

Beton u moru - podvodno betoniranje

Kokorović, Matea

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:947234>

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

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



image not found or type unknown *Repository / Repozitorij:*

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Matea Kokorović

BETON U MORU – PODVODNO BETONIRANJE

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Konstrukcije
Teorija i tehnologija betona**

**Matea Kokorović
JMBAG: 0114029669**

BETON U MORU – PODVODNO BETONIRANJE

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

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

Matea Kokorović

U Rijeci, 15. rujna 2022.

Zahvala

Zahvaljujem svojoj mentorici doc.dr.sc. Nataliji Bede Odorčić na podršci, pomoći te korisnim savjetima tijekom pisanja ovog rada. Također se zahvaljujem elaborantima Dini Juriševiću i Dominiku Štroku na pomoći prilikom izrade laboratorijskog dijela.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i dečku koji su me podupirali sve ove godine studiranja, a ponajviše majci koja je osigurala da mi ništa ne nedostaje te prijateljima na pruženoj potpori.

Sažetak:

Podvodni beton ubraja se u specijalne vrste betona kojem se svojstva razlikuju u odnosu na običan beton. Razvojem i poboljšavanjem svojstava, danas se primjenjuje u izgradnji mostova, brana te konstrukcija čiji su temelji pod vodom. Za razliku od običnog betona, izvedba podvodnog betona zahtijeva drugačiju tehnologiju ugradnje.

Cilj ovog diplomskog rada je upoznavanje s podvodnim betonom, njegovim karakteristikama, mehanizacijom te načinima ugradnje. Spomenuti su primjeri primjene u praksi u bližoj okolini. U eksperimentalnom dijelu rada napravljen je vlastiti projekt sastava podvodnog betona te su provedena ispitivanja na uzorcima svježeg i očvrsnulog betona na tri mješavine: referentnoj mješavini običnog betona te dvije mješavine istog sastava kao referentna, ali je u jednoj cement zamijenjen metakaolinom a u drugoj silicijskom prašinom, u udjelu od 10%.

Većina dobivenih rezultata ispitivanja upućuju na zadovoljavajuće ponašanje betona u moru. Prilikom ispitivanja sadržaja pora i plinopropusnosti dobiveni rezultati nisu u skladu s očekivanim. Jedan od mogućih razloga jest veličina i tip pora u betonu. Sukladno očekivanom, rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i vodonepropusnosti potvrđuju pozitivan utjecaj mineralnih dodataka u betonu.

Ključne riječi: podvodni beton, projektiranje vlastite mješavine, silicijska prašina, metakaolin, laboratorijsko ispitivanje

Abstract:

Underwater concrete is one of the special types of concrete whose characteristics are different from the ordinary concrete. With the development and improvement of properties, today it is used in the construction of bridges and structures whose foundations are under water. Unlike ordinary concrete, the performance of underwater concrete requires a different installation technology.

The purpose of this thesis is to get familiar with underwater concrete, his characteristics, mechanization, and methods of installation. In the last part of the thesis, the composition of underwater concrete was designed, and laboratory tests were performed on samples.

Most obtained results of this conducted research have met desired expectations. During the research of a content of pores and their gas permeability, there were noted some deviations, meaning that obtained results were not in accordance with expectations. Some of the deviations appeared as a consequence of porosity's impact on a concrete. Pursuant to the expected results, positive impact of the minerals supplements in the concrete, could be confirmed.

Keywords: underwater concrete, projecting silica dust, metakaolin, laboratory testing

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	POVIJEST RAZVOJA PODVODNOG BETONA.....	3
3.	UTJECAJ MORA NA BETONSKE KONSTRUKCIJE	6
3.1.	Degradacija strukture betona	8
3.2.	Fizikalni mehanizmi degradacije	10
3.3.	Biološki mehanizmi degradacije – biopropadanje.....	11
3.4.	Mehanički mehanizmi degradacije.....	12
3.5.	Kemijski mehanizmi degradacije.....	13
4.	MEHANIZMI KOROZIJE BETONA U MORU.....	14
4.1.	Općenito o koroziji	14
4.1.1.	<i>Sulfatna korozija.....</i>	<i>16</i>
4.1.2.	<i>Karbonatna korozija</i>	<i>16</i>
4.1.3.	<i>Karbonatizacija betona</i>	<i>17</i>
4.1.4.	<i>Korozija izluživanja.....</i>	<i>17</i>
4.2.	Korozija armature u betonu.....	18
4.2.1.	<i>Korozija armature uslijed karbonizacije.....</i>	<i>19</i>
4.2.2.	<i>Korozija armature uslijed djelovanja klorida</i>	<i>20</i>
4.3.	Zaštita od korozije	21
5.	SVOJSTVA I ZAHTJEVI ZA BETON.....	22
5.1.	Tehnička svojstva betona u morskome okolišu	22
5.2.	Odrednice o trajnosti u tehničkom propisu za betonske konstrukcije (tpbk)	22
5.3.	Zahtjevi za beton u morskome okolišu	23
5.3.1.	<i>Cement.....</i>	<i>23</i>
5.3.2.	<i>Agregat.....</i>	<i>24</i>
5.3.3.	<i>Razred izloženosti</i>	<i>24</i>
5.3.4.	<i>Vodocementni omjer.....</i>	<i>26</i>
5.3.5.	<i>Zaštitni sloj betona.....</i>	<i>27</i>
5.3.6.	<i>Pukotine.....</i>	<i>28</i>
5.3.7.	<i>Sadržaj klorida u betonu</i>	<i>29</i>
6.	DODACI BETONU KAO ZAŠTITA OD AGRESIVNOG OKOLIŠA	30
6.1.	Mineralni dodaci.....	30
6.2.	Kemijski dodaci.....	32
7.	TEHNOLOGIJA UGRADNJE POD VODOM	34
7.1.	Tehnike izgradnje podvodnih konstrukcija.....	35

7.1.1.	<i>Kesoni</i>	35
7.1.2.	<i>Kofer brana</i>	36
7.1.3.	<i>Piloti</i>	37
7.1.4.	<i>Predgotovljeni elementi</i>	37
7.2.	Metode gradnje.....	38
7.2.1.	<i>Kontraktor postupak</i>	39
7.2.2.	<i>Metoda pumpanja</i>	42
7.2.3.	<i>Metoda hidro ventila – vodni ventil</i>	42
7.2.4.	<i>Rešetkasti lift (skip)</i>	44
7.2.5.	<i>Colcrete sistem</i>	45
7.2.6.	<i>Beton pumpa</i>	46
7.3.	izazovi podvodnog građenja.....	46
8.	OSNOVNA ISPITIVANJA PODVODNOG BETONA.....	47
8.1.	Ispitivanje konzistencije svježeg betona – slijeganje i rasprostiranje.....	47
8.2.	Vodopropusnost betona.....	48
8.3.	Plinopropusnost betona.....	50
8.4.	Difuzija klorida.....	52
9.	PODVODNA SANACIJA	54
9.1.	Uzroci oštećenja.....	56
9.1.1.	<i>Morski organizmi</i>	56
9.1.2.	<i>Nedostaci iskustva i pogreške projektiranja</i>	56
9.1.3.	<i>Napad kemikalijama</i>	57
9.1.4.	<i>Korozija</i>	58
9.1.5.	<i>Mehaničko oštećenje</i>	58
9.1.6.	<i>Posljedica smrzavanja i odmrzavanja</i>	60
10.	PRIMJERI PRIMJENE I UGRADNJE PODVODNOG BETONA.....	61
10.1.	Zagrebačka obala – kontejnerski terminal, rijeka.....	61
10.2.	Projekt lng terminala, otok krk	62
11.	PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE	63
11.1.	Eksperimentalni dio	63
11.2.	Određivanje fizikalnih svojstava materijala.....	64
11.3.	Granulometrijski sastav agregata.....	67
11.4.	Probna mješavina	69
11.5.	Izrada mješavina.....	71
11.5.1.	<i>Mješavina 1 (obični beton OB S5)</i>	71
11.5.2.	<i>Mješavina 2 (obični beton S5 + 10% metakaolin)</i>	71

11.5.3.	<i>Mješavina 3 (obični beton S5+ 10% silicijska prašina)</i>	72
12.	ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA	73
12.1.	Slijeganje	73
12.2.	Gustoća betona	74
12.3.	Sadržaj pora	75
12.4.	Ugradnja betona	76
12.5.	Njega betona	77
13.	ISPITIVANJA OČVRSNULOG BETONA.....	78
13.1.	Gustoća očvrsnulog betona	78
13.2.	Tlačna čvrstoća.....	79
13.2.1.	<i>Mješavina 1 (OB S5)</i>	81
13.2.2.	<i>Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolina)</i>	82
13.2.3.	<i>Mješavina 3 (OB S5 + 10% silicijske prašine)</i>	83
13.3.	Plinopropusnost	84
13.4.	Vodopropusnost	88
13.5.	Vlačna čvrstoća cijepanjem.....	89
13.5.1.	<i>Mješavina 1 (OB S5)</i>	89
13.5.2.	<i>Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolina)</i>	90
13.5.3.	<i>Mješavina 3 (OB S5 + 10% silicijske prašine)</i>	91
14.	ZAKLJUČAK.....	93
	LITERATURA.....	96

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste oštećenja konstrukcije u različitim zonama morskog okoliša [8].....	8
Tablica 2. Produkti korozije i njihovo volumensko povećanje u odnosu na pasivnu amaturu [17]	18
Tablica 3. Ograničenja za primjenu cementa po razredima izloženosti [9].....	24
Tablica 4. Razredi izloženosti prema normi HRN EN 206-1:2006 [23]	25
Tablica 5. Najveće dopuštene vrijednosti v/c omjera [24]	26
Tablica 6. Najmanja debljina zaštitnog sloja prema kriteriju trajnosti čelične armature (mm) [23]	27
Tablica 7. Preporučene granične vrijednosti širine pukotina betona w_{max} [3]	28
Tablica 8. Maksimalni sadržaj kloridnih iona u betonu [20]	29
Tablica 9. Razredi slijeganja prema TPBK [27].....	47
Tablica 10. Razredi vodonepropusnosti betona [47]	50
Tablica 11. Kriteriji plinopropusnosti [3].....	52
Tablica 12. Mase dobivene vaganjem agregata.....	66
Tablica 13. Osnovna fizikalna svojstva agregata.....	66
Tablica 14. Osnovna fizikalna svojstva agregata.....	67
Tablica 15. Zadani sastav agregata	67
Tablica 16. Dobiveni kumulativni sastav	68
Tablica 17. Receptura betonske mješavine za 1 m ³ i za 0,01 m ³	70
Tablica 18. Korekcija masa pojedinih frakcija agregata	70
Tablica 19. Receptura mješavine 1 (OB S5)	71
Tablica 20. Receptura mješavine 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	72
Tablica 21. Receptura mješavine 3 (OB S5 + 10% silicijska prašina)	72
Tablica 22. Rezultati ispitivanja gustoće na očvrslom betonu.....	78
Tablica 23. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za mješavinu 1	81
Tablica 24. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na mješavini 2	82
Tablica 25. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine 3.....	83
Tablica 26. Ulazni podaci za proračun koeficijenta plinopropusnosti.....	85
Tablica 27. Rezultati ispitivanja plinopropusnosti.....	86

Tablica 28. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 1 (obični beton).....	86
Tablica 29. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 2 (običan beton + 10% metakaolina)	86
Tablica 30. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 3 (običan beton + 10% silicijske prašine).....	87
Tablica 31. Rezultati ispitivanja vodopropusnosti	88
Tablica 32. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće mješavine 1	90
Tablica 33. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za mješavinu 2	91
Tablica 34. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za mješavinu 3	91

POPIS SLIKA

Slika 1. Nekadašnji izgled Caesarea Maritime [4]	4
Slika 2. Caesarea Maritima danas [5] Slika 3. Caesarea Maritima danas [5]	5
Slika 4. Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju [6]	7
Slika 5. Vrlo jako oštećenje terminala Podbok u Bakru [10]	9
Slika 6. Stupnjevi degradacije betona uslijed korozije (od I do IV) [3]	9
Slika 7. Uzroci preranog oštećivanja konstrukcija [12]	10
Slika 8. Odlamanje zaštitnog sloja betona [13]	10
Slika 9. Razvoj algi na betonskim stubama [13] Slika 10. Školjke na površini [13]	11
Slika 11. Abrazija površine betona (3 milimetra/godina) [13]	12
Slika 12. Sastav morske vode [14]	13
Slika 13. Ilustracija korozije u armiranom betonu [16]	14
Slika 14. Korozija armature izazvana djelovanjem slane vode [13]	19
Slika 15. Stupnjevi degradacije armiranobetonske konstrukcije [18]	20
Slika 16. Mineralni dodaci [26]	30
Slika 17. Tehnike podvodne izgradnje [30]	35
Slika 18. Podvodno betoniranjem pomoću kesona [31]	35
Slika 19. Izvođenje kofer brana [30]	36
Slika 20. Platforma sa koje se izvode piloti [12] Slika 21. Cijevi za izvođenje pilota [32]	37
Slika 22. Potopljeni hotel u Švedskoj	38
Slika 23. Ilustrirani prikaz betoniranja kontraktor postupkom [36]	39
Slika 24. Dijelovi kontraktor sustava [34]	40
Slika 25. Ilustrirani prikaz jedne cijevi [36] Slika 26. Ilustrirani prikaz kontraktor okvira [36]	41
Slika 27. Princip betoniranja pumpanjem [38]	42
Slika 28. Prikaz betoniranja metodom hidro ventila [40]	43
Slika 29. Rešetkasti lift za podvodno betoniranje: a) zatvoren i b) otvoren	44
Slika 30. Prikaz Colcrete sistema u dva koraka [42]	45
Slika 31. Koraci ispitivanja slijeganja betona [44]	47
Slika 32. Postupak ispitivanja konzistencije rasprostiranjem svježeg betona [45]	48

Slika 33. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti iz laboratorija za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci	49
Slika 34. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti betona u laboratoriju za materijale, Građevinski fakultet u Rijeci	50
Slika 35. Koraci postupka sanacije konstrukcije [50]	54
Slika 36. Oštećenje betona uzrokovano napadom sulfata [16].....	57
Slika 37. Oštećenje betonske konstrukcije uzrokovano kavitacijom [3]	59
Slika 38. Plutajuće postrojenje za izvedbu kesona [52]	61
Slika 39. Prikaz svih ugrađenih kesona [52].....	61
Slika 40. Prikaz armirano betonskih pilota kao temelja LNG terminala na otoku Krku ...	62
Slika 41. Piknometar + voda	Slika 42. Piknometar + voda + pijesak 65
Slika 43. ZSP agregat frakcije 4-8 mm	Slika 44. ZSP agregat frakcije 8-16 mm.....66
Slika 45. Udjeli frakcija agregata u betonskoj mješavini (%).....	60
Slika 46. Granulometrijska i kumulativna krivulja.....	68
Slika 47. Problemi koji su nastajali u probnim mješavinama.....	69
Slika 48. Slijeganje mješavina	73
Slika 48. Slijeganje mješavine 1 (S5)	Slika 49. Slijeganje mješavine 3 (S2) 73
Slika 54. Njegovanje betonskih uzoraka u vodi	77
Slika 55. Rezultati ispitivanja gustoće očvrstnalog betona	79
Slika 56. Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće, Građevinski fakultet, Rijeka.....	80
Slika 57. Betonski uzorci mješavine 1 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće.....	81
Slika 58. Betonski uzorci mješavine 2 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće.....	82
Slika 59. Betonski uzorci mješavine 3 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće.....	83

1. UVOD

Beton je drugi po redu najviše korišteni materijal u svijetu, odmah nakon vode. S obzirom na tu činjenicu, danas je teško zamisliti svijet bez betona. Beton se može pronaći u raznim konstrukcijama od blokova, zgrada, parkirališta pa sve do luka, brana i mostova. Betoniranje konstrukcija na tlu u suhim uvjetima zahtijeva uobičajena svojstva betona poput kompatibilnosti, stabilnosti, obradivosti te odgovarajuće čvrstoće. Izgradnjom konstrukcija kao što su mostovi, brane i druge konstrukcije u vodi i/ili blizini vode nameću se novi zahtjevi i problemi. Najčešći problemi kod podvodnog betoniranja javljaju se u fazi ugradnje pri čemu beton ne bi trebao doći u izravan kontakt s vodom.

Podvodni beton je posebna vrsta betona koji zahtijeva odgovarajuća svojstva, karakteristike i kvalitetu te posebne metode ugradnje i mehanizaciju. Pod odgovarajuća svojstva i karakteristike betona ubrajaju se čvrstoća, obradivost i trajnost, stoga bi podvodni beton trebao zadovoljiti navedene kriterije kako bi ostao održiv i ekonomski prihvatljiv. Ova vrsta betona zahtijeva pažljivo praćenje tijekom svih faza izvedbe te oprezan izbor odgovarajućih materijala, uređaja za kontrolu kvalitete i prikladne metode ugradnje.

Cilj ovog rada je istražiti i analizirati faktore koji utječu na trajnost podvodne betonske konstrukcije, moguće uzroke degradacije strukture betona, metode kojima se ugrađuje podvodni beton te naposljetku, na vlastitoj betonskoj mješavini ispitati kako mineralni dodatci utječu na svojstva betona i jesu li prigodni za podvodni beton.

U radu su objašnjeni mehanizmi prolaska pojedinih štetnih tvari u beton te vodonepropusnost i plinopropusnost betona. Ulaskom štetnih tvari u beton, pogotovo u agresivnim morskim uvjetima dolazi do kemijskih reakcija koje uzrokuju koroziju betona ili armature. Kod degradacije strukture betona razlikuje se više mehanizama poput fizikalnih, mehaničkih, bioloških i kemijskih. Najčešće dolazi do kemijskih mehanizama degradacije budući da morski okoliš sadrži znatnu količinu soli, kisika, ugljičnog dioksida te sulfata.

U poglavlju „Svojstva i zahtjevi za beton“ istaknute su specifičnosti projektiranja trajnosti betonske konstrukcije prema normama. Definirani su zahtjevi za cement, agregat, razred izloženosti konstrukcije, pukotine, sadržaj klorida, vodocementni omjer te kao najbitnije za trajnost konstrukcije definirana je najmanja debljina zaštitnog sloja betona.

Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Opisana su sva izvedena ispitivanja a to su ispitivanje gustoće, tlačne čvrstoće, vodonepropusnosti i plinopropusnosti te su analizirani rezultati provedenih ispitivanja.

2. POVIJEST RAZVOJA PODVODNOG BETONA

Budući da je beton materijal nastao miješanjem agregata, vode i veziva, odnosno cementa, razvoj betona započinje razvojem cementa prije 12 milijuna godina. Na samom početku otkrivanja cementa koristio se prirodni cement, a kasnije su ljudi pronašli način kako dobiti cement pomoću raznih drugih materijala. Prirodni cement je pronađen na prostoru današnjeg Izraela. Na tom području odvale su se reakcije između vapnenca i uljnog škriljca te su tako nastala ležišta cementnih spojeva [1]. Pronađen je između 1960-ih i 1970-ih, a pretpostavlja se da datira 12 milijuna g.p.n.e.

Sljedeće bitno razdoblje za razvoj cementa je 3000 g.p.n.e. u kojem su Egipćani koristili mješavinu blata i slame za povezivanje suhih cigli, a pri izgradnji piramida korištena je žbuka od gipsa i vapna.

Drevni Rimljani izgradili su čvrste betonske zidove u moru i morskom okruženju koji su izloženi jakim oceanskim valovima više od 2000 godina. Oni su 25 godina pr. Kr. razvili recept za beton koji se posebno koristio za podvodne radove, a koji se zapravo i dan danas koristi uz neke male promjene i nadopune. Rimski beton, poznatiji kao *opus caementicium*, bio je materijal korišten u gradnji tijekom Rimske republike i cijele povijesti Rimskog carstva [2].

Kod podvodnog betona bitno je da vezivo može očvršćivati u vodi pa se tako posebna važnost pridaje nastanku hidrauličkog veziva. Rimljani su kao vezivo ispočetka upotrebljavali gašeno vapno, a s vremenom su počeli koristiti i neke druge dodatke poput mljevene opeke i vulkanskog pepela. Njihovim dodavanjem dobivalo se kvalitetno, čvrsto i trajno hidrauličko vezivo, a pravi primjer tome su njihove građevine koje još uvijek postoje [2] [3].

Padom Rimskog carstva hidrauličko vezivo gubi popularnost i za to vrijeme započinje ponovno upotreba gašenog vapna. Hidrauličko vezivo počinje se ponovno koristiti tek krajem 18. stoljeća razvojem Portland cementa. Portland cement je fini praškasti materijal, dobiven pečenjem minerala vapnenca i gline na visokim temperaturama [3].

Razvoj započinje 1756. godine kada John Smeaton eksperimentira s kombinacijama različitih vapnenaca i aditiva, uključujući i pucolane za gradnju svjetionika, danas poznatog kao Smeatonov toranj ili Svjetionik Eddystone. Istražujući najbolje materijale za tako zahtjevan zadatak, otkrio je da je za morski okoliš najbolji materijal vapno iz vapnenca u Južnom Walesu zbog visokog sadržaja gline. Takav materijal pokazao se najboljim za očvršćivanje u vodi, a usput nudi i vrhunsku otpornost [2].

Materijal je izgledom podsjećao na kamen u okolici mjesta Portland u Engleskoj po kojem je i dobio naziv portland cement. Joseph Aspdin je, 1824. godine patentirao prvi portland cement koji je zapravo poboljšana verzija početnog hidrauličnog cementa. Nadograđivanjem Aspdinovog recepta dobiven je cement koji se i danas koristi [3].

Jedna od poznatijih svjetskih znamenitosti poznata po dugotrajnoj očuvanosti betonske strukture je Caesarea Maritima (Slika 1), grad izgrađen u čast kralju Herodu Velikom. Bitna značajka ovog grada je luka koja je zaštićena masivnim lukobranom izvedenog od ogromnih stijena i betona. U trenutku dovršetka radova, luka se smatrala najvećom umjetno napravljenom lukom te se smatra jednim od najznačajnijih primjera rimskog inženjerstva. Istraživanje znanstvenika koji su proučavali rimski beton za izgradnju podvodnih građevina, otkrilo je da je njegova trajnost posljedica rijetke kemijske reakcije koja pozitivno utječe na trajnost konstrukcije. Ta kemijska reakcija, poznatija je kao pucolanska reakcija odnosno reakcija koja nastaje pri dodavanju vulkanskog pepela u smjesu. Rimski znanstvenici su otkrili proces koji uključuje interakciju vulkanskog pepela, vode i stijene, odnosno primijetili su da čim mješavina dođe u dodir s valovima i bude potopljena postaje čvrsta kamena masa koja svakim danom sve više i više očvršćava [4].



Slika 1. Nekadašnji izgled Caesarea Maritime [4]

Slike 2 i 3 prikazuju današnji izgled Caesara Maritime, odnosno kako danas izgledaju preostali dijelovi betonskih konstrukcija.



Slika 2. Caesarea Maritima danas [5]



Slika 3. Caesarea Maritima danas [5]

Uobičajeno je da suvremene cementne smjese s vremenom erodiraju, osobito kada dođu u dodir s morskom vodom, ali kombinacijom vulkanskog pepela, vapna, morske vode i minerala aluminij tobermorit, Rimljani su stvorili mješavinu koja se odupire tim procesima. Budući da morska voda godinama neprestano udara u betonsku konstrukciju, mješavina s vulkanskim pepelom omogućava betonu da razvije otpornost i spriječi širenje pukotina.

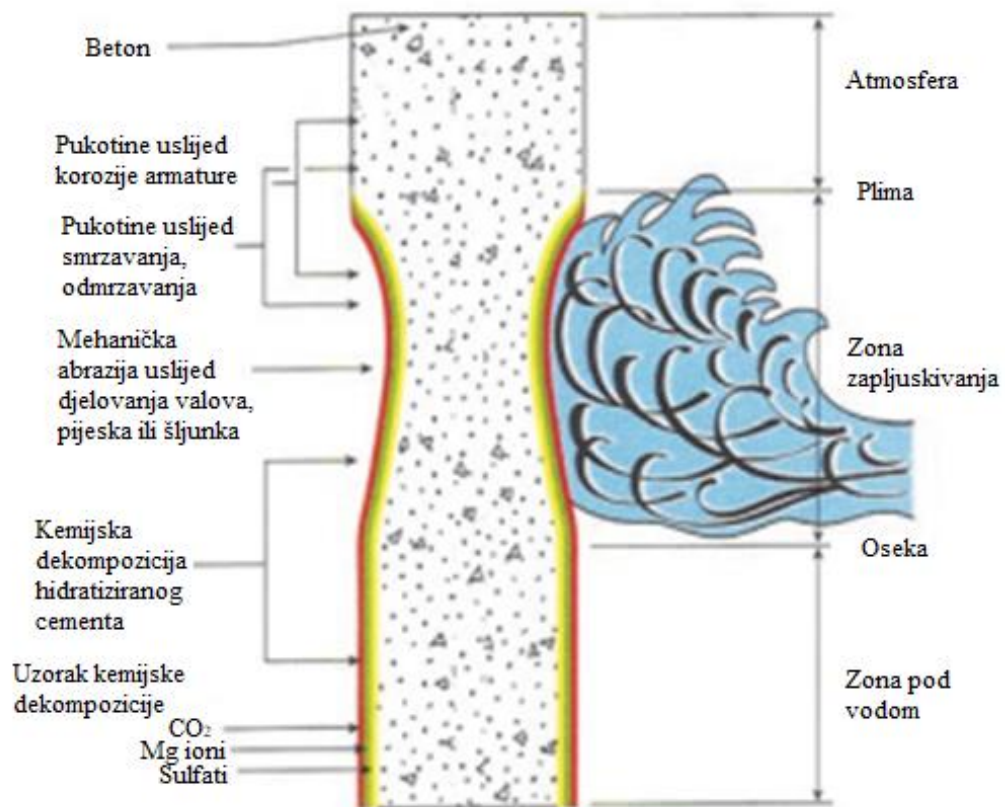
Poznato je i da su građevine antičkog svijeta poput egipatskih piramida i grčkih spomenika nadživjele svoje tvorce tisućama godina, što ukazuje na to da je Rimski beton izuzetno kvalitetan i čvrst materijal koji može ostati trajan čak i kada je izložen agresivnom okolišu poput morskog okruženja.

3. UTJECAJ MORA NA BETONSKE KONSTRUKCIJE

Morski okoliš se smatra jednim od agresivnijih i kompleksnijih okoliša za izgradnju betonskih konstrukcija [6]. Konstrukcije u moru i u blizini mora izložene su djelovanju različitih fizikalno-kemijskih procesa. Posljedica tih procesa je degradacija mikrostrukture betona što znatno smanjuje vijek trajanja konstrukcije, ali i razna druga kemijska i mehanička oštećenja.

