

-8-

NUMERIČKO MODELIRANJE DJELOVANJA KOROZIJE U ARMIRANOBETONSKIM KONSTRUKCIJAMA

-8.1-

- PREGLED -



□ U ovom predavanju:

- KOROZIJA ARMATURE – UVOD U PROBLEMATIKU
- KONSTRUKCIJSKI ASPEKTI
 - Izrada modela za procjenu životnog vijeka novih i postojećih konstrukcija
 - Projektiranje i građenje AB konstrukcija koje će bez velikih sanacija doživjeti projektirani životni vijek

UVOD

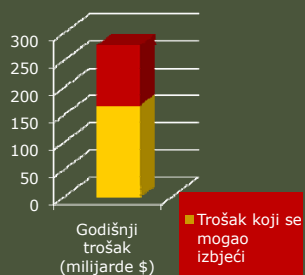
- Korozija armature - glavni je uzrok propadanja AB konstrukcija
- Ostali degradacijski mehanizmi AB konstrukcija
 - Mehanička, kemijska, klimatska ili biološka djelovanja - oštećenja ili pukotine
 - Dodatno potiču ili ubrzavaju proces korozije



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

- SAD - godišnji troškovi sanacije konstrukcija zahvaćenih korozijom
 - 276 milijardi \$
 - 40% tih troškova se moglo izbjeći primjenom sadašnjih znanja
 - Preventivne metode prilikom projektiranja i građenja te prikladni postupci dijagnoza i održavanja



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

- NORVEŠKA (istraživanje 1994.)
- Mostovi u morskom okolišu starosti do 25 godina
- 25% zahvaćeno korozijom armature



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

ITALIJA

- Nakon starosti mosta od 25 do 30 godina isplativije sagraditi novi most nego sanirati postojeći



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

HRVATSKA

- Brojni primjeri oštećenja



Nadvožnjak nad AC

Sagrađen prije 25 god. od montažnih nosača

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

HRVATSKA

- Brojni primjeri oštećenja



Rekonstrukcija Paškog mosta (1991-1999)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UVOD

HRVATSKA

- Brojni primjeri oštećenja



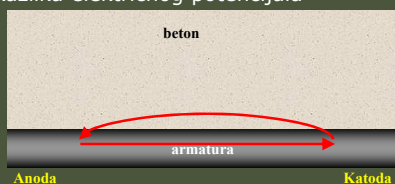
Sanacija Krčkog mosta (od 80ih ...)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KOROZIJA ARMATURE U BETONU

Elektrokemijski proces

- Anoda i katoda
- Električni vodić (šipka) i elektrolit (porna otopina u betonu)
- Razlika električnog potencijala



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KOROZIJA ARMATURE U BETONU

Razlika električnog potencijala

- Obično svugdje prisutna zbog
 - Prisutnosti još nekih metala u betonskom elementu,
 - Razlike u mikrostrukтури željeza te prisutnost nečistoća,
 - Različite koncentracije elektrolita u porama betona

Formiranje anode i katode

- Nakon depasivacije čelika

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

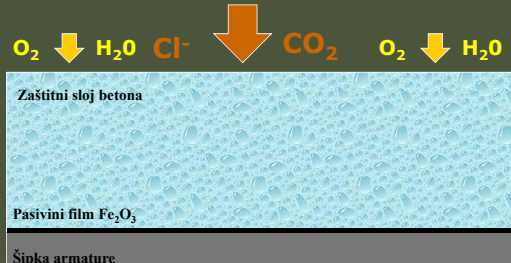
1. Pasivacija



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

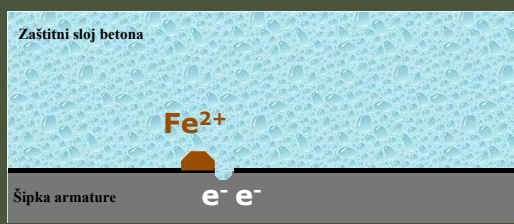
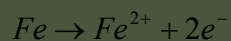
2. Depasivacija



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

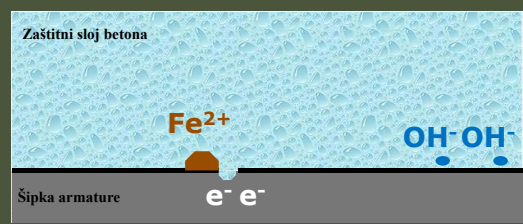
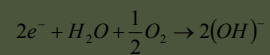
3. ANODA: otapanje željeza



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

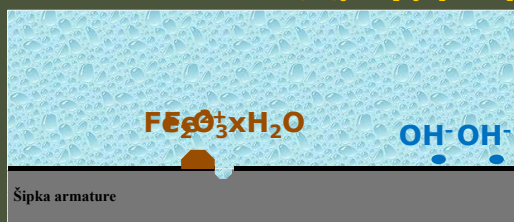
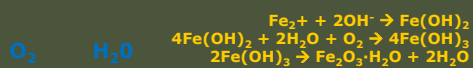
4. KATODA: hidroksidni ioni



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

5. ANODA: korozijski produkti



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Proces korozije

□ Kontroliran slijedećim parametrima:

- električnom otpornošću betona
- površinom armature
- alkalitetom cementne paste koja je u dodiru s čelikom
- penetracijom elektrolita u dubinu betona
- koncentracijom kisika otopljenog u pornoj otopini koja je u blizini armature

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

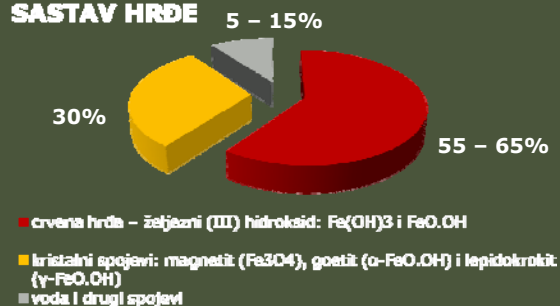
Korozijski produkti

- Primarni proizvod
željezni(II)hidroksid, $Fe(OH)_2$ (ili vjerojatnije $FeO.nH_2O$)
 - slabo topivi
 - vrlo brzo oksidira i prelazi u hrđu
- Hrđa - rahla tvar čvrstog agregatnog stanja
 - crvena hrđa - željezni (III) hidroksid: $Fe(OH)_3$ i $FeO.OH$, oko 55 - 65 %,
 - kristalni spojevi: magnetit (Fe_3O_4), goetit (α - $FeO.OH$) i lepidokrokrit (γ - $FeO.OH$), oko 30 %,
 - voda i drugi spojevi, 5-15%.

