

Primljen / Received: 23.1.2018.
Ispravljen / Corrected: 10.5.2018.
Prihvaćen / Accepted: 24.6.2018.
Dostupno online / Available online: 10.6.2019.

Primjena modela prodora klorida za ocjenu stanja u gospodarenju mostovima

Autori:



Dr.sc. **Ivan Zambon**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za prirodne resurse i biološke znanosti
Fakultet građevinarstva i prirodnih nepogoda
ivan.zambon@outlook.com



Dr.sc. **Anja Vidović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za prirodne resurse i biološke znanosti
Fakultet građevinarstva i prirodnih nepogoda
anja.vidovic@boku.ac.at



Izv.prof.dr.sc. **Alfred Strauss**, dipl.ing.građ.
Sveučilište za prirodne resurse i biološke znanosti
Fakultet građevinarstva i prirodnih nepogoda
alfred.strauss@boku.ac.at



Doc.dr.sc. **Jose Matos**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Minho
Građevinski fakultet
jmatos@civil.uminho.pt

Izvorni znanstveni rad

Ivan Zambon, Anja Vidović, Alfred Strauss, Jose Matos

Primjena modela prodora klorida za ocjenu stanja u gospodarenju mostovima

Iako se danas diljem svijeta primjenjuju brojni sustavi za gospodarenje mostovima, čini se da ipak nema dovoljno sustava u kojima bi se koristilo znanje o svojstvima materijala i opterećenju iz okoliša. U ovom se radu, kao doprinos sadašnjoj praksi, analizira primjena modela prodora klorida, što podržava Međunarodni savez za betonske konstrukcije, a koristi se za preliminarno ocjenjivanje u okviru gospodarenja mostovima. Prije svega, analizira se primjena modela u realnim situacijama za ocjenu postojećih betonskih mostova za koje ne postoje podaci o materijalima i svojstvima okoliša.

Ključne riječi:

prodor klorida, gospodarenje mostovima, propadanje, trajnost, preliminarno ocjenjivanje, betonski mostovi

Original scientific paper

Ivan Zambon, Anja Vidović, Alfred Strauss, Jose Matos

Use of chloride ingress model for condition assessment in bridge management

Although there is a large number of established Bridge Management Systems worldwide, there seems to be a lack of those that utilise the knowledge on material properties and environmental loading. Hence, as a supplement to current practice, the paper examines the use of the chloride ingress model, supported by the International Federation for Structural Concrete, for preliminary assessment in bridge management. The focus is set on analysing application of the model in realistic situations on existing concrete bridges for which the information on material and environmental properties is lacking.

Key words:

chloride ingress, bridge management, deterioration, durability, preliminary assessment, concrete bridges

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Ivan Zambon, Anja Vidović, Alfred Strauss, Jose Matos

Anwendung des Penetrationsmodells von Chlorid bei der Beurteilung des Zustands beim Brückenmanagement

Obwohl heute weltweit zahlreiche Brückenmanagementsysteme angewendet werden, scheint es jedoch nicht ausreichend Systeme zu geben, in denen die Kenntnisse über die Materialeigenschaften und die Umweltbelastung angewendet werden. In dieser Abhandlung wird als Beitrag zur aktuellen Praxis die Anwendung des Penetrationsmodells von Chlorid analysiert, was vom Internationalen Verband für Betonkonstruktionen unterstützt wird, und wird als vorläufige Beurteilung im Rahmen des Brückenmanagements angewendet. Zunächst wird die Anwendung des Modells unter realen Bedingungen für die Beurteilung der bestehenden Betonbrücken analysiert, zu denen Daten über die Materialien und die Umwelteigenschaften vorliegen.

Schlüsselwörter:

Penetration von Chlorid, Brückenmanagement, Verfall, Dauerhaftigkeit, vorläufige Beurteilung, Betonbrücken

1. Uvod

U toku uporabe, na planirani uporabni vijek građevina utječu razna opterećenja, starost građevine te propadanje zbog okoliša u kojoj se građevina nalazi. Zato su vlasnici i organizacije zadužene za upravljanje postojećim građevinama suočeni s potrebom donošenja složenih odluka o strategiji održavanja tj. sanacija, ili pak o mogućoj zamjeni građevine [1]. U posljednja dva desetljeća razvijen je velik broj računalnih sustava za gospodarenje mostovima (SGM) kako bi se inženjerima pružila pomoć u analizi velikog broja mostova, te u donošenju odgovarajućih odluka [2]. Pravilno ocjenjivanje stanja konstrukcije jedan je od ključnih segmenata u izradi strategije donošenja odluka. Kako je potpuna analiza konstrukcije skup i dugotrajan postupak, danas se u praksi održavanja mostova najčešće provode vizualni pregledi kao osnova za preliminarno ocjenjivanje stanja građevine.

Postojeće norme i propisi uglavnom su usmjereni na projektiranje novih građevina, a tek se u novije vrijeme odgovarajuća pažnja posvećuje razvoju međunarodnih normi i propisa za ocjenjivanje postojećih građevina. U tom se smislu kao najznačajniji dokument ističe međunarodna norma ISO 13822: "Osnove za projektiranje građevina - Ocjena postojećih građevina" [3], u kojoj se postupak za ocjenu stanja dijeli na sljedeće korake:

- definiranje cilja ocjene,
- definiranje mogućih scenarija,
- preliminarna ocjena,
- detaljna ocjena,
- podnošenje izvještaja o rezultatima i
- ponavljanje koraka, ako je to potrebno.

Dodatno, preliminarna ocjena uključuje:

- analizu projektne dokumentacije i ostalih podataka,
- preliminarni pregled,
- preliminarne kontrole,
- odluku o provođenju trenutačno potrebnih mjera i
- preporuku za detaljno ocjenjivanje.

Odluka o tome trebaju li se odmah poduzimati neke mjere, ili su pak potrebna dodatna istraživanja, treba se bazirati na analizi dokumentacije i ostalih podataka, te na kvalitativnoj ocjeni stanja konstrukcije u skladu s rezultatima preliminarnog pregleda.

Osim provjere sadašnjeg stanja prema Modelu propisa za betonske konstrukcije [4], buduće bi se ponašanje trebalo predviđati i na temelju ocjene stanja. Stoga bi jedna od osnovnih komponenata SGM-a trebala uključivati predviđanje dugoročnog ponašanja na temelju modela za predviđanje stanja konstrukcije.

Međunarodno udruženje za gospodarenje i sigurnost mostova (engl. *International Association for Bridge Management and Safety - IABMAS*) pripremila je 2008. godine upitnik kako bi prikupilo podatke o sustavima gospodarenja mostovima koji se koriste diljem svijeta [5]. Od tada su objavljena tri

izvještaja o sustavima gospodarenja mostovima i to 2010., 2012. i 2014. godine. U posljednjem izvješću iz 2014. godine analizirano je 25 različitih SGM-a. Mirzaei i dr. [6] navode da se tijekom propadanja te preostali uporabni vijek može predvidjeti pomoću devetnaest analiziranih SGM-a. Može se međutim uočiti nedostatak SGM u kojima bi se koristilo znanje o utjecaju okoliša na mostove. Isto tako, iako se u većini tih sustava za predviđanje stanja primjenjuje teorija Markovljevih lanaca, vrlo rijetko se u obzir uzimaju stvarna specifična svojstva materijala pojedinačnih mostova [7].

U posljednjih nekoliko desetljeća brojni istraživači i organizacije ulažu znatne napore kako bi razvili i poboljšali spoznaje o analitičkim modelima baziranim na stvarnim fizikalnim i kemijskim procesima koji uzrokuju propadanje građevina, pri čemu je težište vrlo često na analizi prodora klorida. Potaknuti novim spoznajama u području istraživanja modela za analizu propadanja, te potrebom za uključivanjem utjecaja materijala i okoliša u SGM-a, autori u ovom radu istražuju primjenu modela prodora klorida u fazi preliminarnog ocjenjivanja velikog broja betonskih mostova koji čine znatan dio prometne infrastrukturne mreže.

2. Prodor klorida

Korozija armature nesumnjivo predstavlja jedan od najčešćih faktora koji nepovoljno utječu na uporabni vijek armiranobetonskih konstrukcija [8]. Mikroskopski tanak sloj oksida, koji se formira na površini zbog alkalnosti okolnog betona, održava čelične šipke u pasivnom stanju. Međutim, ako beton izgubi alkalnost zbog prodora klorida ili uslijed karbonatizacije, zaštitni sloj se rastvara i stvara se povoljno stanje za početak korozije [9].

U većini operativnih normi koje se danas koriste, projektiranje povezano s trajnošću bazira se na pristupu zadovoljavanju uvjeta, a ne na drugim aspektima sigurnosti kao što su potpuno probabilistički aspekt projektiranja ili projektiranje na bazi parcijalnih faktora sigurnosti. Na taj način, primjenom niza unaprijed zadanih pravila, sprječava se prekoračenje ciljne pouzdanosti za zadana granična stanja u toku projektiranog uporabnog vijeka, u slučajevima kada je betonska konstrukcija ili neki njen element izložen nepovoljnim djelovanjima. U tom je smislu u normi EN 1992-1-1:2004 [10] definirana minimalna debljina zaštitnog sloja betona kao kombinacija razreda konstrukcije i razreda izloženosti, što uključuje različite uvjete okoliša koji dovode do propadanja građevine. Odgovarajući opisi s nekoliko ilustrativnih primjera daju se u normi EN 206-1 [11]. Uvjeti okoliša koji dovode do prodora klorida podijeljeni su na dva razreda izloženosti: razred XS (4 razine) i razred XD (3 razine). Razred XS odnosi se na koroziju uvjetovanu kloridima iz morske vode, a razred XD odnosi se na koroziju uvjetovanu kloridima iz soli za odmrzavanje kolnika i drugo.

Osim pristupa utemeljenog na zadovoljavanju uvjeta, razvijeni su i mnogi drugi potpuno različiti pristupi za

modeliranje o vremenu ovisnog postupka prodora klorida u beton, koji ovise o trajanju izloženosti Model primijenjen u ovom radu temelji se na *fib*-ovom Modelu propisa iz 2010. godine [4], Biltenu 34 [12], Biltenu 59 [13] i Biltenu 76 [14]. Model se zapravo bazira na Fickovom drugom zakonu difuzije u kojem se navodi da je postupak prodora klorida u beton kontroliran difuzijom. Crankovo rješenje [15] Fickovog drugog zakona prvo su primijenili Collepardi i dr. [16], a iz toga je proizišao model predviđanja utemeljen na funkciji greške. Potpuno probabilistički pristup projektiranju za modeliranje depasivizacije uzrokovane kloridima u betonu bez pukotina temelji se na jednadžbi graničnih stanja, izraz (1), u kojoj se kritična količina klorida C_{crit} uspoređuje sa stvarnim količinama klorida $C(c,t)$ u betonu na dubini armature.

$$g(c,t) = C_{crit} - C(c,t) \quad (1)$$

gdje je:

C_{crit} - kritična količina klorida [% maseni udio klorida na masu cementa];

$C(c,t)$ - stvarna količina klorida na dubini armature [maseni udio klorida na masu cementa].

