Trajnost armiranobetonskih konstrukcija

Nemčić, Tomi

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:483812

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository

zir.nsk.hr

UNIRI DIGITALNA KNJIŽNICA

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tomi Nemčić

Trajnost armiranobetonskih konstrukcija

Diplomski rad

Rijeka, 2020.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Konstrukcije
Teorija i tehnologija betona

Tomi Nemčić
JMBAG: 0114026875

Trajnost armiranobetonskih konstrukcija

Diplomski rad

Rijeka, veljača 2020.

IZJAVA

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

_____

Tomi Nemčić

U Rijeci, 24.02.2020.

Zahvala

Zahvaljujem se svim djelatnicima Građevinskog fakulteta na pruženom znanju tijekom cjelokupnog trajanja studija.

Posebno zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Silviji Mrakovčić na razumijevanju, pristupačnosti i savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada. Zahvaljujem se i tetama u referadi Nildi i Marini na ljubaznosti i pomoći.

Veliko hvala obitelji, prijateljima i djevojci Moniki na podršci, razumijevanju i lijepim trenucima tijekom studiranja.

Sažetak

Naslov rada: Trajnost armiranobetonskih konstrukcija

Student: Tomi Nemčić

Mentor: doc. dr. sc. Silvija Mrakovčić

Studij: Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo

Kolegij: Teorija i tehnologija betona

Trajnost konstrukcije predstavlja sposobnost konstrukcije da održi svoju stabilnost, funkciju i estetska svojstva uslijed djelovanja iz okoliša, bez značajnih oštećenja i prevelikih troškova održavanja. Pri razmatranju trajnosti važno je poznavati mehanizme prolaska tvari kroz beton, a to su: propusnost, difuzija i sorpcija. Uslijed ulaska štetnih tvari u beton dolazi do korozije koja predstavlja najveći problem trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Korozija se dijeli na koroziju betona i koroziju čelika. Najčešći uzročnici korozije betona su razna kemijska djelovanja i mehanizmi kao što su zamrzavanje i požar. Korozija armature se dijeli na dva perioda, period pobude koji karakteriziraju karbonatizacija i prodor klorida, te period razvoja korozije. U radu su prezentirani postupci ispitivanja parametara trajnosti kao što su: vodopropusnost, plinopropusnost, otpornost na ciklično smrzavanje i odmrzavanje, prodor klorida i otpornost na abraziju. Trajnost se može projektirati na dva načina, prema normama ili prema uporabnim svojstvima.

Prvi problemi Krčkog mosta pojavili su se nedugo nakon puštanja u promet. Redovitim pregledima konstrukcije kao najveći problem pokazala se korozija uzrokovana velikim sadržajem klorida u betonu. U međuvremenu je pronađen sustav zaštite kojim se značajno smanjio prodor klorida u konstrukciju mosta i osigurao dulji životni vijek trajanja konstrukcije.

Ključne riječi: trajnost, armirani beton, armiranobetonske konstrukcije, korozija, kloridi, Krčki most

Abstract

Thesis title: Durability of reinforced concrete structures

Student: Tomi Nemčić

Mentor: Assist. prof. Silvija Mrakovčić

Study: Graduate study of civil engineering

Course: Theory and Technology of Concrete

The durability of the structure is the ability to maintain its stability, function and aesthetics due to environmental effect, without significant damage and major maintenance costs. When considering durability, it is important to know the mechanisms for the entry of external causes of damage into the concrete, which are: permeability, diffusion and sorption. The entry of harmful substances into the concrete leads to corrosion, which is the biggest problem of the durability of reinforced concrete structures. The corrosion can be divided into concrete corrosion and steel corrosion. The most common causes of concrete corrosion are various chemical actions and mechanisms such as freezing and fire. The corrosion of the reinforcement can be divided into two periods, the initiation period characterized by carbonation and penetration of chloride, and the propagation period. In this work it will be presented methods of testing durability parameters such as: water permeability, gas permeability, resistance to cyclic freezing and thawing, chloride penetration and abrasion resistance. Durability can be designed in two ways, according to norms or according to its usability properties.

The first problems of the Krk bridge appeared shortly after its launch. Regular inspections of the bridge structure showed the major problem with corrosion caused by the high chloride content in concrete. In the meantime, a system of protection was found to significantly reduce the penetration of chloride into the bridge structure which provided longer structural life.

Key words: durability, reinforced concrete, reinforced concrete structures, corrosion, chloride, Krk bridge

SADRŽAJ

POPIS TABLICA .....

POPIS SLIKA .....

1. UVOD 1

2. MEHANIZMI PROLASKA TVARI U BETONU 2

2.1. Propusnost betona 3

2.1.1. Vodopropusnost 4

2.1.2. Plinopropusnost 5

2.2. Difuzija 7

2.2.1. Difuzija vode 8

2.2.2. Difuzija plina 9

2.2.3. Difuzija klorida 10

2.3. Sorpcija 10

3. MEHANIZMI RAZARANJA BETONA I ARMATURE U BETONU 12

3.1. Korozija betona 12

3.1.1. Kemijska djelovanja 12

3.1.1.1. Djelovanje kiselina 12

3.1.1.2. Djelovanje sulfata 13

3.1.1.3. Alkalnoagregatna reakcija 13

3.1.1.4. Djelovanje morske vode 14

3.1.2. Proces smrzavanja i odmrzavanja 15

3.1.3. Djelovanje požara 16

3.2. Korozija čelika 16

3.2.1. Karbonatizacija 17

3.2.2. Prodor klorida 17

3.2.3. Proces korozije 18

4. ISPITIVANJE PARAMETARA TRAJNOSTI 22
4.1. Ispitivanje vodopropusnosti 22
4.2. Ispitivanje plinopropusnosti 22
4.3. Ispitivanje otpornosti na ciklično izlaganje smrzavanju i odmrzavanju 25
4.4. Ispitivanje prodora klorida 26
4.5. Ispitivanje otpornosti na abraziju 29
5. OSIGURANJE TRAJNOSTI ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA 30
5.1. Projektiranje trajnosti prema normama 30
5.2. Projektiranje trajnosti prema uporabnim svojstvima 33
5.2.1. Parametri materijala 34
5.2.2. Zaštitni sloj betona 35
5.2.2.1. Prijenos sila prionjivošću 36
5.2.2.2. Dimenzije zaštitnog sloja iz uvjeta trajnosti 37
5.2.2.3. Dimenzije zaštitnog sloja betona iz uvjeta otpornosti na požar 38
5.2.2.4. Preporučene dimenzije širine pukotina 40
5.2.2.5. Izvedba projektirane dimenzije zaštitnog sloja betona 41
6. STANJE PODRUČJA NA PRIMJERU KRČKOG MOSTA 42
6.1. Povijest Krčkog mosta 42
6.2. Opis konstrukcije 43
6.3. Pregledi konstrukcije mosta 44
6.4. Zaštita armature od korozije pri sanaciji oštećenih dijelova 46
7. ZAKLJUČAK 48
LITERATURA 50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrednovanje rezultata ispitivanja s obzirom na prolazak električnog naboja [9] ... 28
Tablica 2. Razrada uvjeta okoliša prema HRN 1128 [1] ... 30
Tablica 3. Razredi izloženosti [1] ... 31
Tablica 4. Trajnosni parametri i granične vrijednosti za razrede izloženosti [1] ... 34
Tablica 5. Razredi trajnosti i granične vrijednosti indeksa trajnosti [1] ... 35
Tablica 6. Najveći preporučeni koeficijenti difuzije [1] ... 35
Tablica 7. Zahtjevi za najmanji zaštitni sloj $cmin, b$ [11] ... 37
Tablica 8. Najmanji razredi tlačnih čvrstoća [11] ... 37
Tablica 9. Preporuke razredbe konstrukcije [1] ... 38
Tablica 10. Najmanja debljina zaštitnog sloja s obzirom na trajnost čelične armature [1] ... 38
Tablica 11. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za nosive AB zidove [11] ... 39
Tablica 12. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za nosive AB stupove [11] ... 39
Tablica 13. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za slobodno oslonjene AB i prednapete grede [11] ... 40
Tablica 14. Preporučene vrijednosti maksimalne dopuštene širine pukotina [1] ... 40
Tablica 15. Rezultati ispitivanja za stup S28 [10] ... 47

POPIS SLIKA

Slika 1. Razlika između poroznosti i propusnosti [1] 2
Slika 2. Utjecaj hidratacije na propusnost cementne paste [1] 3
Slika 3. Proces difuzije [1] 7
Slika 4. Idealizirani prikaz pukotina uzrokovan alkalnoagregatnom reakcijom [1] 14
Slika 5. Učinak smrzavanja i odmrzavanja [4] 15
Slika 6. Utjecaj povišenih temperatura i vrste agregata na tlačnu čvrstoću betona [1] 16
Slika 7. Karbonatizacija [1] 17
Slika 8. Krivulja prodora klorida [4] 18
Slika 9. Odlamanje zaštitnog sloja betona [4] 19
Slika 10. Proces korozije armature [4] 19
Slika 11. Klasifikacija AB konstrukcija [4] 21
Slika 12. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti [7] 22
Slika 13. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti 23
Slika 14. Klimatski kabinet [8] 26
Slika 15. Oprema za saturiranje uzoraka [9] 27
Slika 16. Uzorak u naponskoj čeliji [9] 28
Slika 17. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abraziju 29
Slika 18. Grupe projektiranja trajnosti [1] 30
Slika 19. Postupci projektiranja prema uporabnim svojstvima [1] 33
Slika 20. Prikaz zaštitnog sloja betona [1] 35
Slika 21. Primjeri podmetača [1] 41
Slika 22. Krčki most [14] 42
Slika 23. Dispozicija mosta [14] 43
Slika 24. Karakteristični poprečni presjek konstrukcije mosta [13] 43
Slika 25. Poprečni presjek stupa [13] 43
Slika 26. Izgled površine nakon uklanjanja oštećenog sloja betona [13] 46

1. UVOD

Cilj ovoga rada je istražiti i analizirati faktore koji utječu na degradaciju te posljedično na trajnost armiranobetonskih konstrukcija.

U radu su objašnjeni mehanizmi prolaska tvari u betonu s aspekta propusnosti betona (vodopropusnost i plinopropusnost), difuzije vode, plina i klorida i sorpcije.

Uslijed ulaska štetnih tvari u beton stvaraju se uvjeti za kemijske reakcije zbog kojih dolazi do korozije betona ili korozije armature. Od kemijskih djelovanja izdvojena su: djelovanja kiselina, djelovanja sulfata, alkalnoagregatna reakcija, djelovanja morske vode. Dano je i teoretsko objašnjenje procesa smrzavanja i odmrzavanja, kao i o djelovanju požara. Istaknute su i značajke korozije čelika, pa se u tom smislu govori o karbonatizaciji, prodoru klorida i samome procesu korozije.

U laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta proučena je oprema za ispitivanje parametara trajnosti. Opisuju se postupci ispitivanja vodopropusnosti, ispitivanju plinopropusnosti, ispitivanju otpornosti na ciklično izlaganja smrzavanju i odmrzavanju, te o ispitivanju prodora klorida i ispitivanju otpornosti na abraziju.

Kroz poglavlje „Osiguranje trajnosti AB konstrukcija“ istaknute su specifičnosti projektiranja trajnosti prema normama i projektiranja trajnosti prema uporabnim svojstvima. Definiran je zaštitni sloj betona, i u tu svrhu o prijenosu sila prionjivošću, dimenzijama zaštitnog sloja iz uvjeta trajnosti, dimenzijama zaštitnog sloja betona iz uvjeta otpornosti na požar, kao i o preporučenim dimenzijama širine pukotina, te se navode specifičnosti vezane uz izvedbu projektirane dimenzije zaštitnog sloja betona.

Vezano za trajnost armiranobetonskih konstrukcija analiziran je taj parametar na primjeru Krčkog mosta. Dan je opis same konstrukcije mosta te su kronološki prezentirani pregledi konstrukcije i nedostaci koji su pritom uočeni. Nadalje, prikazani su načini na koji su sanirani oštećeni dijelovi konstrukcije mosta.

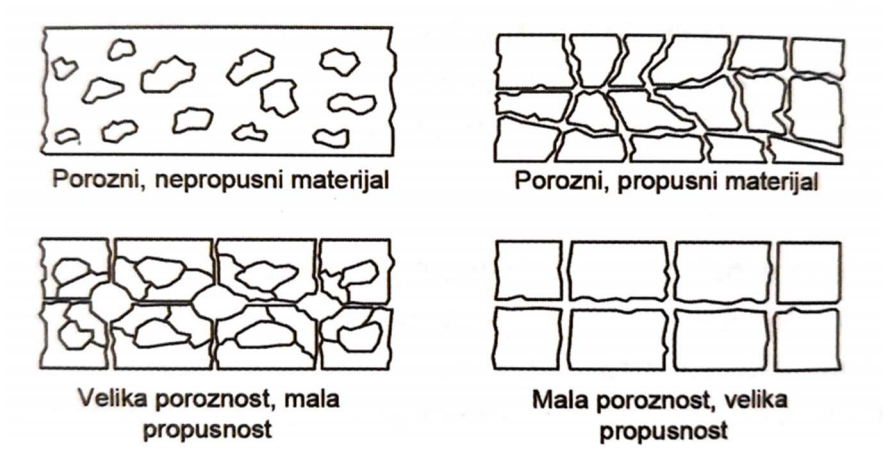
Zaključno sintetizirani su stavovi, mišljenja i zaključci do kojih se došlo temeljem ovoga istraživanja.

2. MEHANIZMI PROLASKA TVARI U BETONU

Najvažnije svojstvo pri razmatranju trajnosti betona je propusnost betona i različiti mehanizmi prolaska tvari kroz beton [1]:

- kretanje fluida uslijed razlike tlakova
- kretanje iona, atoma ili molekula zbog razlike u koncentraciji – difuzija
- kapilarno privlačenje tekućine u prazne ili djelomično ispunjene pore – sorpcija.

Beton sadrži pore različitih vrsta i veličina, te se prolazak tvari kroz njegovu strukturu smatra posebnim slučajem općeg fenomena tečenja kroz porozni materijal. Brzina tečenja ne ovisi samo o poroznosti nego i o međusobnoj povezanosti pora i njihovoj veličini. Primjerice, kroz nepovezane pore promjera manjeg od 150 nm neće biti tečenja [1]. U betonu to opisujemo svojstvom koje se naziva propusnost. Razlika između propusnosti i poroznosti prikazana je na slici 1.



