

Primljen / Received: 9.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 20.5.2015.

Prihvaćen / Accepted: 27.11.2015.

Dostupno online / Available online: 10.1.2016.

Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina

Autori:



Prof.dr.sc. **Dubravka Bjegović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
dubravka@grad.hr



Dr.sc. **Marijana Serdar**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mserdar@grad.hr



Dr.sc. **Ana Baričević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
abaricevic@grad.hr



Dr.sc. **Marija Jelčić Rukavina**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
jmarija@grad.hr

Prethodno priopćenje

Dubravka Bjegović, Marijana Serdar, Ana Baričević, Marija Jelčić Rukavina

Ocjena stanja betonskog obalnog zida izloženog djelovanju morske vode više od 30 godina

U radu su prikazane posljedice dugotrajnog izlaganja betonskih konstrukcija morskom okolišu, na primjeru betonskih blokova obalnog zida koji se nalaze u moru više od 30 godina. Na blokovima je provedeno ispitivanje mehaničkih (tlačna čvrstoća) i trajnosnih (plinopropusnost i kapilarno upijanje) svojstava, svojstava homogenosti (odskok sklerometrom i brzina prolaska ultrazvuka) te kemijska analiza (količina kloridnih i sulfatnih iona). Osim ispitivanja, provedeno je modeliranje ponašanja betona u morskoj vodi uz pomoć programskih paketa Stadium i Conclife.

Ključne riječi:

morski okoliš, sulfatna korozija, kloridi, ocjena stanja

Preliminary note

Dubravka Bjegović, Marijana Serdar, Ana Baričević, Marija Jelčić Rukavina

Condition assesment of concrete pier after three decades of exposure to sea water

This paper presents the effects of long-term exposure of concrete structures to marine environment using as an example concrete blocks of a pier exposed to seawater for more than three decades. The blocks were tested to determine their mechanical characteristics (compressive strength), durability (gas permeability and capillary absorption), homogeneity (sclerometer rebound and ultrasound passage velocity) and chemical properties (quantity of chloride and sulphate ions). In addition, concrete behaviour in sea water was modelled using software packages Stadium and Conclife.

Key words:

Marine environment, sulphate corrosion, chlorides, condition assessment

Vorherige Mitteilung

Dubravka Bjegović, Marijana Serdar, Ana Baričević, Marija Jelčić Rukavina

Zustandsbeurteilung von Ufermauern bei über 30-jähriger Meerwassereinwirkung

In dieser Arbeit werden die Folgen langzeitiger Einwirkungen aus der Meerwasserumgebung auf Betonkonstruktionen dargestellt und am Beispiel von Betonblöcken einer Ufermauer, die sich über 30 Jahre im Meerwasser befinden, erläutert. An den Blöcken wurden Versuche zur Ermittlung mechanischer (Druckfestigkeit) sowie mit der Beständigkeit (Gasdurchlässigkeit, kapillare Saugfähigkeit) und mit der Homogenität zusammenhängender Eigenschaften (Sklerometerabprall, Ultraschallgeschwindigkeit) durchgeführt und chemische Analysen (Anteil von Chlorid- und Sulfat-Ionen) abgeschlossen. Außerdem wurde das Verhalten des Betons im Meerwasser mittels der Programme Stadium und Conclife modelliert.

Schlüsselwörter:

Meerwasserumgebung, Sulfat-Korrosion, Chloride, Zustandsbeurteilung

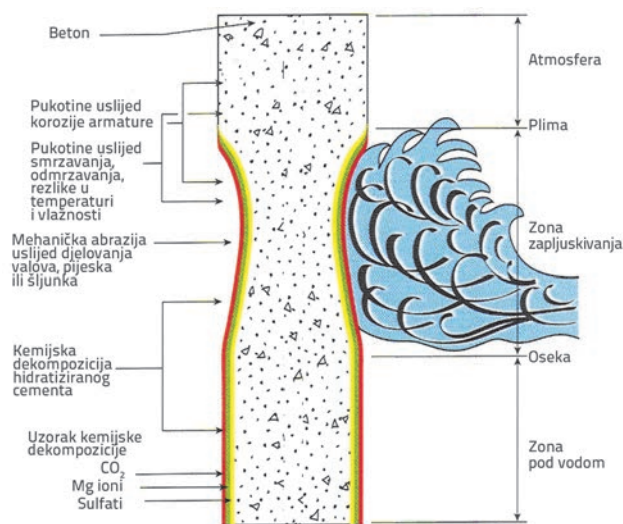
1. Uvod

Od svih razreda okoliša u kojem se betonska konstrukcija može nalaziti tijekom svoje uporabljivosti, morski se okoliš ubraja u jedan od agresivnijih i kompleksnijih [1]. Betonske konstrukcije su u morskom okolišu izložene djelovanju različitih fizikalno - kemijskih procesa koji uzrokuju degradaciju mikrostrukture betona, te samim time umanjuju trajanje betonske konstrukcije. Neke od ključnih infrastrukturnih građevina, brojne marine i luke u Hrvatskoj smještene su u neposrednoj blizini Jadranskog mora [2, 3]. Upravo je zato izuzetno važno za projektiranje i održavanje betonskih građevina poznavati dugotrajni utjecaj Jadranskog mora na beton.

Glavni je razlog agresivnosti morskog okoliša, prije svega, kemijski sastav morske vode, koja sadrži znatne količine otopljenih soli, kisika, ugljičnog dioksida te sulfata. Morska voda u prosjeku sadrži 3,5 do 4 % otopljenih soli, uglavnom natrijevog klorida [4]. Prosječna količina soli u Jadranskom moru je 38,3 g/l, što je više od prosjeka u ostalim morskim vodama. Osim klorida, propadanje betona može biti uzrokovano kemijskom korozijom induciranom ionima magnezija Mg^{2+} , sulfatnim ionima i kiselinama koje su također prisutne u Jadranskom moru (tablica 1.).

Tablica 1. Prosječna količina soli u Jadranskom moru

Otopljeni ioni		SO_4^{2-}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+
Koncentracija	g/l	2,97	1,42	0,46	21,25	0,39



Slika 1. Utjecaj morske vode na armiranobetonsku konstrukciju [4]

Osim kemijskih mehanizama degradacije, građevine su u morskom okolišu izložene i nizu fizikalnih i bioloških mehanizama degradacije, poput izmjene ciklusa vlaženja i sušenja, promjene temperature, erozije te djelovanju mikroorganizama koji se razvijaju unutar strukture betona [4-6]. S obzirom na složenost mehanizama djelovanja morskog okoliša, bilo bi pogrešno

promatrati svaki mehanizam odvojeno, ne uzimajući u obzir njihovu međusobnu ovisnost i sinergiju. Osnovni fizikalno-kemijski procesi degradacije koji nastupaju prilikom dužeg izlaganja konstrukcije morskoj vodi prikazani su na slici 1.

