

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:

Trebušak, R., 2016. Primerjava lastnosti betonskih mešanic iz naravnega in recikliranega agregata. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V.): 44 str.

Datum arhiviranja: 21-09-2016

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:

Trebušak, R., 2016. Primerjava lastnosti betonskih mešanic iz naravnega in recikliranega agregata. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V.): 44 pp.

Archiving Date: 21-09-2016

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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
SMER OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**ROBERT TREBUŠAK**

**PRIMERJAVA LASTNOSTI BETONSKIH MEŠANIC IZ  
NARAVNEGA IN RECIKLIRANEGA AGREGATA**

Diplomska naloga št.: 586/SOG

**COMPARISON OF PROPERTIES OF CONCRETE  
MIXTURES MADE OF NATURAL AND RECYCLED  
AGGREGATE**

Graduation thesis No.: 586/SOG

**Mentorica:**

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 14. 09. 2016

## **POPRAVKI**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

»Ta stran je namerno prazna«

## IZJAVE

Spodaj podpisani študent Robert Trebušak, vpisna številka 26105633, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Primerjava lastnosti betonskih mešanic iz naravnega in recikliranega agregata.

## IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*
  - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
  - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta:

\_\_\_\_\_

»Ta stran je namerno prazna«

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>691.3(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Robert Trebušak</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Violeta Bokan – Bosiljkov</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Primerjava lastnosti betonskih mešanic iz naravnega in recikliranega agregata</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomsko delo – visokošolski strokovni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>44 str., 23 tab., 9 graf., 31 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>recikliran agregat, drobljen beton, nadomeščanje naravnega agregata z recikliranim, betonske mešanice</b>

### **Izvleček**

Reciklirani agregat, pridobljen iz betonskih ruševin, predstavlja potencialno zelo kvalitetno sekundarno surovino za uporabo v betonskih mešanicah. V okviru diplomske naloge sem primerjal lastnosti referenčne betonske mešanice z naravnim agregatom in mešanic z različnimi deleži drobljenega betona v vlogi recikliranega grobega agregata. Najprej sem v sklopu projekta COST TU1404 preizkušal osnovne lastnosti referenčne mešanice betona z naravnim agregatom iz Francije. Zrna grobih frakcij francoskega agregata so bolj porozna, kot smo vajeni v Sloveniji. Za naravni agregat sem imel podane vse potrebne lastnosti, gostoto zrn in koeficient vpijanja vode. Recikliran agregat sem pridobil z drobljenjem in sejanjem betonskih ruševin. Za ta agregat sem sam določil gostoto zrn in koeficient vpijanja vode. Ugotovil sem, da sta navedeni lastnosti recikliranega betona zelo blizu lastnostim naravnega grobega agregata iz Francije. Na podlagi sestave referenčne mešanice sem določil recepture mešanic z recikliranim grobim agregatom. Z recikliranim agregatom sem zamenjal 30%, 50% in 100% prostornine grobe frakcije v referenčnem betonu. Nato sem na mešanicah z recikliranim agregatom opravil enake preiskave v svežem in strjenem stanju betona, kot na referenčni mešanici. Pri vseh mešanicah sem posebno pozornost posvetil predpripravi agregata, da sem dosegel z vodo zasičeno površinsko suho stanje agregatnih zrn. Rezultati opravljenih preiskav so pokazali, da so imele mešanice z recikliranim agregatom v svežem stanju enako konsistenco in prostorninsko maso in nekoliko višjo vsebnost zraka, kot referenčni beton. Tudi v strjenem stanju so dosegale zelo podobno tlačno trdnost, kot referenčni beton.

»Ta stran je namerno prazna«



## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 691.3(043.2)  
**Author:** Robert Trebušak  
**Supervisor:** Prof. Violeta Bokan – Bosiljkov, PhD  
**Title:** Comparison of properties of concrete mixtures made of natural and recycled aggregate  
**Document Type:** Graduation Thesis – Higher professional studies  
**Notes:** 44 p., 23 tab., 9 fig., 31 graph  
**Keywords:** recycled aggregate, crushed concrete, substitution of natural aggregate by recycled one, concrete mixtures

### **Abstract**

Recycled aggregate produced from concrete rubble has potential to be high-quality secondary raw material for use in concrete mixtures. As part of the thesis, I compared properties of reference concrete mixtures (OC) with natural aggregate and mixtures with different proportions of crushed concrete as recycled coarse aggregate. OC mixture was prescribed in the framework of round robin test (RRT) of the COST TU1404 Action. I first carried out tests in the framework of the RRT, on the OC, which was prepared from natural aggregate from France. Coarse aggregate particles of the French natural aggregate have higher porosity than Slovenian natural aggregates. For the French aggregate, all the necessary properties were given by the RRT coordinator, including grain density of particular fraction and its coefficient of water absorption. Recycled aggregate was obtained by crushing and sieving of concrete rubble. The grain density and the coefficient of water absorption of coarse fractions of recycled aggregates were determined in laboratory of UL FGG. I found out that the tested properties of the recycled concrete are very close to the same properties of natural coarse aggregate from France. Based on the composition of the OC I determined the composition of mixtures with recycled coarse aggregate. I replaced 30%, 50% and 100% of the coarse fraction volume of the OC with the recycled aggregate. On the recycled aggregate concrete mixtures I carried out the same tests in fresh and hardened state as for the OC. For all concrete compositions, I paid special attention to initial preparation of aggregate that should reach water-saturated surface dry condition of the grains. Obtained test results showed that compared to the OC the recycled aggregate concrete mixtures possess the same consistency and density in fresh state and slightly higher air content. The same is true also for the hardened state, since the compressive strength results were approximately the same for the reference and recycled aggregate concrete mixtures.

»Ta stran je namerno prazna«

## **ZAHVALA**

Za nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov univ. dipl. inž. grad. Za pomoč pri izvedbi laboratorijskih preiskavah se zahvaljujem Franciju Čeponu in Boštjanu Jursinoviču.

Zahvaljujem se tudi svojim staršema, katera sta mi omogočila študij in mi vedno stala ob strani.

»Ta stran je namerno prazna«

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OSNOVNE SESTAVINE V PROIZVODNJI BETONA</b> .....	<b>2</b>
2.1	Agregat .....	2
2.1.1	Naravni agregat .....	2
2.1.2	Agregat iz recikliranega betona.....	3
2.1.3	Proizvodnja agregata .....	3
2.2	Lastnosti agregata, pomembne za proizvodnjo betona .....	5
2.2.1	Poroznost in vodovpojnost .....	5
2.2.2	Maksimalno zrno in zrnastostna sestava.....	6
2.3	Cement.....	6
2.4	Voda.....	8
2.5	Dodatki v betonskih mešanicah .....	8
2.5.1	Kemijski dodatki .....	8
2.5.2	Mineralni dodatki .....	9
<b>3</b>	<b>UPORABLJENE LABORATORIJSKE PREISKAVE</b> .....	<b>9</b>
3.1	Preiskave agregata .....	9
3.1.1	Določanje vsebnosti vlage s sušenjem v sušilniku .....	9
3.1.2	Sejalna analiza.....	10
3.1.3	Določanje prostorninske mase zrn in vpijanje vode (SIST EN 1097-6) .....	11
3.2	Preiskave sveže betonske mešanice .....	13
3.2.1	Določanje vsebnosti zraka v sveži betonski mešanici (SIST EN 12350-7) .....	13
3.2.2	Preizkus s posedom (SIST EN 12350-2).....	14
3.2.3	Določanje prostorninske mase svežega betona (SIST EN 12350-6).....	15
3.3	Preizkusi na strjenih vzorcih .....	16
3.3.1	Določanje tlačne trdnosti.....	16
<b>4</b>	<b>METODE IN MATERIALI</b> .....	<b>18</b>
4.1	Mešanica iz naravnega materiala .....	18
4.1.1	Naravni agregat .....	19
4.1.1.1	Predpriprava grobega naravnega agregata.....	20
4.1.1.2	Predpriprava finega naravnega agregata .....	21
4.1.2	Postopek mešanja betonske mešanice .....	21
4.1.3	Preizkusi na sveži betonski mešanici .....	23
4.2	Reciklirani agregat.....	23

4.2.1	Odvzem vzorca in določitev prostorninske mase zrn .....	25
4.3	Določanje receptur betonskih mešaníc .....	27
4.3.1	Mešanica s 30 % reciklirane grobe frakcije (30%_RCA).....	27
4.3.2	Mešanica s 50 % reciklirane grobe frakcije (50%_RCA).....	28
4.3.3	Mešanica s 100 % reciklirane grobe frakcije (100%_RCA).....	28
4.3.4	Mešanica s 100 % reciklirane fine frakcije (100%_RCA_0/4 mm) .....	29
<b>5</b>	<b>REZULTATI IN DISKUSIJA .....</b>	<b>30</b>
5.1	Rezultati v sklopu projekta COST TU1404 .....	30
5.1.1	Preizkusi na sveži mešanici OC.....	30
5.1.1.1	Določanje konsistence po metodi s posedom .....	30
5.1.1.2	Vsebnost zraka v sveži betonski mešanici .....	31
5.1.1.3	Prostorninska masa sveže mešanice .....	32
5.1.2	Preizkusi na strjenem betonu za mešanico OC.....	33
5.1.2.1	Tlačna trdnost 7 dni .....	33
5.1.2.2	Tlačna trdnost 28 dni .....	34
5.2	Rezultati preiskav na mešanícah z recikliranim agregatom .....	36
5.2.1	Preizkusi na sveži mešanici .....	36
5.2.1.1	Določanje konsistence po metodi s posedom .....	36
5.2.1.2	Vsebnost zraka v sveži betonski mešanici .....	37
5.2.1.3	Prostorninska masa sveže betonske mešanice .....	38
5.2.2	Preizkusi na strjenem betonu .....	39
5.2.2.1	Tlačna trdnost pri starosti 7 in 28 dni .....	39
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>42</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>43</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Drobilec agregata .....	3
Slika 2: Separacija s pranjem agregata podjetja Šuštar trans d.o.o. ....	4
Slika 3: Stopnje vlažnosti agregata: a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vodo - površinsko suh, (d) površinsko vlažen. (vir: Žarnič, 2005).....	5
Slika 4: Priporočene mejne krivulje za mešanico agregata 0/16 (vir: SIST EN 1026) .....	6
Slika 5: Vrste in oznake cementov po SIST EN 197-1 (vir: Saje, 2015) .....	7
Slika 6: Oznake cementov po SIST EN 197-1 (vir: Saje, 2015).....	8
Slika 7: Prikaz pojmov pri sejalni analizi (vir: Žarnič, 2005).....	10
Slika 8: Standardna sita .....	11
Slika 9: Ostanek agregatnih zrn na situ .....	11
Slika 10: Piknometar z vzorcem recikliranega agregata .....	12
Slika 11: Ocejnanje agregata.....	12
Slika 12: Agregat v zasičenem površinsko suhem stanju.....	12
Slika 13: Porozimetar .....	13
Slika 14: Tehnična skica porozimetra .....	13
Slika 15: Primer poseda razreda S2.....	15
Slika 16: Primer poseda razreda S4.....	15
Slika 17: Primer stiskalnice za določanje tlačne trdnosti .....	17
Slika 18: Tipi porušitve preizkušanca po SIST EN 12390-3 .....	17
Slika 19: Naravni agregat frakcije 8/16 uporabljen v sklopu projekta COST TU1404 .....	20
Slika 20: Agregat v z vodo zasičenem površinsko vlažnem stanju.....	20
Slika 21: Navodila za predpripravo grobega agregata (vir: RRT <sup>+</sup> programme for TU1404 Instructions for participation, 2015).....	21
Slika 22: Mešalec v Kostruktcijsko prometnem laboratoriju UL FGG.....	22
Slika 23: Rušenje bazenov CČN Domžale – Kamnik (vir:CČN Domžale-Kamnik) .....	23
Slika 24: Hidravlične klešče za rušenje betona (vir:CČN Domžale-Kamnik) .....	24
Slika 25: Ruševine bazenov (vir:C ČN Domž ale-Kamnik) .....	24
Slika 26: Ločevanje betonskih ruševin in armature (vir:CČN Domžale-Kamnik) .....	24
Slika 27: Nakladanje ruševin na kamione in odvoz v drobljenje (vir:CČN Domžale-Kamnik) .....	25
Slika 28:Drobljenje betonskih ruševin z drobilcem .....	25
Slika 29: Strojni odvoz reprezentativnega vzorca agregata.....	26
Slika 30: Odstranjevanje nezaželenih primesi (les, polistiren) .....	26

**KAZALO TABEL**

Tabela 1: Razredi poseda po standardu SIST EN 206.....	14
Tabela 2: Receptura za betonsko mešanico OC .....	19
Tabela 3: Koeficient vpijanja vode ( $WA_{24}$ ) naravnega agregata .....	19
Tabela 4: Prostorninske mase zrn recikliranega agregata in koeficient vpijanja vode .....	26
Tabela 5: Receptura za betonsko mešanico 30%_RCA .....	27
Tabela 6: Receptura za betonsko mešanico 50%_RCA .....	28
Tabela 7: Receptura za betonsko mešanico 100%_RCA .....	28
Tabela 8: receptura za betonsko mešanico 100%_RCA_0/4 mm .....	29
Tabela 9: Rezultati poseda mešanice OC .....	30
Tabela 10: Statistika poseda mešanice OC.....	30
Tabela 11: Rezultati vsebnosti zraka mešanice OC.....	31
Tabela 12: Statistika vsebnosti zraka mešanice OC v [%] .....	31
Tabela 13: Rezultati prostorninske mase sveže mešanice .....	32
Tabela 14: Statistika prostorninske mase mešanice OC v [ $kg/m^3$ ].....	33
Tabela 15: Rezultati 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC.....	34
Tabela 16: Statistika rezultatov 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC .....	34
Tabela 17: Rezultati 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC.....	35
Tabela 18: Statistika rezultatov 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC .....	35
Tabela 19: Rezultati preizkusa s posedom na mešanicah z recikliranim agregatom.....	36
Tabela 20: Rezultat preizkusa s razlezom na mešanici RCA_0/4_100%.....	36
Tabela 21: Rezultati vsebnosti zraka na mešanicah z recikliranim agregatom .....	37
Tabela 22: Rezultati prostorninske mase mešanic z deležem RCA.....	38
Tabela 23: Rezultati tlačnih trdnosti pri starosti 7 in 28 dni.....	40



## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Raztros rezultatov preizkusa s posedom.....	31
Grafikon 2: Raztros rezultatov vsebnosti zraka .....	32
Grafikon 3: Raztros rezultatov vsebnosti zraka .....	33
Grafikon 4: Raztros rezultatov 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC .....	34
Grafikon 5: Raztros rezultatov 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC .....	35
Grafikon 6: Vpliv deleža zamenjave agregata na konsistenco sveže mešanice .....	37
Grafikon 7: Vpliv deleža recikliranega agregata na vsebnost zraka .....	38
Grafikon 8: Vpliv zamenjave agregata na prostorninske mase .....	39
Grafikon 9: Vpliv deleža zamenjave agregata na tlačno trdnost.....	40

»Ta stran je namerno prazna«

## 1 UVOD

Beton je najpogosteje uporabljeni gradbeni material. S tem pa je povezana tudi velika poraba naravnih virov, saj je beton druga najbolj uporabljana snov takoj za vodo. Ocenjena letna poraba cementa za leto 2012 znaša kar okrog 500 kg na vsakega zemljana. (<http://www.globalcement.com/>) Upoštevajoč te ocene, znaša letna poraba agregata za proizvodnjo betona kar 3500 Mt.

