

PROUČEVANJE KOROZIJSKE ODPORNOSTI BETONOV

Boštjan Gerbec, univ.dipl.inž.kem.tehn.
Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.



Ključne besede: beton, kemijska korozija, propadanje, obstojnost

Povzetek:

Propadanje betonov je poleg subjektivnih napak pri projektiranju, proizvodnji in uporabi betona velikokrat tudi posledica delovanja različnih agresivnih vplivov iz okolja. Projektiranje korozijsko odpornih betonov zato temelji tudi na proučevanju kemijskih procesov, ki delujejo na beton škodljivo. Zelo agresivno na beton delujejo sulfati. Poleg magnezijevega sulfata zelo uničujoče na betone vpliva amonijev sulfat, ki je prisoten v komunalnih odpadnih vodah.

V prispevku je predstavljena metodologija določevanja korozijske odpornosti cementnega kamna. Predstavljeni so rezultati preiskave agresivnega delovanja odpadne vode na formiran cementni kamen, ki je vgrajen v armirano betonske elemente centralne čistilne naprave Ljubljana-Zalog.

Keywords: concrete, chemical attack, deterioration, durability

Abstract:

Deterioration of concrete is not only the consequence of subjective errors in its designing, production and application but in many cases also the result of various aggressive environmental effects. Designing of concrete resistance to chemical attack is therefore based on studies of chemical processes affecting it detrimentally. Sulphates are very aggressive to concrete. Besides magnesium sulphate, ammonium sulphate in municipal wastewater acts very destructively on concrete.

In this paper we present a methodology of determination of resistance of hardened cement pastes to chemical attack. Results of investigation show aggressive effects of wastewater on hydrated cement paste formed within reinforced concrete elements of the central wastewater treatment plant in Ljubljana-Zalog.

UVOD

Korozija betona je proces, pri katerem se spreminjajo kemijske, fizikalne in mineraloške značilnosti agregata in hidratiranega cementa – cementnega kamna. Posledica korozije, ki jo opredelimo tudi kot fizično in kemijsko delovanje na relaciji

beton-okolje, je degradacija materiala, ki se kaže kot poškodba strukture in poslabšanje mehanskih lastnosti betona.

Fizično korozijo najpogosteje povzročajo erozija, kavitacija, temperaturno delovanje oziroma izmenično zmrzovanje in odtaljevanje.

Kemijsko korozijo povzročajo kemijske reakcije betona z okoljem, pri čemer se spreminja struktura betona.

Projektiranje betona odpornega proti koroziji in posledično napovedovanje življenjske dobe betonskih objektov temelji na Eurocode 2 ENV 1992-1 in standardu SIST EN 206-1 oziroma na SIST 1026. Standard določa stopnje izpostavljenosti glede na delovanje okolja in hkrati priporoča (predpisuje) sestave betonov, ki so odporni na agresivne vplive, ki jih posamezne stopnje izopostavljenosti predstavljajo. Nekateri betonski tehnologi vidijo pomanjkljivost standarda v tem, da je potrebno dokazovanje odpornosti uporabljenega betona pred določenim agresivnim vplivom le v primeru, ko pride do odstopanja od predvidene oziroma priporočene sestave in trdnostnega razreda. (1,2,3)

Zato avtorji, kadar niso popolnoma prepričani o korozijski odpornosti betona, ki ga projektirajo, nemalokrat predpisujejo še dodatne varnostne oziroma zaščitne ukrepe, največkrat v smislu projektiranja višje trdnosti in boljše zmrzlinke odpornosti kot je potrebno ali pa v smislu predpisovanja dodatnih nebetonskih zaščitnih plasti kot so polimerne folije in premazi, ki se vgrajujejo v betonsko jedro ali na njegovo površino. Uporaba dodatnih zaščitnih plasti je velikokrat upravičena, predvsem v primerih zelo agresivnega okolja, na katerega cementni beton ni odporen. Včasih pa le poveča stroške izvedbe.

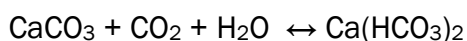
Obstojnost projektiranih betonov se v glavnem lahko napove še pred vgradnjo in eksploatacijo z dokazovanjem njihove korozijske odpornosti. Zato so na razpolago dokaj zanesljive in uveljavljene standardizirane metode za dokazovanje odpornosti proti fizikalno mehanskim vplivom (npr. v smislu dokazovanja predvidene trdnosti, abrazijske odpornosti, odpornosti na zmrzovanje-tajanje, odpornosti proti prodoru vode, odpornosti proti krčenju zaradi izsuševanja, odpornosti na temperaturno delovanje itd.). Manj pa so poznane in uveljavljene metode preskušanja korozijske odpornosti proti vplivom v kemijsko agresivnem okolju. Te temeljijo na ugotavljanju sprememb fizikalno mehanskih in kemijskih lastnosti betona po pospešenem intenzivnem obremenjevanju v agresivnem okolju s povečano koncentracijo snovi, ki na beton delujejo škodljivo (4,5,6,7).

