Beton u morskom okruženju

Dumančić, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:232485

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Katarina Dumančić

Split,2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Katarina Dumančić

Beton u morskom okruženju

Završni rad

Split, 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:	**PREDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	Katarina Dumančić
BROJ INDEKSA:	4406
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Beton u morskom okruženju

Opis zadatka: Zadatak ovog završnog rada je prikazati utjecaj morskog okoliša na svojstva betona. Potrebno je prikazati mehanizam korozije betona u moru, principe projektiranja sastava betona uključivanjem trajnosti elemenata, te relevantne metode ispitivanja otpornosti betona na kloride iz mora. Projektirati sastav betona za zadanu konstrukciju u maritimnim uvjetima (detalji prikazani u završnom radu).

U Splitu, 31.03.2020.

Voditelj Završnog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Beton u morskom okruženju

Sažetak:

Morski okoliš predstavlja jedan od agresivnijih i kompleksnijih okoliša. Agresivne utjecaje takve okoline dijelimo na mehaničke, kemijske, fizikalne, elektrokemijske i biološke. Kemijski, elektrokemijski i biološki utjecaji djeluju izazivajući koroziju armature u armiranome betonu. Proces korozije ne možemo u potpunosti spriječiti ali ga smanjujemo kemijskim i drugim dodacima cementu koji poboljšavaju svojstva betona. Tehnički propis za betonske konstrukcije određuje odrednice o trajnosti betona, kojima je ujedno i određen mjerodavan sastav i svojstva betona prema utjecaju okoliša unutar kojega se nalazi. Metode ispitivanja otpornosti betona temelje se na određivanju vodo-propusnosti i plino-propusnosti betona, te difuziji klorida kroz pore betona.

Ključne riječi:

morski okoliš, kloridi, beton, degradacija betona, armatura, korozija, cement, mineralni dodatci, kemijski dodaci, vodo-propusnost, plino-propusnost, difuzija

Concrete in a marine environment

Abstract:

The marine environment is one of the most aggressive and complex environments. Aggressive influences of such environment of parts on mechanical, chemical, physical, electrochemical and biological. Chemical and electrochemical work by causing corrosion of reinforcement in reinforced concrete. We cannot completely prevent the corrosion process but reduce the chemical and other cement additives that improve the properties of the concrete. The technical regulation for concrete structures determines the determinants of the durability of concrete, which also determines the relevant composition and properties of concrete according to the environmental impact within which it is located. Concrete resistance testing methods are based on the determination of water permeability and gas permeability of concrete, and the diffusion ofchloride through concrete pores.

Keywords:

marine environment, chlorides, concrete, concrete degradation, reinforcement, corrosion, cement, mineral additives, chemical additives, water permeability, gas permeability, diffusion

Sadržaj

1. UVOD 1
1.1. Povijest hidrauličkog veziva 1
1.2. Beton danas 2
2. UTJECAJ MORA NA BETON I ARMATURU 3
2.1. Beton i armirani beton u moru 3
2.2. Degradacija strukture betona 3
2.2.1. Kemijski mehanizmi degradacije 5
2.2.2. Fizikalni mehanizmi degradacije 9
2.2.3. Biološki mehanizmi degradacije 10
2.3. Korozija armature u betonu 11
2.3.1. Utjecaj karbonizacije na armaturni čelik 12
2.3.2. Utjecaj klorida na armaturni čelik 13
2.4. Posljedice korozije u armiranom betonu 15
3. ODREDNICE ZA TRAJNOST BETONA (TPBK) 16
3.1. Zahtjevi za beton u morskom okolišu 16
3.1.1. Razred izloženosti 16
3.1.2. Cement i vodo-cementni faktor 18
3.1.3. Agregat 19
3.1.4. Zaštitni sloj za antikorozivnu zaštitu betona 20
3.1.5. Pukotine 21
3.1.6. Kritična količina klorida u betonu 22
4. MATERIJAL ZA POBOLJŠANJE ZAŠTITE OD KOROZIJE 23
4.1. Dodaci betonu 23
4.1.1. Mineralni dodaci 23
4.1.2. Kemijski dodaci betonu 25
4.2. Materijali i tehnologije za zaštitu armature 26
5. METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA KLORIDE IZ MORA 28
5.1. Vodo-propusnost betona 28
5.2. Plino-propusnost betona 30
5.3. Difuzija klorida 31
5.4. Metode ispitivanja difuzije klorida 32
5.4.1. ASTM C1202 metoda ispitivanja 33
5.4.2. NORDTEST BUILD 492 metoda ispitivanja 34

5.4.3. ASTM C1760 metoda ispitivanja 34
5.4.4. Odnos koeficijenta difuzije i električne vodljivosti 35
6. PRORAČUN SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE 37
6.1. Potporni zid - beton B1 39
6.2. Naglavna greda - beton B2 50
6.3. Podna ploča - beton B3 54
6.4. Sumarni prikaz odabranih komponenti betona 60
6. ZAKLJUČAK 61
7. LITERATURA 62

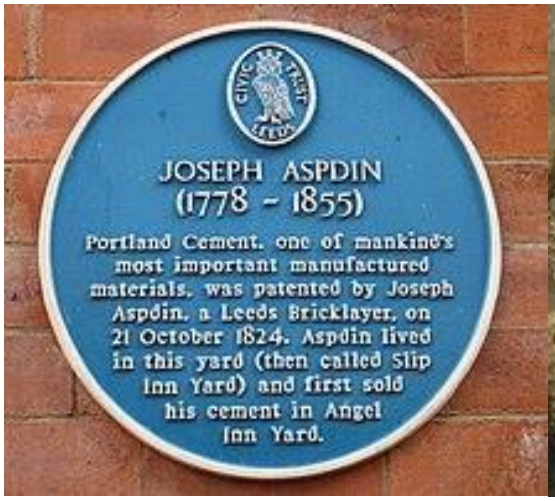
1. UVOD

1.1. Povijest hidrauličkog veziva

Beton je građevinski materijal dobiven miješanjem veziva cementa, vode i agregata, sa ili bez dodataka koji poboljšavaju ili mijenjaju jednog ili više svojstava betona. Posebnu važnost pridodajemo nastanku hidrauličkog veziva koje može očvršćivati u vodi. Poznat je iz doba antike kada su Rimljani isprva upotrebljavali kao vezivo gašeno vapno, naknadno dodavali mljevenu opeku, koju su kasnije zamijenili vulkanskim pepelom koji potječe iz okolice grada Pozzuolia iz Napuljske provincije. Takvom mješavinom postigli su kvalitetno i trajno hidrauličko vezivo. Takvo vezivo bilo je toliko čvrsto da mnoge njihove građevine, poput mostova, rimskih toplica i akvedukta još uvijek postoje. [1]

Upotreba gašenoga vapna ponovno je bila na snazi nakon pada Rimskoga carstva, kada je hidrauličko vezivo palo u zaborav. Hidrauličko vezivo ponovno se počelo koristiti krajem 18.st. kada se naprimjer pucolan miješao sa plovučcem, koji se vadio na Grčkom otoku Santorini, poznat kako Thera, a služio je za lučke radove diljem jadranske obale.

1756.godine Englez John Smeaton dobiva prvo hidrauličko vezivo. Pekao je vapnenac koji je sadržavao 20-25% gline i dobio vezivo koje je vezalo i pod vodom. Takvo vezivo 1824. godine pronalazi i Joseph Aspdin koji mu daje ime portland-cement, jer nakon svoga očvršćivanja takav materijal, zbog svoje čvrstoće i trajnosti, izgleda kao kamen u blizini mjesta Portland u Engleskoj.1825.godine zajedno sa Williamom Beverley osnovao je tvornicu proizvodnje cementa u Kirkgateu, Wakefield. [2]



Slika 1.1 Plakat u spomen J. Aspdina



Slika 1.2 Konstantinove terme u Arlesu

1.2. Beton danas

Beton predstavlja građevinski materijal kao današnji stupanj razvoja društva. Primjenjuje se gotovo stoljeće i pol, a pokriva oko 70% potreba u građenju. Predstavlja infrastrukturnu i urbanu osnovu suvremenog života. No prelaskom u novo stoljeće sve više je opterećen dvojbama i nedoumicama zbog kojih postaje područje intezivnijih istraživanja i promjena.

Razlozi zbog kojih beton danas ima dominantnu ulogu u građenju su niska početna cijena, široka dostupnost sastavnih komponenata, prednost nad drugim materijalima u prijenosu tlačnog naprezanja, podobnost za ugradnju čelične armature za preuzimanje vlačnog naprezanja, podobnost prevođenja u materijal visoke vlačne nosivosti sustavom pred-napinjanja, koji sprječava pojavu pukotina, plastična i lako oblikovana priroda betona u svježem stanju koje osiguravaju arhitektonsku atraktivnost, i slično.

Uz takve prednosti postoje i ozbiljni problemi koji ga prate poput primjene i eksploatacije. Jedno od osnovnih današnjih pitanja jest sve složenije oblikovanje, proračun i dimenzioniranje, te trajnost betonskih i armirano-betonskih konstrukcija. U neagresivnim uvjetima eksploatacije beton je trajan i starošću sve čvršći i bolji. Takvo uvjerenje u praksi dugo je bilo pogrešno i uzročnik je današnjih još uvijek ne riješenih problema i brzog dotrajavanja u brojnim ruralnim i urbanim agresivnim uvjetima eksploatacije, poput kloridno agresivne okoline mora i prometnih objekata koji se zimi održavaju posipanjem sa soli.

Najkarakterističniji primjer problema utjecaja kloridne agresivne okoline mora jest slučaj najdužeg mosta u Europi, Eland Bridge u Švedskoj dužine 6.072 m, koji spaja otok Eland s matičnim kopnom. Pušten je u promet 1972. godine, ali već 1980.godine je na sandučastim monolitnim stupovima došlo do ljuštenja zaštitnog sloja i korozije armature u zoni plime i oseke, zoni zapljuskivanja valova pa čak i na nekoliko metara pod morem. Rješenje takvih problema je sanacija stupova, izradom novog samonosivog plašta, koja rezultira velikim troškom.

Slični problemi javljali su se i pri gradnji naših jadranskih mostova. Tako krajem 2019.godine započeta je sanacija Paškog mosta zbog oštećenja uzrokovanih korozijom i dotrajalošću betona, kao i sanacija i zaštita Krčkog mosta koja je izuzetno složena i skupa.

Na sanaciju takvih građevina naprimjer Velika Britanija i Njemačka troše godišnje po 10 milijardi američkih dolara a razvijeni svijet oko 4% nacionalnog dohotka. [3]

2. UTJECAJ MORA NA BETON I ARMATURU

2.1. Beton i armirani beton u moru

Kod pomorske gradnje, beton može biti pred-gotovljeni (montažni) ili monolitni (ugrađen na licu mjesta). Pred-gotovljenim betonom postižemo što kvalitetniju građevnu konstrukciju. Takav beton ispunjava sve zahtjeve pomorskog betona. Monolitni beton je beton ugrađen u konstrukciju na gradilištu. Razlikujemo dvije vrste monolitnog betona, a to su nadmorski i podmorski beton. Nadmorski beton je beton iznad mora koji je pod utjecajem mora, te ispunjava zahtjeve kvalitetnog pomorskog betona. Podmorski beton je beton pod morem. Kako je betoniranje pod morem teška tehnička zadaća, takav način gradnje nastoji se zamijeniti pred-gotovljenim betonima, izrađenim u pogonu ili na suhom na gradilištu. [4]

2.2. Degradacija strukture betona

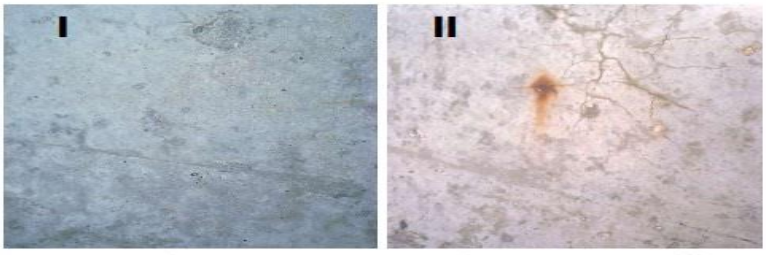
Od svih razreda izloženosti okoliša, unutar kojih se beton može nalaziti, najagresivniji je morski okoliš. Unutar takvog okoliša beton je pod utjecajem različitih fizikalnih ,kemijskih i bioloških procesa između klorida i vegetacije mora s mineralima cementa. Fizikalni procesu su erozija, kavitacija, kristalizacija soli i ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, kemijski proces je pojava oblika korozije, a biološki procesi su procesi nastali pri doticaju vegetacije mora s površinom betona. Posljedica takvih procesa je umanjena trajnost betonske konstrukcije. Takvi procesi su štetni jer, uzrokujući oštećenja strukture betona i koroziju armature, umanjuju trajnost betonske konstrukcije.

Kalcijev karbonat (CaO_3), sadržan u vapnencu i laporu, potreban je za proizvodnju cementnog klinkera. U peći, na temperaturi 900°C, reagira i razlaže se na ugljični dioksid (CO_2) i kalcijev oksid ili živo vapno (CaO). Kalcijev oksid reagira s ostalim oksidima, pri čemu nastaju četiri najzastupljenija minerala klinkera: alit, belit ,aluminat i ferit. Kemijski sastav, kao i četiri najzastupljenija oksida (kalcijev oksid (CaO), silicijev dioksid (SiO_2), aluminijev oksid (Al_2O_3), željezov oksid (Fe_2O_3)), pojedinog prethodno navedenog minerala, prikazani su u sljedećoj tablici: [5]

Tablica 2.1 Kemijski sastav cementnog klinkera

Naziv minerala	**Približna kemijska formula**	**Zapis u obliku oksida**	**Zapis u kemiji cementa**	**Udio u portland klinkeru (%)**
Alit	Tri kalcijev silikat	$3CaOxSiO_2$	C_3S	45 - 75
Belit	Dikalcijev silikat	$2CaOxSiO_2$	C_2S	7 - 32
Aluminat	Trikalcijev aluminat	$3CaOxAl_2O_3$	C_3A	0 - 13
Ferit	Tetrakalcijev alumino-ferit	$4CaOxAl_2O_3xFe_2O_3$	C_4AF	0 - 18

Pri projektiranju i održavanju građevinskih konstrukcija, koje su u doticaju s morem, važno je poznavati utjecaj mora koji je dugotrajan. Karakteristične pojave na površini armiranobetonske konstrukcije po kojima se može odrediti stupanj degradacije uslijed korozije prikazuje sljedeća slika *(Slika 2.1):* [4]



1. Pojava mikro-pukotina *2. Pojava smeđih mrlja*



3. Ljuštenje zaštitnog sloja *4. Odlamanje većih komada betona*

Slika 2.1 Stupnjevi degradacije

2.2.1. Kemijski mehanizmi degradacije

Kemijski sastav morske vode koja sadržava velike količine otopljenih soli, kisika, ugljičnog dioksida te sulfata, glavni je razlog agresivnog djelovanja morskog okoliša. Morska voda u prosjeku sadržava od 3.5% do 4% otopljenih soli. Primjer sastava soli u morskoj vodi prikazuje *Tablica 2.2.* Vidljivo je da prevladava natrijev klorid. On ne reagira kemijski sa betonom uronjenim u vodu. Nadalje prema sadržaju sulfata, morska voda trebala bi izazivati najjaču sulfatnu koroziju betona, ali zbog prisustva drugih soli ona je znatno usporen proces.

Korozija betona, koja je izazvana ionima magnezija, sulfatnim ionima i kiselinama, može se odvijati jedino ako su ispunjeni uvjeti kao što su prisustvo vode ili vlage, te prisustvo tvari otopljenih u vodi, koje kemijski reagiraju s betonom. Jadranska obala je dosta agresivan morski okoliš, posebno na lokacijama armiranobetonskih lučkih mostova velikih raspona kao što su Krčki most, Paški most i Maslenički most. Jadransko more pruža kombinaciju fenomena koji utječu na konstrukcije a to su relativno visok salinitet (38 ‰), jaka bura koja podiže morsku pjenu i nanosi kloride na konstrukcijske elemente, visoke ljetne temperature od 37°C ubrzavaju prodor klorida u beton, te prosječna godišnja vlažnost zraka od 71% pogodna je za koroziju čelika u betonu. Kemijsko djelovanje morske vode na beton kombinacija je više oblika korozije betona. [6]

Tablica 2.2 Sastav morske soli

Vrsta soli	NaCl	MgCl	MgSO4	CaSO4	KCl	Ostalo
Udio (%)	77.1	8.8	8.4	2.3	2.5	0.9

2.2.1.1. Vrste korozije

Opće kiselinska korozija nastaje kada lužnate tvari iz betona kemijski reagiraju s anorganskom ili organskom kiselinom. Produkti reakcije su soli i voda. Primjer:

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O \qquad (2.1)$$

Ako voda dođe u dodir s betonom, odnosi otopljenu sadru ($CaSO_4$.). Posljedica toga je proširenje pora u betonu, što za posljedicu ima daljnje napadanje kiseline na cementne hidrate. Stoga nastaje frontalno kemijsko razaranje betona.