Agregat, pridobljen iz betonskih ruševin, predstavlja velik potencial za zmanjšanje porabe naravnih virov. Povpraševanje po betonu je največje v urbanih središčih, gramoznice oz kamnolomi pa so praviloma bolj na obrobju. Zato je treba te surovine prevažati na večjih razdaljah, kar poveča transportne stroške in obremenjuje okolje. Na drugi strani pa ravno v urbanih središčih nastajajo največje količine gradbenih odpadkov iz rušitev betonskih objektov. Z uporabo agregata iz betonskih ruševin bi tako lahko rešili dva problema na en mah. Vendar je zaradi nepoznavanja te sekundarne surovine še precej pomislekov glede njene uporabe v novem betonu v večjih količinah.

V diplomski nalogi sem preučeval vpliv zamenjave naravnega agregata na osnovne lastnosti betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju. Zaradi relativno visoke pozornosti sem pozornost posvetil predvsem predpripravi agregata, pred pripravo betonskih mešanic. V Sloveniji imajo naravni agregati majhno (manj kot 1%) poroznost in posledično zanemarljivo vodovpojnost. Zaradi tega lahko vpliv vodovpojnosti na v/c razmerje praktično zanemarimo. Pri višji poroznosti agregata, pa le ta lahko pomembno vpliva na v/c razmerje in tako negativno vpliva na lastnosti betona predvsem v svežem stanju.

V sklopu diplomske naloge sem najprej opravil standardne preizkuse na betonski mešanici z naravnim agregatom, katera je bila predpisana v sklopu projekta COST TU1404. Nato sem na osnovi te iste mešanice pripravil še 3 mešanice z različnimi deleži recikliranega grobega agregata. Cilj te diplomske naloge je bil primerjati lastnosti teh mešanic v svežem in strjenem stanju.

## 2 OSNOVNE SESTAVINE V PROIZVODNJI BETONA

### 2.1 Agregat

Agregat v betonu zaseda približno tri četrtine prostornine, zato imajo lastnosti agregata lahko velik vpliv na lastnosti betona. Le te vplivajo na trdnost betona, ter tudi na trajnost in druge tehnične lastnosti betona. Agregate za proizvodnjo betona delimo glede na velikost delcev (grobi ali fini), izvor (naravni, umetni) ter specifično težo zrn (lahki, težki).

S tradicionalnega vidika agregat predstavlja inerten in poceni material, enakomerno razporejen v cementni pasti kot polnilo. V resnici pa agregat ni povsem inerten, saj njegove fizikalne in včasih tudi kemične lastnosti vplivajo na lastnosti betona. S pomočjo agregata izboljšamo prostorninsko stabilnost in trajnost, v primerjavi s samo cementno pasto. Z ekonomskega vidika je ugodno v mešanici uporabiti čim več agregata in čim manj cementa, vendar je potrebno to razmerje prilagajati drugim želenim lastnostim betona, tako v svežem, kot tudi strjenem stanju.

#### 2.1.1 Naravni agregat

Naravni agregati nastanejo z naravnimi procesi preperevanja, erozije in transporta, ali pa z umetnim drobljenjem večjih kosov kamnin. Tako je večino lastnosti agregata odvisnih od lastnosti kamnin, iz katerih je agregat nastal oz. bil pridobljen. Nekatere lastnosti pa so odvisne od načina nastanka agregata, kot npr. oblika delcev in njihova velikost, površinska tekstura in vodovpojnost.

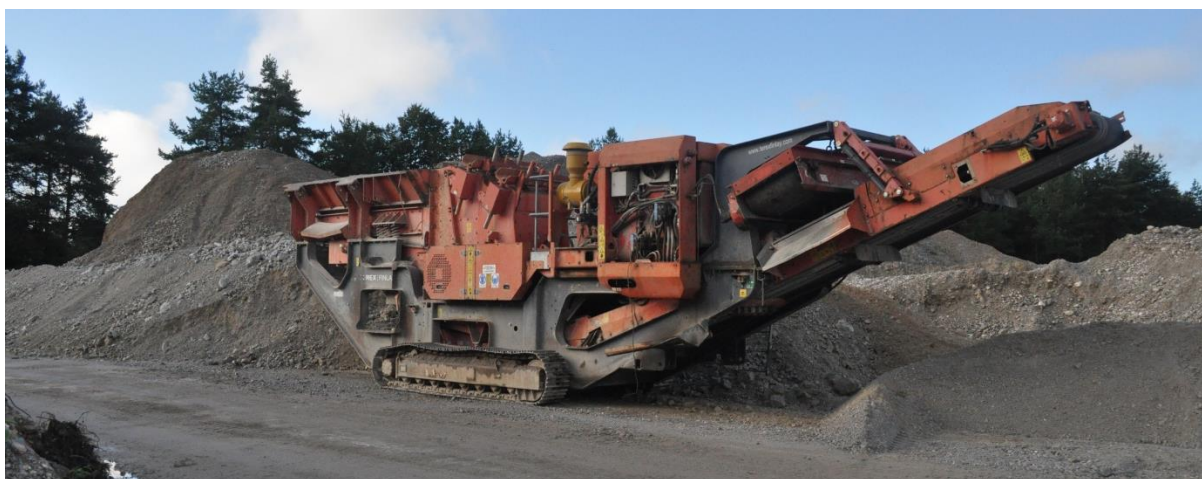
Naravni agregat pridobivamo ali iz aluvialnih nanosov (prod) ali v kamnolomih z drobljenjem skal v drobilcih (drobljenec). Prod sestavljajo zrna zaobljenih oblik, ki so lahko različne mineralne sestave. Zaobljena zrna proda pripomorejo k boljši vgradljivosti betonske mešanice. Drobljenec sestavljajo zrna nepravilnih oblik z ostrimi robovi. Betoni iz drobljenega agregata navadno dosegajo višjo tlačno trdnost, zaradi medsebojnega klinjenja zrn.

### 2.1.2 Agregat iz recikliranega betona

Agregat, pridobljen iz ruševin porušениh betonskih konstrukcij se pridobiva praktično po istem postopku, kot naravni drobljeni agregat. Betonske ruševine primerne velikosti se zdrobi v drobilcih, ki so opremljeni z magnetnim trakom za odstranjevanje kovinskih delcev. Rezultat je betonski drobljenec, kateri vsebuje zrna agregata, ki so deloma oblepljena s hidratizirano cementno pasto. Groba frakcija tega agregata je bila uspešno uporabljena v več laboratorijskih preizkusih, kot tudi v praksi. Fina frakcija (0-4 mm), katera vsebuje večje količine hidratiziranega cementa in mavca, pa se načeloma ne uporablja v betonskih mešanicah. V zadnjem času je več študij pokazalo, da s primerno pripravo recikliranega agregata ne pride do zmanjšanja kvalitete betona, v katerem je uporabljena ta vrsta agregata. (Somayeh,et al., 2015)

### 2.1.3 Proizvodnja agregata

Agregat za proizvodnjo betona v praksi pridobivamo s sejanjem proda iz aluvialnih nanosov ali drobljenega kamna iz kamnolomov. S sejanjem ločimo agregat na posamezne frakcije. Standardne frakcije za proizvodnjo betona so 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm in 16/32 mm.



Slika 1: Drobilec agregata

Pridobivanje se prične z drobljenjem večjih kosov v drobilcih. Drobljenje se izvaja v dveh stopnjah. V primarni stopnji drobljenja se večji kosi, ki so lahko tudi večji od metra, reducirajo na velikost primerno za sekundarno drobljenje. Primarni drobilci so običajno čeljustnega tipa. Čeljustni drobilci so ekonomični za obratovanje, vendar proizvajajo podolgovata zrna. Zato gre agregat še skozi sekundarno fazo drobljenja, pri kateri nastajajo zrnja bolj pravilnih oblik. V sekundarni fazi se

najpogosteje uporabljajo rotacijski tipi drobilcev, saj poleg bolj pravilne oblike zrn proizvajajo tudi večje količine finih delcev.

Po drobljenju agregata na primerno maksimalno velikost zrn, ki znaša okrog 40 mm, se agregat loči na frakcije. Ločevanje posameznih frakcij se izvaja s sejanjem na vibracijskih sitih. S pomočjo vibracij zrna padajo skozi sita z večjim premerom odprt in se ustavijo na sitih z manjšim premerom odprt in. Ostanki na posameznih sitih se s pomočjo traku transportirajo na kupe. Sejanje se lahko izvaja na suh ali moker način. Pri mokrem načinu se odstranijo fini delci, ki so nezaželeni pri proizvodnji betona (glineni delci).



Slika 2: Separacija s pranjem agregata podjetja Šuštar trans d.o.o.

Opisani postopek se v principu uporablja tudi za pridobivanje recikliranega agregata. Potreben pa je dodaten korak v fazi drobljenja. Ker je beton najpogosteje armiran, je treba to armaturo odstraniti. Zato morajo biti drobilci opremljeni z magnetnim trakom, kateri po drobljenju armaturo izvrže. Treba pa je posvetiti večjo pozornost vhodnim surovinam. To pomeni, da morajo biti ruševine brez lesa, plastike, izolacije,.... , oz drugih nezaželenih snovi, saj jih je zelo težko odstraniti. Ta pomanjkljivost preprečuje bolj razširjeno uporabo recikliranih agregatov v proizvodnji betona.

## 2.2 Lastnosti agregata, pomembne za proizvodnjo betona

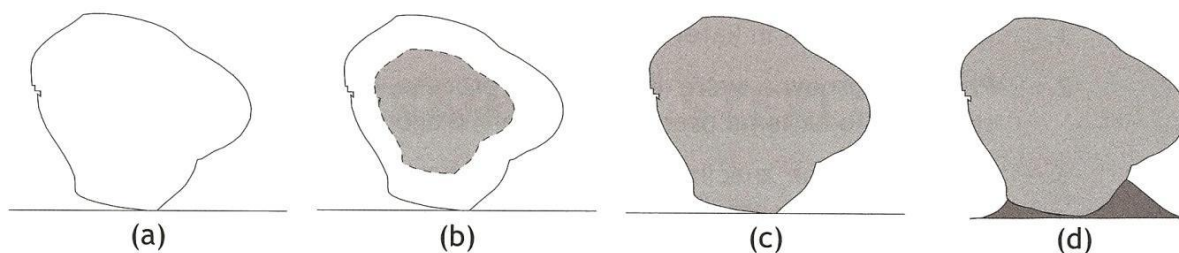
Za pripravo betonskih mešanic je izrednega pomena poznavanje lastnosti agregata. Lastnosti, ki so pomembne za proizvodnjo betona, so: poroznost, vodovpojnost, porazdelitev delcev oz. zrnastostna sestava, oblika in površinska tekstura, tlačna trdnost, modul elastičnosti in morebitna prisotnost škodljivih primesi. Mineralna sestava vpliva na tlačno trdnost samega agregata, njegovo odpornost proti obrabi, modul elastičnosti. Te lastnosti pa vplivajo na strjen beton.

### 2.2.1 Poroznost in vodovpojnost

Poroznost je zelo pomembna lastnost agregata. Stopnja poroznosti, velikost por ter njihova porazdelitev v agregatnih delcih, so lastnosti, katere vplivajo na tlačno trdnost agregata, odpornost proti obrabi, površinsko teksturo, specifično gostoto, sposobnost sprijemanja s cementno pasto in na odpornost proti zmrzovanju.

Agregati, bodisi naravni ali reciklirani, so do neke mere porozni. Poroznost je razmerje med prostornino por in celotno prostornino delca. Pore v agregatnih delcih so zaprte (notranje) pore in odprte pore (pore, v katere lahko prodre voda). Slednje nas zanimajo zaradi določanja razmerij v betonskih mešanicah.

Vodovpojnost je sposobnost delcev za vpijanje vode. Voda se v agregatnih delcih lahko nahaja v porah agregata, ali pa kot tanek film na površini delca. Količina te vode pa je odvisna od vremenskih pogojev, kot tudi lokacije zrn v kupu. Količina vode, katero bodo vpila zrna ali pa morebitna odvečna voda na površini zrn, vpliva na vodo-cementno razmerje. Pore v agregatnih delcih so lahko nasičene v različnih stopnjah. Če so vse oprte pore nasičene in na površini delcev ni vodnega filma, potem je agregat v t.i. nasičenem – površinsko suhem stanju (SSD). Če količina vode presega vodo potrebno za doseganje nasičenega – površinsko suhega stanja, imamo površinsko vlažen agregat.



