

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2019

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	620.1:691.3(497.4)(043.2)
Avtor:	Neža Gošte
Mentorica:	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentorica:	asist. dr. Petra Štukovnik
Naslov:	Vpliv vira dolomitnega agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	30 str., 11 pregl., 7 sl., 11 graf.
Ključne besede:	Vrsta dolomitnega agregata, samozgoščevalni beton, tlačna trdnost betona, elastični modul betona, odpornost površine proti zmrzovanju in tajanju

Izvleček

V diplomski nalogi smo se ukvarjali z ugotavljanjem reoloških in mehanskih lastnosti samozgoščevalnega betona iz dolomitnega agregata ter njegove obstojnosti. Zanimalo nas je predvsem, kako na te lastnosti vpliva vir dolomitnega agregata. Za namen preiskav smo pripravili dve sestavi samozgoščevalnega betona, ki sta vsebovali enak cement, vodocementno razmerje, dodan superplastifikator, a različen dolomitni agregat, ki smo ga dobili iz dveh različnih kamnolomov. Sami smo zamešali beton ter pripravili betonske preizkušance. Na svežih betonskih mešanica smo preverili konsistenco z metodo razleza s posedom in določili vsebnost zraka s porozimetrom. Na strjenih betonskih preizkušancih smo ugotavljali mehanske in obstojnostne lastnosti betona. Določali smo tlačno trdnost betona ter dinamični in statični modul elastičnosti. Preiskave smo izvajali po 24-ih urah, 3-eh, 7-ih, 28-ih in 90-ih dneh. Po 28-ih dneh smo na preizkušancih določili tudi odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju, pri čemer smo izvedli 20 ciklov zmrzovanja/tajanja v prisotnosti talilne soli. Rezultate preiskav smo na koncu analizirali in ocenili vpliv vira dolomitnega agregata na karakteristike betona.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	620.1:691.3(497.4)(043.2)
Author:	Neža Gošte
Supervisor:	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Cosupervisor:	assist. dr. Petra Štukovnik
Title:	Influence of dolomite aggregate on the properties of self-compacting concrete
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Scope and tools:	30 p., 11 tab., 7 fig., 11 graph.
Keywords:	Dolomite aggregate type, self-compacting concrete, compressive strength of concrete, modulus of elasticity of concrete, salt frost scaling resistance

Abstract

The graduation thesis deals with the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete prepared using dolomite aggregate and with its durability. We were predominantly interested, how the source of dolomite aggregate affects these properties. For the purpose of research work, we prepared two self-compacting concrete mixtures that contained the same type and content of cement, the same water-to-cement ratio, the same type of superplasticizer, but different dolomite aggregate, obtained from two different quarries. The concrete mixtures were prepared and test specimens were cast in the laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. On fresh concrete mixtures, we tested the consistency using slump-flow test and determined the content of air bubbles in concrete using the pressure method. On hardened concrete samples, we determined mechanical properties and durability of concrete. We tested the compressive strength of concrete and the dynamic and static modulus of elasticity. We did the tests after 24 hours, 3, 7, 28 and 90 days. At the age of samples of 28 days we started to carry out salt frost scaling test. The surface of the samples was saturated with a de-icing salt and the specimens were exposed to 20 freezing/thawing cycles. Finally, we analysed the test results and evaluated the influence of the source of dolomite aggregate on the properties of self-compacting concrete.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov in somentorici asist. dr. Petri Štukovnik za vso pomoč, nasvete, čas in usmeritve pri izdelavi diplomske naloge.

Hvala g. Franciju Čeponu za vso pomoč pri opravljanju laboratorijskih preizkusov.

Posebna zahvala gre mojim najbližjim, ki so me ves čas študija podpirali in spodbujali.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
2 PREGLED PREDHODNE LITERATURE	3
3 PRIPRAVA VZORCEV	4
3.1 Materiali	4
3.1.1 Agregat	4
3.1.2 Cement	6
3.1.3 Voda	7
3.1.4 Dodatki k betonu	7
3.2 Priprava betonskih mešanic	7
3.2.1 Določanje vlažnosti agregata	8
3.2.2 Mešanje betona.....	9
3.3 Izdelava in nega betonskih preizkušancev	11
4 PREISKAVE NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH	12
4.1 Metoda razleza s posedom	12
4.2 Določanje vsebnosti por	13
5 PREISKAVE NA STRJENEM BETONU.....	14
5.1 Tlačna trdnost.....	14
5.2 Dinamični modul elastičnosti	18
5.3 Statični modul elastičnosti	21
5.4 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilne soli	23
6 ZAKLJUČEK.....	27
VIRI	29
Standardi	30

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Uporabljeni deleži frakcij agregata A.....	5
Preglednica 2: Uporabljeni deleži frakcij agregata B.....	6
Preglednica 3: Kemijska sestava cementa CEM I 42,5N.	6
Preglednica 4: Vlažnost po frakcijah za posamezen agregat.....	8
Preglednica 5: Sestava betonskih mešanic za mehanske preiskave.	10
Preglednica 6: Tlačne trdnosti - agregat A.....	15
Preglednica 7: Tlačne trdnosti - agregat B.....	16
Preglednica 8: Povprečni dinamični moduli elastičnosti po starosti.....	20
Preglednica 9: Povprečne vrednosti statičnega modula elastičnosti po starosti.....	22
Preglednica 10: Masa odluščenega materiala - agregat A.....	24
Preglednica 11: Masa odluščenega materiala - agregat B.....	24

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti s pripadajočo standardno deviacijo.....	16
Grafikon 2: Primerjava E_D za oba agregata (vzdolžni valovi).	20
Grafikon 3: Primerjava E_D za oba agregata (strižni valovi).	20
Grafikon 4: Potek obremenjevanja-razbremenjevanja en dan starega vzorca (Prizma 1), ki je vseboval agregat B.	21
Grafikon 5: Primerjava E_S za oba agregata.....	22
Grafikon 6: Povprečna količina odluščene materiala - agregat A.	25
Grafikon 7: Povprečna količina odluščene materiala - agregat B.	25

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO SLIK

Slika 1: Agregat A.	4
Slika 2: Agregat B.	5
Slika 3: Sveža betonska mešanica.....	10
Slika 4: Potek razleza betonske mešanice med preiskavo razleza.	12
Slika 5: Porozimeter.	13
Slika 6: Tlačna preša (levo) in porušen preizkušane (desno).....	15
Slika 7: Merilna naprava in preizkušane.	18
Slika 8: Primer določanja E_D z merilno napravo na 28 dni starem preizkušancu (Prizma 3), ki je vseboval agregat A.	19
Slika 9: a) NaCl, b) čiščenje vzorca, c) tehtanje odluščenega materiala.	24
Slika 10: Primerjava vzorcev z agregatom A (levo) in agregatom B (desno) po 10 ciklih.	26
Slika 11: Vzorec po 20 ciklih - agregat A.	26

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Danes je v gradbeništvu beton eden najpogostejše uporabljenih materialov, lahko bi rekli, da je skoraj nepogrešljiv. Praktično ga lahko uporabimo skoraj povsod, od večjih kompleksnih objektov, kot so večstanovanjske stavbe, infrastrukturni, industrijski in poslovni objekti, kot tudi pri gradnji manjših enodružinskih hiš. Njegova uporaba sega že daleč nazaj, celo do obdobja Rimljanov, kar samo dokazuje kako vsestranski in uporaben je. Kljub temu, da ga je izmed vseh gradbenih materialov najlažje oblikovati, je potrebno zelo dobro poznati njegove sestavine in lastnosti. Betoni se namreč zelo razlikujejo med seboj. Betone lahko razdelimo že glede na maso in njihovo uporabnost. Vrst betona je torej veliko, za vsako vrsto so predpisane karakteristike njegove kakovosti, ki jih moramo pri pripravi betona upoštevati, da lahko dosežemo dobre lastnosti strjenega betona [1]. Mi smo pripravljali samozgoščevalni beton (SCC). Ta beton se od drugih razlikuje predvsem v tem, da je zaradi lastne teže in visoke sposobnosti tečenja sposoben popolnoma zapolniti opaž katerekoli oblike. Njegova prednost je torej ta, da pri vgradnji ne potrebuje vibracij, zato smo imeli pri polnjenju betona v kalupe tudi mi olajšano delo. Da dosežemo te specifične lastnosti betona SCC, mu moramo poleg ustreznih materialov dodati še nekoliko večjo količino praškastih delcev in kemijski dodatek superplastifikator [2].

Lastnosti strjenega betona so odvisne tako od sestave betonske mešanice, kot tudi od same nege betona. Da bi dosegli optimalne karakteristike betona in predvsem visoko tlačno trdnost, morajo biti sestavine v mešanici pravilno porazdeljene. Velik pomen pri tem imata cement in voda, saj brez njiju hidratacija nebi bila možna, ta pa ima odločilno vlogo pri prehodu sveže betonske mešanice v strjen beton. Pri tem je zelo pomembno tudi vodocementno razmerje. To je razmerje med maso vode in cementa za pripravo betona. Pri nizkih vodocementnih razmerjih se poslužujemo posebnih dodatkov, ki prispevajo k izboljšanju vgradljivosti svežega betona. Največji delež pa v betonski mešanici predstavlja agregat. Ravno njegov pomen v betonski mešanici smo preučevali v okviru diplomske naloge. Zanimalo nas je kako vrsta dolomitnega agregata vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice in na karakteristike strjenega betona. V laboratoriju na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani smo preučevali vpliv dveh vrst dolomitnih agregatov, ki sta se razlikovala po lastnostih kamninske formacije. Ostale sestavine, vrsta cementa, vodocementno razmerje in dodani superplastifikator, so bile enake za obe sestavi betonskih mešanic, ki smo jih pripravili. Preizkušali smo konsistenco sveže betonske mešanice in ugotavljali vsebnost por. Na strjenem betonu pa smo primerjali tlačne trdnosti, statični in dinamični modul elastičnosti ter odpornost površine betonov proti zmrzovanju/tajanju ob prisotnosti talilne soli.

