

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:

Resman, J., 2016. Vpliv deleža in zrnivosti
recikliranega agregata na lastnosti betona.
Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v
Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in
geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov,
V.): 113 str.

Datum arhiviranja: 20-09-2016

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:

Resman, J., 2016. Vpliv deleža in zrnivosti
recikliranega agregata na lastnosti betona.
B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of
Ljubljana, Faculty of civil and geodetic
engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov,
V.): 113 pp.

Archiving Date: 20-09-2016

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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

JANJA RESMAN

**VPLIV DELEŽA IN ZRNAVOSTI RECIKLIRANEGA
AGREGATA NA LASTNOSTI BETONA**

Diplomska naloga št.: 3503/KS

**INFLUENCE OF CONTENT AND GRAIN SIZE
DISTRIBUTION OF RECYCLED AGGREGATE ON
CONCRETE PROPERTIES**

Graduation thesis No.: 3503/KS

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 13. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisana študentka **JANJA RESMAN**, vpisna številka **26105070**, avtorica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **VPLIV DELEŽA IN ZRNAVOSTI RECIKLIRANEGA AGREGATA NA LASTNOSTI BETONA**

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a 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: Ljubljani

Datum: _____

Podpis študentke: _____

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.322(043.2)
Avtor:	Janja Resman
Mentor:	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Naslov:	Vpliv deleža in zrnivosti recikliranega agregata na lastnosti betona
Tip dokumenta:	Dipl. nal. – UNI
Obseg in oprema:	str. 113, pregl. 41, sl. 82, gr. 10, en. 16
Ključne besede:	gradbeni odpadek, recikliran agregat, beton

Izvleček

Skrb za okolje nas spremlja na vsakem koraku. Vpliv vedno večje ozaveščenosti in skrbi za okolje se kaže tudi v gradbeništvu, pri izbiri materialov, postopkov gradnje ter v ravnanju z gradbenimi odpadki. Pri uporabi betona se želimo čim bolj izogniti negativnim vplivom na okolje. Tudi zakonodaja s področja gradbeništva, okolja in odpadkov relativno hitro sledi odločitvam pristojnih institucij. Vlada RS je v ta namen v letošnjem letu sprejela Program ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS v skladu z zakonodajo.

Osnovni namen diplomske naloge je ocena vpliva deleža in zrnivosti recikliranega agregata na lastnosti betona. Poskušali smo dobiti odgovor na vprašanje, ali je mogoče zamenjati naravni agregat z recikliranim in pri tem ohraniti osnovne karakteristike svežega in strjenega betona.

Pri pripravi betonskih mešanic smo uporabili dve vrsti kamenega agregata. Naravni agregat je bil dostavljen iz Francije v okviru projekta »COST Action TU1404«, recikliran agregat iz odpadnega drobljenega betona pa smo dobili na separaciji v okolici Ljubljane. Pripravo vzorcev in preiskave recikliranega agregata smo opravili v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, ki deluje v okviru Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. S pomočjo preiskav smo določili fizikalne lastnosti recikliranega agregata (zrnavost, delež finih delcev, modul oblike zrn, prostorninska masa, vpijanje vode, vlažnost, prisotnost humoznih delcev). Na osnovi teh smo ocenili njihovo primernost za uporabo v betonskih mešanicah. Pripravili smo tri mešanice svežega betona z enako količino cementa in enakim vodocementnim razmerjem. Prva mešanica betona je bila sestavljena iz drobne frakcije naravnega izvora in grobe frakcije iz recikliranega agregata. Druga mešanica betona je bila sestavljena iz drobne frakcije recikliranega agregata in grobe frakcije naravnega izvora. Tretja mešanica betona je vsebovala samo recikliran agregat. Lastnosti sveže betonske mešanice (konsistenca, gostota, delež vsebnosti zraka) in strjenega betona (tlačna trdnost, cepilna natezna trdnost, globina prodora vode pod pritiskom) smo preverjali v skladu z določili evropskih standardov. Na podlagi rezultatov preiskav

betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju smo betone uvrstili v razrede tlačne trdnosti, naredili primerjalno analizo ter podali priporočila za uporabo takih betonov pri gradnji objektov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 691.322(043.2)
Author: Janja Resman
Supervisor: Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.
Title: Influence of content and grain size distribution of recycled aggregate on concrete properties
Document type: Graduation Thesis – University Studies
Notes: p. 113, tab. 41, fig. 82, gr. 10, eq. 16
Key words: construction waste, recycled aggregate, concrete

Abstract

Environmental concerns are all around us. The influence of an increasing awareness and care for the environment is present also in construction sector, in the areas of material selection, construction technology and construction waste management. When using concrete we strive to avoid negative impacts on the environment. Legislation in the area of construction, environment and waste follows the decisions of authorities relatively fast. This year the government of the Republic of Slovenia adopted the Programme of waste management and waste prevention in the Republic of Slovenia in accordance with the legislation.

The main aim of this diploma thesis is the assessment of the influence of content and grain size distribution of recycled aggregate on concrete properties. We tried to find out whether it is possible to exchange natural aggregate with a recycled one while maintaining the basic properties of fresh and hardened concrete.

When preparing the concrete mixtures two types of aggregate were used. Natural aggregate was delivered from France within project "COST Action TU1404", while recycled aggregate from crushed waste concrete was acquired from a separation plant near Ljubljana. The preparation of samples and testing of recycled aggregate was carried out at the laboratory of UL FGG. With tests we first determined the physical properties of the recycled aggregate (grain size distribution, fines content, particle shape, density, water absorption, moisture content, presence of humus particles). On the basis of obtained results the suitability of the aggregate for use in concrete mixtures was assessed. Three mixtures of fresh concrete were prepared with the same amount of cement and the same water-to-cement ratio. The first mixture was prepared with fine natural aggregate and coarse recycled aggregate, the second one with recycled fine aggregate and natural coarse aggregate, while in the third mixture only recycled aggregate

was used. The properties of fresh concrete (consistency, density, air content) and hardened concrete (compressive strength, splitting tensile strength, depth of water penetration under pressure) were determined according to SIST EN standard methods. On the basis of obtained results the tested concretes were classified into compressive strength classes, and analysis of the results was carried out. At the end, recommendations were given for the use of such concretes in the construction sector.

ZAHVALA

Najprej se najlepše zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov za pomoč in usmeritve pri izdelavi diplomske naloge.

Hvala g. Franciju Čeponu za pomoč pri laboratorijskih preskusih.

Zaposlenim na Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., se zahvaljujem, ker so mi omogočili uporabo sit.

Na koncu bi se zahvalila tudi svoji družini in bližnjim, ki so mi v času študija stali ob strani, me podpirali in verjeli v uspešen zaključek mojega študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen, cilji, hipoteze in vsebina diplomske naloge	2
2	TEORETIČNI DEL	5
2.1	Okolje	5
2.1.1	Namen in cilji varovanja okolja	5
2.2	Odpadki.....	6
2.2.1	Definicija odpadkov	6
2.2.2	Gradbeni odpadki	6
2.2.3	Klasifikacija odpadkov in gradbenih odpadkov	7
2.3	Zakonodaja na področju gradbenih odpadkov	10
2.3.1	Ravnanje z odpadki	12
2.3.2	Terminologija pri ravnanju z odpadki.....	13
2.3.3	Ravnanje z gradbenimi odpadki	15
2.3.4	Hierarhija ravnanja z odpadki	19
2.3.5	Investitor, povzročitelj odpadkov in načrt gospodarjenja z gradbenimi odpadki	20
2.3.6	Zbiralec in predelovalec gradbenih odpadkov.....	22
2.3.7	Predelovanje gradbenih odpadkov.....	23
2.3.8	Gradbeni proizvod (CPR)	23
2.3.9	Rušenje	24
2.3.10	Recikliranje.....	27
2.3.10.1	Recikliranje na mestu rušenja	28
2.3.10.2	Recikliranje v reciklažnem centru	28
2.3.10.3	Drobilniki	28
2.3.10.4	Mlini in sejalna sita	31
2.4	Beton in njegove sestavine	31
2.4.1	Cement.....	33
2.4.2	Agregat	34
2.4.3	Voda	35
2.4.4	Dodatki k betonu	36
2.4.4.1	Plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji.....	37
2.5	Beton iz recikliranega agregata.....	37
2.5.1	Značilnost svežega betona iz recikliranega agregata	38
3	EKSPERIMENTALNI DEL	39

3.1	Laboratorijske preiskave agregatov	39
3.1.1	Francoski in recikliran agregat.....	39
3.1.2	Odvzem agregata in priprava vzorcev za preiskave	40
3.1.3	Laboratorijske preiskave recikliranega agregata	43
3.1.3.1	Določanje zrnivosti recikliranega agregata s sejanjem	43
3.1.3.2	Določanje deleža finih delcev recikliranega betona s sejanjem	46
3.1.3.3	Določanje oblike zrn recikliranega agregata – Modul oblike	48
3.1.3.4	Določanje prostorninske mase zrn in vpivanja vode za grobi agregat (4 – 31,5 mm).....	50
3.1.3.5	Določanje prostorninske mase zrn in vpivanja vode za drobni agregat (0,063 – 4 mm).....	54
3.1.3.6	Določanje vlažnosti agregata.....	55
3.1.3.7	Določanje prisotnosti humoznih delcev – Kolorimetrijska metoda	56
3.1.4	Preiskave francoskega agregata	57
3.2	Priprava receptur za betonske mešanice.....	58
3.2.1	Vzorec 1: frakcija 0 – 4 mm francoski agregat, frakcija 4 – 16 mm recikliran agregat.....	60
3.2.2	Vzorec 2: 0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat.....	61
3.2.3	Vzorec 3: 0 – 16 mm recikliran agregat	63
3.3	Preskušanje svežega in strjenega betona.....	65
3.3.1	Priprave in preskušanje/preiskave svežega betona.....	65
3.3.1.1	Priprava svežega betona.....	65
3.3.1.2	Vzorčenje svežega betona	65
3.3.1.3	Preskušanje konsistence svežega betona – preskus s posedom stožca	66
3.3.1.4	Določanje gostote svežega betona	69
3.3.1.5	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu	71
3.3.2	Priprava standardnih preskušancev	73
3.3.3	Izdelava in nega preskušancev	75
3.3.4	Preskušanje strjenega betona	77
3.3.4.1	Določanje tlačne trdnosti betona.....	77
3.3.4.2	Določanje gostote strjenega betona.....	79
3.3.4.3	Določanje cepilne natezne trdnosti betona	80
3.3.4.4	Določanje globine prodora vode pod pritiskom.....	81
3.3.4.5	Določanje dinamičnega modula elastičnosti.....	82
3.4	Rezultati in analiza laboratorijskih raziskav.....	84
3.4.1	Preiskave agregatov	84
3.4.1.1	Določanje zrnivosti recikliranega agregata s sejanjem	84
3.4.1.2	Določitev finih delcev recikliranega agregata s sejanjem.....	85

3.4.1.3	Določanje oblike zrn recikliranega agregata – Modul oblike	86
3.4.1.4	Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za grobi agregat (4 – 31,5 mm).....	86
3.4.1.5	Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za drobni agregat (0,063 – 4 mm)	87
3.4.1.6	Določanje vlažnosti agregata	87
3.4.1.7	Določanje prisotnosti humoznih delcev – Kolorimetrijska metoda.....	88
3.4.2	Preiskave svežega betona.....	88
3.4.2.1	Konsistenca svežega betona – Preskus s posedom stožca	88
3.4.2.2	Gostota svežega betona	89
3.4.2.3	Vsebnost zraka – Metoda z manometrom.....	90
3.4.3	Preiskave strjenega betona	91
3.4.3.1	Tlačna trdnost betona	91
3.4.3.2	Gostota strjenega betona.....	94
3.4.3.3	Cepilna natezna trdnost betona	95
3.4.3.4	Globina prodora vode pod pritiskom.....	97
3.4.3.5	Dinamični modul elastičnosti	98
3.4.4	Skupni rezultati	101
3.4.5	Primerjava rezultatov diplomske naloge z rezultati etalona	104
4	ZAKLJUČEK.....	107
VIRI		111

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija gradbenih odpadkov	9
Preglednica 2: Gradbeni odpadki in ruševine	16
Preglednica 3: Sestava in letna količina nastajanja nenevarnih gradbenih odpadkov.....	18
Preglednica 4: Letna količina nastajanja nevarnih gradbenih odpadkov	19
Preglednica 5: Zahteve glede vode po SIST 1008.....	36
Preglednica 6: Najmanjša velikost vzorca v skladu s SIST EN 933-1.....	43
Preglednica 7: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0 – 16 mm po SIST 1026.....	46
Preglednica 8: Minimalna zatehta testnega vzorca v skladu s SIST EN 933-4	48
Preglednica 9: Minimalna zatehta testnega vzorca.....	50
Preglednica 10: Prostorninska masa agregata	57
Preglednica 11: Vpijanje vode agregata	58
Preglednica 12: Sestava agregata za betone.....	58
Preglednica 13: Sestava betonske mešanice – vzorec 1.....	61
Preglednica 14: Sestava betonske mešanice – vzorec 2.....	62
Preglednica 15: Sestava betonske mešanice – vzorec 3.....	64
Preglednica 16: Metode določanja konsistence svežega betona.....	66
Preglednica 17: Stopnje poseda po SIST EN 206	69
Preglednica 18: Zgoščevanje vgrajenega betona.....	71
Preglednica 19: Nazivne velikosti preskušancev po SIST EN 12390-1	74
Preglednica 20: Razredi tlačne trdnosti za preskušance v obliki kocke po SIST EN 206.....	79
Preglednica 21: Dovoljene vrednosti prodora vode po SIST EN 1026.....	82
Preglednica 22: Zrnavost recikliranega agregata.....	84
Preglednica 23: Delež finih delcev.....	86
Preglednica 24: Rezultati določanja modula oblike	86
Preglednica 25: Rezultati prostorninske mase in vpijanja vode za grobi agregat.....	87
Preglednica 26: Rezultati prostorninske mase in vpijanja vode za drobni agregat.....	87
Preglednica 27: Rezultati preskusa vlažnosti	88
Preglednica 28: Rezultati preiskav poseda stožca	89
Preglednica 29: Gostota svežega betona.....	90
Preglednica 30: Rezultati vsebnosti zraka	91
Preglednica 31: Rezultati tlačne trdnosti po 1 dnevu.....	92
Preglednica 32: Rezultati tlačne trdnosti po 7 dneh	92
Preglednica 33: Rezultati tlačne trdnosti po 28 dneh.....	93

Preglednica 34: Rezultati gostote strjenega betona.....	94
Preglednica 35: Rezultati cepilne natezne trdnosti	95
Preglednica 36: Rezultati globine prodora vode.....	97
Preglednica 37: Rezultati dinamičnega modula elastičnosti po 7 dneh.....	99
Preglednica 38: Rezultati dinamičnega modula elastičnosti po 28 dneh.....	99
Preglednica 39: Izbor rezultatov preiskav svežega in strjenega betona	101
Preglednica 40: Primerjava rezultatov svežega betona	104
Preglednica 41: Primerjava rezultatov strjenega betona	105

KAZALO SLIK

Slika 1: Gradbeni odpadki	7
Slika 2: Prikaz klasifikacije gradbeni odpadkov	8
Slika 3: Hierarhija ravnanja z odpadki	20
Slika 4: Diagram ravnanja z ruševinami.....	24
Slika 5: Čeljustni, konusni in udarni drobilnik.....	30
Slika 6: Kladivni in navpični udarni drobilnik.....	30
Slika 7: Francoski agregat frakcij 8 – 16 mm, 8 – 11 mm, 0 – 4 mm.....	39
Slika 8: Recikliran agregat.....	40
Slika 9: Sejalni stolp.....	41
Slika 10: Uporabljena sita.....	41
Slika 11: Shranjen agregat v vrečah	41
Slika 12: Potek zmanjševanja laboratorijskega vzorca.....	42
Slika 13: Četrtnjenje.....	42
Slika 14: Francoski agregat po frakcijah shranjen v silosih.....	43
Slika 15: Namakanje vzorca.....	45
Slika 16: Pranje vzorca.....	45
Slika 17: Sejalni stolp.....	45
Slika 18: Ročno sejanje.....	46
Slika 19: Ostanki na situ.....	46
Slika 20: Pranje vzorca in shranjevanje odpadne vode.....	47
Slika 21: Sušenje v sušilnici.....	47
Slika 22: Po sušenju.....	47
Slika 23: Sejanje skozi sito 4 mm.....	48
Slika 24: Vzorec po frakcijah.....	48
Slika 25: Pranje vzorca.....	49
Slika 26: Merjenje s kljunastim merilom.....	49
Slika 27: Določanje največje in najmanjše dimenzije zrna.....	49
Slika 28: Ločevanje zrn glede na obliko.....	49
Slika 29: Zrna ugodne (levo) in neugodne.....	49
Slika 30: Pranje vzorca skozi siti 4 in 8 mm.....	52
Slika 31: Pripravljena vzorca in piknometra.....	52
Slika 32: Dodajanje vzorca.....	52
Slika 33: Dodajanje vode.....	52

Slika 34: Odstranjevanje zračnih mehurčkov.....	53
Slika 35: Vodna kopel	53
Slika 36: Tehtanje piknometra.....	53
Slika 37: Odcejanje vzorca	53
Slika 38: Površinsko vlažen agregat.....	53
Slika 39: Sušenje na zraku.....	53
Slika 40: Odstranitev kalupa	54
Slika 41: Vlažen agregat.....	55
Slika 42: Sušenje s pečko.....	55
Slika 43: Rahlo vlažen agregat.....	55
Slika 44: Nasičen, površinsko suh agregat.....	55
Slika 45: Tehtanje NaOH.....	57
Slika 46: Priprava razopine NaOH	57
Slika 47: Natehtane sestavine za pripravo betona.....	59
Slika 48: Merjenje temperature	59
Slika 49: Agregat in cement v mešalcu.....	60
Slika 50: Beton neustrezen za vgradnjo.....	62
Slika 51: Betonska mešanica po	62
Slika 52: Notranje dimenzije konusa	66
Slika 53: Navlaženje osnovne plošče.....	68
Slika 54: Polnjenje kalupa s pomočjo lijaka.....	68
Slika 55: Zgoščevanje s kovinsko palico.....	68
Slika 56: Merjenje poseda.....	68
Slika 57: Merjenje poseda.....	69
Slika 58: Zgoščevanje svežega betona.....	70
Slika 59: Napolnjena kalupa s svežim betonom	70
Slika 60: Posoda z manometrom (SIST EN 12350-7)	72
Slika 61: Zgoščevanje z vibracijsko iglo	72
Slika 62: Pritrditev pokrova.....	73
Slika 63: Vbrizganje vode.....	73
Slika 64: Dimenzije kocke, valja in prizme	74
Slika 65: Kalupi v obliki kocke	75
Slika 66: Premaz z opažnim oljem.....	76
Slika 67: Označitev preskušanca.....	76
Slika 68: Zaščita preskušancev.....	76
Slika 69: Odstranitev kalupa.....	76
Slika 70: Nega preskušancev.....	77

Slika 71: Preskušanje tlačne trdnosti.....	78
Slika 72: Izpis porušne sile na monitorju.....	78
Slika 73: Zadovoljiva porušitev.....	78
Slika 74: Zadovoljiva porušitev.....	78
Slika 75: Preskušanec v stiskalnici.....	81
Slika 76: Porušitev.....	81
Slika 77: Naprava za določanje globine prodora vode pod pritiskom.....	81
Slika 78: Označena globina prodora vode.....	82
Slika 79: Meritev globine vode.....	82
Slika 80: Nanos vazelina.....	84
Slika 81: Merjenje ultrazvočnih valov.....	84
Slika 82: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za agregat frakcije 0 – 16 mm po SIST 1026 in krivulja zrnivosti recikliranega agregata.....	85

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Količine gradbenih odpadkov od leta 2008 do leta 2014.....	17
Grafikon 2: Posed s stožcem	89
Grafikon 3: Gostota svežega betona	90
Grafikon 4: Vsebnost zraka v svežem betonu	91
Grafikon 5: Naraščanje tlačne trdnosti s starostjo	93
Grafikon 6: Gostota strjenega betona	94
Grafikon 7: Povprečna cepilna natezna trdnost.....	96
Grafikon 8: Primerjava tlačne in cepilne natezne trdnost	96
Grafikon 9: Prodor vode pod pritiskom	98
Grafikon 10: Primerjava E_D in tlačne trdnosti 7. in 28. dan	100

SEZNAM PRILOG

Priloga A:	MEJNE VREDNOSTI SESTAVE IN LASTNOSTI BETONA PO SIST 1026	A1
------------	--	----

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Stopnja recikliranja odpadnih materialov je v največji meri odvisna od razpoložljivosti naravnih surovin. Nizozemska, dežela mlinov na veter, je za njih prikrajšana zaradi majhnih zalog naravnega agregata, zato je bila prisiljena najti alternativo v času, ko je bila uporaba recikliranega agregata pri nas še v povojih.

V Sloveniji imamo od junija 2016 potrjen Program ravnanja z odpadki in preprečevanja nastajanja odpadkov RS do leta 2020 oz. do 2030, kjer je zapisano, koliko in katere vrste odpadkov imamo ter da moramo poskrbeti, da preprečujemo prekomerno nastajanje odpadkov, jih ločujemo, ustrezno recikliramo oziroma predelamo v nove proizvode ali pa jih uporabimo za pridobivanje energije. Direktiva o ravnanju z odpadki (2008/8/EC) določa petstopenjsko hierarhijo ravnanja z odpadki, kjer imata največjo prioriteto preprečevanje nastajanja odpadkov in ponovna uporaba. V primeru odpadkov iz gradbenih ruševin, ki so nastale pri vzdrževanju, gradnji ali rušenju objektov in javne infrastrukture se največkrat poslužujemo recikliranja le-teh. Ko konstrukcije dosežejo svojo življenjsko dobo, jih moramo zaradi varnosti največkrat odstraniti. V preteklosti, ko poudarek na varovanju okolja ni bil velik, so večinoma izvajali neselektivna rušenja. Sčasoma pa je postal poudarek na postopku rušenja večji, saj se je želel dobiti predelan odpadek, ki bi imel določeno kvaliteto in primerljive lastnosti z naravnimi surovinami. Prvi korak k temu je bil selektiven postopek rušenja, kjer se najprej odstranijo notranja oprema, stavbno pohištvo, nevarni materiali, nato sledi rušenje, zatem pa ločevanje po materialih ter končni postopek – recikliranje.

V Sloveniji je trenutno registriranih 195 podjetij oziroma posameznikov zbiralcev, ki se ukvarjajo s prevzemom odpadkov, 451 pa s predelavo. Za pridobitev obratovalnega dovoljenja je potrebno ustrezati določenim kriterijem v skladu z zakonodajo in uredbami.

Začetki betona segajo v čas starih Rimljanov, ki so bili znani kot odlični arhitekti in gradbeniki. Z razvojem na različnih področjih je prišlo do napredka tudi pri betonu, z izboljšanjem mehanskih in tehnoloških lastnosti in večjim spektrom uporabnosti. Njegova uporaba se je tako skozi stoletja povečevala vse do danes, ko je nepogrešljivi del gradbenega sveta. Beton je, kot najbolj masovno uporabljan material v gradbeništvu, tudi največji del gradbenih odpadkov, zato je pomembno, da ga znamo ponovno uporabiti. Ponovna uporaba pomeni, da znamo odpadek pravilno reciklirati in pridobiti recikliran proizvod. Pomembno je, da Slovenija sodeluje z vso družbo v krožnem gospodarstvu, ki pomeni večji gospodarski razvoj, nova delovna mesta in predvsem čisto okolje s čim manj odpadki.

Agregat je pomemben del betona, saj v povprečju predstavlja od 70 do 80 % njegove prostornine. Alternativa naravnemu agregatu je uporaba recikliranega agregata iz gradbenih ruševin. S tem rešimo dva problema, zmanjšamo porabo naravnih surovin in količino odpadkov, ki se odlagajo na deponijah.

V okviru diplomske naloge sta uporabljeni dve vrsti agregata: reciklirani beton in francoski naravni agregat. Reciklirani agregat smo pridobili s separacije blizu Ljubljane, ki je bil povečini iz odpadnega drobljenega betona. Francoski agregat je bil dostavljen v Konstrukcijsko prometni laboratorij UL FGG, v okviru evropskega projekta COST Action TU1404. Pri projektu sodelujejo tudi trije laboratoriji iz sloveniji, med njimi tudi laboratorij UL FGG, kjer preiskave vodi mentorica, prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov.

1.1 Namen, cilji, hipoteze in vsebina diplomske naloge

Za namen diplomske naloge sem najprej preučila relevantno zakonodajo, postopke rušenja in recikliranja. Sledi opis betona in njegovih sestavin ter priprava vzorcev in izvedba preskusov na recikliranem agregatu ter na sveži in strjeni betonski mešanici.

Cilj diplomske naloge je iz recikliranega betona v vlogi agregata izdelati beton s primerljivimi karakteristikami, kot jih ima beton iz naravnega agregata.

V diplomski nalogi smo predpostavili tudi dve hipotezi:

- Hipoteza 1: S pomočjo zmogljivega superplastifikatorja lahko znižamo količino vode in istočasno v betonsko mešanico vključimo večji delež finih delcev ter tako pripravimo beton iz recikliranega agregata, ki je dovolj plastičen v svežem stanju in ima ustrezno trdnost v strjenem stanju.
- Hipoteza 2: trdnosti betona iz naravnega agregata in betona iz recikliranega agregata sta primerljivi.

V diplomski nalogi se na začetku seznanimo s slovensko zakonodajo s področja varovanja okolja, odpadkov, gradbenih odpadkov in njihove predelave. Razloženi so termini, ki se najpogosteje uporabljajo pri gradbenih odpadkih. Nadalje so predstavljeni postopki rušenja in recikliranja (s pripadajočo mehanizacijo), katerih cilj je pridobitev kvalitetnih recikliranih materialov. V nalogi je predstavljen beton kot glavni gradbeni material in njegove osnovne sestavine: cement, voda in agregat

ter kemični dodatki. V skladu z določili standardov so predstavljeni postopki preskušanja agregatov ter svežih in strjenih betonov.

V praktičnem delu so bili na podlagi določil standardov izvedeni poskusi na recikliranem agregatu. S tem smo dobili vpogled v njegove fizikalne lastnosti, kar nas je usmerjalo pri določitvi recepture betona. Odločili smo se za tri različne vzorce, in sicer: prvi vzorec (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat), drugi (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) in tretji vzorec (0 – 16 mm recikliran agregat). Pri vsaki recepturi smo natehtali sestavine (cement, voda, agregat, superplastifikator) in zamešali svežo betonsko mešanico, na kateri smo izvedli preskuse in jo vgradili v kalupe. Po različnih dnevih nege v vodni kopeli smo izvedli preskuse na strjenem betonu. Na koncu smo podatke vnesli v preglednice in grafikone ter jih analizirali. Po končanih poskusih, rezultatih in ugotovitvah smo preverili veljavnost hipotez.

Pri delu sem si pomagala s standardi, zakonodajo, učbeniki, literaturo v slovenskem in tujem jeziku ter spletnimi viri. Praktičen del sem izvedla v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju, ki deluje v okviru Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

»Ta stran je namenoma prazna.«

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Okolje

Okolje si predstavljamo kot prostor v katerem živimo in se nahaja okoli nas.