Budući da morska voda sadrži velike količine otopljenih soli, ugljičnog dioksida, sulfata i kisika, takav kemijski sastav je glavni razlog agresivnosti morskog okoliša te dovodi do propadanja betona. Propadanju betona doprinose otopljene soli od kojih uglavnom natrijev klorid, a osim toga propadanje može biti posljedica djelovanja kemijske korozije nastale djelovanjem sulfatnih iona, iona magnezija i kiselina koje su prisutne u moru.

Kada se betonska konstrukcija nalazi u morskoj vodi, tada je najpogođenije područje konstrukcije znatno iznad razine visoke vode. Područje između niskog i visokog vodostaja je manje pogođeno, dok je područje koje je kontinuirano potopljeno pod morskom vodom najmanje pogođeno. Razlog tome je da kada morska voda nasilno dođe u kontakt s područjem iznad visoke vode uslijed djelovanja valova, nešto slane vode se taloži u betonskim porama. Kada se ovo područje osuši, voda će se kristalizirati u čestice soli i dolazi do narušavanja betona. Slično, kada se voda u betonskim porama pusti da se smrzne u hladnoj klimi, beton će se proširiti i izgubiti svoju trajnost. Utjecaj morske vode na konstrukciju prikazan je na Slici 4 [6].



Slika 4. Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju [6]

Ranija iskustva pokazuju da se najteži napad na beton javlja neposredno iznad razine visoke voda tj. zona zapljuskivanja. Dio konstrukcije između najveće plime i najniže oseke manje su zahvaćeni kao i dijelovi ispod koji su kontinuirano uronjeni. Zonu zapljuskivanja karakterizira stalni kontakt s morskom vodom koja sadrži znatnu količinu ugljičnog dioksida, erozijski učinak prskanja slane vode, temperaturni gradijent te djelovanje valova u prisutnosti atmosferskog O_2 i CO_2 plina [7]. U zoni zapljuskivanja, betonska konstrukcija izložena je naizmjeničnom vlaženju i sušenju tijekom kojeg čista voda isparava dok sulfati ostaju na konstrukciju u obliku kristala soli. Ti kristali ponovno hidratiziraju i rastu nakon naknadnog vlaženja i time vrše ekspanziju sila na okolni stvrdnuti beton. Do takvog progresivnog površinskog trošenja dolazi kada je temperatura visoka. U Tablici 1 prikazane su vrste oštećenja razdvojene po zonama morskog okoliša.

Tablica 1. Vrste oštećenja konstrukcije u različitim zonama morskog okoliša [8]

OPIS ZONE	VRSTA OŠTEĆENJA
Atmosferska zona – gdje se dijelovi konstrukcije nalaze iznad najviše razine plime ili zone zapljuskivanja	Fizikalna i kemijska
Zona zapljuskivanja – dijelovi konstrukcije koji se nalaze između najveće plime i najniže oseke	Fizikalna, kemijska i mehanička
Potopljena zona – dijelovi konstrukcije stalno uronjeni u morsku vodu	Fizikalna i kemijska

3.1. Degradacija strukture betona

Beton izložen različitim klimatskim uvjetima dolazi u kontakt s raznim agresivnim medijima koji značajno mogu utjecati na trajnost konstrukcije, njenu stabilnost i sigurnost. Osnovni procesi degradacije odnosno propadanja betona nastupaju tijekom dužeg izlaganja konstrukcije morskoj vodi, a javljaju se kao rezultat djelovanja više kemijskih reakcija istovremeno. Do degradacije dolazi prilikom prodora tvari i fluida iz okoline kroz poroznu strukturu betona tijekom hidratacije, očvršćivanja, ali i tijekom cijelog uporabnog vijeka te uslijed promjena temperature i vlažnosti pri čemu se stvaraju naprezanja unutar betona i nastaju pukotine. Konstrukcija u morskom okolišu izložena je različitim fizikalnim, biološkim i kemijskim procesima između klorida i vegetacije mora s česticama cementa, ali može doći i do mehaničkih oštećenja. Takvi procesi uzrokuju oštećenja betonske strukture i koroziju armature te tako smanjuju trajnost same konstrukcije [9].

Na Slici 5 prikazan je terminal za rasuti teret Podbok u Bakru. Uočljiva su znatna oštećenja jednog od glavnih nosača uslijed korozije armaturnih šipki. Također, zaštitni sloj betona je otpao tijekom vremena što je dodatno smanjilo nosivost [10].



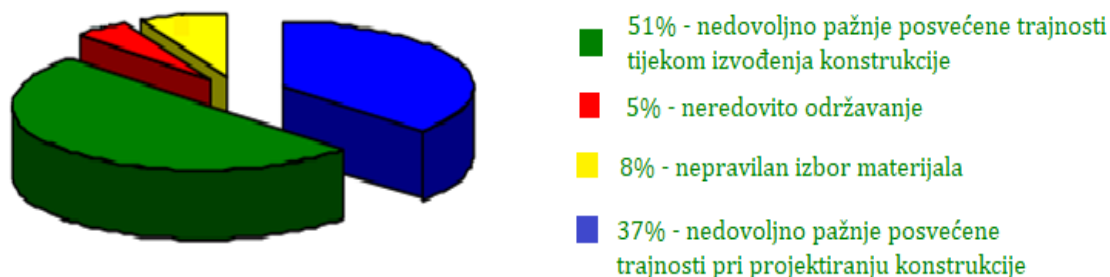
Slika 5. Vrlo jako oštećenje terminala Podbok u Bakru [10]

Neka od karakterističnih oštećenja konstrukcije u morskom okolišu prema kojima se određuje stupanj oštećenja betona uslijed korozije prikazani su na Slici 6 [3].



Slika 6. Stupnjevi degradacije betona uslijed korozije (od I do IV) [3]

Do oštećivanja betonskih konstrukcija dolazi ponajviše zbog nedovoljno pažnje posvećene trajnosti pri projektiranju, ali i tijekom izvođenja radova. Uz nedovoljno posvećene pažnje, tu je i nepravilan izbor materijala te neredovito i neprikladno održavanje. Uzroci oštećivanja konstrukcija prikazani su na Slici 7 [11].



Slika 7. Uzroci preranog oštećivanja konstrukcija [12]

3.2. Fizikalni mehanizmi degradacije

Kod betonskih konstrukcija, fizikalni mehanizmi degradacije dijele se na dvije osnovne vrste: ekstremne temperature (smrzavanja i odmrzavanje, požar) i volumne promjene uslijed temperaturne razlike, korozije armature, pritiska kristala soli [3]. Posljedica navedenih oštećenja betona su odlamanje zaštitnog sloja (Slika 8), ljuštenje betona, pukotine, te degradacija i dotrajavanje same strukture betona. Kod konstrukcija u morskom okruženju najčešće dolazi do korozije armature i ekstremnih temperatura [13].

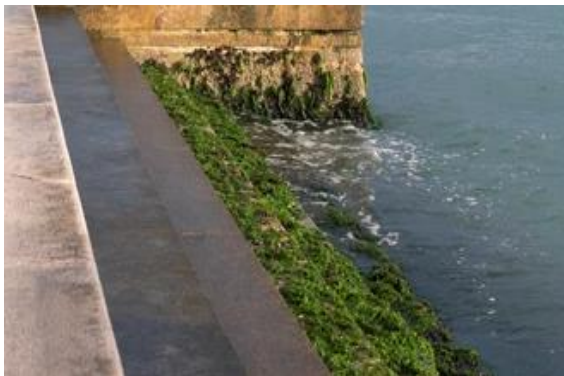


Slika 8. Odlamanje zaštitnog sloja betona [13]

3.3. Biološki mehanizmi degradacije – biopropadanje

Biopropadanje betona je dezintegracija materijala uzrokovana biogenim djelovanjem te se u većini slučajeva povezuje s mikroorganizmima poput bakterija, gljiva, algi, lišajeva. Dugotrajnim istraživanjem zaključilo se da se propadanje betona može povezati i s naseljavanjem makroskopskih organizama kojima pripadaju školjkaši, mekušci i ljuskare. U zonama vlaženja i sušenja, na površini betonske konstrukcije uobičajeno da se pojave lišajevi i gljivice jer im nije potrebno puno vlage. Kod konstrukcija koje su kontinuirano uronjene u more, u nastalim udubljenjima u betonu dolazi do razvoja algi (Slika 9). Organizmi poput školjki imaju štetan utjecaj na beton budući da buše površinu betona i prodiru u dublje dijelove hraneći se tvarima iz betona te se tako uništava zaštitni sloj betona (Slika 10) [3].

Životinjski i biljni svijet razvija se na neutraliziranoj površini betona odnosno kada je $\text{pH} < 7$, a do neutralizacije površine dolazi kada beton napadne korozija. Najbujnija vegetacija razvit će se pri najagresivnoj koroziji u zoni plime i oseke. Svaka vrsta vegetacije koja se nalazi u moru, usporava proces korozije betona i štiti njegovu površinu.



Slika 9. Razvoj algi na betonskim stubama [13]



Slika 10. Školjke na površini betona [13]

3.4. Mehanički mehanizmi degradacije

Mehaničkim oštećenjima smatraju se iznenadni udarci u konstrukciju, kavitacija ili trošenje, erozija, kristalizacija soli, preopterećenje, pukotine, progibi, te lomovi. Udarce u konstrukciju koja se nalazi ispod vode ili djelomično u vodi u većini slučajeva izazivaju brodovi, ali je moguće i da jak vjetar ošteti konstrukciju. Pri jačem udarcu i pri znatnom preopterećenju, konstrukcija gubi mehaničku otpornost i stabilnost prilikom čega može doći do urušavanja same konstrukcije ili njezinog dijela [6].

Djelovanjem valova na konstrukciju dolazi do oštećivanja betona erozijom i kavitacijom što je karakteristično za topla mora poput Jadranskog. U hladnim morima i nemirnim vodama gdje se može očekivati i pojava leda dolazi do oštećenja površine betona morskom erozijom odnosno abrazijom (Slika 11). Abrazija je proces u kojem vodni tok pronosi velike količine šljunka i pijeska do konstrukcije odnosno stvaraju se oštećenja prilikom udara čvrstih čestica u betonsku površinu.



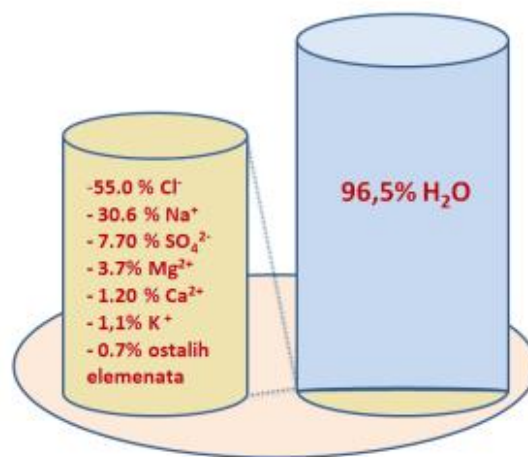
Slika 11. Abrazija površine betona (3 milimetra/godina) [13]

Tijekom vlaženja i sušenja betona, soli iz mora ulaze duboko u pore betona, tijekom kristalizacije povećavaju volumen i tako izazivaju dodatni pritisak u cementnoj matrici betona [14]. Kristalizacijom soli povećava se i naprezanje, a ako naprezanje prekorači vlačnu čvrstoću betona dolazi do pojave pukotina unutar strukture betona.

3.5. Kemijski mehanizmi degradacije

Poznato je da je kemijski sastav morske vode iznimno agresivan za betonske konstrukcije budući da sadrži znatne količine otopljenih soli, kisika, ugljičnog dioksida i sulfata (Slika 12). Iako je ugljični dioksid zastupljen u manjoj količini, pri djelovanju skupa sa solima magnezija može doći do kemijske reakcije sa sastojcima hidratacije iz betona te tako štetno djelovati na konstrukciju [3].

Pri normalnim uvjetima beton je prirodno zaštićen aragonitom (CaCO_3) koji je ujedno i najstabilniji mineral betona. Problem nastaje u zoni zapljuskivanja gdje zaštita aragonitom nije moguća jer valovi prilikom zapljuskivanja ispiru aragonit.



Slika 12. Sastav morske vode [14]

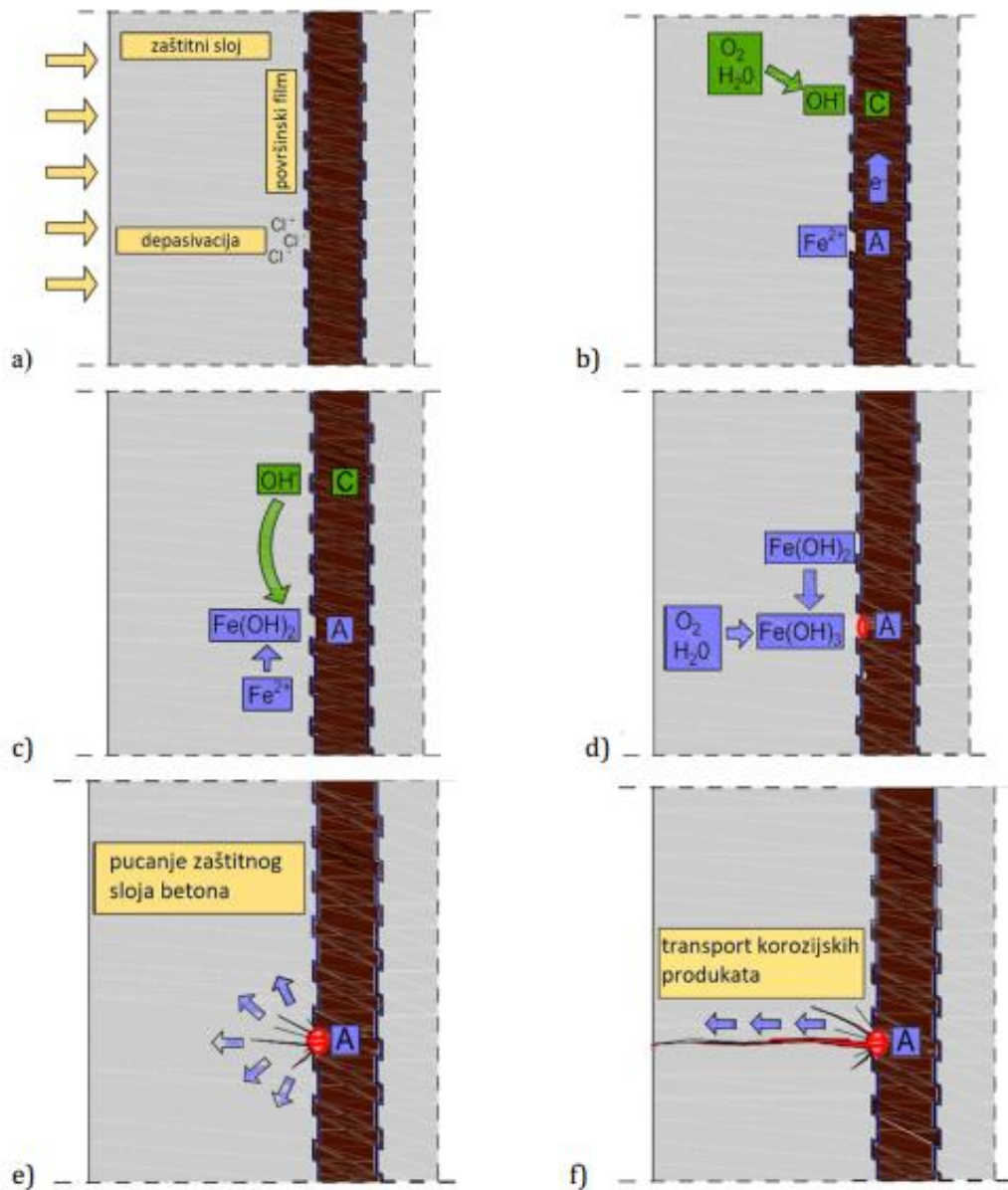
Veliki sadržaj magnezijevog sulfata u moru dovodi do pojave sulfatne korozije betona, prilikom koje sulfatni ioni reagiraju s ionima hidratizirane cementne matrice što rezultira nastankom gipsa ili etringita [15]. Kristali etringita uzrokuju povećanje volumena betona što izaziva tlakove u cementnoj matrici ili na sučelju (između paste i agregata) te tako nastaju pukotine u betonu ili se gubi veza između cementnog kamena i agregata.

Na agresivan utjecaj morskog okoliša utječu salinitet mora, jak vjetar koji podiže morsku pjenu pri čemu nanosi kloride na dijelove konstrukcije, visoke temperature koje doprinose ubrzanju prodoru klorida u beton te na kraju vlažnost zraka.

4. MEHANIZMI KOROZIJE BETONA U MORU

4.1. Općenito o koroziji

Pojava korozije je glavni uzrok propadanja armiranobetonskih konstrukcija te samim time predstavlja najveći problem pri projektiranju konstrukcija. Od pojave korozije najviše su ugrožene konstrukcije u morskom okolišu i okolici. Proces korozije uzrokuje direktno smanjenje poprečnog presjeka šipke armature što utječe na duktilnost konstrukcije i smanjenje vlačne čvrstoće [9].



Slika 13. Ilustracija korozije u armiranom betonu [16]

Slika 13 predstavlja ilustrirani prikaz procesa korozije. Proces započinje ulaskom kisika, vode, topline i klorida u vanjski sloj betona te despasivizacijom zaštitnog sloja armature. Prodor kisika djelomično se može kontrolirati manjom propusnošću zaštitnog sloja betona. Zatim nastupa oksidacija željeza (anoda) i formiranje hidroksilnih iona (katoda) te formiranje željeznog (II) i (III) hidroksida odnosno crvene hrđe. Posljedica toga je pucanje zaštitnog sloja betona te odlamanje njegovih dijelova. Jednom kada je zaštitni sloj popucao, agresivne tvari imaju slobodan prolazak do strukture betona. Za proces korozije mora postojati korozijska struja koja se dobiva kretanjem elektrona s anode prema katodi. Prekidom ili zaustavljanjem struje prekida se i korozija. Do prekida korozije može doći i ukoliko nema dovoljne količine kisika za reakcije na katodi [16].

Početak procesa korozije ovisi o brzini kretanja vode uz beton, veličini i količini pora u betonu i o utjecaju zraka te s obzirom na naveden faktore, razlikujemo dva slučaja pojave korozije: kada je konstrukcija iznad površine mora i kada je konstrukcija uronjena u more.

Ukoliko se konstrukcija nalazi iznad površine mora, izložena je plimi i oseki te zapljuskivanju valova što uzrokuje naizmjeničnu promjenu pritiska vode na konstrukciju i izmjenično vlaženje i sušenje, odnosno ulazak i izlazak vode iz kapilara. Izmjenično vlaženje i sušenje dovodi do izluživanja vapna iz betona, povećava se volumen kapilarnih pora kroz koje je prodiru soli te dolazi do razvoja sulfatne korozije. Konstrukcija iznad površine mora, izložena je također i atmosferskim utjecajima, odnosno na nju djeluje kišnica. Kišnica sadrži ugljični dioksid, a posljedica toga je karbonizacija betona i karbonatna korozija.

Konstrukcije uronjene u more izložene su razvoju sulfatne korozije i korozije izluživanja. Zbog velikog sadržaja kalcijevog klorida ne dolazi do stvaranja novih spojeva, a razvoj sulfatne korozije je usporen te je tako i samo razaranje betona sporije, a postepenim usporavanjem se može i potpuno zaustaviti. Budući da se vapno brzo topli u morskoj vodi, moguć je razvoj korozije izluživanja koji je također usporen pa se u konačnici i ona može zaustaviti.

4.1.1. Sulfatna korozija

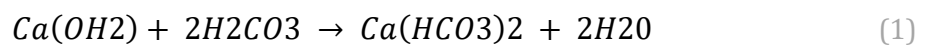
Prodor sulfata u beton i reakcija sa sastojcima betona dovodi do ekspanzije betona, formiranja pukotina, znatnim gubitkom čvrstoće betona, ljuštenja i odvajanja zaštitnog sloja. Sulfatna korozija često se javlja u morskom okolišu izazvana magnezijevim sulaftom iz morske vode.

Pri procesu sulfatne korozije mogu se javiti dvije reakcije u isto vrijeme. U prvoj reakciji sudjeluje hidroaluminat iz cementa uz vapno što rezultira nastankom etringita. Dobiveni etringit zbog velike količine vode ima tri puta veći volumen od spojeva koji su ušli u proces [3]. U isto vrijeme, vrši se druga reakcija samo s vapnom pri čemu nastaje sadra. Povećanje volumena sadre je manje nego pri prvoj reakciji, ali je topljiva u vodi pa se može izlužiti iz betona i stvoriti novi etringit, dok dio sadre ostaje u betonu i ne može stvarati etringit.

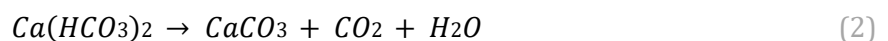
4.1.2. Karbonatna korozija

Karbonatna korozija može nastati u dva slučaja koja se vrše istodobno. Ako u vodi prevladava HCO_3 , obe reakcije završavaju kada se ispune veće kapilarne pore i šupljine u betonu. Ukoliko u vodi prevladava CO_2 , dolazi do kemijskog razaranja betona [3].

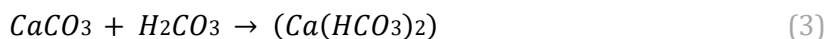
Prvi slučaj je kada kišnica, odnosno ugljična kiselina koja sadrži CO_2 dolazi u kontakt s betonom. U tom slučaju nastaje reakcija s vapnom iz betona, točnije kalcijev bikarbonat:



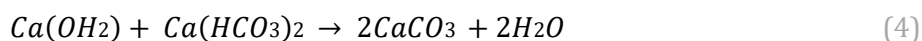
Dobiveni topljivi kalcijev bikarbonat ($\text{Ca(HCO}_3\text{)}_2$) može se vodom odnositi sa površine betona ili procijediti kroz beton, pri čemu nastaje kalcijev karbonat (CaCO_3). Posljedica toga su bijele nakupine na površini betona, a kemijska formula glasi:



Drugi slučaj je kada je beton u kontaktu s vodom karbonatnog porijekla. Ugljična kiselina će prvo reagirati s karbonatima, pri čemu ostaje kalcijev bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$):

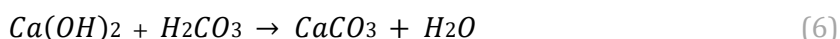
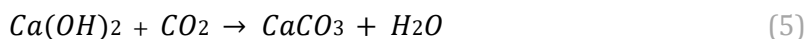


Kada takva voda oplakuje beton nastaje kalcijev karbonat (CaCO_3), koji ispunjava pore, kristalizira u njima i time smanjuje propusnost betona:



4.1.3. Karbonatizacija betona

Karbonatizacija predstavlja reakciju vapna $\text{Ca}(\text{OH})_2$ iz betona s ugljičnim dioksidom CO_2 iz zraka. Ugljični dioksid u pore može ući kao plin (CO_2) ili kiselina (H_2CO_3), a u oba slučaja nastaje kalcijev karbonat CaCO_3 :



Za brži razvoj karbonatizacije povoljno je naizmjenično vlaženje i sušenje betona kako bi pri svakom vlaženju ušla nova količina plina ili kiseline. Sušenje se odvija na površina konstrukcije ukoliko je izložena suncu zbog čega dolazi do ranih oštećenja [3] [16].

4.1.4. Korozija izluživanja

Korozija izluživanja se javlja kada voda koja sadrži manje kalcijevog hidroksida od ugljične kiseline i kalcijevog bikarbonata, oplakuje beton i prodire u pore pod pritiskom, pri čemu izlužuje vapno na površinu ili ga odnosi sa sobom. Izluživanjem vapna također nastaju značajna oštećenja betona. Pri ovoj reakciji izlužuje se svo vapno za razliku od karbonatne korozije kod koje dio vapna ostaje u porama te zbog toga korozija izluživanja napreduje brže od karbonatne korozije [3].

4.2. Korozijska armature u betonu

Armaturene čelične šipke unutar betona obavijene su betonom te su na taj način pasivno zaštićene od korozijske. To se događa u normalnim uvjetima, sve dok beton ima pH vrijednost veću od 12. Na površini čelične šipke formira se željezni oksid u tankom sloju koji je stabilan i nepropustan. Ukoliko dođe do narušavanja uvjeta $pH > 12$, započinje proces korozijske. Produkti korozijske imaju znatno veći volumen od pasivne armature (Tablica 2), a posljedica toga je stvaranje naprezanja u konstrukciji. Ukoliko su naprezanja veća od vlačne čvrstoće betona u konstrukciji nastaju pukotine. Pojava prvih pukotina pogodna je za prodor agresivnih tvari iz morske vode u konstrukciju što ubrzava proces korozijske te dolazi do odlamanja zaštitnog sloja betona. Korozijsku armature je iznimno teško izbjeći i kontrolirati u već izvedenim konstrukcijama stoga pri projektiranju novih konstrukcija pažnju treba posvetiti trajnosti armirano betonskih konstrukcija [3].

Tablica 2. Produkti korozijske i njihovo volumensko povećanje u odnosu na pasivnu armaturu [17]

Produkt korozijske	Željezov oksid	Hematit	Magnetit	Getit	Lepidokrokrit	Akaganeit	Željezov (II) hidroksid	Željezov (III) hidroksid	Hidrirani željezov hidroksid
Formula	FeO	$1/2Fe_2O_3$	$1/3Fe_2O_3$	$\alpha-FeOOH$	$\gamma-FeOOH$	$\beta-FeOOH$	$Fe(OH)_2$	$Fe(OH)_3$	$Fe(OH)_3, 3H_2O$
Povećanje volumena	1,70	2,00	2,10	2,91	3,03	3,48	3,60	4,00	6,15

U morskom okolišu, dva su glavna razloga zbog kojih dolazi do korozijske armature u betonu: smanjivanje pH faktora betona i djelovanje klorida u porama oko armature. Smanjivanje pH faktora nastaje zbog reakcije cementnog hidroksida i ugljičnog dioksida CO_2 . Posljedica te reakcije je karbonizacija koja uništava pasivnu zaštitu oko armaturnih šipki. Također djelovanje visoke koncentracije klorida u porama može narušiti zaštitni sloj.

4.2.1. Korozija armature uslijed karbonizacije

Karbonizacija je kemijska reakcija ugljikovog dioksida i kalcijevog hidroksida uslijed kontakta betona sa vodom ili zrakom (Slika 14). Karbonizacija betona doprinosi stvaranju vode i kalcijevog karbonata, koji je odgovoran za snižavanje pH vrijednosti betona. Svježi beton ima pH 12, dok kao rezultat karbonizacije njegova vrijednost čak pada na 8. Jačina kemijske reakcije ovisi o nekoliko čimbenika: koncentraciji ugljičnog dioksida u zraku, velikoj količini vode u odnosu na sadržaj cementa, kao i poroznost samog betona.