Karbonatna korozija nastaje prilikom dva moguća slučaja:

1. Slučaj

Ugljična kiselina (H_2CO_3) iz kišnice reagira s vapnom iz betona, pri čemu nastaje kalcijev bikarbonat ($Ca(HCO)_3$) u topljivom stanju:

$$Ca(OH_2) + 2H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2 + 2H_20 \quad (2.2)$$

Nastali topljivi kalcijev bikarbonat ($Ca(HCO_3)_2$) može se nadolazećom vodom odnositi sa površine betona ili procijediti kroz beton na suhu površinu betona, pri čemu nastaje kalcijev karbonat ($CaCO_3$) koji stvara bijela nakupine na površini betona:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O \quad (2.3)$$

U obije reakcije voda odnosi vapno iz betona, stoga se ova pojava naziva izluživanje betona. Nakon izluživanja većine vapna, ugljična kiselina reagirat će s cementnim hidratima. Produkt njihove reakcije je kalcijev bikarbonat ($Ca(HCO_3)_2$), kojega na isti način kako i prije odnosi voda ili se izlužuje na površinu betona u obliku bijelih nakupina.

2. Slučaj:

Ako je beton u dodiru sa vodom koja potječe iz terena karbonatnog porijekla, tada ugljična kiselina prvo reagira sa karbonatima iz terena, pri čemu nastaje topljivi kalcijev bikarbonat ($Ca(HCO_3)_2$):

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow (Ca(HCO_3)_2) \quad (2.4)$$

U doticaju kalcijevog bikarbonata ($Ca(HCO_3)_2$) s vapnom $Ca(OH_2)$ iz betona, nastaje kalcijev karbonat ($CaCO_3$) , koji ispunjava pore, kristalizira u njima i time smanjuje propusnost betona:

$$Ca(OH_2) + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O \quad (2.5)$$

Korozija izluživanja nastaje ako voda , koja sadrži odgovarajuće manje kalcijevog hidroksida ($Ca(OH)_2$) od ugljične kiseline (H_2CO_3) i kalcijevog bikarbonata ($Ca(HCO_3)_2$) , oplakuje beton ili penetrira kroz pore pod pritiskom , pri čemu odnosi sa sobom vapno ($Ca(OH)_2$) iz betona ili ga izlužuje na površinu. Kada se izluži sve vapno , voda nešto sporije otapa cementne hidrate i izlužuje ih u obliku vapna ($Ca(OH)_2$) ili aluminijevog hidroksida ($Al(OH)_3$)koji nastaje otapanjem aluminijevog oksida (Al_2O_3). Oštećenja, koja nastaju pri koroziji izluživanja, ista su kao i oštećenja nastala pri karbonatnoj koroziji. Razlika je u tome što pri karbonatnoj koroziji, prema drugom slučaju, dio vapna ostaje u porama kako stabilni $CaCO_3$, a pri koroziji izluživanja izlužuje se svo vapno, što rezultira brže napredovanje korozije.

Sulfatna korozija nastaje pri ulazi sulfatnih soli u pore betona, koje reagiraju s cementnom hidratima. Pojava sulfatne korozije čest je slučaj izazvan magnezijevim sulfatom iz mora. Pri takvom obliku korozije, moguće su dvije reakcije. Prva reakcija sudjeluju hidroaluminat iz cementnog kamena uz prisustvo vapna, pri čemu nastaje entrigit, koji zbog velike količine vezane vode ima 3 puta veći volumen od spojeva koji su ušli u proces:

$$4CaO * Al_2O_3 * 12H_2O + 2Ca(OH)_2 + 3MgSO_4 + 20H_2O \rightarrow 3CaO * Al_2O_3 *3CaSO *31H_2O +Mg(OH)_2 \quad (2.6)$$

Istodobno se vrši i druga reakcija ali samo sa vapnom, pri čemu je povećanje nastale sadre manje nego u prvoj reakciji, ali je topljiva u vodi pa se može izlužiti iz betona ili reagirati s hidroaluminatom iz cementnog kamena i stvoriti novi entrigit:

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2\ H_2O \rightarrow CaSO_4 * 2\ H_2O + Mg(OH)_2 \quad (2.7)$$

Dio sadre ostaje u betonu i ne može stvarati entrigit. Entrigit je stabilan pri određenoj koncentraciji sadre, te ako je ona manja od granične, entrigit se raspada na spojeve od kojih nastaje.

Karbonatizacija betona nastaje kada vapno ($Ca(OH)_2$) iz betona reagira sa ugljičnim dioksidom (CO_2) iz okolnog zraka, koji u pore može ući kao plin (CO_2) ili kiselina (H_2CO_3). U oba slučaja nastaje kalcijev karbonat ($CaCO_3$):

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.8)$$

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (2.9)$$

Nastali $CaCO_3$ ima manji volumen nego vapno, zbog čega dolazi do povećanja volumne koncentracije kapilarnih pora u betonu, što za posljedicu ima povećano skupljanje betona koje dodatno može izazvati pukotine u betonu.

Biološka korozija nastaje kada se pojedini biljni i životinjski organizmi, koji se hrane sumpornim spojevima i izlučuju sumpornu kiselinu koja ujedno i izaziva koroziju, nastane na površini betona:

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2O \quad (2.10)$$

Nastali kalcijev sulfat ($Ca(OH)_2$) može vezati vodu i prijeći u sadru, pri čemu se stvaraju i uvjeti za nastanak entrigita. [7]

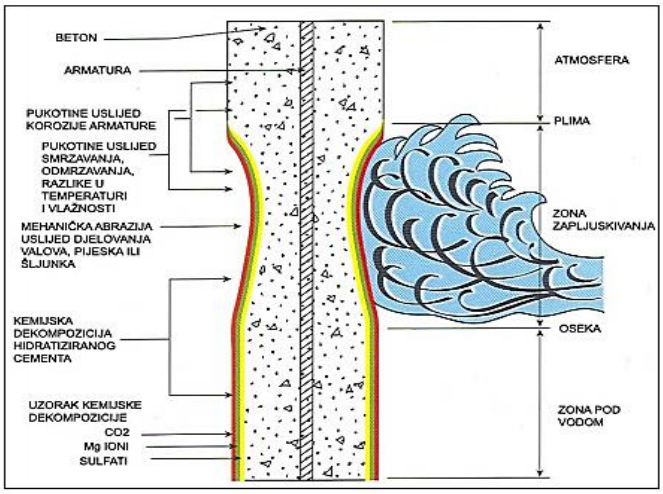
2.2.1.2. Utjecaj razine mora na razvoj korozije

Korozija je slučaj koji može nastupiti ovisno o faktorima poput brzine kretanja vode uz beton i u njegovim porama te o utjecaju zraka. S obzirom na takve faktore, moguća su dva slučaja pojave korozije betona, a to su kada je beton uronjen u more i kada se beton nalazi iznad površine mora.

Kada je beton uronjen u more, moguća su dva oblika korozije. Zbog prisustva magnezijevog i kalcijevog sulfata moguć je nastanak oblika sulfatne korozije koja je prethodno objašnjena. Ali zbog veće koncentracije kalcijevog klorida NaCl zbog koje nije moguće stvaranje novih spjeva, proces sulfatne korozije je usporen, što za posljedicu ima stvaranje nedovoljne količine kristala novih spojeva koji bi stvorili kristalizacijski pritisak zbog kojeg bi došlo do razaranja betona. U konačnici proces se, postepenim usporavanjem, zaustavlja. Zbog činjenice da je vapno brže topljivo u morskoj vodi nego slatkoj, moguća je pojava jake korozije izluživanja. No proces popunjavanja pora je brži, a time korozija sporiji proces, te se i ona u konačnici zaustavlja.

Kada je beton iznad površine mora, gibanje vode uz površine betona uzrokuju plima i oseka, te zapljuskivanje valova. Takve pojave predstavljaju naizmjeničnu promjenu pritiska vode na beton, naizmjenično ulaženje i izlaženje vode iz kapilarnih pora, te naizmjenično vlaženje i sušenje. Pri takvim procesima dolazi do izluživanja vapna iz betona, čime se povećava volumna koncentracija kapilarnih pora što olakšava pristup solima u beton i daljnji razvoj sulfatne korozije. Na beton iznad nivoa površine mora djeluje kišnica koja sadržava ugljični dioksid koji izaziva karbonatnu koroziju i karbonizaciju betona.

Navedene vrste korozije izazivaju razaranje betona, što prikazuje *Slika 2.2* gdje je vidljivo da proces razaranja započinje od srednjeg najnižeg nivoa oseke do srednje visine valova. [7]

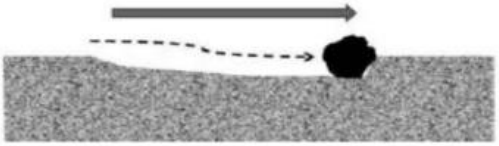


Slika 2.2 Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju

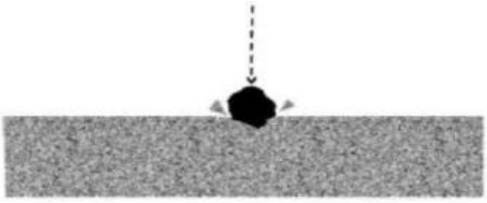
2.2.2. Fizikalni mehanizmi degradacije

Kada govorimo o ne armiranim betonskim konstrukcijama , u fizikalna djelovanja spadaju četiri osnovna mehanizma degradacije betona, erozija, kavitacija, kristalizacija soli i ciklusi smrzavanja i odmrzavanja. U području mediteranske klime, moguća je pojava svih navedenih mehanizama degradacije osim smrzavanja i odmrzavanja. Tijekom ciklusa vlaženja i sušenja, soli iz mora prodiru sve dublje u pore betona, kristaliziraju, povećavaju volumen i stvaraju dodatne tlakove u cementnoj matrici betona. Ako to naprezanje postane veće od vlačne čvrstoće betona, može doći do nastanka pukotina unutar strukture betona.

Erozija i kavitacija koje izazivaju degradaciju betona, nastaju pri djelovanju valova. Rjeđe su u toplijim morima kao što je Jadransko more, a češće u nemirnim i hladnim morima gdje tijekom godine bude prisutan i led koji svojim kretanjem izaziva abraziju koja oštećuje površinu betona. Abrazija kao mehaničko trošenje može biti katalizator za razne oblike degradacije poput nastajanja pukotina ili korozije armature.[6]



Slika 2.3 Abrazija od trenja



Slika 2.4 Abrazija od udarca

2.2.3. Biološki mehanizmi degradacije

Biološki mehanizmi degradacije površine betona su djelovanja mekušaca, školjkaša i ljuskara. Oni se nastanjuju na površini betona i s vremenom ga erodiraju. Na površini betona, u zonama ciklusa vlaženja i sušenja, mogu se naći gljivice i lišajevi jer zahtijevaju manje vlage. U dijelovima betonskih konstrukcija, koji su stalno uronjeni u more, mogu se naći alge koje za svoja staništa koriste udubljenja u betonu, poput otvorenih pora, neravnina na površini ili mehaničkih oštećenja. Takvi organizmi buše beton i stvaraju ″tunele″, zbog čega struktura betona slabi. Tako naprimjer školjke imaju štetan utjecaj na beton jer prodiru u dubinu betona, uzimajući tvari iz beton za svoj metabolizam. Time uništavaju zaštitni sloj betona.

Biljni i životinjski organizmi ne razvijaju se na podlozi koja je lužnata, tj. mogu se nastaniti na površinu betona kada je ona tek neutralizirana ($pH<7$). Površina betona biti će neutralizirana kada ga napadne neki od oblika korozije, što nam dokazuje činjenica da je potrebno nekoliko desetaka godina da se na površini betona ispod nivoa niske vode oseke razvije morska vegetacija. Bujna vegetacija razvit će se pri najjačoj koroziji koja se događa u zoni plime i oseke. Svaka vegetacija, poput vlasastih algi, koje se nastanjuju na betonu u moru, usporava proces korozije. Neke sitne školjke učvršćuju se na površini betona svojim zaštitnim ljuskama i tako štite njegovu površinu. [6]



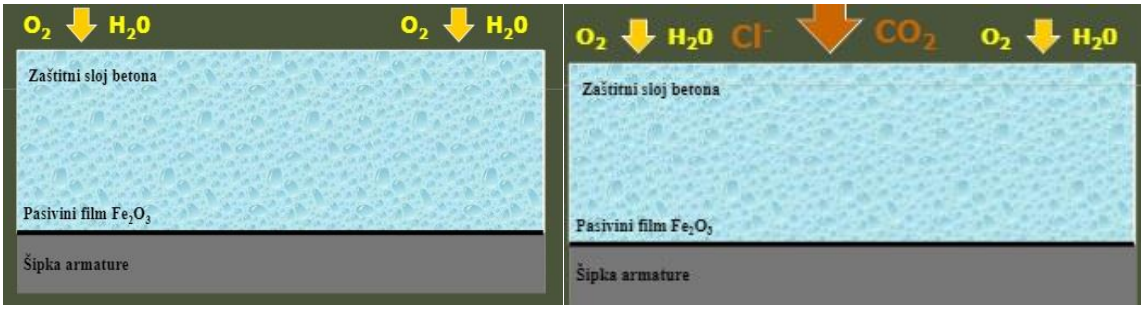
Slika 2.5 Školjke na betonu



Slika 2.6 Alge na betonu

2.3. Korozija armature u betonu

Prethodno definirane vrste kemijskih korozija rezultat su reagiranja kemijskih tvari pri njihovom međusobnom dodiru. Takav tip korozije kod armature može se javiti prije njene ugradbe u beton, pri čemu je ona izložena zraku i vodi. Kod novo-očvrsnulog betona, pH-faktor betona i vodene otopine u porama veći je od 12. Takva vodena otopina u porama ostaje bazična sve dok pH-faktor ne postigne vrijednost manju od 12. Pri takvim uvjetima, na površini armature stvara se tanki sloj željeznog oksida. Takav sloj je nepropustan i stabilan sve dok je vodena otopina u porama bazična (pH-faktor≥12), tj. sve dok vodena otopina nema svojstvo električne vodljivosti. Takav sloj predstavlja pasivnu zaštitu armature i sve dok ona postoji čelik neće biti izložen koroziji. Do depasivizacije dolazi uslijed karbonatizacije betona, tj. izluživanja vapna iz betona zbog njegovog kontakta sa zrakom ili vodom, koji sadržavaju ugljični dioksid (CO_2), ili uslijed prodora klorida (Cl^-) u beton, što prikazuje sljedeća slika: [4]



Slika 2.7 Pasivizacija (lijevo), Depasivizacija (desno)

Dakle, u armiranobetonskoj konstrukciji koja je izložena utjecajima iz morskog okoliša, dva su osnovna uzročnika korozije armature u betonu:

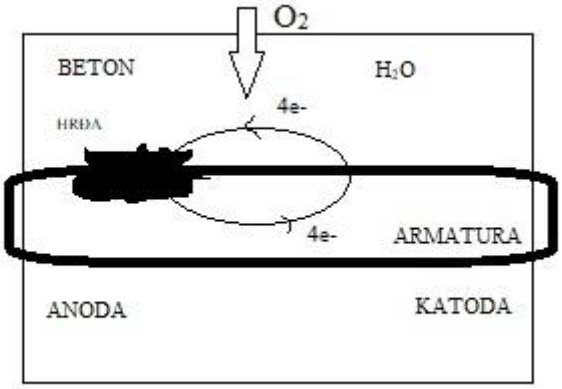
1. Smanjivanje pH razine betona zbog reakcije cementnog hidroksida i ugljičnog dioksida CO_2, pri čemu nastaje karbonizacija koja razara pasivnu zaštitu oko armaturnog čelika
2. Penetracija klorida u porama oko armature; dovoljna visoka koncentracija iona klora koja može destabilizirati pasivizirajući film, iako pH vrijednost porne vode ostaje nepromijenjena

Oba procesa imati će jači utjecaj ako su prisutne pukotine od naprezanja konstrukcije. [4]

2.3.1. Utjecaj karbonizacije na armaturni čelik

Kao što je već prethodno objašnjeno, karbonizacija nastaje uslijed kontakta betona sa zrakom ili vodom, koji sadrže ugljični dioksid kao plin ili kao kiselinu, koji reagira sa hidratima cementa iz betona. Za posljedicu ima izluživanje vapna, a pri izluživanju vapna dolazi do smanjena pH-faktora (pH<8), te vodena otopina poprima svojstvo elektrolita, te nastupa proces korozije armature. Proces korozije armature je elektrokemijski proces jer na površini armature nastaju anode i katode koje zajedno s betonom čine galvanski članak (*Slika 2.8).*

Do toka elektrona u betonu od anode(+) do katode(-) u armaturi i obrnuto, doći će ako postoji razlika elektrokemijskog potencijala prema betonu između mjesta potencijalne anode i katode na površini šipke, ako postoji dovoljna zasićenost pora elektrolitom, te ako je moguć ulazak zraka u beton. Najpovoljniji uvjeti za koroziju su pri relativnoj vlažnosti zraka od 70%-80%. Pri većoj relativnoj vlazi od navedene, pore su potpuno zasićene pa je prodor zraka u njih onemogućen, a pri manjoj relativnoj vlazi, ispod 60%, nema dovoljno vlage u porama za kretanje iona.