»Okolje je celota delujočih živih in neživih elementov narave. Ti elementi neposredno in istočasno vplivajo na razvoj, presnovo in življenjsko aktivnost organizmov na območju, na katerem živijo. Neživi elementi okolja so: zrak, voda, tla, kemične spojine, svetloba, toplota, rečemo jim tudi abiotski dejavniki. Živi oziroma biotski elementi pa so: mikroorganizmi, živali in rastline. Delujejo v povezavi z neživimi in ustvarjajo na določenem območju značilne razmere. Okolje delimo na kopensko in vodno okolje, sestavine pa so v medsebojni povezavi. Sestavni element je voda, ki s prodiranjem v tla povzroči izhlapevanje v ozračje.« [1]

Zakon o varstvu okolja [2] v 3. členu definira »**okolje** kot tisti del narave, kamor seže ali bi lahko segel vpliv človekovega delovanja«.

2.1.1 Namen in cilji varovanja okolja

V 2. členu Zakon o varstvu okolja [2] namen varstva okolja predstavi kot »spodbujanje in usmerjanje takšnega družbenega razvoja, ki omogoča dolgoročne pogoje za človekovo zdravje, počutje in kakovost njegovega življenja ter ohranjanje biotske raznovrstnosti.«

Zakon o varstvu okolja [2] predpisuje cilje in potrebne spodbude za varstvo okolja.

»Cilji varstva okolja:

- preprečitev in zmanjšanje obremenjevanja okolja,
- ohranjanje in izboljševanje kakovosti okolja,
- trajnostna raba naravnih virov,
- zmanjšanje rabe energije in večja uporaba obnovljivih virov energije,
- odpravljanje posledic obremenjevanja okolja, izboljšanje porušenega naravnega ravnovesja in ponovno vzpostavljanje njegovih regeneracijskih sposobnosti,
- povečevanje snovne učinkovitosti proizvodnje in potrošnje ter
- opuščanje in nadomeščanje uporabe nevarnih snovi.«

Za doseganje ciljev varstva okolja se [2]:

- »spodbuja proizvodnjo in potrošnjo, ki prispeva k zmanjšanju obremenjevanja okolja,
- spodbuja razvoj in uporabo tehnologij, ki preprečujejo, odpravljajo ali zmanjšujejo obremenjevanje okolja in
- plačuje onesnaževanje in raba naravnih virov.«

V zadnjih letih se je na področju varstva okolja veliko spremenilo, predvsem pri ozaveščanju ljudi, skupin in posameznikov. Velik korak naprej se kaže že pri otrocih, kjer se jih z vzgojo doma ter v vrtcu in šoli z raznimi eko projekti poskuša učiti o pomembnosti zdravega in čistega okolja. Varstvo okolja pa ni zašlo samo v domača okolja, ampak tudi v gospodarstvo, kjer podjetja sledijo eko trendom in zakonom, s svojimi eko investicijami v podjetja pa podpirajo varstvo okolja.

2.2 Odpadki

V vsakem izmed nas je potrošniška žilica, ki nas sili v nakupovanje. In ko izdelka ne potrebujemo več, ga pogosto enostavno zavržemo. Kaj se potem dogaja z njim velikokrat ni več naša stvar. Odpadki nas spremljajo na vsakem koraku: doma, med preživljanjem prostega časa na delovnem mestu. Vsakemu izmed nas bi moralo biti pomembno, ne samo v kakšnem okolju živimo, ampak tudi kakšnega bomo zapustili našim zanamcem. Zavedati se moramo, da je varovanje okolja vseživljenski in vseprostorski 'projekt', pri katerem moramo sodelovati vsi. Z razvojem, dobro organiziranostjo in odgovornostjo nam lahko uspe priti do skupnega cilja: čisto okolje.

2.2.1 Definicija odpadkov

Po definiciji Zakona o varstvu okolja [2] je v 3. členu je **odpadek** opredeljen kot »snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava zavreči ali mora zavreči.«

2.2.2 Gradbeni odpadki

Gradbeni odpadki (slika 1) nastanejo »pri gradbenih delih, zaradi gradnje, rekonstrukcije, adaptacije, obnove ali odstranitve objekta.« [3] Ravnanje z gradbenimi odpadki ureja Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih.



Slika 1: Gradbeni odpadki [4]

2.2.3 Klasifikacija odpadkov in gradbenih odpadkov

Odpadke delimo najprej po dveh osnovnih kriterijih, glede na vir nastanka in z vidika nevarnostnega potenciala. Po viru nastanka, to je zaradi opravljanja različnih človeških dejavnosti, so odpadki razvrščeni v 20 skupin in 111 podskupin. Glede na nevarnost potenciala, pa se odpadki delijo na nevarne in nenevarne. Odpadki se delijo tudi po drugih kriterijih in sicer:

- komunalni (gospodinjiski, industrijski, odpadki obrti in storitvenih dejavnosti, ločeni, nevarni in kosovni) in nekomunalni,
- z vidika funkcionalnosti in predelave glede na materialno sestavo (biološko razgradljivi, steklo, plastika, kovine, sestavljeni materiali, odpadno usnje, kože, gume, kisline, kemikalije, mineralna olja, kamenje, zemlja, pepel, mulj),
- odpadki iz primarnih dejavnosti (kmetijstvo, gozdarstvo, rudarstvo), industrije, energetike, gradbeništva,
- odpadki iz naprav za obdelavo odpadkov in čiščenje odpadne vode,
- ločevanje nevarnih odpadkov glede na zakon po specifičnih skupinah (vsebnosti kovin živega srebra, svınca, kroma,
- v posebni kriterij spadajo odpadki z vsebnostjo azbesta, elektronski odpadki, CBP, PCT, iz proizvodnje TiO₂, odpadna in mineralna olja, baterije in akumulatorji, **gradbeni odpadki**, izrabljene avtomobilske gume in motorna vozila, infektivni zdravstveni odpadki, klavnični odpadki, kužni živalski odpadki, biorazgradljivi organski gospodinjiski odpadki, jedilna olja in masti, električni in elektronski odpadki, radioaktivni odpadki,
- razvrščanje po velikosti in masi.

(Povzeto po: [5])

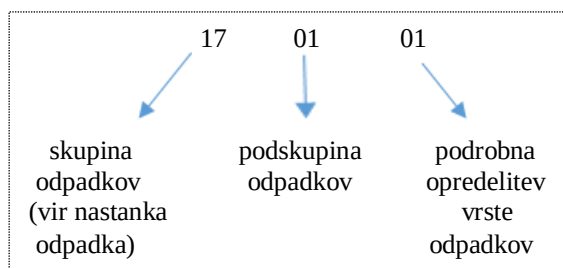
Za razvrščanje odpadkov ima vsaka država svoj pristop, vendar je še vedno boljše takšno razvrščanje odpadkov kot če ga ne bi bilo. Prav tako je globalno zelo pomembno ozaveščanje in izobraževanje prebivalstva o tem.

(Povzeto po: [5])

Slovenija kot članica Evropske unije uporablja seznam razvrščenih odpadkov s klasifikacijskimi številkami, ki je objavljen v Uradnem listu Evropske unije kot Sklep komisije z dne 18. decembra 2014 o spremembi Odločbe Komisije 2000/532/ES o seznamu odpadkov v skladu z Direktivo 2008/98/ES Evropskega parlamenta in Sveta in velja od začetka leta 2015. Slovenija tako uporablja Evropsko klasifikacijo odpadkov EWC. Pri vrednotenju nevarnih lastnosti odpadkov se uporabljajo merila in mejne vrednosti za posamezne snovi, ki so določena v Prilogi III k Direktivi 2008/98/ES. Nevarni odpadki so vsi odpadki na seznamu, ki so označeni z zvezdico (*) v skladu z zgoraj omenjeno direktivo. Izjema so odpadki, za katere se uporablja 20. člen omenjene direktive. Odpadki so razvrščeni v 20 klasifikacijskih skupin in 111 podskupin glede na vir nastanka. Določeni so s šestmestno številčno kodo za odpadke in z dvomestno in štirimestno številčno kodo naslovov poglavij, kot je prikazano na sliki 2. Za iskanje posameznih odpadkov na seznamu je potrebno slediti naslednjim korakom:

- v poglavjih od 01 do 12 ali od 17 do 20 poiščemo vir nastanka odpadka,
- ko najdemo pravo poglavje poiščemo ustrezno šestmestno kodo odpadka,
- ne iščemo kod v teh poglavjih, ki se končajo z 99.

Pomembno je, da vemo, da je lahko posamezna proizvodna dejavnost oz. njihova enota, razvrščena v več poglavij, saj različna poglavja ustrezajo različnim korakom v procesu proizvodnje. Kot primer lahko navedemo npr. proizvodnjo avtomobilov za katero velja, da so odpadki njihove dejavnosti razvrščeni v poglavju 12 (odpadki iz oblikovanja in površinske obdelave kovin), v poglavju 11 (anorganski odpadki, ki vsebujejo kovine, iz obdelave in površinske zaščite kovin) in v poglavju 08 (odpadki iz uporabe površinske zaščite).



Slika 2: Prikaz klasifikacije gradbeni odpadkov

Gradbenim odpadkom pripada klasifikacijska številka 17, ki je podrobno predstavljena kot preglednica 1. Posamezna vrsta odpadka je določena s šestmestno kodo. Primer prikaza klasifikacije gradbenih odpadkov je prikazan na sliki 2.

Preglednica 1: Klasifikacija gradbenih odpadkov [6]

17	Gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov (vključno z zemeljskimi izkopi z onesnaženih območij)
17 01	Beton, opeke, ploščice in keramika
17 01 01	Beton
17 01 02	Opeke
17 01 03	Ploščice in keramike
17 01 06*	Mešanice ali ločene frakcije betona, opeke, ploščic in keramike, ki vsebujejo nevarne snovi
17 01 07	Mešanice betona, opeke, ploščic in keramike, ki niso navedene v 17 01 06
17 02	Les, steklo in plastika
17 02 01	Les
17 02 02	Steklo
17 02 03	Plastika
17 02 04*	Steklo, plastika in les, ki vsebujejo nevarne snovi, ali so z njimi onesnaženi
17 03	Bitumenske mešanice, premogov katran in proizvodi, ki vsebujejo katran
17 03 01*	Bitumenske mešanice, ki vsebujejo premogov katran
17 03 02	Bitumenske mešanice, ki niso navedene v 17 03 01
17 03 03*	Premogov katran in proizvodi, ki vsebujejo katran
17 04	Kovine (vključno z zlitinami)
17 04 01	Baker, bron, medenina
17 04 02	Aluminij
17 04 03	Svinec
17 04 04	Cink
17 04 05	Železo in jeklo
17 04 06	Kositer
17 04 07	Mešanice kovin
17 04 09*	Kovinski odpadki, onesnaženi z nevarnimi snovmi
17 04 10*	Kabli, ki vsebujejo olje, premogov katran in druge nevarne snov
17 04 11	Kabli, ki niso navedeni v 17 04 10 30.12.2014 L 370/78 Uradni list Evropske unije SL

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

17 05	Zemlja (vključno z zemljo, izkopano na onesnaženih območjih), kamenje in material, izkopen pri poglobljanju dna z bagranjem
17 05 03*	Zemlja in kamenje, ki vsebujeta nevarne snovi
17 05 04	Zemlja in kamenje, ki nista navedena v 17 05 03
17 05 05*	Material, izkopen pri poglobljanju dna z bagranjem, ki vsebuje nevarne snovi
17 05 06	Material, izkopen pri poglobljanju dna z bagranjem, ki ni naveden v 17 05 05
17 05 07*	Tolčenec izpod železniških tirov in pragov, ki vsebuje nevarne snovi
17 05 08	Tolčenec izpod železniških tirov in pragov, ki ni naveden v 17 05 07
17 06	Izolirni materiali in gradbeni materiali, ki vsebujejo azbest
17 06 01*	Izolirni materiali, ki vsebujejo azbest
17 06 03*	Drugi izolirni materiali, ki sestojijo iz nevarnih snovi ali jih vsebujejo
17 06 04	Izolirni materiali, ki niso navedeni v 17 06 01 in 17 06 03
17 06 05	Gradbeni materiali, ki vsebujejo azbest
17 08	Gradbeni materiali na osnovi sadre
17 08 01*	Gradbeni materiali na osnovi sadre, ki so onesnaženi z nevarnimi snovmi
17 08 02	Gradbeni materiali na osnovi sadre, ki niso navedeni v 17 08 01
17 09	Drugi gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov
17 09 01*	Gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov, ki vsebujejo živo srebro
17 09 02*	Gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov, ki vsebujejo PCB (npr. tesnilne mase, ki vsebujejo PCB, talne obloge na osnovi smol, ki vsebujejo PCB, zasteklitve z izolirnimi stekli, ki vsebujejo PCB, in kondenzatorji, ki vsebujejo PCB)
17 09 03*	Drugi gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov (vključno z mešanicami odpadkov), ki vsebujejo nevarne snovi
17 09 04	Mešanice gradbeni odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov, ki niso navedene v 17 09 01, 17 09 02 in 17 09 03

2.3 Zakonodaja na področju gradbenih odpadkov

Odpadke in ravnanje z njimi ureja obsežna zakonodaja kot je Zakon o varstvu okolja, Uredba o odpadkih, Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih.

Zakon o varstvu okolja

Začetki slovenske zakonodaje na področju odpadkov segajo v leto 1992, ko smo dobili Zakon o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 32/92 in 1/96). Na novo je bil Zakon o varstvu okolja (ZVO-1) izdan leta 2004 (Uradni list RS, št. 41/2004), nato pa se je zakonodaja še dopolnjevala in spreminjala [2]:

- »Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1A (Uradni list RS, št. 20/06 z dne 24. 2. 2006),
- Zakon o varstvu okolja – uradno prečiščeno besedilo –ZVO-1- UBP1 (Uradni list RS, št. 39/06 z dne 13. 4. 2006),
- Zakon o meteorološki dejavnosti – ZMetD (Uradni list RS, št. 49/06 z dne 12. 5. 2006),
- Odločbo o delni razveljavitvi drugega odstavka 187. člena Zakona o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 66/06 z dne 27. 6. 2006),
- Zakon o prostorskem načrtovanju – ZPNačrt (Uradni list RS, št. 33/07 z dne 13. 4. 2007),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o financiranju občin – ZFO-1A (Uradni list RS, št. 57/08 z dne 10. 6. 2008),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1B (Uradni list RS, št. 70/08 z dne 11. 7. 2008),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1C (Uradni list RS, št. 108/09 z dne 28. 12. 2009),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o prostorskem načrtovanju – ZPNačrt-A (Uradni list RS, št. 108/09 z dne 28. 12. 2009),
- Zakon o spremembah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1D (Uradni list RS, št. 48/12 z dne 26. 6. 2012),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1E (Uradni list RS, št. 57/12 z dne 27. 7. 2012),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1F (Uradni list RS, št. 92/13 z dne 8. 11. 2013),
- Zakon o spremembah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1G (Uradni list RS, št. 56/15 z dne 29. 7. 2015),
- Zakon o spremembah Zakona o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1H (Uradni list RS, št. 102/15 z dne 24. 12. 2015),
- Zakon o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja – ZVO-1I (Uradni list RS, št. 30/16 z dne 25. 4. 2016).«

Uredba o odpadkih

»Uredba o odpadkih [7] z namenom varstva okolja in varovanja človekovega zdravja določa pravila ravnanja in druge pogoje za preprečevanje ali zmanjševanje škodljivih vplivov nastajanja odpadkov in ravnanja z njimi ter zmanjševanje celotnega vpliva uporabe naravnih virov in izboljšanje učinkovitosti uporabe naravnih virov.«

Na podlagi 1. odstavka 2. člena Uredbe o odpadkih se le-ta [7] »uporablja za vse odpadke, razen če je s posebnim predpisom za posamezno vrsto ali tok odpadkov drugače določeno.«

Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih

»Na podlagi 5. in 6. odstavka 20. člena Zakona o varstvu okolja [2] je Vlada Republike Slovenije izdala Uredbo o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih«.

2.3.1 Ravnanje z odpadki

Po definiciji v 3. členu Zakona o varstvu okolja [2] je **ravnanje z odpadki** »zbiranje, prevoz, predelava in odstranjevanje odpadkov, vključno z nadzorom nad takimi postopki in dejavnostmi po prenehanju obratovanja naprave za odstranjevanje odpadkov, ter delovanje osebe, ki z odpadki trguje ali jih posreduje.«

V 5. odstavku 20. člena Zakona o varstvu okolja [2] je določeno, da »vlada s predpisom določi pravila ravnanja in druge pogoje za ravnanje z odpadki, nanašajo pa se zlasti na:

1. preprečevanje odpadkov,
2. razvrščanje odpadkov na seznane,
3. načine ravnanja z odpadki,
4. pogoje za vpis v evidenco iz tretjega odstavka tega člena,
5. pogoje za pridobitev predpisanih dovoljenj,
6. načrtovanje, gradnjo in obratovanje naprav za ravnanje z odpadki,
7. usposobljenost oseb za ravnanje z odpadki,
8. ukrepe, povezane s prenehanjem delovanja naprav za ravnanje z odpadki in
9. vodenje evidenc o odpadkih in ravnanju z njimi ter način poročanja ministrstvu, pristojnemu za varstvo okolja.«

2.3.2 Terminologija pri ravnanju z odpadki

Na podlagi Zakona o varstvu okolja [2] ter Uredbe o odpadkih [7] so v tem poglavju razloženi termini, povezani z ravnanjem z odpadki.

Razloženi termini povezani z odpadki so naslednji [2], [7], [12]:

- »**Evidenčni list** je listina, s katero imetnik odpadkov in oseba, ki odpadke prevzame, potrđita oddajo in prevzem pošiljke odpadkov.
- **Gradbeno dovoljenje** je odločba, s katero pristojni upravni organ dovoli gradnjo in s katero določi konkretne pogoje, ki jih je treba pri gradnji upoštevati.
- **Gradnja** je izvedba gradbenih in drugih del in obsega gradnjo novega objekta, rekonstrukcijo objekta in odstranitev objekta.
- **Imetnik odpadkov** je povzročitelj odpadkov ali pravna ali fizična oseba, ki ima odpadke v posesti.
- **Investitor** je pravna ali fizična oseba, ki naroči graditev objekta, ali ki jo sam izvaja.
- **Izvajalec** je pravna ali fizična oseba, ki kot gospodarsko dejavnost opravlja storitve pri izvajanju pripravljalnih del na gradbišču, izvajanju gradbenih del, montažah in vgrajevanju strojnih in električnih inštalacij ter izvajanju zaključnih gradbenih del.
- **Izvajalec obdelave** je predelovalec ali odstranjevalec.
- **Ločeno zbiranje** je zbiranje, pri katerem so tokovi odpadkov ločeni glede na vrsto in naravo odpadkov, tako da se olajša posamezna obdelava.
- **Naprava za obdelavo odpadkov** je naprava v skladu z zakonom, ki ureja varstvo okolja, v kateri se odpadki obdelujejo.
- **Nenevarni odpadek** je odpadek, ki se ne uvršča med nevarne odpadke.
- **Nevarni odpadek** je odpadek, ki kaže eno ali več nevarnih lastnosti iz priloge Uredbe 1357/2014/EU.
- **Obdelava** so postopki predelave ali odstranjevanja, vključno s pripravo za predelavo ali odstranjevanje.
- **Oddaja odpadkov** je oddaja odpadkov v nadaljnje ravnanje z evidenčnim listom.
- **Odpadek** je snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava zavreči ali mora zavreči.
- **Odstranjevalec** je pravna oseba ali samostojni podjetnik posameznik, ki kot dejavnost opravlja odstranjevanje odpadkov v skladu s to uredbo.

- **Odstranjevanje** je postopek, ki ni predelava, tudi če je sekundarna posledica postopka pridobivanje snovi ali energije. Postopki odstranjevanja so navedeni v prilogi 1, ki je sestavni del Uredbe o odpadkih, pri čemer pa so mogoči tudi drugi postopki odstranjevanja.
- **Odstranitev objekta** je izvedba del, s katerimi se objekt odstrani, poruši ali razgradi in vzpostavi prejšnje stanje.
- **Ponovna uporaba** je postopek, pri katerem se proizvodi ali njihovi sestavni deli, ki niso odpadek, ponovno uporabijo za enak namen, za katerega so bili prvotno izdelani.
- **Povzročitelj odpadkov** je oseba, katere delovanje ali dejavnost povzroča nastajanje odpadkov (izvirni povzročitelj odpadkov), ali oseba, ki izvaja predobdelavo, mešanje ali druge postopke, s katerimi se spremenijo lastnosti ali sestava teh odpadkov.
- **Predelava** je postopek, katerega glavni rezultat je, da se odpadki koristno uporabijo v obratu, v katerem so bili predelani, ali v drugih gospodarskih dejavnostih, tako da nadomestijo druge materiale, ki bi se sicer uporabili za izpolnitev določene funkcije, ali so pripravljeni za izpolnitev te funkcije. Postopki predelave so navedeni v prilogi 2, ki je sestavni del Uredbe o odpadkih, pri čemer pa so mogoči tudi drugi postopki predelave.
- **Predelovalec** je pravna oseba ali samostojni podjetnik posameznik, ki kot dejavnost opravlja predelavo odpadkov v skladu s to uredbo.
- **Predhodno skladiščenje** odpadkov je skladiščenje odpadkov pri zbiralcu v zbirnem centru, v katerem se odpadki raztovorijo za namene priprave za prevoz do kraja njihove obdelave, pri čemer predhodno skladiščenje odpadkov ni postopek D 15 iz priloge 1 ali postopek R 13 iz priloge 2 Uredbe o odpadkih.
- **Preprečevanje odpadkov** so ukrepi, ki se sprejmejo, preden snov, material ali proizvod postane odpadek, in s katerimi se zmanjšajo:
 - količina odpadkov, vključno s ponovno uporabo proizvodov ali podaljšanjem njihove življenjske dobe,
 - škodljivi vplivi nastalih odpadkov na okolje in človekovo zdravje ali
 - vsebnost nevarnih snovi v materialih in proizvodih.
- **Prepuščanje odpadkov** je oddaja odpadkov v nadaljnje ravnanje brez evidenčnega lista, kadar je to dovoljeno na podlagi posebnega predpisa, ki ureja ravnanje z določeno vrsto odpadkov.
- **Prevoznik** je pravna oseba ali samostojni podjetnik posameznik, ki kot dejavnost opravlja prevažanje odpadkov drugih imetnikov odpadkov v skladu z Uredbo o odpadkih.
- **Priprava** za ponovno uporabo so postopki predelave, v katerih se proizvodi ali njihovi sestavni deli, ki so postali odpadki, s preverjanjem, čiščenjem ali popravili pripravijo za ponovno uporabo brez kakršne koli druge predobdelave.

- **Recikliranje** je postopek predelave, v katerem se odpadne snovi ponovno predelajo v proizvode, materiale ali snovi za prvotni ali drug namen. Recikliranje vključuje tudi ponovno predelavo organskih snovi. Za recikliranje se ne šteje energetska predelava ali ponovna predelava v materiale, ki se bodo uporabili kot gorivo ali za zasipanje.
- **Skladiščenje** odpadkov je skladiščenje odpadkov pri izvajalcu obdelave do njihove predelave ali odstranjevanja.
- **Začasno skladiščenje** odpadkov je skladiščenje odpadkov pri izvornem povzročitelju odpadkov na kraju njihovega nastanka do njihove oddaje ali prepustitve v zbiranje ali obdelavo, pri čemer začasno skladiščenje odpadkov ni postopek D 15 iz priloge 1 ali postopek R 13 iz priloge 2 Uredbe o odpadkih.
- **Zbiralec** je pravna oseba ali samostojni podjetnik posameznik, ki kot dejavnost opravlja zbiranje odpadkov v skladu s to uredbo.
- **Zbiranje** je prevzemanje odpadkov, vključno z njihovim predhodnim sortiranjem in predhodnim skladiščenjem za namene prevoza do naprave za obdelavo odpadkov. Pri predhodnem sortiranju odpadkov se številka odpadka iz 5. člena te uredbe ne spremeni.
- **Zbirni center** je objekt za prevzemanje odpadkov, vključno z njihovim predhodnim sortiranjem in predhodnim skladiščenjem za namene prevoza do naprave za obdelavo odpadkov.«

2.3.3 Ravnanje z gradbenimi odpadki

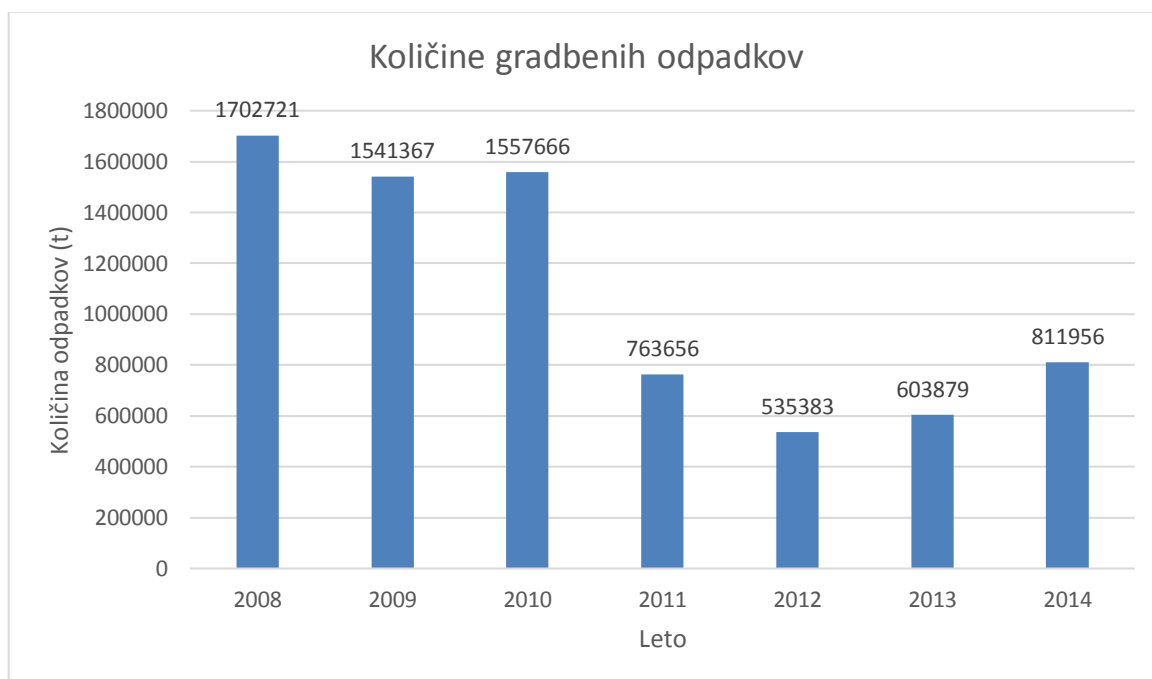
Poznamo različne vrste gradbenih odpadkov glede na izvor in komponente, kar je razvidno iz preglednice 2. Odpadke dobimo iz različnega okolja. V Evropski uniji je zelo pomembno, da odpadke ločimo v tri skupine: gradbeni odpadki, odpadki izkopavanj in industrijski odpadki. Odpadke lahko nadalje recikliramo in dobimo sekundarne surovine.

