

PREDVIĐANJE VIJEKA TRAJANJA MOSTOVA

I Uvod

Najveći dio ulaganja društvene zajednice ide za **izgradnju** zgrada i prometnica, osobito cesta, **mostova** i lučkih građevina.

Zbog toga treba sve više računa voditi ne samo o troškovima **građenja** (početnim troškovima), nego i o troškovima **uzdržavanja**, što sve više opterećuju državni proračun.

Danas sve **jasnije**, ali i sa sve većom **zabrinutošću**, uviđamo kako će nedavni nagli porast ulaganja u **izgradnju** biti popraćen još većim porastom izdvajanja za **uzdržavanje** i **nepredviđeno rane popravke** građevina.

Ključno je proturječje sadanjega stanja stvari: nema nikakvih poteškoća u svezi sa zajamčenjem vrlo **trajna betona**, ali je itekako teško zajamčiti **pouzdanu i trajnu betonsku sklopove**.

I Uvod

Naime, i u najjače **ugrožavajućem** (agresivnu) okolišu kakav je morski, **beton** kakav se danas proizvodi može **trajno** opstati.

Međutim, sasvim je druga stvar zajamčiti **trajan armirani** (a pogotovo **prednapeti**) **betonski sklop**.

Svijest o tomu kako je **trajnost** betonskoga sklopa podjednako važna njegova vlastitost koliko i **nosivost** (sigurnost) ili **uporabljivost** mora se pobuđivati već u studentskoj sredini.

Valja znati da ako se već sada ne uvedu u primjenu krupnija **poboljšanja u projektiranju i građenju** usmjerena na doista pouzdano **ponašanje** novih građevina, ali i u **uzdržavanju i popravcima** postojećih, sljedeći će naraštaj – dakle naša djeca – biti prikraćen u mogućnostima razvitka.

Naime, on će (novi naraštaj) morati dobar dio novca što bi ga ulagao u **razvitak** (ili općenito za dobrobit) izdvajati za **popravke** građevina što ih je baštiniio od našega naraštaja.

Na slici I.1 predočena su česta oštećenja uočena na hrvatskim mostovima.

I Uvod

Slika 1.1: Česta oštećenja na hrvatskim mostovima



2 Odnos uvriježenoga projektiranja i predviđanja trajnosti

Općenito je prihvaćeno kako je svrha proračuna “postići prihvatljivu vjerojatnost da će se projektirani sklop ponašati na zadovoljavajući način u predviđenomu vijeku trajanja”.

Kada proračunavamo sklop prvo određujemo **opterećenja** (ili, općenitije, djelovanja) kojima se sklop mora oduprijeti.

Kako su ta djelovanja obično **promjenjiva**, rabimo tzv. **faktore sigurnosti** kako bismo stvorili **zalihu** sigurnosti.

Pošto odredimo djelovanja pomnožena faktorom sigurnosti, biramo **vrst nosivoga sklopa, gradivo** od kojega će biti (ili više njih), podrazumijevajući i potrebne **čvrstoće**, te **izmjere** pojedinih **presjeka** odabranoga sklopa.

Budući da je teško predvidjeti **vlastitosti gradiva**, a donekle i **izmjere presjeka**, i za njih su potrebni faktori sigurnosti, naravno, druge vrsti.

2 Odnos uvriježenoga projektiranja i predviđanja trajnosti

Slijedi ispisivanje jednačbe kojom se provjerava je li **vjerojatnost** pojave **djelovanjâ** što **premašuju otpornost** nosivoga sklopa dostatno **mala**.

Kada se radi o **predviđanju trajnosti**, tj. provjeri može li se predviđeni vijek trajanja dosegnuti uz prihvatljivu razinu **vjerojatnosti**, prilike su sasna različite.

U prvi mah izgleda da je bez daljega prihvatljiv vrlo pojednostavnjeni pristup.

U normama nalazimo samo opisne definicije **izloženosti** sklopa **ugrožavajućim djelovanjima**, a nedostaje **definicija vijeka trajanja** u odnosu na **trajnost**.

Osobito nedostaje **količinski** (kvantitativni) **iskaz** graničnoga stanja **trajnosti** što mora biti **premašeno** kako bi vijek trajanja **istekao**.

2 Odnos uvriježenoga projektiranja i predviđanja trajnosti

Obično se previđa da norme i propisi utvrđuju samo **najnižu razinu kakvoće** što ju zahtijeva društvena zajednica.

Za mnoge važne građevine (slika 2.1) to **ne može** biti **dostatno** pa ni **zadovoljavajuće**.



Slika 2.1: Krčki most

Po prijašnjemu pristupu nije se prepoznavalo, da za trajnost nisu **odlučujuće** samo **vlastitosti gradiva** ili njegovih sastojnica, nego i **uvjeti okoliša** u kojem je građevina.

2 Odnos uvriježenoga projektiranja i predviđanja trajnosti

Osobito se je malo pozornosti posvećivalo određivanju okolnosti i trenutka kada je **nuždan** kakav **zahvat** (intervencija) na nosivomu sklopu.

Kada se radi o procjeni **preostalog vijeka trajanja** postojećih građevina opet prevladavaju vrlo pojednostavnjeni postupci kao i pri određivanju vijeka trajanja novih građevina.

Ova tvrdnja vrijedi usprkos činjenici da se, pošto je građevina već **podignuta**, veći dio **nesigurnosti** vezanih uz projektiranje nove građevine može **ukloniti**.

Naime, mnogi **podatci** koje pri projektiranju **pretpostavljamo** sada postaju provjerljive **činjenice**.

3 Jedinственost sklopovnoga betona

S obzirom na **propadanje** (dotrajavanje) betonski sklopovi imaju uočljive **vlastitosti** po kojima se bitno razlikuju od sklopova od drugih gradiva.

Evo tih vlastitosti:

- **Kakvoća i odoljivost** (engl. *performance*) betona pretpostavljeni pri **projektiranju** i **izvedbi** pojedinoga sklopa pripadaju u područje **poželjnoga**.
- **Stvarna** kakvoća i odoljivost betona određeni su primijenjenim postupkom **izvedbe** u tijeku **građenja** (na gradilištu).
- Ako se dogodi da trajnosna odoljivost bude **niža** od one što ju propisuje norma, to ne bude **očito** niti se može **otkriti** dok ne prođe neko vrijeme zbog **naravi propadanja** (dotrajavanja) betonskih sklopova izloženih ugrožavajućem okolišu.

Rečeno podjednako vrijedi i za armirane i za prednapete betonske sklopove; odatle izraz sklopovni beton (*structural concrete*).

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

Po uvriježenom načinu proračuna betonskih sklopova smatralo se je da je **trajnost zajamčena** ako su ispunjeni zahtjevi na utvrđenu ili propisanu najmanju debljinu **zaštitnoga sloja** i najveću propisanu **širinu pukotine**, a oboje za pretpostavljenu **ugrozivost** (agresivnost) **okoliša**.

a) **Ugrozivost okoliša**

Obično se ugrozivost okoliša uzima kao **blaga, umjerena** ili **visoka** s obzirom na **zbroj** okolnosti:

- razina gustoće (koncentracije) ugrozivih kemijskih tvari poput klorida, sulfata i kiselina,
- nazočnost vode,
- stupanj vlažnosti.

