

# Proračun uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija

---

Ercegovac, Juraj

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:974266>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 245 /2015**

## **Proračun uporabnog vijeka konstrukcije**

**Juraj Ercegovac, 4274/601**

Varaždin, rujan 2015





**Sveučilište  
Sjever**

**Odjel za graditeljstvo**

**Završni rad br. 245 /2015**

## **Proračun uporabnog vijeka konstrukcije**

**Student:**

Juraj Ercegovic, 4274/601

**Mentor:**

dr.sc. Matija Orešković, dipl.ing.

Varaždin, rujan 2015

## **Predgovor**

*Zahvaljujem se svim kolegama i kolegicama koji su mi pomagali, svaki put kada bi mi pomoć zatrebala kao i prijateljima s kojima sam studirao i na svakoj dobroj gesti. Uz njih je bilo puno lakše studirati i živjeti daleko od kuće.*

*Zahvaljujem se svojim roditeljima koji su mi pružili mogućnost bezbrižnog studiranja, a i življenja u drugom gradu. Bili su čvrsti i motivirajući oslonac u godinama studiranja.*

*Zahvaljujem se svojoj braći koji si mu bili podrška i vjerni navijači svaki puta kada sam odlazio na ispit i na njihovoj pomoći kada sam bio u gužvi.*

*Zahvaljujem se svom mentoru dr. sc. Matiji Oreškoviću dipl. ing. građ., na stručnim savjetima, motivaciji te pomoći tijekom cjelokupnog studiranja i oko izrade ovog rada.*

## Sažetak

*Uporabni vijek konstrukcije je razdoblje tijekom kojeg ponašanje i svojstva građevina ostaju očuvana na razini sukladnoj s ispunjenjem bitnih zahtjeva. Kada je korozija armature uzrok dosezanja graničnog stanja uporabivosti, onda se razaranje pasivnog sloja armature mora definirati kao bitan događaj prilikom proračuna uporabnog vijeka. Uporabni vijek je tada ograničen vremenom inicijacije korozije, tj. vremenom koje je potrebno agresivnoj tvari da dođe do armature i izazove depasivizaciju. Razdoblje inicijacije završava kada koncentracija klorida na armaturi dosegne kritičnu vrijednost ili kada karbonatizacija prodre do armature. Stoga je proces prodora klorida jedan od najbitnijih parametara za određivanje vijeka trajanja konstrukcije, odnosno matematičkim modeliranjem mehanizma transporta klorida može se teoretski odrediti uporabni vijek konstrukcija.*

**Ključne riječi:** armirani beton, kloridi, korozija, uporabni vijek

## **Popis korištenih kratica**

**AB** armiranibeton, beton s armaturom

**TPBK** tehnički propisi za betonske konstrukcije

**CO<sub>2</sub>** Ugljikov dioksid

**RH** Republika Hrvatska

**HRN EN 206-1** Hrvatska norma za sviježi beton

**Cl** Klorid, kemijski element

**pH** Mjera kiselosti ili bazičnosti neke tvari

**R** Predstavlja otpornost klorida u beton

**S** Predstavlja prodor klorida u beton

**LIFE-365** Životno predviđanje modela betonskih konstrukcija

**DuraCrete** Probabilistički učinak baziran na trajnosti projektiranja betonskih konstrukcija

**CHLODIF** Numerički model za proračun uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju klorida

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. VAŽEĆA REGULATIVA .....	3
3. OPĆENITO O PRORAČUNSKIM MODELIMA .....	6
4. MODELI PRODORA KLORIDA .....	8
5. UPORABNI VIJEK .....	11
6. TRANSPORT KLORIDA U BETON .....	16
a) Prvi Fickov zakon .....	16
b) Drugi Fickov zakon.....	17
7. DETERMINISTIČKI PRISTUP UPORABNOG VIJEKA .....	19
8. ODREĐIVANJE KOEFICJENTA KLORIDA IZ PROFILA KLORIDA .....	21
9. NUMERIČKI MODEL LIFE -365 .....	23
10. UTJECAJU DODATAKA NA BETON .....	26
11. NUMERIČKI MODEL CHLODIF .....	31
12. POVRŠINSKA KONCENTRACIJA KLORIDA .....	34
13. KOEFICJENT PROMJENE POČETNE KONCENTRACIJE KVAŠENJA ....	36
14. PRORAČUN RAZDOBLJA PROPAGACIJE KOROZIJE .....	37
15. OSNOVE PRORAČUNA .....	38
16. PRODOR KLORIDA KAO OPTEREĆENJE IZ OKOLIŠA.....	41
17. MODEL KARBONATIZACIJE .....	43
18. PROBABILISTIČKI PRISTUP PRORAČUNU UPORABNOG VIJEKA .....	45
19. MODEL ZAMRZAVANJA.....	50
20. OBRADA ZADATKA PRIMJER MATEMATIČKOG MODELA.....	54
20.1. Opis AB stupa .....	54
20.2. Praktični dio .....	55
20.3. Analiza rezultata.....	59
21. ZAKLJUČAK .....	63
22. LITERATURA.....	64



# 1. UVOD

Prirodna usmjerenost graditelja je neprolaznost ili što veća trajnost građevina. Povijest graditeljstva obiluje primjerima različitog pristupa trajnosti kao što su:

- Bezuvjetna želja da građevine potraju vječno
- Potpuno zanemarivanje činitelja trajnosti
- Nastojanje za ostvarenjem optimalne trajnosti

Drvene rimske konstrukcije se ipak nisu očuvale do današnjih dana iz razloga slabijih trajnosnih svojstva drva u odnosu na kamen, a mnoge su nestale u požarima. Građevina još iz rimskog doba u Hrvatskoj je primjer Pulske Arene, koja je građena od kamena te svojom ljepotom i trajnošću i danas služi za raznu upotrebu poput raznih kazališnih priredbi i koncerata.

Odlučni čimbenici velike trajnosti rimskih građevina:

- uporaba vrlo kvalitetnog kamenog materijala
- primjena luka kao glavnog konstrukcijskog elementa
- gradnja s velikim rezervama nosivosti

Primjeri iz prošlosti jasno potvrđuju da se kroz stoljeća ili čak tisućljeća najbolje očuvaju one građevine koje se kontinuirano koriste. Napuštene građevine, vrlo slikovito opisane kao "baština bez baštinika", izostankom brige i održavanja, ubrzano propadaju uslijed vanjskih djelovanja i dotravanja.

Današnji se pristup temelji na saznanjima da je projektiranje nosivosti i uporabljivosti konstrukcije, u postupku projektiranja potrebno projektirati i trajnost, odnosno potrebno je odrediti opterećenja iz okoliša, odgovarajuće parametre materijala, proračunski model i kriterije za koeficijente sigurnosti. Razvoj modela proračun uporabnog vijeka u naglom je usponu i vrlo brzo će postati dijelom projektne dokumentacije i sustava osiguranja kvalitete. Postoje dva pristupa projektiranju koji uključuju i tretiranje uporabnog vijeka konstrukcije, a to su:

- Pridržavanje važećih propisa
- Proračun pomoću inženjerskih modela

Trajnost je svojstvo betonske konstrukcije koje se mora ostvariti odgovarajućim planiranjem, projektiranjem i dimenzioniranjem, ali također i odabirom građevnih proizvoda i izvođenjem radova. Trajnima se smatraju one konstrukcije koje zadržavaju zahtijevana svojstva odnosno podnose sve utjecaje koji proizlaze iz načina i redoslijeda građenja, predvidivih uvjeta uobičajene uporabe i predvidivih uvjeta utjecaja okoliša, tijekom projektiranog vijeka uporabe, uz relativno niske troškove održavanja.

Trajnost konstrukcija se još uvijek propisuje iskustvenim pravilima i uglavnom zanatskim mjerama. To znači da su svojstva betona, postupci ugrađivanja i njege dani samo na osnovi iskustva, bez inženjerskih modela fizičkih, mehaničkih i kemijskih procesa, koji djeluju na razaranju betona i armature. Međutim, tako propisani vodocementni omjer, razred tlačne čvrstoće, minimalna količina cementa, aeriranje i vrijeme njege betona ne daju prognozu uporabnog vijeka armiranobetonske konstrukcije. Da to nije dovoljno, dokazuje upravo brojni primjeri armiranobetonskih mostova u nas oštećenih korozijom. Beton je tradicionalno smatran trajnim materijalom, koji treba malo ili nikako održavanje. Praksa je međutim pokazala drugačije i golemi troškovi popravaka konstrukcija oštećenih korozijom armature razvili su svijest o važnosti projektiranja trajnosti. Najviše su izraženi pri projektiranju novih armiranobetonskih konstrukcija, čiji je uporabni vijek zadan i pri projektiranju popravaka konstrukcija, kod kojih su beton i armatura toliko degradirali, da je u pitanju izgled i/ili sigurnost konstrukcije.

Pri tome se pod uporabnim vijekom podrazumijeva kriterij postavljen od strane investitora ili društva, a predstavlja zadatak graditeljima izražen kroz vrijeme u kojem bi građevina trebala trajati.

## 2. VAŽEĆA REGULATIVA

Betonske konstrukcije treba projektirati i izvesti tako, da pod očekivanim utjecajima okoliša, njihova sigurnost i uporabljivost ostane tijekom uporabnog vijeka građevine bez zahtjeva za velikim troškovima održavanja i popravaka. Trajnost betonskih konstrukcija ostvaruje se pravilnim projektiranjem konstrukcije, pravilnim odabirom svih materijala u konstrukciji, te pravilnim izvođenjem i održavanjem konstrukcija. Opće odredbe Tehničkog propisa za betonske konstrukcije-TPBK propisuju zahtjeve za betonske konstrukcije, te uređuju projektiranje, izvođenje i održavanje betonskih konstrukcija i građevinskih proizvoda namijenjenih ugradnji u betonske konstrukcije.

Tehnička svojstva betonske konstrukcije moraju biti takva da, tijekom trajanja građevine uz projektiranje, izvođenje i održavanje sukladno odredbama Tehničkog propisa, predviđiva djelovanja ne prouzroče rušenje građevine ili njezina dijela, deformiranja nedopustivog stupnja, oštećenja građevinskog sklopa ili opreme zbog deformiranja nosive konstrukcije, te nesrazmjerno velika oštećenja u odnosu na uzrok zbog kojih su nastala. Smatra se da građevina čija betonska konstrukcija ima tehnička svojstva propisana Tehničkim propisom ispunjava bitni zahtjev mehaničke otpornosti i stabilnosti te dio bitnog zahtjeva zaštite od požara koja se odnosi na očuvanje nosivosti konstrukcije u slučaju djelovanja požara tijekom određenog vremena utvrđenog posebnim propisom.

Poštivanjem TPBK-a, odnosno svih zahtjeva na projektiranje betonskih konstrukcija, zahtjeva na beton, zahtjeva na izvođenje radova, te održavanje ostvaruje se uporabni vijek najmanje 50 godina.

Planiranje uporabnog vijeka dio je projektiranja kojim se želi što više moguće da uporabni vijek građevine bude jednak ili da premaši projektirani uporabni vijek uzimajući u obzir troškove uporabnog ciklusa konstrukcije.

Tehnička svojstva betona moraju ispunjavati opće i posebne zahtjeve bitne za krajnju namjenu i moraju biti specificirana prema normi HRN EN 206-1, norma na koje ta norma upućuje i odredbama važećeg tehničkog propisa. Postupak projektiranja sastava betona, što uključuje prethodno ispitivanje i utvrđivanje sastava betona, vezan uz trajnost betonske konstrukcije u obzir uzima svaki mehanizam dotrajanja, uporabni vijeka na kvantitativan način.

Postupci projektiranja sastava vezani za trajnost betona preciznije su definirani s obzirom na otpornost na koroziju u otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje betona u odnosu na alkalno-silikatnu reakciju, sulfatnu agresivnost ili abraziju.

Detaljni pristup projektiranju sastava betona će biti adekvatan kada:

- se traži uporabni vijek značajno različiti od 50 godina
- je specijalna konstrukcija koja traži manju vjerojatnost otkazivanja
- su djelovanja okoliša posebno agresivna ili dobro definirana, očekuju se visoke norme rada
- je uvedena strategija menadžmenta i održavanja, moguće višeg stupnja, biti će izgrađen značajan broj sličnih konstrukcija ili elemenata
- će se upotrijebiti novi ili različiti materijali primijenjeni u postupku projektiranja prema propisanim graničnim vrijednostima sastava betona, ali je pogrešno u izvedbi

U praksi postignuti nivo trajnosti ovisi o kombinaciji projektnog rješenja, odabiru materijala i izvedbe. Kompatibilnost materijala, postupaka izvedbe, kvalitete rada, nivoa kontrole i osiguranja kvalitete su značajni parametri postupka projektiranja trajnosti.

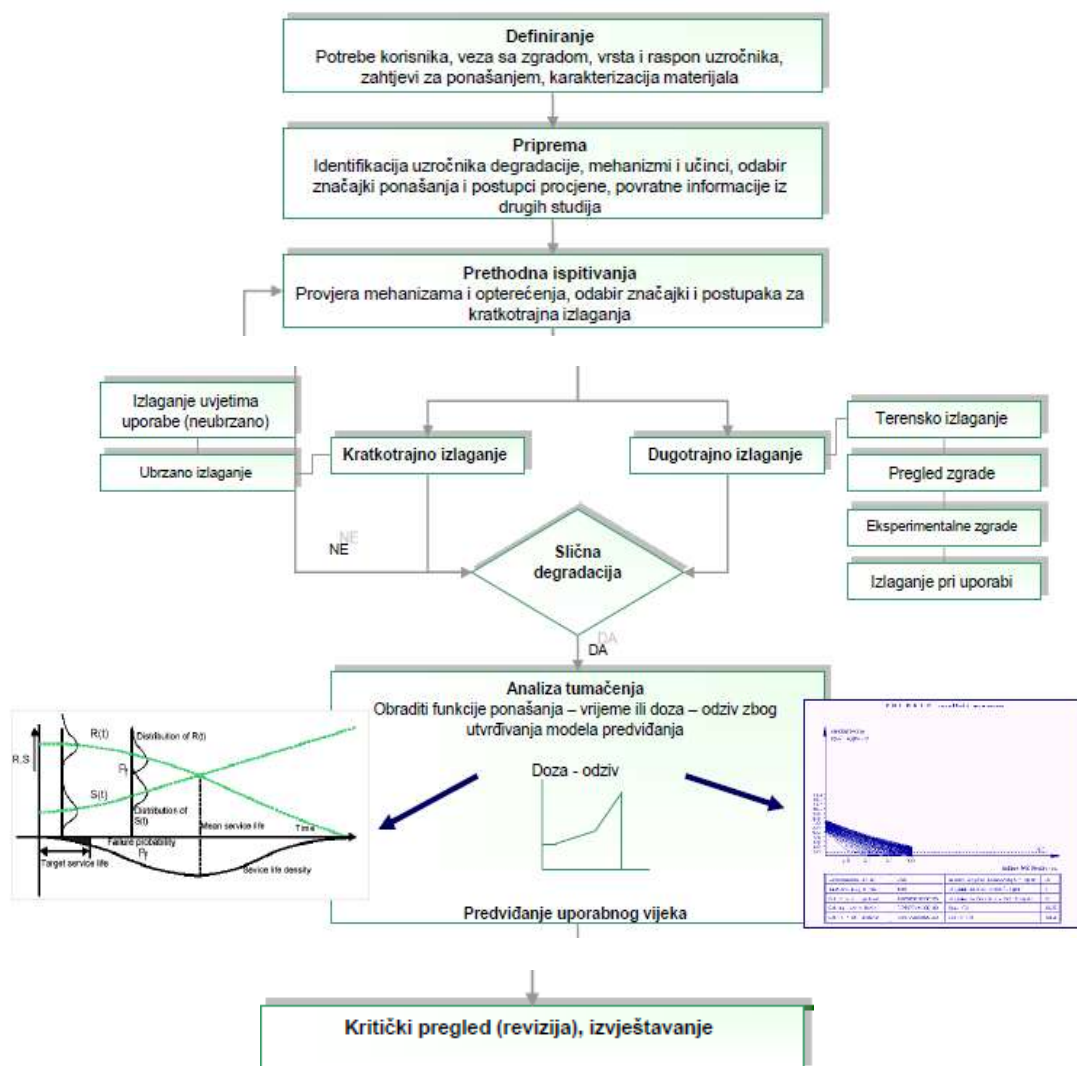
Traženo svojstvo trajnosti ovisi o traženom uporabnom vijeku, o mogućoj budućoj uporabi konstrukcije, o posebnim zaštitnim mjerama, o planiranom održavanju tijekom uporabnog vijeka i o posljedicama otkazivanja u posebnim lokalnim uvjetima.

Nivo znanja sredine i lokalna mikroklima važni su u uspostavi postupaka projektiranja vezanim uz trajnost, projektiranjem sastava betona u svrhu ostvarivanja što veće trajnosti važno je unaprijed utvrditi:

- Tip i oblik konstrukcije
- Lokalne uvijete okoliša
- Razinu izvedbe
- Zahtijevani uporabni vijek

Potrebne su određene pretpostavke i prosudbe:

- a) Detaljni pristup projektiranju sastava betona zasnovan na dugotrajnom iskustvu s lokalnim materijalima i praksom i detaljnom poznavanju lokalne okoline
- b) Postupci zasnovani na odobrenim i dokazanim ispitivanjima koja reprezentiraju stvarne uvjete i imaju odobrene kriterije primjene
- c) Postupci zasnovani na analitičkim modelima prema podacima ispitivanja stvarnih uvjeta u praksi

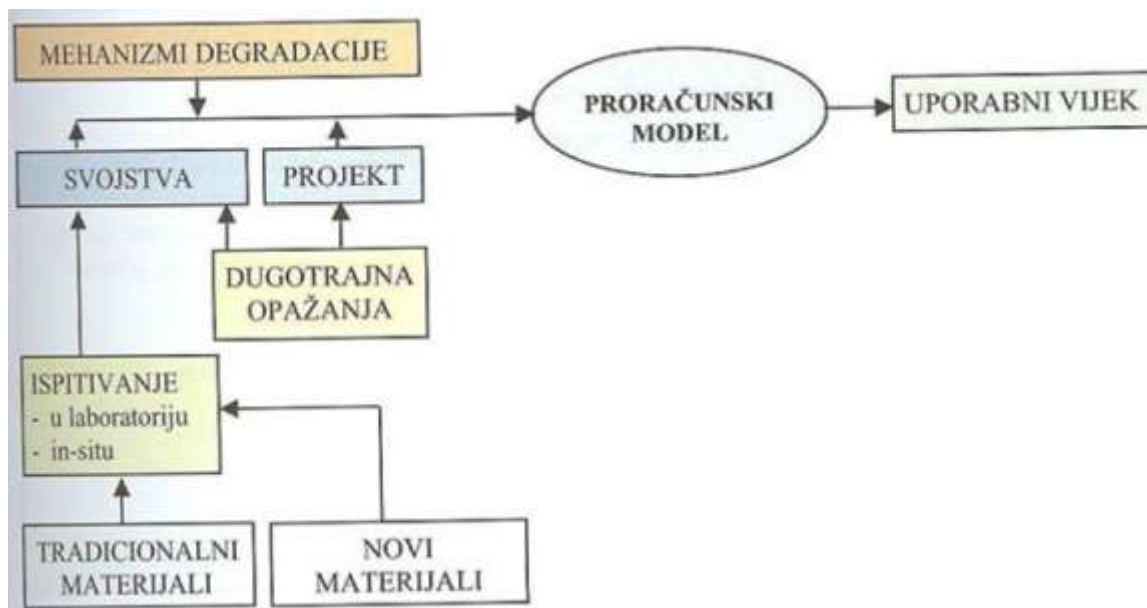


**Slika 2.1** Analitičko predviđanje uporabnog vijeka konstrukcije zasniva se na procesima degradacije

Sastav betona i sastavni materijali trebaju biti precizno utvrđeni radi omogućivanja održavanja nivoa izvedbe, a i same trajnosti konstrukcije.