Preglednica 2: Gradbeni odpadki in ruševine [13]

Izvorni sektor		Komponente
gradbeni odpadki	odpadki, ki so nastali pri vzdrževanju in/ali gradnji objektov in javne infrastrukture	beton cement in različne malte konglomerati ali bitumenske mešanice opeka, strešniki in bloki izkopana zemlja
ruševine	odpadki, ki so nastali pri vzdrževanju in/ali delnem ali popolnem rušenju objektov in javne infrastrukture	les papir, celuloza in polistiren kovine plastika kreda keramika steklo azbest
odpadki od gradnje in rušenja cest	odpadki, ki so nastali pri vzdrževanju cest in gradbenih delih	konglomerati in bitumenske mešanice izkopana zemlja beton les kovine plastika
izkopavanje zemlje in kamnin	odpadki, ki so nastali pri zemeljskih delih za gradnjo javnih objektov in/ali izkopavanjih	izkopana zemlja les

Program ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS v skladu z zahtevami Uredbe o odpadkih, Uredbe o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo ter Uredbe o odlagališčih odpadkov je dokument, ki ga je sprejela Vlada RS, dne 30. 06. 2016, v katerem je v povzetku zapisano, da je v Sloveniji nastalo največ gradbenih odpadkov in zemeljskih izkopov in to kar 24 % vseh odpadkov. [8]

Količino gradbenih odpadkov od leta 2008 do leta 2014, ki jih je zbral Statistični urad RS in na podlagi katerih je bil pripravljen dokument Program ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS je razviden iz grafikona 1. O pridobivanju podatkov moramo omeniti, da se je leta 2011 spremenila metodologija pridobivanja le-teh.



Grafikon 1: Količine gradbenih odpadkov od leta 2008 do leta 2014 [9]

Razlogi za povečanje količin gradbenih odpadkov po letu 2012 so lahko: bolj dosledno upoštevanje zakonodaje, večji nadzor nad odpadki, povečanje gradnje, zmanjšanje odlaganja gradbenih odpadkov na divjih odlagališčih ... Podatki Programa ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS nam kažejo, da se je v obdobju od leta 2006 do 2014 na splošno zmanjšalo odlaganje za 75 %, število odlagališč pa za 68 %.

Program ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS je operativni program RS za preprečevanje nastajanja odpadkov, zagotavljanja predpisanega ravnanja z odpadki in doseganje zastavljenih ciljev po kategorijah o ravnanju z odpadki za obdobje do leta 2020 oziroma 2030.

Program je pripravljen tudi za gradbene odpadke, skupaj z zemeljskim izkopom in rudarskimi odpadki, z naslednjimi posebnimi cilji [8]:

- »pri ravnanju z gradbenimi odpadki slediti ciljem krožnega gospodarstva tako, da se bo v letu 2020 najmanj 70 odstotkov njihove količine pripravilo za ponovno uporabo, recikliranje in snovno predelavo, za zemeljske izkope pa zagotovilo višjo stopnjo uporabnosti s predpisanimi merili za preglednejšo razvrščanje zemeljskega izkopa glede na vsebnost onesnaževal in vsebnost onesnaževal v izlužku;
- ureditev uporabe recikliranih gradbenih odpadkov tako, da so merila za določitev kakovosti recikliranih gradbenih odpadkov odvisna od namena in načina njihove uporabe;

- urediti ukrepanje pri sanaciji onesnaženih območij in način sanacijskega ukrepanja;
- ureditev uporabe recikliranih gradbenih odpadkov tako, da so merila za določitev kakovosti recikliranih gradbenih odpadkov odvisna od namena in načina njihove uporabe;
- izdelava gradiva za ozaveščanje prebivalstva o nevarnostih za zdravje in okolje, ki nastajajo pri ravnanju z gradbenimi odpadki, ki vsebujejo azbest, in z grelnimi napravami, ki vsebujejo azbest;
- prijava vseh rekonstrukcij ali odstranitvev objektov in vzdrževalnih del na objektih, instalacijah in napravah, ki vsebujejo azbest;
- uvedba ustreznega finančnega mehanizma za ravnanje z odpadki, ki vsebujejo azbest;
- podrobnejši pregled postopkov, povezanih s pripravo in uporabo umetno pripravljene zemljine.«

Gradbeni odpadki nastanejo pri gradnjah v deležu 10 %, pri obnovah objektov in rušenju le-teh pa v deležu 90 %. Izvirajo iz gradnje gradbenih inženirskih objektov, geotehnični del, gradnje cest in mostov. Beton in opeka sta glavna materiala gradbenih odpadkov v Sloveniji, njun delež dosega 70 % do 90 % gradbenih odpadkov. Ostali materiali v gradbenih odpadkih, ki imajo delež od 10 % do 30 %, so les, kovine, asfalt in drugi odpadki gradbišč. Razmerja ter vrste gradbenih odpadkov so razvidne iz preglednic 3 in 4, kjer je prikazana tudi letna količina nevarnih gradbenih odpadkov.

Preglednica 3: Sestava in letna količina nastajanja nenevarnih gradbenih odpadkov [8]

VRSTA ODPADKA/ KOLIČINA (t)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Beton, opeka, ploščice in keramika (podskupina 17 01, razen 17 01 06*)	467.813	274.393	178.933	186.784	417.128	125.001	60.160	66.147	83.512
Bitumenske mešanice (17 03 02)	87.841	81.866	44.192	69.119	169.290	99.455	53.322	59.154	104.239
Les, steklo in plastika (podskupina 17 02, razen 17 02 04*)	10.477	10.740	10.902	6.410	10.874	3.761	10.470	8.087	7.575
Kovine, vključno z zlitinami (podskupina 17 04, razen 17 04 09*– onesnažene kovine in 17 04 10*– kabli)	18.017	13.166	262.627	12.250	65.498	11.853	10.427	12.432	35.021
Izolirni materiali (17 06 04)	6.664	779	3.140	3.685	860	1.572	917	367	521
Gradbeni materiali na osnovi sadre (17 08 02)	13.898	725	1.453	1.214	1.039	902	786	830	674
Mešani gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja	84.836	112.030	143.835	99.338	58.193	82.223	24.749	27.123	33.476

Preglednica 4: Letna količina nastajanja nevarnih gradbenih odpadkov [8]

Vrsta nevarnih gradbenih odpadkov/količina (t)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Nearni gradbeni odpadki (17 01 06*; 17 02 04*; 17 03 01*, 03*; 17 04 09*, 10*; 17 05 03*, 05*, 07*; 17 06 01*, 03*, 05*; 17 08 01*; 17 09 01*, 02*, 03*)	8.414	11.226	12.597	2.109	8.194	4.099	5.024	2.316	19.435

Glede na velike količine gradbenih odpadkov, ki jih je v Sloveniji največ, je zelo pomembno, da znamo trajnostno ravnati z odpadki in poskrbeti, da se le-ti lahko ponovno uporabijo, reciklirajo ali vsaj primerno odlagajo in skladiščijo.

2.3.4 Hierarhija ravnanja z odpadki

Direktiva o ravnanju z odpadki (2008/98/EC) uveljavlja nov pristop k obravnavi odpadka, ki naj bi bil vpeljan do leta 2020, in predvideva, da se bo ponovna uporaba in recikliranje odpadnih materialov povečalo na najmanj 51 % skupne mase, pri gradbenih odpadkih pa na najmanj 70 % skupne mase. Odpadki so vir surovin, katere je potrebno ponovno uporabiti, ko je to možno. Najlažje bomo dosegli zahtevan delež ponovne uporabe in recikliranja, če bomo odpadke pričeli ločevati že ob nastanku. (Povzeto po: [10])

Ne smemo pozabiti, da je »za ravnanje odpadkov odgovoren povzročitelj odpadkov oz. t. i. investitor, ki mora ravnati v skladu s hierarhijo in zagotoviti obdelavo odpadkov tako, da jih obdela sam ali pa odda v nadaljnje ravnanje zbiralcem ali izvajalcem obdelave odpadkov.« [11]

Hierarhijo določa Direktiva o ravnanju z odpadki (2008/98/EC). Omenjena direktiva določa 5-stopenjsko hierarhijo ravnanja z odpadki, prikazano na sliki 3, »ki se upošteva kot prednostni vrstni red pri načrtovanju politike in pripravi zakonodaje na področju odpadkov, in sicer [14]:

1. preprečevanje nastajanja odpadkov,
2. priprava odpadkov za ponovno uporabo,
3. recikliranje,
4. druga predelava (npr. energetska predelava),
5. odstranjevanje.«



Slika 3: Hierarhija ravnanja z odpadki [14]

2.3.5 Investitor, povzročitelj odpadkov in načrt gospodarjenja z gradbenimi odpadki

Omenili smo, da je za ravnanje z odpadki odgovoren povzročitelj odpadkov oz. investitor, ki izvaja gradbena dela, s katerimi nastanejo gradbeni odpadki. Povzročitelj mora zato, da zagotovi trajnostni razvoj, pripraviti načrt gospodarjenja z gradbenimi odpadki, ki je pomemben dokument in tudi del elaborata projektne dokumentacije za pridobitev gradbenega dovoljenja PGD. Predpisuje ga Uredba o odpadkih. S tem dokumentom [11] »izdelovalec poda podatke o vrstah in količinah skupaj predvidenih nastalih gradbenih odpadkov na gradbišču ter o postopkih in načinih ravnanja z njimi.« Načrt gospodarjenja z gradbenimi odpadki investitor priloži, če je za gradnjo objekta, rekonstrukcijo ali odstranitev predpisana pridobitev gradbenega dovoljenja skladno z zakonodajo o graditvi objektov. Obstaja izjema, kjer gradbenega dovoljenja PGD in posledično načrta gospodarjenja z gradbenimi odpadki ni potrebno priložiti. Takšna izjema je, če je investitor fizična oseba ali če gre za gradnjo oz. rekonstrukcijo enostavnega nezahtevnega objekta (ni namenjen prebivanju in ne vpliva na okolje), ki ne potrebuje statičnih in gradbenotehničnih izračunov.

(Povzeto po: [11])

Na podlagi 27. člena Uredbe o odpadkih mora [7] »načrt gospodarjenja z odpadki vsebovati najmanj:

1. podatke o količinah odpadkov po številkah odpadkov in predvidenih trendih njihovega nastajanja,
2. opis obstoječih in predvidenih tehničnih, organizacijskih in drugih ukrepov za preprečevanje odpadkov z vidika zahtev iz 9. člena te uredbe,
3. opis obstoječih in predvidenih načinov ravnanja z odpadki s podatki o:

- a) začasnem skladiščenju odpadkov,
 - b) ločenem zbiranju v skladu z 18. členom te uredbe,
 - c) oddaji ali prepuščanju odpadkov v skladu s 24. členom te uredbe,
 - č) obdelavi, ki jo izvaja ali namerava izvajati sam, in
 - d) lastni obstoječi ali načrtovani napravi za obdelavo odpadkov,
4. opis ukrepov za preprečevanje in zmanjševanje škodljivih vplivov na okolje in človekovo zdravje pri začasnem skladiščenju odpadkov in pri njihovi obdelavi, če jo izvaja sam, v skladu z 19. in 43. členom te uredbe ter z vidika zahtev iz prvega odstavka 10. člena in 18. člena te uredbe, in
 5. preglednico predvidenih ukrepov iz 2. in 4. točke tega odstavka z navedbo rokov izvedbe.«

V primeru, ko gre za rekonstrukcijo ali odstranitev oz. t.i. rušitev stavbe zgrajene med 1950 in 1980, je potrebno k načrtu priložiti tudi popis v stavbo vgrajenih gradbenih materialov, ki vsebujejo PCB (Poliklorirani bifenili kot umetne organske spojine uporabljene za transformatorje, kondenzatorje, termoizolacijo, maziva za črpalke, plastične mase, barve, lake, lepila, itd.)

(Povzeto po: [15])

Poleg načrta gospodarjenja z odpadki mora investitor v skladu z Uredbo o preprečevanju in zmanjševanju emisije delcev iz gradbišč (Uradni list RS, št. 21/2011) poskrbeti za elaborat z zahtevami in ukrepi za preprečevanje in zmanjševanje emisije delcev iz gradbišča ter ga priložiti projektu izvedbe.

(Povzeto po: [11])

Vsak povzročitelj odpadkov mora voditi tudi evidenco o nastajanju in ravnanju z odpadki, ki jo mora voditi izvirni povzročitelj odpadkov, vse skladno z 28. členom Uredbe o odpadkih [7] »v kateri so podatki o številkah odpadkov in količinah:

1. nastalih odpadkov in virih njihovega nastajanja,
2. začasno skladiščenih odpadkov,
3. odpadkov, ki jih obdeluje sam,
4. odpadkov, oddanih v nadaljnje ravnanje drugim osebam v RS, in
5. odpadkov, poslanih v obdelavo v druge države članice EU in tretje države, z navedbo postopka obdelave, kraja obdelave in izvajalca obdelave.«

Poleg vodenja evidence povzročitelj odpadkov oz. investitor, ko odda odpadke zbiralcu, od njega prejme evidenčni list s potrditvijo oddaje in prevzema odpadkov. Za urejanje odpadkov, ki nastanejo na

gradbišču, je odgovoren investitor, ne pa izvajalec gradbenih del, razen če pooblasti izvajalca del, da v investitorjevem imenu to ureja ali če je investitor tudi v vlogi izvajalca.

(Povzeto po: [11])

Skladno z Uredbo o odpadkih [7] mora izvirni povzročitelj odpadkov vsako leto do 31. marca predložiti ministrstvu poročilo o nastalih odpadkih in ravnanju z njimi za preteklo leto.

2.3.6 Zbiralec in predelovalec gradbenih odpadkov

Zbiralec odpadkov mora biti vpisan v evidenco zbiralcev odpadkov pristojnega ministrstva in zbira odpadke skladno z načrtom zbiranja odpadkov. Poleg tega vodi [7] »evidenco o zbiranju odpadkov, v kateri so podatki o številkah in količinami:

1. zbranih odpadkov in imetnikih odpadkov, od katerih jih prevzema, ločeno po odpadkih, ki so bili zbiralcu oddani, in odpadkih, ki so bili zbiralcu prepuščeni,
2. predhodno skladiščenih odpadkov, ločeno po kraju predhodnega skladiščenja, če razpolaga z več zbirnimi centri,
3. odpadkov, oddanih v nadaljnje ravnanje drugim osebam v RS, in o osebah, ki jim odda te odpadke, ter
4. odpadkov, poslanih v obdelavo v druge države članice EU in tretje države, z navedbo postopka obdelave, kraja obdelave in izvajalca obdelave.«

Evidenco mora zbiralec hraniti najmanj 3 leta in pristojnim osebam omogočiti vpogled, do 31. 3. tekočega leta pa mora poročati na ministrstvo za preteklo leto o zbiranju odpadkov.

Zbiralec mora za zbiranje odpadkov imeti najmanj en zbirni center za vsaj eno vrsto gradbenih odpadkov, skladno z uredbo in klasificiranjem odpadkov. O zbiranju in načinu oddaje odpadkov mora objaviti javno obvestilo. Odpadke zbiralec lahko skladišči največ eno leto v zbirnem centru. Ko zbiralec prejme odpadke od povzročitelja odpadkov, izpolni evidenčni list, ki pomeni oddajo in prevzem odpadkov.

(Povzeto po: [11])

Predelovalec gradbenih odpadkov mora imeti okoljevarstveno dovoljenje za predelavo odpadkov, odpadke pa mora predelovati skladno z načrtom ravnanja z odpadki in načini uporabe recikliranih gradbenih materialov. Predelovalec mora slediti operativnemu programu varstva okolja na področju

ravnanja z gradbenimi odpadki in voditi evidenco o predelavi in predelanih odpadkih, ki niso več odpadki, vse skladno z Uredbo o odpadkih. Hraniti mora evidence in evidenčne liste najmanj pet let in do 31. 3. tekočega leta oddati poročilo o predelavi gradbenih odpadkov pristojnemu ministrstvu.

2.3.7 Predelovanje gradbenih odpadkov

Najpomembnejši postopek ravnanja z odpadki ter tudi z gradbenimi odpadki je predelava. Iz predelanih oz. recikliranih odpadkov nastanejo novi reciklirani agregati. Glavni cilj predelave je proizvodnja novih recikliranih agregatov, ki so del osnovnih materialov gradbeništva. Odpadkom se po predelavi spremeni namembnost in posledično tudi osnova zakonodaje. V zbirnem centru predelovanje odpadkov lahko opravlja samo predelovalec z okoljevarstvenim dovoljenjem. Gradbene odpadke pa je možno predelati tudi na gradbišču. Na gradbišču nastanejo gradbeni odpadki, katere lahko na mestu samem upravljalec z okoljevarstveni dovoljenjem s premičnimi napravami predela, po postopku R5 z recikliranjem. Postopek R5 pomeni recikliranje oz. pridobivanje drugih anorganskih materialov.

(Povzeto po: [11])

2.3.8 Gradbeni proizvod (CPR)

Gradbeni proizvodi so zakonsko opredeljeni v Uredbi (EU) št. 305/2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov (CPR). Uredba skrbi za nadzor harmoniziranega področja gradbenih proizvodov in recikliranih gradbenih proizvodov. Ob vključevanju recikliranih proizvodov v gradbene objekte je treba zagotoviti, da so gradbeni objekti ali njihove enote ustrezni za predvideno uporabo. Prvenstveno morajo dosegati ustrezno mehansko odpornost in stabilnost, poleg tega pa ekonomsko sprejemljivo življenjsko dobo. Objekti namreč ne smejo ogrožati življenja in zdravja svojih prebivalcev. Osnovnih zahtev, ki jih morajo izpolnjevati gradbeni proizvodi, je sedem, od mehanske odpornosti in stabilnosti do zahtev glede zdravja, higiene, požarne varnosti, protihrupne zaščite, energijske učinkovitosti in trajnostnega razvoja.

(Povzeto po: [11])

V okviru trajnostnega razvoja in ravnanja z viri ter zahteve po reciklirarnju pa so zahteve in pogoji naslednji: [11] »Gradbeni objekti morajo biti načrtovani, grajeni in zrušeni tako, da je raba naravnih virov trajnostna in da se zagotovi predvsem naslednje:

- ponovna uporaba ali možnost recikliranja gradbenih objektov, gradbenega materiala in delov po zrušenju,

- trajnost gradbenih objektov in
- uporaba okoljsko združljivih surovin in sekundarnih materialov v gradbenih objektih.«

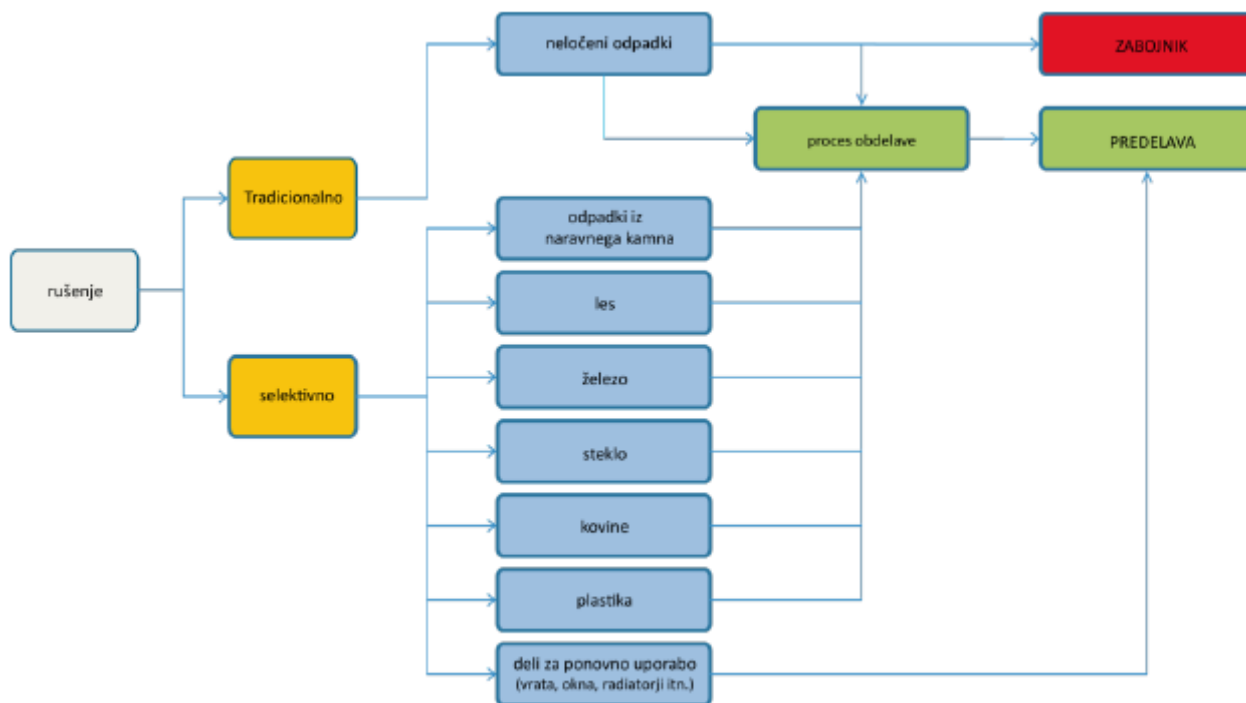
V Sloveniji ureja področje uporabe gradbenih proizvodov ali sklopov proizvodov za trajno vgradnjo v objekte Zakon o gradbenih proizvodih (Uradni list RS, št. 82/13).

(Povzeto po: [11])

2.3.9 Rušenje

Postopki rušenja zelo vplivajo na kasnejši proces recikliranja in tehnične značilnosti recikliranih izdelkov, zato je pomembno, kakšne vrste in način rušenja bomo izbrali. Od vrste in načina rušenja je odvisno tudi ločevanje odpadkov. Z nepravilnim ločevanjem pogosto zmanjšamo kakovost pridobljenih in recikliranih izdelkov. Poleg tega načini in vrste rušenja ter ločevanje gradbenih odpadkov močno vplivajo tudi na finančni vidik recikliranja.

Najbolje je, da se držimo načrta ravnanja z odpadki, v katerega vključimo tudi diagram ravnanja z ruševinami, kot prikazuje slika 4 in je predstavljeno v nadaljevanju.



Slika 4: Diagram ravnanja z ruševinami [13]

Rušenje objektov ni samo fizičen poseg, ampak je potrebno predhodno urediti in pridobiti ustrezno dokumentacijo. Razlogov za rušenje je lahko več. Največkrat se za rušenje odločimo zaradi dotrajanosti objekta ali spremembe namembnosti objekta na tej lokaciji. Metode in tehnologije rušenja so se spreminjale tekom časa, kot posledica napredka tehnike, spremembe zakonodaje, povečanja potreb po rušenju itd. Porušimo lahko celoten objekt ali pa le njegov del (npr. stena). Na podlagi tega izberemo ustrezen postopek rušenja in ustrezno vrsto pripomočkov.

»Glede na vrsto oz. tip objekta, ki se ruši, se uporabljajo različne vrste postopkov rušenja:

- mehanski postopki
 - razbijanje, rušenje (npr. zidarska, udarna in rušilna kladiva, drobilci, robotska tehnika),
 - rezanje (npr. škarje za železo, hidravlične rušilne škarje za beton, opeko in železo, bagri),
 - rušenje z lomljenjem, udarjanjem, vtiskanjem, urezovanjem (npr. lomilke, drobilci, grabeži),
 - mehansko rezkanje in lupljenje (npr. rezkarji, namenski žlični bagri),
 - vrtanje (vrtalna pnevmatska kladiva),
 - brušenje, žaganje (brusilniki, žage),
- hidrodinamični postopki (rušenje objektov pod visokim vodnim pritiskom),
- termični postopki (plinski rezalniki in gorilci),
- kemijski postopki (miniranje, razstreljevanje).« [11]

Včasih se je za rušenje uporabljala tudi krogla, ki je bila pritrjena na krak žerjava. Tehtala je približno pol tone, z njo pa so rušili velike opečnate in armiranobetonske objekte, pri čemer rušeni objekt ni smel biti povezan z ostalimi objekti. Ta način rušenja se v zadnjem času redko uporablja.

Poznamo dva načina rušenja:

- neselektivni in
- selektivni.

Neselektivno rušenje

Neselektivno rušenje se je kot standardna praksa uporabljalo še ne dolgo nazaj. Ločevanje gradbenih odpadkov po neselektivnem rušenju je oteženo, dobimo pa mešane gradbene odpadke. Neselektiven način rušenja je hiter, vendar ekološko in ekonomsko nesprejemljiv. Neselektivno rušenje naj bi se še

vedno uporabljalo, vendar v čim manjšem obsegu, saj se ločevanje gradbenih odpadkov izvede po rušenju, s tem pa je kvaliteta recikliranih materialov, pridobljenih iz odpadkov, vprašljiva.

Selektivno rušenje

Selektivno rušenje predstavlja alternativo neselektivnemu rušenju. Glavne faze selektivnega rušenja so [11]:

- »odstranitev pohištva in opreme,
- odstranitev stavnega pohištva (okna, vrata),
- odstranitev nevarnih materialov,
- selektivno rušenje stavbe,
- ločevanje materialov iz rušenja v ločene frakcije,
- predelava oz. recikliranje gradbenih odpadkov.«

Na podlagi 15. člena Pravilnika o projektni dokumentaciji so določene posebnosti v primeru odstranitve objekta, in sicer [16]: »Ne glede na določbe prejšnjih dveh členov vodilna mapa v primeru odstranitve objekta ali spremembe namembnosti ne vsebuje grafičnih prikazov temveč le tekstualni opis lokacije objekta z navedbo veljavnega prostorskega akta, opisom obstoječega in predvidenega stanja in navedbo predvidenih soglasodajalcev v območju varstvenih in varovalnih pasov ter soglasij ter popis predvidenih priključkov na infrastrukturo s predvideno kapaciteto ter mestom priključitve in navedbo načina zagotovitve minimalne komunalne oskrbe; projekt ne vsebuje načrtov.«

Na podlagi 20. člena Pravilnika o projektni dokumentaciji mora biti že v načrtih predvideno, da se v primeru odstranitve objekta izdela samo načrt odstranjevalnih del z zagotovljeno varnostjo ljudi in okolice. Seveda se mora prikazati tudi končna slika ureditve. V 22. členu Pravilnika o projektni dokumentaciji so zabeležene posebnosti vodilne mape pri gradnji, kjer se predvideva odstranitev objekta, in sicer mora vodilna mapa vsebovati lego obstoječega objekta, zbirnik infrastrukturnih priključkov in območje gradbišča.

(Povzeto po: [16])

V 3. in 3.a členu Zakona o graditvi objektov se gradnja, rekonstrukcija ali odstranitev lahko začne s pravnomočnim gradbenim dovoljenjem, izjema pa je gradnja enostavnega objekta. 29. člen Zakona o graditvi objektov pravi, da objekt lahko gradi, rekonstruira ali odstranjuje pravna ali fizična oseba, ki ima registrirano dejavnost gradbeništva.