U nekim je područjima bio uveden i četvrti stupanj: **osobito visoka ugrozivost**.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

Međutim, nije pravljena nikakava **razlika** između okoliša što prvenstveno prijete **propadanjem betona** i onih što prvenstveno prijete otpočinjanjem **hrđanja armature**.

b) Zaštitni sloj betona

Općenito se je zaštitni sloj betona propisivao da bude od 25 do 75 mm, a sve se je temeljilo na mješavini **iskustva** i **osjećaja** (intuicije).

Još nije provedeno nijedno **istraživanje** kako bi se mogle **znanstveno utemeljeno** određivati najpovoljnije debljine **zaštitnoga sloja** za **određene betone** u **različitim okolišima**.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

c) *Širina pukotina*

Projektna **širina pukotine** propisivana je da bude od 0,3 mm do 0,1 mm zavisno od stupnja ugrozivosti okoliša, ali uz veliku **raznolikost** izrazâ za njihov proračun predočenih u državnim i međunarodnim propisima.

Većina je naporâ bila usredotočena na iznalaženje izrazâ za širinu pukotine od **vanjskog opterećenja** što izaziva čisti **vlak** ili čisto **savijanje**.

Međutim, širine pukotina što nastaju zbog plastičnoga **skupljanja**, zbog raspucavanja od **slijeganja** betona pri **vezanju**, te pukotina usporednih s armaturom, pukotina što nastaju zbog **hrđanja** armature, zbog **alkalne reakcije** puniva (agregata) itd. **uopće nisu bile istraživane**.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

c) *Širina pukotina*

A valja znati da ovakve pukotine mogu imati znatno **pogubniji** učinak na trajnost betonskih sklopova nego pukotine izazvane vlakom ili savijanjem.

Težište je istraživanja dakle bilo na problemima što ih je **lakše** istražiti, a ne na **stvarnim** praktičnim problemima.

d) *Hrđanje armature*

Hrđanje armature postalo je **najozbiljnijim** uzrokom skupoga prijevremenoga **propadanja** betonskih sklopova.

Slučajni pogodak, kada je pred stoljeće i pol izumljen armirani beton, bila je vrlo učinkovita zaštita od hrđanja armature što ju je pružao lužnati beton od portlandskog cementa oko nje.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

d) *Hrđanje armature*

Ipak, s vremenom se je uočilo da se zaštitni učinak lužnate sredine **poništava** iz dvaju razloga:

- kada karbonacija dopre do površine armature i
- kada dostatna količina klorida prodre do armature.

Ako je dostupna dostatna količina **vlage, hrđanje** može nastupiti iz bilo kojeg od ovih razloga, a bujajuća hrđa pri tomu izaziva **raspucavanje, cijepanje i odlamanje** zaštitnoga sloja betona.

Odlomljeni komadi betona mogu biti prijetnja **prolaznicima**, a smanjeni presjeci betona i armature smanjuju i **nosivost** presjeka sklopa.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

d) Hrdanje armature

Učinak prodora ugljičnoga dioksida, kloridâ i vode upozorio je na nužnost **sprječavanja** ili **odgađanja** prodora štetnih tvari.

Ovo pak iziskuje **razumijevanje mehanizama** što upravljaju prodorom takvih ugrožujućih tvari što izazivaju hrdanje armature.

e) Propadanje s vremenom

Propadanjem samoga **betona** također upravlja prodor ugrožujućih tvari i njihovo nakupljanje unutar betona zbog npr. uzastopnoga **vlaženja-sušenja** ili zbog učinaka **hlapljenja** (slika 4.1).

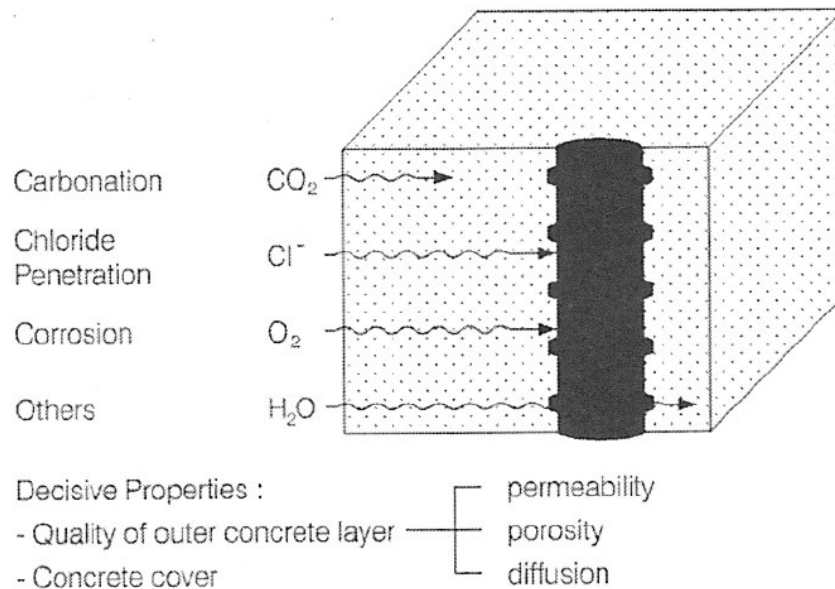
Posljedak je toga da se propadanje betona s vremenom može predočiti slomljenim pravcem (slika 4.2).

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

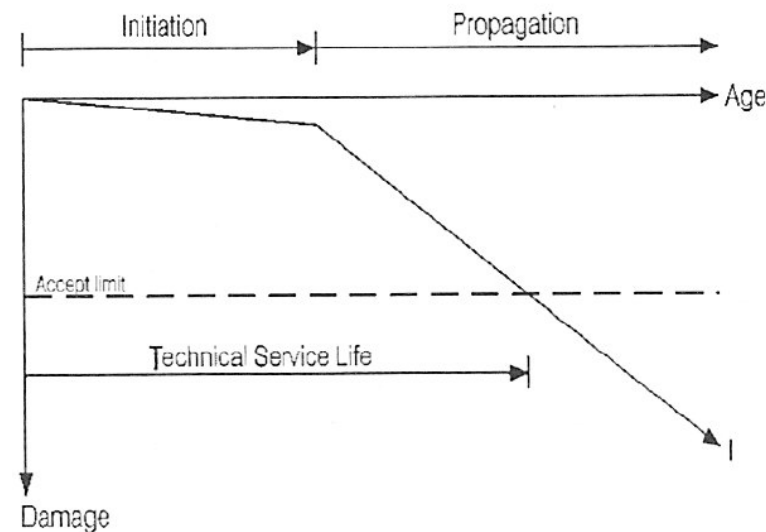
e) Propadanje s vremenom

Uočljiva su dva izrazito različita razdoblja:

- razdoblje otpočinjanja (nema oštećenja) i
- razdoblje napredovanja (rastuće propadanje).