Količina klorida na odgovarajućoj dubini x iskazana je u izrazima (2) do (4):

$$C(x,t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right] \quad (2)$$

C_0 - početna količina klorida [maseni udio klorida na masu cementa]

$C_{S,\Delta x}$ - količina klorida na dubini Δx [maseni udio klorida na masu cementa]

x - dubina s odgovarajućom količinom klorida ($x = c$ - zaštitni sloj betona) [mm]

Δx - dubina konvekcijske zone [mm]

$D_{app}(t)$ - prividni koeficijent difuzije klorida [m^2/s]

t - vrijeme [s].

Početna količina klorida C_0 predstavlja količinu klorida u betonu na početku korištenja betona ($t = 0$). Kloridi mogu potjecati iz sastavnih dijelova betona ili iz okoline (tijekom postupka građenja). Iako se smatra da je vrijednost početne količine klorida zanemariva kod novih građevina, ta vrijednost može biti prilično velika u starijim građevinama [14].

Količina klorida dostiže svoj maksimum na dubini koja nosi naziv "konvekcijska zona" a ne na površini, i to zbog kombiniranog djelovanja suhih i kišnih razdoblja [17]. Kako bi se mogao primijeniti Fickov drugi zakon difuzije, utjecaji konvekcijske zone zanemaruju se pomoću supstitucijske površine Δx ikoličine klorida na supstitucijskoj površini $C_{S,\Delta x}$. Količina klorida na supstitucijskoj površini $C_{S,\Delta x}$ određen je materijalom, geometrijom i uvjetima okoliša. Ta količina može bitno varirati zbog vremenskih i prostornih varijacija u vlazi

betona, učestalosti nanošenja soli za odmrzavanje kolnika, varijacija u količini klorida u otopini itd.

Koeficijent migracije klorida $D_{RCM,0}$, koji se dobiva brzim pokusom migracije klorida (pokus RCM), u ovom se radu koristi za kvantifikaciju prividnog koeficijenta difuzije klorida $D_{app}(t)$, kao što je prikazano u izrazu (3).

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (3)$$

gdje je:

k_e - varijabla okoliša [-]

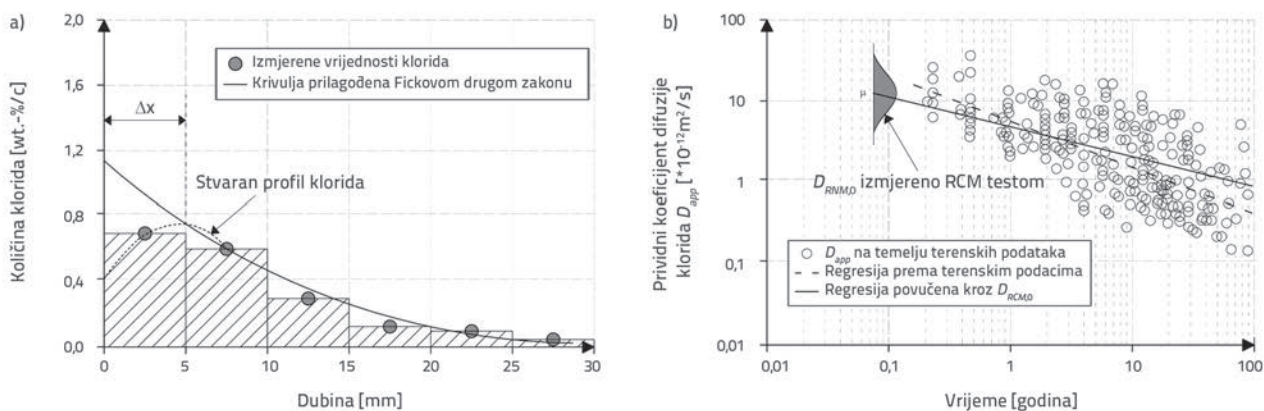
$D_{RCM,0}$ - koeficijent migracije klorida u referentnoj vremenskoj točki [m^2/s]

t_0 - referentna vremenska točka [y]

α - eksponent starenja [-].

Brzi pokus migracije klorida opisan je u metodi BUILD 492 [18] gdje se koeficijent migracije klorida $D_{RCM,0}$ određuje pomoću migracije u nestacionarnom stanju. Referentno vrijeme t_0 , u kojem se pokus RCM najčešće provodi iznosi 28 dana ili, izraženo u godinama, 0,0767 godina. Ovdje se radi o alternativnom pristupu u kojem se koristi koeficijent difuzije klorida u referentnom vremenu $D_{app}(t_0)$. Ovaj koeficijent izveden je iz profila klorida i/ili kratkog laboratorijskog pokusa difuzije. Potrebno je napomenuti da su pokusi RCM zapravo prikladna ispitivanja te, kako se kloridi ne vežu uvijek u mjeri u kojoj se to događa u pokusu difuzije, pokus RCM se uvijek treba baždari primjenom "metode profiliranja klorida" (u prirodnim uvjetima).

Eksponentom starenja α iskazanim u izrazu (3) uvodi se i smanjenje koeficijenta difuzije klorida $D_{app}(t)$ u vremenu. Taj eksponent u matematičkom smislu predstavlja silaznu liniju u dvostrukom logaritamskom dijagramu. Ovaj je parametar ovisan kako o materijalu tako i o uvjetima okoliša. Vjeruje se da vrsta cementa utječe na difuziju klorida i to kroz koeficijent migracije klorida $D_{RCM,0}$ i eksponent starenja α . Ilustrativni primjer određivanja vrijednosti $D_{RCM,0}$ i α prema *fib*-ovom Biltenu 76 [14] prikazan je na slici 1. Na lijevoj strani slike 1. može se vidjeti kako se izvodi vrijednost $D_{app}(t)$ za izmjerena količina klorida $C(x,t)$ pri raznim dubinama na konstrukciji, usklađivanjem krivulje s Fickovim drugim zakonom difuzije, primjenom nelinearne regresije. Opisan je i stvaran profil klorida u konvekcijskoj zoni te dužina zone Δx . Na desnoj strani slike 1. određena je vrijednost $D_{app}(t)$ za konstrukcije pri raznim vrijednostima starosti. Nakon uzimanja u obzir temperature izlaganja pomoću varijable okoline k_e , ta se vrijednost grafički iskazuje u dvostrukoj logaritamskoj skali. Zatim se kroz izmjerene vrijednosti $D_{app}(t)$, bazirane na terenskim podacima, provlači regresijska linija. Osim toga, ta linija se provlači i kroz srednju vrijednost izmjerenih koeficijenata migracije klorida $D_{RCM,0}$. Čitav postupak podrazumijeva primjenu tipova betona koji imaju potpuno jednaka svojstva u oba pokusa, u pokusu RCM i u profilima uzetim iz postojećih građevina.



Slika 1. Ilustrativni primjer određivanja koeficijenta migracije klorida i eksponenta starenja, iskazan na bazi fib-ovog Biltena 76 [14]

Varijabla okoliša k_e može se iskazati na sljedeći način:

$$k_e = \exp \left[b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right] \quad (4)$$

gdje je:

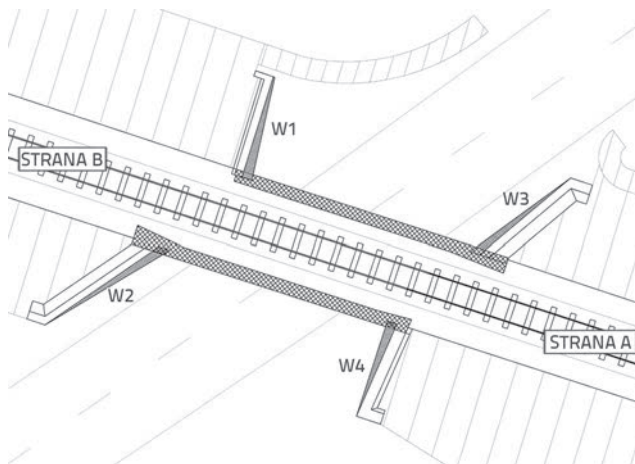
- b_e - koeficijent temperature [K];
- T_{ref} - referentna temperatura [K];
- T_{real} - temperatura konstrukcijskog elementa ili okolnog zraka [K].

Parametar prijenosa k_e uključuje okolnu temperaturu T_{real} referentnu temperaturu $T_{ref} = 293$ [K] (za pokus RCM) i temperaturni koeficijent b_e . Prosječna godišnja okolna temperatura građevine, izmjerena na najbližoj meteorološkoj stanici, treba se koristiti za vrijednost T_{real} . Ovdje treba napomenuti da - iako se koristi u inženjerskoj praksi - model utemeljen na rješenju funkcije pogreške prema Fickovom drugom zakonu o difuziji ipak ima i određene nedostatke. Jedan od najvećih je pretpostavka o konstantnoj površinskoj količini klorida, što nije vjerojatno pri prodoru klorida iz soli za posipanje kolnika i to zbog sezonskog karaktera opterećenja te zbog postojanja razdoblja jačanja opterećenja. Površinski se sloj bitno razlikuje od pretpostavke o homogenom, stabilnom nereaktivnom materijalu pod isključivim utjecajem difuzije. Zapravo, model tek indirektno uzima u obzir mogućnost neke druge pojave, a ne samo difuzije. Što se tiče ostalih nedostataka, model je primjenljiv samo za jednodimenzionalni prodor. Osim toga, model ne uzima u obzir interakciju s drugim mehanizmima propadanja itd. Detaljan pregled grešaka uzrokovanih primjenom pretjerano pojednostavljenih izraza, koje se javljaju u nekim modelima utemeljenima na rješenju funkcije pogreške prema Fickovom drugom zakonu difuzije, daje se u radovima Tanga i Gulikersa [19] te Nissona i Carcassesesa [20].

3. Analiza pokaznog primjera

3.1. Osnovni podaci

Most Weikendorf je jednorasponski željeznički most kojim upravlja austrijsko poduzeće za željeznice ÖBB. Izgrađen je 1967. godine u okrugu Gänsendorf u Saveznoj državi Donja Austrija, a tlocrt njegovih osnovnih elemenata prikazan je na slici 2.