1. KEMIJSKA KOROZIJA BETONA

Kemijska korozija je izmenjava snovi med betonom in okoljem, pri čemer poteče kemijska reakcija in ima za posledico močno spreminjanje lastnosti betona. Nastopi lahko na površini ali v njegovi notranjosti, kjer povzroči poškodbe cementnega kamna. Agresivno kemijsko okolje, ki ga standard SIST EN 206-1 povzema za talno vodo in zemljine, dejansko predstavljajo naravne in industrijske vode ali odplake ter onesnažen zrak (2,8).

Na podlagi poznavanja koncentracije agresivnih snovi v okolju in poznavanja sestave oziroma narave formiranega cementnega kamna, ki ga sestavljajo hidratirani cementni minerali, lahko napovemo vrsto kemijske korozije. Tako je na primer znano, da je kristalizirano apno v betonu vodotopno, zato se izlužuje. Ker je močna baza, prva vstopi v reaktivni stik s snovmi iz okolja. Prav tako je alkalna narava cementnega kamna vzrok za neobstoynost betonov v kislinah. Najbolj destruktivno vpliva na beton žveplena kislina. Povzročča razkrajanje silikat in aluminat hidratov, pri čemer nastaja sadra, ki povzročča nabrekanje. Kislinska korozija preide v sulfatno, kadar SO_2 v stiku z vlažnim betonom tvori H_2SO_3 . Kislina razjeda beton, pri tem nastali kalcijev sulfat pa oksidira v sulfat. Sulfatne vode v stiku z večjo vsebnostjo kalcijevih aluminat hidratov C_3AH_6 in C_4AH_{12} ter z apnom iz betona povzročajo kristalizacijo novih količin etringita in sadre, ki zaradi povečanja prostornine rušita kristalno strukturo v betonu. Kadar sta v vodi raztopljena magnezijev klorid (MgCl_2) in/ali magnezijev sulfat (MgSO_4), takoj reagirata z apnom iz betona. Pretvorba $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v skoraj netopni $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ima za posledico močno znižanje alkalnosti iz pH 12 na pH 10. Pri tako znižani alkalnosti se zmanjša stabilnost kalcijevih silikat in kalcijevih aluminat hidratov, ki začnejo razpadati. Pojav je znan kot magnezijeva korozija. (8)

Kadar magnezijevi ioni nastopajo v kombinaciji s sulfati je korozija bolj uničujoča, ker hkrati nastopa tudi sulfatna korozija. V prisotnosti večje količine kloridov, ki sicer povzročajo korozijo armaturnega železa, je vpliv sulfatov na beton šibkejši. Tvori se manj, zaradi povečanja prostornine, škodljivega etringita in kalcijevega sulfat dihidrata, ker sta v raztopini kloridov manj topna. Podobno povečana koncentracija v vodi prisotnih karbonatov povzroči znižanje vsebnosti etringita, ki se s karbonatom pretvori v slabo topen CaCO_3 , ki se nalaga v porah betona. Na betonskih konstrukcijah poleg sulfatov največ škode povzročča agresivna ogljikova kislina, ki nastane iz v vodi raztopljenega CO_2 . Raztaplja CaCO_3 v $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, kar povečuje trdoto vode. Reakcija poteka reverzibilno po enačbi:



Jasno je, da takrat, kadar sta v vodi raztopljena tako CO_2 kot $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, nastopi ravnovesje, pri katerem je voda stabilna oziroma neagresivna ne glede na stopnjo karbonatne trdote. Lahko pa voda celo z višjo karbonatno trdoto v primeru prebitne koncentracije CO_2 postane agresivna. Možno je tudi obratno, kadar voda izgubi del raztopljenega CO_2 in s koncentracijo $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ni več v ravnotežju. V tem primeru doseže ravnotežje tako, da se del $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ razkroji do ravnotežne koncentracije CO_2 . Pri tem se izloča CaCO_3 , kar preprosto imenujemo tudi pojav sige.(4)

Mehke vode brez CO_2 pa so neprimerno bolj škodljive kot trde, ker za stabiliziranje nizke trdote praktično ne potrebujejo prostega CO_2 . Ves raztopljen CO_2 je zato v agresivni obliki.

V naravnih vodah, je poleg $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, ki določa trdoto vode, smer vzpostavljanja ravnotežja odvisna tudi od koncentracije raztopljenih drugih soli. Tako

je v navzočnosti kloridov in sulfatov doseženo ravnovesje že pri nižji koncentraciji prostega CO₂. Njegova agresivnost je zato večja.