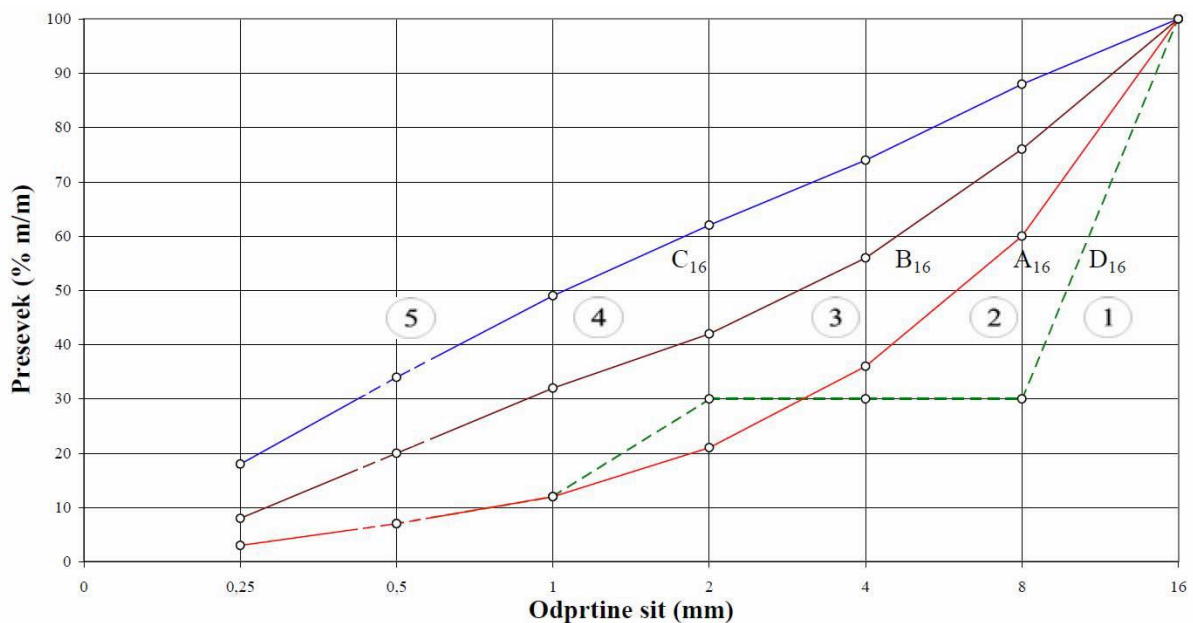
Slika 3: Stopnje vlažnosti agregata: a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vodo - površinsko suh, (d) površinsko vlažen. (vir: Žarnić, 2005)

### 2.2.2 Maksimalno zrno in zrnastostna sestava

Izbira zrnastostne sestave agregata in maksimalnega zrna ima zelo velik vpliv na obdelavnost in ceno betonske mešanice.

V splošnem velja, čim večje je maksimalno zrno agregata, tem manjša je skupna površina zrn agregata, katero mora oblitati cementna pasta. Ker je cement bistveno dražji od agregata, manjša količina cimente paste pomembno vpliva na ceno betona. Vendar pa po drugi strani zelo velika zrna vplivajo na poslabšanje vezi med zrnom in cementno pasto. Izbira maksimalnega zrna je odvisna tudi od prereza elementa ter razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami.

Zrnastostna sestava ima prav tako velik vpliv na potrebno količino cimente paste. Vpliva pa tudi na obdelavnost sveže betonske mešanice. Standard SIST EN 1026 podaja priporočene mejne krivulje zrnastosti, s pomočjo katerih določimo razmerja posameznih frakcij, da dosežemo čim gostejšo porazdelitev zrn.



Slika 4: Priporočene mejne krivulje za mešanico agregata 0/16 (vir: SIST EN 1026)

### 2.3 Cement

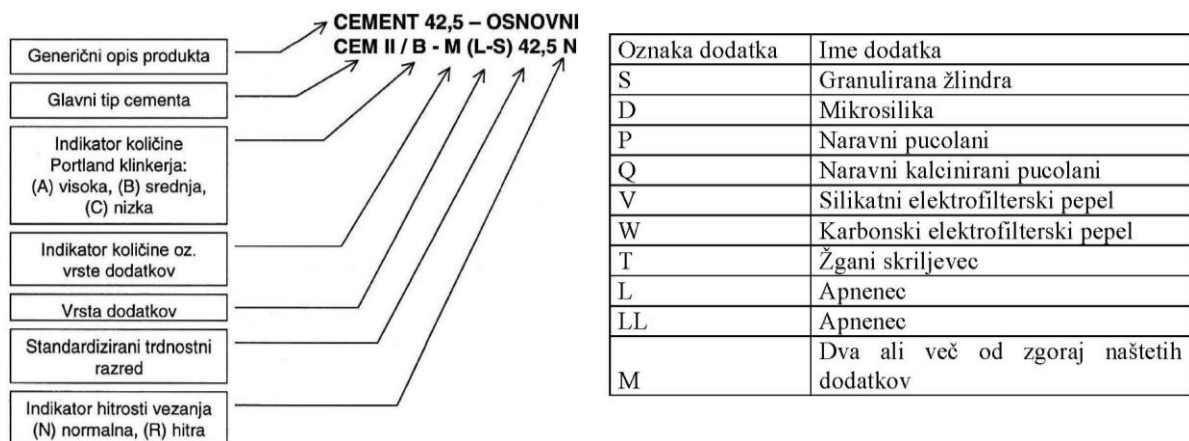
Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo (hidratacija) veže in se strdi. (Žarnič, 2005). Po končani reakciji nastane cementni kamen, ki je obstojen tudi v vodi in je sposoben prenašanja visokih tlačnih obremenitev.



Portland cement je najpogosteje uporabljan tip cementa za proizvodnjo betona. Postopek proizvodnje je v principu enostaven in temelji na uporabi surovin, ki v naravi so v izobilju. Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebujejo apnenec ( $\text{CaCO}_3$ ) in glina ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Osnovne surovine, ki so v določenem razmerju, se najprej zmelje v fin prah, surovinsko moko. Nato se surovinska mešanica žge v rotacijski peči pri temperaturah do  $1450^\circ\text{C}$ , nato pa se hitro ohladi. Tako nastali klinker se zmelje v fin prah, cement. Med mletjem se klinkerju lahko dodajajo dodatki, kot so žindra, elektrofilterski pepel in pucolani. S temi dodatki cementu izboljšamo njegove lastnosti, obenem pa lahko izboljšamo ekonomičnost cementa in zmanjšamo potrebo po naravnih virih.

glavna vrsta	ime cementa	oznaka
CEM I	Portlandski cement	CEM I
CEM II	Portlandski cement z dodatkom žindre	CEM II/A-S CEM II/B-S
	Portlandski cement z dodatkom mikrosilike	CEM II/A-D
	Portlandski cement z dodatkom pucolana	CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q
	Portlandski cement z dodatkom elektrofilterskega pepela	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W
	Portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca	CEM II/A-T CEM II/B-T
	Portlandski cement z dodatkom apnenca	CEM II/A-L CEM II/B-L CEM II/A-LL CEM II/B-LL
	Portlandski mešani cement	CEM II/A-M CEM II/B-M
CEM III	Žlindrin cement	CEM III/A CEM III/B CEM III/C
CEM IV	Pucolanski cement	CEM IV/A CEM IV/B
CEM V	Mešani cement	CEM V/A CEM V/B

Slika 5: Vrste in oznake cementov po SIST EN 197-1 (vir: Saje, 2015)



Slika 6: Oznake cementov po SIST EN 197-1 (vir: Saje, 2015)

## 2.4 Voda

Voda je bistvena sestavina betonske mešanice, saj omogoča proces hidratizacije. Voda za pripravo betonskih mešanic mora biti v skladu s standardom SIST EN 1008:2003. Ne sme vsebovati primesi, ki bi lahko negativno vplivale na proces hidratizacije. Čista pitna voda je primerna za pripravo betonskih mešanic brez predhodnih analiz. Za druge vire zamesne vode pa so potrebne predhodne analize. Z analizo vode za pripravo betonskih mešanic ugotavljamo morebitno prisotnost soli, olj in masti, kislin, ter škodljivih količin raznih organskih ter anorganskih delcev.

## 2.5 Dodatki v betonskih mešanicah

Dodatke za betone delimo na kemijske in mineralne. Z njihovo pomočjo dosegamo določene želene lastnosti, kot na primer boljšo ekonomičnost in lažjo vgradljivost.

### 2.5.1 Kemijski dodatki

Kemijske dodatke standard SIST EN 934-2 definira kot snovi, ki jih betonu dodamo v času mešanja, v količinah, ki so manjše kot 5% glede na maso cementa. S temi dodatki spremenimo lastnosti betona v svežem in strjenem stanju.

Najpogosteje se uporabljajo:

- plastifikatorji oz superplastifikatorji (izboljšujejo vgradljivost),
- aeranti (izboljšujejo odpornost na cikle zmrzovanja in tajanja),
- pospeševalci vezanja,
- zaviralci vezanja,

- antifrizi (betoniranje pri nizkih temperaturah),
- dodatki za zmanjšanje krčenja.

### **2.5.2 Mineralni dodatki**

Mineralni dodatki so fino mleti materiali, ki se lahko dodajajo betonskih mešanicam v relativno velikih količinah glede na maso cementa (nad 20%-). V svežih mešanicah izboljšujejo kohezivnost in odpornost na segregacijo.

Delimo jih na:

- Nepucolanske (kamena moka),
- Pucolanske ali hidravlične dodatke (Elektrofilterski pepel, Mikrosilika, Granulirana plavžna žlindra).

## **3 UPORABLJENE LABORATORIJSKE PREISKAVE**

### **3.1 Preiskave agregata**

#### **3.1.1 Določanje vsebnosti vlage s sušenjem v sušilniku**

Poznavanje vsebnosti vlage v agregatu je pomembno za določanje količine zamesne vode. Vsebnost vlage v agregatu določamo v skladu s standardom (SIST EN 1097-5). Z metodo sušenja agregata določimo vsebnost nevezane vode v vzorcu agregata. To je voda, ki je v porah agregatnih zrn in na površini agregata. Za določitev vsebnosti vlage potrebujemo:

- tehtnico
- izvor toplote, sušilnica, sposobna vzdrževanja temperature  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- posodo odporno na vročino

Najprej stehamo in zabeležimo maso vlažnega vzorca. Nato vzorec sušimo do konstantne mase. To pomeni, dokler razlika med dvema zaporednima tehtanjema ne znaša manj kot 0,1%. Končno zabeležimo maso suhega vzorca. Vsebnost vlage se določi iz razlike med maso mokrega in suhega vzorca in se podaja kot odstotek glede na suho maso vzorca.

Izračun vsebnosti vlage vzorca:

$$W_0 = \frac{M_w - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

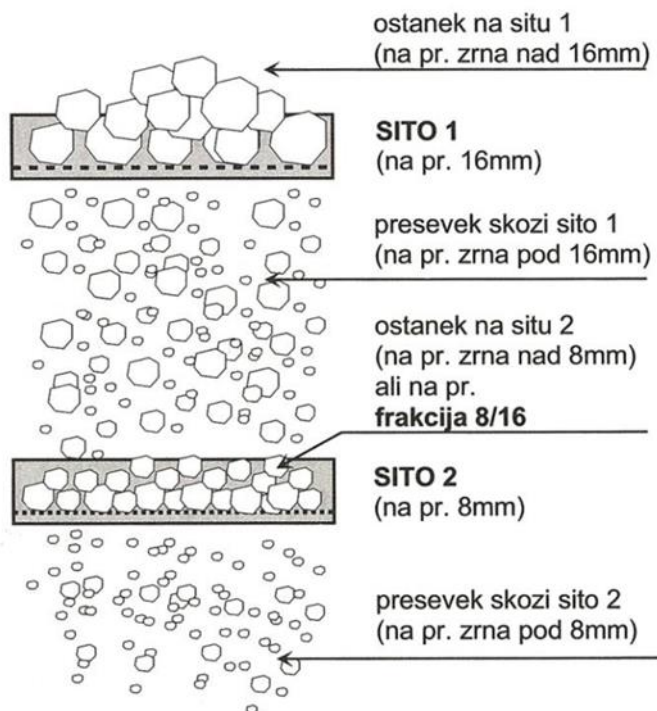
Kjer je:

$M_w$  – masa vlažnega vzorca v [kg]

$M_s$  – masa popolnoma suhega vzorca v [kg]

### 3.1.2 Sejalna analiza

Zrnovostno sestavo agregata določamo s pomočjo sejalne analize. Postopek analize podaja standard SIST EN 933-1. Pri tej preiskavi skozi standardna sita presejemo vzorec materiala. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtiniami 31,5, 16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 mm. Presevek imenujemo tisto količino agregata, ki pade skozi sito z odprtiniami določenega premera. Ostanek na situ je količina agregata, ki ostane na situ z odprtiniami določenega premera. Frakcija je količina agregata, ki pade skozi sito določenega premera odprtini in ostane na situ z manjšim premerom odprtini od predhodnega (Žarnič, 2005). Rezultat sejalne analize je zrnovostna krivulja. Dobimo jo tako, da na ordinatno os vnesemo presevke skozi sito v odstotkih. Na abscisno os pa v logaritemskem merilu velikost posameznih sit.



Slika 7: Prikaz pojmov pri sejalni analizi (vir: Žarnič, 2005)



Slika 8: Standardna sita



Slika 9: Ostanek agregatnih zrn na situ

### 3.1.3 Določanje prostorninske mase zrn in vpijanje vode (SIST EN 1097-6)

Za določanje prostorninske mase sem uporabil metodo s piknometrom. Ta metoda je uporabna za zrna med 4 mm in 31,5 mm. Najprej je treba določiti najmanjšo maso vzorca, ki je odvisna od največjega zrna agregata D. Za D=31,5 mm znaša 5 kg, 2 kg za D=16 mm in 1 kg za D=8 mm

Stehtamo potrebno maso vzorca in jo vsujemo v piknometar. Nato dodamo vodo temperature  $22 \pm 3^\circ\text{C}$  in odstranimo zrak s stresanjem in obračanjem piknometra. Voda mora segati do oznake na vratu piknometra. Tako pripravljen vzorec pustimo  $24 \pm 0,5$  h na konstantni temperaturi  $22 \pm 3^\circ\text{C}$ . Po preteku predpisanega časa ponovno odstranimo morebiten zajet zrak in dodamo vodo do oznake na piknometru. Izmerimo maso piknometra z vzorcem in vodo (M2), ter izmerimo ter zabeležimo temperaturo vode v piknometru. Agregat iz piknometra vsujemo v ustrezno posodo, ki omogoča odcejanje vode s površine zrn. Piknometar napolnimo z vodo do oznake in izmerimo maso piknometra z vodo (M3), ter zabeležimo temperaturo vode v piknometru. Razlika med temperaturama vode v piknometru pri določanju mas (M2) in (M3) ne sme biti večja od  $2^\circ\text{C}$ . Odcejen agregat vsujemo na suho krpo ter z brisanjem zrn poskušamo odstraniti večino površinske vode. Potem ga premestimo na drugo suho krpo in pustimo, da se suši pri pogojih okolja, dokler viden sloj vode v celoti ni odstranjen z agregatnih zrn. Tako dobimo agregat v notranje zasičenem površinsko suhem stanju, kar zabeležimo kot (M1). Agregat premestimo v pladenj in ga sušimo v sušilnici pri temperaturi  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  do konstantne mase, ki jo označimo z (M4).

