

Betoniranje pod vodom

Križanec, Karolina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:401030>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

BETONIRANJE POD VODOM

Karolina Križanec

Zagreb, 26. rujan 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

BETONIRANJE POD VODOM

Karolina Križanec

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Marija Jelčić Rukavina

Zagreb, 26. rujna 2023.



OBRAZAC 2

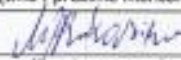
TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Karolina Križanec**JMBAG: **0082062581**Završni ispit iz predmeta: **Osnove tehnologije betona**

| | | |
|------------------------------|-----|------------------------------|
| Naslov teme završnog ispita: | HR | Betoniranje pod vodom |
| | ENG | Underwater concreting |

Opis teme završnog ispita:

U radu je potrebno, temeljem analize dostupne literature, opisati tehnologiju podvodnog betoniranja. Poseban naglasak staviti na ciljana svojstva betona u svježem i očvrslulom stanju te zahtjeve za sastavne materijale.

Datum: **6. travanj 2023. godine**Komentor: **-**
(Ime i prezime komentora)Mentor: **izv.prof. Marija Jelčić Rukavina**
(Ime i prezime mentora)
(Potpis mentora)

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i dolje navedenu literaturu, u suradnji s mentoricom izv. prof. dr. sc. Marijom Jelčić Rukavina i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| POPIS SLIKA I TABLICA | 7 |
| SAŽETAK | 9 |
| ABSTRACT..... | 9 |
| 1. UVOD O PODVODNOM BETONIRANJU | 10 |
| 2. POVIJEST PODVODNOG BETONIRANJA | 11 |
| 3. TEHNOLOGIJE UGRADNJE BETONA | 14 |
| 3.1. Razvoj i tehnike podvodnog betoniranja..... | 14 |
| 3.2. Kesoni..... | 15 |
| 3.3. Kofer brana..... | 16 |
| 3.4. Piloti | 18 |
| 3.5. Predgotovljeni elementi..... | 19 |
| 4. METODE UGRADNJE | 20 |
| 4.1. Kontraktor postupak..... | 20 |
| 4.2. Metoda pumpanja..... | 21 |
| 4.3. Metoda hidro ventila-vodni ventil..... | 22 |
| 4.4. Rešetkasti lift..... | 22 |
| 4.5. Prepak..... | 23 |
| 4.6. Beton pumpa | 24 |
| 5. PONAŠANJE BETONA U MORU | 24 |
| 5.1. Degradacija strukture betona..... | 25 |
| 5.1.1. Fizikalni mehanizmi degradacije | 26 |
| 5.1.2. Kemijski mehanizmi degradacije..... | 27 |
| 5.1.3. Biološki mehanizmi degradacije..... | 28 |
| 5.2. Korozija armature..... | 28 |
| 5.2.1. Korozija armature u armiranom betonu | 29 |
| 5.2.2. Korozija armaturnog čelika uslijed djelovanja klorida..... | 29 |
| 5.2.3. Korozija armaturnog čelika uslijed karbonatizacije | 30 |
| 5.3. Zaštita od korozije..... | 30 |
| 6. ZAHTJEVI ZA SASTAV I SVOJSTVA BETONA U MORSKOM OKOLIŠU..... | 31 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Sastavne komponente..... | 32 |
| 6.1.1. Cement | 32 |
| 6.1.2. Razred izloženosti..... | 34 |
| 6.1.3. Agregat..... | 34 |
| 6.1.4. Vodocementni omjer..... | 35 |
| 6.1.5. Zaštitni sloj betona..... | 36 |
| 6.1.6. Pukotine | 37 |
| 6.1.7. Sadržaj klorida u betonu | 37 |
| 6.2. Utjecaj temperature na betoniranje | 38 |
| 6.2.1. Utjecaj visoke temperature na betoniranje..... | 38 |
| 6.2.2. Utjecaj niske temperature na betoniranje..... | 39 |
| 7. DODACI BETONU | 39 |
| 7.1. Mineralni dodaci | 39 |
| 7.1.1. Metakaolin | 39 |
| 7.1.2. Zgura..... | 40 |
| 7.1.3. Leteći pepeo | 40 |
| 7.1.4. Silikatna prašina..... | 40 |
| 7.2. Kemijski dodaci | 40 |
| 7.2.1. Aeranti..... | 40 |
| 7.2.2. Ubrzivači i usporivači veziva..... | 41 |
| 7.2.3. Plastifikatori | 41 |
| 7.2.4. Superplastifikatori..... | 41 |
| 8. PRIMJER KONSTRUKCIJE OSTVARENE PODVODNIM BETONIRANJEM | 42 |
| 8.1. Pelješki most | 42 |
| 8.1.1. Zahtjevi za Pelješki most | 43 |
| 8.1.2. Izrada pilota | 43 |
| 8.1.3. Izrada temeljne stope | 44 |
| 8.1.4. Izazov sanacije odlomljenog pilota..... | 45 |
| 9. ZAKLJUČAK..... | 46 |
| 10. LITERATURA | 48 |

POPIS SLIKA I TABLICA

| | | |
|--|----------------------------------|----|
| Slika 1 Cesarea Martima nekada i sada | 13 | |
| Slika 2 Tehnike podvodnog betoniranja | 14 | |
| Slika 3 Keson | 16 | |
| Slika 4 Kofer brana | 17 | |
| Slika 5 Hooverova brana, Colorado..... | 17 | |
| Slika 6 Pilot na platformi | 18 | |
| Slika 7 Cijevi za izvođenje pilota | 18 | |
| Slika 8 Hotel Utter In..... | 19 | |
| Slika 9 Ilustrirani prikaz kontraktor postupka | 21 | |
| Slika 10 Betoniranje metodom pumpanja..... | 21 | |
| Slika 11 Metoda hidro ventila..... | 22 | |
| Slika 12 Metoda rešetkastog lifta..... | 23 | |
| Slika 13 Colcrete sistem..... | 24 | |
| Slika 14 Utjecaj morske vode na konstrukciju | 25 | |
| Slika 15 Stupanj degradacije..... | 26 | |
| Slika 16 Odlamanje zaštitnog sloja..... | 27 | |
| Slika 17 Alge na betonskim stepenicama | Slika 18 Školjke na betonu | 28 |
| Slika 19 Torpedo, Rijeka | 29 | |
| Slika 20 Stupnjevi degradacije AB konstrukcije uslijed korozije | 30 | |
| Slika 21 Položaj Pelješkog mosta na karti | 42 | |
| Slika 22 Specijalna dizalica koja prikazuje dizanje pilota..... | 43 | |
| Slika 23 Zabijanje pilota čekićem..... | 44 | |
| Slika 24 Izrada temeljne stope | 45 | |
| Slika 25 Pelješki most danas..... | 46 | |
| Tablica 1 Ograničenja za primjenu cementa po razredu izloženosti | 33 | |
| Tablica 2 Razredi izloženosti, norma HRN EN 206-1:2006 | 34 | |
| Tablica 3 Sadržaj kloridnih iona ispitanih prema HRN EN 744-1 | 35 | |
| Tablica 4 Najveće dopuštene vrijednosti v/c omjera | 35 | |

| | |
|---|----|
| Tablica 5 Najmanja debljina zaštitnog sloja betona i dopuštena odstupanja[14] | 36 |
| Tablica 6 Preporučene granične vrijednosti širine pukotine betona w_{max} [mm] za razrede izloženosti prema EN 1992-1-1 | 37 |
| Tablica 7 Najveći dozvoljeni sadržaj klorida u betonu..... | 38 |

SAŽETAK

Završni rad obrađuje tematiku betoniranja pod vodom. Prilikom gradnje mostova, brana i njima sličnih konstrukcija nameću se novi zahtjevni za beton pod vodom. Cilj ovog rada je upoznati se sa počecima podvodnog betoniranja i njegovim razvojem. Upoznaju se današnje tehnike i metode te analiziraju faktori koji utječu na trajnost konstrukcije prilikom izlaganja agresivnom morskom okolišu. U radu su obrađeni i zahtjevi betona u morskom okolišu koji prilikom projektiranja prate određene norme. Obrađuju se zahtjevi za cement, razred izloženosti, agregat, vodocementni omjer, zaštitni sloj betona kao jedan od najvažnijih zahtjeva, pukotine i sadržaj klorida u betonu. Opisani su i mineralni dodaci koji poboljšavaju svojstva betona za podvodnu ugradnju. Na kraju rada dan je primjer mosta koji je uzdignut iz mora i nalazi se na području Republike Hrvatske.

Ključne riječi: betoniranje pod vodom, metode i tehnike ugradnje, zahtjevi betona u morskom okolišu.

ABSTRACT

The final paper deals with the topic of concreting under water. During the construction of bridges, dams and similar structures, new demanding concrete under water are imposed. The aim of this paper is to get acquainted with the beginnings of underwater concreting and its development. We get to know today's techniques and methods and analyze the factors that affect the durability of the structure when exposed to the aggressive marine environment. The paper also deals with the requirements of concrete in the marine environment, which during the design follow certain norms. We process the requirements for cement, exposure class, aggregate, water cement ratio, concrete protective layer as one of the most important requirements, cracks and chloride content in concrete. At the end of the paper, we give an example of a bridge that was raised from the sea and is located on the territory of the Republic of Croatia.

Keywords: underwater concreting, installation methods and techniques, concrete requirements in the marine environment.

1. UVOD O PODVODNOM BETONIRANJU

Beton je, nakon vode, najkorišteniji materijal na svijetu. Svakodnevno postoji interakcija upravo sa ovim materijalom. Koristi se ga za izgradnju zgrada, prometnica, parkirališta, ali i mostova, luka, brana. Prilikom izgradnje hidrotehničkih građevina uviđa se ljudska potreba betoniranja pod vodom. Važnost podvodnog betona u graditeljstvu je iznimno značajna s obzirom na brojne konstrukcije koje su izložene vodi i agresivnim morskim uvjetima. Međutim, podvodno betoniranje ima svoje specifične izazove i zahtjeve kako bi konstrukcija ostala trajna i pouzdana. Kao glavni izazov ovakvog načina ugradnje istaknuto je da beton prilikom ugradnje ne smije biti u izravnom kontaktu sa vodom. Općenito, podvodni beton predstavlja poseban tip betona koji zahtjeva odgovarajuća svojstva, karakteristike i visoku kvalitetu. Vrlo bitne su i metode ugradnje i mehanizacija. Ključna svojstva i karakteristike podvodnog betona uključuju čvrstoću, obradivost i trajnost, što omogućuje da bude održiv i ekonomski prihvatljiv. Za postizanje tih ciljeva nužan je monitoring tijekom svih faza izvedbe uz pažljiv odabir odgovarajućih materijala, korištenje uređaja za kontrolu kvalitete i uporabu prikladnih metoda ugradnje. [1-7] Cilj ovog preglednog rada je upoznati metode kojima se ugrađuje podvodni beton, istražiti i analizirati uzroke degradacije strukture u betonu te upoznati faktore koji utječu na trajnost podvodne konstrukcije. Rad je koncipiran u 8 poglavlja. Na početku se upoznaje povijest podvodnog betoniranja koja započinje otkrićima Rimljana i Egipćana kao prvih istaknutijih graditelja. Nakon toga su opisane metode i tehnike za ugradnju betona pod vodu gdje se ističe kako prilikom podvodnog betoniranja moramo spriječiti da se svježi beton miješa sa vodom u koju se ugrađuje. Konkretno postoje konstrukcije kao kesoni i kofer brane koje su vodonepropusne ili omogućuju ispumpavanje vode tako da se radovi u vodi zapravo odvijaju unutar njih na suhom bez kontakta sa vodom u koju se ugrađuju. U 5. poglavlju opisana je degradacija strukture betona kod koje se razlikuje više mehanizama, a to su fizikalni, biološki i kemijski. S obzirom na to da morski okoliš sadrži veliku količinu soli, sulfata, i ugljičnog dioksida najčešće dolazi do kemijskog mehanizma degradacije. U ovom poglavlju opisujemo i posljedice ulaska štetnih tvari u beton koje dovode do kemijske reakcije i uzrokuju koroziju armature ili betona. U poglavlju „Zahtjevi za sastav i svojstva betona u morskom okolišu“ opisani su zahtjevi trajnost betonske konstrukcije projektirana prema normama. Opisani su zahtjevi za cement, razred izloženosti, agregat, vodocementni omjer, zaštitni sloj betona, pukotine i sadržaj klorida. Opisani su i zahtjevi za ugradnju betona pri niskim i visokim

temperaturama. U poglavlju „Dodaci betonu“ obrađeni su utjecaji dodataka na svojstva betona. Na kraju preglednog rada opisan je primjer konstrukcije ostvarene podvodnim betoniranjem Pelješki most.