Z diplomsko nalogo smo želeli ugotoviti ali ima vir dolomitnega agregata vpliv na karakteristike betona SCC in kakšen je ta vpliv. Namen naloge je bil primerjati vpliv dveh dolomitnih agregatov in ugotoviti razlike v lastnostih betona SCC, ki so rezultat tega vpliva. V okviru diplomske naloge smo si zastavili naslednji cilj:

- Ugotoviti, ali dolomitni agregat iz različnih virov vpliva na reološke, mehanske in obstojnostne karakteristike samozgoščevalnih betonov.

V diplomski nalogi je najprej pregled literature, kjer so predstavljene predhodne preiskave z obravnavanega področja, ki so jih opravili Lešnik v svojem diplomskem delu z naslovom Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona [3] ter avtorici Štukovnik in Bokan-Bosiljkov v znanstvenem prispevku Vpliv vrste agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona [4]. V diplomski nalogi sem se sklicevala še na doktorsko disertacijo avtorice Štukovnik [5] ter na magistrsko delo avtorja Meglena [6]. Za teoretični del vsebine sem se sklicevala na knjigo Lastnosti gradiv [7], na prispevek Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji [8] in na skripti Gradiva vaje 2015/2016 [9] ter Betonske konstrukcije [10].

Po pregledu literature so v nadaljevanju diplomske naloge predstavljeni še materiali, ki smo jih uporabili pri pripravi betonske mešanice, projektiranje betonskih mešanic, nega vzorcev ter preiskave na svežih betonskih mešanicah in strjenem betonu. Vse ugotovitve in rezultati so predstavljeni v posameznih poglavjih glede na meritve, ki smo jih izvajali na vzorcih. V poglavju 6 Zaključek so strnjeni vsi rezultati ter izpostavljene ugotovitve glede vpliva agregata na karakteristike samozgoščevalnih betonov.

2 PREGLED PREDHODNE LITERATURE

Na temo ugotavljanja različnih dejavnikov, ki vplivajo na lastnosti samozgoščevalnega betona (SCC) je bilo opravljenih že veliko raziskav. Nekatere izmed njih vključujejo tudi vpliv različnih virov agregata na obnašanje betona. Lešnik v svoji diplomski nalogi med seboj primerja apnenčev drobljeni agregat in dolomitni drobljeni agregat [3]. Rezultati njegovih preiskav so pokazali, da dolomitni agregat lažje dosega zahtevano konsistenčno stopnjo, dosega višje tlačne trdnosti in pripomore k večji duktilnosti betona. Iz teh rezultatov je razvidno, da vrsta agregata vpliva na lastnosti betonov tako v svežem kot strjenem stanju.

Do podobnih ugotovitev sta prišli tudi avtorici članka Vpliv vrste agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona [4]. V njem sta primerjali apnenčev in dolomitni agregat. Rezultati preiskav pa so pokazali, da vrsta agregata pomembno vpliva na lastnosti betona SCC v svežem stanju in tudi na njegove mehanske karakteristike ter obstojnost v strjenem stanju. Rezultati omenjene raziskave so pokazali, da višje začetne tlačne trdnosti dosegajo mešanice z apnenčevim agregatom. Prav tako te mešanice pri zgodnjih starostih dosegajo višjo vrednost statičnega modula elastičnosti, od starosti 7 dni naprej pa se situacija obrne. Razlik v dinamičnem modulu elastičnosti med agregatoma ni. Odpornost betona z dolomitnim agregatom proti zmrzovanju in tajanju je bistveno slabša, kot pri betonu z apnenčevim agregatom.

V Sloveniji beton SCC pripravljamo predvsem z apnenčevim agregatom, zato vpliv dolomitnega agregata na lastnosti samozgoščevalnih betonov še ni raziskan v detajle. Ravno zato smo se odločili, da bomo raziskali vpliv dveh dolomitnih agregatov na lastnosti takšnega betona in jih primerjali med seboj.

3 PRIPRAVA VZORCEV

V laboratoriju na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani smo za namen raziskave vpliva vira dolomitnega agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona, pripravili dve sestavi samozgoščevalnega betona. Podrobneje sta sestavi in vse mešanice opisani v poglavju 3.2. Za pripravo vzorcev smo uporabili dva različna dolomitna agregata, triasni poznodiagenetski dolomit (v nadaljevanju označen z A) in dolomit srednje in zgornje triasne starosti (v nadaljevanju označen z B), čisti portlandski cement CEM I 42,5N, vodo in kemijske dodatke. Vsi uporabljeni materiali so opisani v poglavju 3.1. Vzorce smo pripravili skladno s standardom SIST EN 12390-2 [12]. Pripravili smo betonske kocke dimenzij 150*150*150 mm in 100*100*100 mm ter prizme dimenzij 100*100*400 mm, ki smo jih nato preizkušali.

3.1 Materiali

3.1.1 Agregat

Agregat zavzema večji del prostornine betona in bistveno vpliva na njegovo gostoto, zato ima njegov izbor velik pomen, saj vpliva na kakovost in lastnosti betona. Za pripravo betonov smo uporabili dva različna dolomitna agregata iz dveh različnih kamnolomov.

Prvi uporabljeni agregat, agregat A, smo uporabili v mešanicah 1 in 2 (v nadaljevanju označeni z M1 in M2) in je poznodiagenetski triasni dolomit (Slika 1). Mineral dolomit zavzema približno 97% kamnine in mineral kalcit približno 3%. Prostorninska masa kamnine je 2847 kg/m^3 , njeno vpijanje vode je 0,48%. Sama kamnina je svetlo sive barve z vidnimi belimi žilami, ki so



Slika 1: Agregat A.

zapolnjene s sparitnim cementom. Opaziti je tudi stilolitske šive. Kamnina je homogena, razmerje med zrna in vezivom je ocenjeno na 20:80. Zrna so homogeno razporejena po vzorcu, niso orientirana in so alokemičnega izvora. Kot zrna prevladujejo ooidi, nekaj je tudi fosilnih ostankov. Zrna so zaobljena in v osnovi »plavajo«. Osnova kamnine je mikritna do mikrosparitna. Poroznost je ocenjena na 0,5% [5].

Za pripravo betona smo uporabili agregat frakcij 0/4, 4/8, 8/16 in fine kamnite delce oz. kameno moko. Deleži frakcij, ki smo jih uporabili pri pripravi betona, so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Uporabljeni deleži frakcij agregata A.

Frakcija	Delež [%]
0/4	44
4/8	17
8/16	25
Kamena moka	14

Drugi agregat, agregat B, smo uporabili v mešanica 3 in 4 (v nadaljevanju označeni z M3 in M4) in je dolomit srednje in zgodnje triasne starosti (slika 2). Sestavljen je iz mešanice svetlo in temno sivih oz. rjavkastih zrn, ki imajo ostre robove in hrapavo površino. Po obliki so pretežno izometrična, nekatera zrna pa so prevlečena s tanko limonitno prevleko. Mineral dolomit zavzema približno 98% kamnine in mineral kalcit približno 2%. Prostorninska masa kamnine je 2840 kg/m³ [6].

Za pripravo betona smo uporabili agregat frakcij 0/4, 4/8, 8/11, 11/16 in kameno moko. Deleži frakcij, ki smo jih uporabili pri pripravi betona, so prikazani v preglednici 2.



Slika 2: Agregat B.

Preglednica 2: Uporabljeni deleži frakcij agregata B.

Frakcija	Delež [%]
0/4	44
4/8	17
8/11	13
11/16	13
Kamena moka	13

3.1.2 Cement

Cement označujemo po standardu SIST EN 197-1:2011 [13]. Začetna oznaka CEM nam pove, da gre za cement, natančneje pa je sestava cementa podana z oznakami, ki sledijo krajšavi CEM [7].

Sami smo za vezivo pri mešanju betona uporabili čisti portlandski cement (CEM I 42,5N (SIST EN 197-1) [13]). Trdnostni razred uporabljenega cementa je 42,5 z običajno zgodnjo trdnostjo, kar označuje črka N. Portlandski cementni klinker je proizveden s sintranjem predhodno pripravljene surovinske moke z zahtevano mineraloško in kemijsko sestavo. Portlandski cementni klinker je hidravlični material, ki mora vsebovati najmanj dve tretjini mase kalcijevih silikatov, ostanek pa faze, ki vsebujejo aluminij in železo ter druge spojine. Portlandski cement z oznako CEM I vsebuje od 95 do 100% klinkerja. Kemijska sestava našega cementa je prikazani v preglednici 3.