(Povzeto po: [12])

»Če želimo porušiti objekt ali njegov del, moramo pridobiti gradbeno dovoljenje za njegovo rušenje, ki vsebuje:

- opis in posnetek obstoječega in predvidenega stanja;
- lokacijski podatki, ki vsebujejo samo lego obstoječega objekta na zemljišču, zbirnik priključkov na infrastrukturo in območje gradbišča;
- načrt odstranjevalnih del;
- ukrepe za preprečevanje emisij prahu in drugih nevarnih snovi;
- postopek ravnanja z gradbenimi odpadki in
- ukrepe iz varstva pri delu.« [17]

2.3.10 Recikliranje

Izraz »recikliranje« je definiran v poglavju Terminologija pri ravnanju z gradbenimi odpadki.

V zbirnih centrih, kjer zbirajo odpadke, izvajajo naslednje operacije za predelavo mineralnih surovin:

- ločeno zbiranje gradbenih odpadkov (priporočeno),
- doziranje materiala,
- primarno drobljenje in sejanje,
- odstranjevanje kovin s pomočjo magentnega ločilnika,
- transport masnih tokov,
- sekundarno drobljenje,
- klasiranje (sejanje oz. razvrščanje po velikosti zrn).

(Povzeto po: [18])

Gradbene ruševine, ki jih uporabljamo za recikliranje, so sestavljene iz: betona, opeke, kamna, keramike, asfalta. Recikliranje lahko ločimo glede na lokacijo predelave gradbenih odpadkov, in sicer na recikliranje na mestu rušenja in recikliranje v reciklažnem centru. Tehnike recikliranja gradbenih odpadkov so šle v korak z razvojem opreme in mehanskih procesov.

Postopek reciklaže je v grobem sestavljen iz sortiranja odpadkov, njihovega drobljenja in sejanja. Sortiranje lahko poteka ročno ali strojno, vsekakor pa je treba iz odpadkov odstraniti čim več snovi, ki bi lahko vplivale na kakovost končnega proizvoda.

2.3.10.1 Recikliranje na mestu rušenja

Prednosti recikliranja na mestu rušenja so [18] :

- »nizki stroški ravnanja in transporta materiala,
- cenejši stroji za predelavo materiala,
- če material lahko porabi na gradbišču, nižji stroški transporta predelanega materiala.«

Pomanjkljivosti recikliranja na mestu rušenja so [18]:

- »navzkrižje med gradbeno dejavnostjo in potrebnim prostorom za stroje in materiale za predelavo,
- nastanek višjih stroškov delovanja strojev po predelani toni materiala,
- večja onesnaženost s hrupom in prahom na mestu rušenja,
- manjša prilagodljivost kdaj in kje lahko uporabimo predelani material,
- gradnja objekta je lahko počasnejša.«

2.3.10.2 Recikliranje v reciklažnem centru

Prednosti recikliranja v reciklažnem centru so [18] :

- »lažje je zmanjšati oz. ublažiti neugodne vplive na okolje,
- bolj praktična uporaba, več vrst opreme večjih kapacitet,
- nižji stroški delovanja strojev po predelani toni materiala,
- boljša kontrola kvalitete recikliranega materiala,
- lažje trženje predelanega materiala zaradi možnosti skladiščenja.«

Pomanjkljivosti recikliranja reciklažnem centru so [18]:

- »nujna je natančna kontrola rušenja, da lahko nadzorujemo kvaliteto vhodnega materiala,
- stroški ravnanja in transporta so višji,
- stroji za predelavo materiala so dražji,
- reciklažni center ima večje stalne stroške.«

2.3.10.3 Drobilniki

Recikliranje gradbenih odpadkov pomeni njihovo predelavo, predelava pa je v prvi vrsti drobljenje večjih kosov gradbenih odpadkov (beton, opeka, asfalt).

Drobilniki zmanjšujejo velikost gradbenih odpadkov na manjše dele v velikosti kamenih zrn. Drobilnik je najpomembnejša enota oz. del pri drobljenju, saj je njegova izbira odvisna od značilnosti drobljenega materiala, od velikosti vstopnega in izstopnega gradbenega odpadka, to je od velikosti delov ruševin/zrn. Izbira drobilnika je odvisna tudi od začetne investicije, kvalitete drobljenja in amortizacije stroja. Poznamo naslednje vrste drobilnikov: čeljustni, konusni, udarni, kladivni, navpični udarni.

Glede na zrnavost agregatov ločimo drobilnike na:

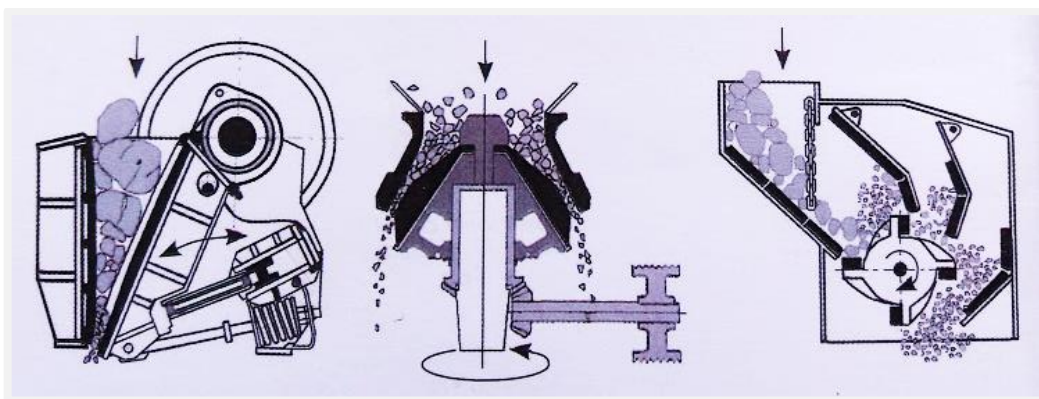
- primarne (čeljustni, konusni),
- sekundarne (čeljustni, udarni, kladivni, pokončni udarni),
- terciarne oz. t.i. mline (udarni, kladivni, pokončni udarni, valjčni, kroglični).

Čeljustni drobilnik (slika 5, levo) je sestavljen iz niza navpičnih čeljusti, na eni strani je čeljust nepomična na drugi pa pomična, ki se premika vodoravno naprej in nazaj. Prostor med čeljustmi se imenuje drobilna komora. To so najstarejši drobilniki, ki se večinoma uporabljajo za primarno drobljenje trših kamnin in to predvsem zaradi njegove podolgovate oblike, ki omogoča drobljenje s stiskanjem. Dosežena stopnja drobljenja (razmerje velikosti drobljenega izstopnega in vstopnega zrna) znaša od 1 : 3 do 1 : 5.

Konusni drobilnik (slika 5, na sredini) je sestavljen tako, da je njegov plašč obložen z oblogami iz manganovega jekla, znotraj njega pa se okoli navpične osi vrti notranji stožec z oblogami na zunanji strani. Spodnji del rotorja je nastavljen tako, da opleta. Material se drobi v zrna pravilnih kubičnih oblik, saj se gradbeni materialni odpadek zaklinja med oba konusa in se nato zaradi vrtenja notranjega konusa tudi drobi. Stopnja drobljenja znaša od 1 : 12 do 1 : 18 (primarno drobljenje) ter med 1 : 6 do 1 : 10 (sekundarno drobljenje).

Udarni drobilnik (slika 5, desno) je sestavljen tako, da gradbeni material pada na rotor, ki je obložen z udarnimi gredami, nato se material odbija od oblog v odbojne stene, kjer se potem zaradi zelo močnih udarcev material drobi in razbija v kose. Udarni drobilniki so primerni za drobljenje mehkejših kamnin, saj dosega stopnjo drobljenja do 1 : 30.

(Povzeto po: [19])

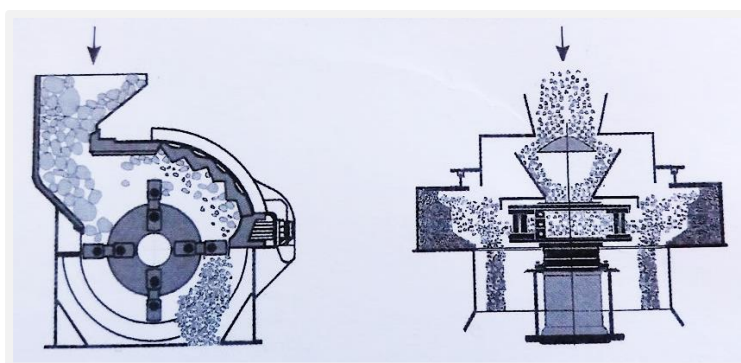


Slika 5: Čeljustni, konusni in udarni drobilnik [19]

Kladivni drobilnik (slika 6, levo) je udarni drobilnik, ki drobijo material z udarci kladiva. Kladiva so pritrjena na vrteči se rotor in odbijajo material v obloge ohišja.. Kladivni drobilniki se uporabljajo za mehkejše materiale, izhodna zrna imajo kubično obliko ter velik delež granulacije pod 1 mm.

Navpični udarni drobilnik (slika 6, desno) ima navpično postavljen votel rotor, kjer z vrtenjem ustvarja centrifugalno silo. Material vstopa v drobilnik z vrha v notranjost votlega rotorja in hitrost vrtenja se pospeši do 90 m/s. Iz odprtine rotorja material zleti v ohišje drobilnika, tam pa se zdrobi ob trku z oblogo in drugimi zrnji. Primeren je za mehkejši material, če material trči v oblogo. V kolikor pa imamo materialno blazino, v katero trči material, pa lahko uporabljamo trše materiale (granit, gnajs, kvarcit, žlindra). Izstopni material ima obliko zrn, ki je pravilno kubična.

(Povzeto po: [19])



Slika 6: Kladivni in navpični udarni drobilnik [19]

Mobilni drobilniki se uporabljajo v kamnolomih in v primeru reciklaže gradbenih odpadkov na mestu rušenja. Material se nalaga z bagrom ali nakladalcem v vsipni jašek. Vibracijska rešetka izloči manjše delce, ki gredo na deponijo, večje pa dozira v drobilnik, kjer se material drobi in transportira na deponijo

ali sejhalno napravo. Mobilni drobilniki imajo tudi funkcijo izločanja jeklene armature s pomočjo delovanja elektromagneta.

(Povzeto po: [19])

2.3.10.4 Mlini in sejalna sita

Mlini zmeljejo odpadni material na granulacijo od 0,1 do 3 mm. Ločimo valjčne in kroglične mline. Pri valjčnem mlinu se material dozira med dva gladka valja, ki imata oblogo iz manganovega jekla. Stopnja mletja je od 1 : 3 do 1 : 5. Kroglični mlini se uporabljajo v cementarnah za mletje klinkerja, za pridobivanje kamene moke in materialov za izdelavo plinobetona. Material se dozira v valjast boben v katerem so jeklene palice ali kroglice, melje pa do stopnje 1 : 100.

Sita razporejajo drobljeni ali mleti material (agregat) na posamezne frakcije. Ločimo statična, vibracijska in rotacijska sita. Statična sita se večinoma uporabljajo za ločevanje večjih zrn in nečistoč, torej za sejanje zemlje in gradbenih odpadkov po rušenju. Vibracijska sita so večetažna sita in tvorijo sejalni stolp. Najvišje je sito z največjimi odprtinami, sledijo mu sita z vedno manjšimi odprtinami. Sita lahko visijo ali pa so pritrjena na podlago, vibracije, ki omogočajo sejanje pa ustvarja elektromotor. Rotacijska sita so sestavljena iz valjev, ki so obdani z mrežami različnih odprtin. Sita so običajno dolga in nekoliko nagnjena, da lahko material neovirano potuje vzdolž valja.

(Povzeto po: [19])

2.4 Beton in njegove sestavine

Beton je sestavljen iz mešanice cementa, agregata in vode ter dodatkov, ki izboljšujejo njegovo obdelavnost in vgradljivost ter njegove lastnosti v strjenem stanju.

Beton je najbolj pogosto uporabljen gradbeni material. Osnovni razlogi so trije: zelo dobra odpornost na vodo, enostavnost oblikovanja različnih velikosti in oblik ter običajno najcenejši in najbolj dostopen material. Betonske konstrukcije potrebujejo manj vzdrževanja kot gradbeni elementi iz drugih materialov, ker ne korodirajo (tudi v primeru armiranobetonskih elementov je jeklena armatura običajno zaščitena pred korozijo) in površine ni potrebno vzdrževati, trdnost pa narašča s časom. Zaradi odpornosti proti delovanju agresivnih vodnih raztopin je razširjen v industrijskem in naravnem okolju. Pomembna lastnost je tudi požarna odpornost betona.

(Prevedeno po: [20])

Beton lahko razdelimo v tri razrede, na podlagi njihove tlačne trdnosti:

- betoni nizke trdnosti: manj kot 20 MPa,
- betoni srednje trdnosti: od 20 do 40 MPa,
- betoni visoke trdnosti: več kot 40 MPa.

(Prevedeno po: [20])

Beton srednje trdnosti se nanaša na običajne in standardne betone, ki se uporabljajo za večino konstrukcijskih del. Betoni visoke trdnosti se uporabljajo za posebne namene (npr. mostovi, predori). Tlačna trdnost betonov je lastnost, ki ima v gradbeništvu veliko vrednost. Določa se jo s preskusom tlačne trdnosti na preskušancih (kocka, prizma, valj) starih 28 dni.

(Prevedeno po: [20])

Po standardu SIST EN 206 ima normalno težek beton suho gostoto, ki je večja od 2000 kg/m^3 , vendar ne presega 2600 kg/m^3 , lahek beton ima gostoto med 800 in 2100 kg/m^3 , težek beton pa ima gostoto večjo od 2600 kg/m^3 .

Ločimo projektirane in predpisane betone:

- Projektirani beton: proizvajalcu se predpišejo zahtevane lastnosti in dodatne značilnosti; proizvajalec je odgovoren za pripravo betona, ki ustreza zahtevanim lastnostim in dodatnim značilnostim. Primer označitve projektiranega betona: SIST EN 206 C30/37 XC2 Cl 0,2 D_{max} 16 S2.
- Predpisani beton: proizvajalcu se predpišejo sestava betona in osnovni materiali, ki jih mora uporabiti; proizvajalec je odgovoren za pripravo betona s predpisano sestavo.

(Prevedeno po: SIST EN 206)

»Pri predpisanem betonu natančno podamo sestavo betona (vsebnost cementa, vrsto in trdnostni razred cementa, vodocementni faktor ali konsistenco, vrsto in kategorijo agregata, največjo vsebnost kloridov, nazivno velikost največjega zrna agregata, omejitve glede zrnivosti, vrsto in količino kemijskega/mineralnega dodatka, lahko pa podamo tudi dodatne zahteve), pri projektiranem betonu pa navedemo predvsem stopnjo izpostavljenosti okolja, ki mu bo beton izpostavljen in lastnosti, ki jih od betona zahtevamo (razred tlačne trdnosti, največje zrno agregata, razred vsebnosti kloridov ter razred konsistence ali ciljna vrednost konsistence).« [21]

2.4.1 Cement

Cement je ena izmed treh glavnih sestavin betona. Cement je hidravlično vezivo, ki veže na zraku in v vodi. V standardu SIST EN 197-1 je predstavljenih 27 vrst cementov, ki se lahko razporedijo v 5 glavnih skupin in 3 trdnostne razrede (razred 32,5, razred 42,5 in razred 52,5). Trdnostni razred cementov se določa s preskusom tlačne trdnosti na preskušancih, ki so bili 28 dni negovani v vodi. Cemente razdelimo v pet glavnih skupin, in sicer:

- CEM I – portlandski cement,
- CEM II – mešani portlandski cement,
- CEM III – žlindrin cement,
- CEM IV – pucolanski cement,
- CEM V – mešani cement.

Portlandski cement z oznako CEM I vsebuje od 95 do 100 % klinkerja. Pod oznako CEM II spadajo mešani portland cementi. To so cementi, ki vsebujejo še vedno večje količine klinkerja (65 – 79 %, 80 – 94 %, 90 – 94 %) ter različne dodatke:

- portland cement z dodatkom žlindre,
- portland cement z dodatkom mikrosilike,
- portland cement z dodatkom pucolana,
- portland cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela,
- portland cement z dodatkom žganega skrilavca,
- portland cement z dodatkom apnenca.

Žlindrini cementi z oznako CEM III vsebujejo manjše količine klinkerja (5 – 19 %, 20 – 34 %, 35 – 64 %). Pucolanski cementi z oznako CEM IV vsebujejo od 45 do 64 % oziroma od 65 do 89 % klinkerja. Mešani cement z oznako CEM V pa vsebuje od 20 do 38 % oziroma od 40 do 64 % klinkerja.
(Prevedeno po: SIST EN 197-1)

V vseh naših vzorcih smo uporabili čisti portlandski cement, ki je opisan v nadaljevanju.

Portland cement

Portland cement se proizvaja iz kalcijevega karbonata v obliki zdrobljenega apnenca in glinastih materialov kot so glina, lapor ali skrilavec. Glede na kemijsko sestavo osnovnih surovin in zahteve se

dodajajo manjkajoče sestavine (npr. železov oksid). Obstajajo štirje postopki proizvodnje, ki so odvisni od uporabljenih surovin in obsega vode pri izločanju: moker, pol moker, pol suh in suh postopek. Pri suhem postopku se osnovne surovine zmeljejo v fini prah, tako imenovano surovinsko moko, in shranijo v silosih. Nato sledijo procesi segrevanja in žganja v rotacijski peči, do najvišje temperature enake 1450 °C. Sledi hitro ohlajanje cementnega klinkerja.

(Prevedeno po: [23])

Portland cement je hidravlično vezivo. Ko ga zmešano z vodo nastane pasta, katere zgoščevanje in strjevanje je posledica različnih kemičnih reakcij. Za hidratacijo cementa je potreben majhen delež vode, ostali del omogoča obdelavnost in vgradljivost betona, ko dodamo še agregat. Presežek vode rezultira v oblikovanju kapilarnih por v cementnem kamnu malte ali betona. Običajno 1 % povečanje kapilarnih por pomeni 6 % zmanjšanje tlačne trdnosti. Zato je potrebno nadzorovati vsebnost vode. To storimo s pomočjo vodocementnega razmerja. Popolno hidratacijo cementa lahko dosežemo z minimalnim v/c razmerjem približno 0,42.

(Prevedeno po: [23])

2.4.2 Agregat

Agregat je največja sestavina v betonu, saj agregatna zrna predstavljajo 65 do 75 % njegove prostornine. Lastnosti agregata, kot so trdnost, oblika zrn, porazdelitev zrn po velikosti, velikost največjega zrna (definirana so v standardu SIST EN 12620) pomembno vplivajo na fizikalne lastnosti sveže betonske mešanice in strjenega betona. Poleg tega na izgled vidnega dela betona vpliva barva in obdelana površina agregata. Agregat za beton je običajno definiran kot lahek, normalno težek in težek agregat. Normalno težek agregat se razdeli na droben (pesek) in grobi agregat (gramoz).

Oblika agregata vpliva na lastnosti sveže mešanice betona. Okrogla zrna v primerjavi z lomljenimi potrebujejo manjše vodocementno razmerje za ustrezno obdelavnost betonske mešanice, vendar pa lahko dosežemo večjo trdnost betona z lomljenimi zrnji z grobo površino, saj se bo cementna pasta bolje povezala z agregatnimi zrnji. Izogibati se je potrebno dolgim in krušljivim zrnjem, ki negativno vplivajo na trdnost betona.

(Prevedeno po: [23])

Agregati so lahko naravni, umetni ali reciklirani. Naravni agregati so mineralnega izvora. Pridobivajo se z izkopom gramoza (zaobljeni robovi) ali lomljenjem večjih kosov tehničnega kamna (ostri robovi).

Izbira naravnega agregata je odvisna od razpoložljivih virov, saj dolga transportna pot ne predstavlja ekonomične izbire. Umetni agregati so toplotno obdelani odpadki, ki so nastali pri industrijski proizvodnji. V uporabi je vedno več recikliranega agregata, pridobljenega iz anorganskih materialov, ki so bili predhodno uporabljeni v gradnji.

2.4.3 Voda

Voda je tudi v gradbeništvu nepogrešljiva. Ob mešanju vode in cementa se začne proces hidratacije. Na obdelavnost oziroma vgradljivost betonske mešanice vplivamo z dodajanjem vode, vendar pa ni vsaka voda, 'dobra' voda. V osnovi velja, da se za pripravo cementnih past in betonskih mešanic lahko uporabi voda iz vodovodnega omrežja oziroma pitna voda. V primeru, da bi želeli uporabiti vodo iz drugih virov, moramo pred uporabo preveriti njeno ustreznost.

V našem primeru smo uporabili vodo iz Ljubljanskega vodovodnega omrežja.

Poznamo naslednje vrste voda:

- pitna voda,
- voda, ki je pridobljena iz procesov v industriji betona,
- podtalnica,
- naravna površinska voda in industrijska odpadna voda,
- morska voda ali manj slana voda,
- komunalna voda.

(Prevedeno po: SIST EN 1008)

Standard SIST EN 1008:2003 navaja zahteve za primernost vode za pripravo betona. Standard zajema tudi vode, ki so pridobljene iz proizvodnih procesov v industriji betona. Pitna voda je v skladu s tem standardom primerna za pripravo vode. Vodo lahko predhodno ocenimo, kot je prikazano v preglednici 5. Če voda ne ustreza eni ali več zahtevam iz preglednice 5, se mora dokazati njeno skladnost skladno s točko 4.4 omenjenega standarda.

(Prevedeno po: SIST EN 1008)

Preglednica 5: Zahteve glede vode po SIST 1008

	Zahteva
Olja in masti	Ne več kot vidni sledovi.
Detergenti	Morebitna pena mora izginiti v dveh minutah.
Barva	Voda, ki ne prihaja iz industrije betona, se kvalitativno oceni kot blede rumena ali motna.
Izločene snovi	Voda iz industrije betona ima posebne zahteve, ki so opisane v aneksu A tega standarda, v točki 4.4.
	Voda iz drugih virov ima lahko največ 4 ml usedlin.
Vonj	Voda iz industrije betona ima dovoljen enak vonj, kot ga ima pitna voda, rahel vonj po cementu in rahel vonj po žveplovodiku, kadar je prisoten žlindrin cement.
	Voda iz drugih virov ne sme imeti vonja, razen vonja, ki je dopusten za pitno vodo. Po dodatku solne kisline ne sme smrdeti po žveplovodiku.
Kisline	$\text{pH} \geq 4$
Humusne snovi	Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna.

2.4.4 Dodatki k betonu

Dodatki k betonu so lahko mineralni (npr. žindra, elektrofiltrski pepel, mikrosilika) ali kemijski (npr. plastifikatorji, superplastifikatorji, pospeševalci, zaviralci, aeranti, dodatki proti zmrzovanju). Njihov namen je doseganje določenih lastnosti betonov. Izbira dodatkov je pestra in odvisna od več dejavnikov: pogojev v katerih betoniramo (klimatski in hidrološki pogoji, lastnosti tal ...), zahtevanih reoloških lastnosti svežih mešanic, zahtevanih lastnosti strjenega betona itd.

Kemijski dodatki se dodajajo v betonsko mešanico v majhnih količinah, običajno do 5 % mase cementa, upoštevati pa je potrebno tudi navodila proizvajalca. V nadaljevanju bodo opisani trije kemijski dodatki, in sicer plastifikatorji (P), superplastifikator (SP) in hiperplastifikator (HP). Zadnja dva smo uporabili pri naših betonskih mešanicah.

2.4.4.1 Plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji

Zametki plastifikatorjev so se pojavili v času starih Rimljanov, ko so pucolanskim maltam dodajali kri, mleko in svinjsko mast. Ta uporaba preprostih 'dodatkov' nas je pripeljala do umetno izdelanih plastifikatorjev, ki so jih začeli množično uporabljati okoli leta 1930 v ZDA, njihov nadaljnji razvoj pa se je stopnjeval z vedno večjimi zahtevami po kakovosti in ekonomičnosti gradnje. Njihovo delovanje temelji na kemijski reakciji, in sicer imajo P, SP in HP negativen naboj in se adsorbirajo na cementne delce, ki imajo pozitiven naboj in okoli njih naredijo tanek film. Zaradi elektrostatskega odboja med enako nabitimi delci je preprečeno združevanje cementnih delcev in zmanjša se trenje. Pri superplastifikatorju učinek traja manj kot eno uro, zato ga običajno dodamo v že pripravljeno mešanico. HP so nekakšna nadgradnja P in SP, saj pri njih adsorpcija poteka postopno in zato je čas obdelavnosti betona daljši. Betonsko mešanico je potrebno mešati še vsaj 3 minute po tem, ko ji dodamo P, SP ali HP. Ob nespremenjeni obdelavnosti betona lahko količino vode pri P zmanjšamo za 5 – 10 %, pri SP za 5 – 25 % in pri HP za 5 – 40 %. Osnovni učinki P, SP in HP so: zmanjšanje vodocementnega razmerja in posledično večja trdnost in trajnost betona, pospešeno strjevanje in pospešen prirastek trdnosti betona. Kljub povečanju plastičnosti ne pride do segregacije. Povečujejo vodoneprepusnost, tudi odpornost proti obrusu in kemikalijam je večja. Lahko se uporabljajo pri črpnih, prefabriciranih, prednapetih betonih ..., pri tem pa je pomembno, da ne vplivajo na lastnosti armature. Pri vseh pozitivnih lastnostih P, SP in HP pa je vseeno treba biti previden pri njihovi uporabi. Na P in SP predvsem pa na HP vlivajo komponente betonske mešanice (vrsta cementa, vrsta in količina agregata, predvsem fini delci, količina vode) ter pogoji dela. Razvoj plastifikatorjev se še ni zaključil, saj je potrebno ugoditi vedno večjim zahtevam po kompleksnih konstrukcijah in njihovi trdnosti, trajnosti in odpornosti, zato v prihodnje lahko pričakujemo plastifikatorje nove generacije.

(Povzeto po: [24])

2.5 Beton iz recikliranega agregata

Beton iz recikliranega agregata se pridobiva s predelavo gradbenih odpadkov. Ideja o predelavi oz. ponovni uporabi gradbenih materialov, ki jih pridobimo iz porušениh objektov, se je pojavila že po 2. svetovni vojni, od 70-tih letih prejšnjega stoletja naprej pa je postala predelava gradbenih odpadkov vse bolj pomembna. Predelava gradbenih odpadkov ima velik pomen zaradi vse manjših zalog naravnih materialov oz. surovin, zaradi velikih količin odpadnih gradbenih materialov ter vse večje ozaveščenosti o varstvu okolja. S predelavo odpadnih gradbenih materialov se poveča prostor za odlaganje komunalnih odpadkov, istočasno se prihranijo naravni materiali in surovine.

Za pridobitev kvalitetne sekundarne surovine je potrebno izvesti racionalno razgradnjo objekta, sortirati material, urediti kontrolo kvalitete in doziranje materialov med predelavo. Kvaliteta recikliranega agregata je odvisna od oblike zrna in vsebnosti finih delcev, ki so neposredno odvisni od tehnološkega procesa predelave. Glede na izvor in sestavo gradbenih odpadkov ter izbrane tehnologije recikliranja se lahko le ti ponovno uporabijo kot:

- agregat za razne vrste betona in asfaltno –betonskih mešanic,
- material za nosilne sloje cest,
- material za izdelavo betonskih elementov.