1.1. Fizikalni mehanizmi degradacije

Kad je riječ o narmiranim betonskim konstrukcijama, fizikalna djelovanja obuhvaćaju četiri osnovna mehanizma degradacije betona: eroziju, kavitaciju, kristalizaciju soli i cikluse smrzavanja i odmrzavanja [1]. U mediteranskim klimama moguće je očekivati sve navedene mehanizme degradacije, osim smrzavanja i odmrzavanja. Soli iz mora (Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , $NaCl$) tijekom ciklusa vlaženja i sušenja betona prodiru sve dublje u pore betona te prilikom kristalizacije povećavaju volumen i stvaraju dodatne tlakove u cementnoj matrici betona. Ako naprezanje nastalo kristalizacijom soli u porama postane veće od vlačne čvrstoće betona, može doći do nastanka pukotina unutar strukture betona [4].

Djelovanjem valova dolazi do degradacije betona erozijom i kavitacijom. Ovakve vrste degradacije rjeđe su u toplim morima poput Jadranskoga, a češće u nemirnim vodama i hladnim morima gdje je tijekom godine prisutan i led koji, nošen valovima, abrazijom oštećuje površinu betona.

1.2. Kemijski mehanizmi degradacije

Ugljični dioksid (CO_2) koji je u morskoj vodi prisutan u manjim količinama, zajedno sa solima magnezija, koje su uvijek prisutne u morskoj vodi, mogu sa sastojcima hidratacije iz betona ući u kemijske reakcije koje će štetno djelovati na beton. U normalnim okolnostima beton je zaštićen aragonitom ($CaCO_3$), jednim od najstabilnijih minerala betona u morskoj vodi [4]. Ova prirodna vrsta zaštite betona nije moguća u zoni zapljuskivanja jer valovi uklanjaju aragonit čim se stvori u betonu.

U slučaju kada su prisutne veće koncentracije CO_2 (npr. bočata voda), aragonit prelazi u kalcijevbikarbonat, koji se potom izlučuje iz betona [1], ostavljajući porozniju strukturu betona smanjene čvrstoće. Koncentracija magnezijevog sulfata u morskoj vodi (oko 2000 mg/l) i više je nego dovoljna za sulfatnu koroziju betona [4] kada dolazi do reakcije sulfatnih iona s ionima hidratizirane cementne matrice (kalcijevog aluminata) pri čemu nastaje gips ili etringit [7]. Nastali kristali etringita povećavaju volumen što uzrokuje tlakove unutar cemente matrice ili na sučelju između paste i agregata, a to onda uzrokuje pojavu pukotina u betonu ili gubitak veze između cementnog kamena i agregata [4, 7]. Potrebno je znati da je količina CO_2 uobičajeno prisutna u morskoj vodi dovoljna za otapanje sastojaka hidratacije u propusnom betonu [1].

1.3. Biološki mehanizmi degradacije

U morima je najčešći mehanizam degradacije površine betona djelovanje mekušaca, školjkaša i ljuskara, koji se nastanjuju na njegovoj površini te ga s vremenom erodiraju [8, 9]. Gljivice

i lišajevi zahtijevaju manje vlage pa se mogu naći na površini betona u zonama izloženima ciklusima vlaženja i sušenja. Alge se često mogu naći u dijelovima betonskih konstrukcija koji su stalno uronjeni u more, s obzirom na to da im je za život nužna vlaga. Spomenuti organizmi za svoja staništa koriste sva postojeća udubljenja u betonu, poput otvorenih pora, neravnina na površini ili mehaničkih oštećenja. Tijekom vremena takvi organizmi buše beton te stvaraju "tunele" koji oslabljuju strukturu betona. Do sada provedenim biološkim analizama betona izloženog morskom okolišu pronađeno je mnogo školjkaša i algi, uglavnom: *Cliona vastifica* i *Cliona vermifera*, školjkaši *Rocellaria dubia*, *Hiatella rugosta*, *Irus irus* i *urchin Paracentrotus lividus* [10, 11].

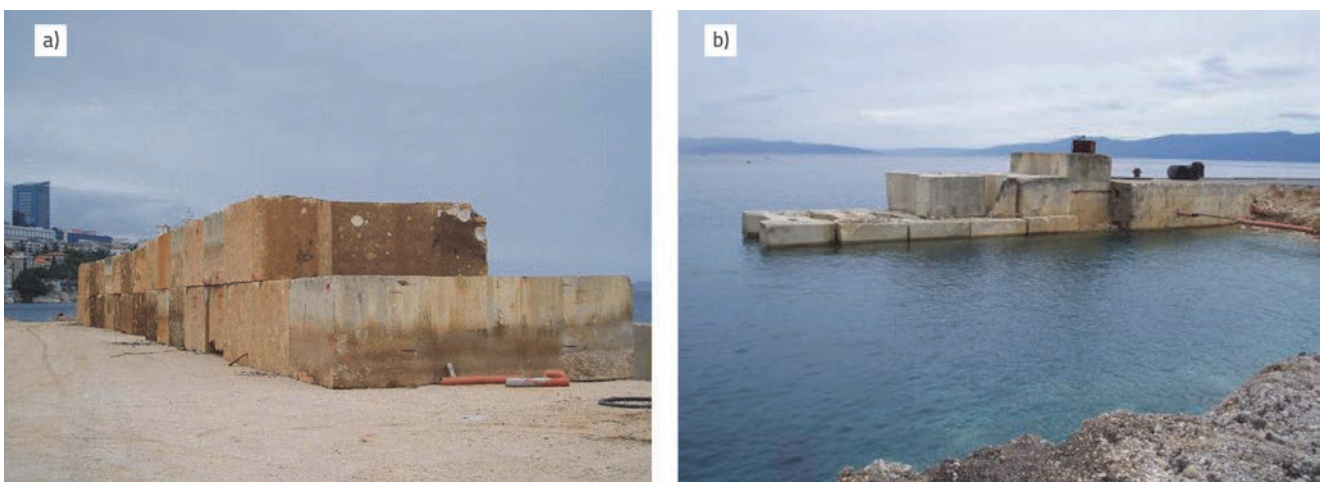
2. Obalni zid terminala Brajdica

Kontejnerski terminal Brajdica dio je najveće hrvatske luke Rijeka, koja je smješтана na sjevernoj obali Jadranskog mora.