Preglednica 3: Kemijska sestava cementa CEM I 42,5N.

Spojina	Delež [%]
SiO ₂	20,31
Al ₂ O ₃	4,49
Fe ₂ O ₃	3,25
CaO	63,72
MgO	1,53
Na ₂ O	0,26
K ₂ O	0,6
Cl	0,051
SO ₃	0,75

3.1.3 Voda

Voda je pomembna tako za proces hidratacije, kot tudi za samo vgradljivost in obdelavnost betona. Za izdelavo betona smemo uporabljati vodo, za katero je dokazano, da je primerna za izdelavo betona. Med to vodo spada pitna voda in voda, ki izpolnjuje zahteve standarda SIST EN 1008:2003 [14].

Mi smo pri pripravi betonske mešanice uporabili pitno vodo iz Ljubljanskega vodovodnega omrežja.

3.1.4 Dodatki k betonu

Dodatki k betonu so lahko kemijski ali mineralni. Kemijski dodatki za beton so po definiciji standarda SIST EN 934-2 (1) snovi/produkti, ki jih dodamo betonu v času mešanja v količinah < 5 % na maso cementa, zato da spremenimo lastnosti svežega in/ ali strjenega betona. S tem izboljšamo lastnosti betona oziroma drugače povedano: s kemijskimi dodatki lahko pripravimo betone, ki imajo v svežem in/ali strjenem stanju želene/zahtevane lastnosti, ki jih sicer ne bi mogli doseči [8].

Mi smo uporabili kemijski dodatek superplastifikator, ki nam je omogočil povečano obdelavnost pri določenem vodocementnem razmerju (V/C razmerje). Superplastifikatorje smemo v mešanico dodati po glavnem procesu mešanja, v promilih ali procentih glede na količino cementa ali praškastih delcev v betonski mešanici, ker s svojim kemijskim delovanjem zelo učinkovito spreminjajo lastnosti cementne paste.

3.2 Priprava betonskih mešanic

Osnovne sestavine za pripravo betona so agregat, cement, voda in dodatki. Vse te sestavine je potrebno pazljivo zmešati v homogeno celoto, pri čemer moramo paziti na pravilen vrstni red dodajanja sestavin. Poleg doziranja vode v suho mešanico agregata in cementa, so pomembne tudi karakteristike mešalca. Kolikšna je hitrost obračanja bobna mešalca, kapaciteta mešalca, oblika in stanje bobna ter lopatic [7].

Recepturo smo imeli pripravljeno že vnaprej, pred samim mešanjem betona smo morali določiti le vlažnosti obeh agregatov in kamene moke, s pomočjo katerih smo nato določili potrebno količino vode in posameznih frakcij agregata. Predpostavili smo 0,48% vpijanje vode

za vse frakcije agregata in za kameno (dolomitno) moko. Količine potrebnih sestavin smo izračunali za m³ betona in jih nato preračunali za 40 litrov.

3.2.1 Določanje vlažnosti agregata

Vlažnost agregata smo določili skladno z modificirano metodo, opisano v standardu SIST EN 1097-5 [15], ki opisuje določanje spremembe vsebnosti vode agregata s sušenjem v prezračevanem sušilniku. Voda se lahko nahaja na površini agregatnih zrn ali v dostopnih porah znotraj agregata.

Obema agregatoma smo vlažnost določili po enakem postopku. Kot napravo za sušenje smo uporabili mikrovalovno pečico, ker je sušenje v njej hitrejše, kot v sušilniku. Najprej smo pripravili ustrezno velike vzorce (vsaj 0,5 kg) in jih stehtali (M_1). Nato smo vzorce sušili pri najvišji moči mikrovalovne pečice (7500 W) do stalne mase. En cikel sušenja je trajal 5 minut. Ko smo vzorce vzeli iz sušilne naprave, smo počakali, da so se ohladili na sobno temperaturo in jih ponovno stehtali (M_2). Postopek smo ponavljali dokler odstopanje mas ni bilo manjše od 0,1%. Vlažnost smo določili kot razliko mas vlažnega in suhega agregata, izraženo v odstotkih glede na maso suhega agregata. V preglednici 4 je prikazana vlažnost po frakcijah za posamezen agregat. Kamena moka agregata A ima 5,32% vlažnost, za kameno moko agregata B pa smo predpostavili kot popolnoma suho.

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100$$

Kjer je:

M_1 – masa vlažnega vzorca v gramih (g)

M_2 – masa suhega vzorca v gramih (g)

w – delež vode v agregatu v %.

Preglednica 4: Vlažnost po frakcijah za posamezen agregat.

Frakcija	Agregat A	Agregat B
0/4	3,13%	3,17%
4/8	0,36%	0,95%
8/11	0,10%	1,09%
11/16		0,74%

3.2.2 Mešanje betona

Z mešanjem betona smo začeli na sredini meseca maja. Mešanici z agregatom B smo zamešali z enotedenskim zamikom. Pripravili smo dve sestavi samozgoščevalnega betona, ki sta vsebovali enako vrsto in količino cementa, enako vodocementno razmerje in takšno količino superplastifikatorja, ki je omogočil enako obdelavnost obeh betonov. Sestavi betona se razlikujeta le po viru agregata. Prva in druga mešanica (M1 in M2) vsebujeta agregat A, tretja in četrta mešanica (M3 in M4) pa agregat B. Vsako sestavo betona smo mešali dvakrat, tako da smo skupaj dobili 80 litrov betona za posamezno vrsto agregata. Skupno smo namešali 160 litrov betona.

Beton smo zamešali z mešalcem s prostornino, ki je omogočala pripravo 40 litrov betona. Najprej smo zmešali suhe sestavine, in sicer, najprej grobe frakcije agregata in cement, temu so nato sledile drobne frakcije. V suho mešanico smo dozirali odtehtano količino vode in vse skupaj mešali tri minute. Po končanem mešanju smo ocenili pripravljeno betonsko mešanico in ji po potrebi dodali superplastifikator ter vse skupaj ponovno dobro premešali. Superplastifikator smo dodali zaradi predpisanega V/C razmerja, saj le ta zmanjšuje količino zamesne vode, ki je potrebna za pripravo betona določene obdelavnosti. Tako smo pri mešanici z agregatom A pri prvem mešanju (M1) dodali 0,6% superplastifikatorja ter še naknadno malenkost gostila (ker je mešanica rahlo segregirala). Pri drugem mešanju (M2) smo dodali le 0,5% superplastifikatorja. Pri prvem mešanju mešanice z agregatom B (M3) smo za dosego enake obdelavnosti betona dodali 1,2% superplastifikatorja, pri drugem mešanju (M4) pa smo dodali 1,0% superplastifikatorja. Dodatka bi lahko dodali tudi več, tako kot v prvem primeru, vendar to ni bilo potrebno, ker večja količina superplastifikatorja ne bi imela vpliva na trdnost betonskih preskušancev. Receptura, ki smo jo uporabili za pripravo betonskih mešanic M1, M2, M3 in M4 je prikazana v preglednici 5.

Po končanem mešanju smo na sveži betonski mešanici (slika 3) določili vsebnost por in konsistenco, ki je predstavljena v nadaljevanju naloge (poglavje 4), ter izdelali preizkušance tako, da smo beton vgradili v posebej za to pripravljene kalupe.

Preglednica 5: Sestava betonskih mešanic za mehanske preiskave.

Material	Agregat A		Agregat B	
	M1	M2	M3	M4
Agregat [kg/m ³]	1678	1678	1686	1686
Kamena moka [kg/m ³]	262	262	250	250
Cement [kg/m ³]	400	400	400	400
Voda [kg/m ³]	150	150	154	154
Superplastifikator [%]	0,6 + gustin	0,5	1,2	1,0
V/C	0,45	0,45	0,45	0,45
Dosežen razlez [mm]	660	690	630	550
Vsebnost por [%]	2	2	4	4

**Slika 3:** Sveža betonska mešanica.

3.3 Izdelava in nega betonskih preizkušancev

Po mešanju smo izdelali preizkušance tako, da smo beton vgradili v posebej za to pripravljene kalupe. Primerni kalupi so vodotesni in narejeni iz materiala, ki ne vpija vode, ne reagira s cementom in omogoča zagotovitev predpisanih toleranc dimenzij standardnih preizkušancev. Pred polnjenjem smo površine kalupov premazali z opažnim ločilnim sredstvom in nato vgradili beton.

Iz mešanice z agregatom A smo pripravili 15 kock dimenzij 150*150*150 mm, 6 kock dimenzij 100*100*100 mm in 4 prizme dimenzij 100*100*400 mm. Iz mešanice z agregatom B smo pripravili 16 kock dimenzij 150*150*150 mm, 5 kock dimenzij 100*100*100 mm in 4 prizme dimenzij 100*100*400 mm. Na velikih kockah smo določali tlačno trdnost, na prizmah dinamični ter statični modul elastičnosti, na malih kockah pa odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju ob prisotnosti talilne soli.

Poleg pravilne vgradnje betona je zelo pomembna tudi nega betona v času strjevanja, saj vpliva na končno trdnost betona. Vse vzorce smo trajno označili na vidna mesta, jih pokrili in negovali do prvega preskušanja na temperaturi okolja $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Po enem dnevu smo vzorce razkalupili in jih naprej hranili potopljene v vodi.