2. POVIJEST PODVODNOG BETONIRANJA

Beton je kompozitni materijal koji se sastoji od tri glavna sastojka: cement, agregat i voda. Glavni sastojak betona je cement koji djeluje kao vezivo, stoga sam razvoj betona započinje upravo upoznavanjem cementa koji poznajemo najmanje 12 milijuna godina. Prolaskom zemlje kroz intenzivne geološke promjene stvarao se prirodni cement koji se kao takav koristio sve do saznanja da se cement može napraviti i iz drugih materijala. Prema današnjim saznanjima prirodni cement je pronađen u Izraelu, a nastao je reakcijom između vapnenca i uljnog škriljca pri sagorijevanju te su tako nastala ležišta cementnih spojeva. Ovo otkriće datira između 1960-tih i 1970-tih. [1]

Početak korištenja cementa upoznajemo sa Egipćanima koji su koristili blato i slamu za povezivanje osušene cigle. Nadalje kod piramida se koristila žbuka od gipsa i vapna. [1]

Iz povijesti je dobro poznato da su drevni Rimljani bili jedinstveni inženjeri te graditelji. Podigli su brojne građevine koje su ostale gotovo netaknute sve do današnjeg modernog doba poput Panteona ili Hrama svih bogova u Rimu. Godinama se istraživao rad Rimljana te njihov beton koji je izdržljiviji i dugovječniji nego današnji. Rimljani su prvi razvili beton koji se mogao koristiti ispod vode. Oni su 25 godina pr. Kr. razvili svoj sastav betona koji se koristi za podvodne radove. Isti takav recept uz tek nekoliko promjena i nadopuna koristi se i danas. Zaduženi su za razvoj hidrauličkog veziva. Naime, prilikom podvodnog betoniranja bitno je da hidrauličko vezivo može očvrnuti pod vodom. Na početku se koristilo gašeno vapno, a kasnije mljevena opeka i vulkanski pepeo. Sa ovim dodacima dobilo se kvalitetno, čvrsto i trajno hidrauličko vezivo. [2] Nakon pada Rimskog carstva započinje ponovna uporaba gašenog vapna.

Hidrauličko vezivo vraća se u uporabu u 18. stoljeću razvojem Portland cementa. To je fini praškasti materijal dobiven pečenjem minerala vapnenca i gline na visokim temperaturama[3]

Razvoj započinje kad je 1756. godine engleski inženjer John Smeaton proveo istraživanja s raznim vapnencima i aditivima kako bi pronašao najbolji materijal za izgradnju Svjetionika Eddystone danas poznatog kao Smeatonov svjetionik. Cilj njegovog istraživanja bio je pronaći materijal otporan na morsku vodu sa snažnom strukturom. Kao idealan materijal pronašao je vapno iz vapnenca u Južnom Walesu sa visokim sadržajem gline. Kombinacija vapna i gline čvrsto je očvrstnula u vodi te je svjetionik postigao iznimnu otpornost na valove i eroziju uzrokovanu morskim okolišem. [2]

Joseph Aspidin je 1824. godine izumio portland cement koji je zapravo poboljšana verzija hidrauličkog veziva. Uz male preinake ovakav portland cement se koristi i danas. Dobiva se pečenjem fino mljevene krede s glinom u prahu u peći za vapno do odstranjivanja ugljikovog dioksida nakon toga se takav proizvod samelje. [1]

Kao dokaz tome kako su Rimljani bili ispred svog vremena istaknuta je betonska konstrukcija Casearea Martima [Slika 1] izgrađena u čast kralja Heroda Velikog. Ova građevina je luka koja stoji sve do danas. Razlog njenog postojanja je rijetka kemijska reakcija koja pozitivno utječe na trajnost konstrukcije. Nastaje dodavanjem vulkanskog pepela u smjesu. Rimski znanstvenici su otkrili proces koji uključuje interakciju vulkanskog pepela, vode i stijene, odnosno čim mješavina dođe u dodir s valovima i bude potopljena postaje čvrsta kamena masa koja svakim danom jače očvršćava [4].

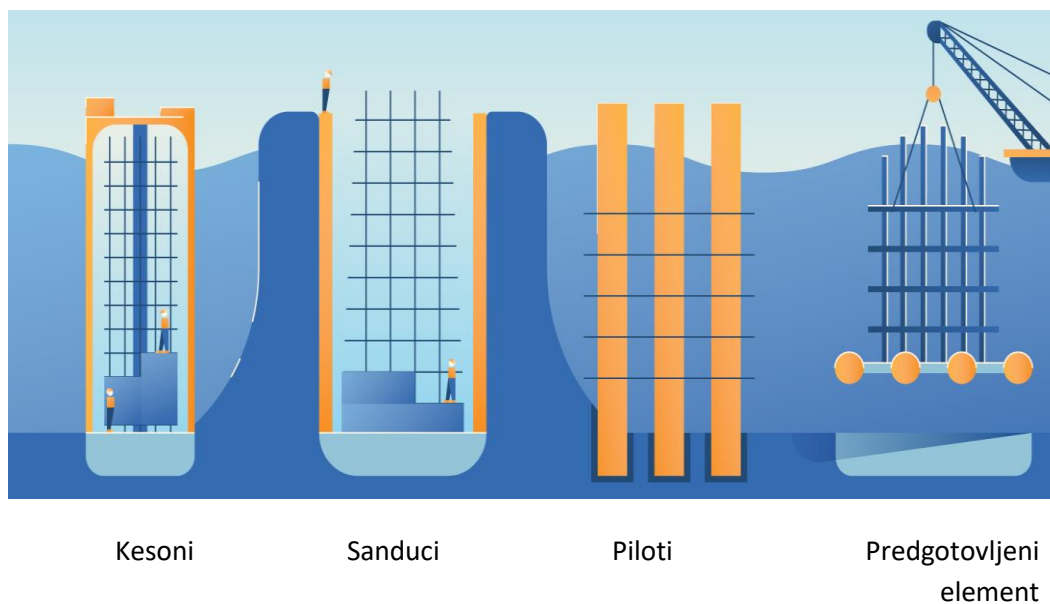


Slika 1 Cesarea Martima nekada i sada

3. TEHNOLOGIJE UGRADNJE BETONA

3.1. Razvoj i tehnike podvodnog betoniranja

Razvojem ljuske populacije razvijala su se i dostignuća u području graditeljstva na kopnu. Međutim, s vremenom je nastala kako potreba tako i želja za građevinama u podvodnom svijetu. Građevine su izvedene kao potreba za zaštitom od voda ili kao želja za povezivanjem sa vodnim svijetom. Danas u svijetu postoje mnoge ugostiteljske građevine i akvariji pa čak i hotelske građevine ostvarene pod vodom u svrhu upoznavanja čovjeka s životom koji ne može upoznati sa obale. Upravo zbog toga je važno upoznati tehnologije ugradnje betona pod vodom. Najpoznatije su (Slika 2) kesoni, sanduci, piloti i predgotovljeni elementi.



Slika 2 Tehnike podvodnog betoniranja

Prilikom betoniranja kako na obali tako i u vodi bitna je uloga oplata. Oplata daje oblik konstrukciji te istovremeno štiti beton od djelovanja morskih valova i struja. Zadaća oplata je da bude zaštitna obloga tijekom betoniranja koja bi spriječila ispiranje cementa i istjecanje cementne paste iz betona. Naknadno štiti svježe ugrađeni beton od udara i abrazivnog djelovanja morskih struja.

Jedna od glavnih prednosti za izvođenje vodnih građevina je mogućnost betona da očvrstne u vodi. Dakle, beton ne treba biti na zraku da postigne željenu čvrstoću već je to očvršćivanje čak i bolje u vodi nego što je na zraku. Podvodno betoniranje ostvaruje se na način da se voda preusmjerava ili izbjegava na različite načine tijekom gradnje. [5]. Postoji više razloga zbog kojih beton ne bi trebao biti u doticaju s vodom tijekom betoniranja, posebno dok je još u svježem stanju. Kad beton padne slobodno kroz vodu dolazi do ispiranja sitnih čestica betonske smjese. To može razdvojiti svježi beton na agregat i cementnu pastu. Posljedica toga bi bilo taloženje krupnije frakcije agregata jer bi veći zrna agregata pala na dno zbog težine. Smjesa betona mora biti plastična, kohezivna i tekuća da bi se kalup što bolje popunio.[5] Dolazi se do zaključka da je građenje pod vodom u stvari pronalaženje kreativnih načina izbjegavanja vode tijekom betoniranja te stvaranje konstrukcije koja će podnijeti djelovanja vode tijekom vremena.

3.2. Kesoni

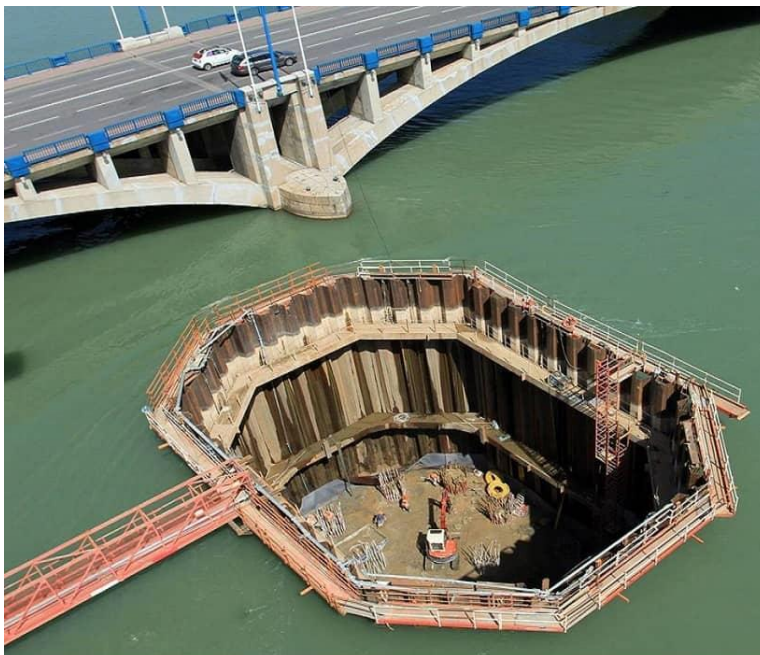
Kesoni (Slika 3) su vodonepropusne konstrukcije koje se mogu spustiti u vodu. [5] S obzirom na to da su vodonepropusni, njihova unutrašnjost ostaje suha te omogućuje iskapanje tla, izvedbu temelja i druge radove pod vodom. Keson se sastoji od dva djela: radnog prostora te cijevnog okna sa zračnom komorom (splavnicom). U radnom prostoru se odvija kopanje pod tlakom. Splavnica služi za ulazak i izlazak radnika, alata i izbacivanje iskopanog materijala. Radnici u njoj ostaju dok ne dođe do izjednačavanja s tlakom u radnoj komori prije ulaska u radni prostor. Način rada kesona je kopanje tla ispod kesona čime se on postupno spušta sve do nosivog sloja pogodnog za temeljenje. Nakon toga se konstrukcija posredstvom vlastite težine ukopava u dno. Donji dio kesona ima oblik noža u cilju lakšeg ukopavanja.[6] Kesoni se koriste i danas, ali je njihovo korištenje ograničeno. Koriste se za manje površine. Kesoni omogućuju rad na i do 35 m dubine, a minimalna dubina vode mora biti 12 m.