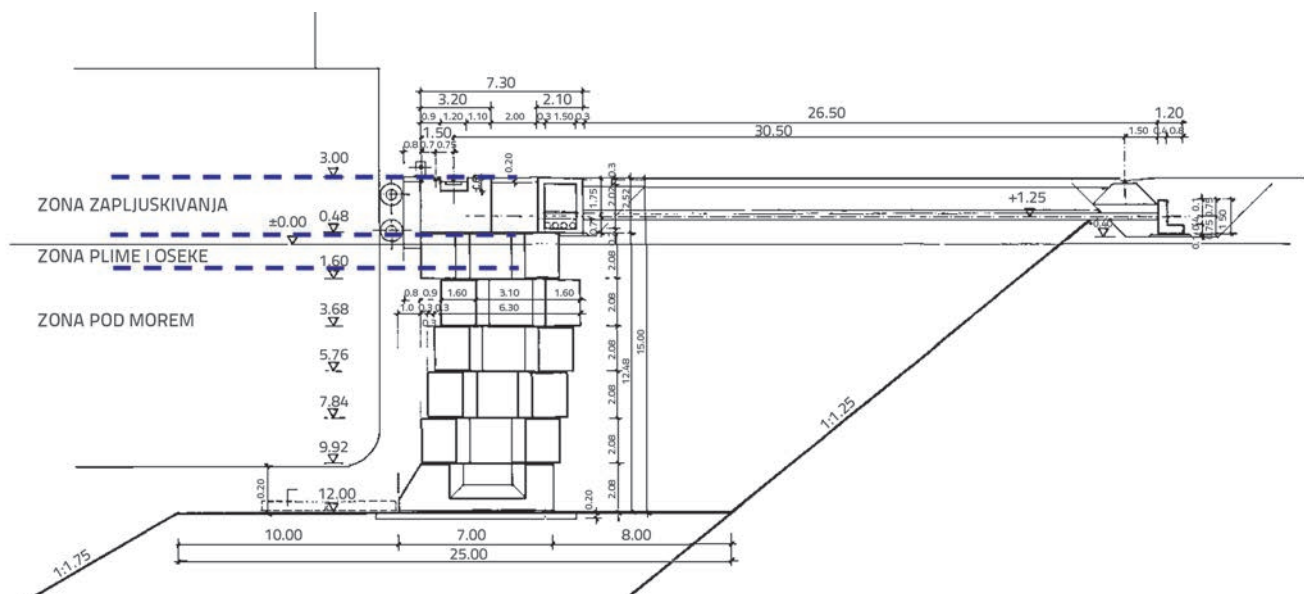
Stari obalni zid terminala Brajdica sastoji se od niza masivnih betonskih blokova dimenzija 2,5 m x 3 m x 8 m, koji su složeni od dna mora do ukupne visine od 15 m. Dubina mora oko zida je otprilike 12 m. Terminal je sagrađen 1980-ih, dakle betonski blokovi su bili izloženi djelovanju morske vode više od 30 godina.

Jedini podatak o betonu na osnovi dostupne dokumentacije iz faze gradnje jest zahtijevani razred čvrstoće MB30, što po sadašnjim propisima pripada razredu tlačne čvrstoće C25/30. Tijekom projektiranja i gradnje takvih blokova za obalni zid, nisu predviđeni niti ispitivani kriteriji trajnosti betona. Prema sadašnjim propisima i normi HRN EN 206-1 [12], za navedeni razred izloženosti minimalni zahtijevani razred tlačne čvrstoće je C35/45, a vodocementni omjer mora biti manji od 0,45.

Ocjenjivanje stanja je provedeno tijekom rekonstrukcije kontejnerskog terminala na dijelu blokova koji su bili izvađeni iz mora i postavljeni na platformu terminala, a drugi su blokovi



Slika 2. Obalni zid terminala Brajdica: a) Izvađeni betonski blokovi; b) preostali betonski blokovi u moru



Slika 3. Poprečni presjek betonskog zida

ostali u moru, slika 2. Izvađeni blokovi sveobuhvatno su ispitani kako bi se ocijenilo njihovo stanje i mogućnost ponovne upotrebe na novom terminalu. Na slici 3. prikazan je poprečni presjek zida, s donjim dijelom uronjenim u more, srednjim dijelom izloženim promjenama razine mora uslijed plime i oseke te gornjim dijelom izloženim zapljuskivanju.

U radu su prikazani svi mehanizmi degradacije betona pronađeni tijekom ispitivanja stanja masivnih nearmiranih blokova koji su kao dio obalnog zida kontejnerskog terminala Brajdica, u blizini grada Rijeke, bili više od 30 godina izloženi morskoj vodi. Osnovni je cilj bio prikupiti realne podatke o stanju betona nakon dugogodišnjeg izlaganja Jadranskom moru. Iz tog razloga provedeno je sveobuhvatno ispitivanje utjecaja morske vode na svojstva betona na različitim razinama izloženosti.

3. Metodologija ocjene stanja i provedena ispitivanja

Na slici 4. prikazana je metodologija pregleda dostupnih betonskih blokova, koji se sastojao od preliminarnog pregleda te preliminarnih (nerazorna, terenska) i detaljnih (na izvađenim uzorcima, laboratorijska) ispitivanja.

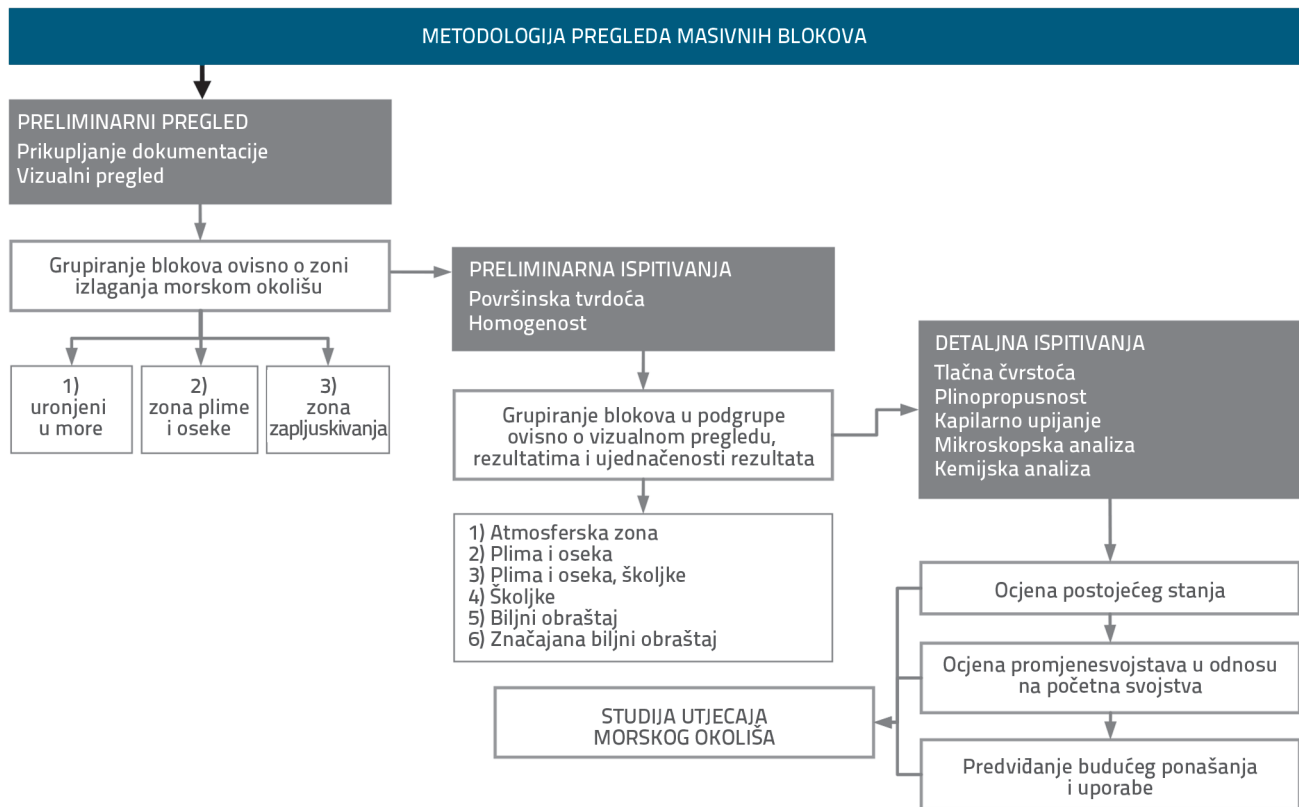
Tijekom preliminarnog pregleda preuzeta je dostupna dokumentacija, koja se sastojala od nacрта zida i osnovnih svojstava materijala (tlačna čvrstoća). S obzirom na različite uvjete izlaganja tijekom uporabe te mehanizme i intenzitet utjecaja morskog okoliša na beton, blokovi su najprije podijeljeni