Slika 2. Tlocrt mosta Weikendorf s prikazom osnovnih elemenata

Prema dokumentima o ranijim pregledima mosta Weikendorf, stanje mosta je u 2005. godini prvi put definirano ocjenom 3. Prije 2005. godine, izvještaji o pregledu tog mosta sadržavali su samo opis stanja, bez dodjele ocjene. Prema planu održavanja infrastrukturnih građevina "ÖBB Infrastruktur Regelwerk" [21], ta se ocjena stanja dodjeljuje za loše stanje građevine, ali bez potrebe zadavanja restriktivnih mjera u pogledu korištenja mosta. Osim toga, može se uočiti da je ocjena dana nakon što je na mostu uočeno više zona s velikim pukotinama. Zbog takvog nalaza tijekom vizualnog pregleda, 2013. su godine provedena dodatna ispitivanja, što je uključivalo i mjerenje količine klorida. Ispitivanjem je utvrđena velika količina klorida

i značajna dubina karbonatizacije, uglavnom u zoni upornjaka i njihovih krila. 2014. godine obavljena je odgovarajuća sanacija. Iako rezultati ispitivanja pokazuju da su oštećenjem zahvaćeni samo neki dijelovi mosta (kao što su donji dijelovi upornjaka i krila), sanacijom su ipak obuhvaćeni čitavi upornjaci, krila, ploča i rubne grede. Pogled na most nakon sanacije prikazan je na slici 3.



Slika 3. Pogled na most Weikendorf u 2016.

3.2. Ispitivanje

U okviru ovog ispitivanja, izmjereno je nekoliko svojstava materijala kao što su tlačna čvrstoća betona, dubina karbonatizacije, vrijednost pH, količina klorida i dubina na kojoj se nalazi armatura. Prema izvještaju o provedenim ispitivanjima, uzorci jezgre najprije su bušeni kako bi se odredila i dokumentirala dužina i širina pukotina koje su zamijećene u zoni upornjaka. Visina na kojoj je obavljeno uzorkovanje varirala je od 0,5 do 1,5 m. Osim toga, isti su uzorci korišteni i za određivanje tlačne čvrstoće f_c [N/mm²] prema normi ONR 23303:2010 [22]. Rezultati dobiveni tijekom ispitivanja prikazani su u tablici 1. U toj su tablici uzorci označeni s A i B kako bi se moglo odrediti s kojeg su upornjaka uzeti, a prema tlocrtu prikazanom na slici 2. Debljina zaštitnog sloja betona određena je samo na upornjacima, gdje je iznosila otprilike 30 mm za horizontalnu armaturu promjera 14 mm na razmaku od 15 cm, tj. otprilike 40 mm za vertikalnu armaturu promjera 12 mm na razmaku od 20 cm.

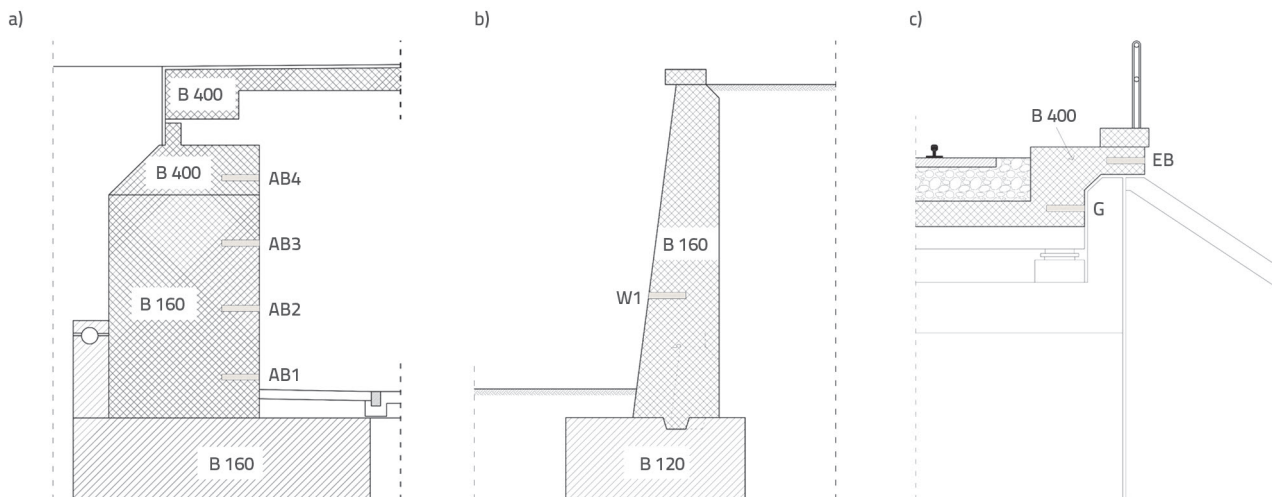
Količina klorida, vrijednost pH i dubina karbonatizacije određeni su prema normi ÖNORM B 4706 [23] na upornjacima (AB), krilima (W), nosaču (G) i rubnoj gredi (EB). Na slici 4. shematski

Tablica 1. Rezultati tlačne čvrstoće f_c [N/mm²] izmjerene na upornjacima

Uzorak	Dužina uzorka [cm]	Maksimalna dubina pukotine [cm]	Maksimalna širina pukotine [mm]	Sila loma [kN]	Gustoća betona [kg/m ³]	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]
A - 1	24	5,0	10	229,3	2320	33,4
A - 2	36	18,0	10	237,4	2332	34,6
A - 3	20	20,0	4	258,6	2347	37,7
B - 1	39	18,0	11	325,3	2375	47,4
B - 2	31	3,0	5	300,0	2332	43,7
B - 3	24	4,5	5	271,8	2339	39,6

Tablica 2. Prikaz izmjerenih vrijednosti količine klorida, dubine karbonatizacije i vrijednosti pH na upornjacima (AB), krilima (W), nosaču (G) i rubnoj gredi (EB)

Mjesto (točka) mjerenja	Razred izloženosti	Visina [m]	Količina klorida [wt,-%/c]			Vrijednost pH [-]			Dubina karbonatizacije [mm]
			0-15 [mm]	15-30 [mm]	30-45 [mm]	0-15 [mm]	15-30 [mm]	30-45 [mm]	
AB 1	XD3	0,20	2,20	2,20	1,20	9,33	10,73	12,17	38
AB 2	XD1	1,30	0,87	1,10	0,24	9,23	9,35	12,05	49
AB 3	XD1	2,35	0,22	0,28	0,20	9,26	11,99	12,60	52
AB 4	XD1	3,40	0,21	0,00	0,00	10,07	12,14	12,54	20
AB 8	XD3	0,20	3,90	2,30	2,50	9,23	9,23	9,23	18
AB 7	XD1	1,30	1,10	1,20	0,87	9,05	11,33	12,20	25
AB 6	XD1	2,35	0,37	0,41	0,18	9,65	9,65	9,65	46
AB 5	XD1	3,40	0,24	0,00	0,00	11,63	11,63	11,63	37
W 1	XD1	1,50	0,21	0,19	0,15	10,10	11,99	12,29	15
W 2	XD1	1,50	0,27	0,26	0,31	11,24	11,78	12,26	23
W 3	XD1	1,50	0,48	1,10	0,59	10,25	12,23	12,39	16
W 4	XD1	1,50	0,00	0,11	0,48	10,01	10,62	12,19	46
G	XD1	> 4,00	<0,1	<0,1	<0,1	12,37	12,51	12,53	1
EB	XD1	> 4,00	<0,1	<0,1	<0,1	12,44	12,45	12,57	1



Slika 4. Točke mjerenja količine klorida, vrijednosti pH i dubine karbonatizacije na a) upornjacima, b) krilima, c) nosaču i rubnoj gredi

su prikazana mjesta mjerenja u upornjacima, krilima, nosaču i rubnoj gredi. Na istoj su slici iskazani i razredi betona projektirani prema normi ÖNORM B 3302 [24].

Rezultati određivanja količine klorida, pH-vrijednosti i dubine karbonatizacije prikazani su u tablici 2. Količina klorida i vrijednosti pH određeni su ispitivanjem tri betonska uzorka na svakoj lokaciji (u svakoj točki). Ti uzorci dužine 15 mm vađeni su na tri dubine: 0-15 mm, 15-30 mm i 30-45 mm. Točke AB 1-4 nalaze se na upornjaku B a točke AB 5-8 na upornjaku A, kao što se to vidi na tlocrtu prikazanom na slici 2.

3.3. Određivanje parametara

Kada klasifikaciju izloženosti okolišu prikazanu u najnovijem izdanju norme EN 206-1 [11] koristimo u europskim državama bez izlaza na more, kao što je Austrija, značajnima se smatraju samo razreda izloženosti XD. Parametri ovise o rezredima izloženosti su supstitucijska površina Δx , količina klorida na supstitucijskoj površini $C_{s,\Delta x}$ te eksponent starenja α . Supstitucijska se površina ne razmatra u rezredima izloženosti XD1 i XD2, a u razredu XD3 može se opisati beta-raspodjelom sa $\mu = 9$ mm, $\sigma = 5$, $a = 0$, i $b = 50$ [12]. Srednje vrijednosti količine klorida na površini $C_{s,\Delta x}$ određene su kao prosječne vrijednosti na temelju količine klorida $C(x,46)$ izmjenjenog na dubinama od 0 do 15 mm, kao što je prikazano u tablici 2. Točke A1 i A8 uzimaju se u obzir za razred izloženosti XD3, a za razred izloženosti XD1 koriste se točke A2 i A7. Srednje vrijednosti μ količine klorida na površini $C_{s,\Delta x}$ prikazane su u tablici 3. Prema projektu DARTS [25], količina klorida na površinama koje su izložene utjecaju soli (osim soli iz mora) opisuje se lognormalnom raspodjelom te s koeficijentom varijacije $CoV = 0,75$.

Eksponent starenja α također se smatra jednim od parametara koji su ovisni o razredu izloženosti. Osim toga, vjeruje se da taj parametar ovisi i o vrsti cementa. Nažalost, rijetko se kada u dokumentaciji o građenju nalaze podaci o vrsti cementa. Zbog toga je u analizi graničnog stanja depasivizacije označena vrsta

cementa kao nepoznato svojstvo. Međutim, iako vrste cementa na mostu Weikendorf nisu poznate, ipak se mogu isključiti one vrste koje se u vrijeme izgradnje tog mosta nisu koristile na području Austrije.