Slika 3 Keson

3.3. Kofer brana

Kofer brane (Slika 4.) su privremeno ograđeni prostori unutar kojih se omogućuje ispumpavanje vode, stvarajući suho okruženje za gradnju. Naziv kofer brane dobile su po tome što im je način rada sličan kao kod brana koje sprječavaju da voda oteče iz željenog područja. Izgledom podsjećaju na velike, ograđene jame okružene vodom. Materijal koji se koristi za njihovu izradu može biti od čelika, kamena, a često i od velike količine nagomilane zemlje. Strane kofer brana moraju biti čvrste i otporne na udarce. Isto tako moraju izdržati horizontalne sile od okolnog vodnog tijela kad se voda iz njih pumpa. [5]



Slika 4 Kofer brana

Primjena kofer brana je široka. Koriste se za izgradnju pristaništa, djelomično ili potpuno potopljenih zgrada i trajnih brana. Kao primjer dana je rijeka Kolorado na kojoj je podignuto nekoliko kofer brana koje preusmjeravaju vodu kako bi se izgradila brana Hoover (Slika 5).



Slika 5 Hooverova brana, Kolorado

3.4. Piloti

Piloti (Slika 6) su dugi vertikalni stupovi (Slika 7) koji se mogu vrlo snažno zabiti u tlo te tako stvaraju stabilan temelj za podvodne i nadvodne konstrukcije. Za ugradnju pilota nije potrebno uklanjati vodu. Za podvodnu gradnju, najčešće se koriste čelični piloti s djelomičnom šupljom unutrašnjosti. Pilot se čvrsto zabije u morsko dno, a zatim se puni betonom istiskujući vodu. Beton očvrstne i ostaje armirano betonski stup u kojem nema vode. Zabijeni piloti su ekonomičan i trajan način izgradnje podvodnih temelja i građevina. [5]



Slika 6 Pilot na platformi



Slika 7 Cijevi za izvođenje pilota

3.5. Predgotovljeni elementi

Podvodna gradnje predstavlja složeni tehnički zadatak. Da bi se izbjeglo betoniranje pod vodom, često se koriste predgotovljeni elementi. Konstrukcija se izvodi i montira na gradilištu nakon čega slijedi transport i ugradnja. Transport se uglavnom obavlja brodicama do mjesta ugradnje, a ispuštanje se izvodi ili vlastitom težinom ili se na dio koji se ugrađuje stavljaju utezi te se on potapa. Nakon toga se, ukoliko postoji potreba voda ispumpava iz konstrukcije. [5] Primjer gradnje ovom tehnikom pronalazi se u malom hotelu Utter In (Slika 8.) lociranog u Švedskoj. Konstrukcija je izvedena na obali nakon čega je transportirana na jezero i potopljena. Pristupni put je vodom, odnosno do hotela se može doći samo brodom.



Slika 8 Hotel Utter In

4. METODE UGRADNJE

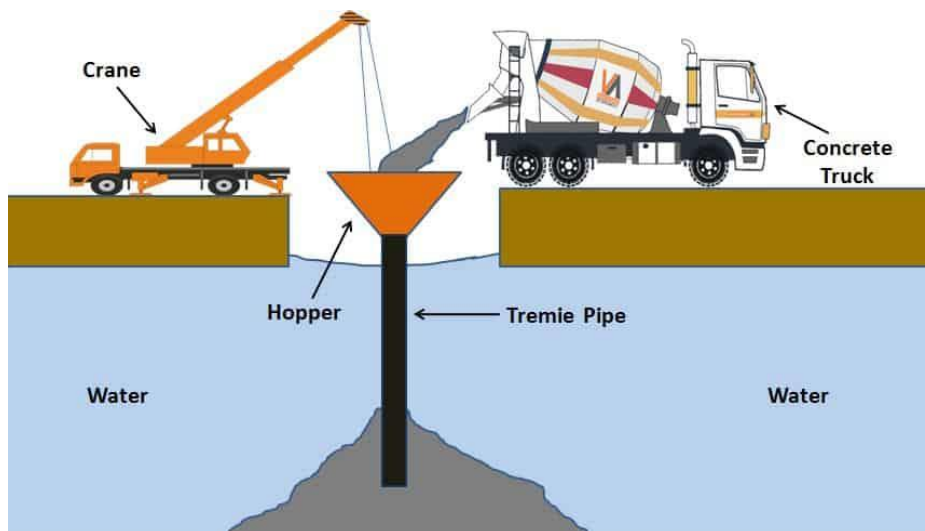
Prilikom izvođenja građevina u rijekama, lukama, obalnim prostorima nameće se zahtjev ugradnje betona pod vodom. Ovdje se ne koriste prethodno opisane tehnike ugradnje. Najbitnija stavka je spriječiti miješanje svježeg betona sa vodom s obzirom na to da je beton prilikom ugradnje dezintegriran što znači da ima niske karakteristike čvrstoće, heterogen je i slojevit. [11]

Najčešće korištene metode ugradnje su:

1. Kontraktor postupak
2. Metoda pumpanja
3. Metoda hidro ventila-vodni ventil
4. Rešetkasti lift
5. Prepak
6. Beton pumpa [11]

4.1. Kontraktor postupak

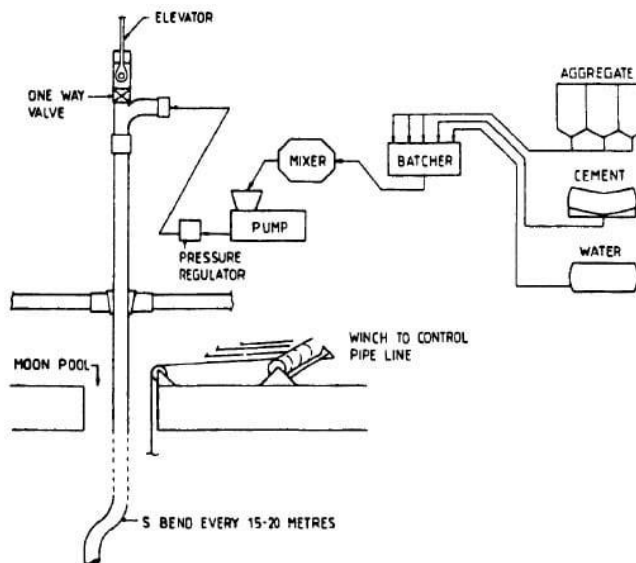
Kontraktor postupak (Slika 9.) je jedan od najpoznatijih postupaka ugradnje betona pod vodom. Beton je tekuće konzistencije i ugrađuje se pomoću cijevi kojom prolazi djelovanjem vlastite težine. [11] U lijevak s gornje strane lijevamo svježi beton pri čemu je bitno da njegova donja strana bude potopljena u svježi, već ugrađeni beton. Na početku betoniranja otvori se cijev i kako se ona puni tako se povlači prema gore. Bitno je da ne dođe do miješanja betona s vodom, stoga kraj cijevi mora biti uronjen.



Slika 9 Ilustrirani prikaz kontraktor postupka

4.2. Metoda pumpanja

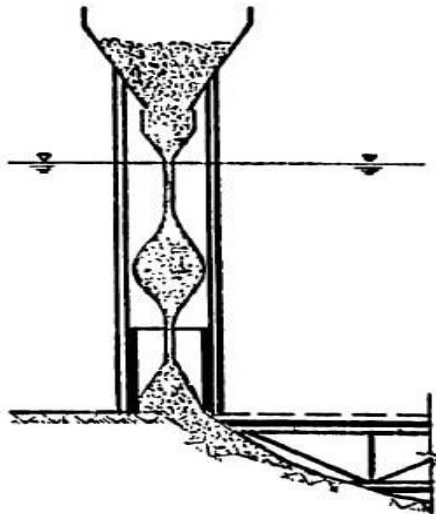
Podvodno betoniranje metodom pumpanja (Slika 10.) je brža i razvijenija metoda od kontraktor postupka. Koristi se u područjima kojima je teško pristupiti poput пристаништа. Za razliku od kontraktor cijevi, ovim načinom ugradnje izljevava se beton iz miješalice izravno u oplata. Betonira se pumpanjem umjesto korištenjem gravitacijske sile, a rizik od segregacije je smanjen. [11]



Slika 10 Betoniranje metodom pumpanja

4.3. Metoda hidro ventila-vodni ventil

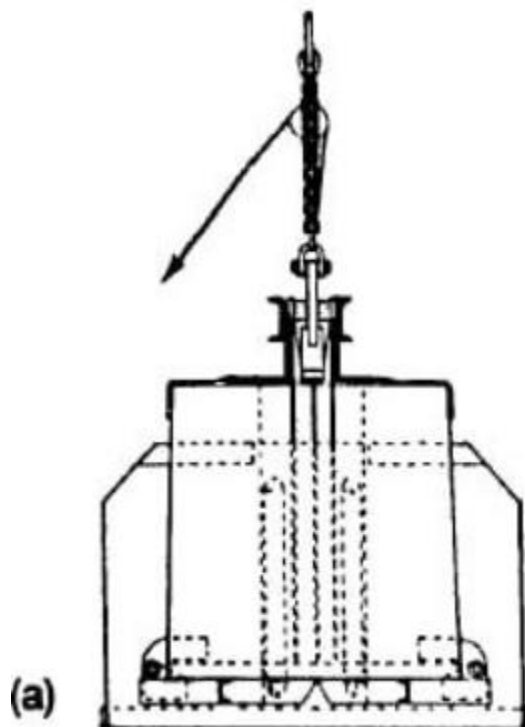
Metoda hidro ventila (Slika 11) razvijena je od strane Nizozemca 1969.god. Upotrebljava se za betoniranje tankih konstrukcija poput ploče do 75 cm debljine. Za izlivanje betona koristi se fleksibilno crijevo pod hidrostatskim tlakom. Kada se beton stavi u gornji dio cijevi vlastita težine betona nadvlada i trenje i hidrostatski tlak. Posljedica toga je sporo pomicanje betona u cijevi i izbjegavanje segregacije. Metoda nije skupa i jednostavna je za korištenje.