u tri grupe izlaganja: blokovi u zoni zapljuskivanja, blokovi u zoni plime i oseke, blokovi uronjeni u more.

Svaki dostupni blok detaljno je vizualno pregledan s obje izložene strane. Prepoznata oštećenja svrstana su u jednu od pet kategorija, ovisno o stupnju oštećenosti, sve prema normama i preporukama za vizualnu ocjenu stanja betona [13-15], tablica 2. Na svakom bloku provedeno je ispitivanje površinske tvrdoće metodom sklerometriranja te ispitivanje homogenosti metodom mjerenja brzine ultrazvuka. Nakon provedenih preliminarnih ispitivanja, napravljena je analiza rezultata te su ovisno o rezultatima vizualnog pregleda i preliminarnih ispitivanja, površine blokova umjesto na 3 osnovne grupe podijeljene na ukupno 6 grupa.

U svakoj grupi blokova izvađena su po 3 betonska uzorka (valjci Ø100 mm) za detaljna ispitivanja u laboratoriju te uzorci betonskog praha za kemijsku analizu. S obzirom na to da u projektnoj dokumentaciji nisu tražena druga svojstva betona osim tlačne čvrstoće, nisu postojali podatci s kojima bi se usporedila trenutna svojstva betona te ocijenio utjecaj morskog okoliša. Iz tog je razloga utjecaj okoliša određen na uzorcima uzetim na prvih 5 cm betonske površine, a preostalih je 10 cm uzeto za ispitivanje tlačne čvrstoće. Beton s dubine veće od 15 cm uzet je kao neizložen, odnosno "zdrav" beton, jer se očekuje da na toj dubini beton nije izložen agresivnom djelovanju morske vode.

Detaljna ispitivanja sadržavala su ispitivanja mehaničkih svojstava (tlačna čvrstoća), homogenosti (odskok sklerometrom



Slika 4. Shematski prikaz metodologije pregleda masivnih blokova

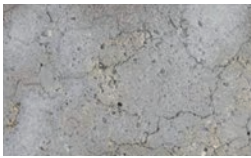



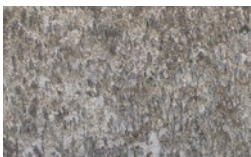
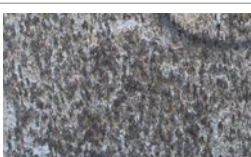
Tablica 2. Kategorizacija oštećenja

Kategorija	Opis oštećenja
0	Nema oštećenja
I	Oštećenje tankog sloja površinskog betona, bez pukotina
II	Oštećenje tankog sloja površine betona do dubine od 1 mm, tanke pukotine, zrna agregata nepovezana s cementnom matricom
III	Oštećenje sloja površine betona do dubine od 4 mm, veća zrna agregata nepovezana s cementnom matricom zbog djelovanja školjkaša
IV	Oštećenje sloja površine betona do dubine od 10 mm, odlomljeni dijelovi cementnog morta između zrna agregata zbog djelovanja školjkaša i algi
V	Odlamanje većeg površinskog dijela betona, smanjenje poprečnog presjeka

Tablica 3. Popis ispitivanja, lokacija i broj mjernih mjesta te norma prema kojoj je ispitivanje provedeno

Ispitivanje	Broj mjernih mjesta	Dimenzije uzoraka [mm]	Norma [15-22]
Vizualni pregled dostupnih blokova	80	-	DIN 1076
Sklerometriranje	80	-	HRN EN 12504-2
Ultrazvučno ispitivanje	80	-	HRN EN 12504-4
Tlačna čvrstoća	18	Ø100/100	HRN EN 12390-3
Kapilarno upijanje	36	Ø50/100	HRN EN 13057
Plinopropusnost	36	Ø50/100	RILEM TC 116
Kemijska analiza (količina klorida i sulfata)	16	prah	HRN EN 196-2

Tablica 4. Karakteristične površine betonskih blokova i kategorizacija uočenih oštećenja (postotak ukupne površine betonskog bloka)

Razred izloženosti	Grupa	Oštećenje površine betona (vizualni prikaz)	Klasifikacija oštećenja, postotak izložene površine					
			0	I	II	III	IV	V
Zona zapljuskivanja	1		57	19	0	24	0	0
Zona plime i oseke	2		4	4	61	30	0	1
	3		8	3	37	48	4	0
Zona pod morem	4		0	0	0	94	1	4
	5		1	1	0	31	62	5
	6		0	0	0	0	97	2

i brzina prolaska ultrazvuka) i trajnosnih svojstava (plinopropusnost i kapilarno upijanje). Dodatno su uzeti uzorci betonskog praha na kojima je provedena kemijska analiza (količina iona klorida i sulfata). Popis ispitivanja, lokacija i broj mjernih mjesta te norma prema kojoj je ispitivanje provedeno prikazani su u tablici 3.

Nakon ispitivanja i analize rezultata, ocijenjeno je postojeće stanje masivnih blokova, ocijenjene su promjene svojstava u odnosu na svojstva neizloženog betona te je ustanovljeno buduće ponašanje i uporabljivost.