Slika 1. Razlika između poroznosti i propusnosti [1]

Propusnost je proces u kojem tvari (voda, plin) prelaze iz jednog dijela materijala u drugi. Najčešće se određuje na uzorku oblika valjka na način da uzorak s jedne strane izložimo djelovanju tlaka te mjerimo stacionarni protok. Ako je fluid nestlačiv, kao što je primjerice voda, razlika tlaka kroz uzorak je linearna i Darcyjeva jednadžba se može izraziti kao (1) [1]:

$$\frac{\Delta Q}{A} = \frac{-K\Delta P}{l} \tag{1}$$

gdje je:

ΔQ - volumenski protok $[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$

A - površina poprečnog presjeka okomito na smjer z $[\mathrm{m}^2]$

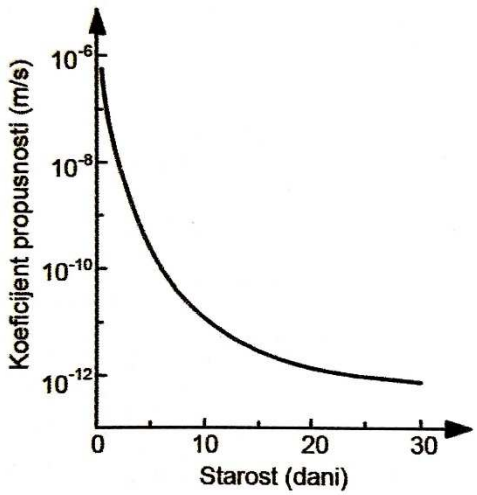
K - koeficijent propusnosti $[\mathrm{m}/\mathrm{s}]$

ΔP - tlak $[\mathrm{N}/\mathrm{m}^2]$

l - duljina puta [m].

2.1. Propusnost betona

Propusnost betona ovisi o propusnosti cementne paste i agregata. Hidratacijom cementa ispunjava se struktura cementne paste te se na taj način smanjuje propusnost. To smanjenje propusnosti ispočetka je veliko zbog napredovanja procesa hidratacije, a nakon 2 do 3 tjedna propusnost se smanjuje (slika 2.). Do najvećeg smanjenja propusnosti očvrsnule cementne paste dolazi kada se poroznost smanji s 40% na 25%, tada dolazi do smanjenja veličine pora i povezanosti među njima.



Slika 2. Utjecaj hidratacije na propusnost cementne paste [1]

Stijene koje se koriste za proizvodnju agregata imaju propusnost istog reda veličine kao i cementna pasta, bez obzira na malu poroznost. Propusnost betona je puno veća od propusnosti agregata ili cementne paste zbog defekata i pukotina koje se nalaze u strukturi betona. Malu propusnost je moguće postići kontrolirajući iste faktore kao i za postizanje većih čvrstoća, a to su: vodocementni omjer, sadržaj cementa, zbijanje i njega betona [1]. Između ostaloga, važno je spriječiti nastanak mikropukotina uslijed deformacija koje nastaju prilikom sušenja te izbjeći mogućnost preranog ili prekomjernog opterećenja.

2.1.1. Vodopropusnost

Do tečenja vode u betonu ne dolazi samo putem kapilarnih pora hidratizirane cementne paste već i preko unutrašnjih pukotina u betonu i preko poroznog sučeljka između matrice i agregata [1]. To dovodi do povećanja propusnosti betona koja se izjednačava, pa čak i premašuje propusnost matrice hidratizirane cementne paste. Tečenje vode je ovisno o tome jesu li kapilarne pore hidratizirane cementne paste međusobno povezane što je određeno vodocementnim omjerom i stupnjem hidratacije cementa. Također, njega betona je vrlo važna jer unatoč tome što je vodocementni omjer mali, nedovoljna njega dovodi do manjeg stupnja hidratacije te na taj način uzrokuje veliku propusnost.

Prolazak vode se opisuje Darcyjevim zakonom (2) [1]:

$$V = K_w \frac{A}{l} \Delta h_w t \tag{2}$$

gdje je:

V - volumen vode [m^3]

Δh_w - hidraulički potencijal [m]

A - izložena površina [m^2]

t - vrijeme [s]

l – debljina uzorka [m]

K_w - koeficijent vodopropusnosti [m/s].

Koeficijent vodopropusnosti možemo odrediti preko srednje tlačne čvrstoće betona ili preko ispitivanja prodora vode. Koeficijent vodopropusnosti procijenjen preko srednje tlačne čvrstoće betona, f_{cm} računa se prema izrazu (3) [1]:

$$K_w = K_{w0} \frac{1}{{f_{cm}}^6} \tag{3}$$

gdje je:

K_w - koeficijent vodopropusnosti [m/s]

$K_{w0} = 4 * 10^{-3}$ [m/s]

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona. [MPa].

Koeficijent vodopropusnosti proračunava se koristeći podatke dobivene ispitivanjem prodora vode prema izrazu (4) [1]:

$$K_w = \frac{\omega_0}{2Pt} dm^2 \tag{4}$$

gdje je:

ω_0 - gustoća vode $[\mathrm{N/mm^3}]$

P - tlak vode [MPa]

t - vrijeme pod tlakom [s]

dm – srednja vrijednost dubine prodiranja vode [mm].

Kako bi se proizveo vodonepropustan beton trebalo bi se pridržavati pet pravila [2]:

- koristiti mali vodocementni omjer
- optimizirati količinu cementa i/ili mineralnih dodataka
- optimizirati granulometrijsku krivulju agregata
- provesti odgovarajući način ugradnje i zbijanja betona
- provesti odgovarajuće izvođenje spojeva.

Za proizvodnju relativno trajnog, vodonepropusnog betona zadovoljavajuće čvrstoće prema članku 5 Rules of Watertightness [2] iz 2012. preporuča se da vodocementni omjer nije veći od 0,45. Minimalna preporučena količina cementa u betonu iznosi 335 kg/m^3, a za postizanje vodonepropusnosti betona preporuka je koristiti cement veće finoće (> 600 m^2/kg po Blainu). Granulometrijska krivulja je vrlo važna za izvedbu vodonepropusnog betona. Preporuča se upotreba dobro graduiranog agregata oblog oblika kako bi se spriječio prolazak vode između zrna agregata.

2.1.2. Plinopropusnost

Plinovi, kao i voda, pod djelovanjem vanjskog tlaka prolaze kroz pore i mikropukotine u betonu. Volumen plina koji prolazi kroz porozni materijal određuje se izrazom (5) [1]:

$$V = K_g \frac{A}{l} \frac{p_1 - p_2}{\eta} p_m \frac{1}{p} t \tag{5}$$

gdje je:

V - volumen plina koji protječe u vremenu t $[\mathrm{m^3}]$

K_g - koeficijent plinopropusnosti [m^2]

A - izložena ploština uzorka [m^2]

l - debljina presjeka uzorka [m]

$p_1 - p_2$ - razlika tlakova plina [$\mathrm{N/m}^2$]

p_m - srednji tlak plina [$\mathrm{N/m}^2$]

η - viskoznost plina [$\mathrm{Ns/m}^2$]

p - lokalni tlak plina [$\mathrm{Ns/m}^2$]

t - vrijeme protjecanja plina [s].

Koeficijent plinopropusnosti je parametar materijala koji je konstantan, predstavlja specifičnu propusnost i mjerna jedinica mu je m/s [1]. Vodocementni omjer utječe na veličinu koeficijenta plinopropusnosti, što je on veći, to je koeficijent plinopropusnosti manji.

Ako nam je dovoljna gruba procjena, koeficijent plinopropusnosti za zrak, kisik i dušik možemo odrediti pomoću izraza koji uzima u obzir srednju tlačnu čvrstoću betona (6) [1]:

$$K_g = K_{g0} \frac{1}{{f_{cm}}^{4.5}} \tag{6}$$

gdje je:

K_g - koeficijent plinopropusnosti [m^2]

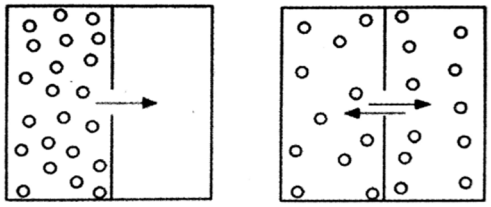
K_{g0} - 2×10^{-10} [m^2]

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona [MPa].

Za točniju procjenu koeficijenta plinopropusnosti provodi se eksperimentalno određivanje plinopropusnosti.

2.2. Difuzija

Difuzija predstavlja kretanje tvari kroz beton koji je vlažan ili djelomično vlažan. Ispituje se na način da s jedne strane uzorka oblika valjka nalazi tvar koja difundira, a promatra se povećanje koncentracije na drugoj strani (slika 3.).



Slika 3. Proces difuzije [1]

Kretanje plinova i tekućina uslijed razlike u koncentraciji opisano je Prvim Fickovim zakonom difuzije (7) [1]:

$$Q = D\frac{c_1 - c_2}{l}At \tag{7}$$

gdje je:

Q - masa transportirane tvari [g]

D - koeficijent difuzije $[\mathrm{m}^2/s]$

$c_1 - c_2$ - razlika u koncentraciji tvari $[\mathrm{g/m}^3]$

A – površina uzorka $[\mathrm{m}^2]$

t – vrijeme prolaska tvari $[s]$

l - debljina presjeka uzorka [m].

Kako se količina tvari koja prolazi kroz beton mijenja po položaju x i vremenu t, iz prvog Fickovog zakona izveden je Drugi Fickov zakon (8) [1]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{8}$$

gdje je:

c - koncentracija tvari $[\mathrm{g/m}^3]$

t – vrijeme prolaska tvari $[s]$

D - koeficijent difuzije $[\mathrm{m}^2/s]$

x - položaj $[\mathrm{m}]$.

2.2.1. Difuzija vode

Kod difuzije vodene pare različiti mehanizmi su uključeni u njen prolazak kroz beton tako da koeficijent difuzije nije konstantan [1]. Difuziju vodene pare možemo odrediti eksperimentalno ili teorijski. Eksperimentalno se određuje prema normi HRN EN 12086 pri lokalnoj koncentraciji c. Kod teorijskog određivanja koeficijenta difuzije potrebno je odrediti relativnu vlažnost pora $0 < H < 1$. Izraz za teorijsko određivanje koeficijenta difuzije vodene pare dobiven je transformiranjem Drugog Fickovog zakona (9) [1]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D(H)\frac{\partial H}{\partial x}\right) \tag{9}$$

gdje je:

H - relativna vlažnost pora

$D(H)$ - koeficijent difuzije pri relativnoj vlažnosti pora H $[\mathrm{m}^2/s]$.

Koeficijent difuzije za betone običnih čvrstoća pri izotermnim uvjetima definiran je kao (10) [1]:

$$D(H) = D_1\left[\alpha + \frac{1-\alpha}{1+\left[\frac{(1-H)}{(1-H_c)}\right]^n}\right] \tag{10}$$

gdje je:

D_1 - najveća vrijednost $D(H)$ kada je H=1 $[\mathrm{m}^2/s]$

D_0 - najmanja vrijednost $D(H)$ kada je H=0 $[\mathrm{m}^2/s]$

α - odnos najmanje i najveće vrijednosti $D(H)$

H_c – relativna vlažnost pora kada je $D(H) = 0{,}5D_1$

n – eksponent

H - relativna vlažnost pora.

2.2.2. Difuzija plina

Difuzija plinova kao što su zrak, kisik, ili ugljični dioksid kontrolira se sadržajem vlage u betonu. Kod betona obične čvrstoće, koji su čuvani u kontroliranom okolišu na približno 20 ºC pri relativnoj vlažnosti od 65 % dani su slijedeći izrazi za proračun koeficijenta difuzije plinova [1]:

Izraz za koeficijent difuzije kisika D_{02} kroz nekarbonatizirani beton (11) [1]:

$$log\left(\frac{D_{O2}}{D_{O2,O}}\right) = -0{,}02 f_{cm} \tag{11}$$

gdje je:

D_{O2} - koeficijent difuzije O_2 $[\mathrm{m}^2/s]$

$D_{O2,O}$ = $10^{-6,5}$ $[\mathrm{m}^2/s]$

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona [MPa].

Izraz za koeficijent difuzije ugljičnog dioksida D_{C02} kroz nekarbonatizirani beton (12) [1]:

$$log\left(\frac{D_{CO2}}{D_{CO2,O}}\right) = -0{,}05 f_{cm} \tag{12}$$

gdje je:

D_{CO2} - koeficijent difuzije CO_2 $[\mathrm{m}^2/s]$

$D_{CO2,O}$ = $10^{-6,1}$ $[\mathrm{m}^2/s]$

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona [MPa].

Karbonatizaciju betona u kontroliranim uvjetima možemo procijeniti prema (13) [1]:

$${d_c}^2 = 2 D_{CO2} \frac{C_a}{C_c} t \tag{13}$$

gdje je:

d_c - dubina karbonatizacije [m]

D_{CO2} - koeficijent difuzije CO_2 kroz karbonatizirani beton $[\mathrm{m}^2/s]$

C_a - koncentracija CO_2 u zraku $[g/\mathrm{m}^3]$

C_c - količina CO_2 potrebna za potpunu karbonatizaciju jediničnog volumena betona $[g/\mathrm{m}^3]$

t – vrijeme $[s]$.

2.2.3. Difuzija klorida

Do prodiranja klorida u beton ne dolazi samo zbog difuzijskih procesa nego i zbog kapilarnog upijanja slanih otopina. Zbog tog razloga je predviđanje prolaska klorida složeno. Količina vezanih klorida ovisi o vrsti cementa i trebala bi biti u ravnoteži s koncentracijom otopljenih klorida u porama [1]. Samo otopljeni kloridi djeluju u procesu difuzije.