Slika 4.1: Važnost zaštitnog sloja betona u zaštiti od propadanja



Slika 4.2: Vijek trajanja betonskih sklopova; shematski prikaz

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

f) Zaštitne mjere

U pogledu zaštite armature od hrđanja izgleda da je pristup bio vrlo **jednostran**, bio je usredotočen na betonsku **mješavinu** u obliku **betona visoke odoljivosti** (*high performance concrete*) i na **zaštitni sloj betona**, kako bi se armatura zaštitila od hrđanja, bez obzira na to **kakav je okoliš** i **koliko je ugrozivo**.

Druge zaštitne mjere poput **prijemazâ** na armaturi i betonu, **katodne zaštite**, **primjesa** što sprječavaju hrđanje, **nemetalne** armature i **vlaknaste** armature također se rabe, ali s **ograničenim učinkom**, a gdjekada i sa **sumnjivim uspjehom**.

4 Valjano projektiranje za trajnost i vijek trajanja

f) Zaštitne mjere

Armatura od **nehrđajućega čelika** (*stainless steel reinforcement*) sada je nova i vrlo pouzdana zaštitna mjera, dostupna projektantu.

Zaštita od hrđanja uporabom odgovarajuće kakvoće nehrđajućega čelika izgleda da danas predstavlja **zaokret** u tehnici trajnosnoga projektiranja kada se radi o **visoko ugrozivim okolišima**, kako ćemo vidjeti kasnije.

5 Beton visoke odoljivosti kao zaštita od hrđanja

Usredotočenost na **propusnost** betona kao vlastitost što određuje njegovu **trajnost “zarobila”** je istraživače trajnosti i vijeka trajanja betonskih sklopova posljednjih nekoliko desetljeća.

Ishod je tih istraživanja vrlo **gust i nepropustan beton**, jer je težište istraživanja bilo na betonskoj **mješavini**, a poglavito na vrsti i sastavu cementnoga veziva i na omjeru vode i veziva.

Osobite hidrauličke **primjese**, poput **kremenoga paha** (engl. *silica fume*), **letećega pepela** i mljevene ozrnjene (granulirane) **šljake visokih peći**, prevladavale su u ovom razvoju ili kao mineralna **primjesa** ili kao **nadomjestak** cementu.

Povrh ovoga uvođenje kemijskih **plastifikatora** i **superplastifikatora** snizilo je omjer vode i cementa do skrajnjih granica: između 0,3 i 0,4, pri čemu beton još uvijek ostaje **obradiv**.

5 Beton visoke odoljivosti kao zaštita od hrđanja

Kako je već rečeno, ishod je ovoga razvoja **beton visoke odoljivosti (BVO)**.

Razvoj ovakvih BVO imao je i nekoliko **manje zapaženih suprotnih** učinaka glede na trajnost.

Naime, BVO se je pokazao znatno **osjetljivijim na kakvoću izvedbenoga postupka** nego tzv. obični beton.

Osobito je pogibelj **ranog raspucavanja**, poput onog od **plastičnoga skupljanja** i od **hidratacijske topline**, znatno **izraženija** u BVO nego u uvriježenih betona.

Veliko **kemijsko (autogeno) skupljanje** BVO dijelom “**potroši**” ranu **izobličljivost** čineći vežući beton **krhkim** i osjetljivim na neizbježiva rana izobličjenja zbog **hlapljenja vode** odmah nakon dovršetka ravnjanja izloženih betonskih ploha.

5 Beton visoke odoljivosti kao zaštita od hrđanja

Na sličan je način ovakav beton osjetljiv na rano raspucavanje kada je izložen **naglomu hlađenju okolnim zrakom**.

S obzirom na zaštitu od hrđanja armature dodatni je **suprotni učinak** neizbježno smanjenje sadržaja **kalcijeva hidroksida** $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ u betonu.

Naime, mineralne primjese **troše** $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ **pri kemijskoj reakciji**.

Ovo proizvodi malo smanjenje sadržaja (OH) koji je odgovoran za **lužnatost** (pH) porne vode u betonu.

Međutim, ukupni se iznos $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ **znatno** smanjuje, što smanjuje sposobnost **ublažavanja karbonacije** i uz to snizuje **djelotvorni prag** pri kojem nastaje hrđanje izazvano **kloridima**.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

Što znači **trajan sklop**, zapravo je vrlo osobno (subjektivno) i teško ga je točno odrediti (definirati).

To bi trebalo značiti da je to sklop što **zadržava** svoju **zadovoljavajuću odoljivost** u predviđenom razdoblju **bez neočekivano visokih troškova uzdržavanja**.

Zbog toga se izrazom **proračun vijeka trajanja** nadomješta izraz **trajnost**, jer se ovaj novi može izraziti **mjerljivom količinom** (godine).

Ovo je pojašnjenje uveo danski istraživač *Fagerlund* (1979.).

Načelno se mogu slijediti dva u osnovi različita pristupa trajnosti, kako su ih zacrtali Danac *S. Rostam* i Nijemac *P. Schiessel* (1994):

- **A – izbjeavati** prijetee propadanje u ugrozivu okolišu;
- **B – dobro odabrati gradiva i detaljirati sklop.**

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

Pristup **A** može se podijeliti u tri skupine mjera:

- A.1: promijeniti **mikro-okoliš**, npr. izvedbom presvlaka, prijemaza itd.
- A.2: odabrati **ne-reaktivna** ili inertna gradiva, npr. armatura od nehrđajućega čelika, ne-reaktivno punivo, cement otporan na sulfate, niskolužnati cement.
- A.3: **spriječiti** reakcije, npr. katodnom zaštitom. Zaštita od smrzavice uvlačenjem zraka u beton također pripada u ovu skupinu.

Većina navedenih mjera **ne pruža potpunu zaštitu**.

Učinci pojedinih mjera zavise od nekoliko čimbenika.

Primjerice, učinak izvedbe prijemaza zavisi od njegove debljine i od njegove razmjerne propusnosti u odnosu na beton.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

Pristup **B** dopušta različite vrste zahvata.

Primjerice, zaštita od hrđanja može se postići izborom prikladne **debljine zaštitnoga sloja** betona i **betonske mješavine**.

Povrh toga sklop se može učiniti otpornijim protiv ugrožavajućega djelovanja okoliša prikladnim **detaljiranjem**.

Modeliranje mehanizama propadanja načelno se može primijeniti i na pristup **A** i na pristup **B**.

Međutim, **malo znamo o učinkovitosti različitih zaštitnih mjera**.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.1 Proračun trajnosti – prvi naraštaj: ***proračun za koje vjerujemo da zadovoljava***

Pristup proračunu trajnosti za koji **vjerujemo** da zadovoljava znači da treba utvrditi **zahtjeve na parametre** poput vrsti i količine cementa, najvećeg omjera vode i veziva, najmanje debljine zaštitnoga sloja betona, vrsti njege, mjera protiv ranog raspucavanja, ograničavanja širina pukotina itd.

Odabrane vrijednosti zavise od **pretpostavljene** ugrozivosti okoliša.

