

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Rot, F., 2013. Stopnje izpostavljenosti kot izhodišče za določitev karakteristik betona AB konstrukcijskih elementov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentor Cotič, Z.): 67 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Rot, F., 2013. Stopnje izpostavljenosti kot izhodišče za določitev karakteristik betona AB konstrukcijskih elementov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Cotič, Z.): 67 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

FLORIJAN ROT

**STOPNJE IZPOSTAVLJENOSTI KOT IZHODIŠČE ZA
DOLOČITEV KARAKTERISTIK BETONA AB
KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV**

Diplomska naloga št.: 3335/KS

**EXPOSURE CLASSES AS A STARTING POINT FOR
DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF RC
STRUCTURAL ELEMENTS**

Graduation thesis No.: 3335/KS

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

Zvonko Cotič

Član komisije:

prof. dr. Janez Žmavc

doc. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 24. 10. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Florijan Rot izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Stopnje izpostavljenosti kot izhodišče za določitev karakteristik betona AB konstrukcijskih elementov«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 11.10.2013

Florijan Rot

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.07:691.3(497.4)(043.2)
Avtor:	Florijan Rot
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Somentor:	Zvonko Cotič, dipl. inž. grad.
Naslov:	Stopnje izpostavljenosti kot izhodišče za določitev karakteristik betona AB konstrukcijskih elementov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	67 str., 45. sl., 7 pregl.
Ključne besede:	agresivno okolje, beton, karbonatizacija, korozija, stopnje izpostavljenosti, trajnost

Izveček:

Konstrukcije je potrebno projektirati tako, da zadostijo vsem zahtevam v zvezi z nosilnostjo, uporabnostjo in stabilnostjo v celotni projektni življenjski dobi. Zato morajo biti dovolj trajne, kar pa zagotovimo tudi s pravilno oceno agresivnih vplivov, ki so jim podvržene. Pri tem si pomagamo s stopnjami izpostavljenosti. Te obravnavata standarda SIST EN 206-1 in SIST 1026. V teh dveh standardih so opisane stopnje izpostavljenosti ter z njimi povezane zahteve in priporočila pri projektiranju betona, ki smo jih zbrali v enem izmed poglavij. V nadaljevanju smo predstavili agresivne vplive, zaradi katerih pride do propadanja armirano betonskih konstrukcijskih elementov ter procese, ki pri tem potekajo. Za lažjo predstavo o tem, kako izbrati primerne stopnje izpostavljenosti, smo pripravili tudi nekaj primerov konstrukcij. Za njihove konstrukcijske elemente smo nato določili parametre za pripravo betonskih mešanic. V zadnjem poglavju so predstavljeni rezultati eksperimentalnega dela, pri katerem smo želeli ugotoviti, kakšno nevarnost za konstrukcije dejansko predstavlja proces karbonatizacije. V ta namen smo v Lažah in v Velenju odvzeli 18 betonskih vzorcev, na katerih smo s pomočjo preizkusa s fenolftaleinom izmerili globino, do katere je prodrl proces karbonatizacije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDK: 624.07:691.3(497.4)(043.2)
Author: Florijan Rot
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor: Zvonko Cotič, B.Sc
Title: Exposure classes as a starting point for determining the characteristics of the concrete of structural elements
Document type: Graduation Thesis – University studies
Notes: 67 p., 45. fig., 7 tab.
Key words: aggressive environment, concrete, carbonation, corrosion, exposure classes, sustainability

Abstract:

Structures must be designed in such manner that they meet all requirements related to strength, stability and serviceability throughout their lifetime. Therefore, they must be durable enough. This is provided with proper evaluation of the aggressive influences that affect them. For that reason, we use exposure classes described in SIST EN 206-1 and SIST 1026. These standards describe the levels of exposure, as well as requirements and recommendations for the design of concrete related to them. They are gathered in one of the chapters. Further on, we describe aggressive influences, resulting in the deterioration of concrete elements, and the respective processes. To show how to choose the appropriate exposure classes, we also prepared a few examples of structures. For their structural elements, we determined parameters for the preparation of concrete mixtures. In the last chapter we present the results of experimental work aimed at determining how much risk the process of carbonation represents to the structures. For that purpose, we took 18 concrete samples from different locations in Laže and Velenje. Then we made tests with phenolphthalein to measure the depth of carbonation.

ZAHVALA

Za pomoč pri izdelavi diplomske naloge, bi se rad zahvalil mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov ter somentorju Zvonku Cotiču, dipl. inž. grad. Prav tako bi se za pomoč pri terenskih preiskavah zahvalil Franciju Čeponu.

Navsezadnje pa bi se zahvalil svoji družini in prijateljem, ki so me v vseh letih študija spodbujali in podpirali.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
2 STOPNJE IZPOSTAVLJENOSTI V EN 206-1 IN SIST 1026	3
2.1 Stopnje izpostavljenosti glede na delovanje okolja	4
2.2 Temeljne zahteve za osnovne materiale in za sestavo betona	11
2.3 Zahteve v zvezi s stopnjami izpostavljenosti	12
3 PROCESI PROPADANJA BETONA ZARADI AGRESIVNIH VPLIVOV OKOLJA	19
3.1 Korozija jekla v betonu	19
3.1.1 Karbonatizacija – razred izpostavljenosti (XC)	22
3.1.2 Korozija zaradi kloridov – razreda izpostavljenosti (XD in XS)	24
3.2 Fizikalni procesi propadanja	24
3.2.1 Propadanje materialov s cementnim vezivom zaradi zmrzovanja in tajanja (XF1, XF3)	24
3.2.2 Zmrzovanje-tajanje v prisotnosti soli (XF2, XF4)	25
3.2.3 Kristalizacija soli v porah	26
3.3 Kemijski procesi propadanja – korozija betona (XA)	27
3.3.1 Hidroliza produktov hidratacije cementa in izluževanje	27
3.3.2 Reakcije, pri katerih pride do menjave kationov	28
3.3.2.1 Oblikovanje topnih kalcijevih soli	28
3.3.2.2 Oblikovanje netopnih in neekspanzijskih kalcijevih soli	29
3.3.2.3 Kemični napad z raztopinami, ki vsebujejo magnezijeve soli	29
3.3.3 Reakcije, pri katerih se oblikujejo ekspanzivni produkti	29
3.3.4 Zunanji sulfatni napad	30
3.3.4.1 Zapoznelo oblikovanje etringita	31
3.3.4.2 Taumazitna oblika sulfatnega napada	32
3.3.5 Alkalno-agregatna reakcija	32

3.4 Mehanski vplivi (XM)	33
3.5 Biološki procesi propadanja	34
4 PRIMERI IZBIRE STOPENJ IZPOSTAVLJENOSTI	36
5 EKSPERIMENTALNI DEL	53
6 ZAKLJUČEK	64
VIRI	66
OSTALI VIRI	67

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Razredi in stopnje izpostavljenosti</i>	4
<i>Preglednica 2: Mejne vrednosti za stopnje izpostavljenosti pri kemičnem delovanju naravnih zemljin in talne vode</i>	10
<i>Preglednica 3: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenost</i>	14
<i>Preglednica 4: Priporočene mejne vrednosti za sestavo in lastnosti betona</i>	17
<i>Preglednica 5: Uporabnost cementov po SIST EN 197-1 za proizvodnjo betonov, skladnih s SIST EN 206-1</i>	18
<i>Preglednica 6: Priporočene vrednosti za sestavo betonov pri določenih stopnjah izpostavljenosti</i>	51
<i>Preglednica 7: Globina karbonatizacije pri vzorcih</i>	61

KAZALO SLIK

SLIKA 1: ODNOSI MED EN 206 IN STANDARDI ZA PROJEKTIRANJE IN IZVEDBO, STANDARDI ZA OSNOVNE MATERIALE IN STANDARDI ZA PRESKUSE (kSIST FprEN 206:2013, str. 5)	3
SLIKA 2: PRIMER KOROZIJE ARMATURE NA CESTNEM MOSTU	20
SLIKA 3: PROSTORNINA RAZLIČNIH PRODUKTOV KOROZIJE (http://www.scielo.org.za/img/revistas/jsaice/v54n2/09f02.jpg)	21
SLIKA 4: KOROZIJA ARMATURE V BETONU (http://pavemaintenance.wikispaces.com/Carbonation+of+Concrete+-+Dahee)	22
SLIKA 5: PREIZKUS GLOBINE KARBONATIZACIJE V BETONU	23
SLIKA 6: POSLEDICE KONTINUIRNE KRISTALIZAIJE SOLI NA STROPU CESTNEGA PODHODA	27
SLIKA 7: OBRABA BETONSKEGA VOZIŠČA	34
SLIKA 8: NASTANEK MAHU IN LIŠAJEV, NAJVERJETNEJE KOT POSLEDICA KARBONATIZCIJE BETONA	35
SLIKA 9: STANOVANJSKA HIŠA V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	37
SLIKA 10: VEČNADSTROPNI POSLOVNO-STANOVANJSKI OBJEKT V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	39
SLIKA 11: PREČNI PREREZ PROMETNO MOČNO OBREMENJENEGA PREMOSITITVENEGA OBJEKTA S PODPORN KONSTRUKCIJO IZPOSTAVLJENO ŠKROPLJENJU SLANICE	41
SLIKA 12: VZDOLŽNI PREREZ PREMOSITITVENEGA OBJEKTA NAD VODOTOKOM	42
SLIKA 13: PREČNI PROFIL PROMETNO MANJ OBREMENJENE LOKALNE CESTE	44
SLIKA 14: GARAŽNA HIŠA V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	45
SLIKA 15: SKLADIŠČE NENEVARNIH SNOVI, V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR, S TLAKI OBREMENJENIMI Z MOČNO MEHANSKO OBREMENITVIJO	46
SLIKA 16: KMETIJSKI OBJEKT V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	47
SLIKA 17: PLAVALNI BAZEN V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	48
SLIKA 18: INDUSTRIJSKI BAZEN V KRAJIH OBIČAJNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	49
SLIKA 19: POMOL V KRAJIH ZMERNIH ZIMSKIH TEMPERATUR	50
SLIKA 20: VRTALNA GARNITURA	53
SLIKA 21: VZOREC	53
SLIKA 22: PORUŠITEV VALJEV	54
SLIKA 23: ODVZEM VZORCEV 1 IN 2	54
SLIKA 24: VZOREC 1	54
SLIKA 25: LOKACIJA ODVZEMA VZORCEV 3 IN 4	55
SLIKA 26: VZOREC ŠTEVILKA 4	55
SLIKA 27: LOKACIJA VZORCEV 5 IN 6	56
SLIKA 28: VZOREC ŠTEVILKA 5	56
SLIKA 29: LOKACIJA ODVZEMA VZORCA ŠTEVILKA 7	56
SLIKA 30: VZOREC ŠTEVILKA 7	56
SLIKA 31: LOKACIJA VZORCEV ŠTEVILKA 8 IN 9	57
SLIKA 32: VZOREC ŠTEVILKA 8	57
SLIKA 33: LOKACIJA ODVZEMA VZORCA 10	58
SLIKA 34: VZOREC ŠTEVILKA 10	58
SLIKA 35: LOKACIJA ODVZEMA VZORCA ŠTEVILKA 11	58
SLIKA 36: VZOREC ŠTEVILKA 11	58
SLIKA 37: LOKACIJA ODVZEMA VZORCA ŠTEVILKA 12	59
SLIKA 38: VZOREC ŠTEVILKA 12	59
SLIKA 39: ODVZEM VZORCA ŠTEVILKA 13	60
SLIKA 40: VZOREC ŠTEVILKA 13	60

SLIKA 41: LOKACIJA VZORCA ŠTEVILKA 14	60
SLIKA 42: VZOREC ŠTEVILKA 14	60
SLIKA 43: LOKACIJA ODVZEMA VZORCEV ŠTEVILKA 15, 16, 17 IN 18	62
SLIKA 44: VZOREC ŠTEVILKA 15	62
SLIKA 45: VZOREC ŠTEVILKA 17	62

1 UVOD

V standardu SIST EN 1990 je določeno, da je treba konstrukcijo projektirati in izvesti tako, da »bo v predvideni življenjski dobi s potrebno zanesljivostjo in ob primernih stroških prenašala vse vplive med gradnjo in uporabo ter bo lahko služila svojemu namenu. Konstrukcijo je treba projektirati tako, da bo dovolj konstrukcijsko odporna, uporabna in trajna (SIST EN 1990)«.

Trajnost betona in betonskih konstrukcij omenja tudi SIST EN 1992-1-1 ki določa, da »mora trajna konstrukcija v celotni projektni življenjski dobi zadoščati zahtevam po nosilnosti, uporabnosti in stabilnosti, brez občutne izgube funkcionalnosti in pretiranega nepredvidenega vzdrževanja (SIST EN 1992-1-1)«. Pri betonskih objektih trajnost zagotovimo s pravilnim projektiranjem in s kakovostno izvedbo gradnje. Pomembno je, da lastnosti vgrajenih materialov dosegajo projektirane vrednosti in da so ti materiali pravilno vgrajeni v konstrukcijo. Seveda pa moramo biti pozorni tudi na samo oblikovanje objekta, tako da je ta čim manj izpostavljen agresivnim vplivom. Ker beton uporabljamo v najrazličnejših okoljih in ga izpostavljam različnim klimatskim razmeram, agresivnim medijem ter mehanskim poškodbam, je njegova obstojnost odvisna od mnogih fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov. Posledice večine teh procesov so pri propadanju materiala precej podobne. Glavni sta zmanjševanje mehanskih lastnosti ter vidne poškodbe v strukturi materiala. Propadanje materiala se praviloma najprej pojavi na površini, kjer pride do stika med materialom in okoljem, in se nato širi v notranjost. Zato je za oviranje rasti poškodb ena od zelo pomembnih lastnosti betona dobra odpornost proti prodoru vode, saj je »večina procesov propadanja betona v agresivnih okoljih povezana s penetrabilnostjo njegove strukture za pline in tekočine (Žnidarič, 2009)«. Prepustnost je odvisna od velikosti, razporeditve in povezanosti por, in je ne smemo zamenjati s poroznostjo. Faktorjev, s katerimi lahko vplivamo na prepustnost betona je precej, glavni med njimi pa so:

- kvaliteta cementa in agregata,
- količina cementa v mešanici,
- vodo-cementno razmerje,
- stopnja hidratacije,
- kvaliteta povezave med cementnim kamnom in agregatom,
- stopnja zgoščenosti betona,
- prisotnost razpok,
- kvaliteta nege betona,

- karakteristike morebitnih dodatkov (Perkins, 1986).

Na nekatere zgoraj naštetih faktorje v fazi projektiranja ne moremo vplivati, saj so odvisni od kvalitete vgradnje ter od kontrole kakovosti. Nekatere, kot na primer kvaliteto cementa in agregata, količino cementa v mešanici ali vodo-cementno razmerje, pa lahko predpišemo že pri projektiranju betonske mešanice. Za določitev teh parametrov je na prvem mestu potrebna pravilna izbira stopenj izpostavljenosti glede na agresivno delovanje okolja, ki predstavlja osnovo za projektiranje betonske mešanice. Tema diplomske naloge zajema prav izbiro teh stopenj izpostavljenosti ter njihov vpliv na projektiranje betonskih konstrukcij.

Na začetku bomo predstavili standarda EN 206-1 in SIST 1026, predvsem tiste njune dele, ki se tičejo izbire stopenj izpostavljenosti in z njihovo izbiro povezanih parametrov za sestavo betonske mešanice ter lastnosti osnovnih materialov.

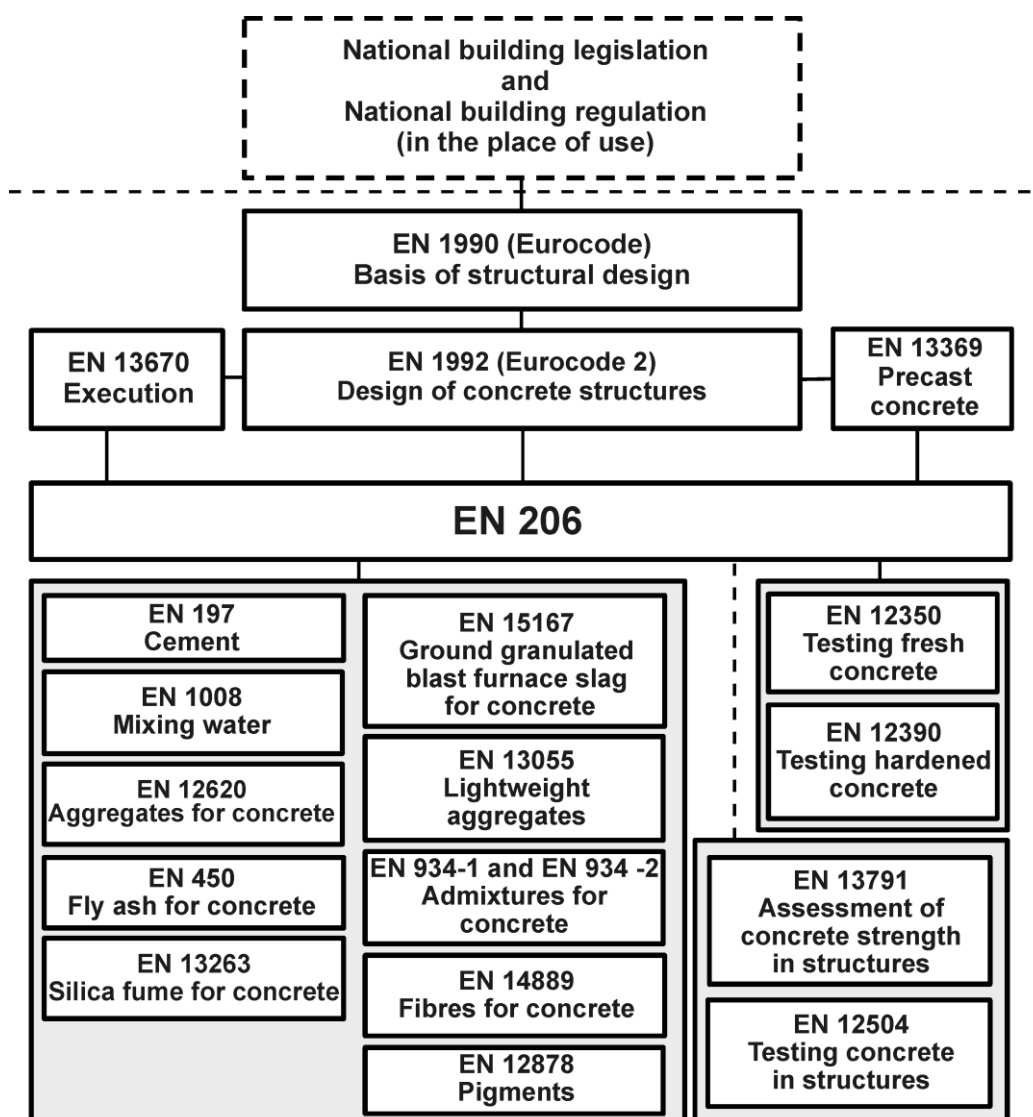
V tretjem poglavju bomo opisali glavne procese, ki so odgovorni za propadanje betona, vzroke za njihov nastanek ter načine da se jim izognemo. Poudarek bo na procesih, ki so zajeti v stopnjah izpostavljenosti, drugi pa bodo predstavljeni le bežno.

V nadaljevanju bomo prikazali nekaj tipičnih objektov, ter na njih poskusili predstaviti in argumentirati izbiro stopenj izpostavljenosti za njihove konstrukcijske elemente. Za le te bomo nato navedli tudi priporočene mejne vrednosti za sestavo in lastnosti betonske mešanice ter zahteve za posebne lastnosti strjenega betona.

V zadnjem poglavju pa bomo predstavili še rezultate eksperimentalnega dela diplomske naloge, pri katerem smo na betonskih vzorcih, ki smo jih odvzeli na terenu, merili globino karbonatizacije betona. Poleg tega smo nekatere najzanimivejše vzorce pregledali še pod mikroskopom, da bi odkrili morebitne spremembe v strukturi betona.

2 STOPNJE IZPOSTAVLJENOSTI V EN 206-1 IN SIST 1026

Zahteve v zvezi s trajnostjo betona, njegovo sestavo in stopnjami izpostavljenosti podrobno obravnava standard SIST EN 206-1. Njegovo dopolnilo kot slovenski nacionalni dodatek predstavlja standard SIST 1026. SIST EN 206-1 je pri projektiranju treba upoštevati skupaj s standardi SIST EN 1992, EN 13670, ter s specifikacijami za osnovne materiale. Odnose med standardi prikazuje Slika 1.



Slika 1: Odnosi med EN 206 in standardi za projektiranje in izvedbo, standardi za osnovne materiale in standardi za preskuse (kSIST FprEN 206:2013, str. 5)

Na trajnost betonske konstrukcije vplivajo (Žnidarič, 2005):

- vrsta in jakost agresivnega vpliva, ki deluje na konstrukcijo oziroma na njene elemente,
- mehanizem transporta agresivnih snovi na izpostavljene površine in v notranjost elementov konstrukcije,
- lastnosti in struktura vgrajenega betona,
- vrsta, položaj in razporeditev armature
- vrsta in smer razpok.

V poglavju 2.1 bomo predstavili kriterije za klasifikacijo agresivnih vplivov, v poglavju 2.2 zahteve za osnovne materiale in v poglavju 2.3 zahteve v zvezi s stopnjami izpostavljenosti, ki so navedene v standardih SIST EN 206-1 in SIST 1026.