(Prevedeno po: [25])

2.5.1 Značilnost svežega betona iz recikliranega agregata

Vpijanje vode pri recikliranem agregatu je odvisno od poroznosti in lastnosti sistema kapilarnih por v zrnih ter od velikosti zrn. Večja je velikost zrn, manjše je vpijanje vode. Recikliran agregat naj bi vpil približno 90 % vode od skupne količine vode, ki jo lahko vpije, že v prvih 10 minutah njegovega stika z vodo. Ker ima agregat z večjim deležem finih delcev večje vpijanje vode, se pri večji količini finih delcev dodaja plastifikatorje in superplastifikatorje.

Prostorninska masa betona je odvisna od prostorninske mase zrn recikliranega agregata. Reciklirani agregati imajo nižje prostorninske mase kot naravni agregati, zato je pri uporabi recikliranih agregatov potrebno računati s 3 – 10 % nižjo vrednostjo prostorninske mase svežega betona.

Reciklirani agregati zmanjšujejo obdelavnost betona. Pri recikliranem agregatu se pojavi večje vpijanje vode, zaradi večje poroznosti, kar zmanjšuje obdelovanje betona.

Poroznost svežega betona iz recikliranega agregata je neposredno odvisna od hrapavosti površine delcev agregata (na zrnih agregata ostane nekaj zalepljenih cementnih ostankov) in od količine zraka. Pri teh betonih je vpliv teh parametrov, v primerjavi z običajnimi betoni, večji. Raziskave kažejo, da imajo reciklirani betoni do 3x večjo količino zajetega zraka kot betoni iz naravnega agregata.

(Prevedeno po: [25])

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Laboratorijske preiskave agregatov

3.1.1 Francoski in recikliran agregat

Pri praktičnem delu smo uporabili francoski in recikliran agregat. Pri francoskem agregatu (slika 7) so bile določene karakteristike že znane, saj smo izhajali iz podatkov, podanih v okviru evropskega projekta »COST Action TU1404«. Gre za večletni projekt, pri katerem sodeluje večina držav EU, med njimi tudi Slovenija. V okviru projekta poteka medlaboratorijska preiskava z materiali, ki so tipični materiali za izdelavo betonov za jedrske elektrarne v Franciji.



Slika 7: Francoski agregat frakcij 8 – 16 mm, 8 – 11 mm, 0 – 4 mm

Recikliran agregat (slika 8), večinoma sestavljen iz odpadnega betona, je bil dostavljen s separacije v bližini Ljubljane. Na njem smo izvedli sledeče preiskave: sejalna analiza, določanje deleža finih zrn, določanje oblik zrn, določanje vlažnosti, določanje prostorninske mase in vpijanje vode, določanje prisotnosti humoznih delcev. Preiskave smo izvedli natančno in dosledno, saj lahko samo s poznavanjem relevantnih fizikalnih kemijskih lastnosti agregata načrtujemo pripravo betonske mešanice in dosežemo predpostavljene karakteristike svežega in strjenega betona.

3.1.2 Odvzem agregata in priprava vzorcev za preiskave

Recikliran agregat je bil odvzet na separaciji v bližini Ljubljane, pri čemer smo upoštevali določila standarda SIST EN 932-1. Namen vzorčenja je bil dobiti vzorec, ki bo reprezentativen glede povprečnih lastnosti proizvedenega in dostavljenega agregata. Konec meseca aprila 2016, na sončen dan, je bilo na separaciji odvzetega približno 700 kg materiala in dostavljenega (slika 8) na Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., (GI ZRMK d.o.o.) kjer so mi prijazno ponudili možnost uporabe sejalnih sit (sliki 9 in 10). Presejan agregat sem po posameznih frakcijah 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm, 16 – 32 mm, shranila v plastične vreče (slika 11), jih zaprla z lepilnim trakom ter tako zaščitila pred izgubo vlage. Iz GI ZRMK d.o.o. sem material pripeljala v Konstrukcijsko-prometni laboratorij, ki deluje v okviru Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.



Slika 8: Recikliran agregat



Slika 9: Sejalni stolp

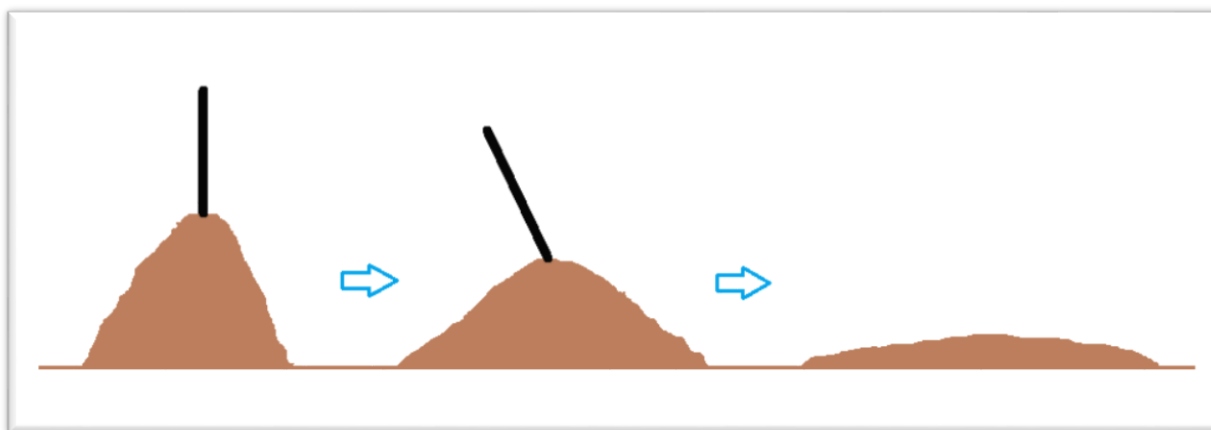


Slika 10: Uporabljena sita

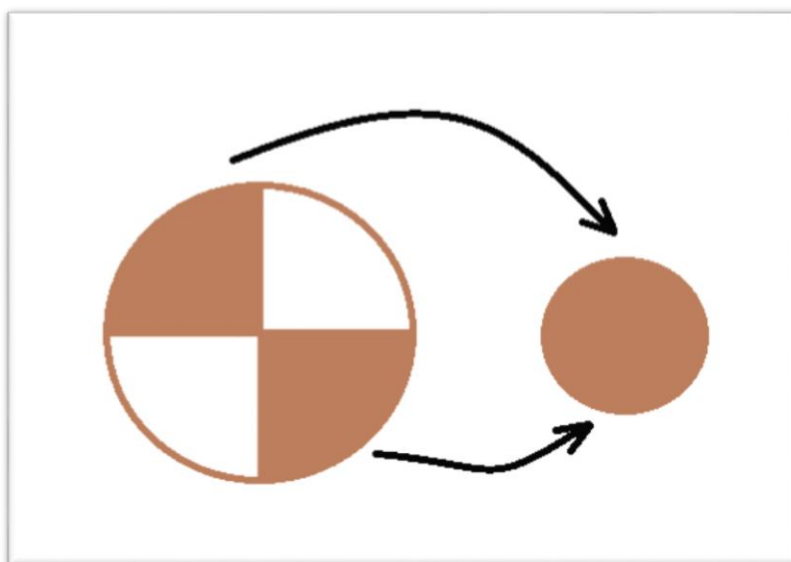


Slika 11: Shranjen agregat v vrečah

Standard SIST EN 932-2 določa metode za zmanjševanje laboratorijskih vzorcev na preskusne vzorce. Na ta način dobimo reprezentativen vzorec, ki je primeren za preiskave. Iz plastičnih vreč smo agregat posamezne frakcije stresli skupaj, ga dobro premešali z lopato in oblikovali kup v obliki stožca. Nato smo material s prvega kupa premetali na drugi kup, pri čemer je material enakomerno padal na vse strani kupa. Postopek smo ponovili trikrat. V središče tretjega kupa smo vertikalno zabodli ročaj lopate in oblikovali sploščen kup (slika 12), ki smo ga razdelili na štiri enake dele. Par nasprotnih četrtin smo zavrgli, ostanek pa zbrali na kupu (slika 13). Postopek mešanja in četrtinjenja smo ponavljali dokler nismo dobili ustrezne količine vzorca. (Prevedeno po: SIST EN 932-2:1999)



Slika 12: Potek zmanjševanja laboratorijskega vzorca



Slika 13: Četrtnjenje

Francoski agregat je bil dostavljen iz Francije, zapakiran v plastičnih vrečah in že ločen po frakcijah 0 – 4 mm, 4 – 11 mm, 8 – 16 mm, v nadaljevanju pa v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju shranjen v silosih (slika 14). Silosi morajo imeti zadostno odprtino (po standardu SIST EN 932-1 mora biti premer odprtine vsaj trikratni premer maksimalnega zrna), da dobimo ustrezen vzorec brez segregacije. Z metodo četrtnjenja smo dobili ustrezne mase vzorcev, ki smo jih v nadaljevanju preiskovali.



Slika 14: Francoski agregat po frakcijah shranjen v silosih

3.1.3 Laboratorijske preiskave recikliranega agregata

V nadaljevanju so natančno opisane preiskave agregata iz recikliranega betona, ki smo jih opravili v laboratoriju.

3.1.3.1 Določanje zrnivosti recikliranega agregata s sejanjem

Določanje zrnivosti agregata smo izvedli s sejnalno analizo v skladu s standardom SIST EN 933-1. Metoda je temeljila na ločevanju materiala na več različnih velikostnih razredov s pomočjo sejanja skozi sita. Velikost testnih vzorcev smo določili glede na velikost največjega zrna agregata, kot je prikazano v preglednici 6, njihovo zmanjšanje pa izvedli po določilih SIST EN 932-2.

Preglednica 6: Najmanjša velikost vzorca v skladu s SIST EN 933-1

Velikost največjega zrna agregata D (mm)	Minimalna masa testnega vzorca (kg)
63	45
32	6
16	1
8	0,1
Za druge velikosti največjega zrna agregata, se masa testnega vzorca dobi z interpolacijo mas v preglednici in uporabo enačbe $M = (D/10)^2$.	

Vzorec smo sušili v sušilnici pri temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do konstantne mase, ohladili in stehtali (M_1). Nato smo ga stresli v posodo in dodali toliko vode, da smo ga prekrili. Priporočalo se je, da se vzorec namaka v vodi 24 ur (slika 15), saj tako agregat, ki je bil sprejet v grude, razpade. Med tem vzorec tudi premešamo, da zagotovimo ločitev finih delcev. Sito velikosti 0,125 mm smo zmočili na obeh straneh in nanj postavili sito velikosti 2 mm, ki je delovalo kot zaščitno sito. Vsebino posode smo nalili na zgornje sito in jo spirali z vodo tako dolgo, da je vzorec postal čist (slika 16). Pri tem moramo paziti, da ne prenapolnimo, preplavimo ali poškodujemo sit. Odpadne vode nismo shranili. Ostanek na situ smo sušili v sušilnici (slika 21) pri temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do konstantne mase, ohladili in stehtali (M_2). Opran in posušen vzorec smo nasuli v sejalni stolp (slika 17). Ta je bil sestavljen iz sit v naslednjem vrstnem redu: 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm in 0,063 mm, pri čemer je bilo sito z največjimi odprtinami na vrhu. Sejalni stolp smo tresli s pomočjo vibracijskega aparata. Po 15 minutah smo aparat ustavili in sejali še ročno (slika 18). Zrna, ki so padla skozi sito smo prenesli na naslednje sito z manjšimi odprtinami. Sejanje je bilo končano, ko se po eni minuti dodatnega sejanja masa na posameznem situ ni spremenila za več kot 1 % (slika 19). Ostanek na situ z največjimi odprtinami smo stehtali in označili kot R_1 . Stehtali smo maso agregata še na ostalih sitih in jih označili kot R_2, R_3, R_i, R_n . Stehtali smo tudi ostanek na pladnju in ga označili s črko P . Rezultate sejalne analize smo primerjali v preglednici 7, kjer so podane priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0 – 16 mm po SIST 1026.

Odstotek finih delcev pod 0,125 mm smo izračunali po enačbi 1:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 \quad (1)$$

Izgubo materiala smo izračunali po enačbi 2:

$$g = \frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} * 100 \quad (2)$$

V enačbah 1 in 2 nastopajo naslednje veličine:

M_1 – suha masa testnega vzorca (kg),

M_2 – suhi material na situ 0,125 mm (kg),

P – masa materiala na podstavku sit (kg).

R_i – masa ostanka na situ.

(Prevedeno po: SIST EN 933-1)



Slika 15: Namakanje vzorca



Slika 16: Pranje vzorca



Slika 17: Sejalni stolp

Preglednica 7: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0 – 16 mm po SIST 1026

Mejne krivulje	Presevky (%) skozi sita (mm)						
	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0
D ₁₆	3	(7)	12	30	30	30	100
A ₁₆	3	(7)	12	21	36	60	100
B ₁₆	8	(20)	32	42	56	76	100
C ₁₆	18	(34)	49	62	74	88	100



Slika 18: Ročno sejanje



Slika 19: Ostanke na situ

3.1.3.2 Določanje deleža finih delcev recikliranega betona s sejanjem

To metodo smo izvedli podobno kot metodo določanja zrnivosti recikliranega agregata s sejanjem, ki je opisana v poglavju 3.1.3.1. Razlika je bila le v tem, da smo vso odpadno vodo, s katero smo oprali vzorec, shranili (slika 20), tako da so se obdržali tudi delci manjši od 0,125 mm, ki smo jih s prejšnjim postopkom odplaknili. Nato smo odpadno vodo in vzorec sušili v sušilnici (slika 21) pri temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do konstantne mase. Posušene 'ostanke' odpadne vode (slika 22) smo postrgali, jih dodali vzorcu in vse skupaj stehtali (M_2), nato pa pričeli s sejanjem. Najprej smo sejali s pomočjo vibracijskega aparata nato pa še ročno (slika 23). Stehtali smo ostanke na posameznem situ in izračunali delež finih delcev.



Slika 20: Pranje vzorca in shranjevanje odpadne vode



Slika 21: Sušenje v sušilnici



Slika 22: Po sušenju

Na sliki 22 so predstavljene posamezne frakcije 0 – 0,125 mm, 0,0125 – 4 mm in 4 – 8 mm izbranega vzorca. Fini delci so v srednjem kupčku.



Slika 23: Sejanje skozi sito 4 mm



Slika 24: Vzorec po frakcijah

3.1.3.3 Določanje oblike zrn recikliranega agregata – Modul oblike

Metoda določanja modula oblike, opisana v standardu SIST EN 933-4, je primerna za grob agregat (to pomeni za zrna, ki so večja od 4 mm in manjša ali enaka 64 mm). Potrebna minimalna količina testnega vzorca je bila določena glede na preglednico 8.

Preglednica 8: Minimalna zatehta testnega vzorca v skladu s SIST EN 933-4

Velikost največjega zrna agregata D (mm)	Minimalna masa testnega vzorca (kg)
90	80
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2
Za druge velikosti največjega zrna agregata, se masa testnega vzorca dobi z interpolacijo mas v preglednici 8.	

V našem primeru smo obliko zrn določali na frakciji 8 – 16 mm. Največje zrno agregata je bilo $D = 16$ mm, torej je minimalna zatehta testnega vzorca znašala najmanj 1 kg. Potrebno količino vzorca smo dobili po standardu SIST EN 932-2. Vzorec agregata smo oprali (slika 25), da smo odstranili fine delce, ga posušili do stalne mase pri temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ in stehali M_1 .

(Prevedeno po: SIST EN 933-4)

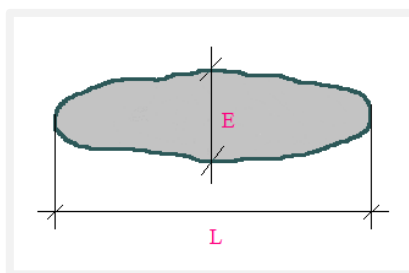


Slika 25: Pranje vzorca



Slika 26: Merjenje s kljunastim merilom

S pomočjo kljunastega merila (sliki 26 in 28) smo izmerili največjo L in najmanjšo E dimenzijo vsakega zrna (slika 27).



Slika 27: Določanje največje in najmanjše dimenzije zrna



Slika 28: Ločevanje zrn glede na obliko



Slika 29: Zrna ugodne (levo) in neugodne (desno) oblike

V primeru, da je bilo razmerje med $L : E > 3$, so bila to zrna neugodne oblike, v primeru $L : E \leq 3$ pa zrna ugodne oblike (slika 29).

Stehali smo zrna neugodne oblike in maso označili z M_2 . Modul oblike SI smo izračunali po enačbi 3:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad (3)$$

kjer je:

SI – modul oblike,

M_1 – masa testnega vzorca,

M_2 – masa zrn neugodne oblike.

Rezultat smo zaokrožili na najbližje celo število.

(Prevedeno po: SIST EN 933-4)

3.1.3.4 Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za grobi agregat (4 – 31,5 mm)

Prostorninska masa se izračuna kot razmerje med maso in prostornino vzorca. Masa se določi s tehtanjem testnega vzorca v z vodo nasičenem in površinsko suhem stanju ter v suhem stanju (sušenje v sušilnici). Prostornina se določi z metodo hidrostatične tehtnice (za grobi agregat) ali z metodo piknometra (za grobi in drobni agregat). Postopki in izračuni so določeni v standardu SIST EN 1097-6.

Preglednica 9: Minimalna zatehta testnega vzorca

Velikost največjega zrna agregata D (mm)	Minimalna masa testnega vzorca (kg)
31,5	5
16	2
8	1
Za druge velikosti največjega zrna agregata, se masa testnega vzorca dobi z interpolacijo mas v preglednici 9.	

Za preskus smo izbrali frakcijo 4 – 8 mm in zmanjševanje vzorca izvedli po standardu SIST EN 932-2. Pripravili smo 2 vzorca mase najmanj 1 kg, saj je bilo največje zrno agregata $D = 8$ mm (preglednica 9). V nadaljevanju opisan postopek smo izvedli enako za oba vzorca. Vzorec smo oprali na sitih 8 mm in 4 mm, da smo odstranili praškaste (fine) delce (sliki 30). Opran in odcejen vzorec smo vsuli v piknometar (sliki 31 in 32) ter dodali vodo temperature $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$ (slika 33). Z rahlim obračanjem in stresanjem piknometra smo odstranili zajet zrak (slika 34), nato pa smo piknometar za $(24 \pm 0,5)$ ur položili v vodno

kopel temperature (22 ± 3) °C (slika 35). Po končanem namakanju smo piknometar vzeli iz vode ter ga ponovno obračali in vrteli, da smo odstranili preostali ujeti zrak (slika 34). Do oznake na nastavku smo dolili vodo, obrisali piknometar ter ga stehali (M_2) (slika 36). Zabeležili smo tudi temperaturo vode. Agregat smo nato stresli na cedilo in pustili, da se odteče (slika 37). Prazen piknometar smo ponovno napolnili z vodo, ga obrisali in stehali (M_3) ter zabeležili temperaturo vode. Razlika med temperaturama vode v piknometru pri tehtanju mas M_2 in M_3 ne sme biti večja kot 2 °C. S cedila smo agregat stresli na suho krpo in z brisanjem poskušali vpiti čim več površinske vode (slika 38). Nato smo ga razporedili po drugi suhi krpi in ga pustili na zraku, vendar stran od direktne sončne svetlobe oziroma drugih virov toplote (slika 39). Ko se je posušila zunanja plast vode (površinsko suh, notranje vlažen), smo agregat stehali (M_1). Agregat smo nato stresli na pladenj, ga sušili v sušilnici pri temperaturi (110 ± 5) °C do stalne mase, ohladili na sobno temperaturo in ga stehali (M_4).

Izračunali smo prostorninske mase (ρ_a , ρ_{rd} in ρ_{ssd}) v megagramih na kubični meter (Mg/m^3) po naslednjih enačbah (4 do 6):

- Navidezna prostorninska masa agregata

$$\rho_a = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (4)$$

- Prostorninska masa agregata, sušenega v sušilnici

$$\rho_{rd} = \rho_w * \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5)$$

- Prostorninska masa z vodo zasičenega, površinsko suhega agregata

$$\rho_{ssd} = \rho_w * \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (6)$$

Vpijanje vode WA_{24} smo izračunamo po enačbi 7:

$$WA_{24} = 100 * \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (7)$$

V enačbah (4 do 7) nastopajo naslednje veličine:

ρ_w – gostota vode, izražena v megagramih na kubični meter (Mg/m^3),

M_1 – masa z vodo zasičenega, površinsko suhega agregata, izražena v gramih (g),

M_2 – masa piknometra skupaj z vodo zasičenim agregatom in vodo v gramih (g),

M_3 – masa piknometra, napolnjenega samo z vodo do oznake v gramih (g),

M_4 – masa agregata sušenega v sušilnici v gramih (g).

Prostorninske mase smo zaokrožili na najbližjo vrednost 0,01 Mg/m^3 , vpijanje vode pa na 0,1 %.

(Prevedeno po: SIST EN 1097-6)



Slika 30: Pranje vzorca skozi siti 4 in 8 mm



Slika 31: Pripravljena vzorca in piknometra



Slika 32: Dodajanje vzorca



Slika 33: Dodajanje vode



Slika 34: Odstranjevanje zračnih mehurčkov



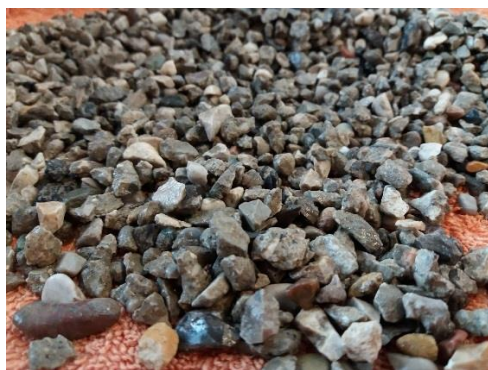
Slika 35: Vodna kopel



Slika 36: Tehtanje piknometra



Slika 37: Odcejanje vzorca



Slika 38: Površinsko vlažen agregat



Slika 39: Sušenje na zraku

3.1.3.5 Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za drobni agregat (0,063 – 4 mm)

Ta metoda s piknometrom se uporablja za agregate, ki se presejejo skozi sito 4 mm in ostanejo na situ 0,063 mm. Preskus smo izvedli na dveh vzorcih. V nadaljevanju je opisan postopek, ki velja za oba vzorca. Vzorec smo zmanjšali v skladu s SIST EN 932-2. Nato smo ga oprali skozi sita 4 mm in 0,063 mm in odstranili delce, ki so ostali na situ 4 mm. Minimalna zatehta testnega vzorca je bila 300 g. Postopek preiskave do sušenja vzorca smo izvedli enako kot je opisano v točki 3.1.3.4. Po 24 urnem namakanju smo vzorec razporedili po pladnju in ga izpostavili blagemu toku toplega zraka (slika 42). Vzorec smo pogosto mešali, da smo zagotovili enakomerno sušenje. Ko na površini agregata ni bila več vidna vlaga, smo vzorec pustili, da se je ohladil na sobno temperaturo. Kdaj smo dosegli stanje površinsko suhega, notranje zasičenega agregata, smo preverjali po naslednjem postopku: na pladenj smo položili kovinski kalup v obliki prisekanega stožca v katerega smo ohlapno stresli vzorec, nato pa ga zgostili s 25 udarci s kovinsko palico. Naknadno kalupa nismo smeli polniti. Kalup smo previdno navpično dvignili (slika 40) in opazovali obliko nastalega kupa agregata. Če se kup ne sesede (sliki 41 in 43), moramo nadaljevati s sušenjem in preverjanjem oblike kupa agregata. Površinsko suho, notranje zasičeno stanje agregata dosežemo, ko po dvigu kalupa nastane pravilna oblika kupa agregata (slika 44). Vzorec agregata smo stehali (M_1), ga posušili v sušilnici pri temperaturi $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do stalne mase, ga ohladili na sobno temperaturo in ponovno stehali (M_4). Prostorninsko maso agregata in vpijanje vode smo izračunali po enačbah 4 do 7.

(Prevedeno po: SIST EN 1097-6)



Slika 40: Odstranitev kalupa



Slika 41: Vlažen agregat



Slika 42: Sušenje s pečko



Slika 43: Rahlo vlažen agregat



Slika 44: Nasičen, površinsko suh agregat

3.1.3.6 Določanje vlažnosti agregata

Standard SIST EN 1097-5 opisuje določanje vlažnosti (celotne proste vode) agregata s sušenjem testnega vzorca v sušilniku. Voda se lahko nahaja na površju agregata ali pa v dostopnih porah znotraj agregata.

Laboratorijski vzorec smo zmanjšali po navodilih standarda SIST EN 932-2 in dobili testne vzorce. Najmanjša masa testnega vzorca je odvisna od zgornje nazivne velikosti frakcije (D) v milimetrih, in sicer:

- če je $D \geq 1,0$ mm, je minimalni masa testnega vzorca $0,2D$ kg,
- če je $D < 1,0$ mm, je minimalna masa testnega vzorca $0,2$ kg.

V primeru, da testnih vzorcev ne bomo takoj preskusili, jih shranimo v čiste in suhe posode, da agregat zaščitimo pred izgubo ali povečanjem deleža vode.

Pri sušenju smo uporabili pladenj, ki smo ga stehali (M_2) in po njem razporedili testni vzorec. Nato smo stehali pladenj s testnim vzorcem. Od te vrednosti smo odšteli maso pladnja (M_2) in tako dobili maso testnega vzorca (M_1). Pladenj z vzorcem smo sušili v sušilnici do stalne mase pri temperaturi (110 ± 5) °C. Da bi dosegli stalno maso (M_3), smo sledili postopku, ki je opisan v nadaljevanju. Pladenj z vzorcem smo ohladili na sobno temperaturo, stehali, od izmerjene vrednosti odšteli maso pladnja (M_2) in dobili maso vzorca (M_{d1}). Pladenj z vzorcem smo ponovno postavili v sušilnico za najmanj 1 uro, ohladili na sobno temperaturo in izmerili maso vzorca brez pladnja (M_{di}). V kolikor je bila razlika med M_{d1} in M_{di} manjša od 0,1 %, je bila stalna masa dosežena. Če je bila razlika enaka ali večja kot 0,1%, smo nadaljevali s postopkom sušenja (min. 1 ura) in nato tehtanja, dokler vrednost razlike ni bila manjša od 0,1 %. Ko je bila stalna masa dosežena, smo zapisali zadnjo vrednost M_{di} kot M_3 .

Vrednost količine vode smo določili kot razliko mas vlažnega in suhega agregata, izraženega v odstotkih glede na maso suhega testnega vzorca.

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} * 100 \quad (8)$$

kjer je:

M_1 – masa testnega vzorca v gramih (g),

M_3 – masa testnega vzorca, sušenega do stalne mase v gramih (g).

Rezultat smo zaokrožili na 0,1 % natančno.