Prostorninske mase agregatnih zrn izračunamo po naslednjih enačbah:

Navidezna prostorninska masa zrn

$$\rho_a = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (2)$$

Prostorninska masa zrn v sušilnici sušenega agregata

$$\rho_{rd} = \rho_w \times \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (3)$$

Prostorninska masa zrn v z vodo zasičenem površinsko suhem stanju

$$\rho_{ssd} = \rho_w \times \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (4)$$

Koeficient vpivanja vode

$$WA_{24} = 100 \times \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5)$$

Kjer so:

$M_1$  - masa z vodo nasičenega, površinsko suhega vzorca v [g]

$M_2$  - masa piknometra, z vodo nasičenega agregata in vode do oznake na piknometru v [g]

$M_3$  - masa piknometra, napolnjenega z vodo do oznake na piknometru v [g]

$M_4$  - masa suhega vzorca v [g]

$\rho_w$  - gostota vode v [g/cm<sup>3</sup>]



Slika 10: Piknometar z vzorcem recikliranega agregata



Slika 11: Ocejanje agregata



Slika 12: Agregat v zasičenem površinsko suhem stanju

## 3.2 Preiskave sveže betonske mešanice

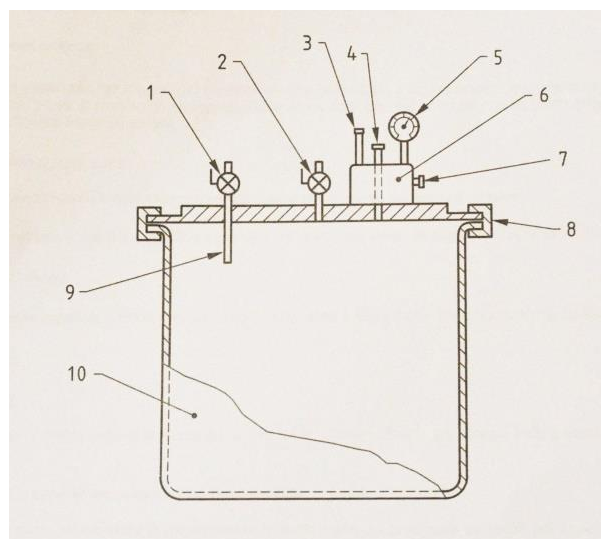
### 3.2.1 Določanje vsebnosti zraka v sveži betonski mešanici (SIST EN 12350-7)

Za določitev deleža zraka v svežih betonskih mešanicih se uporablja t.i. porozimeter, po metodi ki jo opisuje standard SIST EN 12350-7. Vzorec se odvzame v skladu z določili SIST EN 12350-1. Pred preizkušanjem vzorec premešamo.

Osnovno posodo porozimetra napolnimo z vzorcem sveže betonske mešanice. Odvisno od konsistence mešanice in uporabljene metode zgoščevanja, polnimo posodo v enem ali več slojih, da dosežemo popolno zgoščenost. V primeru samozgoščevalnega betona polnimo v enem sloju brez mehanskega zgoščevanja. Po polnjenju in zgoščevanju odstranimo odvečni beton, površino pa zgladimo z zidarsko žlico. Nalegajoče površine osnovne posode in pokrova temeljito očistimo. Na osnovno posodo namestimo pokrov, pri tem smo pozorni na zadostno tesnenje. Skozi odprtino A ali B vlijemo vodo, dokler voda ne pride skozi drugo odprtino. Posodo nežno udarjamo s primernim kladivom, da se izloči ujet zrak in zapremo ventila. Z pomočjo črpalke vnesemo toliko zraka, da kazalec na manometru kaže na ničlo. V primeru, da je pritisk večji, odvečni zrak izpustimo s pomočjo odzračevalnega ventila. Po nekaj sekundnem izravnavanju tlaka odpremo glavni zračni ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Porozimetrijski indeks predstavlja delež zraka, izražen v odstotku glede na celotno prostornino betonske mešanice v posodi.



Slika 13: Porozimeter



Slika 14: Tehnična skica porozimetra

### 3.2.2 Preizkus s posedom (SIST EN 12350-2)

Določanje konsistence svežega betona s posedom se izvaja v skladu s slovenskim standardom SIST EN 12350-2. S preizkusom merimo razliko v višini vzorca svežega betona, ki ga na predpisan način vgradimo in zgostimo v kalupu v obliki prisekanega stožca, pred in potem, ko kalup odstranimo. Mera za konsistenco betona je torej višina poseda vzorca svežega betona po odstranitvi kalupa.

Preizkus s posedom se priporoča za določitev konsistence svežih betonov za posede med 10 mm in 210 mm. Izven teh skrajnih vrednosti je merjenje poseda lahko neprimerno, zato se za določitev konsistence uporabijo druge metode.

Za preizkus potrebujemo kalup, lijak, zgoščevalno palico, merilo, osnovno ploščo ter zidarsko žlico. Specifikacije zanje so predpisane v standardu. Vzorec odvezamo v skladu z določili SIST EN 12350-1. Površine pribora navlažimo z vlažno krpo. Kalup postavimo na vodoravno osnovno ploščo ter ga med polnjenjem pritisnemo k osnovni plošči tako, da stojimo na pločevinastih ušesih kalupa. Kalup polnimo v treh slojih in vsak sloj zgostimo s 25 udarci zgoščevalne palice. Ko je vrhnji sloj zgoščen, površino betona izravnamo, da sega do vrhnjega roba kalupa. Nato očistimo beton, raztresen po osnovni plošči in v nadaljevanju odstranimo kalup tako, da ga pazljivo dvignemo. Takoj po odstranitvi kalupa izmerimo in zabeležimo posed ( $h$ ). Posed predstavlja razlika med višino kalupa in višino najvišje točke posedanega preizkušanca. Celoten postopek mora potekati brez prekinitev in ne sme trajati več kot 150 s.

Klasifikacija poseda po standardu SIST EN 206 je prikazana v Tabeli 1. Sliki 1 in 2 pa prikazujeta primer različnih razredov poseda.

Tabela 1: Razredi poseda po standardu SIST EN 206

Razred	posed [mm]
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	$\geq 220$





Slika 15: Primer poseda razreda S2



Slika 16: Primer poseda razreda S4

### 3.2.3 Določanje prostorninske mase svežega betona (SIST EN 12350-6)

Prostorninska masa sveže betonske mešanice je pokazatelj mnogih lastnosti strjenega betona. Betoni primerljive sestave, ki imajo večjo prostorninsko maso v svežem stanju, so bolj kompaktni in imajo praviloma po strditvi tudi boljše mehanske lastnosti. (Žarnič, Bosiljkov, Bokan – Bosiljkov, 2004)

Za določanje prostorninske mase potrebujemo posodo (običajno kalup za izdelavo preizkušancev ali posoda porozimetra za beton), tehtnico (z natančnostjo 0,01kg), zidarsko žlico, pripomoček za zgoščevanje. Posoda mora biti dovolj toga, da ohrani obliko, mora imeti gladke notranje površine in prostornino vsaj 5 litrov. Vzorec se odvzame v skladu z določili SIST EN 12350-1. Posodo za določanje prostorninske mase napolnimo z vzorcem sveže betonske mešanice. Odvisno od konsistence mešanice in uporabljene metode zgoščevanja polnimo posodo v enem ali več slojih, da dosežemo popolno zgoščenost. V primeru samozgoščevalnega betona polnimo v enem sloju brez mehanskega zgoščevanja. Odvečni beton odstranimo z zidarsko žlico, ter površino zagladimo. Posodo z vzorcem z zunanje strani dobro očistimo in stehtamo. Prostorninsko maso izračunamo po spodnji enačbi (6) in rezultat zaokrožimo na najbližjih 10 kg/m<sup>3</sup>.

Izračun prostorninske mase svežega betona:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (6)$$

Kjer je:

$D$  – gostota svežega betona v  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$m_1$  – masa praznega kalupa v  $[\text{kg}]$

$m_2$  – masa kalupa zapolnjenega z zgoščenim betonom v  $[\text{kg}]$

$V$  – prostornina kalupa, v  $[\text{m}^3]$

### 3.3 Preizkusi na strjenih vzorcih

#### 3.3.1 Določanje tlačne trdnosti

Tlačno trdnost definiramo kot največjo napetost pri osni tlačni obremenitvi. Določamo jo v skladu s standardom SIST EN 12390-3. Pri preizkusu merimo največjo silo, ki jo prenese preizkušaneč tik pred poružitvijo. Postopek preizkusa povzemam v nadaljevanju.

Naležne površine stiskalnice najprej očistimo in preizkušaneč postavimo na sredino spodnje naležne ploskve. Preizkušaneč mora biti suh in obrnjen, tako, da je smer obremenjevanja pravokotna na smer vgrajevanja. Ko je preizkušaneč primerno nameščen, začnemo enakomerno obremenjevanje. Hitrost obremenjevanja mora znašati  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s. Začetna obremenitev ne sme presežati približno 30 % predvidene tlačne trdnosti. Obremenjevanje ne sme biti sunkovito ter ne sme odstopati za več kot  $\pm 10\%$  izbrane hitrosti obremenjevanja. Ob poružitvi zabeležimo maksimalno silo v kN in preverimo, ali je bila poružitev pravilna. Ob nepravilni poružitvi zabeležimo številko tipa poružitve, kateri je poružitev najbolj podobna. Tlačno trdnost zaokrožimo na 0,1 MPa.

Izračun tlačne trdnosti:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (7)$$

Kjer je:

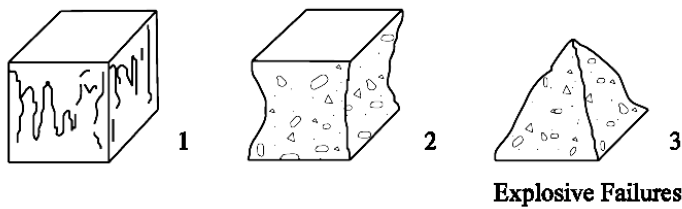
$f_c$  - tlačna trdnost v  $[\text{MPa} (\text{N}/\text{mm}^2)]$

$F$  – porušna sila v  $[\text{N}]$

$A_c$  – površina prereza preizkušanca na katerega deluje tlačna sila v  $[\text{mm}^2]$

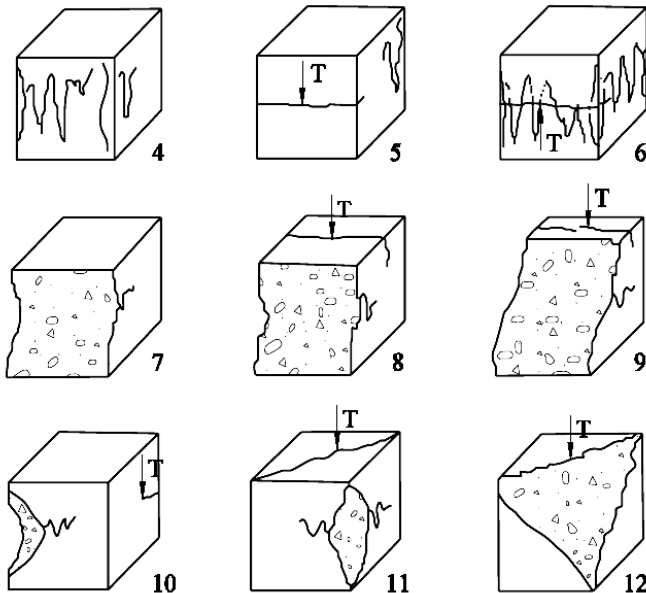


Slika 17: Primer stiskalnice za določanje tlačne trdnosti



**Note.** All four exposed faces are cracked approximately equally, generally with little damage to faces in contact with the platens.

#### Satisfactory Failures



**Note.** T = tensile crack

#### Unsatisfactory Failures

Slika 18: Tipi porušitve preizkušanca po SIST EN 12390-3

## 4 METODE IN MATERIALI

Raziskovalno delo sem pričel z vključitvijo v začetno eksperimentalno fazo projekta COST TU1404. Končni cilj tega projekta so nove smernice za podaljšanje življenjske dobe betonskih konstrukcij in njihove uporabnosti. Namreč, navkljub napredku pri poznavanju lastnosti betona, se za načrtovanje življenjske dobe armiranobetonskih konstrukcij uporablja omejeno število karakteristik, ki se določajo praviloma pri starosti 28 dni, poleg tega pa obstajajo tudi relativno ostre omejitve glede sestave betona.

V okviru COST TU1404 sem opravil preiskave na referenčni mešanici, z materiali, ki smo jih na Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij prejeli od organizatorja medlaboratorijske preiskave. Namen te faze projekta je bil, da se preveri ali se v različnih laboratorijih z enakimi materiali in upoštevanjem enakih postopkov ter pogojev okolja dobi dovolj podobne rezultate.

### 4.1 Mešanica iz naravnega materiala

Predpisana je bila referenčna mešanica t.i. »Ordinary concrete mixture« v nadaljevanju OC. Ta referenčna mešanica temelji na mešanici, ki je bila uporabljena v sklopu projekta Vercors. Gre za eksperimentalno konstrukcijo zadrževalnega hrama nukleranega reaktorja v merilu 1:3, ki so ga pred kratkim zgradili v Renarers-u v bližini Pariza.

Gre za klasično betonsko mešanico z učinkovitim vodo-cementnim razmerjem 0,52, katere sestava je prikazana v tabeli 2.