2.1 Stopnje izpostavljenosti glede na delovanje okolja

Agresivni vplivi, katerim je izpostavljen beton so razvrščeni v preglednici 1. Razdeljeni so v razrede glede na vrsto agresivnega vpliva, ti pa nadalje v stopnje glede na njegovo jakost. V preglednici so opisani kriteriji za razvrstitev v določene razrede, poleg tega pa so navedeni še informativni primeri. Poudariti je treba, da je lahko beton izpostavljen različnim vplivom hkrati, zato je pogosto potrebno določiti tudi kombinacijo stopenj izpostavljenosti.

Preglednica 1: Razredi in stopnje izpostavljenosti (Združenje za beton Slovenije, 2009, str. 16)

Razred in stopnja izpostavljenosti ter opis okolja		Informativni primeri za določitev razreda in stopnje izpostavljenosti v RS
1 Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja		
X0	Pri nearmiranem betonu ali betonu brez vgrajenih kovinskih delov: vsi razredi izpostavljenosti, razen zmrzovanja/tajanja, obrabe ali kemijskega delovanja.	<i>Nearmirani elementi znotraj stavb ali popolnoma vkopani v neagresivno zemljino ali popolnoma potopljeni v neagresivno vodo, n.pr: nearmirani temelji, izravnalni betoni</i>

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 1

	Pri armiranem betonu ali betonu z vgrajenimi kovinskimi deli: zelo suho	Beton znotraj stavb z zelo nizko vlažnostjo zraka <i>Armirani elementi znotraj stavb, če je relativna vlažnost v prostoru do 35%, če ni nevarnosti zmrzovanja in kemičnega delovanja in ni zahtevana odpornost proti obrabi.</i>
2 Korozija zaradi karbonatizacije		
<p>Če je armirani beton ali beton z drugimi vgrajenimi kovinskimi deli izpostavljen zraku in vlagi, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na naslednji način:</p> <p>OPOMBA: Pogoj vlažnosti velja za stanje v zaščitnem sloju betona nad armaturo ali drugim vgrajenim kovinskim delom, v mnogih primerih pa se lahko upošteva, da stanje v zaščitnem sloju odraža pogoje v neposredni okolici. V teh primerih je razvrščanje glede na pogoje v neposredni okolici lahko ustrezno. To pa morda ne drži, če je med betonom in njegovo okolico zaporni sloj.</p>		
XC1	Suho	Beton znotraj stavb z nizko vlažnostjo zraka <i>Elementi v notranjosti stavb, v prostorih z običajno vlažnostjo, vključno kuhinje in kopalnice v stanovanjskih stavbah</i>
	Trajno mokro	Beton stalno potopljen v vodi <i>Elementi, ki so trajno potopljeni v neagresivni vodi, n.pr. temelji, zgradbe v vodi</i>
XC2	Mokro, le redko suho	Betonske površine v dolgotrajnem stiku z vodo Mnogi temelji <i>Popolnoma vkopani elementi v neagresivni zemljini, n.pr. temelji, piloti, kletni zidovi</i> <i>Elementi vodnih zbiralnikov ali vodohranov in posod za neagresivne tekočine</i>
XC3	Zmerno vlažno	Beton znotraj stavb z zmerno ali visoko vlažnostjo zraka Zunanji beton, zaščiten pred dežjem <i>Elementi znotraj stavb, ki so stalno v stiku z zunanjim zrakom.</i> <i>Elementi v notranjosti stavb, v prostorih z visoko vlažnostjo, n.pr. obratne kuhinje in pralnice, javna kopališča, hlevi</i> <i>Zunanji elementi stavb, zaščiteni pred dežjem, n.pr.: zaščitene fasade, deli zunanjih stopnišč in balkonov</i> <i>Elementi inženirskih zgradb, zaščiteni pred dežjem, n.pr. elementi premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo ter na železnicah</i> <i>Nosilne plasti vozišča na cestah ki se pozimi <u>ne</u> solijo</i>

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 1

XC4	Izmenično mokro in suho	<p>Površine betona v stiku z vodo, ki ne spadajo v stopnjo izpostavljenosti XC2</p> <p><i>Zunanji elementi stavb, izpostavljeni dežju, n.pr. nezaščitene fasade, zunanja stopnišča, balkoni</i></p> <p><i>Prometne površine, n.pr. ploščadi in tlaki izpostavljeni dežju</i></p> <p><i>Obrabne plasti vozišča na cestah ki se pozimi <u>ne</u> solijo</i></p> <p><i>Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, n.pr. elementi premostitvenih objektov in predorov na železnicah in cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo, deli HE objektov</i></p> <p><i>Elementi inženirskih objektov v območju nihanja vodne gladine, n.pr.rečni stebri mostov, deli HE objektov</i></p>
3 Korozija zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode		
<p>Če je armirani beton ali beton z drugimi vgrajenimi kovinskimi deli v stiku z vodo, ki vsebuje kloride, vključno soli za tajanje, ki ne izvirajo iz morske vode, <i>in če <u>ni</u> nevarnosti zmrzovanja</i>, je treba stopnjo izpostavljenost določiti na naslednji način:</p> <p>OPOMBA: Glede pogojev vlažnosti glej tudi 2. odstavek te preglednice.</p>		
XD1	Zmerna vlažnost	<p>Betonske površine, izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak</p> <p><i>Elementi premostitvenih objektov in predorov, izpostavljeni slanemu zraku ali ki so lahko posredno izpostavljeni delovanju slanice</i></p> <p><i>Elementi zgradb na cestah, ki so lahko posredno izpostavljeni delovanju slanice, n.pr. nosilne plasti vozišča na cestah, ki se pozimi solijo</i></p>
XD2	Mokro, le redko suho	<p>Plavalni bazeni</p> <p>Beton, izpostavljen industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride</p>
XD3	Izmenično mokro in suho	<p>Deli mostov, izpostavljeni pršcu, ki vsebuje kloride</p> <p>Krovne plasti vozišč</p> <p>Plošče v parkirnih hišah</p> <p><i>Prometne površine, ki se pozimi solijo, n.pr. parkirne ploščadi, tlaki, obrabne plasti vozišča</i></p> <p><i>Navpični in vodoravni elementi, izpostavljeni neposrednemu delovanju (škropljenju) slanice na premostitvenih objektih, predorih in drugih zgradbah na cestah, ki se pozimi solijo ter na zgradbah ob njih (do 3 m nad cestiščem), v parkirnih hišah.</i></p>

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 1

4 Korozija zaradi kloridov iz morske vode		
Če je armirani beton ali beton z drugimi vgrajenimi kovinskimi deli v stiku s kloridi iz morske vode ali z zrakom, ki prenaša soli iz morske vode, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na naslednji način:		
XS1	Izpostavljeno soli, ki jo prenaša zrak, brez neposrednega stika z morskovo vodo	Konstrukcije blizu obale ali ob njej <i>Zunanji elementi stavb in inženirskih zgradb blizu morske obale ali ob njej (v pasu do pribl. 1 km)</i>
XS2	Trajno potopljeno	Deli morskih zgradb <i>Elementi stavb in inženirskih zgradb, ki so trajno in popolnoma potopljeni v morje, n.pr. potopljeni deli pristaniških zgradb in mostov</i>
XS3	Območja plimovanja, pljuskanja in pršenja	Deli morskih zgradb <i>Elementi stavb in inženirskih zgradb v območju plimovanja, pljuskanja in pršenja morske vode, n.pr. deli pristaniških zgradb in mostov, izpostavljeni tem pojavom</i>
5 Zmrzovanje/tajanje		
Če je moker beton izpostavljen znatnemu delovanju izmeničnega zmrzovanja/tajanja, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na naslednji način:		
XF1	Zmerna nasičenost z vodo brez sredstva za tajanje	Navpične betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju <i>Navpični in več kot 10 % nagnjeni zunanji elementi stavb, izpostavljeni dežju</i> <i>Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, če je stopnja nasičenosti zmerna, n.pr. elementi cestišča, premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo ter na železnicah, deli HE objektov, Elementi inženirskih objektov v območju občasnega nihanja vodne gladine.</i>
XF2	Zmerna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje	Navpične betonske površine konstrukcij na cestah, izpostavljene zmrzovanju in sredstvom za tajanje, ki se prenašajo po zraku <i>Elementi premostitvenih objektov in drugih zgradb na cestah, ki so izpostavljeni slanemu zraku</i> <i>Elementi premostitvenih objektov in drugih zgradb na cestah, ki so lahko posredno izpostavljeni slanici, n.pr. nosilne plasti vozišča, voziščna plošča</i>

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 1

XF3	Močna nasičenost z vodo brez sredstva za tajanje	<p>Vodoravne betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju</p> <p><i>Vodoravni in manj kot 10 % nagnjeni elementi zunaj stavb (izpostavljeni dežju)</i></p> <p><i>Elementi inženirskih zgradb, izpostavljeni dežju, če je stopnja nasičenosti visoka, n.pr. elementi cestišča, premostitvenih objektov in predorov na cestah, ki se pozimi <u>ne</u> solijo ter na železnicah, deli HE objektov</i></p> <p><i>Prometne površine, ki se pozimi <u>ne</u> solijo, n.pr. obrabne plasti vozišča, parkirne ploščadi, tlaki</i></p> <p><i>Elementi inženirskih objektov v območju pogostega nihanja vodne gladine</i></p> <p><i>Elementi zgradb za odpadne vode in vodnih zbiralnikov, ki so med obratovanjem nasičeni z vodo</i></p>
XF4	Močna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje, ali z morskovo vodo	<p>Krovne plasti na cestah in mostne plošče, izpostavljene sredstvom za tajanje</p> <p>Betonske površine izpostavljene neposrednemu pršču, ki vsebuje sredstva za tajanje, in zmrzovanju</p> <p>Območje pljuskanja na morskimi zgradbah, ki so izpostavljene zmrzovanju</p> <p><i>Prometne površine, ki se pozimi solijo, n.pr. obrabne plasti vozišča, parkirne ploščadi, tlak</i></p> <p><i>Navpični in vodoravni elementi izpostavljeni neposrednemu delovanju (škropljenju) slanice na premostitvenih objektih, predorih ter drugih zgradbah na cestah in vzdolž njih (do 3 m nad cestiščem), v odprtih parkirnih hišah</i></p>
6 Kemično delovanje		
<p>Če je beton izpostavljen kemičnemu delovanju naravnih zemljin in talne vode, kot je navedeno v preglednici 2, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na spodaj navedeni način. Klasifikacija morske vode je odvisna od geografskega položaja; zato je treba upoštevati klasifikacijo, veljavno v kraju uporabe betona.</p> <p>OPOMBA: Za določitev ustreznih pogojev okolja je morda potrebna posebna študija, če</p> <ul style="list-style-type: none"> so mejne vrednosti zunaj preglednice 2, so prisotne druge agresivne kemikalije, so tla ali voda kemično onesnažena, je hitrost vode v kombinaciji s kemičnimi snovmi iz preglednice 2 velika. 		
XA1	Malo agresivno kemično okolje v skladu s preglednico 2	
XA2	Zmerno agresivno kemično okolje v skladu s preglednico 2	
XA3	Močno agresivno kemično okolje v skladu s preglednico 2	

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 1

7 Obraba površine betona		
<i>Če je površina betona izpostavljena mehanskim obremenitvam, je treba stopnjo izpostavljenosti določiti na naslednji način</i>		
<i>XM 1</i>	<i>Zmerna obremenitev</i>	<i>Nosilni industrijski tlaki za vozila s pnevmatskimi kolesi</i>
<i>XM 2</i>	<i>Močna obremenitev</i>	<i>Nosilni industrijski tlaki za viličarje s polnimi gumijastimi kolesi Krovne plasti vozišč za lahko in srednjo prometno obremenitev Konstrukcije v hitro tekoči vodi</i>
<i>XM 3</i>	<i>Zelo močna obremenitev</i>	<i>Nosilni industrijski tlaki za viličarje z elastomernimi ali jeklenimi kolesi Krovne plasti vozišč za težko in zelo težko prometno obremenitev Konstrukcije v hitro tekoči vodi, ki nosi pesek</i>

V prvi razred izpostavljenosti uvrščamo betonske konstrukcijske elemente, pri katerih ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja. Temu ustrezajo vsi nearmirani elementi, ki niso izpostavljeni zmrzovanju in tajanju, obrabi ali kemijskem delovanju, poleg tega pa tudi armirani elementi, ki poleg zgoraj naštetega niso izpostavljeni niti vlažnem okolju. Tako okolje nima škodljivih učinkov na beton in ga označimo s stopnjo izpostavljenosti X0.

Drugi razred predstavlja korozija zaradi karbonatizacije. Razdeljen je v štiri stopnje. Prva stopnja, XC1, predstavlja okolje v katerem se nahaja armiran beton znotraj stavb z nizko vlažnostjo zraka, ali pa če je stalno potopljen v vodi. Pri stopnji izpostavljenosti XC2 gre za armirano betonske elemente v dolgotrajnem stiku z vodo, ki so večinoma mokri, le redko suhi, medtem ko beton izpostavljen zmerni vlažnosti predstavlja stopnjo izpostavljenosti XC3. Zadnja stopnja, XC4 predstavlja izmenično mokro in suho okolje, ki povzroča najhitrejšo napredovanje karbonatizacije v betonu. Pri določanju pogojev glede vlažnosti je potrebno upoštevati opombo pri drugem odstavku zgornje preglednice ki določa, da se vlažnost določa v zaščitnem sloju betona tik nad armaturo. Vendar se v večini primerov lahko upošteva, da je ta kar enaka vlažnosti v neposredni okolici betona. To velja tudi za druge razrede izpostavljenosti, pri katerih je vlažnost pomemben faktor pri določanju stopnje izpostavljenosti.

Naslednji razred izpostavljenosti je namenjen koroziji zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode. Zajema tri stopnje, od XD1 do XD3. V stopnjo izpostavljenosti XD1 razvrstimo konstrukcijske elemente, ki so izpostavljeni kloridom pri zmerni vlažnosti. To so na primer betonske površine, ki so izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak. Primer stopnje izpostavljenosti XD2 so plavalni bazeni, ki so izpostavljeni mokremu, le redko suhemu okolju.

V tem razredu je najbolj neugodna stopnja izpostavljenosti XD3, pri kateri je beton v izmenično mokrem in suhem okolju.

Če kloridi izvirajo iz morske vode, se agresivnost okolja označuje z XS1 do XS3. Podobno kot pri kloridih, ki ne izvirajo iz morske vode, XS1 predstavlja izpostavljenost soli, ki jo prenaša zrak, XS2 predstavlja okolje, ko je beton stalno potopljen v morski vodi, medtem ko XS3 predstavlja izmenično mokro in suho okolje, torej območja plimovanja, pljuskanja in pršenja.

V razred izpostavljenosti XF uvrščamo elemente, ki so izpostavljeni zmrzovanju in tajanju. Tu imamo štiri stopnje, od XF1 do XF4. Prva predstavlja zmerno zasičenost z vodo brez sredstva za tajanje, druga zmerno zasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje, tretja močno zasičenost z vodo brez sredstva za tajanje in četrta močno zasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje.

Naslednji razred izpostavljenosti je namenjen kemičnem delovanju. Razdelimo ga v tri stopnje, XA1 do XA3, glede na intenzivnost le tega. Mejne vrednosti za stopnje izpostavljenosti pri kemičnem delovanju so navedene v preglednici 2. Ta zajema samo agresivno kemično okolje v talni vodi in zemljinah, ob določenih pogojih. Za kemično agresijo v drugačni obliki, je potrebna podrobnejša analiza.

V zadnjem razredu izpostavljenosti pa je zajeta obraba površine betona. Glede na intenzivnost mehanske obremenitve je razdeljen v tri stopnje, XM1 do XM3.

Preglednica 2: Mejne vrednosti za stopnje izpostavljenosti pri kemičnem delovanju naravnih zemljin in talne vode (Združenje za beton Slovenije, 2009, str. 20)

Spodnja klasifikacija agresivnih kemičnih okolij velja za naravne zemljine in talno vodo pri temperaturi vode/zemljine od 5⁰ C do 25⁰ C in pri hitrosti vode, ki je tako majhna, da se približuje statičnim pogojem.

Stopnjo izpostavljenosti določa najneugodnejša vrednost vsake posamezne kemične karakteristike.

Če do iste stopnje pripeljeta dve ali več karakteristik agresivnosti, je treba okolje uvrstiti v naslednjo višjo stopnjo, razen če se s posebno študijo takega primera dokaže, da to ni potrebno.

Kemična karakteristika	Referenčna metoda preskušanja	XA1	XA2	XA3
Talna voda				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 in ≤ 600	> 600 in ≤ 3000	> 3000 in ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 in ≥ 5,5	< 5,5 in ≥ 4,5	< 4,5 in ≥ 4,0

se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 2

agresivni CO ₂ , mg/l	prEN 13577:1999	≥ 15 in ≤ 40	> 40 in ≤ 100	>100 do nasičenosti
NH ₄ ⁺ , mg/l	ISO 7150-1 ali 7150-2	≥ 15 in ≤ 30	> 30 in ≤ 60	> 60 in ≤ 100
Mg ²⁺ , mg/l	ISO 7980	≥ 300 in ≤ 1000	> 1000 in ≤ 3000	> 3000 do nasičenosti
Zemljina				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^a skupaj	EN 196-2 ^b	≥2000 in ≤3000 ^c	>3000 ^c in ≤12000	>12000 in ≤24000
kislost ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	V praksi ne nastopa	
^a Glinaste zemljine s prepustnostjo manjšo od 10 ⁻⁵ m/s se smejo razvrstiti v nižjo stopnjo ^b Preskusna metoda predpisuje izločitev SO ₄ ²⁻ s klorovodikovo kislino; če obstajajo v kraju uporabe betona zadostne izkušnje, se namesto tega lahko uporabi izločanje z vodo. ^c Če obstaja nevarnost kopičenja sulfatnih ionov v betonu zaradi izmeničnega sušenja in močenja ali kapilarnega sesanja, je treba mejo 3000 mg/kg znižati na 2000 mg/kg.				

Na tem mestu lahko še dodamo, da Dodatek 1 (Združenje za beton Slovenije, 2009) navaja »Priporočene stopnje izpostavljenosti za pomembnejše betonske konstrukcijske elemente z armaturo ali vgrajenimi kovinskimi deli«. Tako nam lahko ta dodatek predstavlja dodaten pripomoček za izbiro stopenj izpostavljenosti, kadar o njih nismo prepričani.

2.2 Temeljne zahteve za osnovne materiale in za sestavo betona

Vsi osnovni materiali, ki jih uporabimo pri izdelavi betonske mešanice morajo zadostiti zahtevam iz poglavja 5.1 Temeljne zahteve za osnovne materiale (Združenje za beton Slovenije, 2009). Za splošno primerne veljajo osnovni materiali, ki so skladni z navedenimi standardi:

- cement (SIST EN 197-1)
- normalni in težki agregati (SIST EN 12 620)
- lahki agregati (SIST EN 13055-1)
- voda (SIST EN 1008)
- kemijski dodatki (SIST EN 934-2)
- mineralna polnila (SIST EN 12 620)
- pigmenti (SIST EN 12878)
- elektrofitrski pepel (SIST EN 450)
- mikrosilika (SIST EN 13263)

Prav tako je v poglavju 5.1.1 Splošno navedeno, da »osnovni materiali ne smejo vsebovati škodljivih primesi v količinah, ki bi lahko poslabšale trajnost betona ali povzročile korozijo

armature. Biti morajo primerni za predvideno uporabo v betonu« in »če velja osnovni material za splošno primernega, to ne pomeni, da je primeren v vseh okoliščinah in za vsako sestavo betona«.

Temeljne zahteve za sestavo betona obravnava poglavje 5.2 združenega besedila, ki pravi da je »sestavo betona in osnovne materiale za projektirani ali predpisani beton je treba izbrati tako, da se zadovoljijo predpisane zahteve za svež in strjen beton; te vključujejo konsistenco, gostoto, trdnost, trajnost in zaščito vgrajenega jekla pred korozijo. Pri tem je treba upoštevati proizvodni postopek in predvideni način izvajanja betonarskih del (Združenje za beton, 2009).«

2.3 Zahteve v zvezi s stopnjami izpostavljenosti

V nadaljevanju bomo predstavili zahteve iz standarda, ki se tičejo stopenj izpostavljenosti. Vse navedbe v tem poglavju, ki niso dodatno citirane, se nahajajo v poglavju 5.3 Zahteve v zvezi s stopnjami izpostavljenosti združenega besedila (Združenje za beton Slovenije, 2009).

»Zahteve glede odpornosti betona proti delovanju okolja se navedejo bodisi kot mejne vrednosti za sestavo betona in za dokazane lastnosti betona bodisi izhajajo iz metod za projektiranje trajnosti, povezanih z obnašanjem betona. Zahteve morajo upoštevati predvideno življenjsko dobo betonske konstrukcije«.

V tej diplomski nalogi bomo predstavili samo prvi način, pri katerem se predpišejo mejne vrednosti za sestavo betona.