Soli šibkih baz (npr. NH₃) in močnih kislin (npr. H₂SO₄) so močno agresivne. Od organskih kislin, ki povzročajo kislinsko korozijo, pa sta najpogostejši očetna in mlečna kislina. Huminske kisline, tudi pri pH 4 ne povzročajo večje korozije, ker je kalcijev humat, ki nastane v cementnem kamnu, netopen.(8)

Značilno okolje, kjer se prepletajo skoraj vsi zgoraj navedeni procesi kemijske korozije, je morska voda. V naravnih in industrijskih vodah pa so poškodbe betonov največkrat posledica predvsem dveh prevladujočih procesov:

- izluževanja ali raztapljanja komponent, ki se tvorijo najprej na površini nato postopoma tudi globlje, ko proces napreduje navznoter – posledica je zmanjševanje mase.
- nabrekanja in pokanja, ki sta posledica tvorbe ekspanzivnih produktov nastalih pri reakciji s sulfati (6)

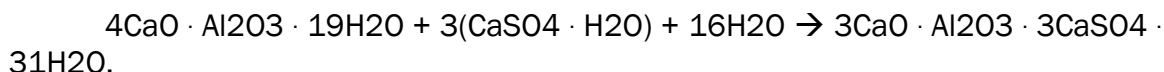
1.1. Sulfatna korozija

Sulfatna korozija je ena najpogostejših in najmočnejših korozij betona. Vpliv sulfatov se izkazuje v nabrekanju in pokanju betona, kar je posledica tvorbe ekspandirajočih produktov. Poleg magnezijevega sulfata zelo uničujoče vpliva na betone amonijev sulfat (NH₄)₂SO₄. Njegovo zelo agresivno delovanje na beton je najverjetneje povezano z naraščanjem topnosti kalcijevega sulfata v raztopini amonijevega sulfata. Tvori se dvojna sol CaSO₄ · (NH₄)₂SO₄ · H₂O.(6)

Korozija sulfatnih raztopin je v veliki meri odvisna od kemijske sestave oziroma njegove konstitucije. Glavni vzrok neobstoynosti betonov je tvorba kalcijevega sulfoaluminat hidrata – etringita iz hidratiranega trikalcijevega aluminata in sadre, ki nastaja iz sulfatov iz vode in apna v hidratiranem cementu. Reakcija med Na₂SO₄ in Ca(OH)₂, ki se sprošča pri hidrataciji cementa po enačbi:



Nastali CaSO₄ · 2H₂O dalje reagira s kalcijevim aluminat hidratom tvoreč manj topni kalcijev sulfoaluminat hidrat – etringit, ki zaradi povečanja volumna povzroča ekspanzijo betona. Reakcija poteka po enačbi:



Znano je, da so cementi z nizkim odstotkom C₃A komponente odpornejši proti koroziji sulfatov kot cementi z višjo vsebnostjo C₃A. Poleg količine C₃A je pomembna tudi oblika te komponente. Kristaliničen C₃A je bolj reaktiven od steklastega. V

določeni meri reagira s sulfati tudi C_4AF , medtem ko C_3S in C_2S v glavnem ne reagirata, a je bilo ugotovljeno, da visoka vsebnost C_3S komponente pri sulfatno odpornem cementu z nizkim odstotkom C_3A prav tako povzroča neodpornost cementa proti sulfatom.(6)

2. PRESKUŠANJE KOROZIJSKE ODPORNOSTI V KEMIJSKO AGRESIVNEM OKOLJU

Pri projektiranju korozijsko odpornih betonov se vedno soočimo z vprašanjem, na katero vrsto agresivnega vpliva naj bo beton odporen. Na podlagi izkušenj vemo, da so betonske poškodbe poleg subjektivnih napak največkrat posledica spleta več neugodnih okoliščin kot so na primer vpijanje vode zaradi pritiska podtalnice ali zaradi kapilarnega vsesavanja, pri čemer nastopi izluževanje apna, reakcije hidratiranih cementnih mineralov s sulfati in kloridi iz vodnih raztopin, karbonatizacija zaradi reakcije z ogljikovim dioksidom, itd..

Navzemanje betona s kloridi ali karbonatizacija za beton nimata nujno negativnih učinkov. Nasprotno, vemo, da velika koncentracija kloridov zavira sulfatno korozijo. Tvori se znatno manj sulfoaluminat hidrata in sulfat hidrata, ker sta v raztopini kloridov bolj topna. Prav tako nastajanje večje količine netopnega karbonata zaradi znižanja koncentracije Ca ionov preprečuje nastanek hidratiranega sulfoaluminata – etringita. (8)

2.1. Proučevanje korozijske odpornosti betonov na komunalno odpadno vodo centralne čistilne naprave Zalog (6)

2.2. Pristop k projektiranju betona

Stopnja poškodb betona zaradi korozije je odvisna od kakovosti oziroma vrste cementa, agregata, načina priprave in vgrajevanja betona. Največkrat je vzrok propadanja betona kemijska korozija hidratiranih cementnih mineralov oziroma formiranega cementnega kamna. Zaradi prisotnosti sulfatov v odpadni vodi CCN Zalog so bili betoni izdelani iz sulfatno odpornega cementa CEM I 42,5 N SR z manj kot 3 % C_3A .