### 3. OPĆENITO O PRORAČUNSKIM MODELIMA

Modeli projektiranja trajnosti mogu se pojednostavljeno prikazati u obliku dijagrama za predviđanje uporabnog vijeka armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju klorida i karbonatizaciji postoji nekoliko matematičkih modela, koji se osnivaju na procesu difuzije agresivnih tvari ( $\text{Cl}$ ,  $\text{CO}_2$ ) u betonu te pada vrijednosti (9-12)pH.



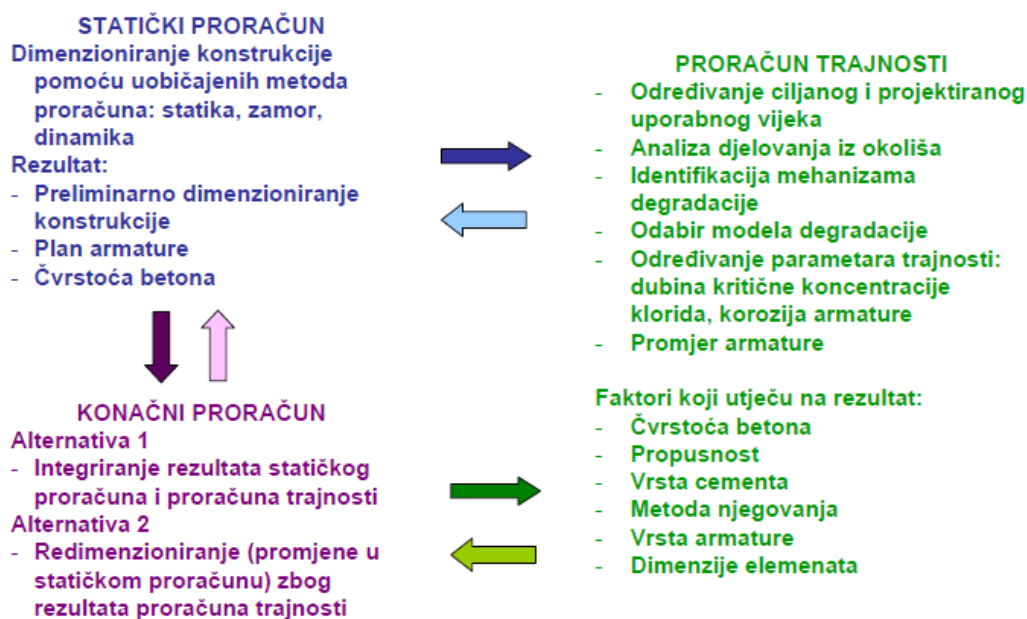
**Slika 3.1.** Model prognoziranja uporabnog vijeka

Analitičko predviđanje uporabnog vijeka konstrukcija osniva se na procesima degradacije materijala, u ovisnosti o vremenu i poznavanju fizikalnih procesa koji se odvijaju u samom materijalu. Utjecaj osnovnih fizikalnih pojava na svojstva materijala, komponenata i sustava i u konačnici na svojstva građevine u cjelini shematski prikazano na slici 3.2.

UTJECAJ OSNOVNIH FIZIKALNIH POJAVA NA SVOJSTVA MATERIJALA, KOMPONENTA I SUSTAVA NA CJELOKUPNA SVOJSTVA GRAĐEVINE			
Domena osnovnih fizikalnih pojava kod građevnih materijala, komponenata i sustava.	Domena svojstava materijala, neovisno o mjestu primjene i ugradnje u konstrukciju.	Domena kompozita s traženim svojstvima za određenu namjenu i ponašanje u konstrukciji.	Domena racionalne integracije komponenata, skupova i sustava za određenu namjenu i ponašanje u konstrukciji.
FIZIKA	MATERIJALI	KOMPONENTE	SUSTAVI
osnovni fenomeni	fizikalna i mehanička svojstva	svojstva kompozita	ponašanje sustava
npr. gravitacija mekanika fluida prijenos topline difuzija vodene pare difuzija klorida i dr. zapaljivost korozija	npr. gustoća vlažnost specifična topline toplinska provodljivost propusnost modul elastičnosti čvrstoća	npr. nosivost zaštita od korozije toplinska zaštita zaštita od buke potencijal kondenzacije razred s obzirom na reakciju na požar	npr. pouzdanost funkcionalnost kompatibilnost estetika zdravlje i sigurnost ekonomičnost
PROCES OCJENE PONAŠANJA	Svojstvo materijala ovisi o određenom fizikalnom procesu	Ponašanje kompozita ovisi o međusobnom odnosu više svojstava	Ponašanje integriranih komponenata i sustava kao rezultat svih fizikalnih fenomena (svojstava)

Slika 3.2 Utjecaj osnovnih fizikalnih promjena na svojstva materijala i građevine u cijelini

Analogne nosivosti i uporabljivosti konstrukcija, potrebno je odrediti opterećenja, odgovarajuće parametre materijala, proračunski model i kriterije za koeficijente sigurnosti. Postupak proračuna uporabnog vijeka u usporedbi s analogijom dimenzioniranja konstrukcije s obzirom na sigurnost i stabilnost.



Slika 3.3. Analogija dimenzioniranja nosivosti i trajnosti konstrukcije

## 4. MODELI PRODORA KLORIDA

Prvi model razvoja procesa korozije u vremenu i njegovo stupnjevanje glede oštećenja konstrukcije, postavio je Tutti 1982. Godine. Od tada do danas razvijeno je niz više ili manje uspješnih inačica Tuttijevih modela koje uglavnom zadržavaju okvire izvornika te pobliže razlažu tijek korozije. Zajedničko svim tuttijevim modelima i razvijenijim je tijek oštećenja konstrukcije koja su podijeljena na razdoblje uzbude ili inicijacije te na razdoblje razvoja ili propagacije korozije.

Razdoblje inicijacije korozije ( $t_i$ ) podrazumijeva vrijeme proteklo od izgradnje građevine pa do dosezanja kritičnih uvjeta za početak razaranja materijala korozijom.

Razdoblje razvoja procesa korozije ( $t_p$ ) kraće je od razdoblja inicijacije, a obuhvaća vrijeme aktivne korozije, za koji stupanj oštećenja građevine doseže razinu sanacije ili razinu otkazivanja nosivosti. U razdoblju razvoj dolazi do znatnog raspucavanja betona, čime se olakšava pristup vlage i kisika armaturi, pa se proces korozije može odvijati punim intenzitetom i time brže dosegnuti kritični stupanj oštećenja.

Prva faza može se opisati odgovarajućom jednačbom penetracije agresivnih tvari u beton, a to su: difuzija, apsorpcija, protok pod tlakom, migracije. Neki od modela su CHLODIF i Life 365 i probabilistički DuraCrete.

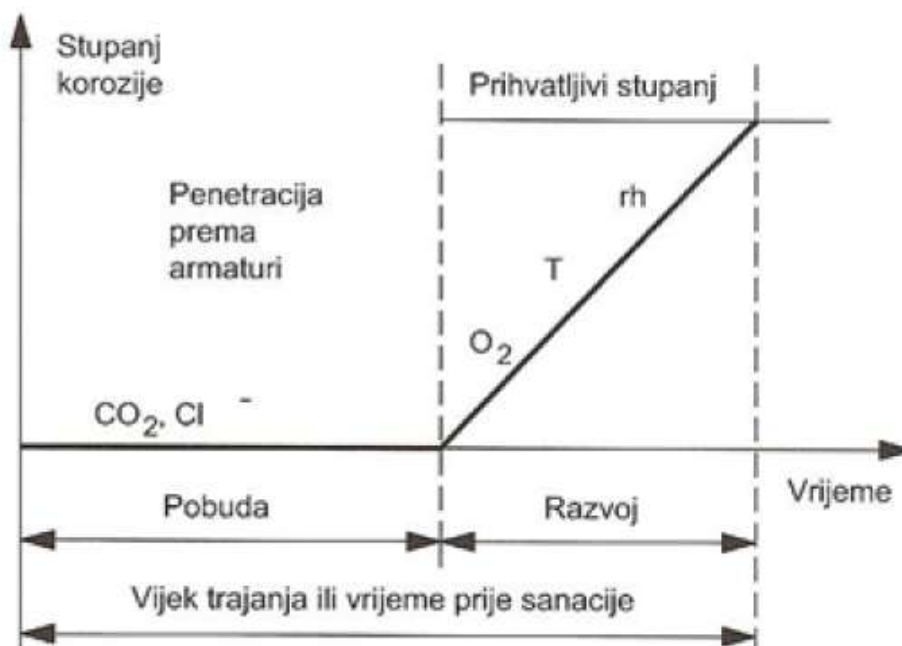
Koeficijent difuzije ( $m^2/s$ )	Otpornost betona
$< 2 \times 10^{-12}$	Jako dobra
$2 - 8 \times 10^{-12}$	Dobra
$8 - 16 \times 10^{-12}$	Zadovoljavajuća
$> 16 \times 10^{-12}$	Nezadovoljavajuća

**Tabela 1.** Tablica s graničnim prodorom klorida

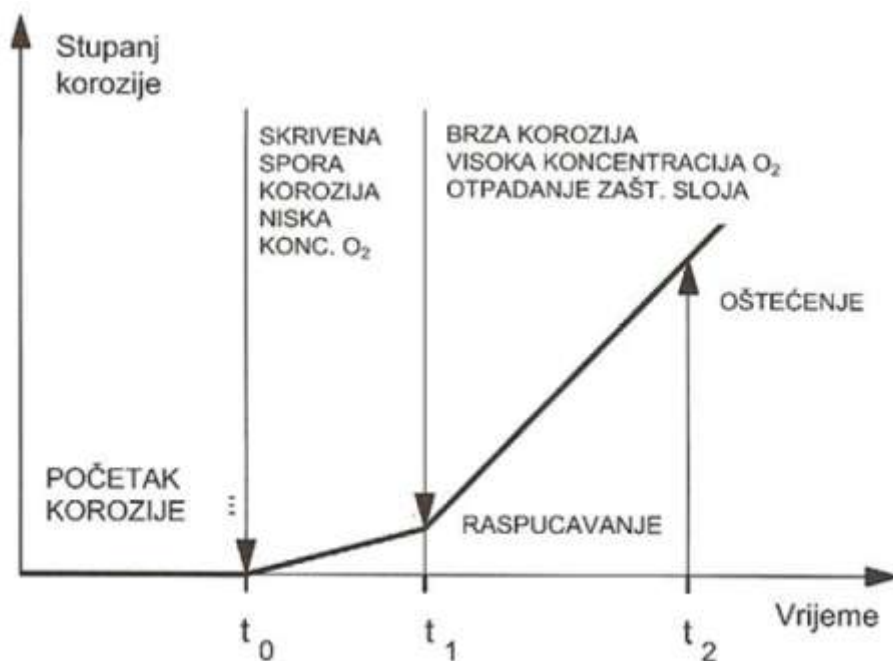


Električna otpornost nakon 28 dana, $k\Omega\text{-cm}$	Kvaliteta / propusnost betona
> 254	Jako dobra / Zanemariva
37 – 254	Dobra / Jako mala
21 - 37	Srednje mala
12 - 21	Loša / srednja
< 12	Jako loša / Velika

**Tabela 2.** Električna otpornost nakon 28dana



**Slika 4. 1.** Model Tutijevog razvoja korozije



**Slika 4. 2.** Model razvoja procesa korozije

Uvjet za početak korozije čelika ostvaruje se karbonatizacijom i/ ili saturacijom betona u okolici armature Cl-ionima. Stupanj korozije i stupanj oštećenosti građevine u tom su razdoblju jednaki nuli, a količina uzbudnih čimbenika povećava se do konačne kritične vrijednosti, čijim dosezanjem započinje korozivni proces.

## 5. UPORABNI VIJEK

UPORABNI VIJEK KONSTRUKCIJE vremensko razdoblje nakon ugradnje tijekom kojega su nosivost, uporabljivost i druga zahtijevana svojstva iznad minimalne dopustive razine.

PRORAČUNSKI UPORABNI VIJEK zahtjev za trajnošću konstrukcije u propisima i normama se daje kao zahtjev da konstrukcija treba dosegnuti određeni broj godina uporabnog vijeka

- Pretpostavljeno razdoblje korištenja konstrukcije uz redovito održavanje, ali bez velikih popravaka
- Početna pretpostavka u postupku dokaza trajnosti konstrukcija, neovisno o materijalu od kojega su izvedene

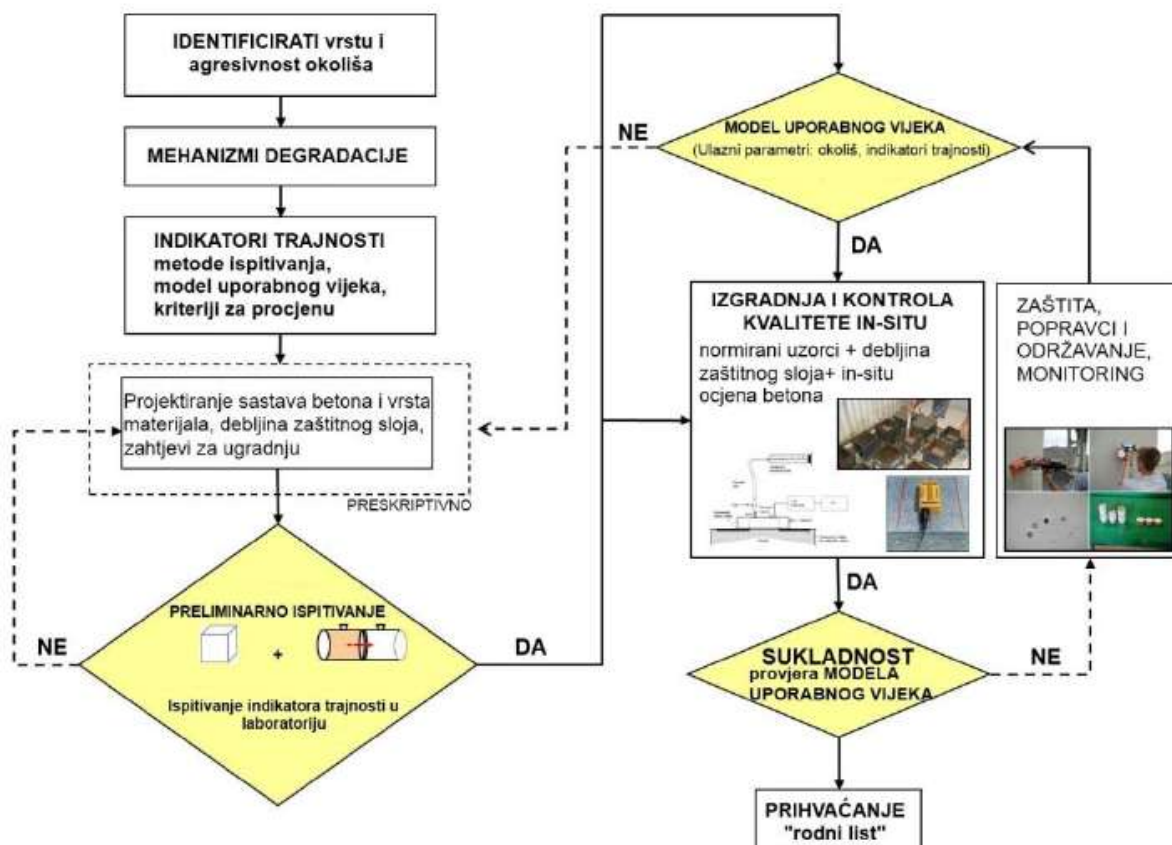
Uz odgovarajuće rješavanje odvodnje vode s površine konstrukcije, trajnost se prvenstveno temelji na:

- odabiru odgovarajuće mješavine betona uz
- definirane zahtjeve za čvrstoću betona i
- debljinu zaštitnog sloja armature

Ovisno o uvjetima okoliša u kojima se konstrukcija nalazi. Ako se ispune zahtjevi smatra se da će biti dosegnut predviđeni uporabni vijek.

<b>Razred</b>	<b>Zahtijevani proračunski radni vijek (godine)</b>	<b>Primjer</b>
1	1 - 5	Privremene konstrukcije
2	25	Zamjenjivi dijelovi konstrukcije
3	50	Konstrukcije zgrada ili druge uobičajene konstrukcije
4	100	Monumentalne građevine, mostovi i druge inženjerske konstrukcije

**Tabela 3.** *Zahtijevani proračunski vijek konstrukcije*



**Slika 5.1.** Projektiranje na osnovu svojstava

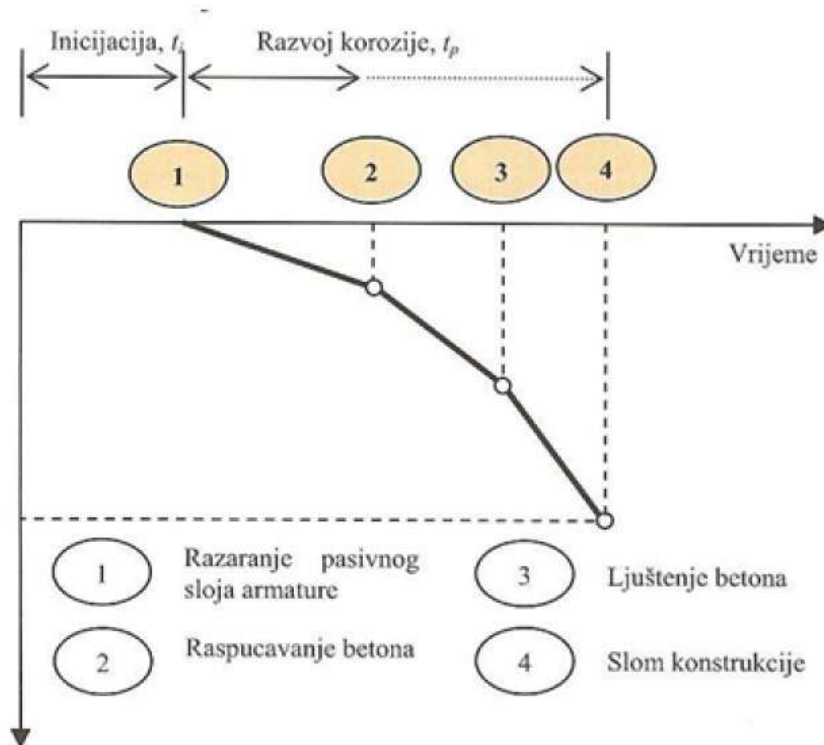
Kompatibilnost materijala, postupak izvedbe, kvalitete rada, nivoa kontrole i osiguranja kvalitete su značajni parametri postupka projektiranja trajnosti tj. osiguranja projektiranog uporabnog vijeka konstrukcije.

**TEHNIČKI UPORABNI VIJEK** - razdoblje tijekom kojega su tehnička svojstva konstrukcije iznad minimalno prihvatljive razine, uz redovito održavanje građevine.

**EKONOMSKI UPORABNI VIJEK** - dosegnut je kada konstrukcija ne ispunjava zahtjeve s ekonomskog stajališta (iako tehnička svojstva konstrukcije zadovoljavaju)

Pri projektiranju trajnosti, prvi i početni korak je definirati željeni uporabni vijek samo građevine i to u dogovoru s korisnikom ili vlasnikom . Kraj uporabnog vijeka prikazuje događaje na betonskoj konstrukciji s obzirom na koroziju armature i uporabni vijek konstrukcije.