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Korozijski produkti

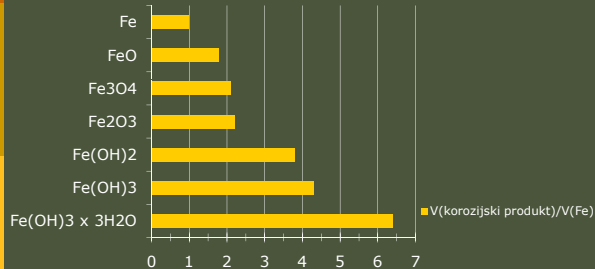
SASTAV HRĐE



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Korozijski produkti

RELATIVNI VOLUMEN KOROZIJSKIH PRODUKATA



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KONSTRUKCIJSKE POSLJEDICE KOROZIJE

POSLJEDICE KOROZIJE ARMATURE

Smanjenje poprečnog presjeka armature	Raspucavanje betona	Krtost armature
1. Smanjenje vlačne čvrstoće 2. Smanjenje duktilnosti 3. Smanjenje čvrstoće na zamor	1. Gubitak čvrstoće prijanjanja 2. Ubrzanje korozijskog procesa 3. Odlamanje zaštitnog sloja	1. Krti lom šipke

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

OPĆA I LOKALNA KOROZIJA



Opća korozija
(karbonatizacija)



Lokalna (točkasta)
korozija

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

OPĆA KOROZIJA

- Depasivacija na velikoj površini armature
 - Posljedica smanjenja pH vrijednosti porne otopine odnosno karbonatizacije
 - Tipičan je za porozan beton u kojem dolazi do prodora ugljičnog dioksida (CO_2) do površine armature jednoliko po njenoj duljini
 - Pritom nastaje niz manjih anoda i katoda koje se međusobno izmjenjuju duž armature
- Šipka armature površinski ravnomjerno korodira

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

LOKALNA (TOČKASTA) KOROZIJA

- Depasivacija armature samo na pojedinim mjestima, obično u blizini pukotina
 - depasivirano područje, površine svega nekoliko cm^2 odnosno mm^2 -> anoda
 - višestruko veća površina pasivne armature - katoda
 - Tipično za kloridima izazvanu koroziju

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

LOKALNA (TOČKASTA) KOROZIJA

- Opasnija od opće korozije
 - Znakovi korozije na površini betona javljaju se tek kada je proces uznapredovao
 - Teško pravodobno intervenirati,
 - Ioni klorida brzo uništavaju pasivnu zaštitu armature, čak i u lužnatom betonu i izazivaju brzu koroziju

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjeri rušenja konstrukcija zbog kloridima izazvane korozije

Galerija u Wormerveer (Nizozemska)

- Srušila se 1990. godine
- Uzrok nesreće: loše postavljena armatura
- Izazvano raspucavanje betonske ploče
- Sol za odmrzavanje brzo prodirala do armature te omogućila brzo napredovanje korozije
- Posljedica bila smanjenje poprečnog presjeka armature ispod razine nosivosti

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjeri rušenja konstrukcija zbog kloridima izazvane korozije

Most u Melleu (Belgija)

- Kolaps prednapetog betonskog mosta izazvan je proširenjem pukotina uslijed velikog opterećenja čime je omogućen brz prodor klorida i korozija prednapetih kabela

Prednapeti most u Port Talbotu (Velika Britanija)

- Srušio se 1984. godine
- Most raspona 18 metara nije bio izložen velikom opterećenju
- Ali je zbog neodgovarajuće zaštite od vlage, korozija kabela izazvala gubitak nosivosti samo 31 godinu nakon izgradnje

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjeri rušenja konstrukcija zbog kloridima izazvane korozije

- Kloridima uzrokovana korozija

- Najčešća
- Visoki troškovi
- Veliki utjecaj na sigurnost konstrukcija



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

PASIVACIJA ARMATURE

- Kvalitetan zaštitni sloj betona - pruža fizikalnu i kemijsku barijeru koroziji čelične šipke
 - Bez obzira na prisutnost kisika i vode u neposrednoj blizini armature

Zaštitni sloj betona

Pasivni film Fe_2O_3

Šipka armature

Pasivni film Fe_2O_3

Beton

Kemijska barijera

- Jako alkalna porna otopina sa pH vrijednošću od **12.5 - 13.6**
 - Omogućuje formiranje i održavanje zaštitnog pasivnog sloja na površini čelika
 - Formiranje zaštitnog sloja nastupa neposredno nakon procesa hidratacije
 - Sastav: gama-željezni oksid ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ili kombinacije željeznog oksida i magnetita
 - Tanak sloj željeznog oksida je nepropustan i stabilan sve dok pH vrijednost porne otopine koja okružuje armaturu ne padne ispod **11.5**

Pasivni film Fe_2O_3

Šipka armature

Fizikalna barijera

- Zaštitni sloj betona
 - Svojom nepropustnošću i debljinom onemogućuje prodor ugljičnog dioksika i kloridnih iona do armature
 - Sprečava korozijsku reakciju čak i kad je pasivni sloj na površini armature oštećen

Zaštitni sloj betona

Šipka armature

Fizikalna barijera

- Kemijska barijera je postojana ukoliko se ne promjene uvjeti u blizini armature
 - Mogu se promijeniti samo ako agresivni čimbenici (CO_2 , Cl^-) iz okoliša prodru kroz zaštitni sloj betona
- Fizikalna barijera ključna da ne započne proces korozije

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

Fizikalna barijera

- Minimalni uvjet za postizanje što postojnije zaštite od korozije armature – NORME
- Prilikom projektiranja AB konstrukcija
 - Poštivanje normama propisanu gustoću, kvalitetu i debljinu zaštitnog sloja
 - Sprečavanje raspucavanje betona

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

Fizikalna barijera

- Gustoća i kvaliteta betona
 - Kontrola max v/c omjera i min udjela cementa
 - Ovisno o mjerodavnom razredu izloženosti konstrukcijskog elementa
 - Mogu se dovesti u vezu i s minimalnim razredom tlačne čvrstoće betona

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

Minimalna debljina zaštitnog sloja

- Hrvatske norme (HRN-ENV 1992-1-1)
 - Prema razredu izloženosti
- Europske norme (EN 1992-1-1) još ovisi i o
 - Razredu konstrukcije odnosno o projektiranom vijeku konstrukcije
 - Tlačnoj čvrstoći betona
 - Izvedbi i dodatnim mjerama zaštite od korozije armature

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

Kontrola pukotina

- Pukotine
 - AB elementi izloženi savijanju, posmiku, torziji ili vlačnom naprezanju
 - Posljedica vanjskog opterećenja, sprječanih ili prisilnih deformacija, plastičnog skupljanja ili ekspanzivnih kemijskih reakcija u očvrslom betonu

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

Kontrola pukotina

- Hrvatske i europske norme: širina pukotina ograničena u okolišu u kojem postoji rizik od korozije
 - 0.3 cm za AB konstrukcijske elemente
 - 0.2 cm za PB konstrukcijske elemente
- Hrvatske norme
 - Ograničenje naprezanja u uporabi
- Europske norme
 - Ograničenje promjera i razmak šipki armature

FIZIKALNA BARIJERA

KEMIJSKA BARIJERA

Šipka armature

DEPASIVACIJA ARMATURE

- Destabilizacija pasivirajućeg filma zbog visoke koncentracije Cl^-
- Neutralizacija odnosno snižavanje alkaliteta betona ($\text{pH} < 9,5$)



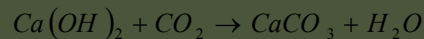
Zaštitni sloj betona

Pasivni film Fe_2O_3

Šipka armature

KARBONATIZACIJA

- CO_2 difuzijom ulazi u beton - u prisutnosti vode reagira s vapnom
- Stvara se kalcijev karbonat - smanjuje pH vrijednost porne otopine na vrijednost oko 8.5



$\text{Ca}(\text{OH})_2$

KARBONATIZACIJA

- Napredovanje karbonatizacije u betonu ovisi o:
 - Permeabilnosti i sastavu betona
 - Relativnoj vlažnosti
 - Koncentraciji CO_2
 - Okolišu
- Što je niža permeabilnost betona proces karbonatizacije je sporiji, naročito kod betona sa većom količinom kalcijevog hidroksida

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

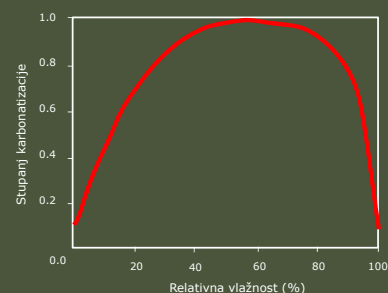
KARBONATIZACIJA

- Stupanj karbonatizacije u ovisnosti o relativnoj vlažnosti

0.4 i do 30
 % karbonatizacije
 zadržavaju
 i više dnevne vode

Nakon je difuzija CO_2 u veći
 relativni vlačni tlak od
 difuzije i zadržava. Kod
 100% R.V. sistem
 zaustavlja protok CO_2 u
 konstrukciju pa
 karbonatizacija također ne
 može napredovati