4 PREISKAVE NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH

4.1 Metoda razleza s posedom

Po končanem mešanju, smo sveži betonski mešanici preskusili konsistenco. Konsistenca betona je tisti parameter, ki pokaže sposobnost tečenja in zapolnjevanja betonov SCC.

Mi smo konsistenco določili po metodi razleza s posedom (slika 4), v skladu z določili standarda SIST EN 12350-8:2019 [16]. Uporabili smo podlago, katere površina je bila prekrita s pločevino, ter standardni prisekani stožec. Pred preskusom smo mizo in prisekan stožec navlažili. Na mizo smo postavili kovinski prisekan stožec in ga napolnili do vrha ter ga po napolnitvi previdno dvignili. Betonska masa se je razlezla po mizi. Izmerili smo dva med seboj pravokotna premera razlezene betonske mase in izračunali povprečje. Pri mešanicah z agregatom A smo za ustrezno konsistenco uporabili 0,5-0,6% superplastifikatorja, medtem, ko smo pri mešanicah z agregatom B za dosego enake konsistence in zahtevanega razleza, morali uporabiti skoraj enkrat večjo količino superplastifikatorja (1,0-1,2%). Vsi razlezi so bili v zahtevanem območju, ki ga za betone SCC predpisuje standard SIST EN 206:2013 [17], in sicer med 550 in 850 mm (povprečni doseženi razlezi so prikazani v preglednici 3). S tem smo dokazali, da je konsistenca betonske mešanice primerna.



Slika 4: Potek razleza betonske mešanice med preiskavo razleza.

4.2 Določanje vsebnosti por



Slika 5: Porozimeter.

V svežem betonu smo določili vsebnost zraka v skladu s standardom SIST EN 12350-7 [18]. Osnovno posodo – porozimeter (slika 5) smo napolnili s svežim betonom in pri tem pazili, da je zgornja površina betona v posodi ostala gladka. Na posodo smo pritrdili pokrov z ventiloma, skozi katera smo vlili vodo in z njo zapolnili prostor med osnovno posodo in pokrovom. Po zaprtju ventilov smo z ročno zračno črpalko vnesli toliko zraka, da je kazalec na manometru pokazal ničlo. Nato smo odprli ventil in odčitali porozimetrijski indeks.

Vsebnost por smo merili takoj po končanem mešanju, ugotovili smo, da je v mešanicah z agregatom A poroznost $\Delta p=2\%$, pri mešanicah z agregatom B pa $\Delta p=4\%$.

5 PREISKAVE NA STRJENEM BETONU

Na naših preizkušancih smo preverjali še lastnosti posamezne mešanice v strjenem stanju. S staranjem se praviloma povečujeta trdnost in elastični modul betona, zaradi procesa hidratacije. V sklopu naših preiskav smo izvedli preskus tlačne trdnosti strjenega betona po 24-ih urah, 3-eh, 7-ih, 28-ih in 90-ih dneh po metodi, opisani v standardu SIST EN 12390-3 [19]. Določili smo tudi dinamični in statični modul elastičnosti ter ugotavljali odpornost površine betonskih preizkušancev proti zmrzovanju/tajanju ob prisotnosti talilne soli.

5.1 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri starosti betona 28 dni [10].

Mi smo tlačno trdnost betona (f_c) preverjali na standardiziranih preizkušancih v obliki kock z robom 150 mm. Tlačno trdnost strjenega betona smo določali na preizkušancih različnih starosti, in sicer po 24 urah, 3-eh, 7-ih in 28-ih in 90-ih dneh, v skladu z določili standarda SIST EN 12390-3 [19]. Preiskavo smo vsakokrat izvedli na treh preizkušancih, ki smo jih pred preiskavo ves čas hranili v vodi pri temperaturi $20 \pm 3^\circ\text{C}$. Pred samim preskusom smo vse preizkušance stekali in s kljunastim merilom izmerili njihove dejanske dimenzije. Porušno silo smo določali s pomočjo tlačne preše, s katero smo strli preizkušane (slika 6). Pri tlačnem preskusu morata biti obe ravnini vzporedni in obremenjeni navpično. Na vzorec smo nanašali silo s predpisano hitrostjo in vrednost nanešene sile zajeli s pomočjo računalnika. Na osnovi znanih dimenzij in dobljene porušne sile, smo izračunali povprečne tlačne trdnosti in standardne deviacije trdnosti preizkušancev po enačbah:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}}$$

Kjer je:

F_c – tlačna trdnost betona (MPa)

F – tlačna sila, ki predstavlja največjo obremenitev ob porušitvi (kN)

A_c – površina vodoravnega prereza preizkušanca, na katerega deluje tlačna sila (m^2)

σ – standardna deviacija

$\bar{x}$ – povprečna vrednost tlačne trdnosti (MPa)

x_i – tlačna trdnost i -tega preizkušanca (MPa)

n – število preizkušancev.



Slika 6: Tlačna preša (levo) in porušen preizkušaneec (desno).

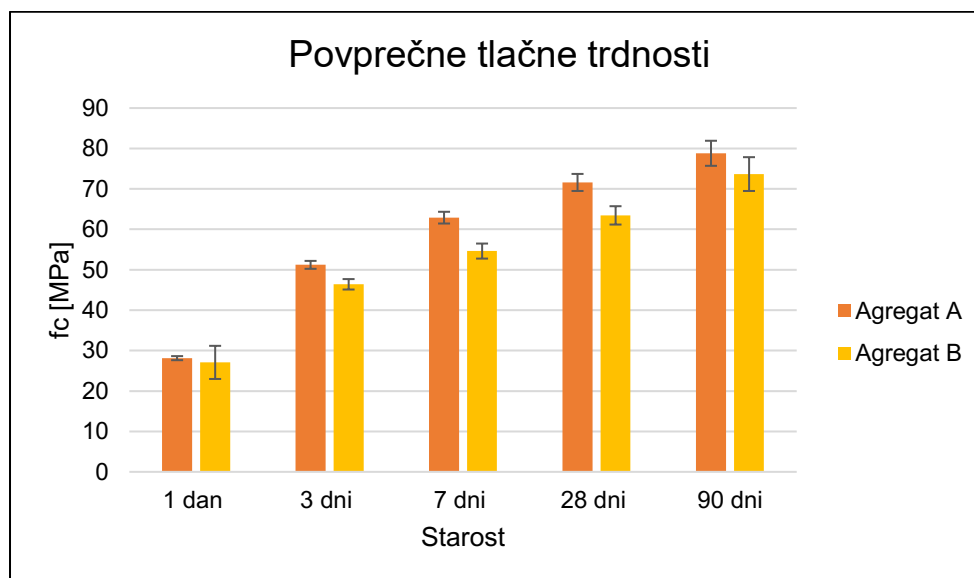
Za vsako mešanico posebej so v preglednicah 4 in 5 prikazane tlačne trdnosti betonov. Za lažjo primerjavo vpliva agregata na tlačno trdnost so rezultati grafično prikazani na grafikonu 1.

Preglednica 6: Tlačne trdnosti - agregat A.

Starost	Preskušaneec	Porušna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]	Povprečna tlačna trdnost [MPa]	Standardna deviacija
1 dan	Kocka 1	637,7	28,34	28,13	0,50
	Kocka 2	617,5	27,44		
	Kocka 11	643,8	28,61		
3 dni	Kocka 3	1153	51,24	51,21	0,98
	Kocka 4	1125	50,00		
	Kocka 12	1179	52,40		
7 dni	Kocka 6	1389	61,73	62,89	1,45
	Kocka 8	1461	64,93		
	Kocka 13	1395	62,00		
28 dni	Kocka 5	1551	68,93	71,60	2,11
	Kocka 14	1667	74,09		
	Kocka 15	1615	71,78		
90 dni	Kocka 7	1782	79,20	78,81	3,10
	Kocka 9	1854	82,40		
	Kocka 10	1684	74,84		

Preglednica 7: Tlačne trdnosti - agregat B.

Starost	Preskušane	Porušna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]	Povprečna tlačna trdnost [MPa]	Standardna deviacija
1 dan	Kocka 1	665,3	29,57	27,08	4,10
	Kocka 2	683,2	30,36		
	Kocka 9	479,1	21,29		
3 dni	Kocka 3	1013	45,02	46,40	1,29
	Kocka 5	1083	48,13		
	Kocka 11	1036	46,04		
7 dni	Kocka 6	1268	56,36	54,62	1,86
	Kocka 14	1171	52,04		
	Kocka 15	1248	55,47		
28 dni	Kocka 7	1490	66,22	63,45	2,27
	Kocka 13	1428	63,47		
	Kocka 16	1365	60,67		
90 dni	Kocka 4	1733	77,02	73,67	4,18
	Kocka 10	1525	67,78		
	Kocka 12	1715	76,22		

**Grafikon 1:** Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti s pripadajočo standardno deviacijo.

Iz rezultatov preiskav smo ugotovili, da je tlačna trdnost betona z agregatom A nekoliko višja od tlačne trdnosti betona z agregatom B. Po 28-ih dneh dosežena povprečna tlačna trdnost betona z agregatom A znaša 71,6 MPa, kar je 13% več od betona, ki vsebuje agregat B, kjer povprečna tlačna trdnost znaša 63,45 MPa.