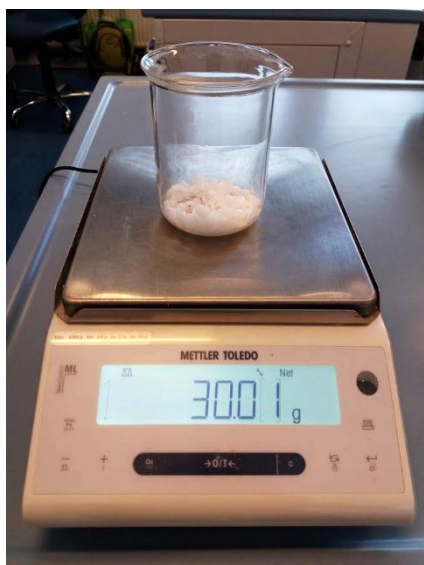
(Prevedeno po: SIST EN 1097-5)

3.1.3.7 Določanje prisotnosti humoznih delcev – Kolorimetrijska metoda

Humus je organska snov, ki nastane v zemeljskih tleh iz razpadlih delov živali in rastlin. Metoda je podana v standardu SIST EN 1744-1, temelji pa na načelu, da ob reakciji humusa in NaOH (natrijev hidroksid) nastane raztopina, intenziteta njene barve pa je odvisna od vsebnosti humoznih delcev. Po standardu SIST EN 932-2 smo pripravili vzorec po (500 ± 75) g finega agregata ter ga sušili v sušilnici do stalne mase pri temperaturi (40 ± 5) °C. Vzorec smo presejeli skozi sito 4 mm in obdržali zrna, ki so padla skozi sito. Pripravili smo 3 % raztopino NaOH (30 g kroglic NaOH raztopili v vodi, ohladili do sobne temperature in razredčili do 1 litra) (sliki 45 in 46). V stekleni merilni valj prostornine približno 450 cm³ in zunanjega premera približno 70 mm (merilni valj drugih dimenzij lahko vpliva na primerjavo barv) smo nalili raztopino NaOH do višine 80 mm. Nato smo dodali vzorec agregata do skupne višine (agregata in raztopine) 120 mm. Merilni valj smo stresali, da smo odstranili zračne mehurčke, zaprli z zamaškom in energično stresali še 1 minuto. Postopek smo ponovili še za drugi vzorec agregata. Oba merilna valja smo pustili mirovati 24 ur nato pa ju primerjali s primerjalno raztopino standardne barve

(oranžnordeče barve). Če je raztopina nad agregatom svetlejša kot primerjalna raztopina standardne barve je test negativen (pomeni majhno vsebnost organskih primesi agregata), če je temnejša pa pozitiven (običajno pomeni veliko vsebnost organskih primesi, razen v primeru vplivov drugih dejavnikov).

(Prevedeno po: SIST EN 1744-1)



Slika 45: Tehtanje NaOH



Slika 46: Priprava raztopine NaOH

3.1.4 Preiskave francoskega agregata

Kot smo že omenili, smo uporabili tudi francoski agregat, ki je bil dostavljen v Konstrukcijsko-prometni laboratorij v okviru evropskega projekta. Prostorninska masa in vpijanje vode sta bila podatka, ki smo ju dobili skupaj z dostavljenim agregatom (preglednici 10 in 11). Prostorninski masi frakcij 0 – 4 mm in 8 – 16 mm sta bili enaki, in sicer 2580 kg/m³, prostorninska masa frakcije 4 – 11 mm pa je bila za 50 kg/m³ manjša. Največji koeficient vpijanja vode je imela frakcija 4 – 11 mm, in sicer 2,61 %, najmanjšega pa frakcija 0 – 4 mm 0,77 %.

Preglednica 10: Prostorninska masa agregata

Frakcija agregata (mm)	Prostorninska masa (kg/m ³)
0 – 4	2580
4 – 11	2530
8 – 16	2580

Preglednica 11: Vpijanje vode agregata

Frakcija agregata (mm)	Vpijanje vode (%)
0 – 4	0,77
4 – 11	2,61
8 – 16	2,25

Po navodilih projekta naj bi bil grob agregat popolnoma nasičen (4 – 11 mm in 8 – 16 mm) pred začetkom mešanja betona. Postopek je bil sledeč: najprej smo po predpisih standarda SIST EN 1097-5, ki je predstavljen v poglavju 3.1.3.6 določili vlažnost posamezne frakcije agregata. Glede na koeficient vpijanja vode, podan v preglednici 11 in izračunani vlažnosti grobe frakcije smo izračunali količino vode, ki smo jo morali dodati agregatu za doseženo polno nasičenost. V zidarsko vedro smo stresli natehtano količino posamezne frakcije agregata in dodali izračunano količino vode ter ga zaprli s pokrovom. Agregat smo v vedru pustili 7 dni, vmes pa ga občasno premešali. Po pretečenem določenem času smo iz zidarskega vedra vzeli 3 vzorce, jih stehali in sušili v sušilnici pri temperaturi 80 °C do stalne mase. Iz povprečja vzorcev smo izračunali dejansko vlažnost grobega agregata. V kolikor smo dosegli popolno nasičenost, morata biti vrednosti vpijanja vode in dejanske vlažnosti enaki.

Iz povprečja 3 vzorcev, zmanjšanih po standardu SIST EN 932-2, smo določili vlažnost tudi pri drobnem agregatu (0 – 4 mm). Ker je bil koeficient vpijanja vode manjši, kot izračunana vlažnost agregata, smo to upoštevali pri izračunu dodane vode pri mešanju betona.

3.2 Priprava receptur za betonske mešanice

Odločili smo se, da bomo pripravili tri različne recepture betona. Predstavljene so v preglednici 12. Natančne količine sestavin v posameznem vzorcu betona in opisi mešanic so predstavljeni v naslednji treh poglavjih.

Preglednica 12: Sestava agregata za betone

Vzorec	Agregat
Vzorec 1	0 – 4 mm: francoski agregat 4 – 16 mm: recikliran agregat
Vzorec 2	0 – 4 mm: recikliran agregat 4 – 16 mm: francoski agregat
Vzorec 3	0 – 16 mm: recikliran agregat

Postopek mešanja betona pri vseh treh vzorcih je potekal približno enako. Po določitvi recepture betona smo preračunali in natehtali osnovne sestavine (slika 47) ter izmerili njihovo temperaturo (slika 48).



Slika 47: Natehtane sestavine za pripravo betona



Slika 48: Merjenje temperature

Z vlažno krpo smo obrisali mešalec. Vanj smo najprej vstavili grob agregat (4 – 16 mm), nato pa še drobni (0 – 4 mm). Po 30 sekundah mešanja smo dodali cement (slika 49), mešali še 30 sekund in nato dodali vodo s superplastifikatorjem ter mešali še 1 minuto. Ugasnili smo mešalec in z lopatko odstranili material, ki se je nabral na stenah. Po še 1 minuti mešanja naj bi bil beton pripravljen. Izmerili smo temperaturo betona in pričeli s preskusi in vgradnjo v kalupe.

Superplastifikator 1 je bil običajni superplastifikator. Superplastifikator 2 pa je bil polikarboksilatnega tipa, to je superplastifikator nove generacije. Njihova učinkovitost je večja in njihova uporaba podaljšuje obdelavnost svežih betonov.



Slika 49: Agregat in cement v mešalcu

3.2.1 Vzorec 1: frakcija 0 – 4 mm francoski agregat, frakcija 4 – 16 mm recikliran agregat

V času priprave vzorca 1 je bila temperatura zraka v laboratoriju 21,9 °C, vlažnost pa 59 %. V tej mešanici smo za droben agregat izbrali francoskega, grob agregat pa je bil iz recikliranega betona. Po določitvi recepture betona smo preračunali količine posameznih komponent za 45 dm³ betona, kar je zadostovalo za preskuse in zapolnitev 12 standardnih kalupov v obliki kocke s stranico 150 mm. Vpijanje vode pri vseh agregatih, še posebno pri frakciji 8 – 16 mm, je bila višja kot njihova naravna vlažnost, zato smo morali poleg zamesne vode, izračunane glede na vodocementno razmerje ($v/c = 0,52$), dodati še skoraj 600 g vode, maso agregatov pa na ta račun nekoliko zmanjšati. Predpostavljena poroznost svežega betona je bila 2,0 %. Za pripravo mešanice smo potrebovali 14,4 kg portlandskega cementa, 8,087 kg vode in 0,108 kg superplastifikatorja 1. Potrebovali smo še sledeče količine nazivne frakcije agregata: 37,178 kg francoskega agregata frakcije 0 – 4 mm, 20,040 kg recikliranega agregata frakcije 4 – 8 mm in 23,945 kg recikliranega agregata frakcije 8 – 16 mm (preglednica 13). Povečanje v/c razmerja ni bilo veliko, vseeno pa bi lahko vplivalo na trdnost betona. Izmerjena temperatura betonske mešanice je bila 22,9 °C.

Preglednica 13: Sestava betonske mešanice – vzorec 1

Sestavine	Temperatura sestavin (°C)	Količina v kg	Količina v dm ³	Preračunano na 45 dm ³
Cement	21,5	320,0	100,9	14,400 kg
Voda				8,087 kg
Zamesna voda (v/c)	19,9	170,9	170,9	7,488 kg
Dodana voda	20,2	/	/	0,599 kg
Agregat				
0 – 4 mm francoski agregat	21,9	830	321,7	37,178 kg
4 – 8 mm recikliran agregat	22,5	448,6	177,3	20,040 kg
8 – 16 mm recikliran agregat	22,7	538,3	208,6	23,945 kg
Superplastifikator 1	23,6	2,4	2,3	0,108 kg
Predpostavljena poroznost (%)	/	2,0	/	/

3.2.2 Vzorec 2: 0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat

Temperatura zraka v laboratoriju je bila 23,5 °C, vlažnost pa 55 %. Pri drugi mešanici smo se odločili za obratno varianto, kot pri prvi. Za grobo frakcijo smo uporabili francoski agregat, za drobno frakcijo pa recikliran agregat. Po navodilih projekta smo francoski agregat 7 dni pred mešanjem zaprli v zidarska vedra in dodali vodo, da bi dosegli polno nasičenost, tako da grobi agregat ne bi vpilal vode, dodano betonski mešanici. To nam je skoraj uspelo, dodati smo morali le 46,02 g vode. Frakcija 0 – 4 mm recikliranega agregata pa je imela naravno vlažnost 3,4 %, vodovpojnost pa približno 3x manjšo, kar je pomenilo presežek vode, ki smo jo morali odšteti od vrednosti zamesne vode. Masa drobne frakcije se je tako povečala za skoraj 1 kg. Vodocementno razmerje je bilo 0,52. Predpostavljena poroznost je bila 2,0 %. V mešalcu smo zmešali: 14,4 kg portlandskega cementa, 6,629 kg vode, 0,108 kg superplastifikatorja, 40,010 kg recikliranega agregata frakcije 0 – 4 mm, 20,002 kg francoskega agregata frakcije 4 – 8 mm in 24,730 kg prav tako francoskega agregata frakcije 8 – 16 mm (preglednica 14). Po mešanju cementa, agregatov, superplastifikatorja 1 ter preračunane količine vode, smo ugotovili, da je

mešanica 'presuha' in ni primerna za preskuse in vgradnjo v kalupe (slika 50). Ponovno smo zagnali mešalec ter v betonsko mešanico dodali 2,012 kg vode in 100 g superplastifikatorja 2. Po 3 minutah mešanja smo dobili betonsko mešanico, ki je bila primerna za preiskave in vgrajevanje v kalupe (slika 51). Vodocementno razmerje se je povečalo na 0,60, kar vpliva na zmanjšanje tlačne trdnosti betona. Izmerjena temperatura betonske mešanice je bila 23,1 °C.

Preglednica 14: Sestava betonske mešanice – vzorec 2

Sestavine betona	Temperatura sestavin (°C)	Količina v kg	Količina v dm ³	Preračunano na 45 dm ³
Cement	22,5	320,0	100,9	14,400 kg
Voda				8,641 kg
Zamesna voda (v/c)	19,9	170,9	170,9	7,488 kg
Zmanjšana količina vode		/	/	0,859 kg
Naknadno dodana voda	20,1	/	/	2,012 kg
Agregat				
0 – 4 mm recikliran agregat	22,7	869,0	307,3	40,010 kg
4 – 11 mm francoski agregat	22,8	445,0	175,89	20,002 kg
8 – 16 mm francoski agregat	22,5	550,0	213,18	24,730 kg
Superplastifikator 1	23,7	2,4	2,3	0,108 kg
Naknadno dodan superplastifikator 2	23,5	/	/	0,100 kg
Predpostavljena poroznost (%)	/	2,0	/	/



Slika 50: Beton neustrezen za vgradnjo



Slika 51: Betonska mešanica po dodajanju vode in superplastifikatorja 2

3.2.3 Vzorec 3: 0 – 16 mm recikliran agregat

Pri zadnjem vzorcu smo izbrali izključno recikliran agregat iz odpadnega betona, pridobljen na separaciji. Zaradi preobremenitve mešalca pri vzorcu 2 smo se odločili, da bomo namesto ene zamešali dve enaki mešanici po 25 litrov. To je pomenilo, da smo posamezne sestavine preračunali na 25 dm³ betona. Vse potrebne sestavine smo natehtali dvakratno in izmerili njihovo temperaturo. Ker smo vedeli, da ima drobni recikliran agregat veliko finih delcev, smo kot dodatek določili superplastifikator 2. Glede na pretekle izkušnje z vzorcem 2 smo se odločili, da bomo poleg vode, preračunane iz vodocementnega razmerja ($v/c = 0,52$) dodali še 0,555 kg vode in 0,067 kg superplastifikatorja 2. Upoštevajoč naravno vlažnost agregatov in njihovo vodovpojnost smo morali zamesno količino vode zmanjšati za 0,101 kg. Predpostavljena poroznost svežega betona je bila 2,0 %. Prva mešanica 3. vzorca je bila tako sestavljena iz sledečih sestavin: 8,0 kg portlandskega cementa, 4,614 kg vode, 0,067 kg superplastifikatorja 2 ter 22,229 kg frakcije 0 – 4 mm, 10,969 kg frakcije 4 – 8 mm in 13,303 kg frakcije 8 – 16 mm. Po treh minutah mešanja teh sestavin smo ustavili mešalec in preverili stanje. Beton je bil še vedno preveč 'suh', kar bi nam povzročalo težave pri vgrajevanju, zato smo dodali še 0,628 kg vode in 0,019 kg superplastifikatorja 2. Po ponovnem mešanju smo dobili beton, ustrezen za preskuse in vgrajevanje.

Za drugo mešanico vzorca 3 so količine cementa in agregatov ostale nespremenjene. Povečali sta se le količini vode in superplastifikatorja 2. Torej količini vode in superplastifikatorja 2, ki smo ju pri prvi mešanici dodali na začetku in naknadno, smo sešteli. To je bilo naše izhodišče za drugo mešanico. Osnova druge mešanice je bila sestavljena iz: 8,0 kg portlandskega cementa, 5,242 kg vode, 0,086 kg superplastifikatorja 2 ter 22,229 kg frakcije 0 – 4 mm, 10,969 kg frakcije 4 – 8 mm in 13,303 kg frakcije 8 – 16 mm. Po 3 minutah mešanja smo morali dodati še 0,244 kg vode in 0,010 kg superplastifikatorja 2 ter tako dobili betonsko mešanico, primerno za preskuse in vgradnjo v kalupe.

Pričakovali bi, da bo druga mešanica s končnimi količinami prve mešanice ustrezna, vendar ni bilo tako. Upoštevati moramo namreč, da smo pri prvi mešanici vodo in plastifikator dodajali počasi med preverjanjem stanja betona, pri drugi mešanici pa so bile te količine osnova na začetku mešanja. Vodocementno razmerje se je pri prvi mešanici povečal na 0,66, pri drugi mešanici pa na 0,69. Porast vodocementnega razmerja je velik in naj bi vplival na trdnost betona.

Preglednica 15: Sestava betonske mešanice – vzorec 3

Sestavine betona	Temperatura sestavin (°C)	Količina v kg	Količina v dm ³	Preračunano na 45 dm ³
Cement	22,5	320,0	100,9	8,000 kg (8,000 kg)
Voda				5,242 kg (5,486 kg)
Zamesna voda (v/c)	19,5	170,9	170,9	4,715 kg (5,343 kg)
Zmanjšana količina vode				0,101 kg (0,101 kg)
Naknadno dodana voda	19,5	/	/	0,628 kg (0,244 kg)
Agregat				
0 – 4 mm recikliran agregat	22,7	869,0	307,3	22,229 kg (22,229 kg)
4 – 8 mm recikliran agregat	23,1	448,6	177,3	10,969 kg (10,969 kg)
8 – 16 mm recikliran agregat	23,3	538,3	208,6	13,303 kg (13,303 kg)
Superplastifikator 2				0,086 kg (0,096 kg)
Dodan na začetku	23,3	/	/	0,067 kg (0,086 kg)
Dodan naknadno	23,3	/	/	0,019 kg (0,010 kg)
Predpostavljena poroznost (%)	/	2,0	/	/

V času priprave prve mešanice tretjega vzorca je bila temperatura zraka v laboratoriju 23,4 °C (temperatura zraka pri drugi mešanici 23,5 °C), vlažnost pa 51 %. Izmerjena temperatura betonske mešanice je bila v obeh primerih 26,1 °C. Količine posameznih sestavin so predstavljene v preglednici 15, kjer so v zadnjem stolpcu v prvi vrstici količine prve mešanice, v drugi vrstici v oklepaju pa druge mešanice betona.

3.3 Preskušanje svežega in strjenega betona

3.3.1 Priprave in preskušanje/preiskave svežega betona

Pripravo svežega betona smo izvedli po recepturi, ki smo jo predhodno natančno in premišljeno določili. Pri pripravi in preskusih svežega in kasneje strjenega betona smo upoštevali določila posameznih standardov.

3.3.1.1 Priprava svežega betona

Glavne sestavine betona so: agregat, cement in voda. V kolikor želimo izboljšati lastnosti svežega in strjenega betona ali doseči posebne lastnosti, dodamo tudi različne dodatke (pospeševalce, zaviralce, plastifikatorje, superplastifikatorje ...). Če se potrebuje manjša količina betona, se lahko zameša ročno, običajno pa se beton pripravi strojno z različnimi vrstami mešalcev. Te uporabljajo tudi na manjših gradbiščih, na večjih pa jim že pripravljen beton dostavijo z agitatorji iz betonarn. V laboratoriju smo uporabili protitočni laboratorijski mešalec z navpično osjo, kapacitete 50 dm³, v katerem smo zamešali po 25 dm³ in 45 dm³ betona. Postopek in priprava naših treh različnih vzorcev betona so natančno opisani v poglavju 3.2.

3.3.1.2 Vzorčenje svežega betona

Standard SIST EN 12350-1 prepisuje dva postopka za vzorčenje svežega betona: postopek z zbirnim in postopek z naključnim vzorcem. Pri zbirnem vzorcu gre za količino betona, sestavljeno iz večjega števila posameznih vzorcev, ki so razporejeni po šarži ali masi betona in med seboj temeljito premešani. Naključni vzorec je količina betona, vzeta iz dela šarže ali mase betona, sestavljene iz enega ali več posameznih vzorcev, ki so med seboj temeljito premešani. Posamezni vzorec je količina vzorca vzeta naenkrat z lopatko ali drugim primernim orodjem. Šarža je količina svežega betona, ki je zmešana v enem delovnem ciklu šaržnega mešalca.

Pred uporabo smo očistili vso opremo. Z lopatko smo odvzeli potrebno število posameznih vzorcev, ki so morali biti enakomerno razporejeni po šarži. Posamezne vzorce smo odlagali v posode. Zabeležili smo datum in čas vzorčenja. V vseh fazah vzorčenja, transporta in ravnanja z vzorci moramo preskušance iz svežega betona zaščititi pred onesnaževanjem, povečanjem in izgubljanjem vode in pred ekstremnimi spremembami temperature.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-1)

3.3.1.3 Preskušanje konsistence svežega betona – preskus s posedom stožca

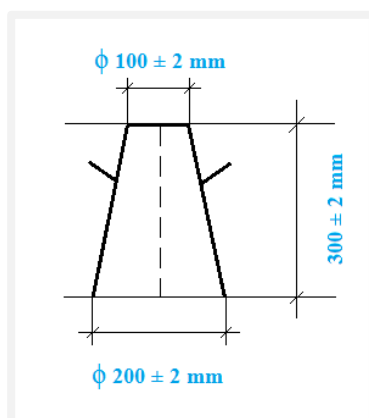
Konsistenco svežega betona določamo s štirimi metodami (preglednica 16), za posamezno metodo pa se odločimo na podlagi ocene plastičnosti sveže betonske mešanice:

Preglednica 16: Metode določanja konsistence svežega betona

Metoda	Standard	Dovoljeno največje zrno agregata D (mm)	Omejitev
preskus s posedom stožca	SIST EN 12350-2	40	posed med 10 mm in 210 mm
preskus Vebe	SIST EN 12350-3	63	Vebe čas med 5 s in 30 s
preskus določanja stopnje zgoščenosti	SIST EN 12350-4	63	stopnja zgoščenosti med 1,04 in 1,46
preskus z razlezom	SIST EN 12350-5	63	razlez med 340 mm in 600 mm

Glede na plastičnost naše betonske mešanice smo se odločili za preskus s posedom stožca, ki je opisan v standardu SIST EN 12350-2. Preskus s posedom stožca je primeren za določanje konsistence svežega betona, če se posed giblje med 10 mm in 210 mm. Izven teh skrajnih vrednosti je merjenje poseda neprimerno in je potrebno uporabiti drugo metodo. Metoda prav tako ni primerna za določanje konsistence, če se posed v prvi minuti po odstranitvi kalupa še vedno spreminja in če je največje zrno agregata nad 40 mm.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-2)



Slika 52: Notranje dimenzije konusa

Konus je izdelan iz kovine, ki ne reagira s cementno pasto in ni tanjši od 1,5 mm. Notranjost konusa mora biti gladka, brez izboklin in udrtin. Konus mora imeti obliko votlega prisekanega stožca, njegove dimenzije so podane na sliki 52.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-2)

Vzorec betona smo odvzeli v skladu s SIST EN 12350-1. Pred izvedbo preskusa smo vzorec premešali v posodi za mešanje s štirioglato lopatko oz. zidarsko žlico. Notranjost kalupa in osnovno ploščo smo obrisali z vlažno krpo in ju tako navlažili (slika 53). Kalup smo postavili na vodoravno osnovno ploščo. Med polnitvijo je bilo potrebno kalup močno pritisniti na osnovno ploščo, in sicer tako, da sem stala na dveh pločevinastih ušesih. Kalup smo napolnili v treh slojih, vsak sloj je po zgoščevanju zavzemal približno tretjino višine konusa. Vsak sloj smo zgostili s 25 udarci z zgoščevalno palico (kovinska palica s krožnim prečnim prerezom, premera (16 ± 1) mm, dolžine (600 ± 5) mm in z zaobljenima koncema). Pri polnjenju smo si pomagali z lijakom (slika 54). Udarce smo enakomerno razporedili po prerezu vsakega sloja (slika 55). V spodnjem sloju smo palico nekoliko nagnili, približno polovico udarcev smo izvedli spiralno proti središču konusa. Prvi sloj smo zgoščevali po celi globini. Drugi in vrhnji sloj smo zgostili vsakega po celi globini, tako da smo z udarci prodrli do spodaj ležečega sloja. Pri vrhnjem sloju smo kalup pred zgoščevanjem napolnili preko roba. Če je po zgoščevanju vrhnji sloj beton pod zgornjim robom konusa, je potrebno beton dodati in ga zgostiti. Po zgoščevanju vrhnjega sloja smo s palico s kretnjami žaganja in valjanja izravnali površino betona in očistili beton z osnovne plošče. Nato smo previdno navpično dvignili konus. Dvig konusa smo morali opraviti v 2 do 5 sekundah z enakomernim vlečenjem navzgor, ne da bi se stranski premiki in zasuki kalupa prenašali na beton. Celoten postopek od začetka polnjenja do odstranitve konusa smo morali izvesti brez prekinitve in najkasneje v 150 sekundah. Takoj po odstranitvi konusa smo izmerili in zabeležili posed h (slika 56) z določitvijo razlike med višino konusa in najvišjo točko posednega testnega vzorca, kot je prikazano na sliki 57 levo in ga zaokrožili na 10 mm.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-2)



Slika 53: Navlaženje osnovne plošče



Slika 54: Polnjenje kalupa s pomočjo lijaka



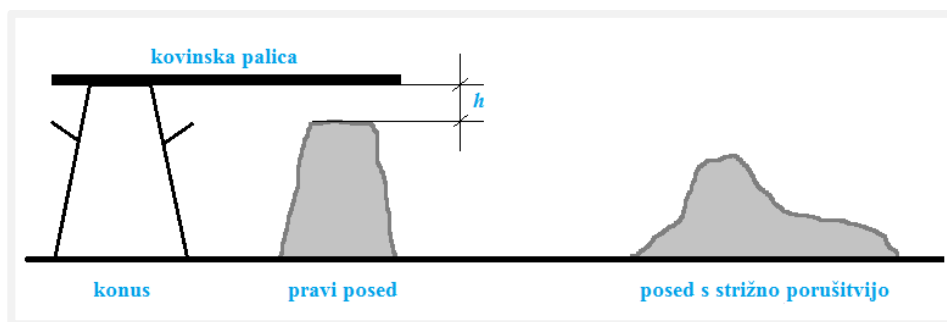
Slika 55: Zgoščevanje s kovinsko palico



Slika 56: Merjenje poseda

Preskus je bil veljaven, če se je končal s pravim posedom, v katerem betonski preskušaneec zadrži simetrično obliko. Če se betonski preskušaneec posede s strižno porušitvijo (del betona se zruši, del zadrži obliko) (slika 57, desno), poskus s posedom ponovimo. V primeru, da se dva zaporedna preskusa končata s strižno porušitvijo, betonu primanjkuje ustrezne plastičnosti in kohezivnosti, da bi bil preskus s posedom stožca primeren.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-2)



Slika 57: Merjenje poseda

Po izmerjenem in zabeleženem posedu h smo v skladu s standardom SIST EN 206 določili stopnjo poseda (preglednica 17).

Preglednica 17: Stopnje poseda po SIST EN 206

Stopnja	Posed (mm)
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5 ^a	≥ 220
^a Preskus ni primeren, izbrati moramo drugo metodo.	

3.3.1.4 Določanje gostote svežega betona

Standard SIST EN 12350-6 predpisuje metodo za določanje gostote zgoščenega svežega betona v laboratoriju in na terenu. Svež beton smo vgradili v togo in nepropustno posodo (kalup) znane prostornine in mase in nato stehali.

Vzorec smo pridobili v skladu s SIST EN 12350-1. Pred izvedbo testa smo vzorec z lopatico kvadratne oblike premešali v mešalni posodi. V skladu z dodatkom A, standarda 12350-6, smo kalibrirali posodo in tako določili njeno prostornino. Postopek je opisan v nadaljevanju. Stehtali smo posodo, določili njeno maso (m_l) in zabeležili izmerjeno vrednost. V odvisnosti od konsistence betona in metode zgoščevanja, smo posodo napolnili v dveh ali več slojih, da smo dosegli popolno zgostitev. Beton je bilo potrebno zgostiti takoj po vnosu v posodo, tako da smo dosegli popolno zgostitev, vendar brez prekomerne segregacije ali izločanja cementnega mleka (slika 58). Vsak sloj je bilo potrebno zgostiti po eni izmed metod, opisanih v preglednici 18. Popolno zgostitev z mehanskim vibriranjem smo dosegli,

ko na površini betona ni bilo opaziti večjih zračnih mehurčkov in je bila površina gladka in lesketajoča, brez prekomerne segregacije (slika 59).