Slika 14. Korozija armature izazvana djelovanjem slane vode [13]

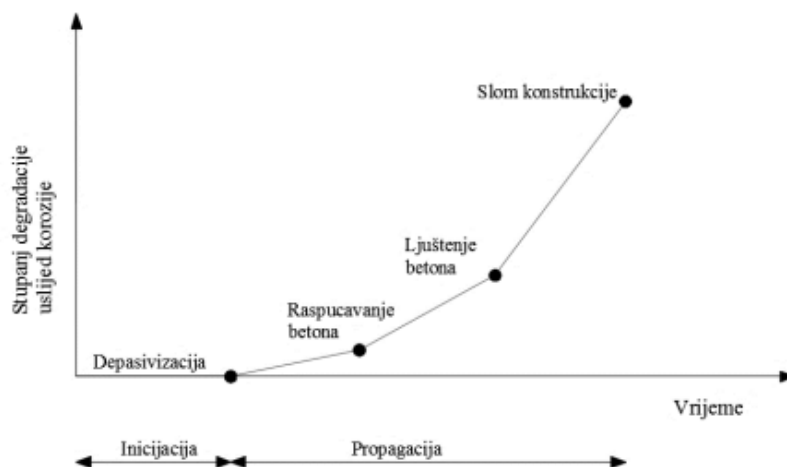
Karbonizacija djeluje pozitivno na beton na način da njezini produkti popunjavaju strukturu betona i time omogućavaju veću nepropusnost. Međutim, ima negativan utjecaj na armaturu u betonu budući da smanjuje pH vrijednosti.

Hoće li doći do korozije armature najviše ovisi o projektiranju konstrukcije, ali i o samom izvođenju. Učinak ugljičnog dioksida postaje jači ako se koristi cement slabije kvalitete. Do korozije armature u betonu ne bi trebalo doći ako se pažnja posveti pravilnom pokrivanju cijele armature. Stoga je važno pravilno zaštititi čelik za armiranje budući da je rizik od korozije znatno manji u odgovarajuće projektiranoj konstrukciji i s dovoljnom debljinom zaštitnog sloja betona.

4.2.2. Korozija armature uslijed djelovanja klorida

Do uništavanja pasivnog zaštitnog sloja armature može doći tijekom prodora klorida iz morske vode u beton, a ono ovisi o količini slobodnih kloridnih iona u odnosu na hidroksidne ione betona. Laboratorijskim ispitivanjem čelika ustanovilo se da pri omjeru manjem od 6 ne dolazi do razaranja pasivne zaštite. Ukoliko je omjer veći od 6, zaštitni sloj se smatra nestabilnim i propusnim pa se tako čelik ne smatra više zaštićenim od korozije. To je približno 0.4% kloridnih iona u odnosu na masu cementa. Kloridni ioni razaraju pasivnu zaštitu, a posljedica toga je znatna razlika elektro-kemijskog potencijala između mjesta na kojem kloridi djeluju i ostalog dijela šipke armature. Na području djelovanja klorida nastaje anoda, dok je katoda neoštećena po cijeloj duljini šipke na kojoj djeluje. Na anodi dolazi do reakcije kloridnih iona sa željezom te tako nastaje željezni klorid (FeCl_3). Ako na željezni klorid djeluje galvanska struja, onda on prelazi u željezni hidroksid koji čini hrđu.

Korozija uslijed djelovanja klorida dijeli se na četiri stupnja koja su prikazana na Slici 15. Prvi stupanj predstavlja razaranje pasivnog zaštitnog sloja uz koroziju armature i smanjenje površine poprečnog presjeka šipki. Zatim je drugi stupanj raspucavanje betona pomoću čega se omogućava jači proces korozije. Treći stupanj je ljuštenje, odnosno odlamanje komada zaštitnog sloja betona te na samom kraju, četvrti stupanj je slom konstrukcije [3].



Slika 15. Stupnjevi degradacije armiranobetonske konstrukcije [18]

4.3. Zaštita od korozije

Kako bi se osigurao projektirani vijek trajanja konstrukcije potrebno je pažnju posvetiti zaštiti armature od korozije. Zaštita ima značajnu ulogu za dugotrajnost konstrukcije pogotovo u agresivnom okolišu kao što je morski. Zaštitom se postiže bolja čvrstoća betona budući da se čestice betona odupiru kristalizacijskom tlaku u porama i veća vodonepropusnost. Neki od postupaka koji povoljno doprinose zaštiti su: pocinčavanje armature prije ugradnje, premazivanje epoksidnom smolom također prije ugradnje, katodna zaštitna, upotreba inhibitora korozije armature. Navedeni postupci su privremena zaštita od korozije što im je ujedno i zajednički nedostatak. Iskustvo je pokazalo da premazi armature s vremenom slabe prionjivost armature i betona i na taj način povećavaju rizik od pojave pukotina, a osim toga i premaz je podložan oštećenjima i koroziji.

Uz zaštitu armature potrebno je zaštititi i beton. Zaštita betona temelji se na izmjeni strukture betona, primjeni zaštitnih i izolacijskih prevlaka. Izmjena strukture betona uključuje se povećanje gustoće, nepropustljivosti i kemijske otpornosti uvođenjem površinski aktivnih sastojaka (glukoza). Zaštiti betona doprinose inhibitori korozije, a njihova učinkovitost ovisi o pH vrijednosti okoline. Najučinkovitijim inhibitorima pokazali su se anodni inhibitori. Općenito najpouzdanijom zaštitom smatra se što deblji i što ujednačeniji zaštitni sloj betona kako ne bi došlo do prodora agresivnih tvari kroz pore.

5. SVOJSTVA I ZAHTJEVI ZA BETON

5.1. Tehnička svojstva betona u morskom okolišu

TPBK propisuje tehnička svojstva za beton koji se ugrađuje, a koja moraju biti specificirana prema normi HRN EN 206-1:2006, te normama specifikacijama za materijale [19]. Tehnička svojstva moraju biti takva da tijekom izvođenja radova, uporabe građevine i održavanja betonske konstrukcije, ona podnese sve utjecaje okoliša, tako da predvidiva djelovanja na građevinu ne prouzroče rušenje građevine ili njezinog dijela, prevelike deformacije, velika oštećenja građevine ili njezinog dijela.

Ukoliko svojstva svježeg betona nisu određena projektom betonske konstrukcije, izvođač ih može sam odrediti, dok svojstva očvrstnalog betona uglavnom budu određena projektom. Uz to, obavezno se mora odrediti razred tlačne čvrstoće, dok se ostala svojstva određuju po potrebi.

5.2. Odrednice o trajnosti u tehničkom propisu za betonske konstrukcije (TPBK)

Trajnost konstrukcije je definirana kao sposobnost da uslijed očekivanog opterećenja iz okoliša tijekom uporabe zadrži zahtijevanu razinu sigurnosti i uporabljivosti te projektirani izgled [11].

Prilikom projektiranja konstrukcija treba imati na umu da sigurnost i uporabivost tijekom vremena trajanja bude takva da nisu potrebni veliki troškovi popravaka i održavanja [20]. Proračun nosivosti i stabilnosti konstrukcija proračunavaju se na temelju principa tehničke mehanike koja je propisana u normama i propisima za projektiranje armiranobetonskih i prednapetih konstrukcija. Trajnost konstrukcije definirana je vdocementnim omjerom, razredom betona, razredom izloženosti, minimalnom količinom cementa, aeriranjem i vremenom potrebnim za njegu betona. Problem kod navedenih zahtijeva je nemogućnost kontrole tijekom izvedbe i nemogućnost uključivanja drugih materijala. Definiranjem razreda izloženosti i ostalih zahtijeva za beton osigurava se dostizanje projektiranog vijeka trajanja.

Trajnost betonske konstrukcije ovisi prvenstveno o kvaliteti betona, konstruiranju pojedinih elemenata i oblikovanju konstrukcije, a trajnost samog betona ovisi o njegovom sastavu, svojstvima, kvaliteti, kontroli pukotina i debljini zaštitnog sloja. Projektirati trajni beton znači isprojektirati beton s malom propusnosti i malim koeficijentom difuzije klorida. Malu propusnost moguće je postići prikladnim vodocementnim omjerom, odgovarajućom njegovom betona i zamjenom cementa materijalom poput silikatne prašine [19].

5.3. Zahtjevi za beton u morskom okolišu

5.3.1. Cement

Za izradu betona koriste se cementi propisani normom HRN EN 197-1 kojom je propisan sastav, svojstva i kriterije cementa opće namjene [21]. Neke od važnih napomena su da cementu u vrećama ili cisternama treba omogućiti odgovarajući transport i skladištenje tako da ne utječu negativno na njegova svojstva. Skladišti se posebno po vrstama i klasama. Cement skladišten duže od tri mjeseca, ne smije se koristiti osim ako ispitivanjima osnovnih svojstava nije drukčije dokazano.

Izbor klase cementa ima značajan utjecaj na trajnost betona, pogotovo u agresivnim uvjetima okoliša. Cement doprinosi većoj kemijskoj otpornosti i zaštiti armature, a uz to određuje pH vrijednost porne vode i veličinu pora u betonu. Pri odabiru vrste i razreda čvrstoće potrebno je uzeti u obzir ograničenja za primjenu cementa koja su dana u normi HRN EN 197-1 (Tablica 3) [9][22].

Tablica 3. Ograničenja za primjenu cementa po razredima izloženosti [9]

Razred izloženosti	Tip cementa koji se ne primjenjuje u betonu u agresivnoj okolini i nepovoljnim uvjetima
XC2, XC3	CEM III/C
XD	CEM IV
XS	CEM V
Svi razredi okoline za elemente betonske konstrukcije s adhezijskim prednapinjanjem	CEM II/AiB-P/Q
	CEM II/AiB-M
	CEM II/AiB-W
	CEM III
	CEM IV
	CEM V

5.3.2. Agregat

Agregat ima značajan utjecaj na koroziju armature u betonu samo ako je značajno porozan ili sadrži veliku količinu klorida budući da je poroznost cementne paste veća u blizini zrna agregata u odnosu na preostali dio cementne paste. Prilikom projektiranja sastava betona, treba paziti na promjer zrna agregata u zaštitnom sloju betona. Zrno agregata treba biti manje veličine od debljine zaštitnog sloja kako bi prodor klorida kroz beton bio otežan. Vrsta agregata, granulometrija i razred agregata odabire se ovisno o izvedbi radova, krajnjoj uporabi betona, uvjetima okoliša u kojima će beton biti izložen i sve uvjete kojima će agregat biti izložen [20]. Agregat koji se koristi za pripremu betona mora biti razvrstan u najmanje tri frakcije koje se transportiraju i skladište odvojeno kako ne bi došlo do prljanja i miješanja [9].

5.3.3. Razred izloženosti

Tehnički propis za betonske konstrukcije (TPBK) se po pitanju trajnosti konstrukcija oslanja na normu HRN EN 206-1:2006 [23] u kojoj su dani razredi izloženosti ovisno o okolišu u kojem se konstrukcija nalazi (Tablica 4). Uz razred izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi prema kojima treba projektirati sastav betona (tlačna čvrstoća, vodocementni omjer, zaštitni sloj betona, sadržaj pora) [9].

Tablica 4. Razredi izloženosti prema normi HRN EN 206-1:2006 [23]

Razred	Opis okoliša	Primjeri moguće pojave klasa izloženosti
1 Nema rizika korozije		
X0	Bez rizika djelovanja	Elementi bez armature u neagresivnom okolišu, npr. nearmirani temelji koji nisu izloženi smrzavanju i odmrzavanju
2 Korozija uzrokovana karbonatizacijom		
Kada je beton s armaturom ili drugim ugrađenim metalom izložen zraku i vlazi:		
XC1	Suho ili trajno vlažno	Elementi u prostorijama obične vlažnosti zraka (kuhinja, kupaona), elementi stalno uronjeni u vodu
XC2	Vlažno, rijetko suho	Dijelovi spremnika za vodu, dijelovi temelja
XC3	Umjerenjena vlažnost	Dijelovi do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup; prostorije s atmosferom visoke vlažnosti (javne kuhinje, kupališta, praonice...)
XC4	Cikličko vlažno i suho	Vanjski betonski elementi izravno izloženi kiši, elementi u području kvašenja vodom
3 Korozija uzrokovana kloridima koji nisu iz mora		
Kada je beton, koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni materijal, u dodiru s vodom koja sadrži kloride, uključujući soli za odmrzavanje, koje nisu iz mora:		
XD1	Umjerenjena vlažnost	Područja prskanja vode s prometnih površina, privatne garaže
XD2	Vlažno, rijetko suho	Bazeni za plivanje i kupališta, elementi izloženi industrijskim vodama koje sadrže kloride
XD3	Cikličko vlažno i suho	Elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje
4 Korozija uzrokovana kloridima iz morske vode		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal u dodiru s kloridima iz morske vode ili solima iz mora nanošenim zrakom:		
XS1	Izložen solima iz zraka, ali ne u izravnom dodiru s morskom vodom	Vanjski elementi u blizini obale
XS2	Stalno uronjeno	Stalno uronjeni elementi u lukama
XS3	U zonama plime i oseke i prskanja vode	Zidovi lukobrana i molova
5 Korozija uzrokovana smrzavanjem i odmrzavanjem sa ili bez sredstava za odmrzavanje		
Kada je beton izložen značajnom djelovanju smrzavanja i odmrzavanja u vlažnom stanju, klase izloženosti treba klasificirati:		
XF1	Umjerenjeno zasićenje vodom, bez sredstava za odmrzavanje	Vanjski elementi
XF2	Umjerenjeno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda	Područja prskanja vode s prometnih površina, sa sredstvom za odleđivanje, područje prskanja morskom vodom
XF3	Jako zasićenje vodom, bez sredstava za odmrzavanje	Otvoreni spremnici za vodu, elementi u području kvašenja vodom
XF4	Jako zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morskom vodom	Prometne površine tretirane sredstvima za odmrzavanje, parkirališne ploče bez zaštitnog sloja, elementi u području plime
6 Kemijska korozija		
Kada je beton izložen kemijskom djelovanju koji se javlja iz prirodnog tla i podzemne vode, klase izloženosti treba klasificirati:		
XA1	Slabo kemijski agresivna okolina	Spremnici u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije, spremnici tekućih umjetnih gnojiva
XA2	Umjerenjeno kemijski agresivna okolina	Betonski elementi u dodiru s morskom vodom, elementi u agresivnom tlu
XA3	Jako kemijski agresivna okolina	Kemijski agresivne vode u postrojenjima za tretiranje otpadnih voda
7 Beton izložen habanju		
XM1	Umjerenjeno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu vozila s pneumatskim gumama na kotačima
XM2	Znatno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viličara s pneumatskim ili tvrdim gumama na kotačima
XM3	Ekstremno habanje	Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu viličara s pneumatskim gumama ili čeličnim kotačima, hidrauličke konstrukcije u uzburkanim vodama (bazeni za destilaciju)

5.3.4. Vodocementni omjer

Vodocementni omjer kao što mu i naziv kaže, predstavlja omjer mase vode i mase cementa u betonskoj smjesi [9]. Vrijednost omjera ima utjecaj na sadržaj pora i koeficijent difuzije, odnosno što je manji vodocementni omjer manja je i poroznost betona, a uz to je i prodor klorida sporiji te bolja korozijska pasivnost armature u betonu. Vodocementni omjer je jedan od osnovnih parametara koji utječe na svojstva cementne paste [3].

Pri projektiranju sastava betona treba obratiti pažnju na ograničenja koja su dana normom HRN EN 197-1:2005, a prikazana su u Tablici 5.

Tablica 5. Najveće dopuštene vrijednosti v/c omjera [24]

Uvjeti u kojim se nalazi konstrukcija	Armirano betonska konstrukcija	Betonska i slaboarmirana
Zona promjenjivog nivoa vode:		
a) u teškim klimatskim uvjetima	0,50	0,55
b) u umjerenim i blagim klimatskim uvjetima	0,55	0,60
Dijelovi konstr. koji se nalaze stalno pod vodom:		
a) pod pritiskom	0,55	0,60
b) bez pritiska	0,60	0,55
Dijelovi konstrukcije koji su povremeno u kontaktu s vodom	0,65	0,70

5.3.5. Zaštitni sloj betona

Jedna od najbitnijih mjera zaštite od korozije armature te samim time i veće trajnosti konstrukcije je osiguravanje dovoljno debljine zaštitnog sloja betona. Minimalna debljina zaštitnog sloja određuje se s obzirom na uvjete okoliša, razred izloženosti konstrukcije i načinu armiranja pojedinih elemenata. U Tablici 6 prikazane su najmanje vrijednosti zaštitnog sloja. Za osiguranje trajnosti konstrukcije, C_{min} mora biti jednak ili veći od vrijednosti danih u tablici. Vrijednosti se prilagođavaju u ovisnosti o projektiranom vijeku uporabe, razredu čvrstoće betona, elementu pločaste geometrije i o posebnoj kontroli kvalitete. Preporučeni razred konstrukcije je S4, a uporabni vijek konstrukcije 50 godina [23].

Tablica 6. Najmanja debljina zaštitnog sloja prema kriteriju trajnosti čelične armature (mm) [23]

Najmanja debljina zaštitnog sloja betona prema EN 1992-1-1							
Razred konstrukcije	Razredi izloženosti						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD2/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Debljina zaštitnog sloja određena je izrazom [22]:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (7)$$

C_{min} - najmanja debljina zaštitnog sloja preko koje se osigurava prijenos sila, zaštita od požara i zaštita čelika od korozije.

ΔC_{dev} - vrijednost dopuštenog odstupanja debljine zaštitnog sloja, uobičajeno iznosi 10 mm.

Najmanja debljina zaštitnog sloja određena maksimalnom vrijednosti sljedećih izraza [22]:

$$C_{min} = \max \begin{cases} C_{min, b} \\ C_{min, dur} + \Delta C_{dur, \gamma} + \Delta C_{dur, st} + \Delta C_{dur, add} \\ 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

gdje je:

$C_{min, b}$ – najmanji zaštitni sloj s obzirom na prionjivost betona i armature

$C_{min, dur}$ – najmanji zaštitni sloj s obzirom na uvjete okoliša

$\Delta C_{dur, \gamma}$ – dodatni sloj sigurnosti

$\Delta C_{dur, st}$ – smanjenje zaštitnog sloja za nehrđajući čelik

$\Delta C_{dur, add}$ – smanjenje zaštitnog sloja zbog dodatne zaštite

5.3.6. Pukotine

Pukotine se smatraju najbitnijim elementom trajnosti konstrukcije, a proračunavaju se u sklopu proračuna uporabljivosti. Proračun se temelji na provjeri graničnog stanja oštećenja prema kojem proračunska vrijednost širine pukotine w_k dobivena iz proračuna gdje su primijenjeni parcijalni koeficijenti sigurnosti treba biti manja ili jednaka preporučenoj graničnoj vrijednosti w_{max} koje su prikazane u Tablici 7 [3].

Tablica 7. Preporučene granične vrijednosti širine pukotina betona w_{max} [3]

Razred izloženosti	Armirani i prednapeti elementi s neprijanjajućim nategama w_{max}	Prednapeti elementi s prijanjajućim nategama w_{max}	
	Nazovi-stalna kombinacija opterećenja	Česta kombinacija opterećenja	
X0	0,4	0,2	
XC1			
XC2	0,3	0,2 + kontrola rastlačenja pri nazovi-stalnoj kombinaciji	kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku
XC3			
XC4		kontrola rastlačenja	
XD1			
XD2			
XD3	ne zahtijevaju se posebne mjere zaštite		
XS1	0,3	kontrola rastlačenja	kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku
XS2			
XS3			

5.3.7. Sadržaj klorida u betonu

Sadržaj klorida izražava se kao postotak kloridnih iona u odnosu na masu cementa. Kloridni ioni u beton dopijevaju iz sastavnih materijala, odnosno agregata i vode, ali i iz okoline, uslijed djelovanja mora. Kako bi se odredila točna količina klorida treba utvrditi ukupan doprinos sastavnih materijala u betonu. Tablica 8 prikazuje maksimalnu dozvoljenu količinu klorida u betonu. U slučaju kada je sadržaj kloridnih iona veći od kritične koncentracije dolazi do razaranja zaštitnog sloja i početka procesa korozije [19].

Tablica 8. Maksimalni sadržaj kloridnih iona u betonu [20]

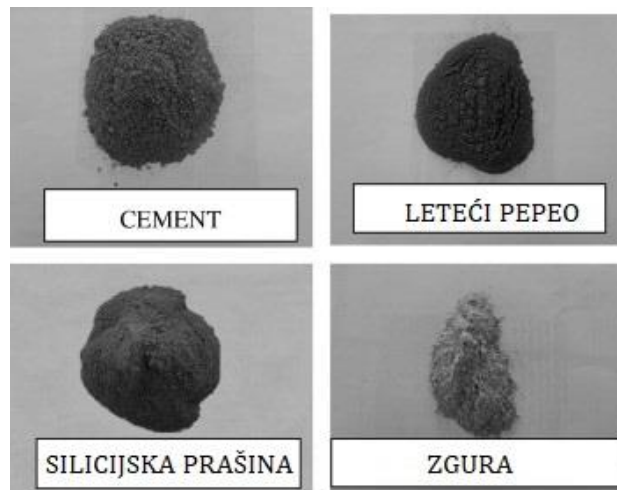
Uporaba betona	Razred sadržaja klorida (a)	Maksimalna količina Cl na masu cementa (b)
Ne sadrži čeličnu armaturu ni drugi ugrađeni metal osim nehrđajućih vodilica	Cl 1,0	1,00%
Sadrži čeličnu armaturu ili drugi ugrađeni metal	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
Sadrži čelik za prednapinjanje	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%
(a) u određenim uvjetima uporabe betona izbor razreda ovisi o odredbama važećim na mjestu uporabe betona		
(b) pri rabljenju mineralnih dodataka tipa II koji su uključeni u proračun količine cementa, sadržaj klorida se izražava kao postotak kloridnih iona na masu cementa plus ukupna količina uračunatog mineralnog dodatka		

6. DODACI BETONU KAO ZAŠTITA OD AGRESIVNOG OKOLIŠA

Dodaci betonu definirani su kao tvari koje se dodaju u beton tijekom miješanja radi poboljšanja ili promjene svojstava. Dijele se na mineralne i kemijske dodatke.

6.1. Mineralni dodaci

Mineralni dodaci su materijali mineralnog podrijetla, deklarirani kao fini praškasti materijal koji se uobičajeno dodaje u udjelu od 5-20% mase cementa. Pod mineralne dodatke ubrajaju se metakaolin, zgura, kvarcno brašno, pucolani poput letećeg pepela, silicijske prašine (Slika 16) [25].



Slika 16. Mineralni dodaci [26]

Metakaolin

Metakaolin je bijeli praškasti materijal pomoću kojeg se postižu bolja svojstva betona. Koristi se za betone visoke čvrstoće i povećane trajnosti. Sastoji se od silicijevog dioksida i aluminijskog oksida te kao i drugi mineralni dodaci s kalcijevim hidroksidom stvara C-S-H gel koji povećava gustoću betona i smanjuje poroznost. U betonu djeluje kao punilo koje prodire u šupljine između čestica cementa što rezultira nepropusnijim betonom.

Zgura visokih peći

Zgura visokih peći ili granulirana zgura je otpadni materijal pri proizvodnji sirovog željeza u visokim pećima. Okrugli oblik čestica omogućuje bolju obradljivost betona. Poznato je da zgura sadrži iste okside kao portland cementni klinker te da hidratacija zgure započinje tek kad cementna pasta postane dovoljno lužnata za proces hidratacije. Dodavanjem zgure u beton povećava se čvrstoća betona, a smanjuje se toplina hidratacije što znači da se zgura može koristiti za proizvodnju betona visokih ili ranih čvrstoća [27].

Leteći pepeo

Leteći pepeo je fini materijal koji se dobiva spaljivanjem mljevenog ugljena. Tijekom spaljivanja ugljena u termoelektranama, ugljen prolazi kroz peći visokih temperatura pri kojima se tale mineralne nečistoće poput gline i kvarca te se prenosi u područja s manjim temperaturama. Pri manjim temperaturama, nečistoće očvršćuju u okrugle čestice stakla. Većina finih čestica koje ostaju lebdjeti sa strujom dimnih plinova nazivaju se leteći pepeo.

Čestice letećeg pepela su sferičnog oblika što utječe na lakšu obradivost betona, odnosno dodavanjem letećeg pepela u beton smanjuje se potreba za vodom i smanjuje se izdvajanje vode na površini. Također, leteći pepeo smanjuje propusnost i usporava oslobađanje topline hidratacije što dovodi do zaključka da se leteći pepeo ne dodaje u betone kod kojih želimo postići ranu čvrstoću [28].

Silikatna prašina

Silikatnu prašinu karakteriziraju najfinije čestice nastale kao nusprodukt proizvodnje silicijskih i ferosilicijskih legura. Njene malene čestice doprinose povećanju čvrstoće betona i smanjenju propusnosti, a samim time i povećanju trajnosti budući da je spriječen prodor štetnih tvari iz vode ili zraka. Silikatna prašina se uglavnom dodaje betonima koji su izloženi smrzavanju i kemijski agresivnim tvarima [3].

6.2. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci, danas poznatiji kao aditivi uglavnom su organskog podrijetla i u beton se dodaju u malim količinama, točnije do 4% mase cementa. Kemijskim dodacima smatraju se plastifikatori, superplastifikatori, aeranti, usporivači i ubrzivači vezanja, dodaci za vodonepropusnost.

Ova vrsta dodataka dodaje se u vodu koja se koristi za proizvodnju betona. Izuzetno je važno da se prije svake upotrebe aditiva provedu ispitivanja kojima će se utvrditi na koji način će aditivi reagirati s ostalim sastojcima betona. Ako se dodaje više vrsta aditiva u istu mješavinu, također treba provjeriti kako ti isti aditivi međusobno reagiraju. Aditivi su vrlo osjetljivi na vanjske utjecaje poput visokih temperatura te ih stoga treba pravilno skladištiti u zatvorenim prostorima [27].

Plastifikatori

Osnovna uloga plastifikatora je da stvaraju adsorpcijski sloj oko čestica veziva i da drže čestice međusobno razmaknute. Razmak između čestica smanjuje otpor gibanju čestica što doprinosi boljoj obradivosti betona. Dodavanjem plastifikatora smanjit će se i vodocementni omjer i količina potrebne vode, a povećati čvrstoća na vlak i tlak, otpornost na mraz i trajnost samog betona

Superplastifikatori

Uloga superplastifikatora je ista kao kod plastifikatora samo malo izraženija, odnosno imaju jače djelovanje na beton. Primjena superplastifikatora omogućuje veće smanjenje vode uz još veću konzistenciju, ubrzani razvoj čvrstoće te povećava brzinu hidratacije, a pri tome smanjuju količinu vode i cementa. Pogodni su za izradu betona koji mora sadržavati znatnu količinu veziva.

Aeranti

Aerant se dodaje u beton kada je potrebno postići što veću otpornost na mraz, obradivost i povećati količinu cementne paste. Dodavanjem aeranata, u beton se uvlače mjehurići zraka te se tako povećava količina cementne paste, a smanjuje segregacija. Također, aeranti povećavaju vodonepropusnost jer dolazi do prekidanja kapilara u očvrslom betonu te do smanjuje visine kapilarnog dizanja [27].