Slika 2.8 Shematski prikaz korozije armature pri karbonizaciji

Dakle, pri razaranju pasivne zaštite betona, dolazi do pojave galvanske struje i ionizacije atoma željeza na anodi u slobodne elektrone (2.11), koji na putu kroz pore betona ioniziraju molekule kisika i vode (2.12):

$$2Fe^{2+} + 4e^{-} \rightarrow 2Fe \qquad (2.11)$$

$$4e^{-} + O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 4OH^{-} \qquad (2.12)$$

Novonastale negativne hidroksidne ione (OH^{-}) privlači pozitivna anoda te dolazi do njihove kemijske reakcije sa atomima željeza na anodi (2.13):

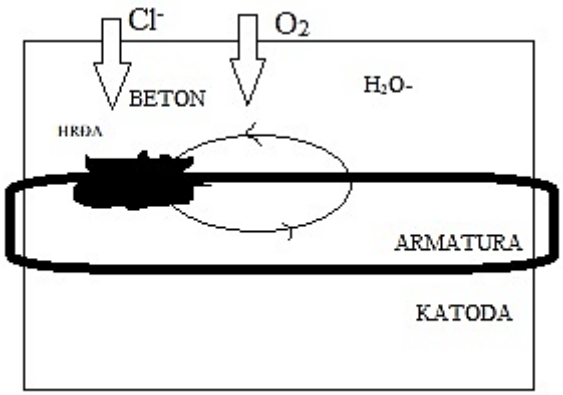
$$2Fe^{2+} + 4OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_2 \quad (2.13)$$

$Fe(OH)_2$ je novonastali željezni hidroksid koji ima 4 puta veći volumen od prvobitnog Fe, koji je ušao u reakciju, i čini hrđu. Higroskopan je, tj. može vezati nove molekule vode i kisika pri čemu prelazi u nove spojeve koji mogu imati do 6 puta veći volumen od prvobitnog Fe. Hrđa, vršeći kristalizacijski pritisak na beton oko šipke, izaziva pukotine uzduž šipke. Hrđa tada ispunjava pukotine i izbija na površinu betona, što za posljedicu često može imati izbijanje zaštitnog sloja betona. [7]

2.3.2. Utjecaj klorida na armaturni čelik

Proces razaranja sloja pasivne zaštite, odnosno proces korozije, kao što je prethodno već navedeno, može nastati uslijed prodora klorida mora u beton, čak i ako je pH-faktora betona veći od 12. Do razaranja pasivne zaštite, odnosno procesa korozije, dolazi pri prodoru kloridnih iona u beton. Labaratorijskim ispitivanjem čelika, koji je uronjen u otopinu poznate pH vrijednosti, zaključeno je da razaranje pasivnog sloja ovisi o koncentraciji slobodnih kloridnih iona mora u odnosu na hidroksidne ione betona. Ustanovljeno je da pri njihovom omjeru manjem od 0.6 ($Cl^-/OH^- < 0.6$), neće doći do razaranja sloja pasivne zaštite. Ako je vrijednost njihovog omjera veća od 0.6 ($Cl^-/OH^- > 0.6$), zaštitni sloj postaje nestabilan i propustan za kloridne ione more. Time čelik više nije zaštićen od korozije.

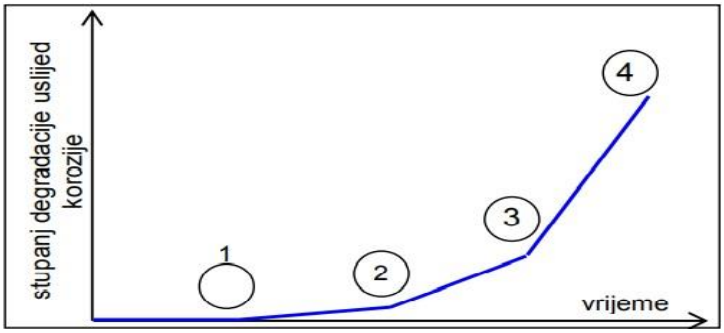
Takvo stanje približno odgovara ukupnoj količini od 0.4% kloridnih iona u odnosu na masu cementa, odnosno 0.05% na masu betona za ugljičnu čeličnu armaturu. Kloridni ioni razore pasivnu zaštitu, zbog čega nastaje velika razlika elektro-kemijskog potencijala između mjesta na kojem kloridi djeluju i ostalog dijela šipke armature. Na mjestu djelovanja klorida na pasivnoj zaštiti nastaje anoda, dok je katoda cijeli dio šipke na kojem je pasivna zaštita neoštećena *(Slika 2.9).* Na anodi kloridni ioni reagiraju sa željezom i stvaraju željezni klorid ($FeCl_3$). Djelovanjem galvanske struje na njega, željezni klorid prelazi u željezni hidroksid koji čini hrđu. [7]



Slika 2.9 Shematski prikaz korozije armature u prisustvu klorida mora

Korozija, koju uzrokuju ioni klora , može se podijeliti na četiri osnovna stupnja *(Slika 2.10):*

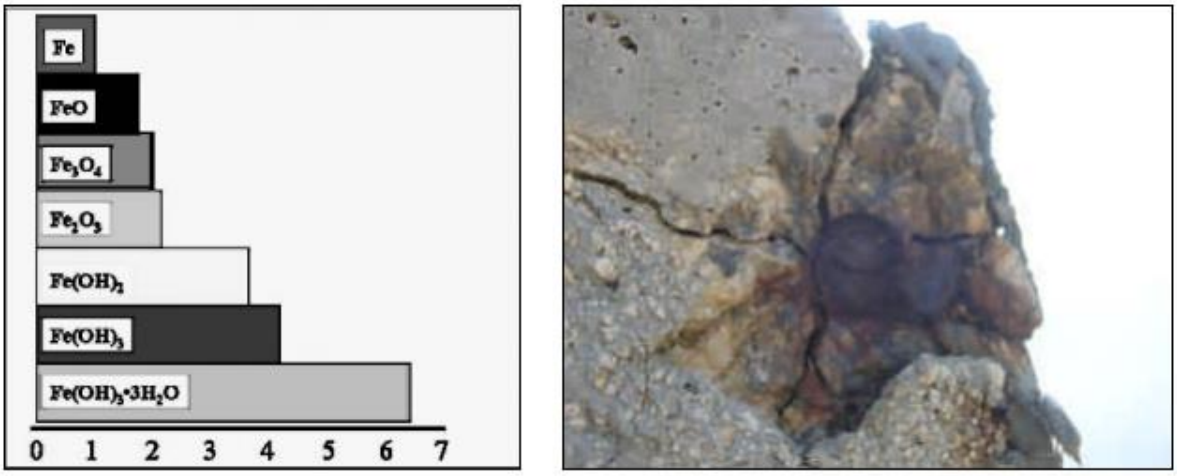
1. Razaranje pasivnog sloja armature uz koroziju čelika i smanjenje površine presjeka armaturnih šipki
2. Raspucavanje betona uz otvaranje puta jačem procesu korozije
3. Ljuštenje betona uz otvaranje puta masovnom procesu korozije
4. Slom konstrukcije



Slika 2.10 Stupnjevi degradacije armiranobetonske konstrukcije uslijed korozije

2.4. Posljedice korozije u armiranom betonu

Razvitak korozije možemo promatrati kroz dva stupnja. U prvom stupnju razvitka, agresivne tvari prodiru u beton te nema vidljivih posljedica. U drugom stupnju, pojavljuju se smeđe mrlje hrđe na površini betona i raspukline uzduž armaturnih šipki, koje su izražene u uglovima, gdje su najviše izložene pristupu agresivnih tvari. Smanjuje se prerez nekorodirane armature, što smanjuje sigurnost cijele konstrukcije. Na mjestima raspuklina kloridi prodiru prema armaturi brže nego u raspuknutom betonu. Time je i propadanje brže. Male raspukline, širine do 0.4 mm, same se popunjavaju prljavštinom, kalcijom i hrđom pa se ne smatraju opasnima za sigurnost konstrukcije. Smanjenje poprečnog presjeka armature uzrokuje smanjenje vlačne čvrstoće, smanjenje duktilnosti i smanjenje čvrstoće na zamor. Raspucavanje betona uzrokuje gubitak čvrstoće prianjanja, ubrzanje korozijskog procesa i odlamanje zaštitnog sloja betona. Smanjenje poprečnog presjeka armature i raspucavanje betona zajedno dovode do krtosti armature, time i do krtog loma šipke. [4]



Slika 2.11 Povećanje volumena prilikom korozije čelika u armiranom betonu

3. ODREDNICE ZA TRAJNOST BETONA (TPBK)

3.1. Zahtjevi za beton u morskom okolišu

Proračun stabilnosti, nosivosti i deformacija konstrukcija definirani su na principima tehničke mehanike u propisima, normama i raznim preporukama za projektiranje armiranobetonskih i pred-napetih konstrukcija. Njihova sigurnost i uporabljivost tijekom cijelog vijeka trajanja treba ostati takva da nisu potrebni veliki troškovi održavanja i popravaka. Trajnost konstrukcije određena je pravilima za materijale i tehnologiju, kao što su razred izloženosti betona, vodo-cementni omjer, marka betona, minimalna količina cementa, granična koncentracija nekih tvari u vodi, aeriranje i vrijeme njegovanja betona.

Bitno je naglasiti da trajnost betonske konstrukcije nije jednaka trajnosti betona. Ona ovisi o kvaliteti betona, koncipiranju konstrukcije i konstruiranju pojedinog elementa, dok trajnost betona ovisi o sastavu betona, svojstvima (npr. propusnost i poroznost), njegovoj kvaliteti, kontroli pukotina, debljini zaštitnog sloja i slično. Tako voda povećava volumen prilikom smrzavanja i odmrzavanja i prenosi kloridne ion, koji uzrokuju koroziju, kisik potpomaže procesu korozije, a sulfati reagiraju s aluminatnim sastojcima.

Tehničkim propisom za betonske konstrukcije (TPBK), koji je donesen na temelju članka 19. Zakona o prostornom uređenju i gradnji, propisuju se tehnička svojstva za betonske konstrukcije u građevinama, zahtjevi za projektiranje i izvođenje radova na izradi, te tehnička svojstva i ostali zahtjevi za građevne proizvode koji su namijenjeni za ugradnju u betonsku konstrukciju. [4]

3.1.1. Razred izloženosti

U pogledu trajnosti, tehnički propis za betonske konstrukcije oslanja se na normu HRN EN 206-1:2006 Beton – 1.dio: Specifikacije, svojstva , proizvodnja i sukladnost. Prema toj normi djelovanje okoliša na betonske konstrukcije određuje ″razredima izloženosti″ koji su prikazani u tablici na *Slici 3.1.* Prema razredima izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi prema kojima se treba projektirati odgovarajući sastav betona, te njegova svojstva poput tlačne čvrstoće, minimalne debljine zaštitnog sloja, maksimalnog vodo-cementnog faktora, te minimalnog sadržaja pora i klorida. [4]

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 karbonatizacijom [a])		
XC 1	Suho ili trajno vlažno	Elementi u prostorijama obične vlažnosti zraka; elementi stalno uronjeni u vodu
XC 2	Vlažno, rijetko suho	Dijelovi spremnika za vodu; dijelovi temelja
XC 3	Umjerena vlažnost	Dijelovi 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

Slika 3.1 Razredi izloženosti betonskih konstrukcija (HRN EN 206-1:2006)

3.1.2. Cement i vodo-cementni faktor

Izbor cementa i drugih parametara sastava betona, pogotovo u nepovoljnim uvjetima okoliša, ima utjecaj na trajnost betona, npr. otpornost na smrzavanje, kemijsku otpornost i zaštitu armature. Određuje pH vrijednost porne vode, veličinu pora i poroznost betona. Izbor vodo-cementnog omjera utječe na poroznost betona i koeficijent difuzije. Što je manji vodo-cementni omjer manja je poroznost betona a time i sporiji prodor klorida i bolja korozijska pasivnost armature u betonu. Minimalni tehnološki zahtjevi, prema kojima se projektira odgovarajući sastav betona kao i svojstva betona(tlačna čvrstoća, minimalni zaštitni sloj, maksimalni vodo-cementni omjera, minimalni sadržaj pora), definirani su prema razredima izloženosti pojedinoga betona. Preporučene vrijednosti sastava i svojstava betona za razrede izloženosti prikazuje tablica na sljedećoj slici: [4]

Razred izloženosti	Max *v/c* omjer	Min razred čvrstoće	Min količina cementa (kg/m^3)	Min količina zraka (%)	Drugi zahtjevi
Nema rizika korozije					
X0	-	C 20/25	-	-	-
Korozija armature uzrokovana karbonatizacijom					
XC 1	0.65	C 25/30	260	-	-
XC 2	0.60	C 30/37	280	-	
XC 3	0.55	C 30/37	280	-	
XC 4	0.50	C 30/37	300	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima iz mora					
XS 1	0.50	C 30/37	300	-	-
XS 2	0.45	C 35/45	320	-	
XS 3	0.45	C 35/45	340	-	
Korozija armature uzrokovana kloridima koji nisu iz mora					
XD 1	0.55	C 30/37	300	-	-
XD 2	0.55	C 30/37	300	-	
XD 3	0.45	C 35/45	320	-	
Smrzavanje i odmrzavanje					
XF 1	0.55	C 30/37	300	-	Agregat s dovoljnom otpornošću na smrzavanje
XF 2	0.55	C 25/30	300	4.0[a]	
XF 3	0.50	C 30/37	320	4.0[a]	
XF 4	0.45	C 30/37	340	4.0[a]	
Kemijski agresivan okoliš					
XA 1	0.55	C 30/37	300	-	Sulfatno otporni cement[b]
XA 2	0.50	C 30/37	320	-	
XA 3	0.45	C 35/45	360	-	
Beton izložen habanju					
XM 1	-	C30/37	-	-	Manje maksimalno zrno agregata
XM 2	-	C30/37	-	-	
XM 3	-	C35/45	-	-	

a) Kada beton nije aeriran, ponašanje betona treba ispitivati prema prikladnoj metodi u usporedbi s betonom kojemu je otpornost na smrzavanje za relevantni razred izloženosti dokazana.

b) Kada SO_4^{2} vodi ka razredu izloženosti XA2 i XA3 ispravno je koristiti sulfatno-otporni cement. Kada je cement razredovan prema sulfatnoj otpornosti, umjereno ili visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA2 (i u razredu izloženosti XA1 kad je primjenljiv), a visoko sulfatno otporni cement treba rabiti u razredu izloženosti XA3.

Slika 3.2 Preporučene vrijednosti sastava i svojstava betona prema razredima izloženosti (TPBK)

Pri projektiranju sastava betona i njegovih svojstava, treba uzeti u obzir ograničenja za primjenu određene vrste cementa u betonu, što je određeno normom HRN EN 197-1:2005 Cement –1.dio: Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti cementa opće namjene *(Tablica 3.1).* [4]

Tablica 3.1 Ograničenja na primjenu cementa u betonu po razredima izloženosti (HRN EN 197-1:2005)

RAZRED IZLOŽENOSTI	**TIP CEMENTA KOJI SE NE PRIMJENJUJE U BETONU**
XC2,XC3	CEM III/C
XD	CEM IV
XS	CEM V
Svi razredi okoline	CEM II/AiB-P/Q
Za elemente betonske konstrukcije s adhezijskim prednapinjanjem	CEM II/AiB-M
	CEM II/AiB-W
	CEM III
	CEM IV
	CEM V

3.1.3. Agregat

Agregat povećava razinu otpornosti na vodu. Najbitnije je odrediti odgovarajuću veličinu zrna agregata u zaštitnome sloju betonu jer je poroznost cementne paste, u okolini zrna agregata, veća od poroznosti u ostatku cementne paste. Ako je veličina zrna agregata približno jednaka debljini zaštitnog betonskog sloja kloridi će lakše prodrijeti kroz beton do armature. Agregat neće imati veliki utjecaj na koroziju armature osim ako je izrazito porozan ili sadrži veću količinu klorida. Sadržaj klorida, koji je ispitan prema normo HRN EN 1744-1:2004 Ispitivanje kemijskih svojstava agregata – 1.dio: Kemijska analiza, izražen kao postotak kloridnih iona, ne smije biti veći od vrijednosti prikazanih u *Tablici 3.2.* S obzirom na specifirana svojstva, tip agregata, granulometriju i razrede bira se prema normi HRN EN 206/A1:2004, uzimajući u obzir: izvedbu radova, krajnju uporabu betona, uvijete okoliša kojima će beton biti izložen te sve uvjete za izloženi agregat. [4]

Tablica 3.2 Maksimalni sadržaj kloridnih iona u agregatu (HRN EN 1744-1:2004)

Maksimalni sadržaj kloridnih iona %	**Namjena**
0,15	Nearmirani beton
0,06	Armirani beton
0,03	Pred-napeti beton

3.1.4. Zaštitni sloj za antikorozivnu zaštitu betona

Ostvarivanjem kvalitetnog betona u zoni zaštitnog sloja, projektiranje i izvedba njegove dovoljne debljine, kao jedne od glavnih mjera zaštite armature od korozije, postižemo povećanu trajnost. Minimalna debljina zaštitnog sloja betona ovisi o razredu izloženosti i načinu armiranja betona. Minimalne vrijednosti zaštitnog sloja, za zaštitu od korozije i dopuštena odstupanja zaštitnog sloja, prikazane su u tablici na *Slici 3.3.* [4]

Razred izloženosti	Najmanji zaštitni sloj c_{min} (mm) [a] [b] za armaturu	Dopuštena odstupanja zaštitnog sloja Δc (mm)
XC1	20	10
XC2	35	15
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 prianjanja moraju se poštivati ako je armatura potpuno iskorištena u fazi izvedbe.[c]) U nekim slučajevima armatura će trebati posebnu zaštitu od korozije.