U **većini** današnjih državnih **norma**, pa i u *Eurokodu 2*, **prevladava** ovaj pristup.

Međutim, uskoro će se unijeti korjenite **promjene** u te norme, kako ćemo vidjeti u točki 6.3.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.2 Proračun trajnosti – drugi naraštaj: proračun vijeka trajanja kroz višestupanjsku zaštitu

Proračun vijeka trajanja po pristupu B počiva na valjanu izboru prikladnih neproturječnih mjera što vode zajamčenju zahtijevanoga vijeka trajanja.

Ovo se smatra pristupom **višestupanjske zaštite** ili **višepreprečnim pristupom**:

1. utvrditi vrst i ugrozivost okoliša u kojem će sklop služiti,
2. predvidjeti moguće gibanje ili nakupljanje ugrožujućih tvari,
3. odrediti koji mehanizam prijenosa prevladava (propuštanje, raspršivanje, kapilarno djelovanje) i koji parametri upravljaju tim mehanizmom.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.2 Proračun trajnosti – drugi naraštaj: proračun vijeka trajanja kroz višestupanjsku zaštitu

4. odabrati prepreke što mogu pomagati pri usporavanju ili sprječavanju prijenosa ili nakupljanja štetnih tvari.

Ovaj pristup proračunu trajnosti (tzv. drugi naraštaj) bio je prvi put primijenjen na danskom projektu stoljeća, na *Velikom Beltu* (slika 6.1).



Slika 6.1: Most preko Velikoga Belta u Danskoj

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.3 Proračun trajnosti – treći naraštaj: *proračun vijeka trajanja zasnovan na pouzdanosti*

Teorije vjerojatnosti i pouzdanosti, što su prvotno rabljene u proračunu sklopova, našle su primjenu i u proračunu **trajnosti**, a znatno su uznapredovale u zadnjih 10÷15 godina; dapače, u zadnjih 10-ak godina primjenjuju se i u praksi.

Ove teorije prešle su s razine istraživanja i teorijskog umjeravanja normâ (*theoretical code calibration*) u izravnu **praktičnu primjenu**, kako ćemo vidjeti u sljedećem poglavlju.

Osnovni je pristup već međunarodno prihvaćen i rabi se više desetljeća u pojednostavnjenju obliku kao **metoda faktorâ sigurnosti za opterećenja i otpornosti** (*load-and-resistance-factor-design, LRFD*).

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.3 Proračun trajnosti – treći naraštaj: proračun vijeka trajanja zasnovan na pouzdanosti

Međutim, faktori što određuju **trajnost** i **odoljivost** sklopova u njihovu uporabnom vijeku tek su nedavno uvedeni na sličan način.

Ovaj je pristup omogućio **modeliranje** mehanizama **prijenosa i propadanja** na vjerojatnosnoj razini i na taj način uvođenje u **proračun sklopova**.

Tako se proračun za **sigurnost** i **trajnost** može provesti uporabom sličnih postupaka.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.3 Proračun trajnosti – treći naraštaj: proračun vijeka trajanja zasnovan na pouzdanosti

Ovo otvara oči onima što gospodare građevinama koju sada mogu – ili su prisiljeni – donositi odluke što se tiču:

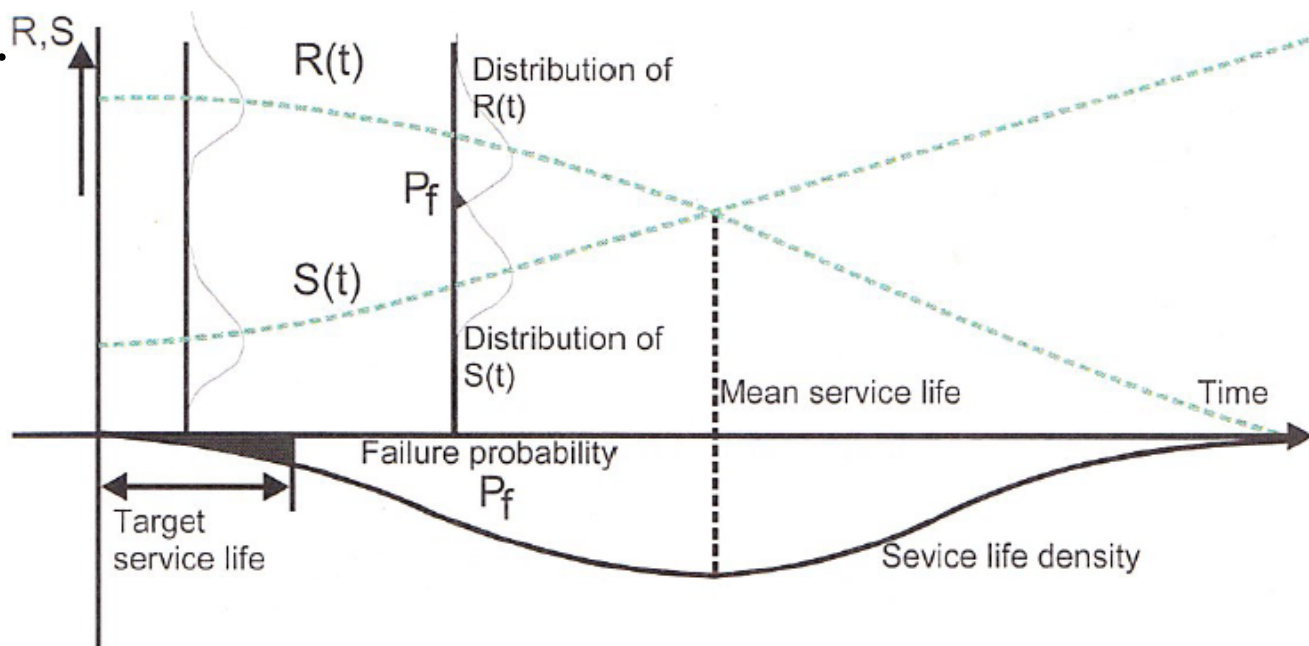
- zahtijevane dugoročne odoljivosti sklopova,
- posljedaka s obzirom na buduće održavanje,
- ukupnih troškova u vijeku trajanja i
- pridružene razine pouzdanosti.

Ovo je izravan **preslik** dobro poznatoga proračuna za **otpornost**, gdje propisani faktori sigurnosti predstavljaju društveno prihvatljivu razinu **pouzdanosti** proračuna sklopova.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.3 Proračun trajnosti – treći naraštaj: proračun vijeka trajanja zasnovan na pouzdanosti

Na slici 6.2 shematski je predložen vjerojatnosni proračunski postupak, pri čemu se zadaća rješava pouzdanosnim postupcima. R, S



Slika 6.2: Vjerojatnost otpočinjanja hrđanja i ciljni vijek trajanja

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.4 Usporedba determinističkog i probabilističkoga proračuna vijeka trajanja

Prikladnost probabilističkoga (vjerojatnosnoga) pristupa proračunu trajnosti najvolje se vidi na primjeru pomorske građevine.

Promatraju se dva različita okoliša čije su prosječne godišnje temperature 10 °C (umjerena klima) i 30 °C (vruća vlažna klima).