Koeficijent difuzije klorida može se odrediti prema izrazu (14) pomoću srednje tlačne čvrstoće betona f_{cm}, ali on vrijedi samo za betone običnih ili visokih čvrstoća za čiju izradu je korišten portland cement i nisu korišteni nikakvi dodaci [1]:

$$D_{C1} = D_{C10} \frac{1}{{f_{cm}}^{1,5}} \tag{14}$$

gdje je:

D_{C1} - efektivni koeficijent difuzije klorida $[\mathrm{m}^2/s]$

$D_{C10} = 5 \times 10^{-9}$ $[\mathrm{m}^2/s]$

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona [MPa].

2.3. Sorpcija

Sorpcija predstavlja pojavu u kojoj tvar iz jedne faze prelazi graničnu površinu i u drugoj fazi se jednolično raspodjeljuje u koncentraciji koja je veća nego u prvoj fazi [3]. Ispitivanje se provodi na uzorcima kojima su rubovi zabrtvljeni i prodiranje se odvija s jedne strane. Nakon toga određujemo dubinu prodiranja fluida cijepanjem ili mjerenjem mase.

Apsorpciju vode možemo prikazati izrazom (15) [1]:

$$w = w_1 \left(\frac{t}{t_1}\right)^n = M_w t^n \tag{15}$$

gdje je:

w - voda apsorbirana po jedinici površine u vremenu t $[\mathrm{m}^3/\mathrm{m}^2]$

w_1 - voda apsorbirana u vremenu t

t – trajanje ispitivanja $[s]$

n = 0,5 za jednoliku raspodjelu vlažnosti ili $< 0{,}5$ za nejednoliku raspodjelu vlažnosti

M_w - koeficijent apsorpcije vode $[\mathrm{m/s^{0.5}}]$.

Koeficijent apsorpcije ovisi o vlažnosti betona i mikrostrukturi. Njegovu grubu procijenu možemo izračunati uz pomoć tlačne čvrstoće betona prema izrazu (16) [1]:

$$M_w = M_{wo} \frac{1}{{f_{cm}}^{2,5}} \tag{16}$$

gdje je:

M_{wo} = 0,2 $[\mathrm{m/s^{0.5}}]$

f_{cm} - srednja tlačna čvrstoća betona $[\mathrm{MPa}]$.

3. MEHANIZMI RAZARANJA BETONA I ARMATURE U BETONU

Dugo su se vremena konstrukcije od betona smatrale neuništivim konstrukcijama kojima nije potrebno nikakvo održavanje. Tijekom vremena, s obzirom na oštećenja raznih betonskih građevina zaključeno je da je potreban drukčiji pristup projektiranju kako bi se osigurala zahtijevana trajnost.

Uzroci oštećenja armiranobetonskih konstrukcija su različita djelovanja iz okoliša koja uzrokuju kemijske procese ili kemijske reakcije koja mijenjaju svojstva materijala nakon čega dolazi do nepredviđenog ponašanja materijala. Neke od promjene do kojih dolazi zbog djelovanja iz okoliša su: promjene u boji, pukotine, oštećenje površine, ljuštenje, skupljanje i dr. [1].

Mehanizmi koji razaraju armiranobetonske konstrukcije su različiti i ima ih puno, ali osnovna podjela je slijedeća:

- mehanizmi uslijed kojih dolazi do korozije betona
- mehanizmi uslijed kojih dolazi do korozije čelika.

3.1. Korozija betona

Do oštećenja betona može doći iz više razloga, najčešći uzročnici su [1]:

- kemijska djelovanja koja uzrokuju smanjenje cjelovitosti
- mehanizmi koji utječu na fizička svojstva, u njih spadaju zamrzavanje, požar itd.

3.1.1. Kemijska djelovanja

Najčešći uzročnici razaranja uslijed kemijskih djelovanja su slijedeći:

- kiseline
- sulfati
- alkalije
- morska voda.

3.1.1.1. Djelovanje kiselina

Kiseline u kontaktu s cementnom pastom razaraju mikrostrukturu očvrslog cementnog kamena što dovodi do povećanja propusnosti betona. Zrna agregata ostaju izložena i nepovezana jer dolazi do ispiranja produkata reakcije uslijed abrazije ili otapanja. Djelovanje kiselina dovodi do napredovanja drugih mehanizama razaranja, primjerice, posljedica razaranja

zaštitnog sloja betona je ubrzana korozija armature. Uzročnici razornog djelovanja kiselina su: zagađenje atmosfere i plinovi [4]. Zadovoljavajuću trajnost i otpornost na djelovanje kiselina postižemo kvalitetom betona, koji bi trebao biti manje propustan te ispravno njegovan.

Degradacija betona uzrokovana djelovanjem kiselina određuje se dubinom korozije d, s obzirom na početnu površinu. Ukoliko je gubitak materijala s površine mali i koncentracija kiseline konstantna, dubinu korozije procjenjujemo prema izrazu (17) [1]:

$$d = k_c\sqrt{ct} \tag{17}$$

gdje je:

c - koncentracija kiseline $[\mathrm{mol/L}]$

t - vrijeme kontakta kiseline i betona $[\mathrm{s}]$

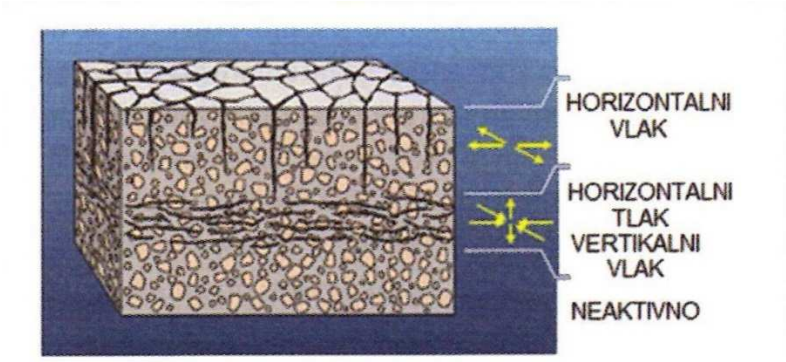
k_c – konstanta.

3.1.1.2. Djelovanje sulfata

Do razornog djelovanja sulfata dolazi kod kontakta sulfata s ionima kalcija i aluminija u betonu pri čemu se formiraju pukotine koje dodatno ubrzavaju proces degradacije daljnjim prodorom sulfata [4]. Djelovanjem sulfata uništava se zaštitni sloj betona što dovodi do napredovanja drugih mehanizama razaranja. Sulfati se često nalaze u podzemnim vodama ili industrijskim otpadnim vodama. Djelovanje sulfata ovisi o koncentraciji sulfata, ukoliko je koncentracija mala nije potrebno provoditi posebne mjere za zaštitu betonske konstrukcije, dok je kod većih koncentracija potrebno zaštititi betonsku konstrukciju. Kod betona koji je izložen djelovanju sulfata oštećenja će se prvo pojaviti na rubovima, nakon čega dolazi do progresivnih pukotina i na kraju do sloma konstrukcije.

3.1.1.3. Alkalnoagregatna reakcija

Agregati sadrže elemente silicija, silikata i karbonata koji mogu reagirati s alkalijama u betonu [1]. Najčešća reakcija je alkalnosilikatna, a njen produkt je gel koji koji razara vezu agregata i očvrsnule cementne paste. Reakcija dovodi do ekspanzije i dolazi do pukotina u betonu i mrežastih pukotina na površini betona (slika 4.) [4].



Slika 4. Idealizirani prikaz pukotina uzrokovan alkalnoagregatnom reakcijom [1]

Neki od najbitnijih faktora utjecaja na alkalnoagregatnu reakciju su [1]:

- količina alkalija
- povećanjem količine alkalija dolazi do povećanja brzine reakcije
- količina reaktivnog silicija
- temperatura okoliša je isto tako važna jer njeno povećanje dovodi do ubrzavanja reakcije.

Povećanje količine aktivnog silicija uzrokuje povećanje bubrenja do neke granice nakon koje se bubrenje smanjuje. Ukoliko relativna vlažnost betona padne ispod 85 % dolazi do prestanka bubrenja [1]. Kako bi zaustavili jednom započetu alkalnoagregatnu reakciju potrebno je eliminirati vodu što često nije moguće. Zbog toga je potrebno pravilno odabrati materijal i projektirati sastav betona pri čemu se vodimo slijedećim načelima [1]:

- izbjegavanje reaktivnih agregata
- ograničavanje sadržaja alkalija u cementu
- upotreba portlandskog cementa s raznim mineralnim dodacima
- ograničavanje ukupnog sadržaja alkalija u betonu
- preporuča se da za vrijeme upotrebe beton bude suh.

3.1.1.4. Djelovanje morske vode

Betonske konstrukcije u prisustvu morske vode izložene su raznim procesima degradacije kao što su: kemijska djelovanja zbog utjecaja morskih soli, ciklusi vlaženja i sušenja betona u dijelu zapljuskivanja, valovi i nanošenje materijala valovima (uzrokuje abraziju) te pojave smrzavanja i odmrzavanja.

Kretanje soli kroz beton odvija se procesima propusnosti, difuzijom i apsorpcijom. U dijelovima gdje se odvijaju procesi vlaženja i sušenja, evaporacija vode uzrokuje kristalizaciju

soli koja ovisno o količini može dovesti do oštećenja konstrukcije uslijed kristalizacijskog tlaka. Povećanje otpornosti na djelovanje morske vode postiže se primjenom betona manje propusnosti.

3.1.2. Proces smrzavanja i odmrzavanja

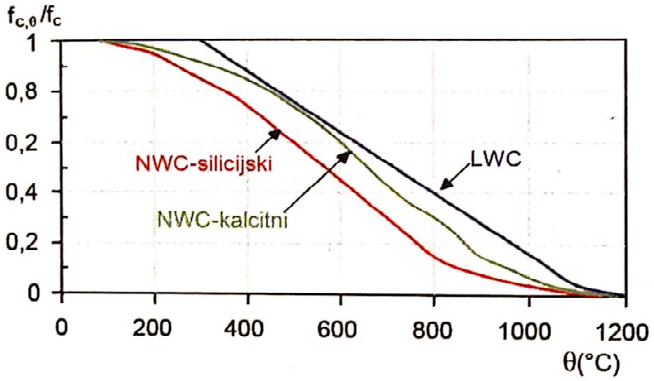
Do razornog djelovanja uslijed procesa smrzavanja i odmrzavanja dolazi zbog učestalog ponavljanja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Ovaj proces najčešći je uzrok oštećenja betona u hladnijim područjima. Voda prelazi u led pri 0 ºC, te tada dolazi do povećanja volumena za približno 9 % [4]. Oštećenja koja nastaju posljedica su širenja pri pretvaranju vode u led, jer najčešće u betonu za to nema dovoljno prostora, te se kao posljedica toga počinju javljati vlačne sile koje premašuju vlačnu čvrstoću betona.

Oštećenja do kojih dolazi uslijed djelovanja procesa smrzavanja i odmrzavanja pojavljuju se u obliku pukotina, ljuštenja (slika 5.) ili raspucavanja betona, koje dovode do smanjenja čvrstoće. Mjere kojima sprečavamo razorno djelovanje procesa smrzavanja i odmrzavanja su: uvlačenje zraka uporabom kemijskih dodataka, niži vodocementni omjer, uporaba prikladnih agregata te zaštita površine hidrofobnim sredstvima [4]. Smanjenjem vodocementnog omjera povećavamo otpornost betona na smrzavanje jer izdvajanje vode u svježem betonu dovodi do velike poroznosti očvrsnulog betona. Agregati koji su manje otporni na smrzavanje su neke vrste vapnenaca i poroznih pješčenjaka koje imaju veliku apsorpciju te su zbog toga osjetljivi na pojavu smrzavanja, također veći udio manjih zrna agregata je povoljniji ako želimo postići veću otpornost na smrzavanje.

Slika 5. Učinak smrzavanja i odmrzavanja [4]

3.1.3. Djelovanje požara

Beton je materijal koji ne gori i kod vrlo visokih temperatura ne ispušta štetne plinove ali dolazi do oštećenja same strukture betona. ˝Brzina i stupanj oštećenja ovisi o najvišoj temperaturi, vremenu izloženosti, sastojcima betona i sadržaju vlage te veličini elementa˝ [1]. Na slici 6. prikazan je utjecaj visokih temperatura i vrsta agregata u odnosu na tlačnu čvrstoću betonskih elemenata. Tlačna čvrstoća se postepeno smanjuje do temperature od 500 ºC, nakon kojih se nagib povećava sve do 1000 ºC kada dolazi do potpunog gubitka čvrstoće konstrukcije [1]. Isto tako je vidljivo kako se konstrukcijski beton sa kalcitnim agregat bolje ponaša pri visokim temperaturama u odnosu na konstrukcijski beton sa silicijskim agregatom.



Slika 6. Utjecaj povišenih temperatura i vrste agregata na tlačnu čvrstoću betona [1]

3.2. Korozija čelika

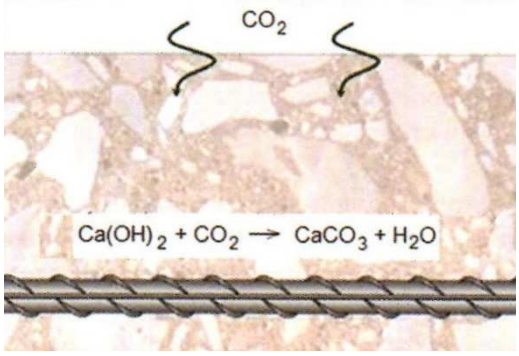
Konstrukcije od betona su u većini slučajeva armirane čelikom za armiranje ili prednapete čelikom za prednapinjanje. Čelik za armiranje u betonu je zaštićen slojem koji se formira ukoliko je pH betona veći od 12, te on predstavlja pasivnu zaštitu čelika za armiranje. Pojedini utjecaji iz okoliša mogu ugroziti pasivni zaštitni sloj betona te se stvaraju uvjeti za nastanak korozije. Hrđa kao produkt korozije povećava volumen čelika u betonu te dolazi do pukotina i odlamanja zaštitnog sloja betona [1]. Ukoliko dođe do odlamanja zaštitnog sloja betona, čelik u betonu ostaje izložen što dovodi do bržeg napredovanja korozije i u konačnici je ugrožena cjelovitost konstrukcije. Naspram drugih mehanizama koji ugrožavaju cjelovitost betonskih konstrukcija, koroziju čelika je teško izbjeći ili kontrolirati te se smatra najvećim uzročnikom propadanja armiranobetonskih konstrukcija.