Tablica 3. Količina klorida na površini $C_{s,\Delta x}$ koji je korišten u analizi; temelji se na količini klorida izmjenjenom na mostu Weikendorf Bridge te na preporukama s projekta DARTS [25]

Razred izloženosti	$C_{s,\Delta x}$ [wt,-/c]	
XD1	$\mu = 0,99$	$\sigma = 0,74$
XD3	$\mu = 3,05$	$\sigma = 2,29$

Vrste cementa koje se obično koriste u Austriji prikazane se u tablici 4. uzimajući u obzir primjenjene aditive. Pritom su primijenjene oznake prema sadašnjoj normi ÖNORM EN 197-1 [26] te odgovarajuće oznake iz prethodne norme ÖNORM B 3310 [27]. U istoj su tablici prikazane i indikativne vrijednosti koeficijenta migracije klorida $D_{RCM,0}$ i eksponenta starenja α , a prema *fib*-ovom Biltenu 76 [14]. Te su vrijednosti prikupljene na temelju opsežnih istraživanja koja su prikazana u radovima: Gehlen [28], DARTS [25], Bamforth [29], Lay [30] itd. Čini se da su vrijednosti $D_{RCM,0}$ za većinu mladih betona jednake ili manje od vrijednosti koeficijenta prividne difuzije izmjerenih u referentnoj vremenskoj točki $D_{app}(t_0)$ koje su prikazane u literaturi, [31, 32]. S druge strane, čini se da su tijekom pokusa RCM dobivene više vrijednosti $D_{app}(t)$ za vremenska razdoblja veća od 10 godina, što rezultira konzervativnom procjenom uporabnog vijeka građevine. Koeficijent migracije klorida $D_{RCM,0}$ može se opisati pomoću normalne raspodjele, a srednja mu je vrijednost μ iskazana u tablici 4. Standardno odstupanje σ iznosi $0,2 \cdot \mu$. Eksponent starenja α se u razredu izloženosti XD1 smatra neovisnim o vrsti cementa te se opisuje beta raspodjelom sa srednjom vrijednošću $\mu = 0,65$, standardnim odstupanjem $\sigma = 0,12$, donjom granicom $a = 0,0$ te gornjom granicom $b = 1,0$ [22]. S druge strane, srednja

Tablica 4. Vrste cementa koje se koriste u Austriji (sa sadašnjim i prijašnjim oznakama) s pripadajućim indikativnim koeficijentom migracije klorida $D_{RCM,0}$ te s eksponentom starenja α , prema Biltenu 76 [14], normi ÖNORM B 3310 [27] i normi ÖNORM EN 197-1 [26]

1963. - 1980.	1980. - 1994.	1994.	1993.	$D_{RCM,0} (\mu) [^*10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$						$\alpha (\mu / \sigma) [-]$
				0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	
-	PZ	PZ	CEM I	-	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0	0,30 / 0,12
PZ (H)	PZ (H)	PZ (H)	CEM II/A-S	-	7,0	8,0	-	-	-	0,35 / 0,16
EPZ	EPZ	EPZ	CEM II/B-S	-	5,0	7,7	8,3	-	-	-
-	-	-	CEM II/A-D	-	4,0	4,5	4,8	5,0	-	0,40 / 0,16
-	-	-	CEM II/A-P	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEMII/B-P	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEMII/A-Q	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEMII/B-Q	-	-	-	-	-	-	-
PZ (F)	PZ (F)	PZ (F)	CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9	-	0,60 / 0,15
		FAZ	CEMII/B-V	-	-	-	-	-	-	0,60 / 0,15
PZ (F)	PZ (F)	PZ (F)	CEMII/A-W	-	-	-	-	-	-	-
-	-	FAZ	CEMII/B-W	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEMII/A-T	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEMII/B-T	-	6,3	7,7	9,7	-	-	-
PZ (T)	PZ (K)	PZ (K)	CEM II/A-L	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM II/B-L	-	-	-	-	-	-	-
PZ (T)	PZ (K)	PZ (K)	CEM II/A-LL	-	9,4	12,8	15,1	-	-	0,30 / 0,12
-	-	-	CEM II/B-LL	-	-	-	-	-	-	-
PZ (C)	PZ (C)	PZ (C)	CEM II/A-M	-	-	-	-	-	-	-
-	-	CMZ	CEM II/B-M	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM III/A	-	3,9	3,9	4,2	-	-	0,40 / 0,18
HOZ	HOZ	HOZ	CEM III/B	-	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4	0,45 / 0,20
-	-	-	CEM III/C	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM IV/A	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM IV/B	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM V/A	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM V/B	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	CEM I	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9	-	0,60 / 0,15
-	-	PZ HS	CEM I	4,4	4,8	-	-	5,3	-	0,40 / 0,16

vrijednost i standardno odstupanje eksponenta starenja smatra se ovisnim o cementu u razredima izloženosti XD2 i XD3, kao što je to prikazano u tablici 4.

Osjenčani cementi iz tablice 4. mogli su se upotrebljavati u gradnji mosta Weikendorf, pa su stoga i korišteni u analizi. Za ostale neosjenčane vrste cementa koji su bili u upotrebi za vrijeme građenja mosta, analiza se nije mogla provesti zbog nedostatka podataka o koeficijentu migracije, tj. o eksponentu starenja.

Kako koeficijent migracije klorida $D_{RCM,0}$ nije ispitan za neke vodocementne omjere prikazane u tablici 4. (npr. za $v/c = 0,6, 0,7$ i $0,8$), nedostajuće vrijednosti dobivene su aproksimacijom primjenom postupka linearnog izjednačavanja. Slične aproksimacije utjecaja vodocementnog omjera na koeficijent difuzije koriste se i u radu Vu i Stewart [33].

Vodocementni se omjer, isto kao i vrsta cementa, vrlo rijetko navodi u dokumentima za projektiranje postojećih mostova. U slučajevima kada se ne spominju u navedenim dokumentima, svojstva betona kao što su vrsta cementa i vodocementni omjer mogu se odrediti pomoću opsežnih petrografskih analiza. Međutim, u sadašnjoj praksi upravljanja mostovima ta se svojstva, nažalost, vrlo rijetko mjere za očvrslu beton [34]. Ipak, raspon vodocementnih omjera koji se koristi za određeni most može se definirati na temelju informacija o razredu betona i čvrstoći očvrslu betona. Veza između razreda betona i razreda čvrstoće cementa korištenih u vrijeme građenja prikazana je u tablici 5. Ta je veza primijenjena u određivanju približnog raspona vodocementnog omjera i s njim povezanog parametra $D_{RCM,0}$.

Tablica 5. Veza između zadanih vodocementnih omjera i razreda betona, tj. razreda čvrstoće cementa, VÖZ [35]; s prikazom ukupnih i prosječnih vrijednosti

Razred betona	Vodocementni omjer za određeni razred čvrstoće cementa						Ukupno (prosječna vrijednost)
	Z 275		Z 375		Z 475		
B 160	0,74	0,92	0,87	1,03	-	-	0,74 - 1,03 (0,89)
B 225	0,61	0,75	0,71	0,83	0,77	0,88	0,61 - 0,88 (0,75)
B 300	0,51	0,64	0,61	0,71	0,66	0,74	0,51 - 0,74 (0,63)
B 400	0,32	0,54	0,51	0,61	0,57	0,64	0,32 - 0,64 (0,48)
B 500	-	-	0,39	0,52	0,48	0,56	0,39 - 0,56 (0,48)
B 600	-	-	0,32	0,43	0,37	0,48	0,32 - 0,48 (0,40)

Razredi betona osjenčani u tablici 5. predstavljaju razrede zadane u dokumentima o projektiranju za upornjake i krila. Osim toga, kako su vodocementni omjeri razreda betona u tablici 5. iskazani u rasponima, smatra se da je vodocementni omjer nepoznati parametar.

Kako se vrijednost početne količine klorida C_0 teško može kvantificirati bez kemijske analize, usvojena je konstantna vrijednost tog parametra: $C_0 = 0,1$ % masenog udjela klorida na masu cementa. Ta je vrijednost prihvaćena zato što je građevina izvedena 1960. godine i nije se mogla isključiti mogućnost zagađenja kloridom, bilo iz sastavnih materijala betona, ili na neki drugi način tijekom izvođenja radova.

Kritična količina klorida C_{crit} je parametar koji se teško može kvantificirati za neki most jer ovisi o mnogim faktorima kao što su kontakt između betona i čelika, kemijski sastav armature, vrijednost pH porne vode u betonu itd. Prema normi ÖNORM B 4706 [23] i dokumentima ÖVBB-Richtlinie [36] i ÖBV-Richtlinie [37], nikakvi pregledi, praćenje niti sanacije nisu potrebni ako je količina klorida niža od 0,6 % te ako nema znakova korozije. Osim toga, vrijednost C_{crit} opisana je u fib-ovom Biltenu 34 [12] te u fib-ovom Biltenu 76 [14] pomoću beta raspodjele sa

srednjom vrijednošću $\mu = 0,6$ % masenog udjela klorida na masu cementa i sa standardnim odstupanjem $\sigma = 0,15$, gdje donja granica iznosi $a = 0,2$ a gornja je $b = 2,0$. Treba međutim napomenuti da u nekim slučajevima korozija nije zabilježena čak ni kod vrijednosti od 2 do 3 % masenog udjela klorida na masu cementa [38].

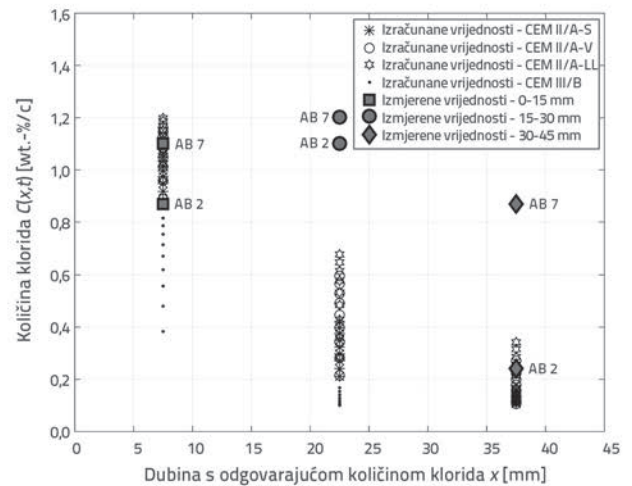
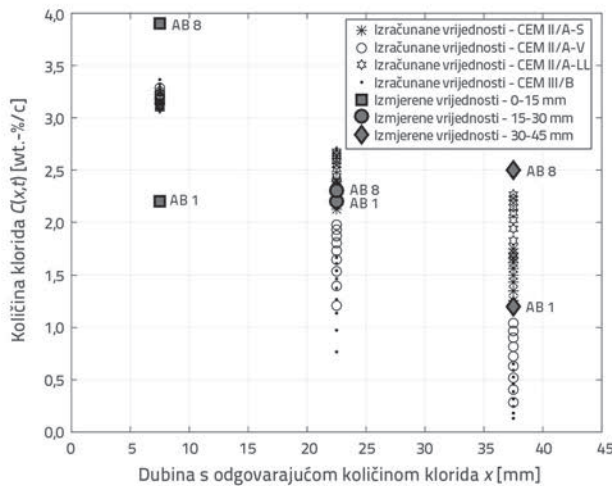
Kao što je navedeno u prethodnoj točki, u izvještaju o ispitivanju mosta se zaštitni sloj betona spominje samo kao približna vrijednost izmjerena na upornjacima. Osim toga, na nacrtima mosta nema niti na jednom elementu naznake debljine zaštitnog sloja. Dakle, imajući na umu da se u izvješću o ispitivanju zaštitni sloj spominje samo kao približna vrijednosti na upornjacima, usvojeno je da je srednja vrijednost zaštitnog sloja betona μ nepoznat parametar, s koeficijentom varijacije od $CoV = 0,20$.