»V specifikaciji projektiranega betona je treba zahteve za beton, ki mora ustrezati vrsti in stopnji izpostavljenosti ter načrtovani življenjski dobi konstrukcije, določeni v projektu, predpisati z naslednjimi parametri sestave svežega betona:

- dovoljenimi vrstami in razredi osnovnih materialov,
- največjim vodocementnim razmerjem $(v/c)_{max}$, ki med proizvodnjo betona ne sme biti prekoračeno,
- najmanjšo vsebnostjo cementa,
- potrebno vsebnostjo zraka pri aeriranih betonih, dodatnimi zahtevami za agregat, če mora biti beton odporen tudi proti zmrzovanju-tajanju ali proti obrabi«.

»Če so površine konstrukcijskega elementa, ki se načrtuje graditi z isto vrsto betona, izpostavljene različnim vplivom okolja, ali če je površina elementa izpostavljena dodatnim vplivom (XA in XM), je treba predpisane parametre prilagoditi višjim zahtevam«.

»Vrednosti največjega vodocementnega razmerja $(v/c)_{max}$, ki zagotavljata predpisani razred tlačne trdnosti C in zahtevano odpornost betona proti delovanju okolja pri predvideni stopnji izpostavljenosti, se med seboj lahko razlikujeta. V tem primeru je treba v specifikaciji predpisati nižjo vrednost«.

V preglednici 3 so navedene posebne lastnosti betona za preverjanje izbranih parametrov sestave svežega betona, ter priporočene vrednosti $(v/c)_{max}$ ter minimalne vsebnosti cementa. »Mejne vrednosti navedene v preglednici 3, veljajo za pripravo betonov, ki se zgoščujejo na tradicionalne načine in če:

- je beton pripravljen z osnovnimi materiali, ki veljajo za primerne za predpisano uporabo, v smislu točke 5.1.1 (omenjeno v prejšnjem poglavju),
- so za pripravo betona uporabljeni cementi, ki so v preglednici 4 označeni kot primerni ali pa je primernost za posamezne stopnje izpostavljenosti betona dokazana s preiskavami, v skladu s točko 5.2.2 tega standarda,
- je velikost največjega zrna agregata (D_{max}) 22 mm ali 32 mm,
- je armatura iz običajnega jekla in brez dodatne zaščite
- površina betona ni dodatno zaščitena s premazom ali hidroizolacijo«.

»Najmanjša vsebnost cementa ni odvisna od vrste cementa in njegovega trdnostnega razreda«.

»Trdnostni razred betona ne sme, razen za stopnjo izpostavljenosti X0, biti nižji od C20/25«.

»Najmanjša vrednost (spodnja meja) vsebnosti zraka pri aeriranih betonih, določena po SIST EN 12350-7, mora na mestu vgrajevanja v konstrukcijo in pri največjem zrnju agregata 22 mm ali 32 mm, znašati:

- Pri stopnjah izpostavljenosti XF2 in XF3 3%
- Pri stopnji izpostavljenosti XF4 5%«

Preglednica 3: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenosti (Združenje za beton Slovenije, 2009, str. 32)

Stopnje agresivnosti okolja	Stopnja izpostavljenosti po SIST EN 206-1	Posebne lastnosti betona za preverjanje izbranih parametrov sestave svežega betona			Priporočeni parametri sestave svežega betona	
		XC, XD, XS, XA	XF	XM	$(v/c)_{max}$	Najmanjša vsebnost cementa ^{*)} kg/m ³
I	nizka	X0			0,75	
		XC1			0,65	260
II	zmerna	XC2, XC3	PV-I		0,55	300
		XC 2 + XF 1	PV-I	NOZT-100	0,55	300
III	normalna	XD1, XS1, XA1, XM1	PV-I		0,55	320
		XD 1 + XF 2	PV I	OPZT-S1	0,60 ae	300
					0,55	320
IV	močna	XC4, XD2, XS2, XA2, XM2	PV-II		0,50	340
		XC 4 + XF 3	PV-II	NOZT-150	0,55 ae	320
					0,50	340
V	zelo močna	XD3, XS3, XA3, XM3	PV-III		0,45	360
		(XD 2, XD 3) + XF 4	PV-II	OPZT-S2	0,50 ae	360

Legenda k preglednici N.4:

$(v/c)_{max}$

Največje efektivno vodocementno razmerje (v/c_{eff}), ki pri določeni stopnji izpostavljenosti po izkušnjah omogoča 50-letno življenjsko dobo objekta. Prekoračitev deklarirane vrednosti $(v/c)_{max}$ za več kot 0,02 pomeni neskladnost pri kontroli proizvodnje (glej tč. 5.4.2 in preglednica 17). Če predpostavimo normalno statistično porazdelitev v/c vrednosti, je $(v/c)_{max} = v/c_m + 2 \sigma_{v/c}$, kjer pomeni v/c_m srednjo vrednost, $\sigma_{v/c}$ pa standardni odklon normalne porazdelitve izmerjenih v/c vrednosti. Pri $\sigma_{v/c} \approx 0,025$ velja potem naslednja poenostavitev: $(v/c)_{max} = v/c_m + 0,05$. Postopek določitve v/c_{eff} je opisan v dodatku 3. Efektivna vsebnost vode za določitev v/c_{eff} je razlika med celokupno količino vode v svežem betonu in vodo, ki jo vpije agregat.

ae

$(v/c)_{max}$ za aerirani beton

PV

prodor vode iz tč. 5.5.3 (stopnje I, II in III)

OZT

odpornost proti zmrzovanju-tajanju

NOZ100, NOZ150

notranja odpornost proti zmrzovanju-tajanju, tč. 5.5.5 (po 100 ali 150 ciklih zmrzovanja-tajanja)

OPZT-S1

odpornost površine proti zmrzovanju-tajanju s sredstvi za tajanje, tč. 5.5.6 (merilo 1)

OPZT-S2

odpornost površine proti zmrzovanju-tajanju s sredstvi za tajanje, tč. 5.5.6 (merilo 2)

OO

odpornost proti obrabi (1, 2, 3)

*)

pri največjem zrnju agregata 22 ali 32 mm.

Poleg zgornje preglednice, priporočila za sestavo betona navaja tudi informativni dodatek F Priporočila za mejne vrednosti sestave betona (Združenje za beton Slovenije, 2009). Zbrana so v preglednici 4. Na tem mestu je potrebno povedati, da se vrednosti v preglednici 4 nanašajo na uporabo cementa CEM I po SIST EN 197-1 in agregata z nazivno velikostjo največjega zrna v območju od 20 do 32 mm. Novi standard EN 206, ki bo izšel konec leta, pa bo dovoljeval vse cemente iz SIST EN 197-1, ki so primerni za posamezno stopnjo izpostavljenosti.

Nekaj zahtev v zvezi s stopnjami izpostavljenosti in materiali, se nahaja tudi izven poglavja 5.3.

»Če je agregat predviden za uporabo v betonu, ki bo izpostavljen zmrzovanju-tajanju, mora biti v izjavi o skladnosti deklarirana tudi zmrzljinska odpornost grobega agregata (Združenje za beton Slovenije, 2009)«. Ustrezati mora naslednjim kategorijam odpornosti proti zmrzovanju/tajanju, predpisanim v SIST EN 12620:

- Pri stopnjah izpostavljenosti betona XF1 in XF2 kategorija F2 oziroma MS 25
- Pri stopnjah izpostavljenosti XF3 in XF4 kategorija F1 oziroma MS 18

»Če je agregat predviden za uporabo v betonu, ki bo izpostavljen obrabi, mora biti v izjavi o skladnosti deklarirana tudi odpornost grobega agregata proti drobljenju in, če se zahteva v projektu konstrukcije, tudi odpornost proti zaglajevanju (Združenje za beton Slovenije, 2009)«. Grobi agregat za beton, ki mora biti odporen proti obrabi, mora ustrezati naslednjim dodatnim zahtevam:

- Pri stopnjah izpostavljenosti XM1, XM2 oziroma XM3 mora odpornost proti drobljenju ustrezati kategorijam LA35, LA25, oziroma LA20, določenim v SIST EN 12620, tč. 5.2
- Pri stopnji izpostavljenosti XM3 mora odpornost grobega agregata proti zaglajevanju ustrezati kategoriji PSV50, določeni v SIST EN 12620, tč. 5.4.1.

»V informativni preglednici N.3 (preglednica 5) so navedene vrste cementa, ki so primerne oziroma neprimerne za uporabo v betonu, od katerega se zahteva odpornost na agresivno delovanje okolja, pri posameznih stopnjah izpostavljenosti, opisanih v preglednici 1/N.1 (preglednica 1).

Tiste vrste cementa, za katere v Sloveniji ni dovolj izkušenj o njihovem obnašanju v uporabi ali pa je izbira vrste cementa odvisna od dejansko delujočih kemičnih karakteristik in od stopnje njihovega delovanja (razred izpostavljenosti XA), so v tej preglednici označene z x. Zanje je potrebno predhodno pridobiti mnenje specializiranega strokovnjaka in dokazati primernost za predvideni namen uporabe v betonu s preiskavami cementa in z začetnim

preskusom betona, opravljenim v skladu s tč. 9.5 in normativnim dodatkom A (Združenje za beton Slovenije, 2009)«.

Preglednica 4: Priporočene mejne vrednosti za sestavo in lastnosti betona (Združenje za beton, 2009, str. 71)

	Stopnje izpostavljenosti																	
	Ni nevarnosti 1)	Korozija zaradi karbonatizacije					Korozija zaradi kloridov					Zmrzovanje - tajanje			Kemijsko agresivna okolja			
		Morska voda					Drugi kloridi					XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Max. v/c	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
		0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Min. trdnostni razred	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Min. vsebnost cementa, kg/m ³		260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Min. vsebnost zraka, %													4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a			
Druge zahteve												Agregat po prEN12620:2000 z zadostno odpornostjo proti zmrzovanju/ tajanju				Sulfatoodporni cement ^b		

^a Če beton ni aeriran, naj se obnašanje betona preskusi po ustreznih preskusnih metodah in primerja z betonom, za katerega je odpornost proti zmrzovanju/tajanju pri ustreznih stopnjah izpostavljenosti dokazana.

^b Če SO₂ nakazuje stopnjo izpostavljenosti XA2 in XA3, je uporaba sulfatoodpornega cementa bistvena. Če je cement razvrščen glede na sulfatno odpornost, naj se pri stopnji izpostavljenosti XA2 (in pri XA1, kadar nastopa) uporabi zmerno ali visoko sulfatoodporen cement, za stopnjo izpostavljenosti XA3 pa visoko sulfatoodporen cement.

1) Polno besedilo: Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja

Preglednica 5: Uporabnost cementov po SIST EN 197-1 za proizvodnjo betonov, skladnih s SIST EN 206-1 (Združenje za beton, 2009, str. 27)

	Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja	Stopnje izpostavljenosti																							
		Korozija zaradi karbonatizacije				Korozija zaradi kloridov			Zmrzovanje-tajanje				Kemično agresivno okolje			Abrazija									
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2 ¹⁾	XF3 ²⁾	XF4 ²⁾	XA1	XA2	XA3	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
1 CEM I	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2 CEM IIIA-S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3 CEM IIIB-S	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4 CEM IIIA-D	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
5 CEM IIIA-P	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6 CEM IIIB-P	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7 CEM IIIA-Q	+	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8 CEM IIIB-Q	+	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
9 CEM IIIA-V	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10 CEM IIIB-V	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
11 CEM IIIA-W	+	+	+	+	+	X	-	-	X	X	X	+	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-
12 CEM IIIB-W	+	+	+	+	X	X	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	-	-	-
13 CEM IIIA-T	+	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
14 CEM IIIB-T	+	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
15 CEM IIIA-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
16 CEM IIIB-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
17 CEM IIIA-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
18 CEM IIIB-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
19 CEM IIIA-M	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
20 CEM IIIB-M	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
21 CEM IIIA	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
22 CEM IIIB	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
23 CEM IIIC	+	X	X	X	X	X	+ ¹⁾	+ ¹⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
24 CEM IIIA	+	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
25 CEM IIIA	+	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
26 CEM IIIA	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
27 CEM IIIB	+	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda

+ Uporaba je primerna

- Uporaba se odsvetuje in je možna le na podlagi dokaznih preiskav

X Uporaba je možna na podlagi dokaznih preiskav

1) Priporočljiva je uporaba sulfatnoodpornega cementa

2) Uporaba koncepta k- vrednosti z EF pepelom ni primerna

3 PROCESI PROPADANJA BETONA ZARADI AGRESIVNIH VPLIVOV OKOLJA

Za propadanje betona so krivi različni mehanski, fizikalni, kemični in elektrokemični procesi. Povzročitelji mehanskih poškodb so lahko udarci, preobremenitev ali erozija, med fizikalnimi procesi so najbolj pomembni zmrzovanje in tajanje, požar ter prostorninske spremembe, veliko pa je tudi kemičnih procesov propadanja betona, ki jih lahko povzročijo kisline, morska voda, raztopine soli, sulfati in še mnoge druge agresivne snovi. Najpomembnejši elektrokemični proces je seveda korozija armature, ki se lahko pojavi kot posledica karbonatizacije ali prisotnosti kloridov. Preglednica 1, ki vsebuje razrede in stopnje izpostavljenosti, izmed zgoraj naštetih mehanskih procesov ne obravnava udarcev in preobremenitev, ampak samo obrabo površine betona. Prav tako v njej ni zajeta požarna obremenitev. Razrede izpostavljenosti bi lahko glede na učinke na armirano betonske konstrukcije razdelili v tri skupine. V prvo skupino bi lahko uvrstili razrede izpostavljenosti X0, XC, XD in XS, pri katerih je glaven kriterij nevarnost korozije armature. Zaradi razredov z oznako XF in XA pride do propadanja betona, pri razredu XM pa do obrabe površine.

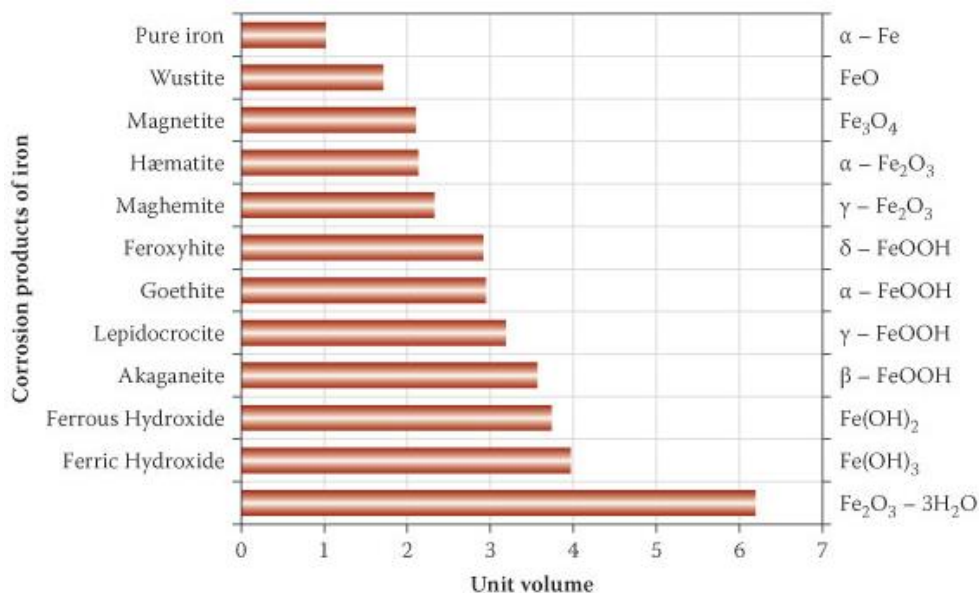
3.1 Korozija jekla v betonu

»Korozija jekla je elektrokemijski proces, pri katerem nastajajo na površini jeklenih palic korozijske celice, anoda in katoda. Na anodi se železovi ioni ločijo od elektronov in jeklo pri tem preide v enega od železovih oksidov, na katodi pa se ti elektroni, voda in kisik pretvorijo v hidroksilne ione. Jeklo se torej razgradi le na anodni strani, katodni proces pa na jeklu ne povzroča poškodb (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006)«.



Slika 2: Primer korozije armature na cestnem mostu

Korozija jekla je zelo pomemben dejavnik, ki vpliva na trajnost in nosilnost armiranobetonskih konstrukcij. Sprva je negativen učinek korozije samo vizualen, ker se na površini betona pojavijo produkti korozije. Postopoma pa produkti korozije, ki imajo nekajkrat večjo prostornino od prostornine raztopljenega jekla (Slika 2), z naraščanjem le te povzročajo napetosti, ki lahko vodijo do oblikovanja razpok in odstopanja zaščitne plasti betona, kar pa še pospeši korozijo, saj je jeklo še bolj izpostavljeno zunanjim vplivom. Običajna korozija se kaže v obliki enakomernega raztapljanja jekla in povzroča zmanjšanje nosilnega prereza. Poleg običajne korozije poznamo še napetostno korozijo in pojav vodikove krhkosti v jeklu za prednapeti beton.

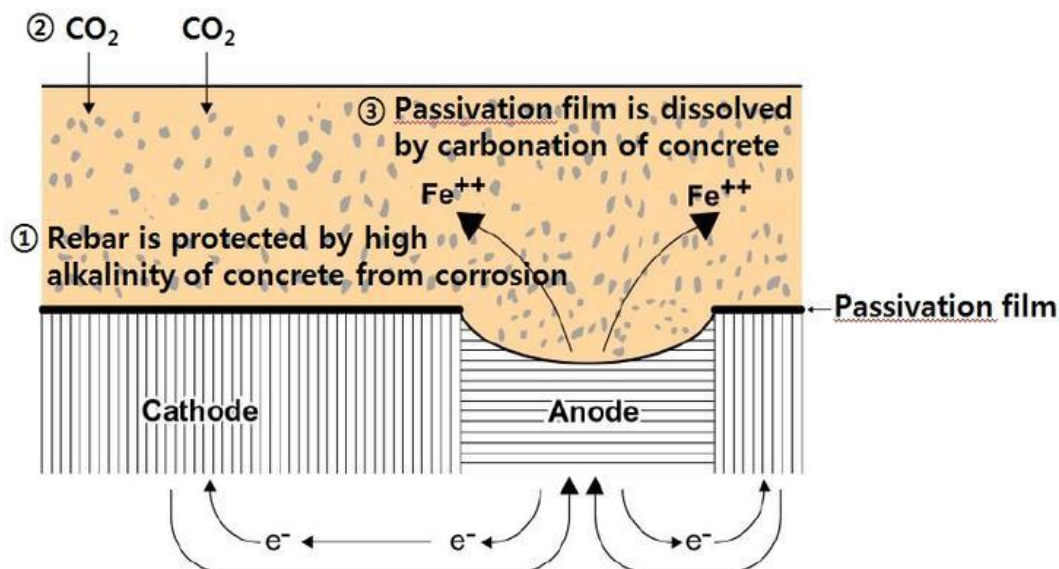


Slika 3: Prostornina različnih produktov korozije
(<http://www.scielo.org.za/img/revistas/jsaice/v54n2/09f02.jpg>)

Jeklo je v betonu dobro zaščiteno zaradi visoke alkalnosti cementnega kamna. pH porne raztopine je na začetku med 12,5 in 13,5 in ne pade pod 12, če je v matrici na voljo še kaj $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pasivizacijo železa povzroča tanka oksidna plast na površini jekla. Dokler obstaja pasivna zaščita, jeklo ni izpostavljeno koroziji. To pa se spremeni, če se zniža alkalnost cementnega kamna na pH manj kot 9,5 ali če je koncentracija kloridov v porni vodi večja od kritične. Pri primerni debelini krovnega sloja slabo prepustnega betona do korozije armature ne bi smelo priti (Mehta, Monteiro, 2006).

»Galvanski proces (Slika 4) lahko poteka le, če elektroni, ki nastanejo z ionizacijo železa na anodi, tečejo proti katodi in če je na površini armature dovolj vode in kisika, da vežeta elektrone v OH^- ione. Zato morajo biti za začetek korozijskega procesa izpolnjeni naslednji pogoji:

- med anodo in katodo mora obstajati razlika v električnih potencialih,
- na katodi mora biti na razpolago dovolj kisika, ki s površine betona z difuzijo stalno prodira do površine armature,
- med anodnim in katodnim območjem na površini jekla morata biti omogočena tok elektronov in tok ionov, zato morata biti oba pola med seboj povezana, električno preko armaturne palice in elektrolitsko z vlažnim betonom.



Slika 4: Korozija armature v betonu

(<http://pavemaintenance.wikispaces.com/Carbonation+of+Concrete+-+Dahee>)

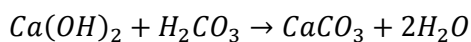
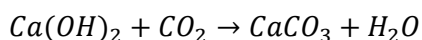
Če le eden od zgornjih pogojev ni izpolnjen, korozija jekla ne more potekati (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006)«.

3.1.1 Karbonatizacija – razred izpostavljenosti (XC)

Vzrok za padec pH vrednosti cementnega kamna v okolici armature je karbonatizacija. Zaradi znižanja pH vrednosti, pasivni filmi v okolici armature niso več obstojni, zato nastajajo železovi hidroksidi. Ti pa imajo lahko tudi do sedem krat večji volumen od osnovnega materiala, zato povzročajo velike napetosti v materialu in posledično razpokanje materiala. Bistveno pa je tudi, da železovi hidroksidi nimajo zaščitne sposobnosti, zato se na mestih depasivizacije ustvarijo žarišča korozije armature, ki se ob prisotnosti korodirnih medijev širijo.