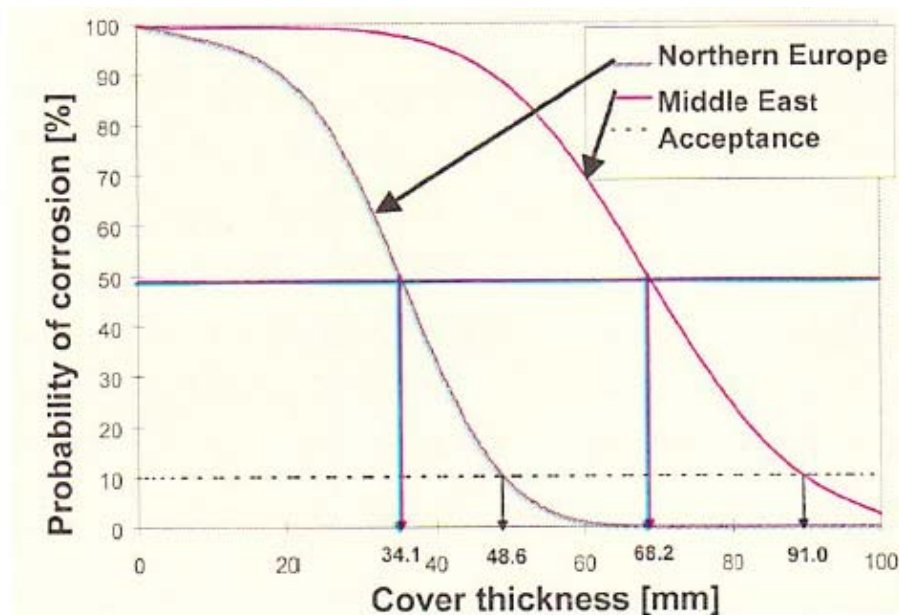
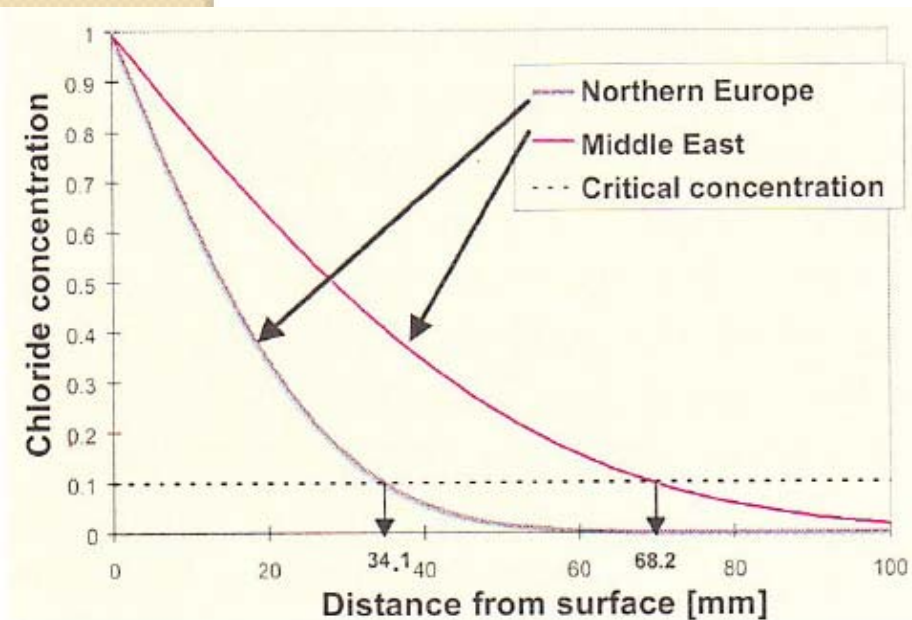
Proračunski je zahtjev vijek trajanja od 50 godina.

Radi jednostavnosti ovdje je vijek trajanja određen kao razdoblje otpočinjanja, tj. vrijeme do depasivizacije armature zbog prodora klorida.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.4 Usporedba determinističkog i probabilističkoga proračuna vijeka trajanja

Slika 6.3 predočuje zahtijevane debljine zaštitnoga sloja betona za dva okoliša dobivene po uvriježenom **determinističkomu** pristupu i po **vjerojatnosnom** pristupu.



Slika 6.3: Zahtijevana debljina zaštitnoga sloja betona

Lijevo: deterministički pristup; desno: vjerojatnosni pristup

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.4 Usporedba determinističkog i probabilističkoga proračuna vijeka trajanja

Slika 6.3 (desno) pak naglašava činjenicu da deterministički pristup pruža **samo 50 %** vjerojatnosti postizanja vijeka trajanja bez hrđanja.

Ova se činjenica često previđa pri uvriježenomu proračunu trajnosti.

Ako je recimo prihvatljivo samo 10 % rizika da će hrđanje započeti prije isteka 50 godina, onda su potrebni **znatno deblji** zaštitni slojevi, kako se vidi na slici 6.4.

Ovdje rabljeni deterministički pristup zasniva se na **srednjim vrijednostima** odlučujućih parametara.

U probabilističkom pristupu rabe se **funkcije raspodjelbe, srednje vrijednosti** i njihovi poznati ili pretpostavljeni **koeficijenti varijacije**.

6 Pristupi proračunu trajnosti i vijeka trajanja

6.4 Usporedba determinističkog i probabilističkoga proračuna vijeka trajanja

Ovaj drugi pristup omogućuje ne samo da se vidi **odnos** debljine zaštitnoga sloja i **vjerojatnosti** hrđanja, nego i **količinski iskaz** posljedaka različito odabranih **rizika** hrđanja.

Ovi se posljedci tiču ne samo kakvoće betona i debljine zaštitnoga sloja, nego, što je još važnije, **gospodarskih** (novčanih) posljedaka.

Tako je stvorena osnova za proračun **najpovoljnije raspodjelbe troškova u vijeku trajanja** (optimizacija troškova) zasnovana na **vjerojatnosti**.

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

Kada treba projektirati osobito veliku građevinu ustanovljuje se “**Zbirka podataka**” za nju.

Ovaj dokument objedinjuje odabrane mjerodavne propise i norme, moguće preinake norma i sve dodatne zahtjeve što mogu biti zanimljivi.

Dulji vijek trajanja u odnosu na pretpostavke iz propisa, manja potreba za uzdržavanjem, oblikovni zahtjevi, osobita opterećenja i iznimno ugrozivi okoliš – sve su to podatci što ih treba prikupiti, kao i postupke proračuna i provjera utvrđene u Zbirci podataka.

Zanimljivo je vidjeti koji se “novi” zahtjevi traže ako vlasnik hoće da mu građevina zadovolji kakve osobite uvjete.

To ćemo pokazati na primjeru primorske građevine u vrućemu vlažnom okolišu, gdje je glavni problem hrđanje armature.