Slika 3.3 Najmanje vrijednosti zaštitnog sloja i njegova dopuštena odstupanja (TPBK)

Debljina zaštitnog sloja određuje se sljedećim izrazom:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

c_{min} – najmanja debljina zaštitinog sloja,osigurava siguran prijenos sila prionjivošću, propisanu zaštitu od požara i zaštitu čelika od korozije

Δc_{dev} - vrijednost odstupanja,ovisi o veličini,obliku i vrsti konstruktivnog elementa,vrsti konstrukcije i provedbi postupaka kontrole kvalitete

Ako na zaštitni sloj utječe više razreda izloženosti, minimalna debljina zaštitnog sloja, koja ne smije biti manja od promjera cijevi kako bise osigurala prijenosna sila, određuje se sljedećim izrazom:

c_{min}= max($c_{min,b}$;$c_{min,dur}$ + $\Delta c_{dur,y}$ - $\Delta c_{dur,st}$ -$\Delta c_{dur,add}$; $10mm$)

$c_{min,b}$ – najmanji zaštitni sloj zbog prionljivosti

$c_{min,dur}$ - najmanji zaštitni sloj zbog uvjeta okoliša

$\Delta c_{dur,y}$ – zaštitni sloj zbog sigurnosti

$\Delta c_{dur,st}$ - smanjenje zaštitnog sloja za nehrđajući čelik

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

3.1.5. Pukotine

Pukotine su jedan od najbitnijih čimbenika o kojem ovisi trajnost konstrukcije. Proračun pukotina u sklopu je proračuna uporabljivosti prema EC, a svodi se na provjeru graničnog stanja oštećenja. Kriterij proračuna je da proračunska vrijednost širine pukotine wk(mm), koja je dobivena iz proračuna konstrukcije gdje su primijenjeni parcijalni koeficijenti sigurnosti za granično stanje uporabljivosti, bude manja ili jednaka od preporučene granične vrijednosti (w_{max}(mm)) koju prikazuje *Slika 3.4.* [4]

<table>
<tr><td rowspan="2">Razred izloženosti</td><td>Armirani elementi i prednapeti elementi s neprianjajućim nategama w_{max} [mm]</td><td colspan="2">Prednapeti elementi s prianjajućim nategama w_{max} [mm]</td></tr>
<tr><td>Nazovi-stalna kombinacija opterećenja</td><td colspan="2">Česta kombinacija opterećenja</td></tr>
<tr><td>X0</td><td rowspan="2">0.4</td><td colspan="2" rowspan="2">0.2</td></tr>
<tr><td>XC1</td></tr>
<tr><td>XC2</td><td rowspan="5">0.3</td><td rowspan="3">0.2 + kontrola rastlačenja pri nazovi-stalnoj kombinaciji djelovanja</td><td rowspan="5">kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku</td></tr>
<tr><td>XC3</td></tr>
<tr><td>XC4</td></tr>
<tr><td>XD1</td><td rowspan="2">kontrola rastlačenja</td></tr>
<tr><td>XD2</td></tr>
<tr><td>XD3</td><td colspan="3">zahtijevaju se posebne mjere zaštite</td></tr>
<tr><td>XS1</td><td rowspan="3">0.3</td><td rowspan="3">kontrola rastlačenja</td><td rowspan="3">kabel minimalno 25 mm unutar betona u tlaku</td></tr>
<tr><td>XS2</td></tr>
<tr><td>XS3</td></tr>
</table>

3.4 Preporučene granične vrijednosti širine pukotina betona w_{max}(mm) prema HRN EN 1992-1-1

3.1.6. Kritična količina klorida u betonu

Kloridni ioni koji dospiju u beton mogu biti iz samih sastojaka betona (u agregatu ili u vodi) ili iz okoline, uslijed djelovanja mora ili soli za odmrzavanje. Do depasivizacije površine čelika dolazi kada se dosegne kritična koncentracija kloridnih iona. Takvo stanje približno odgovara ukupnoj količini od 0.4% kloridnih iona u odnosu na masu cementa, odnosno 0.05% na masu betona za ugljičnu čeličnu armaturu. Kritična količina klorida određena je labaratorijskim ispitivanjem, izražena u postotku klorida na masu cementa, vrijednost je koja se ne smije prijeći. Vrijednosti su prikazane su u *Tablici 3.3.* kritična količina ovisi i o zoni u kojoj se beton nalazi. U zoni zapljuskivanja kritična vrijednost ukupne količine klorida iznosi 0.03%, a za beton uronjen u more 0.1%, u odnosu na masu cementa. [4]

Tablica 3.3 Najveći dozvoljeni sadržaj klorida u betonu (TPBK)

Uporaba betona	**Razred sadržaja klorida[a]**	**Najveći sadržaj kloridnih iona 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

4. MATERIJAL ZA POBOLJŠANJE ZAŠTITE OD KOROZIJE

4.1. Dodaci betonu

Dodaci su tvari koje se betonu dodaju za vrijeme miješanja ili prije miješanja, kako bi postigli poboljšanje svojstva svježeg ili očvrsnulog betona. Poboljšanje pojedinog svojstva betona poput obradljivosti, smanjenja segregacije i izdvajanja vode, usporiti ili ubrzati vezanje, poboljšati otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, skupljanje i druga svojstva ovisi o vrsti upotrijebljenog dodatka. Dijele se na mineralne i kemijske dodatke.

4.1.1. Mineralni dodaci

Mineralni dodatci su fino usitnjeni materijal, obično u praškastom obliku i doziraju se u većim količinama na masu cementa. Dodaju se radi poboljšanja određenih svojstava i/ili za dobivanje nekih posebnih svojstava. Njihovo dodavanje smjesi betona poboljšavaju njegovu obradljivost smanjujući veličinu i količinu šupljina. Što su finije usitnjeni, to je manja potrebna količina za poboljšavanje kohezivnosti i obradljivosti svježeg betona. Prema postanku dijelimo ih na prirodne (opal, čert, vulkanski pepel) i industrijske (leteći pepel, granulirana zgura visokih peći, metakaolin, silicijska prašina). Prema TPBK dijelimo ih na tip1(punila i pigmenti) i tip2 (leteći pepeo i silicijska prašina). Mineralni dodaci mogu djelovati kao punilo, to su oni minerali koji imaju veličinu čestice manje nego čestice cementa, kao efekt nukleacije koji se očituje u djelovanju na povećanje stupnja hidratacije, te kao pucolanska reakcija koja se odlikuje povećanjem CSH gela (hidratacija portland cementa).

Silicijska prašina je proizvod koji nastaje proizvodnjom silicijskih i ferosilicijskih legura koje se proizvode u elektrolučnim pećima. Sastoji se od ne kristaliziranih sferičnih amorfnih čestica silicijevog dioksida SiO_2.Na svojstva betona utječe na dva načina, pucolanskom reakcijom i učinkom sitnih čestica. Pucolanskom reakcijom povećava količinu gela, a učinkom sitnih čestica poboljšava obradivost, povećava kohezivnost, te popunjava unutrašnje šupljine strukture betona. Takve čestice sitnije su od čestica cementa. Povećava čvrstoću i smanjuje propusnost betona, te nema sklonosti segregaciji. Zbog velike specifične ploštine utječe na povećanje potrebne vode. Maksimalna količina silicijske prašine u cementu je 15 %,a preporučljivo je doziranje od 7% do 10%.

Leteći pepeo je fini prah od ne izgorjelih staklastih dijelova ugljene prašine. Dobivaju se iz elektro-filtera termoelektrana na ugljen. Poboljšava svojstva betona na dva načina, fizičkim efektom povezanim

povišenjem udjela finih čestica pri čemu su čestice letećeg pepela manje nego čestice cementa, te pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama. Smanjuje potrebu za vodom i njenim izdvajanjem, poboljšava obradivost, smanjuje propusnost betona i usporava oslobađanje topline hidratacije, što je povoljno za korištenje kod masivnog betona. Smanjuje vodo-cementni omjer, te u kombinaciji s kemijskim dodacima smanjuje povezanost pora u strukturi betona i otpornost betona. Povećanjem udjela letećeg pepela, smanjujemo prodor klorida i smanjuje brzinu korozije.

Granulirana zgura visokih peći je otpadni proizvod koji se dobije proizvodnjom sirovog željeza. Sadrži iste okside kao i portland cementni klinker, samo u drugim omjerima. U novije vrijeme zamjenjuje se letećim pepelom velikog udjela kalcija. Time značajno doprinosi čvrstoći unutar prvih 7 dana od početka hidratacije. Čestice koje su manje od 10 μm doprinose ranoj čvrstoći betona do starosti 28 dana. Veće čestice doprinose kasnijim čvrstoćama. Čestice veće od 45 μm teško hidratiziraju, pa je to max veličina čestice. Čestice manjih dimenzija smanjuju izdvajanje vode, a veće imaju manji utjecaj na izdvajanje. Poboljšava obradivost, pumpabilnost, povećava otpornost na prodiranje klorida, djelovanje sulfata, djelovanje alkalno-agregatne reakcije te produljuje trajnost.

Metakaolin je kaolinska glina zagrijavana na 700-900°C pod uvjetima u različitim trajanjima ovisno o procesu, s ciljem da se dobije amorfni aluminijev silikat koji je reaktivan u bteonu. U betonu reagira s produktima kalcijevog hidroksida (vapno). Obično se upotrebljava 5-15% zamjene portland cementa. Sastoji se od 55% SiO_2 i 35-45% Al_2O_3. Pridonosi porastu čvrstoće, olakšava završnu obradu, smanjuje eflorescenciju, smanjuje vodoupojnost, smanjuje mogućnost pojave alkalno-silikatne reakcije, te smanjuje deformacije skupljanja.

Punilo je dio agregata koji prolazi kroz sito otvora 0,063 mm. U svrhu punila upotrebljavaju se prah vapnenac, mramor, kvarc, reciklirano staklo i slično. Dodaje se betonu radi postizanja određenih svojstava poput obradljivosti i smanjenja segregacije i izdvajanja vode. Njegova primjena povoljna je kod upotrebe betona izrađenog s agregatom manjim udjelom sitnih čestica. Često se upotrebljavaju i za proizvodnju samozbijajućih betona. Ubrzava hidrataciju cementa, povećava čvrstoću betona, poboljšava mikrostrukturu, povećava učinkovitost silicijske prašine te utječe na smanjenje količine cementa bez gubitka čvrstoće betona.

Prirodni pucolanski materijal se većinom sastoje od više reaktivnih komponenti. Dijele se na vulkanska stakla, vulkanske tufove, kalciniranu glinu ili škriljevce i dijatomejsku zemlju. Sve se dobivaju iz vulkanskih stijena i minerala osim dijatomejske zemlje. Dijatomejska zemlja je prirodna sedimentna stijena nastala taloženjem skeletnih ostataka dijatomeja, mikroskopskih jednostaničnih biljaka (alge, kremenjašice).

Bitno svojstvo ovih materijala je da imaju pucolansku aktivnost s vapnom ili portland cementom u vodenoj otopini. [8]

4.1.2. Kemijski dodaci betonu

Aditivi ili kemijski dodaci su tvari koje dodajemo betonu da poboljšamo njegova svojstva ili mijenjamo jedno ili više njegovih svojstava, kako bismo postigli željeni efekt. Obično su u tekućem stanju i doziraju se u manjim količinama za razliku od mineralnih dodataka. Vrste kemijskih dodataka su aeranti, plastifikatori, super-plastifikatori, ubrzivači vezanja, usporivači vezanja, dodaci za zadržavanje vode, ubrzivači očvršćivanja, dodaci za vodo-nepropusnost i ostali.

Aeranti – kod svježeg betona uvlačenjem stabilnih mjehurića zraka povećava se količina paste u betonu pa je time poboljšana konzistencija i smanjena segregacija. Povećavaju vodo-nepropusnost betona jer mjehurići u očvrsnulom betonu prekidanjem kapilara smanjuju visinu kapilarnog dizanja, poboljšavaju otpornost betona na smrzavanje i odmrzavanje sa solima, poboljšavaju sulfatnu otpornost.

Plastifikatori – omogućuju stvaranje adsorpcijskog sloja oko čestica veziva zbog čega one pri miješanju nisu u kontaktu. Zbog toga su smanjeni otpori međusobnom gibanju čestica, što daje bolju obradivost betona, jer ostaje više raspoložive vode za smanjenje viskoznosti paste i samog betona. Povećavanjem obradivosti ne povećava se i stabilnost betona, stoga je uz dodavanje plastifikatora potrebno dodati i sadržaj cementa ali je to povećanje manje nego kod betona bez aditiva. Dakle, beton s plastifikatorom je iste konzistencije kao i beton bez aditiva ali s manjom potrebnom količinom cementa zbog smanjenog vodo-cementnog faktora.

Super-plastifikatori – načelo njihovog djelovanja isto je kao i kod plastifikatora samo što su efekti postignuti s njima izraženiji. Njihove molekule su izrađene u obliku molekulskog lanca, stoga u adsorbiranom sloju bolje pokrivaju površinu sitnih čestica. Omogućavaju veće smanjenje vode(12-30%) uz postizanje veće konzistencije. Postižu dobru dispreziju cementnih čestica u vodi što povećava brzinu hidratacije, a time i ubrzano vezanje. Granična vrijednost cementa pri upotrebi super-plastifikatora je 350 kg/m3, jer dovode do jače izraženosti nestabilnosti paste s nedovoljnim sadržajem cementa. Stoga je pogodan za izradu betona koji mora imati visok sadržaj veziva. Ubrzavaju razvoj čvrstoće,, tj. skraćuju vrijeme vezanja brže nego plastifikatori.

Inhibitori korozije – smanjuju nastanak korozije čelika armature, te smanjuju stupanj korozije ali ne i u potpunosti njen nastanak. Dijelimo ih na:

a) Anodni inhibitori **–** Potiču formiranje zaštitnog pasivnog filma, to su uglavnom kalcijev nitrat, natrijev kromat, natrijev benzoat, kositrov klorid. Na anodnim mjestima stvaraju filmove oksida ili slabo topljivih soli i time čime barijeru kao zaštitu metala.
b) Katodni inhibitori – smanjuju brzinu korozije tako što usporavaju katodne reakcije korozijskog procesa ili smanjuju površinu katodnih dijelova.
c) Miješani ili migracijski inhibitori – imaju i anodno i katodno djelovanje. Djelovanje se zasniva na adsorpbciji na metalnu površinu, tvoreći barijeru molekularnih dimenzija, smanjuju brzinu elektrodnih reakcija

Biocidni dodaci – baktericidni i fungicidni dodaci za sprječavanje djelovanja mikroorganizama, školjki, algi i slično. Provedena su istraživanja njihovog djelovanja na sprječavanje rasta algi u labaratorijskim uvjetima na konstrukcijama kao dodatak mortu i kao dodatak premazima za beton. Biocidni dodaci i njihove karakteristike prikazani su na sljedećoj slici: [8]

Dodatak	***Primjena***
Cinkov oksid	U drugim područjima poznat kao biocidni materijal, no ne i u betonu. Pogodan za konstrukcije s vodom jer je teško topljiv u vodi
Leteći pepeo	Primjenjuje se kao mineralni dodatka, poboljšava svojstva sučeljka, smanjuju kapilarnu poroznost
Bakrena zgura	Poznat kao biocidni materijal, no ne i u betonu, kao dodatak u betonu povoljno djeluje na razvoj čvrstoće
Amonijev klorid	Općenito upotrebljavan u morskom okolišu
Natrijev bromid	Općenito upotrebljavan u premazima za brodove i marine
Cetil-trimetil amonijev bromid	Novi materijal na tržištu s obećavajućim antibiocidnim učincima

Slika 4.1 Biocidni dodaci i njihove karakteristike

4.2. Materijali i tehnologije za zaštitu armature

Molekule kisika i vode prodiru kroz beton kroz kapilarne pore i šupljine, jer ne mogu slobodno difundirati kroz gel pore koje su zasićene apsorbiranom vodom. Što je veća volumna koncentracija kapilarnih pora i šupljina, time je veća brzina korozije armature. U početnoj fazi procesa korozije hrđa popunjava kapilarne pore i vrši kristalizacijski pritisak na stijenke. Ako beton može izdržat takav pritisak, hrđa će se širit uzduž kapilara u blizini šipke armature. Kapilare se popunjavaju te se proces korozije smanjuje, u konačnici i zaustavlja. Tamo gdje je uže područje tj. gdje beton ima veću poroznost, šipke armature ipak će

korodirati. Iz navedenih činjenica proizlazi da se armatura može zaštiti zaštitnim slojem maksimalne debljine 5 cm. Kvalitetu zaštitnog sloja određuju čvrstoća i vodo-nepropusnost betona. Čvrstoća betona je njegova sposobnost da se odupre kristalizacijskom pritisku, a vodo-nepropusnost je mjera brzine difuzije.

Prema PBAP određeno je da se za armirani beton ne smije upotrebljavati beton marke niže od MB-15 jer ne pruža dovoljnu zaštitu armature. Najniža čvrstoća betona potrebna za zaštitu armature nije utvrđena. Najniža vrijednost vodo-propusnosti betona je V-4, odnosno dubina prodiranja vode od najviše 5 cm *(Pogledati Tablicu 5.1)*. Za poboljšanje zaštite armature u nepovoljnim uvjetima primjenjuju se sljedeća tehnička rješenja koja ujedno ne predstavljaju trajnu zaštitu armature:

1. Zaštita armature pocinčavanjem ili premazom epoxy smolom prije ugradnje u beton
2. Katona zaštita
3. Premaz površine betona radi sprječavanja ulaska vlage, kisika i drugih agresivnih tvari u beton
4. Upotreba inhibitora korozije armature.