Tabela 2: Receptura za betonsko mešanico OC  
(vir: RRT<sup>+</sup> programme for TU1404 Instructions for participation, 2015)

Basic Material	Type of the material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Amount [kg/m <sup>3</sup> ]
Cement	CEM I 52,5 N CE CP2 NF Gaurain	3.17	320
Sand	0-4 mm, REC GSM LGP1 (13 % of CaO and 72 % of SiO <sub>2</sub> )	2.58	830
Gravel	4-11mm, R GSM LGP1 (rounded, containing silicate and limestone)	2.53	445
	8-16 mm, R Balloy (rounded, containing silicate and limestone)	2.58	550
Admixtures	Plasticizer SIKAPLAST Techno 80 (water content 80%)	1.06	2.4
Added water*	Water that needs to be added in the mixer	1.00	170.9
$w_{eff}/C$			0.52

\* Added water = Effective water (obtained from  $w_{eff}/c$  ratio) – 0.8\*amount of the Sp (80% of Sp mass is water) + water theoretically absorbed by the sand (0.77% as coefficient of absorption)

#### 4.1.1 Naravni agregat

Naravni agregati, uporabljeni pri eksperimentalnem delu, so bili dobavljeni iz Francije v sklopu projekta COST TU1404. Zrna frakcij so bila zaobljena, kar nakazuje na aluvialni izvor. Pripeljani so bili v posebnih silosih v frakcijah 0/4 mm, 4/11 mm, in 8/16 mm. Ti agregati so bili že na pogled precej porozni in imajo relativno visok koeficient vpijanja vode  $WA_{24}$ , kar lahko bistveno vpliva na vodo-cementno razmerje. V Sloveniji tako visokih vodovpojnosti naravnih agregatov nismo vajeni, saj imajo naravni agregati pri nas koeficient  $WA_{24}$  praviloma pod 1%. Zaradi te lastnosti so organizatorji predpisali postopek predpriprave posameznih frakcij, ki bi omogočal čim bolj konstantne rezultate. Za grobe frakcije (4/11 in 8/16) je bilo potrebno popolno nasičenje z vodo, medtem, ko je morala biti fina frakcija popolnoma suha.

Tabela 3: Koeficient vpijanja vode ( $WA_{24}$ ) naravnega agregata  
(vir: RRT<sup>+</sup> programme for TU1404 Instructions for participation, 2015)

Aggregates	Absorption coefficient $WA_{24}$
Coarse aggregate 8/16 R Balloy	2.25
Coarse aggregate 4/11 R GSM LGP1	2.61
Sand 0/4 REC GSM LGP1	0.77



Slika 19: Naravni agregat frakcije 8/16 uporabljen v sklopu projekta COST TU1404

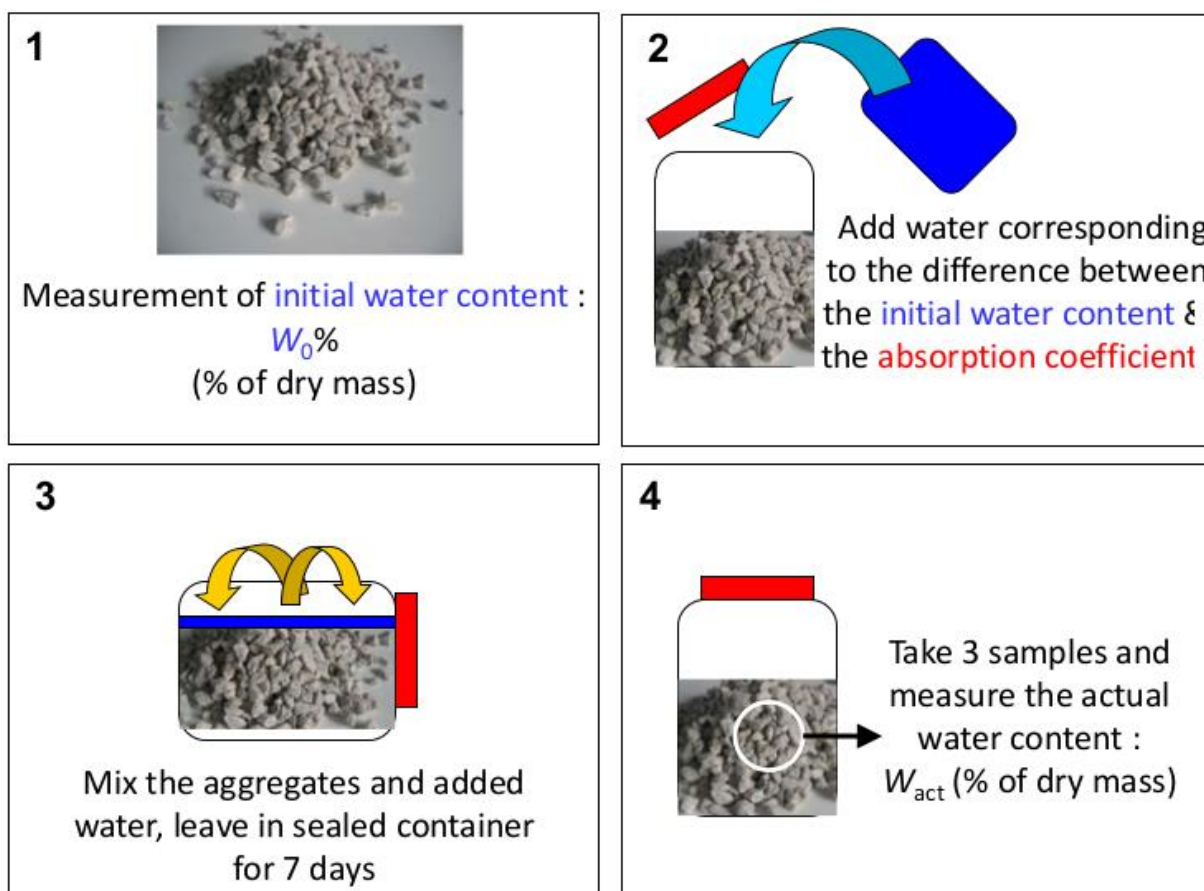
#### 4.1.1.1 Predpriprava grobega naravnega agregata

Izračunal sem potrebno količino grobih frakcij (4/11 in 8/16) za mešanico OC. To izračunano količino sem povečal za cca 20 %, zaradi odvzema vzorcev za preiskave vlažnosti. Vsako frakcijo sem vsul v svoje vedro. Nato sem za vsako frakcijo vzel po tri vzorce, na katerih sem določil vlažnost  $W_0$ . Vlažnost sem določal s pomočjo mikrovalovne pečice, v kateri sem pri 650W sušil vzorce, ter jih vsake tri minute stehal, dokler nisem dobil konstantne mase.

Ko sem določil vlažnost agregata  $W_0$ , sem za posamezno frakcijo izračunal količino vode  $M_w$ , potrebno za popolno zasičenje agregatnih zrn. Izračunane količine vode sem dodal v vedra s posameznimi frakcijami in vedra zatesnil s pokrovom. Nato sem vedra stresal, da se je voda čim bolje porazdelila po agregatnih zrnih, kar je omogočalo čim boljše vpijanje. Zaprte posode sem 7 dni hranil v laboratoriju pri konstantni temperaturi  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$



Slika 20: Agregat v z vodo zasičenem površinsko vlažnem stanju



Slika 21: Navodila za predpripravo grobega agregata  
(vir: RRT<sup>+</sup> programme for TU1404 Instructions for participation, 2015)

#### 4.1.1.2 Predpriprava finega naravnega agregata

Priprava popolnoma zasičenega površinsko suhega peska (0/4 mm) ni ravno enostavna. Ker bi lahko pesek vseboval večjo količino presežne vode, je organizator predpisal, da je treba uporabiti popolnoma suh pesek.

Izračunano količino peska, povečano za cca 20 %, sem posušil v prezračevanem sušilniku. Pesek se je sušil približno 24 ur pri predpisani temperaturi 60 °C. Ko se je shladil na sobno temperaturo, sem ga shranil v vedro, ki sem ga zatesnil s pokrovom.

#### 4.1.2 Postopek mešanja betonske mešanice

Tudi postopek mešanja je bil predpisan, da bi bila mogoča čim boljše ponovljivost rezultatov. Mešanje je bilo potrebno izvajati pri temperaturi 20 °C ± 2 °C, relativni vlažnosti RH ≥ 60 %. Morebitno

nedoseganje ambientnih pogojev je bilo treba zabeležiti. Opisani postopek mešanja sem uporabil pri obeh vrstah betonskih mešanic.

Postopek samega mešanja temelji na postopku standarda EN 480-1, ki je opisan v nadaljevanju:

- Notranjost mešalca je treba obrisati z vlažno krpo.
- V mešalec najprej vsujemo grobe frakcije, zatem pa še pesek.
- Mešamo inertne materiale 30 sekund.
- V mešalec vsujemo cement ter mešamo 30 sekund.
- V naslednjih 30 sekundah v mešalec vlijemo vodo s superplastifikatorjem.
- Mešamo 1 minuto. Ustavimo mešalec in postrgamo morebiten material z lopatic in sten mešalca. Nato mešamo še 1 minuto, po tem pa mešalec ustavimo. To naj bi bil konec postopka mešanja
- Če mešanica ne izgleda homogena, je potrebno nadaljevati s postopkom mešanja, dokler ne dosežemo želene homogenosti. Dodaten čas mešanja je treba zabeležiti



Slika 22: Mešalec v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju UL FGG



### 4.1.3 Preizkusi na sveži betonski mešanici

Takoj po koncu mešanja smo preizkušali naslednje lastnosti sveže mešanice:

- Konsistenco – z uporabo standardne metode s posedom po navodilih standarda EN 12350-2
- Vsebnost zraka – z uporabo ene od metod, opisanih v standardu EN 12350-7
- Gostoto – z uporabo metode opisane v standardu EN 12350-6

Vsakega od zgoraj navedenih preizkusov je bilo treba izvesti na treh vzorcih posamezne mešanice, v najkrajšem možnem času. Prav tako je bilo treba zabeležiti temperaturo betonske mešanice ter posneti fotografijo mešanice takoj po mešanju.

## 4.2 Reciklirani agregat

Betonski drobljenec je material pridobljen z drobljenjem betonskih ruševin. Material, ki sem ga uporabil v diplomskem delu, izvira iz ruševin, ki so nastala pri rušitvenih delih na centralni čistilni napravi v Domžalah (C.Č.N. Domžale). V sklopu nadgradnje C.Č.N. Domžale – Kamnik je bilo potrebno porušiti del obstoječih bazenov. Rušenje se je vršilo z uporabo bagrov s hidravličnimi kleščami in hidravličnimi kladivi. Poudaril bi, da je bil uporabljen selektivni način rušenja. To pomeni, da se med samim rušenjem ločuje različne masne tokove odpadkov. To pa zagotavlja višjo kakovost recikliranih materialov. Betonske ruševine so bile nato transportirane na deponijo gradbenih odpadkov. Tam se je izvršila nadaljnja redukcija betonskih kosov, da so bili primerne velikosti za obdelavo v drobilcu. V procesu drobljenja magnetni trak odstrani armaturo in končni rezultat je betonski drobljenec frakcije 0-100 mm. Tako pridobljeni material se navadno uporablja za razne nasipe.



Slika 23: Rušenje bazenov CČN Domžale – Kamnik (vir:CČN Domžale-Kamnik)



Slika 24: Hidravlične klešče za rušenje betona (vir:CČN Domžale-Kamnik)



Slika 25: Ruševine bazenov (vir:C ČN Domž ale-Kamnik)



Slika 26: Ločevanje betonskih ruševin in armature (vir:CČN Domžale-Kamnik)



Slika 27: Nakladanje ruševin na kamione in odvoz v drobljenje (vir:CČN Domžale-Kamnik)



Slika 28:Drobljenje betonskih ruševin z drobilcem

#### 4.2.1 Odvzem vzorca in določitev prostorninske mase zrn

Vzorec sem odvzel na lokaciji deponije podjetja Šuštar Trans d.o.o, iz kupa betonskega drobljenca, v katerem je bilo tedaj cca 7000 m<sup>3</sup> materiala. Vzorec sem odvzel na način, ki ga opisuje standard SIST EN 932-1. V skladu s tem standardom sem najprej iz kupa z nakladačem odvzel cca 3 m<sup>3</sup> materiala, katerega sem s strojem razgrnil, da sem dobil reprezentativen osnovni vzorec. Nato sem z lopato nabral dele vzorca po posameznih četrtinah.

Material sem pripeljal v Konstrukcijsko-prometni laboratorij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL. Da bi pridobil frakcije, potrebne za betonsko mešanico, sem najprej ročno odstranil zrna večja od cca 40 mm. Nato pa sem preostanek posušil v prezračevanem sušilniku pri temperaturi 110 °C. S tem

sem dobil popolnoma suh agregat, katerega zrna se niso sprijemala med seboj. Agregat sem presejal na frakcije 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm s pomočjo sit za sejnalno analizo. Grobe frakcije 4/8 mm in 8/16 mm sem opral z vodo, da sem odstranil morebitne nezaželene primesi (les, polistiren).

Na tako pripravljenih frakcijah sem s pomočjo metode s piknometrom določil prostorninske mase zrn. Prostorninske mase zrn in vpijanje vode sem določal na po 2 vzorcih za posamezno frakcijo. Povprečne vrednosti preiskave so podane v Tabeli 4. Ugotovil sem, da je prostorninska masa zrn v z vodo zasičenem površinsko suhem stanju ( $\rho_{ssd}$ ) zelo podobna, kot pri frakcijah naravnega agregata iz Francije. Le koeficient vpijanja vode ( $WA_{24}$ ) je bil višji za cca 1 %.



Slika 29: Strojni odvzem reprezentativnega vzorca agregata



Slika 30: Odstranjevanje nezaželenih primesi (les, polistiren)

Tabela 4: Prostorninske mase zrn recikliranega agregata in koeficient vpijanja vode

Frakcija	$\rho_a$	$\rho_{rd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{ssd}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$WA_{24}$ [%]
4/8	2,67	2,42	2,51	3,8

### 4.3 Določanje receptur betonskih mešanic

Kot osnovo za določitev sestave mešanic z deleži recikliranega agregata, sem vzel referenčno mešanico OC. To recepturo sem prilagodil za posamezno stopnjo nadomestitve naravnega z recikliranim agregatom. Pri tem sem upošteval lastnosti recikliranega agregata. Prvotno sem se odločil nadomestiti le grobe frakcije, saj uporabo fine frakcije 0/4 mm standard SIST EN 206 ne dopušča. Kljub temu sem za primerjavo zamešal tudi mešanico s 100% frakcije 0/4 mm iz recikliranega agregata. Potrebno količino recikliranega agregata v kg sem določil tako, da sem izračunal prostornino agregata, ki jo v mešanici OC zaseda posamezna frakcija naravnega agregata, ter dobljeno prostornino pomnožil z prostorninsko maso zrn izbrane reciklirane frakcije v z vodo nasičenem površinsko suhem stanju. Pred mešanjem sem še enkrat preveril vlažnost agregata, kar sem upošteval pri določanju količine zamesne vode.