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.1 Stvaranje Zbirke podataka

Naravno, svi parametri što određuju opterećenja, čvrstoće gradiva, propisi i norme, osobite preinake i dopune propisa i norma u svezi s projektom, osobiti vlasnikovi zahtjevi, itd. – sve se to mora prikupiti **prije** nego što otpočne **projektiranje**.

Želi li se dosegnuti osobit vijek trajanja uz utvrđenu razinu pouzdanosti, moraju se unaprijed utvrditi **dodatni zahtjevi**.

Ova se činjenica često previđa u uvriježenim postupcima projektiranja gdje je bio običaj da se trajnost osigurava u završnom dijelu projekta pisanjem osobitih zahtjeva u potanji opis radova.

Međutim, takav pristup **ne može zajamčiti predviđeni vijek trajanja**.

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.1 Stvaranje Zbirke podataka

Radi jednostavnosti – ali **obuhvaćajući velik broj stvarnih projektnih prilika** – prikazat ćemo primjer zahtjevâ za stvarni vijek trajanja od 100 godina velika betonskoga mosta temeljena pod morem u vrućemu vlažnom okolišu (slika 7.1).



Slika 7.1: Betonski ovješeni most u vrućem i vlažnom okolišu

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.2 Zaštita armature od hrđanja

Ona se u prvom redu zajamčuje **kakvoćom betona** u zaštitnom sloju i **debljinom** toga sloja.

O mogućem **suprotnom učinku** raspucavanja mora se također voditi računa u Zbirci podataka.

Debljina zaštitnoga sloja, najveća širina pukotina na površini i prihvaćena razina pouzdanosti zapravo su **jedini dodatni parametri** što ih treba utvrditi prije početka statičkoga proračuna.

Zaštitni sloj ima svoj udio u geometriji presjeka – banalan podatak – ali je **mного važniji za vijek trajanja** nego što se obično priznaje.

Širina pukotina utječe na brzinu prodora štetnih tvari, što je očito važan podatak, ali se općenito **precjenjuje** njegov utjecaj na vijek trajanja.

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.2 Zaštita armature od hrđanja

Zbog toga Zbirka podataka mora obuhvatiti dodatne podatke potrebne za utvrđivanje prikladne kakvoće betona na osnovi koje se može odrediti **debljina zaštitnoga sloja uz predodređenu razinu pouzdanosti**.

Ukratko, Zbirka podataka treba utvrditi najveću raspršivost klorida i debljinu zaštitnoga sloja betona.

Za to je nužno prikupiti ove podatke:

- ugrozivost okoliša izraženu kao pretpostavljenu površinsku gustoću (koncentraciju) klorida, Cl_s^- ,
- najveći prihvatljivi sadržaj klorida u početnoj betonskoj mješavini, Cl_0^- ,
- najveći prihvatljivi koeficijent raspršenosti klorida utvrđen normnim pokusom pri određenoj starosti, D_{Cl^-} ,

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.2 *Zaštita armature od hrđanja*

- pretpostavljenu kritičnu gustoću klorida što pokreće hrđanje, Cl_{cr}^- ,
- faktor starenja što je u svezi s vrsti cementnog veziva, α .

Predviđenu razinu pouzdanosti predstavlja pokazatelj pouzdanosti, β .

Eurokod propisuje da se granična stanja uporabivosti provjeravaju na osnovi pokazatelja pouzdanosti $\beta_{sls} = 1,5 \div 1,8$, što odgovara vjerojatnosti prekoračenja graničnog stanja $6,7\% \div 3,6\%$.

U niže predočenomu primjeru uzeta je 10 %-tna vjerojatnost prekoračenja graničnoga stanja – u ovom slučaju to znači da će hrđanje otpočeti prije isteka vijeka trajanja.

To približno odgovara pokazatelju pouzdanosti $\beta = 1,3$.

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.2 Zaštita armature od hrđanja

Razmatrana su tri uvjeta izloženosti s ulaznim parametrima predočenima u tablici 1.

Parametri	Podvodno područje	Plima – oseka - pjena	Zračno područje
Cl_s , % težine veziva	2,5	4,0	2,0
Cl_0 , % težine veziva	0,1	0,1	0,1
D_{Cl^-} , $10^{-12} \times m^2/s$	2	2	2
Cl_{cr} , % težine veziva	2,2	0,7	0,9
α	0,30	0,40	0,40

7 Vijek trajanja kao sastavni dio statičkoga proračuna

7.2 Zaštita armature od hrđanja

Nakon provedbe vjerojatnosnoga proračuna kako je predočeno na slici 6.2 dobiju se teorijske debljine zaštitnoga sloja betona što je predočeno u tablici 2 za tri različita uvjeta izloženosti.

β	Podvodno područje	Plima – ose- ka – pjena	Zračno područje
1,30	20	59	38
1,50	22	63	40
1,80	25	68	44

Pri izboru konačne debljine teorijske se vrijednosti iz tablice 2 moraju povećati u skladu s praktičnim podacima poput najvećega zrna puniva (agregata).

Na osnovi toga će se onda određivati izmjere razmačnikâ (“distancerâ”).

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

Može se poduzeti nekoliko mjera za sprječavanje hrđanja, koje ne počivaju na betonu ili zaštitnomu sloju, a najčešće se rabe:

1. prijemazi za beton ili armaturu,
2. ometala hrđanja,
3. katodna zaštita,
4. nemetalna armatura i
5. armatura od nehrđajućega čelika.

Od svih nabrojanih mjera pozabavit ćemo se samo armaturom premazanom umjetnom (epoksidnom) smolom i armaturom od nehrđajućega čelika.

Znatne su koristi za vlasnika građevine, a i za društvenu zajednicu, ako se spriječi hrđanje u vrlo ugrozujućim područjima poput tropskih ili zemalja u kojima se soli radi odmrzavanja.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

Evo tih koristi od kojih se neke tiču izvedbe:

- Nema potrebe za osobito gustim i nepropusnim betonom ili cementom s posebnim dodacima kako bi se postigla pouzdana prepreka protiv prodora klorida, vode i kisika.
- Ne mora se nužno rabiti BVO osim ako je potreban radi čvrstoće ili radi sprječavanja propadanja samog betona.
- Cementi otporni na sulfate mogu se rabiti u tlu što sadrži sulfate i onda kada ono sadrži i sulfate i kloride.
- U betonskoj mješavini smjet će se rabiti mjesna puniva i voda, pa i ako su malo onečišćeni kloridima.
- Može se dobiti zdrav beton manje osjetljiv na izvedbene uvjete, što unaprjeđuje kakvoću i pouzdanost građevine u njezinu vijeku trajanja.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

Valja biti oprezan s proizvođačima **organskih** zaštitnih sredstava koji ih nasrtljivo nude.

Sama ta sredstva i nisu loša, ali treba znati da ona stare pod djelovanjem ultraljubičastih zraka, te da ih treba obnavljati i po više puta u vijeku trajanja građevine.

Drugi povod za oprez jesu **otpadna gradiva** što navodno imaju **hidraulične vlastitosti**, pa se mogu rabiti kao dodatci (pa i nadomjestci) cementu.

To je istina kada se radi o kremenomu prahu, letećem pepelu i šljaci.