Pomemben vpliv na propadanje armirano betonskih konstrukcij imata pora struktura betona in vsebnost kemijsko nevezane porne vode. Porna struktura betona določa njegovo propustnost na različne snovi, tudi vodo in kisik, ki sta potrebna za začetek kemijske reakcije z armaturnim železom. Pri večji količini porne vode, kadar je beton delno nasičen z vodo, je hitrost korozijskih procesov največja. Avtor projekta betona je zato pri načrtovanju sestave betonov uporabil kemijske dodatke za znižanje potrebne zamesne vode in za izboljšanje betonske porne mikrostrukture (superplastifikator –receptura 1 in kombinacija aeranta in plastifikatorja – receptura 2). Hkrati je beton projektiral z najvišjo stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV-III.

2.3. Preskušanje korozijske odpornosti

V vodah, kjer se pričakuje sulfatna korozija, se na podlagi dosedanjih izkušenj pri nas in v svetu za ugotavljanje korozijske odpornosti betonov uporabljajo metode, na osnovi katerih ugotavljamo spremembe formiranega cementnega kamna. Poleg metode, ki temelji na merjenju ekspanzije zaradi sulfatnega nabrekanja oziroma tvorbe etringita sta uveljavljeni Kindova metoda in t.i. hitra metoda po Koch – Steineggerju. Tudi ostale metode, ki so v bistvu le modifikacije navedenih, temeljijo na ugotavljanju odpornosti formiranega cementnega kamna v simuliranem časovnem obdobju po obremenjevanju v mediju. Korozijska odpornost je vedno določena s koeficientom (K_o) korozijske odpornosti, ki pomeni razmerje med upogibnimi trdnostmi vzorca, obremenjenega v določenem mediju po določenem času in upogibnimi trdnostmi kemijsko neobremenjenega etalonskega vzorca.

Za proučevanje korozije cementnega kamna na CČN Zalog smo vpeljali kombinacijo modificirane Kindove in Koch Steineggerjeve metode*. Cementni kamen smo v laboratoriju izdelali po enaki sestavi kot je bil formiran v betonski mešanici, vgrajeni v AB elemente CČN Ljubljana-Zalog. Vzorce strjenega cementnega kamna velikosti 1 x 1 x 6 cm smo negovali 7 dni na 100%-ni rel. vlagi in nato še 28 dni na zraku z rel. vlago 50%. Del prizmic smo še naprej negovali na zraku in v destilirani vodi (etalona), del pa smo jih obremenili z odpadno vodo iz čistilne naprave. Na podlagi rezultatov kemijske analize odpadne vode smo za simulacijo povečane agresivnosti odpadne vode povečali koncentracijo agresivnih ionov tako, da smo pripravili raztopine, ki so se med seboj razlikovale po koncentraciji agresivnih (sulfatnih) ionov oziroma po stopnji agresivnega delovanja na cementni kamen:

- destilirana voda,
- odpadna voda brez dodatnih agresivnih snovi,
- odpadna voda z dodanim amonijevim sulfatom in kalijevim nitratom v količini, ki predstavlja 10 x povečano koncentracijo agresivnih snovi (dodanega 0,5 % amonijevega sulfata in 0,018% kalijevega nitrata) v odpadni vodi glede na kemijsko analizo,
- odpadna voda z dodanim amonijevim sulfatom in kalijevim nitratom v količini, ki predstavlja 20 x povečano koncentracijo agresivnih snovi (dodanega 1,0 % amonijevega sulfata in 0,036% kalijevega nitrata) v odpadni vodi glede na kemijsko analizo,
- odpadna voda z dodanim amonijevim sulfatom in kalijevim nitratom v količini, ki predstavlja 40 x povečano koncentracijo agresivnih snovi (dodanega 2,0 % amonijevega sulfata in 0,072% kalijevega nitrata) v odpadni vodi glede na kemijsko analizo.

Odpadna voda je vsebovala za cementni kamen korozivne substance kot so $\text{NH}_4\text{-N} = 12,4 \text{ mg/l}$, $\text{NO}_3\text{-N} < 1 \text{ mg/l}$ in sulfat = $27,8 \text{ mg/l}$ pri pH vrednosti 7,0. Odpadno vodo smo tako koncentrirali z navedenimi snovmi, pri čemer smo amonijeve in sulfatne ione dodali v obliki agresivnega amonijevega sulfata. Odpadno vodo in odpadno vodo s povečanimi koncentracijami agresivnih snovi smo vzdrževali

na pH = 7,0 tako, da smo jo ves čas trajanja preiskave titrirali z 2N žveplovo VI kislino. Na ta način smo zagotovili, da je bila vsebnost sulfatnih ionov ves čas preiskave v pribitku.