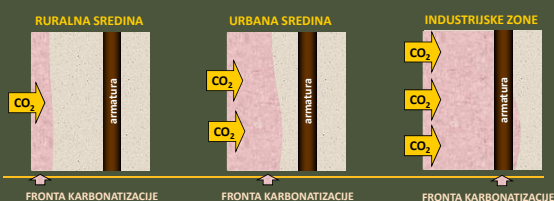
Najveća brzina
 karbonatizacije pri R.V.
 50-75%



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KARBONATIZACIJA

- Dubina karbonatizacije - veća u industrijskom okolišu s višim stupnjem zagađenja i **većom koncentracijom CO_2 u atmosferi**
- Koncentracija CO_2 u zraku
 - u ruralnoj sredini iznosi oko 0.03 %,
 - u gradovima ta vrijednost može biti 10 puta veća
 - u industrijskim zonama se može povećati čak 100 puta



KOROZIJA IZAZIVANA PRODOROM KLORIDA

- Kloridi – među najsloženijim i najagresivnijim utjecajima iz okoline
- Utjecaj klorida višestruk
 - Najznačajniji: korozija armature i degradacija armiranog betona
 - Konstrukcije u maritimnom okolišu
 - Kolničke konstrukcije
- Pojava klorida u betonu:
 1. Prilikom spravljanja betona
 2. Iz okoliša
 3. Od organizama koji žive na konstrukciji, a izlučuju organske spojeve koji sadrže kloride

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

PODRIJETLO KLORIDA

1. Prilikom ugradnje ako se u spravljanju betona koristi:
 - agregat kontaminiran kloridima (primjerice agregat izvađen iz mora koji nije dovoljno dobro ispran)
 - morska voda
 - otpadna voda
 - dodaci mješavini koji sadrže kloride (sredinom 1970-ih koristio se ubrzivač koji je u svom sastavu sadržavao $CaCl_2$)
- Prilikom spravljanja betona, u pravilu se ne smije koristiti voda koja sadrže kloride
- Postojeće norme nalažu stroga ograničenja o sadržaju klorida u agregatu

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

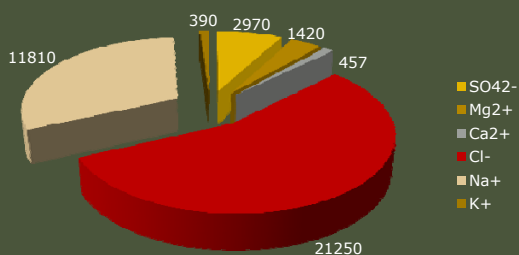
PODRIJETLO KLORIDA

2. Iz okoliša:
 - od djelovanja mora (direktno vlaženje, zapljuskivanje konstrukcije, vjetrom nošene kapljice morske vode na udaljenosti od nekoliko kilometara ovisno o topografiji terena i vjetra)
 - od djelovanja soli za odleđivanje koje se rabe za posipanje po cestama, mostovima
 - od raznih kemikalija ako se radi npr. o rezervoarima
 - od različitih plinova, primjerice klorovodika koji se oslobađa kod sagorjevanja PVC-a
- Najučestaliji primjeri dubokog prodora klorida u konstrukciju

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

PODRIJETLO KLORIDA

Sastav soli u Jadranskom moru (mg/l)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Kloridni ioni se mogu pojaviti u betonu u tri različita oblika:
 - Kemijski vezani za produkte hidratacije cementa,
 - Fizikalno adsorbirani na površini pornog gela
 - Otopljeni u pornoj vodi



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Ukupna količina klorida u betonu = koncentracija vezanih klorida (kemijski i fizikalno) + koncentracija slobodnih klorida

Ukupna količina klorida u betonu



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Količina kloridnih iona u betonu mjeri se normiranim postupcima:
 - Ukupna količina klorida** - mjerenjem koncentracije kiselinom topivih klorida – odnosno izmjeri se masa klorida otopljenih u dušičnoj kiselini (HNO_3)
 - Količina slobodnih** odnosno vodotopljivih klorida - kloridi ekstrahirani u vodi pod posebnim uvjetima
 - Količina vezanih klorida** - razlika ukupne količine klorida i koncentracija slobodnih klorida

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Kritična koncentracija klorida – razara pasivni sloj na površini armature
- Ovisi o:
 - Vrsti veziva, posebice količini trikalcijske aluminata C_3A u cementu
 - Porijeklu klorida
 - Omjeru između slobodnih i vezanih klorida u betonu
 - Omjeru između sadržaja kloridnih Cl^- i hidroksidnih OH^- iona u pornoj otopini
 - Vodocementnom omjeru
 - Vrsti armature: obična ili za prednapinjanje
 - Utjecajima okoliša kao što su temperatura i relativna vlažnost
 - Stupnju karbonatizacije betona odnosno njegova pH vrijednost
 - Elektrokemijskom potencijalu čelika

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Postoji razlika u kritičnoj količini klorida potrebne za početak korozije ovisno da li su kloridi prisutni od trenutka spravljanja betona ili su naknadno prodrli iz okoliša.
- Veća količina klorida dodanih u beton putem njegovih sastojaka (voda, agregat) će reagirati s trikalcijskim aluminatom (C_3A) pri čemu će nastati tzv. **Friedelova sol** ($3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{CaCl}_2 \times 10\text{H}_2\text{O}$ - kalcijev kloroaluminat) koja ne pridonosi odvijanju procesa korozije.
 - Ovaj spoj je najjači s kloridima umiješanim u mješavinu, i upravo iz tog razloga se smatralo opravdana uporaba morske vode prilikom pripreme betona, odnosno tolerira se veća koncentracija klorida umiješanih u beton u odnosu na kloride koji prodiru iz okoliša.
 - Međutim, prilikom smanjenja pH betona, kao što je slučaj kod karbonatizacije betona, dolazi do djelomičnog otapanja Friedelove soli, čime se povećava koncentracija slobodnih kloridnih iona u području karbonatiziranog betona.

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Norme propisuju dozvoljenu količinu kloridnih iona prilikom spravljanja betona izraženu u postotku mase cementa

NORMA	CSA A23.1-94	ACI 318-89	ACI 222	BS 8110-85	ENV 206-92
Vrsta klorida	Topivi u vodi (slobodni)	Topivi u vodi (slobodni)	Topivi u kiselini (vezani)	Topivi u kiselini (vezani)	Topivi u kiselini (vezani)
Armirani beton	0.15	0.15	0.2	0.4	0.4
Prednapeti beton	0.06	0.06	0.08	0.1	0.1

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Vrijednost kritične koncentracije klorida na razini armature
 - 0,05 % mase betona
 - 0,40 % klorida na masu cementa za tipičnu betonsku mješavinu, s količinom cementa od 350 do 400 kg/m^3
 - Iako u literaturi vrijednosti variraju od 0.06 do 2.5% klorida na masu cementa, kod modeliranja korozijskog procesa se uglavnom uzimaju vrijednosti u granicama 0.4 - 1.0% klorida na masu cementa
- SLOBODNI KLORIDI**
 - 7 – 8 kg klorida/ m^3 porne otopine