4. Rezultati i analiza

4.1. Preliminarni pregled – vizualni pregled

U tablici 4. prikazan je pregled ukupnog oštećenja svih pregledanih površina blokova, prema kategorijama iz tablice 2. Uočeno je da su na blokovima iznad razine mora uglavnom vidljiva površinska oštećenja u obliku površinskih pukotina (grupa 1) nastalih zbog kristalizacije soli uz sulfatnu koroziju [23]. Kod blokova koji su u zoni plime i oseke (grupa 2 i 3) vidljivo je više površinskih pukotina i znatnije su mrežaste pukotine duž gotovo cijele površine blokova, koje su također posljedica sulfatne korozije uz kristalizaciju soli. Kod blokova koji su ispod razine mora na nižim dubinama (grupa 4) vidljivo je više mrežastih pukotina te rupičaste površine nastale zbog djelovanja školjkaša [24]. Školjkaši su uzrokovali značajnije oštećenje površinskog sloja betona, ostavljajući duboke brazde kroz koje je omogućen ulazak agresivnih sastojaka iz morske vode dublje u beton. U sklopu ovog istraživanja nije napravljena mikrobiološka analiza, ali se s obzirom na sličnost pronađenih oštećenja može zaključiti da se radi o istim vrstama kao u dosadašnjim istraživanjima podvodnih građevina u riječkom zaljevu [10, 11]. Kod blokova koji su ispod razine mora na većim dubinama (grupe 5 i 6), gotovo je cijela površina prekrivena morskim travama i školjkašima, odnosno bioorganizmima koji svojim metabolizmom otapaju sastojke hidratacije i time povećavaju propusnost betona. Pregled kategoriziranih oštećenja za svaku grupu betonskih blokova prikazan je u tablici 4.

4.2. Preliminarna ispitivanja – rezultati terenskih ispitivanja

Nakon preliminarnog pregleda, provedena su terenska ispitivanja na lokacijama izabranim tijekom vizualnog pregleda [25]. Terenska ispitivanja su se sastojala od procjene površinske tvrdoće sklerometriranjem i procjene homogenosti metodom mjerenja brzine prolaska ultrazvuka. Prema dobivenim rezultatima, blokovi su svrstani u beton srednje (grupe 1, 2, 3, 5) i dobre (grupe 4, 6) kvalitete. Kriteriji za klasifikaciju betona navedeni su u [12].

Kao što je očekivano, rezultati ispitivanja pokazuju da se beton bolje kvalitete nalazi u zoni pod morem jer nije izložen utjecajima koji ubrzavaju njegovo propadanje.

4.3. Detaljna ispitivanja – rezultati laboratorijskih ispitivanja

Ukupno je izvađeno 18 betonskih uzoraka i 18 uzoraka betonskog praha za detaljna ispitivanja. Detaljna ispitivanja sastojala su se od ispitivanja mehaničkih (tlačna čvrstoća) i trajnosnih svojstava (plinopropusnost i kapilarno upijanje) te kemijske analize (količina iona klorida i sulfata).

U tablici 6. prikazani su rezultati laboratorijskih ispitivanja. Koeficijenti kapilarnog upijanja i plinopropusnosti izraženi su za neizložen i za izložen beton. Rezultati ispitivanja neizloženog betona korišteni su kao referentne vrijednosti kako bi se odredio utjecaj morske vode na beton. Kada se usporede vrijednosti neizloženog i izloženog betona, vidljivo je da je najznačajniji utjecaj na svojstva propusnosti kod grupe blokova 2 i 3. Rezultati propusnosti upućuju na određenu razinu degradacije betona u zoni plime i oseke. U toj su zoni presudan degradirajući čimbenik svakako ciklusi vlaženja i sušenja, rezultirajuća kristalizacija soli, kemijska interakcija morske vode i sastojaka hidratacije, pri čemu dolazi do izluživanja sastojaka hidratacije. Tijekom analize rezultata potrebno je uzeti u obzir relativno malu čvrstoću betona (C25/30) te veliki vodocementi omjer, koji nisu u skladu s današnjim zahtjevima za trajnost pa su zasigurno jedan od razloga dobivenog velikog koeficijenta plinopropusnosti i u

Tablica 5. Rezultati ispitivanja površinske tvrdoće i brzine prolaska ultrazvuka

Izloženost	Grupa	Indeks odskoka sklerometra	Brzina ultrazvuka [m/s]	Ocjena kvalitete betona [6]
Zona zapljuskivanja	1	37,3 ± 5,1	3526,7 ± 160,7	srednja
Zona plime i oseke	2	35,6 ± 0,2	3313,3 ± 1006,5	srednja
	3	42,5 ± 1,2	3823,3 ± 769,6	srednja
Zona pod morem	4	41,2 ± 3,4	4128,4 ± 823,0	dobra
	5	40,1 ± 1,9	3581,4 ± 871,8	srednja
	6	46,5 ± 7,3	4730,0 ± 389,6	dobra

Tablica 6. Rezultati laboratorijskih ispitivanja provedenih na izvađenim uzorcima betona (tlačna čvrstoća, kapilarno upijanje, plinopropusnost)

Izloženost	Grupa	Tlačna čvrstoća [MPa]	Koefficient kapilarnog upijanja [kg/m ² h ^{0,5}]		Koefficient plinopropusnosti [x10 ⁻¹⁶ m ²]	
			neizložen	izložen	neizložen	izložen
Zona zapljuskivanja	1	39,0 ± 10,6	0,35 ± 0,17	0,39 ± 0,19	1,75 ± 1,07	11,2 ± 3,40
Zona plime i oseke	2	36,3 ± 4,7	0,22 ± 0,07	0,97*	6,49 ± 3,32	-**
	3	44,9 ± 5,7	0,20 ± 0,03	0,53 ± 0,04	10,9 ± 6,20	22,4*
Zona pod morem	4	49,9 ± 6,0	0,24 ± 0,04	0,33 ± 0,08	1,83 ± 2,38	2,61 ± 2,58
	5	41,5 ± 8,6	0,25 ± 0,08	0,61 ± 0,35	2,38 ± 7,78	6,59 ± 7,12
	6	52,9 ± 10,0	0,22 ± 0,14	0,51 ± 0,15	1,45 ± 6,92	7,20 ± 5,03

* ispitivanje na jednom uzorku; ** nije moguće ispitati

slučaju neizloženog betona. Propusnost izloženih površina je između 1,5 do 4 puta veća kada se usporede neizložene i izložene površine betona, i u slučaju plinopropusnosti i kapilarnog upijanja.

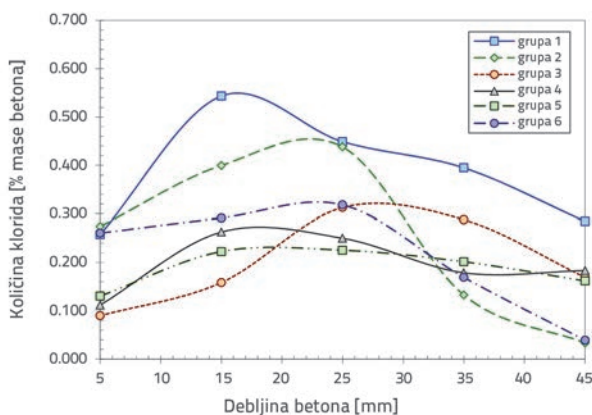
U zoni zapljuskivanja i u zoni plime i oseke smanjen je zaštitni sloj aragonita (CaCO₃) zbog djelovanja valova [1, 4]. U tim slojevima prisutna je reakcija aragonita i morske vode, što uzrokuje stvaranje kalcijevog bikarbonata. S obzirom na to da je kalcijev bikarbonat jako topiv u vodi, upravo njegovo otapanje može biti povezano s gubitkom materijala i slabljenjem očvrstnule cementne paste. Ovaj mehanizam degradacije objašnjava i smanjene vrijednosti tlačne čvrstoće u usporedbi s vrijednostima dobivenima na betonu u zoni pod morem, gdje taj mehanizam oštećenja nije prisutan (tablica 6).