Ubrzivači i usporivači vezanja

Ubrzivači vezanja su zapravo aditivi koji skraćuju potrebno vrijeme vezanja betona i time omogućavaju betoniranje pri niskim temperaturama (do -10°C). Osim za betoniranje pri niskim temperaturama, ubrzivači se koriste u situacijama kada je potrebna velika brzina rada. Posljedice dodavanja ubrzivača u beton su: promjena redoslijeda otapanja glavnih minerala cementa, brži razvoj čvrstoće, formiranje konačnih produkata hidratacije, brže otapanje cementnih minerala.

Usporivači vezanja djeluju tako da se skraćuje vrijeme vezanja betona, odnosno vrijeme u kojem se beton može kvalitetno ugraditi, zbiti i obraditi. Primjenjuju se pri betoniranju konstrukcija velikih dimenzija, pri betoniranju na visokim temperaturama i za transportne betone. Neke od dodatnih prednosti usporivača su bolja disperzija cementa u betonu i privremena zaštita cementa od vode [27].

7. TEHNOLOGIJA UGRADNJE POD VODOM

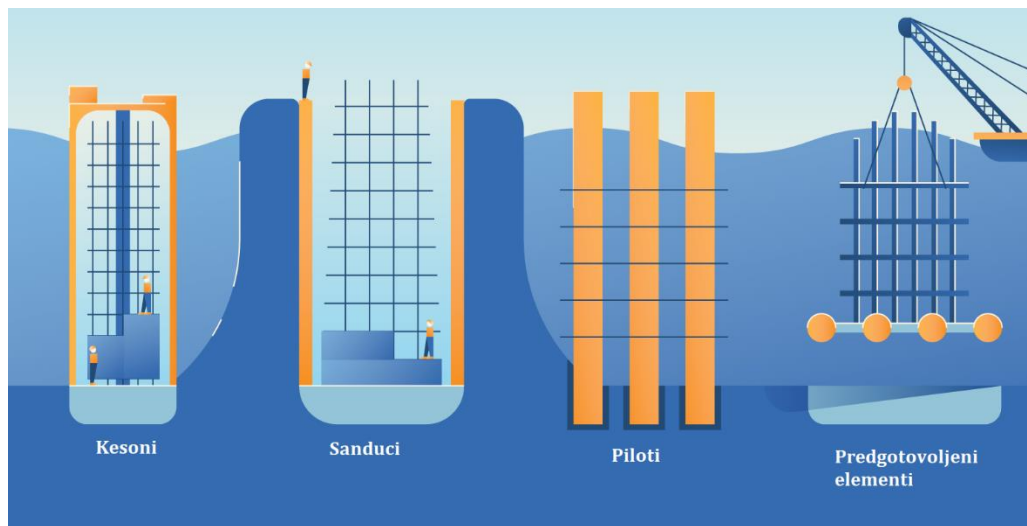
Betoniranje pod vodom je težak građevinski zadatak koji zahtijeva mnogo iskustva. Zato se takva gradnja, kad god je moguće nastoji zamijeniti predgotovljenim betonskim elementima izrađenim u pogonu ili u suhim uvjetima na gradilištu. Ugradnja betona pod vodom temelji se na činjenici da za očvršćavanje betona nije potreban zrak, odnosno da je očvršćavanje čak bolje ili jednako u vodi. Budući da pod vodom nije moguće vibriranje kako ne bi došlo do ispiranja cementa vodom, smjesa svježeg betona mora biti dovoljno plastična, kohezivna i tekuća da bi se kalup što bolje popunio [29]. Zahtijeva se mješavina bogatija od mješavine betona u normalnim uvjetima građenja. Omjere finog i krupnog agregata treba prilagoditi kako bi se postigla željena obradivost s nešto većim udjelom finog agregata u odnosu na beton za normalne uvjete građenja. Udio finog agregata često može biti od 45-50% ukupnog agregata. Krupni agregat ne smije sadržavati ilovaču koja može uzrokovati stvaranje mlijeka tijekom obrade.

Oplata ne samo da mora dati željeni oblik konstrukciji, već mora i štititi betonsku mješavinu tijekom ugradnje od izravnog djelovanja morske struje i valova. Oplata također služi i kao privremena zaštitna obloga koja tijekom betoniranja sprječava moguće ispiranje cementa i istjecanje cementne paste iz betona, a nakon završetka betoniranja štiti svježe ugrađeni beton od udara i abrazivnog djelovanja vodenih struja.

Zbog takvih zahtijeva, pažnju treba posvetiti ugradnji betona pri čemu beton ne smije doći u direktan kontakt s vodom te kako bi se to spriječilo, osnovno pravilo je da beton ne smije padati slobodno kroz vodu. U slučaju kada beton pada slobodno kroz vodu, dolazi do brzog tonjenja betona i ispiranja sitnih čestica betonske smjese što bi razdvojilo svježi beton na agregat i cement. Posljedica toga bi bilo taloženje najprije krupnije granulacije agregata.

7.1. Tehnike izgradnje podvodnih konstrukcija

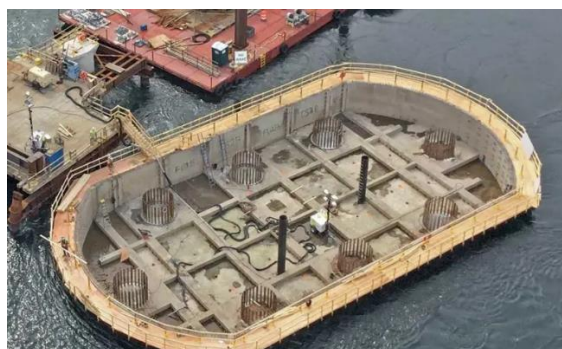
Najpoznatije tehnike (Slika 17) podvodne izgradnje su kesoni, sanduci, piloti i predgotovljeni elementi, odnosno elementi koji se izrađuju izvan mjesta ugradnje te se odgovarajućim transportom dovoze do gradilišta [30].



Slika 17. Tehnike podvodne izgradnje [30]

7.1.1. Kesoni

Kesoni su vodonepropusne čvrste komore koje se spuštaju u vodu i ukopavaju u tlo uz očuvanje suhe unutrašnjosti (Slika 18). Izvođenje kesona se provodi potkopavanjem unutar sanduka kako bi se dno potkopalo sa unutarnje strane dok ne dođe do sloma. Dolaskom do sloma, konstrukcija se pod vlastitom težinom ukopava na određenu dubinu. Kako bi se olakšalo ukopavanje, donji dio kesona je u obliku noža [30].



Slika 18. Podvodno betoniranjem pomoću kesona [31]

Kod kesona postoji radna i prolazna komora. U glavnoj komori se izvode radovi ispod površine vode, odnosno u njoj se odvija kopanje pod pritiskom. Prolazna komora se koristi kako bi se radnici prije početka radova u radnoj komori prilagodili komprimiranom zraku, sve dok ne dođe do izjednačavanja sa pritiskom u radnoj komori [32] [33].

Neke od prednosti kesona su povoljna cijena, smanjenje vibracije i buke, laka prilagodba različitim uvjetima na gradilištu te velika bočna nosivost. Uglavnom se koriste za manje površine, a dubina vode ne smije biti manja od 12 metara [30].

7.1.2. Kofer brana

Kofer brana (*eng. Cofferdams*) su privremene ograde koje omogućuju ispumpavanje vode stvarajući suhe uvjete za gradnju (Slika 19). Djeluju po principu sličnom kao i brane, sprječavajući protok vode iz određenog područja. Izgled koferdama podsjeća na veliku jamu ograđenu zidovima s vodom koja je okružuje. Mogu se koristiti za izgradnju raznih struktura, od pristaništa i molova do djelomično ili potpuno potopljenih zgrada. Ova tehnika se također koristi i u izgradnji trajnih brana. Najpoznatiji primjer iz prakse je Hooverova brana, pri čijoj se izgradnji podignulo nekoliko koferdama kako bi se preusmjerila rijeka Colorado [30].



Slika 19. Izvođenje kofer brana [30]

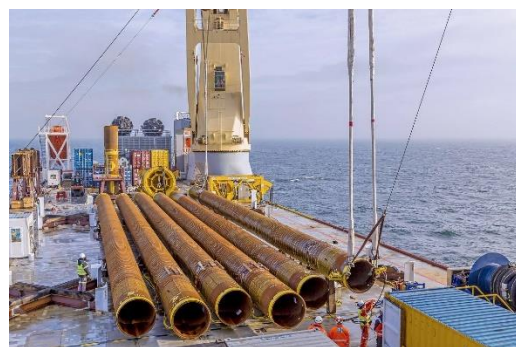
7.1.3. Piloti

Prilikom izgradnje elemenata temelja pod vodom, zabijeni piloti omogućuju stvaranje čvrstih konstrukcija bez potrebe za uklanjanjem vode. Piloti, koji izgledaju kao dugi, okomiti stupovi, mogu se zabiti u tlo pomoću snažnog čekića, stvarajući stabilan temelj za podvodne ili nadvodne strukture (Slika 20) [30].

Za podvodnu gradnju piloti se najčešće izrađuju od čelika sa djelomično šupljom unutrašnjosti. Nakon postavljanja pilota, cijev (Slika 21) se koristi za punjenje unutrašnjosti betonom, koji istodobno istiskuje vodu. Beton može očvrnuti i dok je okružen vodom, a ono što ostaje na kraju ovog procesa je armirano betonski stup u kojem uopće nema vode. Zabijeni piloti jedan su od najisplativijih načina za izgradnju temelja i ostalih elemenata podvodnih građevina [32].



Slika 20. Platforma sa koje se izvode piloti [32]

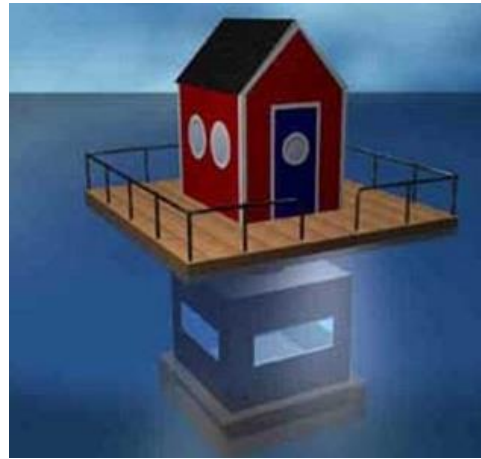


Slika 21. Cijevi za izvođenje pilota [32]

7.1.4. Predgotovljeni elementi

Jedan od ciljeva podvodne izgradnje je svakako pokušati izbjeći izgradnju pod vodom. Kao rezultat toga, jedna od najčešćih praksi u podvodnoj gradnji je izgradnja izvan gradilišta. Konstrukcije se izvode i montiraju izvan gradilišta, ponekad koristeći modularnu konstrukciju, a zatim se transportiraju na gradilište. Često se dijelovi konstrukcije vuku brodicama, a zatim se spuštaju na projektirano mjesto. Neki dijelovi se spuštaju vlastitom težinom, dok se na neke stavljaju utezi koji im pomažu da stignu do morskog dna. Ukoliko je potrebno, voda se nakon toga ispumpava iz konstrukcije nakon što se spusti na svoje mjesto [30].

Poznati primjer izgradnje ovom tehnikom je mali hotel u Švedskoj, Utter Inn (Slika 22). Njegova konstrukcija je prethodno izgrađena na obali pa kasnije potopljena usred jezera, a ulaz u hotel je dostupan samo brodom.



Slika 22. Potopljeni hotel u Švedskoj

7.2. Metode gradnje

Kada se građevine izvode u rijekama, lukama i obalnim područjima, tada konstrukcija obično zahtijeva postavljanje podvodnog betona. Postavljanje betona pod vodu je važna dinamička operacija o kojoj ovisi ispunjena podvodne konstrukcije. Beton je dezintegriran tijekom polaganja što rezultira slojevitim, heterogenim i niskim karakteristikama čvrstoće. Stoga je važno prilikom polaganja betona osigurati da se svježi beton ne miješa s vodom.

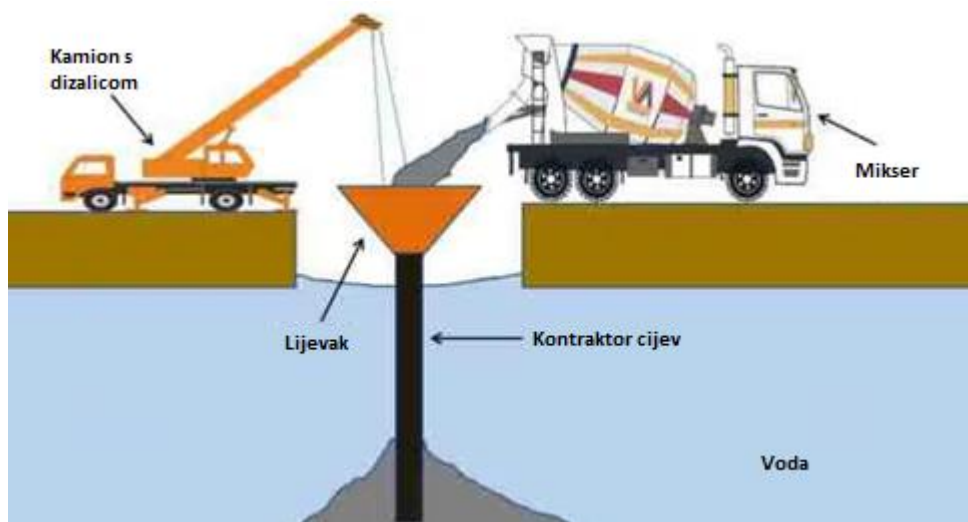
Neke od najčešće korištenih metoda ugradnje podvodnog betona su [34]:

1. Kontraktor postupak – Tremie metoda
2. Metoda pumpanja
3. Metoda hidro ventila – vodni ventil
4. Rešetkasti lift
5. Colcrete sistem ili Prepak
6. Beton pumpa

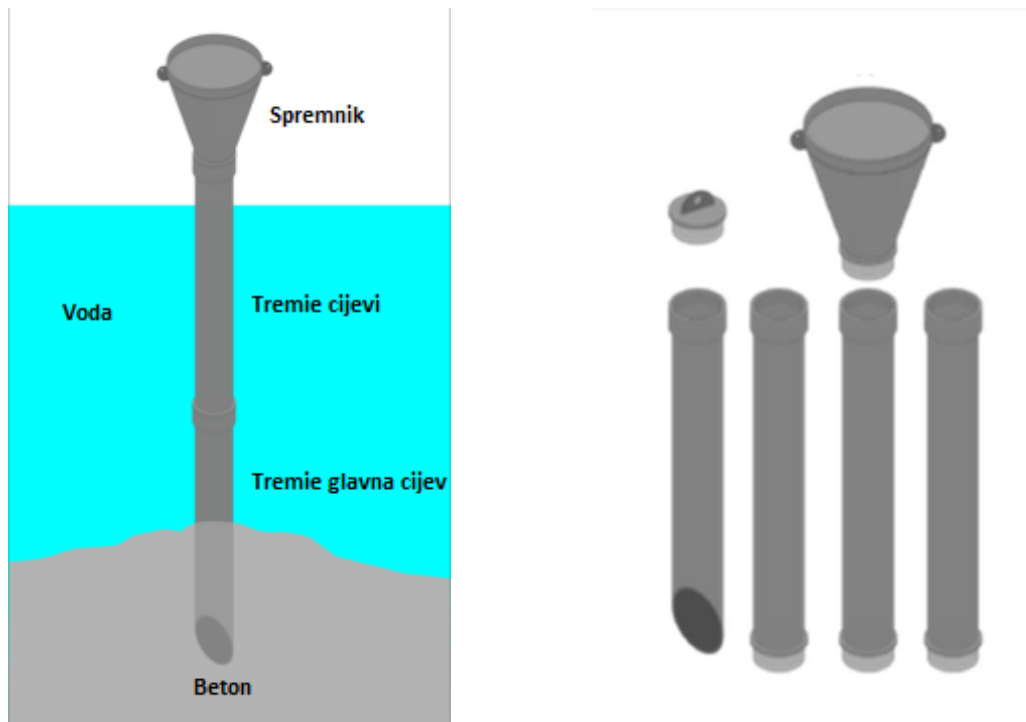
7.2.1. Kontraktor postupak

Jedna od najčešće korištenih i najpoznatijih metoda ugradnje betona pod vodom je kontraktor postupak (Slika 23). Kontraktor predstavlja vodonepropusnu glatku cijev unutarnjeg promjera od 150 do 300 mm, duljine 2 do 3 m. Na gornjem dijelu cijevi nalazi se lijevak konusnog oblika koji služi kao spremnik za beton, a na donjem dijelu uglavnom se nalazi čep ili ventil. Donji dio cijevi je obično uronjen u svježi beton, a razlog toga je sprječavanje ispiranja cementa iz betonske mješavine zbog turbulentnog kontakta vode i betona dok on protječe kroz cijev, odnosno beton koji se izdiže s dna istiskuje vodu te se tako ograničava ispiranje cementa. Cijeli sustav je oslonjen na radnu platformu iznad nivoa vode [33] [35].

Glavna cijev se sastoji od kratkih cijevi spojenih vijcima s O prstenom (Slika 24). Takav spoj omogućuje podešavanje dužine cijevi tijekom izlijevanja betona bez spuštanja cijevi ili uklanjanja donjeg kraja ispod površine već izlivenog betona. Glavna karakteristika ove metode je da se za izlijevanje betona koristi vertikalna cijev kroz koju beton teče gravitacijski ispod nivoa vode [34] [36].



Slika 23. Ilustrirani prikaz betoniranja kontraktor postupkom [36]



Slika 24. Dijelovi kontraktor sustava [34]

Vibracije i trzanja cijevi mogu se primijeniti kako bi se potaklo slijeganje i poravnanje gornje površine izlivenog betona. Cijev se tijekom izlivanja betona povremeno podiže kako donji kraj ne bi ostao previše zatrpan betonom. Treba pripaziti također i da cijev ne bude previše iznad izlivena površine, odnosno da se donji otvor izloži vodi.

Princip rada

Iznad nivoa vode nalazi se radna platforma s koje se tremie cijev spušta na određenu poziciju na kojoj treba izliti beton. Čep izrađen od pjenaste gume postavlja se na vrh glavne cijevi prije nego se spremnik napuni betonom. Kako beton ulazi u cijev, čep klizi prema dolje, odvajajući beton od vode. Nakon što se ljevjak i cijev napune betonom, cijev se lagano podiže kako bi se čep izbacio i beton počeo izlaziti iz cijevi. Kako se protok betona ne bi usporio ili zaustavio, cijev se povremeno podiže kako bi protok ponovno krenuo [36].

Ako je površina izlivanja prevelika za upravljanje iz jedne točke, preporučuje se korištenje okvira koji se sastoji od nekoliko paralelno postavljenih cijevi (Slika 25 i 26). Preporučeni razmak između svake cijevi je 3,5 do 5 m.



Slika 25. Ilustrirani prikaz jedne cijevi[36] Slika 26. Ilustrirani prikaz kontraktor okvira[36]

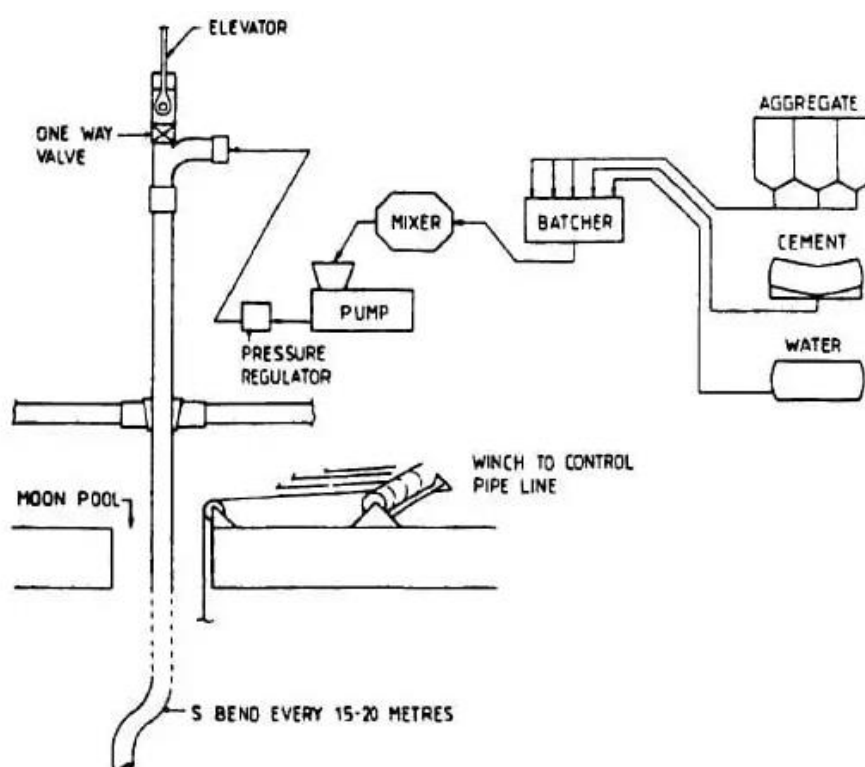
Podvodno betoniranjem kontraktor postupkom pogodno je za izlivanje velike količine betona visoke fluidnosti, a najčešće se primjenjuje kod izvedbe dijafragmi u podzemnoj vodi, pilota u zemlji kesona, temelja za mostove, ali i za potrebe sanacije.

Potrebna svojstva betona

Betonska smjesa treba biti takva da beton gravitacijski prolazi kroz cijev i ulazi u masu svježeg betona te je postepeno povećava, odnosno smjesa mora biti tekuće konzistencije i najmanjeg razreda slijeganja S4 ili S5. Ostala svojstva koja su bitna za beton kod podvodnog betoniranja su sposobnost samozbijanja betona, produljeno vrijeme ugradnje, otpornost betona na ispiranje, segregaciju te malo izdvajanje vode, prionljivost i mala toplina hidratacije [37].

7.2.2. Metoda pumpanja

Podvodno betoniranje metodom pumpanja je zapravo razvijena verzija kontraktor postupka (Slika 27) i brža je za betoniranje na teško dostupnim područjima kao što je područje ispod stupova. Pumpanje pruža nekoliko prednosti koje nedostaju u kontraktor postupku, a to su izlijevanje betona iz mješalice direktno u oplatu, ne dolazi do začepjenja cijevi jer se betoniranje vrši pumpanjem umjesto upotrebom gravitacijske sile, a rizik od segregacije je znatno manji [38].

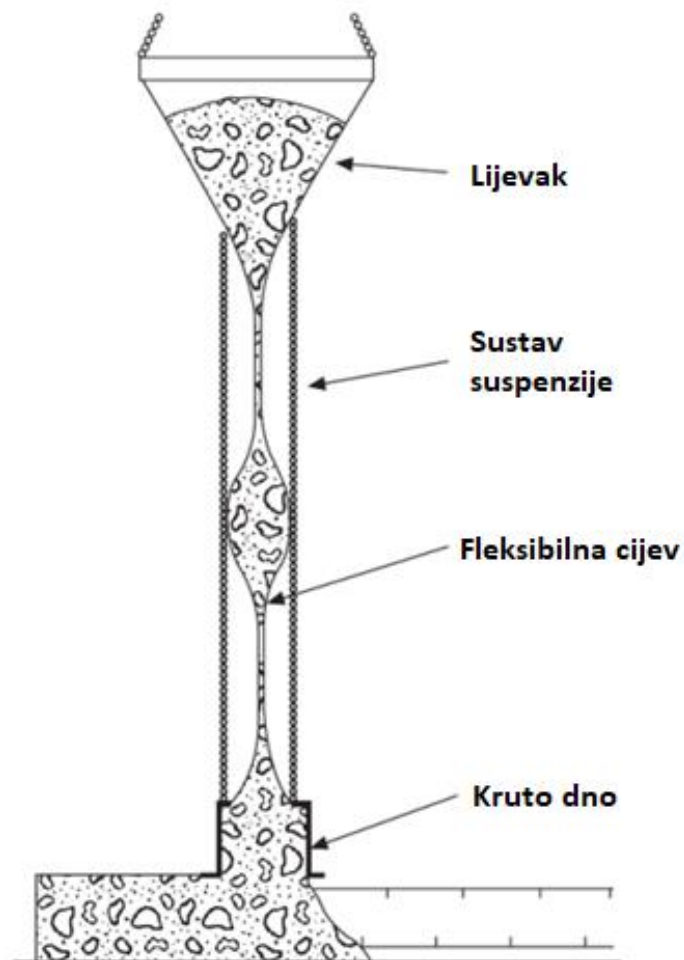


Slika 27. Princip betoniranja pumpanjem [38]

7.2.3. Metoda hidro ventila – vodni ventil

Metoda hidro ventila ili vodnog ventila je nizozemska metoda slična kontraktor postupku (Slika 28). Upotrebljava se za betoniranje tankih konstrukcija, na primjer ploče do 75 cm debljine. Karakteristika ove metode ugradnje betona je horizontalno vođenje po morskom dnu. Ispod čeličnog lijevka nalazi se fleksibilna cijev od tkanog materijala [39].

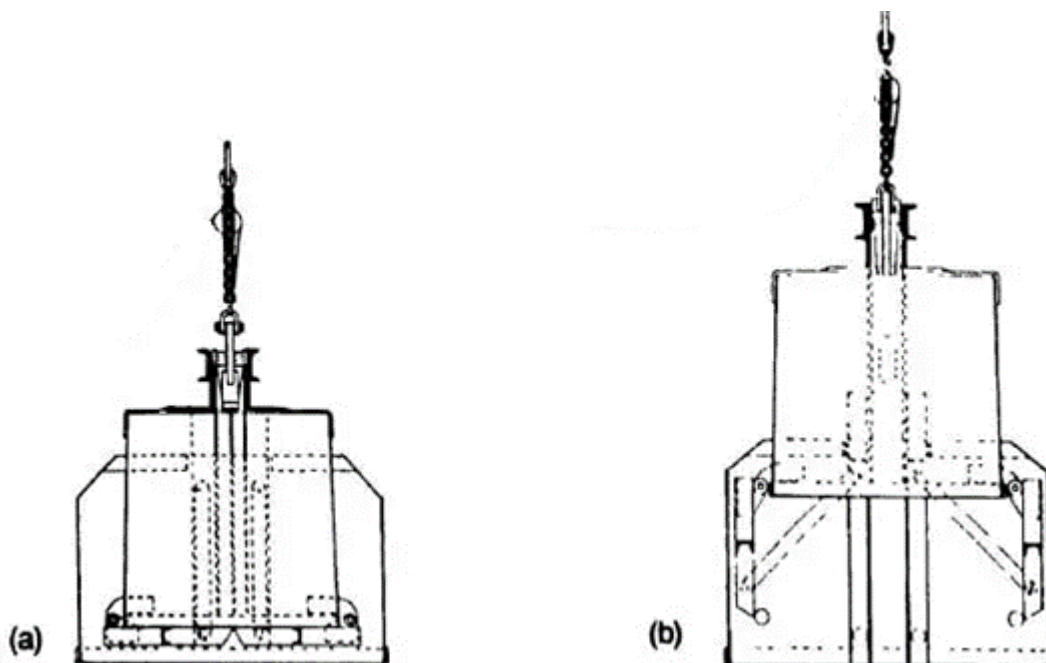
Kada je lijevak prazan, odnosno nema betona cijev je djelovanjem pritiska vode spljoštena uz dno, a kada beton protječe kroz cijev, cijev je kontinuirano priljubljena uz beton i ne dolazi do ispiranja cementa. U odnosu na kontraktor postupak, donji kraj cijevi ne mora biti stalno uronjen u svježi beton već je dovoljno da bude na razini buduće gornje površine betona [40].