Točke 1 i 2 predstavljaju događaje kod graničnog stanja uporabljivosti, točka 3 vezana je i na granično stanje uporabljivosti i na granično stanje nosivosti, dok točka 4 predstavlja slom konstrukcije.



**Slika 5.2.** Događaji vezani za uporabni vijek konstrukcije

Događaji koji su vezani za koroziju armature mogu se identificirati u svrhu određivanja uporabnog vijeka konstrukcije:

1. Razaranje pasivnog sloja armature

Uporabni je vijek ograničen vremenom inicijacije ( $t_i$ ), vremenom koje je potrebno kloridima da dođu do armature i izazovu depasivizaciju. Razdoblje inicijacije završava kada koncentracija klorida na armaturi dosegne kritičnu vrijednost ili kada karbonatizacija prođe do armature. Depasivizacija ne znači nužno nepoželjno stanje. No ona se zasigurno odvija prije početka same korozije.

2. Pucanje zaštitnog sloja

Sljedeći proces je pucanje zaštitnog sloja radi vlačnih sila uzrokovanih produktima korozije. U ovom slučaju uporabni vijek uključuje i razdoblje razvoja procesa korozije u kojem dolazi do značajnog smanjenja poprečnog presjeka armature. Širina pukotina ovisi o veličini korozijom zahvaćenih površina, o veličini korozivnih produkata, o odnosu debljine zaštitnog sloja i promjera armature, o kvaliteti betona te o položaju armature. Vrijeme razvoja procesa korozije ( $t_p$ ) završava kada je dosegnuta određena (prethodno definirana) širina pukotina. Na osnovi prijašnjih iskustava, graničnom se vrijednošću smatra širina pukotine od 0,3 mm

### 3. Ljuštenje zaštitnog sloja

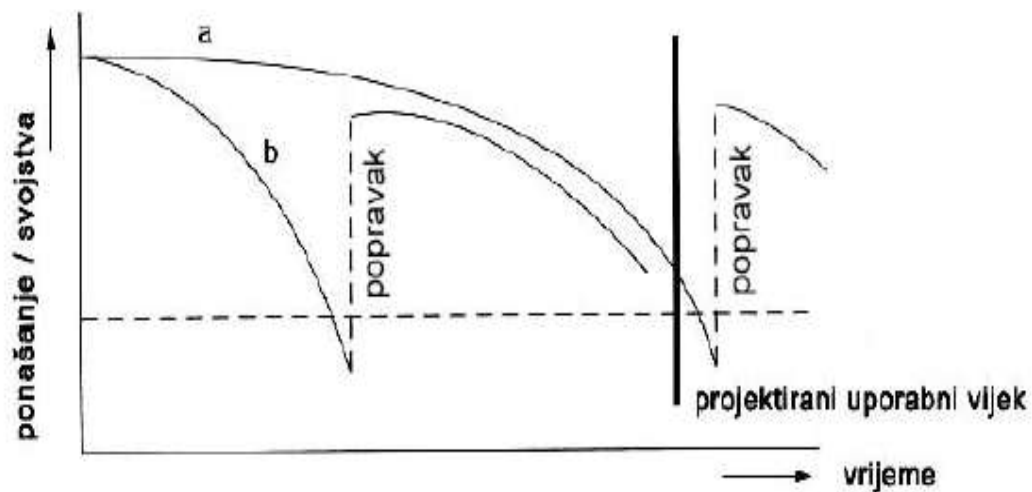
Napredovanje korozije nakon pojave pukotina može dovesti do ljuštenja zaštitnog sloja. Ovisno o razmaku armature, zaštitnom sloju i vlačnoj čvrstoći betona, ljuštenje je moguće u obliku trokutastih dijelova betona duž jedne šipke armature ili u slučaju većih vlačnih sila preko više šipki, odnosno na većoj površini. Ljuštenje zaštitnog sloja se obično smatra nedopustivim stanjem. No ljuštenje nužno ne vodi ka rušenju konstrukcije i zbog toga se može smatrati granično stanje uporabljivosti. U tom slučaju ljuštenje se mora uzeti kao konačno granično stanje. Na osnovu iskustva ljuštenje nastupa kod pojave pukotina širine 1,0 mm. Predstavlja se da je tada završilo vrijeme napredovanja korozije.

### 4. Slom konstrukcije

Slom konstrukcije će nastupiti kada je nosivost dijela konstrukcije uslijed korozije toliko smanjena (zbog smanjenja poprečnog presjeka armature, otpadanja betona i gubitka veze između armature i betona) da može doći do rušenja konstrukcije.

Kada je korozija uzrokovana prodorom klorida, projektirani uporabni vijek se često smatra jednakim vremenu inicijacije korozije ( $t_1 = t_1$ ). Vrijeme razvoja procesa korozije, koje može biti vrlo kratko, vrlo se često ne uzima obzir, zbog nesigurnosti procjene trajanja tog perioda i zbog mogućih ozbiljnih posljedica lokalne korozije.

Na produljenje uporabnog vijeka moguće je utjecati intervencijama, odnosno redovitim mjerama održavanja i sanacijama, ukoliko dođe do oštećenja konstrukcije. Održavanje konstrukcije je nužno kako bi se zahtijevana svojstva zadržala iznad kritične vrijednosti.



**Slika 5.3.** Ponašanje materijala, građevnog proizvoda ili konstrukcije u vremenu:

- a) Nisu potrebne intervencije i mjere održavanja, nema oštećenja tijekom upornog vijeka
- b) Nužne su intervencije i sanacije, oštećenja se pojavljuju

## 6. TRANSPORT KLORIDA U BETONU

Prodor kloriranih iona je kombinacija više načina transporta, od kojih je jedan dominantan, a to je obično difuzija te se iz tog razloga proces transporta klorida u beton najčešće opisuje zakonima difuzije. Bez obzira na podrijetlo kloriranih iona u konstrukciji, oni prodiru u dubinu elementa difuzijom, apsorpcijom, migracijom i kretanjem zbog razlike u tlakovima ( iz područja većeg u područje manjeg tlaka ).

Početni mehanizmi prodora klorida je apsorpcija, naročito kada je površina betona suha i upijanje slane vode se odvija relativno brzo. Zatim slijedi kapilarno kretanje slane vode kroz pore, nakon čega slijedi difuzija. Postoje također i mehanizmi koji usporavaju prodor klorida, kao npr. kemijska reakcija stvaranja kloroaluminata i apsorpcija na površinama pora.

Kod elemenata koji su naizmjenično mokri i suhi, prodiranje kloriranih iona progresivno. Morska voda ulazi u beton apsorpcijom tijekom mokrog razdoblja, a isparavanjem izlazi van ostavljajući za sobom klorirane ione tijekom suhog razdoblja, odnosno isušivanja. Proces prodiranja kloriranih iona kod takvih elemenata zasniva se na guranju kloriranih iona od površine ( suho razdoblje ) prema unutrašnjosti svaki put kada dođu nove količine klorida ( mokro razdoblje ). Količina soli koja će se kretati van-unutra u betonu ovisi o duljini vlažnih i suhih razdoblja. Svakako treba naglasiti vrlo progresivno prodiranje klorida u dubinu betona kod konstrukcija izloženih vlaženju i sušenju u morskom okolišu. Posljedica prodora klorida u beton do razine armature je proces korozije armature.

Utvrđivanje količine klorida u prahu betona, provodi se bušenjem uzoraka iz konstrukcije i određivanje sadržaja klorida kemijskim metodama ispitivanja.



**Slika 6.1.** Postupak uzimanja praha betona za određivanja sadržaja klorida u betonu



## Matematičke zakonitosti

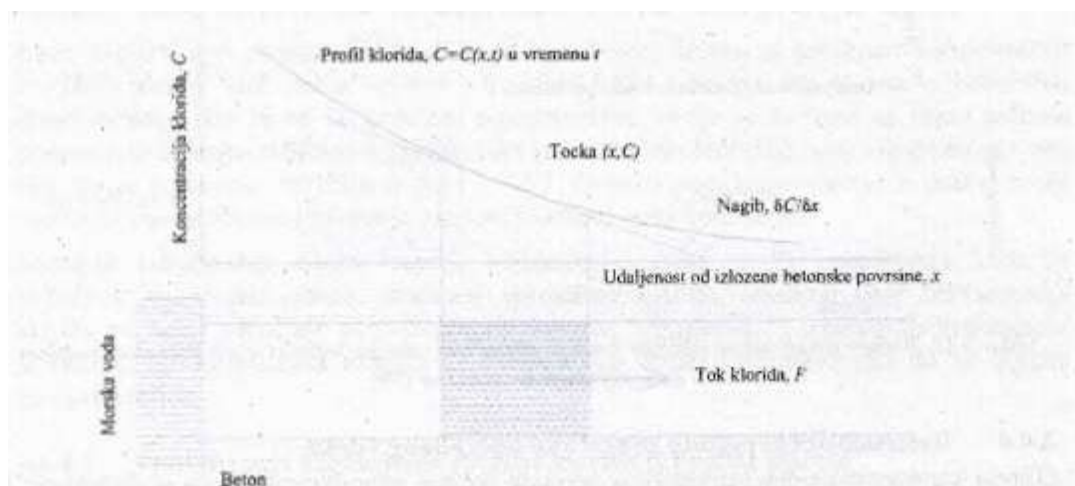
### a) Fickov prvi zakon difuzije

Tijekom 1855. godine A. Fick formulirao je zakone difuzije koristeći se direktnom analogijom s jednadžbom toplinske vodljivosti (Fourier 1822.).

No ipak, primjena Fickovog prvog zakona na procese vezane za kloridne ione u betonu nastupila je mnogo godina kasnije. 1970. i 1972.; prema tome, istraživanje i proučavanje procesa difuzije kloridnih iona kroz beton je još uvijek relativno mlado.

Najjednostavniji proračun koji se može upotrijebiti za objašnjenje difuzije kloridnih iona kroz beton je Fickov prvi zakon difuzije, gdje se pretpostavlja da je koeficijent difuzije konstantan, tj.  $D=D_0$

Ovaj zakon objašnjava da je transport kloridnih iona kroz određeno područje betona u jedinici vremena (tok  $F$ ) proporcionalan koncentracijskom gradijentu kloridnih iona izmjerenih u tom području, tj.  $dC/dx$ . Negativni predznak u Fickovom prvom zakonu difuzije javlja se zato što se difuzija kloridnih iona odvija u smjeru suprotnom od povećanja koncentracije kloridnih iona u betonu.



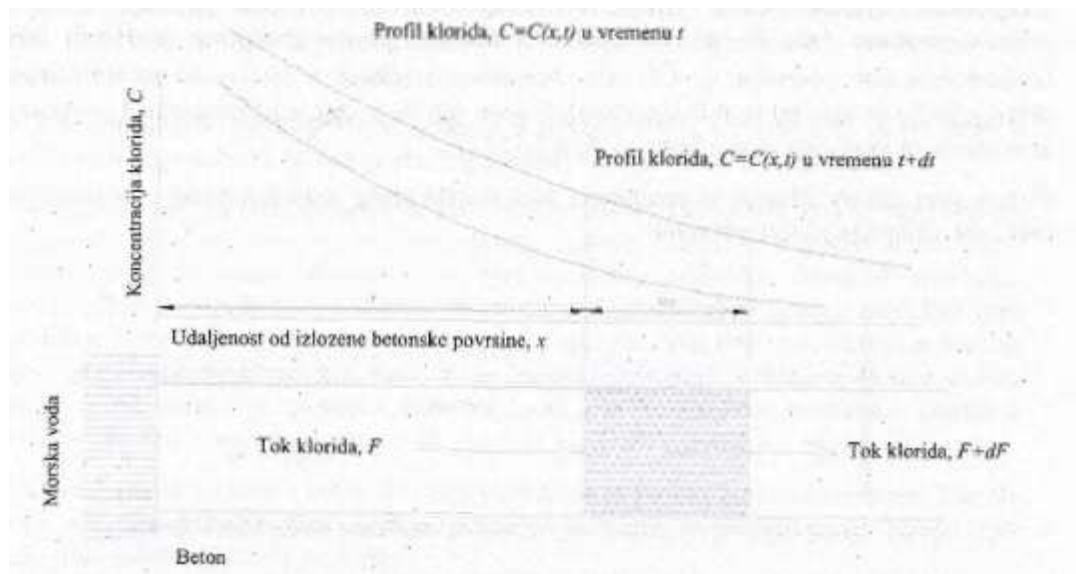
Slika 6.2. Fickov prvi zakon difuzije

Fickov prvi zakon difuzije je primjenjiv kod stacionarnog jednosmjernog i konstantnog toka, što očito nije slučaj u betonu.

## b) Fickov drugi zakon difuzije

Ako se uvjeti mijenjaju kroz vrijeme, protok klorida nije konstantan. Dakle distribucija klorida će se mijenjati kroz vrijeme i vezanje iona će imati ključnu ulogu u tom procesu.

Kod otopine je to relativno jednostavno opisati. Zakon o očuvanju masa u beskonačno malom volumenu otopine daje promjenu koncentracije klorida u vremenu u toj jedinici volumena:



**Slika 6.3.** Fickov drugi zakon difuzije

• Prodor klorida kroz beton modelira se uglavnom 2. Fickovim zakonom difuzije, a vrijedi za difuziju u otopini uz pretpostavku da je  $D$  konstantna.

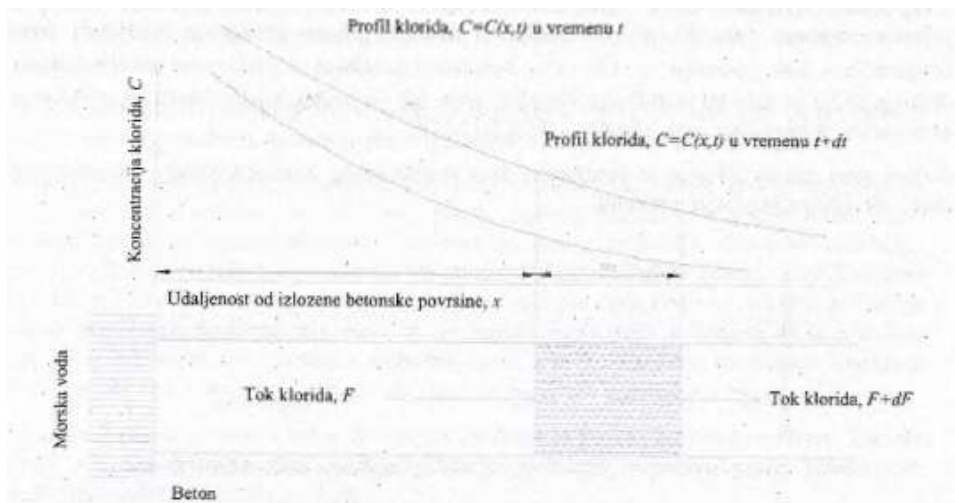
gdje je:

- $C$  koncentracija klorida u otopini
- $D$  definirani koeficijent difuzije klorida
- $x$  dubina mjerena od izložene površine
- $t$  vrijeme

## 7. DETERMINISTIČKI PRISTUP PRORAČUNU UPORABNOG VIJEKA

Glavna karakteristika determinističkog pristupa dokazu uporabljivosti je da se djelovanje S i otpornost R tretiraju kao determinirane veličine, odnosno određene vrijednosti, te kao takve nemaju nepouzdanosti. U slučaju proračuna uporabnog vijeka AB konstrukcija izloženih djelovanju klorida prodor klorida u beton predstavlja djelovanje S, a svojstvo betona da se odupire tom prodoru, definiran koeficijentom difuzije klorida, predstavlja otpornost R. Iz ovakvog pristupa proizlazi apsolutna vrijednost uporabnog vijeka konstrukcije.

Kada kloridni ioni procesom difuzije prodiru u beton, događa se promjena koncentracije kloridnih iona  $C$  kroz cijelo vrijeme  $t$  u svakoj točki  $x$  betona, što se naziva nestabilno stanje difuzije. Da bi se taj problem pojednostavio, ovdje se bavimo sa samo jednom dimenzijom difuzije, odnosno s gradijentom koncentracije kloridnih iona samo uzduž  $z$ -osi. Ovakvo pojednostavnjenje u praksi može riješiti mnoge probleme rješavanja prodora kloridnih iona kroz beton.



**Slika 7.1.** Prodor klorida u vremenu

Postupak određivanja vijeka trajanja konstrukcije svodi se na određivanje kada će vrijednost  $C(x,t)$  biti jednaka kritičnoj vrijednosti klorida, odnosno onoj koncentraciji klorida pri kojoj započinje aktivan proces korozije. Vrijednost  $C_s$  predstavlja opterećenje kloridima, dok koeficijent difuzije  $D$  karakterizira sposobnost materijala da se odupre prodoru klorida.

## Primjena na postojeće konstrukcije

Postupak određivanja preostalog uporabnog vijeka AB konstrukcija je sljedeći:

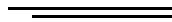
1. U sklopu istražnih radova i ocjene stanja konstrukcije određuje se dubina fronte karbonatizacije ( $x_c$ ) na svježem lomu betona. Dubina karbonatizacije može se odrediti istražnim radovima na malom broju uzoraka (npr. 3) na mjerodavnim površinama betona, pri čemu se ona računa kao srednja vrijednost dobivenih izmjerenih vrijednosti na tim uzorcima.
2. Koeficijent karbonatizacije  $K$  se određuje proračunom, ukoliko je poznata starost konstrukcije te vrijeme izloženosti  $\text{CO}_2$ .

Kada se računa uporabni vijek komponenti betona, to je moguće ukoliko se podaci sakupljaju na površinama koje su proizvedene betonom jednake kvalitete i koje su izložene jednakim uvjetima okoliša. Na odstupanja dubine karbonatizacije će u ovim okolnostima djelovati uglavnom:

- nehomogene karakteristike betona
- točnost mjerenja
- metode mjerenja.

## 8. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA DIFUZIJE KLORIDA IZ PROFILA KLORIDA

Ovaj se postupak primjenjuje na postojeće konstrukcije i kada je potrebno odrediti preostali uporabni vijek. U sklopu istražnih radova i ocjene stanja konstrukcije provodi se ispitivanje sadržaja klorida po dubini. Nakon što su određene koncentracije klorida po dubini do razine armature provodi se proračun za određivanje koeficijenta difuzije klorida. Metoda proračuna koeficijenta difuzije osniva se na Fickovom drugom općem zakonu difuzije, a do rješenja se dolazi primjenom inverzne funkcije pogreške  $erfc^{-1}$



gdje je:

$C(x,t)$  - količina kloridnih iona na dubini  $x$  poslije vremena  $t$

$C_s$  - proračunana količina kloridnih iona na površini

$C_i$  - inicijalna (početna) količina kloridnih iona u betonu

$D_{eff}$  - efektivni (srednji) koeficijent difuzije kloridnih iona

$x$  - udaljenost od kloridima izložene površine

$t$  - proteklo vrijeme

$erfc$  - komplementarna funkcija pogreške.

### **Određivanje koeficijenta difuzije $D_0$ primjenom aproksimacijske metode uz pretpostavku površinske količine kloridnih iona $C_s$**

Kod ove metode rabi se inverzna funkcija pogreške ( $erfc^{-1}$ ), koja je uvijek potrebna kada se na osnovi poznatih podataka količine kloridnih iona u armirano betonskom elementu želi doći do podatka koeficijenta difuzije kloridnih iona  $D_0$ , uz primjenu drugog Fickovog općeg zakona difuzije. Princip rada je da se na osnovi poznate jednadžbe profila kloridnih iona dođe do jednadžbe za koeficijent difuzije kloridnih iona  $D_0$ , koja se rješava pomoću inverzne funkcije pogreške.