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Granična vrijednost ukupne količine klorida također ovisi o uvjetima okoliša
 - U morskom okolišu kritična vrijednost ukupne količine klorida za beton u zoni zapljuskivanja iznosi 0.03%, a za beton potpuno uronjen u more 0.1% u odnosu na masu betona
- Vrijednosti kritične koncentracije klorida za prednapete konstrukcije variraju od 0.1% do 0.2% klorida na masu cementa
 - Razlog strožiš ograničenja za prednapete konstrukcije leži u činjenici da posljedice točkaste korozije na prednapetim kabelima (smanjenje poprečnog presjeka) imaju fatalniji učinak na životni vijek konstrukcija

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

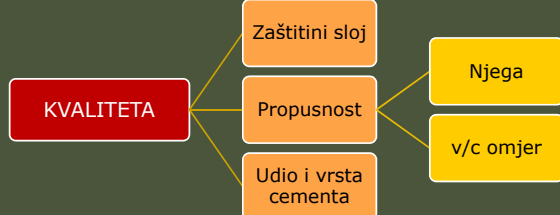
KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

- Hidroksidni ion OH^- djeluje kao inhibitor u betonu neprestano odgađajući proces aktivne korozije izazvane kloridima tako da konstatno obnavlja zaštitni, pasivni sloj na površini armature
 - Kolika će količina slobodnih iona klorida biti agresivna ovisi o sadržaju OH^- iona u pornoj vodi
 - Prema istraživanjima kao granična vrijednost omjera kloridnih i hidroksidnih iona otopljenih u pornoj vodi, Cl^-/OH^- iznad koje će doći do depasivacije armature predlaže se vrijednost 0.6
 - iako prema laboratorijskim eksperimentima vrijednost spomenutog omjera varira od 0.26 do 40
 - ovisno o brojnim parametrima među kojima su najznačajniji količina i vrsta cementa upotrijebljenom za proizvodnju betona

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

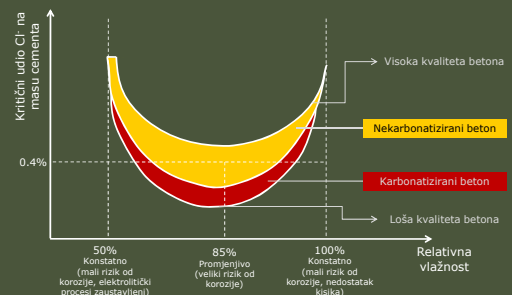
- Kritična koncentracija slobodnih iona klorida varira od 0.14 do 1.8 mol po litri porne otopine
 - Ovisno o kvaliteti betona i vrsti cementa



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

KRITIČNA KOLIČINA KLORIDA

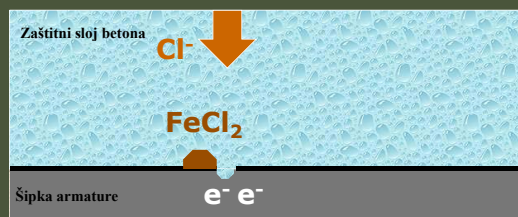
- Ovisno o relativnoj vlažnosti (RV)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

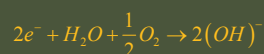
- ANODA: otapanje željeza i formiranja željeznog klorida



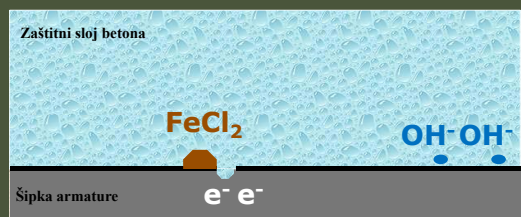
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- KATODA: hidroksidni ioni



O_2 H_2O



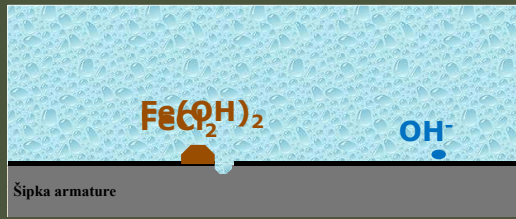
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- ANODA: željezni(II)hidroksid

$$FeCl_2 + H_2O + OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 2Cl^- + H^+$$

$$H_2O$$



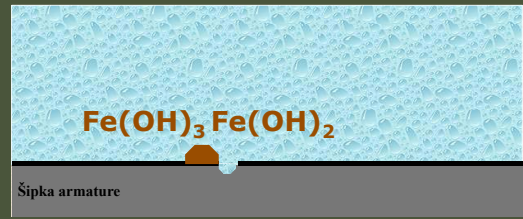
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- ANODA: željezni(III)hidroksid (crvena rđa)

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$$

$$O_2 \quad H_2O$$

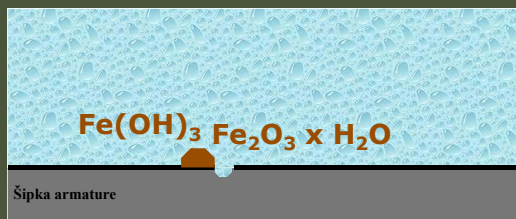


TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- ANODA: crna rđa

$$4Fe(OH)_3 \rightarrow 4Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O$$

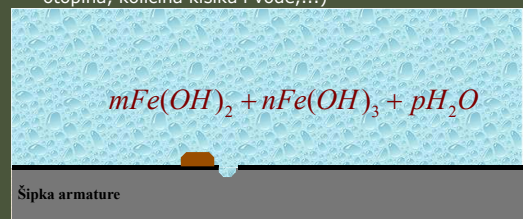


TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- Korozijski produkti

$$mFe(OH)_2 + nFe(OH)_3 + pH_2O$$
 - m, n i p ovise o uvjetima okoline (pH vrijednost, pora otopina, količina kisika i vode,...)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

KLORIDI

- Ne troše se u elektrokemijskom procesu
- Ostaju prisutni za širenje korozije
- Tijekom sanacije moraju biti uklonjeni zajedno sa slojem betona u zoni armature
- Kloridi povećavaju higroskopičnost
 - povećanje vlažnosti
 - smanjenje električne otpornosti betona
- Beton nikada nije u potpunosti suh, što stvara dodatne uvjete za nastanak korozije
- Kada je pasivna zaštita armature probijena, brzinu daljnjeg korozijskog procesa diktira električni otpor betona i prisutni kisik koji difundira iz okoline...

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

KISIK

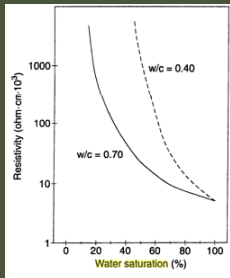
- Prisutnost kisika od esencijalne važnosti
- Kisik se troši i na katodi (OH ioni) i na anodi (crvena hrđa)
- Ako dođe do prekida dotoka kisika bilo na katodnom bilo na anodnom djelu blokirat će se daljni proces korozije

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

VODA

- Voda je također potrebna za odvijanje procesa na katodi i anodi
- Nije parametar koji kontrolira koroziju obzirom da je uvijek prisutna u dovoljnim količinama
- Utječe indirektno na druge parametre:
 - Stupanj saturacije vodom utječe na električnu otpornost betona
 - Utječe na mobilnost kisika i kloridnih iona, odnosno na njihov koeficijent difuzije



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- Korozijski proces = električni krug
- Električna struja određena potencijalima na katodi i na anodi koji uvjetuje gibanje električnog naboja (ioni i elektroni)
- Stupanj takve reakcije se izražava preko gustoće struje
 - preko koje se može utvrditi brzinu prirasta korozijskih produkata, promjenu volumena nastalu kao posljedica pretvaranja pasivne armature u hrđu odnosno odrediti naprezanje uzrokovano promjenom volumena