Slika 28. Prikaz betoniranja metodom hidro ventila [40]

7.2.4. Rešetkasti lift (Skip)

Rešetkasti lift (Slika 29) se također koristi za betoniranje tankih konstrukcija, iako se mogu izvoditi i deblje ukoliko se usta lifta ukopaju u prethodno postavljen svježi beton. Lift se sastoji od kante s dvostrukim otvorom na dnu i preklapajućim platnenim klapnama koje su postavljene na vrhu kako bi se spriječilo ispiranje betona. Lift se polagano spušta kroz vodu čim se napuni betonom, a kada dođe do projektiranog mjesta vrata se otvaraju automatski ili ručno. Ova tehnika podvodnog betoniranja prikladna je za slučajeve kada je potrebna velika masa betona za stabilizaciju temelja [39].

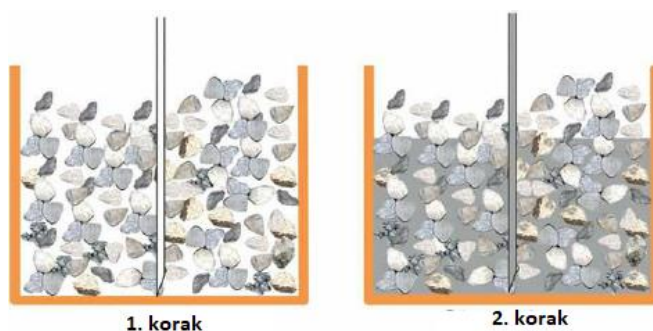


Slika 29. Rešetkasti lift za podvodno betoniranje: a) zatvoren i b) otvoren

7.2.5. Colcrete sistem

Colcrete sistem, u engleskoj literaturi poznatiji pod nazivom „Pre-placed aggregate concrete“, a u hrvatskoj literaturi koristi se naziv „pre-pak beton“, odnosno beton od prethodno postavljenog agregata podrazumijeva ugradnju agregata uniformne granulacije. Kako bi se postiglo povezivanje agregata s betonskom smjesom, u njega se injektira cementni mort. U ukupnom volumenu betona, otprilike 65-70% otpada na agregat dok preostalih 30-35% zauzima mort. Prvi korak kod betoniranja je postavljanje tzv. zdenaca od šipki armature na razmaku od 1,5 metra (Slika 30 – 1. korak). Zatim započinje punjenje oplata agregatom, a armaturni zdenci ostaju nepopunjeni. Nakon punjenja oplata, slijedi injektiranje cementnog morta koji ulazi u šupljine između agregata (Slika 30 – 2. korak). Oprema za injektiranje sastoji se od vertikalnih injekcijskih cijevi koje se uranjaju u armaturne zdence, a injektiranje se izvodi pod pritiskom stupca cementnog morta u injekcijskoj cijevi koja se lagano podiže kako se oplata puni mortom.

Za ugrađivanje betona pod vodom Colcrete sistemom uglavnom se koristi varijanta injektiranja pumpom pri kojoj se postavljaju čelične injekcijske cijevi do dna kalupa. Kod podvodnog ugrađivanja betona, za razliku kod ugrađivanja običnog betona injekcijske cijevi se ne podižu prema gore kako se oplata puni mortom. Razmak injekcijskih cijevi je najčešće 2 metra, a uobičajeni sastav injekcijskog morta je vezivo (portland cement, pucolanski cement) u omjeru masa 2.5:1 do 3.5:1 i pijeska u omjeru masa 1:1 do 1.5:1. Kako bi se smanjila segregacija te povećala fluidnost betona, u mješavinu se može dodati i kemijski dodatak koji ujedno i usporava vrijeme vezanja te povećava koheziju. Glavna karakteristika ovog načina betoniranja je da daje beton velike čvrstoće najčešće preko 40 MPa [41] [42].



Slika 30. Prikaz Colcrete sistema u dva koraka [42]

7.2.6. Beton pumpa

Budući da su sastav i konzistencija podvodnog betona dosta slični pumpanom betonu, ugradnja beton pumpom smatra se idealnim rješenjem za podvodno betoniranje. Princip rada je kao i kod kontraktor postupka, a dubina betoniranja je otprilike 30 metara. Razlika u odnosu na kontraktor postupak je ta što je cijev pumpe pod vodom položena pod kutom prema horizontali. Iz tog razloga nije ju lako kontrolirati te je svakako bitno spriječiti njeno horizontalno pomicanje [40].

7.3. Izazovi podvodnog građenja

Betoniranje na tlu u nekim situacijama može biti zahtijevno i komplicirano, ali podvodno betoniranje donosi znatno veće izazove. Jedan od izazova je izbor odgovarajućih materijala. Mnogi od materijala koji se koriste za izgradnju na tlu poput drva nisu prikladni za dugoročnu podvodnu upotrebu. Uz izbor prikladnih materijala, do problema podvodnog betoniranja dovodi i pritisak vode te korozija. Učinci tlaka vode predstavljaju izazov tijekom izgradnje, ali i kroz sami vijek trajanja građevine. Pojavljivanje korozije je neizbježno, ali se na razne načine pokušavaju smanjiti štetni učinci.

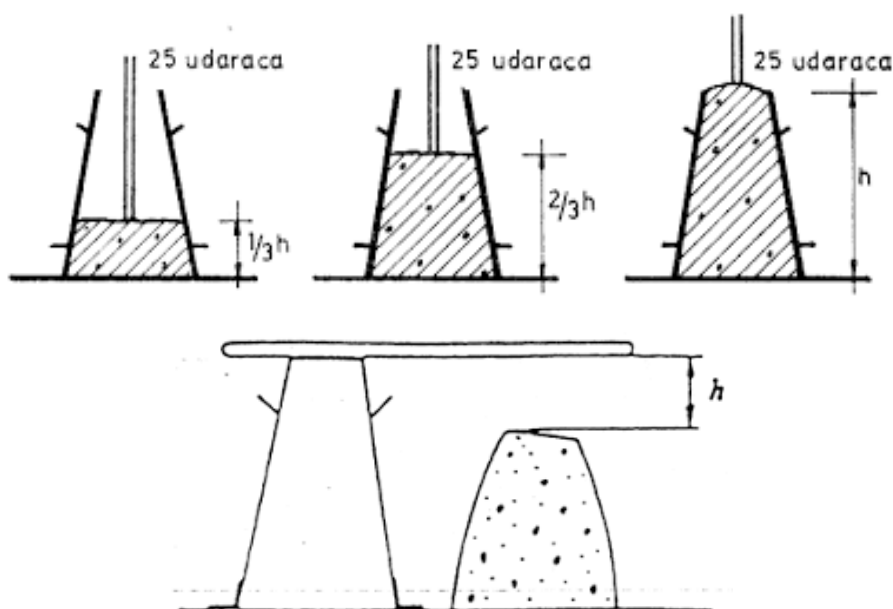
Rimljani su kroz razvoj podvodnog betona pronašli način kako savladati ove izazove koristeći prikladne materijale i jednostavne metode podvodnih konstrukcija za izgradnju potpornih stupova za mostove preko rijeka.

Za gradnju pod vodom, materijali trebaju biti otporni na pritisak vode, koroziju i eroziju. Najčešće se koriste beton, čelik i akrilno staklo. Osnovna razlika betona za betoniranje na tlu i pod vodom je da podvodni beton treba brzo očvrnuti i da ima dobra svojstva u vodi. Čelične konstrukcije se obično ispunjavaju betonom i tako formiraju snažnu podvodnu konstrukciju, dok se akrilno staklo uglavnom koristi za prozore budući da je ono otporno na sunčevu svjetlost, izdržljivo i poprilično kruto.

8. OSNOVNA ISPITIVANJA PODVODNOG BETONA

8.1. Ispitivanje konzistencije svježeg betona – slijeganjem i rasprostiranjem

Slijeganje svježeg betona se provodi na uzorku betona oblikovanog u krnji stožac (Abramsov konus). Kalup se ispuni svježim betonom u tri sloja, od kojih se svaki sloj zbija sa 25 udaraca šipkom za nabijanje (Slika 31). Zatim se nakon nabijanja, kalup vertikalno uklanja te se mjeri slijeganje h na način da se izmjeri razlika visine kalupa i najviše dobivene točke slegnutog uzorka kao što je prikazano na Slici 31 [27] [43].



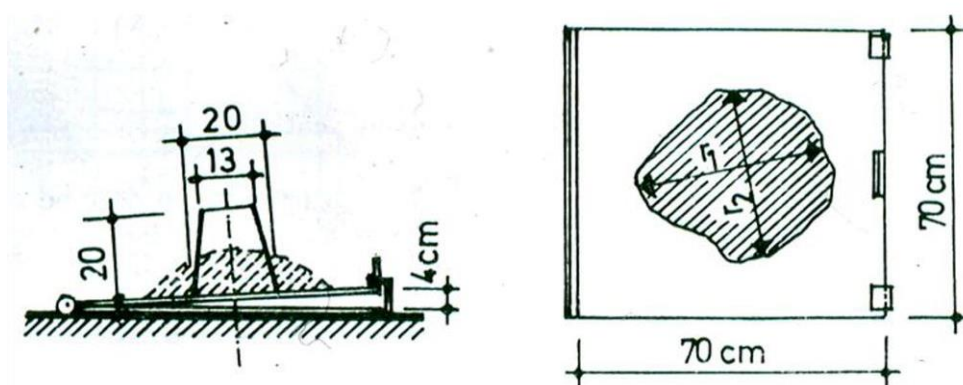
Slika 31. Koraci ispitivanja slijeganja betona [44]

Tablica 9 prikazuje razrede konzistencije betona s obzirom na izmjereno slijeganje.

Tablica 9. Razredi slijeganja prema TPBK [27]

Razred	Slijeganje [mm]
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

Ispitivanje konzistencije *rasprostiranjem* betona provodi se mjereći rasprostiranje svježeg betona na horizontalnoj ravnoj ploči koja je izložena trzanju. U centar ploče postavlja se konus napunjen betonom u dva sloja približno jednake visine. Svaki sloj se nabija šipkom za nabijanje sa po 10 udaraca. Kalup se uklanja vertikalno nakon čega se beton sliježe. Zatim se ploča pomoću ručice 15 puta izdiže i spušta da slobodno pada kako bi se izazvali trzaji. Po završetku ispitivanja, mjeri se promjer ispitanog uzorka betona. Na Slici 32 su prikazani koraci ispitivanja konzistencije rasprostiranjem [27] [43].



Slika 32. Postupak ispitivanja konzistencije rasprostiranjem svježeg betona [45]

8.2. Vodonepropusnost betona

Propusnost betona od posebnog je značaja kod konstrukcija koje se izvode u vodi ili dolaze u dodir s vodom. Osim funkcionalnog značaja, propusnost je također povezana s otpornošću betona na progresivno propadanje u agresivnim uvjetima okoliša i ispiranjem uslijed dugotrajnog prodiranja vode. Propusnost se može definirati kao ispunjavanje pora slobodnom vodom i tečenje vode kroz beton. Vodopropusnost ovisi o količini i vrsti cementa, volumnom sadržaju kapilarnih pora i šupljina te o kvaliteti kontaktne zone. Beton sa niskom vodopropusnošću zahtijeva otprilike 250 kg/m³ cementa.

Propusnost betona postiže se primjenom aditiva, odnosno superplastifikatora koji doprinose većoj kompaktnosti cementne paste. Vodonepropusni beton karakterizira visoka obradivost i sprječavanje stvaranja makropora unutar matrice i između agregata i cementa. Takav beton koristi se za izvedbu konstrukcija u morskom okolišu, bazena, podruma...

Ispitivanje vodonepropusnosti, odnosno dubine prodora vode provodi se prema normi HRN EN 12390-8 tako da se betonski uzorak izloži konstantnom hidrostatskom tlaku od 5 bara. Ispitivanje se provodi pomoću uređaja za utiskivanje vode pod tlakom i traje 72 sata (Slika 33). Voda se utiskuje s donje strane dok se nepropusnost osigurava gumenom brtvom pri čemu treba paziti da ne dođe do curenja vode, odnosno popuštanja brtve. Nakon ispitivanja uzorak se cijepa na pola. Trag vode na ispitanom uzorku bilježi se markerom nakon čega se mjeri se maksimalna visina prodora vode u uzorku. Ispituju se tri uzorka po mješavini, od kojih je mjerodavna najveća vrijednost prodora vode u milimetrima [46].



Slika 33. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti iz laboratorija za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci

Vodonepropusnost je definirana razredima prema normi HRN 1128 koji su dani u Tablici 10.

Tablica 10. Razredi vodonepropusnosti betona [47]

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

8.3. Plinopropusnost betona

Plinopropusnost je svojstvo materijala da propušta plinove kao posljedica razlike tlakova između dviju površina. Ispitivanje se sastoji od mjerenja protoka plina pod tlakom u određenom vremenskom intervalu. Na jednoj strani uzorka nanosi se plin pod tlakom, a na suprotnoj strani mjeri se količina protoka. Uzorci za ispitivanje su uglavnom valjci promjera 50, 100 ili 150 mm [47]. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti prikazan je na Slici 34.



Slika 34. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti betona u laboratoriju za materijale, Građevinski fakultet u Rijeci

Protok plina Q_f se izračunava prema izrazu (9):

$$Q_f = \frac{V_f}{T_{0-1}} \quad (9)$$

gdje je:

Q_f – protok plina (m^3/s)

V_f – referentni volument epruvete (m^3)

T_{0-1} – vrijeme potrebno da mjehurić kisika dođe od nule do graduiranog dijela epruvete (s).

Koeficijent propusnosti dušika izračunava se pomoću sljedećeg izraza (10):

$$K_{1.5} = \frac{2 \cdot Q_f \cdot p_0 \cdot H \cdot \eta}{A \cdot (p^2 - p_a^2)} \quad (10)$$

gdje je:

$K_{1.5}$ – koeficijent propusnosti za vrijednost tlaka od 1.5 bara (m^2)

Q_f – protok plina (m^3/s)

p_0 i p_a – atmosferski tlak (Pa)

H – visina betonskog uzorka (m)

η – dinamička viskoznost fluida; za dušik iznosi $17,82 \cdot 10^{-6}$ Pas

A – površina poprečnog presjeka uzorka (m^2)

p – ulazni tlak (Pa)

Srednji specifični koeficijent prolaska dušika računa se kao srednja vrijednost prema izrazu:

$$K = \frac{K_{1.5} + K_2 + K_{2.5} + K_3 + K_{3.5}}{5} \quad (11)$$

gdje je:

K – srednji koeficijent prolaska dušika (m^2)

$K_{1.5}, K_2, K_{2.5}, K_3, K_{3.5}$ – koeficijenti prolaska dušika za tlak od 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 i 3.5 bara (m^2)

Nije moguće napraviti potpuno nepropustan beton, stoga ovisno o njegovom sastavu, beton može imati veću ili manju propusnost plina. Ispitivanje plinopropusnosti nije propisano TPBK, ali može biti zahtijevano projektom za betone u agresivnom okolišu.

Obzirom na proračunati koeficijent plinopropusnosti beton se svrstava u razrede otpornosti na prodor plina koji su dani u Tablici 11.

Tablica 11. Kriteriji plinopropusnosti [3]

Koeficijent plinopropusnosti ($\times 10^{-18}$ m ²)	Otpornost betona	Kvaliteta betona
$< 10^{-18}$	mala	dobra
$10^{-18} - 10^{-16}$	srednja	srednja
$> 10^{-16}$	velika	loša

8.4. Difuzija klorida

Prodiranje klorida u beton javlja se kao posljedica procesa difuzije i kapilarnog upijanja morske vode. U procesu difuzije sudjeluju samo otopljeni kloridi, a kada je beton u procesu karbonizacije svi kloridi su otopljeni u pornoj vodi [48].

Postoje tri metode ispitivanja difuzije klorida u betonu [3]:

1. Prema normi NORDTEST BUILD 492 određuje se dubina prodiranja klorida na uzorku koji je izložen električnom potencijalu. Ispitivanjem se određuje koeficijent migracije klorida.
 2. Coulomb test ili test brze propusnosti klorida omogućuje određivanje prolaza ukupnog električnog naboja kroz zasićeni beton. Ispitivanje se vrši također pomoću električnog potencijala te mora biti u skladu s normama AASHTO T 227 ili ASTM C1202.
 3. Ispitivanje zapreminske vodljivosti provodi se mjerenjem struje koja prolazi kroz uzorak zasićenog betona. Ispitivanje se provodi u skladu s ASTM C1760.
- [3]

Koeficijent difuzije određuje se prema izrazu (12):

$$D_{Cl} = D_{Cl0} * \frac{1}{f_{cm}^{1.5}} \quad (12)$$

gdje je:

D_{Cl} – efektivni koeficijent difuzije (m²/s)

D_{Cl0} – 5*10⁻⁹ (m²/s)

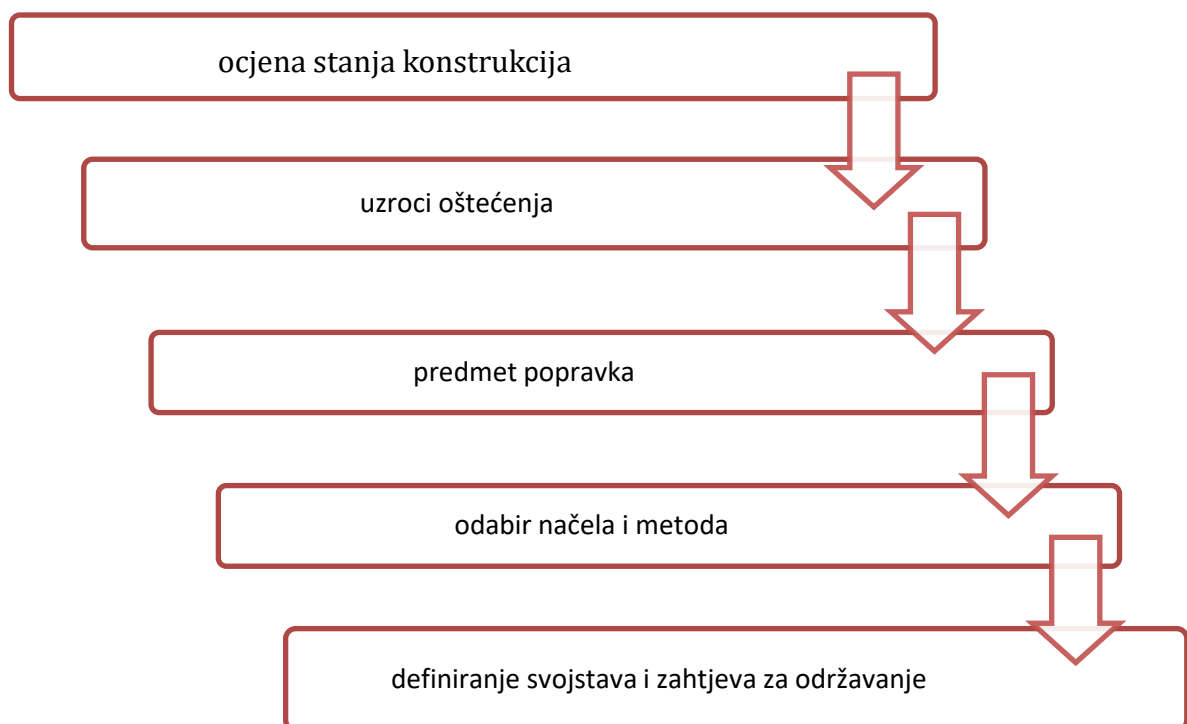
f_{cm} – srednja tlačna čvrstoća

Difuzija klorida ovisi ponajviše o vrsti cementa, sastavu betona, njegovoj ugradnji i njezi, stanju vlažnosti agregata i pukotinskom stanju betona.

9. PODVODNA SANACIJA

Izvedba podvodnih konstrukcija predstavlja kompleksan tehnički zahvat pa samim time je i njihova sanacija komplicirana. Kod podvodnih radova potrebno je pažljivo planiranje, dobra organizacija, priprema i najbitnije ispravno provedena ispitivanja prije početka radova. Sanacija je uglavnom složena i zahtijeva specijalne materijale i sisteme te također izvedbu od strane kvalificiranih i iskusnih stručnjaka.

Prvi i najbitniji korak dugoročne sanacije je pravilna procjena postojećeg stanja konstrukcije. Kako bi sanacija bila što učinkovitija, procjena zahtijeva povijesne informacije o konstrukciju i njenom okruženju, uključujući bilo kakve promjene te zapisnik o periodičnim pregledima i popravcima. Također je potrebna i dokumentacija o uzroku i opsegu propadanja, točni kriteriji projektiranja, pravilna sanacija i osiguranje kvalitete sanacije. Na Slici 35 su prikazani ključni koraci postupka sanacije [49].



Slika 35. Koraci postupka sanacije konstrukcije [50]

Izmjena plime i oseke dodatno utječu na propadanje podvodnog betona što predstavlja ozbiljan ekonomski problem. Voda koja sadrži kisik i onečišćenja izaziva agresivan napad na beton. Kako bi sanacija bila uspješna potrebno je odabrati prikladan sanacijski materijal i metodu, te redovno kontrolirati kvalitetu radova.

Podvodna sanacija zahtijeva na nekim dijelovima rezanje i varenje metalnih dijelova. Tijekom takvih radova pažnju treba posvetiti spriječavanju udara električne energije, eksplozije, opekline te omogućiti smanjenje utjecaja zračenja prilikom varenja. Ronilac koji izvodi rezanje ili varenje mora biti kvalificiran za taj posao i opremljen odgovarajućom zaštitnom opremom (rukavice, zaštitno staklo...) [51].

Sanacija podvodnih konstrukcija se izvodi uglavnom ronjenjem stoga razlikujemo tri načina ronjenja: ronjenje s posadom, oklopno odijelo s jednom atmosferom ili podmornica s posadom i vozilo na daljinsko upravljanje.

Ronjenje s ljudskom posadom je uobičajen način obavljanja radova pod vodom. Osim opreme potrebne za ronjenje, ronilac mora biti imati i adekvatnu zaštitnu opremu (zaštitna kaciga, naočale, slušalice, rukavice, cipele...). Izvođenje radova pri tlaku većem od jedne atmosfere ($1 \text{ at} = 101\,325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$) izaziva razne fiziološke promjene u ljudskom tijelu. Na primjer, tjelesna tkiva apsorbiraju i izbacuju plinove različitim brzinama u odnosu na one koje se inače događaju na površini te se zbog toga dozvoljeno vrijeme za izvođenje radova pod vodom smanjuje s povećanjem dubine vode. Industrijski standardi trenutno dopuštaju roniocu koji koristi komprimirani zrak da radi na dubini od 10 metara neograničeno vrijeme. Ukoliko se radovi izvode na dubini od 20 metara, ronilac može raditi samo 60 minuta, a gornja granica je 30 minuta radnog vremena na dubini od 30 metara u morskoj vodi [49].

9.1. Uzroci oštećenja

9.1.1. Morski organizmi

Bakterije koje proizvode kiselinu

Bakterije koje oksidiraju ulje mogu proizvoditi masne kiseline u aerobnim uvjetima. Ove bakterije otapajući površinu napadaju Portland cementnu pastu u betonu. Osim toga, kiseline mogu smanjiti pH vrijednost betona na razinu na kojoj armatura više nije pasivizirana. Pasivizacija je postupak završne obrade armature kako bi se spriječila korozija, odnosno nanošenje tankog zaštitnog sloja. Ako se smanji pH vrijednost betona, korozija u armaturi ubrzano započinje [49].

9.1.2. Nedostaci iskustva i pogreške projektiranja

Zbog teških radnih uvjeta i poteškoća u osiguravanju odgovarajuće inspekcije tijekom izgradnje, podvodno betoniranje, ali i ugradnja drugih materijala često je podložno pogreškama i lošim građevinskim praksama. Nedostaci uključuju sljedeće: prekoračenje vodocementnog omjera, neadekvatna priprema površine, nepravilno postavljanje oplata, nepravilno postavljanje i konsolidacija betona, nepravilan položaj armature, pomicanje oplata tijekom postavljanja, prerano uklanjanje oplata te taloženje betona tijekom stvrdnjavanja.

Specifični nedostatak uobičajen za morske konstrukcije je pucanje betonskih pilota uslijed velike napetosti, koje je posljedica nepravilnog transporta. Pukotine u betonu povećavaju propusnost betona oko pukotine te tako dolazi do prodiranja klorida u blizini pukotine, što dovodi do stvaranja anode na armaturnoj šipki koja ne uzrokuje značajniju koroziju armature. Međutim, u zoni prskanja, prisutnost takvih pukotina može uzrokovati rani početak lokalizirane korozije.

Pogreške u projektiranju ili izvođenju konstrukcije mogu rezultirati urušavanjem oplata, probijanjem kesona pod tlakom i probijanjem kofer brane (koferdam). Ove situacije obično zahtijevaju rekonstrukciju ili opsežnu sanaciju [49].

9.1.3. *Napad kemikalijama*

Beton pod vodom izrazito je osjetljiv na propadanje uzrokovano širokim spektrom kemikalija. Ovakva vrsta oštećenja može se podijeliti na dvije vrste. Prva vrsta je oštećenje uzrokovano kemikalijama izvan betona, a druga vrsta oštećenja je uzrokovana kemikalijama prisutnim u samim sastojcima betona. U situacijama vanjskog napada, voda osigurava kontinuiranu opskrbu kemikalijama i također, ispire produkte reakcije i uklanja labave čestice agregata. Unutarnji napad, odnosno oštećenje kemikalijama u sastojcima betona, ubrzava širenje pukotina i šupljina u betonu. U unutarnje napade ubrajaju se alkalno-silikatne reakcije i korozija armature.

Unutarnje propadanje može nastati i kada se topljivi sastojci betona izlože, što ujedno rezultira nižom čvrstoćom betona i većom poroznosti. Beton u zoni prskanja posebno je osjetljiv na kemijske napade zbog čestog vlaženja i sušenja te svakodnevnog djelovanja plime i oseke [49].

Napad sulfata

Sulfati natrija, kalija, kalcija ili magnezija često se nalaze u morskoj vodi, rijekama, podzemnoj ili industrijskoj vodi. Kemijske reakcije koje se odvijaju između sulfatnih iona i portland cementa rezultiraju produktima reakcije koji imaju veći volumen od izvornih krutih sastojaka. Ova promjena volumena uzrokuje razvoj naprezanja u betonu koji u konačnici dovodi do pucanja i propadanja zaštitnog sloja betona (Slika 36) [50].