#### 4.3.1 Mešanica s 30 % reciklirane grobe frakcije (30%\_RCA)

Pri tej mešanici sem nadomestil 30 % naravne grobe frakcije z recikliranim agregatom. To pomeni, da je mešanico sestavljalo 70 % naravnih grobih frakcij 4/11 mm in 8/16 mm, ter 30 % recikliranih grobih frakcij 4/8 mm in 8/16 mm. Vse grobe frakcije agregata so bile 7 dni pred mešanjem v popolnoma z vodo nasičenem površinsko suhem stanju. Kot osnovo za pripravo recepture sem vzel mešanico OC, v kateri sem nadomestil 30 % naravnega agregata z recikliranim.

Tabela 5: Receptura za betonsko mešanico 30%\_RCA

Material	Prostorninska masa zrn [kg/ m <sup>3</sup> ]	Količina [kg/m <sup>3</sup> ]	Za 30 l
Cement	3,17	320,00	9,60
NA 0/4	2,58	830,00	24,90
NA 4/11	2,53	311,33	9,34
RCA 4/8	2,51	132,33	3,97
NA 8/16	2,58	385,00	11,55
RCA 8/16	2,56	163,67	4,91
Superplastifikator	1,06	2,40	0,072
voda	1,0	170,90	5,12
$v_{eff}/c$		0,52	

### 4.3.2 Mešanica s 50 % reciklirane grobe frakcije (50%\_RCA)

Pri tej mešanici sem nadomestil 50 % naravne grobe frakcije z recikliranim agregatom. To pomeni, da je mešanico sestavljalo 50 % naravnih grobih frakcij 4/11 mm in 8/16 mm, ter 50 % recikliranih grobih frakcij 4/8 mm in 8/16 mm. Vse grobe frakcije agregata so bile 7 dni pred mešanjem v popolnoma

z vodo nasičenem površinsko suhem stanju. Kot osnovo za recepturo sem vzel mešanico OC, v kateri sem nadomestil 50 % naravnega agregata z recikliranim.

Tabela 6: Receptura za betonsko mešanico 50%\_RCA

Material	Prostorninska masa zrn [kg/ m <sup>3</sup> ]	Količina [kg/m <sup>3</sup> ]	Za 30 l
Cement	3,17	320,00	9,60
NA 0/4	2,58	830,00	24,90
NA 4/11	2,53	222,33	6,67
RCA 4/8	2,51	220,67	6,62
NA 8/16	2,58	275	8,25
RCA 8/16	2,56	272,66	8,18
Superplastifikator	1,06	2,40	0,072
Voda	1,0	170,90	5,127
$v_{eff}/c$		0,52	

### 4.3.3 Mešanica s 100 % reciklirane grobe frakcije (100%\_RCA)

Pri tej mešanici sem nadomestil ves grobi naravni agregat z recikliranim. Tako je bil edina naravna frakcija pesek 0/4 mm. Sama mešanica ima nekoliko nižji  $v/c$  razmerje, saj se mi je pri mešanju zgodila napaka. Namreč, upošteval sem mešanico iz starejše verzije navodil (RRT instructions for participation v1) namesto zadnje verzije (RRT instructions for participation v3). Tudi tu so bile grobe frakcije agregata 7 dni pred mešanjem v popolnoma z vodo zasičenem stanju.

Tabela 7: Receptura za betonsko mešanico 100%\_RCA

Material	Prostrninska masa zrn [kg/ m <sup>3</sup> ]	Količina [kg/m <sup>3</sup> ]	Za 30 l
Cement	3,17	320,00	9,60

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje tabele 7.

NA 0/4	2,58	837,00	24,90
NA 4/11	2,53	0	0
RCA 4/8	2,51	220,67	13,24
NA 8/16	2,58	0	0
RCA 8/16	2,56	272,66	16,37
Superplastifikator	1,06	2,40	0,072
Voda	1,0	165,5	5,127
$v_{eff}/c$		0,50	

#### 4.3.4 Mešanica s 100 % reciklirane fine frakcije (100%\_RCA\_0/4 mm)

Pri tej mešanici sem nadomestil ves fini naravni agregat z recikliranim agregatom. Pri določanju recepture nisem poznal prostorninske mase zrn finega recikliranega agregata. Mešanice s to vrsto agregata nisem imel namena obravnavati v diplomskem delu. Ta frakcija se ne uporablja za konstrukcijske betone, saj so njene lastnosti nepredvidljive. Tako nisem opravljal raziskav za določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode. Mešanico sem zamešal po istem receptu, kot mešanico OC le, da sem zamenjal fini agregat z recikliranim. Vse grobe frakcije agregata so bile 7 dni pred mešanjem v popolnoma z vodo nasičenem stanju.

Tabela 8: receptura za betonsko mešanico 100%\_RCA\_0/4 mm

Material	Prostorninska masa zrn [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Količina [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Za 30 l
Cement	3,17	320,00	9,60
NA 0/4	2,58	0	0
RCA 0/4	?	830	24,9
NA 4/11	2,53	445	13,65
RCA 4/8	2,51	0	0
NA 8/16	2,58	550	16,5
RCA 8/16	2,56	0	0
Superplastifikator	1,06	2,40	0,072
Voda	1,0	170,90	5,127
$v_{eff}/c$		0,52	

## 5 REZULTATI IN DISKUSIJA

### 5.1 Rezultati v sklopu projekta COST TU1404

V prvem sklopu eksperimentalnega dela sem izvedel predpisane preizkuse na referenčni mešanici OC. Enake preizkuse, z enakimi materiali ter po prej opisanih postopkih je izvedlo še 34 laboratorijev iz 17 evropskih držav. Tako sem dobil zelo dobro referenčno mešanico, s katero sem lahko primerjal dobljene rezultate na mešanicah z deleži recikliranega agregata.

#### 5.1.1 Preizkusi na sveži mešanici OC

##### 5.1.1.1 Določanje konsistence po metodi s posedom

Posed mešanice OC sem določil po metodi, ki je opisana v standardu SIST EN12350-2. Posed je bilo potrebno izmeriti na treh vzorcih, vendar sem zaradi zelo podobnih rezultatov preizkus opravil le na dveh vzorcih. Rezultati meritve konsistence so podani v Tabeli 9. V Tabeli 10 je podana statistična analiza rezultatov preizkusa s posedom, katere je posredovalo 33 laboratorijev, sodelujočih v začetni fazi programa COST TU1404. Na grafikonu 9 je prikazan raztros rezultatov preizkusa sodelujočih laboratorijev. Id (identifikacijska številka) laboratorija FGG predstavlja št.35. Iz rezultatov je razvidno, da je posed mešanice OC zelo blizu povprečju in je v območju znotraj standardne deviacije.

Tabela 9: Rezultati poseda mešanice OC

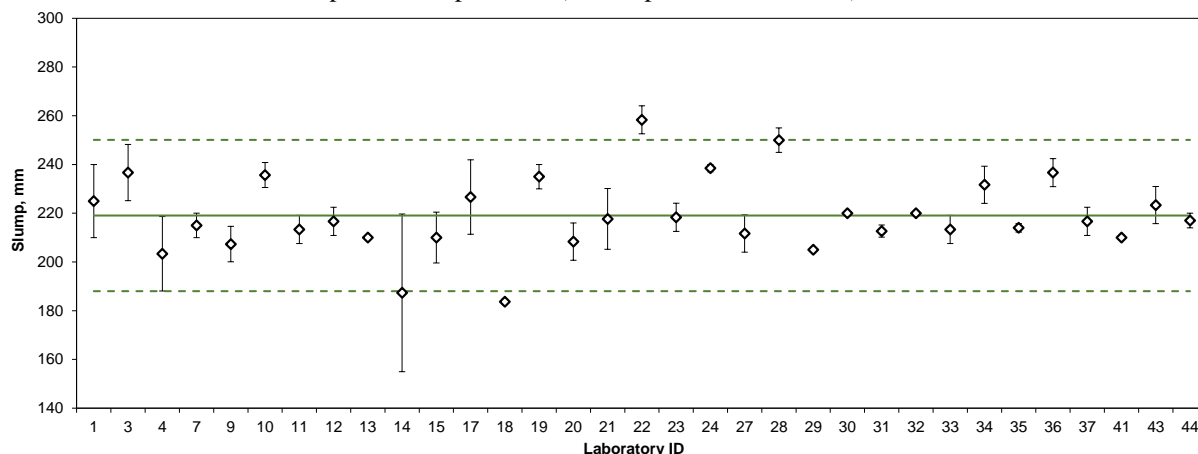
Serijska	Posed [mm]	Razred konsistence
Vzorec 1	212	S4
Vzorec 2	215	S4
<b>Povprečna vrednost</b>	<b>213,5</b>	

Tabela 10: Statistika poseda mešanice OC (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

Število opazovanj	Minimum	Maksimum	Povprečje	Standardna deviacija
33	183	258	219	15,5



Grafikon 1: Raztros rezultatov preizkusa s posedom (Vir: <http://www.tu1404.eu>)



### 5.1.1.2 Vsebnost zraka v sveži betonski mešanici

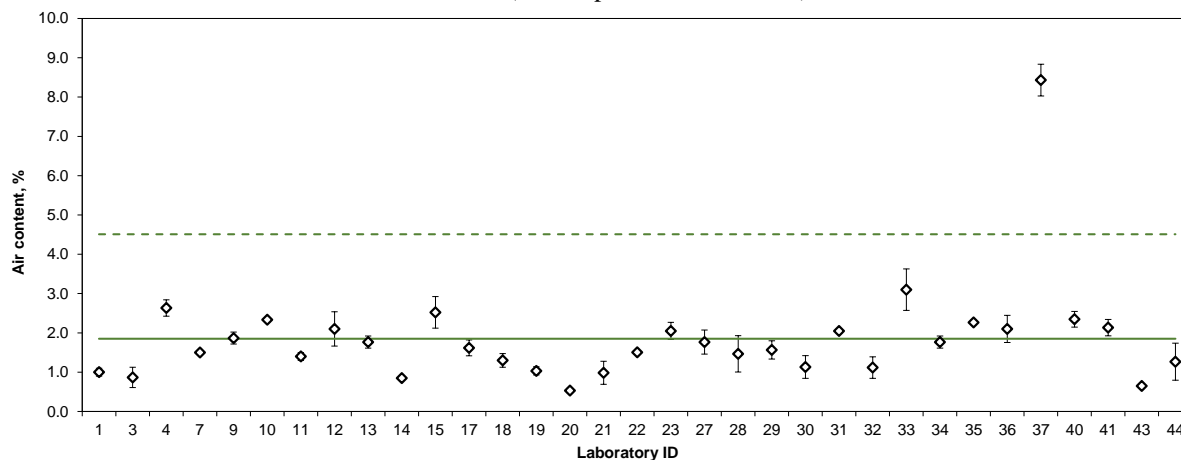
Vsebnost zraka v sveži betonski mešanici OC sem izvajal v skladu z navodili standarda SIST EN12350-7. Zaradi popolnoma enakih rezultatov vsebnosti zraka sem preiskavo izvedel samo na dveh vzorcih. Rezultati preiskave so podani v Tabeli 11. V tabeli 12 je podana statistična analiza rezultatov vsebnosti zraka sveže mešanice, katere je posredovalo 33 laboratorijev, sodelujočih v začetni fazi programa COST TU1404. Na grafikonu 2 je prikazan raztros rezultatov preizkusa sodelujočih laboratorijev. Id laboratorija FGG predstavlja št.35. Vsebnost zraka je malenkost višja od rezultatov sodelujočih laboratorijev, vendar še vedno v območju standardne deviacije.

Tabela 11: Rezultati vsebnosti zraka mešanice OC

Serijska	Vsebnost zraka [%]
Vzorec 1	2,3
Vzorec 2	2,3
<b>Povprečna vrednost</b>	<b>2,3</b>

Tabela 12: Statistika vsebnosti zraka mešanice OC v [%] (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

Število opazovanj	Minimum	Maksimum	Povprečje	Standardna deviacija
33	0,5	8,4	1,8	1,33

Grafikon 2: Raztros rezultatov vsebnosti zraka (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

### 5.1.1.3 Prostorninska masa sveže mešanice

Prostorninsko maso sveže mešanice sem določil v skladu z navodili standarda SIST EN 12350-6. Preizkus sem opravil na vzorcih, ki sem jih pripravil za določanje tlačne trdnosti tik po vgradnji v kalupe. Prostorninsko maso sem določal na 7ih vzorcih, s pomočjo katerih sem izračunal povprečno vrednost. V Tabeli 13 so podani rezultati prostorninske mase mešanice OC. V tabeli 14 je podana statistična analiza rezultatov prostorninske mase sveže mešanice, katere je posredovalo 33 laboratorijev, sodelujočih v začetni fazi programa COST TU1404. Na grafikonu 3 je prikazan raztros rezultatov preizkusa sodelujočih laboratorijev. Id laboratorija FGG predstavlja št.35. Povprečna vrednost  $2330 \text{ kg/m}^3$ , je nekoliko nižja od povprečja vseh sodelujočih laboratorijev, kar je posledica nekoliko višje vsebnosti zraka.