Unatoč navedenim tehničkim rješenjima, najpouzdaniju zaštitu armature daje kvalitetan zaštitni sloj betona. Takav sloj trebao bi biti izveden u projektnoj debljini ali mjerenja su pokazala da njegova debljina ipak varira preko granične projektne debljine. Time se vijek trajanja konstrukcije smanjuje. Stoga je pored takvih činjenica važno da projektant propiše vrstu i raspored podmetača za održavanje debljine zaštitnog sloja. Osnovno pravilo je da razmak podmetača kod šipki do Ø14 mm mora biti 50 cm, a razmak kod podmetača šipki iznad Ø14 mm treba biti 100 cm. Metalni podmetači se ne dozvoljavaju. [7]

5. METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA KLORIDE IZ MORA

5.1. Vodo-propusnost betona

Vodo-propusnost betona predstavlja ispunjavanje pora slobodnom vodom i njeno tečenje kroz betonsku prepreku. Standardne metode mjerenja vodo-propusnosti su pojednostavljene i prikazuju samo tečenje slobodne vode kroz pore betona. Razlog toga je što dio slobodne vode koja teče kroz pore betona se veže u adsorpcijski sloj ispred fronte zasićenja pora vodom i na isparavanje, ali taj gubitak nije značajan. Vodo-propusnost ovisi o nekoliko faktora:

1. Volumnoj koncentraciji kapilarnih pora i šupljina – što je veća volumna koncentracija kapilarnih pora i šupljina, veća je vodo-propusnost betona, a ona je veća što je veći vodo-cementni faktor i stupanj hidratacije cementne paste. Beton sa manjim sadržajem cementa, većim sadržajem vode i većim sadržajem uvučenog zraka, ima veću koncentraciju kapilarnih pora i šupljina, a time i veću vodo-propusnost.

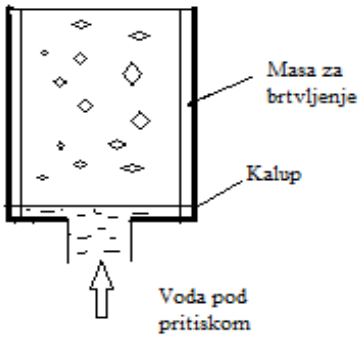
2. Količini i vrsti cementa – beton sa vodo-propusnošću na donjoj granici treba imati najmanje 250 kg/m^3 količine cementa ako mu je specifična površina po Blaineu oko 3200 cm^2/g. Što je cement finijeg mliva, veći je stupanj hidratacije, a se time smanjuje volumna koncentracija kapilarnih pora a povećava volumna koncentracija gel pora koje su nepropusne za slobodnu vodu.

3. Kvaliteti kontaktne zone – koncentracija kapilarnih pora u kontaktnoj zoni veća je nego u ostatku cementnog kamena. Propusnost kontaktne zone ovisi najviše o površini zrna agregata. Što im je površina glađa, manji broj kristala cementa sraste s površinom zrna agregata pa je zona propusnija. Propusnost kontaktne zone ovisi i o mineraloškom sastavu betona, pa je tako zrno kvarca nepovoljno zbog svoje staklaste površine na koju se teško vežu kristali cementa. Kontaktna zona može se poboljšati energičnijim miješanjem smjese betona.

Marka vodo-nepropusnosti betona određena je **metodom sa spriječenim izlazom vode na bočnim stranama**, te je princip ispitivanja prikazan je na *Slici 5.1.* Ispitivanje se provodi na betonskom uzorku oblika valjka promjera i visine 15 cm, s tim da baza može biti ili krug ili kvadrat dimenzija 20 cm. U naznačeni prostor ulije se masa za brtvljenje(parafin koji se prethodno rastali). Beton treba biti suh, a kalup ugrijan na 60°C. Nakon otvrdnjavanja mase za brtvljenje, ispitano tijelo stavlja se pod pritisak vode od 1 bar, koji se svakih 8 sati poveća za 1 bar. Ispitivanje se završava kada se na gornjoj površini betona pojavi prva kap vode. Relativna vlažnost zraka pri ispitivanju je oko 65%, a temperatura oko 20°C. Pritisak vode pri kojem se još nije javila prva kap vode na površini betona naziva se marka vodo-nepropusnosti betona. HRN U.M1.015 predviđa marke vodo-nepropusnosti i njihove sljedeće kriterije koji su prikazani u sljedećoj tablici:

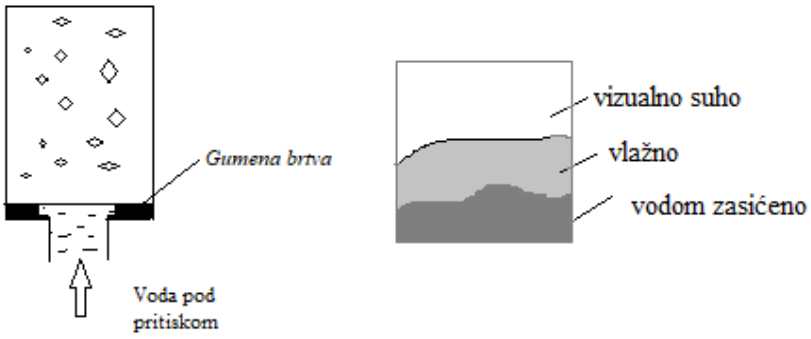
Tablica 5.1 Marka vodo-nepropusnosti betona

Marka	Pritisak (bar)	Dubina prodora vode (mm)
V-2	1	150
V-4	3	150
V-6	7	150
V-8	7	100
V-10	7	50
V-12	7	30
V-14	7	15



Slika 5.1 Shematski prikaz ispitivanja vodo-nepropusnosti betona sa spriječenim izlazom vode na bočnim stranama ispitnog tijela

Druga metoda ispitivanja vodo-propusnosti betona je **metoda s nespriječenim izlazom vode na bočnim stranama** ispitnog tijela. Princip ispitivanja prikazan je na *Slici 5.2.* Standardno ispitano tijelo oblika je kocke s bridovima od 20 cm. Pritisak vode unaprijed je određen, te se mjeri dubina prodiranja u određenom vremenu. Prvih 48 sati pritisak je 1 bar, u sljedećih 24 sata 3 bara i u zadnjih 24 sata 7 bara. Nakon proteklih 96 sati, ispitano tijelo se prelomi po sredini i mjeri se najveća dubina prodora vode *(Slika 5.2).* [7]



Slika 5.2 Shematski prikaz ispitivanja vodo-nepropusnosti betona i izgled prelomljenog tijela 20x20 cm

5.2. Plino-propusnost betona

Plinovi i vlaga kroz sustav pora prodiru difuzijski. Na prelomljenom betonskom tijelu *(Slika 5.2)* u tamnoj zoni kapilarne pore i šupljine su zasićene vodom. U zoni poviše tamne je zona higroskopskog zasićenja pora, u kojoj se smatra da postoji adsorpcijski sloj vode na stijenkama pora u punoj debljini, ali nema slobodne vode. Kroz tu zonu i zadnju zonu, zonu koja je suha, difundira vodena para, pri čemu dio vode izlazi u zrak. Vlaga difundira kroz sve vrste pora u betonu. Razlika je u tome što se taj proces kroz gel pore vrši sporije, jer su one ispunjene adsorbiranom vodom. Zaključuje se da propusnost betona na vlagu ovisi o istim faktorima kao i propusnost za slobodnu vodu. Ali kako se vlaga kreće i kroz gel pore a slobodna voda ne, propusnost vlage ne može se ocijeniti na temelju izmjerene vodo-nepropusnosti. Pokazatelj propusnosti betona na vlagu je njegova plino-propusnost, jer se difizujom plinovi kreću kroz pore betona, na isti način kao i vodena para. Prodor vlage u beton može se spriječiti izradom hidroizolacije od nepropusnog materijala na površinama betona. Na sljedećoj slici je prikazan uređaj za ispitivanje plino-propusnosti betona:[7]



Slika 5.3 Uređaj za ispitivanje plino-propusnosti betona

5.3. Difuzija klorida

Prodiranje klorida događa se zbog procesa difuzije i kapilarnog upijanja slane vode. Pored toga, vanjska koncentracija klorida je promjenjiva, a količina klorida koja uđe se ne kreće zbog kemijske reakcije ili vremenski ovisne fizičke adsorpcije. Količina vezanih klorida mora biti u ravnoteži s koncentracijom otopljenih klorida u pornoj vodi. Ulogu u procesu difuzije imaju samo otopljeni kloridi. Kada je beton pod karbonizacijom, svi kloridi su otopljeni u pornoj vodi. Koeficijent difuzije klorida nije konstanta, promjenjiv je upravo zbog tog jer se ioni u nekim slučajevima više ne kreću. Koeficijent difuzije klorida određen je izrazom (5.1), gdje je definiran pomoću srednje tlačne čvrstoće betona (f_{cm}). Izraz vrijedi za betone velikih i običnih čvrstoća, izrađenih portland cementom, bez dodatak i srednje tlačne čvrstoće manje od 95 MPa.

$$D_{Cl} = D_{ClO} * 1/f_{cm}^{1.5} \quad (5.1)$$

D_{Cl} – efektivni koeficijent difuzije (m^2/s)

$D_{ClO} = 5*10^{-9}$ (m^2/s)

f_{cm} – srednja tlačna čvrstoća

Upotreba dodataka može smanjiti koeficijent difuzije, pa se za beton običnih i velikih čvrstoća do 130 MPa, izrađenih sa silicijskom prašinom, letećim pepelom ili zgurom, upotrebljava se izraz (5.2). Utjecaj letećeg pepela i silicijske prašine na koeficijent difuzije prikazan je na *Tablica 5.1.*

$$D_{Cl,add} = D_{Cl0,add} * 1/f_{cm}^{2.5} \quad (5.2)$$

$D_{Cl0,add} = 5*10^{-8}$ (m^2/s)

Na difuziju klorida utječu sljedeći parametri: vrsta cementa, sastav betona, ugradnja, njega betona, stanje vlažnosti agregata, pukotinsko stanje, itd. [8]

Tablica 5.2 Utjecaj letećeg pepela i silicijske prašine na koeficijent difuzije klorida

Vrsta cementa	**D_{28} (m^2/s)**
Kontrolni cement	$4,3 \times 10^{-12}$
25% letećeg pepela	$4,4 \times 10^{-12}$
Portlandski cement s 8% silicijske prašine	$6,6 \times 10^{-13}$
Portlandski cement s 8% silicijske prašine + 25% letećeg pepela	$3,7 \times 10^{-13}$

5.4. Metode ispitivanja difuzije klorida

Moguće su tri metode ispitivanja:

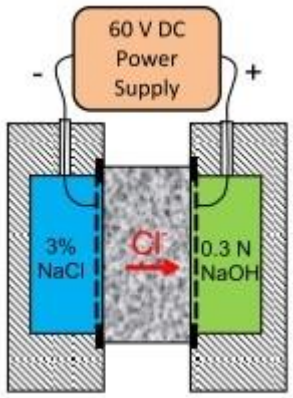
1. Coulomb test ili Test brze propusnosti klorida (RCPT) – ispitivanje kojim određujemo prolaz ukupnog električnog naboja kroz zasićeni beton. Ispitivanje se vrši primjenom električnog potencijala na uzorku, te se vrši u skladu s normama AASHTO T 277 ili ASTM C1202.

2. Ispitivanje dubine prodiranja klorida – dubina prodiranja klorida mjeri se nakon što je na uzorak primijenjen električni potencijal. Pri ispitivanju određuje se koeficijent migracije klorida, koji se može koristiti za procjenu koeficijenta difuzije klorida koji je potreban za izračun vijeka trajanja. Mjerenje se vrši u skladu s normom NORDTEST BUILD 492.

3. Ispitivanje zapreminske vodljivosti – određivanje zapreminska vodljivost mjerenjem struje koja prolazi kroz uzorak zasićenog betona. Mjerenje se vrši u skladu s ASTM C1760. [9]

5.4.1. ASTM C1202 metoda ispitivanja

Ispitivanje se vrši na uzorku betona promjera 100 mm, debljine 50 mm i zasićenog vodom. Uzorak se stavlja u ispitnu ćeliju koja sadržava spremnike tekućine na oba kraja uzorka *(Slika 5.4)*. Jedan spremnik sadrži 3% otopine NaCl, a drugi 0,3 N otopine NaOH.



Slika 5.4 Shematski prikaz ispitivanja uzorka (ASTM C1202)

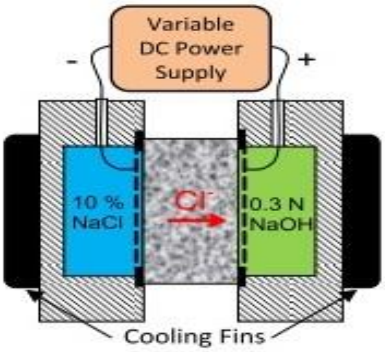
Preko ćelije provodi se električni potencijal od 60 VDC. Elektroda u otopini NaCl priključena s negativnim priključkom potencijalnog izvora, a elektroda u otopini NaOH priključena je s pozitivnim priključkom. Negativno nabijeni ioni gibaju se prema pozitivnim priključku, što rezultira pojavu struje kroz uzorak koja se mjeri. Što je beton propusniji, time će više negativnih iona proći kroz uzorak, što rezultira većom strujom. Mjerenje se provodi 6 sati. Određuje se područje ispod krivulje struje i vremena koje predstavlja ukupan naboj ili Coulombs koji su prošli kroz uzorak. Coulomove vrijednosti za razvrstavanje betona prikazane su u *Tablici 5.3*. [9]

Tablica 5.3 Coulomove vrijednosti za razvrstavanje betona (ASTM C1202)

Couloma	Klasa propusnosti	Tipično za
>4000	Visoka	*w/c** > 0.5
4000-2000	Umjerena	*w/c* = 0.4 do 0.5
2000-1000	Niska	*w/c* < 0.4
1000-100	Vrlo niska	Beton modificiran lateksom
<100	Zanemariva	Polimerni beton

5.4.2. NORDTEST BUILD 492 metoda ispitivanja

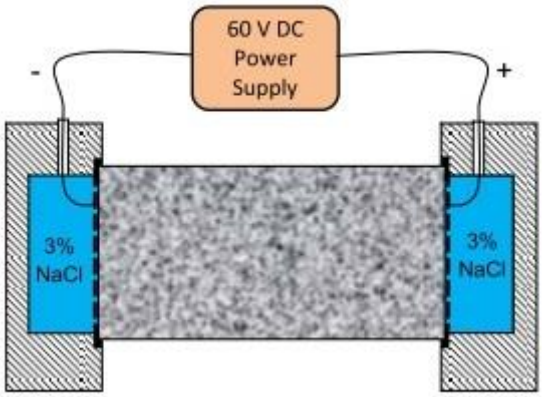
Spremnik koji okružuje negativni terminal napuni se sa 10% otopinom NaCl, a spremnik koji okružuje pozitivni terminal napuni se sa 0,3 N otopinom NaOH *(Slika 5.5)*. Preko ćelije provodi se električni potencijal od 30 VDC i mjeri se početna struja. Ispitani napon i trajanje određuju se na temelju izmjerene početne struje. Naprimjer, ako je početna struja između 120 i 180 mA, tada je ispitni napon 15 VDC a trajanje 24 sata. Ako je početna struja manja od 5 mA, ispitni napon je 60 VDC, a trajanje 96 sati. Nakon završetka ispitivanja, uzorak se cijepa te se mjeri penetracija kloridnih iona raspršivanjem podijeljene površine s 0,1 M otopinom srebrovog nitrata koja je taložena u obliku bijelog AgCl. Iz uvjet ispitivanja i izmjerene dubine prodiranja, određuje se koeficijent prodiranja kloridnih iona. [9]



Slika 5.5 Shematski prikaz ispitivanja uzorka (NT BUILD 492)

5.4.3. ASTM C1760 metoda ispitivanja

ASTM C1760 je metoda ispitivanja koja uključuje isti osnovni postupak ispitivanja kao i ASTM C1202 uz određene iznimke, a to su da oba spremnika sadrže 3% otopine NaCl, duljina uzorka može biti 200 mm i struja se mjeri 1 minutu nakon isključenja napajanja *(Slika 5.6)*. Skupna električna vodljivost računa se pomoću određene jednadžbe. Različite skupne električne vodljivosti odgovaraju različitim opsezima napunjenosti koji su prošli u skladu s ASTM C1202. [9]

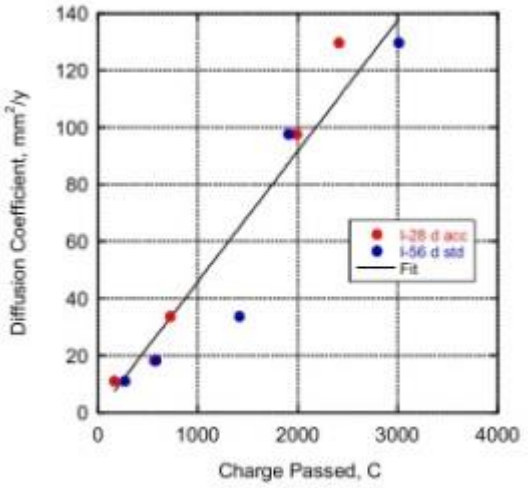


Slika 5.6 Shematski prikaz ispitivanja uzorka (ASTM C1760)

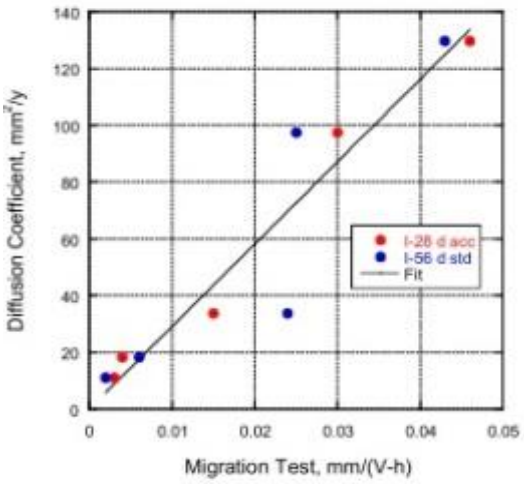
5.4.4. Odnos koeficijenta difuzije i električne vodljivosti

Kao što je već spomenuto, postoji odnos između koeficijenta difuzije klorida i električne vodljivosti. Koeficijent difuzije klorida određuje se izravnim bušenjem profila uzorka nakon poniranja s otopinom NaCl u skladu s NT BUILD 443 (stvrdnuti beton-ubrzana penetracija klorida) ili ASTM C1556 (određivanje prividnog koeficijenta difuzije klorida cementnih smjesa skupnom difuzijom). Potrebno razmatranje je najmanje od 35 dana. Osim električne vodljivosti, može se stvoriti korelacija koeficijenta difuzije i bilo kojeg drugog određenog svojstva.