Kemijskom analizom koja je provedena na uzorcima betonskog praha, određena je količina iona klorida i sulfata. Rezultati kemijske analize prikazani su na slikama 5. i 6. Iz tih rezultata vidljivo je da postoji određena povezanost između lokacije betonskog bloka i količine iona. Najveća količina iona pronađena je u zoni zapljuskivanja (grupa 1) gdje valovi i vjetar osiguravaju veliku količinu iona stalno prisutnu na površini betona.

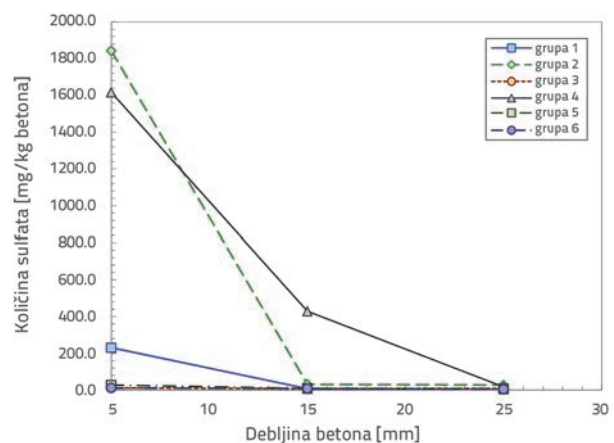
Profili kloridnih iona dobiveni za zone zapljuskivanja i zonu plime i oseke (grupe 1 do 3) potvrđuju da se pronađene pukotine na površini betona mogu povezati s kristalizacijom soli, koja uzrokuje naprezanja dovoljno velika da dolazi do stvaranja pukotina [1]. Iako u ovom istraživanju blokovi nisu armirani, informacije o izmjerenim količinama klorida mogu biti korisne za predviđanje ponašanja armiranog betona u istim uvjetima okoliša.

Kako bi se ustanovila vjerojatnost sulfatne korozije betona, provedena je kemijska analiza količine sulfatnih iona, slika 6. Profili sulfatnih iona potvrđuju da je zona plime i oseke najizloženija djelovanju sulfatnih iona te stvaranju gipsa i etringita. Međutim prema literaturi, volumenske promjene povezane sa stvaranjem etringita rjeđe se događaju kada je u betonu prisutna i određena količina kloridnih iona [1].

Manja gustoća gipsa u odnosu na kalcijev hidroksid također može biti razlogom promjene volumena [7]. Gips je također topiv u vodi te se njegovo otapanje može povezati s povećanjem propusnosti betona u ovom razredu izloženosti [1].



Slika 5. Količina kloridnih iona za svaku grupu betonskih blokova (postotak mase betona)



Slika 6. Količina sulfatnih iona u svakoj grupi betonskih blokova (postotak na masu betona)

5. Predviđanje budućeg ponašanja i uporabljivosti

5.1. Modeliranje ponašanja betona uz pomoć programskog paketa Conclife

Conclife je deterministički program koji omogućava proračun o uporabljivosti betona izloženog djelovanju sulfata i/ili djelovanju ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja. Program je osmišljen u Building and Fire Research Laboratory pri Federal Highway Association (FHWA) 2001. godine, s osnovnom namjenom za projektiranje kolnika i kolničkih ploča mostova na osnovi svojstava, odnosno za provjeru utjecaja sastava betona i opterećenja iz okoliša na uporabljivosti konstrukcija [26]. Prednost programa je mogućnost kontroliranja okolišnih uvjeta (temperatura, vlažnost, padaline, zasićenost) i svojstava betona (modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, površinska koncentracija sulfata, vlažnost betona, kapilarno upijanje), uz pretpostavku da je osnovni mehanizam prenosa vlage u betonu upravo kapilarno upijanje.

Djelovanje sulfatne korozije i izračunavanje uporabljivosti provodi se na način da se izračuna vrijeme potrebno za prodor kritične količine sulfata u beton kapilarnim putem, a koja je dovoljna da u reakciji s očvrnulom cementnom pastom (sastojcima hidratacije) nastane količina etringita potrebna za pojavu pukotina u betonu. Laboratorijska ispitivanja svojstva materijala i godišnja količina padalina osnovni su parametri za procjenu vremena pojave pukotina u zaštitnom sloju. Djelovanje sulfatne korozije opisuje se modelom razvijenim prema [27], gdje se kao osnovni mehanizam prenosa sulfatnih iona uzima kapilarno upijanje. Proračun se provodi prema jednadžbi:

$$X_{spall} = \frac{2\alpha\gamma_f(1-\nu)}{E(\beta C_E)^2} \quad (1)$$

gdje je:

C_E - koncentracija sulfata koji su sudjelovali u tvorbi etringita [mol/m³]

E - modul elastičnosti betona [GPa]

X_{spall} - dubina odlamanja betona [m]

α - faktor hrapavosti linije pukotine (uobičajena vrijednost 1)

β - linearna deformacije uslijed nastajanja 1 mola etringita m³/mol (uobičajena vrijednost 1,8 · 10⁻⁶)

γ_f - površinska energija loma betona [N/m]

ν - Poissonov koeficijent betona.

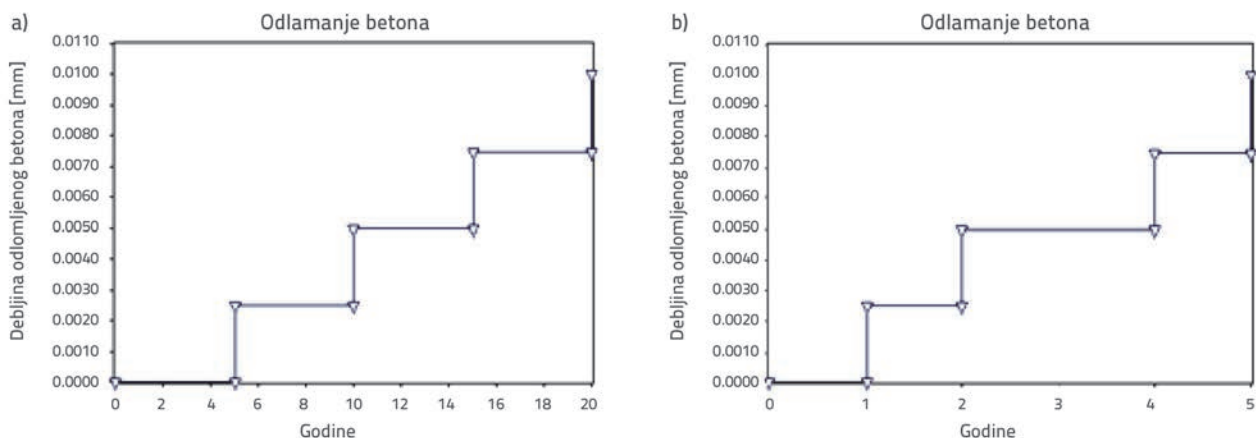
Osnovna pretpostavka modela jest da je neželjeno širenje i pojava pukotina u betonu posljedica formiranja etringita, a zbog rasta kristala etringita i posljedičnog razvoja napreznja koja premašuju vrijednost energije loma betona [28].