Na bazi srednje godišnje temperature izmjerene u razdoblju od 1960. do 1990. u Saveznoj državi Donjoj Austriji [39], za temperaturu okoline T_{real} usvojena je srednja vrijednost od $\mu = 281,6$ K te standardno odstupanje od $\sigma = 1,2$ K.

Svi parametri koji se odnose na materijale i okolinu, a služe za definiranje funkcije graničnog stanja $g(c,t)$ prikazane u izrazu (1), iskazani su u tablici 6.

Tablica 6. Parametri koji se koriste u analizi funkcije graničnog stanja $g(c,t)$, podijeljeni na poznate i nepoznate parametre

Poznati parametri		Raspodjela	XD1	XD3	XD1	XD3	a	b
Parametar	j.m.		Srednja vrijednost μ		Standardno odstupanje σ			
t_0	godina	Konstanta	0,0767		-		-	-
T_{ref}	K	Konstanta	293		-		-	-
T_{real}	K	Normalna	281,6		1,2		-	-
b_e	K	Normalna	4800		700		-	-
C_0	wt,-%/c	Konstanta	0,10		-		-	-
C_{crit}	wt,-%/c	Beta	0,60		0,15		0,2	2,0
$C_{s,ax}$	wt,-%/c	Lognormalna	0,99	3,05	$\mu * 0,75$		-	-
Δx	mm	Beta	0	9	0	5	0	50
Nepoznati parametri		Raspodjela	XD1	XD3	XD1	XD3	a	b
Parametar	j.m.		Srednja vrijednost μ		Standardno odstupanje σ			
A	-	Beta	0,65	Tablica 3	0,12	Tablica 3	0	1
C	mm	Normalna	20 - 50		$\mu * 0,20$		-	-
D_{RCMO}	m ² /s	Normalna	Tablica 3		$\mu * 0,20$		-	-



Slika 5. Usporedba izmjerenih i izračunanih profila klorida na upornjacima, na visini: a) 0,20 m; b) 1,30 m

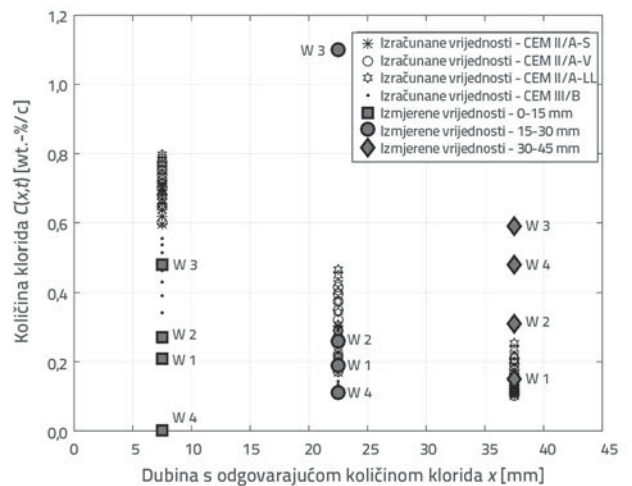
3.4. Usporedba izmjerenih i izračunanih profila klorida

Statistička razrada izmjerenih vrijednosti može se provesti za savršen slučaj, tj. za slučaj kada je dostupan velik broj izmjerenih podataka o količini klorida $C(x,t)$. Takva razrada omogućuje određivanje svojstava raspodjele za svaki ispitani element, isto kao i za područje izloženosti pojedinačnih mostova. U takvim se slučajevima dobiveni rezultati mogu koristiti za ažuriranje prethodno izračunane količine klorida, npr. pomoću Bayes-ovog postupka ažuriranja. Međutim, u slučaju mosta Weikendorf, dostupna su samo dva mjerenja na istim visinama i na istoj udaljenosti od ceste, pa zbog toga nije bila moguća statistička analiza izmjerenih vrijednosti. Zato su izmjerene količine klorida $C(x,t)$ iskazane u tablici 2. primijenjene samo za aproksimaciju nekih parametara modela prodora klorida koji su prikazani u jednadžbi (2), kao što je $C_{5,\Delta x}$.

Usporedba izmjerenih i deterministički izračunanih profila klorida provedena je kako bi se omogućilo bolje razumijevanje rezultata dobivenih ispitivanjem, te kako bi se ocijenili svi parametri odabrani za analizu (prikazani u tablici 6.). Za te potrebe analizirana su tri betonska uzorka dužine 15 mm na tri različite dubine: 0-15 mm, 15-30 mm te 30-45 mm. Zatim su te vrijednosti uspoređene s izračunanim vrijednostima za prosječne dubine uzoraka, tj. za 7,5 mm, 22,5 mm i 37,5 mm. Rezultati izmjerene i izračunate količine klorida na upornjacima, na visinama od 0,2 m i 1,30 m, prikazani su na slici 5.

Analiza izračunanih vrijednosti provedena je za razne vrste cementa koje su se upotrebljavale u Austriji u vrijeme gradnje mosta, a također i za razne vodocementne omjere. Ulazni parametri potrebni za proračun prikazani su u tablici 6., s tim da visina od 0,20 m ulazi u razred izloženosti XD3, a visina od 1,30 m u razred izloženosti XD1. U usporedbi s tablicom 6., jedina razlika odnosi se na veći težinski udio klorida na supstitucijskoj površini $C_{5,\Delta x}$, tj. $C_{5,\Delta x} = 1,5\%/c$ na visini od 1,30 m. Ta je vrijednost maksimum koji se predlaže u fib-ovom Biltenu 34 [12] i fib-

ovom Biltenu 76 [14] za razred izloženosti XD1, a usvojena je jer su točke na 1,30 m još uvijek relativno blizu razreda XD3, u kojoj se bilježe mnogo veće vrijednosti $C_{5,\Delta x}$. Isto tako, na slici 6. prikazana je usporedba za krila mosta, gdje je samo jedno mjerenje provedeno za svako krilo, na visini od 1,5 m. Vrijednost $C_{5,\Delta x}$ jednaka vrijednosti iz tablice 6., usvojena je u proračunima za krila.



Slika 6. Usporedba izmjerenih i izračunanih profila klorida na krilima, na visini od 1,5 m

3.5. Analiza graničnog stanja depasivacije

Pretpostavlja se da se granično stanje uporabivosti za depasivaciju kloridom postiže kada količina klorida u betonu $C(c,t)$ na dubini armature postane veća od kritične količine klorida C_{crit} . Obje veličine su po svojoj prirodi neegzaktne, tj. one se uvode kao slučajne varijable i sučeljavaju se u funkciji graničnog stanja $g(c,t)$, kao što je to prikazano u izrazu (1). Vjerojatnost da će funkcija graničnog stanja $g(c,t)$ biti manja od nule iskazuje se kao vjerojatnost otkazivanja $p_f(t)$, vidi jednadžbu (5).

$$p_A(t) = p_{dep} = p\{g < 0\} = p\{c - xc(t)\} \quad (5)$$

Indeks pouzdanosti (sigurnosti) β pokazuje kako se često standardno odstupanje s_g funkcije graničnog stanja $g(c, t)$ može postaviti između nule i srednje vrijednosti m_g .

$$\beta(t) \approx \frac{m_g(t)}{s_g(t)} \quad (6)$$

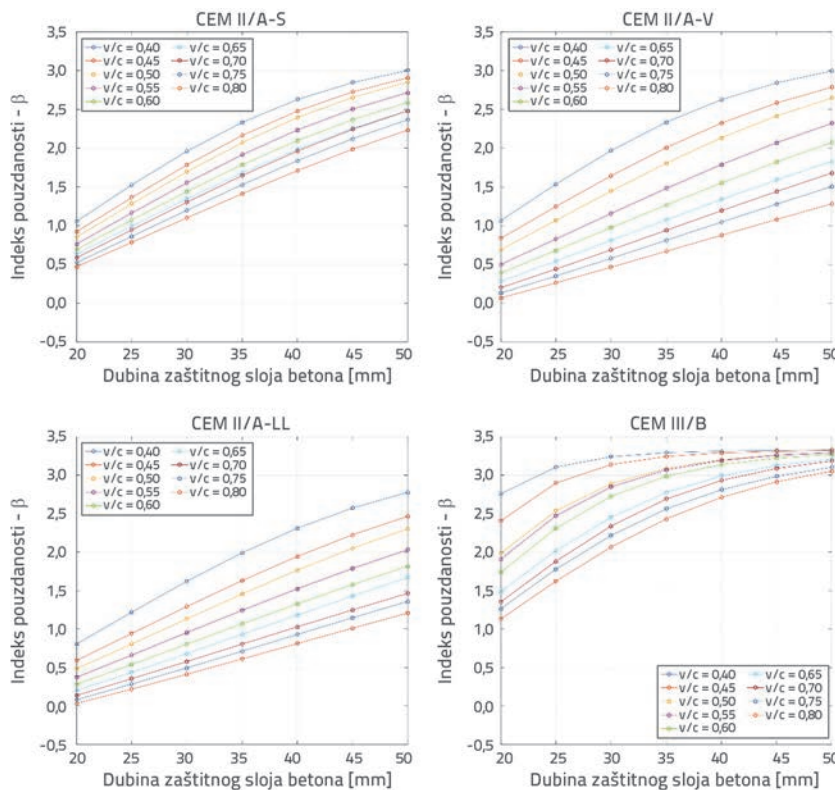
Trenutak u kojem vjerojatnost otkazivanja $p_A(t)$ (ili indeks pouzdanosti $\beta(t)$) postaje veći od ciljnih vrijednosti smatra se završetkom uporabnog vijeka, a vrijeme od građenja do tog trenutka smatra se vremenskim intervalom uporabnog vijeka t_{SL} .

Probabilističko program FReET (engl. *Feasible Reliability Engineering Tool*) korišteno je za izračunavanje vjerojatnosti postizanja graničnog stanja i indeksa pouzdanosti β , [40]. Vrijednosti indeksa pouzdanosti β , izračunane za razrede izloženosti XD1 i XD3 kojima pripadaju elementi mosta Weikendorf, prikazane su na slikama 7. i 8. Na tim je slikama prikazan razvoj indeksa pouzdanosti s variranjem parametara za koje se smatra da su nepoznati (vodocementni omjer, zaštitni sloj betona i vrsta cementa) za uporabni vijek od $t_{SL} = 100$ godina.