Beton z agregatom A po 24-ih urah doseže povprečno trdnost 28,13 MPa, kar predstavlja 39% njegove 28-dnevne tlačne trdnosti. Po treh dneh povprečna tlačna trdnost naraste na 51,21 MPa in predstavlja 72% njegove 28-dnevne tlačne trdnosti. Pri sedmih dneh povprečna tlačna trdnost še naraste, na 62,89 MPa, in tako predstavlja že kar 88% njegove 28-dnevne povprečne tlačne trdnosti.

Prav tako so ti procenti zelo podobni pri betonu z agregatom B. Po 24-ih urah je doseženih 43% njegove povprečne tlačne trdnosti pri starosti 28 dni, kar znaša 27,08 MPa. V nadaljnjih dneh povprečna tlačna trdnost še vedno narašča in po treh dneh naraste na 46,4 MPa kar predstavlja 73% njegove 28-dnevne povprečne tlačne trdnosti, po sedmih dneh pa na 54,62 MPa in tako predstavlja že kar 86% njegove 28-dnevne povprečne tlačne trdnosti.

Povprečna tlačna trdnost betona z agregatom A po 90-ih dneh znaša 78,81 MPa, torej je v tem času pridobil glede na 28-dnevno vrednost še 10% tlačne trdnosti. Nekoliko več je na trdnosti pridobil beton z agregatom B. Njegova povprečna tlačna trdnost je po 90-ih dneh znašala 73,67 MPa, kar pomeni, da je v tem času glede na 28-dnevno trdnost pridobil še 16% povprečne tlačne trdnosti.

Glede na to, da se mešanici med seboj razlikujeta le po vrsti agregata, lahko sklepamo, da na tlačno trdnost betona vpliva vir dolomitnega agregata.

5.2 Dinamični modul elastičnosti

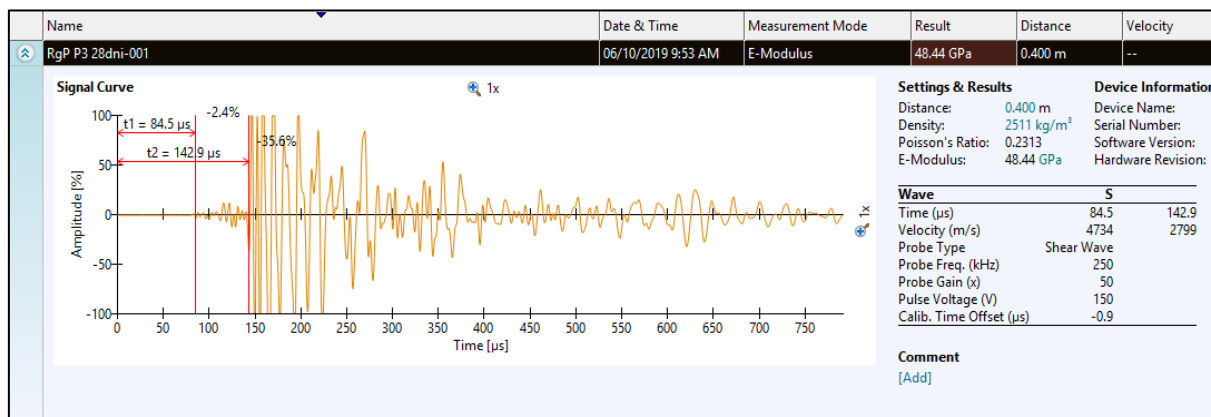
Vzporedno s spremljanjem tlačne trdnosti smo spremljali tudi dinamični modul elastičnosti (E_D) betonskih prizem. To nam je omogočila ultrazvočna naprava, s pomočjo katere smo vzbujevali valove v vzorcu. Metoda spada med neporušne preiskave. To pomeni, da se lastnosti materiala določijo brez porušitve ali drugih sprememb njegove strukture, zato smo lahko za spremljanje E_D vsakokrat uporabili iste prizme.



Slika 7: Merilna naprava in preizkušane prizme.

Merilna naprava (slika 7) je sestavljena iz dveh sond (oddajnik in sprejemnik), dveh kablov in digitalnega prikazovalnika zvočnega valovanja. Za kontrolo pravilnega delovanja aparature smo med sondi postavili kalibrator. Odčitek na merilnem inštrumentu je moral biti enak vrednosti, ki je označena na kalibratorju. Med sondo in površino vzorca smo zagotovili popoln kontakt tako, da smo površino očistili in nanjo nanесли tanko plast

silikonske paste. Na znani razdalji med sondama, ki je znašala 400 mm, smo merili čas prehoda vzdolžnih in strižnih valov [9]. Iz hitrosti prehoda strižnih valov smo neposredno izmerili E_D , ki smo ga primerjali z izračunanim. Tega smo izračunali s pomočjo hitrosti širjenja vzdolžnih valov, gostote prizmatičnega vzorca in Poissonovega števila. Čas potovanja valov smo odčitali v mikrosekundah, hitrost potovanja valov pa določili v metrih na sekundo. Prizmo smo stehali (m) in ji s kljunastim merilom izmerili dimenzije ter iz njih izračunali volumen (V). Gostoto vzorca smo izračunali po formuli $\rho = m/V$. Za izračun E_D smo potrebovali še Poissonov koeficient, ki za beton običajno znaša 0,2 [11]. Meritve smo izvedli po 24 urah, 3-eh, 7-ih, 28-ih in 90-ih dneh. Vsakokrat smo meritve izvedli na treh prizmatičnih vzorcih za agregat A in na treh prizmatičnih vzorcih za agregat B. Za vsako prizmo posebej smo določili E_D in na koncu izračunali njegovo povprečno vrednost. Na sliki 8 je prikazan primer poteka zvočnih valov in vrednosti parametrov, ki smo jih lahko izmerili z merilnim inštrumentom pri merjenju E_D .



Slika 8: Primer določanja E_D z merilno napravo na 28 dni starem preizkušancu (Prizma 3), ki je vseboval agregat A.

$$E_D = \frac{v^2 \gamma}{f(\mu_D)}$$

$$f(\mu_D) = \frac{1 - \mu_D}{(1 + \mu_D)(1 - 2\mu_D)}$$

Kjer je:

E_D – dinamični modul elastičnosti (GPa)

v – hitrost širjenja valovanja (m/s)

γ – gostota betonske prizme (kg/m³)

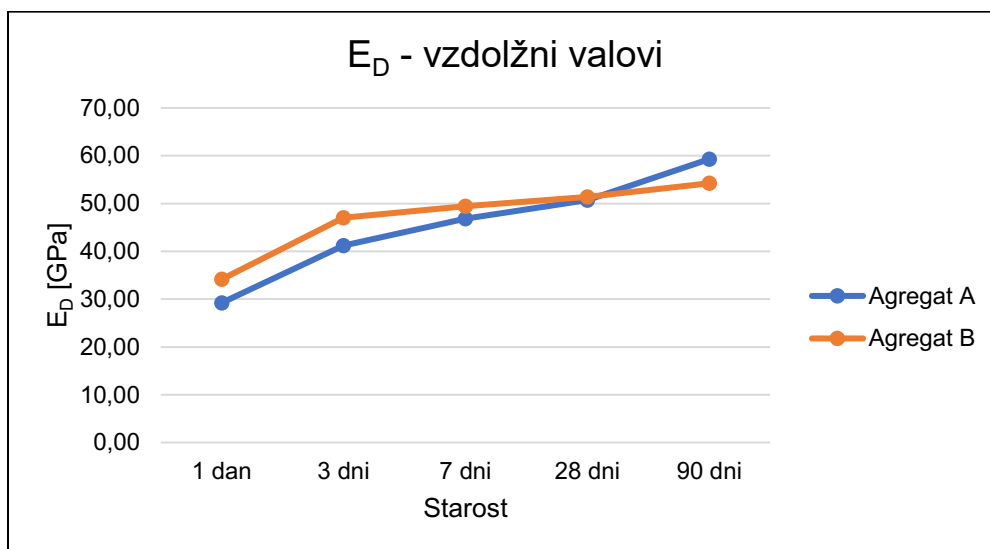
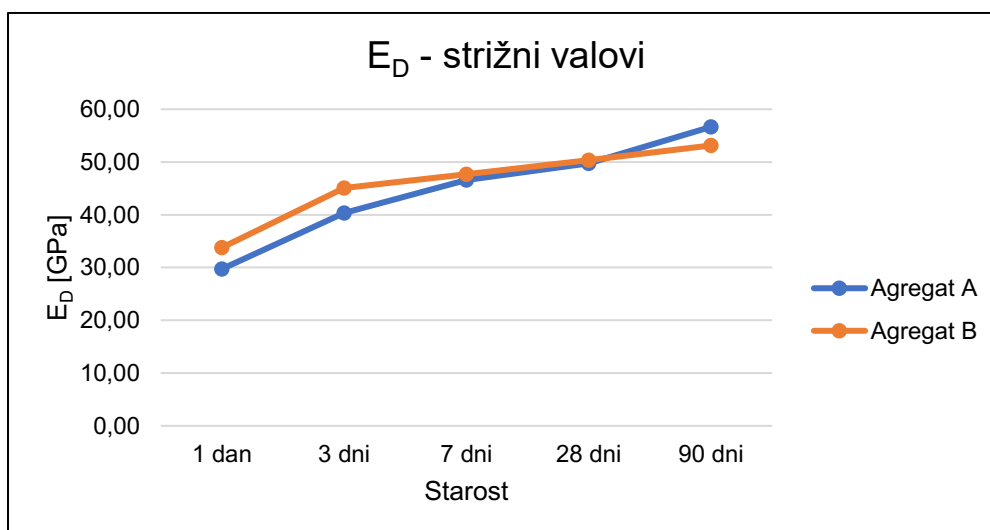
μ_D – Poissonovo število, ki znaša 0,2.