Slika 11 Metoda hidro ventila

4.4. Rešetkasti lift

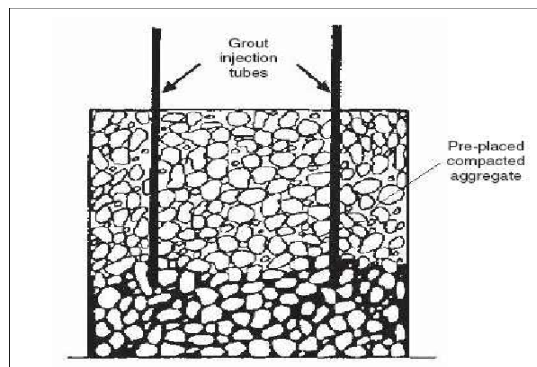
Rešetkasti lift (Slika 12), poznatija i kao skip metoda koristi se za betoniranje tankih konstrukcija, iako se mogu izvoditi i deblje ukoliko se usta lifta ukopaju u prethodno postavljen svježi beton. Lift se sastoji od kante s dvostrukim otvorom na dnu i preklapajućim platnenim klapama koje su postavljene na vrhu kako bi se spriječilo ispiranje betona. [11]. U trenutku kada se lift napuni betonom spušta se kroz vodu. Kada dosegne željeno projektno mjesto, vrata se otvaraju ručno ili automatski. Skip metoda koristi se kad je potrebna velika količina betona za stabilizaciju temelja.



Slika 12 Metoda rešetkastog lifta

4.5. Prepak

Colcrete sistem (Slika 13), u engleskoj literaturi poznatiji pod nazivom „Pre-placed aggregate concrete“, a u hrvatskoj literaturi koristi se naziv „pre-pakt beton“, odnosno beton od prethodno postavljenog agregata. Pod time se podrazumijeva ugradnja agregata uniformne granulacije. Tehnika se temelji na injektiranju cementnog morta u cilju povezivanja agregata s betonskom smjesom. Prije nego što započinje punjenje oplata agregatom izvodi se tzv. zdenac od šipki armature razmaka 1,5 metar. Armaturni zdenci se ne popunjuju već samo oplata. Nakon popunjavanja oplata injektira se cementni mort koji ulazi u šupljine između agregata. Prednost ove tehnike je što je primjenjiva u uvjetima u kojima je pristup radu ograničen, kada postoje velike brzine voda, kada je lokacija podvrgnuta valnom djelovanju. Moguće je dobiti beton čvrstoće i preko 40 MPa.



Slika 13 Colcrete sistem

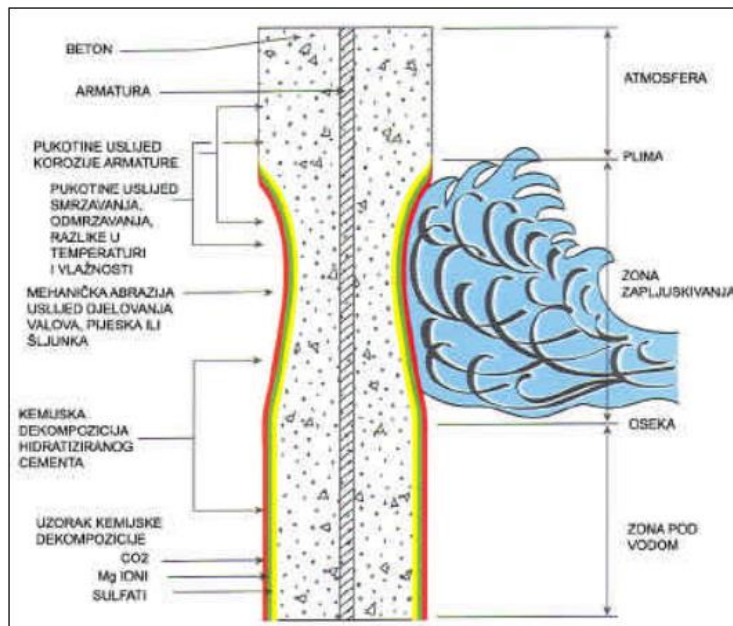
4.6. Beton pumpa

Beton pumpa je po načinu rada jednaka kontraktor metodi. Razlika je u tome što je cijev pumpe, za razliku od kontraktora teže kontrolirati jer je položena pod kutom prema horizontali. Mora se spriječiti njezino horizontalno pomicanje.

5. PONAŠANJE BETONA U MORU

Od svih mjesta na koje se ugrađuje beton upravo je ugrađivanje betona u more jedno od najnezahvalnijih. More je najagresivniji okoliš u kojem se beton može nalaziti. Tome je tako zbog toga što su u moru rastopljene razne soli, ugljikov dioksid, sulfati i kisik. Od otopljenih soli najviše ima natrijevog klorida. Kloridi imaju višestruk utjecaj na konstrukciju, a najvažnije je da izazivaju koroziju armature i degradaciju betona.

Nisu svi dijelovi konstrukcije jednako izloženi negativnom djelovanju vode. Najpogođenije područje je neposredno iznad razine visoke vode. To područje naziva se područje zapljuskivanja. Val udara u konstrukciju i slana voda se taloži u betonskim porama. Nakon sušenja voda kristalizira u čestice soli te narušava beton. Područje koje je kontinuirano izloženo morskoj vodi je najmanje pogođeno njezinim utjecajima. Utjecaj morske vode na konstrukciju dan je na slici. (Slika 14)



Slika 14 Utjecaj morske vode na konstrukciju

5.1. Degradacija strukture betona

Degradacija betona je postupak propadanja betona koji nastaje nakon dugotrajnog izlaganja betonske konstrukcije morskom okolišu, a rezultat je više kemijskih reakcija koje djeluju u isto vrijeme. Tijekom očvršćivanja, hidratacije, promjene temperature, promjene vlažnosti ali i cijelog uporabnog vijeka konstrukcije tvari i fluidi prodiru iz okoline kroz poroznu strukturu betona stvarajući naprezanja unutar betona i pukotine. Postoji nekoliko mehanizama degradacije: fizikalni, biološki i kemijski. Mehanizmi degradacije oštećuju betonsku strukturu, uzrokuju koroziju te smanjuju trajnost same konstrukcije. Stupanj degradacije uslijed korozije može se odrediti vizualno. (Slika 15.)



Pojava mikro-pukotina



Pojava smeđih mrlja



Ljuštenje zaštitnog sloja



Otpadanje većih komada

Slika 15 Stupanj degradacije

5.1.1. Fizikalni mehanizmi degradacije

Fizikalna djelovanja obuhvaćaju 4 osnovna mehanizma degradacije betona: eroziju, kavitaciju, kristalizaciju soli, i cikluse smrzavanja i odmrzavanja. [15] Degradaciju betona erozijom i kavitacijom uzrokuju valovi. Pojava je češća u hladnijim morima gdje se nalaze sante leda koje oštećuju beton. Kristalizacijom soli povećava se volumen betona i stvaraju dodatni tlakovi. Prilikom kristalizacije može doći do nastanka pukotina u betonu ukoliko naprezanje nastalo kristalizacijom postane veće od vlačne čvrstoće. Posljedice fizikalnih mehanizama degradacije vidljive su odlamanjem zaštitnog sloja (Slika 16) , ljuštenjem betona te stvaranjem pukotina.



Slika 16 Odlamanje zaštitnog sloja

5.1.2. Kemijski mehanizmi degradacije

Morska voda je bogata solima magnezija. U manjoj količini je prisutan ugljični dioksid. Sastojci hidratacije betona ulaze u kemijske reakcije sa solima magnezija i ugljičnim dioksidom što izrazito nepovoljno djeluje na beton. Jedan od najstabilnijih minerala betona u morskoj vodi je aragonit. On zaštićuje beton, međutim u zoni zapljuskivanja on se skida čim se stvori u betonu. Unatoč tome što je u morskoj vodi manja prisutnost ugljičnog dioksida, ona je dovoljna da otopi sastojke hidratacije u propusnom betonu. U slučaju kada su prisutne veće koncentracije CO₂ (npr. bočata voda), aragonit prelazi u kalcijevbikarbonat, koji se potom izlučuje iz betona. 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]

Kolika će biti agresivnost mora ovisit će o jačini vjetrova koja diže morskiju pjenu i prenosi kloride na dijelove konstrukcije, visokim temperaturama koje pospješuju ubrzan prodor klorida u beton, salinitetu mora te vlažnosti zraka.

5.1.3. Biološki mehanizmi degradacije

Pod pojmom biološki mehanizmi degradacije podrazumijeva se degradaciju uzrokovana životinjskim i biljnim svijetom. Na površini betonske konstrukcije, u zoni vlaženja i sušenja pojavljuju se mikroorganizmi lišajevi i gljivice. Njima za opstanak nije potrebno puno vlage. Konstrukcije koje su uronjene u vodu napadnute su algama (Slika 17) koje se razvijaju u udebljanjima u betonu. Osim mikroorganizama, beton naseljavaju i makroorganizmi kao što su školjkaši, mekušci i ljuskare. Tijekom vremena organizmi poput školjki buše beton hraneći se tvarima iz betona i na taj način ga uništavaju.



Slika 17 Alge na betonskim stepenicama



Slika 18 Školjke na betonu

5.2. Korozijska armature

Korozijska armature je jedan od glavnih uzroka propadanja betona u vodenom okruženju. Čitav proces započinje ulaskom kisika, vode, topline i klorida u vanjski sloj betona. Tu dolazi do djelomičnog ili potpunog razaranja zaštitnog sloja armature. Korozijska je ovisna o tzv. korozijskoj struji i kisiku. Korozijska struja se dobiva kretanjem elektrona s anode prema katodi. Ukoliko se zaustavi korozijska struja i/ili dotok kisika zaustavlja se i proces korozijske

Razlikuju se 2 slučaja korozijske. Kada se konstrukcija nalazi iznad površine mora razvija se karbonatna i sulfatna korozijska. Konstrukcija iznad površine mora izložena je atmosferskim utjecajima, zapljuskivanju valova, izmjeničnom vlaženju i sušenju, plimi i oseki. Pod atmosferskim utjecajima podrazumijeva se kišnica bogata ugljičnim dioksidom koja uzrokuje karbonizaciju betona i karbonatnu korozijsku. S obzirom na položaj iznad mora konstrukcija se

neprestano vlaži i suši, izlučuje se vapno iz betona, povećava se volumen kapilarnih pora u koje dolazi sol i razvija se sulfatna korozija.

Kad je konstrukcija uronjena u more razvija se sulfatna i korozija izluživanja. Konstrukcija uronjena u more sporije će poprimati oštećenja uzrokovana korozijom nego što će to konstrukcija iznad površine mora. Ne stvaraju se novi spojevi jer ima puno kalcijevog klorida pa je razvoj sulfatne korozije usporen, a moguće ga je postepenim usporavanjem u potpunosti zaustaviti. Vapno se u vodi brzo topi pa se javlja korozija izluživanja, ali i ona je usporena i zaustavljiva.

5.2.1. Korozija armature u armiranom betonu

Armirani beton izložen utjecaju morske vode osjetljiv je na djelovanje korozije zbog dva procesa:

1. Armaturne čelične šipke pasivno su zaštićene od korozije tako da su obavijene betonom. Kada se smanjuje pH razina betona zbog karbonatizacije (reakcije hidroksida iz cementa sa atmosferskim CO₂) dolazi do razaranja te zaštitne barijere betona oko armature.
2. Visoka koncentracija kolara u porama oko armature uništava zaštitni sloj. [14]

Armatura ima manji volumen od produkata korozije pa u amiranom betonu dolazi do naprezanja. Ukoliko je vlačna čvrstoća betona manja od naprezanja nastat će pukotine. Pojava pukotina pogoduje procesima razvoja korozije u armiranom betonu.