Slika 36. Oštećenje betona uzrokovano napadom sulfata [16]

9.1.4. Korozija

Značajan broj slučajeva ukazuje na to da je korozija čelika za armiranje bila i još uvijek je najozbiljnija i najkritičnija prijetnja trajnosti i sigurnosti betonskih konstrukcija u morskom okruženju.

Korozija se jako brzo razvija u propusnom i poroznom betonu koji je naizmjenično izložen prskanju slane vode i zraku, te plimi i oseki. U betonu dolazi do taloženja klorida različitih koncentracija, pokrećući elektrokemijske reakcije i korodirajući čelik za armiranje. Korozija čelika stvara naprezanja znatno veća od vlačne čvrstoće betona, a samim time i pukotine duž armaturnih šipki. Posljedica toga je oštećenje zaštitnog sloja betona što povoljno djeluje na brzinu razvoja korozije [49].

9.1.5. Mehaničko oštećenje

Betonske konstrukcije u vodi i njenoj okolini podložne su raznim vrstama mehaničkih oštećenja. Neki od njih su udari, abrazija, kavitacija, oštećenja uslijed opterećenja, ali i oštećenja od smrzavanja i odmrzavanja.

Udar

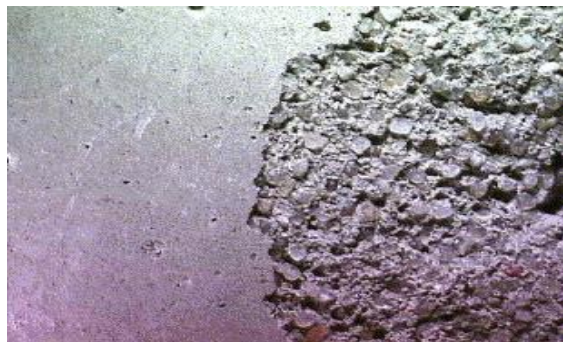
Oštećenje od udarca na betonskoj konstrukciji može varirati od plitkog ljuštenja uzrokovanog laganim udarom teglenice pa sve do potpunog gubitka stabilnosti konstrukcije uzrokovanog udarom broda u neki od dijelova konstrukcije. U slučajevima manjeg od katastrofalnog utjecaja, šteta može biti pod vodom i stoga neotkrivena. U takvom slučaju, konstrukcija pati ne samo od izravne posljedice udara (obično pucanja i lomljenja), već i od neizravnih posljedica većeg pristupa unutarnjem betonu i armaturnom čeliku od strane vode i onečišćenja koja se prenosi vodom [49].

Abrazija

Abrazija je obično uzrokovana česticama koje se prenose vodom (kamen, pijesak) koje se trljaju o betonsku površinu i tako uzrokuju oštećenja. Tipična podvodna abrazija uključuje oštećenja stupova i pilota uzrokovanih česticama koje su nošene strujom. Oštećenja od abrazije nastaju i kretanjem brodova privezanih uz nedovoljno zaštićene objekte. Također, i u ovom slučaju nastalo oštećenje omogućuje veći pristup unutarnjem betonu. U hladnim klimatskim uvjetima, led je glavni uzrok oštećenja abrazijom [49].

Kavitacija

Kavitacija je oštećenje uzrokovano implozijom mjehurića vodene pare nošenih brzom vodenom strujom. Mjehurići se formiraju i potom uništavaju promjenom uvjeta tlaka koji su rezultat diskontinuiteta protoka vode. Kavitacija predstavlja ozbiljan problem jer je sila koja djeluje na beton pri imploziji dovoljno velika da ukloni sloj betona. Oštećenja uzrokovana kavitacijom u početku se pojavljuju kao vrlo gruba područja na betonskoj površini (Slika 37), a s vremenom se pogoršavaju u smjeru strujanja vode [49].



Slika 37. Oštećenje betonske konstrukcije uzrokovano kavitacijom [3]

Oštećenja uslijed opterećenja

Betonska konstrukcija može biti oštećena seizmičkim silama ili opterećenjima većim od onih danih projektom. Uobičajeni simptomi takvih oštećenja su velike strukturalne pukotine u područjima napetosti ili smicanja.

9.1.6. Posljedica smrzavanja i odmrzavanja

Propadanje betona uslijed ciklusa djelovanja smrzavanja i odmrzavanja uočeno je u velikom broju konstrukcija izloženih vodi i niskim temperaturama. Smrzavanje vode u porama betona može dovesti do naprezanja i pucanja. Destabilizirajuće sile nastaju zbog činjenice da se volumen vode pri smrzavanju poveća za otprilike 9%. Beton koji je stalno potopljen u vodi, obično se dobro ponaša. Međutim, u zoni plime i oseke podložan je aktivnom ciklusu smrzavanja i odmrzavanju u hladnim klimama. Smrzavanje se događa kada se plima povuče, izlažući mokri beton. Voda se smrzava u betonskim porama, širi se i stvara velika naprezanja. Kada plima na kraju poraste, led se topi i ciklus se ponavlja, a pri tome uzrokuje progresivno propadanje betona.

Razna terenska i laboratorijska istraživanja pokazala su da je stopa propadanja uslijed smrzavanja i odmrzavanja znatno veća u slanoj nego u slatkoj vodi. Ova razlika u otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje obično se pripisuje stvaranju višeg hidrauličkog tlaka u sustavu pora zbog gradijenata soli i osmotskih učinaka. Male zračne šupljine u betonu postat će ispunjene vodom nakon dugog perioda uranjanja. Te se praznine također mogu lakše popuniti kada je prisutna sol. Unatoč niskoj otpornosti betona na smrzavanje u slanoj vodi, propadanje se obično odvija vrlo sporo. Međutim, u zonama plime i oseke beton je izložen i drugim vrstama procesa propadanja. Beton koji je podvrgnut mnogim ciklusima smrzavanja-odmrzavanja u morskoj vodi može povećati volumen zbog mikropukotina koje su rezultat neadekvatne otpornosti na smrzavanje-odmrzavanje [49].

10. PRIMJERI PRIMJENE I UGRADNJE PODVODNOG BETONA

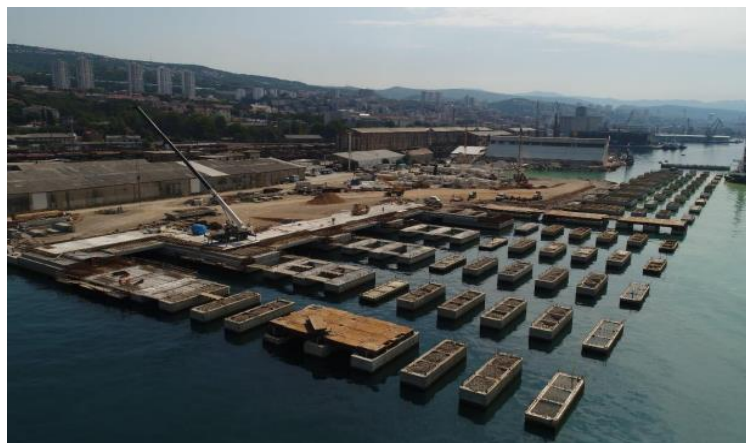
10.1. Zagrebačka obala – kontejnerski terminal, Rijeka

Cilj projekta je bio povećanje kapaciteta kontejnerskog prometa riječke luke, ali i izvedba adekvatnog pristupa željezničkom transportu. Metoda za ugradnju betona u ovom slučaju je bila izvedba armirano betonskih kesona sa samo jednim plutajućim postrojenjem (Slika 38).



Slika 38. Plutajuće postrojenje za izvedbu kesona [52]

Pomoću plutajućeg postrojenja izvodili su se kesoni na dubini većoj od 22 m. Tijekom izvođenja kesona došlo je do promjene pozicije postrojenja, odnosno postrojenje je prebačeno s otvorenog mora u područje zatvorenog lučkog bazena kako bi se izbjegli visoki valovi. Ukupno je izvedeno 49 kesona ukupne visine 1050 m (Slika 39) [52, 53].



Slika 39. Prikaz svih ugrađenih kesona [52]

10.2. Projekt LNG terminala, otok Krk

Kao tehničko rješenje temeljenja LNG terminala predloženi su armirano betonski piloti (Slika 40) umjesto prethodno planiranih kesona. Raznim istraživanjima i proračunima dokazano je da su piloti jednako dobri kao i izvedba kesona, ali i jednostavniji za izvođenje. Za razliku od kesona, izvedba konstrukcije na armirano betonskim pilotima ima manji utjecaj na morsko dno budući da oni utječu isključivo na mjestu izvođenja samog pilota. Izvođenje kesona je nešto kompleksnije jer je za njih potreban široki iskop, ali i temeljni nasip koji prekriva znatnu površinu morskog dna. Osim toga, pri izvedbi pilota nije potrebno plutajuće postrojenje.



Slika 40. Prikaz armirano betonskih pilota kao temelja LNG terminala na otoku Krku

11. PROJEKTIRANJE SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE

Projekt sastava betona treba zadovoljiti sljedeće zahtjeve: zahtjev tlačne čvrstoće, zahtjev trajnosti te zahtjev obradivosti. Zahtjev tlačne čvrstoće ovisi o vrsti konstrukcije i razredu izloženosti, dok zahtjev trajnosti ovisi samo o razredu izloženosti konstrukcije okolišu. Zahtjev obradivosti betona može se odrediti ispitivanjem konzistencije svježe betonske mješavine četirima metodama. Najčešće se primjenjuje metoda slijeganja gdje se mjeri veličina slijeganja svježeg betona. Proračun betonske mješavine vrši se u skladu s tehničkim propisom za betonske konstrukcije.

11.1. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio diplomskog rada izrađen je u Laboratoriju za materijala Građevinskog fakulteta u Rijeci, a sastojao se od određivanja fizikalnih parametara agregata, proračuna sastava betonske mješavine, izrade potrebnih mješavina te ispitivanja mješavine u svježem i očvrnulom stanju. Nakon određenih fizikalnih parametara i proračuna sastava betona, bilo je potrebno postići mješavinu koja će zadovoljiti sve potrebne zahtjeve. Nakon izrade nekoliko probnih mješavina slijedila je izrada zadovoljavajuće mješavine koja predstavlja referentnu mješavinu, te još dvije mješavine istog sastav, ali u kojima je 10% mase cementa zamijenjeno metakaolinom u jednoj mješavini i silicijskom prašinom u drugoj mješavini..

Dakle, ukupno su izrađene tri mješavine betona:

- I. Mješavina 1 oznake M1 REF odnosi se na referentnu mješavinu - Obični beton OB S5
- II. Mješavina 2 oznake M2 MET odnosi se na mješavinu u kojoj je 10% mase cementa zamijenjeno sa metakaolinom - Obični beton S5 + 10% Metakaolin
- III. Mješavina 3 oznake M3 SIL odnosi se na mješavinu u kojoj je 10% mase cementa zamijenjeno silicijskom prašinom - Obični beton S5+ 10% Silicijska prašina

Proračun recepture betonske mješavine vrši se za obalni potporni zid, odnosno za betonsku konstrukciju u zoni morskog okoliša (plima i oseka), bez smrzavanja.

Za proračun sastava betona, projektom su definirani sljedeći parametri:

- Klasa betona: C35/45
- Uvjet trajnosti: XC4, XS3, XA1
- Razred konzistencije slijeganjem: S5
- Maksimalno zrno agregata: $D_{\max}=16$ mm, $\rho_a = 2,65$ kg/dm³
- Granulometrijska krivulja: Fuller (B)
- Cement CEM II/A-LL 42,5 R (Holcim Lumen), $\rho_c = 3,05$ kg/dm³
- Superplastifikator Dynamo SF 16 S, $\rho_s = 1,1$ kg/dm³

11.2. Određivanje fizikalnih svojstava materijala

Kako bi započeli s proračunom recepture betona potrebno je prvo odrediti fizikalna svojstva agregata odnosno gustoću i volumensku masu suhog te zasićenog površinski suhog materijala. Korištene su tri frakcije: 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm te je svaka od njih pojedinačno ispitana. Svaka frakcija je prethodno potopljena u vodi minimalno 24 sata kako bi se dobio zasićen agregat.

Sitni agregat, odnosno frakcija 0-4 mm ispituje se pomoću piknometra. Piknometar se prvo ispuni vodom do označenog nivoa te se važe (Slika 41), zatim se odlije dio vode iz piknometra i ubacuje se pijesak (Slika 42). Nakon pijeska, u piknometar se dodaje voda do označenog nivoa te se zajedno s pijeskom i vodom ponovno važe. Zatim se pijesak vadi iz piknometra i važe kao vlažan agregat, a nakon toga suši do stalne mase. Agregat se smatra suhim ako u dva ili više uzastopnih vaganja ima istu masu.



Slika 41. Piknometar + voda



Slika 42. Piknometar + voda + pijesak

Potopljeni krupni agregat (4-8 mm i 8-16 mm) se procijedi kroz mrežastu košaru koja je dio vage. Agregat se izvaži na zraku, a zatim se krpom obriše vidljivi sloj vode, odnosno ukloni se površinska voda čime se dobije zasićeni, površinski suh uzorak koji se također važe na zraku (Slika 43 i 44). Nakon toga se taj isti uzorak važe i pod vodom u prethodno tariranoj košari, a zatim se suši do stalne mase.



Slika 43. ZSP agregat frakcije 4-8 mm



Slika 44. ZSP agregat frakcije 8-16 mm

Nakon svih potrebnih vaganja frakcija i dobivenih masa (Tablica 12), uvrštavanjem u određene formule dobiju se vrijednosti gustoća i volumenskih masa (Tablica 13) za svaku frakciju te se također izračuna apsorpcija A_s , površinska vlažnost A_w i vlažnost W (Tablica 14).

Tablica 12. Izmjerene mase frakcija agregata

SVOJSTVO			MATERIJAL			
			Sitni agregat 0-4	Krupni agregat 4-8	Krupni agregat 8-16	
Opis svojstva		Oznaka	M.j.			
Masa vlažnog materijala		m_{wv}	g	611,12	927,53	2248,53
Masa zasićenog površinski suhog materijala	vaganog na zraku	m_z	g	518,76	861,30	2186,10
	vaganog pod vodom	m_{zw}	g	-	531,13	1355,57
Masa suhog materijala		m_d	g	511,19	843,69	2167,37
Masa piknometra s vodom		m_{Bw}	g	962,94	-	-
Masa materijala+piknometar+voda		m	g	1286,54	-	-

Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlažnosti agregata

SVOJSTVO		FORMULE	FRAKCIJE		FORMULE	FRAKCIJE
			4-8	8-16		0-4
Gustoća	ρ_0	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_d - m_{zw}}$	2,70	2,67	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{Bw} - m + m_d}$	2,73
Volumenska masa suhog materijala	$\rho_z(d)$	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	2,56	2,61	$\frac{m_d \cdot \rho_w}{m_{Bw} - m + m_z}$	2,62
Volumenska masa zasićenog površinski suhog materijala	$\rho_z(ZPS)$	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_z - m_{zw}}$	2,61	2,63	$\frac{m_z \cdot \rho_w}{m_{Bw} - m + m_z}$	2,66

Tablica 14. Osnovna fizikalna svojstva agregata

SVOJSTVO		FORMULE	FRAKCIJE		
			0-4	4-8	8-16
APSORBIRANA VODA (A_w)	(% m)	$\frac{m_z - m_d}{m_d} \cdot 100$	1,48	2,09	0,86
	(% vol)	$\frac{(m_z - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	4,04	5,63	2,31
POVRŠINSKA VLAŽNOST (A_s)	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_z}{m_d} \cdot 100$	18,07	7,85	2,88
	(% vol)	$\frac{(m_{wv} - m_z) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	49,24	21,19	7,69
VLAŽNOST (W)	(% m)	$\frac{m_{wv} - m_d}{m_d} \cdot 100$	19,55	9,94	3,74
	(% vol)	$\frac{(m_{wv} - m_d) \cdot \rho_0}{m_d \cdot \rho_w} \cdot 100$	53,27	26,82	10,00

11.3. Granulometrijski sastav agregata

Zadani sastav agregata određen je prema granulometrijskoj krivulji Fuller (B16) i prikazan je u Tablici 15.

Tablica 15. Zadani sastav agregata

FRAKCIJA (mm)	Site (mm)								
	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4	0	3,5	13,1	36	60	75	92	100	100
4-8	0	0	0	0	0	0	10	99	100
8-16	0	0	0	0	0	0	3	10	92
B16	0	0	12	21	33	44	56	76	100

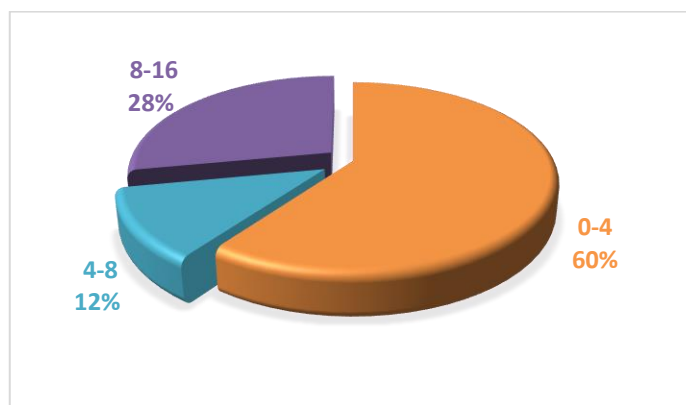
Proračunom udjela frakcija dobiveni su sljedeći rezultati:

- frakcija 0-4 mm 60 %
- frakcija 4-8 mm 12 %
- frakcija 8-16 mm 28 %

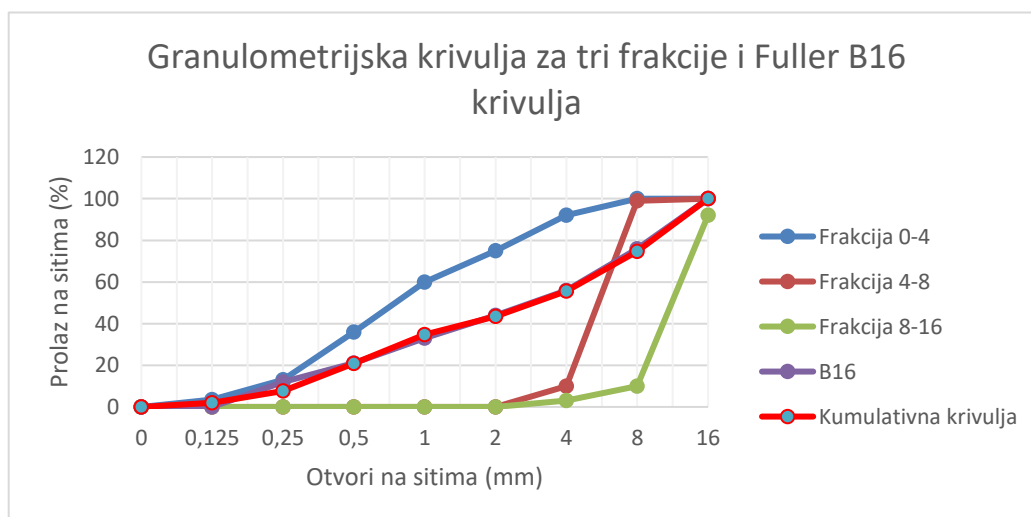
Pomoću dobivenih rezultata udjela frakcija određuje se kumulativni sastav agregata (Tablica 16).

Tablica 16. Dobiveni kumulativni sastav

Frakcija	%	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4	60	0,0	2,1	7,9	21,6	36,0	45,0	55,2	58,0	58,0
4-8	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	11,9	14,0
8-16	28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	2,8	28,0
Ukupno	100	0	2,1	7,86	21,6	36	45	57,2	72,7	100,0



Slika 45. Udjeli frakcija agregata u betonskoj mješavini (%)



Slika 46. Granulometrijska krivulja

11.4. Probna mješavina

Prije izrade potrebnih mješavina betona spravljena je probna mješavina koja treba zadovoljiti zadane uvjete. Probna mješavina je spravljena od agregata frakcije 0-4 mm, 4-8 mm i 8-16 mm, cementa, vode i superplastifikatora. Izrada se odvijala u više faza dok dobivena mješavina nije postigla zahtijevana svojstva betona. Nakon miješanja svake od probnih mješavina, bilo je potrebno provjeriti konzistenciju slijeganjem pomoću Abramsova konusa.

Izrađeno je ukupno 12 probnih mješavina u kojima su se javili neki od problema prikazanih na Slici 47: a) nedostatak vode – presuha mješavina, b) prevelika količina krupnog agregata, odnosno frakcije 8-16 mm, c) nepravilan oblik slijeganja uslijed nedostatka cementne paste, te d) izdvajanje vode.



a) nedostatak vode



b) nepravilno slijeganje - velika količina frakcije 8-16 mm



c) nepravilno slijeganje, nedostatak vode



d) izdvajanje vode

Slika 47. Problemi koji su nastajali u probnim mješavinama

Variranjem postotaka određenih frakcija te povećanjem mase cementa i vode dobivena je probna mješavina čija svojstva svježje betonske mješavine su zadovoljavajuća. Tablica 17 prikazuje recepturu betonske mješavine za volumen od 1 m³ i količine sastojaka probne mješavine volumena 0,01 m³.

Tablica 17. Receptura betonske mješavine za 1 m³ i za 0,01 m³

KOMPONENTE	ZA 1 m ³			PROBNA MJEŠAVINA (10 l=0,01 m ³)
	MASA	GUSTOĆA	VOLUMEN	MASA (kg)
Cement	440,00	3,05	144,26	4,4
Voda	198,00	1	198,00	2,014
v/c=0,45	-	-	-	-
Zrak=2,5 %	-	-	25,00	-
Superplastifikator=0,6%mc	2,64	1,2	2,20	0,0264
Agregat	1670,92	2,65	630,54	16,709
UKUPNO	2311,56	2,31	1000,00	23,15

Prilikom izrade svake od mješavine bilo je potrebno provjeriti vlažnost agregata za svaku od frakcija te ovisno o izmjerenoj vlažnosti korigirati masu vode kako ne bi došlo do narušavanja vodocementnog omjera. Korekcija vlažnosti za spravljanje mješavina dana je u Tablici 18.

Tablica 18. Korekcija masa pojedinih frakcija agregata obzirom na stanje vlažnosti

FRAKCIJE	MASA ZPS		APSORPCIJA (As)		VLAŽNOST (W)		KOREKCIJA
	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	60	1002,55	1,5	15,04	2,0	20,05	1003,05
4-8	12	200,51	2,1	4,21	0,0	0,00	198,41
8-16	28	467,86	0,9	4,21	0,0	0,00	466,96
Σ	100	1670,92	4,5	23,46	2,0	20,05	1668,42

Korekcija mase vode:

$$m_{w.k} = m_w - (\Sigma W - \Sigma A_s) \quad (13)$$

$$m_{w.k} = 198,0 - (20,05 - 23,46) = 201,41 \text{ kg}$$

11.5. Izrada mješavina

11.5.1. Mješavina 1 (Obični beton OB S5)

Spravljanje mješavine započinje vaganjem svih potrebnih sastojaka, a zatim se u mješalicu stavljaju prvo suhi sastojci (agregat i cement) te se miješa 1 min. Voda se dodaje u dva puta. Prvi put se dodaje 80% vode te sve skupa miješa 1 min. Nakon što se mješavina dobro izmiješala, dodaje se preostalih 20% vode pomiješane sa potrebnom količinom superplastifikatora i miješa se 1-2 min, odnosno do trenutka kada je mješavina homogena. Temperatura svježeg betona nakon miješanja iznosila je 22°C. Receptura mješavine 1 prikazana je u Tablici 19.

Tablica 19. Receptura mješavine 1 (OB S5)

KOMPONENTE	MJEŠAVINA 1 ZA 30 l=0,036 m ³
	MASA (kg)
Cement	15,84
Voda	7,13
v/c=0,45	-
Zrak=2,5 %	-
Superplastifikator=0,6%mc	0,095
Agregat	60,15
UKUPNO	83,22

11.5.2. Mješavina 2 (Obični beton S5 + 10% Metakaolin)

Mješavina 2 spravljena po istoj recepturi kao i mješavina 1. Jedina razlika između ove dvije mješavine je zamjena mase cementa sa 10% metakaolina u mješavini 2 (Tablica 20). Postupak miješanja je isti kao prethodno opisani za mješavinu 1. Temperatura svježeg betona nakon miješanja iznosila je 22°C.

Tablica 20. Receptura mješavine 2 (OB S5 + 10% metakaolin)

KOMPONENTE	MJEŠAVINA 2 ZA 30 l=0,036 m ³
	MASA (kg)
Cement	14,26
Voda	6,42
Metakaolin 10% m _c	1,43
v/c=0,45	-
Zrak=2,5	-
Superplastifikator=0,6%mc	0,086
Agregat	63,44
UKUPNO	84,20

11.5.3. Mješavina 3 (Obični beton S5+ 10% Silicijska prašina)

Mješavina koja je po recepturi ista kao mješavine 1 i 2 (Tablica 21). Za razliku od mješavine 2, umjesto metakaolina korištena je silicijska prašina (u udjelu od 10% mase cementa). Postupak dodavanja i miješanja sastojaka je isti kao prethodno opisani za mješavinu 1 i 2. Temperatura svježeg betona neposredno nakon završetka procesa miješanja iznosila je 25°C.

Tablica 21. Receptura mješavine 3 (OB S5 + 10% silicijska prašina)

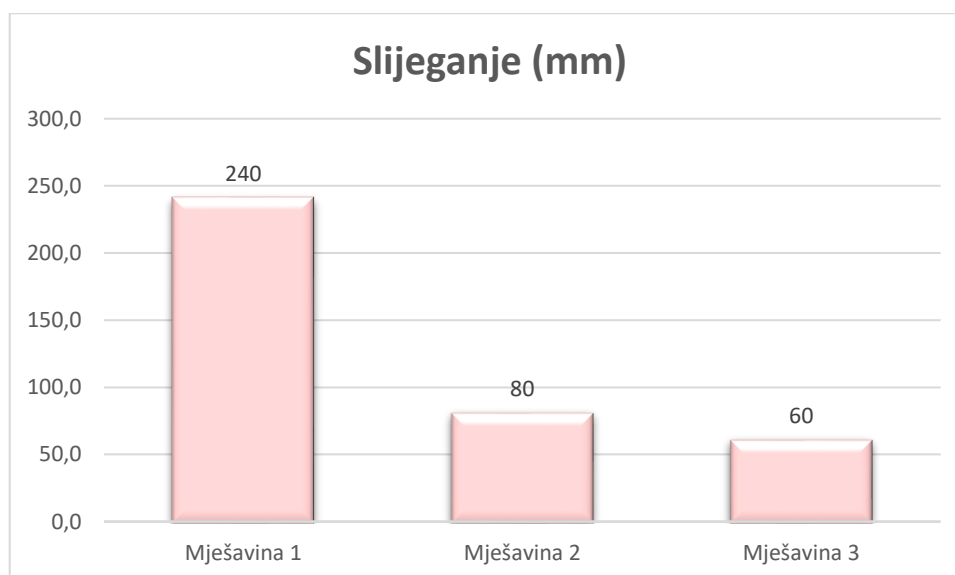
KOMPONENTE	MJEŠAVINA 3 ZA 30 l=0,036 m ³
	MASA (kg)
Cement	14,23
Voda	6,42
Silicijska prašina 10% m _c	1,43
v/c=0,45	-
Zrak=2,5	-
Superplastifikator=0,6%mc	0,086
Agregat	63,44
UKUPNO	84,20

12. ISPITIVANJE SVJEŽEG BETONA

Svaka od prethodno spomenutih mješavina ispitana je u svježem stanju, neposredno nakon miješanja. Provedena su ispitivanja konzistencije metodom slijeganja (Slump test), gustoće i sadržaj pora svježeg betona.