==

gdje je:

$C_x$  – koncentracija na dubini  $x$  (%)

$C_i$  – pretpostavljena koncentracija na površini (%)

$x$  - udaljenost od kloridima izložene površine

$t$  - proteklo vrijeme (godina)

## 9. NUMERIČKI MODEL LIFE-365

Numeričkim modelom Life -365 proračunavaju se uporabni vijek i troškovi održavanja (life-cycle costs) armiranobetonske konstrukcije, koji je razvio Konzorcij Vijeća za strateški razvoj Američkog Instituta za beton (ACI Strategic Development Council Consortium). Life-365 određuje uporabni vijek i troškove održavanja na osnovi različitih antikorozivnih zaštita primijenjenih na konstrukciji. Uporabni vijek definiran je kao vrijeme od izvedbe konstrukcije do prve sanacije. Analize koje se provode unutar proračunskog modela Life- 365 mogu biti podijeljene u četiri koraka:

1. proračun razdoblja inicijacije, i razdoblja propagacije  $tp$
2. proračun razdoblja do prve sanacije, što se smatra uporabnim vijekom  $= t + tp$
3. određivanje plana održavanja građevine nakon prve sanacije
4. predviđanje troškova održavanja konstrukcije osnovano na početnim cijenama betona i eventualne zaštite, te cijena sanacije.

Life-365 se osniva na 2. Fickovom zakonu, pretpostavljajući da je difuzija dominantan mehanizam transporta klorida. Diferencijalna jednačba rješava se metodom konačnih elemenata s 1-D i 2-D mrežom, uporabom oblika centralnih diferencija za prostome pomake i Crank- Nicholsonovu (centriranu u vremenu) theta diferencijalne sheme za vremenske pomake. 1-D rješenja dobivaju se direktno iz matrice krutosti, dok se 2-D rješenja procjenjuju sukcesivno iterativnim postupkom. Vremenski korak u vremenskim pomacima dinamički se povećava dok se u analizi preostalo vrijeme smanjuje.

U model su ugrađene sljedeće pretpostavke:

- promatrani materijal je homogen (npr. nema površinskih utjecaja)
- koncentracija klorida na površini nekog elementa je konstantna (oko cijelog tog elementa) tijekom svakom vremenskog koraka
- svojstva elemenata su konstantna tijekom svakog vremenskog koraka, a proračunana su na početku svakog vremenskog intervala
- koeficijent difuzije jednolik je po cijeloj dubini elementa
- 100 elemenata je dovoljno za analizu jednodimenzijskog protoka, a mreža  $35 \times 35$  se rabi za jednu četvrtinu 2-D modela.

## Proračun razdoblja inicijacije korozije

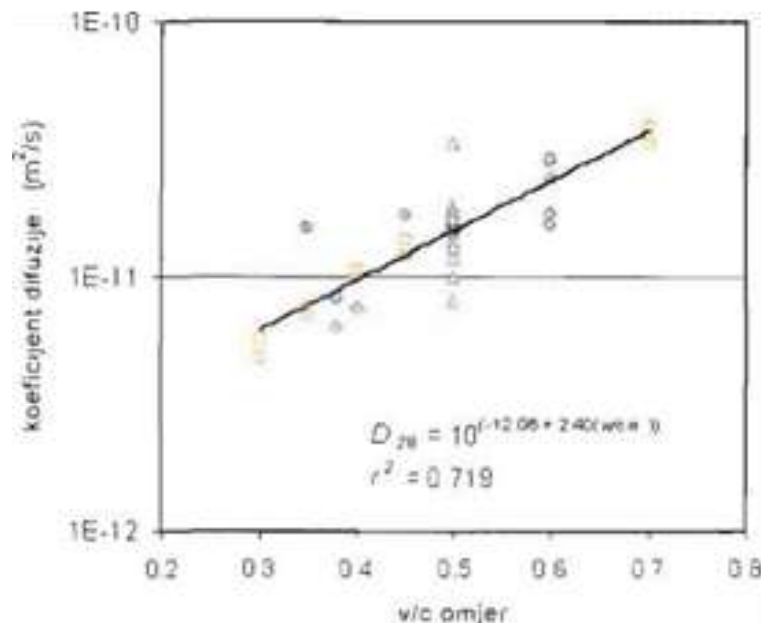
Razdoblje pobude definirano je kao vrijeme potrebno da kloridi penetriraju u beton i da se na površini ugrađene armature skupi količina klorida dovoljna za početak procesa korozije. Drugim riječima  $t$ , predstavlja vrijeme potrebno da se na dubini armature  $x_d$  postigne kritična koncentracija klorida  $C_c$ . Glavna diferencijalna jednačina je drugi Fickov zakon.

## Koeficijent difuzije

U Life-365 koeficijent difuzije klorida funkcija je vremena i temperature. Početna vrijednost koeficijenta  $D_{28}$  ovisi o vodocementnom omjeru i opisana je sljedećim izrazom:

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 - 2.40 w/c)} \text{ m}^2/\text{s}$$

Odnos između  $D_{28}$  i  $w/c$  omjera je empirijski, na osnovi istraživanja provedenih na Sveučilištu u Torontu. Priroda te zavisnosti je prikazana na slici



**Slika 9.1.** Ovisnost početnog koeficijenta difuzije  $D_{28}$  i vodocementnog omjera na 20 °C

Za ovisnost koeficijenta difuzije o vremenu rabi se eksponencijalni zakon, često predlagan u literaturi (Bamfoith, 1998.; Thomas and Bamforth, 1999.; Tang and Nilsson, 1992.; Mangat and Molloy, 1994.; Maage et al., 1995.) gdje eksponent može biti funkcija materijala i okoline. Sljedeća relacija za opisivanje vremenske ovisnosti koeficijenta  $D$  je:



---

gdje je :

$D(t)$  koeficijent difuzije u trenutku  $t$

$D_{ref}$  koeficijent difuzije u nekom referentnom trenutku  $t_{ref}$  (=28 dana)

$m$  difuzijska vremenska konstanta (ovisna o sastavu betona).

Vrijednosti  $D_{ref}$  i  $m$  proračunavaju se ovisno o sastavu betona, odnosno o v/c omjeru, vrsti i količini cementa, koje zadaje korisnik. Referentni se trenutak uobičajeno uzima 28 dana. Druga je mogućnost da korisnik sam sve definira za običan PC beton  $m = 0,20$ .

Kako bi se spriječilo smanjivanje vrijednosti koeficijenta difuzije beskonačno, jednadžba vrijedi samo za prvih 30 godina. Nakon toga razdoblja vrijednost  $D_{30g}$  proračunana prema jednadžbi smatra se konstantom za daljnje razdoblje analize.

## 10. UTJECAJI DODATAKA NA BETON

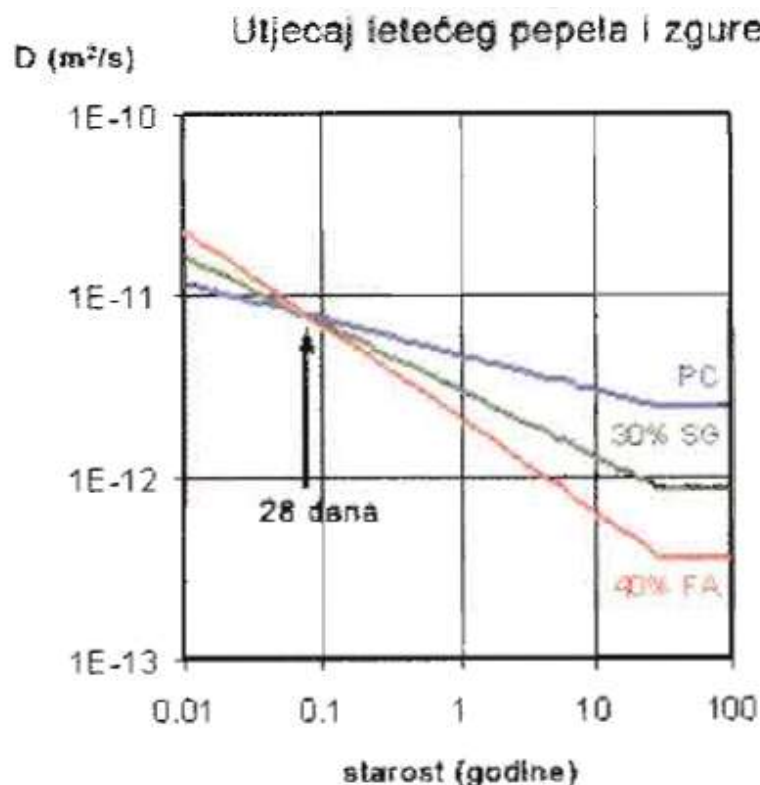
### Utjecaj letećeg pepela i zgure

Pretpostavlja se da leteći pepeo i zgura nemaju utjecaja na početni koeficijent difuzije,  $D_{20g}$ , ni na vrijednost kritične koncentracije klorida na površini armature,  $C_c$ . Ipak, oba dodatka utječu na veličinu smanjenja difuzije, odnosno na parametar  $m$ . Na osnovi udjela letećeg pepela (% FA) ili zgure (% SG) dobiva se vrijednost parametra  $m$  iz izraza:

$$m = 0,2 + 0,4 (\% \text{ FA}/50 + \% \text{ SG}/70)$$

Izraz vrijedi sve do udjela od 50 % pepela ili 70 % zgure, pa otuda  $m < 0,60$ . Model neće računati vrijednosti difuzije za veće udjele ovih materijala.

Slika 10.1 pokazuje ovisnost koeficijenta difuzije o dodacima cementu, na tri mješavine s  $v/c = 0,40$ , pripremljene samo s -običnim portlandskim cementom (PC), s 30 % zgure, te s 40 % letećeg pepela. Rezultati za ove tri mješavine su prikazane u tablici 10.2.



**Slika 10.1.** Dijagram utjecaja letećeg pepela i zgure

	m	$D_{28}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$D_{10g}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$D_{30g}$ ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
PC	0,20	7,9	3,0	2,4
30 % SG	0,37	7,9	1,3	0,87
40 % FA	0,52	7,9	0,63	0,36

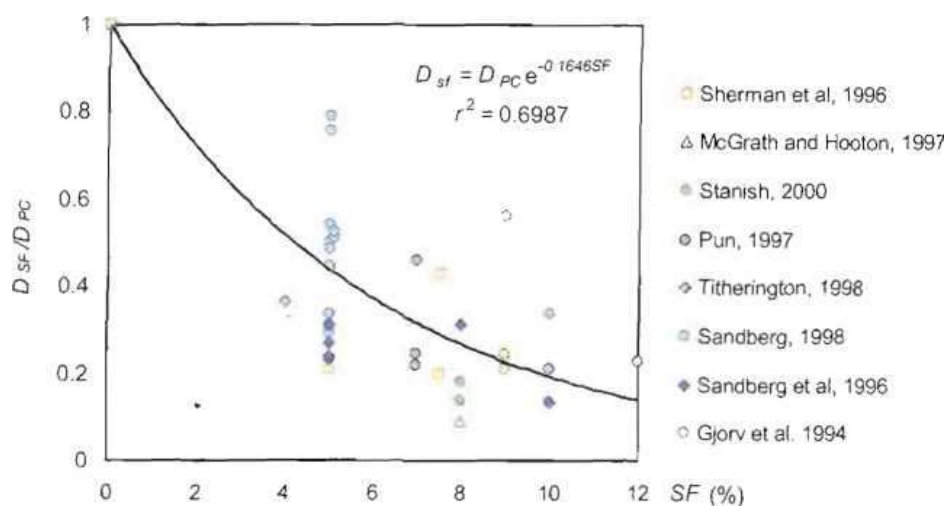
**Tabela 4.** Tablica koeficijenta difuzije ovisno o dodacima cementu

### Utjecaj silikatne prašine

Poznato je da se dodavanjem silikatne prašine značajno smanjuje propusnost i difuznost betona. U Life-365 primijenjen je faktor smanjenja početnog koeficijenta difuzije običnog betona,  $D_{PC}$ , s obzirom na udio silikatne prašine (% SF) u betonu. Rabi se sljedeći izraz, dobiven na osnovi većeg broja istraživanja (slika 11.1):

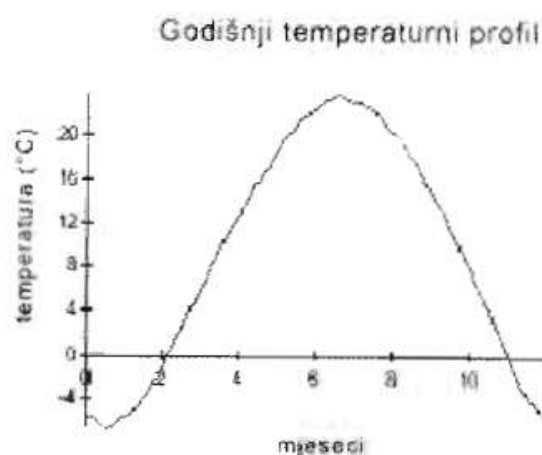
$$D_{SF} = D_{PC} e^{-0,0163 SF}$$

Izraz vrijedi sve do udjela od 15 % silikatne prašine i pretpostavlja se da silikatna prašina nema utjecaja na kritičnu koncentraciju klorida C, i na konstantu m.



**Slika 10.2.** Dijagram utjecaja silikatne prašine na početni koeficijent difuzije

U osnovnom modelu  $t_{ref} = 28$  dana i  $T_{ref} = 293\text{K}$  ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ). Temperatura betona T je promjenjiva ovisno o položaju konstrukcije, koji zadaje korisnik. Ako se željena lokacija ne nalazi u bazi podataka modela, korisnik može unijeti temperaturne prosjeke za sve mjeseci u godini.



**Slika 10.3.** *Dijagram godišnjih temperaturnih profila*

### Utjecaj inhibitora korozije

U ovom trenutku model uzima u obzir dvije vrste inhibitora korozije s utvrđenim svojstvima, a to su kalcij-nitritni inhibitor (CNI) i organski inhibitor Rheocrete 222+. Težnja je uključiti više inhibitora kada budu dostupni pouzdani podaci o njihovom djelovanju.

Unutar Life-365 ugrađeno je pet razina doziranja 30 %-tne otopine kalcij-nitritnog inhibitora (CNI). Pretpostavljeno je da dodavanje CNI-ja nema utjecaja na koeficijent difuzije,  $D_{28}$  ili koeficijent smanjenja difuzije,  $m$ . Utjecaj količine nitritnog inhibitora na početak korozije ( $C_t$ ) mijenja se prema vrijednostima prikazanim u tablici 3.

CNI (lit / m <sup>3</sup> betona)	0	10	15	20	25	30
Početak $C_t$ (% betona)	0,05	0,15	0,24	0,32	0,37	0,40

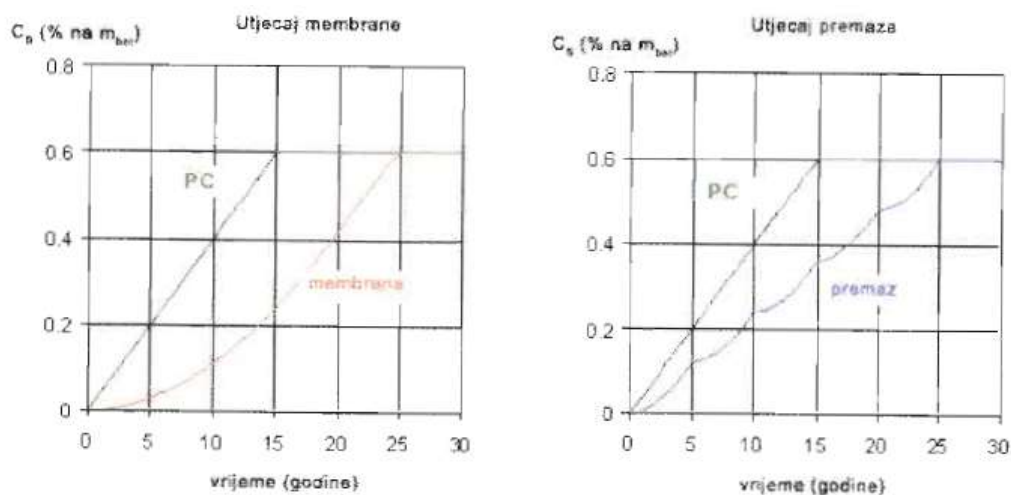
**Tabela 5.** *Utjecaj nitratnog inhibitora*

U modelu je dopuštena samo jedna koncentracija inhibitora Rheocrete-a 222+, i to od 5 lit/m<sup>3</sup> betona. Pretpostavlja se da ta količina dodatka mijenja razdoblje inicijacije do povećane dopuštene kritične količine klorida na  $C_t = 0,12\%$  (mase betona). Nadalje, pretpostavlja se da je početni koeficijent difuzije smanjen na 90 % vrijednosti pretpostavljene za betone bez

dodataka, te da je brzina skupljanja klorida na površini smanjena na pola (drugim riječima, potrebno je dvostruko dulje vrijeme da C, dospije na maksimalnu vrijednost). Ove promjene su unesene u model zbog utjecaja Rheocrete-a 222+ na veličinu pora, koji na taj način smanjuje utjecaj kapilara i difuzije.

### Utjecaj membrana i premaza

Utjecaji membrana i nepropusnih premaza uzeti su u obzir na jednostavnijoj razini u sadašnjoj verziji modela Life-365. Pretpostavljeno je da oni utječu samo na veličinu površinske koncentracije klorida. Membrane započinju sa 100 %-tnim utjecajem, koji se tijekom roka trajanja membrane smanjuje. Rok trajanja membrane je 20 godina. To znači da brzina stvaranja klorida počinje od nule, i linearno se povećava istom brzinom kao i kod nezaštićenog betona do 20 godina starosti. Na slikama 3.18 i 3.19 vidi se da brzina površinskog nakupljanja klorida kod nezaštićenog betona iznosi 0,04 % godišnje, postizući maksimalnu koncentraciju 0.06 % nakon 15 godina. Kada je na površinu nanescena membrana početna brzina je 0, nakon 20 godina postiže brzinu od 0,04 % godišnje, a maksimum se postiže nakon 25 godina. U modelu se parametri utjecaja zaštite mogu promijeniti. Također premazi i membrane mogu biti primjenjivani više puta, redovito tijekom vijeka trajanja konstrukcije. Premazi su uzeti u obzir na isti način kao i membrane, s razlikom da je njihov vijek trajanja 5 godina, pa se stoga moraju redovito nanašati svakih pet godina.



Slika 10.4. Utjecaj membrane i utjecaj premaza

## Utjecaj nehrđajućeg čelika

U postojećoj verziji Life-365 pretpostavlja se da nehrđajući čelik 316 dopušta deset puta veću kritičnu vrijednost koncentracije klorida na površini armature, dakle  $C_t = 0,50 \% / m_{bet}$

## Ulazni parametri za proračun razdoblja inicijacije korozije

U osnovnom modelu korisnik mora unijeti za svaki projekt sljedeće parametre:

- geografsku lokaciju  $C_s, T$
- tip konstrukcije i vrstu izloženosti; 1-D (npr. ploča) ili 2-D model (npr. stup u moru)
- dubinu od površine do armature = debljinu zaštitnog sloja  $x_d$
- detalje o sastavu betona i eventualnim mjerama zaštite kao što su v/c omjer, vrsta i količina mineralnih aditiva ili inhibitora, vrsta čelika i premaza, postojanje membrana ili premaza  $D_{28}, m, C_t, t_p$ .

Ovisno o tim ulaznim parametrima model odabire nužne koeficijente za proračun vremena do početka korozije. Rješenje se dobiva primjenom metode konačnih razlika na drugi Fickov zakon.

## Proračun razdoblja propagacije korozije

Razdoblje razvoja procesa (propagacije) korozije  $t_p$  je fiksno i uzima se da iznosi 6 godina, prema istraživanjima Weyersa, čiji zaključak je bio da je duljina razdoblja od početka korozije do raspucavanja između 3 i 7 godina.