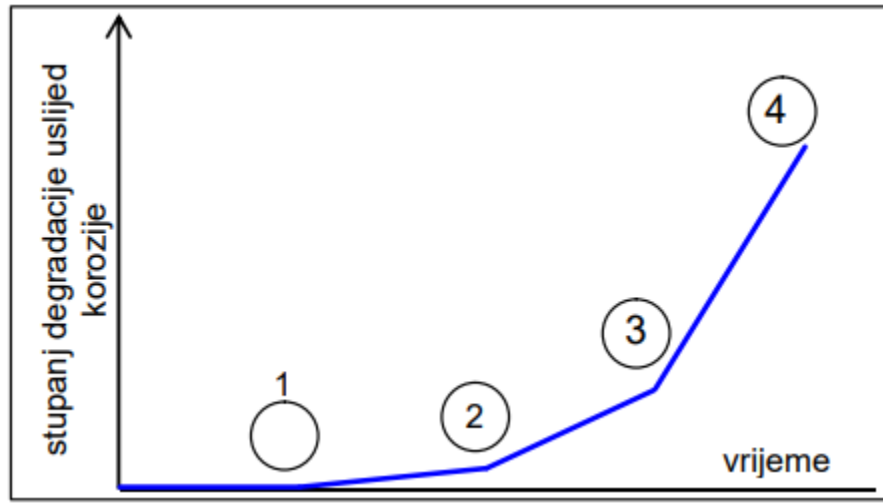


Slika 19 Torpedo, Rijeka

5.2.2. Korozija armaturnog čelika uslijed djelovanja klorida

Koroziju čelika koju uzrokuju kloridni ioni djeli se u četiri stupnja. Pri prvom stupnja dolazi do razaranja pasivnog sloja armature uz koroziju čelika i smanjenje površine poprečnog presjeka

šipki. U drugom stupnju dolazi do raspucavnja betona što pogoduje mogućnosti jače korozije. Nakon toga kreće ljuštenje betona uz veoma jaku koroziju. Ovo je treći stupanja. U posljednjem, četvrtom stupnju konstrukcija se lomi. [14]



Slika 20 Stupnjevi degradacije AB konstrukcije uslijed korozije

5.2.3. Korozija armaturnog čelika uslijed karbonatizacije

Karbonatizacija je kemijski proces između ugljikovog dioksida i kalcijevog hidroksida kad beton dođe u kontakt sa vodom ili zrakom. Pri betoniranju kada beton nije izložen direktnom utjecaju vode dovoljno je da beton bude dobre kvalitete i daje dobru antikorozivnu zaštitu armaturnom čeliku. Kako čelik ne bi bio izložen koroziji važno je da pH vrijednost porne vode u betonu bude 12. Na čeliku se tada stvara zaštitni pasivni sloj oksida željeza koji je nepropustan i stabilan. [14] Usporedbe radi, pH vrijednost nakon karbonatizacije pada na 8. Karbonatizacija ima negativne učinke na beton na način da smanjuje pH vrijednost porne vode betona, ali je pozitivno što povećava vodonepropusnost jer njezini produkti popunjavaju strukturu betona.

5.3. Zaštita od korozije

Prilikom projektiranja i same izvedbe konstrukcije potrebno je ispuniti zahtjev za njenu trajnost posebno u agresivnom morskom okolišu. Iz tog razloga bitno je zaštititi konstrukciju od negativnog učinka korozije koji ugrožava njezinu trajnost. Kao primarna zaštita betona od korozije koriste se

mineralni dodaci koji povećavaju njegovu čvrstoću, vodonepropusnost i kemijsku otpornost. Sekundarnom zaštitom štitimo armaturu premazivanjem epoksidnom smolom, katodna zaštita, uporaba inhibitora korozije armature, premazivanje površine betona. Nedostatak sekundarne zaštite je da je ona samo privremena. Sa vremenom premazi slabe spoj armature i betona što može dovesti do razvoja pukotina koje pogoduju koroziji. Pravilnim korištenjem kombinacije primarne i sekundarne zaštite može se dobiti trajni infrastrukturni objekt u morskom okolišu.

6. ZAHTJEVI ZA SASTAV I SVOJSTVA BETONA U MORSKOM OKOLIŠU

Tehnička svojstva betona određena su na način da zadovolje uvjet da građevina podnese sva djelovanja prilikom same izvedbe radova, korištenja građevine i održavanja betonske konstrukcije. Tijekom životnog vijeka građevine predvidiva su razna djelovanja na konstrukciju, međutim odabirom tehničkih svojstva garantira se kako neće doći do kolapsa građevine ili nekog njezinog dijela ili samo oštećenja građevine ili njezinog dijela kao ni velikih deformacija prilikom rukovanja građevinom u prije navedenim fazama izvedbe, korištenja i održavanja. Svojstva svježeg betona određuje sam izvođač ukoliko ona nisu prije određena projektom betonske konstrukcije, a svojstva gotovog, očvrstnalog betona određena su glavnim projektom. Bitno je napomenuti kako svojstva svježeg betona uveliko utječu na svojstva očvrstnalog betona.. prilikom spravljanja smjesu za beton koji se ugrađuje pod vodu iznimno je važno da se dobije visoko protočni beton koji se može širiti i teći samo pod vlastitom težinom, može postići dostatnu zbijenost bez potrebe za vibracijom, ima veliku čvrstoću i brzo se stvrdnjava, ima nisku sklonost segregaciji. Tehnologija podvodnog betoniranja značajno je napredovala sa godinama i danas se rade mješavine koje omogućavaju veliku fluidnost te otpornost na ispiranje i segregaciju. Dizajn betonske mješavine je tehnika koja se koristi za određivanje proporcija sastojaka potrebnih za proizvodnju betonske mješavine željenih svojstava. To je složen proces koji uzima u obzir svojstva materijala, uvjete okoline u kojima će se beton postaviti i željenu kvalitetu. Kreiranje betonske mješavine zahtijeva identifikaciju željenih svojstava betona i utvrđivanje pravilnih udjela sastojaka potrebnih za njezinu izradu. Karakteristike betonske mješavine općenito se definiraju trajnošću, odredljivošću, čvrstoćom, skupljanjem i drugim svojstvima. Da bi se stvorila dobra betonska mješavina, moraju

se identificirati betonski sastojci. Najčešći sastojci koji se koriste u betonskim mješavinama uključuju cement, vodu, agregat i primjese. Svaki od ovih sastojaka igra različitu ulogu u konačnom proizvodu. Cement je najvažniji od betonskih sastojaka i osigurava osnovnu čvrstoću i trajnost betona. Voda se koristi za aktiviranje cementa, dok agregat osigurava strukturnu čvrstoću i obradivost mješavine. Primjese su dodatni sastojci koji se mogu koristiti za poboljšanje performansi betonske mješavine promjenom njegovih svojstava. Nakon što su sastojci identificirani, moraju se odrediti proporcije. Proporcije se općenito izražavaju kao omjer cementa i vode i agregata i mogu varirati ovisno o željenim svojstvima betona. Posljednji korak ovog procesa je ispitivanje betonske mješavine. Nakon što se utvrde proporcije, beton se mora ispitati kako bi se osiguralo da zadovoljava željena svojstva. Postupak ispitivanja potreban je kako bi se osiguralo da beton zadovoljava navedene standarde čvrstoće, trajnosti te druge karakteristike. Trajnost konstrukcije definira se kao njezina sposobnost da zadrži dostatnu razinu sigurnost i uporabljivosti te projektirani izgled uslijed previđenih djelovanja iz okoliša. [14] Trajnost konstrukcije određena je vodocementnim omjerom, razredom betona, razredom izloženosti, minimalnom količinom cementa, aeriranjem i vremenom potrebnim za njegu betona.

6.1. Sastavne komponente

6.1.1. Cement

Izbor cementa utječe na trajnost betona, morta ili injekcijske smijese. Cement koji se koristiti bira se ovisno o normi HRN EN 197-1. (Tablica 1.)

| Razred izloženosti | Tip cementa koji se ne primjenjuje u betonu |
|---|--|
| 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 |

Tablica 1 Ograničenja za primjenu cementa po razredu izloženosti

Pri podvodnom betoniranju najčešće korišten je hidraulički cement. Najpoznatiji je Portland cement. Hidraulički cement funkcionira na način da nakon miješanja sa vodom dolazi do kemijske reakcije koja stvara kemijske spojeve. Oni sadrže vodu. Bitna karakteristika ove vrste cementa je njegova netopivost u vodi što znači da će zadržati svoju čvrstoću i tvrdoću i u vlažnom, odnosno mokrom okruženju. Postupak proizvodnje Portland cementa je zagrijavanje vapnenca sa malim količinama gline u peći do postizanja vrlo visoke temperature. Nastaje tvrda tvar klinker. Dodaje se gips pa se zajedno sa klinkerom melje dok se dobije prah, Portland cement. U novije vrijeme istraživanja su pokazala da se zamjenom djela sastava cementa sa materijalima poput zgure, letećeg pepela, silikatnog praha dobiva betona sa manjom vodonepropusnošću.

Bitno je napomenuti da na kvalitetu cementa osim postupka proizvodnje uveliko utječe i rukovanje. Cement se skladišti na suhom mjestu gdje je zaštićen od vanjskih utjecaja. Najviše korišteni su betonski ili čelični silosi. Od isporuke cementa do korištenja može proći najviše 6 mjeseci uz pravilno rukovanje, odnosno skladištenje.

6.1.2. Razred izloženosti

Razred izloženosti kod betona služi za klasifikaciju okoline u kojoj će betonska konstrukcija biti postavljena. Postupak pomaže u odabiru odgovarajućeg tipa betona i utvrđuje specifične zahtjeve za kvalitetu materijala kako bi se osigurala dugotrajnost i otpornost konstrukcije na različite uvjete, a posebno agresivne faktore morskog okoliša. Razredi izloženosti, ovisno o okolišu dani su u normi HRN EN 206-1:2006 (Tablica 2)