Slika 58: Zgoščevanje svežega betona



Slika 59: Napolnjena kalupa s svežim betonom

Po zgostitvi smo vrhnji sloj poravnali z vrhom posode z zidarsko žlico. Površino in rob smo zgladili z ravnilom in obrisali zunanost posode. Posodo z vsebino (betonom) smo stehali, določili njeno maso (m_2) in zabeležili izmerjeno vrednost. Gostoto smo izračunali po enačbi 9:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (9)$$

kjer je:

D – gostota svežega betona (kg/m^3),

m_1 – masa posode (kg),

m_2 – masa posode napolnjena s zgoščenim betonom (kg),

V – prostornina posode (m^3).

Gostoto svežega betona zaokrožimo na 10 kg/m^3 .

(Prevedeno po: SIST EN 12350-6)

SIST EN 12350-6 (Dodatek A): Izvedba kalibracije posode

Prazno posodo in stekleno ploščo smo stehali na $0,01 \text{ kg}$ natančno in zabeležili izmerjeno maso. Posodo smo postavili na vodoravno površino, jo prekomerno napolnili z vodo temperature $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ter čeznjo potegnili stekleno ploščo, da smo odstranili zračne mehurčke. Stehali smo posodo, stekleno ploščo in vodo na $0,01 \text{ kg}$ natančno. Prostornino posode smo izračunali z deljenjem skupne mase (kg) vode, potrebne za napolnitev posode z 998 kg/m^3 . Prostornino posode izrazimo v kubičnih metrih (m^3) na $0,01 \text{ dm}^3$ natančno.

$$V = \frac{m_v}{\gamma_v} \quad (10)$$

kjer je:

V – prostornina posode (m^3),

m_v – masa vode, potrebna za napolnitev posode (kg),

γ_v – gostota vode, podane vrednosti 998 (kg/m^3).

(Prevedeno po: SIST EN 12350-6)

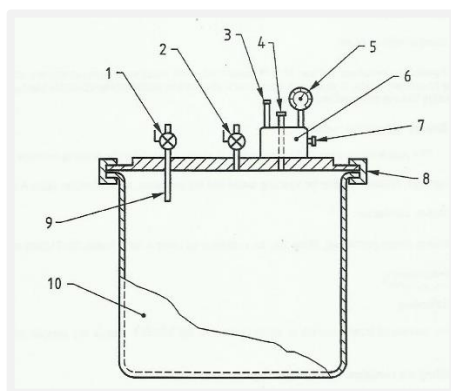
Preglednica 18: Zgoščevanje vgrajenega betona

Sredstva za zgoščevanje betona		Opis
mehansko zgoščevanje	notranji (palični vibrator)	najmanjša frekvenca 120 Hz (7200 nihajev na minuto), premer ne presega približno ene četrtine najmanjše dimenzije preskušanca
	vibracijska miza	najmanjša frekvenca 40 Hz (2400 nihajev na minuto)
ročno zgoščevanje	zgoščevalna palica okroglega prereza	narejena iz jekla, s premerom približno 16 mm in dolžine približno 600 mm, z zaobljenimi konci
	zgoščevalna palica kvadratnega prereza	narejena iz jekla, dimenzij približno 25 x 25 mm in dolžine približno 380 mm

3.3.1.5 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu

V standardu SIST EN 12350-7 sta opisani metodi za določanje vsebnosti zraka v svežem betonu, narejenem iz normalno težkega oziroma relativno gostega agregata z največjim zrnem 63 mm. Metodi temeljita na načelu Boyle-Mariotte-ovega zakona. Gre za metodo vodnega stolpca in manometriško metodo. Pri prvi se uporablja merilnik vodnega stolpca, pri drugi pa merilnik z manometrom. V našem primeru smo uporabili manometriško metodo, zato bo v nadaljevanju opisana le ta.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-7)



Legenda:

- 1 – ventil A
- 2 – ventil B
- 3 – črpalka
- 4 – glavni zračni ventil
- 5 – manometer
- 6 – zračna komora
- 7 – izpustni ventil zraka
- 8 – zaklep
- 9 – podaljšek cevi za preverjanje kalibracije
- 10 – posoda

Slika 60: Posoda z manometrom (SIST EN 12350-7)

Vzorec svežega betona smo vzeli v skladu s SIST EN 12350-1. Pred izvedbo testa smo vzorec betona dobro premešali. V odvisnosti od gostote in konsistence svežega betona smo se odločili, v koliko plasteh bomo vgradili beton v posodo in katero metodo zgoščevanja, opisano v preglednici 18, bomo uporabili. Beton, pri katerem je bila konsistenca določena s stopnjo posoda S3 ali večja, smo lahko vgradili v eni plasti. Popolna zgostitev z mehanskim vibriranjem je bila dosežena, ko na površini betona ni bilo več videti zračnih mehurčkov in je postala površina gladka in lesketajoča, brez prekomerne segregacije. Količina materiala, uporabljenega v zadnjem sloju, je morala zadostovati za napolnitev posode tako, da ni bilo potrebno odstranjevati odvečnega materiala. Če je bilo potrebno, smo dodali majhno količino materiala, da smo napolnili posodo, vendar smo se morali izogniti odstranjevanju preseženega materiala. Za popolno zgostitev smo vgrajen beton zgoščevali z vibracijsko iglo (slika 61). Pretiranemu vibriranju smo se izogibali. Vibrator smo držali navpično, ni se smel dotikati dna oziroma stranic posode.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-7)



Slika 61: Zgoščevanje z vibracijsko iglo

Po zgoščevanju smo poravnali vrh betona z zidarsko žlico in temeljito očistili rob posode in pokrova. Na posodo smo namestili in z zaponkami pritrdili pokrov (slika 62). Zaprli smo glavni zračni ventil, odprli ventila A in B ter z brizgalko vbrizgali vodo skozi ventil A ali B (slika 63), dokler se ni voda pojavila iz drugega ventila. Z lesenim kladivom smo narahlo udarjali po napravi, da smo odstranili ujeti zrak. Zaprli smo ventil za izpust zraka na zračni komori in črpali zrak v zračno komoro toliko časa, da se je kazalec na manometru premaknil na začetno točko. Ko se je po nekaj sekundah stisnjeni zrak ohladil na temperaturo okolice, smo z dodajanjem oziroma izpuščanjem zraka ponovno stabilizirali kazalec na manometru na začetno točko. Med tem smo rahlo udarjali po manometru. Zaprli smo ventila A in B in odprli glavni zračni ventil in močno tolkli po steni posode. Po rahlem udarjanju po manometru smo odčitali prikazano vrednost, ki je pomenila navidezen odstotek zraka, zaokroženega na 0,1 % natančno. Pred odstranitvijo pokrova smo odprli ventila A in B, da se je razbremenil pritisk.

(Prevedeno po: SIST EN 12350-7)



Slika 62: Pritrditev pokrova



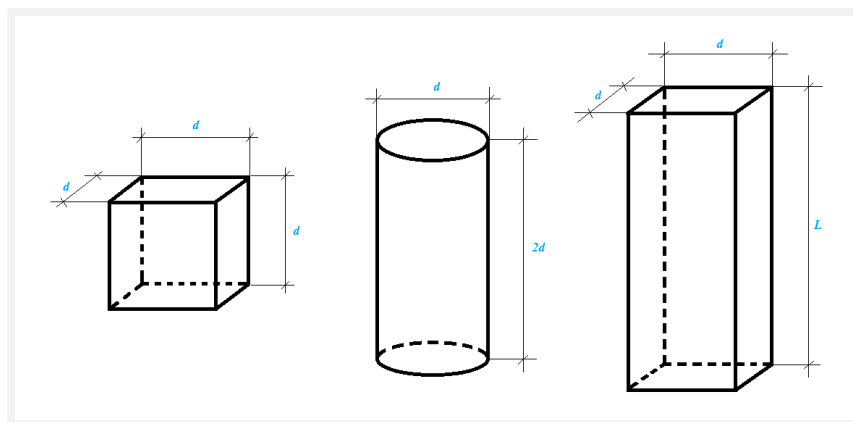
Slika 63: Vbrizganje vode

3.3.2 Priprava standardnih preskušancev

Standard SIST EN 12390-1 obravnava obliko, mere in dovoljena odstopanja vgrajenih betonskih preskušancev v obliki kock, valjev in prizem ter kalupov, ki so potrebni za njihovo izdelavo. Za preskušance v obliki kocke, valja ali prizme velja, da mora biti dimenzija vzorca d večja od 3,5-kratnika maksimalnega zrna v betonu ($d > 3,5D_{max}$).

(Prevedeno po: SIST EN 12390-1)

Določanje dimenzij preskušancev v obliki kocke, pokončnega valja in pokončne prizme je prikazano na sliki 64.



Slika 64: Dimenzije kocke, valja in prizme

V preglednici 19 so podane nazivne velikosti preskušancev v obliki kocke, valja in prizme.

Preglednica 19: Nazivne velikosti preskušancev po SIST EN 12390-1

Oblika kalupa in dimenzije			
Kocka	Pokončni valj	Pokončna prizma	
d (mm)	d (mm)	d (mm)	L (mm)
100	100	100	$\geq 3,5d$
150	113 ^a	150	
200	150	200	
250	200	250	
300	250	300	
	300		
	^a Prečni prerez s površino 10000 mm ² .		

Za namene naših raziskav smo uporabili kalupe v obliki kocke z nazivno velikostjo 150 mm (slika 65).

Kalupi morajo biti vodotesni in ne smejo vpijati vode. Stikališča v kalupu se premažejo z voskom, oljem ali mastjo, da se doseže nepropustnost za vodo. Modeli, razen kalibriranih, so lahko narejeni iz različnih materialov, ki so primerni za izdelavo betonskih preskušancev. Kalibrirani kalupi naj bi bili narejeni iz jekla ali litega železa.

(Prevedeno po: SIST EN 12390-1)



Slika 65: Kalupi v obliki kocke

3.3.3 Izdelava in nega preskušancev

Standard SIST EN 12390-2 navaja metode za izdelavo in nego preskušancev za preskuse trdnosti, kar obsega pripravo in polnjenje kalupov, zgoščevanje betona, ravnanje površine, nego in transport preskušancev.

Vzorec betona smo vzeli v skladu s standardom SIST EN 12350-1. Pred polnjenjem kalupov smo beton premešali s štirioglasto lopatico v posodi za mešanje. Pred polnjenjem kalupa smo notranje površine premazali s tanko plastjo nereaktivnega sredstva, da se prepreči sprijemanje betona na kalup (slika 66). Glede na konsistenco betona smo kalup napolnili v dveh plasteh. Takoj po vgraditvi smo zgoščevali beton tako, da smo dosegli popolno zgostitev brez prekomerne segregacije ali izločanja cementnega mleka. Vsak sloj je bilo potrebno zgostiti po eni od metod, ki so podane v preglednici 18. V našem primeru smo izbrali vibracijsko iglo. Popolna zgoščenost je bila dosežena, ko se na površju betona niso več pojavljali večji zračni mehurčki in ko je površina postala gladka in lesketajoča. Prekomernemu vibriranju smo se morali izogibati zaradi prekomerne segregacije. Vibrator smo držali navpično in pazili, da se nismo dotikali dna ali stranic kalupa, saj bi ga s tem lahko poškodovali.

Z zidarsko žlico smo odstranili presežek betona in zravnali površino betona z robovi kalupa. Preskušance smo označili (oznaka preskušanca, datum, vrsta mešanice in stehtali) (slika 67). Preskušance smo 24 ur pustili v kalupih pri temperaturi $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$, pred izsušitvijo smo jih zaščitili s polivinilom (slika 68). Po odstranitvi kalupov (slika 69) smo preskušance do začetka preskusov negovali v vodni kopeli temperature $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ (slika 70).

V kolikor je potreben transport preskušancev: v vseh fazah transporta je potrebno preprečiti izgubo vlage in odstopanja od zahtevane temperature. Preskušance lahko zapakiramo v moker pesek, žagovino, krpe ali v plastične vreče napolnjene z vodo.

(Prevedeno po: SIST EN 12390-2)



Slika 66: Premaz z opažnim oljem



Slika 67: Označitev preskušanca



Slika 68: Zaščita preskušancev



Slika 69: Odstranitev kalupa



Slika 70: Nega preskušancev

3.3.4 Preskušanje strjenega betona

Preiskave tlačne trdnosti in dinamičnega modula elastičnosti smo opravili pri starosti betonskih kock 24 ur, 7 dni in 28 dni, vsakokrat na po treh kockah. 28. dan smo na preostalih treh kockah začeli s preskusom odpornosti betona na prodor vode pod pritiskom. Preskus traja 3 dni (72 ur), zato rezultate preiskave dobili pri starosti betona 31 dni. Pri tej starosti smo izvedli preskus cepilne natezne trdnosti, da smo dobili rezultate globine prodora vode, istočasno pa še oceno natezne trdnosti betona.

3.3.4.1 Določanje tlačne trdnosti betona

Po določenih standarda SIST EN 12390-3 smo izvedli preskus tlačne trdnosti betona s pomočjo stiskalnice, ki je morala biti skladna s SIST EN 12390-4.

Tlačno trdnost smo preskušali na standardiziranih kockah pri starosti 1 dan, 7 dni in 28 dni. Preskušanece smo vzeli iz vodne kopeli in z njega obrisali površinsko vodo. Očistili smo vse površine za prenos obtežbe na preskusni napravi. Preskušanec smo postavili na sredino stiskalne plošče (slika 71). Paziti smo morali, da je obtežba delovala pravokotno na smer vgrajevanja. Kocko smo obremenjevali s konstantno hitrostjo v območju od $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s. Obremenitev smo enakomerno povečevali z izbrano konstantno hitrostjo do največje možne obremenitve. Na monitorju, ki je povezan s stiskalno napravo, smo odčitali največjo silo, ki jo preskušanec lahko prenese (slika 72). Ocenili smo, ali se je preskušanec porušil zadovoljivo (sliki 73) ali nezadovoljivo. Slednja porušitev bi bila lahko posledica nezadostne pazljivosti pri postopkih preskušanja, še posebno pri postavitvi preskušanca ali pa zaradi

napake v stiskalnici. Tlačno trdnost smo izračunali tako, da smo največjo zabeleženo silo delili s površino, na katero je ta sila delovala:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (11)$$

kjer je:

f_c – tlačna trdnost v MPa (N/mm²),

F – največja obremenitev ob porušitvi (N),

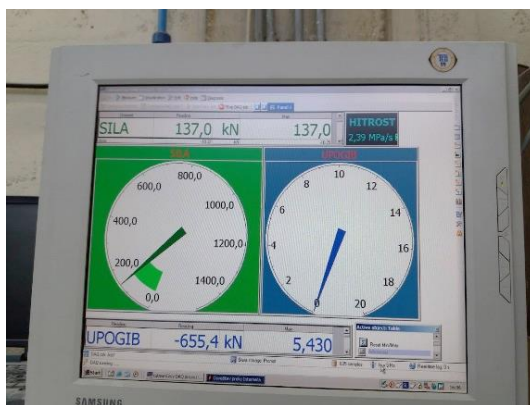
A_c – ploščina preseka preskušanca na katerega deluje tlačna sila (mm²).

Tlačno trdnost smo zaokrožili na 0,1 MPa (N/mm²).

(Prevedeno po: SIST EN 12390-3)



Slika 71: Preskušanje tlačne trdnosti



Slika 72: Izpis porušne sile na monitorju



Slika 73: Zadovoljiva porušitev



Slika 74: Zadovoljiva porušitev

Preglednica 20: Razredi tlačne trdnosti za preskušance v obliki kocke po SIST EN 206

Razred tlačne trdnosti	Minimalna karakteristična trdnost kocke $f_{ck,cube}$ (N/mm²)
C8/10	10
C12/15	15
C16/20	20
C20/25	25
C25/30	30
C30/37	37
C35/45	45
C40/50	50
C45/55	55
C50/60	60
C60/75	75
C70/85	85
C80/95	95
C90/105	105
C100/115	115

Osemindvajseti dan smo na 3 kockah izvedli tlačni preskus in po enačbi 11 izračunali tlačno trdnost. Iz rezultatov 3 kock smo izračunali povprečno vrednost tlačne trdnosti in s pomočjo preglednice 20 določili razred tlačne trdnosti posamezne mešanice betona.

3.3.4.2 Določanje gostote strjenega betona

Gostoto strjenega betona se določi po standardu SIST EN 12390-7. Predpostavljena so tri različna stanja strjenega betona: dostavljeno (m_r), nasičeno z vodo (m_s) in posušeno v sušilnici (m_o). Prostornino določimo s tremi metodami: z izrivanjem vode, z izračunom, pri čemer uporabimo dejanske meritve in pri kockah z izračunom na podlagi preverjenih, označenih dimenzij.

V našem primeru smo maso preskušanca določili v z vodo nasičenem stanju. Preskušanec smo negovali v vodni kopeli pri temperaturi $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, dokler se masa ne spremeni za manj kot 0,2 % v 24 urah. Pred vsakim tehtanjem smo s površine preskušanca obrisali odvečno vodo. Zabeležili smo vrednost nasičene mase (m_s) v kilogramih. Pri tem lahko predpostavljamo, da je preskušanec, ki je bil pred preskusom najmanj 72 ur negovan v vodi, nasičen do stalne mase.

Prostornino pri preskušancih v obliki kock smo določili na podlagi dejanskih meritev dimenzij. Dimenzije preskušanca je bilo potrebno preveriti v skladu s SIST EN 12390-1. Prostornino kocke smo izračunali v m³ na tri decimalna mesta točno.

$$D = \frac{m}{V} \quad (12)$$

kjer je:

D – gostota, ki se navezuje na stanje preskušanca in na metodo določanja prostornine (kg/m³),

m – masa, določena v stanju v kakršnem je bil preskušanelec v času preskusa (kg),

V – prostornina, določena po izbrani metodi (m³).

Rezultat zaokrožimo na najbližjih 10 kg/m³.

(Prevedeno po: SIST EN 12390-7)

3.3.4.3 Določanje cepilne natezne trdnosti betona

Preskus cepilne natezne trdnosti smo opravili na kockah starih 31 dni, ki smo jih predhodno izpostavili preskusu globine prodora vode pod pritiskom.

Preskus cepilne natezne trdnosti smo izvedli v skladu s SIST EN 12390-6 (Dodatek A). Na kocki smo izmerili dimenziji l in d , nato pa označili dve liniji, vzdolž katerih naj bi potekala obremenitev. Kocko smo sredinsko vpeli v vpenjalno glavo tako, da je bila smer vpetosti in kasneje delovanja sile pravokotna na smer vgrajevanja (slika 75). Vpenjalno glavo s kocko smo postavili na sredino stiskalne plošče, ki smo jo predhodno očistili. Pričeli smo s konstantnim obremenjevanjem v območju od 0,04 MPa/s do 0,06 MPa/s in ga nato enakomerno povečevali z izbrano konstantno hitrostjo $\pm 10\%$ do največje možne obremenitve (slika 76). Vrednost največje sile se nam je izpisala na monitorju, ki je bil povezan s stiskalnico. Ob znanih parametrih smo izračunali cepilno natezno trdnost z enačbo 13:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (13)$$

kjer je:

f_{ct} – cepilna natezna trdnost v MPa (N/mm²),

F – največja obremenitev ob porušitvi (N),

l – dolžina raznosa sile (mm),

d – merodajna dimenzija preskušanca (mm).

Cepilno natezno trdnost zaokrožimo na 0,05 MPa natančno.

(Prevedeno po: SIST EN 12390-6)



Slika 75: Preskušanelec v stiskalnici



Slika 76: Porušitev

3.3.4.4 Določanje globine prodora vode pod pritiskom

V standardu SIST EN 12390-8 je predpisana metoda za določanje globine prodora vode pod pritiskom na strjenem betonu, ki je bil negovan v vodni kopeli. Voda pod pritiskom deluje na površino strjenega betona. Nato se preskušanelec razcepi in izmeri globino prodora vode.



Slika 77: Naprava za določanje globine prodora vode pod pritiskom

Preskušanelec v obliki kocke smo razkalupili in negovali v vodni kopeli kot je opisano v poglavju 3.3.3. Po 28 dneh smo preskušanelec vzeli iz vode, ga obrisali in površino, ki naj bi bila izpostavljena vodnemu pritisku, očistili z žičnato krtačo. Nato smo ga položili v napravo tako, da vodni pritisk ni deloval v

smeri vgrajevanja (slika 77). Preskušanece smo za (72 ± 2) ur izpostavili vodnemu pritisku (500 ± 5) kPa oziroma 5 barov. Med testom smo opazovali površine, ki niso bile izpostavljene pritisku, če bi se pojavila voda, kar bi morali zabeležiti. Po preteku predpisanega časa smo preskušanece odstranili iz naprave, ga obrisali in razcepili na pol, pravokotno na površino, na katero je deloval vodni pritisk. Bolj natančno je postopek cepitve opisan v poglavju 3.3.4.3. Ko se je razcepljena površina toliko osušila, da je bila vidna meja penetracije vode, smo jo označili z vodoodpornim flomastrom (slika 78). Izmerili smo največjo globino prodora vode (slika 79), jo zapisali na milimeter natančno ter na podlagi preglednice 21 določili stopnjo odpornosti proti prodoru vode.

(Prevedeno po: SIST EN 12390-8)

Preglednica 21: Dovoljene vrednosti prodora vode po SIST EN 1026

Stopnja odpornosti proti prodoru vode	Največji povprečni dovoljeni prodor vode na vzorcu (mm)	Največji dovoljeni odklon posameznega preskušanca (mm)
PV-I	50	+15
PV-II	30	+10
PV-III	20	+5



Slika 78: Označena globina prodora vode



Slika 79: Meritev globine vode

3.3.4.5 Določanje dinamičnega modula elastičnosti

»Naprava za preskušanje s pomočjo ultrazvoka je sestavljena iz merilnega inštrumenta, dveh sond, od katerih je ena oddajnik, druga pa sprejemnik ultrazvočnih impulzov, kablov, ki spajajo merilni instrument s sondami in kalibratorja, ki služi za preverjanje pravilnosti delovanja aparature. Vzorec, na katerem merimo hitrost ultrazvoka, postavimo med sonde in izmerimo čas t , ki ga potrebuje ultrazvok

za prehod dolžine s med sondami (slika 81). Pri preverjanju aparature pa med sondi postavimo kalibrator – odčitek na merilnem instrumentu mora biti enak vrednosti, ki je označena na kalibratorju.

Pri postavljanju sond na površino elementa, na katerem vršimo merjenje, je potrebno zagotoviti popolni kontakt s površino. To dosežemo s čiščenjem in ravnanjem površine in z nanašanjem tankega sloja vazelina, tekočega mila ali silikonske paste (slika 80). Obvezno moramo namreč odstraniti zrak na stiku sonda – material.« [21]

Hitrost ultrazvoka izračunamo s pomočjo enačbe 14:

$$v = \frac{s}{t} * 10^6 \quad (14)$$

kjer je:

s – pot v metrih (m),

t – čas v mikrosekundah (μs).

Predpostavili smo, da ima dinamični Poissonov koeficient za beton μ_D vrednost 0,2.

$$\bar{f}(\mu_D) = \frac{1 - \mu_D}{(1 + \mu_D) * (1 - 2\mu_D)} \quad (15)$$

Dinamični modul elastičnosti E_D se določi z merjenjem hitrosti longitudinalnih (delci snovi nihajo v smeri širjenja motnje) ultrazvočnih valov, izračuna pa po enačbi 16:

$$E_D = \frac{v^2 * \gamma}{\bar{f}(\mu_D)} \quad (16)$$

kjer je:

E_D – dinamični modul elastičnosti (GPa),

v – hitrost gibanja ultrazvočnih valov (m/sec),

γ – gostota betona (kg/m^3),

μ_D – dinamični Poissonov koeficient. [21]



Slika 80: Nanos vazelina



Slika 81: Merjenje ultrazvočnih valov

3.4 Rezultati in analiza laboratorijskih raziskav

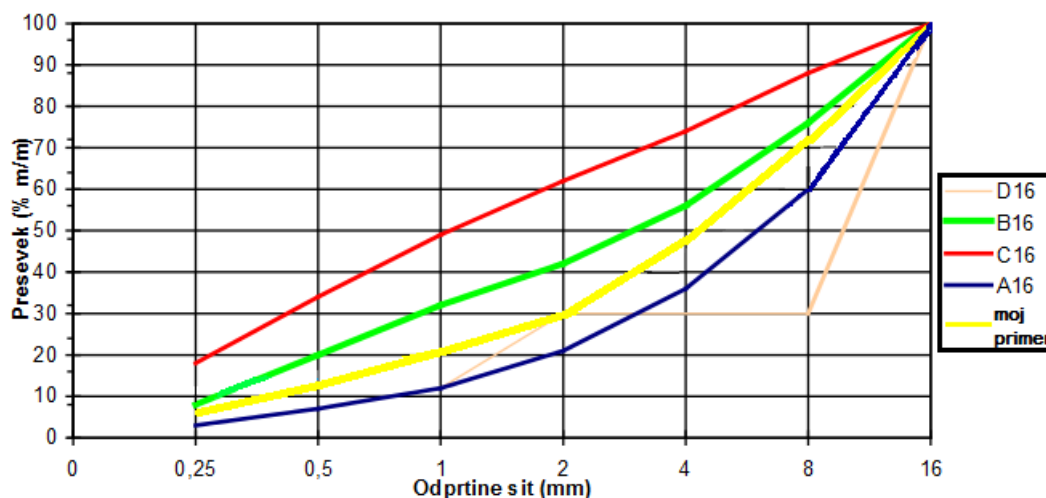
3.4.1 Preiskave agregatov

3.4.1.1 Določanje zrnivosti recikliranega agregata s sejanjem

Najprej smo vsako frakcijo recikliranega agregata presejali, stehtali ostanke na situ in izračunali deleže presevkov. Nato smo prostorninski delež posamezne frakcije, pomnožili s pripadajočimi presevky ter sešteli tako dobljene vrednosti za vse frakcije, ki so sestavljale agregat (preglednica 22). Tako smo dobili celotno sejarno krivuljo za recikliran agregat.

Preglednica 22: Zrnavost recikliranega agregata

Sito	Presevek skozi sito frakcije 0 – 16 mm (%)
16	100,0
8	72,2
4	49,4
2	31,2
1	20,8
0,5	12,1
0,25	7,6
0,125	4,1



Slika 82: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za agregat frakcije 0 – 16 mm po SIST 1026 in krivulja zrnivosti recikliranega agregata

V standardu SIST 1026 so podane priporočene mejne krivulje zrnivosti mešanice agregata 0 – 16 mm. Če naše rezultate vnesemo v ta grafikon lahko vidimo, da naša krivulja poteka med krivuljama A in B (slika 82). Naš agregat vsebuje zadostno količino posameznih frakcij in lahko rečemo, da ima ustrezno zrnovostno sestavo, kar naj nam bi omogočilo izdelavo svežega betona ustrezne plastičnosti in strjenega betona z ustreznimi lastnostmi.

3.4.1.2 Določitev finih delcev recikliranega agregata s sejanjem

Za posamezno frakcijo smo izvedli po pet preskusov (ponovitev preiskave), nato pa izračunali povprečno vrednost vsebnosti finih delcev. Rezultati so podani v preglednici 23. Najvišji delež finih delcev je pričakovano v frakciji 0 – 4 mm, in sicer kar 14,54 %. Ker je bil agregat pri prvem sejanju nekoliko bolj vlažen, so bili fini delci prilepljeni na večja zrna.