Dakle vrijeme do prve sanacije,  $t$  se računa kao:  $t_r = t_i + 6$  godina. Jedina mjera zaštite koja utječe na vrijeme propagacije je uporaba čelika s epoksidnim premazom, što povećava  $t_p$  na 20 godina. Razdoblje propagacije može biti i drugačije definirano ako korisnik ima točnije podatke.

## Utjecaj čelika s epoksidnom premazom

Primjena epoksidnog premaza na čeliku ne utječe na brzinu prodiranja klorida u beton, kao ni na graničnu vrijednost klorida na površini armature gdje je ona nezaštićena. Nadalje primjena epoksidnih premaza ne utječe na razdoblje inicijacije  $t_i$ . Ipak u modelu je pretpostavljen utjecaj epoksida na duljinu razdoblja propagacije, povećanjem  $t_p$  na 20 godina.

## 11. NUMERIČKI MODEL CHLODIF

Matematički model CHLODIF [10] osniva se na drugom Fickovom zakonu difuzije. Njime se za proračunani ili odabrani koeficijent difuzije iona klorida, određenu početnu koncentraciju iona klorida u kori betona ( $C_0$ ), kritičnu količinu iona klorida ( $C_{cr}$ ), specificiranu debljinu zaštitnog sloja ( $a$ ), dobivaju :

- koncentracija iona klorida na dubini svakih 1 cm do ukupne dubine zaštitnog sloja i to za svaku godinu do specificiranog ukupnog vremena promatranja
- inicijalno vrijeme,  $t_0$ , potrebno da koncentracija klorida na dubini armature dosegne kritičnu vrijednost od 0,4 % u odnosu na težinu cementa. Unutar inicijalnog vremena na konstrukciji nema tragova oštećenja. Nakon toga vremena, slijedi vrijeme  $t_1$  u kojem korozija armature napreduje sve do ljuštenja i odlamanja zaštitnog sloja.

Prema predložen je kriterij graničnog stanja korozije prema kojem treba dokazati daje proračunski vijek trajanja građevine  $t_c$  veći ili najmanje jednak projektiranom  $t_p$ :

$$t_0 + t_i = t_c > t_p \quad [10]$$

gdje je:

$t_0$  - razdoblje inicijacije korozije armature u betonu

$t_i$  - razdoblje razvoja procesa korozije armature u betonu.

### Proračun razdoblja inicijacije korozije

Proces difuzije klorida u polubeskonačnom prostom nehomogenoga i anizotropnog medija (armiranobetonska ploča) matematički se i u ovom modelu opisuje pomoću drugog Fickovog zakona, jednodimenzijском parcijalnom diferencijalnom jednačbom paraboličkog tipa. Razdoblje inicijacije korozije ( $t_0$ ) inicirane kloridima određuje se kao vrijeme potrebno da koncentracija iona klorida dosegne kritičnu vrijednost  $C_{cr}$  na nivou armature:

$$C(c, t_0) = C_{cr} = 0,4 \% (na m_{cem}) \quad [11]$$

Kontinuirani proces difuzije iona klorida, uz pretpostavku da su koeficijent difuzije i početna koncentracija iona klorida vremenski promjenljivi, opisan je sljedećim eksperimentalnim izrazom:

## Koeficijent difuzije

Istraživanja provedena u Japanu pokazala su da je vodocementni omjer ( $v/c$ ) jedan od važnih čimbenika što utječu na promjenu koeficijenta difuzije. Na osnovi niza pokusa ustanovljena je međuovisnost koeficijenta difuzije i vodocementnog omjera u obliku:

$$\log_{10} D_{v/c} = -6,274 - 0,076 \times v/c + 0,00113 (v/c)^2 \quad [12]$$

gdje je:

$D_{v/c}$  - koeficijent difuzije ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$v/c$  - vodocementni omjer (%).

Pokusi su provedeni na betonskim uzorcima starim od 1 do 20 godina, koji su bili izloženi raznovrsnim maritimnim uvjetima (uronjeni u morskoj vodi, izloženi djelovanju plime i oseke, u području zapljuskivanja morskom vodom ili u neposrednoj blizini mora, ali izvan područja neposrednog zapljuskivanja). Rezultati su pokazali da koeficijent difuzije iona klora ne ovisi o uvjetima okolice u kojoj se konstrukcija nalazi, ali zato osjetno varira ovisno o tipu cementa i posebice starosti betona. Pokazalo se da stariji betoni imaju manji koeficijent difuzije. Sukladno dobivenim rezultatima, predložen je sljedeći izraz za proračun koeficijenta difuzije iona klora u betonu:

$$D_{Cl^-} = D_{v/c} \times D_0 \times t^{-0,1} \quad [13]$$

gdje je:

$D_{v/c}$  - koeficijent difuzije iona klora ovisan o  $v/c$  omjeru ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),

$D_0$  - koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj vrste cementa

$t$  - starost konstrukcije (godine).

Rezultati ovih ispitivanja, koji se odnose na promjenljivost koeficijenta difuzije u vremenu, mogu se objasniti popunjavanjem strukture betona tijekom procesa hidratacije (manji utjecaj) i zapunjavanjem kapilarnih pora u betonu kristalima morskih soli (veći utjecaj). Oba su procesa vremenski ovisna i s povećanjem starosti betona odvijaju se sporije.



<b>VRSTA CEMENTA</b>	<b>D<sub>o</sub></b>
portlandski cement	1
PC s ranim čvrstočama	1,2
PC s dodatkom zgure	0,3
Aluminatni cement	0,08

**Tabela 6.** Ovisnost koeficijenta  $D_o$  o dodacima cementu

U radu je razmotren utjecaj različitih čimbenika na vrijednost koeficijenta  $D_o$ , odnosno promjenu koeficijenta difuzije s obzirom na:

- promjene razdoblja pobude procesa korozije
- utjecaj sulfata
- utjecaj povećanja količine trikalcijsva aluminata ( $C_3A$ ) i zamjene dijela cementa letećim pepelom (FA)
- utjecaj zamjene dijela cementa silikatnom prašinom
- utjecaj dodatka superplastifikatora
- utjecaj temperaturnih promjena
- utjecaj raspucavanja betona pod osnovnim opterećenjem
- utjecaj betoniranja "tekstilnoj oplati".

Na osnovi prikazane analize zaključeno je da većinom raspucavanje betona do širine od 0,5 mm realno malo pridonosi povećanju njegove difuznosti, tj. koeficijent difuzije iona klora ostaje unutar reda veličine za neraspucani beton.

Za zajednički učinak dvaju ili više čimbenika promjene koeficijenta difuzije predložen je njihov umnožak. U samom programu CHLODIF nije automatiziran unos svih ovih čimbenika, pa ako ih korisnik želi uzeti u obzir, mora prethodno proračunati koeficijent difuzije i unijeti tu vrijednost kao ulazni parametar.

## 12. POVRŠINSKA KONCENTRACIJA KLORIDA

Pod početnom koncentracijom iona klora ( $C_0$ ) smatra se koncentracija klorida u površinskom sloju betona debelom 2 do 5 mm. S obzirom na relativno brzu karbonatizaciju do te dubine, i time izrazito smanjenu mogućnost stvaranja Friedelove soli, početna koncentracija se uvijek odnosi na količinu slobodnih iona klora.

Veličina iznosa početne koncentracije mijenja se u funkciji vremena. Uz pretpostavku da ioni klora nisu uneseni u beton tijekom njegove pripreme, u novoizvedenim konstrukcijama na početku vijeka njihova trajanja ( $t = 0$ ), početna koncentracija jednaka je nuli ( $C_0 = 0$ ). Promjena količine klorida u površinskom sloju betona tijekom vremena posljedica je procesa njegova vlaženja i isušivanja i taloženja kristala soli u kapilarnim porama. Ako se pretpostavi da je taloženje moguće samo u kapilarnim porama koje se potpuno mogu zapuniti, može se definirati najveća moguća koncentracija iona klora ( $C_{max}$ ) prema izrazu:

$$- \quad [14]$$

gdje je:

$C_{max}$  - najveća moguća koncentracija iona klora u površinskom sloju betona (%)

$V_c$  - volumen kapilarnih pora;  $V_c = (v/c - 0,382 \cdot h) \cdot C$

$C$  - količina cementa u betonu ( $\text{kg/m}^3$ )

$v/c$  - vodocementni omjer;  $v/c > 0,382$  (iz uvjeta veličine volumena kapilarnih pora)

$h$  - stupanj hidratacije

$q = 12,33$  - konstanta dobivena iz količine NaCl, MgCl<sub>2</sub> i CaCl<sub>2</sub> u morskoj vodi i količine iona klora u navedenim solima. Ova se vrijednost može rabiti samo pri dimenzioniranju konstrukcija koje su izložene djelovanju morske vode.

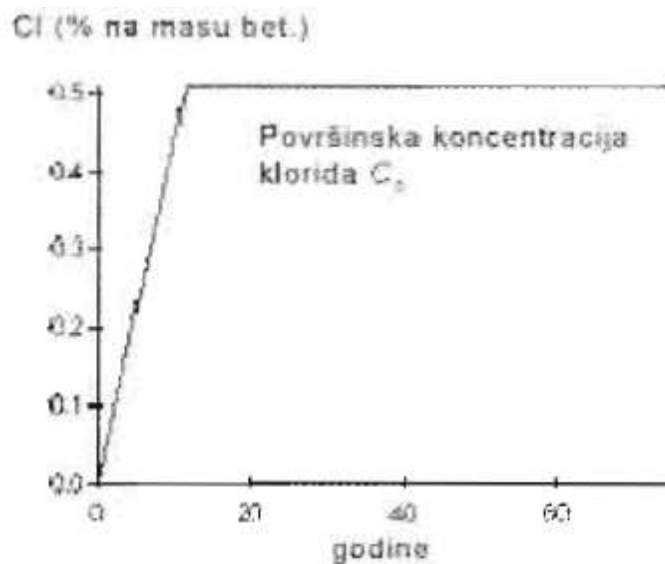
Model određuje maksimalnu koncentraciju klorida na površini  $C_s$  i vrijeme potrebno za doseganje tog maksimuma,  $t_{max}$  na osnovi tipa konstrukcije, njezinom geografskom (klimatskom) položaju i tipu okoliša, odnosno parametrima koje zadaje korisnik. U modelu su uključeni sljedeći tipovi okoliša/konstrukcija:

- područje plime i oseke
- područje prskanja morskom vodom

- do 800 m udaljenosti od mora
- do 1,5 km udaljenosti od mora
- parkirne garaže
- mostovi u ruralnim krajevima
- mostovi u gradovima.

Na slici 10.5 vidi se opterećenje kloridima koje daje model, ako se odabere most u urbanom području, smješten u kontinentalnoj klimi.

Druga mogućnost je da korisnik sam definira vrijednost  $C_s$  i brzinu dosezanja maksimalne koncentracije klorida na površini betona.



**Slika 12.1.** Dijagram opterećenja kloridima

### Kritična koncentracija klorida

Vrijednost kritične koncentracije klorida  $C_t$  na razini armature se uobičajeno uzima 0,05 % na masu betona, odnosno 0,40 % klorida na masu cementa za tipičnu betonsku mješavinu, s količinom cementa od 350 do 400 kg/m<sup>3</sup>. Treba napomenuti da ovi odnosi vrijede za beton proizveden s agregatom uobičajene gustoće i ne mogu se rabiti za lakoagregatni beton. Korisnik može sam definirati kritičnu koncentraciju klorida.

### 13. KOEFICIJENT PROMJENE POČETNE KONCENTRACIJE KVAŠENJA (K)

Na osnovu niza pokusom dobivenih podataka predložena je linearna promjena početne koncentracije u iznosu:

- $10^{-2}$ -  $10^{-1}$  % na težinu betona u zoni zapljuskivanja (kvašenja) mjesečno
- $10^{-3}$ -  $10^{-2}$  % na težinu betona u atmosferskom području mjesečno.

Linearnu pretpostavku promjene početne koncentracije u vremenu potvrđuju i eksperimentalni podaci koji ujedno ukazuju i na gotovo trenutno doseganje konstantne vrijednosti  $C_0$  u području kvašenja (odgovara uvjetu a), znatno sporiji procesa povećanja u području plime i oseke (odgovara uvjetu b) i najsporiji i ujedno najpravilniji proces povećanja u atmosferskom području (odgovara uvjetu c).

UVJETI OKOLIŠA	k
područje kvašenja	10
područje plime i oseke	1
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora do 10 m	0,8
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora 10 – 50 m	0,5
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora 50 – 250 m	0,2
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora više od 250 m	0,1
primjena soli za odmrzavanje kontinentalnog područja	0,1

**Tabela 7.** Vrijednosti koeficijenta k ovisno o području izloženosti

## 14. PRORAČUN RAZDOBLJA PROPAGACIJE KOROZIJE

Razdoblje razvoja procesa korozije ( $t_1$ ) može se odrediti iz izraza za brzinu korozije, koji se modificira uvođenjem koeficijenta povećanja gustoće korozijske struje i koeficijenta sigurnosti. Koeficijent povećanja gustoće korozijske struje uzima u obzir utjecaj sulfata, karbonatizacije i realno raspucavanje betonskog presjeka pod osnovnim opterećenjima, na brzinu smanjenja izvorne površine poprečnog presjeka armature [15].

Koeficijent sigurnosti uzima u obzir doprinos kvalitativnih čimbenika vjerojatnosti otkazivanja nosivosti presjeka u kojem je započeo proces korozije. Uvođenjem ovih koeficijenata, izraz za brzinu korozije [16] poprima sljedeći oblik:

$$\bar{\varphi}(t) = \bar{\varphi}_1 - y(0,023 \times p \times i_{corr} \times t) \quad [15]$$

gdje je:

$t$  - vrijeme proteklo od početka procesa korozije (godine)

$\bar{\varphi}(t)$  - veličina promjera armature u trenutku  $t = 0$  (mm)

$\bar{\varphi}_1$  - početni promjer u trenutku  $t = 0$  (mm)

$i_{corr}$  - gustoća korozijske struje (pA/cm<sup>2</sup>)

0,023 - koeficijent pretvorbe (pA/cm<sup>2</sup>) u (mm/godinu)

$p$  - koeficijent povećanja gustoće korozijske struje

$y$  - koeficijent sigurnosti proračunan na osnovi teorije mutnih skupova

$y \in \{1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8,2\}$

**Konačno razdoblje razvoja korozije:**

$$\bar{\varphi}(t_1) = \bar{\varphi}_1 - y(0,023 \times p \times i_{corr} \times t_1) = \bar{\varphi}_n = 0.9 \times \bar{\varphi} \quad [16]$$

→ \_\_\_\_\_

Proračun razdoblja razvoja procesa korozije nije matematički izmodeliran u CHLODIF-u, pa ukoliko se želi proračunati vrijeme razvoja procesa korozije potrebno je pravilno odabrati sve koeficijente i provesti gore opisanu proceduru.

## 15. OSNOVE PRORAČUNA

Probabilistički dokaz sigurnosti podrazumijeva da su osnovni parametri u postupku proračuna usvojeni kao slučajne veličine. U DuraCrete modelu primijenjen je probabilistički pristup opisan u normi EN 1990:2002 Basis of Structural Design. Prema tom eurokodu pouzdanost konstrukcije je ostvarena ako konstrukcija ima odgovarajuću uporabljivost uz predviđenu sigurnost i pretpostavljenu trajnost. Pouzdanost predstavlja sigurnost, uporabljivost i trajnost konstrukcije.

Stohastička priroda varijabli prikazuje se srednjom vrijednosti, standardnom devijacijom i tipom distribucije relevantnih varijabli. Važno je napomenuti da većina pristupa uporabnom vijeku računa srednji uporabni vijek tj. uporabni vijek koji će biti ostvaren s 50 %-tnom vjerojatnošću. To nije prihvatljivo s gledišta ekonomičnosti i sigurnosti. Zavisno o posljedicama nepovoljnog događaja (granično stanje), vjerojatnost zakazivanja bi trebala biti (puno) manja od 50 %. Granična stanja mogu biti npr.: konstrukcija treba sanaciju jer otpadaju komadi betona zaštitnog sloja uslijed korozije ili konstrukcija je izgubila nosivost. Potreba za sanacijom naziva se granično stanje uporabljivosti (GSU). Dostizanje nosivosti naziva se granično stanje nosivosti (GSN). Granična stanja uporabljivosti bi trebala imati malu vjerojatnost zakazivanja reda 1:100. Granična stanja nosivosti uključuju sigurnost (ljudske živote) ili gubitak nosivosti konstrukcije (velika ekonomska šteta) i moraju imati vrlo malu vjerojatnost zakazivanja reda 1:10 000. Kako inicijacija korozije nema odmah ekstremne posljedice, predložena vjerojatnost zakazivanja za ovaj događaj je 1:10. Probabilistička metoda proračuna uporabnog vijeka razvijena u DuraCrete projektu slijedi metodologiju proračuna nosivosti konstrukcija. Razvijena je pojednostavnjena metoda proračuna uporabnog vijeka, u kojoj se rabe karakteristične vrijednosti i koeficijenti sigurnosti.

U proračunu nosivosti konstrukcija smatra se da su opterećenja (djelovanja) i otpornosti neovisne o vremenu. Opterećenja su npr. djelovanja kao promet, snijeg i vjetar. Otpornosti su svojstva materijala kao granica popuštanja čelika i tlačna čvrstoća betona.

Proračun uporabnog vijeka zahtijeva formulaciju otpornosti i opterećenja zavisne o vremenu. Svojstva materijala će uglavnom biti varijable otpornosti, a varijable koje opisuju okoliš će biti varijable opterećenja, npr. prisutnost klorida iz morskog okoliša. Varijable opterećenja iz okoliša mogu rasti s vremenom (npr. zbog akumulacije klorida). Vremenskom zavisnošću

otpornosti se opisuje degradacija svojstava materijala (npr. gubitak poprečnog presjeka zbog korozije armature).

U najjednostavnijem obliku jednadžba graničnog stanja (ili proračunska jednadžba) se piše kao:

$$g(x, t) = R(t) - S(t) > 0 \quad [17]$$

gdje su:

$g(x, t)$  - funkcija graničnog stanja, gdje je  $x$  vektor baznih varijabli,  $t$  vrijeme

$R(t)$  - vremenski ovisna otpornost konstrukcije

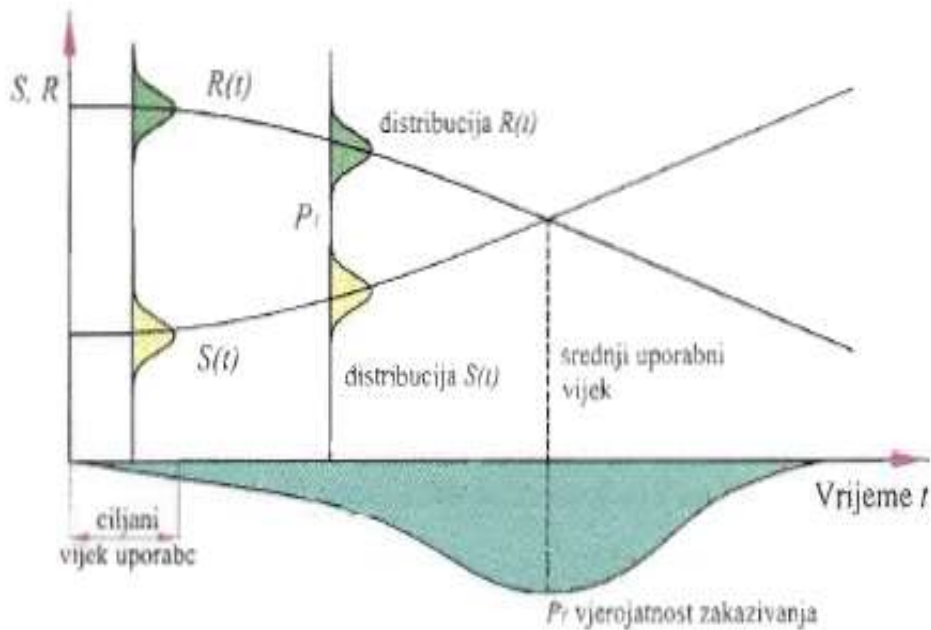
$S(t)$  - vremenski ovisno opterećenje.