| Razred | Opis okoliša | Primjeri moguće pojave razreda izloženosti |
|---|---|--|
| 1 Nema rizika od oštećenja | | |
| X 0 | Vrlo suho | Elementi bez armature u neagresivnom okolišu |
| 2 Korozija armature uzrokovana karbonizacijom *) | | |
| XC 1 | Suho ili trajno vlažno | Elementi u prostorijama obične vlažnosti zraka; elementi stalno uronjeni u vodu |
| XC 2 | Vlažno, rijetko suho | Djelovi spremnika za vodu; dijelovi temelja |
| XC 3 | Umjerena vlažnost | Djelovi do kojih vanjski zrak ima stalni ili povremeni pristup; prostorije s atmosferom visoke vlažnosti |
| XC 4 | Cikličko vlažno i suho | Vanjski betonski elementi izravno izloženi kiši; elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke) |
| 3 Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora | | |
| XD 1 | Umjerena vlažnost | Područja prskanja vode s prometnih površina; privatne garaže |
| XD 2 | Vlažno, rijetko suho | Bazeni za plivanje i kupališta sa slanom vodom; elementi izloženi industrijskim vodama koje sadrže kloride |
| XD 3 | Cikličko vlažno i suho | Elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče |
| 4 Korozija armature, uzrokovana kloridima iz mora | | |
| XS 1 | Izloženo soli iz zraka, ali ne u izravnom dodiru s morskom vodom | Vanjski elementi u blizini obale |
| XS 2 | Uronjeno | Stalno uronjeni elementi u lukama |
| XS 3 | U zonama plime i prskanja vode | Zidovi lukobrana i molova |
| 5 Djelovanje smrzavanja i odmrzavanja, sa ili bez sredstava za odleđivanje | | |
| XF 1 | Umjereno zasićenje vodom, bez sredstva za odleđivanje | Vanjski elementi |
| XF 2 | Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odleđivanje ili morska voda | Područja prskanja vode s prometnih površina, sa sredstvom za odleđivanje; područje prskanja morskom vodom |
| XF 3 | Jako zasićenje vodom, bez sredstva za odleđivanje | Otvoreni spremnici za vodu; elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke) |
| XF 4 | Jako zasićenje vodom, sa sredstvom za odleđivanje ili morskom vodom | Prometne površine tretirane sredstvima za odleđivanje; pretežno vodoravni elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče bez zaštitnog sloja; elementi u području morske plime; mjesta na kojima može doći do struganja u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije |
| 6 Beton izložen kemijskom djelovanju | | |
| XA 1 | Slabo kemijski agresivni okoliš | Spremnici u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije, spremnici tekućih umjetnih gnojiva |
| XA 2 | Umjereno kemijski agresivni okoliš, konstrukcije u marinama | Betonski elementi u dodiru s morskom vodom; elementi u agresivnom tlu |
| XA 3 | Jako kemijski agresivni okoliš | Kemijski agresivne vode u postrojenjima za tretiranje otpadnih voda; spremnici za silažu i korita (žljebovi) za hranjenje životinja; rashladni tornjevi s dimnjacima za odvođenje dimnih plinova |
| 7 Beton izložen habanju | | |
| XM 1 | Umjereno habanje | Elementi industrijskih konstrukcija izloženi prometu vozila s pneumatskim gumama na kotačima |

Tablica 2 Razredi izloženosti, norma HRN EN 206-1:2006

6.1.3. Agregat

Agregat je jedan od 3 osnovna sastojka za proizvodnju betona uz cement i vodu. Agregat se dodaje betonu da bi postigli bolju čvrstoću, stabilnost, gustoću i otpornost na habanje. Agregati koji se koriste su šljunak, kamen drobljenac i reciklirani beton. Agregat obično ne utječe značajno na koroziju armature u betonu, osim ako je sam agregat izrazito porozan i/ili sadrži veću količinu klorida. Veličina zrna agregata treba biti manja od debljine zaštitnog sloja kako bi otežali prodor

klorida kroz beton. Maksimalni dopušteni sadržaj kloridnih iona u zrnima agregata dan je u tablici 3 prema normi HRN EN 1744-1:2004.

| Maksimalni sadržaj kloridnih iona (%) | Namjena |
|---------------------------------------|------------------|
| 0,15 | nearmirani beton |
| 0,06 | armirani beton |
| 0,03 | prednapeti beton |

Tablica 3 Sadržaj kloridnih iona ispitanih prema HRN EN 744-1

6.1.4. Vodocementni omjer

Vodocementni omjer (izraz v/c) je izraz koji se koristi u građevinarstvu i odnosi se na omjer vode i cementa u betonu. Pokazuje koliko se vode koristit ovisno o količini cementa. Vodocementni omjer mora biti što manji jer je onda manja poroznost betona i kloridi sporije prodiru u beton i bolja je korozijska pasivnost armature u betonu. Prilikom projektiranja betona za podvodnu ugradnju pazi se na ograničenja za vodocementni omjer dijelova konstrukcije koji se nalaze pod vodom dana normom HRN EN 197-1:2005. (Tablica 4)

| Uvjeti u kojima se nalazi konstrukcija | Armiranobetonska konstrukcija | Betonska i slaboarmirana |
|---|-------------------------------|--------------------------|
| Dijelovi konstrukcije se nalaze stalno pod vodom i pod pritiskom su | 0,55 | 0,60 |
| Dijelovi konstrukcije se nalaze stalno pod vodom i nisu pod pritiskom | 0,60 | 0,55 |
| Dijelovi konstrukcije koji su povremeno u kontaktu sa vodom | 0,65 | 0,70 |

Tablica 4 Najveće dopuštene vrijednosti v/c omjera

6.1.5. Zaštitni sloj betona

Kvalitetan beton u području zaštitnog sloja i odgovarajuća dimenzioniranja i izvedba potrebne debljine zaštitnog sloja su ključne mjere zaštite armature od korozije, te istodobno povećavaju trajnost. Minimalna debljina zaštitnog sloja betona ovisi o razredu izloženosti i načinu armiranja elementa. Tablica 5 sadrži najmanje vrijednosti C_{min} , koje osiguravaju zaštitu od korozije armature, te dopuštena odstupanja zaštitnog sloja. Ako su prisutni istovremeni utjecaji više razreda izloženosti, tada se mora primijeniti zahtjev za veću debljinu zaštitnog sloja.

| Razred izloženosti | Najmanji zaštitni sloj c_{min} (mm) ^{a)} ^{b)} za armaturu | Dopuštena odstupanja zaštitnog sloja Δc (mm) |
|--------------------|---|--|
| XC1 | 20 | 10 |
| XC2 | 35 | |
| XC3 | 35 | |
| XC4 | 40 | |
| XD1 | 55 | |
| XD2 | | |
| XD3 ^{c)} | | |
| XS1 | 55 | |
| XS2 | | |
| XS3 | | |

^{a)} Ako su elementi izvedeni od betona za dva razreda više od najmanjeg razreda specificiranog u tablici 2.25, zaštitni sloj može se smanjiti za 5 mm. Ovo, međutim, ne vrijedi za razred izloženosti XC1.
^{b)} Ako se beton na mjestu (in-situ) veže s betonom predgotovljenog elementa, zaštitni sloj na tom spoju može se smanjiti do 5 mm u predgotovljenom elementu i do 10 mm u betonu na mjestu. Ipak, pravila specificirana u Prilogu H TPBK, za osiguranje prijanjanja moraju se poštivati ako je armatura potpuno iskorištena u fazi izvedbe.
^{c)} U nekim slučajevima armatura će trebati posebnu zaštitu od korozije.

Tablica 5 Najmanja debljina zaštitnog sloja betona i dopuštena odstupanja

Debljina zaštitnog sloja određena je sljedećim izrazom :

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}[17]$$

C_{min} – najmanja debljina zaštitnog sloja za osiguranje prijenosa sila, zaštitu od požara i zaštitu čelika od korozije

ΔC_{dev} – dopušteno odstupanje debljine zaštitnog sloja

6.1.6. Pukotine

Jedna od karakterističnih opasnosti koje prijete trajnosti konstrukcije su pukotine. Proračunavaju se u sklopu proračuna uporabljivosti. Proračun pukotina se temelji na provjeri graničnog stanja oštećenja. Pri tome proračunska vrijednost širine pukotina w_k dobivena iz proračuna gdje se koristi parcijalni koeficijent sigurnosti mora biti manja ili jednaka preporučenoj graničnoj vrijednosti w_{max} prikazanoj u Tablici 6.

| Razred | Armirani elementi i prednapeti elementi s neprianjajućim nategama w_{max} [mm] | Prednapeti elementi s prijanjajućim nategama w_{max} [mm] | |
|--------------------|--|---|---|
| izloženosti | Nazovi-stalna kombinacija opterećenja | Česta kombinacija opterećenja | |
| X0 | 0.4 | 0.2 | |
| XC1 | | | |
| XC2 | 0.3 | 0.2 + kontrola rastlačenja pri nazovi-stalnoj kombinaciji djelovanja | kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku |
| XC3 | | | |
| XC4 | | | |
| XD1 | | kontrola rastlačenja | |
| XD2 | | | |
| XD3 | zahtijevaju se posebne mjere zaštite | | |
| XS1 | 0.3 | kontrola rastlačenja | kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku |
| XS2 | | | |
| XS3 | | | |

Tablica 6 Preporučene granične vrijednosti širine pukotine betona w_{max} [mm] za razrede izloženosti prema EN 1992-1-1

6.1.7. Sadržaj klorida u betonu

Kloridi se u betonu mogu nalaziti u samom sastavu betona, odnosno agregatu i vodi ili dolaze iz okoline, naneseni su djelovanjem mora. Koncentracija kloridnih iona ne smije dosegnuti kritičnu vrijednost jer dovodi do razaranja pasivnog zaštitnog sloja i započinje korozija. Sadržaj klorida u betonu je postotak kloridnih iona na masu betona. Najveća dopuštena količina klorida u betonu prikazana je u Tablici 7.

| Uporaba betona | Razred sadržaja klorida ^a | Najveći sadržaj Cl ⁻ na masu cementa ^b |
|--|--------------------------------------|--|
| Ne sadrži celicnu armaturu ni drugi ugrađeni metal osim nehrđajućih vodilica | Cl 1,0 | 1,00 % |
| Sadrži celicnu armaturu ili drugi ugrađeni metal | Cl 0,20 | 0,20 % |
| | Cl 0,40 | 0,40 % |
| Sadrži celik 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 klornih iona na masu cementa plus ukupna količina uračunatog mineralnog dodatka.

Tablica 7 Najveći dozvoljeni sadržaj klorida u betonu

6.2. Utjecaj temperature na betoniranje

Prilikom same proizvodnje betona osim odabira pravilnog omjera sastojaka kojim se postižu željena svojstva ne smije se zanemariti pojam hidratacije betona. Hidratacije cementa je reakcija cementa sa vodom pri kojoj beton može postići temperaturu i do 25 °C tijekom procesa sazrijevanja betona. Hidratacija uzrokuje širenje betona te dovodi do nemogućnosti postizanja homogene čvrstoće. Glavni problem čvrstoće betona je temperatura na kojoj se odvija hidratacija. Početkom hidratacije cement upija velike količine vode što dalje dovodi do ubrzanog formiranja kristala oko čestica agregata. Što je veća temperatura kristali se brže formiraju. S obzirom na ubrzano formiranje kristala beton u početku ima veliku čvrstoću, međutim nakon 28 dana koliko mu treba da sazrije beton gubi čvrstoću. Zbog ovog procesa pridaje se velika važnost temperaturi ugradnje betona. Ona ne smije biti previsoka ni preniska. Kao idealna temperatura uzima se 15 °C.

6.2.1. Utjecaj visoke temperature na betoniranje

Visoke temperature nisu pogodne za ugradnju betona, međutim ukoliko se ugrađivanje vrši u ovakvim uvjetima postoje načini da se dobije beton zahtijevanih karakteristika. Odabire se doba dana kada su temperature niže što bi bilo rano ujutro, kasno navečer ili noću. Izbjegava se cement tipa CEM 1 koji povećava rast temperature hidratacije. Koriste se plastifikatori ili superplastifikatori čime se povećava konzistencija svježeg betona, a zadržava vodocementni

omjer korišten pri standardnim temperaturama. Toplina hidratacije raste količinom cementa pa se cement mijenja plastifikatorima i superplastifikatorima.

6.2.2. Utjecaj niske temperature na betoniranje

Pri niskim temperaturama beton razvija dostatnu tlačnu čvrstoću znatno sporije nego što je to pri višim temperaturama. Zbog procesa hidratacije koristi se hlađenje betona, međutim ukoliko se beton ohladi na temperaturu nižu od 0 °C voda u mješavini će se smrznuti i raširiti. Ovakva temperatura dovodi do toga da je takav beton u potpunosti neuporabljiv i treba ga se ukloniti. Cilj betoniranja pri niskim temperaturama je održavanje betona toplim, temperatura iznad 5 °C, posebno u prvih 48 sati nakon ugradnje kako bi se razvila dostatna tlačna čvrstoća.