12.1. Slijeganje

Veličina slijeganja izmjerena je sukladno postupku opisanom u normi HRN EN 12350-2 [54]. Rezultati ispitivanja konzistencije slijeganjem prikazani su grafom na Slici 48.



Slika 48. Slijeganje mješavina



Slika 49. Slijeganje mješavine 1 (S5)



Slika 50. Slijeganje mješavine 3 (S2)

Dobiveni rezultati pokazuju da je slijeganje najveće kod mješavine 1, odnosno običnog betona i da zadovoljava traženi razred konzistencije S5, a ono iznosi 240 mm (Slika 49). Veličina slijeganja mješavine 1 je veća u odnosu na mješavinu 2 za 30%, a u odnosu na mješavinu 3 za 25%. Obzirom na izmjerene veličine slijeganja, obje mješavine se svrstavaju u razred konzistencije S2 (raspona od 50-90 mm) (Slika 50).

12.2. Gustoća betona

Gustoća svježeg betona ispituje se prema normi HRN EN 12350-6 [55]. Za određivanje gustoće koristi se kalup poznatog volumena i vaga. Najprije se izvaže prazan kalup, a zatim kalup napunjen betonom do vrha [55]. Uvrštavanjem u sljedeći izraz dobiju se potrebne vrijednosti:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (14)$$

gdje je:

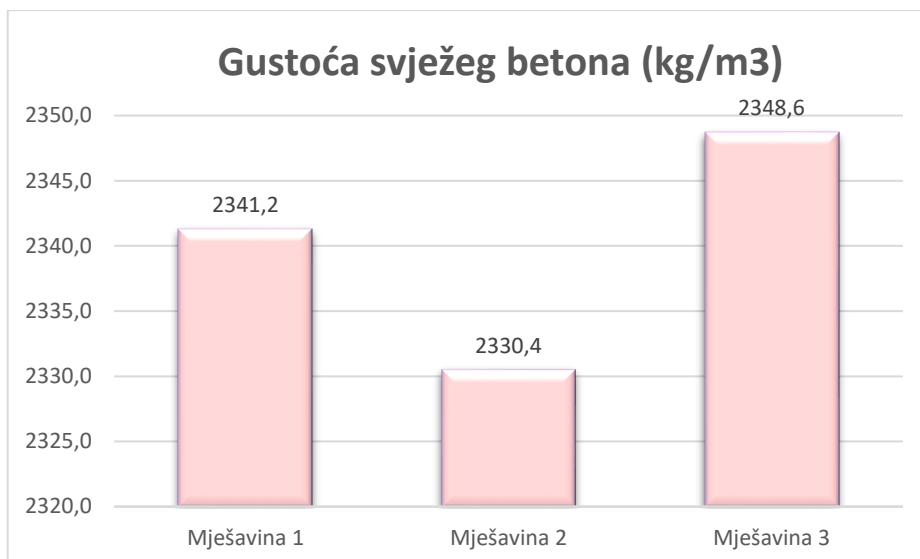
ρ – gustoća svježeg betona (kg/m^3)

m_1 – masa praznog kalupa (kg)

m_2 – masa kalupa napunjenog betonom (kg)

V – volumen kalupa (m^3)

Dobiveni rezultati prikazani su grafom na Slici 51. Iz grafa se vidi da najveću gustoću u svježem stanju ima mješavina 3, odnosno mješavina s dodatkom silicijske prašine, a ona iznosi 2348,6 kg/m^3 . Najmanja gustoća zabilježena je kod mješavine s dodatkom metakaolina od 2330,4 kg/m^3 što se i očekivalo obzirom da je gustoća cementa 3000 kg/m^3 , a gustoća metakaolina 2600 kg/m^3 . Za silicijsku prašinu ne postoji točna vrijednost gustoće, ali na temelju podataka i ispitivanja može se pretpostaviti da je njena gustoća veća od gustoće cementa.



Slika 51. Rezultati određivanja gustoće betonskih mješavina

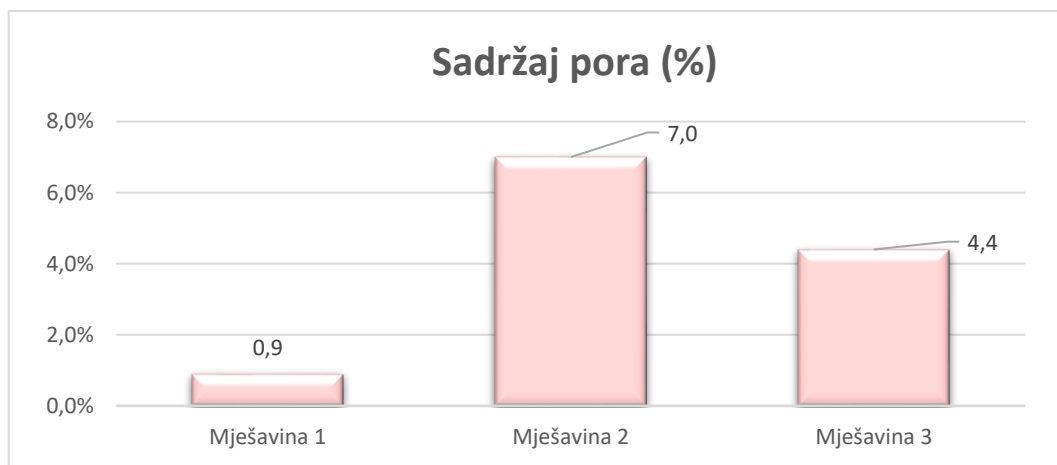
12.3. Sadržaj pora

Sadržaj pora u uzorku ispituje se prema normi HRN EN 12350-7 [56]. Za ovo ispitivanje koristi se prethodno baždareni porometar (Slika 52). Porometar se napuni svježim betonom u tri sloja do vrha, nakon čega se postavlja poklopac i zabrtvljuje. Ventil za zrak se zatvara, a istovremeno se otvaraju druga dva ventila. Kroz jedan ventil se ubrizguje voda sve dok ne poteče kroz drugi ventil. Zatim se porometar lagano udara čekićem kako bi se izbacio zarobljeni zrak te se upumpava zrak u zračnu komoru [56].



Slika 52. Porometar iz laboratorija za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci

Rezultati ispitivanja prikazani su na Slici 53. Udio pora je najveći u mješavini 2 u kojoj se nalazi metakaolin, a najmanje pora sadrži mješavina običnog betona. Ovakvi rezultati nisu očekivani budući da na sadržaj pora utječu oblik i veličina čestica, odnosno sitnije i okruglije čestice smanjuju udio pora u betonu. Najkrupnije čestice ima cement te iz toga razloga očekivano je bilo da najveći sadržaj pora ima obični beton, bez dodataka. U poglavlju „Dodaci betonu kao zaštita od agresivnog okoliša“ navedeno je kako mineralni dodaci poput metakaolina i silicijske prašine utječu povoljno na smanjenje poroznosti betona, ali to se u ovom slučaju nije dogodilo. Razlog takvom rezultatu mogao bi se dobiti detaljnijim istraživanjem, što može biti predmet istraživanja nekog drugog diplomskog rada.



Slika 53. Rezultati ispitivanja sadržaja pora

12.4. Ugradnja betona

Nakon izrade mješavina i ispitivanja potrebnih svojstava svježeg betona, svaka od mješavina je ugrađena u 6 kalupa oblika kocke dimenzija 15 x 15 x 15 cm za ispitivanje tlačne čvrstoće i vodonepropusnosti te 1 valjak dimenzija 15 x 30 cm za ispitivanje plinopropusnosti. Svježi beton je ugrađen u prethodno nauljene kalupe, zatim zbijen na vibrostolu (Slika 54). Uzorci betona se vade iz kalupa nakon proteklih 24 sata [57, 58].



Slika 54. Beton ugrađen u kalupe

12.5. Njega betona

Vađenjem betonskih uzoraka iz kalupa započinje njegovanje betona. Nakon vađenja potrebno je uzorke njegovati u termostratiranom bazenu 28 dana (Slika 55). Uzorci se ostavljaju u bazenu kako bi se spriječilo izdvajanje vode na površini uzorka, reducira plastično skupljanje i pojavu pukotina [59].



Slika 55. Njegovanje betonskih uzoraka u vodi

13. ISPITIVANJA OČVRSNULOG BETONA

Ispitivanja očvrtnulog betona provedena su nakon 28 dana njegovanja u vodi. Provedena su sljedeća ispitivanja: gustoća očvrtnulog betona, tlačna čvrstoća, plinopropusnost, vodonepropusnost (VDP) te nakon 72 ± 2 sata vlačna čvrstoća cijepanjem. Za svako ispitivanje ispitana su po 3 uzorka.

13.1. Gustoća očvrtnulog betona [60,61]

Gustoća svakog od uzorka je određena prema izrazu (15) te prikazana u Tablici 22:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (15)$$

gdje je:

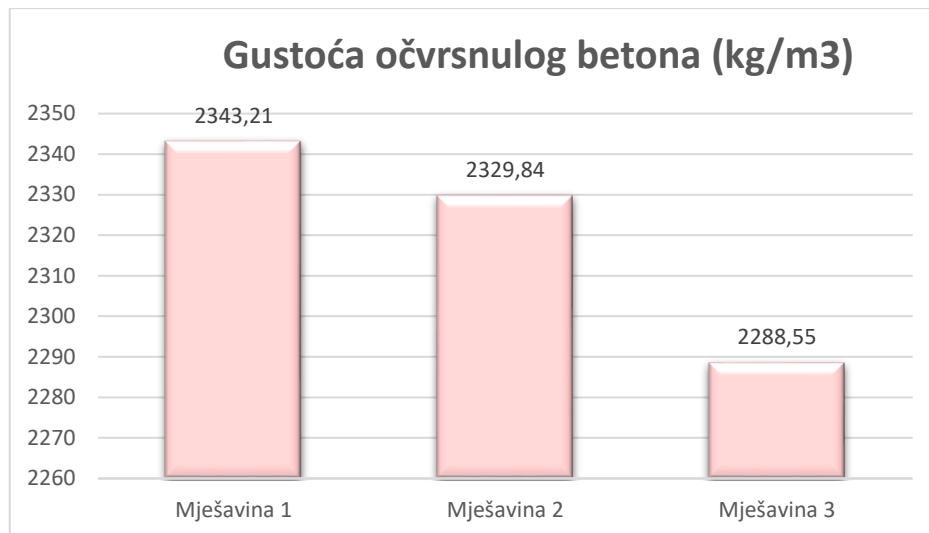
ρ – gustoća očvrtnulog betona (kg/m^3)

m – masa betonskog uzorka (kg)

V – volumen betonskog uzorka (m^3)

Tablica 22. Rezultati ispitivanja gustoće na očvrslom betonu

GUSTOĆA OČVRSNULOG BETONA								
Mješavina	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			Volumen	Masa	Gustoća	
		a (mm)	b (mm)	c (mm)	V (m^3)	m (kg)	ρ (kg/m^3)	ρ_{sr} (kg/m^3)
Mješavina 1 (OB S5)	U1R	150,1	149,9	149,5	0,00336	7,866	2338,46	2343,21 (st.dev=6,28)
	U2R	149,9	150,1	149,8	0,00337	7,894	2342,09	
	U3R	149,6	149,9	149,7	0,00336	7,837	2334,51	
	U4R	149,7	150,5	149,7	0,00337	7,898	2341,73	
	U5R	149,6	149,9	149,7	0,00336	7,899	2352,97	
	U6R	149,9	150,3	149,6	0,00337	7,919	2349,51	
Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	U1M	149,7	151,1	149,8	0,00339	7,893	2329,40	2329,84 (st.dev=8,18)
	U2M	150,2	151,2	149,9	0,00340	7,973	2342,06	
	U3M	151,8	150,0	150,0	0,00342	7,932	2322,35	
	U4M	150,1	150,3	149,8	0,00338	7,867	2327,86	
	U5M	149,8	150,0	149,8	0,00337	7,871	2338,38	
	U6M	149,9	150,6	150,2	0,00339	7,863	2318,95	
Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	U1S	150,2	150,3	150,3	0,00339	7,707	2271,42	2288,55 (st.dev=16,88)
	U2S	149,6	152,5	150,8	0,00344	7,961	2314,01	
	U3S	150,2	149,9	149,7	0,00337	7,629	2263,47	
	U4S	149,4	152,5	150,6	0,00343	7,885	2298,03	
	U5S	150,1	150,8	149,9	0,00339	7,766	2288,83	
	U6S	150,4	151,2	149,9	0,00341	7,825	2295,53	



Slika 56. Rezultati ispitivanja gustoće očvrsnulog betona

Prema rezultatima iz Tablice 22 i grafa sa Slike 56, najveću gustoću ima mješavina običnog betona kao što se i očekivalo budući da dodavanjem metakaolina i silicijske prašine se gustoća smanjuje. Gustoća ovisi o gustoći, finoći i veličini čestica te obzirom da su čestice silicijske prašine najsitnije, mješavina 3 ima najmanju gustoću u očvrsnulom stanju. Međutim, rezultati ispitivanja za mješavinu 2 i 3 pokazuju veliko rasipanje rezultate što upućuje na to da bi dobivene rezultate trebalo dodatno istražiti.

13.2. Tlačna čvrstoća

Tlačna čvrstoća je osnovno svojstvo očvrsnulog betona koje treba ispitati. Prema normi HRN EN 206:2016 [62] ispituje se na uzorcima oblika kocke dimenzija 15 x 15 x 15 cm.

Postupak ispitivanja provodi se prema normi HRN EN 12390-3 [59]. Površine betonskog uzorka se izravnavaju brušenjem te nakon toga prebrišu krpom kako bi se odstranila površinska voda i višak zrnaca materijala, a zatim se uzorak izvaži i izmjere se dimenzije bridova. Uzorak se postavlja u prešu za ispitivanje (Slika 57) na način da se opterećenje nanese okomito smjeru ulijevanja betona u kalup. Opterećenje na uzorak se nanosi jednolikom brzinom 0,6 MPa do sloma [62]. Tijekom ispitivanja mjeri se porast sile u vremenu. Važno je zabilježiti maksimalno opterećenje pri kojem je došlo do sloma te i sami oblik sloma. U okviru ovog rada ukupno je ispitano 9 uzoraka, 3 od svake mješavine.

Tlačna čvrstoća dobivena je kao srednja vrijednosti tri uzorka prema izrazu (16):

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)} \quad (16)$$

gdje je:

σ_c – tlačna čvrstoća (Mpa)

F_c – sila pri kojoj dolazi do sloma (N)

A – površina koja se opterećuje (mm²)

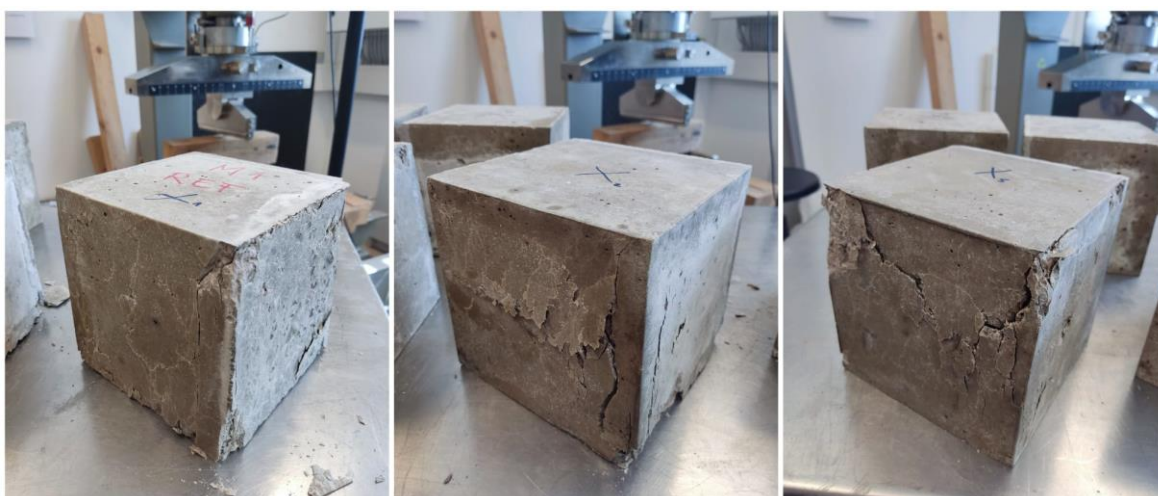


Slika 57. Preša za ispitivanje tlačne čvrstoće, Građevinski fakultet, Rijeka

13.2.1. Mješavina 1 (OB S5)

Najveća sila sloma mješavine 1 iznosila je 1264,0 kN, a najmanja 1251,9 kN. Pomoću izraza (16) za dobivanje tlačne čvrstoće, najveća tlačna čvrstoća iznosi 56,10 MPa, dok srednja tlačna čvrstoća iznosi 56,01 MPa kao što je prikazano u Tablici 23. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pokazuju konzistentnost s vrlo malim odstupanjem

Na Slici 58 su prikazani rezultati ispitivanja i oblici sloma pojedinog uzorka. Na svim uzorcima su vidljive pukotine, nešto više na uzorcima U2R i U5R. Oblici sloma zadovoljavaju zahtjev oblika sloma koji je dan normom.



Slika 58. Betonski uzorci mješavine 1 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

Tablica 23. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće za mješavinu 1

Mješavina 1 (OB S5)	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			Površina uzorka A_c (mm ²)	Masa (kg)	Maksimalna sila (N)	Tlačna čvrstoća (MPa)	Srednja čvrstoća (MPa)
		a (mm)	b (mm)	c (mm)					
	U1R	150,1	149,9	149,5	22530,01	7,866	1264000	56,10	56,01 (st.dev=0,07)
	U2R	149,9	150,1	149,8	22470,01	7,894	1258000	55,99	
	U5R	149,6	149,9	149,7	22380,16	7,899	1251900	55,94	

13.2.2. Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolina)

Mješavina 2 je mješavina u kojoj je masa cementa zamijenjena s 10% metakaolina te njena srednja tlačna čvrstoća iznosi 66,91 MPa što je 16% veće u odnosu na mješavinu običnog betona. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 24.

Na Slici 59 su prikazani ispitani betonski uzorci na kojima su vidljivi mali tragovi pucanja i mrvljenja bridova. Oblici sloma zadovoljavaju oblike propisane normom.



Slika 59. Betonski uzorci mješavine 2 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

Tablica 24. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na mješavini 2

Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			Površina uzorka A_c (mm ²)	Masa (kg)	Maksimalna sila (N)	Tlačna čvrstoća (Mpa)	Srednja čvrstoća (Mpa)
		a (mm)	b (mm)	c (mm)					
	U4M	150,1	150,3	149,8	22530,01	7,867	1472000	65,34	66,91 (st.dev=1,79)
	U5M	149,8	150	149,8	22440,04	7,871	1557700	69,42	
	U6M	149,9	150,6	150,2	22470,01	7,863	1482500	65,98	

13.2.3. Mješavina 3 (OB S5 + 10% silicijske prašine)

U mješavini 3 masa cementa je zamijenjena sa 10% silicijske prašine. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na takvoj mješavini su dani na Slici 60 i u Tablici 25. Maksimalna sila iznosi 1411,5 kN, a maksimalna tlačna čvrstoća 62,40 MPa te srednja tlačna čvrstoća 61,26 MPa.

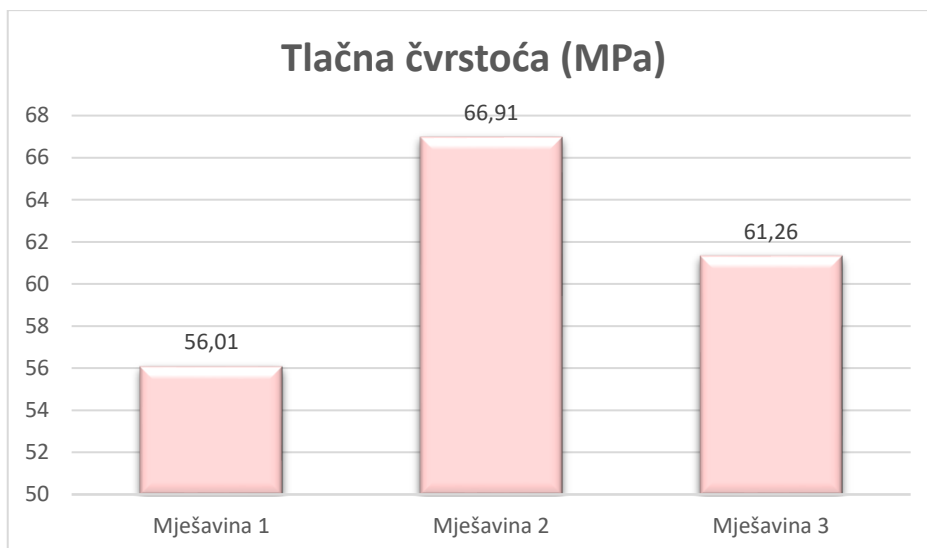
Na Slici 60 prikazani su oblici sloma betonskih uzoraka te je primijećeno mrvljenje bridova.



Slika 60. Betonski uzorci mješavine 3 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

Tablica 25. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine 3

Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	Oznaka uzorka	Dimenzije uzorka			Površina uzorka A_c (mm ²)	Masa (kg)	Maksimalna sila (N)	Tlačna čvrstoća (MPa)	Srednja čvrstoća (MPa)
		a (mm)	b (mm)	c (mm)					
	U4S	149,4	152,5	150,6	22320,36	7,885	1374600	61,59	61,26 (st.dev=1,08)
	U5S	150,1	150,8	149,9	22530,01	7,766	1347500	59,81	
	U6S	150,4	151,2	149,9	22620,16	7,825	1411500	62,40	



Slika 61. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Slika 61 prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće za sve tri mješavine. Najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina 2 koja sadrži metakaolin. Očekivano je bilo da će mješavina 1 bez ikakvih dodataka imati najmanju čvrstoću budući da je poznato da sitne čestice metakaolina i silicijske prašine dodatno popunjavaju šupljine i pore što direktno utječe na povećanje čvrstoće betona. Mješavina 2 u odnosu na mješavinu 1 ima veću tlačnu čvrstoću za otprilike 16%, a u odnosu na mješavinu 3 za 9%. Uspoređujući oblik sloma svake od mješavina uočeno je da je kod uzoraka običnog betona pojava pukotina najizraženija, dok je kod mješavina s dodatcima pojava pukotina manja i međusobno sličnija.

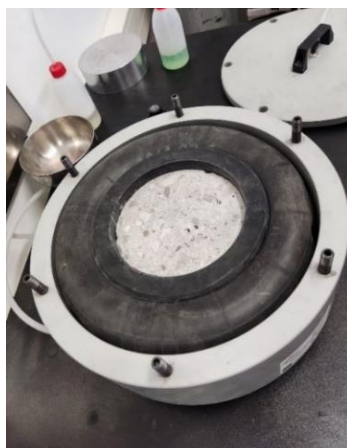
13.3. Plinopropusnost [63]

Plinopropusnost betonskog uzorka ispitana je prema preporukama Cembureau (Kollek, 1989.) budući da metode za ispitivanje nisu još normirane. Cembureau se temelji na Haugen-Poiseuilleovom odnosu prema kojem voda teče pod tlakom kroz pore materijala, pri stacionarnim uvjetima.

Uzorci koji se ispituju su valjkastog oblika te prethodno pravilno njegovani i bez pukotina. Ispitano je po 9 uzoraka od svake mješavine, ukupno 45 valjaka približnog promjera 150 mm i visine 50 mm. Betonski uzorci ispitani su na propusnost dušika pri

temperaturi od 25° C. Ispitivanje je provedeno na način da se betonski uzorak postavi u gumeni obruč te se zajedno s njim postavlja na predviđeno mjesto u uređaju.

Gumeni obruč (Slika 62) se pričvrsti aluminijskim diskom, nakon čega se zatvara komora i pričvršava s 6 vijaka. Kako bi se onemogućio prodor plina oko uzorka, obruč je potrebno napuhati kompresorom. Epruvete se pune sapunicom. Tlak dušika započinje na 1.5 bara, a zatim se postepeno povećava do 3.5 bara. U laboratoriju se nalaze tri epruvete volumena 10, 25 i 100 ml. Svaka epruveta ima pripadajući ventil koji se otvara ovisno u kojoj se epruveti provodi ispitivanje. Otvaranjem ventila ispušta se dušik u epruvetu te se mjeri vrijeme koje je potrebno da mjehurić sapunice dođe od nule do graduiranog dijela epruvete. Tijekom ovog ispitivanja mjereno je do kojeg će volumena doći mjehurić u jednoj minuti, odnosno u 60 sekundi. Očitanje protoka dušika provodi se dok razlika između dva uzastopna mjerenja nije manja od 3%.



Slika 62. Betonski uzorak u gumenom obruču [63]

Rezultati ispitivanja plinopropusnosti su prikazani u Tablici 26, 27, 28, 29 i 30.