Karbonatizacija je reakcija med ogljikovim dioksidom in produkti hidratacije, v največji meri s kalcijevim hidroksidom. Ogljikov dioksid lahko najdemo v različnih oblikah: kot prosti CO₂ v zraku, vezan v karbonatih (CaCO₃), delno vezan v hidrokarbonatih Ca(HCO₃)₂, v vodi kot ogljikova kislina H₂CO₃ ali kot prosti CO₂, raztopljen v vodi v plinasti obliki. Tipične reakcije, ki

potekajo v cementnem kamnu med ogljikovim dioksidom ali ogljikovo kislino in kalcijevim hidroksidom so (Bokan Bosiljkov, 2006):



Karbonatizacija neposredno na beton nima negativnih učinkov, so pa ti posredni. Zato je globina karbonatizacije pomemben faktor pri varovanju armirano betonskih konstrukcij. Obseg karbonatizacije se lahko preveri s fenolftaleinom. Kjer je alkalnost še dovolj velika, se pojavi rožnata barva, medtem ko se karbonatiziran del ne obarva (Slika 5). Za omejevanje pojava karbonatizacije je zelo pomembna lastnost betona odpornost proti prodoru vode, in je zato tudi zahtevana v preglednici 3. Karbonatizacija v kvalitetnih, gostih betonih je zelo počasen proces. Tudi v 50 letih zelo redko prodre v globino več kot 5-10 mm. Pri slabši kvaliteti betona pa je ta proces precej hitrejši in lahko prodre v globino 25 mm v manj kot 10 letih (Perkins, 1986).



Slika 5: Preizkus globine karbonatizacije v betonu

3.1.2 Korozija zaradi kloridov – razreda izpostavljenosti (XD in XS)

Korozija jekla lahko nastopi tudi zaradi depasivizacije zaradi kritičnega deleža kloridov. Vrednost kritičnega deleža je odvisna od pH vrednosti raztopine v porah betona. Delovanje kloridov je največje pri nizkem pH, vendar tudi pri višjih vrednostih napadejo najbolj šibka mesta. Tam se ustvari jamičasta korozija, ki povzroči hitro lokalno zmanjšanje prereza armaturne palice. Samemu betonu se zaradi vpliva kloridov pH vrednost ne spremeni. Kloridi so pogosto prisotni že v svežem betonu, velikokrat pa so njihov vir talilne soli za soljenje vozišč ali pa kloridi iz morske vode. Za preprečevanje korozije zaradi kloridov je podobno kot pri karbonatizaciji pomembna odpornost betona proti prodiranju vode.

3.2 Fizikalni procesi propadanja

Propadanje betona zaradi fizikalnih procesov ima več vzrokov. Najpomembnejši so zmrzovanje in tajanje ter druge volumenske spremembe v betonu, kot na primer kristalizacija soli v porah ali nekompatibilnost temperaturnega raztezanja cementnega kamna in agregata.

3.2.1 Propadanje materialov s cementnim vezivom zaradi zmrzovanja in tajanja (XF1, XF3)

V hladnejših podnebjih, kjer temperatura lahko pade pod ledišče, je beton ob prisotnosti vode izpostavljen procesu zmrzovanja in tajanja. Zaradi zmrzovanja in tajanja v betonu lahko nastanejo notranje in površinske poškodbe. Pri zmrzovanju brez prisotnosti talilnih soli se pojavlja notranja poškodovanost. Le ta nastane zaradi pritiska ledu, ki povečuje mikrorazpoke in lahko doseže natezno trdnost materiala. Posledica je manjša nosilnost, večja deformabilnost ter zmanjšana trajnost betona, saj se zaradi luščenja betona zmanjšuje debelina zaščitnega sloja betona in posledično povečuje nevarnost poškodovanja armature. Propadanje betona zaradi zmrzovanja in tajanja je delno tudi posledica nekompatibilnosti koeficientov temperaturnega raztezanja cementnega kamna in agregata.

Voda začne v širokih kapilarah zmrzovati pri temperaturi 0°C, medtem ko v manjših pri precej nižjih temperaturah. V gel porah tako zamrzne tudi pri manj kot -78°C (Žnidarič, 2009). Vodi

se pri zmrzovanju prostornina poveča za 9% (Hewlett, 1998), zato je potrebno zagotoviti dovolj prostora da se led neovirano širi, ali pa odvečno vodo izločiti iz votlin, sicer cementni kamen razpoka. Z nadaljnjimi cikli zmrzovanja in tajanja se učinki samo stopnjujejo, saj zaradi večanja razpok voda lahko prodira čedalje globlje v beton in cementni kamen se začne zaradi vse večjih pritiskov lomiti. Če se lahko beton med posameznimi cikli vsaj delno posuši, se poškodbe ne pojavljajo. Hidravlični pritiski, ki nastajajo med prehajanjem vode iz enega v drugo agregatno stanje, so odvisni od dolžine poti, ki jo voda potrebuje za osvoboditev, prepustnosti betona in hitrosti oblikovanja ledu. Z aeriranjem betona lahko dosežemo dvoje. Kot prvo, se majhni zračni mehurčki v betonu težko zapolnijo z vodo in je s tem dosežena manjša zasičenost betona z vodo. Poleg tega pa omogočajo, da so pore zapolnjene z vodo dovolj blizu zračnim poram, tako da precej zmanjšamo hidravlične pritiske. Običajno aerirani betoni vsebujejo 5 do 6% volumskega deleža zraka v mešanici (Hewlett, 1998). Nevarnost zmrzlinjskih poškodb je prisotna pri betonih, zasičenih z vodo, ali pri mladem betonu, v katerem je še veliko proste vode. Za suh beton zmrzovanje ni nevarno.

Če je beton izpostavljen zmrzovanju brez prisotnosti talilnih soli, ga uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XF1 pri zmerni nasičenosti z vodo ali XF3 pri močni nasičenosti z vodo. Za take betone je zahtevana kontrola notranje odpornosti proti zmrzovanju in tajanju (NOZT, Dodatek 4). Zmrzlinjsko odpornost betona lahko poleg aeriranja poveča tudi nizko vodocementno razmerje ter ustrezna nega betona, saj s tem povečamo njegovo odpornost proti prodiranju vode.

3.2.2 Zmrzovanje-tajanje v prisotnosti soli (XF2, XF4)

Kadar pride do zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli, je situacija nekoliko drugačna. V tem primeru ne pride do notranje, ampak do zunanje poškodovanosti oziroma do luščenja površine betona. Uporaba soli za tajanje sicer omogoča, da ostaja voda v tekočem agregatnem stanju pri nižjih temperaturah kot sicer, vendar pa ima tudi negativne posledice na beton, saj povzroči nastajanje osmotskega pritiska. Zaradi le tega se voda, ki se nahaja v notranjost betona, začne pomikati proti površini, kjer pa je bolj izpostavljena zmrzovanju. Poleg tega nastane večji rušilni učinek, če superohlajena voda znotraj gel por zamrzne. Negativne posledice nastanejo tudi zaradi temperaturnega šoka pri uporabi soli v suhem stanju na betonskih površinah prekritih s snegom ali ledom (Bokan Bosiljkov, 2006; Hewlett, 1998). Ranljivost betona na zmrzovanje in tajanje v prisotnosti talilnih soli je odvisna tudi od vrste in koncentracije le teh, ter od vrste mineralnih dodatkov (Prinčič, 2012; Šelih, 2010).

Največje luščenje betona se v večini primerov pojavlja pri raztopinah soli s koncentracijo med 2 in 5%.

Agresivnost okolja v tem primeru ustreza razredu izpostavljenosti XF2 ali XF4. Take betone moramo kontrolirati glede odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju (OPZT, Dodatek 5). Vendar pa standard SIST 1026 za določanje OPZT zahteva uporabo 3% raztopine NaCl, medtem ko se v praksi za soljenje uporabljajo tudi drugačne koncentracije in druge soli, kot na primer magnezijev ali kalcijev klorid. Ukrepi za povečanje odpornosti na zmrzovanje-tajanje v prisotnosti soli so podobni kot v primeru brez prisotnosti soli. Najbolj uspešen pa je aeriranje betona.

3.2.3 Kristalizacija soli v porah

Kristalizacija soli v porah povzroči poškodbe betona zaradi napetosti, ki pri tem nastanejo. Kristalizacija se pojavi, ko je ena stran betonskega elementa v stiku s tekočino z raztopljenimi solmi, druga stran pa je izpostavljena izsuševanju. Ko se tekočina, navadno voda, transportira skozi element, se sol izkristalizira v odprtih kapilarnih porah zaradi izhlapevanja. Če se to dogaja kontinuirno, ali pa vsaj dovolj pogosto, kristali zrastejo do take mere, da se ustvarijo napetosti, ki povzročijo oblikovanje razpok v betonu. Problem lahko rešimo tako, da povečamo odpornost betona proti prodoru vode (Mehta, Monteiro, 2006).



Slika 6: Posledice kontinuirne kristalizacije soli na stropu cestnega podhoda

3.3 Kemijski procesi propadanja – korozija betona (XA)

Korozija betona je proces propadanja betona zaradi kemijske agresije okolice ali reakcij med različnimi materiali v betonu. Povzročitelji so lahko raztopine agresivnih snovi v podtalnici ali talni vodi, agresivne snovi v zraku ali v tekoči obliki, shranjene ali v kontaktu s konstrukcijo ter reakcije med sestavinami betona. Primer slednjih je na primer alkalno agregatna reakcija. Pogoji za vse kemijske reakcije je prisotnost vlage. Ta pogoj pa je v praksi vedno izpolnjen, saj popolnoma suhega betona v naravi ni. V večini primerov korozije betona pride do korozije cementnega kamna, redkeje pa do korozije agregata, razen v primeru apnenčastega agregata. Če je beton izpostavljen kemičnemu delovanju, ga uvrstimo v razred izpostavljenosti XA.

3.3.1 Hidroliza produktov hidratacije cementa in izluževanje

Izluževanje je proces, pri katerem pride do transporta ionov iz notranjosti materiala v okolico preko sistema por. Začetna faza izluževanja je hidroliza produktov hidratacije, pri kateri se trdne komponente cementnega kamna raztopijo v vodi, ki prodira v material. Te komponente

se potem transportirajo iz materiala. To se zgodi z difuzijo zaradi razlik v koncentracijah ali s konvekcijo/advekcijo zaradi tečenja/pronicanja vode skozi material zaradi razlik v tlakih. Reke, jezera in podtalnica že vsebujejo majhne količine kloridov, sulfatov in bikarbonatov kalcija in magnezija, zato praviloma ne napadejo produktov hidratacije cementa. Čista voda in mehka voda, kot je deževnica ali pa stopljen sneg ali led, pa vsebujejo zelo majhne količine ali pa sploh nič kalcijevih ionov. Zato v stiku s cementnim kamnom začnejo raztapljati produkte hidratacije, ki vsebujejo kalcij, dokler ne dosežejo kemijskega ravnotežja. Nadaljnja hidroliza produktov hidratacije je nato možna le v primeru tekoče vode ali pronicanja pod pritiskom, ko se kontaktna raztopina ves čas redči. Tako so zagotovljeni pogoji za kontinuirno hidrolizo produktov hidratacije. Izluževanje povzroča večjo poroznost cementnega kamna, povečuje njegovo prepustnost ter zmanjša tlačno trdnost in modul elastičnosti. Na hidrolizo je najbolj občutljiv kalcijev hidroksid, saj je relativno dobro topen v čisti vodi (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).

3.3.2 Reakcije, pri katerih pride do menjave kationov

3.3.2.1 Oblikovanje topnih kalcijevih soli

V industrijskih okoljih pogosto naletimo na kisle raztopine z anioni. Ko pride do reakcije med kislimi raztopinami in komponentami cementnega kamna, nastajajo topne soli kalcija, kot so kalcijev klorid, kalcijev acetat in kalcijev bikarbonat. Te se z vodo izlužijo iz cementnega kamna. V odpadnih vodah kemijske industrije se pojavljajo npr. klorovodikova, žveplena in dušikova kislina, v prehrabni industriji naletimo na očetno, mravljično in mlečno kislino, pa tudi ogljikovo kislino. Ta se lahko pojavi tudi v naravnih vodah, kjer je velika koncentracija ogljikovega dioksida. Pozorni moramo biti tudi na industrijo umetnih gnojil in na kmetijska zemljišča, saj so tam prisotne raztopine amonijevega klorida in amonijevega sulfata, ki so sposobne produkte hidratacije spremeniti v zelo topne produkte (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).

3.3.2.2 Oblikovanje netopnih in neekspanzijskih kalcijevih soli

»Za njihovo oblikovanje so praviloma odgovorne reakcije med kalcijevim hidroksidom in oksalno, vinsko, huminsko, fluorovodikovo ali fosforno kislino. Če je cementni kamen izpostavljen propadajočim živalskim ali rastlinskim odpadkom je praviloma prisotnost huminske kisline odgovorna za kemično propadanje (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).«

3.3.2.3 Kemični napad z raztopinami, ki vsebujejo magnezijeve soli

»Magnezijev klorid, magnezijev sulfat ali magnezijev bikarbonat velikokrat najdemo v podtalnicah, morski vodi in v industrijskih odpadnih vodah. Magnezijeve raztopine reagirajo s kalcijevim hidroksidom v portland cementnem kamnu in oblikujejo topne kalcijeve soli. Vendar pa je za napad magnezijevih ionov na cementni kamen značilno še to, da lahko le ti napadejo tudi C-S-H fazo. Pri dolgotrajnem stiku z magnezijevo raztopino izgublja C-S-H faza postopno kalcijeve ione, ki so delno ali v celoti zamenjani z magnezijevimi ioni. Končni produkt reakcije je lahko torej magnezijev silikat hidrat, ki povzroči izgubo vezivnih lastnosti (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).«

3.3.3 Reakcije, pri katerih se oblikujejo ekspanzivni produkti

Pri kemijskih reakcijah, pri katerih se oblikujejo ekspanzivni produkti je glavni problem oblikovanje razpok in luščenje materiala. Do tega pride, ko z naraščanjem količine ekspanzivnih produktov rastejo tudi napetosti v materialu in dosežejo njegovo nosilnost. Ekspanzivne kemijske reakcije v cementnem kamnu so sulfatni napad in zapoznena hidratacija prostega CaO in MgO. Slednja praviloma ni problematična zaradi omejene količine prostega CaO in MgO v cementih in pucolanskih dodatkih.

3.3.4 Zunanji sulfatni napad

Sulfate najrazličnejših oblik najdemo v talni vodi, morski vodi in v tleh. Sulfati raztopljeni v vodi potujejo skozi porni sistem betona v njegovo notranjost. Tam kemično reagirajo s produkti hidratacije, produkti ki pri tem nastanejo pa imajo ekspanzivne lastnosti, zato se v betonu pojavijo notranje natezne napetosti. Zaradi tega se pojavijo razpoke na površini, odpadajo manjši delci betona, pride pa tudi do izgube mase. Proces je mogoč le ob prisotnosti vlage. Teoretično so vse raztopine sulfatov agresivne na portland cementni beton v večji ali manjši meri. Sulfati reagirajo s C_3A fazo in oblikujejo etringit. Stopnja napada je odvisna od številnih faktorjev, glavni pa so delež C_3A v cementu, vodoprepustnost betona ter topnost obravnavanega sulfata.

Zunanji sulfatni napad je najbolj običajna oblika sulfatnega napada. Pojavi se, ko v cementni kamen prodirajo vode z raztopljenimi sulfati. Le ti imajo več virov. Najbolj pogost vir sulfatov je gips, ki ga vsebuje večina zemljin, vendar je količina gipsa ki je topna v vodi, praviloma neškodljiva za beton. Višje koncentracije sulfatov v podtalnicah so večinoma posledica prisotnosti magnezijevega, natrijevega in kalijevega sulfata. Na kmetijskih zemljiščih in v vodi v njihovi bližini najdemo amonijev sulfat, sulfate pa najdemo tudi v morski vodi, v kanalizacijah zaradi delovanja bakterij in kadar pride do oksidacije sulfidnih materialov v glinah v stiku s cementnim kamnom.

Propadanje cementnega kamna zaradi reakcije med produkti hidratacije cementa in sulfatnimi ioni iz okolice ima lahko dve obliki. Kateri proces prevlada, je odvisno od koncentracije in izvora sulfatnih ionov ter od sestave cementnega kamna.

Prva oblika propadanja je ekspanzija in oblikovanje razpok v cementnem kamnu. To povzroči povečanje prepustnosti betona, kar omogoči lažje vstopanje agresivne vode v njegovo strukturo in še pospeši propadanje cementnega kamna. Poleg tega je posledica sulfatnega napada tudi izguba trdnosti in mase zaradi izgube kohezivnosti med produkti hidratacije. Sulfatnemu napadu so podvrženi predvsem kalcijev hidroksid in faze z aluminijem (etringit, monosulfat).

»Večina strokovnjakov se strinja, da je ekspanzija v cementnem kamnu zaradi sulfatnega napada povezana z oblikovanjem etringita. Vendar pa glede mehanizma, ki povzroči ekspanzijo, še ni soglasja. Oblikovanje notranjih napetosti zaradi rasti kristalov etringita in nabrekanje zaradi adsorpcije vode v alkalnem okolju s strani slabo kristaliničnega etringita sta samo dve od različnih hipotez, ki jih zagovarja večina raziskovalcev (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006)«.

Ekspanzijo lahko povzroča tudi oblikovanje gipsa kot rezultat izmenjave kationov. Vendar se najprej pojavi zmanjšanje pH vrednosti in izguba togosti in trdnosti. Šele nato sledi ekspanzija in razpokanje, ter nazadnje preoblikovanje cementnega kamna v kašasto ali nepovezano maso.

»V primeru napada z natrijevim sulfatom, zagotavlja oblikovanje natrijevega hidroksida kontinuirno visoko alkalnost sistema, ki je bistven za stabilnost C-S-H faze. V primeru napada z magnezijevim sulfatom, pa je preoblikovanje kalcijevega hidroksida v gips spremljano z istočasnim oblikovanjem magnezijevega hidroksida, ki je netopen in zmanjša alkalnost sistema. V odsotnosti hidroksilnih ionov v raztopini C-S-H faza ni več stabilna in lahko prav tako vstopa v reakcijo s sulfatnimi raztopinami. To pomeni, da je magnezijev sulfat mnogo bolj škodljiv za cementni kamen kot natrijev sulfat (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006)«.

Če hočemo povečati odpornost betona proti sulfatni agresiji lahko spremenimo kemično sestavo cementa, izboljšamo kvaliteto projektiranja, vgradnje in nege betona, ali zmanjšamo koncentracijo zunanjih virov sulfatnih ionov ali izpostavljenost betona agresivnem okolju. Lahko povečamo odpornost betona proti prodoru vode. »Kemična sestava cementa ima direkten vpliv na kemične reakcije, ki potekajo ob procesu sulfatne agresije. Največji vpliv imata trikalcijev aluminat in sadra, ki sta neposredno udeležena v tvorbi etringita in monosulfoaluminata v svežem betonu ter kasneje etringita v strjenem betonu. Količina trikalcijevega aluminata je najpogostejši pokazatelj za sulfatno odpornost cementa, ki jo lahko merimo. S količino trikalcijevega aluminata kontroliramo količino monosulfoaluminata, ki nastaja v svežem betonu in s tem količino monosulfoaluminata, ki bi se lahko v strjenem betonu pretvoril v etringit, kar se kaže v nabrekanju materiala in v poškodbah materiala, ki so značilne za sulfatno agresijo (Hočevar, 2007).«

3.3.4.1 Zapoznelo oblikovanje etringita

Zapoznelo oblikovanje etringita je primer notranjega sulfatnega napada, saj je vir sulfatov v samem cementnem kamnu. Pojavlja se pri negovanju betona pri povišani temperaturi, npr. z vodno paro ali pri masivnih betonskih elementih, kjer hidratacijska toplota povzroča visoke temperature v notranjosti betonskih elementov. Ker pri temperaturi nad 65°C etringit ni stabilna faza, se razgradi in sulfatne ione, ki pri tem nastanejo, absorbira C-S-H faza. Ko pa se kasneje med uporabo objekta sulfatni ioni desorbirajo, ponovno nastane etringit, kar povzroči ekspanzijo in razpoke v cementnem kamnu. Pogoji za nastanek te oblike sulfatnega

napada so torej visoka temperatura in trajna zasičenost z vodo po končani negi (Mehta, Monteiro, 2006).

3.3.4.2 Taumazitna oblika sulfatnega napada

Taumazitna oblika sulfatnega napada poleg vira sulfatov zahteva še vir karbonatov. Vir sulfatov je praviloma enak kot pri zunanjem sulfatnem napadu, medtem ko karbonati navadno izvirajo iz apnenčevih agregatov ter iz CO₂ iz zraka. Pri tej reakciji pride do razpada produktov hidratacije, predvsem kalcijevega hidroksida in C-S-H faze v prhek material. Taumazit se oblikuje pri nizkih temperaturah (4-10°C) in pri stalnem viru dodatne vode. Za oblikovanje taumazita ni potreben aluminij, ampak samo zadostna količina sulfatov in karbonatov. Oblikuje se dokler je na voljo C-S-H faza, zato uporaba sulfatno odpornega cementa (delež C₃A pod 5%) ne prepreči te oblike sulfatnega napada (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).