Međutim, u tu se skupinu hoće i utrpati i pepeo što ostane nakon spaljivanja **životinjskih ostataka** i drugi organski otpad.

Zato treba ustrajavati na opsežnim **laboratorijskim** provjerama.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.1 Armatura premazana umjetnom smolom

Ova je zaštitna mjera uvedena s velikim nadama u Sjevernoj Americi sredinom 70-ih.

Međutim, početkom 90-ih počela su se pojavljivati prva izvješća o hrđanju armature ispod prijemaza, do čega je vjerojatno dolazilo zbog oštećenja prijemaza pri ugradbi armature.

Zanimljivo je da hrđanje nije bivalo popraćeno uzdužnim **pukotinama** u betonu kao inače, nego se je samo armatura **polagano raspadala**.

Tek pošto bi proces **uznapredovao** javljale bi se i pukotine.

Objavljeno je **upozoravajuće izvješće**, a u to doba ovaj se je postupak bio polako širio na Europu, Srednji Istok, pa i dijelove Dalekog Istoka.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.1 *Armatura premazana umjetnom smolom*

Prva uočena veća oštećenja bila su na mostovima Florida Keys u SAD (slika 8.1).



Slika 8.1: Mostovi Florida Keys armirani čelikom, premazani umjetnom smolom

Već krajem 80-ih u Europi se je počelo radati **nepovjerenje** prema ovom postupku, osobito zbog toga što nakon njega sve šipke bivaju međusobno **električno izolirane**, što onda **onemogućuje** primjenu **katodne zaštite** ako ustreba.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.1 Armatura premazana umjetnom smolom

Rješenje sa samim prijemazima duhovito je nazvano **stavljanjem svih jaja u jednu košaru**.

Ova otkrića potaknula su opsežna **istraživanja** na mjestima ugradbe, koja su otkrila da je do hrđanja dolazilo zbog **oštrih rubova** na mjestu sječenja armature, te zbog naknadnoga **savijanja** premazanih šipaka.

Ukratko, **postupak je**, nakon dodatnih istraživanja provedenih u Kanadi, malo po malo **povučen iz uporabe**.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.2 *Armatura od nehrđajućeg čelika*

U zadnjih 10-ak godina postala je armatura od nehrđajućeg čelika (ANČ) **cjenovno prihvatljiva**.

Ona može biti otporna na hrđanje i u **visoko ugrozivu** okolišu.

Ako ju rabimo samo **na najizloženijim mjestima** ona ne će znatnije opteretiti ukupne **troškove** na armaturu, pogotovo ako imamo na umu kasnije manje troškove **uzdržavanja**.

Ona je zgodna i zbog toga što se može ugraditi u beton **zajedno** s običnom armaturom bez bojazni od nastanka **galvanskih struja** što uzrokuju hrđanje.

Polje njezine moguće primjene jest vrući i slani okoliš poput onog u **Sredozemlju**, ali i sklopovi izloženi **solima za odmrzavanje**.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.2 Armatura od nehrđajućeg čelika

Vrlo uvjerljiv dokaz odoljivosti ANČ pruža pristanišni most dug 2,2 km kod grada Progresso u Meksiku, star oko 70 godina (slika 8.2).



Slika 8.2: Pristanišni most armiran nehrđajućim čelikom (lijevo)

i ostatci puno mlađega mosta armirana običnim čelikom (desno)

Nema tragova hrđanju usprkos iznimno ugrozivu okolišu, o čemu svjedoči nestanak više nego upola mlađeg mosta čiji se tragovi jedva vide na lijevom, a sasvim jasno na desnom dijelu slike.

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.2 *Armatura od nehrđajućeg čelika*

Dodatna korist od uporabe ANČ jest činjenica da je on **katodno slabiji** od ugljičnoga čelika.

Zato se može rabiti za **popravak** sklopova u kojima je hrđanje ugljičnog čelika znatno uznapredovalo pa ga treba **nadomjestiti** drugim.

Primjeri takvih sklopova jesu rubne grede ili odbojnici mostova i uopće dijelovi mosta snažno izloženi soljenju, bilo prirodnom (morski okoliš) bilo namjernomu (kopneni mostovi).

8 Sprječavanje hrđanja na druge načine – ne samo betonom

8.2.1 Mješovita rješenja

U zadnje se vrijeme na tržištu visoko razvijenih zemalja javlja armatura **presvučena** nehrđajućim čelikom.

Međutim, za sada se mogu dobiti samo razmjerno kratke šipke, što izaziva velike gubitke i druge nepogodnosti, pa treba još pričekati s primjenom do usavršavanja postupka proizvodnje ovakva čelika.

Drugi je nedavni proizvod – **specijalno legirani čelik**, navodno **otporan na kloride**.

Kao i sa svim što se bučno nudi i s ovim treba biti **oprezan**, što je inače iznimno teško u okolnostima kada posao dobiva onaj koji nudi **najnižu cijenu**.

9 Propisivanje ostvarivih zahtjeva na građenje

Vidjeli smo da **građenje** predstavlja **odlučujuću** fazu u ostvarivanju predviđenog vijeka trajanja betonskih građevina.

Zbog toga je izvanredno važno već u fazi **projektiranja** procijeniti koja se razina **znanja** i **praktičnog iskustva** u izvedbi sličnih građevina može očekivati od raspoložive radne snage i vodstva, uzimajući u obzir odabrana gradiva i okoliš.

O svim ovim podacima mora se voditi računa u Zbirci podataka.

Iz ovih je razloga tzv. **predkvalifikacija** izvoditeljskih tvrdaka bila jedno od sredstava za jamčenje osposobljenosti i iskustva.

Međutim, to očito nije bilo dostatno, jer bi zapravo bilo nužno znati kojom **osposobljenošću i iskustvom** raspolažu **konkretni ljudi koji će betonirati i njihovi poslovođe**, a to je vrlo teško postići.

9 Propisivanje ostvarivih zahtjeva na građenje

Pošto su ljudi uvidjeli koliko je važan zaštitni sloj betona, ne samo za zaštitu armature nego i za izgled gotova sklopa, velika je pozornost posvećena vodonepropusnosti (ili, bolje, nadziranoj propusnosti) oplata.

Brojni su pokusi, a i opće praktično iskustvo, pokazali da je tako. Doduše, to poskupljuje (i to ne zanemarivo) gotovi proizvod, ali se nesumnjivo isplati.

Nastojanje da se **snižavanjem** omjera vode i cementa povećava **gustoća** betona, a onda i njegova **trajnost** znalo je uroditi i suprotnim učinkom – pojavom tzv. **gnijezda** zbog slabe ugradivosti betona.

Dodatna je nevolja u tomu što kakvoća betona izravno zavisi od **savjesnosti rukovatelja vibratorom**.

9 Propisivanje ostvarivih zahtjeva na građenje

Tako je nastalo temeljno **proturječje**: što je **bolja betonska mješavina** sa stajališta trajnosti, to je veća pogibelj da se taj **beton ne ugradi valjano**.

Iz tih su razloga tehnolozi betona razvili tzv. **samozbijajući beton** (*selfcompacting concrete*).