Tablica 26. Ulazni podaci za proračun koeficijenta plinopropusnosti

MJEŠAVINA	UZORAK	η (Pas)	PROMJER D (m)	VISINA h (m)	POVRŠINA A (m ²)
Mješavina 1 (OB S5)	U1Rdno	0,00001782	0,1504	0,051	0,018
	U2Rsred.	0,00001782	0,1500	0,051	0,018
	U3Rvrh	0,00001782	0,1503	0,051	0,018
Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	U1Mdno	0,00001782	0,1502	0,050	0,018
	U2Msred.	0,00001782	0,1503	0,052	0,018
	U3Mvrh	0,00001782	0,1495	0,052	0,018
Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	U1Sdno	0,00001782	0,1494	0,053	0,018
	U2Ssred.	0,00001782	0,1498	0,050	0,018
	U3Svrh	0,00001782	0,1499	0,053	0,018

Tablica 27. Rezultati ispitivanja plinopropusnosti

MJEŠAVINA	UZORAK	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa
Mješavina 1 (OB S5)	U1Rdno	60s 2,0 ml	60s 2,4 ml	60s 3,2 ml	60s 4,25 ml	60s 5,4 ml
	U2Rsred.	60s 3,16 ml	60s 3,5 ml	60s 5,3ml	60s 6,3 ml	60s 7,8 ml
	U3Rvrh	60s 2,5 ml	60s 3,15 ml	60s 3,5 ml	60s 4,76 ml	60s 5,6 ml
Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	U1Mdno	60s 3,3 ml	60s 4,15 ml	60s 7,15 ml	60s 9,15 ml	60s 9,5 ml
	U2Msred.	60s 4,75 ml	60s 6,5 ml	60s 8,8 ml	60s 13,5 ml	60s 18,0 ml
	U3Mvrh	60s 8,2 ml	60s 11,25 ml	60s 15,5 ml	60s 22,0 ml	60s 29,5 ml
Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	U1Sdno	60s 5,3 ml	60s 6,8 ml	60s 9,3 ml	60s 12,4 ml	60s 16,0 ml
	U2Ssred.	60s 4,6 ml	60s 5,25 ml	60s 7,0 ml	60s 8,4 ml	60s 14,0ml
	U3Svrh	60s 4,5 ml	60s 5,0 ml	60s 6,5 ml	60s 8,2 ml	60s 13,0 ml

Tablica 28. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 1 (običan beton)

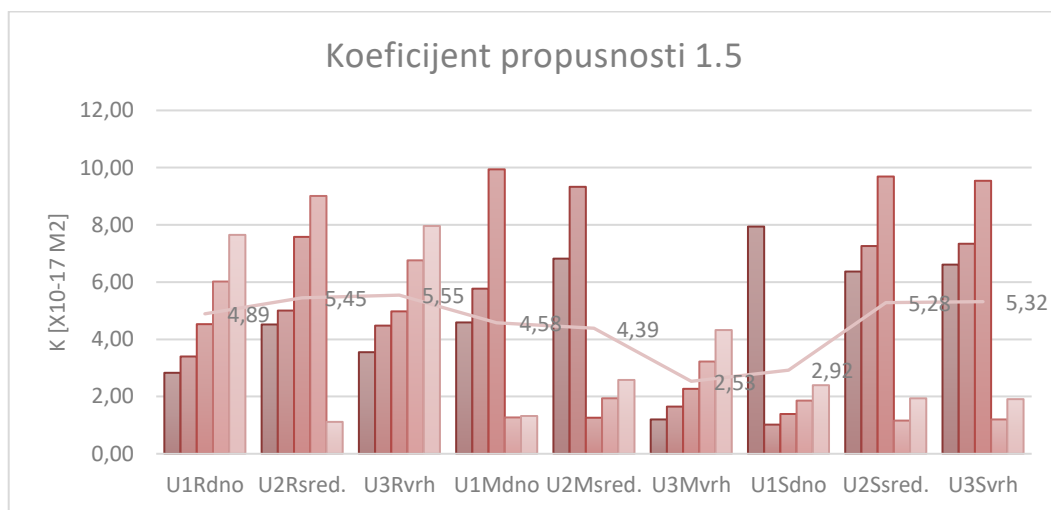
Koeficijent propusnosti K1.5			
TLAK	U1Rdno	U2Rsred.	U3Rvrh
150 kPa	2,83	4,52	3,56
200 kPa	3,40	5,01	4,48
250 kPa	4,53	7,58	4,98
300 kPa	6,02	9,01	6,77
350 kPa	7,65	1,10	7,96
K _{srednje}	4,89	7,45	5,55
St.dev	1,76	2,48	1,60
Plinopropusnost	srednja	srednja	srednja
Kvaliteta betona	srednja	srednja	srednja
*rezultati su prikazani u jedinici 10 ⁻¹⁷ m ²			

Tablica 29. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 2 (običan beton + 10% metakaolina)

Koeficijent propusnosti K1.5			
TLAK	U1Mdno	U2Msred.	U3Mvrh
150 kPa	4,59	6,82	1,20
200 kPa	5,77	9,34	1,65
250 kPa	9,95	1,26	2,27
300 kPa	1,27	1,94	3,22
350 kPa	1,32	2,59	4,32
K _{srednje}	9,25	6,67	4,70
St.dev	3,52	4,05	3,77
Plinopropusnost	srednja	srednja	srednja
Kvaliteta betona	srednja	srednja	srednja
*rezultati su prikazani u jedinici 10 ⁻¹⁷ m ²			

Tablica 30. Dobiveni koeficijenti plinopropusnosti za mješavinu 3 (običan beton + 10% silicijske prašine)

Koeficijent propusnosti K1.5			
TLAK	U1Sdno	U2Ssred	U3Svrh
150 kPa	7,94	6,37	6,61
200 kPa	1,02	7,27	7,35
250 kPa	1,39	9,69	9,55
300 kPa	1,86	1,16	1,20
350 kPa	2,40	1,94	1,91
$K_{srednje}$	7,27	7,38	7,49
St.dev	4,61	3,29	3,37
Plinopropusnost	srednja	srednja	srednja
Kvaliteta betona	srednja	srednja	srednja
*rezultati su prikazani u jedinici $10^{-17} m^2$			



Slika 63. Prosječni specifični koeficijent propusnost

Srednja vrijednost rezultata ispitivanja je dovela do zaključka da su sve tri betonske mješavine slične plinopropusnosti, odnosno da je kvaliteta betona „srednja“. Očekivani rezultat je bio da mješavine s mineralnim dodacima imaju manju plinopropusnost, a rezultati ispitivanja su upravo suprotni. Iz grafa (Slika 63) se vidi da najmanju plinopropusnost, odnosno najveću otpornost na plin ima mješavina običnog betona, dok su druge dvije mješavine manje otporne. Budući da plinopropusnost ovisi o strukturi i poroznosti betona, zaključak ovog ispitivanja, iako suprotno očekivanom je da mješavina običnog betona ima najmanju poroznost tj. najveću otpornost na plin što je u skladu s rezultatima ispitivanja danim u poglavlju 12.3. Sadržaj pora. Također, vidljivo je da rezultati ispitivanja mješavina s dodacima imaju veliko rasipanje rezultata te se obzirom na broj ispitanih uzoraka dobiveni zaključci ne mogu uzeti kao pouzdani.

13.4. Vodonepropusnost [46]

Vodonepropusnost betonskih uzoraka ispitana je prema normi HRN EN 12390-8 [46]. Uzorak je izložen hidrostatskom tlaku od 5 bara 72 ± 2 sata te kroz to vrijeme u uzorak se kontinuirano utiskuje voda s donje strane (Slika 64). Nakon 72 sata utiskivanja vode, uzorak se prepolovi cijepanjem. Na obje polovice uzorka trag vode se zabilježio markerom nakon čega se izmjeri količina vode koja je prodrla kroz beton.



Slika 64. Uzorci izloženi hidrostatskom tlaku 72 sata

Tablica 31. Rezultati ispitivanja vodonepropusnosti

MJEŠAVINE	Oznaka uzorka	Visina prodora vode h (mm)	Srednja visina prodora vode (mm)	Razred vodonepr.
Mješavina 1 (OB S5)	U3R	15	12,7	VDP 3
	U4R	12		
	U6R	11		
Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	U1M	7	8,7	VDP3
	U2M	14		
	U3M	5		
Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	U1S	5	4,7	VDP3
	U2S	4		
	U3S	5		

U Tablici 31 prikazani su dobiveni rezultati ispitivanja vodonepropusnosti iz kojih se vidi da mješavina 3, s dodatkom silicijske prašine ima najveću vodonepropusnost što je u skladu s očekivanjima budući da sitne čestice doprinose smanjenju propusnosti popunjavanjem šupljina i pora matrice betona. Najmanju vodonepropusnost ima običan beton jer sadrži najkrupnije čestice.

13.5. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Vlačna čvrstoća određuje se prema normi HRN EN 12390-6 [64] na uzorcima oblika kocke. Površina uzorka se briše krpom kako bi se odstranio višak vode i zrnca materijala. Uzorci se stavljaju u prešu za tlak u koju se stavi čelični dodatak pomoću kojeg se uzorka cijepa. Uzorak se postavlja u smjeru okomitom na smjer ugradnje betona u kalup. Zatim se opterećuje jednoliko do sloma [64]. Ispituju se tri uzorka od svake mješavine, a vlačna čvrstoća se dobije kao srednja vrijednost prema izrazu (17):

$$\sigma_c = \frac{F_f \cdot 2}{a^2} \text{ (MPa)} \quad (17)$$

gdje je:

σ_c – vlačna čvrstoća (MPa)

F_f – sila sloma (N)

a – dužina brida kocke (mm)

13.5.1. Mješavina 1 (OB S5)

Vlačna čvrstoća ispitana je najprije na mješavini običnog betona, odnosno referentnoj mješavini. Maksimalna sila opterećenja iznosi 127,6 kN pri kojoj je maksimalna vlačna čvrstoća 5,70 MPa. Srednja vlačna čvrstoća ua uzorke mješavine 1 iznosi 5,43 MPa. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 32. Slika 65 prikazuje način cijepanja uzorka po sredini te je crvenim markerom označena veličina prodora vode.



Slika 65. Uzorak mješavine 1 nakon cijepanja

Tablica 32. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće mješavine 1

Mješavina	Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Masa (kg)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Srednja čvrstoća (MPa)
Mješavina 1 (OB S5)	U3R	127,6	7,837	5,70	5,43 (st.dev=0,2)
	U4R	120,9	7,898	5,37	
	U6R	117,5	7,919	5,22	

13.5.2. Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolina)

Sljedeća ispitana mješavina je ona sa dodatkom metakaolina. Maksimalna sila opterećenja iznosi 139,90 kN, dok je maksimalna vlačna čvrstoća 5,30 MPa. Rezultati su dani u Tablici 33 iz koje se može zaključiti da mješavina 2 ima nešto manju vlačnu čvrstoću od običnog betona. Slom uzorka je bio točno po sredini kao što je vidljivo na Slici 66.



Slika 66. Uzorak mješavine 2 nakon cijepanja

Tablica 33. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za mješavinu 2

Mješavina 2 (OB S5 + 10% metakaolin)	Oznaka uzorka	Maksimalna sila (kN)	Masa (kg)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Srednja čvrstoća (MPa)
	U1M	120,00	7,893	5,30	5,32 (st.dev=0,42)
	U2M	109,10	7,973	4,82	
	U3M	132,90	7,932	5,84	

13.5.3. Mješavina 3 (OB 5S + 10% silicijske prašine)

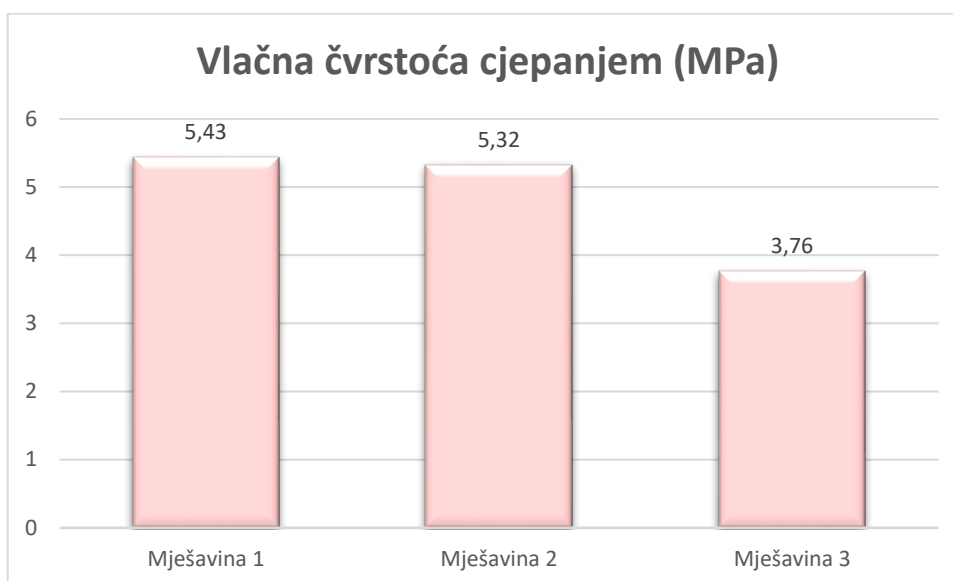
Rezultati ispitivanja (Tablica 34) pokazuju da mješavina 3 u kojoj se nalazi silicijska prašina ima najmanju vlačnu čvrstoću u odnosu na prve dvije mješavine te ona iznosi 3,76 MPa. Slom se dogodio po sredini kao i kod mješavine 1 i 2 (Slika 67).



Slika 67. Uzorak mješavine 3 nakon cijepanja

Tablica 34. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za mješavinu 3

Mješavina 3 (OB S5 + 10% sil.prašina)	Oznaka uzorka	Maksimalna sila (N)	Masa (kg)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Srednja čvrstoća (MPa)
	U1S	99,4	7,707	4,39	3,76 (st.dev=0,56)
	U2S	69,1	7,961	3,03	
	U3S	81,6	7,629	3,85	



Slika 68. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Obje mješavine betona s dodatcima imaju manju vlačnu čvrstoću pri cijepanju u odnosu na referentnu. Najveću vlačnu čvrstoću ispitanu cijepanjem ima mješavina običnog betona, a najmanju ima beton sa silicijskom prašinom (Slika 68). Rezultati su u skladu s očekivanjima budući da se prema podacima iz literature vlačna čvrstoća betona s dodatkom silicijske prašine kreće oko 3,3 MPa, a ovo ispitivanje ne odstupa znatno od te vrijednosti.

14. ZAKLJUČAK

Ugradnja betona pod vodu te i sama izgradnja podvodnih konstrukcija predstavlja jako zahtijevan zadatak koji ako se neispravno provodi može dovesti do ozbiljnih posljedica. Beton u moru izložen je izrazito agresivnom okolišu stoga mora biti adekvatno spravljen, ugrađen i njegovan. Prilikom spravljanja ove vrste betona, bitno je da bude vodonepropusan kako ne bi došlo do prodora vode i drugih agresivnih tvari iz vode.

Glavni cilj ovog rada je ispitati svojstva betona s dodatkom mineralnih dodataka u odnosu na običan beton. Mineralni dodaci prema literaturi i dostupnim podacima pozitivno utječu na svojstva betona, odnosno poboljšavaju određena mehanička i trajnosna svojstva. Također je cilj ovog rada kroz provedena ispitivanja pokazati da li je beton s dodacima dovoljno dobar za podvodno betoniranje.

U praktičnom dijelu ovog rada izrađene su ukupno tri mješavine betona. Prva referentna mješavina je mješavina uobičajenog sastava, agregat, cement, voda te superplastifikator. Druga mješavina također je spravljena od istih sastojaka. Jedina razlika je što je masa cementa zamijenjena s 10% metakaolina. Treća mješavina se razlikuje po tome što je umjesto metakaolina dodano 10% silicijske prašine. Nakon izrade svake od mješavina provedena su ispitivanja svježe mješavine. Prvo je ispitana gustoća svježeg betona prilikom čega se pokazalo da je najveću gustoću postigla mješavina s dodatkom silicijske prašine. Takav rezultat je očekivan budući da je prema podacima iz literature silicijska prašina sitnih sferičnih čestica koje najbolje popunjavaju šupljine i pore u betonu.

Kao rezultat ispitivanja sadržaja pora svježe mješavine dobiveno je da mješavina 2 ima najveću poroznost od čak 7,0% dok mješavina 3 ima 4,4%, a mješavina običnog betona najmanju poroznost od 0,9%. Prilikom ovog ispitivanja očekivano je da mješavina običnog betona bude najporoznija s obzirom na to da sadrži najmanji udio sitnih čestica, međutim rezultati pokazuju suprotno.

Najveću gustoću u očvrnulom stanju ima mješavina običnog betona što ukazuje na to da se dodavanjem mineralnih dodataka poput metakaolina i silicijske prašine dobiva beton manje težine, odnosno gustoće te su ovakvi rezultati i zadovoljavajući.

Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće, najveća tlačna čvrstoća dobila se za mješavinu 2 u kojoj se nalazi metakaolin, a ona iznosi 66,91 MPa. Mješavina 2 ima veću tlačnu čvrstoću u odnosu na mješavinu 1 za 16%, dok je u odnosu na mješavinu 3 veća za 9%. Očekivanja su bila da će mješavina običnog betona imati najmanju tlačnu čvrstoću zbog sadržaja najkrupniji čestica te su rezultati zadovoljili očekivanja.

Prema rezultatima ispitivanja plinopropusnosti betonskih uzoraka kao najmanje propusna pokazala se mješavina običnog betona, a najveću plinopropusnost ima mješavina sa silicijskom prašinom što je bilo potpuno neočekivano. Očekivalo se da će običan beton bez ikakvih dodataka biti zapravo najpropusniji, odnosno najslabije kvalitete. Razlog ovakvim rezultatima povezan je s poroznosti betona, budući da za propusnost značajan utjecaj ima veličina i tip pora. Običan beton se pokazao kao beton najmanje poroznosti i najveće otpornosti na prolazak plina. Razlog ovakvim rezultatima ispitivanja trebalo bi provjeriti dodatnim ispitivanjima, npr. Analiziranjem mikrostrukture spravljenih mješavina betona.

Ispitivanje vodonepropusnosti pokazuje da je mješavina običnog betona najpropusnija što pokazuje visina prodora vode od 12,7 mm, dok je najmanju propusnost imala mješavina sa silicijskom prašinom od 4,7 mm. Sitne čestice mineralnih dodataka doprinose povećanoj vodonepropusnosti, stoga su dobiveni rezultati u skladu s očekivanjima.

Nakon ispitivanja vodonepropusnosti izvedeno je ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem prilikom čega se pokazalo da mješavine s mineralnim dodatcima imaju manje vlačne čvrstoće pri cijepanju u odnosu na mješavinu običnog betona što je u skladu s istraživanjima dostupnim u literaturi.

Prilikom pojedinih ispitivanja došlo je do odstupanja rezultata od očekivanih. Odstupanja su se pojavila kod ispitivanja sadržaja pora na svježem betonu te prilikom ispitivanja plinopropusnosti očvrsnulog betona. Poveznica ta dva ispitivanja je veličina i tip pora. Razlog tome svakako bi trebalo detaljnije istražiti, što može biti predmet nekog drugog diplomskog rada.

Sva ostala svojstva su zadovoljila očekivanja, stoga je zaključak da mineralni dodaci poboljšavaju pojedina svojstva betona, odnosno povećavaju čvrstoću očvrsnulog betona, smanjuju izdvajanje vode, a budući da su se mješavine s dodatcima pokazale vodonepropusnije preporučljivo ih je koristiti za podvodno betoniranje.

LITERATURA

- [1] *Povijest cementa i betona*, <https://www.cemex.hr/povijest-cementa-i-betona>, dostupno 17.05.2022.
- [2] Brandon C.J., Hohlfelder R. L. i drugi: *Building for eternity: The History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*, Oxford, 2014.
- [3] Dumančić K.: *Beton u morskom okruženju*, Završni rad, Sveučilište u Splitu, 2020.
- [4] *Caesarea and the Secret of Roman Underwater Concrete*, <https://thelampstand.com.au/caesarea-and-the-secret-of-roman-underwater-concrete/>, dostupno 05.06.2022.
- [5] *Caesarea Maritima images*, <https://www.shutterstock.com/search/caesarea+maritima>, dostupno 06.04.2022.
- [6] Bjegović D., Serdar M.: *Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina*, Zagreb, 2015.
- [7] Gupta, A.K., *Corrosion of Reinforced Concrete Structures and their Rehabilitation*, Indian Concrete Bulletin, 1988.
- [8] Islam S., Islam M., Chadra Mondal B.: *Deterioration of Concrete in Ambient Marine Environment*, 2012.
- [9] Pršić, M.; Bjegović D.; Serdar, M.: *Plovni putevi i luke – Poglavlje 4: Građenje u moru*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.
- [10] *Sanacija-vraćanje u prvobitno stanje nosača stupnja oštećenja C+*, <https://www.portauthority.hr/wpcontent/uploads/2018/12/SCTehni%C4%8Dke-specifikacije.pdf>, dostupno 14.04.2022.
- [11] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu: *Važnost projektiranja trajnosti betona za osiguranje trajnosti betonskih građevina*, Zagreb, 2019.
- [12] Stipanović Oslaković, I.: *Trajnost materijala*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Prvi hrvatski forum o održivoj gradnji, Zagreb, 2007.
- [13] *Prodor vode u beton-uzrok propadanja armature*, <https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/5921/820/prodor-vode-u-beton-uzrok-propadanja-armature>, dostupno 16.04.2022.
- [14] Bašić H.: *Plutajuće prednapete betonske konstrukcije*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2016.

- [15] Dickson A.G., Goyet. C.: *Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water*, DOE, 1994.
- [16] Brajković A.: *Utjecaj oštećenja betona od korozije armature na otpornost čupanja: usporedba prirodne i ubrzane korozije*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2018.
- [17] Mohan Kumar.P: *Underwater Construction*, 2017.
- [18] Leko K., Radić I.: *Proračun uporabnog vijeka mikroarmiranog betona izloženog djelovanju agresivnog okoliša*, Zagreb, 2017.
- [19] Pršić, M.; Bjegović D.; Serdar, M.: *Plovni putevi i luke – Poglavlje 2: Građenje u moru*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2009.
- [20] *Svojstva propusnosti betona*,
https://www.grad.unizg.hr/download/repository/6_P-NDT-propusnost_%5BRead-Only%5D.pdf, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [21] Mavar K.: *Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu – Betonski radovi*, Zagreb, 2010.
- [22] Hrvatski zavod za norme: *Cement - 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene HRN EN 197-7*, Zagreb
- [23] *Tehnički propisi o izmjenama i dopunama Tehničkog propisa za betonske konstrukcije*, https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_12_136_2892.html, dostupno 18.06.2022.
- [24] *Hidrotehnički beton*, www.gfos.hr, dostupno 02.05.2022.
- [25] Mršić-Božinović F.: *Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2015.
- [26] *Construction and Building Material*,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811005010>, dostupno 23.09.2022.
- [27] Mrakovčić S.: *Dodaci betonu*, (Predavanje u okviru kolegija Teorija i tehnologija betona), Građevinski fakultet u Rijeci, 2020.
- [28] Mršić-Božinović F.: *Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2015.
- [29] Bjegović D., Štirmer N.: *Teorija i tehnologija betona*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [30] *How Underwater Construction Works*, [How Underwater Construction Works: 5 Amazing Structures | BigRentz](https://www.bigrentz.com/blog/underwater-construction-works), dostupno 20.05.2022.

- [31] *What is Caisson Foundation i Its Types*, <https://civiconcepts.com/blog/caisson-foundation>, posjećeno 15.06.2022.
- [32] *Duboko temeljenje*, <https://www.gradnja.me/clanak/278/Duboko-temeljenje>, dostupno 15.06.2022.
- [33] *Underwater Concreting Methods*, <https://theconstructor.org/concrete/underwater-concreting-methods>, dostupno 15.05.2022.
- [34] *Tremie method*, [Tremie \(wikipedia.net\)](https://www.wikipedia.net), dostupno 15.05.2022.
- [35] *How to do Underwater Concreting*, <https://www.civilknowledges.com/concreting-under-water/>, dostupno 02.05.2022.
- [36] *Tremie equipment*, [W.E. Couplings Ltd - Tremie Equipment \(tremiepipe.com\)](http://www.tremiepipe.com), dostupno 15.05.2022.
- [37] *Posebne tehnologije ugradnje betona; Betoniranje pod vodom*, <https://www.grad.unizg.hr/>, dostupno 15.05.2022.
- [38] *Underwater Concreting Methods*, <https://theconstructor.org/concrete/underwater-concreting-methods>, dostupno 15.05.2022.
- [39] *Underwater Concreting Methods-Tremie Method Process and other Techniques*, [Underwater Concreting Methods- Tremie Method Process and others \(theconstructor.org\)](https://theconstructor.org), dostupno 25.04.2022.
- [40] *Podvodno betoniranje*, Semestralni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2011.
- [41] Muravljev M.: *Osnovi teorije i tehnologije betona*, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.
- [42] Najjar M.F., Abdelgader H.S.: *Underwater concreting by using two-stage (preplaced aggregate) concrete*, AL-Fateh University, Libya, 2009.
- [43] Midness S.: *Developments in the formulation and reinforcement of concrete*, Engleska, 2008.
- [44] *Ispitivanje svježeg betona – slijeganje*, [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer uputa zs ispitivanje .pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Primjer_uputa_zs_iskitivanje.pdf), dostupno 23.09.2022.

- [45] *Osnove teorije i tehnologije betona*, <https://slideplayer.gr/slide/14916397/>, dostupno 23.09.2022.
- [46] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-8: Ispitivanje očvrslulog betona - 8. dio: određivanje dubine prodiranja vode pod tlakom*, Zagreb
- [47] *Ispitivanje trajnosti*, [https://www.grad.unizg.hr/repository/5 Trajnosna svojstva-auditorne](https://www.grad.unizg.hr/repository/5_Trajnosna_svojstva-auditorne), Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [48] Lizarazo-Marriaga J., Gonzalez J., Claisse P.: *Simulation of the concrete chloride NT build-492 migration test*, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2012.
- [49] Murray M.A., Graudette P.E.: *Guide to Underwater Repair of Concrete*, ACI Committee 546, 1998.
- [50] Kurian C., Das Grandi M., Selvi V.: *A Study On Advanced Underwater Construction And It's Challenges*, 2021.
- [51] Jakin M.: *Osobna zaštitna sredstva ronilaca pri obavljanju radova varenja i rezanja*, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2015.
- [52] Zupičić M. i drugi: *Izgradnja kontejnerskog terminala Zagrebačka obala*, Rijeka, 2019.
- [53] *Konstrukcija kontejnerskog terminala Zagrebačka obala u luci Rijeka*, https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2019/prezentacije/Magnolia/11.%20Betonske%20konstrukcije/11.1.%20Konstrukcija%20kontejnerskog%20terminala%20Zagreba%C4%8Dka%20obala%20u%20luci%20RI%20-%20LUSTIG.pdf, dostupno dana 03.08.2022.
- [54] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12350-2: Ispitivanje svježeg betona - 2. dio: ispitivanje slijeganja*, Zagreb
- [55] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12350-6: Ispitivanje svježeg betona - 6. dio: gustoća*, Zagreb
- [56] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12350-7: Ispitivanje svježeg betona - 7. dio: određivanje sadržaja pora*, Zagreb
- [57] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12350-1: Ispitivanje svježeg betona - 1. dio: uzorkovanje*, Zagreb
- [58] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-1: Ispitivanje očvrslulog betona - 1. dio: oblik, dimenzije i drugi zahtjevi za uzorke i kalupe*, Zagreb

- [59] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-2: Ispitivanje očvrtnulog betona – 2. dio: izrada i njegovanje uzoraka*, Zagreb
- [60] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-7: Ispitivanje očvrtnulog betona - 7. dio: gustoća očvrtnulog betona*, Zagreb
- [61] Hrvatski zavod za norme: *Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost HRN EN 206:2016*, Zagreb
- [62] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-3: Ispitivanje očvrtnulog betona - 3. dio: tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka*, Zagreb
- [63] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 993-4: Određivanje plinopropusnosti*, Zagreb
- [64] Hrvatski zavod za norme: *Hrvatska norma HRN EN 12390-6: Ispitivanje očvrtnulog betona - 6. dio: određivanje vlačne čvrstoće cijepanjem*, Zagreb