Pojavu korozije možemo promatrati kroz dva perioda, period inicijacije tj. pobude i period propagacije tj. razvoja korozije. Za period inicijacije karakteristični su procesi karbonatizacije i prodora klorida, a tek nakon korozije betona uslijed tih procesa nastupa proces korozije odnosno period propagacije [4].

3.2.1. Karbonatizacija

Uzročnik karbonatizacije je ugljikov dioksid koji prodire u beton i reagira s kalcijevim hidroksidom, C-S-H gelom i ionima alkalija i kalcija iz cementnog kamena, a kao posljedica tih reakcija dolazi do smanjenja pH vrijednosti. Ugljikov dioksid CO_2 u kontaktu s vodom reagira s vapnom $Ca(OH)_2$ tvoreći kalcijev karbonat $CaCO_3$ i dolazi do izdvajanja vode (slika 7.) (18) [1].

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \tag{18}$$



Slika 7. Karbonatizacija [1]

Kalcijev karbonat uzrokuje skupljanje cementnog kamena i smanjuje pH vrijednosti što dovodi do ugrožavanja pasivne zaštite armature u betonu. „Vrijednosti pH-faktora u betonu, koje su manje od 9,5, uništavaju pasivizirajući sloj, čime je ispunjen uvjet za aktivnu koroziju. Karbonatizirani beton u pravilu ima pH oko 9“ [4].

Vlažnost betona je isto važan faktor koji utječe na proces karbonatizacije. Ako je vlažnost manja od 30 % neće doći do procesa karbonatizacije jer količina vlage nije dovoljna za to, a isto tako do karbonatizacije neće doći pri vlažnosti od 100 % jer je na taj način spriječen prolaz CO_2 u beton [4].

3.2.2. Prodor klorida

Kloridni ioni u kontaktu sa visokoalkalnom pornom vodom oko armature u betonu razaraju prirodni zaštitni sloj armature. Pri kontaktu nastaje složeni spoj koji uzrokuje točkastu koroziju. U isto vrijeme se odvija proces pasivizacije, tako da će do nastavka procesa korozije doći ukoliko je količina kloridnih iona velika s obzirom na ione hidroksida. Kritična vrijednost Cl^-/OH^- nakon koje dolazi do pojave točkaste korozije iznosi 0,6 pri temperaturi od 20 ºC [4]. Točkasta korozija nastupiti će u području gdje postoji mala količina kisika.

Prodor klorida kroz beton može se opisati drugim Frickovim zakonom [4] (19):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{19}$$

gdje je:

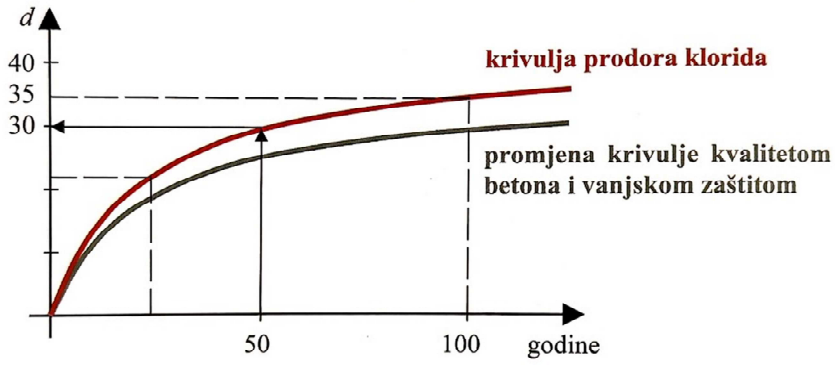
C - koncentracija klorida $[\mathrm{g/m^3}]$

t - vrijeme $[s]$

D - koeficijent difuzije $[\mathrm{m^2}/s]$

x - koordinata smjera procesa difuzije [m].

Prodor klorida u betonu moguće je prilagoditi kvalitetom betona i vanjskom zaštitom. Na slici 8. prikaza je krivulja prodora klorida u ovisnosti o debljini zaštitnog sloja u vremenu i njena prilagodba kvalitetom betona i vanjskom zaštitom [4].



Slika 8. Krivulja prodora klorida [4]

3.2.3. Proces korozije

Dva uvjeta moraju biti zadovoljena da bi nastupio proces korozije, jedan je prisutnost kisika, a drugi je vlažnost.

„Korozija je elektrokemijski proces. U slučaju korozije armature uslijed karbonatizacije betona dolazi do opće korozije, a u slučaju korozije armature uslijed prodora klorida korozija je lokalna“ [4].

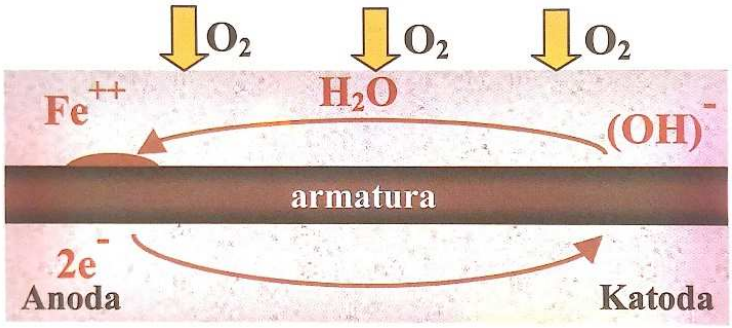
Kod procesa korozije (slika 9.) uzrokovane karbonatizacijom betona javljaju se dvije elektrokemijske reakcije, anodna i katodna. „Na anodi se željezo otapa u pornoj vodi i formira se ion željeza i slobodni elektroni“ [4]. Reakcija je slijedeća (20) [4]:

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \tag{20}$$

„Oni putuju prema katodi gdje reagiraju s vodom i kisikom i tako stvaraju hidroksilne ione“ [4]. Produkt toga je slijedeći (21) [4]:

$$2e^{-} + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2(OH)^{-} \tag{21}$$

Produkt korozije je hrđa koja nastaje zbog reakcije iona željeza s kisikom. Njen volumen je veći od volumena pasivne armature što uzrokuje povećanje naprezanja, te raspucavanje i otpadanje zaštitnog sloja betona (slika 10.) [4].



Slika 10. Proces korozije armature [4]

Slika 9. Odlamanje zaštitnog sloja betona [4]

Uvjeti koji trebaju biti zadovoljeni da bi proces započeo su [4]:

- razlika električnog potencijala između anode i katode
- dovoljni sadržaj kisika na katodi
- vlažan beton.

Uslijed korozije uzrokovane karbonatizacijom, na čeliku nastaju manje anode i katode koje dovode do ravnomjernog korodiranja armaturnih šipki.

Kod korozije uzrokovane prodorom klorida ukoliko dođe do oštećenja konstrukcije koja zahtjeva sanaciju, potrebno je ukloniti kloride zajedno sa slojem betona jer se kloridi ne troše. Isto tako, kloridi povećavaju vlažnost betona što pogoduje uvjetu nastanka korozije. Daljnja brzina korozije određena je električnim otporom betona i prisutnosti kisika iz okoline.

Korozija uslijed prodora klorida je opasnija od korozije uslijed pada alkaliteta ispod 9,5, a razlozi su sljedeći [4]:

- kloridi uzrokuju brzo uništavanje pasivnog zaštitnog sloja betona što izaziva brzo napredovanje korozije
- posljedice korozije možemo uočiti tek kada je proces već dosta napredovao.

Apsolutna granica dopuštenog sadržaja klorida u betonu iznosi 0,4 % s obzirom na količinu cementa.

Posljedica korozije je smanjenje poprečnog presjeka armaturnih šipki što uzrokuje smanjenje nosivosti betonske konstrukcije. Preostala nosivost i trajnost bitno ovise o tome koliki dio površine poprečnog presjeka armature je preostao. Rezervna nosivost je iskorištena ukoliko se površina armature smanjila za 10 do 25 %, a veće smanjenje smatramo neprihvatljivim. Koeficijent rezervne nosivosti izvodi se kao (22) [4]:

$$v = \frac{R}{s} \text{ x } 100 \tag{22}$$

gdje je:

v - koeficijent rezervne nosivosti [%]

R - postojeća nosivost [N/mm^2]

s – opterećenje [N/mm^2].

Razine oštećenja armiranobetonskih konstrukcija uslijed korozije armature podijeljene su 5 kategorija (slika 11.) [4].

Tip razine oštećenja	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Promjene boje	Postoje	✓	✓	✓	✓
Pukotine	Malo uzdužnih	Uzdužne, malo poprečnih	Opsežne Duge	✓	✓
Ljuštenje	-	Malo	Intenzivno	Armatura gubi vezu s betonom	✓
Smanjenje presjeka armature	-	-5 %	-10 %	-25 %	Poprečna armatura prosječno, glavna djelomično
Odlamanje	-	-	-	Vjerojatno	Prisutno

Slika 11. Klasifikacija AB konstrukcija [4]

Kada je koeficijent nosivosti $v < 0{,}5$ oštećenja spadaju u A ili B kategoriju i potrebno je provoditi monitoring, te na vrijeme provesti sanaciju. Ako je koeficijent nosivosti $v > 0{,}5$ oštećenja spadaju u C ili D kategoriju te je potrebno pristupiti hitnoj sanaciji.

Monitoring korozije provodimo razornim i nerazornim metodama. Razorne metode primjenjujemo jedino ako je zaštitni sloj betona oštećen. U ranoj fazi, kada je zaštitni sloj betona neoštećen primjenjuju se nerazorne metode. Neke od nerazornih metoda ispitivanja konstrukcija od betona su [5]: vizualni pregled, ispitivanje uz pomoć sklerometra, ispitivanje metodom ultrazvuka, tragač armature itd.

4. ISPITIVANJE PARAMETARA TRAJNOSTI

4.1. Ispitivanje vodopropusnosti

Ispitivanje vodopropusnosti provodi se prema normi HRN EN 12390-8. Vodopropusnost betona dobivamo određivanjem dubine prodiranja vode pod tlakom. Uzorci koji se ispituju su betonske kocke dimenzija 15 × 15 × 15 cm njegovane u vodi 28 dana pri temperaturi od 20 ± 2 ºC ili betonski valjci promjera 15 cm i visine 30 cm.

Njegovani uzorci postavljaju se u uređaj za ispitivanje (slika 12.) te se izlažu pritisku vode od 500 kPa u trajanju od 72 sata. Nakon 72 sata uzorci se uklanjaju iz uređaja za ispitivanje vodopropusnosti i cijepaju se u uređaju za ispitivanje čvrstoće. Kod cijepanja je važno da je strana uzorka koja je bila izložena vodi okrenuta prema dolje. Na rascijepanom uzorku je potrebno označiti trag prodiranja vode i izmjeriti najveću dubinu prodiranja.

Slika 12. Uređaj za ispitivanje vodopropusnosti [6]

4.2. Ispitivanje plinopropusnosti

Laboratorijsko ispitivanje plinopropusnosti još uvijek nije normirano ali postoje preporuke u kojima je opisan proces ispitivanja. Cembureau, europsko udruženje proizvođača cementa preporuča ispitivanje plinopropusnosti na temelju propusnosti kisika. Metoda se zasniva na Haugen – Poiseuilleovom odnosu pri kojem voda u stacionarnim uvjetima teče pod tlakom kroz pore materijala.

Uzorci koji se ispituju su valjkastog oblika, moraju biti ispravno njegovani, te ne smiju sadržavati pukotine. Ispitivanje se provodi na način da se uzorak postavi u gumeni obruč na predviđeno mjesto u uređaju (slika 13.), te se uzorak pričvrsti aluminijskim diskom. Nakon toga zatvaramo komoru, te je učvršćujemo vijcima. Gumeni obruč je potrebno napuhati kako bi se onemogućio prolazak plina oko uzorka. Epruvete se pune mješavinom vode i sapunice, tlak kisika se namješta na 1.5 bara i otvara se ventil na epruvetama. Mjeri se vrijeme koje je potrebno da mjehurić zraka prijeđe put od početne točke do graduiranog dijela epruvete, te se ispitivanje provodi sve dok se u dva uzastopna mjerenja ne dobije razlika u protoku koja je manja od 3 %, jer smatramo da je tada tečenje stacionarno. Plinopropusnost se ispituje na vrijednost tlaka od 1.5, 2, 2.5, 3 i 3.5 bara.

Slika 13. Uređaj za ispitivanje plinopropusnosti

Protok plina izračunava se prema izrazu (23) [6]:

$$Q_f = \frac{V_f}{T_{0-1}} \tag{23}$$

gdje je:

Q_f - protok plina [m^3/s]

V_f - referentni volumen epruvete [m^3]

T_{0-1} - vrijeme koje je potrebno da mjehurić kisika prijeđe put od nule do graduiranog dijela epruvete [s].

Koeficijent propusnosti kisika izračunava se prema slijedećem izrazu (24) [6]:

$$K_{1.5} = \frac{2Q_f p_0 H\eta}{A(p^2 - {p_a}^2)} \tag{24}$$

gdje je:

$K_{1.5}$ - koeficijent propusnosti za vrijednost tlaka od 1.5 bara $[\mathrm{m}^2]$

Q_f - protok plina $[\mathrm{m}^3/s]$

H - visina uzorka [m]

η - dinamička viskoznost fluida $[\mathrm{N/m}^2]$

p - apsolutni ulazni tlak $[Pa]$

A - površina poprečnog presjeka uzorka $[\mathrm{m}^2]$

p - apsolutni ulazni tlak $[Pa]$

p_a i p_0 - atmosferski tlak $[Pa]$.

Prosječni specifični koeficijent prolaska kisika proračunavamo prema slijedećem izrazu (25) [6]:

$$K = \frac{K_{1.5} + K_2 + K_{2.5} + K_3 + K_{3.5}}{5} \tag{25}$$

gdje je:

K - prosječni specifični koeficijent prolaska kisika $[\mathrm{m}^2]$

$K_{1.5}$, K_2, $K_{2.5}$, K_3, $K_{3.5}$ - koeficijenti prolaska kisika za vrijednosti tlaka od 1.5, 2, 2.5, 3 i 3.5 bara $[\mathrm{m}^2]$.

