cementa te se na taj način smanjuje upotreba štetnog klinkera koji se koristi za proizvodnju cementa. Pri proizvodnji cementa ispušta se velika količina CO₂ te je i sama proizvodnja skupa, stoga je cijena betonskih konstrukcija u kojima se koriste mineralni dodaci jednaka ili čak i manja u odnosu na betone u kojima se ne dodaju mineralni dodaci.

6 LITERATURA

- [1.] D. Bjegović, N. Štirmer: Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.
- [2.] Velimir Ukrainczyk: Beton, Struktura, Svojstva, Tehnologija, Zagreb, 1994.
- [3.] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2000.
- [4.] https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Strucno_Vaznost_projektiranja_trajnosti_betona_2019.pdf.....3
- [5.] <https://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=7682>
- [6.] Mislav Lovrić, Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona, Diplomski rad, Split, 2016.
- [7.] Testing hardened concrete - Part 8: Depth of penetration of water under pressure, CEN, 2000.
- [8.] http://www.grad.hr/rescue/materijali/Izvjestaji_1/Izvjestaj_br_14_Rezultati_ispitivanja_na_betonu.pdf
- [9.] RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability, Materials and Structures, 1999.
- [10.] Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, 2012.
- [11.] <https://germann.org/products-by-application/electrical-conductivity-electrical-resistivity-and-chloride-penetrability/prooveit>
- [12.] Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, ASTM International, 2012.
- [13.] <https://www.cemex.hr/documents/47380066/47381413/Tehni%C4%8Dka+uputa+CEM+I+42%2C5+R+Sv.Juraj.pdf/33161d69-3257-0162-d891-e987d42da6e8?t=1579772635945>

7 PRILOZI

Oznaka:	GF E					Date:	2.11.2021
Projekt:	Diplomski rad V.Titulić						
Tabela broj 1.							
Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu							
SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	MASA ZA 23 lit. [kg]		
CEMENT		380	3,10	123			8,74
VODA		171	1,00	171			3,93
V/C	0,45						
DODACI BETONU							
Glenium Sky 658	1,00	3,80	1,06	3,585			0,0874
-	0,00	0,00	1,00	0,000			0,0000
-	0,00	0,00	1,00	0,000			0,0000
ZRAK [%]	2,0	0,00	0,00	20			0
AGREGAT		1844	2,70	683			42,40
UKUPNO		2398		1000			55,16

Tabela br. 2								
Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata								
SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLA`NOST		1 m ³	23 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	52	958,7	1,40	13,42	0,20	1,92	947,20	21,79
4 - 8	7	129,06	0,95	1,23	0,20	0,26	128,09	2,95
8 - 16	41	755,9	0,39	2,95	0,20	1,51	754,46	17,35
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium Sky 658		3,80					3,80	0,0874
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		380					380	8,74
VODA		171		17,60		3,7	185	4,25

Oznaka:	GF S5					Date:	3.11.2021
Projekt:	diplomski rad V.Titulić						
Tabela broj 1.							
Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu							
SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]	MASA ZA 23 lit. [kg]		
CEMENT		361	3,10	116			8,30
VODA		180	1,00	180			4,13
V/C	0,50	0,45					
DODACI BETONU							
Glenium Sky 658	1,00	3,80	1,06	3,585			0,0874
Silikatna prašina	0,00	19,00	0,65	29,231			0,4370
-	0,00	0,00	1,00	0,000			0,0000
ZRAK [%]	2,0	0,00	0,00	20			0
AGREGAT		1758	2,70	651			40,44
UKUPNO		2322		1000			53,40

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	23 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	52	914,24	1,40	12,80	0,20	1,83	903,27	20,78
4 - 8	7	123,07	0,95	1,17	0,20	0,25	122,15	2,81
8 - 16	41	720,85	0,39	2,81	0,20	1,44	719,48	16,55
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium Sky 658		3,80					3,80	0,0874
Silikatna prašina		19,00					19,00	0,4370
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		361					361	8,30
VODA		180		16,78		3,5	193	4,43