Deterministička analiza provedena je za tri glavne zone izloženosti: zonu zapljuskivanja, zonu plime i oseke te za zonu pod morem. Prilikom modeliranja napravljena je i simulacija "zdravog" betona, tj. neizloženog betona. Za obje simulacije provedeno je modeliranje pojave pukotina unutar jednog centimetra površinskog sloja betona. Za sve skupine izloženosti ulazni parametri su prikazani u tablici 6., a rezultat je vrijeme inicijacije pukotina u zaštitnom sloju. Primjer rezultata modeliranja za zonu plime i oseke prikazan je na slici 7.

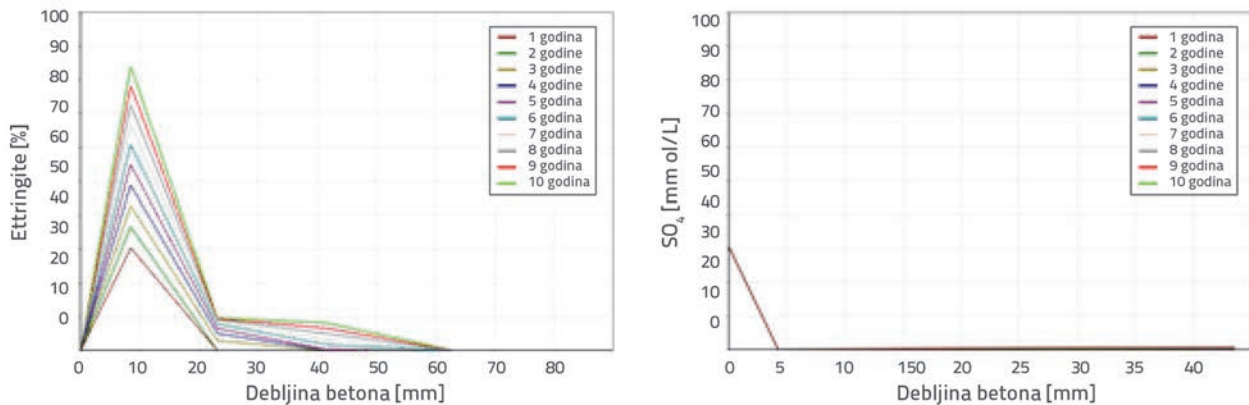
Modeliranjem je dobiveno da je do pojave pukotina u površinskom sloju kod "zdravog" betona došlo nakon 12 godina izloženosti bloka zapljuskivanju morskih valova, odnosno 20 godina za predmetne blokove izložene djelovanju plime i oseke. Također je provedeno modeliranje za slučaj ponovne upotrebe betonskih blokova u istim zonama izloženosti morskom okolišu iz čega slijedi da bi do pojave novih pukotina došlo znatno brže u odnosu na "zdravi" beton; 11 godina za blokove u zoni zapljuskivanja, odnosno za 5 do 9 godina u zoni plime i oseke.

5.2. Modeliranje ponašanja betona uz pomoć programskog paketa Stadium

Stadium je programski paket razvijen od strane SIMCO Technologies. Stadium pouzdano i točno predviđa trajanje betonskih konstrukcija izloženih agresivnim okolišima, poput morske vode, sulfatno bogatih tla ili soli za odmrzavanje [29].



Slika 7. Primjer rezultata modeliranja za zonu plime i oseke pomoću Conclife programa: a) vrijeme inicijacije pukotina u neizloženom betonu, b) vrijeme inicijacije pukotina u betonu izloženom djelovanju sulfata



Slika 8. Primjer rezultata modeliranja za zonu plime i oseke pomoću Stadium programa: a) količina klorida; b) količina sulfata

Potrebno je naglasiti da je tijekom ovog istraživanja korištena demoverzija programskog paketa STADIUM s prethodno definiranom bazom materijala i sastavima betona.

Deterministička analiza napravljena je za tri glavne zone izloženosti: zonu zapljuskivanja, zonu plime i oseke te za zonu pod morem. Za sve zone izloženosti ulazni podatci odabrani su iz dostupnih baza programskog paketa. Rezultat modeliranja jest količina tvari nakon 10 godina izlaganja morskom okolišu, a sve kako bi se odredio očekivani rizik od fizikalnih i kemijskih mehanizama degradacije (Friedelova sol, brucit, etringit, ioni magnezija i sulfata, ukupne količine klorida topljivih u kiselini) te usporedile modelirane vrijednosti s količinama dobivenih kemijskom analizom.

Rezultati dobiveni modeliranjem (slika 8.) upućuju na moguća značajnija oštećenja predmetnih blokova koji se nalaze u zoni zapljuskivanja i zoni plime i oseke (grupa 1 do 3). Nakon usporedbe rezultata modeliranja i provedenih terenskih i laboratorijskih ispitivanja (slike 5. do 8.), vidljivo je da se programski paket može pouzdano koristiti pri procjeni ocjene stanja betonskih konstrukcija, ali i u svrhu projektiranja betona na osnovi svojstava izloženih morskom okolišu.

6. Zaključak

Betonski blokovi obalnog zida terminala Brajdica bili su izloženi agresivnom djelovanju morskog okoliša više od 30 godina. U svrhu određivanja utjecaja morskog okoliša na svojstva betona, provedeno je opsežno ispitivanje mehaničkih (terenska i laboratorijska ispitivanja tlačne čvrstoće) i trajnosnih (plinopropusnost i kapilarno upijanje) svojstava te kemijska analiza betona.

Iz rezultata provedenih ispitivanja može se zaključiti da su osnovni mehanizmi degradacije betonskih blokova sljedeći:

1. Kristalizacija soli (fizikalno djelovanje)

- Najizloženija zona: zona zapljuskivanja, gdje je prisutna morska voda nošena valovima i vjetrom te dovoljna količina zraka;
- Mehanizam djelovanja: soli iz morske vode kristaliziraju te uzrokuju vlačna naprezanja u betonu;

- Posljedice: površinske pukotine, povećanje površinske propusnosti betona.

2. Sulfatna korozija i izluživanje sastojaka hidratacije (kemijsko djelovanje)

- Najizloženija zona: zona plime i oseke, gdje je prisutna manja količina klorida, a znatnija količina sulfata;
- Mehanizam djelovanja: sulfati reagiraju sa sastojcima hidratacije očvrstnule cementne paste pri čemu nastaje mineral etringit koji buja uzrokujući vlačna naprezanja u betonu. S obzirom na povećanu količinu CO_2 , aragonit se pretvara u kalcijev bikarbonat koji se potom izlužuje;
- Posljedice: površinske pukotine, povećanje površinske propusnosti betona. Međutim, prisutnost klorida iz morske vode ograničava ekspanzivno stvaranje etringita.