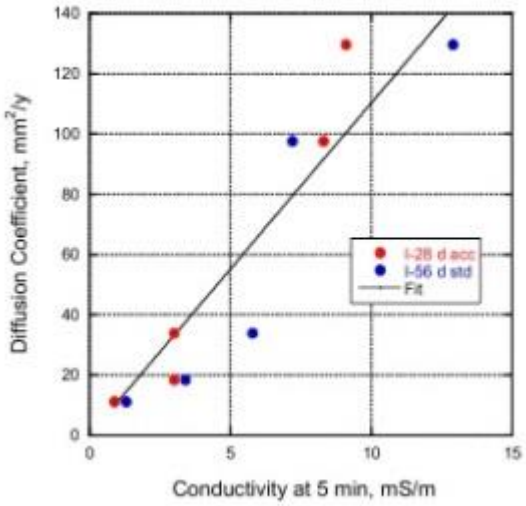
Tako je studija Obla, Kim i Lobo (2014) odredila prividni koeficijent difuzije klorida u skladu s ASTM C1556. 5 uzoraka betonske smjese podvrgnuli su 59-dnevnom standardnom stvrdnjavanju, a zatim su ih podvrgnuli 16-mjesečnom potapanju u otopini NaCl. Očvršćivanje tijekom 56 dana provodilo se na 23°C, nakon čega je slijedilo sušenje tijekom 21 dana na 38°C. Uzorci su ispitivani u skladu s ASTM C1202 i AASHTO TP 64. Za testove u skladu ASTM C1202 izmjerena je struja od 5 min i korištena za izračun električne vodljivosti. Korelacija različitih rezultata ispitivanja prikazani su na sljedećim slikama, koje prikazuju da postoji snažna veza između različitih metoda ispitivanja na osnovi električne vodljivosti i difuzije klorida *(Slika 5.7, Slika 5.8, Slika 5.9, Slika 5.10).* Također je prikazan odnos između popunjenog naboja i 5-minutne električne vodljivosti izmjerene testom ASTM C1202. [9]



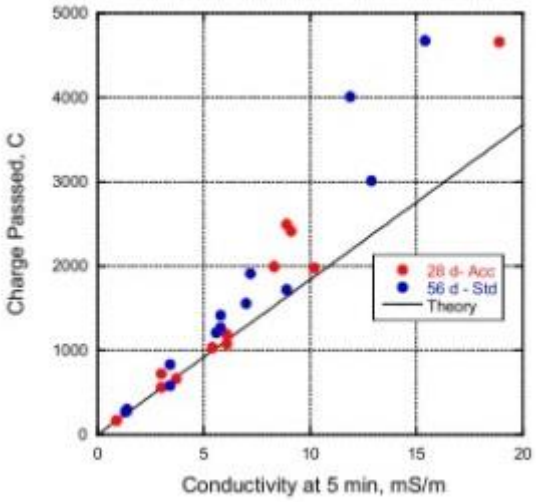
Slika 5.7 Koeficijent difuzije prema prolasku naboja



Slika 5.8 Koeficijent difuzije testa migracije



Slika 5.9 Koeficijent difuzije (vodljivost od 5 min)

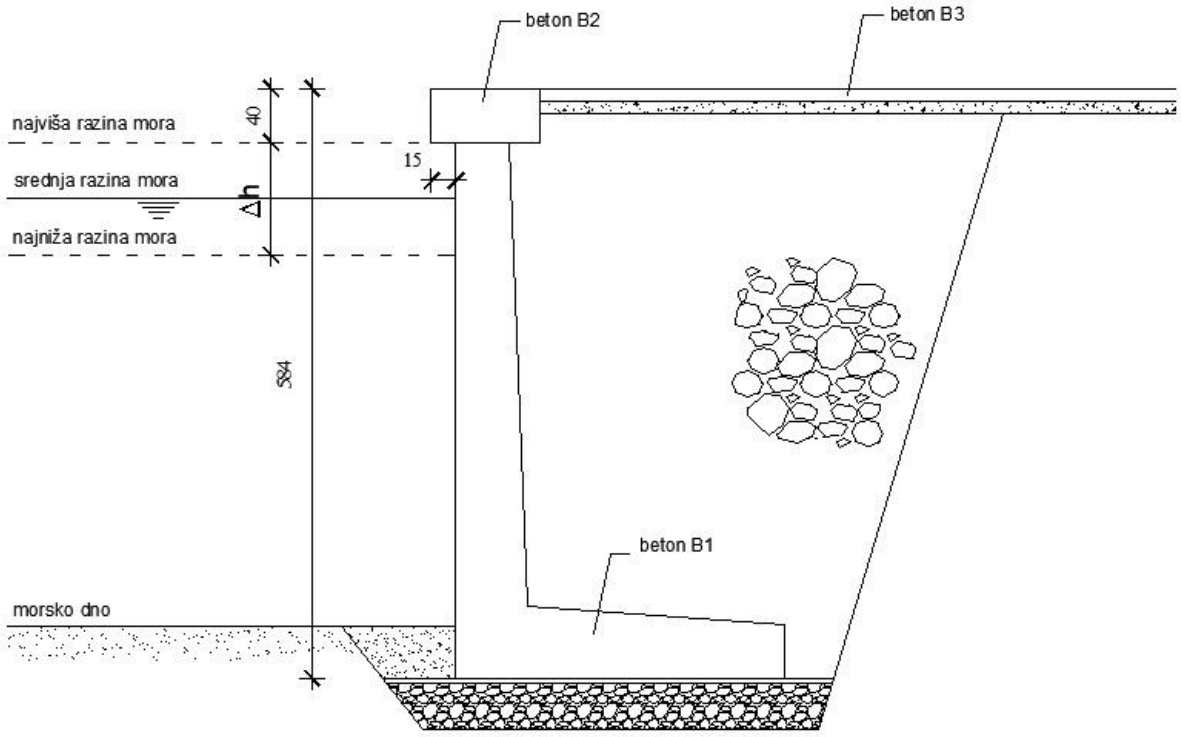


Slika 5.10 Prolaz naboja (vodljivost od 5 min)

6. PRORAČUN SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE

Projektiranje sastava ključna je faza u proizvodnji kvalitetnog betona. u nastavku se vrši proračun sastava betona za tri armiranobetonska elementa obale. Proračun pojedinog sastava betona vrši se u skladu s tehničkim propisom za betonske konstrukcije, koji propisuje tehnička svojstva i druge zahtjeve bitne za beton koji se ugrađuje u betonsku konstrukciju opisana u poglavlju 4. Tri betonska elementa za koja vršimo proračun su *(Slika 6.1):*

1. Potporni obalni zid – beton B1
2. Naglavna greda – beton B2
3. Podna betonska ploča – beton B3



Slika 6.1 Prikaz armiranobetonskih elemenata

Za proračun sastava pojedinog betona, projektom su zahtijevani sljedeći podaci:

Klasa betona 25/30

Cement CEM I 42.5, ρc=3.10 g/cm^3

Agregat: riječni, ρa= 2.70 g/cm^3

Granulometrijska krivulja: Fuller (B)

Granulometrija riječnog agregat prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.1 Granulometrija agregata

Frak. br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0,125	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**16**	**31,5**	**63**
1	***0 - 4***	6	20	35	49	66	80	100	100	100	100
2	***4 - 8***	0,8	1,5	2,5	3,8	4,5	5,4	100	100	100	100
3	***8 - 16***	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	2,5	99	100	100
4	***16 - 31.5***	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	1,5	1,7	100	100

Apsorpcija i vlažnost agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.2 Apsorpcija i vlažnost agregata

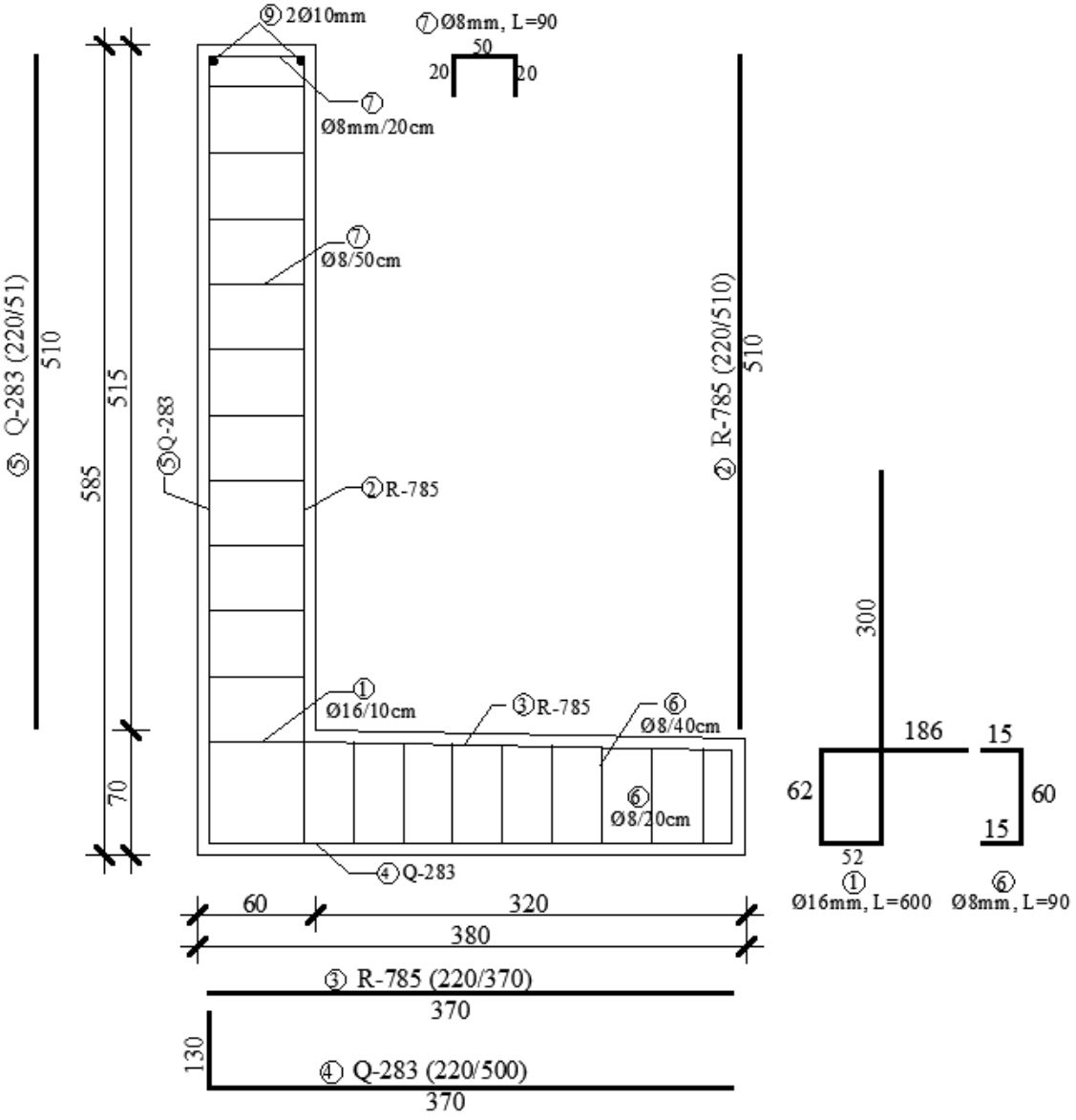
	0 - 4	**4 - 8**	**8 - 16**	**16 - 31.5**
Absorpcija	1,34%	1,03%	0,48%	0,36%
Vlažnost	0,70%	0,40%	0,20%	0,15%

Preporučena je upotreba Superplastifikatora: Glenium 628 u dozi 0,9% mase cementa i gustoće pad= 1.15%, kako bi se smanjila potrebna količina vode sastava.

Napomena: Cijeli postupak proračuna sastava betona detaljno je opisan kod proračuna sastava betona za armiranobetonski potporni zid – beton B1.

6.1. Potporni zid - beton B1

Poprečni presjek armiranobetonskog potpornog zida prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 6.2 Poprečni presjek armiranobetonskog potpornog zida

1. Određivanje maksimalnog zrna agregata D_{max}

Maksimalno zrno agregata ne smije biti veće od:

-Radijusa kalupa betonskog elementa R=V/A (cm)

-1/4 najmanje dimenzije elementa h

-0,8 horizontalnog razmaka armature a_{min}

-Debljine zaštitnog sloja betona c

$V=\{(30900+26600)*100\} - \{(0,6^2*\pi)/4*510*10+(0,6^2*\pi)/4*100*51\} - \{(0,6^2*\pi)/4*100*20+(1^2*\pi)/4*510*10)\} - \{(1^2*\pi)/4*100*37+(1^2*\pi)/4*370*10\} - \{(1^2*\pi)/4*370*10+(0,6^2*\pi)/4*100*15\} - \{(1^2*\pi)/4*100*2\} - \{(0,8^2*\pi)/4*90*5\} - \{(0,8^2*\pi)/4*90*10\} - \{(0,8^2*\pi)/4*90*5\} - \{(0,8^2*\pi)/4*90*8\} - \{(1,6^2*\pi)/4*600*10\} = 5719811,89\ cm^3$

$A=\{320*100+515*100*2+100*60+100*70*2+380*100\} + \{0,6^*\pi*510*10+0,6^*\pi*100*51\} + \{ 0,6^*\pi*100*20+1^*\pi*510*10\} + \{1^*\pi*100*37+1^*\pi*370*10\} + \{1^*\pi*370*10+0,6^*\pi*100*15\} + \{1^*\pi*100*2\} + \{0,8^*\pi*90*5\} + \{0,8^*\pi*90*10\} + \{0,8^*\pi*90*5\} + \{0,8^*\pi*90*8\} + \{1,6^*\pi*600*10\} = 306782,36\ cm^2$

Uvjeti:

$R=V/A = 5719811,89/306782,36= 18,64$ cm

$D_{max} < R= 186,4$ mm

$D_{max}< h/4= 600/4= 125$ mm

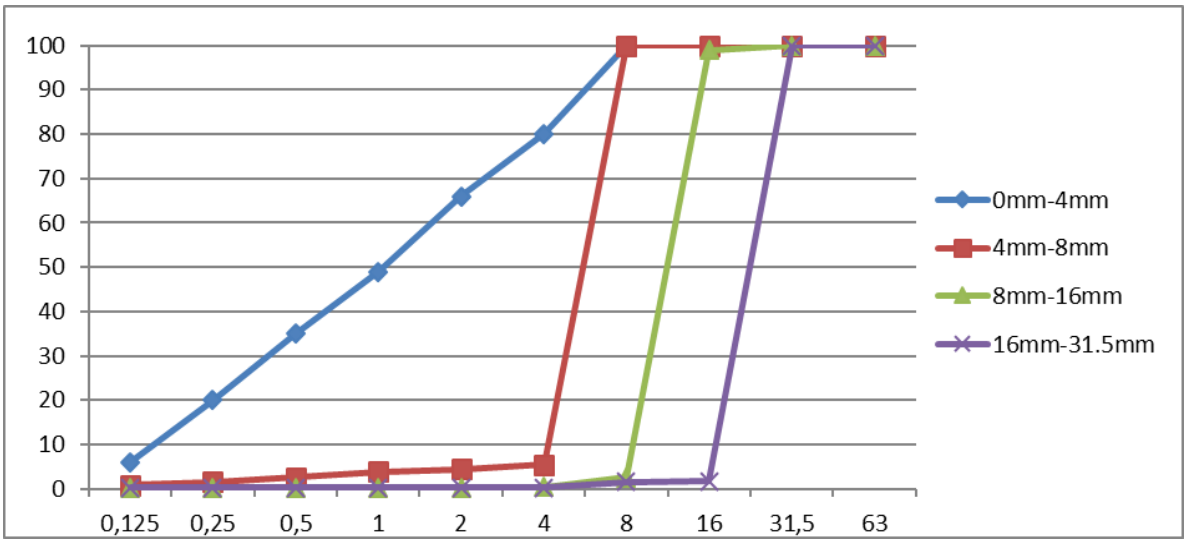
$D_{max}< c= 50$ mm

$D_{max}<0,8*a_{min}= 80$ mm

$a_{min}= 100$ mm

ODABRANO: $D_{max}= 31,5$ mm

2. Numerički granulometrijski sastav agregata



Slika 6.3 Granulometrijske krivulje pojedinih frakcija (Tablica 6.1)

Zadani sastav agregata određen je prema granulometrijskoj krivulji Fuller ($B=100*\sqrt{\frac{d}{D}}$) i prikazan je u sljedećoj tablici:

	ZADANI SASTAV AGREGATA (%)								
Sito (d)	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
Zadano	6,3	8,9	12,6	17,8	25,2	35,6	50,4	71,3	100

Proračun udjela frakcija vrši se egzaktnim postupkom:

EGZAKTNI PRORAČUN:

Gornja nazivna veličina najsitnije frakcije: D1= 4 mm

- Koeficijenti zrnatosti stvarnog sastava mješavine frakcija

K1=$\frac{1}{100}$(6+20+35+49+66+80)= 2.56

K2=$\frac{1}{100}$(0.8+1.5+2.5+3.8+4.5+5.4)= 0.185

K3=$\frac{1}{100}$(0.2+0.2+0.2+0.2+0.3+0.4)= 0.015

K4=$\frac{1}{100}$(0.2+0.2+0.2+0.2+0.2+0.3)= 0.013

- Koeficijent zrnatosti idealnog sastava do granice D1

Ko=$\frac{1}{100}$(6,3+8,9+12,6+17,8+25,2+35,6)= 1,10

Sustav jednadžbi:

2,56 X_1 + 0,185 X_2 + 0,015 X_3 + 0,013 X_4= 1,10

100 X_1 + 100 X_2 + 2,5 X_3 + 1,5 X_4= 50,4

100 X_1 + 100 X_2 + 99 X_3 + 1,7 X_4= 71,3

100 X_1 + 100 X_2 + 100 X_3 + 100 X_4= 100

Rješenja:

X_1 = 42%

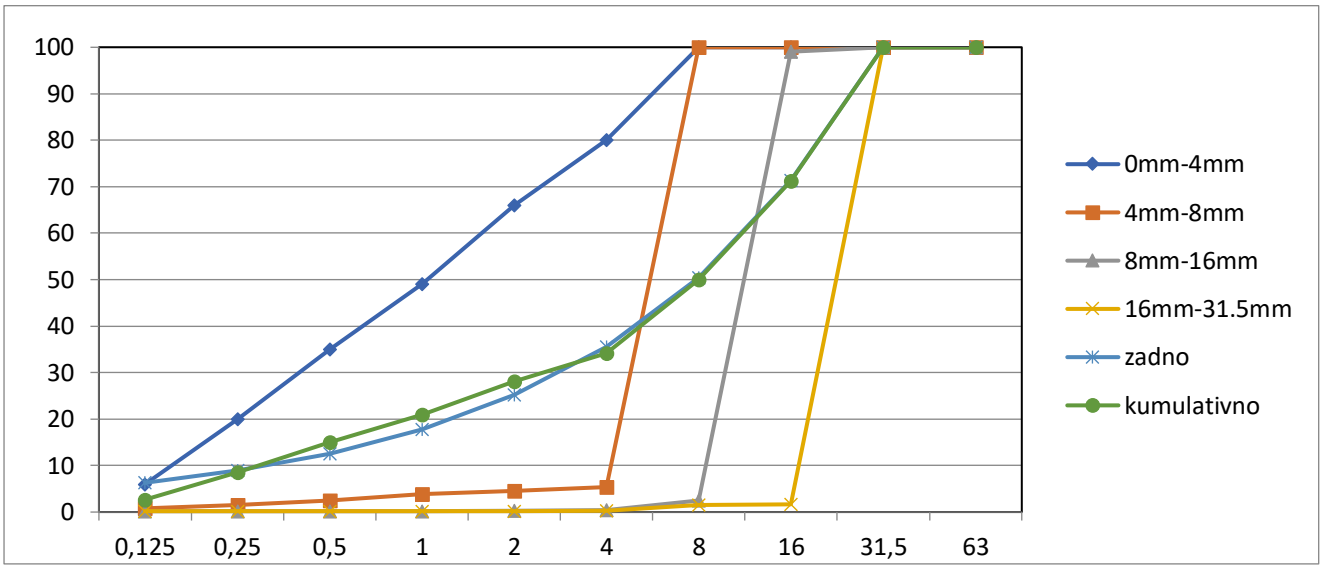
X_2 =7%

X_3 = 22%

X_4= 29%

Na temelju dobivenih udjela pojedine frakcije i granulometrijskog sastava *(Tablica 6.1), određen je* kumulativni sastav agregata prikazan u sljedećoj tablici:

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0,125	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**16**	**31,5**	**63**
0-4	***0,42***	2,52	8,4	14,7	20,58	27,72	33,6	42	42	42	42
4-8	***0,07***	0,056	0,105	0,175	0,266	0,315	0,378	7	7	7	7
8-16	***0,22***	0,044	0,044	0,044	0,044	0,066	0,088	0,55	21,78	22	22
16-31,5	***0,29***	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,087	0,435	0,493	29	29
ukupno	100	2,7	8,6	15,0	20,9	28,2	34,2	50,0	71,3	100,0	100,0



Slika 6.4 Granulometrijska krivulja agregata

3. Odabir komponenti betona

3.1 Uvjet trajnosti

Razred izloženosti određen je prema okolišu unutar kojeg se beton nalazi: XS3 *(Pogledati Slika 3.1)*
Opis okoliša: u zonama plime, oseke i prskanja morske vode

Prema razredu izloženosti XS3 dani su minimalni tehnološki zahtjevi prema kojima se treba projektirati odgovarajući sastav betona *(Pogledati Sliku 3.2):*

Razred izloženosti	Max. w/c omjer	Min. razred čvrstoće	Min. količina cementa (kg/m^3)	Min. količina zraka	Drugi zahtjevi
XS3	0,45	C35/45	340	-	-

Kako područje razreda izloženosti XS3 nema rizika od smrzavanja, stoga nije potrebno dodavati aerant. Prema tome, za nearirani beton i maksimalno zrno agregata D_{max}=31,5 mm, odabran je sadržaj zahvaćenog zraka 1,5%. Količinu mikropora zahvaćenog ili uvučenog zraka u odnosu na najveću frakciju prikazuje sljedeća tablica:

Tablica 6.3 Količina mikropora uvučenog zraka u odnosu na najveću frakciju agregata

Najveća frakcija agregata (mm)	**Količina pora (%)**	
	Uvučeni zrak (aerirani beton)	**Zahvaćeni zrak (neaerirani zrak)**
32-63	2-3	0,4
16-32	3-5	1,5
8-16	5-7	2,5
4-8	7-10	2-3

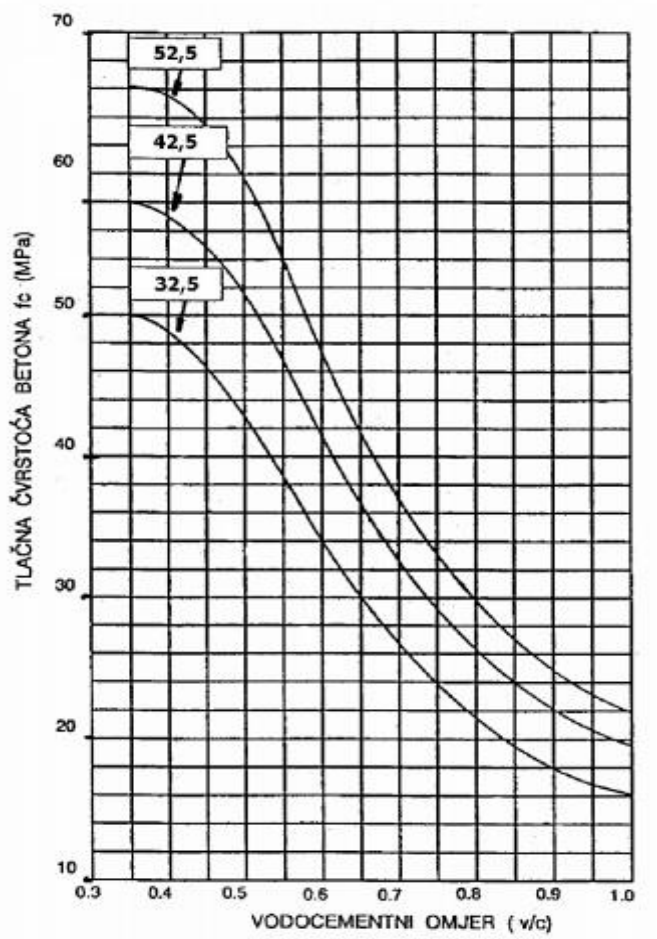
3.2 Uvjet čvrstoće

Tlačna čvrstoća betona određena je projektom zahtjevnom klasom betona C 25/30 :

$f_{cm} > f_{ck}$ + (6 do 12)

f_{cm} = 30+8= 38 N/mm^2

Ovisnost tlačne čvrstoće betona i vodo-cementnog omjera za različite razrede cementa iskazana je Waltz-ovim dijagramom *(Slika 6.5)*. Prema dobivenoj tlačnoj čvrstoći 38 N/mm^2 i razredu čvrstoće cementa CEM I 42,5 očitan je w/c sa dijagrama: w/c = 0,63



Slika 6.5 Waltz-ov dijagram ovisnosti tlačne čvrstoće betona i vodo-cementnog omjera

3.4 Uvjet obradivosti

Uvjeti obradivosti određuju se prema tipu konstruktivnog elementa *(Slika 6.6):*

Tip konstrukcije: armiranobetonski potporni zid

ODABRANO:
Transportno sredstvo: pumpa, posuda na kranu
Preporučena konzistencija: 60-120 mm

Odabrani razred konzistencije svježeg betona: S2
Zahvaćeni zrak: 1,5%

Tip konstrukcije	Transportna sredstva	Konzistencija -slijeganje, (mm)
Slaboarmirani ili nearmirani temelji i blokovi	trake, specijalne posude	10 - 50
Armirani temelji, zidovi, ploče, stupovi	pumpa, posuda na kranu	60 - 120
Jako armirani presjeci stupova i greda	pumpa, posuda na kranu	80 - 160
Kolničke ploče, industrijski podovi	trake kamioni	10 - 50
Betoniranje pod vodom	pumpe cijevi	120 - 180
Masivni hidrotehnički betoni	trake, kamioni, silobusi	10 - 50
Zalijevanje sidara, podlijevanje ploča strojeva	posude	130 - 200

Slika 6.6 Odabir slijeganja prema tipu konstruktivnog elementa

Prema odabranoj konzistenciji slijeganja određuje se razred konzistencije - S2 *(Slika 6.7):*

RAZREDI KONZISTENCIJE							
Razredi slijeganjem		**Vebe razredi**		**Razredi zbijanjem**		**Razredi rasprostiranjem**	
Razred	Slijeganje (mm)	Razred	Vebe vrijeme (s)	Razred	Stupanj zbijenosti	Razred	Promjer rasprostiranja (mm)
S1	10 do 40	V0	≥ 31	C0	≥ 1,46	F1	≤ 340
S2	50 do 90	V1	30 do 21	C1	1,45 do 1,26	F2	350 do 410
S3	100 do 150	V2	20 do 11	C2	1,25 do 1,11	F3	420 do 480
S4	160 do 210	V3	10 do 6	C3	1,10 do 1,04	F4	490 do 550
S5[1)]	≥ 220	V4	5 do 3	C4	< 1,04	F5	560 do 620
-	-	-	-	-	-	F6	≥ 630

Slika 6.7 Razredi konzistencije svježeg betona

Za riječni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller (B), maksimalno zrno agregata D_{max}=31,5 mm i razred konzistencije S2, odabrano je 165 litara približne potrebne količine vode za 1 m^3 betona (*Slika 6.8*). Dodavanjem superplastifikatora Glenium 628 redukcija potrebne količine vode iz uvjeta obradivosti je za 15% → 140 lit.

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

Slika 6.8 Približna količina vode za 1m^3 betona u ovisnosti D_{max} i konzistencije slijeganja

4. Odabrane komponente

Sve prethodno odabrane komponente za sastav betona B1 prikazane su u slijedećoj tablici:

Tablica 6.4 Prikaz odabranih komponenti za sastav betona B1

Vrsta cementa		CEM I 42,5
Vrsta agregata		Riječni agregat
Najveće zrno agregata (mm)		31,5
Udio zraka u betonu (%)		1,5
w/c omjer	uvjet čvrstoće	0,63
	uvjet trajnosti	0,45
	odabrano	0,45
Količina vode za 1 m^3 betona (lit)		140
Količina cementa	uvjet čvrstoće	311
	uvjet trajnosti	340
	odabrano	340

5. Receptura

Proračun sastava betona B1 prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.5 Proračun sastava betona B1

SASTAV	**MASA (kg)**	**GUSTOĆA (kg/m^3)**	**VOLUMEN (dm^3)**
Cement CEM II 42,5 N	340	3,10	109,68
Voda	140	1,00	140
w/c 0,45			
Dodaci Superplastifikator: Glenium 628 0,9%Mc	3,06	1,15	2,66
Zrak 1,5%	0	0	15
Agregat	1978,18	2,70	732,66
Ukupno	2461,24		1000

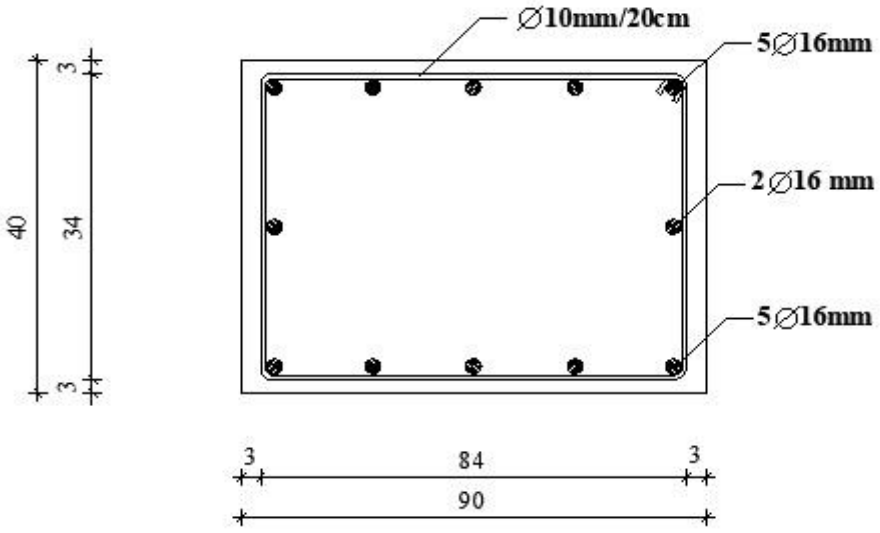
Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.6 Proračun korekcije važnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	**MASA**		**APSORPCIJA**		**VLAŽNOST**		**KORIGIRANA MASA**
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	42	834,62	1,34	11,18	0,7	5,82	829,26
4-8	7	138,47	1,03	1,43	0,4	0,55	137,59
8-16	22	435,20	0,48	2,10	0,2	0,87	433,99
16-31.5	29	573,67	0,36	2,07	0,15	0,86	572,46
VODA		140	Σ	16,78	Σ	8,1	131,32

6.2. Naglavna greda - beton B2

Poprečni presjek armiranobetonske naglavne grede prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 6.9 Poprečni presjek armiranobetonske naglavne grede

1. Određivanje maksimalnog zrna agregata D_{max}

$V=90*40*100 – (1.6^2*\pi)/4*100*12 – (1.0^2*\pi)/4*2*(90+40)*5= 356\ 567{,}98\ cm^3$

$A=(90*100*2 + 40*100*2) + 1.6\pi*100*12 + 1.0*\pi*2*130*5= 36110{,}8\ cm^2$

Uvjeti:

$R=V/A =356\ 567{,}98/36110{,}8=9{,}87$ cm

$D_{max} < R =98{,}7$ mm

$D_{max}< h/4 =400/4 =100$ mm

$D_{max}< c= 30$ mm

ODABRANO: $D_{max} = 31{,}5$ mm

2. Numerički granulometrijski sastav agregata

Uvjeti granulometrije agregata za beton B2 su isti kao i uvjeti granulometrije agregata za beton B1. Stoga se usvajaju prethodno izračunata učešća frakcija iz proračuna sastava betona B1:

X_1 = 42%

X_2 =7%

X_3 = 22%

X_4= 29%

3. Odabir komponenti betona

3.1 Uvjet trajnosti

Razred izloženosti: XS3
Opis okoliša: u zonama plime, oseke i prskanja morske vode

Razred izloženosti	Max. w/c omjer	Min. razred čvrtoće	Min. količina cementa (kg/m^3)	Min. količina zraka	Drugi zahtjevi
XS3	0,45	C35/45	340	-	-

Kako područje razreda izloženosti XS3 nema rizika od smrzavanja, nije potrebno dodavati aerant. Stoga je za nearirani beton, granulometrijsku krivulju Fuller (B) i maksimalno zrno agregata D_{max}=31,5 mm odabran sadržaj zahvaćenog zraka 1,5% *(Tablica 6.3).*

3.2 Uvjet čvrstoće

Projektom je zahtijevan razred tlačne čvrstoće C25/30

$f_{cm} > f_{ck}$ + (6 do 12)

f_{cm} = 30+8= 38 N/mm^2

Razred čvrstoće cementa: CEM I 42,5

Očitano: w/c = 0,63 (očitan iz Waltz-ov dijagram)

3.3 Uvjet obradivosti

Tip konstrukcije: armiranobetonska naglavna greda
Transportno sredstvo: pumpa, posuda na kranu
Preporučena konzistencija: 80-160 mm
Odabrani razred konzistencije svježeg betona: S3
Zahvaćeni zrak: 1,5%
Za riječni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller (B32) i razred konzistencije S3 očitano:
količina vode potrebna za 1 m^3 betona je 185 lit.

Dodavanjem superplastifikatora Glenium 628 redukcija potrebne količine vode iz uvjeta obradivosti je za 15% → 157 litara.