Oznaka:	GF S10					Date:	4.11.2021
Projekt:	diplomski rad V.Titulić						
Tabela broj 1.							
Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu							
SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³ [kg]	GUSTOJA r [kg/dm ³]	VOLUMEN ZA 1 m ³ [dm ³]		MASA ZA 23 lit. [kg]	
CEMENT		342	3,10	110		7,87	
VODA		188	1,00	188		4,33	
V/C	0,55	0,45					
DODACI BETONU							
Glenium Sky 658	1,00	3,80	1,06	3,585		0,0874	
Silikatna prašina	0,00	38,00	0,65	58,462		0,8740	
-	0,00	0,00	1,00	0,000		0,0000	
ZRAK [%]	2,0	0,00	0,00	20		0	
AGREGAT		1673	2,70	620		38,47	
UKUPNO		2245		1000		51,63	

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	23 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	52	869,82	1,40	12,18	0,20	1,74	859,38	19,77
4 - 8	7	117,09	0,95	1,11	0,20	0,23	116,21	2,67
8 - 16	41	685,82	0,39	2,67	0,20	1,37	684,52	15,74
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium Sky 658		3,80					3,80	0,0874
Silikatna prašina		38,00					38,00	0,8740
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		342					342	7,87
VODA		188		15,96		3,3	201	4,62

Oznaka:	GF M5					Date:	8.11.2021
Projekt:	diplomski rad V.Titulić						
Tabela broj 1.							
Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu							
SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m ³	MASA ZA 23 lit.		
		[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]	[kg]		
CEMENT		361	3,10	116			8,30
VODA		180	1,00	180			4,13
V/C	0,50	0,45					
DODACI BETONU							
Glenium Sky 658	1,00	3,80	1,06	3,585			0,0874
Metakaolin	0,00	19,00	2,60	7,308			0,4370
-	0,00	0,00	1,00	0,000			0,0000
ZRAK [%]	3,0	0,00	0,00	30			0
AGREGAT		1790	2,70	663			41,18
UKUPNO		2354		1000			54,14

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	23 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	52	931	1,40	13,03	0,20	1,86	919,83	21,16
4 - 8	7	125,33	0,95	1,19	0,20	0,25	124,39	2,86
8 - 16	41	734,06	0,39	2,86	0,20	1,47	732,66	16,85
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium Sky 658		3,80					3,80	0,0874
Metakaolin		19,00					19,00	0,4370
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		361					361	8,30
VODA		180		17,09		3,6	193	4,44

Oznaka:	GF M10					Date:	9.11.2021
Projekt:	diplomski rad V.Titulić						
Tabela broj 1.							
Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu							
SASTOJAK		MASA ZA 1 m ³	GUSTOJA r	VOLUMEN ZA 1 m ³	MASA ZA 23 lit.		
		[kg]	[kg/dm ³]	[dm ³]	[kg]		
CEMENT		342	3,10	110			7,87
VODA		188	1,00	188			4,33
V/C	0,50	0,45					
DODACI BETONU							
Glenium Sky 658	1,00	3,80	1,06	3,585			0,0874
Metakaolin	0,00	38,00	2,60	14,615			0,8740
-	0,00	0,00	1,00	0,000			0,0000
ZRAK [%]	3,0	0,00	0,00	30			0
AGREGAT		1764	2,70	653			40,57
UKUPNO		2336		1000			53,73

Tabela br. 2

Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Z.P.S. MASA		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m ³	23 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	52	917,34	1,40	12,84	0,20	1,83	906,33	20,85
4 - 8	7	123,49	0,95	1,17	0,20	0,25	122,56	2,82
8 - 16	41	723,29	0,39	2,82	0,20	1,45	721,91	16,60
16 - 32	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Glenium Sky 658		3,80					3,80	0,0874
Metakaolin		38,00					38,00	0,8740
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		342					342	7,87
VODA		188		16,84		3,5	201	4,63