Ugotovili smo, da se dinamični modul elastičnosti (E_D) s staranjem vzorcev povečuje in je odvisen od hitrosti potovanja valov. Več časa ko potrebujejo ultrazvočni valovi za prehod skozi preizkušane, manjša je njihova hitrost in posledično tudi manjši E_D . Mešanice z agregatom B so ves čas staranja dosegale višje vrednosti E_D od tistih, ki so vsebovale agregat A. Na začetku, v prvem tednu preizkušanja, so odstopanja E_D med agregatoma velika (do 13%), po enem mesecu pa sta vrednosti E_D za oba agregata približno enaki. Po treh mesecih je stanje povsem drugačno. Beton z agregatom A takrat doseže višji E_D kot beton z agregatom B. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da vrsta dolomitnega agregata vpliva na E_D . V preglednici 8 so prikazane povprečne vrednosti E_D po 24 urah, 3-ih, 7-ih in 28-ih in 90-ih dneh za oba agregata, na podlagi prehoda vzdolžnih in strižnih valov. Najvišjo vrednost E_D doseže agregat A po 90-ih dneh.

Preglednica 8: Povprečni dinamični moduli elastičnosti po starosti.

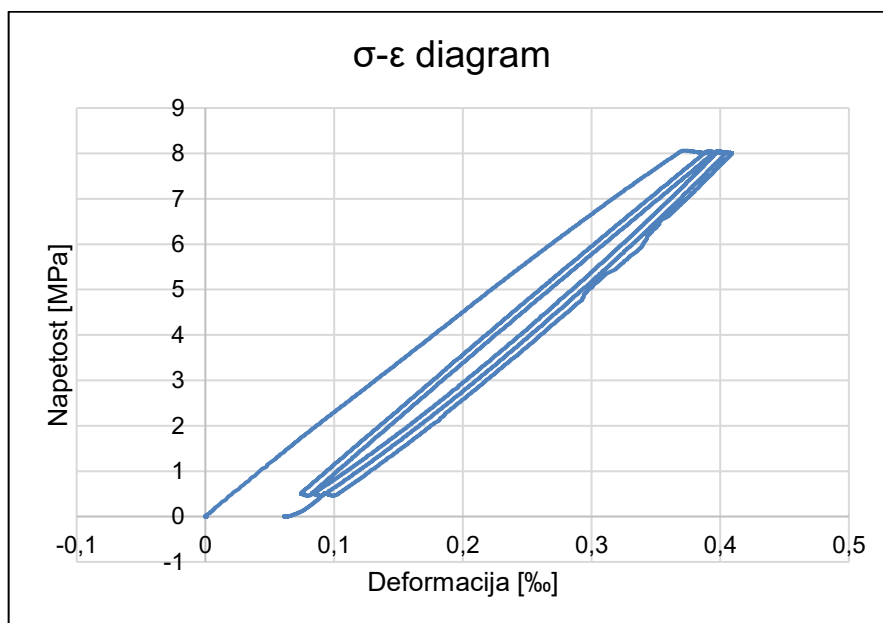
		1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	90 dni
Agregat A	E_D - vzdolžni valovi [GPa]	29,23	41,22	46,80	50,73	59,29
	E_D - strižni valovi [GPa]	29,72	40,33	46,61	49,76	56,66
Agregat B	E_D - vzdolžni valovi [GPa]	34,15	47,01	49,41	51,35	54,23
	E_D - strižni valovi [GPa]	33,78	45,10	47,65	50,33	53,14

Naraščanje dinamičnega modula elastičnosti s staranjem vzorca prikazujeta grafikon 2 in grafikon 3. Pri obeh agregatih E_D ves čas staranja narašča in po enem mesecu doseže vrednost približno 50 GPa. Tudi odstopanje E_D glede na prehod vzdolžnih in strižnih valov ni veliko. Malenkost višje vrednosti dosega E_D pri prehajanju vzdolžnih valov.

**Grafikon 2:** Primerjava E_D za oba agregata (vzdolžni valovi).**Grafikon 3:** Primerjava E_D za oba agregata (strižni valovi).

5.3 Statični modul elastičnosti

Istočasno kot dinamični modul elastičnosti, smo na istih prizmatičnih vzorcih spremljali še statični modul elastičnosti (E_s). Za ugotavljanje statičnega modula elastičnosti smo uporabili standardno metodo določanja sekantnega modula elastičnosti v tlaku, v skladu z določili SIST EN 12390-13 [20]. Preizkušance smo v preši obremenjevali in razbremenjevali v območju med 0,5 MPa in 1/3 njegove ocenjene tlačne trdnosti. Med preiskavo smo merili silo, ki je delovala na preizkušanec v času obremenjevanja in pripadajoče deformacije. Ker smo določali le statični modul elastičnosti in ne tudi $\sigma - \varepsilon$ diagrama ter smo iste prizme uporabili večkrat, smo naredili tri cikle obremenjevanja-razbremenjevanja in vzorca nismo porušili. Z obremenjevanjem in razbremenjevanjem vzorcev stabiliziramo material in merilno opremo. Statični modul elastičnosti smo določili iz zadnjega cikla obremenjevanja-razbremenjevanja. Potek obremenjevanja-razbremenjevanja en dan starega vzorca (Prizma 1), ki je vseboval agregat B, je prikazan na grafikonu 4.



Grafikon 4: Potek obremenjevanja-razbremenjevanja en dan starega vzorca (Prizma 1), ki je vseboval agregat B.

Iz sile s katero smo obremenjevali vzorec smo izračunali napetost po enačbi $\sigma = F/A$. Pri napetosti 0,5 MPa in pri napetosti, ki odgovarja 1/3 tlačne trdnosti preizkušanca smo odčitali povprečni pripadajoči deformaciji. Statični modul elastičnosti smo izračunali iz razmerja med razliko napetosti in razliko deformacij. V standardih so podani izrazi za izračun modulov elastičnosti na osnovi odvisnosti med napetostjo in deformacijo pri enosni tlačni obremenitvi.

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

$$\Delta\sigma = 1/3f_c - 0,5 \text{ MPa}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon(1/3f_c) - \varepsilon(0,5 \text{ MPa})$$

Kjer je:

E_s – statični modul elastičnosti

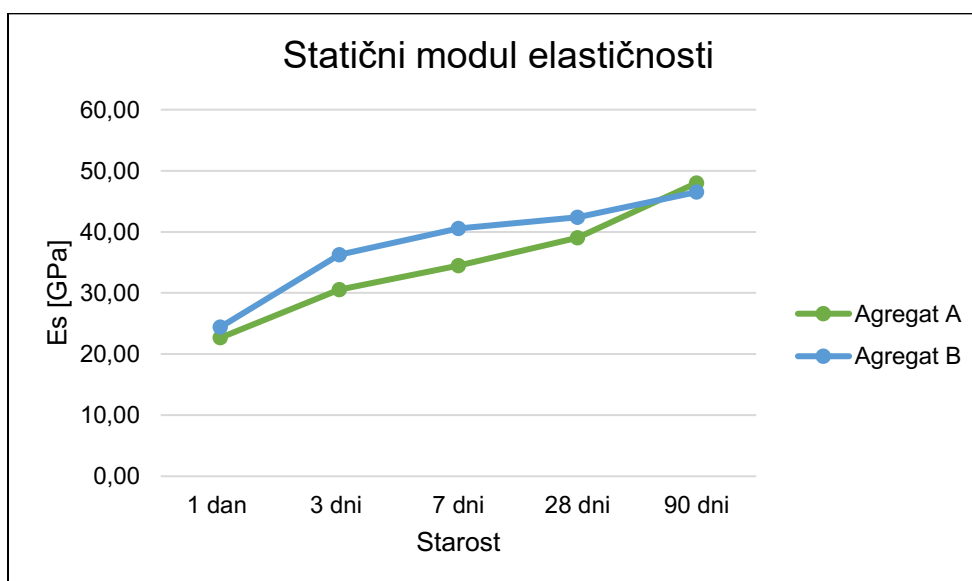
$\Delta\sigma$ – razlika napetosti [MPa]

$\Delta\varepsilon$ – razlika pripadajočih deformacij [%].

Statični modul elastičnosti smo določali na treh prizmah dimenzij 100*100*400 mm za vsak agregat posebej in sicer po 24 urah, 3-eh, 7-ih in 28-ih in 90-ih dneh. Za oceno tlačne trdnosti prizem smo uporabili rezultate dobljene s preskusom tlačne trdnosti treh kock, ki smo jih opravili predhodno. Zaradi razlike v obliki preizkušanca smo upoštevali faktor oblike $k=0,8$. Povprečne vrednosti statičnega modula elastičnosti za oba agregata, smo iz izmerjenih podatkov izračunali v programu Excel. Vrednosti so prikazane v preglednici 9. Za grafično predstavbo so rezultati predstavljeni na grafikonu 5.