S tem ko smo izgubo sulfata v raztopini nadomeščali s titracijo z žveplovo VI kislino, smo istočasno tudi vzpostavili stalno enake pogoje, ki jim je izpostavljen preiskovani cementni kamen. S kontrolo navzemanja sulfata v raztopini ugotovimo sposobnost reagiranja cementnega kamna (hidrata) z raztopino sulfata. Sulfatni ioni difundirajo v otrdeli cementni kamen in reagirajo s cementnimi hidrati, pri čemer nastaja etringit $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$.

Pri reakciji sproščeni hidroksilni ioni OH^\ominus reagirajo s H_2SO_4 , ki jo dodajamo pri titraciji raztopin odpadnih vod glede na porast pH zaradi sproščanja OH^\ominus iz cementnega kamna. Nastanek etringita, kot vemo, spremlja močno povečanje volumna, ki povzroča propadanje betona oz. njegovega cementnega kamna. Razen poškodb zaradi povečanja volumna, znižuje tudi trdnost, s tem ko zrahlja strukturo in pri tem prekinja povezavo med hidrati cementa. Novotvorba ima za posledico nastanek razpok in s tem povečan difuzijski presek, kar pospeši in poveča navzemanje sulfata.

Preiskavo korozijske odpornosti cementnega kamna v odpadni vodi z večkrat povečano koncentracijo agresivnih snovi smo izvedli predvsem v smislu ugotavljanja sulfatne korozijske, pri čemer smo po 14, 28 in 56 dnevem ter 6 mesečnem obremenjevanju proučevali vzorce cementnega kamna po negi v različnih medijih na podlagi:

- zunanjšega izgleda vzorcev,
- razvoja upogibnih trdnosti,
- spremembe mas vzorcev.

Pri preiskavi sta bila etalonska primerjalna medija destilirana voda in zrak, ki smo ju izbrali predvsem zato, ker ne vsebujeta korozijsko agresivnih sulfatov, katerih vpliv smo sicer preiskovali.

2.4. Ocenjevanje korozijske odpornosti betona

Cementni kamen, ki je bil izdelan na osnovi 2 receptur za beton, smo ocenili kot korozijsko obstojen ker:

- s časom ni bilo zaznati spremembe poroznosti vzorca niti na površini niti v prerezu,
- s časom ni bilo zaznati spremembe dimenzij vzorca,
- je izkazoval stalen prirast upogibnih trdnosti v 6 mesečnem obdobju (upoštevajoč Kindovo metodo*),

* Po Kindovi metodi je merilo za stopnjo korozijske odpornosti koeficient odpornosti KO(6) po 6 mesečni negi vzorcev v agresivnem (preiskovanem) mediju za razliko od Koch – Steineggerjeve metode, pri kateri je čas agresivnega tretmaja 56 dni oziroma 2 meseca, tako da koeficient korozijske odpornosti označimo s KO(2)

- je znašal koeficient odpornosti $KO(2)^*$ glede na etalon $> 0,9$ (v smislu dosedanjih izsledkov podobnih raziskovalnih nalog ZRMK po vpeljani Koch Steineggerjevi metodi*),
- je znašal koeficient odpornosti $KO(6)^*$ glede na etalon $> 0,8$ (po Kindovi metodi*),
- ni bilo zaznati padca upogibne trdnosti po 6 mesečni negi v medijih,
- s časom ni bilo zaznati spremembe mase vzorcev.

Na vzorcih, ki so bili obremenjeni 40 x povečano koncentracijo agresivnih snovi v odpadni vodi, smo zaznali komaj opazno ekspanzijo in izločanje soli na površini vzorcev. Sama ekspanzija kot posledica tvorbe etringita, zaradi nizke koncentracije aluminatnih ionov v cementu bistveno ne ogroža strukture formiranega cementnega kamna, kar je razvidno tako iz vizualnega pregleda poroznosti kot tudi rezultatov meritev globine karbonatizacije in upogibnih trdnosti.



Slika št.1: Izgled vzorcev cementnega kamna po 6 mesečnem obremenjevanju v medijih