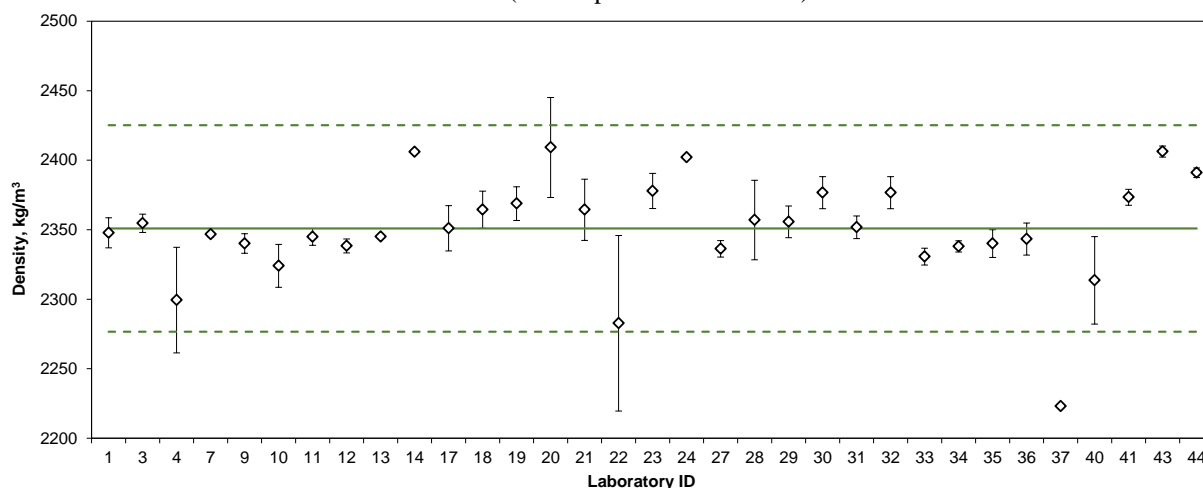
Tabela 13: Rezultati prostorninske mase sveže mešanice

Vzorec	Gostota [ $\text{kg/m}^3$ ]
1K	2317,04
2K	2328,89
3K	2349,63
4K	2328,89
5K	2328,89
6K	2337,78
7K	2322,96
<b>Povprečna vrednost</b>	<b>2330</b>

Tabela 14: Statistika prostorninske mase mešanice OC v [kg/m<sup>3</sup>] (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

Število opazovanj	Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]			
	Minimum	Maksimum	Povprečje	Standardna deviacija
33	2223	2409	2352	37,7

Grafikon 3: Raztros rezultatov vsebnosti zraka (Vir: <http://www.tu1404.eu>)



## 5.1.2 Preizkusi na strjenem betonu za mešanico OC

### 5.1.2.1 Tlačna trdnost 7 dni

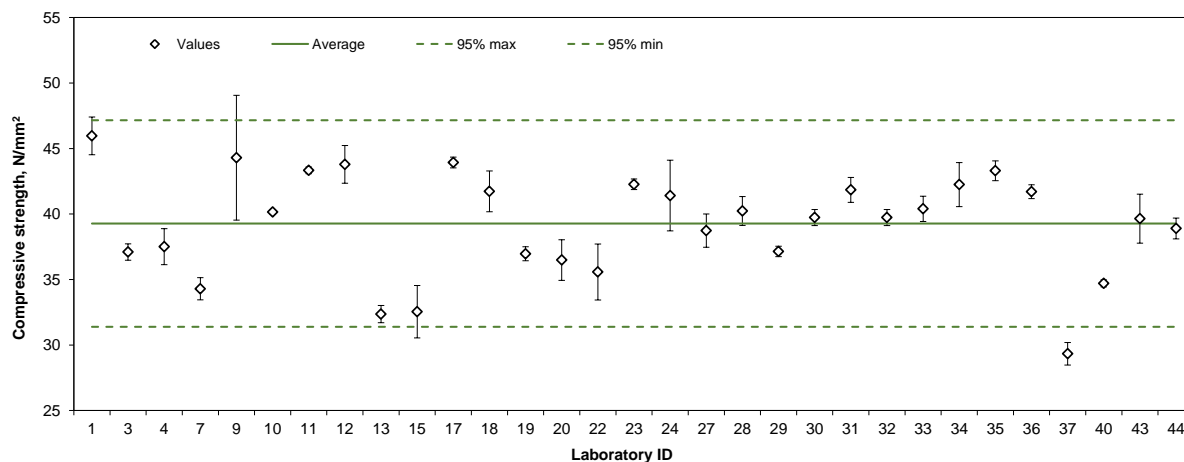
Sedem dnevno tlačno trdnost sem določal na 5-ih vzorcih, katere sem 7 dni hranil potopljene v vodi pri  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Preizkus sem opravil v skladu s standardom SIST EN 12390-3. V Tabeli 15 so prikazani rezultati preiskave tlačne trdnosti, s pomočjo katerih sem izračunal povprečno 7 dnevno tlačno trdnost. V tabeli 16 je podana statistična analiza rezultatov 7 dnevne tlačne trdnosti, katere je posredovalo 31 laboratorijev, sodelujočih v začetni fazi programa COST TU1404. Na grafikonu 4 je prikazan raztros rezultatov preizkusa sodelujočih laboratorijev. Id laboratorija FGG predstavlja št.35. Dobljena povprečna vrednost tlačne trdnosti enaka 42,3 MPa je nad povprečjem sodelujočih laboratorijev. Vrednost je v območju standardne deviacije.

Tabela 15: Rezultati 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC

Vzorec	Dimenzije[mm]	Masa[g]	Sila[KN]	$f_{cc}$ [Mpa]
4K (mix2)	150/150/148	7838	943,1	41,92
4K (mix1)	150/150/148	7824	976,4	43,40
2K (mix2)	150/150/147	7808	911,1	40,49
2K (mix1)	150/150/146	7798	952,5	42,33
5K (mix2)	150/150/148	7850	981,1	43,60
<b>Povprečna</b>				<b>42,3</b>

Tabela 16: Statistika rezultatov 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

Število opazovanj	Tlačna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Minimum	Maksimum	Povprečje	Standardna deviacija
31	29,3	45,9	39,3	3,94

Grafikon 4: Raztros rezultatov 7-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

### 5.1.2.2 Tlačna trdnost 28 dni

Karakteristično tlačno trdnost sem določal na 3-h vzorcih katere sem 28 dni hranil potopljene v vodi pri  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Preizkus sem opravil v skladu s standardom SIST EN 12390-3. V Tabeli 17 so prikazani rezultati tlačnih preiskav na 28 dni starih kockah, s pomočjo katerih sem izračunal povprečno 28 dnevno tlačno trdnost. V tabeli 18 je podana statistična analiza rezultatov tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni, katere je posredovalo 26 laboratorijev, sodelujočih v začetni fazi programa

COST TU1404. Na grafikonu 5 je prikazan raztros rezultatov preizkusa sodelujočih laboratorijev. Id laboratorija FGG predstavlja št.35. Dobljena povprečna tlačna trdnost enaka 55,5 MPa je nad povprečjem sodelujočih laboratorijev. Vrednost je v območju standardne deviacije.

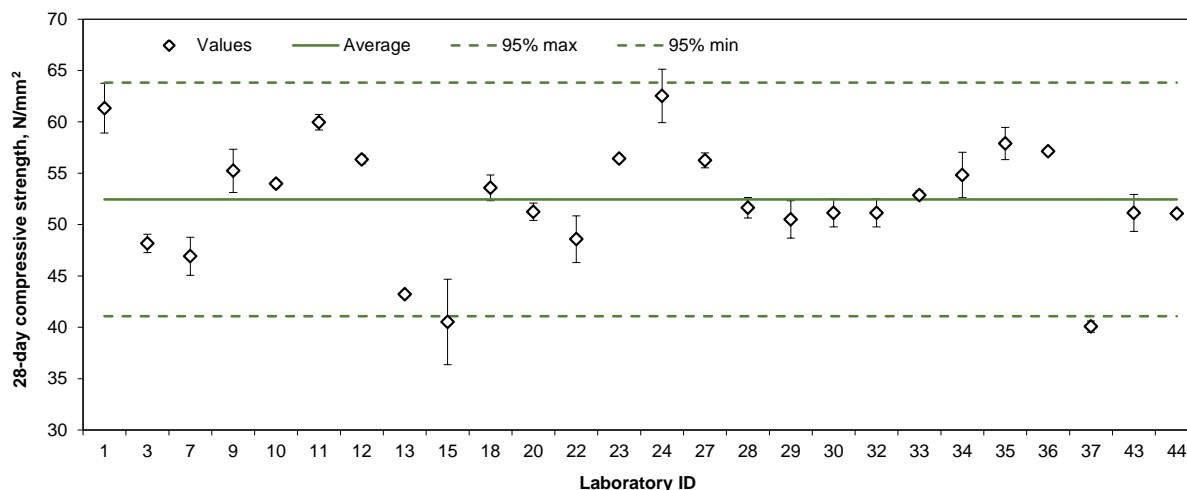
Tabela 17: Rezultati 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC

Vzorec	Dimenzije[mm]	Masa[g]	Sila[KN]	f <sub>cc</sub> [Mpa]
5K(mix1)	150/150/149	7856	1320	58,67
3K (mix2)	150/150/148	7794	1196	53,16
1K (mix1)	150/150/148	7828	1299	57,73
3K (mix1)	150/150/147	7884	1192	52,98
1K (mix2)	150/150/147	7844	1237	54,98
<b>povprečna</b>				<b>55,5</b>

Tabela 18: Statistika rezultatov 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC (Vir: <http://www.tu1404.eu>)

Število opazovanj	Tlačna trdnost [N/mm <sup>2</sup> ]			
	Minimum	Maksimum	Povprečje	Standardna deviacija
26	40,1	62,5	52,4	5,7

Grafikon 5: Raztros rezultatov 28-dnevne tlačne trdnosti mešanice OC (Vir: <http://www.tu1404.eu>).



## 5.2 Rezultati preiskav na mešanicah z recikliranim agregatom

### 5.2.1 Preizkusi na sveži mešanici

#### 5.2.1.1 Določanje konsistence po metodi s posedom

Rezultati preizkusa s posedom so prikazani v Tabeli 19. V primerjavi z referenčno mešanico OC sem dobil zelo podobne rezultate pri mešanicah RCA\_30% in RCA\_50%. Vrednost poseda mešanice RCA\_100%, pri kateri sem nadomestil ves grobi agregat z recikliranim, pa je bistveno odstopala. To bi pripisal predvsem nižjemu v/c razmerju, saj sem mešanico, zaradi napake, zamešal po drugačnem receptu z nižjim v/c razmerjem. Vendar bi moral za jasnejši odgovor, kaj je razlog za odstopanje poseda, preizkus na mešanici RCA\_100% ponoviti. Namreč znano je, da oblika zrn vpliva na obdelavnost mešanice. Recikliran agregat ima ostre robove, medtem ko ima naravni agregat uporabljen v tem delu zaobljene robove.

Vrednost razleza mešanice RCA\_0/4\_100% je prikazan v Tabeli 20. Ta mešanica ni primerljiva z ostalimi mešanicami, saj smo jo zamešali po občutku, z uporabo večje količine superplastifikatorja. Uporabili smo drug tip superplastifikatorja, katerega količine v mešanici nismo niti merili. Želeli smo le preveriti ali bi bila fina reciklirana frakcija primerna za proizvodnjo samozgoščevalnih betonov, vendar to ni bil predmet te diplomske naloge.

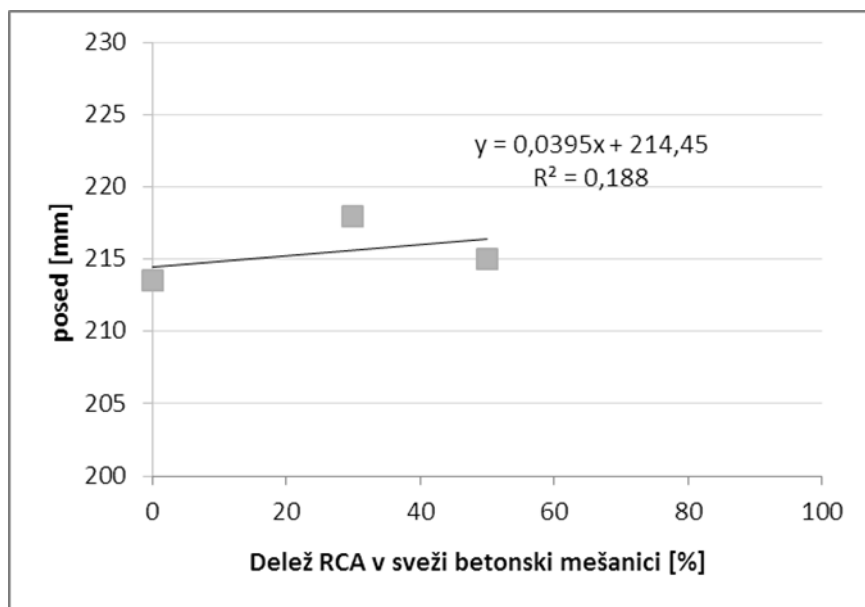
Tabela 19: Rezultati preizkusa s posedom na mešanicah z recikliranim agregatom

Mešanica	Posed [mm]	Razred konsistence
OC	213	S4
RCA_30%	218	S4
RCA_50%	215	S4
RCA_100%	50	S2

Tabela 20: Rezultat preizkusa s razlezom na mešanici RCA\_0/4\_100%

Mešanica	Razlez	Razred konsistence
RCA_0/4_100%	490	F4

Grafikon 6: Vpliv deleža zamenjave agregata na konsistenco sveže mešanice



### 5.2.1.2 Vsebnost zraka v sveži betonski mešanici

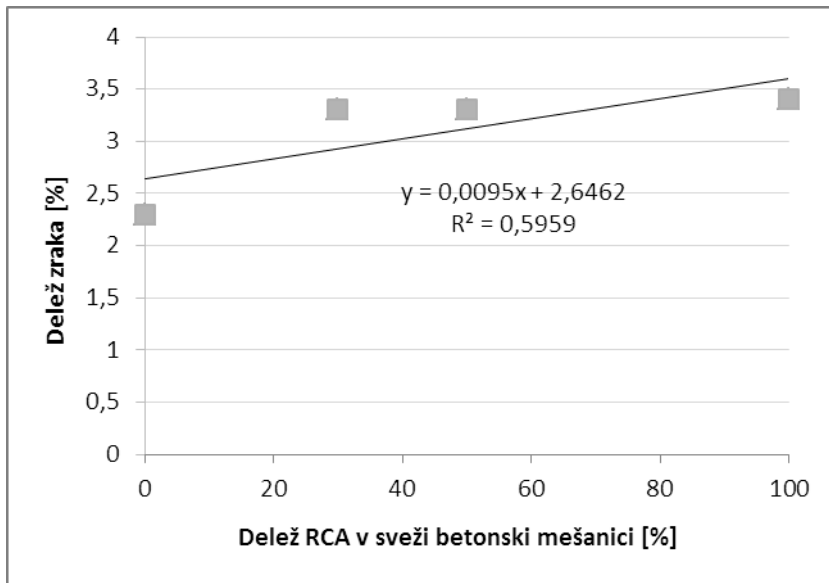
Rezultati določanja zraka v svežih betonskih mešanica so prikazani v Tabeli 21. Vsebnost zraka je pri mešanica, kjer sem nadomestil del ali ves grobi agregat z recikliranim, nekoliko višja, v primerjavi z referenčno mešanico OC. Izstopa pa mešanica RCA\_0/4\_100%, pri kateri sem nadomestil ves fini agregat z recikliranim. Vsebnost zraka je pri mešanica, v katerih sem nadomeščal deleže grobega agregata z recikliranim, praktično identična. Vpliv deleža zamenjave agregata je prikazan na grafikonu 7. Korelacijski koeficient 0,59 nakazuje, da se z večanjem deleža recikliranega agregata večja tudi delež zraka v sveži mešanici.