4.3. Ispitivanje otpornosti na ciklično izlaganje smrzavanju i odmrzavanju

Laboratorijsko ispitivanje se provodi prema normi HRN CEN TS 12390/9:2006. Uzorci koje ispitujemo su betonske kocke dimenzija 10 × 10 × 10 cm koje moraju biti stare 27 dana. Ispitivanje započinjemo na način da uzorcima izmjerimo masu te ih smjestimo u posudu sa međusobnim razmakom od 10 mm. Posudu ispunjavamo destiliranom vodom koja prekriva uzorke za 25 ± 5 mm. Uzorke puštamo u posudi 24 sata, te se nakon toga izmjeri masa saturiranih uzoraka i određuje količina apsorbirane vode. Postotak apsorbirane vode određen je izrazom (26) [7]:

$$L = \frac{m_{28D} - m_{27D}}{m_{27D}} * 100 \tag{26}$$

gdje su:

L - apsorbirana voda [%]

m_{27D} - masa suhog uzorka starog 27 dana [g]

m_{27D} - masa saturiranog uzorka starog 28 dana [g].

Nakon toga uzroke smještamo u klimatski kabinet (slika 14.) u posudu sa vodom, te se pokreće ciklus smrzavanja i odmrzavanja. Jedan ciklus se provodi 24 sata, od kojih se 16 sati uzorci smrzavaju, a 8 sati odmrzavaju. Provodi se ukupno 56 ciklusa, te je nakon 7 ± 1, 14 ± 1, 28 ± 1, 42 ± 1 i 56 ciklusa uzorke potrebno provjeriti, ukloniti otrgnute komade sa uzorka i zamijeniti vodu u uređaju. Otrgnute komade je potrebno osušiti do stalne mase (110 ± 10 ºC) i izvagati, a količinu oštećenja izračunavamo sljedećim izrazom (27) [7]:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + m_{c+f+b} \tag{27}$$

gdje su:

$m_{s,n}$ - masa izgubljenog materijala u n mjerenju [g]

$m_{s,before}$ - masa izgubljenog materijala iz prethodnog mjerenja [g]

m_{c+f+b} - masa odvojenog materijala koji je osušen do stalne mase [g].

Nakon toga izračunavamo postotak izgubljenog materijala za vrijeme ispitivanja (28) [7]:

$$P = \frac{m_{s,n}}{m_0} \text{ x } 100 \tag{28}$$

gdje su:

P - izgubljeni materijal [%]

$m_{s,n}$ - masa izgubljenog materijala u n mjerenju [g]

m_0 - ukupna masa suhih uzoraka starih 27 dana [g].

Slika 14. Klimatski kabinet [8]

4.4. Ispitivanje prodora klorida

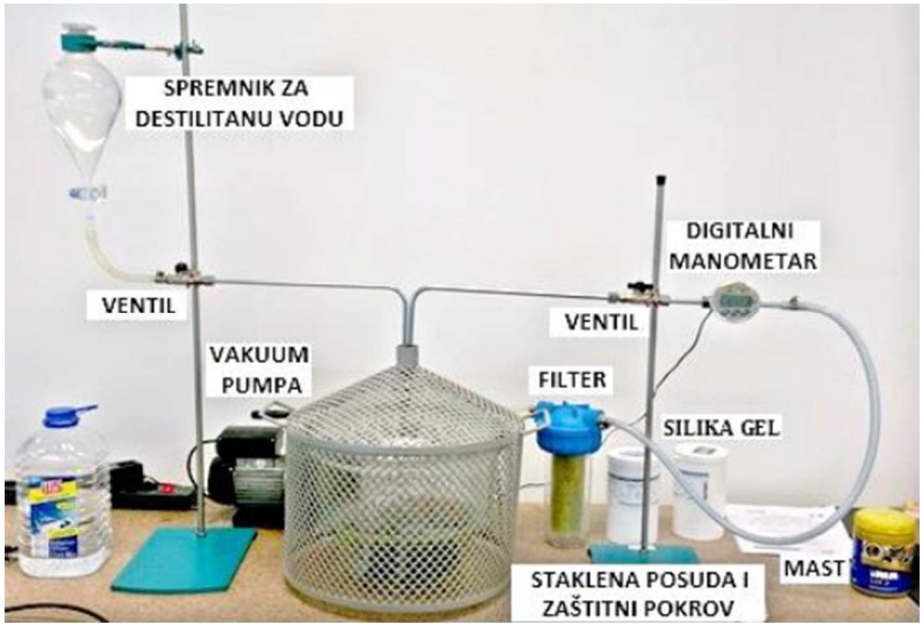
Laboratorijsko ispitivanje se provodi prema normi ASTM C 1202 metodom brze penetracije klorida koju je razvio Whiting 1981. godine. Metoda se bazira na procjeni električne provodljivosti uzoraka, na način da pomoću dane korelacije dobivene dugotrajnim ispitivanjem prodora klorida dobivamo približnu otpornost uzoraka na prodor klorida.

„Napon od 60 V istosmjerne struje održava se preko krajeva uzorka (baza), od kojih je jedan uronjen u otopinu natrijevog klorida (NaCl), drugi u otopinu natrijevog hidroksida

(NaOH). Utvrđeno je da je ukupni naboj, iskazan u mjernoj jedinici Coulomb, povezan s otporom uzorka na prodor iona klorida“ [9].

Ispitivanje se provodi na uzorcima valjka dimenzija 100 × 50 mm, starosti 28 dana pomoću uređaja kojim se mjeri prodor iona klorida. Ispitivanja se sastoji se od tri faze: pripremne faze koja obuhvaća saturiranje uzorka, pripremanje otopina i faze ispitivanja mjerenja prolaska struje kroz uzorak.

Saturiranje uzorka započinje premazivanjem plašta valjka silikonom. Nakon što se silikon osuši, uzorci se postavljaju u staklenu posudu. Nakon što su svi dijelovi opreme (slika 15.) spojeni, pokreće se vakuum pumpa i započinje proces isušivanja uzorka. Nakon 3 sata otvara se ventil koji omogućava ulazak destilirane vode u posudu, te je potrebno dodati toliko destilirane vode da uzorci budu kompletno prekriveni. Nakon još sat vremena rada pumpe, ona se gasi i omogućava se ulazak zraka u posudu, te se uzorci prekriveni vodom tako ostavljaju 18 ± 2 h.



Slika 15. Oprema za saturiranje uzoraka [9]

Nakon saturiranja uzoraka, potrebno je pripremiti 1 litru natrijevog klorida (NaCl) i natrijevog hidroksida (NaOH).

Ispitivanje uzoraka započinje postavljanjem uzoraka u kućišta naponskih ćelija od pleksiglasa (slika 16.), s kojim se povezuju silikonom. Stegama se sprječava odvajanje kućišta od uzorka. Nakon što se silikon osušio, prethodno pripremljene otopine ulijevaju se u naponske

ćelije. U ćeliju negativnog pola ulijeva se natrijev klorid (NaCl), a u ćeliju pozitivnog pola natrijev hidroksid. Oba pola se povezuju žicama s uređajem koji isporučuje istosmjernu struju napona 60 V. Cijeli ciklus traje 6 h nakon kojih se dobivaju rezultati ispitivanja. Rezultati ispitivanja ocjenjuju se prema vrijednostima prikazanima u tablici 1.

Slika 16. Uzorak u naponskoj čeliji [9]

Tablica 1. Vrednovanje rezultata ispitivanja s obzirom na prolazak električnog naboja [9]

Prolazak električnog naboja Q [Coulomb]	Propusnost iona klorida
> 4000	Visoka
2000 - 4000	Srednja
1000 - 2000	Slaba
100 - 1000	Vrlo slaba
< 100	Beznačajna

Ispitivanje na terenu provodi se prema normi AASHTO 260 – Standard Method for Sampling and Testing Chloride Ion in Concrete Raw Materials [10]. Uzorci se uzimaju na način da se betonski element koji ispitujemo buši na jednom mjestu s tri veličine svrdala na 3 različite dubine, prikuplja se prah koji je nastao i sprema se u vrećice za uzrokovanje. Tijekom bušenja treba paziti na položaj armaturnih šipki. Uzorci se ispituju pomoću uređaja kojim se određuje sadržaj klorida po masi cementa. Prije samog ispitivanja uzoraka, sondu uređaja potrebno je kalibrirati. Kalibracija se izvodi uz pomoć pet različitih kiselina i za uspješno provedenu kalibraciju vrijednost generiranog električnog otpora treba biti unutar točno određenih granica. Sadržaj klorida određuje se tako što se uzorak praha mase 3 ± 0,1 g otopi u normiranoj kiselini, u mješavinu je potrebno uroniti sondu kojom se očita sadržaj klorida po masi cementa [10].

4.5. Ispitivanje otpornosti na abraziju

Laboratorijsko ispitivanje otpornosti na abraziju s pomoću Böhme-ovog uređaja izvodi se prema normi HRN EN 13892-3:2014. Uređaj (slika 17.) na kojem se provodi ispitivanje sastoji se od metalnog stola koji rotira i dijela koji pridržava uzorak, te nanosi opterećenje. Za početak ispitivanja na metalni stol se posipa abrazivni materijal, pijesak aluminijevog oksida. Uzorak se postavlja u držač, te započinje ciklus koji se sastoji od 22 rotacije uz opterećenje od 294 ± 3 N. Ispitivanje se sastoji od sveukupno 16 ciklusa. Nakon svakog ciklusa zamijeni se abrazivni materijal i uzorak se okrene za 90º po vertikali, a nakon 4 ciklusa uzorak je potrebno izvagati. Rezultat ispitivanja se dobiva uspoređujući mase uzoraka na za početku i kraju ispitivanja prema izrazu (29) [7]:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \tag{29}$$

gdje je:

ΔV - razlika u volumenu $[\mathrm{m}^3]$

Δm - razlika u masi [kg]

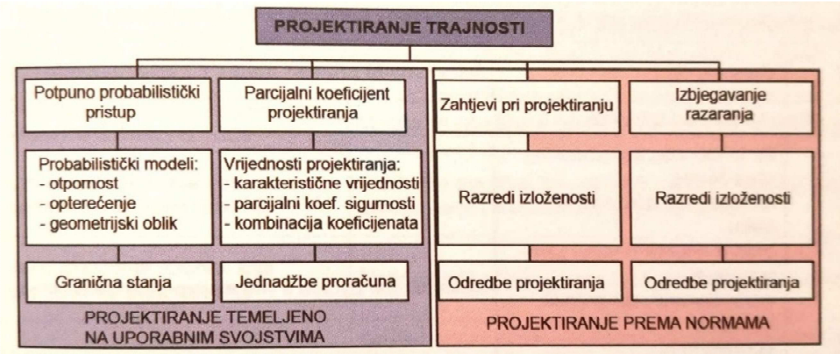
ρ - gustoća $[\mathrm{kg/m}^3]$.

Slika 17. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abraziju

5. OSIGURANJE TRAJNOSTI ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA

Trajnost konstrukcija se definira kao sposobnost konstrukcije da održi svoju stabilnost, funkciju i estetska svojstva uslijed djelovanja iz okoliša, bez značajnih oštećenja [1]. Kako je korozija najveći problem trajnosti, trajnost armiranobetonskih konstrukcija uvelike ovisi o zaštitnom sloju betona. Projektiranje armiranobetonskih konstrukcija dijeli se u dvije grupe (slika 18.) [1]:

- projektiranje trajnosti prema normama
- projektiranje trajnosti prema uporabnim svojstvima.



Slika 18. Grupe projektiranja trajnosti [1]

5.1. Projektiranje trajnosti prema normama

Projektiranje trajnosti provodi se prema normama HRN EN 206 i HRN EN 1990. Ovim pristupom uzimaju se u obzir zahtjevi za projektiranje sastava betona, zahtjevi za agregate i veziva te metode ugradnje i njege betona.

Postoji sveukupno 24 razreda izloženosti okolišu te su za svaki razred određeni minimalni zahtjevi koji moraju biti zadovoljeni (tablica 2. i 3.) [1].

Tablica 2. Razrada uvjeta okoliša prema HRN 1128 [1]

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

Tablica 3. Razredi izloženosti [1]

Razred	Opis okoliša	Informativni primjeri moguće pojave razreda izloženosti
1	**Nema rizika od korozije**	
X0	**Za beton bez armature ili ugrađenog metala; sve izloženosti osim onih u kojima postoji zamrzavanje/ odmrzavanje, abrazija ili kemijska agresivnost. Za beton s armaturom ili ugrađenim metalom: vrlo suho.**	Beton unutar zgrada s vrlo malom vlažnošću zraka.
2	**Korozija uzrokovana karbonatizacijom**	
Kada je beton s armaturom ili drugim ugrađenim metalom izložen zraku i vlazi, izloženost treba svrstati u razrede kako slijedi:		
XC1	**Suho ili trajno vlažno**	Beton unutar zgrada s malom vlažnošću zraka Beton stalno uronjen u vodu
XC2	**Vlažno, rijetko suho**	Površine betona izložene dugotrajnom kontaktu s vodom Mnogi temelji
XC3	**Umjerena vlažnost**	Beton unutar zgrada s umjerenom ili velikom vlažnošću zraka Vanjski beton zaštićen od kiše
XC4	**Ciklički vlažno i suho**	Površine betona izložene kontaktu s vodom koje ne pripadaju razredu izloženosti XC2
3	**Korozija uzrokovana kloridima**	
Kada je beton, koji sadržava armaturu ili drugi ugrađeni materijal, u dodiru s vodom koja sadržava kloride, uključujući soli za odmrzavanje, koji nisu iz mora, razrede izloženosti treba svrstati kako slijedi:		
XD1	**Umjerena vlažnost**	Površine betona izložene kloridima iz zraka
XD2	**Vlažno, rijetko suho**	Bazeni za plivanje Elementi betona izloženi industrijskim vodama koje sadržavaju kloride
XD3	**Ciklički vlažno i suho**	Dijelovi mostova izloženi prskanju vode koja sadržava kloride Pločnici – kolničke konstrukcije Ploče javnih garaža
4	**Korozija uzrokovana kloridima iz morske vode**	
Kada je beton koji sadržava armaturu ili drugi ugrađeni metal u dodiru s kloridima iz morske vode ili solima iz mora nošenim zrakom, razrede izloženosti treba svrstati kako slijedi:		
XS1	**Izložen solima iz zraka, ali ne u izravnom dodiru s morskom vodom**	Konstrukcije u blizini ili na obali
XS2	**Stalno uronjeno**	Dijelovi pomorskih konstrukcija
XS3	**U područjima plime i oseke i prskanja vode**	Dijelovi pomorskih konstrukcija