Preglednica 9: Povprečne vrednosti statičnega modula elastičnosti po starosti.

Agregat	1 dan [GPa]	3 dni [GPa]	7 dni [GPa]	28 dni [GPa]	90 dni [GPa]
Agregat A	22,66	30,56	34,47	39,03	48,00
Agregat B	24,41	36,28	40,53	42,36	46,51



Grafikon 5: Primerjava E_s za oba agregata.

Statični modul elastičnosti s starostjo ves čas narašča. Najvišjo povprečno vrednost E_s po 28-ih dneh doseže mešanica z agregatom B in sicer 42,36 GPa, medtem ko mešanica z agregatom A takrat doseže povprečno vrednost 39,03 GPa. Mešanica z agregatom B ves čas staranja dosega višje vrednosti E_s . Najmanjša odstopanja E_s med betonoma z agregatoma A in B so po enem dnevu in po 28-ih dneh. Po 90-ih dneh pa se situacija obrne. Do takrat E_s še narašča in pri betonu z agregatom A doseže povprečno vrednost 48,00 GPa, kar pa je več od povprečne vrednosti pri betonu z agregatom B, ki takrat znaša 46,51 GPa. Vrsta agregata torej vpliva na statični modul elastičnosti.

5.4 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilne soli

Pomembna lastnost betona, povezana z njegovo obstojnostjo, je njegova zmrzljinska odpornost, brez in v prisotnosti talilne soli. Življenjsko dobo betona znižujejo že cikli zmrzovanja in tavanja, zaradi kemikalij, kot so talilne soli, pa beton še hitreje propada. Z aeriranjem betona lahko zvišamo njegovo zmrzljinsko odpornost, ker sistem zaprtih por velikosti okrog 0,2 mm deluje kot rezervoarji, kamor se lahko voda, ki je pod pritiskom zaradi zmrzovanja, sprosti in tam zmrzne. Ker ima dovolj prostora za povečanje prostornine zaradi prehoda v trdno agregatno stanje (led), ni pritiskov, ki sicer (v odsotnosti zračnih por) poškodujejo strukturo betona. Poškodbe lahko povzroči tudi voda v agregatu. Pri agregatih višje kakovosti je učinek zmrzovanja manjši, ker je agregat manj prepojen z vodo [7].

Odpornost površine proti zmrzovanju in tajanju (OPZT) se zahteva za betone s stopnjo izpostavljenosti XF2 ali XF4. ti betoni so praviloma aerirani. Vse zahteve so podane v standardu SIST EN 1026 [21].

V okviru diplomske naloge smo OPZT določali na neaeriranem betonu, in sicer na treh kockah dimenzij 100*100*100 mm pri starosti 28 dni (začetek preiskave). Pri preverjanju odpornosti smo uporabili 3-odstotno raztopino NaCl, ki smo jo nanесли na preiskovano površino velikosti 10000 mm². Izvedli smo 20 ciklov zmrzovanja/tavanja za preizkušance z agregatom A in 20 ciklov za preizkušance z agregatom B. En cikel traja 24 ur in obsega 16 do 18 ur zmrzovanja pri temperaturi $(-20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ in 6 do 8 ur tavanja pri temperaturi $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. OPZT smo ocenili glede na količino odluščenega materiala s preiskovane površine po 20 ciklih izmeničnega zmrzovanja/tavanja. Količino odluščenega materiala smo določili po vsakih 5 ciklih. Vzorce smo očistili z vodo, da smo dobili odluščeni material, ki smo ga osušili, stehali na 0,1 g natančno in delili s ploščino preiskovane površine (slika 9). Pri tehtanju odluščenega materiala smo uporabili filter papir, ki smo ga predhodno stehali in nato odšteli od celotne mase odluščenega

materiala s filter papirjem. Mase odluščenega materiala so po vsakih 5 ciklih prikazane v preglednicah 10 in 11, za lažjo predstavbo pa še na grafikonih 6 in 7.



a)

b)

c)

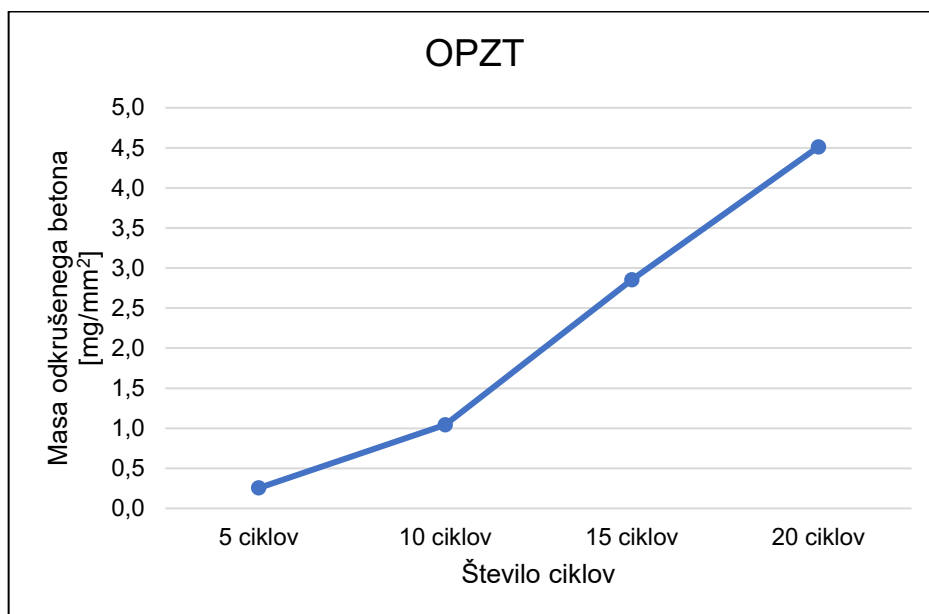
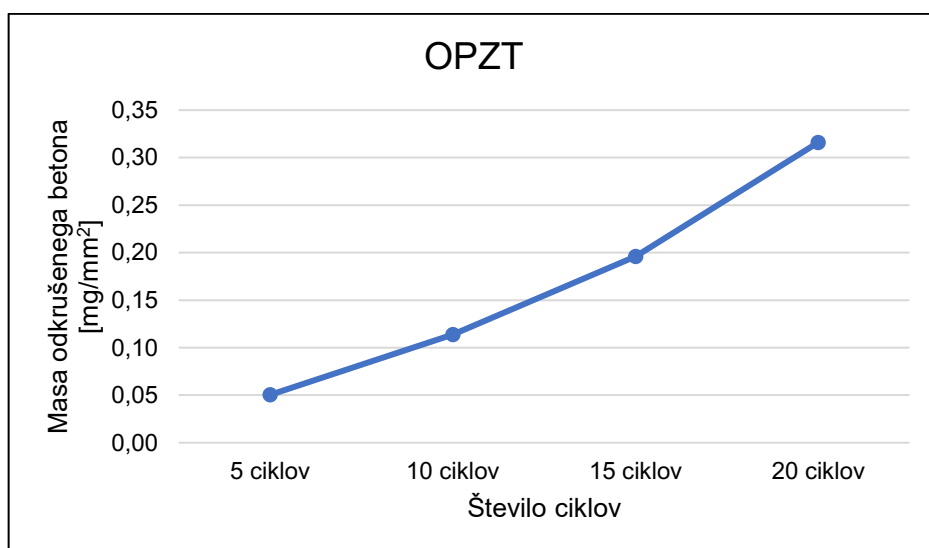
Slika 9: a) NaCl, b) čiščenje vzorca, c) tehtanje odluščenega materiala.

Preglednica 10: Masa odluščenega materiala - agregat A.

Preizkušane	Masa odluščenega betona [mg/mm ²]			
	5 ciklov	10 ciklov	15 ciklov	20 ciklov
1	0,445	1,397	2,319	1,694
2	0,118	0,445	1,596	1,688
3	0,199	0,526	1,509	1,597
Povprečje	0,254	0,789	1,808	1,660
Vsota	0,254	1,043	2,851	4,511

Preglednica 11: Masa odluščenega materiala - agregat B.

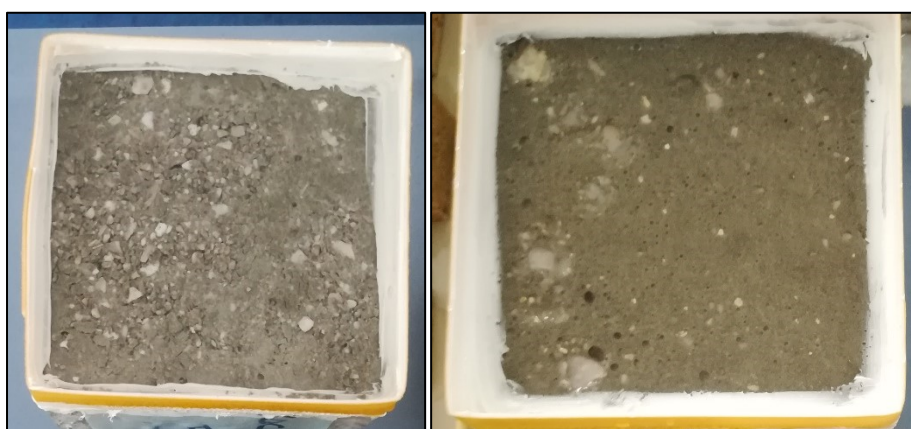
Preizkušane	Masa odluščenega betona [mg/mm ²]			
	5 ciklov	10 ciklov	15 ciklov	20 ciklov
1	0,076	0,087	0,072	0,119
2	0,035	0,060	0,101	0,110
3	0,040	0,044	0,073	0,131
Povprečje	0,050	0,064	0,082	0,120
Vsota	0,050	0,114	0,196	0,316

**Grafikon 6:** Povprečna količina odluščenega materiala - agregat A.**Grafikon 7:** Povprečna količina odluščenega materiala - agregat B.