3.3.5 Alkalno-agregatna reakcija

Poznamo alkalno-silikatno in alkalno-karbonatno reakcijo. To so praviloma reakcije med alkalijami v cementnem kamnu in sestavinami agregatnih zrn v strjenem betonu. Pri reakciji pride do ekspanzivnih produktov, kar povzroči oblikovanje razpok in posledično manjšo trdnost in modul elastičnosti. To so počasni procesi, ki so na objektih opazni šele po več letih.

Pri alkalno-silikatni reakciji najprej pride do porušitve silikatne strukture agregata v betonu s strani hidroksilnih ionov. Nato se alkalno-kovinski ioni adsorbirajo na površino produktov reakcije. V stiku z vodo alkalno-silikatni gel nabrekne, ker vsrka veliko količino vode zaradi osmoze. Pri tem nastane hidravlični pritisk, ki lahko povzroči ekspanzijo in razpokanje betona. Za pojav alkalno-silikatne reakcije v betonu so torej potrebni agregat z reaktivno obliko SiO₂, visoko alkalna porna raztopina v betonu in zadostna količina vlage.

Precej manj pogosta je alkalno-dolomitna reakcija, saj se zaradi neustrezne trdnosti dolomitni agregati, ki sodelujejo v tej reakciji, navadno ne uporabljajo za izdelavo betonov. Pri tej reakciji pride do tako imenovane dedolomitizacije, ko dolomitne minerale napadejo

alkalni in hidroksilni ioni v porni raztopini. Posledica alkalno-dolomitne reakcije je, tako kot pri alkalno-silikatni reakciji, oblikovanje razpok.

Nevarnost alkalno-agregatnih reakcij se lahko zmanjša z uporabo nizko alkalnih cementov, ali z dodajanjem žindre, elektrofiltrskega pepela ali mikrosilike, še boljše pa je, da se ne uporablja agregatov, ki bi lahko povzročili katero od teh reakcij (Bokan Bosiljkov, Žarnić, 2006).

3.4 Mehanski vplivi (XM)

Površinska obraba betona je lahko posledica treh procesov. Ti so abrazija, erozija in kavitacija. Abrazija je suho brušenje površine zaradi drsenja ali kotaljenja raznih teles. Ponavadi gre za obrabo zaradi vozil. Erozija je obraba zaradi abrazivnega delovanja trdnih delcev v tekočinah ali plinih. Značilna je za razne hidrotehnične objekte. Zanje pa je značilna tudi kavitacija. Kavitacija je pojav pri tečenju vode, ko se na mestih z veliko hitrostjo in majhnim tlakom pojavijo mehurčki, ki na mestih z manjšo hitrostjo in večjim tlakom eksplodirajo, in povzročajo velike lokalne obremenitve betona (Mehta). Tako obremenjene betonske elemente uvrstimo v razred izpostavljenosti XM.

V to poglavje bi lahko uvrstili tudi mehanske preobremenitve betona zaradi udarcev, cikličnega obremenjevanja in pomikov temeljev. Posledice takega delovanja so razpoke ali lomi.

Pri odpornosti na površinsko obrabo ima glavno vlogo ustrezna vrsta agregata in njegova zrnavostna sestava, saj cementni kamen nima visoke odpornosti na obrabo. Priporoča se uporaba nizkega v/c razmerja in uporaba večjega deleža grobega agregata. Pomembna je tudi konsistenca betona ter delež zraka v mešanici. Preskus odpornosti betona proti obrusu opisuje Dodatek 6 standarda SIST 1026 (Združenje za beton Slovenije, 2009).



Slika 7: Obraba betonskega vozišča

3.5 Biološki procesi propadanja

Osnova za začetek biodegradacije je znižanje alkalnosti betona zaradi karbonatizacije in izpiranje njenih produktov iz betona. Z izpiranjem pride do povečane poroznosti betona, kar omogoča zadrževanje vlage v površinskem delu betona. To predstavlja idealno okolje za razvoj alg in lišajev, ti pa predstavljajo dobro podlago tudi za rast večjih rastlin. Povečana vlažnost na površini lahko povzroči poškodbe v primeru zmrzovanja, kar lahko v kombinaciji z napetostmi, ki jih povzroči rast korenin, vodi tudi v popolno uničenje zaščitnega sloja betona. V morskih okoljih nevarnost predstavljajo tudi školjke.



Slika 8: Nastanek mahu in lišajev, najverjetneje kot posledica karbonatizcije betona

4 PRIMERI IZBIRE STOPENJ IZPOSTAVLJENOSTI

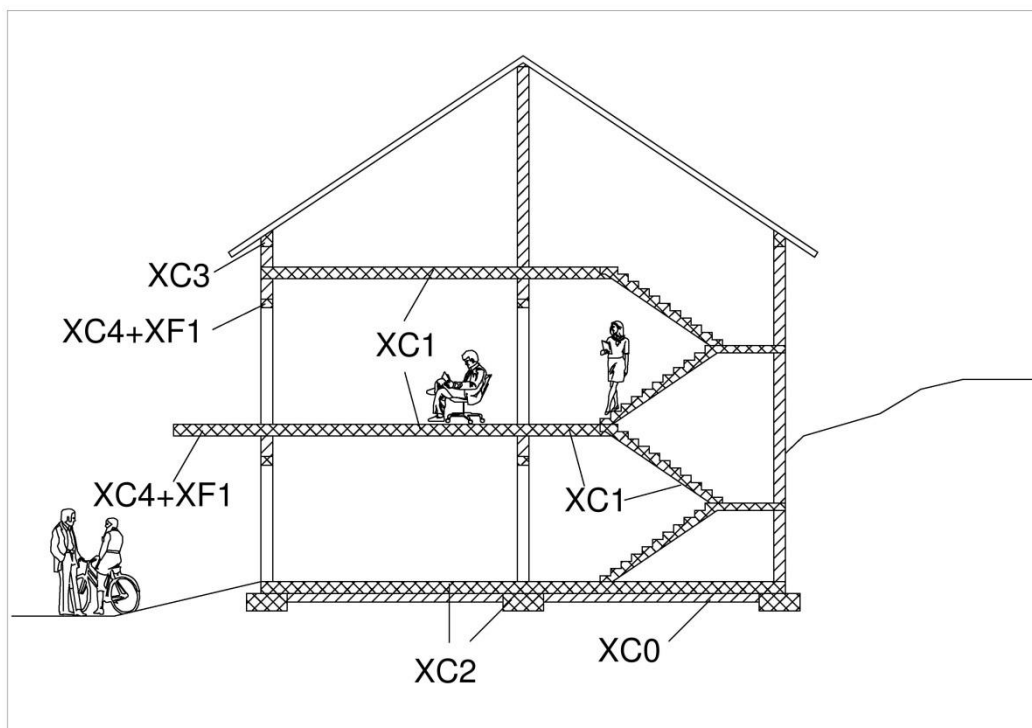
V tem poglavju bomo skušali predstaviti primere izbire stopenj izpostavljenosti za konstrukcijske elemente pri nekaterih tipih konstrukcij. Pri tem bomo večinoma obravnavali okolje večjega dela Slovenije, pri katerem upoštevamo prisotnost kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode, ter zmrzovanje in tajanje pozimi. Čeprav naj bi standard SIST EN 206-1 podrobno definiral klasifikacijo agresivnega okolja v stopnje izpostavljenosti, pa so meje med posameznimi razredi dostikrat zabrisane in odvisne od včasih precej subjektivne ocene projektanta. Zato bomo skušali vse izbire stopenj izpostavljenosti, ki so navedene na skicah, tudi ustrezno argumentirati. Na skicah so naštetni vsi vplivi, ki so jim konstrukcijski elementi izpostavljeni. Tisti, ki na koncu niso merodajni za določanje sestave betonske mešanice, so zapisani v oklepajih. Za določanje priporočenih mejnih vrednosti za sestavo in lastnosti betona se bomo pretežno sklicevali na preglednico 4, glede zahtevanih posebnih lastnosti strjenega betona pa na preglednico 3.

Prvi primer je stanovanjska hiša na sliki 9. Hiša se nahaja v okolju, ki ustreza večini ozemlja Slovenije, pri katerem ni vpliva morskega okolja. Če začnemo pri temeljih, pri teh večinoma velja, da se nahajajo v pretežno mokremu okolju. Zato jih uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XC2. Če zemljina, ki jih obdaja, ne vsebuje agresivnih snovi, je to tudi edini vpliv okolja, ki so mu izpostavljeni. Ta izbira je običajna v praksi za vse temelje v neagresivnih zemljinah in je v skladu s preglednico 1. Za tak beton je v preglednici 4 priporočeno največje vodo cementno razmerje $(v/c)_{\max}$ 0,6 ter minimalna vsebnost cementa 280 kg/m^3 . Minimalni trdnostni razred betona naj bi bil C25/30. Če pogledamo še priporočila in zahteve iz preglednice 3, je za tak beton zahtevana še stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-I. Nekoliko strožje kriterije za temelje kot v preglednici 1, najdemo v dodatku 1 (Združenje za beton, 2009, str. 79, točki 7 in 8), kjer je upoštevana tudi možnost, da temelji niso večino časa potopljeni v vodi, ampak samo vkopani v tleh. Za te primere je priporočena stopnja izpostavljenosti XC3 ali celo XC4 in bi bile zahtevane še boljše lastnosti betona. Vendar je v večini primerov primerna izbira stopnje izpostavljenosti XC2.

Vsi nearmirani elementi znotraj stavb, popolnoma vkopani v neagresivno zemljino ali potopljeni v neagresivno vodo, spadajo v stopnjo izpostavljenosti XC0. V našem primeru tem kriterijem ustreza izravnalni beton pod talno ploščo. Zahtev za take betone standarda ne navajata, je pa v preglednici 4 priporočena minimalna trdnost betona C12/15.

Betonski elementi znotraj stavbe so izpostavljeni nizki vlažnosti v zraku, zato jih uvrstimo v stopnjo XC1. Izjema niso niti običajne kopalnice in kuhinje, ki jih prav tako lahko razvrstimo v

stopnjo XC1. Vsi ti elementi so izpostavljeni nizki stopnji agresivnosti okolja in so za njih priporočene vrednosti maksimalnega vodo cementnega razmerja $(v/c)_{\max}$ 0,65, najmanjše vsebnosti cementa 260 kg/m^3 betona, ter minimalni trdnostni razred C20/25.



Slika 9: Stanovanjska hiša v krajih običajnih zimskih temperatur

Zunanje betonske stene, ki niso zaščitene pred dežjem, so v hladnih podnebnjih lahko obremenjene z zmrzovanjem in tajanjem in jih zato uvrstimo v razred izpostavljenosti XF. Ker na navpičnih betonskih površinah zasičenost z vodo ni tako velika in ker niso prisotna sredstva za tajanje, v tem primeru preglednica 1 priporoča stopnjo izpostavljenosti XF1, čeprav se v dodatku 1 priporoča tudi XF3. Poleg tega so zunanje stene izpostavljene še izmenično mokremu in suhemu okolju, torej stopnji izpostavljenosti XC4. Če pogledamo zahteve in priporočila iz preglednic 3 in 4, vidimo da so zahteve pri teh dveh stopnjah izpostavljenosti različne. Tako je na primer maksimalno vodo cementno razmerje za stopnjo izpostavljenosti XC4 enako 0,5, pri stopnji izpostavljenosti XF1 pa le 0,55. Merodajna je seveda strožja zahteva, torej zahteva pri XC4. Minimalni trdnostni razred in minimalna vsebnost cementa sta v preglednici 4 sicer za oba enaka ($C30/37$ in 300 kg/m^3), vendar pa je pri stopnji izpostavljenosti XF1 v preglednici 3 zahtevana tudi notranja odpornost betona proti

zmrzovanju in tajanju (NOZT-100). Zato moramo za opis stopnje izpostavljenosti takega elementa navesti obe stopnji, torej XC4+XF1. Pri tej stopni izpostavljenosti je v preglednici 3 zahtevana še stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-II.

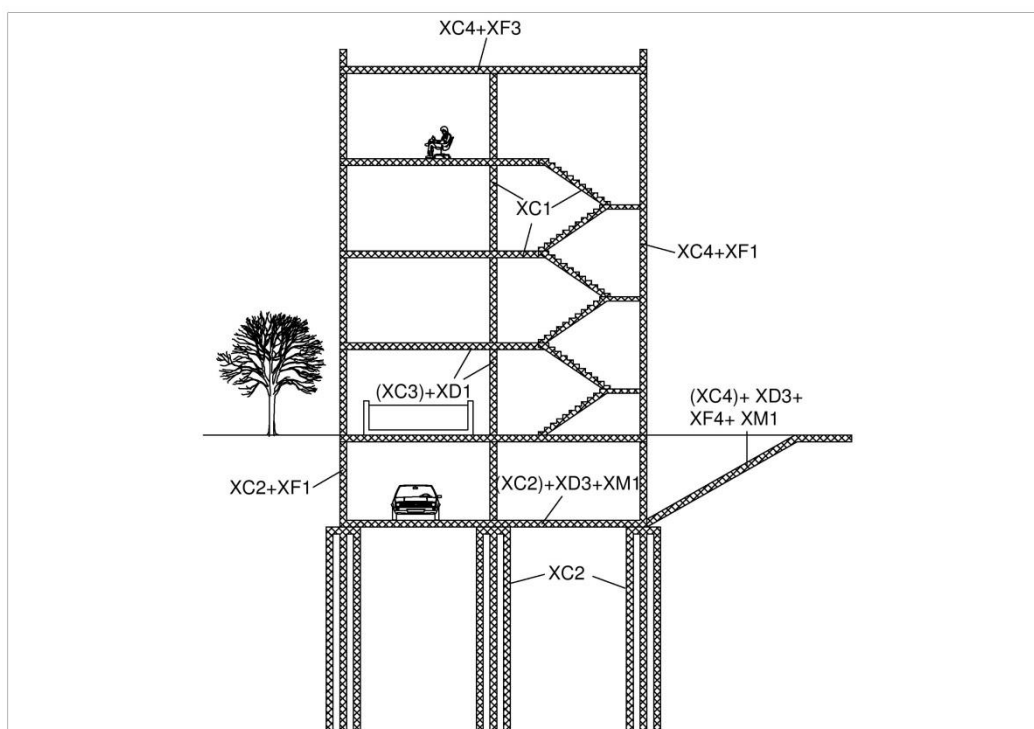
Za balkonsko ploščo smo prav tako navedli stopnjo izpostavljenosti XC4+XF1, tako da je priporočena enaka sestava betona kot v prejšnjem primeru. Sicer je tako v preglednici 1 kot v dodatku 1 za horizontalne elemente izpostavljene dežju priporočena stopnja izpostavljenosti XF3 namesto XF1, saj naj bi bila pri zmrzovanju in tajanju prisotna močna zasičenost z vodo. Vendar lahko našo odločitev argumentiramo s tem, da so balkoni običajno obloženi z materiali, ki omogočajo hitrejše odtekanje vode ter manjšo zasičenost betona z vodo.

Zunanji elementi stavb, ki so zaščiteni pred dežjem, kot na našem primeru betonski elementi pod strešnim napuščem ali pa morebitna zaščiteni fasada, so izpostavljeni stopnji izpostavljenosti XC3, ne pa tudi zmrzovanju. Za take betone je po preglednici 3 zahtevana stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-I, ter po preglednici 4 priporočeno maksimalno vodo cementno razmerje $(v/c)_{max}$ 0,55, najmanjša vsebnost cementa 280 kg/m³ betona in minimalni trdnostni razred betona C30/37.

Pri manjših objektih je morda smiselno uporabiti beton enakih karakteristik za vse konstrukcijske elemente. Seveda ga izberemo tako, da izpolnjuje najostrejše zahteve izmed vseh možnih. Kljub uporabi dražjega betona v tem primeru verjetno vseeno prihranimo, saj ne naročamo več različnih betonskih mešanic. Hkrati pa se izognemo napakam pri gradnji, saj pri gradnji manjših stavb pogosto ni ustreznega nadzora.

Drugi primer je večnadstropna poslovno stanovanjska stavba na sliki 10, ki se ne nahaja v morskem okolju. Podobno kot temelje v prejšnjem primeru, lahko tukaj v stopnjo izpostavljenosti XC2 uvrstimo pilote, na katerih temelji stavba, in pa tudi stene ter talno ploščo, ki so v stiku z neagresivno zemljino.

V primeru, da je zemljina zasičena z vodo, del kleti pa je v coni zmrzovanja, lahko za kletne stene navedemo kombinacijo stopenj izpostavljenosti XC2+XF1. V tem primeru se priporočeno maksimalno dovoljeno vodo cementno razmerje zmanjša na 0,55, minimalna vsebnost cementa poveča na 300 kg/m³ betona, kot minimalni priporočeni trdnostni razred betona pa navaja C30/37. Za tak beton se zahteva tudi razred odpornosti proti prodoru vode PV-I ter notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju (NOZT-100).



Slika 10: Večnadstropni poslovno-stanovanjski objekt v krajih običajnih zimskih temperatur

V kletnih prostorih imamo garažo. Zaradi prometne obremenitve, ki je v tem primeru sicer majhna, saj bo betonsko vozišče verjetno obremenjeno samo z vozili z majhno maso in pnevmatskimi kolesi, uvrstimo take elemente v stopnjo izpostavljenosti XM1 ali pa obrabo površine betona celo zanemarimo. Tak beton mora zagotavljati dovolj veliko odpornost proti obrusu. Klančina, ki vodi do garaže je v našem primeru izpostavljena tudi zunanjim vplivom. Če obravnavamo objekt v hladnem podnebju, to pomeni, da obstaja nevarnost zmrzovanja, najverjetneje v prisotnosti vode, ki vsebuje sredstva za tajanje. Če združimo vse skupaj, je klančina obremenjena z zunanjimi vplivi, ki jih zajamejo stopnje izpostavljenosti XC4, XD3, XF4 in XM1. XC4 ker je izpostavljena izmenično mokremu in suhemu okolju, XD3, ker je poleg tega izpostavljena kloridom, ki ne izvirajo iz morske vode, XF4 pa zaradi močne zasičenosti z vodo s sredstvi za tajanje ob nevarnosti zmrzovanja. Če pogledamo zahteve in priporočila za sestavo betona ob teh stopnjah izpostavljenosti, ugotovimo da bi lahko izpustili XC4, saj so vse zahteve za to stopnjo izpostavljenosti zagotovljene že z upoštevanjem ostalih treh, torej XD3+XF4+XM1. Za tak beton je po preglednici 3 zaradi prisotnosti kloridov zahtevan razred odpornosti proti prodoru vode PV-II, zaradi zmrzovanja razred odpornosti površine na zmrzovanje in tajanje OPZT-S2 ter zaradi prometne obtežbe razred odpornosti proti obrusu OO-1. Če pogledamo najstrožja priporočila za sestavo betonske mešanice pa

potrebujemo aeriran beton z minimalno 4% vsebnostjo zraka, maksimalnim vodo cementnim razmerjem $(v/c)_{\max}$ 0,45, minimalno količino cementa 340 kg/m^3 ter minimalni trdnostni razred C35/45.

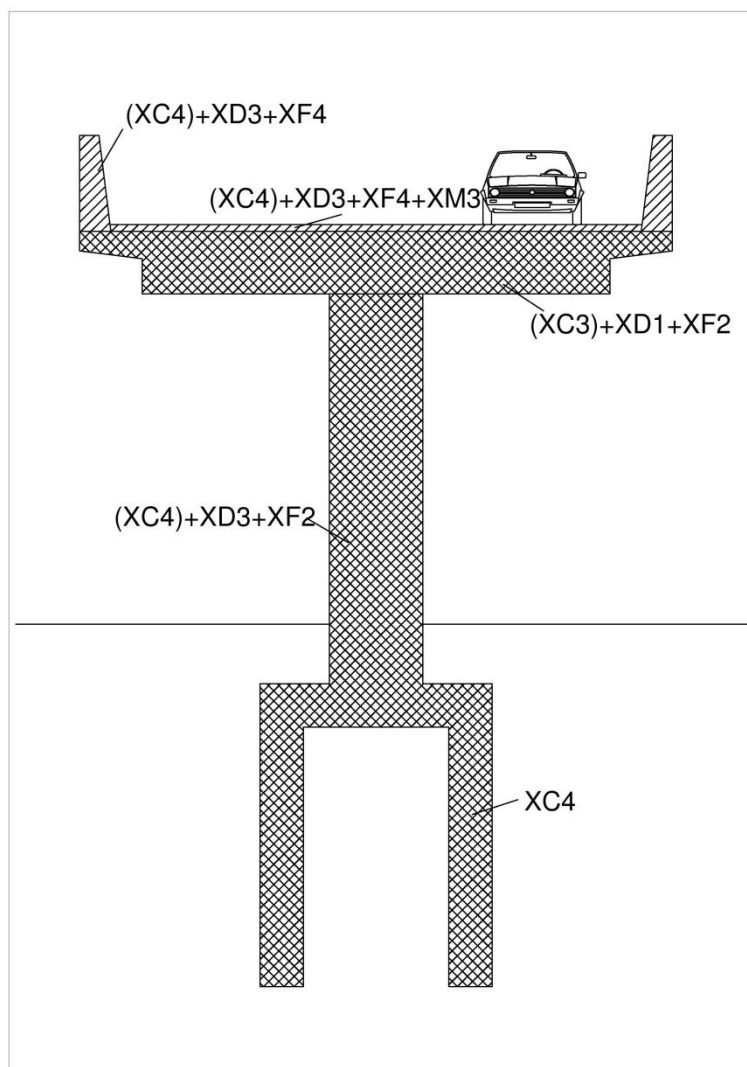
Podobno kombinacijo stopenj izpostavljenosti dobimo, če pri talni plošči v garaži upoštevamo, da lahko avtomobili ob soljenju cest od zunaj prinesejo sol. V tem primeru moramo upoštevati stopnji izpostavljenosti XD3+XM1. Zaradi odsotnosti nevarnosti zmrzovanja in tajanja imamo nekoliko nižja priporočila glede vsebnosti cementa, saj se ta zmanjša na 320 kg/m^3 betona, hkrati pa zadostujeta zahtevi glede prodora vode (PV-II) in odpornosti proti obrabi (OO-1).