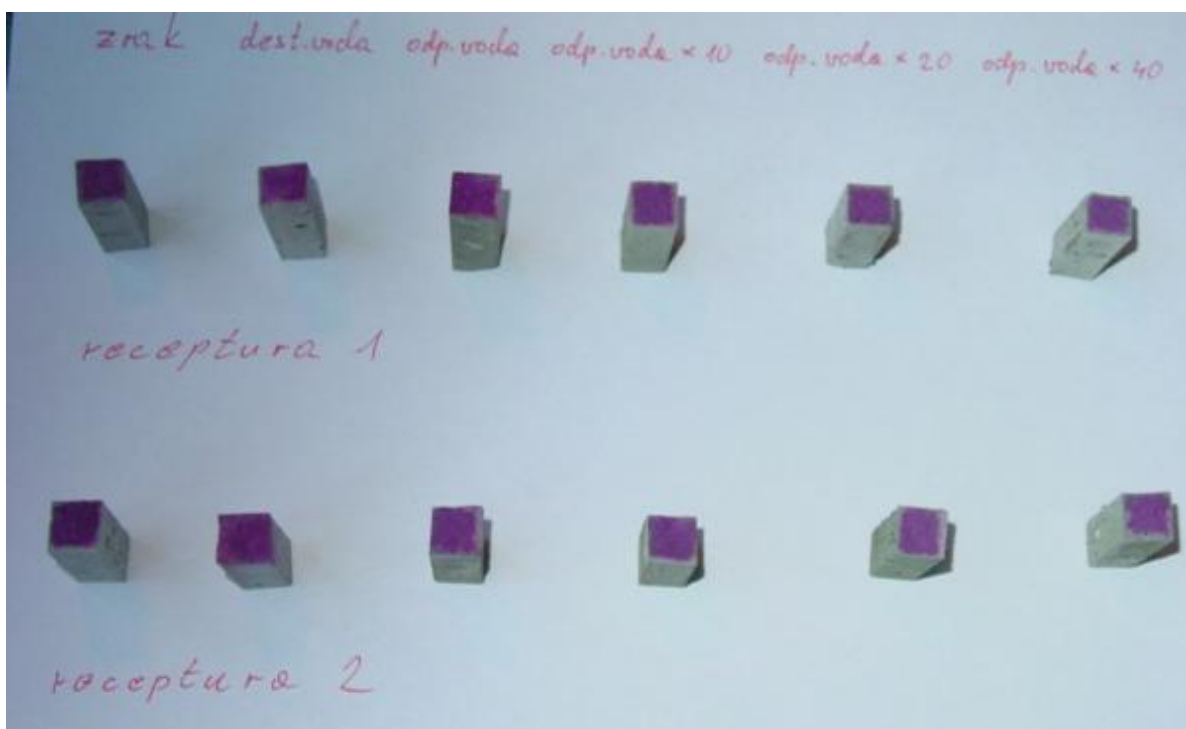
Zelena obarvanost vzorcev v odpadni vodi in v odpadni vodi s povečano koncentracijo amonijevih, nitratnih in sulfatnih ionov, je verjetno posledica tvorbe dvojne soli $\text{CaSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, ki po rezultatih preiskave sodeč ne vpliva destruktivno na preiskan cementni kamen.

(Kind.V.V: »Korozija cementa i betona u hidrotehničkim objektima«, 1959 in Koch A., Steinegger H.: »Ein Schnell – prüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff«, ZKG, zv.7, 1960)



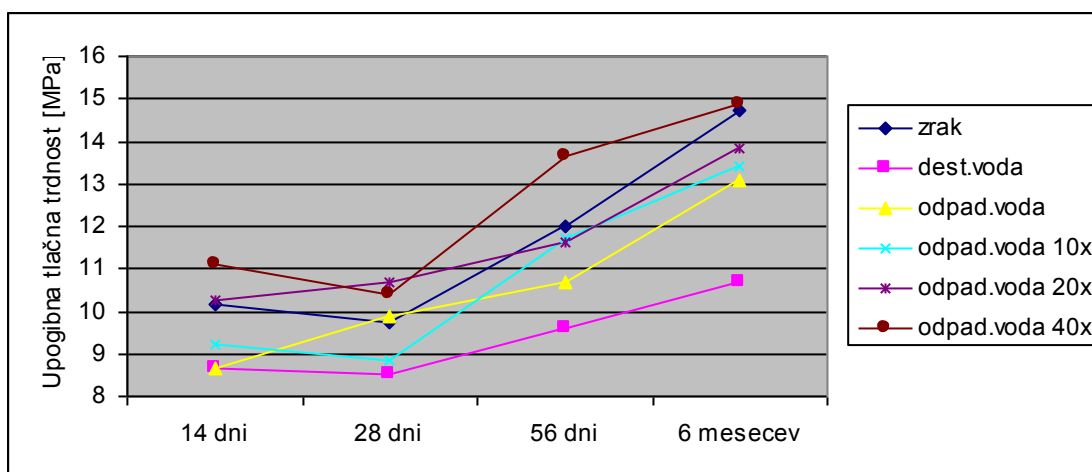
Slika št.2: Obremenjevanje vzorcev cementnega kamna v medijih

Globino karbonatizacije v cementnem kamnu smo izmerili na podlagi obarvanosti raztopine fenolftaleina na prelomni površini preskušanca. Indikator se pri prehodu v alkalno območje betona pri pH 9,5 obarva viločno. Globina karbonatizacije z znižanjem alkalnosti pod pH 9,5 je po 6 mesečnem obremenjevanju v medijih na vseh preiskanih vzorcih nizka in v nobenem primeru ne presega 2 mm. Cementni kamen po obremenjevanju praktično ohrani visoko pH vrednost, kar pomeni, da nudi ustrezno alkalno zaščito pred morebitno korozijo armaturnega železa.