5	**Korozija uzrokovana zamrzavanjem i odmrzavanjem sa ili bez sredstva za odmrzavanje**	
Kada je beton izložen značajnom djelovanju zamrzavanja i odmrzavanja u vlažnom stanju, razrede izloženosti treba svrstati kako slijedi:		
XF1	**Umjereno zasićenje vodom, bez sredstva za odmrzavanje**	Vertikalne površine betona izložene kiši i zamrzavanju
XF2	**Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje**	Vertikalne površine betona cestovnih konstrukcija izložene zamrzavanju i sredstvima za odmrzavanje
XF3	**Jako zasićenje vodom, bez sredstva za odmrzavanje**	Horizontalne površine betona izložene kiši i zamrzavanju
XF4	**Jako zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje**	Ceste i kolnici mostova izloženi sredstvima za odmrzavanje Betonske površine izložene izravnom prskanju vode koja sadržava sredstva za odmrzavanje i izložene zamrzavanju Područja plime i oseke kod pomorskih konstrukcija izloženih zamrzavanju
6	**Kemijska korozija**	
Kada je beton izložen kemijskom djelovanju koje se javlja iz prirodnog tla i podzemne vode kako je dano u tablici 2 (HRN EN 206), razrede izloženosti treba svrstati kako dolje slijedi. Svrstavanje morske vode u razrede ovisi o geografskoj lokaciji, pa treba primijeniti razvrstavanje koje vrijedi na mjestu uporabe betona.		
XA1	**Slabo kemijski agresivni okoliš prema normi HRN EN 206, tablica 2**	Prirodno tlo i podzemna voda
XA2	**Umjereno kemijski agresivni okoliš prema normi HRN EN 206, tablica 2**	Prirodno tlo i podzemna voda
XA3	**Jako kemijski agresivni okoliš prema normi HRN EN 206, tablica 2**	Prirodno tlo i podzemna voda
7	**Beton izložen habanju**	
XM1	**Umjereno habanje**	Prometne površine za vozila s pneumatskim kotačima
XM2	**Znatno habanje**	Prometne površine za vozila s punim gumenim kotačima, za lako i teško prometno opterećenje i za brzi protok vode
XM3	**Vrlo jako habanje**	Prometne površine za viličare s plastičnim kotačima, za vrlo teško prometno opterećenje i za brzi protok vode koja nosi pijesak

Projektiranje prema normama ima nedostataka, npr. ne razmatraju se [1]:

- građevine duljeg životnog vijeka
- novi materijali
- nove vrste konstrukcija ili elemenata.

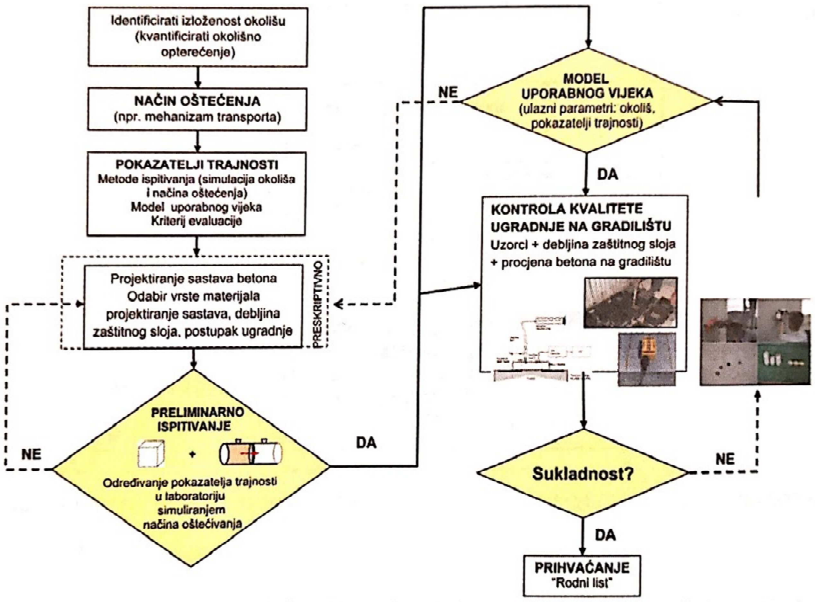
Najveći problemi nastaju ako se nakon analize rezultata 28-dnevnog ispitivanja utvrde nedostaci. Tada je konstrukcija već izvedena i troškovi popravka su iznimno veliki kada ih usporedimo s cijenom samog betona. Uobičajeni popravak obuhvaća ojačanje ili zamjenu samog zaštitnog sloja betona.

5.2. Projektiranje trajnosti prema uporabnim svojstvima

„Projektiranje utemeljeno na uporabnim svojstvima sastoji se od [1]:

- projektiranja parametara materijala u uporabi
- projektiranja dimenzije zaštitnog sloja betona. “

Pristup projektiranju prema uporabnim svojstvima (slika 19.) bazira se na parametrima materijala koji se ispituju u laboratoriju i nakon izvođenja na gradilištu, te geometrijskim karakteristikama poprečnog presjeka elementa [1]. Važno je da su pri takvom projektiranju u uputama jasno definirane metode ispitivanja i kriteriji prihvatljivosti.



Slika 19. Postupci projektiranja prema uporabnim svojstvima [1]

5.2.1. Parametri materijala

Pri određivanju trajnosti konstrukcija propusnost materijala najvažniji je faktor. Iz tog razloga svojstva materijala određuju se u laboratoriju i na gradilištu metodama koje su definirane normama ili metodama koje su već dugo u upotrebi i smatraju se dovoljno preciznima. Posao projektanta je da izračuna vrijednost pokazatelja trajnosti kojim se postiže predviđeni životni vijek projektirane konstrukcije, te prihvaća metode ispitivanja, kriterije prihvatljivosti i razine ispitivanja određenog projekta [1]. Na gradilištu je potrebno ispitati beton i utvrditi je li u skladu s projektiranim specifikacijama. „Bilježi se stvarno stanje u "početnom/rodnom listu" (engl. birth certifikate) konstrukcije, koji je sastavni dio pri tehničkom pregledu građevine [1]." Da bi se projektiranje trajnosti prema uporabnim svojstvima smatralo uspješnim, potrebno je utvrditi normirane granične vrijednosti i metode ispitivanja svojstava betona, te vezu svojstava koja su zahtijevana razredom okoliša i zahtjevanog uporabnog vijeka.

U tablicama 4. - 6. prikazane su vrijednosti dobivene normiranim metodama ispitivanja uzoraka koje predstavljaju srednju vrijednost mjerenja više uzoraka [1]:

Tablica 4. Trajnosni parametri i granične vrijednosti za razrede izloženosti [1]

Razred izloženosti okolišu	Zahtijevani životni vijek / Vrsta konstrukcije	
	Od 50 do 100 godina / Zgrade/ inženjerske konstrukcije	Od 100 do 120 godina / Velike konstrukcije
X0 i XC1	P_{water} < 14 %	P_{water} < 12 % K_{gas} < 100 × 10^{-18} m²
XC2	P_{water} < 14 %	P_{water} < 12 % K_{gas} < 100 × 10^{-18} m²
XC3	P_{water} < 12 % K_{gas} < 100 × 10^{-18} m²	P_{water} < 9 % K_{gas} < 10 × 10^{-18} m²
XC4	P_{water} < 12 % K_{liq} < 0,1 × 10^{-18} m²	P_{water} < 9 % K_{gas} < 10 × 10^{-18} m² K_{liq} < 0,01 × 10^{-18} m²
XS1	P_{water} < 11 % $D_{app(mig)}$ < 2 × 10^{-12} m²/s K_{liq} < 0,1 × 10^{-18} m²	P_{water} < 9 % $D_{app(mig)}$ < 1 × 10^{-12} m²/s K_{gas} < 10 × 10^{-18} m² K_{liq} < 0,01 × 10^{-18} m2
XS2	P_{water} < 13 % $D_{app(mig)}$ < 7 × 10^{-12} m²/s	P_{water} < 12 % $D_{app(mig)}$ < 5 × 10^{-12} m²/s
XS3	P_{water} < 11 % $D_{app(mig)}$ < 3 × 10^{-12} m²/s K_{liq} < 0,1 × 10^{-18} m²	P_{water} < 10 % $D_{app(mig)}$ < 2 × 10^{-12} m²/s K_{gas} < 100 × 10^{-18} m² K_{liq} < 0,05 × 10^{-18} m²

Legenda:
P_{water} poroznost betona prema HRN EN 12390-7
K_{liq} vodopropusnost betona u laboratoriju prema HRN EN 12390-8
K_{gas} plinopropusnost betona u laboratoriju prema HRN EN 993-4
$D_{app(mig)}$ ispitivanje difuzije klorida prema NT BUILD 492

Tablica 5. Razredi trajnosti i granične vrijednosti indeksa trajnosti [1]

Razred trajnosti	OPI* (log skala)	Sorpcija ($mm/h^{0,5}$)	Vodljivost (mS/cm)
Odličan	> 10,0	< 6	< 0,75
Dobar	9,5 – 10,0	6 – 10	0,75 – 1,50
Loš	9,0 – 9,5	10 – 15	1,50 – 2,50
Vrlo loš	< 9,0	> 15	> 2,50
*OPI - indeks propusnosti kisika (engl. Oxygen Permeability Index)			

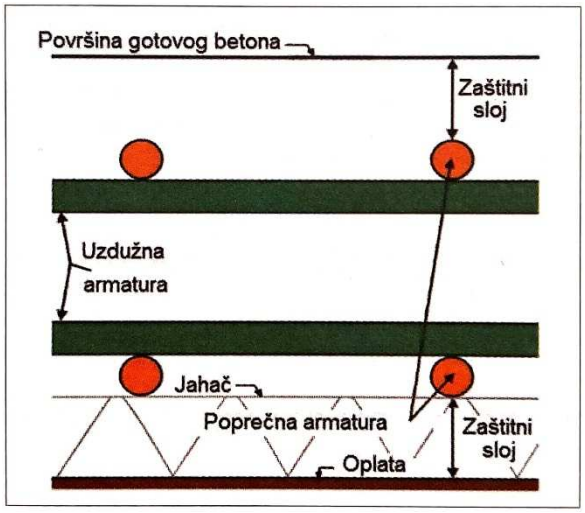
Tablica 6. Najveći preporučeni koeficijenti difuzije [1]

Zaštitini sloj [mm]		Najveća vrijednost $D_{RCM,28}$ [10^{-12} m^2/s]							
Čelik za armiranje	Čelik za prednapinjanje	CEM I		CEM I + III 25 – 50 % S		CEM III 50 – 80 % S		CEM II/ B-V CEM I + 20 – 30 % V	
		XD1 XD2 XD3 XS1	XS2 XS3	XD1 XD2 XD3 XS1	XS2 XS3	XD1 XD2 XD3 XS1	XS2 XS3	XD1 XD2 XD3 XS1	XS2 XS3
35	45	3,0	1,5	2,0	1,0	2,0	1,0	6,5	5,5
40	50	5,5	2,0	4,0	1,5	4,0	1,5	12	10
45	55	8,5	3,5	6,0	2,5	6,0	2,5	18	15
50	60	12	5,0	9,0	3,5	8,5	3,5	26	22
55	65	17	7,0	12	5,0	12	5,0	36	30
60	70	22	9,0	16	6,5	15	6,5	47	39

5.2.2. Zaštitni sloj betona

Zaštitni sloj betona (slika 20.) predstavlja debljinu betona između vanjske površine betona i vanjskog dijela armature. Debljina zaštitnog sloja betona mora biti takva da osigura [1]:

- prijenos sila prionjivošću
- dimenzije zaštitnog sloja iz uvjeta trajnosti
- dimenzije zaštitnog sloja betona iz uvjeta otpornosti na požar.



Slika 20. Prikaz zaštitnog sloja betona [1]

Najmanja debljina zaštitnog sloja betona određuje se s obzirom na razred izloženosti okolišu i razredu konstrukcije prema slijedećim izrazima (30), (31) [1]:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \tag{30}$$

gdje je:

c_{nom} - nazivna veličina zaštitnog sloja [mm]

c_{min} - najmanja veličina zaštitnog sloja [mm]

Δc_{dev} - dodana vrijednost [mm].

$$c_{min} = max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10\ mm\} \tag{31}$$

gdje je:

$c_{min,b}$ - najmanji zaštitni sloj zbog zahtjeva prianjanja [mm]

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

$\Delta c_{dur,\gamma}$ - dodatni element sigurnosti [mm]

$\Delta c_{dur,st}$ - smanjenje najmanjeg zaštitnog sloja za upotrebu nehrđajućeg čelika [mm]

$\Delta c_{dur,add}$ - smanjenje najmanjeg zaštitnog sloja za upotrebu dodatne zaštite [mm].

5.2.2.1. Prijenos sila prionjivošću

Kako bi se osigurao siguran prijenos sila, najmanja debljina zaštitnog sloja (tablica 7.) mora biti veća od promjera uzdužne armature d_s, koji označava promjer armature ili zaštitne cijevi natege, ili zamjenski promjer d_{sv} kod armature u snopu. Izračunava se prema izrazu (32) [1]:

$$d_{sv} = d\ x\ n \tag{32}$$

gdje je:

d_{sv} - zamjenski promjer armature u snopu [mm]

d - promjer armature [mm]

n - broj armaturnih šipki u snopu.

Tablica 7. Zahtjevi za najmanji zaštitni sloj $c_{min,b}$ [11]

Raspored šipki	Najmanji zaštitni sloj, $c_{min,b}$*
Razdvojene (pojedinačne)	Promjer šipke
U snopu	Istovrijedni promjer ϕ_h
*Ako je nazivni najveći promjer zrna agregata veći od 32 mm, $c_{min,b}$ treba povećati za 5 mm	

5.2.2.2. Dimenzije zaštitnog sloja iz uvjeta trajnosti

Najmanji zaštitni sloj betona $c_{min,dur}$ iz uvjeta trajnosti dobiva se s obzirom na uvjete okoliša i vrstu konstrukcije. Uobičajeni razred konstrukcije za konstrukciju predviđenog uporabnog vijeka od 50 godina je S4 za pojedine razrede tlačnih čvrstoća (tablica 8.), te izmjene razreda konstrukcije dane u tablici 9. [1].