Jednadžba graničnog stanja pozitivna je samo u slučaju ako je promatrana konstrukcija potpuno sposobna ispuniti zahtijevane performanse. Cilj primjene koncepta pouzdanosti je određivanje vjerojatnosti pojavljivanja određenog događaja, koji označava kraj uporabnog vijeka.

Koncept vremenski zavisne metode proračuna primijenjen je na proračunu uporabnog vijeka AB konstrukcija, uz to da opterećenje na konstrukciju ( $S(t)$ ) ostaje jednako tijekom vremena ili može porasti. S druge strane otpornost konstrukcije ( $R(t)$ ) će se smanjivati tijekom vremena uslijed procesa degradacije. Obje funkcije ( $S(t)$  i  $R(t)$ ) su stohastičke i moraju biti opisane preko distribucije oko srednje vrijednosti u svakom trenutku u vremenu. Distribucija uporabnog vijeka može se odrediti preko preklapanja distribucija  $S(t)$  i  $R(t)$  tj. ukupne vjerojatnosti da će se pojaviti situacija da će opterećenje biti veće od otpornosti konstrukcije (što je vjerojatnost zakazivanja  $P_f$ ). Nakon točke srednjeg uporabnog vijeka, funkcija gustoće vjerojatnosti zakazivanja ponovo pada ier je manja vjerojatnost da će konstrukcija još uvijek postojati. Ovaj pristup je prikazan na slici

Dakle, DuraCrete proračun uporabnog vijeka temeljen je na jednadžbama kojima se modeliraju procesi razaranja konstrukcije i njena otpornost na djelovanja iz okoliša. Matematički modeli procesa razaranja opisani su fizikalnim i kemijskim uvjetima uključujući i vremensku ovisnost. Ti modeli su osnove za probabilističku metodu proračuna uporabnog vijeka.

Kod proračuna uporabnog vijeka konstrukcija izloženih djelovanju klorida, prodor klorida smatra se opterećenjem iz okoliša ( $S(t)$ ). a svojstva materijala i konstrukcije da se odupru tom prodoru otpornost ( $R(t)$ ). Dosezanje graničnog stanja će u ovom slučaju biti definirano kao kraj razdoblja uzbude procesa korozije što znači da će “slom” nastupiti kada dubina kritične koncentracije klorida bude jednaka najmanjoj debljini zaštitnog sloja betona.



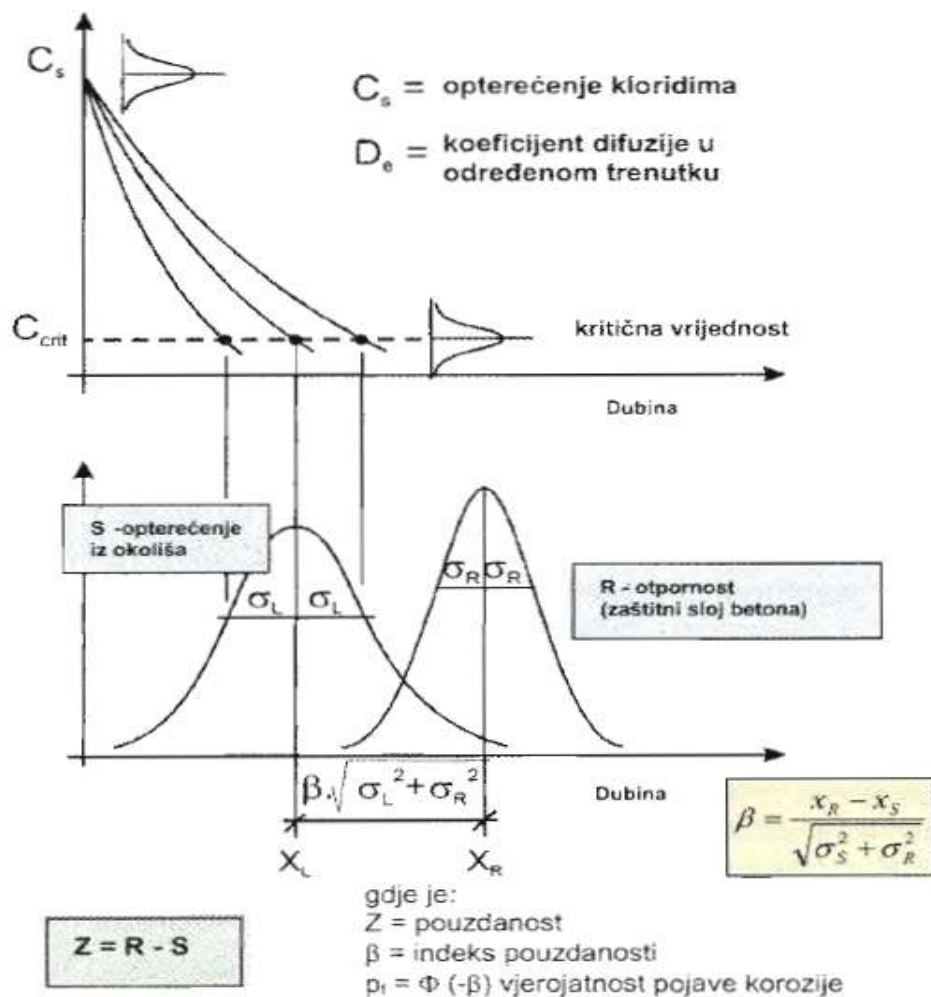
**Slika 15. 1.** Vjerojatnost zakazivanja i ciljani uporabni vijek

Kod korozije armature u betonu kao uzroka dotrajanja konstrukcije, neprihvatljivim događajem se smatra inicijacija procesa korozije. Kao što je već prije navedeno, za pojavu korozije, definiranu kao granično stanje uporabljivosti, nema velikog rizika od posljedica, pa je prihvaćena vjerojatnost zakazivanja od  $10^{-1}$ .



## 16. PRODOR KLORIDA KAO OPTEREĆENJE IZ OKOLIŠA

Na slici 16.1 su prikazane granične krivulje za profile klorida na osnovi proračunanih vrijednosti površinskog opterećenja kloridima  $C_s$  i koeficijenta difuzije  $D_e$  sa statističkim varijacijama. Točke gdje krivulje prodora klorida sijeku kritičnu vrijednost koncentracije klorida definiraju se kao opterećenje iz okoliša, odnosno dubina prodora klorida koja ima statističku distribuciju, ovdje prikazanu kao normalna distribucija, s parametrima  $x_s$  i  $\sigma_s$ . Otpornost konstrukcije je debljina zaštitnog sloja, s pripadajućim  $x_R$  i  $\sigma_R$ . Iz tih parametara se može proračunati indeks pouzdanosti prema izrazu:



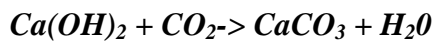
**Slika 16. 1.** Prikazuje jednostavan model za određivanje funkcije pouzdanosti  $Z$  u slučaju kad se armiranobetonska konstrukcija nalazi u morskom okolišu, odnosno kada je izložena djelovanju klorida

### **Matematički model za proces korozije uzrokovane djelovanjem klorida**

Smatra se da proces korozije počinje kada koncentracija klorida oko armaturnog čelika prijeđe kritičnu graničnu vrijednost, što se definira kao granično stanje uporabljivosti (GSU). Kritična koncentracija klorida ne ovisi samo o okolišu i vrsti veziva već i o odnosu voda/vezivo.

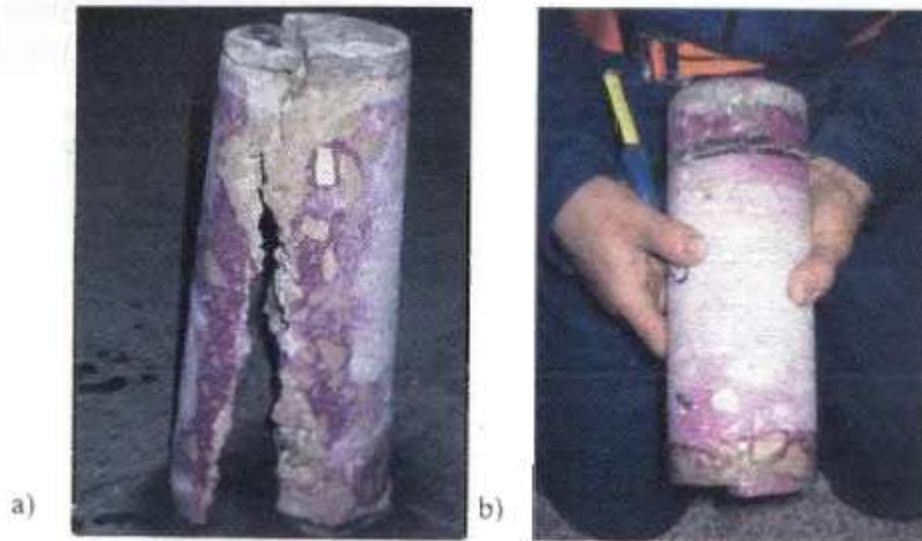
## 17. MODELI KARBONATIZACIJE

Ugljični dioksid,  $\text{CO}_2$ , koji se nalazi u zraku bez obzira na okoliš, tvori kiselu vodenu otopinu u pornoj vodi koja reagira s cementnom pastom i nastoji neutralizirati alkalnost betona. Alkalni sastojci betona prisutni su u pornoj otopini (najčešće kao natrijevi i kalijevi hidroksidi), ali i u vidu čvrstih produkata hidratacije, npr.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ili C-S-H. Kalcijev hidroksid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , je hidrat u betonu koji lako reagira s ugljičnim dioksidom iz zraka uslijed čega nastaje kalcijev karbonat. C-S-H, također može reagirati s ugljičnim dioksidom uslijed čega nastaje kalcijev karbonat i hidratiziran silicijev dioksid. Reakcije se odvijaju u vodenim otopinama prema sljedećim kemijskim jednadžbama:



Uslijed uklanjanja određene količine otopljenih hidroksida alkalnih metala iz porne otopine i ugrađivanja njihovih kationa u hidratizirani  $\text{SiO}_2$ , dolazi do smanjenja pH vrijednosti izložene površine betona do vrijednosti  $< 10$ . Ovakva vrijednost alkalnosti betona nije dovoljna da stabilizira pasivni sloj čelika. Dakle, karbonatizacija ne uzrokuje nikakvu direktnu štetu betonu, čak može na beton imati i pozitivne utjecaje poput smanjivanja poroznosti i povećanje površinske čvrstoće. Međutim, ukoliko karbonatizirani sloj betona dopre do ugrađene armature u armirano- betonskom elementu, prirodna zaštita armature je narušena i dolazi do korozije armature.

Stupanj karbonatizacije ovisi i o relativnoj vlažnosti. Ukoliko je beton suh ili potpuno potopljen u vodu, karbonatizacija neće nastupiti, jer jedna od reakcija karbonatizacije uključuje otapanje  $\text{CO}_2$  u vodi. Ispitivanje karbonatizacije se provodi prskanjem otopinom fenolftaleina pri čemu dio uzorka sniženog pH ( $< 9,5$ ) ostaje bez boje, a višeg pH poprima ljubičastu boju.



**Slika 17. 1.** a.) Uzorak betona potpuno ljubičast, pH niži od potrebnog b.) Uzorak gdje nije došlo u potpunosti do karbonatizacije

## **18. PROBABILISTIČKI PRISTUP PRORAČUNU UPORABNOG VIJEKA**

Za važnije betonske konstrukcije sve češće se zahtijeva od projekatanta projektiranje uporabnog vijeka od 50, 80, 100 ili više godina, uključujući i prikaz pouzdanosti tog proračuna. Rabeći standardne metode koje propisuju određena svojstva materijala i konstrukcije to nije moguće. Važeći propisi daju kriterije koje treba zadovoljiti (npr. maksimalni v/c omjer) bez preciznog navođenja konačnog uporabnog vijeka ili njegove pouzdanosti.

U cilju poboljšanja ovakve situacije predložen je i proveden Europski BRITE EuRam istraživački projekt u kasnim 1990-tim nazvan "Probabilistički pristup projektiranju trajnosti betonskih konstrukcija, zasnovana na ponašanju/svojstvima", ili kraće "DuraCrete". Cilj projekta bio je formulirati pristup proračunu uporabnog vijeka koji je znanstveno korektan i koji slijedi filozofiju proračuna nosivosti konstrukcije, tj. metodu proračuna "opterećenje-otpornost" s koeficijentima sigurnosti.

Rezultati DuraCrete-a dani su kao skup proračunskih jednadžbi, temeljenih na:

- matematičkim modelima degradacije betonskih konstrukcija pod utjecajem okoliša
- stohastičkoj prirodi uključenih varijabli
- prepoznavanju graničnih stanja koja pokazuju granicu između željenog ponašanja i nepovoljnog ponašanja konstrukcije prema pojedinim performansama (svojstvima).

Primjena ovih proračunskih jednadžbi dopušta proračunavanje vjerojatnosti zakazivanja odabranih performansi konstrukcije kao funkcije vremena. Prihvatljiva vjerojatnost zakazivanja ovisi o posljedicama koje nastaju zbog oštećenja.

### **Matematički model**

Model karbonatizacije spaja dva procesa: difuziju i vezanje ugljičnog dioksida, pod utjecajem npr. relativne vlažnosti, sušenja i vlaženja betona, nehomogenosti...

U projektu DuraCrete model je preuzet jer je najpogodniji za svakodnevnu primjenu te se u dovoljnoj mjeri podudara s podacima iz mjerenja.

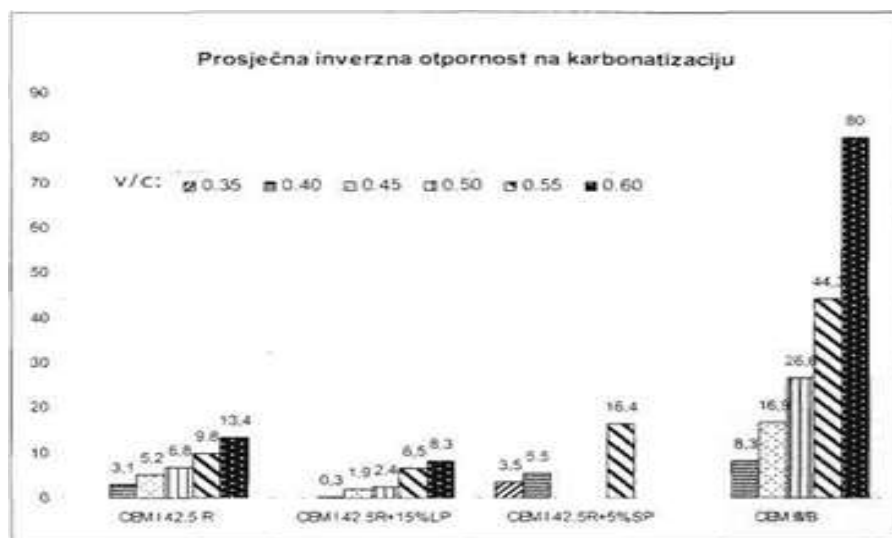
Model, koji je pročišćen, temelji se na prvom Fickovom zakonu difuzije i uzima u obzir utjecaje poput djelovanja okoliša, izgradnje i mjerenja uvođenjem:

- otpornosti na karbonatizaciju kao mjerljivog svojstva betona
- faktora utjecaja za okoliš
- faktora utjecaja za izgradnju
- faktora utjecaja za mjernu metodu

Stupanj zasićenosti vodom kontrolira brzinu penetracije  $\text{CO}_2$  u betonu. Stupanj zasićenosti je funkcija sastava betona, relativne vlažnosti (RH) i vremena vlažnosti. Stupanj zasićenosti vodom betona može se smatrati konstantnim na određenoj dubini  $x$ . Budući daje karbonatizacija ograničena samo na vanjski dio zaštitnog sloja betona, može se rabiti aproksimacija korištenjem meteoroloških podataka o oborinama i relativnoj vlažnosti okolnog zraka.

### Inverzna otpornost na karbonatizaciju

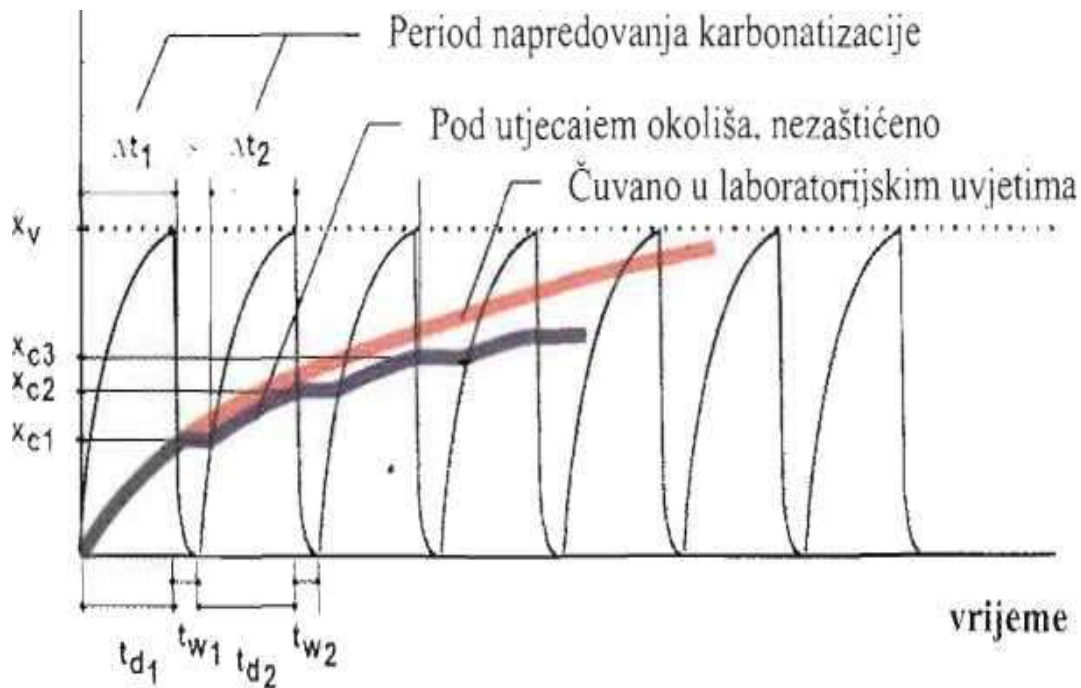
Efektivna otpornost betona na karbonatizaciju može se mjeriti ispitivanjem u ubrzanim uvjetima karbonatizacije (ACC- accelerated carbonation conditions), ukoliko se radi o projektiranju trajnosti nove konstrukcije, ili mjerenjem dubine karbonatizacije postojeće konstrukcije. Ubrzana karbonatizacija“ usvojena je kao ispitivanje sukladnosti za nove konstrukcije. Prosječne vrijednosti za inverznu otpornost na karbonatizaciju



**Slika 18.2.** Podaci za inverznu otpornost na karbonatizaciju određeni pomoću ubrzanog ispitivanja karbonatizacije

## Mikroklimatski utjecaj $w$

Parametar  $w$  naziva se „faktor mikroklimatskih utjecaja“, budući da će kiša dovesti do zasićenosti betonske površine vodom što će, barem privremeno, spriječiti daljnje napredovanje karbonatizacije jer su pore ispunjene vodom.