Pri mešanici RCA\_0/4\_100% smo dobili praktično še enkrat večjo vrednost vsebnosti zraka v svežem betonu. Vzrok za takšno odstopanje mi ni poznan, vendar to ni predmet tega diplomskega dela.

Tabela 21: Rezultati vsebnosti zraka na mešanica z recikliranim agregatom

Mešanica	Delež zraka [%]
OC	2,3
RCA_30%	3,3
RCA_50%	3,3
RCA_100%	3,4
RCA_0/4_100%	7

Grafikon 7: Vpliv deleža recikliranega agregata na vsebnost zraka



### 5.2.1.3 Prostorninska masa sveže betonske mešanice

Rezultati določanja prostorninske mase svežega betona so prikazani v Tabeli 22. Prostorninske mase svežih mešaníc z deležem recikliranega agregata so zelo podobne prostorninski masi pri mešanici OC. To gre pripisati podobnim prostorninskim masam zrn uporabljenega naravnega in recikliranega agregata. Nekoliko presenetljivo je, da prostorninska masa mešanice celo rahlo narašča z večanjem deleža recikliranega grobega agregata. Mešanica s fino reciklirano frakcijo ima najnižjo prostorninsko maso. To je posledica najvišje vsebnosti zraka. Na grafikonu 8 je prikazan vpliv zamenjave deleža recikliranega agregata na prostorninsko maso svežega betona. Korelacijski koeficient znaša 0,86, kar kaže, da se z večanjem deleža recikliranega agregata večja tudi prostorninska masa sveže mešanice. Ta povezava je presenetljiva, saj je prostorninska masa zrn recikliranega agregata celo nekaj nižja, glede na prostorninsko maso zrn naravnega agregata. Edina razlaga za tovrstne rezultate bi lahko bila bolj optimalna porazdelitev zrn recikliranega agregata, ki je zato sposoben zapolniti večji delež prostornine betona.

Tabela 22: Rezultati prostorninske mase mešaníc z deležem RCA

Mešanica	Povprečna gostota [kg/m <sup>3</sup> ]
OC	2330
RCA_30%	2330

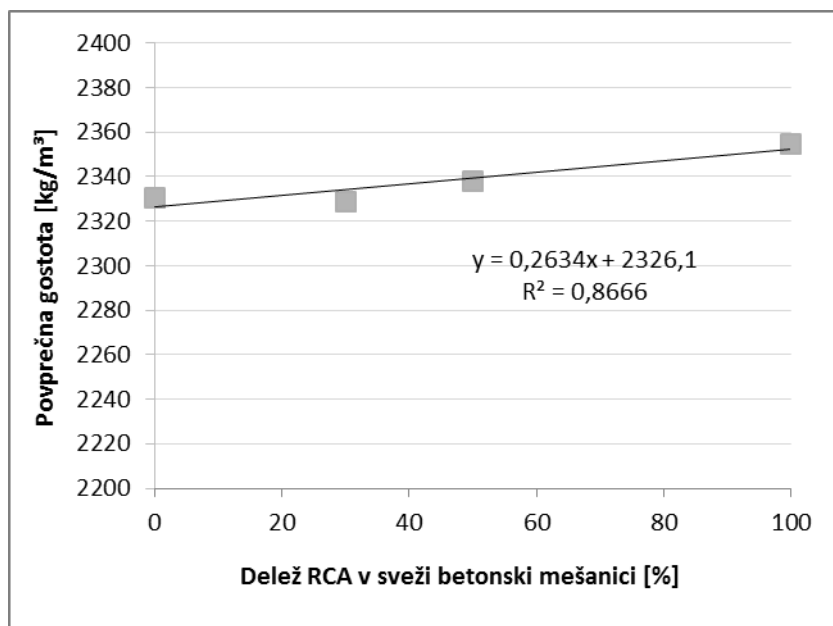
Se nadaljuje ...



... nadaljevanje tabele 22.

RCA_50%	2340
RCA_100%	2350
RCA_0/4_100%	2280

Grafikon 8: Vpliv zamenjave agregata na prostorninske mase



## 5.2.2 Preizkusi na strjenem betonu

### 5.2.2.1 Tlačna trdnost pri starosti 7 in 28 dni

Rezultati tlačnih trdnosti (prikazani v Tabeli 23) so bili pri vseh mešanicah z deležem grobega recikliranega agregata zelo podobni dobljeni tlačni trdnosti na referenčni mešanici OC. Tlačna trdnost po 7-ih dneh je bila celo nekoliko višja pri mešanicah z deležem recikliranega agregata. Pri mešanici RCA\_100% je celo najvišja, kar bi pripisal nižjemu v/c razmerju. Ne gre pa zanemariti tudi vpliva klinjenja zrn z ostrimi robovi, vendar bi moral za razjasnitev tega dejstva preizkus ponoviti. Pri isti mešanici je 28 dnevna tlačna trdnost presenetljivo najnižja. To pa je zaradi slabše zgoščenosti preizkušancev. Namreč mešanica RCA\_100% je bila zelo težko vgradljiva in mi jo kljub zgoščevanju z vibratorjem ni uspelo vgraditi na način, da bi lepo zapolnila kalup. Na grafikonu 9 je prikazan vpliv zamenjave agregata na tlačno trdnost. Na grafikonu ni prikazana vrednost za mešanico RCA\_0/4\_100%, saj mešanica ni primerljiva. Korelacijski koeficient 0,92 kaže na zelo dobro

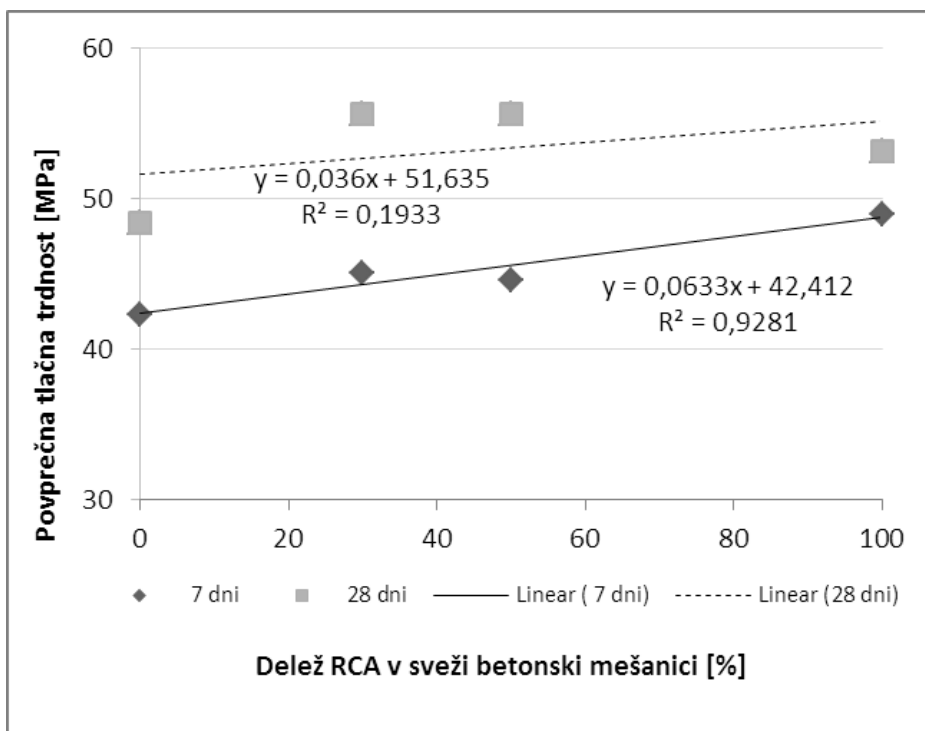
povezavo med večanjem deleža grobe frakcije recikliranega agregata in naraščanjem 7 dnevne tlačne trdnosti. Pri 28 dnevni tlačni trdnosti pa glede na korelacijski koeficient 0,19 povezava ni najboljša. Vendar je treba upoštevati, da je bila mešanica RCA\_100% slabo zgoščena, posledično pa preizkušanci na katerih se je izvajala preiskava tlačne trdnosti pri 28 dneh, neprimerljivi z preizkušanci na katerih smo določali 7 dnevno tlačno trdnost.

Vrednosti pri merodajnih mešanicah RCA\_30% in RCA\_50% pa nakazujejo, da z zamenjavo naravnega agregata z recikliranim ne poslabšamo tlačne trdnosti, saj smo dobili praktično enake vrednosti. To je tudi pričakovano, saj sta naravni in reciklirani agregat, katera smo obravnavali v tem delu, podobne poroznosti.

Tabela 23: Rezultati tlačnih trdnosti pri starosti 7 in 28 dni

Mešanica	Povprečna tlačna trdnost 7 dni [MPa]	Povprečna tlačna trdnost 28 dni [MPa]
OC	42,3	55,5
RCA_30%	45,1	55,7
RCA_50%	44,6	55,7
RCA_100%	49,0	53,2
RCA_0/4_100%	30,1	40,1

Grafikon 9: Vpliv deleža zamenjave agregata na tlačno trdnost





Slika 31: Primer porušitve pri mešanici RCA\_30%

## 6 ZAKLJUČEK

Globalne smernice gredo vedno bolj v smeri zmanjševanja vplivov na okolje. Tudi regulativa s področja gradbenih odpadkov veleva večje stopnje ponovne uporabe. Agregati, pridobljeni iz ruševin porušениh betonskih konstrukcij predstavljajo potencialni vir za uporabo v betonskih mešanicah. Standardi dovoljujejo uporabo tovrstnega agregata, vendar v praksi še ni sprejet, zaradi nepoznavanja in predsodkov glede sekundarne surovine. Zato je pomembno poznati lastnosti tako pridobljenih agregatov, saj jih lahko le v tem primeru uporabimo v proizvodnji konstrukcijskih betonov.

V diplomski nalogi sem preučeval vpliv zamenjave naravnega agregata z recikliranimi betonskimi ruševinami v vlogi agregata, na osnovne lastnosti betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju. Ugotovil sem, da ima reciklirani agregat, pridobljen iz betonskih ruševin, zelo podobne lastnosti kot naravni agregat, uporabljen v začetni eksperimentalni fazi projekta COST TU1404. Oba tipa uporabljenega agregata sta imela višjo poroznost, kot smo je vajeni v Sloveniji. Zaradi večje poroznosti pa imata agregata tudi višji koeficient vodovpojnosti  $WA_{24}$ . Zaradi te lastnosti je treba posvetiti posebno pozornost količini zamesne vode, saj lahko agregatna zrna vpijejo del te vode in vplivajo na  $v/c$  razmerje. V ta namen smo vse uporabljene frakcije agregata predhodno pripravili, da so bile v z vodo zasičenem površinsko suhem stanju. Tako agregat ni vpil dodatne vode.

Sveže mešanice z deležem grobega recikliranega agregata so dosegale praktično isto konsistenco, kot mešanice z naravnim agregatom. Presenetljivo je tudi karakteristična tlačna trdnost, kljub večanju deleža grobega recikliranega agregata, ostala praktično enaka, saj so vsi preizkušanci dosegali vrednosti, ki zadoščajo razredu tlačne trdnosti vsaj C35/45. Z eksperimentalnim delom sem ugotovil, da lahko s primerno pripravljenim recikliranim grobim agregatom, pridobljenim iz betonskih ruševin, dosežemo povsem primerljive lastnosti, kot z uporabo primerljivega naravnega agregata.

## VIRI

<http://www.globalcement.com/magazine/articles/858-defining-the-trend-cement-consumption-vs-gdp>  
(Somayeh, et al., 2015)

Kumar Mehta, P., Monteiro, P. J. M., 2006, United States of America, Concrete, Microstructure, Properties, and Materials, third edition, University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering

Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mroz, R., Deja, J., 2015, Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, Volume 95, 1 October 2015, Pages 243–256

Cust Action 1414. 2015

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09500618> (pridobljeno 23. 02. 2016)

Žarnič, R., 2005, Ljubljana, Lastnosti gradiv, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij, str 84-86, 90, 99, 110.

Saje, D., 2015, Ljubljana, Teorija betona, Predavanja, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, katedra za masivne in lesene konstrukcije

Žarnič, R., Bosiljkov, V., Bokan – Bosiljkov, V., 2003/2004, Ljubljana, Gradiva vaje, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij, str 41-51

Neville, A.M., Brooks, J. J., 2010, Harlow, England, Concrete technology, second edition, str 53

Serdar, M., Trtnik, G., Nanukuttan, S., Azenha, M., Staquet, S., Schlicke, D., Gabrijel, I., Cizer, O., B. Bosiljkov, V., Pichler, B., Rozière, E., Matikas, T., 2015, RRT\* Extended round robin testing programme for TU1404, Instructions for participation, str 10, 12, 14

Cust Action 1414. 2015

<http://www.tu1404.eu/> (pridobljeno 21. 05. 2016)

Serdar, M., Staquet, S., Schlicke, D., Rozière, E., Trtnik, G., Nanukuttan, S., Azenha, M., 2016, Extended Round Robin Test Rrt<sup>+</sup> Initial Phase, Results and lessons learned, presentation

Cust Action 1414. 2015

<http://www.tu1404.eu/> (pridobljeno 21. 05. 2016)

## STANDARDI

SIST 1026:2016, Beton - specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost - Pravila za uporabo  
SIST EN 206

SIST EN 206:2013, Beton - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

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

---

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

SIST EN 934-2:2009, Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso - 2. del: Kemijski dodatki za beton - Definicije, zahteve, skladnost, označevanje in obeleževanje

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

SIST EN 933-1:2012, Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - Metoda sejanja

SIST EN 1097-6:2013, Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 6. del: Določevanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode

SIST EN 12350-7:2001, Preskušanje svežega betona. Del 7, Vsebnost zraka. Porozimeterske metode

SIST EN 12350-1:2009 Preskušanje svežega betona – 1. del: Vzorčenje

SIST EN 12350-2:2001, Preskušanje svežega betona. Del 2, Posed stožca

SIST EN 12350–6:2009. Preskuševanje svežega betona – 6.del: Gostota

SIST EN 12390-3:2009. Določanje tlačne trdnosti preizkušancev

SIST EN 932-1:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov - 1. del: Metode vzorčenja.