Tablica 8. Najmanji razredi tlačnih čvrstoća [11]

	Razred izloženosti prema tablici 2.									
Korozija										
	Korozija zbog karbonatizacije				Korozija zbog klorida			Korozija zbog klorida iz morske vode		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Naznačeni najmanji razredi čvrstoća	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Oštećenje betona										
	Nema rizika	Zamrzavanje – odmrzavanje						Kemijski utjecaj		
	X0	XF1	XF2	XF3				XA1	XA2	XA3
Naznačeni najmanji razredi čvrstoća	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37				C30/37		C35/45

Tablica 9. Preporuke razredbe konstrukcije [1]

Kriterij	Razred izloženosti						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Proračunski uporabni vijek 100 godina	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2	Povećati razred za 2
Razred čvrstoće	≥ C30/37 Smanjiti razred za 1	≥ C30/37 Smanjiti razred za 1	≥ C35/45 Smanjiti razred za 1	≥ C40/50 Smanjiti razred za 1	≥ C40/50 Smanjiti razred za 1	≥ C40/50 Smanjiti razred za 1	≥ C45/55 Smanjiti razred za 1
Element pločaste geometrije (proces gradnje nema utjecaja na položaj armature)	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1
Osigurana posebna kontrola kvalitete proizvodnje betona	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1	Smanjiti razred za 1
NAPOMENE: 1. Razred čvrstoće i vodocementni omjer međusobno su povezani. Smije se razmotriti poseban sastav (vrsta cementa, vodocementni omjer, fina punila) s namjerom postignuća male propusnosti. 2. Ograničenje se smije smanjiti za jedan razred čvrstoće ako je uvučenoga zraka više od 4 %.							

Minimalna vrijednost zaštitnog sloja $c_{min,dur}$ dana je u tablici 10. ovisno o razredu konstrukcije i razredu izloženosti.

Tablica 10. Najmanja debljina zaštitnog sloja s obzirom na trajnost čelične armature [1]

Zahtjevi okoliša za $c_{min,dur}$ (mm)							
Razred konstrukcije	Razred izloženosti						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

5.2.2.3. Dimenzije zaštitnog sloja betona iz uvjeta otpornosti na požar

Za provjeru zadovoljava li konstrukcija normirane uvjete otpornosti za požar koriste se tablice prema HRN EN1992-1-2 pomoću kojih se provjeravaju dimenzije presjeka i zaštitnog sloja betona. Razlika između zaštitnog sloja betona i osnog razmaka koji se promatra pri projektiranju na požar je ta što je osni razmak udaljenost od osi armature do površine betona, a zaštitni sloj je udaljenost od vanjskog ruba armature do površine betona.

U tablicama 11. - 13. mogu se vidjeti najmanje preporučene dimenzije presjeka b_{min} i osni razmak armature za različite konstrukcijske elemente dobivene prema omjeru (33) [1]:

$$\frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d}} \leq 1 \tag{33}$$

gdje je:

$E_{fi,d}$ – proračunski učinak djelovanja za stanje požara

$R_{fi,d}$ – proračunska otpornost za stanje požara.

Tablica 11. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za nosive AB zidove [11]

Normirana požarna otpornost	Najmanje izmjere (mm) debljina zida/osni razmak (b_{min}/a)			
	μ_{fi} = 0,35		μ_{fi} = 0,70	
	Izložen s jedne strane μ_{fi} = 0,35	Izložen s dvije strane	Izložen s jedne strane	Izložen s dvije strane
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/45	200/45	210/55	300/55
REI 240	230/60	250/60	270/70	360/70
*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN EN 1992-1-1				

Tablica 12. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za nosive AB stupove [11]

Normirana požarna otpornost	Najmanje izmjere (mm) širina stupa/osni razmak (b_{min}/a)			
	Stup izložen požaru na više od jedne stane			Izložen na jednoj strani
	μ_{fi} = 0,20	μ_{fi} = 0,50	μ_{fi} = 0,70	μ_{fi} = 0,70
1	2	3	4	5
R 30	150/10*	150/10*	150/10*	100/10*
R 60	150/10*	180/10*	200/10*	120/10*
R 90	180/10*	210/10*	240/35	140/10*
R 120	200/40	250/40	280/40	160/45
R 180	240/50	320/50	360/50	200/60
R 240	300/50	400/50	450/50	300/60
*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN EN 1992-1-1				

Tablica 13. Približne vrijednosti najmanjih duljina i osnih razmaka za slobodno oslonjene AB i prednapete grede [11]

Normirana požarna otpornost	Najmanje izmjere (mm)				
	širina grede/osni razmak b_{min}/a – moguće kombinacije				Debljina hrpta b_w
1	2	3	4	5	6
R 30	80/25	120/15*	160/10*	200/10*	80
R 60	120/40	160/35	200/30	300/25	100
R 90	150/55	200/45	250/40	400/35	100
R120	200/65	240/55	300/50	500/45	120
R 180	240/80	300/70	400/65	600/60	140
R 240	280/90	350/80	500/75	500/70	160
*obično će biti mjerodavan zaštitni sloj prema normi HRN EN 1992-1-1					

5.2.2.4. Preporučene dimenzije širine pukotina

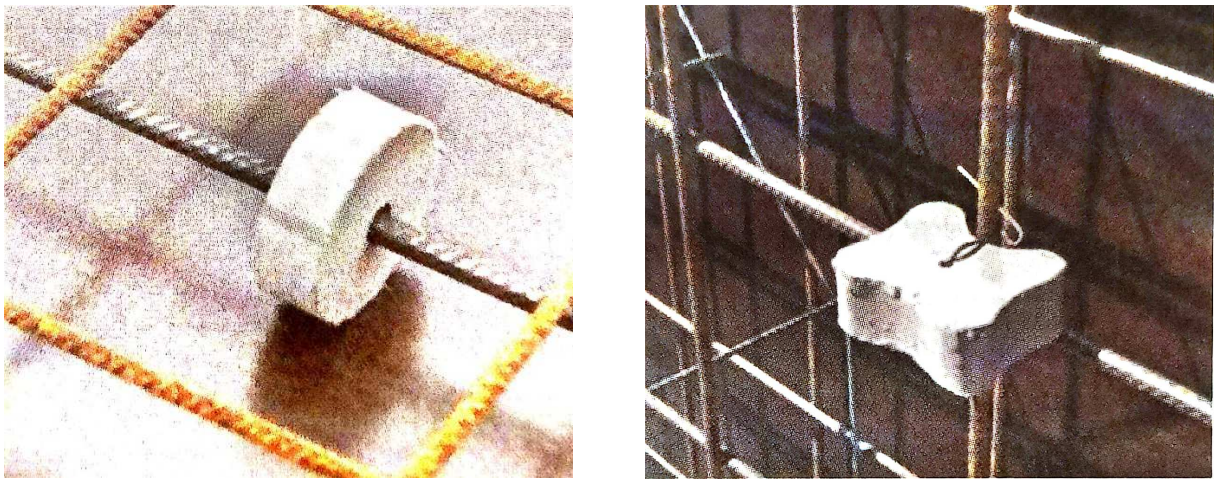
S aspekta trajnosti betona potrebno je uzeti u obzir maksimalne dozvoljene širine pukotina jer one doprinose bržem razvoju korozije armature. Preporučene vrijednosti prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Preporučene vrijednosti maksimalne dopuštene širine pukotina [1]

Razred izloženosti	**Armirani elementi i prednapeti elementi s neprianjajućim nategama**	**Prednapeti elementi s prianjajućim nategama**
	Nazovistalna kombinacija opterećenja	Učestala kombinacija opterećenja
X0, XC1	0,4[1]	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,4[2]
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		rastlačenje
[1]Za razrede izloženosti X0, XC1, širina pukotine nema utjecaja na trajnost tako da je navedeno ograničenje postavljeno radi osiguranja prihvatljivog izgleda. Ako nema zahtjeva za izgledom, ovaj kriterij se može povećati [2]Za ove razrede izloženosti treba dodatno provjeriti rastlačenje pod nazovistalnom kombinacijom opterećenja		

5.2.2.5. Izvedba projektirane dimenzije zaštitnog sloja betona

Kako bi se osigurala izvedba projektirane dimenzije zaštitnog sloja betona potrebno je ugraditi podmetače. Podmetači (slika 21.) mogu biti izrađeni od različitih materijala koji moraju osigurati dovoljnu prionjivost s betonom i u raznim geometrijskim oblicima kojima se osigurava stabilnost.



Slika 21. Primjeri podmetača [1]

6. STANJE PODRUČJA NA PRIMJERU KRČKOG MOSTA

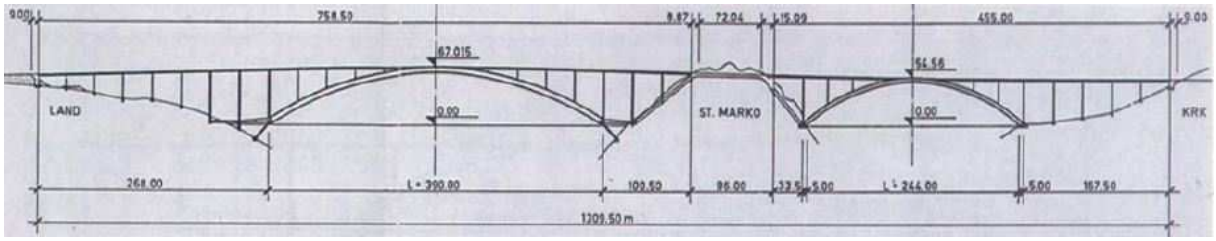
6.1. Povijest Krčkog mosta

Ideja izgradnje mosta koji povezuje otok Krk sa kopnom pojavila se pred kraj 1918. godine nakon završetka Prvog svjetskog rata. Četrdesetak godina kasnije krenulo se u detaljnije analize i razrade te ideje što je rezultiralo studijom koja je objavljena 1964. godine. U studiji su predložena 3 moguća idejna rješenja: tunel ispod mora, betonski gredni most s betonskim stupovima i čelični gredni most sa betonskim stupovima [13]. Godine 1971. krenulo se u izgradnju, položena je trasa i započeli su pripremni radovi, no ubrzo je došlo do prekida izgradnje. Nakon novog natječaja 1975. godine kao najbolje rješenje odabran je projekt lučne konstrukcije mosta projektanta Ilije Stojadinovića, a za izvođača su odabrane firme Mostogradnja, čiji je zadatak bio izgradnja glavnog rasponskog skopa i GP Hidroelektra koja je izvela temelje i kolničku konstrukciju. Izgradnja Krčkog mosta (slika 22.) započela je 1976. godine i završena je 1980. kada je most pušten u promet. Armiranobetonskom lučnom konstrukcijom Krčkog mosta oboren je rekord duljine armiranobetonskog luka za čak 85 metara. Potreba izgradnje Krčkog mosta vidjela se nedugo nakon puštanja u promet, a njegova važnost vidi se po tome što je otok Krk jedan od rijetkih otoka koji ne bilježi pad broja stanovnika.

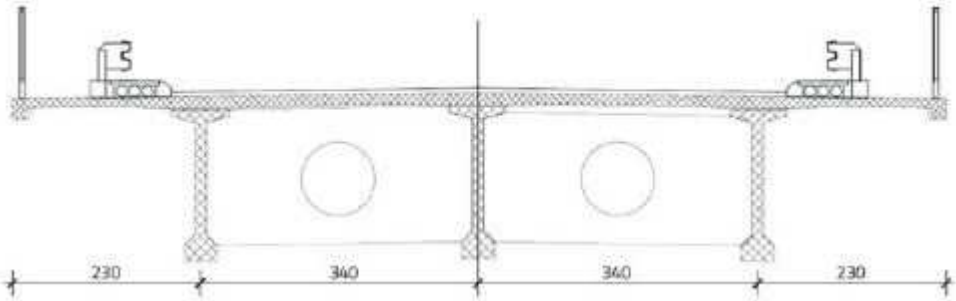
Slika 22. Krčki most [14]

6.2. Opis konstrukcije

Duljina mosta iznosi 1309,5 m (slika 23.), ukupne širine 11,4 m u koja se sastoji od kolnika širine 7,5 m, dvije pješačke staze širine 1,3 m i zaštitnog pojasa sa svake strane širine 0,65 m (slika 24.). Konstrukcija mosta se sastoji od dva luka, jednog manjeg raspona 244 metara kojim se premošćuje Burni kanal i većeg luka raspona 390 metara kojim se premošćuje Tihi kanal.

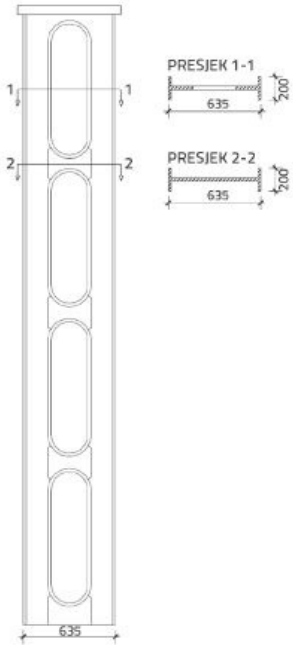


Slika 23. Dispozicija mosta [14]



Slika 24. Karakteristični poprečni presjek konstrukcije mosta [13]

Stupovi mosta (kojih je sveukupno 31) izvedeni su kao dvostruki T poprečni presjeci (slika 25.) [13].



Slika 23. Poprečni presjek stupa [13]

6.3. Pregledi konstrukcije mosta

Konstrukciji mosta ne pomaže činjenica da se nalazi u vrlo agresivnom okolišu, te da su nosivi dijelovi projektirani s minimalnim dimenzijama i minimalnim zaštitnim slojem betona od 2,5 cm [15]. Iako je most prošao tehnički pregled, nedugo nakon otvaranja mosta za promet primijetilo se da je došlo do oštećenja ležajnih dijelova glavnih nosača. Pregled stanja armiranobetonske konstrukcije obavljen je 1981. godine od strane Građevinskog instituta. Ustanovljeni su nedostaci prilikom izvođenja na pojedinim mjestima, neki od njih su: segregacija betona, rupe, zračne pore, pukotine, vidljiva armatura na pojedinim mjestima, nezaštićene glave kabela [14].