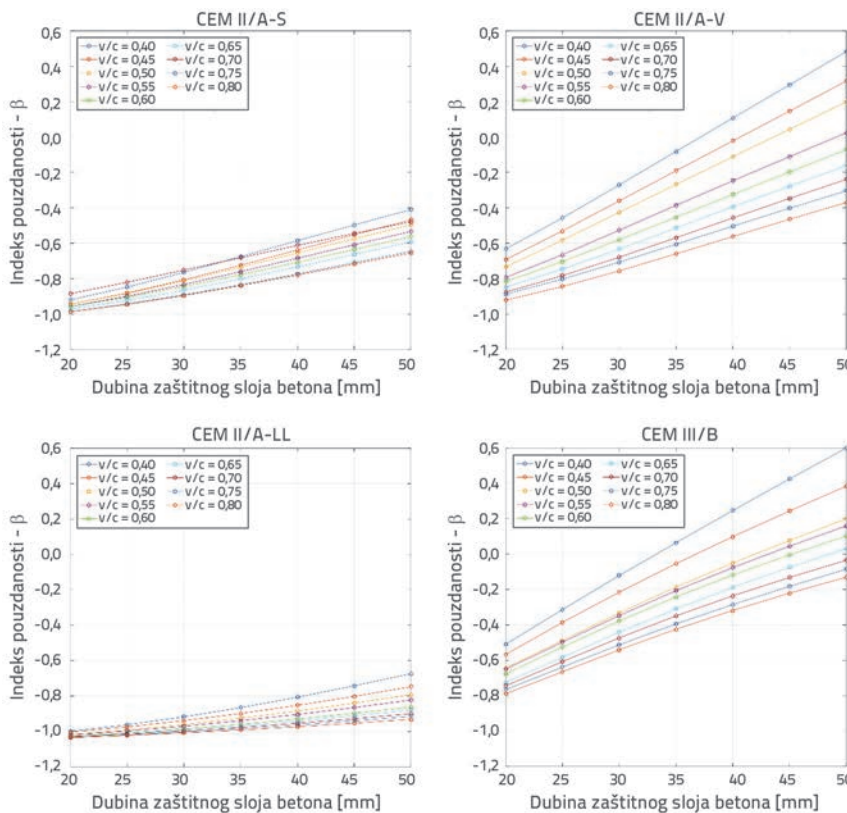
Kako bi se prikazala promjena u vjerojatnosti otkazivanja konstrukcije u vremenu $p_A(t)$, na slici 9. prikazan je spektar pouzdanosti za najpovoljniju i najnepovoljniju vrstu cementa (CEM III/B tj. CEM II/A-LL) koja se koristila u Austriji u vrijeme građenja mosta Weikendorf. Vjerojatnosti su izračunane za vodocementne omjere 0,4, 0,5 i 0,6, za razrede izloženosti XD1 i XD3, te za zaštitni sloj betona debljine 35 mm.

3.6. Ciljne pouzdanosti za granično stanje depasivacije

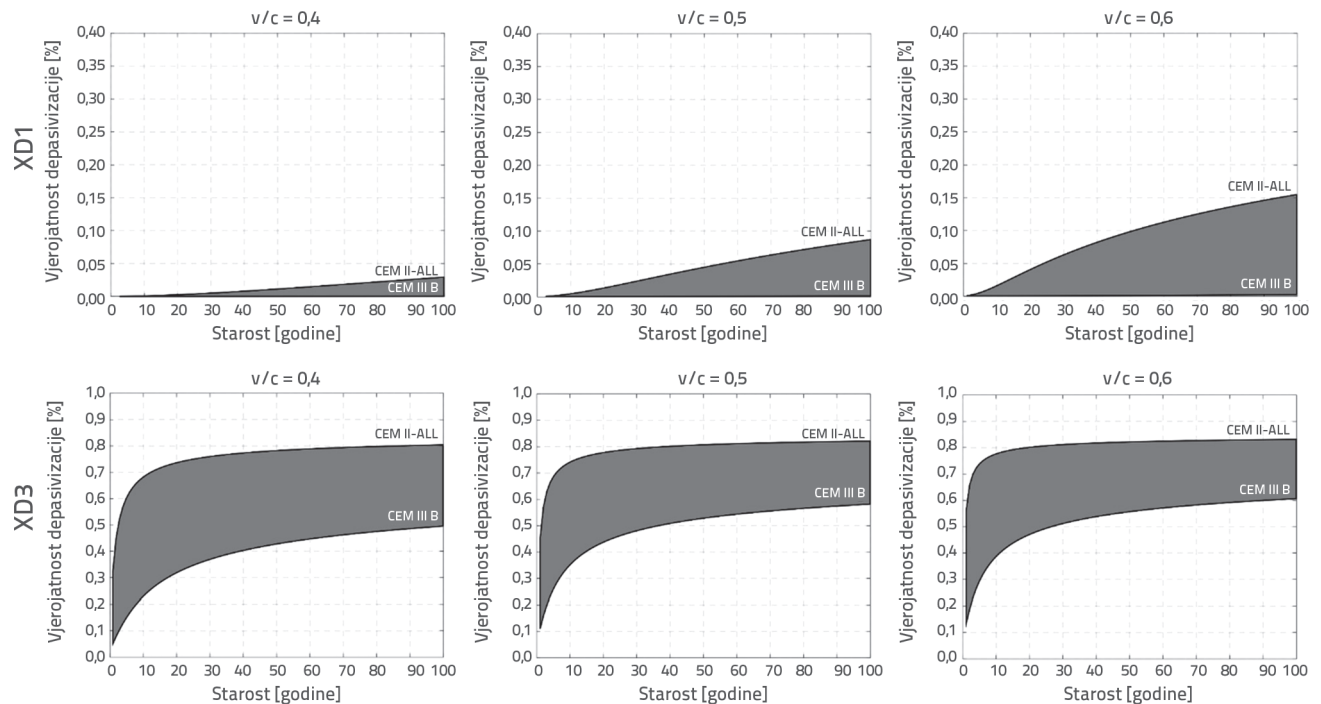
Kako bi se omogućilo korištenje modela i određivanje uporabnog vijeka građevine, te stoga i planiranje optimalne strategije održavanja, treba se obaviti odgovarajuća provjera i to uspoređivanjem dobivene pouzdanosti s ciljnom pouzdanošću.



Slika 7. Indeksi pouzdanosti β za vrijeme od $t_{SL} = 100$ godina, prikazani u kombinaciji s raznim vodocementnim faktorima i dubinama armature, za razred izloženosti XD1



Slika 8. Indeksi pouzdanosti β za vrijeme od $t_{SL} = 100$ godina, prikazani u kombinaciji s raznim vodocementnim faktorima i dubinama armature, za razred izloženosti XD3



Slika 9. Spektar vjerojatnosti otkazivanja $p_f(t)$ za pogodni (CEM III/B) i nepogodni tip cementa (CEM II/A-LL) za razrede izloženosti XD1 i XD3 te za vodocementne omjere od 0,4, 0,5, i 0,6

Prema *fib*-ovom Biltenu 34 [12], razlikujemo nekoliko razreda pouzdanosti (RC1, RC2 i RC3) u vezi s posljedicama otkazivanja konstrukcije. Ista projektirana ciljna pouzdanost tj. $\beta = 1,3$ ($p_f \approx 0,09$) predlaže se za granično stanje depasivacije uzrokovano solju za odmrzavanje kolnika za sve razrede pouzdanosti i za referentno razdoblje od 50 godina.

Za predviđanje uporabnog vijeka konstrukcije, Andrade [38] predlaže sljedeće vjerojatnosti ciljne depasivacije u odnosu na posljedice korozije: nisku, srednju i značajnu. Vrijednost od 50% odnosi se na niske i srednje posljedice, a vrijednost od 25% na značajne posljedice. Von Greve-Dierfeld i Gehlen [41] dijele ciljne pouzdanosti prema razredima izloženosti, pa tako ističu situacije u kojima se očekuje značajna pojava korozije nakon depasivacije zbog prisutnosti vode i kisika.

3.7. Analiza osjetljivosti

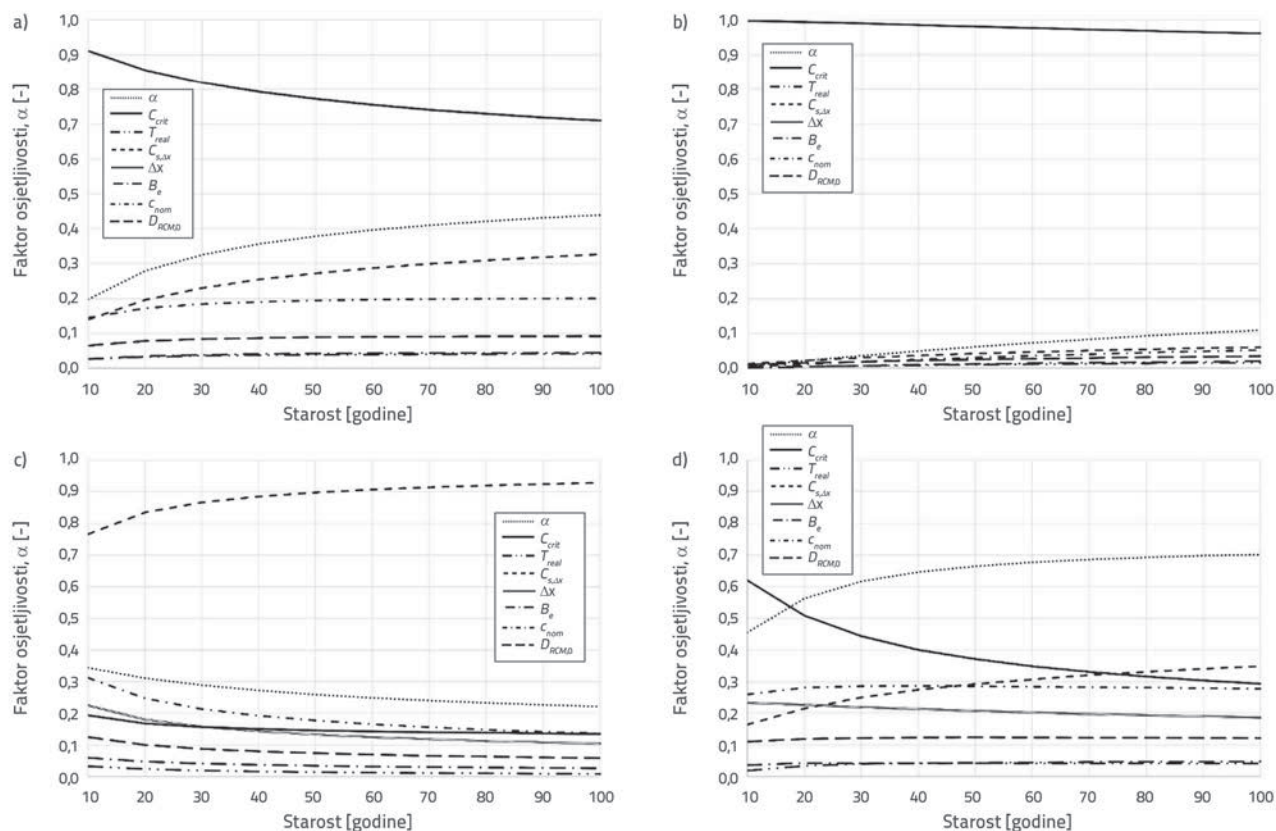
Kako se velik broj parametara modela ne može precizno ispitati ili izmjeriti, trebaju se odrediti barem oni najznačajniji kako bi se model mogao koristiti u stvarnim situacijama. U analiziranom slučaju mosta Weikendorf ispitano je značenje određenog parametra za definiranje graničnog stanja depasivacije uzrokovane prodorom klorida. Korišten je računalni program FReeT za provedbu pristupa baziranog na primjeni neparametarske statističke korelacije rangiranja osnovnih slučajnih varijabli i varijable odziva konstrukcije. Kako su modeli odziva konstrukcije uglavnom nelinearni, primjenjuje se neparametarska korelacija ranga i u tu se svrhu koristi Spearmanov ili Kendallov koeficijent korelacije ranga [42].