Betonske elemente v notranjosti in navpične zunanje elemente, ki so izpostavljeni dežju, smo obravnavali že v prejšnjem primeru. Imamo pa tukaj še en, nekoliko drugačen primer in sicer teraso, ki predstavlja horizontalni element izpostavljen dežju. Tukaj so stopnje izpostavljenosti podobne, kot pri navpičnih elementih, le pri zmrzovanju in tajanju se zaradi močnejše zasičenosti z vodo le ta poveča na XF3. Tako dobimo kombinacijo stopenj izpostavljenosti XC4+XF3. Podobno bi bilo pri nezaščitenem balkonu. Tudi v tem primeru je priporočen aeriran beton z vodo cementnim razmerjem $(v/c)_{\max}$ 0,5, trdnostnim razredom C30/37 ter minimalno 320 kg cementa na kubični meter betona. Poleg tega pa je zahtevana še notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju ter odpornost proti prodoru vode (NOZT-150, PV-II).

Če je v katerem od notranjih prostorov povečana vlažnost zraka, izberemo razred izpostavljenosti XC3, kot pri zunanjih elementih zaščitenih pred dežjem. Tak primer bi bila kakšna večja kuhinja ali pralnica. V primeru javnega kopališča morajo notranji elementi zadoščati tudi pogojem pri stopnji izpostavljenosti XD1, saj so lahko izpostavljeni kloridom, ki jih prenaša zrak. Pri obeh omenjenih stopnjah izpostavljenosti preglednica 4 priporoča maksimalno vodo cementno razmerje $(v/c)_{\max}$ 0,55 ter minimalni trdnostni razred C30/37. Kar pa se tiče minimalne vsebnosti cementa, pa je strožja zahteva pri stopnji izpostavljenosti XD1, kjer je priporočeno vsaj 300 kg cementa na m^3 betona (pri XC3 je ta vrednost 280). Preglednica 3 za tak beton zahteva še razred odpornosti proti prodoru vode PV-I. Ker so torej priporočila za stopnjo izpostavljenosti XD1 strožja, lahko za take betone predpišemo le to in izpustimo XC3. Zahteve za beton iz katerega je zgrajen sam bazen bomo predstavili v posebnem primeru.

Nadaljujemo lahko s premostitvenimi objekti. Na sliki 11 je prečni, na sliki 12 pa vzdolžni prerez cestnega mostu. V primeru, ko so temelji mostov izpostavljeni talni vodi, jih podobno kot v prejšnjih primerih uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XC2. Take betone smo že podrobneje predstavili v zgornjih odstavkih. Če pa so vkopani v neagresivno zemljinu, jih

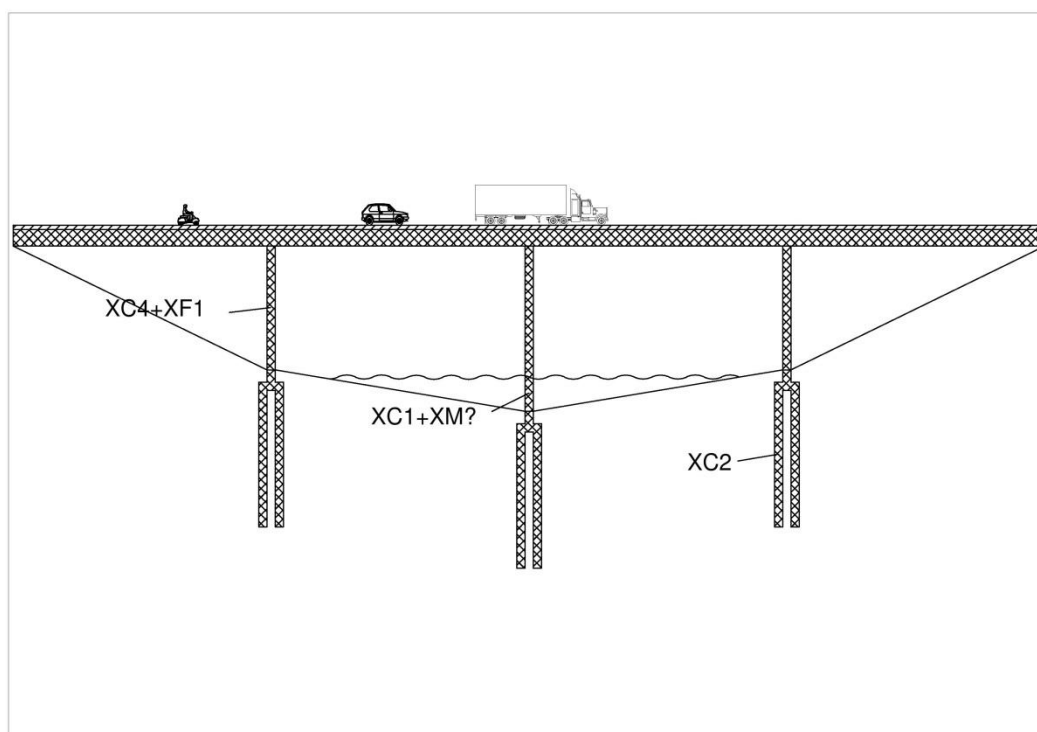
uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XC3 ali XC4. Zahteve za stopnjo izpostavljenosti XC3 smo prav tako že navedli v prvem primeru, pri XC4 pa se nekoliko razlikujejo. Tako priporočen $(v/c)_{max}$ znaša 0,5, minimalna priporočena vsebnost cementa pa se poveča z 280 na 300 kg/m³ betona. Prav tako se zviša zahteva za odpornost proti prodoru vode na stopnjo PV-II. V tem primeru predpostavimo, da temelji oziroma temeljni piloti niso v coni zmrzovanja. Če pa so, je potrebno upoštevati še stopnjo izpostavljenosti XF1.



Slika 11: Prečni prerez prometno močno obremenjenega premostitvenega objekta s podporno konstrukcijo izpostavljeno škropljenju slanice

Če nadaljujemo s podpornimi stebri, pa naletimo na več možnih variant zunanjih vplivov. Na sliki 11 je predstavljen primer, pri katerem premostitveni objekt poteka nad cesto. V takem

primeru so stebri izpostavljeni izmenično mokremu in suhemu okolju (XC4), pršču, ki vsebuje kloride (XD3), ter zmrzovanju/tajanju pri zmerni zasičenosti z vodo, ki vsebuje sredstva za tajanje (XF2). Zahteve pri stopnji izpostavljenosti XC4 so manjše kot pri XD3, zato zadostuje, če v tem primeru navedemo stopnje izpostavljenosti XD3 in XF2. Na podobno kombinacijo stopenj izpostavljenosti smo naleteli že v primeru klančine ki vodi do garaže pri poslovno stanovanjskem objektu, le da tokrat ni prisotna stopnja izpostavljenosti XM1, ter da imamo namesto stopnje izpostavljenosti XF4 le XF2. V dodatku 1 standarda SIST 1026 je sicer za tak primer priporočena tudi stopnja izpostavljenosti XF4, vendar gre verjetno za napako, saj na navpičnih elementih ne more priti do zastajanja vode. Priporočene mejne vrednosti za sestavo betona takih elementov smo tudi že navedli. Razlika je le v tem, da tukaj ni potrebna odpornost betona na obrus, ter da se priporočena minimalna količina cementa zmanjša na 320 kg/m^3 betona.



Slika 12: Vzdolžni prerez premostitvenega objekta nad vodotokom

Če imamo premostitveni objekt, ki poteka čez rečno strugo, kot je prikazano na sliki 12, je situacija nekoliko drugačna. Deli stebrov, ki niso potopljene v vodo so izpostavljeni okolju, ki ga lahko opišemo s stopnjami izpostavljenosti XC4 in XF1. V dodatku 1 se namesto XF1

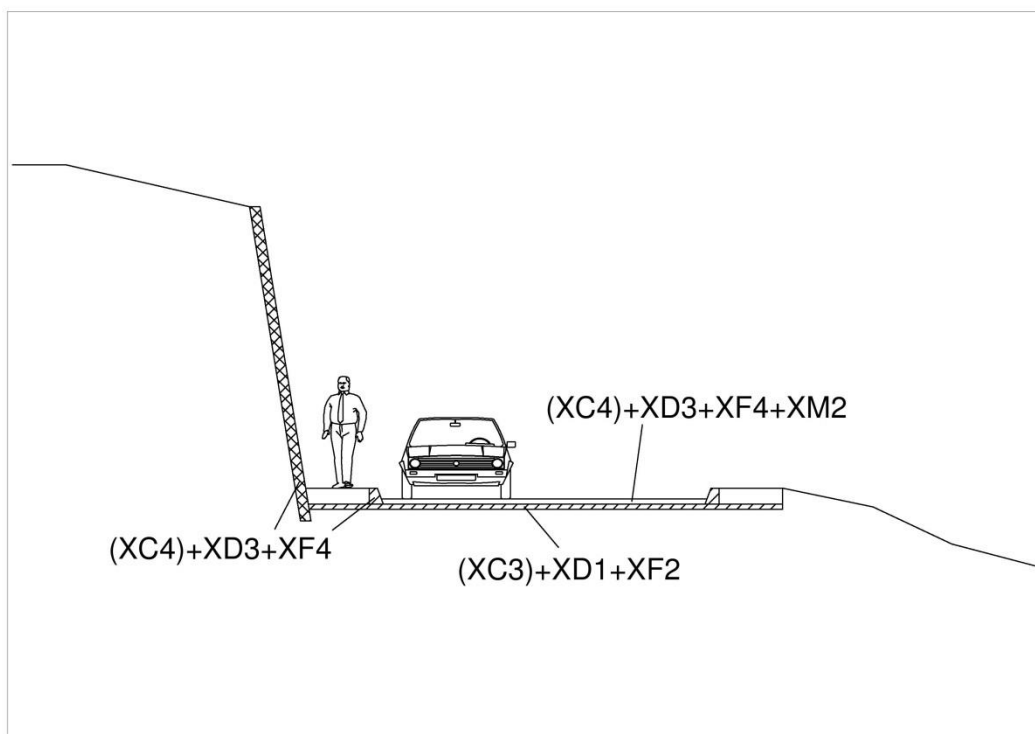
priporoča celo stopnja XF3, kar pa bi tudi lahko bila napaka, kot v prejšnjem primeru. Tudi take stopnje izpostavljenosti smo že obravnavali pri navpičnih zunanjih elementih izpostavljenih dežju (slika 10).

Trajno potopljeni deli stebrov so, kar se tiče karbonatizacije, manj obremenjeni in jih lahko uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XC1. Zahteve za tak beton so opisane v primeru stanovanjske hiše. Vendar se poleg tega pri stebrih lahko pojavi tudi nevarnost obrusa zaradi plavajočih delcev v vodi. Odvisno od hitrosti vode in od strukture plavajočih delcev, lahko take elemente razvrstimo tudi v stopnjo izpostavljenosti XM3, zato mora beton zadostiti tudi zahtevam glede odpornosti proti obrusu.

Prekladne mostne konstrukcije na cestah, ki se pozimi solijo, so običajno precej zaščitene z voziščno konstrukcijo. Zato je izpostavljena nekoliko manj agresivnim zunanjim vplivom. Le Te lahko opišemo s stopnjami izpostavljenosti XC3, XD1 in XF2. Zaradi podobnih vzrokov, kot v prejšnjih primerih, lahko tukaj izpustimo razred XC3. Priporočena sestava za take betone mora ustrezati kriterijem, kot je maksimalno vodo cementno razmerje $(v/c)_{\max}$ 0,55, minimalni trdnostni razred C30/37 ter minimalno 300 kg cementa na m³. Priporočeno je tudi, da je beton aeriran in vsebuje vsaj 4% zraka, beton pa mora imeti tudi zadostno odpornost proti prodoru vode (PV-I) ter zmrzovanju in tajanju (OPZT-S1).

Če je betonska tudi sama voziščna plošča, naletimo na precej agresivnejše razmere, saj je lahko obremenjena z izmenično suhim in mokrim okoljem v katerem obstaja nevarnost zmrzovanja ob prisotnosti talilnih soli, poleg tega pa je prisotna velika obremenitev betona z obrabo površine (XC4, XD3, XF4, XM3). Za pripravo betonske mešanice, ki bo trajna v takem okolju, moramo upoštevati razrede izpostavljenosti XD3, XF4 in XM3. Podobno, le brez mehanskih obremenitev (XD3, XF4) so obremenjeni tudi vsi ostali betonski elementi, ki se pojavljajo v bližini in so izpostavljeni slanemu pršču. Take so na primer betonske ograje (slika 11), robni venci, robniki in podporne stene (slika 13). Sestava vseh teh betonov je podobna kot pri dovozni klančini do garaže pri drugem primeru, le da se razlikujejo v zahtevah pri odpornosti proti obrusu.

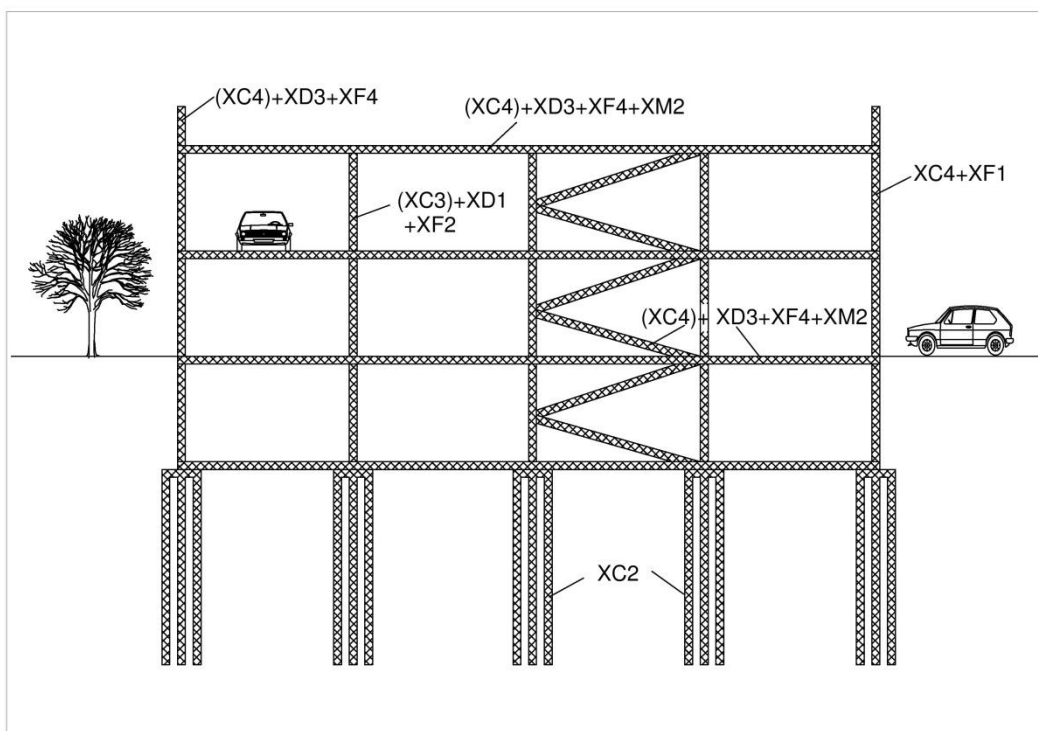
Izbira stopnje mehanske obremenitve je v standardu precej prepuščena oceni projektanta, saj ni točno definirano, kje je meja med zmerno, močno in zelo močno obremenitvijo. Za približno predstavbo lahko rečemo, da so vozišča lokalnih cest obremenjene primerljivo s stopnjo izpostavljenosti XM2, medtem ko bolj obremenjena cestišča, kot na primer pri avtocestah, lahko uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XM3.



Slika 13: Prečni profil prometno manj obremenjene lokalne ceste

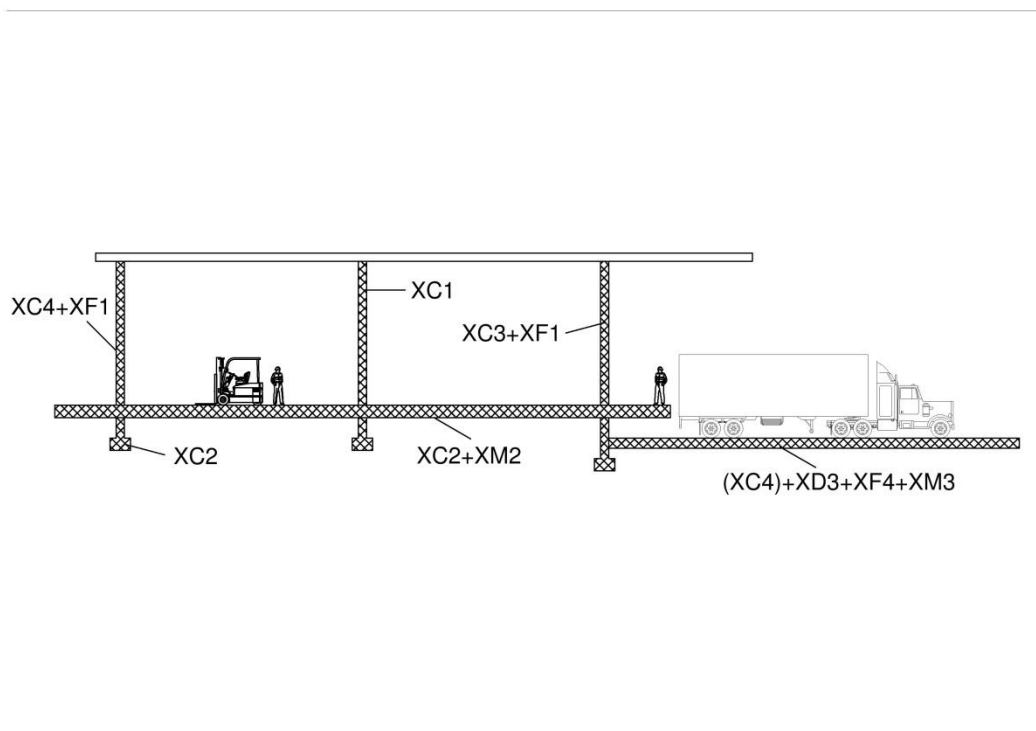
Konstrukcijski elementi predstavljeni na sliki 13 so predstavljeni že pri opisu slike 11. Izjema je beton pod voziščno ploščo, ki je zaradi le te nekoliko zaščiten pred zunanjimi vplivi, zato ustreza stopnjam izpostavljenosti $XD1+XF2$. Tako kombinacijo smo obravnavali že pri prekladni mostni konstrukciji na sliki 11.

Povozni elementi v garažnih hišah (slika 14) so obremenjeni podobno kot betonske voziščne konstrukcije. Tudi večina ostalih elementov je obremenjena podobno kot v primerih, ki smo jih že obravnavali. So pa v garažnih hišah nekoliko bolj kot v običajnih objektih obremenjeni notranji vertikalni elementi, sploh kadar gre za odprte garažne hiše, saj so zaradi stika z zunanjim zrakom izpostavljeni večjim vplivom kar se tiče karbonatizacije ($XC3$), v manjši meri pa so prisotni tudi kloridi in pa nevarnost zmrzovanja ($XD1$, $XF2$). Tako okolje torej zahteva lastnosti betona, ki jih lahko zagotovimo z upoštevanjem stopenj izpostavljenosti $XD1+XF2$ in smo jih tudi že opisali.



Slika 14: Garažna hiša v krajih običajnih zimskih temperatur

Na zanimive situacije naletimo, če obravnavamo skladišča ali industrijske objekte. Tukaj namreč lahko pride do najrazličnejših kombinacij stopenj izpostavljenosti, saj se v teh objektih pojavljajo različni načini transporta, agresivne snovi, ki se v teh objektih skladiščijo ali uporabljajo in še marsikaj. Tako lahko, odvisno od vrste koles na vozilih, ki se uporabljajo znotraj teh objektov, za nosilne tlake predpišemo stopnje izpostavljenosti na obrabo od XM1 do XM3. Prav tako so lahko isti tlaki obremenjeni tudi s kemičnim delovanjem XA, ki ga do zdaj še nismo obravnavali. Nabor možnosti je tako velik, da smo se omejili na preprost primer skladišča nenevarnih snovi (slika 15), ki je zaprto in kjer so tlaki obremenjeni z močno mehansko obremenitvijo (XM2). Na sliki smo poskusili ponazoriti razliko med stopnjo izpostavljenosti XM2 in XM3. V notranjosti skladišča, kjer se vozijo lažja vozila, kot na primer viličarji, je primerna izbira stopnja izpostavljenosti XM2, medtem ko je zunanje betonsko vozišče, po katerem se vozijo težka tovorna vozila, izpostavljeno stopnji XM3. Vse ostale stopnje izpostavljenosti in njihove kombinacije so bile že zajete v prejšnjih primerih.