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

ELEKTROKEMIJSKI PROCES

- Gustoća struje i = jakost struje po jedinici površine vodiča
 - šipka armature (A/m^2)
- Jakost struje I = količina naboja koja prođe kroz presjek vodiča odnosno armature u jedinici vremena ($Q/s = A$)
- Gustoća struje u betonu varira od 10^{-2} (u fazi pasivacije armature) do $10^2 \mu A/cm^2$ (aktivna korozija)
- Ohmov zakon:** jakost struje proporcionalna razlici napona i obrnuto proporcionalna otpornosti vodiča - betona



Memo za pamćenje Ohmovog zakona: Pokrijemo li bilo koju varijablu, ostatak prikazuje formulu za njen izračun

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

UTJECAJ PUKOTINA

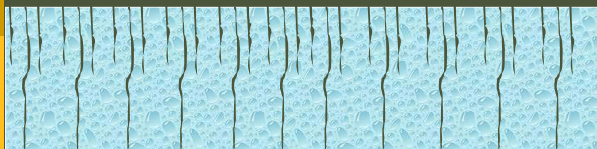
- Gotovo uvijek prisutne u betonu
- Omogućuju znatno brži prodor agresivnih tvari (CO_2 , Cl^-)
- Utjecaj pukotina u korozijskom procesu ovisi da li se radi o općoj ili lokalnoj koroziji



Šipka armature

UTJECAJ PUKOTINA

- Opća korozija**
 - Anodni i katodni procesi se odvijaju samo u području raspucanog betona
 - Anode i katode su veoma male i duž armature jednoliko razmještene tako da ih je teško prostorno razdvojiti



Šipka armature

UTJECAJ PUKOTINA

- Lokalna korozija**
 - Znatno veći stupanj korozije
 - Na znatno većoj površini armature odvijaju katodni procesi
 - Armatura u zoni pukotina - anoda
 - Preostali, pasivnim filmom obloženi dio šipke - katoda

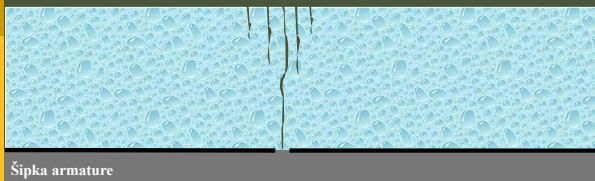


Šipka armature

UTJECAJ PUKOTINA

Smjer pukotina

- Pukotina okomita na armaturu (poprečno pucanje)
 - Duljina korodiranih šipki ograničena
- Pukotine paralelne s armaturom (uzdužno raspucavanje)
 - Znatno veće oštećenje - duljina korodirane šipke znatno veća



Šipka armature

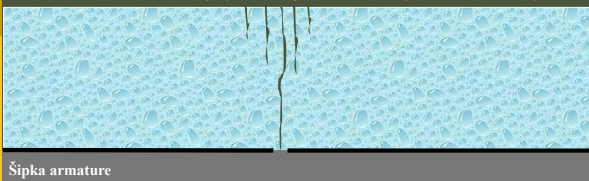
UTJECAJ PUKOTINA

Vrijeme depasivacije

- Dulje što je širina pukotina uža

Nakon depasivacije

- Kvaliteta i debljina zaštitnog sloja betona u neposrednoj blizini pukotine imaju značajniju ulogu na napredovanje korozijskog procesa od ograničenja širine pukotine
 - Na usporavanje korozijskog procesa može se samo utjecati na katodnom dijelu: kvalitetan beton ne propušta dovoljnu količinu kisika potrebnu za katodne procese



Šipka armature

MODELI DJELOVANJA KOROZIJE

- Još uvijek u fazi intenzivnog istraživanja
 - Složeno - istovremeno djelovanje različitih čimbenika tijekom razvoja korozije na armaturi u betonu
- Bažant - 1. sveobuhvatni pristup problemu korozije
 - 1979. - fizički model za koroziju u morskom okolišu
- Tutti
 - 1982. poopćio model, prilagodio i za koroziju izazvanu karbonatizacijom



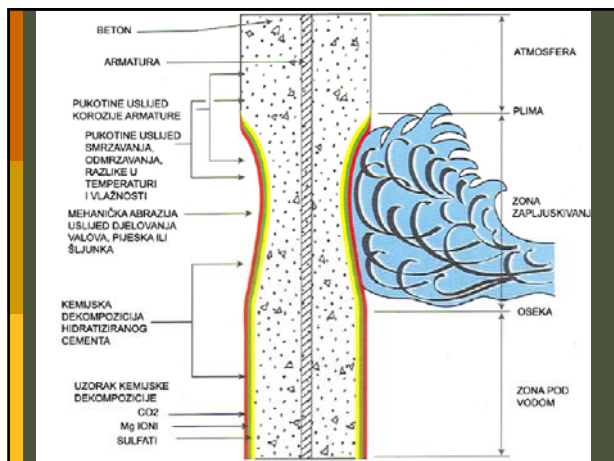
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

MODELI DJELOVANJA KOROZIJE

- Razdoblje propagacije ovisi o brzini korozije, koja ovisi o prvenstveno o:
 - Relativnoj vlažnosti,
 - Dostupnosti kisika na razini armature,
 - Temperaturi,
 - Čvrstoći betona,
 - itd.

- Primjerice, za konstrukcije u morskom okolišu životni vijek betonskog elementa u zoni zapljuskivanja je obično manji obzirom da je u tom području brzina prodiranja klorida te brzina korozije znatno veća
- Prodor klorida u površinskom dijelu betona je ubrzan zbog djelomičnog sušenja betona i kapilarne absorpcije morske vode u zoni močenja
- Nakon depasivacije, brzina korozije je velika zbog niske otpornosti betona, koja je posljedica visokog sadržaja vode u betonu usred čestog zapljuskivanja
- S druge strane, u zoni močenja beton nije potpuno saturiran, te na razini armature postoji dovoljna količina kisika za odvijanje katodne reakcije

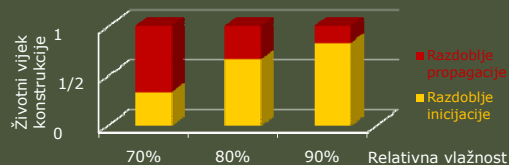
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II



MODELI DJELOVANJA KOROZIJE

- Većina dostupnih modela - pretpostavka: vrijeme propagacije zanemareno

- Projektirani životni vijek = trajanje faze inicijacije
- Pretpostavka - zbog oskudnog znanja o procesu propagacije te njenoj složenosti
- U nekim slučajevima ta pretpostavka previše konzervativna
 - Primjerice, za vrijednosti relativne vlažnosti od 70% razdoblje propagacije ne samo da nije zanemarivo, već je i dulje od razdoblja inicijacije



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Modeliranje faze inicijacije

- Kloridi prodiru u beton različitim mehanizmima transporta:

- difuzijom,
- konvekcijom,
- apsorpcijom,
- migracijom zbog utjecaja električnog polja,
- migracijom zbog razlike u tlakovima, itd.