Masa odkrušenega betona se je z vsakim ciklom večala. Pri betonu z agregatom B je to naraščanje približno linearno. Po zadnjem, dvajsetem ciklu, je povprečna masa odkrušenega betona znašala 0,316 mg/mm². To pomeni, da beton z agregatom B izpolnjuje zahtevo glede zmrzlinске odpornosti za stopnjo izpostavljenosti XF2, ki po SIST 1026 po 20 ciklih znaša 0,4 mg/mm². Pri betonu z agregatom A pa je masa odkrušenega betona velika že po prvih petih ciklih, spremembe so že takoj očitne tudi vizualno. Nato eksponentno narašča do dvajsetega cikla, kjer pride do porušitve dela vzorca in takrat masa odkrušenega materiala znaša že kar 4,511 mg/mm². Beton z agregatom A doseže mejo za stopnjo izpostavljenosti XF2 že med 6 in 10 cikli. Za stopnjo izpostavljenosti XF4 pa noben beton ne izpolni zahteve. Po SIST 1026

je meja po 25 ciklih za stopnjo izpostavljenosti XF4 0,2 mg/mm². Beton z agregatom A je to mejo dosegel že med 1 in 5 cikli, beton z agregatom B pa med 16 in 20 cikli. Ugotovili smo torej, da beton pri katerem je uporabljen agregat A, ni zmrzlinško odporen, saj ne izpolni niti zahteve za stopnjo izpostavljenosti XF2.

Slika 10 prikazuje primerjavo stanja med betonoma z agregatom A in agregatom B po 10 ciklih. Slika 11 pa končno stanje betona z agregatom A, ko je vzorec porušen in se krši tudi že sam agregat.



Slika 10: Primerjava vzorcev z agregatom A (levo) in agregatom B (desno) po 10 ciklih.



Slika 11: Vzorec po 20 ciklih - agregat A.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo primerjali vpliv dveh različnih dolomitnih agregatov, ki sta se razlikovala po lastnostih kamninske formacije, na lastnosti betona SCC. Agregat je bil tudi edina sestavina, po kateri sta se sestavi betonske mešanice ločili med seboj. Z vsakim agregatom smo pripravili 80 litrov betona, da smo dobili zadostno količino materiala za izdelavo standardnih preizkušancev. Iz agregata A smo zamešali dve mešanici (M1 in M2) prav tako iz agregata B (M3 in M4). Na preizkušancih iz betonskih mešanic smo izvedli preizkuse za ugotavljanje karakteristik betonov.

Cilj, ki smo si ga zastavili na začetku diplomske naloge je bil ugotoviti, ali dolomitni agregat iz različnih virov vpliva na reološke, mehanske in obstojnostne karakteristike samozgoščevalnih betonov (SCC). V ta namen smo opravili preiskave na sveži betonski mešanici in preiskave na strjenem betonu.

Z metodo razleza s posedom smo le preverili konsistenco svežih betonskih mešanic, da smo lahko nadaljevali z vgradnjo. Vsi razlezi so bili v zahtevanem območju. Ugotovili smo, da smo pri mešanicah z agregatom B potrebovali večjo količino superplastifikatorja, da smo dosegli enako konsistenco, kot pri mešanicah z agregatom A. S preizkušanjem vsebnosti por smo ugotovili, da sta mešanici z agregatom B bolj porozni ($\Delta p=4\%$) od mešanic, ki sta vsebovali agregat A ($\Delta p=2\%$). Verjetno je do razlike prišlo zaradi različne količine dodanega superplastifikatorja. Mešanicam z agregatom B ga je bilo dodano več, kot mešanicam z agregatom A.

Iz rezultatov preiskav tlačne trdnosti betona smo ugotovili, da višje tlačne trdnosti dosega beton z agregatom A. Po 24-ih urah razlike v trdnosti še niso tako očitne, po 28-ih dneh pa so že zelo opazne. Beton z agregatom A po 28-ih dneh doseže povprečno tlačno trdnost 71,60 MPa, medtem ko beton z agregatom B le 63,65 MPa. Obe mešanici pa tekom staranja dosežeta približno enak delež 28-dnevne tlačne trdnosti. Po 90-ih dneh je povprečna tlačna trdnost betona z agregatom A znašala 78,81 MPa, betona z agregatom B pa 73,67 MPa.

Pri ugotavljanju dinamičnega modula elastičnosti smo prišli do ugotovitve, da je njegova vrednost po 28-ih dneh tako za beton z agregatom A kot tudi za beton z agregatom B približno enaka. Ta vrednost znaša približno 50 GPa. Pri zgodnjih starostih so vrednosti E_D višje pri betonu z agregatom B. Po 90-ih dneh pa je stanje ravno obratno, takrat je E_D pri betonu z agregatom A višji, kot pri betonu z agregatom B. Do podobnih ugotovitev smo prišli pri ugotavljanju statičnega modula elastičnosti. Tudi tukaj se vrednosti E_S betonov z obema

agregatoma približujeta. Na začetku, po 24-ih urah, sta vrednosti približno enaki (23 GPa), med obdobjem do 28 dni se razlikujeta za 15%, po 28-ih dneh pa le še za 7%. Vrednost E_s betona z agregatom A se ves čas približuje vrednosti E_s betona z agregatom B in jo po 90-ih dneh celo preseže. Ugotovili smo tudi, da je dinamični modul elastičnosti večji od statičnega, kar je pričakovan rezultat.

V okviru preiskav smo na vzorcih kock preverili še odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilne soli. Tukaj smo prišli do zaključka, da vzorec z agregatom A ni zmrzlinsko odporen, saj je pri betonu s tem agregatom prišlo do velikega luščenja materiala že v prvih 5 ciklih, na koncu (po 20 ciklih) pa celo do porušitve dela vzorca. Pri betonu z agregatom B pa je masa odluščenega materiala bistveno manjša. Ta beton izpolnjuje zahtevo glede zmrzlinke odpornosti za stopnjo izpostavljenosti XF2.

Glede na to, da se sestavi betona razlikujeta le po vrsti dolomitnega agregata in so rezultati preiskav pokazali razlike med betonskimi preizkušanci, lahko zaključimo, da lahko vrsta dolomitnega agregata bistveno vpliva na lastnosti samozgoščevalnega betona. V danem primeru je vpliv najbolj izražen pri zmrzlinški odpornosti betona.

VIRI

- [1] Slonep. 1998-2019. Beton. <https://www.slonep.net/gradnja/gradbeni-materiali/beton-2565> (Pridobljeno 2. 8. 2019.)
- [2] Lespatex d.o.o. 2016. Samozgoščevalni betoni. <http://www.lespatex.si/gradbenistvo/dodatki-betonom-in-malte/samozgoscevalni-betoni/> (Pridobljeno 6. 8. 2019.)
- [3] Lešnik, A. 2012. Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 66-67.
- [4] Štukovnik, P., Bokan-Bosiljkov, V. 2018. Vpliv vrste agregata na lastnosti samozgoščevalnega betona. 40. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 19.-20. november 2018, J. Lopatič, P. Može, V. Markelj, (ur.). Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 229-235.
- [5] Štukovnik, P. 2015. Vpliv okolja na historične materiale z mineralnim vezivom. = Influence of environment on the historical material with mineral binder. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 43.
- [6] Meglen, A. 2018. Alkalno karbonatna reakcija v betonu. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: str. 12.
- [7] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo UL, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 84-89, 99-100, 110-117.
- [8] Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik 12/2010 – 01/2011, str: 100-103.
- [9] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. Gradiva vaje 2015/2016. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo UL, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 57-76.
- [10] Lopatič, J. 2016. Betonske konstrukcije. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo UL, Katedra za masivne in lesene konstrukcije: str. 7-17.

[11] Saje, D. 2016. Tehnologija betona. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 54.

Standardi

[12] SIST EN 12390-2:2019. Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti.

[13] SIST EN 197-1:2011. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

[14] SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.

[15] SIST EN 1097-5:2008. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov – 5.del: Določevanje vode s sušenjem v prezračevanem sušilniku.

[16] SIST EN 12350-8:2010. Preskušanje svežega betona – 8. del: Samozgoščevalni beton – Preskus razleza s posedom.

[17] SIST EN 206:2013+A1:2016. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

[18] SIST EN 12350-7:2019 – Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Metode s pritiskom.

[19] SIST EN 12390-3:2009/AC:2011. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.

[20] SIST EN 12390-13:2013. Preskušanje strjenega betona – 13. del: Preskušanje sekantnega modula elastičnosti v tlaku.

[21] SIST EN 1026:2016. Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206.