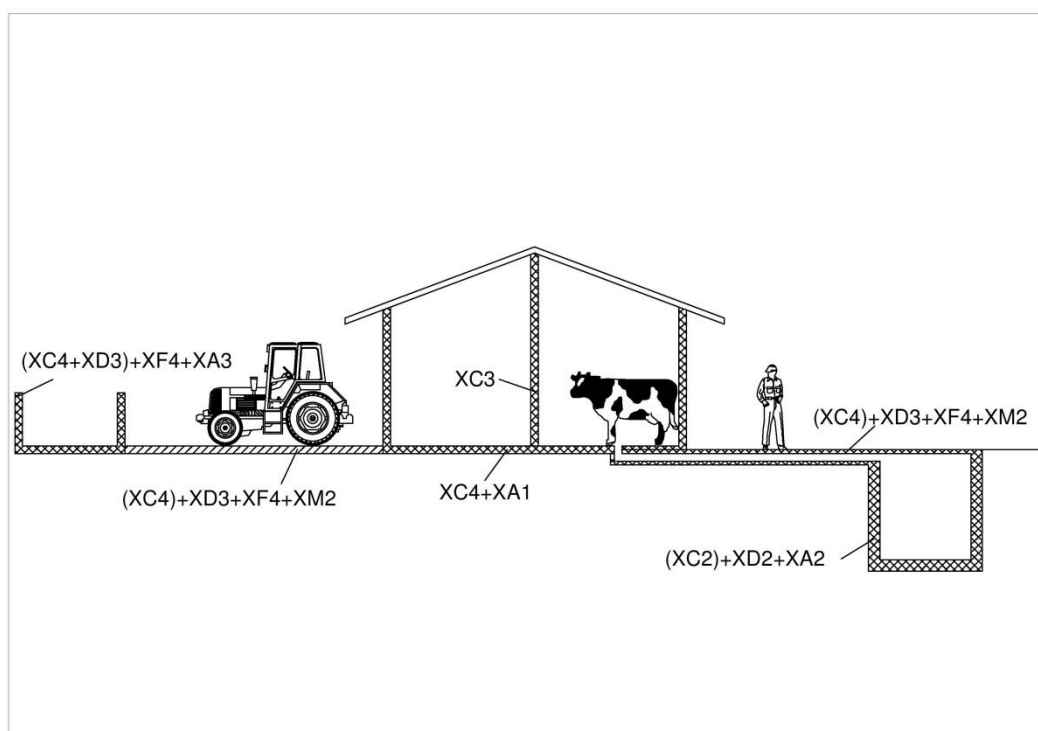
Slika 15: Skladišče nenevarnih snovi, v krajih običajnih zimskih temperatur, s tlaki obremenjenimi z močno mehansko obremenitvijo

Poseben primer so tudi kmetijski objekti, saj so izpostavljeni težki mehanizaciji, vlažnemu okolju, soljenju in kemični agresiji, skratka praktično vsem možnim agresivnim zunanjim vplivom. Na sliki 16 smo poskusili predstaviti nekaj tipičnih elementov na kmetijskih objektih.

Skrajno levo je zbiralnik hlevskega gnoja, ki je poleg običajnih zunanjih vplivov izpostavljen tudi kloridom in pa kemijski agresiji. Tako lahko zahteve za sestavo betona opišemo s kombinacijo stopenj izpostavljenosti XD3+XF4+XA3. Preglednica 2 navaja samo mejne vrednosti za izbiro stopenj izpostavljenosti pri kemičnem delovanju naravnih zemljin in talne vode. Za druge primere je potrebno narediti analizo vpliva kemičnega delovanja na beton. V našem primeru bomo predpostavili, da lahko uvrstimo kemično delovanje v stopnjo izpostavljenosti XA3. V tem primeru so priporočene naslednje vrednosti sestave betona. Maksimalno vodo cementno razmerje $(v/c)_{max}$ je 0,45, minimalni trdnostni razred betona C35/45 ter minimalna vsebnost cementa v m^3 betona 360 kg. Zahtevana je tudi velika odpornost proti prodoru vode (PV-III), ter odpornost površine proti zmrzovanju in tajanju (OPZT-S2).

Notranji elementi v hlevih so izpostavljeni visoki vlažnosti zraka, zato jih uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XC3. Tla so izpostavljena izmenično mokremu in suhemu okolju (XC4), lahko pa so tudi nekoliko izpostavljena kemični agresiji (XA1).

Betonske koristne površine okoli kmetijskih objektov so, podobno kot betonske voziščne konstrukcije, obremenjene s kombinacijo stopenj izpostavljenosti XD3+XF4+XM2.

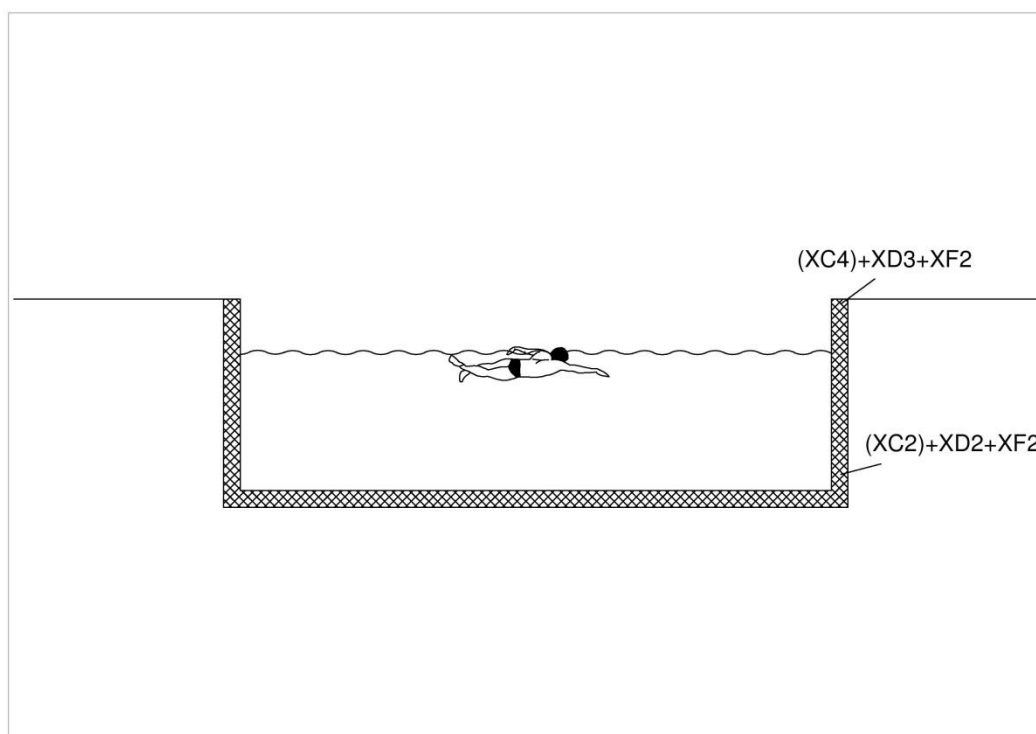


Slika 16: Kmetijski objekt v krajih običajnih zimskih temperatur

Na desni strani skice je viden tudi zbiralnik odpadnih vod, ki je obremenjen s stopnjami izpostavljenosti XD2 in XA2. Zanj so priporočene vrednosti $(v/c)_{\max}$ 0,5, minimalni razred tlačne trdnosti C30/37 in minimalna vsebnost cementa 320 kg/m^3 ter zahtevana odpornost proti prodoru vode PV-II.

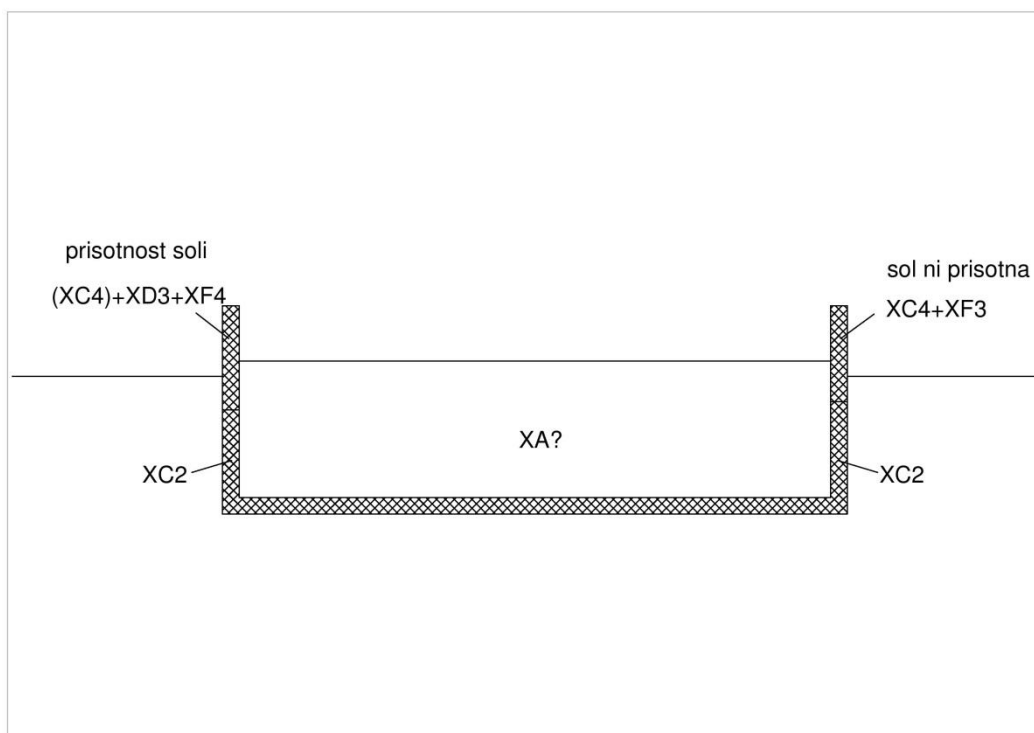
V primeru večnadstropnega poslovno stanovanjskega objekta smo že omenili plavalni bazen. Če gre za pokrit bazen, lahko agresivno delovanje okolice opišemo s stopnjo izpostavljenosti XD2 ki predstavlja mokro, le redko suho okolje ob prisotnosti kloridov, če pa so betonski elementi izpostavljeni škropljenju, pa lahko izberemo celo stopnjo izpostavljenosti XD3.

Na sliki 17 je prikazan odprt plavalni bazen, ki je izpostavljen tudi zunanjim vplivom. Tako je območje, ki je izpostavljeno izmenično mokremu in suhemu okolju, podvrženo stopnjam izpostavljenosti XD3+XF2, stalno potopljeni del pa XD2+XF2. V prvem primeru je priporočeno vodo cementno razmerje $(v/c)_{\max}$ 0,45, minimalni trdnostni razred betona C35/45 ter minimalna vsebnost cementa 320 kg/m^3 . V drugem primeru pride do zmanjšanja priporočenega minimalnega trdnostnega razreda betona na C30/37 ter povečanja minimalnega dovoljenega vodo cementnega razmerja na 0,55. V obeh primerih je zahtevana še odpornost proti prodoru vode (PV-II) ter odpornost površine proti zmrzovanju in tajanju (OPZT-S1). Ker pa seveda ni smiselno za izdelavo bazena naročati dveh različnih sestav betona, se izbere sestava, ki izpolnjuje ostrejšje pogoje.



Slika 17: Plavalni bazen v krajih običajnih zimskih temperatur

Na sliki 18 je predstavljen bazen za shranjevanje industrijskih odpadkov. Tudi pri tem primeru gre za podobne stopnje izpostavljenosti kot pri plavalnem bazenu, le da je poleg prej naštetega lahko prisotna še kemijska agresija zaradi različnih škodljivih snovi.

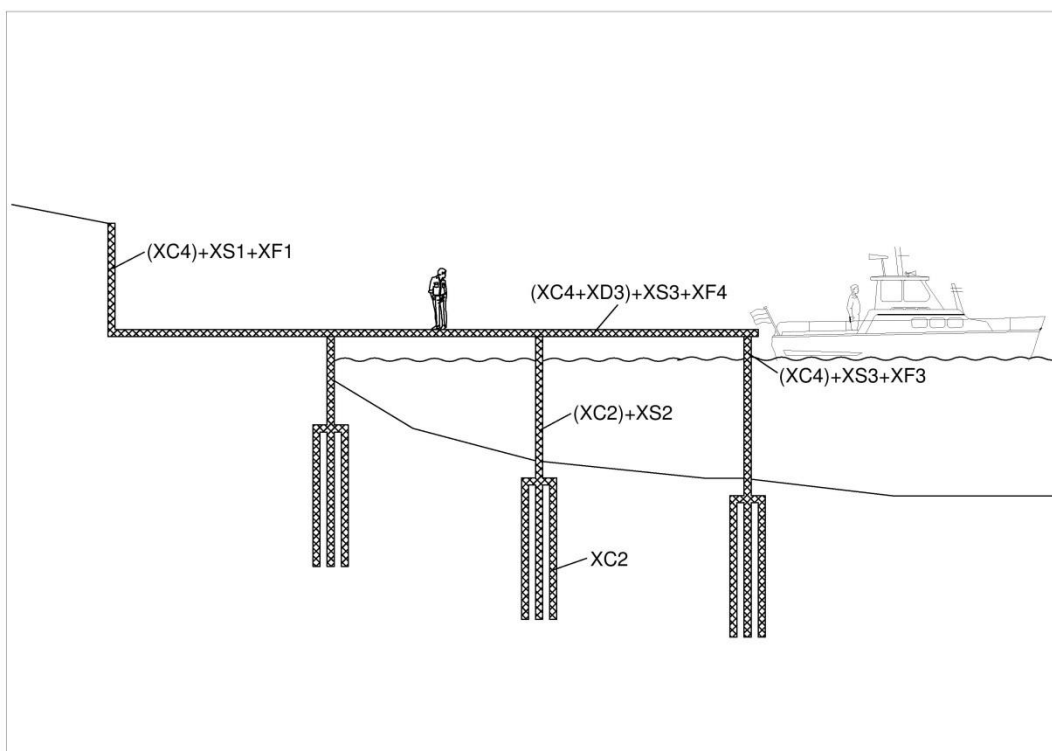


Slika 18: Industrijski bazen v krajih običajnih zimskih temperatur

Zadnji primer pa zajema še zadnji razred izpostavljenosti, ki ga še nismo obravnavali. Gre za korozijo zaradi kloridov iz morske vode. Vsi armirani betonski elementi v pasu enega kilometra oddaljenosti od obale so, poleg vseh ostalih stopenj izpostavljenosti, obremenjeni še s stopnjo izpostavljenosti XS1 zaradi izpostavljenosti soli, ki jo prenaša zrak. Če so elementi stalno potopljeni v morsko vodo, so obremenjeni s stopnjo izpostavljenosti XS2. Če pa so elementi blizu obale, in so izpostavljeni pljuskanju, pršenju in plimovanju, pa jih uvrstimo v stopnjo izpostavljenosti XS3.

V Sloveniji se do sedaj v praksi skoraj ni istočasno uporabljalo stopenj izpostavljenosti zaradi kloridov iz morske vode ter zmrzovanja in tajanja. Razlog za to naj bi bil v tem, da temperature v našem primorskem okolju nikoli ne padejo dovolj nizko, da bi prišlo do zmrzovanja in tajanja, sploh pa ne v velikem številu ciklov. Vendar se je v praksi pokazalo, da že majhno število ciklov zmrzovanja in tajanja v življenjski dobi konstrukcije lahko povzroči velike poškodbe. Prav tako pa smo bili tudi v zadnjih letih večkrat priča precej močnim snežnim padavinam ter nizkim temperaturam na slovenski obali, pri čemer pa je vedno prisotna tudi uporaba soli za tavanje. Zato bi bilo smiselno kljub splošnemu prepričanju, da v slovenskem Primorju ni potrebe po upoštevanju stopenj izpostavljenosti

zaradi zmrzovanja in tajanja, upoštevati tudi te, ter za izpostavljene elemente uporabljati aeriran beton.



Slika 19: Pomol v krajih zmernih zimskih temperatur

Na sliki 19 predstavljen pomol na morski obali s svojo okolico. Podporni zid na levi strani je obremenjen z agresivnim okoljem, ki obsega nevarnost korozije zaradi karbonatizacije XC4 ter morske vode v zraku XS1. Poleg tega pa s stopnjo izpostavljenosti zaradi zmrzovanja in tajanja XF1. Če pogledamo priporočila iz preglednice 3 ugotovimo, da zadošča, če predpišemo stopnje izpostavljenosti XS1+XF1, kar nam narekuje uporabo betonov z vrednostjo $(v/c)_{max}$ 0,5, minimalnim trdnostnim razredom C30/37 ter minimalno vsebnostjo cementa 300kg/m^3 . Za stopnjo izpostavljenosti XF1 sicer ni potrebna uporaba aeriranega betona, mora pa agregat ustrezati zahtevam v zvezi odpornostjo proti zmrzovanju in tajanju (NOZT-100).

Stalno potopljeni deli pomola so obremenjeni s stopnjo izpostavljenosti XS2, ki zahteva beton s priporočenimi lastnostmi $(v/c)_{max}$ 0,45, trdnostjo betona C35/45 ter vsebnostjo cementa 320kg/m^3 . Prav tako mora biti zadostna odpornost betona proti prodoru vode (PV-

II). Nevarnosti zmrzovanja pri stalno potopljenih delih ni, saj tako nizkih temperatur, da bi prišlo do zmrzovanja morja vendarle ni pričakovati.

Ostanejo nam še elementi, ki so izpostavljeni pljuskanju, pršenju ter plimovanju. Ti so izpostavljeni stopnjam izpostavljenosti XC4, XS3 ter XF3. Če pa gre še za površine, ki so lahko izpostavljene tudi solem za tajanje, lahko dodamo še stopnjo izpostavljenosti XD3 ter XF3 zamenjamo z XF4. V obeh primerih lahko izpustimo razreda izpostavljenosti XC ter XD, saj so priporočila pri preostalih dveh strožja. Tako se priporoča maksimalno vodo cementno razmerje 0,45, minimalni trdnostni razred betona C35/45, ter vsebnost cementa 340 kg na kubični meter betona. Beton mora biti aeriran, z vsaj 4% zraka, imeti pa mora zadostno odpornost proti prodoru vode (PV-III) ter odpornost proti zmrzovanju in tajanju (NOZT-150 za XF3, OPZT-S2 za XF4).

V spodnji preglednici so zbrane obravnavane kombinacije stopenj izpostavljenosti ter zanje priporočene mejne vrednosti ter zahtevane posebne lastnosti. Naj še enkrat ponovimo, da so v primerih, kjer se isti element nahaja v dveh različnih okoljih, merodajne zahteve agresivnejšega okolja.

Preglednica 6: Priporočene vrednosti za sestavo betonov pri določenih stopnjah izpostavljenosti

Stopnja izpostavljenosti	Max (v/c)	Min. vsebnost cementa [kg/m ³]	Min. trdnostni razred	Min. vsebnost zraka	Razred prepustnosti za vodo	Razred odpornosti proti zmrzovanju in tajanju	Razred odpornosti proti obrusu
XC1	0,65	260	C20/25				
XC2	0,6	280	C25/30		PV-I		
XC3	0,55	280	C30/37		PV-I		
XC4	0,5	300	C30/37		PV-II		
XC2, XF1	0,55	300	C30/37		PV-I	NOZT-100	
XC4, XF1	0,5	300	C30/37		PV-II	NOZT-100	
XC4, XF3	0,5	320	C30/37	4%	PV-II	NOZT-150	
XD1	0,55	300	C30/37		PV-I		
XD1, XF2	0,55	300	C30/37	4%	PV-I	OPZT-S1	
XD2, XF2	0,55	320	C30/37	4%	PV-II	OPZT-S1	

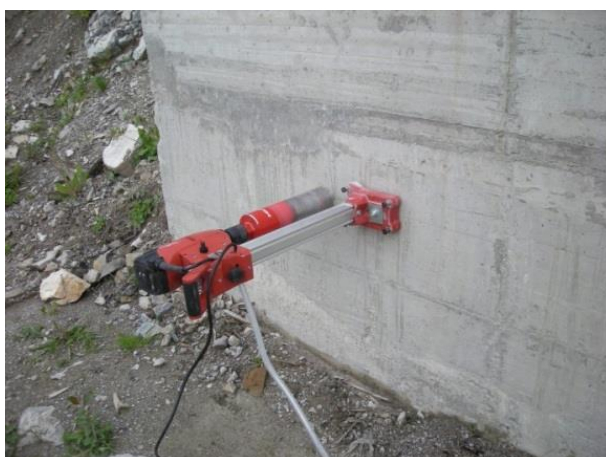
se nadaljuje...