**Slika 18.3.** Napredovanje karbonatizacije na uzorcima u različitim uvjetima izloženosti (u laboratoriju, pod utjecajem okoliša-nezaštićeno)

Napredovanje karbonatizacije uvelike ovisi o frekvenciji i rasporedu perioda vlaženja. Kako bi se vrijeme vlažnosti prikazalo brojčano potrebno je registrirati kišne periode (trajanje i intenzitet). Sadržaj vlage prije kiše, te zasićenost betona vodom odlučujući su za područje koje je pod utjecajem određene količine oborinske vode, što dovodi do velike kompleksnosti modela.

Podaci o dubini karbonatizacije za nezaštićene konstrukcije koje se nalaze pod utjecajem okoliša moraju biti povezani s meteorološkim podacima kako bi se utvrdile vrijednosti za parametre regresije, a za vertikalne elemente mora se uzeti u obzir vjerojatnost zapljuskivanja od vozila.

## **Faktor relativne vlažnosti**

Faktor relativne vlažnosti može se brojačno izraziti tako da se usporede podaci pri promatranim klimatskim uvjetima s onima pri referentnim klimatskim uvjetima.

## **Koncentracija CO<sub>2</sub> na površini**

Na koncentraciju CO<sub>2</sub> u atmosferi najviše utječu sljedeća dva faktora:

1. Izgaranje fosilnih goriva
2. Globalno smanjenje vegetacije.

Prosječni sadržaj CO<sub>2</sub> u zraku varira između 350 i 380x 10<sup>-6</sup>, što je jednako 0,00057 do 0,00062 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Međutim te vrijednosti mogu znatno varirati ovisno o mikrolokaciji jer neki procesi dovode do smanjenja CO<sub>2</sub> u zraku npr. apsorpcija mora, fotosintetski procesi vegetacije, dok drugi uzrokuju povećanje sadržaja npr. u tunelima kod kojih je slaba izmjena zraka.

## **Faktor njege**

Utjecaj njege na svojstvo difuzije u betonu ovisi o odabranom materijalu, te okolišu i uvjetima njege. Kako bi se analizirali podaci o dubini karbonatizacije moraju se uvesti neki kriteriji sortiranja kao što su:

- vrijeme pregleda
- klasifikacija okoliša (npr. prema HRN EN 206-1: XC 1 do XC 4)
- klasifikacija materijala (tip veziva, v/c).

Podaci su vezani na referentni postupak izvedbe, koji je odabran za 7 dana vlažne njege

## **Zaštitni sloj betona d<sub>c</sub>**

Debljina zaštitnog sloja odabire se tijekom projektiranja, međutim tijekom izgradnje će doći do promjena zbog nepreciznosti izvedbe. Vrijednosti debljine zaštitnog sloja betona su ograničene na pozitivne vrijednosti. Trebao bi imati maksimalnu granicu, budući da zaštitni sloj ne može premašiti geometrijske granice elementa. Slučaj da je armaturni čelik smješten odmah kraj oplata ne može se uzimati u obzir kod ovakve distribucije. Takve greške trebaju se izbjeći kvalitetnim upravljanjem.



## Nedostaci modela

Sljedeći aspekti su zanemareni:

- različita svojstva vlažnosti karboniziranog i nekarboniziranog područja zaštitnog sloja
- utjecaj temperature betona: pri višoj temperaturi kemijska reakcija CO<sub>2</sub> s hidroksidima iz otopine u porama je ubrzana. Kemijska reakcija je proces koji se ubrzava uslijed prodora CO<sub>2</sub>, tako da su temperaturni utjecaji manje važni.
- promjena otpornosti na karbonatizaciju pri povećanoj starosti zbog hidratacije. Podaci ovisnost o starosti nisu dostupni. Za sada postoje samo podaci o betonu ispitanom pri starosti od 28 dana za različite tipove veziva.
- Međudjelovanje karbonatizacije i drugih degradacijskih mehanizama kao npr. djelovanje klorida, zamrzavanje.

## 19. MODELI ZAMRZAVANJA

Degradacije betona zbog zamrzavanja proizlazi iz pojave da led zauzima 9 % veći volumen od vode. Zamrzavanjem vode u sustavu pora betona dolazi do pojave naprezanja, koja razaraju strukturu materijala kada postanu veća od vlačne čvrstoće betona.

Powers je postavio teoriju zamrzavanja betona prema kojoj u velikim porama dolazi do pojave hidrauličnog tlaka, dok u kapilarnim porama dolazi do djelomičnog zamrzavanja otopina što rezultira osmotskim tlakom. Voda u kapilarama sadrži topljive tvari poput lužina, klorida i kalcijeva hidroksida koje snižavaju točku leđišta.

Pritom, osmotski tlak uzrokuju lokalne promjene koncentracije otopina u porama. Opaženo je međutim da zamrzavanjem tekućina poput benzena koji ne povećava volumen prelaskom u krutu fazu dolazi do širenja uzoraka cementne paste. To navodi na zaključak da postoje i drugi mehanizmi koji uzrokuju nastajanje oštećenja betona zbog zamrzavanja. U cementnoj pasti postoje tri vrste vode: kapilarna voda u malim kapilarama (20 nm - 10 pm), adsorbirana voda u gel porama (0,5 nm - 10 nm) i voda između slojeva C-S-H strukture. Utvrđeno je da se voda u gelporama ne zamrzava do -80 °C. Dakle kada se vodom zasićeni beton izloži zamrzavanju, u većim se šupljinama pojavljuje led, a u gel porama tekuća voda, zbog čega dolazi do termodinamičke neravnoteže. Zamrznuta se voda nalazi u stanju manje energije od hladne tekuće vode, sustav teži prijeći u stanje manje energije što rezultira gibanjem vode iz gel pora u kapilarne pore, nastajanjem tlaka u kapilarnim porama i širenjem materijala. Ako u cementnoj pasti postoje zračne šupljine led koji kristalizira u šupljinama može se slobodno širiti. Rast kristala leda u šupljinama crpi vodu iz gel pora u kojima se smanjuje tlak, posljedica čega je skupljanje cementne paste. Ovaj mehanizam objašnjava skupljanje uočeno pri zamrzavanju cementne paste s velikom količinom uvučenog zraka. Također daje objašnjenje pojavi širenja cementne paste u slučaju benzena koji zamrzavanjem ne povećava volumen.

Oštećenja betona zbog zamrzavanja pojavljuju se u nekoliko različitih oblika. Najčešće dolazi do pojave pukotina i odlamanja dijelova betona. Kod konstrukcija izloženih ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja uz prisutnost vode i soli za odmrzavanje dolazi do ljuštenja površine betona. Osim toga poznato je da nastajanje pukotina između zrna agregata i cementne matrice ovisi o vrsti i podrijetlu agregata.

## Unutarnje oštećenje betona od zamrzavanja

Unutarnje oštećenje betona od zamrzavanja nastupa samo ukoliko je prisutna duga izloženost konstrukcije prodoru vode. Konstrukcije koje su najčešće izložene ovom obliku degradacije su:

- konstrukcije koje upijaju vodu iz tla
- konstrukcije koje su izložene vodi koja dolazi i povlači se kao što su potporni zidovi
- konstrukcije koje su neprestano izložene vodi, kao što su hidrotehničke građevine, brane i si.
- konstrukcije koje su više ili manje stalno izložene otpadnim vodama.

Površina betona koji je izložena ovim djelovanjima ima pukotine koje ukazuju na unutarnju degradaciju betona uslijed širenja od zamrzavanja. Sličan izgled oštećenja uzrokuju prodor sulfata u beton i odgođeno formiranje etringita. Količina oštećenja može varirati ovisno o dijelu konstrukcije.

Izložena površina



**Slika 19.1.** *Tipičan uzorak unutarnjeg raspucavanja uzrokovanog unutarnjim zamrzavanjem u betonu*

Ovaj način oštećenja uzrokuje gubitak tlačne i vlačne čvrstoće betona, smanjenje modula elastičnosti, i gubitak veze između betona i armature. Utječe na moment i posmični kapacitet kod ploča i greda i tlačni kapacitet stupova, smanjivanjem njihove tlačne i vlačne čvrstoće. Također može jako utjecati na nosivost prednapetog betona, a mijenja i raspodjelu momenata i sila u konstrukciji time što mijenja krutost dijelova konstrukcije.

## Ljuštenje betona uslijed zamrzavanja

Zamrzavanje započinje prvo na površini betona, te se led i voda šire prema unutrašnjosti betona. Sljedeće odmrzavanje omogućuje upijanje novih količina vode, tako da ciklusi zamrzavanja/odmrzavanja zapravo „upumpavaju“ vodu u strukturu betona. Posljedica je

ljuštenje površine betona što s ciklusima zamrzavanja/odmrzavanja prodire sve dublje smanjujući time presjek betonskog elementa.

Granično stanje zamrzavanja Pretpostavlja se da do oštećenja betona uslijed zamrzavanja neće doći ako kapilarno zasićenje ostane manje od kritične vrijednosti zasićenosti. Faza inicijacije: dosizanje kritičnog zasićenja Predviđanje zasićenja tijekom vremena u promatranoj konstrukciji je vrlo složen problem, koji se rješava modeliranjem na osnovi laboratorijskih ispitivanja. Kod primjene u praksi uočava se nesigurnost modela.

### Poluprobabilistički pristup proračunu oštećenja betona od zamrzavanja

Jednadžba graničnog stanja faze inicijacije procesa unutarnjeg oštećenja betona od zamrzavanja može se prikazati kao funkcija kapilarnog zasićenja  $S_{cap}$ , i kritične vrijednosti zasićenosti  $S_{cr}$ , u sljedećem obliku:

$$P_f(t) = P(S(t) > S_{cr}) \quad [18]$$

gdje je:

$P_f$  - vjerojatnost otkazivanja (-)

$S_{cr}$  - kritični stupanj zasićenosti vodom (-)

$S(t)$  - stupanj zasićenosti vodom (-)

v/c = 0,30	v/c = 0,45	v/c = 0,70
0,97	0,96	0,93

**Tabela 8.** U tablici su dani kritični stupnjevi zasićenosti betona u ovisnosti o v/c omjeru.

Stupanj kapilarne zasićenosti ovisi o materijalu i o uvjetima okoliša. Jedan od načina kako da se uzmu u obzir uvjeti okoliša jest da se provede ispitivanje kapilarne elevacije u laboratoriju, te da se uz pomoć korekcijskih faktora uzme u obzir razlika između apsorpcijskog ponašanja pri ispitivanju i u uvjetima okoliša.

Međutim, predviđanje razvoja stvarnog stupnja zasićenosti tijekom vremena u promatranoj konstrukciji je i dalje vrlo složeno. Jednadžba za prodor vode ovisan o vremenu može se utvrditi ispitivanjem kapilarnog upijanja u laboratoriju. Najveća vrijednost stupnja zasićenosti u danom periodu.

Kako bi se odredio  $t_{max}$  potrebno je razlikovati tri različita okoliša:

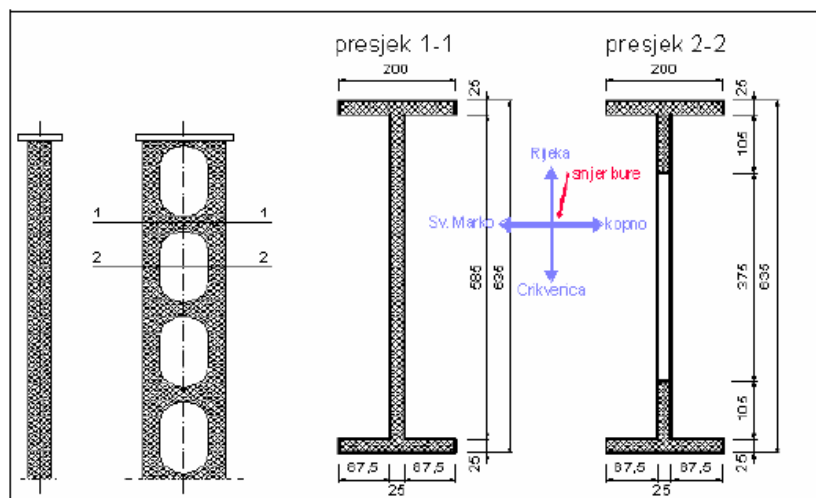
1. okoliš u kojem je sušenje betona zanemarivo. U ovom slučaju najdulji period vlaženja je jednak starosti konstrukcije.
2. sušenje dovodi stupanj zasićenosti ispod točke loma. Najdulji period vlaženja jednak je trajanju kiše, o čemu su podaci dobiveni u najbližoj meteorološkoj postaji.
3. okoliš koji dovodi do stupnja zasićenosti koji je neprestano ispod/iznad točke loma za određene periode. Ovdje se mora odrediti ekvivalentni period vlaženja. Najjednostavniji pristup je da se postavi najdulji period vlaženja jednak  $k \times t$ , gdje je  $t$  starost konstrukcije.

Zbog nedostatka podataka o prodoru vode kod postojećih konstrukcija model je vrlo nesiguran, što se može uzeti u obzir uvođenjem nesigurnosti modela  $m$ .

## 20. OBRADA ZADATKA PRIMJER MATEMATIČKOG MODELA NA PRORAČUNA UPORABNOG VIJEKA AB STUPA IZLOŽENOM DJELOVANJU KLORIDA NA KRČKOM MOSTU

### 20.1. Opis AB stupa

Primjeru provedeno je eksperimentalno utvrđivanje sadržaja klorida na Krčkom mostu, koji je izložen djelovanju morskog okoliša više od 25 godina. Krčki most spaja kopno s otokom Krkom preko otočića Sv. Marko, preko dva morska kanala s dva luka, pri čemu je veliki luk raspona 390 m klasično armirani luk. Ukupna duljina mosta je 1310 m, što uključuje i 96 m ceste u zasijeku na otočiću Sv. Marko. Građen je u razdoblju od srpnja 1976. do srpnja 1980. godine.



**Slika 20. 1.** Presjeci stupa na Krčkom mostu

Za izradu betona ugrađenog u Krčki most upotrebljavani su sljedeći materijali:

- oko 450 kg cementa (PC 20z 45 Dalmacija cement) po m<sup>3</sup> ugrađenog betona
- aluvijalni kopani karbonatni šljunak iz Grobničkog polja maksimalnog zrna 31,5 mm, frakcioniran u frakcije 0-4, 4-8, 8-16 i 16-31,5 mm
- dodaci betonu: 0,15% aeranta i 0,2% superplastifikatora
- v/c omjer 0,36 kod  $D_{\max} = 32$  mm i v/c omjer 0,37 kod  $D_{\max} = 16$  mm.

Srednje tlačne čvrstoće kontrolnih uzoraka betona tijekom izgradnje konstrukcije kretale su se od 48,8 N/mm<sup>2</sup> do 55,6 N/mm<sup>2</sup>. Ispitano je ukupno oko 4400 kontrolnih uzoraka, uz standardne devijacije od 3,9 do 5,4 N/mm<sup>2</sup>. Laboratorijski beton je imao kapilarno upijanje 0,65%, vlačnu čvrstoću savijanjem 9,3 N/mm<sup>2</sup> i statički modul elastičnosti 41,3 kN/mm<sup>2</sup>. Glavna agresivna djelovanja iz okoliša na armiranobetonsku konstrukciju Krčkog mosta su sljedeća:

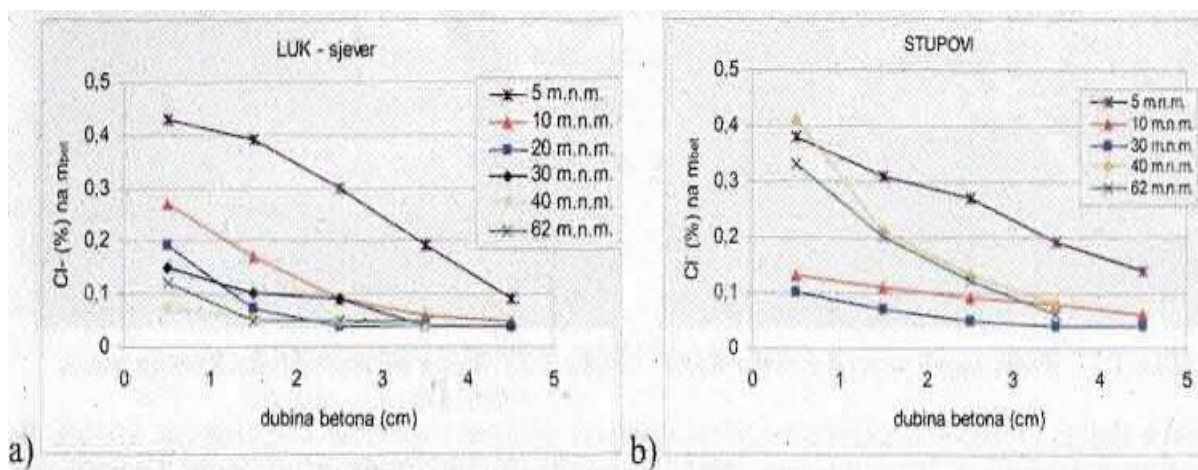
1. vrlo jaki i česti vjetrovi (bura i jugo) koji dižu morską prašinu i kloridne ione i nanose ih na konstrukcijske dijelove i iznad područja plime i oseke i područja zapljuskivanja valovima
2. visoki salinitet mora (3,5 %)
3. relativno visoka srednja godišnja temperatura i relativno velika vlažnost zraka tijekom cijele godine, što ubrzava prodor klorida i kloridnu koroziju armature
4. povremeni zimski padovi temperature ispod 0 °C i zamrzavanje, koje slabi površinski sloj betona i također ubrzava prodor klorida u beton.

Okoliš Krčkog mosta je, dakle, vrlo agresivan što je uzrokovalo uznapredovalu koroziju.

## **20.2. Praktični dio**

### **Analiza sadržaja klorida u betonu**

Eksperimentalno utvrđivanje ukupnog sadržaja klorida u betonskim uzorcima uzetim iz velikog luka Krčkog mosta provedeno je pomoću standardnih laboratorijskih metoda prema normama HRN B.B8.020 i HRN EN 14629. Uzorci betonskog praha su uzimani na terenu, ukupno s 284 lokacije, pri čemu je betonski prah za svaku poziciju uziman iz minimalno tri rupe. Analiza ukupnog sadržaja klorida u betonu je učinjena na više od 1200 uzoraka. Na slikama 20.2 a) i b) prikazani su tipični profili koncentracije klorida (sadržaj klorida po dubini) za luk i stupove u ovisnosti o visini nad morem.



**Slika 20. 2.** Tipični profili koncentracije klorida a) za luk i b) za stupove u ovisnosti o visini mora

### Kritična koncentracija klorida

U ovom radu je za slučaj Krčkog mosta prihvaćena kritična koncentracija ukupne količine klorida od 0,60% na masu cementa, odnosno 0,11% na masu betona na razini armature. Ova relativno visoka vrijednost odgovara dosadašnjim opažanjima s Krčkog mosta.