Upravo zbog svih ovih nepredvidivosti uveden je proračun vijeka trajanja zasnovan na vjerojatnosti.

Međutim, pošto je građevina **dovršena**, više ne moramo **pretpostavljati** parametre odlučne za trajnost – možemo ih **znati, izmjeriti**, doći do njih **ispitivanjem uzoraka** itd.

Iz tako dobivenih podataka **ponovno** se računa očekivani **vijek trajanja** i to se podastire vlasniku građevine u obliku “**krsnog lista**”, a postupak se ponavlja pri svakom krupnijem zahvatu (popravku i sl.).

10 Motrenje trajnosti

Uvidjelo se je da je radi **sniženja troškova uzdržavanja i popravaka** nužno redovito **pregledavanje i bilježenje stanja građevina**.

Također se zna da su **brzina prodora klorida** i mjesna vrijednost **praga otpočinjanja djelovanja klorida** (C_{cr}) dva ključna parametra za **predviđanje otpočinjanja hrdanja**.

Zato se u **nove** građevine ugađuju **osjetila** (senzori) što daju podatke iz kojih se može pouzdano utvrditi preostali vijek trajanja.

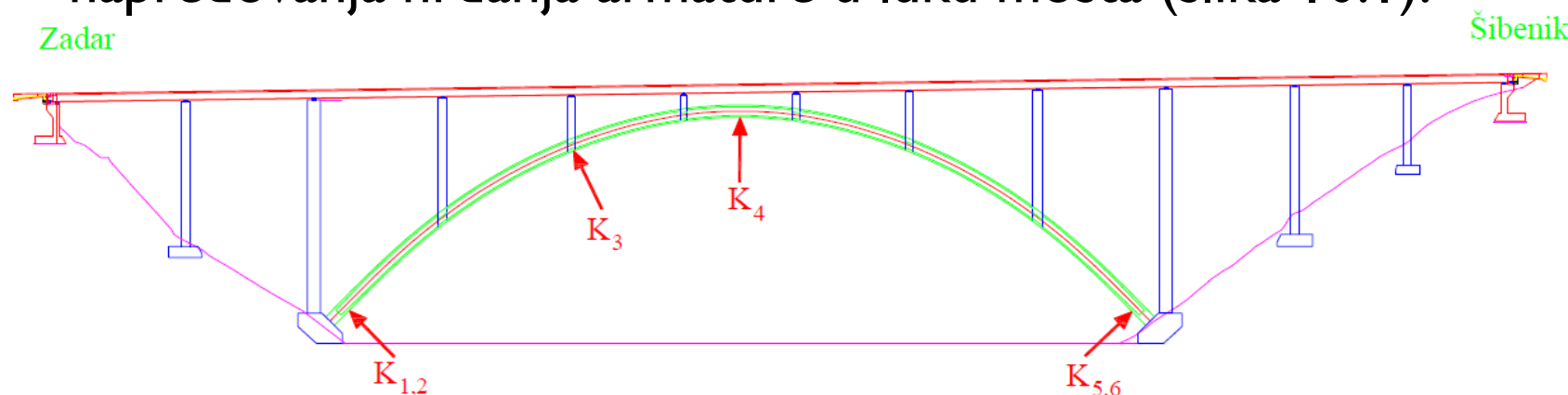
Međutim, razvijena su i odgovarajuća osjetila što se mogu ugraditi u **postojeće** građevine.

Ta se osjetila **umrežuju** i povezuju sa sustavom za praćenje stanja građevine što se zove sustavom **motrenja** (*monitoring*).

10 Motrenje trajnosti

Cjelovit sustav motrenja stanja mosta ugrađen je u most preko Krke na AC Zagreb - Split.

Sa stajališta trajnosti mosta najzanimljiviji je sustav motrenja napredovanja hrđanja armature u luku mosta (slika 10.1).

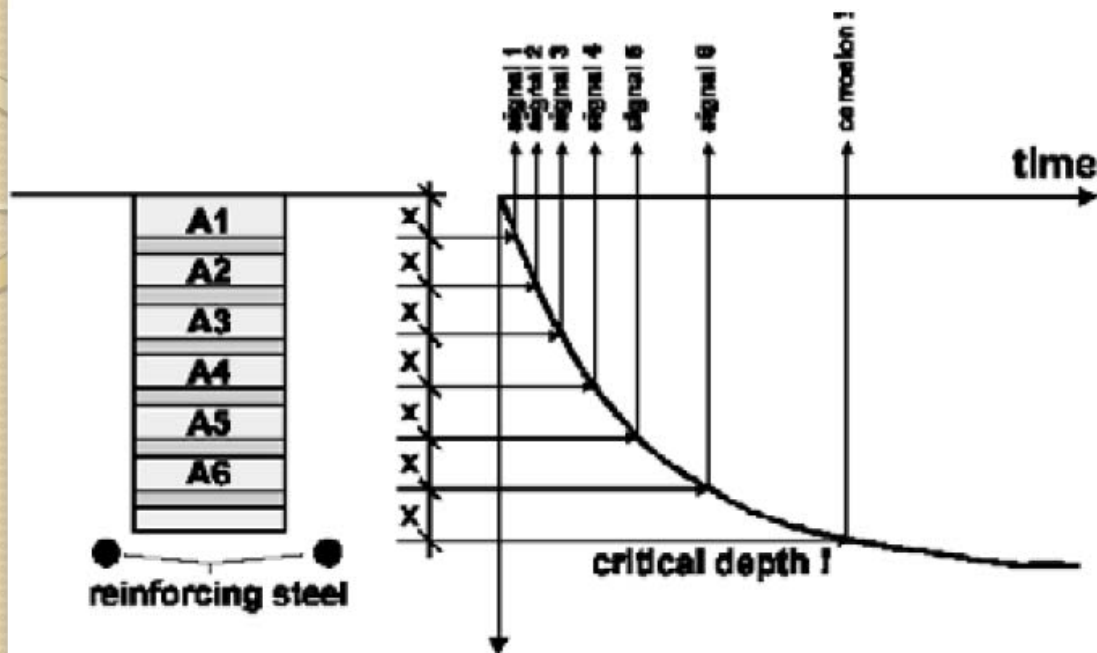


Slika 10.1: Osjetila ugrađena u luk mosta preko Krke na AC Zagreb-Split

Radi se o ugradbi Raupach-Schiessel-ovih osjetila, tzv. **anodnih ljestava**.

Osjetilo pokazuje pri kojoj je udaljenosti od betonske površine dosegnuta kritična razina prodora klorida, tj. gdje će otpočeti hrđanje armature (slika 10.2).

I0 Motrenje trajnosti



Slika I0.2: Raupach-Schiessel-ove "ljestve" za praćenje napredovanja prodora klorida kroz beton

* * * * *

Na kraju valja reći da cjelokupna stručna zajednica, dakle svi koji rade na projektiranju, građenju, uzdržavanju i gospodarenju mostovima moraju stalno **učiti**, sabirati iskustva drugih i **ne ponavljati pogreške**.