7. DODACI BETONU

Dodaci betonu dodaju se prilikom miješanja kako bi se poboljšala svojstva i ostvarila otpornost u agresivnom morskom okolišu.

7.1. Mineralni dodaci

Mineralni dodaci poput finog praškastog materijala dodaju se u udjelu 5-20% cementa. Mineralni dodaci koji se dodaju cementu su silicijska prašina, kvarcno brašno, zgura, leteći pepeo, metakaolin. [18]

7.1.1. Metakaolin

Metakaolin je bijeli praškasti materijal koji se koristi za betone povećane trajnosti i velike čvrstoće. Glavna karakteristika je stvaranje C-H-S gela koji smanjuje poroznost i povećava samu gustoću betona. Nepropusnost betona se ostvaruje na način da metakaolin prodire u beton i djeluje kao punilo ispunjavajući šuplje prostore između čestica cementa. [18]

7.1.2. Zgura

Mineralni dodatak koji se dodaje u beton kako bi se povećala njegova čvrstoću je i otpadni materijal pri proizvodnji sirovog željeza u visokim pećima, zgura visokih peći ili granulirana zgura. Osim što zgura povećava čvrstoću betona, smanjuje toplinu hidratacije te zbog svojeg okruglog oblika čestica poboljšava obradivost. Hidratacija zgure započinje kad je cementa pasta dovoljno lužnata da dođe do procesa hidratacije. Zgura se koristi kod betona visokih i ranih čvrstoća. [15]

7.1.3. Leteći pepeo

Dodatkom letećeg pepela u beton omogućuje se lakša obradivost betona. Leteći pepeo u betonu smanjuje njegovu potrebu za vodom i izdvajanje vode na površini. Nije pogodan dodatak kod betona gdje se želi postići rana čvrstoća zbog toga što usporava toplinu hidratacije i smanjuje propusnost. [17]

7.1.4. Silikatna prašina

Silikatna prašina nastaje kao produkt tijekom proizvodnje silicijskih i ferosilicijskih legura. Značajan je dodatak zbog toga što sprječava štetan prodor tvari iz vode i zraka i time povećava trajnost. Isto tako smanjuje propusnost i povećava čvrstoću betona. [17]

7.2. Kemijski dodaci

Kemijski dodaci, poznatiji i kao aditivi čine 4% mase cementa. Uglavnom su organskog podrijetla. U ovu vrstu dodataka ubrajamo dodatke za vodonepropusnost, aerante, ubrzivače i usporivače veziva, plastifikatore i superplastifikatore. Dodaju se u vodu koja se koristi za spravljanje betona.

7.2.1. Aeranti

Prilikom spravljanja betonske mješavine za podvodnu ugradnju dodatak aeranata je koristan iz razloga što povećava vodonepropusnost prekidanjem kapilara u očvrslom betonu i smanjuje

visinu kapilarnog dizanja. Kada se dodaje aerant u beton se uvlače mjehurići zraka koji povećavaju količinu cimente paste, a smanjuju segregaciju. [18]

7.2.2. Ubrzivači i usporivači veziva

Kao što im samo ime otkriva ubrzivači se koriste u situacijama kada je potrebna velika brzina rada i skraćeno vrijeme vezivanja betona. Mogu se koristiti za betoniranje pri niskim temperaturama. Kao posljedicu imaju brže ostvarenje čvrstoće, formiranje konačnih produkata hidratacije, brže otapanje cementnih minerala, mijenjaju redoslijed otapanja glavnih minerala cementa.

Usporivači veziva skraćuju vrijeme vezivanja betona. Skraćuju vrijeme u kojem se beton može ugraditi, zbiti i obraditi. Glavna prednost je što privremeno štite cement od djelovanja vode i bolje je raspršenje cementa u betonu. [18]

7.2.3. Plastifikatori

Plastifikatori stvaraju adsorpcijski sloj između čestica veziva i drže čestice na međusobnom razmaku. S obzirom na taj razmak smanjuje se otpor gibanju čestica pa je obradivost bolja. Dodatkom plastifikatora povećava se čvrstoća na vlak i tlak, otpornost na mraz i trajnost beton. Parametri koji se smanjuju su vodocementni omjer i količina potrebne vode.

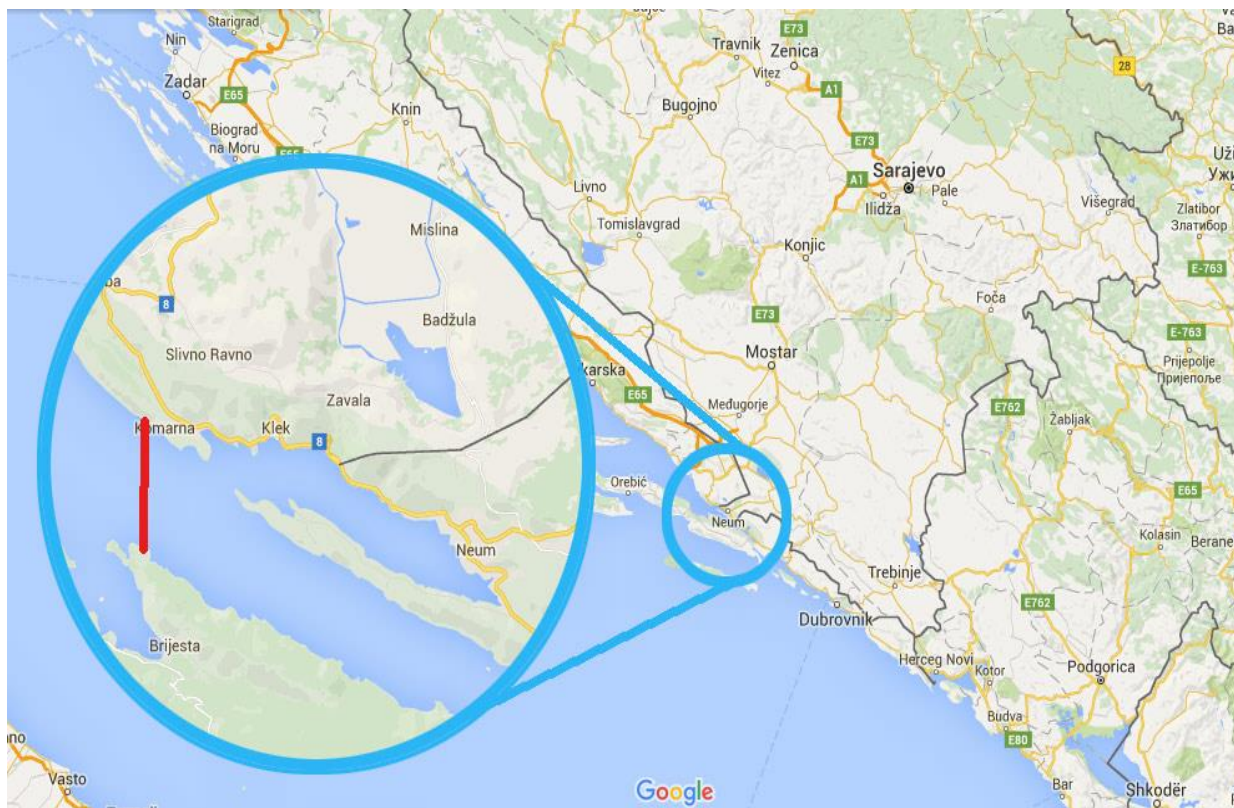
7.2.4. Superplastifikatori

Uloga superplastifikatora je istoznačna ulozi plastifikatora, ali im je djelovanje jače, odnosno izraženije. Veća je konzistencija, veće smanjenje vode, brži razvoj čvrstoće i hidratacije. Potrebna je manja količina vode i cementa. . [18]

8. PRIMJER KONSTRUKCIJE OSTVARENE PODVODNIM BETONIRANJEM

8.1. Pelješki most

Veliko dostignuće graditeljstva čija se gradnja pomno pratila i iščekivala nalazi se na prostoru Republike Hrvatske. Riječ je o Pelješkom mostu služeno otvorenom 27. srpnja 2022. godine. Značajan je zbog toga što povezuje jug Hrvatske sa ostatkom zemlje. Do njegove izgradnje kontinuitet Hrvatske je bio prekinut uskim koridorom kojim Bosna i Hercegovina kod Neuma izlazi na more. Smješten je u Malestonskom zaljevu između Komarne na kopnu i Brijeste na poluotoku Pelješcu. (Slika 21) [21]



Slika 21 Položaj Pelješkog mosta na karti

Čitav infostuktorni projekt bio je veliki izazov za graditeljstvo. Pozicioniran je na najužem dijelu kanala, a zbog Nacionalnog parka Mljet posebno je trebalo paziti gdje se što gradi da se ne naruši

prirodni sklad ovog zaštićenog područja. Naravno, do izlaska mosta iz vode bilo je potrebno izvesti zahtjevne podvodne radove koji su naišli na neočekivane komplikacije.

8.1.1. Zahtjevi za Pelješki most

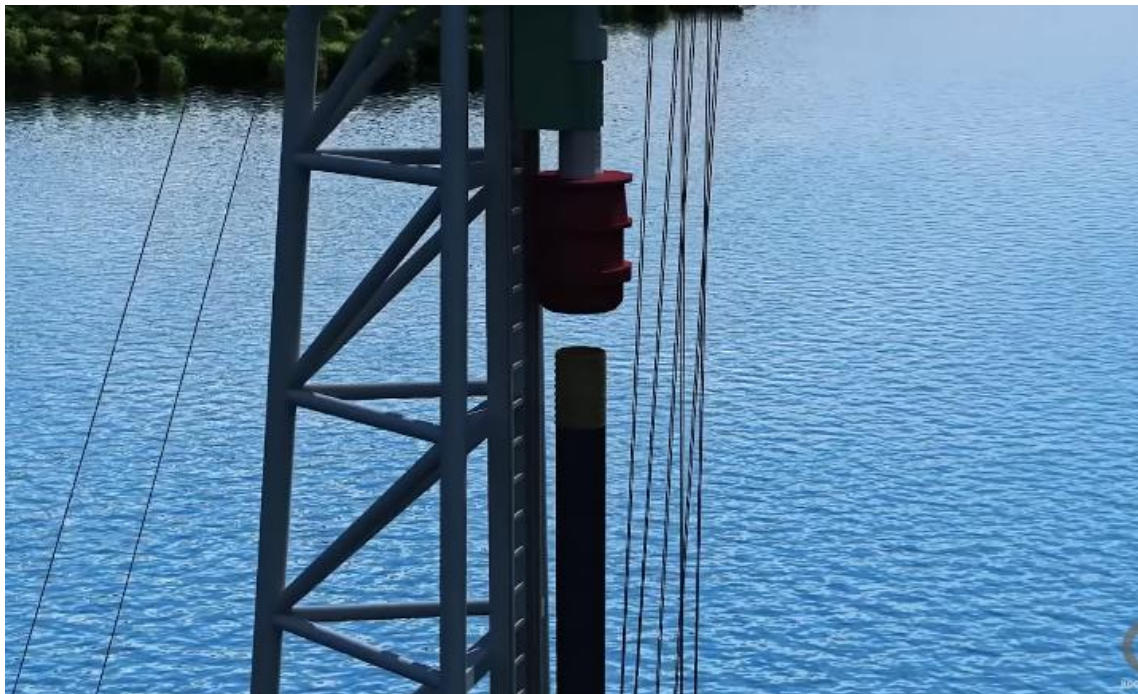
Most se nalazi u području zahtjevnom za temeljenje, prisutan je jak vjetar koji puše i do 150 km/h i područje je trusno. Zahtjevan je plovni koridor ispod mosta te most sa što manjom vlastitom težinom posebno rasponskok sklopa, a s druge strane most sa što manje oslonaca kako bi se ostvarilo što manje temelja.