- Fickov 1. zakon difuzije - 1855.**

- Analogija jednadžbe toplinske vodljivosti (Fourier 1822.)
- Primjena zakona na procese vezane za kloridne ione u betonu nastupila je 20ak godina kasnije
- Pretpostavka: koeficijent difuzije klorida konstantan, tj. $D=D_0$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D_0 \frac{\partial C}{\partial x}$$

- C koncentracija klorida,
- t vrijeme,
- D_0 koeficijent difuzije

- Primjenjivo kod stacionarnog, jednosmjernog i konstantnog toka – nije slučaj kod betona

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Modeliranje faze inicijacije

- Fickov 2. zakon difuzije**

- 1. zakon + očuvanje mase
- Pretpostavka: koeficijent difuzije klorida konstantan

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

- C koncentracija klorida,
- t vrijeme,
- D koeficijent difuzije

- Brojni modeli: projektirani životni vijek = dostizanje kritične koncentracije klorida na površini armature (faza inicijacije)

- Deterministički
- Life - 365
- CLODIF
- Probabilistički

MOSTOVI III

Literatura:
J. Radić i suradnici: Betonske konstrukcije 4 – SANACIJE (3. poglavlje)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Modeliranje faze propagacije

- 3 vrste pristupa:

- Modeli koji se temelje na zakonima elektrokemije
- Modeli vezani za difuzijom ograničeni pristup kisika na razini armature
- Modeli prema empirijskim jednadžbama

- Rezultat: gustuća korozijske struje**

- Smanjenje poprečnog presjeka korodirane šipke
- Proračun smanjenja nosivosti

- Zasad ne postoji gotov model koji omogućuje realniji prikaz djelovanja na AB konstrukciju

- Mehaničke karakteristike
- Statička, dinamička djelovanja na konstrukciju
- Proračun i razmještaj konstruktivnih pukotina

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

		FAKTORI		SVOJSTVA TRANSPORTNIH PROCESA U BETONU	
		OKOLIŠ	BETON	PARAMETRI	MODELI
I	Cl	1. MAKROKLIMATSKI - Temperatura - Relativna vlažnost - Radijacija - Kiša - Vjetar	1. PROJEKT - v/c - Količina cementa - Tip cementa - Debljina zaštitnog sloja - Vjetar	- Def - Ccr - Cs - Co - Kapilarna apsorpcija	- Difuzija (Fickov zakon) - Difuzija + konvekcija - Empirijski
	CO2			- Dco2 - Ca(OH)2 - Sadržaj CO2 u zraku	- Fickov zakon - Empirijski
P		2. MIKROKLIMATSKI - Projekt - Zona zapljuskivanja - Plima/oseka - Dostupnost kisika (sušenje, močenje)	2. KONTROLA KVALITETE - Kompaknost - Prijanjanje - Segregacija - Njega - Varijacija zaštitnog sloja	- Sadržaj kisika - Promjer šipke - Zaštitni sloj - Razmak šipki	Gustoća struje - konstatno / ovisno o vremenu

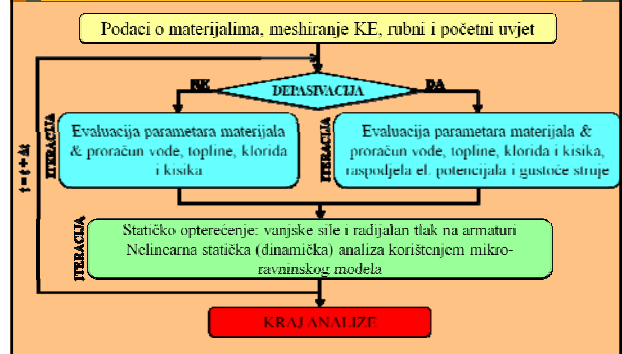
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

-8.2-

-MODELIRANJE I PRORAČUN ŽIVOTNOG VIJEKA-

MODELIRANJE KOROZIJSKIH PROCESA
IMPLEMENTACIJA U KOD – MKE
NUMERIČKI PRIMJERI

ALGORITAM MODELA



MODELIRANJE KOROZIJE

- Za proračun trenutnog stupnja korozije potrebno je modelirati slijedeće fizičke i elektrokemijske procese:

- Transport vode
- Transport kisika
- Transport klorida
- Distribucija topline kroz zaštitni sloj betona
- Vežanje klorida u betonu
- Transport OH⁻ iona kroz elektrolit u porama betona

FAZA INICIJACIJE

- Katodna i anodna polarizacija
- Električni potencijal
- Gustoća električne struje
- Potrošnja kisika na katodi i anodi
- Transport korozivskih produkata u pore i pukotine betona
- Raspućavanje betona zbog naprežanja izazvano povećanjem volumena korozivskih produkata

FAZA PROPAGACIJE

- Mehanički procesi
- Interakcija između mehaničkog i ne-mehaničkog dijela

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

1. FAZA INICIJACIJE

TRANSPORT VODE

- Difuzija
- Volumni udio porne vode (m³ vode / m³ betona)
- Richardova jednačina:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \nabla \cdot [D_w(\theta_w) \nabla \theta_w]$$

- D koeficijent difuzije kapilarne vode (m²/s)
- Strogo nelinearna funkcija sadržaja vlage:

$$D_w(\theta_w) = D_0 e^{n \bar{\theta}_w}$$

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

1. FAZA INICIJACIJE

TRANSPORT KISIKA

- Pretpostavka: kisik ne sudjeluje ni u jednoj kemijskoj reakciji prije depasivacije čelika

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o$$

θ_w : Volumni udio porne vode (m³ vode/m³ betona)
 $\frac{\partial C_o}{\partial t}$: Vremenska promjena koncentracije kisika u pornoj otopini (kg kisika/m³ porne otopine pore)
 $\nabla \cdot [\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o]$: Difuzija kisika (efektivan koeficijent difuzije kisika)
 $D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o$: Konvekcija kisika (koeficijent difuzije vode)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

1. FAZA INICIJACIJE

TRANSPORT KLORIDNIH IONA

- Kroz nesaturirani beton - rezultat difuzije, difuzivne konvekcije te fizičkog i kemijskog vežanja za produkte cementne hidratacije

$$\theta_w \frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot [\theta_w D_c(\theta_w, T) \nabla C_c] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c - \frac{W_{gel}}{1000} \frac{\partial C_{cb}}{\partial t}$$

θ_w : Vremenska promjena koncentracije slobodnih klorida u pornoj otopini (kg Cl⁻/m³ porne otopine pore)
 $\frac{\partial C_c}{\partial t}$: Difuzija Cl⁻ (efektivan koeficijent difuzije klorida)
 $D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_c$: Konvekcija Cl⁻
 $\frac{W_{gel}}{1000} \frac{\partial C_{cb}}{\partial t}$: Stupanj veživanja klorida za cementnu pastu (Sadržaj vezanih klorida po masi cementnog gela (g Cl⁻/kg gela))

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

1. FAZA INICIJACIJE

TRANSPORT VEZANIH KLORIDA

- Stupanj veživanja klorida za cementnu pastu u vremenu
- Nelinearna veza između koncentracije slobodnih i vezanih klorida
- Ovisi o količini slobodnih klorida te o sadržaju klorida iz okoliša

$$\frac{\partial C_{cb}}{\partial t} = k_r (\alpha C_c^\beta - C_{cb})$$

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

1. FAZA INICIJACIJE

TRANSPORT TEMPERATURE

- Konstitutivni zakon za protok topline i očuvanje energije
- Pretpostavka: toplinski kapacitet i toplinska provodljivost betona konstatni parametri

$$\lambda \Delta T + W(T) - c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

λ : Toplinska provodljivost (W/(m·K))
 ΔT : Unutarnji izvor topline (W/m³)
 $W(T)$: Toplinski kapacitet po jedinici mase betona (J/(K·kg))
 c : Toplinski kapacitet po jedinici mase betona (J/(K·kg))
 ρ : Gustoća betona (kg/m³)

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

HIGRO-TERMO-MEHANIČKA ZAVISNOST

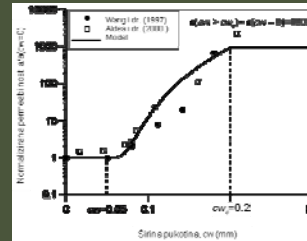
- Utjecaj transportnih procesa na mehanička svojstva betona :
 - Utjecaj temperature
 - Higro-deformacija (skupljanje i puzanje)
 - Utjecaj vlažnosti
- Utjecaj oštećenja na transportne procese:
 - Difuzija vode u strogoj je zavisnosti o oštećenjima betona
 - Teoretski: jednom kad se pukotina otvori ($c_w, \text{krit} = 0.1 - 0.2 \text{ mm}$) - površina pukotine = slobodna površina -> posebni rubni uvjeti
 - Koeficijent difuzije kapilarne vode D_w i poroznost p_c
 - Utjecaj oštećenja na distribuciju kisika i klorida implicitno uzeto u obzir - transporti se odvijaju kroz poru vodu