Godine 1985. Građevinski institut je izradio program održavanja Krčkog mosta na temelju kojeg je 1986. godine proveden prvi detaljni pregled konstrukcije. Pregledom su ustanovljena oštećenja na kosnicima, razuporama, i petama lukova uzrokovane korozijom, pukotine na stupovima, upornjacima, krajnjim poprečnim nosačima i u podgledu kolničke ploče te pukotine i početna korozija u dijelovima oslonačkih sklopova glavnih nosača [14]. Ispitivanjem na terenu i u laboratoriju ustanovljeno je da su debljina zaštitnog sloja betona, tlačna čvrstoća i propusnost zadovoljavajućih karakteristika. Kod većine konstrukcijskih elemenata količina klorida je bila niska, jedino je u kosniku velikog luka bila granična. Predložene su hitne mjere sanacije i zaštite, neke od njih su: popravak oslonačkih sklopova glavnih nosača, zatvaranje otvora u lukovima, premazivanje svih raspucanih dijelova posebnom zaštitom, poboljšanje odvodnje kolničke konstrukcije, sanacija dilatacijskih naprava i asfalta, te premazivanje svih metalnih dijelova antikorozivnom zaštitom [14].

Hrvatski institut za mostove i konstrukcije proveo je drugi po redu detaljni pregled konstrukcije 1993. godine. Provedenim ispitivanjima utvrdila su se velika oštećenja stupova malog luka (S21, S26, S30 i S31), te je zaključeno da je potrebna hitna sanacija najoštećenijih dijelova [13].

Na temelju izvješća Hrvatskog instituta za mostove i konstrukcije, 1994. godine IGH provodi prvo ispitivanje stanja betona i armature u svrhu projektiranja sanacije oštećenih stupova. Ispitivanja su pokazala da je beton visoke kvalitete, niskog koeficijenta plinopropusnosti i kapilarnog upijanja, karbonatizacija betona je površinska, a prodor klorida varijabilan.

Završno izvješće stanja betona manjeg luka izdano je 2000., i u njemu je zaključeno sljedeće [13]:

- beton u konstrukciji je visoke tlačne čvrstoće, te je zbog prisutnosti klorida apsorpcija u površinskom sloju visokog stupnja, a otpornost na smrzavanje slaba
- koncentracija klorida je kritična u području armature na spojnicama i na vutama luka zbog toga što je zaštitni sloj betona pretanak, na stupovima u području armature pri dnu stupova koji su bliži otoku Sv. Marko, te u područjima ispucanog betona na svim stupovima, a posebno izražena na upornjacima
- na pojedinim elementima konstrukcije primijećene su statičke pukotine, dok su kod stupova primijećene značajne pukotine uzrokovane korozijom
- na elementima saniranim 1988. godine vidljivo je usporavanje prodora klorida
- visokokvalitetni beton i cement sa dodatkom zgure usporili su prodor klorida i produljili uporabivost same konstrukcije.

Ispitivanja velikog luka započela su 2001. godine nizom ispitivanja. Rezultati ispitivanja prezentirani su kroz 3 izvještaja koje je izradio IGH (Knjiga 1, Knjiga 2 i Knjiga 3). Zaključci su sljedeći [13]:

- općenito stanje velikog luka je puno bolje od stanja malog luka
- kapilarno upijanje i koeficijent plinopropusnosti su niski u odnosu na mali luk zbog povoljnijih mikrolokacijskih uvjeta
- prodor klorida najviše je oštetio dijelove u petama luka i kolničku konstrukciju u blizini otoka Sv. Marko
- na temelju oštećenja konstrukcije zaključeno je da konstrukcija može trajati još desetak godina
- preporučeno je ograničenje prometovanja i sanacija pukotina uzrokovane skupljanjem betona, te statičkim i dinamičkim opterećenjima na kolničkoj konstrukciji.

Radi sporosti otklanjanja otkrivenih nedostataka obavljen je i dodatni pregled nakon kojeg je zaključeno da se stanje mosta pogoršalo što je prikazano kroz Knjigu 4 i Knjigu 5. Količina klorida je ostala ista, što se pripisuje različitim postupcima ispitivanja. Provedena su dodatna ispitivanja nakon što je usvojen postupak ispitivanja količine klorida. Rezultati ispitivanja su prikazani kroz Knjigu 6 sa zaključkom da zaštita konstrukcije polimercementnim

premazima provedena krajem 1980-ih godina nije spriječila prodor klorida, već samo usporila, te da je zaštita konstrukcije polimernim premazima obavljena početkom 2000-ih godina dala puno bolje rezultate [13].

6.4. Zaštita armature od korozije pri sanaciji oštećenih dijelova

Na temelju pregleda obavljenog 1994. godine zaključeno je da je stup S28 jedan od najoštećenijih stupova, te da je zbog njegovog položaja (stup 28 se nalazi na kopnu) na njemu najlakše izvesti radove sanacije. Nakon njega, istom metodom sanirati će se i stupovi S29, S30 i S31. Radovi su trebali biti izvedeni pomoću tehnologije koja je tada bila nepoznata na našim prostorima. Sanacija se sastojala od hidrodemoliranja oštećenog sloja betona (slika 26.), te nanošenja sustava zaštite [14].

Nanošenje sustava zaštite sastojalo se od tri faze [13]:

- nanošenje mlaznog morta suhim postupkom
- nanošenje premaza za impregnaciju i izravnavanje
- nanošenje završnog polimernog premaza u dva sloja.

Slika 24. Izgled površine nakon uklanjanja oštećenog sloja betona [13]

Prilikom pregleda konstrukcije 1993. godine u podnožju stupa S28 izmjeren je udio klorida od 0,7 % mase cementa. Godine 2016. za potrebe diplomskog rada na Građevinskom fakultetu u Rijeci izvađeni su uzorci betona s više stupova Krčkog mosta. Uzroci su uzeti sa riječke i crikveničke strane istog stupa zbog specifičnih mikroklimatskih uvjeta u okolišu [10]. Rezultati ispitivanja sadržaja klorida po masi cementa za stup S28 prikazani su u tablici 15.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja za stup S28 [10]

STUP 28			
Dubina[mm]	Riječka strana	Dubina[mm]	Crikvenička strana
0-21	0,375%	0-20	0,078%
21-41	0,097%	20-36	0,065%
41-65	0,016%	36-61	0,121%

Može se primijetiti kako je sam sadržaj klorida značajno smanjen u odnosu na rezultate ispitivanja iz 1994. godine što pokazuje da je sanacija uklanjanjem zaštitnog sloja betona uvelike poboljšala stanje i povećala trajnost stupa S28.

Dijelovi malog luka sanirani su 2013. godine na sličan način kao i stup S28. Sanacija je također uključivala postupak uklanjanja oštećenog sloja betona, te nanošenje zaštite.

Sustav zaštite za sanaciju malog luka sastojao se od 3 faze [13]:

- nanošenje reprofilacijskog morta mokrim postupkom na prethodno navlaženu podlogu
- nanošenje temeljnog premaza i sloja elastične mase ojačane mikrovlaknima
- nanošenje zaštitne i akrilne boje.

Reprofilacijski mort trebao je zadovoljiti svojstva određena normom HRN EN 1504-9 [13]:

- prionjivost veća od 2 N/mm^2
- tlačna čvrstoća veća od 50 N/ mm^2
- vlačna čvrstoća veća od 4 N/ mm^2
- koeficijent plinopropusnosti manji od 10^{-13} cm^2
- otpornost na smrzavanje i odmrzavanje veća od 56 ciklusa.

Projektom je predviđena katodna zaštita dijelova velikog luka ali nakon više neuspjelih pokušaja traženja pogodnog sustava katodne zaštite izabran je prijedlog anodnog sustava zaštite dijelova kosnika koji se nalaze iznad površine vode, dok je za dijelove kosnika koji se nalaze u moru odabran diskanodni sustav s dvanaest anoda aktiviranih slojem elektrovodljive keramike [13].

7. ZAKLJUČAK

Propusnost betona jedno je od važnijih svojstava prilikom razmatranja trajnosti betona. Međutim, kretanje fluida uslijed promjene tlakova, kao i kretanje iona, atoma i molekula zbog razlika u koncentraciji (difuzija), te kapilarno privlačenje tekućine u prazne ili djelomično ispunjene pore (sorpcija), također su parametri koje treba uzeti u obzir prilikom razmatranja propusnosti betona. Beton sadrži različite vrste pora i veličina, a prolazak tvari kroz njegovu strukturu posebni je slučaj općeg fenomena tečenja kroz porozni materijal. Propusnost betona ovisi o dvama čimbenika – o propusnosti cementne paste, te o propusnosti agregata. U radu je prikazan utjecaj hidratacije na propusnost cementne paste, čime se zaključuje da je propusnost betona znatno veća nego propusnost agregata ili cementne paste, i to zbog defekata i pukotina smještenih u strukturi samog betona.

Korozija betona i korozija čelika primjer su dvaju mehanizama koji razaraju armiranobetonske konstrukcije. Do korozije betona može doći uslijed kemijskih djelovanja (kiseline, sulfati, alkalije i dr.), djelovanja kiselina, djelovanja sulfata, kao i zbog alkalnoagregatne reakcije i djelovanja morske vode. Proces smrzavanja i odmrzavanja, kao i požari, također su uzročnici oštećenja strukture betona. Što se tiče korozije čelike, ona ima dva perioda razvoja korozije – period inicijacije i period propagacije. U period inicijacije spadaju proces karbonatizacije čiji produkt kalcijev karbonat smanjuje pH vrijednost betona te uništava prirodni zaštitni sloj armature i proces prodora gdje kloridni ioni u kontaktu sa visokoalkalnom pornom vodom u betonu razaraju prirodni zaštitni sloj armature.

Neki od parametara o kojima ovisi trajnost betonskih konstrukcija su: vodopropusnost i plinopropusnost, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje, otpornost na prodor klorida i otpornost na abraziju. Kada je riječ o ispitivanju vodopropusnosti, ono se dobiva određivanjem dubine prodiranja vode pod tlakom. Što se tiče ispitivanja plinopropusnosti, ono se određuje na temelju propusnosti kisika. Pri laboratorijskom ispitivanju otpornosti na ciklično izlaganje smrzavanju i odmrzavanju provodi se ukupno 56 ciklusa nakon kojih se izračunava masa izgubljenog materijala. Ispitivanje prodora klorida provodi se metodom brze penetracije klorida, koja se temelji na električnoj provodljivosti uzoraka pomoću koje dobivamo približnu vrijednost otpornosti uzorka na prodor klorida. Ispitivanje otpornosti na abraziju izvodi se rotacijom metalnog stola na koji je posipan abrazivni materijal u 16 ciklusa nakon kojih se izračunava razlika u volumenu na početku i kraju ispitivanja.

Nadalje, u radu su prikazane grupe projektiranja trajnosti armiranobetonskih konstrukcija. Riječ je o projektiranju koje se temelji na uporabnim svojstvima i s druge strane, o projektiranju prema normama. Prednost projektiranja na temelju uporabnih svojstava je ta što možemo uzeti u obzir građevine duljeg životnog vijeka, nove materijale i nove vrste konstrukcija.

U radu je naglasak na analizi Krčkog mosta koji se nalazi u vrlo agresivnom okolišu, a ne ide mu u prilog ni činjenica da je projektiran s minimalnim dimenzijama elemenata i minimalnim zaštitnim slojem betona. Pri projektiranju mosta nije se pazilo na projektiranje trajnosti same konstrukcije pa su se prvi problemi javili nedugo nakon puštanja u promet. Redovitim pregledima konstrukcije kao najveći problem pokazala se korozija uzrokovana velikom količinom klorida u betonu. U nekim dijelovima udio klorida bio je znatno veći od granične vrijednosti koja iznosi 0,2 % udjela klorida po masi cementa. Prednost je to što korozija još uvijek nije zahvatila glavnu armaturu, a u međuvremenu se pronašao adekvatan sustav zaštite kojim se značajno usporio prodor klorida u elemente konstrukcije. Preostalu trajnost Krčkog mosta nije moguće izračunati, te je za očuvanje njegove trajnosti potrebno redovito održavati konstrukciju i obavljati preglede kako bi se eventualna oštećenja sanirala na vrijeme.

Prilikom projektiranja konstrukcije je vrlo bitno posebnu pažnju posvetiti projektiranju trajnosti. Ispravnim projektiranjem trajnosti postiže se ušteda na troškovima održavanja konstrukcije, sprečava se degradacija armiranobetonskih konstrukcija i u konačnici postiže se dulji vijek trajanja same konstrukcije.

LITERATURA

[1] Bjegović D., Štirmer N., Teorija i tehnologija betona, Zagreb, 2015.

[2] https://precast.org/2012/11/5-rules-of-watertightness/, 10.08.2019.

[3] Anton H., Bjegović D, Ević E., Metodologija ispitivanja površinske trajnosti betona, Građevinar, 58 (2006) 9, 727-734.

[4] Radić J., Trajnost konstrukcija 1, Zagreb, 2010.

[5] Banjad Pečur I., Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu, HDKBR INFO Magazin, Vol. 3, No. 1, 2013.

[6] Klobučar M., Analiza svojstava samozbijajućeg betona s dodatkom karbidnog mulja, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2016.

[7] Krajnović N., Analiza svojstava betona s recikliranim agregatom, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.

[8] https://www.controls-group.com/eng/ , 15.12.2019.

[9] Ušić I., Prodor klorida kroz mikroarmirani beton visoke čvrstoće, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2017.

[10] Šverko I., Utjecaj prodora klorida na beton u morskom okolišu, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2016.

[11] ASTM C 12012-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

[12] HRN EN 1992-1-1 Eurokod 2 – Projektiranje betonskih konstrukcija.

[13] Huzjan B., Ostojić N., Sanacije Krčkog mosta, Građevinar, 68 (2016) 9, 735-743.

[14] Vujić D., Radovi na izvanrednom održavanju Krčkog mosta, Građevinar, 56 (2004) 9, 547-553.

[15] Šimunić Ž., Ožbolt J., Kučer A., Analiza oštećenja stupova malog luka Krčkoga mosta, Građevinar, 58 (2006) 2, 113-120.