...nadaljevanje Preglednice 6

XD3, XF2	0,45	320	C35/45	4%	PV-II	OPZT-S1	
XD3, XM1	0,45	320	C35/45		PV-II		OO-1
XD3, XF4	0,45	340	C35/45	4%	PV-II	OPZT-S2	
XD3, XF4, XM1	0,45	340	C35/45	4%	PV-II	OPZT-S2	OO-1
XD3, XF4, XM2	0,45	340	C35/45	4%	PV-II	OPZT-S2	OO-2
XD3, XF4, XM3	0,45	340	C35/45	4%	PV-II	OPZT-S2	OO-3
XD2, XA2	0,5	320	C30/37		PV-II		
XD3, XF4, XA3	0,45	360	C35/45	4%	PV-III	OPZT-S2	
XS1, XF1	0,5	300	C30/37		PV-I	NOZT-100	
XS2	0,45	320	C35/45		PV-II		
XS3, XF3	0,45	340	C35/45	4%	PV-III	NOZT-150	
XS3, XF4	0,45	340	C35/45	4%	PV-III	OPZT-S2	

5 EKSPERIMENTALNI DEL

V okviru diplomske naloge smo poleg teoretičnega spoznavanja stopenj izpostavljenosti ter njihovega vpliva na sestavo betona opravil tudi nekaj terenskega dela. V okolici kamnoloma Laže ter Premogovnika Velenje smo odvzeli 18 betonskih vzorcev, na katerih smo ugotavljali globino karbonatizacije. Namen tega dela je bil, da ugotovimo, kakšno nevarnost dejansko predstavlja karbonatizacija in kako hitro napreduje v notranjost betona. Vzorce smo na terenu odvzeli s pomočjo vrtalne garniture, ki je prikazana na sliki 20, ter jih takoj po odvzemu zaščitili s plastično folijo.



Slika 20: Vrtalna garnitura



Slika 21: Vzorec

V laboratoriju smo jih nato razpolovili ter poškopili s fenolftaleinom. Kjer je že prišlo do pojava karbonatizacije se beton ni obarval, kjer pa je bila alkalnost betona še dovolj velika, je prišlo do obarvanosti.



Slika 22: Porušitev valjev

Prvih sedem vzorcev smo dobili v okolici kamnoloma Laže. Vzorca številka 1 in 2 smo odvzeli iz armirano betonske podporne stene. Starost stene je približno 15 let, na mestu odvzema pa je bila najverjetneje izpostavljena le karbonatizaciji ter zmrzovanju brez prisotnosti soli (XC4, XF3). Stena na zunaj ni kazala znakov poškodovanosti. Lokacija odvzema valjev je razvidna na spodnji sliki. Po pregledu obeh vzorcev v laboratoriju je bila izmerjena globina karbonatizacije 6 mm.



Slika 23: Odvzem vzorcev 1 in 2



Slika 24: Vzorec 1

Vzorca 3 in 4 smo odvzeli iz armirano betonske ograje tipa New Jersey, prav tako v kamnolomu Laže. Njena starost nam sicer ni znana, saj so jo pripeljali iz druge lokacije, verjetno pa gre za relativno mlad beton, ki je bil najverjetneje izpostavljen koroziji zaradi karbonatizacije in kloridov ter zmrzovanju in tajanju ob prisotnosti talilnih soli (XC4, XD3, XF4). Slika lokacije odvzema je vidna na spodnji sliki. Globina karbonatizacije pri teh dveh vzorcih je bila še manjša. Pri vzorcu številka 3 je znašala le 1 mm, pri vzorcu številka 4 pa 2,5 mm. Razlog za to je verjetno v tem, da so take ograje navadno izdelane iz samozgoščevalnih betonov z nizkim vodo cementnim razmerjem, za katere je značilna visoka odpornost betona proti prodiranju vode.



Slika 25: Lokacija odvzema vzorcev 3 in 4

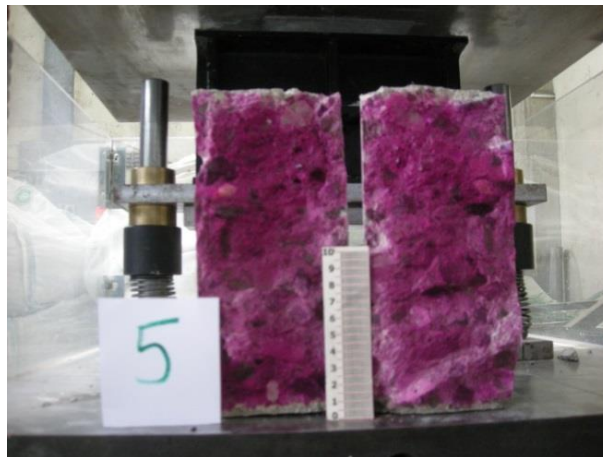


Slika 26: Vzorec številka 4

Vzorca številka 5 in 6 smo odvzeli iz druge betonske stene, podobne starosti kot je bila prva, le da je bila ta blizu ceste in zato verjetno izpostavljena močnejšim zunanjim vplivom zaradi prisotnosti soli za tajanje. Globina karbonatizacije kljub temu ni bila večja kot pri prvih dveh vzorcih in je znašala pri petem vzorcu 5 mm, pri šestem pa 6 mm.



Slika 27: Lokacija vzorcev 5 in 6

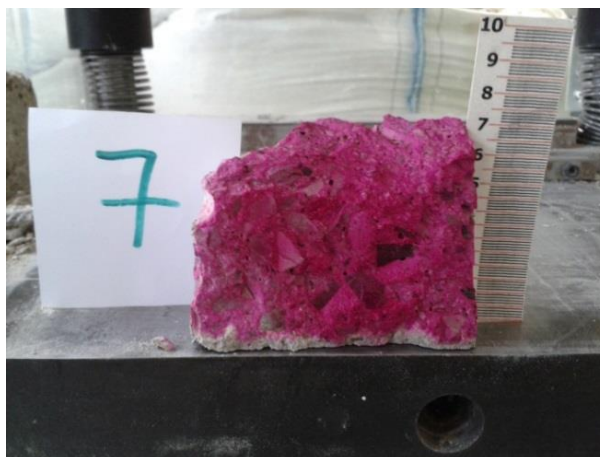


Slika 28: Vzorec številka 5

Zadnji vzorec iz kamnoloma Laže je vzorec številka 7. Tega smo vzeli iz stene novejšega objekta, zgrajenega v letih 2009 in 2010. Globina karbonatizacije je bila temu primerno manjša in je znašala le 3,5 mm.



Slika 29: Lokacija odvzema vzorca številka 7



Slika 30: Vzorec številka 7

Kot smo že omenili, smo ostale vzorce dobili na območju Premogovnika Velenje. Točnih podatkov o starosti in sestavi betona tudi tukaj nismo uspeli dobiti. Okvirna starost večine objektov naj bi bila okoli 30 let, zato smo pričakovali večje globine karbonatizacije, kot na vzorcih iz Laž.

8 in 9 vzorec smo vzeli iz elementa montažne armirano betonske stene na območju Premogovnika Velenje. Po pričakovanju smo dobili slabše rezultate kot v prejšnjih primerih. Največja globina karbonatizacije je bila pri osmem vzorcu 20 mm, pri devetem pa 11 mm. Zanimiva je bila razlika v globini karbonatizacije na različnih mestih. Ker je bila stena na nekaterih mestih videti precej mehansko poškodovana, smo predvidevali, da je prišlo tam do nastanka večjih razpok, posledično pa do večje izpostavljenosti okolju in pospešenemu procesu karbonatizacije. Stena je sicer po naši oceni bila izpostavljena le stopnjam izpostavljenosti XC4 ter XF3.



Slika 31: Lokacija vzorcev številka 8 in 9



Slika 32: Vzorec številka 8

Vzorec številka 10 smo odvzeli iz podpornega stebra žerjavne proge, ki se je nahajal v neposredni bližini mesta odvzema vzorcev številka 8 in 9. Karbonatizacije nismo opazili, verjetno pa do nje ni prišlo tudi zaradi nekakšnega zaščitnega sloja na površini betona.



Slika 33: Lokacija odvzema vzorca 10



Slika 34: Vzorec številka 10

Vzorec številka 11 smo odvzeli na skladiščni rampi, ki je prikazana na sliki 40. Izpostavljena je bila stopnjam izpostavljenosti XD3 ter XF4. Globina karbonatizacije je bila zelo velika in je znašala od 26 do 30 mm.



Slika 35: Lokacija odvzema vzorca številka 11



Slika 36: Vzorec številka 11

Vzorec številka 12 je bil odvzet na istem objektu kot številka 11, le na drugi strani, kjer ni bil izpostavljen soljenju (stopnje izpostavljenosti XC4, XF3). Zato je tudi smiselno, da je bila globina karbonatizacije nekoliko manjša in je znašala med 14 in 24 mm. Beton je sicer kazal tudi znake morebitne sanacije v preteklosti, saj je bil površinski sloj betona na nekaterih mestih videti drugače.



Slika 37: Lokacija odvzema vzorca številka 12



Slika 38: Vzorec številka 12

Vzorec številka 13 je bil odvzet na betonski voziščni konstrukciji. Globina karbonatizacije je znašala sicer samo 5 mm, vendar verjetno tudi zato, ker je bila velika količina površinskega materiala odstranjena zaradi mehanske obrabe.



Slika 39: Odvzem vzorca številka 13



Slika 40: Vzorec številka 13

Vzorec številka 14 je bil odvzet na zidu, po katerem poteka žerjavna proga. Globina karbonatizacije je bila podobna kot pri vzorcu številka 11, ki je bil izpostavljen podobnim zunanjim vplivom (XD3, XF4), in sicer 27 mm.



Slika 41: Lokacija vzorca številka 14



Slika 42: Vzorec številka 14

Zadnja lokacija, na kateri smo odvzeli vzorce je bil stari rudniški jašek. Globine karbonatizacije so bile pri različnih vzorcih precej drugačne. Pri vzorcu številka 15 je tako znašala 7 mm, pri vzorcu številka 16 3 mm, pri vzorcu številka 17 na zunanji strani med 22 in 24 mm, ter na notranji med 30 in 32 mm. Globina karbonatizacije na vzorcu številka 18 je

znašala 17 mm. Razlike med izmerjenimi vrednostmi bi lahko argumentirali s tem, da sta bila vzorca 15 in 16 odvzeta na steni, ki je bila nagnjena tako, da je bila zaščitena pred dežjem, vzorca številka 17 in 18 pa ravno obratno. Prav tako pa lahko razložimo razliko v globini karbonatizacije pri vzorcu 17 na zunanji ter na notranji strani. Na zunanji strani jaška je namreč zaščitni sloj v obliki grobega ometa, ki pa ga na notranji strani ni. Ker pa jašek ni več v uporabi, je samo okolje podobno na obeh straneh in je zato propadanje hitrejše na manj zaščiteni, notranji strani. Vsi dobljeni rezultati so zbrani preglednici 7.

Preglednica 7: Globina karbonatizacije pri vzorcih

Številka vzorca	Globina karbonatizacije [mm]	Ocenjena stopnja izpostavljenosti	Opombe
1	6	XC4, XF3	starost cca. 15 let
2	6	XC4, XF3	starost cca. 15 let
3	1	XD3, XF4	
4	2,5	XD3, XF4	
5	5	XD3, XF4	starost cca. 15 let
6	6	XD3, XF4	starost cca. 15 let
7	3,5	XC4, XF3	starost 4 leta
8	20	XC4, XF3	
9	11	XC4, XF3	
10	0	XC4, XF3	zaščitni sloj
11	26-30	XD3, XF4	
12	14-24	XC4, XF3	
13	5	XD3, XF4, XM1	
14	27	XD3, XF4	
15	7	XC4, XF3	zaščitni sloj, grob omet
16	3	XC4, XF3	zaščitni sloj, grob omet
17	17	XC4, XF3	zaščitni sloj, grob omet
18	zunaj 22-24, znotraj 30-32	XC4, XF3	zaščitni sloj, grob omet



Slika 43: Lokacija odvzema vzorcev številka 15,
16, 17 in 18

Slika 44: Vzorec številka 15



Slika 45: Vzorec številka 17

Da bi ocenili dobljene rezultate smo poskusili najti matematični model za napovedovanje globine karbonatizacije. Nekaj takih modelov sicer obstaja, vendar jih v našem primeru ne moremo uporabiti, saj nimamo točnih podatkov niti za osnovne parametre kot so starost betona, njegova sestava ali pa stopnja izpostavljenosti. Po enem izmed modelov, je globina karbonatizacije podana s spodnjimi enačbami (Žnidarič, 2005).

Globina karbonatizacije x po času t je podana z izrazom:

$$x = k^* \sqrt{t}$$

kjer pomeni:

k^* - koeficient karbonatizacije, ki je funkcija stopnje izpostavljenosti, zlasti vlage in temperature. Koeficient karbonatizacije je določen kot:

$$k^* = (2 \cdot c_{s,ca} \cdot D_{ca})^{0,5}$$

kjer je: $D_{ca} = D_{ca,0} \cdot k_{e,ca} \cdot k_{c,ca} \cdot (t_0/t)^{2 \cdot n_{ca}}$

Posamezne oznake imajo naslednji pomen:

$c_{s,ca}$	koncentracija CO ₂ na površini
D_{ca}	efektivni koeficient karbonatizacije
$D_{ca,0}$	koeficient difuzije CO ₂ , določen s preskusom
$k_{e,ca}$	faktor okolja
$k_{c,ca}$	faktor nege
t_0	starost betona pri preskusu $D_{ca,0}$
n_{ca}	faktor staranja (0 do 0,16).

Kar pa lahko ugotovimo iz dobljenih rezultatov je, kot je bilo že zapisano v poglavju o karbonatizaciji, da ob uporabi primernega betona globina karbonatizacije ne preseže debeline krovnega sloja in zato v večini primerov ne predstavlja nevarnosti, ki bi ogrozila armaturo v življenjski dobi običajnih konstrukcij.

6 ZAKLJUČEK

V tej diplomski nalogi smo želeli osvetliti problematiko stopenj izpostavljenosti betona in z njimi povezanimi karakteristikami betona. V času študija smo na to temo slišali premalo, posledično pa tudi v praksi marsikateri projektant ni dobro seznanjen z njo. Pogosto se dogaja, da se vpliv stopenj izpostavljenosti na lastnosti betona kar zanemari. Mnogo projektantov na primer trdnostni razred betona določa samo na podlagi nosilnosti, pri tem pa pozabljajo na zahteve v zvezi s trajnostjo. Velikokrat sicer navedejo katerim agresivnim vplivom je beton izpostavljen in pri tem celo nekoliko pretiravajo, vendar temu ne prilagodijo lastnosti kot sta na primer največje dovoljeno vodocementno razmerje ali minimalna tlačna trdnost betona. Ker pa se ponudba za beton praviloma oblikuje glede na razred tlačne trdnosti in ker je v praksi pomembna le še najnižja cena, se velikokrat zgodi, da ima beton vgrajen v konstrukcijske elemente sicer ustrezno nosilnost, kar pa se tiče trajnosti pa se velikokrat uporabijo betoni z neustreznimi karakteristikami.

Sestava betonskih mešanic mora biti v prvi vrsti določena na podlagi agresivnih vplivov okolja. Ti so zbrani in razdeljeni v stopnje izpostavljenosti, ki jih opisujemo v drugem poglavju. Tam smo zbrali celotno vsebino standardov SIST EN 206-1 in SIST 1026, ki se nanaša na stopnje izpostavljenosti in z njimi povezanimi zahtevami za sestavo betonskih mešanic. Za primerno izbiro agresivnega okolja, v katerem se nahaja naša konstrukcija, je potrebno tudi nekaj teoretičnega znanja. Zato smo predstavili nekaj najpogostejših procesov propadanja armirano betonskih konstrukcij.

Ker so meje med nekaterimi stopnjami izpostavljenosti nekoliko zabrisane, smo z izdelavo skic nekaj recimo temu tipičnih konstrukcij ponazorili, kako izbrati stopnjo izpostavljenosti, ki je ustrezna za našo situacijo. Pri teh odločitvah je potrebno malo razmisleka, saj je nemogoče pripraviti priročnik, v katerem bi zajeli vse možne situacije. Vsaka konstrukcija je po svoje unikatna, zato je pomembno, da znamo svoje odločitve podpreti z ustreznimi argumenti. Tukaj lahko poudarimo tudi pomembnost terenskih preiskav. Vsaka preiskava ki jo opravimo, nam lahko omogoči uporabo recimo temu slabšega betona oziroma cenejšega betona. To na primer velja pri uvrščanju v razrede izpostavljenosti XA. Če vemo, da na neki lokaciji zemljina ali talna voda vsebuje agresivne snovi, to še ne pomeni, da moramo tam uporabljati beton projektiran na stopnjo izpostavljenosti XA3. Morda nam bo preiskava zemljine pokazala, da zadošča že stopnja izpostavljenosti XA1 ali pa celo ni potrebno upoštevati kemičnega delovanja. Pri večjih projektih, kjer se porabijo velike količine betona nam lahko preiskava, ki nam omogoči klasifikacijo v nižjo stopnjo izpostavljenosti pomeni

velik prihranek pri porabi cementa. Če primerjamo stopnji izpostavljenosti XA1 in XA3 to pomeni razliko 60 kg cementa na kubični meter betona.

Ugotovili smo, da se potreba po cementu zmanjša tudi z uporabo aeriranih betonov. To je posledica tega, da je zaradi večje količine por omogočeno lažje raztezanje in krčenje pri zmrzovanju in tajanju, obenem pa je pozitiven vpliv zračnih por tudi v tem, da predstavljajo prepreko za prodiranje vode in zato upočasnjujejo prodiranje agresivnih vplivov v notranjost betona. Ker ima največjo težo pri ceni betonske mešanice prav cement, je možno z uporabo aeriranega betona doseči določen prihranek, vendar se moramo zavedati, da je za njegovo vgradnjo potrebna dražja tehnologija. Prav tako je pri takih betonih nekoliko nižja trdnost. Ker pa je mnogokrat trdnost, ki je zahtevana zaradi kriterijev nosilnosti nižja od zahtev zaradi stopenj izpostavljenosti, to večinoma ne predstavlja takega problema. Kot smo omenili že pri primerih izbire stopenj izpostavljenosti je priporočljiva uporaba aeriranih betonov tudi v obalnih predelih Slovenije, saj kljub višjim povprečnim temperaturam tudi tam občasno temperatura pade pod zmrzišče. Kot pa so pokazale nekatere študije, lahko že nekaj ciklov zmrzovanja in tavanja povzroči precejšnje poškodbe v strukturi betona.

Če zaključimo z eksperimentalnim delom, bi lahko glede tega ugotovili, da karbonatizacija betona ne predstavlja tako resne težave, kot je videti. Ob kvaliteti betonov, ki bi se morali uporabljati v gradbeništvu in ob ustrezni kvaliteti in debelini krovnega sloja namreč ni nevarnosti, da bi karbonatizacija prodrla do armature. Tudi pri naših vzorcih, pri katerih se je pojavila rahla korozija armature, je bilo očitno, da se je pojavila na mestih, kjer je beton utrpel poškodbe iz drugih virov, tako da so se pojavile večje razpoke, ki so nato omogočile hitrejšo korozijo.

To diplomsko delo smo izdelali v želji, da se izdelava pripomoček, ki na enem mestu združuje tako teoretično podlago o procesih propadanja betona, vsebino standardov ki obravnavajo to tematiko in konkretne primere. Dopolnilo temu delu bi lahko bila še izdelava projekta nekaj betonskih mešanic s konkretnimi podatki, kot čisto praktično ponazoritev uporabe stopenj izpostavljenosti v praksi. Vseeno pa mislimo, da lahko vsak, ki si želi spoznati problematiko stopenj izpostavljenosti, pa naj si bo študent ali projektant, dobi s pomočjo tega diplomskega dela dobro podlago za nadaljnji študij in varno projektiranje betonskih konstrukcij.

VIRI

Bokan Bosiljkov, V., Žarnič, R. 2006. Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 64-83, 104-115.

Hewlett, P. C. (ur.). 1998. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. London, Arnold: str. 299-342.

Hočevar, A. 2007, Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hočevar): str. 17-28.

kSIST FprEN 206:2013. Concrete - Specification, performance, production and conformity.

Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. 2006. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. New York, McGraw-Hill: str. 121-198.

Perkins, P. H. 1986. Repair, protection and waterproofing of concrete structures. London, Elsevier Applied Science Publishers: str. 34-60.

Prinčič, T., Bokan Bosiljkov, V., Cotič, Z. 2012. Vpliv vrste in koncentracije kloridnih soli na luščenje betonskih elementov premostitvenih objektov zaradi zmrzovanja in tajanja, 11. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 24.-25. oktobra 2012. Ljubljana, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: str. 1-9.

Ronkalj B. 2012. Vpliv kemijske agresije na beton pri različnih temperaturah. Diplomski naloga. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Ronkalj): str. 23-29.

SIST EN 1990:2004. Evrokod: Osnove projektiranja.

SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

Šelih J. 2010. Performance of concrete exposed to freezing and thawing in different saline environments, Journal of Civil Engineering and Management 16, 2: 306-311.

Združenje za beton Slovenije. 2009. Združeno besedilo SIST EN 206-1 in SIST 1026.

Žnidarič J. 2005. Projektiranje trajnosti betona in betonskih konstrukcij v skladu s SIST EN 206-1. Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah: Zbornik referatov Konference o trajnosti betonov v konstrukcijah, Lipica, 10.-11. marca 2005. Ljubljana, Združenje za beton Slovenije: str. 193-208.

Žnidarič J. 2009. Trajnost betona v SIST EN 206-1 in SIST 1026 (Komentar k določbam, povezanim s trajnostjo betona). Ljubljana, Združenje za beton Slovenije: 28 str.

OSTALI VIRI

Grum, B. et. al. 2004, Sanacije betonskih objektov. Ljubljana, i2: 271 str.

Jarc Simonič, M. Sanacija premostitvenih objektov. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Jarc Simonič): 66 str.