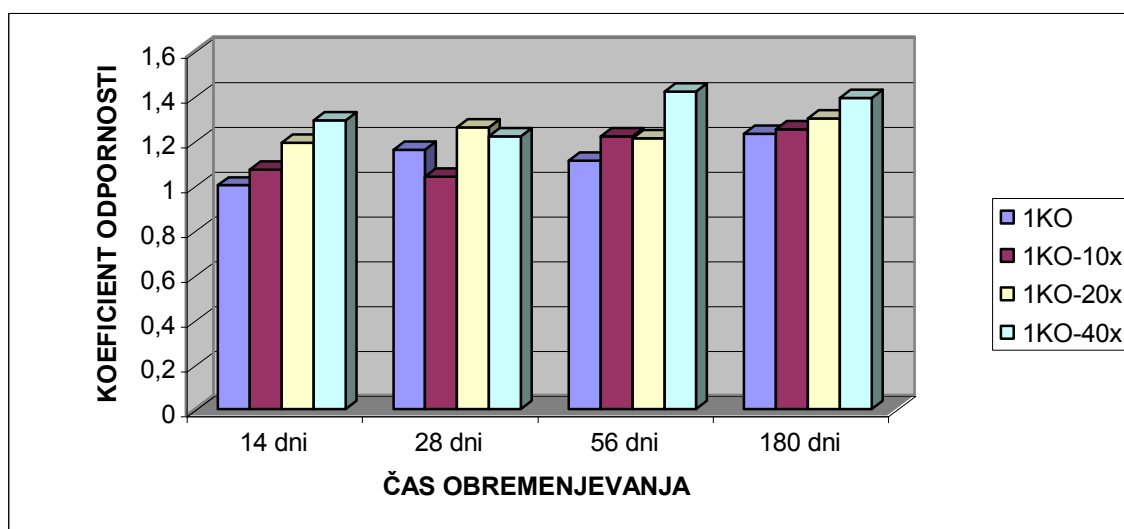


Slika št.3: Globina karbonatizacije oziroma padca alkalnosti pod pH 9,5 na vzorcih cem. kamna po 6 mesečnem obremenjevanju v medijih.

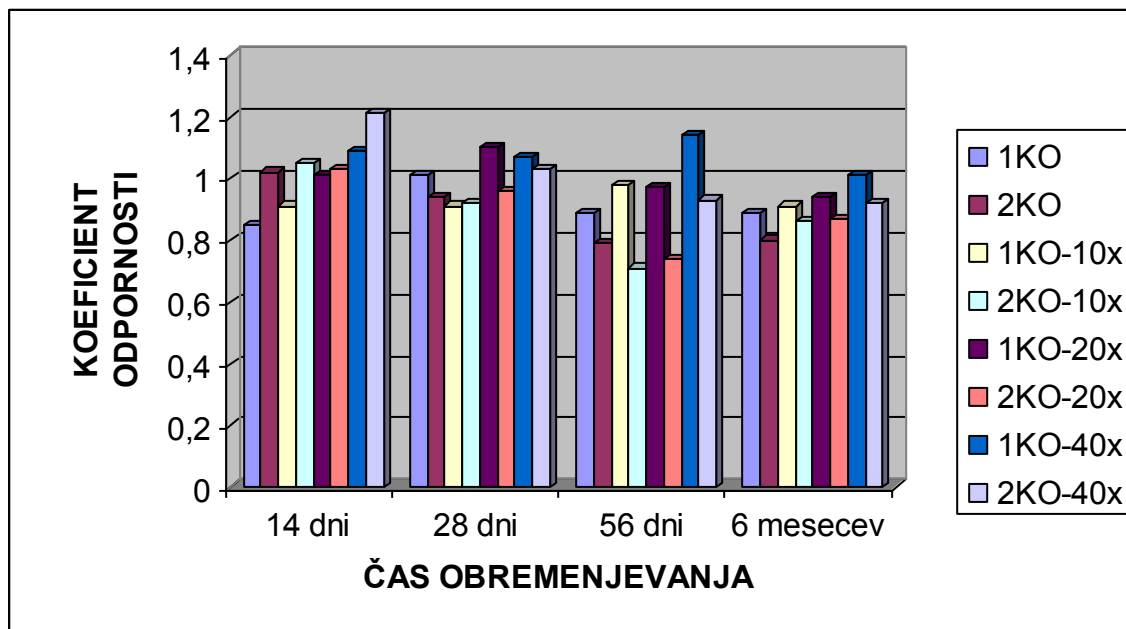
Proces sulfatne korozije cementnega kamna se konča v razdobju med 28 in 56 dni izpostavljenosti korozivnemu delovanju medijev, kar utemeljujemo z zaznavno rastjo upogibnih trdnosti ne glede na vrsto medija (slika št.5) in z rastjo koeficienta kor.odpornosti glede na destilirano vodo v navedenem razdobju (slika št.6). Koeficient korozijske odpornosti glede na zrak je za recepturo 2 nekoliko nižji kot za recepturo 1 (slika št.7), kar pripisujemo predvsem bolj porozni in manj gosti betonski mikrostrukturi, ki je nastala zaradi uporabe aeranta (pri recepturi 2) namesto superplastifikatorja (pri recepturi 1). Tudi globina karbonatizacije je zato v primeru cementnega kamna po recepturi 2 nekoliko večja.