Faktor osjetljivosti α_f analiziran je u raznim kombinacijama razreda izloženosti (XD1 i XD3) i tipova cementa (CEM II/A-LL i CEM III/B), pri čemu je usvojeno da vodocementni omjer iznosi $v/c = 0,5$. Rezultati te analize prikazani su na slici 10. Treba napomenuti da su na slici 10. svi faktori osjetljivosti prikazani kao apsolutne vrijednosti kako bi se omogućila njihova usporedba. U stvarnosti su faktori osjetljivosti parametara $C_{s,0,x}$, $D_{RCM,0}$, Δx i T_{real} negativni, što znači da se pri njihovom povećanju smanjuje funkcija graničnog stanja $g(c,t)$.

4. Analiza rezultata

Na slikama 5. i 6. može se uočiti veliki raskorak između količine klorida izmjerenog na istim visinama i dubinama te između izmjerenih i izračunanih vrijednosti. Osim toga, smanjenje izmjerene količine klorida s povećanjem dubine je nepravilno, kao što se lako može uočiti na slici 6. Razlika između vrijednosti izmjerenih na istim lokacijama na različitim upornjacima i krilima može se objasniti mogućim utjecajem pukotina i specifičnim utjecajima mikrookoliša na pojedinim lokacijama. Uz to, razlog za raskorak između izmjerenih i izračunanih vrijednosti mogao bi se tražiti i u prije opisanim nedostacima modela. Međutim, informacije o izmjerenim rezultatima suviše su šture te se na osnovu njih ne može odrediti u kojoj bi mjeri neki od spomenutih nedostataka mogao utjecati na razliku između izmjerenih i izračunanih vrijednosti.

Količina klorida na supstitucijskoj površini $C_{s,0,x}$ za razred izloženosti XD1, kojom se koristi u analizi graničnog stanja depasivacije, temelji se samo na točkama A2 i A7, a one imaju



Slika 10. Faktor osjetljivosti α , za parametre modela prodora klorida ovisno o starosti mosta Weikendorf t , za razne kombinacije parametara: a) XD1 & CEM II/A-LL, b) XD1 & CEM III/B, c) XD3 i CEM II/A-LL i d) XD3 & CEM III/B

najvišu količinu klorida u usporedbi sa svim drugim točkama za razred izloženosti XD1. Međutim, niže su vrijednosti zabilježene na ostalim točkama definiranim na raznim visinama na upornjacima, isto kao i na točkama mjerenja na krilima, pa bi se zapravo na tim lokacijama trebala usvojiti niža vrijednost $C_{s,\Delta x}$. Iako je usvojena najviša količina klorida, prodoru klorida za razred XD1 pripisuje se niska vjerojatnost depasivacije. Prema projektnoj dokumentaciji, za upornjake i krila korišten je beton razreda B160. To bi značilo da vodocementni omjer varira od 0,71 do 1,03. Međutim, analizom baze podataka ÖBB utvrđeno je da se na upornjacima i krilima mostova obično koristi beton razreda B300, te da je razred B225 najniži koji se koristi na tim dijelovima mosta. Stoga je pretpostavljeno da je najvjerojatnije korišten razred betona koji je viši od onog navedenog u projektnoj dokumentaciji. Zbog toga je u analizi graničnog stanja depasivacije najviši vodocementni omjer iznosio 0,80. Ako pretpostavimo da indeks pouzdanosti $\beta = 0$ odgovara ciljnoj pouzdanosti, tada možemo prema slici 7. zaključiti da se ta ciljna pouzdanost nikada neće prekoračiti za razred izloženosti XD1 u periodu od 100 godina. S druge strane, ako analiziramo razred izloženosti XD3 opisan na slici 8., možemo vidjeti da se kombinacije parametara s indeksom pouzdanosti većim od 0 javljaju u vrlo malom broju slučajeva. Navedena razlika u pouzdanosti upućuje na jak utjecaj parametara $C_{s,\Delta x}$ α i Δx , koji se bitno razlikuju za te razrede. Osim toga, niski

indeks pouzdanost može se djelomično objasniti činjenicom da pristup baziran na koeficijentima migracije klorida D_{RCMO} rezultira višim koeficijentima difuzije $D_{app}(t)$ ako se uspoređi s pristupom baziranim na ispitivanjima difuzije obavljenima na stvarnim građevinama. Iako se istraživači dosta često bave temom preciznog određivanja projektiranog uporabnog vijeka mostova, iz slike 9. možemo vidjeti da do malog povećanja vjerojatnosti depasivacije $p_f(t)$ dolazi nakon pedesete godine. Kada razmatramo razne vodocementne omjere, možemo uočiti da se vjerojatnost depasivacije $p_f(t)$ povećava za razred XD1 i XD3 za najviše 0,07 u razdoblju od pedesete do stote godine. Cilj je analize osjetljivost bio odrediti ključne parametare modela u odnosu na punu probabilističku analizu. Na slici 10. vidimo da se C_{crit} iskazuje kao parametar koji najviše utječe na funkciju graničnog stanja $g(c,t)$, naročito u slučajevima kada je vjerojatnost depasivacije niska. Međutim, za razred XD3, gdje postoji veća vjerojatnost da će doći do depasivacije, parametri kao što su $C_{s,\Delta x}$ i α znatno utječu na funkciju graničnog stanja $g(c,t)$. Osnovni cilj analize pokaznog primjera bio je istražiti primjenjivost modela prodora klorida u stvarnim situacijama, kada neki od parametara nisu potpuno poznati. Zbog toga je analiziran utjecaj parametara koji su mjerljivi, ali nisu poznati. Ako analiziramo spektar vjerojatnosti popuštanja prikazan

na slici 9., možemo uočiti da dva vrlo različita tipa cementa (povoljan i nepovoljan) iskazuju vrlo veliku razliku u izračunanim vjerojatnostima otkazivanja.

Ostala dva parametra koja su označena kao nepoznata zaštitni su sloj betona c i vodocementni omjer v/c . Utjecaj oba parametra na indeks pouzdanosti β prikazan je na slikama 7. i 8., gdje se znatno niži utjecaj može uočiti za razred izloženosti XD3. Maksimalna pogreška u određivanju β prilikom određivanja vodocementnog omjera manja je od 0,2 u razredu XD3 tj. od 0,5 u razredu XD1, za razliku od $\Delta(v/c) = 0,05$. Ista maksimalna pogreška uočena je za razliku zaštitnog sloja betona od $\Delta(c) = 5$ mm. Drugim riječima, ako se u analizi kao debljina zaštitnog sloja betona usvoji 35 mm umjesto 30 mm, tada maksimalna pogreška u određivanju indeksa pouzdanosti β iznosi 0,2 za razred XD3, tj. 0,5 za razred XD1.

Općenito uzevši, može se uočiti da su u analizi dobivene visoke vjerojatnosti depasivacije, naročito za elemente koji pripadaju razredu izloženosti XD3, kao što se to može vidjeti na slici 9. To je najuočljivije za cement tipa CEM II/A-LL koji ima 70-postotnu vjerojatnost depasivacije u prvih deset godina, bez obzira na vodocementni omjer. Ako se te vjerojatnosti razmotre za starost od 46 godine, kod koje je dokumentirano da na mostu Weikendorf ima puno pukotina, rezultati analize pokazuju sukladnost sa stvarnom situacijom. Međutim, treba imati na umu da kod provođenja probabilističke analize graničnog stanja s više parametara, statističke vrijednosti nekih od tih parametara uključuju nesigurnost u poznavanju parametara, a ne stvarnu svojstvenu nesigurnost tih parametara. Drugim riječima, ako ne postoje točne informacije o parametrima kao što su $C_{s,\Delta x}$, Δx , T_{real} itd., tada se tim parametrima pripisuju visoka standardna odstupanja (za što postoje potvrde iz literature). Ipak, ti parametri ne moraju varirati u mjeri u kojoj je to naznačeno za analizirani most. Akumulacija visokih standardnih odstupanja brojnih varijabli dovodi do visokog standardnog odstupanja funkcije graničnog stanja $g(c,t)$ pa tako i do niskog indeksa pouzdanosti β i visoke vjerojatnosti otkazivanja p_f . Takva vjerojatnost otkazivanja predstavlja vjerojatnost kod koje se ne može isključiti otkazivanje s obzirom na trenutačna znanja o građevini i njenim svojstvima, a ne stvarnu vjerojatnost da će građevina otkazati. Na taj se način lako može dogoditi da mnogi postojeći mostovi prilikom analize iskazuju vrlo visoke vjerojatnosti depasivacije, ali pokazuju nisku količinu klorida nakon ispitivanja.

5. Zaključci

U radu je prikazano istraživanje o primjeni modela prodora klorida utemeljena na dokumentu *fib* za preliminarno ocjenjivanje stanja u gospodarenju mostovima.

U današnjoj praksi većina agencija za upravljanje mostovima obavlja preliminarno ocjenjivanje postojećih mostova na temelju vizualnog pregleda, a ne na temelju podataka o materijalima, svojstvima konstrukcije i opterećenjima uslijed utjecaja okoline. Zbog toga, a i kao rezultat novih spoznaja o modelu prodora

klorida, u radu se također analizira i mogućnost primjene modela za preliminarno ocjenjivanje, koji bi se koristio kao dodatak postupcima koji se sada primjenjuju.

Model je primijenjen u analizi pokaznog primjera, a radi se o mostu Weikendorf za koji je karakterističan - kao i za većinu postojećih mostova - nedostatak informacija o materijalima i vrstama opterećenja.

U radu su definirani parametri prema karakteristikama mosta naznačenima u projektu i u dokumentima o pregledima, te je na temelju tako dobivenih podataka provedena analiza graničnog stanja depasivacije. Uz analizu graničnog stanja, razmatrane su i ciljne vrijednosti pouzdanosti, isto kao i osjetljivost i utjecaj ključnih parametara modela.