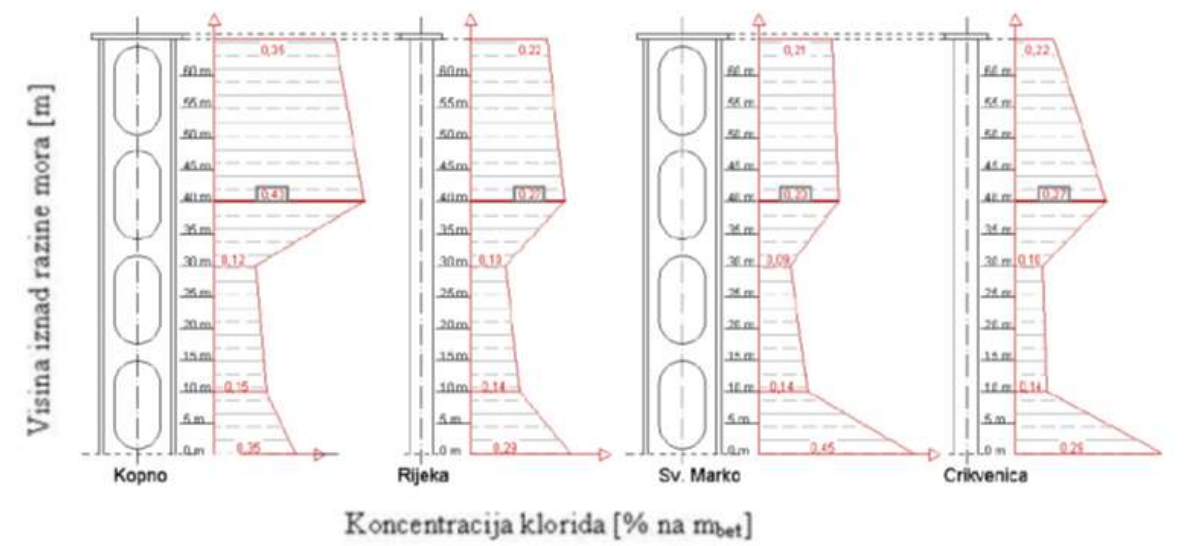
### Analiza površinske koncentracije klorida

Nakon eksperimentalnog određivanja profila klorida po područjima stupova i luka, provedena je analiza rezultata i statistička obrada podataka. U tablici 9. prikazani su rezultati analize sadržaja klorida u površinskom sloju betona, tzv. površinska koncentracija klorida za stupove i za luk. Na slici prikazane su površinske koncentracije klorida u ovisnosti o udaljenosti od mora. Iz dijagrama je vidljivo da se površinska koncentracija klorida mijenja u ovisnosti o udaljenosti od mora, ali očito i o orijentaciji elementa, na koju utječe smjer vjetrova.



Pozicija	Visina (m. n. m.)	KONSTRUKCIJSKI ELEMENT					
		STUP			LUK		
		$C_s$ (% na $m_{bet}$ )	$\bar{\sigma}_s$ (% na $m_{bet}$ )	$C_{Sd}$ (% na $m_{bet}$ )	$C_s$ (% na $m_{bet}$ )	$\bar{\sigma}_s$ (% na $m_{bet}$ )	$C_{Sd}$ (% na $m_{bet}$ )
1	0	0,38	0,07	0,47	0,31	0,14	0,49
2	10	0,13	0,04	0,18	0,21	0,06	0,29
3	20	-	-	-	0,16	0,04	0,21
4	30	0,10	0,02	0,13	0,12	0,03	0,16
5	40	0,30	0,09	0,42	0,09	0,01	0,10
6	62	0,22	0,10	0,35	0,09	0,03	0,13

Tabela 9. U tablici prikazani su rezultati analize sadržaja klorida u površinskom sloju betona



Slika 20.3 Prikaz izmjerenih vrijednosti koncentracija klorida na stupovima Krčkoga mosta

Ulazni parametar		Vrijednost
površinska koncentracija klorida	$C_S$ (% na $m_{bet}$ )	0,38
kritična koncentracija klorida	$C_{crit}$ (% na $m_{bet}$ )	0,11
debljina zaštitnog sloja	$X_d$ ( mm )	25-50
vodocementni omjer	v/c ( - )	0,40
efektivni koeficijent difuzije	$D_{sr}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s )	0,85 0,51
vremenska konstanta	m ( - )	0
teorijski koeficijent difuzije	$D_i$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s )	0,94 (za 365 dana)
vremenska konstanta	m ( - )	0,10

**Tabela 10.** U tablici su prikazani ulazni parametri za Krčki most

### Koeficijent difuzije klorida

Nakon što su određene koncentracije klorida po dubini do razine armature proveden je proračun za određivanje koeficijenta difuzije klorida. Metoda proračuna koeficijenta difuzije se osniva na Fickovom drugom općem zakonu, a do rješenja se dolazi primjenom inverzne funkcije pogreške erfe<sup>1</sup>.

Područje	Nadmorska Visina (m)	Element			
		STUP		LUK	
		Opterećenje kloridima	Parametar klorida	Opterećenje kloridima	Parametar klorida
		$C_{Sd}$ (% na $m_{bet}$ )	$D_{sr}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s )	$C_{Sd}$ (% na $m_{bet}$ )	$D_{sr}$ ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s )
1	0	0,48	1,45	0,48	0,52
2	10	0,17	0,76	0,29	0,55
3	20	0,13	0,75	0,21	0,51
4	30	0,12	0,97	0,17	0,78
5	40	0,41	0,52	0,09	2,23
6	62	0,35	0,56	0,13	0,56
		sr. vrij.	0,84	sr. vrij.	0,86
		st. dev.	0,34	st. dev.	0,68

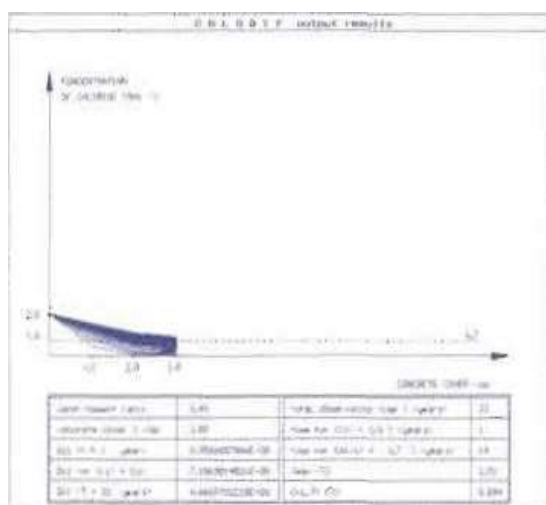
**Tabela 11.** U tablici su prikazani koeficijenti difuzije na Krčkom mostu po visini

## Proračun uporabnog vijeka pomoću modela *CHLODIF*

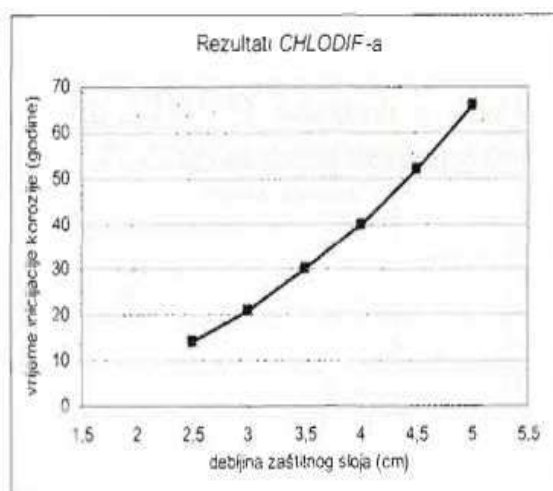
Ulazni parametri za proračun uporabnog vijeka pomoću modela *CHLODIF* prikazani su u tablici 10, a rezultati proračuna profila klorida za debljinu zaštitnog sloja od 2,5 cm.

### 20.3 Analiza rezultata

Rezultati proračuna vremena inicijacije u ovisnosti o debljini zaštitnog sloja prikazani su na slici 20.4. Izmjerene vrijednosti debljine zaštitnog sloja betona kretale su se od 2,5 do 5 centimetara pa je iz toga razloga variran ovaj parametar u tom rasponu. No srednja vrijednost je iznosila 3.8 cm, uz standardnu devijaciju od 1 centimetra. Znači prema *CHLODIF*-u najrelevantniji broj za vrijeme uzbude procesa korozije bi bio 37 godina, očitano iz slike 20.5. To se djelomično poklapa sa stvarnom situacijom, jer stanje velikog luka Krčkog mosta uglavnom je dobro i nema vidljive korozije, ali ipak prema mjerenjima stvarnih profila klorida je jasno daje na nekim dijelovima dosegnuta kritična koncentracija klorida i da će aktivni proces korozije započeti i ranije od ovog perioda proračunatog *CHLODIF*-om.



**Slika 20.4.** Profili koncentracije klorida



**Slika 20.5.** Ovisnost vremena inicijacije

*korozije o debljini zaštitnog sloja za Krčki most*

*proračunani *CHLODIF*-om*

Na slici prikazana je usporedba rezultata proračuna vremena inicijacije procesa korozije u ovisnosti o vodocementnom omjeru, kao ulaznom parametru. Očito je da je *CHLODIF* osjetljiviji model s obzirom na kvalitetu betona odnosno na debljinu zaštitnog sloja. Kod modela *CHLODIF* rezultati proračuna su puno bliži stvarnim vrijednostima za manje vrijednosti vodocementnog omjera, odnosno za betone bolje kvalitete.

Kod proračuna numeričkim modelom *CHLODIF* uočeno je da su proračunske vrijednosti maksimalne površinske koncentracije klorida nerealno velike, odnosno da su izmjerene koncentracije klorida u površinskom sloju betona znatno manje. Na tu vrijednost je moguće utjecati smanjivanjem koeficijenta  $k$ , i to tako da se  $k$  uzme znatno manji od 1, pa da se u promatranom vremenu ne postigne tako velika koncentracija klorida. Definiranje koeficijenta  $k$  nije u tom slučaju u skladu s prijedlogom autorice modela, opisanom u [2], Drugi način približavanju rezultata realnom stanju je samostalno definiranje koeficijenta difuzije, i to tako da se unese koeficijent umanjenja, osnovan na eksperimentalnim istraživanjima određene vrste betona.

<b>UVJETI OKOLIŠA</b>	<b>k</b>
područje kvašenja	10
područje plime i oseke	1
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora do 10 m	0,8
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora 10 – 50	0,5
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora 50 – 250 m	0,2
atmosfersko područje – udaljenost konstrukcije od mora više od 250 m	0,1
primjena soli za odmrzavanje kontinentalnog područja	0,1

**Tabela 12.** *Vrijednosti koeficijenta k ovisno o području izloženosti*

<b>VRSTA CEMENTA</b>	<b>D<sub>o</sub></b>
portlandski cement	1
PC s ranim čvrstočama	1,2
PC s dodatkom zgure	0,3
Aluminatni cement	0,08

**Tabela 13.** *Ovisnost koeficijenta D<sub>o</sub> o dodacima cementu*

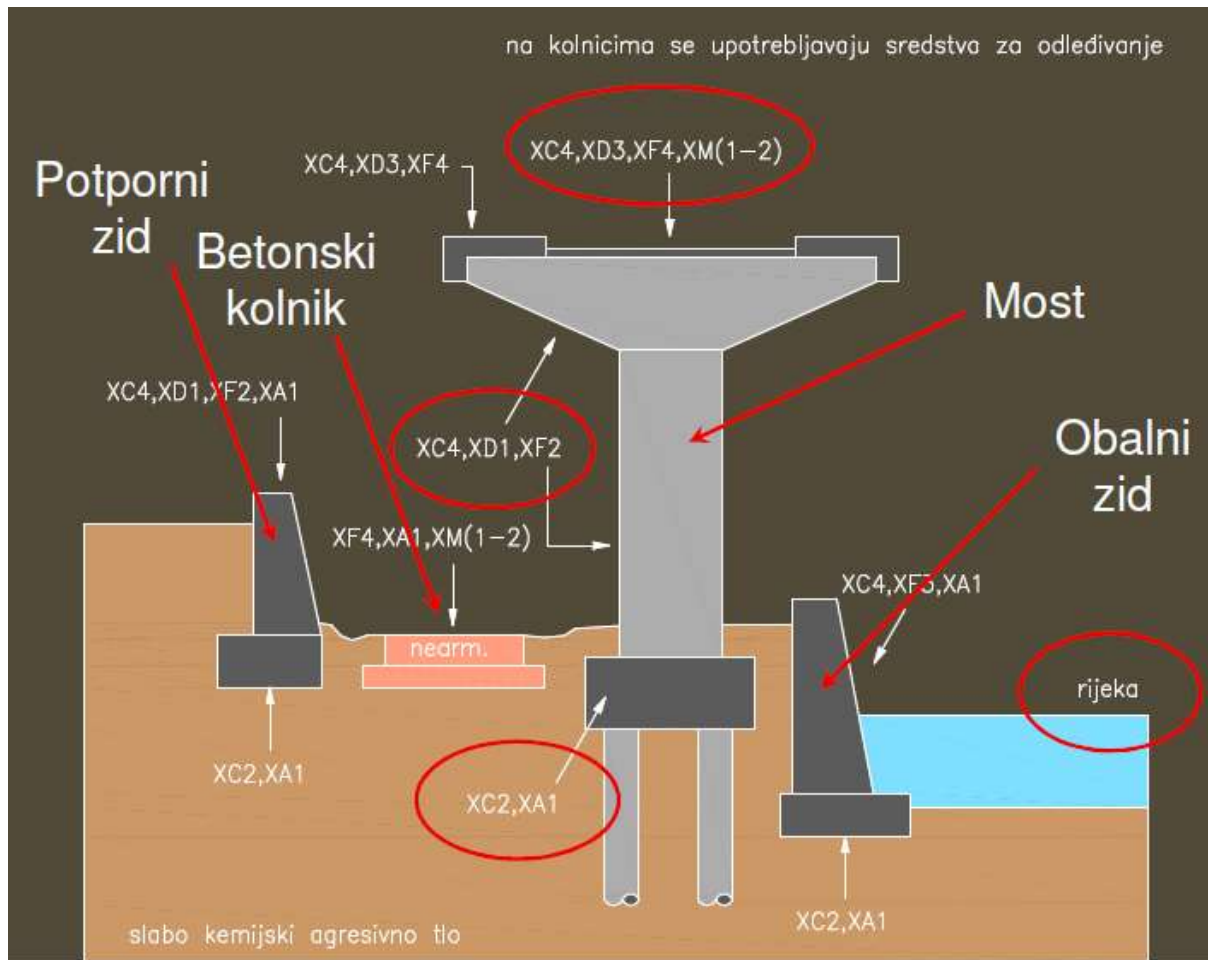
	m	D <sub>28</sub> ( x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	D <sub>10g</sub> ( x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)	D <sub>30g</sub> ( x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)
PC	0,20	7,9	3,0	2,4
30 % SG	0,37	7,9	1,3	0,87
40 % FA	0,52	7,9	0,63	0,36

**Tabela 14.** *Tablica koeficijenta difuzije ovisno o dodacima cementu*

Numerički model *CHLODIF*

Matematički model *CHLODIF* osniva se na drugom Fickovom zakonu difuzije. Njime se za proračunani ili odabrani koeficijent difuzije iona klora, određenu početnu koncentraciju iona klora u kori betona kritičnu količinu iona klora ( $C_{cr}$ ), specificiranu debljinu zaštitnog sloja ( $a$ ), dobivaju :

- koncentracija iona klora na dubini svakih 1 cm do ukupne dubine zaštitnog sloja i to za svaku godinu do specificiranog ukupnog vremena promatranja
- inicijalno vrijeme,  $t_h$  potrebno da koncentracija klorida na dubini armature dosegne kritičnu vrijednost od 0,4 % u odnosu na težinu cementa. Unutar inicijalnog vremena na konstrukciji nema tragova oštećenja. Nakon toga vremena, slijedi vrijeme  $t$ , u kojem korozija armature napreduje sve do ljuaskanja i odlamanja zaštitnog sloja.



**Slika 20.6.** Presjek kroz betonske konstrukcije s oznakama agresivnosti okoliša

## 21. ZAKLJUČAK

Današnje projektiranje i gradnja konstrukcija imaju veliku obavezu, a to je ispuniti mnoga očekivanja i zahtjeve koje se postavljaju pred njih. Na to utječu mnogi čimbenici kao što sudionici u gradnji, a od njih posebno se odnosi na projektanta, izvođača i nadzornog inženjera. Osim sudionika u gradnji tu jako utječu klimatski uvjeti, a tu se posebno misli na agresivnost okoliša s kloridima, a i svojstva samih materijala, sve ovo nabrojano doprinosi i ovisi kako će biti građevina projektirana, napravljena, održavana i u konačnici vremenski uporabljiva. Ispunjavajući sve tehničke propise te pridržavajući ih se tim načinom produljujemo uporabni vijek svake konstrukcije, a i smanjujemo u budućnosti velike sanacije te ogromne troškove samih popravaka. Što su bolji svi čimbenici koji utječu na građevinu to će biti bolja uporabljivost građevine, stabilnost, nosivost i dugovječnost same građevine. Uporabni vijek svake građevine je bitan i zato je danas među glavnim stavkama prije samog projektiranja. Matematički model CHLODIF osniva se na drugom Fickovom zakonu difuzije. Njime se za proračunani ili odabrani koeficijent difuzije iona klora, određenu početnu koncentraciju iona klora u kori betona, kritičnu količinu iona klora, specificiranu debljinu zaštitnog sloja koji je iznosila srednju vrijednost 3,8 cm uz devijaciju 1 cm. Prema proračunu CHLODIF-u vrijeme uzbude procesa korozije bio bi 37 godina. ali ipak prema mjerenjima stvarnih profila klorida je jasno daje na nekim dijelovima dosegnuta kritična koncentracija klorida i da će aktivni proces korozije započeti i ranije od ovog perioda proračunatog CHLODIF-om. Ti nam podaci ukazuju da će na nekim pojedinim mjestima biti potrebe za prije vremenu sanaciju mosta kod određenih konstrukcija koji su načeti djelovanjem jako agresivnog okoliša, a prvenstveno se misli na kloride i soli iz mora, te jaki naleti vjetra. Pri ovakvim sanacijama treba se pažljivo mehanički odstraniti beton napukao ili odvojen korozijom armature. Sanacije ovako zahtjevnih građevinskih pothvata izvode se tehnologijom mlazom vode. Nakon same sanacije, pristupa se rekonstrukciji samog mjesta oštećenja te vraćanje njegovih građevinskih svojstava kao u prvobitnom stanju. Pregledima i redovnim održavanjem konstrukcija koja kod ovog mosta, gdje se traži uporabni vijek dulji od 100 godina treba redovito održavati i raditi barem jednom godišnje preglede kritičnih mjesta kao što su lukovi, stupovi i grede jer su oni najizloženiji djelovanju agresivnog okoliša. Samo takvim načinom rada i brige, možemo reći da će ovakve i slične konstrukcije zasigurno doživjeti svoj proračunati uporabni vijek.

U Varaždinu 20.11.2015. godine Juraj Ercegovac

## 22. LITERATURA:

[1] J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije 4 –sanacije, Hrvatska sveučilišna naklada- Građevinski fakultet- Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.godine.

[2] J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije riješeni primjeri, Hrvatska sveučilišna naklada- Građevinski fakultet- Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.godine.

[3] [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009\\_11\\_139\\_3381.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_11_139_3381.html)

[4] [http://seminar.tvz.hr/materijali/materijali4/TVZ4\\_Gradjevina.pdf](http://seminar.tvz.hr/materijali/materijali4/TVZ4_Gradjevina.pdf)

[5]

[https://www.grad.unizg.hr/download/repository/05\\_M3\\_zivotni\\_vijek\\_%5BCompatibility\\_Mode%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/05_M3_zivotni_vijek_%5BCompatibility_Mode%5D.pdf)

[6]

[http://www.grad.hr/mostovi/files/trajnost\\_2/predavanja/01\\_TK\\_II\\_2011\\_SUVREMENI%20PRISTUP%20\[Compatibility%20Model\].pdf](http://www.grad.hr/mostovi/files/trajnost_2/predavanja/01_TK_II_2011_SUVREMENI%20PRISTUP%20[Compatibility%20Model].pdf)