8.1.2. Izrada pilota

Gradnja započinje probijanjem i ostvarivanjem pristupnih cesta. Nakon toga rade se piloni u pogonima u Kini koji su se do lokacije dovodili cijeli teretnim brodovima. Piloni su se dizali specijalnim dizalicama (Slika 23) zatim pozicionirali na mjesto ugradnje i zabijali čekiće. (Slika 24) Najdublje temeljenje je na pilotu S7 jer je tu najdublje temeljenje i stijena je najdalje. Pilot je duljine 130,6 metara te je to najdulji pilot na svijetu zabijen na ovaj način. [21] Ukupno imamo 146 zabijenih pilota.



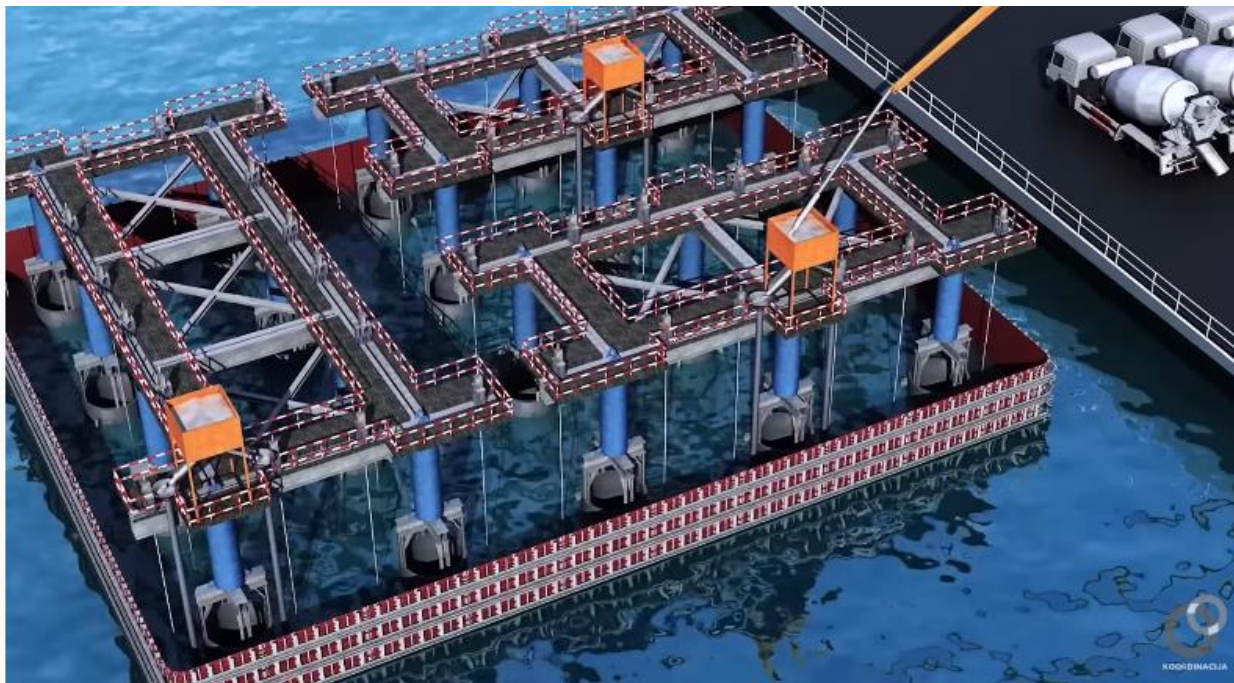
Slika 22 Specijalna dizalica koja prikazuje dizanje pilota



Slika 23 Zabijanje pilota čekićem

8.1.3. Izrada temeljne stope

Nakon zabijanja pilota uslijedila je izrada temeljne stope. (Slika 25) Sadrži 3000 kubika betona. Započinje izrada betonske donje oplata koja postaje sastavni dio same stope. Stopa se nalazila na hidrauličkim dizalicama. Cijela donja oplata se ogradila čeličnim zidovima nakon čega se potopila i slijedilo je ispumpavanje vode kako bi se započelo sa armiranjem. Ugradile su se i cijevi za hlađenje betona. Po tome je krenulo dizanje konstrukcije iz vode odnosno stupovi i čitav dio koji nije pod vodom.



Slika 24 Izrada temeljne stope

8.1.4. Izazov sanacije odlomljenog pilota

Tijekom izvedbe konstrukcije dolazi do neplaniranih radova. Izgradnja Pelješkog mosta nije iznimka. Prilikom zabijanja 146 pilota jedan od njih se zaglavio. Problem je riješen miniranjem, međutim ostali piloti su bili blizu pa je trebalo paziti da se ne oštete prilikom miniranja zaglavljenog pilota. Došlo je i do odlamanja komada težine preko dvije tone koji je izronjen na površinu nakon 200 zaronu kroz 4 mjeseca. S obzirom na dubini od 50 metara i prestanak vidljivosti na 33 metara ronilci su radili sa vremenskim ograničenjem. Tako je efektivni rad trajao 17 minuta po zaronu, a spuštanje je trajalo 2 i pol minute. Strogo je bilo određeno da svaki ronilac može zaroniti samo na 20 minuta nakon čega slijedi 26 minuta dekompresije. [21] Unatoč izazovima uspješno se ostvarilo veliko dostignuće graditeljstva na području Republike Hrvatske. Pelješki most danas (Slika 26.) stoji sa svojih 55 metara visine i 2,4 kilometara dužine spajajući jug i sjever Hrvatske. [22]



Slika 25 Pelješki most danas

9. ZAKLJUČAK

Beton je građevni materijal dobiven iz cementa, agregata, vode i dodataka, odnosno aditiva koji poboljšavaju njegova svojstva u svježem stanju, odnosno kasnije u očvrslom. S obzirom na jednostavnost obrade betona za razliku od drugih građevinskih materijala primjena mu je široka. Vrlo rano se uviđa potreba za korištenjem betona ne samo na kopnu već i u vodi te se upoznaje podvodno betoniranje. Podvodno betoniranje tehnološki je zahtjevna i specifična metoda koja se koristi u raznim inženjerskim projektima kao što su izgradnja mostova, brana, pristaništa, podvodnih tunela i ostalih infrastrukturnih projekata. Glavni cilj ovog rada je upoznati se sa načinima ugradnje betona pod vodu te faktorima koji utječu na njegovu trajnost u ovom agresivnom okolišu. Prema dostupnoj literaturi i podacima moguće je postavljanje betona ispod vode, i ostvarivanje trajnih i stabilnih rješenja za građevinske konstrukcije. Prikazani su i utjecaji mineralnih dodataka koji stvaraju beton boljih trajnosnih i mehaničkih svojstava u odnosu na običan beton. Glavni cilj podvodnog betoniranja je osigurati čvrstoću i otpornost betonske strukture na vodeni okoliš. Beton mora biti vodonepropusna kako ne bi došlo do prodora vode i

drugih agresivnih tvari iz okoline. Zbog toga je iznimno važno odabrati pravilne proporcije za ostvarenje betonske smjese. Osim toga ključnu ulogu u podvodnom betoniranju uključuju pažljivo planiranje, upotreba odgovarajuće opreme i materijala te stručno vođenje. Također, važno je paziti kakav će utjecaj na okoliš imati podvodna građevina te minimalizirati negativne utjecaje na okoliš. Unatoč brojnim rizicima i izazovima povezanih s radom u vodi moguće je postići uspješne rezultate sa današnjim modernim tehnikama i metodama ugradnje. Morski okoliš je najagresivniji okoliš u kojem čovjek ostvaruje svoju građevinu. Glavna prijetnja propadanju betona su razni oblici korozije koja se može umanjiti kombinacijom primarne i sekundarne zaštite kako bi se ostvario objekt koji će ispuniti zahtjev trajnosti. Do sada su poznata velika građevinskim dostignućima na kopnu. Zgrade, neboderi, značajna arhitektonska dostignuća. Postoji mogućnost da budućnost nosi upravo to, ali u slabije poznatom vodenom okruženju.

10. LITERATURA

- [1] *Povijest cementa i betona*, <https://www.cemex.hr/povijest-cementa-i-betona> [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [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] *Portland cement*, <https://www.becason.com/Portland-cement/> [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [4] *Caesarea and the Secret of Roman Underwater Concrete*, <https://thelampstand.com.au/caesarea-and-the-secret-of-roman-underwaterconcrete>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [5] *How Underwater Construction Works*, [How Underwater Construction Works: 5 Amazing Structures | BigRentz](https://www.bigrentz.com/blog/how-underwater-construction-works-5-amazing-structures)[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [6] *Duboko temeljenje*, <https://www.gradnja.me/clanak/278/Duboko-temeljenje>, [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [7] *What is Caisson Foundation i Its Types*, <https://civiconcepts.com/blog/caissonfoundation>, [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [8] *Cofferdams*, <https://dailycivil.com/prevent-leakages-cofferdams/>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [9] *Hooverova brana*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=26106>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [10] *Heavy lift enters*,<https://www.ynfpublishers.com/2014/11/sal-heavy-lift-enters-offshore-wind-energy-sector>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [11] *Underwater Concreting Methods*, <https://theconstructor.org/concrete/underwater-concreting-methods>, [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [12] *Posebne tehnologije ugradnje betona; Betoniranje pod vodom*, <https://www.grad.unizg.hr/>,[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [13] Najjar M.F., Abdelgader H.S.: *Underwater concreting by using two-stage (preplaced aggregate) concrete*, AL-Fateh University, Libya, 2009.
- [14] Pršić, M.; Bjegović D.; Serdar, M.: *Plovni putevi i luke – Poglavlje 4: Građenje u moru*, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Zagreb, 2009
- [15] Mršić-Božinović F.: *Utjecaj mineralnih dodataka na svojstva betona*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, 2015

- [16] Mrakovčić S.: *Dodaci betonu*, (Predavanje u okviru kolegija Teorija i tehnologija betona), Građevinski fakultet u Rijeci, 2020
- [17] Dubravka Bjegović, Marijana Serdar, Ana Baričević, Marija Jelčić Rukavina: *Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina*, Zagreb 2015.
- [18] *Prodor vode u beton-uzrok propadanja armature*, https://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/5921/820/prodor-vode-u-beton_, [Posjećeno: 1.8.2023.]
- [19] *Algae on stairs*, <https://www.bing.com/search>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [20] Hrvatski zavod za norme: *Cement - 1. dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene HRN EN 197-7*, Zagreb
- [21] *Hrvatski megaprojekt-Pelješki most*, <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-73-2021-8-6-PELJ.pdf>[Posjećeno: 1.8.2023.]
- [22] *Gradnja pelješkog mosta*, <https://baustela.hr/gradiliste/ovako-se-gradio-peljeski-most-bilo-je-itekako-puno-izazovnih-trenutaka/>[Posjećeno: 1.8.2023.]