Sljedeći se zaključci mogu izvesti na temelju podataka dobivenih analizom mosta Weikendorf:

- Analiza je pokazala da postoji velika vjerojatnost da u razdoblju od 100 godina neće doći do depasivacije elemenata koji pripadaju razredu izloženosti XD1, i to bez obzira na kombinaciju nepoznatih parametara. S druge strane, postoji velika vjerojatnost da će do depasivacije elemenata koji pripadaju razredu izloženosti XD3 doći već na početku uporabnog vijeka, bez obzira na kvalitetu korištenog betona.
- Ako neki element nije depasiviran u vremenu do 50 godina starosti, mala je vjerojatnost da će do depasivacije doći u nekom kasnijem razdoblju. To znači da informacije o parametrima modela nisu izrazito značajne za mostove starije od 50 godina.
- Analizom najpovoljnijih i najnepovoljnijih vrsta cementa koje su se mogle koristiti u vrijeme građenja mosta dobiven je velik rasap rezultata. Bez obzira na to koja je vjerojatnost depasivacije primijenjena kao ciljna vrijednost, ipak je dvostruko duži uporabni vijek dobiven kada je korišten povoljan cement. Iz toga se može zaključiti da model u sadašnjem stanju razvoja nije primjenjiv za slučajeve kada nema točnih podataka o vrsti cementa.
- Debljina zaštitnog sloja betona i vodocementni omjer definirani su kao ključni pokazatelji ponašanja u pogledu vremena depasivacije i napredovanja korozije (vidi [43] i [44]). Međutim, kada se analizira formula prodora klorida prikazana u izrazima (1) do (4), vidi se da ti parametri manje utječu na granično stanje depasivacije, što je naročito vidljivo u slučaju razreda izloženosti XD3. Stoga se može zaključiti da se model može koristiti za preliminarno ocjenjivanje u slučajevima kada su poznate samo približne vrijednosti tih parametara.
- Kako se za analizirani most nisu mogli odrediti brojni parametri o materijalu, štoviše to nije moguće učiniti za velik broj postojećih mostova unutar infrastrukturne mreže, treba se jasno poduprijeti korištenje dokumenata kao što su "rodni listovi" tih građevina. Inženjerima koji obavljaju ocjenjivanje, ti bi dokumenti trebali pružiti najmjerodavnije informacije o trajnosti. Prema rezultatima provedenih istraživanja, takove informacije trebale bi u slučaju prodora

klorida uključivati podatke kao što su tip cementa, razred izloženosti, vodocementni omjer i debljina zaštitnog sloja betona. Osim tih svojstava, agencije za upravljanje trebale bi voditi evidenciju o količini soli za odmrzavanje kolnika koja se koristi u zimskom razdoblju, kako bi se dobila barem približna informacija o količini klorida na vanjskoj površini betona.

Na temelju istraživanja prikazanih u ovom radu može se općenito zaključiti da bi se modeli propadanja konstrukcija, kao što je model prodora klorida, trebali u budućnosti sve češće koristiti u praksi upravljanja mostovima, ali tek nakon što se za sve mostove uvriježi praksa unošenja podataka o trajnosti. U kombinaciji s jednostavnim vizualnim pregledima, ti bi modeli mogli pružiti naznake o tome kada bi se trebali provesti radovi

održavanja na mostovima, tj. kada bi se trebale planirati detaljne radnje pregleda, ispitivanja i praćenja. Međutim, u sadašnjoj situaciji, kada ključni parametri nisu dostupni, a njihovo određivanje je često financijski nepovoljno, može se reći da je primjenljivost modela za predviđanje uporabnog vijeka mostova, tj. za programiranje budućih radnji održavanja, još uvijek prilično ograničena.

Zahvale

Autori ovim putem zahvaljuju na pomoći tijekom provedbe projekta "Ocjena uporabnog vijeka željezničkih građevina" koji je financirala tvrtka ÖBB-Infrastruktur Bau AG iz Beča. Autori također posebno zahvaljuju i tvrtki Smart Minerals GmbH na potpori tijekom analize postojećih normativnih dokumenata.

LITERATURA

- [1] Zambon, I., Vidovic, A., Strauss, A., Matos, J., Amado, J.: Comparison of stochastic prediction models based on visual inspections of bridge decks, *Civil Engineering and Management*, 23 (2017) 5, pp. 553-561.
- [2] Mirzaei, Z., Adey, B.T.: Investigation of the use of three existing methodologies to determine optimal life-cycle activity profiles for bridges, *Structure and Infrastructure Engineering*, 11 (2015) 11, pp. 1484-1509.
- [3] ISO 13822: Bases for design of structures - Assessment of existing structures, 2010.
- [4] Model Code, fib Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [5] Tanasic, N.: Data collection on Bridge Management Systems, in COST TU 1406 Quality Specification for Roadway Bridges, Standardization at a European Level - 2nd Workshop Meeting, Belgrade, 2016.
- [6] Mirzaei, Z., Adey, B.T., Klatter, L., Thompson, P. D.: The IABMAS Bridge Management Committee Overview Of Existing Bridge Management System, 2014 International Association for Bridge Maintenance and Safety - IABMAS, Report, 2014.
- [7] Zambon, I., Vidovic, A., Strauss, A., Matos, J.C., Friedl, N.: Prediction of the remaining service life of existing concrete bridges in infrastructural networks based on carbonation and chloride ingress. *Smart Structures and Systems*, 21 (2018) 3, pp. 305-320.
- [8] Andrade, C., Cesetti, A., Mancini, G., Tondolo, F.: Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening, *Structural Concrete*, 17 (2016) 4, pp. 533-540.
- [9] Teply, B., Chroma, M., Vorechovska, D., Rovnanik, P.: FReET-D Deterioration Module Program Documentation, Cervenka Consulting, Prague, 2008.
- [10] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General, Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [11] EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN/TC 104 'Concrete and related products', 2013.
- [12] fib Bulletin 34, Model Code for Service Life Design of Concrete Structures, Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2006.
- [13] fib Bulletin 59, Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environment (carbonation/chlorides), Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2011.
- [14] fib Bulletin 76, Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides; Germany: DCC Document Competence Center Siegmund Kästl e. K., 2015.
- [15] Crank, J.: The mathematics of diffusion, Bristol: Calderon Press, 1956.
- [16] Collepardi, M., Marcialis, A., Turriziani, R.: Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes, *Journal of the American Ceramic Society*, 55 (1972) 10, pp. 534-535.
- [17] Song, H.W., Lee, C.H., Ann, K.Y.: Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments, *Cement and Concrete Composites*, 30 (2008) 2, pp. 113-121.
- [18] NT BUILD 492, Nordtest method: Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, 1999.
- [19] Tang, L., Gulikers, J.: On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp. 589-595, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006>
- [20] Nilsson, L.O., Carcasses, M.: Models for Chloride Ingress into Concrete - A Critical Analysis, Report of Task 4.1 in EU-Project G6RD-CT-2002-00855, ChlorTest, 2004.
- [21] ÖBB Infrastruktur Regelwerk 06.01.02, Instandhaltungsplan Konstruktiver Ingenieurbau [Maintenance plan for structural engineering construction], Vienna, 2012.
- [22] ONR 23303:2010 03 15, Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe [Test methods for concrete - National application of testing standards for concrete and its source materials], Technical Regulation, 2010.

- [23] ÖNORM B 4706, Instandsetzung, Umbau und Verstärkung von Betonbauten - Allgemeine Regeln und nationale Umsetzung der ÖNORM EN 1504 [Repair, reconstruction and strengthening of concrete structures - General rules and national implementation of ÖNORM EN 1504], Vienna: Austrian Standards Institute, 2015.
- [24] ÖNORM B 3302, Richtlinien für Beton – Baustoffe und maßgenormte Tragwerksteile [Guidelines for concrete - Building materials and standardized structural parts], Vienna: Österreichischer Normenausschuss, 1954.
- [25] DARTS, Durable and reliable tunnel structures, Project with financial support of the European Commission under the Fifth Framework Program, GROWTH 2000 Project GRDI-25633, 2004.
- [26] ÖNORM EN 197-1, Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement [Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements], Vienna: Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
- [27] ÖNORM B 3310, Portlandzement, Eisenportlandzement und Hochofenzement [Portland cement, Portland-slag cement and Blastfurnace cement], Vienna: Österreichisches Normungsinstitut, 1963 / 1980 / 1993.
- [28] Gehlen, C.: Probability-based service life design of reinforced concrete structures - Reliability studies for prevention of reinforced corrosion, DAFStb Heft 510, Berlin, 2000.
- [29] Bamforth, P.: Enhancing reinforced concrete durability: Guidance on selecting measures for minimising the risk of corrosion of reinforcement in concrete, Concrete Society Technical Publication, 61 (2004), ISBN: 1904482112.
- [30] Lay, S., Schießl, P.: Instructions on methodology and application of models for the prediction of the residual service life for classified environmental loads and types of structures in Europe. Service Life Models. LIFECON deliverable D 3.2, Technische Universität München, 2007.
- [31] Tang, L.: Chloride transport in concrete - measurement and prediction, PhD Thesis, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 1996.
- [32] Tang, L., Utgenannt, P., Lindvall, A., Boubitsas, D.: Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in road environment, Uppdragsrapport N. P802606, Lund, 2010.
- [33] Vu, K.A.T., Stewart, M.G.: Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, Structural Safety, 22 (2000) 4, pp. 313-333.
- [34] Neville, A.: How closely can we determine the water-cement ratio of hardened concrete?, Materials and Structures, 36 (2003), pp. 311-318, <https://doi.org/10.1007/BF02480870>
- [35] VÖZ, Vereinigung Österreichischer Zementindustrie: Zement und Beton [Cement and Concrete], Vienna: Bauberatungsstelle des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten und des Österreichischen Betonvereins, 1985.
- [36] ÖVBB-Richtlinie, Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton [Maintenance and repair of buildings made of concrete and reinforced concrete], Austrian society for construction technology, 2003.
- [37] ÖBV-Richtlinie, Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton [Maintenance and repair of buildings made of concrete and reinforced concrete], Vienna: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2014.
- [38] Andrade, C.: Reliability analysis of corrosion onset: initiation limit state, Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2 (2017) 4, pp. 200-2008.
- [39] ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [Central Institute of Meteorology and Geodynamics] 22 May 2017. [Online]. Available: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetter-oesterreich>.
- [40] Novák, D., Vořechovský, M., Rusina, R.: Small-sample probabilistic assessment: FREET software. Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP 9), J. Kanda, T. Takada, and H. Furuta. San Francisco, 2003.
- [41] von Greve-Dierfeld, S., Gehlen, C.: Performance based durability design, carbonation part 3: PSF approach and a proposal for the revision of deemed-to-satisfy rules, Structural Concrete, 17 (2016) 5, pp. 718-728.
- [42] Novák, D.: Small-sample simulation for uncertainties modelling in engineering: Theory, software and applications, in 3rd Weimar Optimization and Stochastic Days, Weimar, 2006.
- [43] Ožbolt, J., Balabanić, G., Periškić, G., Kušter, M.: Modelling the effect of damage on transport processes in concrete, Construction and Building Materials, 24 (2010), pp. 1638-1648, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.028>
- [44] Ožbolt, J., Balabanić, G., Kušter, M.: 3D Numerical modelling of steel corrosion in concrete structures, Corrosion Science, 53 (2011), pp. 4166-4177, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.08.026>