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

HIGRO-TERMO-MEHANIČKA ZAVISNOST

OVISNOST DIFUZNOSTI VODE I ŠIRINE PUKOTINA

- Utjecaj pukotina na difuznost - dobiven na temelju eksperimentalnih rezultata za permeabilnost u raspucanom i



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

2. FAZA PROPAGACIJE

- PRETPOSTAVKA: depasivacija armature počinje kada masena koncentracija slobodnih klorida dosegne vrijednost od 7 kg/m3 porne vode
- Transport kisika kroz beton nakon depasiviranja čelika

$$\theta_w \frac{\partial C_o}{\partial t} = \nabla[\theta_w D_o(\theta_w) \nabla C_o] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla C_o$$

- Električni potencijal

$$\nabla[\sigma(\theta_w) \nabla \Phi] = 0$$

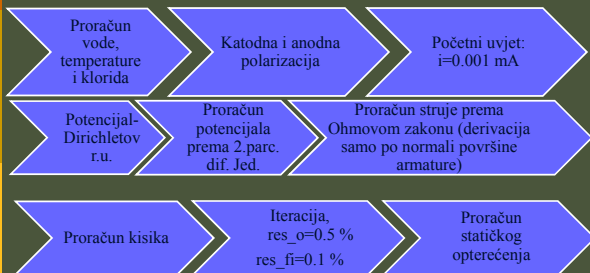
- Gustoća korozivne struje

$$\vec{i} = -\sigma(\theta_w) \nabla \Phi$$

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

2. FAZA PROPAGACIJE

ALOGRITAM



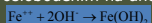
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Novi vremenski interval

2. FAZA PROPAGACIJE

ALOGRITAM

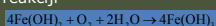
- Hidroksilni ion oslobođeni na katodi vežu se sa ionima željeza oslobođenim na anodi tvoreći željezni hidroksid:



- Brzina prirasta željeznog hidroksida na anodi:

$$J_{\text{Fe}} = \frac{i_{\text{Fe}}}{zF} = \frac{i_{\text{Fe}} \cdot C(\text{m}^2 \cdot \text{s})}{2 \times 96486.7 \text{ C/mol}} \times 0.089845 \text{ kg/mol} = 4.656 \times 10^{-7} i_{\text{Fe}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

- Željezni hidroksid se veže sa kisikom i prelazi u crvenu rđu prema reakciji



- Brzina prirasta crvene rđe na anodi:

$$J_r = \frac{106.485}{89.845} J_{\text{Fe}} = 1.189 J_{\text{Fe}} = 5.536 \times 10^{-7} i_{\text{Fe}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

2. FAZA PROPAGACIJE

ALOGRITAM

- Masa crvene rđe formirane po jedinici dužine armature:

$$m_r = J_r \cdot (t - t_i) \cdot \pi \cdot \frac{d}{4} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$$

vrijeme trajanja korozije (s) promjer armature (m)

- Masa čelika (armature) pretvorena u rđu:

$$m_r = 0.523 m_r \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$$

- Povećanje volumena armature po jedinici dužine:

$$\Delta V = \frac{m_r}{\rho_r} - \frac{m_r}{\rho_s} = m_r \left(\frac{1}{\rho_r} - \frac{0.523}{\rho_s} \right) \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}} \right]$$

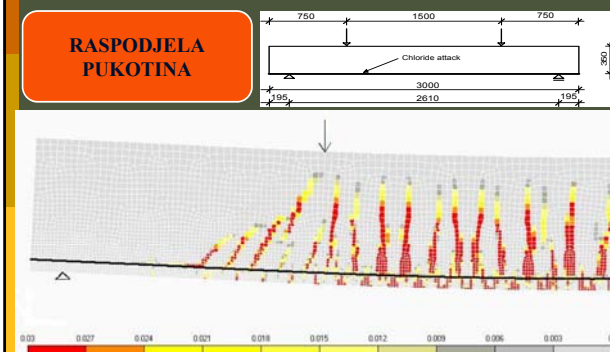
$$\rho_r = 1.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_s = 7.89 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA PUKOTINA



Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA VODE

Raspodjela vode ($\text{m}^3 \text{ vode} / \text{m}^3 \text{ betona}$) po visini poprečnog presjeka AB ploče nakon:

- (a) 1 sata,
- (b) 1 dana i
- (c) 1 godine kada je postignuta maksimalna vrijednost po čitavoj visini ploče

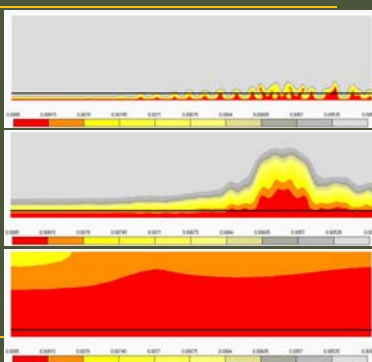


Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA KISIKA

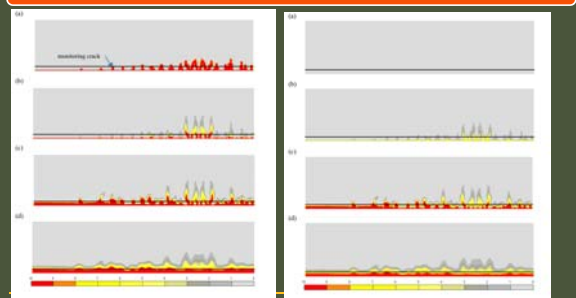
Raspodjela kisika ($\text{kg} / \text{m}^3 \text{ porne vode}$) po visini poprečnog presjeka AB ploče nakon:

- (a) 1 sata,
- (b) 1 dana i
- (c) 2 mjeseca godine kada je postignuta maksimalna vrijednost po čitavoj visini ploče



Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA SLOBODNIH I VEZANIH KLORIDA

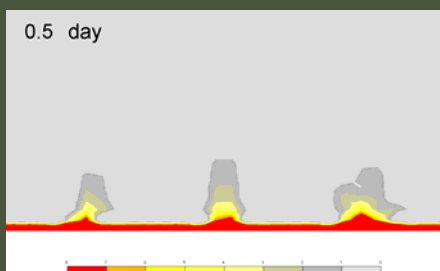


($\text{kg} / \text{m}^3 \text{ porne vode}$) po visini poprečnog presjeka AB ploče nakon: (a) 1 sata, (b) 1 dana, (c) 1 godina i (d) 10 godina

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA SLOBODNIH KLORIDA

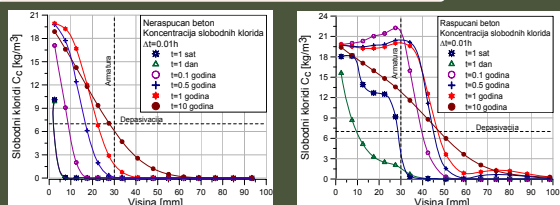
0.5 day



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA SLOBODNIH KLORIDA



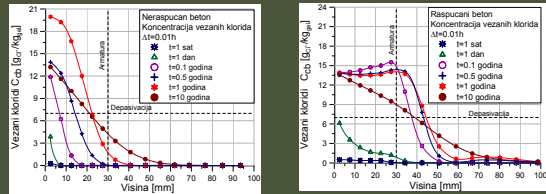
Raspodjela slobodnih klorida po dubini ploče, mjereno od donjeg ruba ploče:

- (a) za neraspucani dio grede i
- (b) po dubini pukotine s maksimalnom širinom pukotine na donjem rubu ploče od 0.20 mm

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA VEZANIH KLORIDA



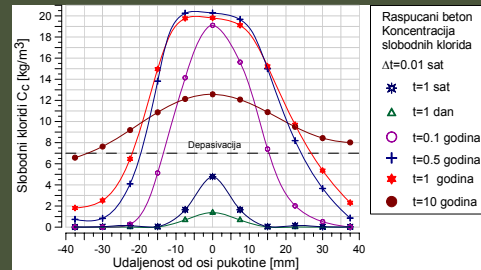
Raspodjela vezanih klorida po dubini ploče, mjereno od donjeg ruba ploče:

(a) za neraspucani dio grede i
(b) po dubini pukotine s maksimalnom širinom pukotine na donjem rubu ploče od 0.20 mm

TRAINOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA SLOBODNIH KLORIDA

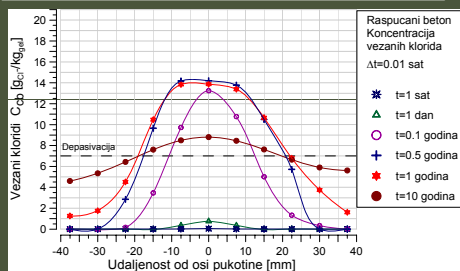


Raspodjela slobodnih klorida na razini armature lijevo i desno od pukotine

TRAINOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

RASPODJELA VEZANIH KLORIDA



Raspodjela vezanih klorida na razini armature lijevo i desno od pukotine

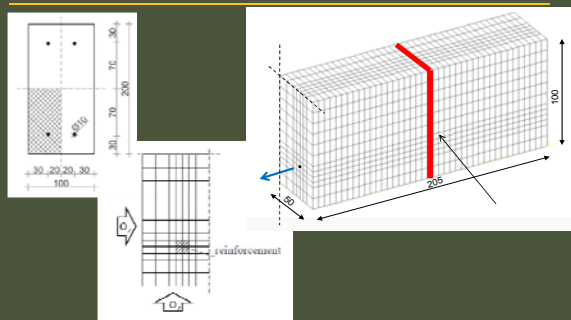
TRAINOST KONSTRUKCIJA II

Primjer: FAZA INICIJACIJE

- Na temelju dobivenih vrijednosti vrijeme depasivacije nastupa odmah nakon formiranja pukotina
 - U skladu s eksperimentalnim rezultatima koji pokazuju da voda i slobodni kloridi odmah nakon otvaranja pukotina prodiru u pukotinu
 - Nasuprot tome, na neraspucanom području ploče vrijeme depasivacije nije postignuto ni nakon 10 godina
- Raspodjela slobodnih odnosno vezanih klorida u vremenskim razdobljima nakon godinu dana
 - Kloridi prodiru u područje između pukotinu, u horizontalnom smjeru
 - Pritom se javlja blagi pad koncentracije klorida u pukotini: kloridi imaju tendenciju razmazivanja u horizontalnom smjeru
 - Razlog toj pojavi, koja je uočena i u eksperimentima, promjena rubnih uvjeta uzrokovanih formiranjem relativno velikih pukotina

TRAINOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

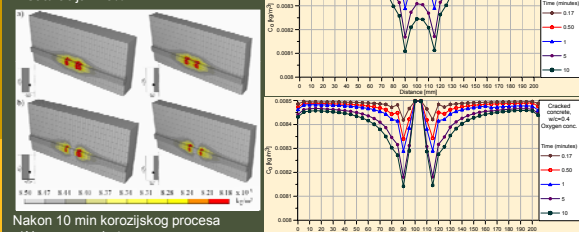


TRAINOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

RASPODJELA KISIKA

- Beton dobre kvalitete ($w/c = 0.4$)
- Saturacija = 45%



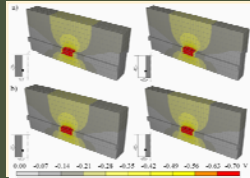
Nakon 10 min korozijskog procesa
a) Neraspucan beton
b) Raspucan beton

TRAINOST KONSTRUKCIJA II

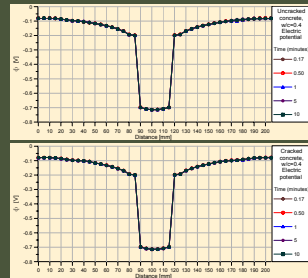
Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

EL. POTENCIJAL

- Beton dobre kvalitete ($w/c = 0.4$)
- Saturacija = 45%



Nakon 10 min korozijskog procesa
a) Neraspucan beton
b) Raspucan beton

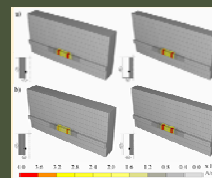


TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

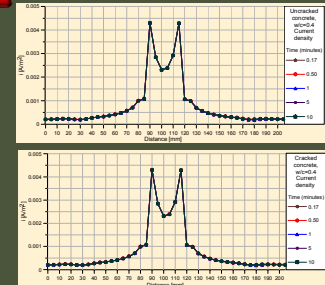
Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

STRUJA

- Beton dobre kvalitete ($w/c = 0.4$)
- Saturacija = 45%



Nakon 10 min korozijskog procesa
a) Neraspucan beton
b) Raspucan beton



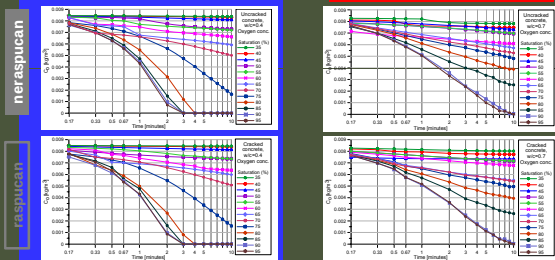
TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

POTROŠNJA KISIKA OVISNO O SATURACIJI

Dobar beton ($w/c = 0.4$)

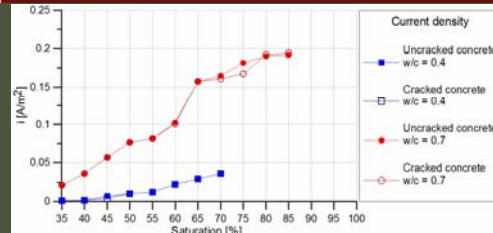
Loš beton ($w/c = 0.7$)



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

STRUJA OVISNO O SATURACIJI/PUKOTINI

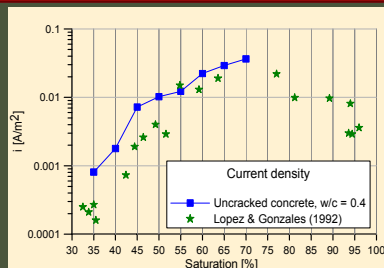


□ Stupanj korozije – veći u betonu lošije kvalitete

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

STRUJA OVISNO O SATURACIJI/PUKOTINI



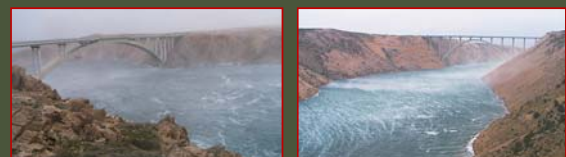
□ Realistična simulacija

TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

Primjer 2: FAZA PROPAGACIJE

ZONA ZAPLJUSKIVANJA

- Gustoća struje u zoni zapljuskivanja $0.1 \text{ A/m}^2 - 10 \text{ A/m}^2$
- Jedna od najkritičnijih područja za koroziju armature u betonu izazvane kloridima



TRAJNOST KONSTRUKCIJA II