Slika št.5: Časovni prirast trdnosti vzorcev po recepturi 1 pri različni obremenitvi



Slika št.6: Koeficienti odpornosti za recepturo 1 glede na destilirano vodo



Slika št.7: Primerjava koeficienta odpornosti cementnega kamna po recepturah 1 in 2 glede na zrak

Legenda slik št. 6 in 7:

Receptura 1:

- 1KO koeficient odpornosti v odpadni vodi
 1KO-10x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 10 x povečano konc. agresivnih ionov
 1KO-20x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 20 x povečano konc. agresivnih ionov
 1KO-40x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 40 x povečano konc. agresivnih ionov

Receptura 2:

- 2KO koeficient odpornosti v odpadni vodi
 2KO-10x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 10 x povečano konc. agresivnih ionov
 2KO-20x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 20 x povečano konc. agresivnih ionov
 2KO-40x, koeficient odpornosti v odpadni vodi z 40 x povečano konc. agresivnih ionov

Meritve mas vzorcev so pokazale ves čas preiskave konstantno težo, kar nas napeljuje na oceno, da preiskani cementni kamen ni podvržen bistvenim difuzijskim procesom. Tudi v primeru obremenjevanja s 40 x povečano koncentracijo agresivnih ionov, ko smo po 6 mesečnem obremenjevanju na površini vzorcev zasledili izločanje soli, nismo zaznali bistvene spremembe teže.

Na podlagi rezultatov preiskave kemijske korozije smo ob pozitivnih rezultatih tekoče kontrole odpornosti proti prodoru vode ocenili, da so betoni in AB konstrukcije, katerih gradnik je preiskani cementni kamen, korozijsko obstojni ob predpostavki dovolj kakovostne vgradnje in nege betona. Zato smo predlagali, da se po končani negi betona, temeljito pregleda vse betonske površine, ki so podvržene potencialni agresiji odpadne vode, pri čemer je potrebno evidentirati:

- območja razpok in lasastih razpok,
- območja površinske odprte poroznosti,
- območja segregacije oziroma vidnega medzrnskega prostora,
- območja luščenja cementne skorjice,
- območja morebitne nezadostne krovne plasti betona nad armaturo,
- ali katerekoli druge poškodbe betonske površine.

V delu nivoja vodne gladine je tveganje za korozijo armaturnega železa v betonu največje. Z večanjem oddaljenosti od nivoja v potopljeni del betona verjetnost korozije hitro pada, kar je posledica majhne koncentracije kisika v vodi in počasne difuzije skozi nasičen beton.(9)

Za navedena območja in za potencialna korozijska žarišča kot so delovni oziroma dilatacijski stiki ter območje nivoja vode, kjer deluje fizična korozija, smo predlagali izdelavo tehnoloških rešitev varnostnih oziroma zaščitnih ukrepov, sicer pa smo bili mnenja, da betonskih površin ni potrebno dodatno zaščititi pred vplivom delovanja odpadne vode.

3. LITERATURA

1. Eurocode 2 ENV 1992-1-1: Design of Concrete Structures – Part1, General Rules and Rules for buildings, 1991
2. SIST EN 206-1, 2003: Beton-1.del - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, 2003
3. SIST 1026, 2003: Beton-1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1
4. Koch A., Steinegger H.: Ein Schnell – prüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff, ZKG, zv.7, 1960, str.317-324
5. Dimic D.: Študij odpornosti različnih vrst cementov proti vplivu sulfatov, magistrsko delo,1972
6. Gerbec B.: Zaključno mnenje o korozijski odpornosti cementnega kamna, ki je vgrajen v AB elemente CČN Ljubljana Zalog – II.faza, št.DN 2000235/03, GI ZRMK d.o.o., 2004

7. Maultzsch M., Dimic, Šuput, J.: Effect of admixtures on the sulphate resistance of concrete. In:1st slovene German Seminar on Joint Projects in materials Science and Technology: Portorož, 1994
8. Kavčič J.: Pogoji in vzroki nastanka korozije betona iz portland cementa, Zbornik razprav ZRMK, 1961, str.3-16