3. Školjkaši i morske trave (biološka djelovanja)

- Najizloženija zona: zona ispod razine mora, gdje je stalno prisutna morska voda, a beton je potpuno saturiran;
- Mehanizam djelovanja: školjkaši i morske trave u svom metabolizmu koriste sastojke hidratacije, razrahljuju beton te kroz njega buše sitne kanaliće;
- Posljedice: kanalići do dubine od 2 cm, povećanje površinske propusnosti betona.

Iz rezultata modeliranja budućeg ponašanja betonskih blokova programskim paketom Conclife dobiveno je da je uslijed djelovanja sulfata moguće očekivati ubrzano (oko 5 godina) propadanje površinskih slojeva betonskih blokova ako bi se te blokove vratilo na iste pozicije (jednako djelovanje morskog okoliša). Površinski slojevi betona (debljina do 5 cm) uslijed fizikalnih i kemijskih djelovanja imaju povećanu propusnost te količine klorida i sulfata koje premašuju dopuštene količine u nearmiranom betonu. Dijelovi betonskih blokova iza površinskog sloja od 5 cm mogu se tretirati kao "zdrav" beton, s obzirom na to da kod njih nisu pronađene značajnije količine klorida i sulfata te im je propusnost također srednje do dobre kvalitete. Programskim paketom Stadium potvrđene su izmjerene količine klorida i sulfata, te se zaključak temeljem

proračuna vremena pojave pukotina programskim paketom Conclife ovim potvrđuje.

Iz navedenoga se može zaključiti da se blokovi i dalje mogu koristiti u morskom okolišu, ali isključivo u zonama ispod razine mora gdje se opisani mehanizmi degradacije odvijaju ili vrlo sporo ili ih, zbog nedovoljne količine kisika, zapravo i nema.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je u sklopu projekta broj 082-0822161-2159, koji je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. Autori zahvaljuju i na potpori Lučke uprave Rijeke.

LITERATURA

- [1] Mehta, P.: *Concrete in the marine environment*. Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG11 8JU, England: Elsevier Science Publishers Ltd., 1991.
- [2] Rak, M., Krolo, J., Bartolac, M.: Testing and analysis of parameters for big arch bridges, *GRAĐEVINAR* 62 (2010) 10, pp. 913-920.
- [3] Carević, D., Lončar, G., Kuspilić, N.: Basic plan dimensions of marinas in Croatia, *GRAĐEVINAR* 66 (2014) 10, pp. 909-9015, <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.1110.2014>
- [4] Mehta, P., Monteiro, P.: *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
- [5] Bjegović, D., Stipanović Oslaković, I., Jelčić, M.: Degradacijski procesi (poglavlje), *Betonske konstrukcije - Sanacije*, Čandrić, Vinko (ur.). Zagreb, Secon HDGK, Andris, pp. 325-392, 2008.
- [6] Shifter, D.A.: Understanding material interactions in marine environments to promote extended structural life, *Corrosion Science* 47 (2005), pp. 2335-2352, <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2004.09.027>
- [7] Collepardi M.: *The new concrete*. 2nd ed. Italy: Grafiche Tintoretto; 2010.
- [8] Juracic, M.: *Geology of the sea. Sources and composition of sediments and seawater. Types of sediments in the seawater*. Department of Geology, Faculty of Science, University of Zagreb. 2008. (in Croatian)
- [9] Bjegović, D., Serdar, M., Cigrovski, I.: Review of microbial corrosion of concrete. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 38, 9; pp. 1741-1745, 2010.
- [10] Hrešić, D.: Bioerozija betona u morskoj sredini, *Annals of maritime studies* 29 (1991), pp. 437-450.
- [11] Beslač, J.: Regulativa u području građenja betonom, *Građevinar* 52 (2000) 4, pp. 209-215.
- [12] HRN EN 206:2014 Beton - 1. dio: Specifikacije, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206: 2014)
- [13] Bjegović, D., Serdar, M., Stipanović Oslaković, I.: Assessment of concrete properties in structures (Chapter), *Handbook of concrete durability*, Kim, S.-H., Ann, K. Y. (ur.). Korea : Middleton Publishing Inc, pp. 131-179, 2010.
- [14] Bjegović, D.: Durability design for reinforced concrete structures. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, V.M. Malhotra (ur.). ACI International, pp. 737-756, 2003.
- [15] DIN 1076:1999 Highway structures - Testing and inspection
- [16] Tehnički propis za betonske konstrukcije, NN 139/09, 14/10, 125/10, 136/12
- [17] HRN EN 12504-2:2012 Ispitivanje betona u konstrukcijama - 2. dio: Nerazarno ispitivanje - Određivanje veličine odskoka (EN 12504-2:20012)
- [18] HRN EN 12504-4:2004 Ispitivanje betona - 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa (EN 12504-4:2004)
- [19] HRN EN 12390-3:2009/Ispr.1:2012 Ispitivanje očvrsloga betona - 3.dio: Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka (EN 12390-3:2009/AC:2011)
- [20] HRN EN 13057:2003 Proizvodi i sustavi za zaštitu i popravak betonskih konstrukcija - Ispitne metode - Određivanje otpornosti na kapilarno upijanje (EN 13057:2002)
- [21] RILEM Technical Committee TC 116-PCD: Performance of Concrete as a Criterion of its Durability, *Recommendations, Materials and Structures*, 32, pp. 174-179, 1999.
- [22] HRN EN 196-2:2013 Metode ispitivanja cementa - 2. dio: Kemijska analiza cementa (EN 196-2:2013)
- [23] Biczok, I.: *Concrete corrosion, concrete protection*, Budapest: Akademiai Kiado. 1972.
- [24] Hrešić, D.: Korozija prednapetih armiranobetonskih elemenata, magisterij, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci, 2010.
- [25] Raupach, M., Reichling, K., Broomfield, J., Gulikers, J., Schneck, U., Serdar, M., Pepenar, I.: Inspection strategies for reinforcement corrosion surveys, *Materials and Corrosion*, 64 (2013) 2, pp. 111-115, <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201206627>
- [26] Bentz, D.P., Ehlen, M.A., Ferraris, C.F., Garboczi E.J.: Sorptivity-based service life predictions for concrete pavements, *7th International Conference on Concrete Pavements, Proceedings*, Volume 1, Orlando, Florida, USA, pp. 181-193, 2001.
- [27] Atkinson, A., Hearne, J.A.: Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters, *MRS Symposium Proceedings*, Vol. 176, pp.149-156, 1990.
- [28] NIST Engineering Laboratory, Publicly Available Computer Models, CONCLIFE Computer Program [Accessed 20 July 2010]. <http://ciks.cbt.nist.gov/phpct/cmml.html>
- [29] Stadium - A Simco solution [Accessed 08 August 2010]. <http://www.stadium-software.com/>