4. Odabrane komponente

Sve prethodno odabrane komponente za sastav betona B2 prikazane su u slijedećoj tablici:

Tablica 6.7 Prikaz odabranih komponenti za sastav betona B2

Vrsta cementa		CEM I 42,5
Vrsta agregata		Riječni agregat
Najveće zrno agregata (mm)		31,5
Udio zraka u betonu (%)		1,5
w/c omjer	uvjet čvrstoće	0,63
	uvjet trajnosti	0,45
	odabrano	0,45
Količina vode za 1 m^3 betona (lit)		157
Količina cementa	uvjet čvrstoće	349
	uvjet trajnosti	340
	odabrano	349

5. Receptura

Proračun sastava betona B2 prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.8 Proračun sastava betona B2

SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/m^3)	VOLUMEN (dm^3)
Cement CEM I 42,5 N	349	3,10	112,58
Voda	157	1,00	157
w/c 0,55			
Dodaci Superplastifikator: Glenium 628 0,9%Mc	3,14	1,15	2,73
Zrak 1,5%	0	0	15
Agregat	1924,21	2,70	712,67
Ukupno	2433,35		1000

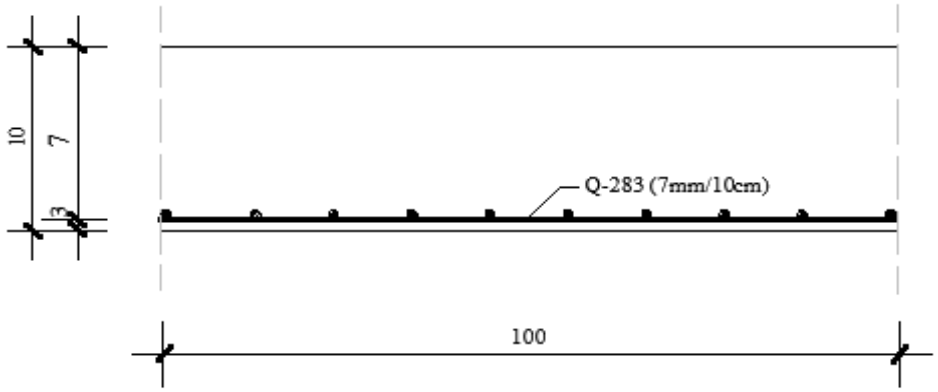
Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.9 Proračun korekcije vlažnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGIRANA MASA
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	42	808,17	1,34	10,83	0,7	5,57	802,91
4-8	7	134,69	1,03	1,39	0,4	0,53	133,83
8-16	22	423,33	0,48	2,00	0,2	0,85	422,16
16-31.5	29	558,02	0,36	2,00	0,15	0,84	556,86
VODA		157	Σ	16,22	Σ	7,79	148,59

6.3. Podna ploča - beton B3

Poprečni presjek armiranobetonske podne ploče prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 6.10 Poprečni presjek armiranobetonske podne ploče

1. Određivanje maksimalnog zrna agregata D_{max}

$V=10*100*100 – (0,7^2*\pi)/4*100*(100/10)*2 = 99230,7\ cm^3$

$A=100*100*2 + 10*100*2 + 0,7\pi*100*(100/10)*2 = 26396\ cm^2$

Uvjeti:

$R=V/A=99230,7/26396=3,8$ cm

$D_{max} < R = 38$ mm

$D_{max} < d_{pl}/3 = 100/3 = 33$ mm

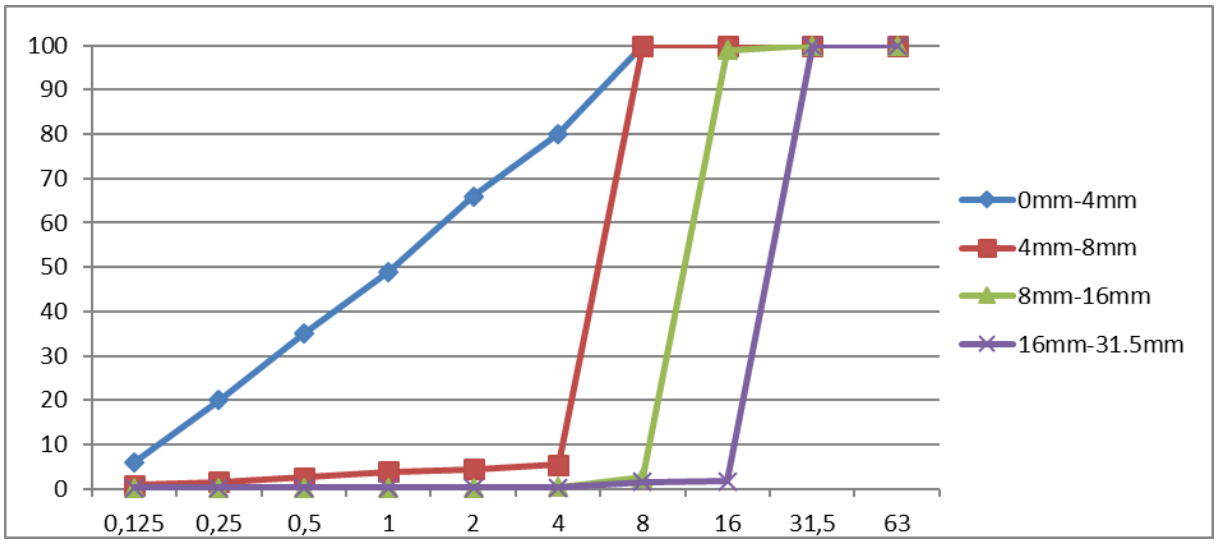
$D_{max} < c = 30$ mm

$D_{max} < 0,8*a_{min} = 80$ mm

$a_{min} = 100$ mm

ODABRANO: $D_{max} = 16$ mm

2. Numerički granulometrijski sastav agregata



Slika 6.11 Granulometrijske krivulje pojedinih frakcija (Tablica 6.1)

Zadani sastav agregata određen je prema granulometrijskoj krivulji Fuller ($B=100*\sqrt{\frac{d}{D}}$) i prikazan je u sljedećoj tablici:

	ZADANI SASTAV AGREGATA (%)								
Sito (d)	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5
Zadano	8,8	12,5	17,7	25	35,3	50	70,7	100	100

EGZAKTNI PRORAČUN:

Gornja nazivna veličina najsitnije frakcije: D1=4 mm

Koeficijenti zrnatosti:

- Koeficijenti zrnatosti stvarnog sastava mješavine frakcija

$K1=\frac{1}{100}(6+20+35+49+66+80)=2.56$

$K2=\frac{1}{100}(0.8+1.5+2.5+3.8+4.5+5.4)=0.185$

K3=$\frac{1}{100}$(0.2+0.2+0.2+0.2+0.3+0.4)=0.015

- Koeficijent zrnatosti idealnog sastava do granice D1

Ko=$\frac{1}{100}$(8,8+12,5+17,7+25+35,3+50)= 1,50

Sustav jednadžbi:

2,56 X_1 + 0,19 X_2 + 0,015 X_3 = 1,50

100 X_1 + 100 X_2 + 2,5 X_3 = 70,7

100 X_1 + 100 X_2 + 99 X_3 = 100

Rješenja:

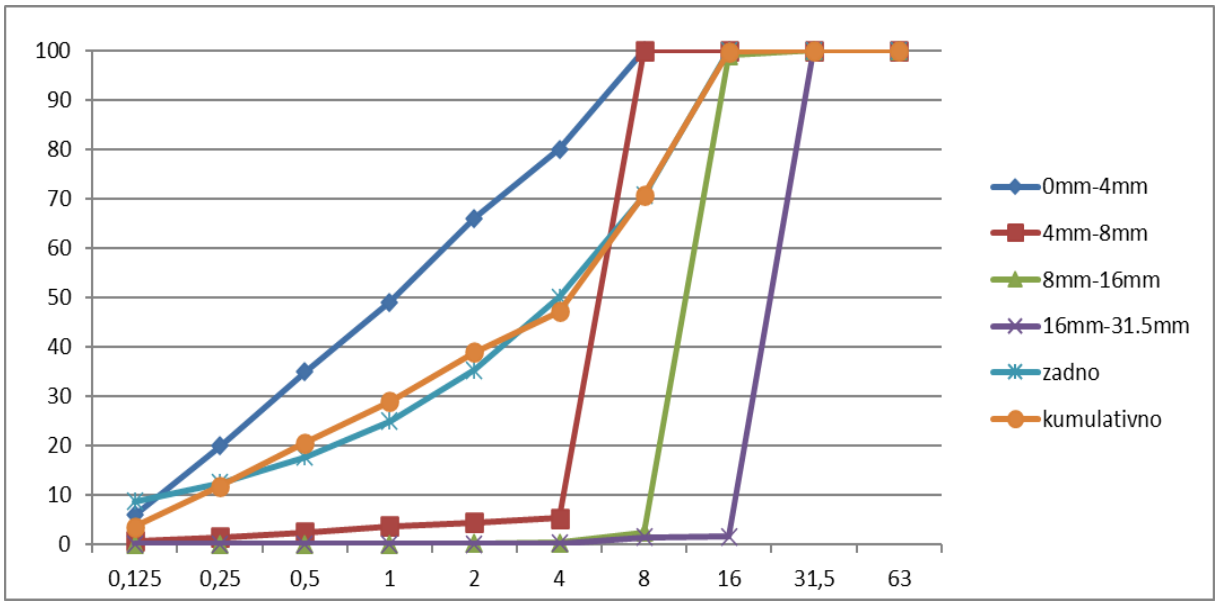
X_1 = 58%

X_2 =12%

X_3 = 30%

Tablica 6.10 Kumulativni sastav agregata

Frak.br.	**Veličina**	**GRANULACIJA - PROLAZ U %**									
		0,125	**0,25**	**0,5**	**1**	**2**	**4**	**8**	**16**	**31,5**	**63**
0-4	***0,58***	3,48	11,6	20,3	28,42	38,28	46,4	58	58	58	58
4-8	***0,12***	0,096	0,18	0,3	0,456	0,54	0,648	12	12	12	12
8-16	***0,30***	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,12	0,75	29,7	30	30
16-31,5	***0***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ukupno	100	3,6	11,8	20,7	28,9	38,9	47,2	70,8	99,7	100,0	100,0



Slika 6.12 Granulometrijska krivulja agregata

3. Odabir komponenti betona

3.1 Uvjet trajnosti

Razred izloženosti: XF2

Opis okoliša: umjereno zasićenje s vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda

Razred izloženosti	Max. w/c omjer	Min. razred čvrstoće	Min. količina cementa (kg/m^3)	Min. količina zraka
XF2	0,55	C25/30	300	4,0

Kako područje razreda izloženosti XF3 ima rizika od smrzavanja, potrebno je dodati aerant. Stoga je za aerirani beton, granulometrijsku krivulju Fuller (B) i maksimalno zrno agregata Dmax=16 mm odabran sadržaj uvučenog zraka 6,0% (*Tablica 6.3*).

3.2 Uvjet čvrstoće

Projektom je zahtijevan razred tlačne čvrstoće C25/30

$f_{cm} > f_{ck}$ + (6 do 12)

f_{cm} = 30+8= 38 N/mm^2

Razred čvrtoće cementa: CEM I 42,5
Očitanio: w/c = 0,63 (očitan iz waltz-ov dijagram)

3.3 Uvjet obradivosti

Tip konstrukcije: armiranobetonska podna ploča

Transportno sredstvo: pumpa, posuda na kranu

Preporučena konzistencija: 60-120 mm

Odabrani razred konzistencije svježeg betona: S2

Za riječni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller (B16) i razred konzistencije S2 očitano:

količina vode potrebna za 1 m^3 betona je 180 litara.

Dodavanjem superplastifikatora Glenium 628 redukcija potrebne količine vode iz uvjeta obradivosti je za 15% → 153 litre.

3. Odabrane komponente

Sve prethodno odabrane komponente za sastav betona B3 prikazane su u slijedećoj tablici:

Tablica 6.11 prikaz odabranih komponenti za sastav betona B3

Vrsta cementa		CEM I 42,5
Vrsta agregata		Riječni agregat
Najveće zrno agregata (mm)		16
Udio zraka u betonu (%)		6,0
w/c omjer	uvjet čvrstoće	0,63
	uvjet trajnosti	0,55
	odabrano	0,55
Količina vode za 1 m^3 betona (lit)		153
Količina cementa	uvjet čvrstoće	278
	uvjet trajnosti	300
	odabrano	300

5. Receptura

Proračun sastava betona B3 prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.12 Proračun sastava betona B3

SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/m^3)	VOLUMEN (dm^3)
Cement CEM I 42,5 N	300	3,10	96,77
Voda	153	1,00	153
w/c 0,55			
Dodaci Superplastifikator: Glenium 628 0,90%Mc	2,70	1,15	2,35
Zrak 6,0%	0	0	60
Agregat	1857,28	2,70	687,88
Ukupno	2312,98		1000

Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.13 Proračun korekcije vlažnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGIRANA MASA
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	58	1077,22	1,34	14,43	0,7	7,54	1070,33
4-8	12	222,87	1,03	2,30	0,4	0,89	221,46
8-16	30	557,18	0,48	2,67	0,2	1,11	555,62
VODA		153	Σ	19,4	Σ	9,54	143,14

6.4. Sumarni prikaz odabranih komponenti betona

Komponente sastava pojedine betonske mješavine prikazane su u sljedećoj tablici:

Svojstva	Beton B1	Beton B2	Beton B3
Klasa betona	C 25/30	C 25/30	C 25/30
Vrsta cementa	CEM I 42,5	CEM I 42,5	CEM I 42,5
Masa cementa	340 kg	349 kg	300 kg
W/C	0,45	0,45	0,55
D_{max}	31,5 mm	31,5 mm	16 mm
Razred konzistencije	S2	S3	S2
Udio zraka (%)	1,5 %	1,5 %	6,0 %
Masa agregata	1931,3 kg	1915,76 kg	1847,41 kg

6. ZAKLJUČAK

Beton je građevni materijal dobiven miješanjem cementa, agregata, vode i/ili dodatka, takozvanih aditiva za poboljšanje konzistencije smjese svježega betona i poboljšanja njegovih svojstava u očvrsnulom stanju. Za razliku od drugih građevinskih materijala, može se lako oblikovati što za posljedicu ima velik stupanj njegove upotrebe. Zbog toga predstavlja infrastrukturu i urbanu osnovu suvremenog društva.

Betonske konstrukcije koje se nalaze unutar morskog okoliša, pod utjecajem su različitih kemijskih, fizikalnih procesa, koji uzrokuju degradaciju betona i koroziju armature. Takvi procesi umanjuju trajnost betonskih konstrukcija. Morski okoliš je jedan od najagresivnijih i kompleksnijih okoliša. Morska voda sadržava veliku količinu otopljenih soli, kisika i sulfata. Štetni kloridni ioni, ugljični dioksid i sulfati glavni su razlog agresivnog djelovanja mora. Kemijski reagiraju sa mineralima betona, izazivaju korozija koja može uzrokovati velika oštećenja armiranobetonskih konstrukcija. Svježoj betonskoj smjesi dodavaju se mineralni i kemijski aditiva, kojima se povećava otpornost betona na štetne kloridne ione, poboljšavajući sljedeća svojstva betona: obradivost bez povećanja količine vode, ubrzava ili usporava vrijeme početka vezanja, smanjuje ili sprječava skupljanje i puzanje betona, usporava se gubitak obradivosti, sprječava se smrzavanje betona, povećava se čvrstoća i trajnost betona, te je sprječavaju štetno djelovanje alkalija iz cementa na sastojke betona i razne druge modifikacije. Tako je čvrstoća betona je njegova sposobnost da se odupre kristalizacijskom pritisku, a vodo-nepropusnost i plino-nepropusnost je mjera brzine difuzije.

Iz provedenih proračuna sastava betona pojedinog betonskog elementa obale iz poglavlja 6., vidljiv je udio pojedine komponente betonske mješavine. Od navedenih materijala od kojih se beton proizvodi, najveći udio u betonu ima agregat, zauzimajući 75% smjese betona. 25% betonske mješavine sačinjava cementi kamen, mješavina cementa i vode. Najmanji udio u sastavu imaju kemijski i mineralni aditivi. Također je vidljiv utjecaj aditiva na smanjenje potrebne količine vode koja dodatno uzrokuje smanjenje količine ostalih komponenti sastava betonske smjese. Pri tome se postiže ekonomična izrada betonske smjese i bolja konzistencija svježeg betona. Konzistenciju svježeg betona odabiremo u skladu s uvjetima trajnosti, čvrstoće i obradivosti betona koji su određeni pripadajućim razredom izloženosti okoliša unutar kojega se beton nalazi, određenog prema Tehničkim propisima za betonsku konstrukciju (TBPK).

7. LITERATURA

[1] Cemex; Povijest cementa i betona

https://www.cemex.hr/povijest-cementa-i-betona

[2] Hrvatska enciklopedija; beton

https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7337

[3] J. Beslać, Časopis Građevinar; Beton u novom stoljeću

http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-54-2002-01-02.pdf

[4] M. Pršić, D. Bjegović , M. Serdar: Plovni putevi i luke; Poglavlje 4: Građenje u moru, Građevinski fakultet Zagreb

Zagrebhttp://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/plovni_putevi_i_luke/predavanja/PPL_Pogl%204%20Grad%20u%20moru_050411.pdf

[5] D. Vrkljan, M. Klanfar: Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina

https://rudar.rgn.hr/~mklanfar/nids_mklanfar/TEHNOLOGIJA%20NEMETALA/Cementne%20sirovine.pdf

[6] D. Bjegović, M. Serdar, A. Baričević, M.J. Rukavina: Časopis Građevinar(12/2015); Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 god.

[7] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2000

[8] D. Bjegović, N. Štirmer, Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, 2015.

[9] http://germann.org/products-by-application/electrical-conductivity-electrical-resistivity-and-chloride-penetrability/prooveit