Če primerjamo preglednici 22 in 23 je razlika v deležih praškastih delcev velika. Glavni razlog je v shranjeni odpadni vodi, ki smo jo posušili in ostanek pred začetkom sejanja dodali k vzorcu. Domnevamo lahko, da je recikliran agregat vseboval veliko delcev manjših od 0,125 mm, ki smo jih pri analizi zrnivosti odstranili z odpadno vodo.

Preglednica 23: Delež finih delcev

Frakcija	Frakcija 0 – 4 mm	Frakcija 4 – 8 mm	Frakcija 8 – 16 mm
Delež finih delcev (%)	14,54	5,31	3,37

Fine delce v recikliranem agregatu sestavljajo delci cementnega kamna in delci agregata, ki so manjši od 0,125 mm. Fini delci so potrebni za ustrezno obdelavnost svežega betona in ustrezno gostoto strjenega betona. V našem primeru smo sešteli vrednosti cementa in agregata ($< 0,125$ mm) po posameznih frakcijah ter dobili količino finih delcev, ki je bila 488 kg/m^3 , kar je velika količina.

3.4.1.3 Določanje oblike zrn recikliranega agregata – Modul oblike

Oblika zrn agregata je pri naravnih agregatih odvisna od njihovega izvora, pri recikliranih agregatih pa od njihove predelave (npr. vrsta drobilca). Zrna so različnih oblik: okrogla, podolgovata, ploščata, oglata, zaobljena ...

Preskus smo izvedli na frakciji 8 – 16 mm, kjer smo s kljunastim merilom zmerili približno kilogram zrn. Izračunan modul oblike je bil 8,5 %, kar predstavlja majhen delež zrn neugodne oblike. Sklepamo lahko, da na separaciji uporabljajo naprave za predelavo, ki ustrezno drobijo odpadni beton v recikliran agregat.

Rezultati oblike zrn agregata so podani v preglednici 24.

Preglednica 24: Rezultati določanja modula oblike

Frakcija (mm)	Masa zrn (g)	Masa zrn neugodne oblike (g)	Masa zrn ugodne oblike (g)	Modul oblike (%)
8 - 6	1004,0	85,6	918,4	8,5

3.4.1.4 Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za grobi agregat (4 – 31,5 mm)

Rezultati za vpijanje vode in prostorninsko maso zrn frakcije 4 – 8 mm so podani v preglednici 25. Te rezultate upoštevamo tudi pri frakciji 8 – 16 mm. Agregati frakcije 4 – 16 mm so imeli ustrezno prostorninsko maso in smo jih lahko uporabili za izdelavo betona.

Preglednica 25: Rezultati prostorninske mase in vpijanja vode za grobi agregat

Prostorninska masa (Mg/m³)	Rezultati izračunov
Navidezna prostorninska masa	2,74
Prostorninska masa agregata, sušenega v sušilnici	2,42
Prostorninska masa z vodo zasičenega, površinsko suhega agregata	2,54
Vpijanje vode (%)	4,8

Prostorninska masa normalno težkega agregata, sušenega v sušilnici je po SIST EN 206 med 2000 kg/m³ in 3000 kg/m³. V našem primeru je prostorninska masa v sušilnici sušenega grobega agregata 2420 kg/m³, prostorninska masa drobnega agregata pa 2670 kg/m³, kar recikliran agregat frakcij od 0 – 16 mm uvršča med normalno težek agregat. Ker gostota agregata vpliva na gostoto betona, saj agregat predstavlja 65 do 75 % delež betona, bo tudi beton normalno težak.

3.4.1.5 Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode za drobni agregat (0,063 – 4 mm)

Rezultati za vpijanje vode in prostorninsko maso zrn frakcije 4 – 8 mm so podani v preglednici 26. Drobní agregat je imel ustrezno prostorninsko maso.

Preglednica 26: Rezultati prostorninske mase in vpijanja vode za drobni agregat

Prostorninska masa (Mg/m³)	Rezultati izračunov
Navidezna prostorninska masa	2,75
Prostorninska masa agregata, sušenega v sušilnici	2,67
Prostorninska masa z vodo zasičenega, površinsko suhega agregata	2,70
Vpijanje vode (%)	1,1

3.4.1.6 Določanje vlažnosti agregata

Agregat iz odpadnega betona je bil odvzet na separaciji. Tisti, ki je bil odvzet pri vrhu kupov, je bil značilno suh zaradi izpostavljenosti soncu in vetru (v dneh pred odvzemom ni bilo dežja), agregat iz sredine kupa pa je bil zasičen z vlago. Po dostavi recikliranega agregata v Konstrukcijsko-prometni

laboratorij smo prvič določili vlažnost, ki je bila več kot 10 %. Ker bi bilo to neugodno pri pripravi betona, smo se odločili, da ga bomo določen čas sušili na zraku v laboratoriju. Posamezne frakcije smo razporedili po plastičnih folijah, jih občasno premešali z grabljami in tako pustili nekaj dni. Agregat smo potem zbrali skupaj in na treh vzorcih, pridobljenih po SIST EN 932-2, izvedli poskus določanja vlažnosti. Povprečne vrednosti vlažnosti po posameznih frakcijah so podane v preglednici 27. Rezultati preskusov vlažnosti in vpijanja vode so bili izhodišče za določanje količine vode, ki smo jo dodali v betonsko mešanico.

Preglednica 27: Rezultati preskusa vlažnosti

Frakcija (mm)	0 – 4	4 – 8	8 – 16
Vlažnost (%)	3,4	4,0	3,6

3.4.1.7 Določanje prisotnosti humoznih delcev – Kolorimetrijska metoda

Organske primesi v agregatu imajo negativen vpliv na hidratacijo cementne paste in posledično na njeno končno trdnost. Za bolj točno primerjavo smo pripravili dva vzorca, poskus smo izvedli pri obeh po enakem postopku. Raztopini natrijevega hidroksida sta se po 24 urah rahlo obarvali. Barva raztopin nad vzorcema je bila svetlo oranžne barve in veliko svetlejša, kot primerjalna tekočina. Iz tega lahko izhajamo, da je naš agregat iz recikliranega betona vseboval manjši delež humusnih primesi, ki naj ne bi vplivale na lastnosti betonske mešanice in kasneje na lastnosti strjenega betona.

3.4.2 Preiskave svežega betona

3.4.2.1 Konsistenca svežega betona – Preskus s posedom stožca

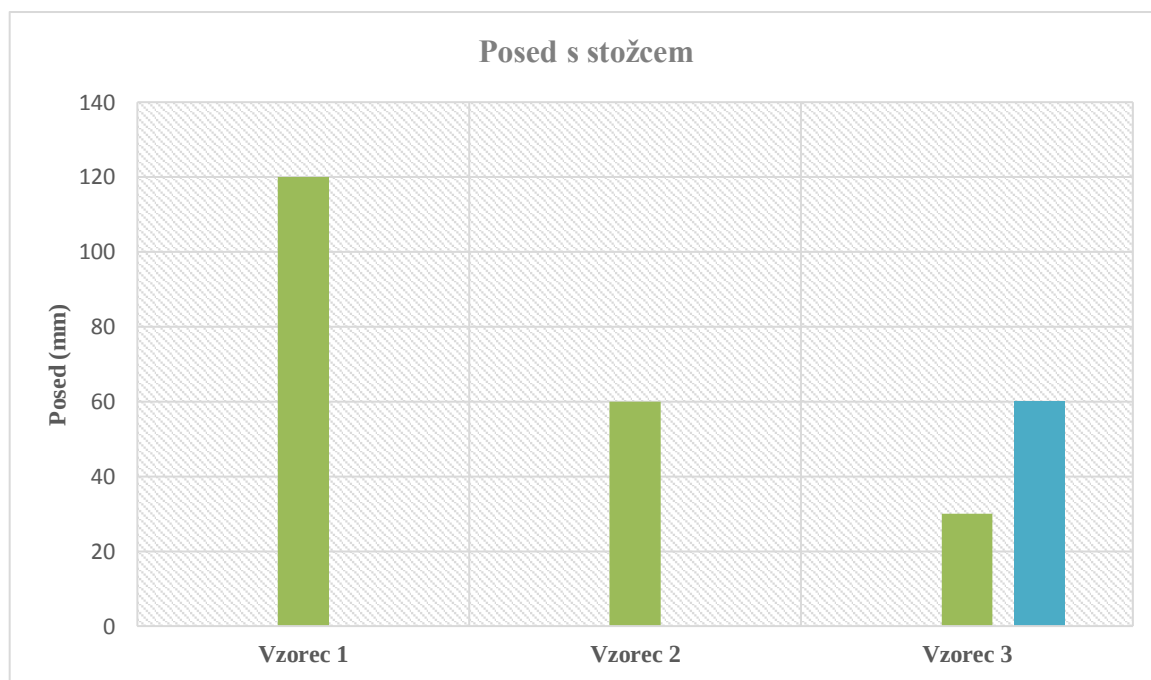
Na podlagi standarda SIST EN 206 smo po izmerjenem posedu določili stopnjo poseda. Stopnja S1 predstavlja trdo plastičen beton, ki je težko vgradljiv, stopnja S4 pa tekoč beton. Najlažje je bilo vgraditi prvi vzorec (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat), saj je bil najbolj plastičen, na kar nakazuje tudi stopnja poseda S3. Pri drugem vzorcu (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat), smo morali dodati več vode in plastifikatorja, zaradi velike količine finih delcev v drobnem recikliranem agregatu. Posed pri 2. vzorcu je bil 60 mm in stopnja poseda S2. Tretji beton (0 – 16 mm recikliran agregat) pa smo pripravili v dveh šaržah. Razlika v posedu je bila zaradi dodane večje količine vode in superplastifikatorja v drugo šaržo. Prva šarža tretjega vzorca je bila tudi najtežje vgradljiva, kar dokazuje tudi 30 mm posed, ki ga uvršča v razred S1. Pri vseh treh vzorcih betona so

preskušanci dosegli pravilno obliko poseda. Če pogledamo celotno sliko, je zamenjava drobnega francoskega agregat z recikliranim imela velik vpliv na konsistenco betona. Kljub povečanju količine vode in superplastifikatorja nismo uspeli doseči enake konsistence.

Rezultati poseda so prikazani v preglednici 28 in grafikonu 2.

Preglednica 28: Rezultati preiskav poseda stožca

Vzorec	Oblika poseda	Posed (mm)	Stopnja
Vzorec 1	pravilna	120	S3
Vzorec 2	pravilna	60	S2
Vzorec 3	pravilna	30 (60)	S1 (S2)



Grafikon 2: Posed s stožcem

3.4.2.2 Gostota svežega betona

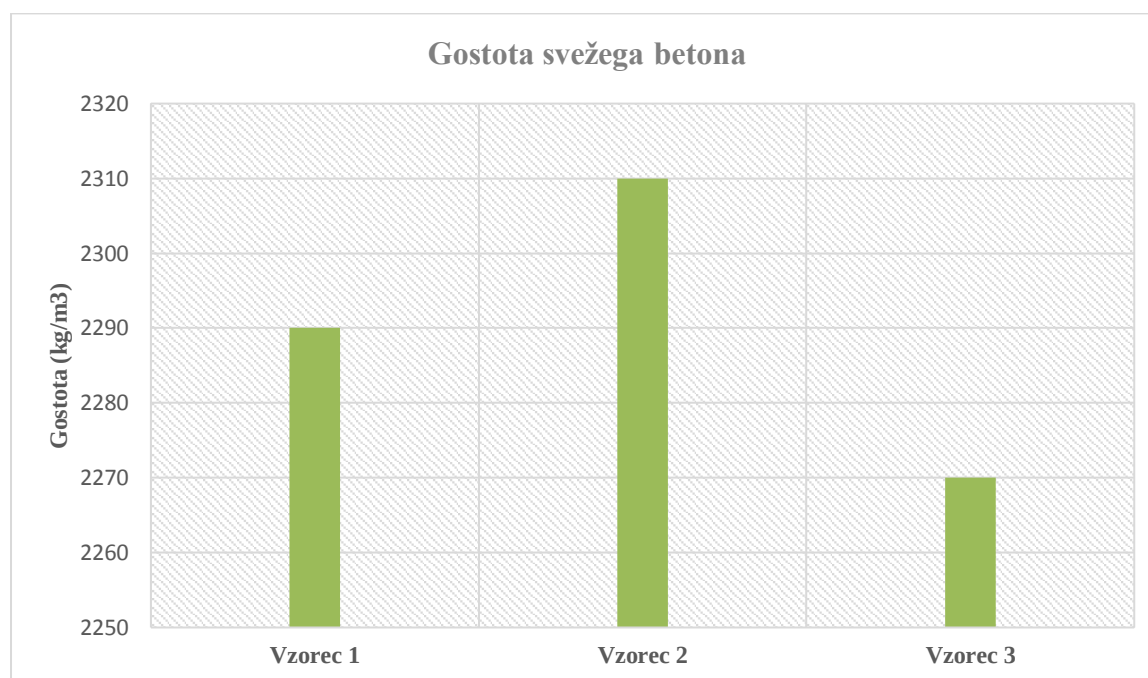
Gostota svežega betona je bila v prvem vzorcu (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) 2290 kg/m³, v drugem (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) 2310 kg/m³, v tretjem vzorcu (0 – 16 mm recikliran agregat) pa 2270 kg/m³. Gostote posameznih vzorcev se med seboj minimalno razlikujejo. Največja razlika med njimi je manj kot 2 %. Na gostoto betona ima velik vpliv gostota agregata. Največja gostota je bila v drugem vzorcu (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16

mm francoski agregat), kjer smo uporabili droben recikliran agregat, ki je imel največjo gostoto. Tretji vzorec vsebuje prav tako droben recikliran agregat, vendar je manjša gostota tudi zaradi grobega recikliranega agregata, ki ima manjšo gostoto kot grobi francoski agregat.

Rezultati gostote svežega betona posameznih vzorcev so podani v preglednici 29 in grafikonu 3.

Preglednica 29: Gostota svežega betona

Vzorec	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3
Gostota (kg/m ³)	2290	2310	2270



Grafikon 3: Gostota svežega betona

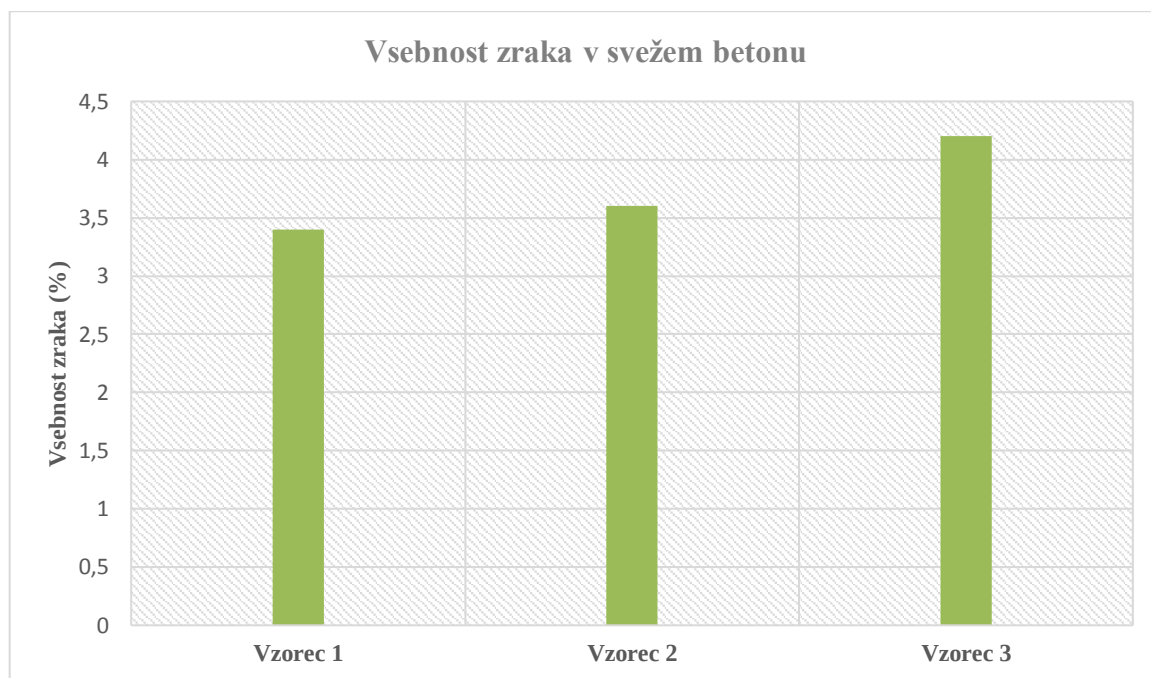
3.4.2.3 Vsebnost zraka – Metoda z manometrom

Vsebnost zraka v prvem vzorcu (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) je bila 3,4 %, v drugem (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) 3,6 %, v tretjem vzorcu (0 – 16 mm recikliran agregat) pa 4,2 %. Največjo vsebnost zraka smo izmerili v vzorcu iz recikliranega agregata. V vzorcih, kjer sta bili kombinaciji francoskega in recikliranega agregata, je bila vsebnost zraka manjša za 0,8 % oziroma 0,6 %. Sklepamo, da recikliran agregat vpliva na vsebnosti zraka v svežem betonu.

Rezultati vsebnosti zraka so podani v preglednici 30 in grafikonu 4.

Preglednica 30: Rezultati vsebnosti zraka

Vzorec	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3
Vsebnost zraka (%)	3,4	3,6	4,2



Grafikon 4: Vsebnost zraka v svežem betonu

3.4.3 Preiskave strjenega betona

3.4.3.1 Tlačna trdnost betona

Med mehanske lastnosti betona spada tudi tlačna trdnost. Preverjali smo jo na standardnih kockah pri starosti 1 dan, 7 dni in 28 dni. Pri vsakem betonu in vsaki starosti betona smo preskusili po tri preskušance in nato izračunali povprečno tlačno trdnost.

Prvi vzorec betona (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) bi razporedili v razred tlačne trdnosti C30/37, drugi vzorec betona (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) prav tako v razred C30/37, tretji vzorec betona (0 – 16 mm recikliran agregat) pa v razred C25/30

oziroma lahko tudi v C30/37, vendar bi morali izvesti še dodatne preiskave. Na podlagi teh podatkov lahko rečemo, da sta prvi in drugi vzorec glede tlačne trdnosti primerljiva. Najmanjšo tlačno trdnost ima beton, ki je v celoti izdelan iz recikliranega agregata. Vsi trije betoni so ustrezni za uporabo v konstrukcijske namene.

Pri klasificiranju smo določili nekoliko nižje razrede tlačne trdnosti, kot bi lahko bili dejansko, ker smo želeli ostati na varni strani.

Tlačne trdnosti posameznih kock in povprečne vrednosti so podane v preglednicah 31-33.

Preglednica 31: Rezultati tlačne trdnosti po 1 dnevu

Vzorec	Preskušane	Porušna sila (kN)	Tlačna trdnost preskušanca (MPa)	Povprečna tlačna trdnost (MPa)
Vzorec 1	kocka 1	391,6	17,4	16,9
	kocka 2	381,5	16,9	
	kocka 3	368,0	16,3	
Vzorec 2	kocka 1	378,5	16,7	16,9
	kocka 2	375,4	16,6	
	kocka 3	390,9	17,4	
Vzorec 3	kocka 4	344,4	15,1	14,3
	kocka 8	336,7	14,9	
	kocka 10	294,3	12,7	

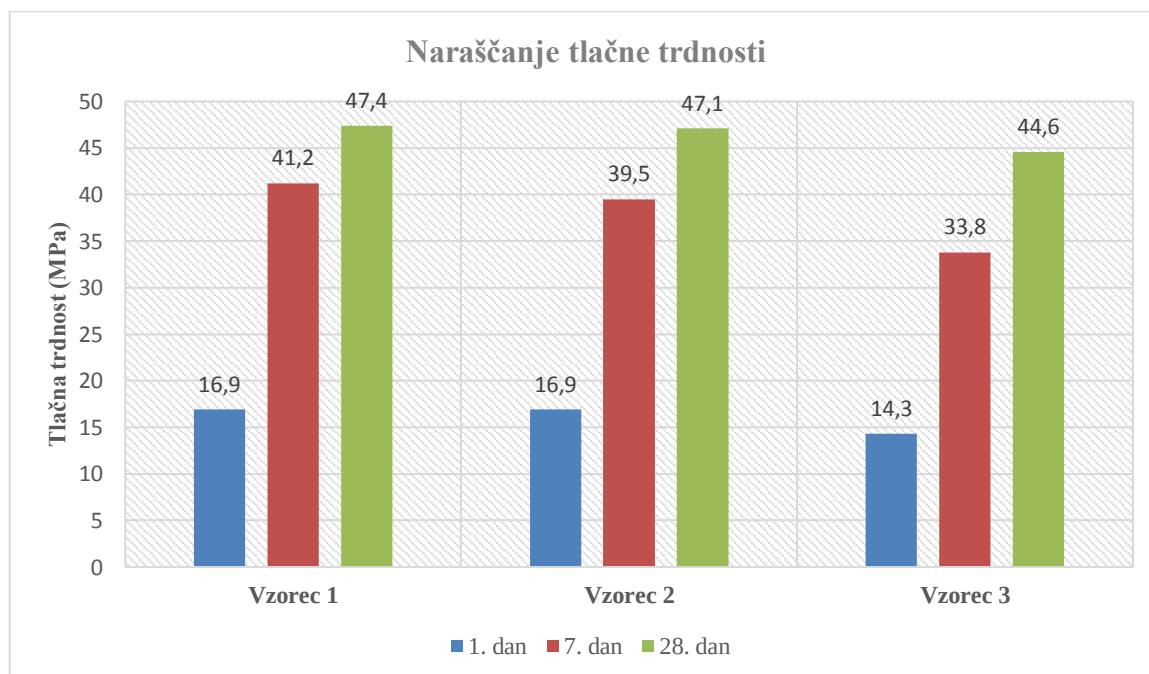
Preglednica 32: Rezultati tlačne trdnosti po 7 dneh

Vzorec	Preskušane	Porušna sila (kN)	Tlačna trdnost preskušanca (MPa)	Povprečna tlačna trdnost (MPa)
Vzorec 1	kocka 4	(578,1)	(25,4)	41,2
	kocka 6	933,3	41,5	
	kocka 8	931,0	40,9	
Vzorec 2	kocka 4	866,3	38,1	39,5
	kocka 6	925,6	40,7	
	kocka 8	902,0	39,8	
Vzorec 3	kocka 2	764,0	33,6	33,8
	kocka 5	818,5	36,2	
	kocka 11	720,5	31,6	

Preglednica 33: Rezultati tlačne trdnosti po 28 dneh

Vzorec	Preskušane	Porušna sila (kN)	Tlačna trdnost preskušanca (MPa)	Povprečna tlačna trdnost (MPa)
Vzorec 1	kocka 5	1056,0	46,9	47,4
	kocka 7	1081,0	47,4	
	kocka 9	1077,0	47,8	
Vzorec 2	kocka 5	1109,0	48,6	47,1
	kocka 7	1086,0	47,9	
	kocka 9	1019,0	44,9	
Vzorec 3	kocka 1	1019,0	44,7	44,6
	kocka 6	1073,0	47,0	
	kocka 12	960,6	42,1	

Naraščanje tlačne trdnosti s starostjo (1., 7. in 28. dan) posameznih vzorcev je pregledno prikazano v grafikonu 5. Beton naj bi po 24 urah dosegel tretjino projektirane trdnosti betona, po enem tednu pa tri četrtine projektirane trdnosti. (Prevedeno po: [22]) Tak potek povečanja trdnosti je bil tudi pri naših vzorcih.



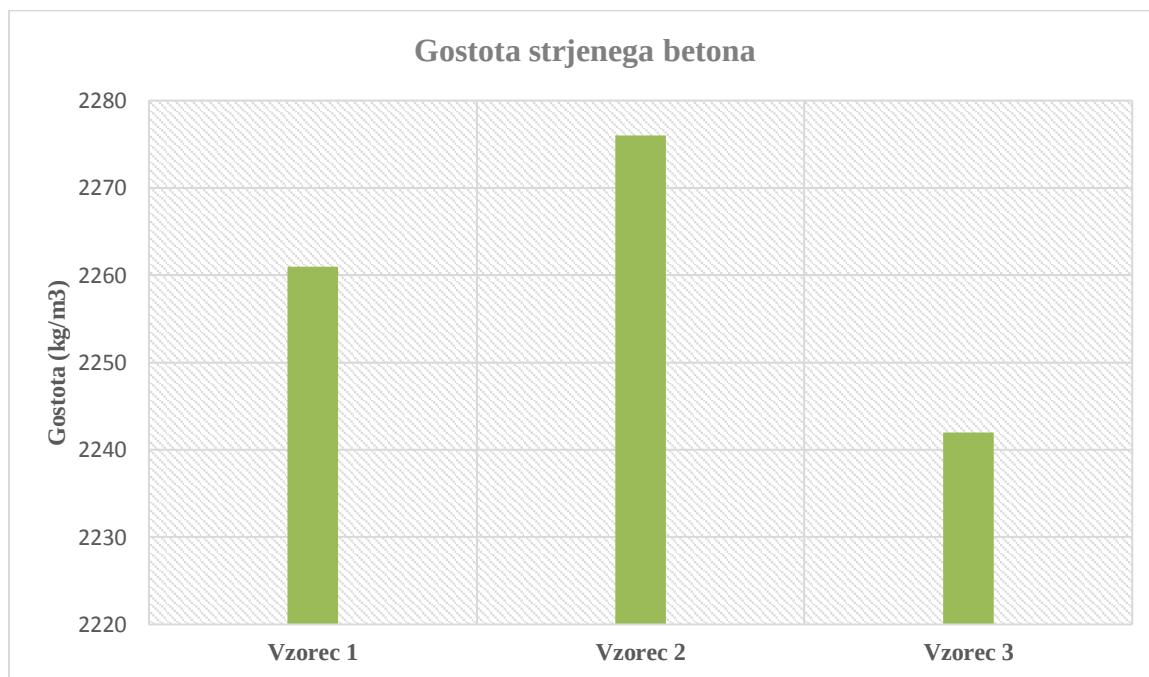
Grafikon 5: Naraščanje tlačne trdnosti s starostjo

3.4.3.2 Gostota strjenega betona

Gostota strjenega betona je bila pri prvem vzorcu betona (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) 2261 kg/m³, pri drugem (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) 2276 kg/m³, pri tretjem vzorcu betona (0 – 16 mm recikliran agregat) pa 2235 kg/m³. Podobno kot pri svežem betonu je bila tudi pri strjenem betonu največja gostota pri drugem vzorcu (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat). Svež beton ima nekoliko večjo gostoto kot strjeni beton, saj med procesom strjevanja počasi izhlapeva voda. Gostote posameznih vzorcev betona so podani v preglednici 34 in grafikonu 6.

Preglednica 34: Rezultati gostote strjenega betona

Vzorec	Gostota strjenega betona (kg/m ³)
Vzorec 1	2261
Vzorec 2	2276
Vzorec 3	2235



Grafikon 6: Gostota strjenega betona

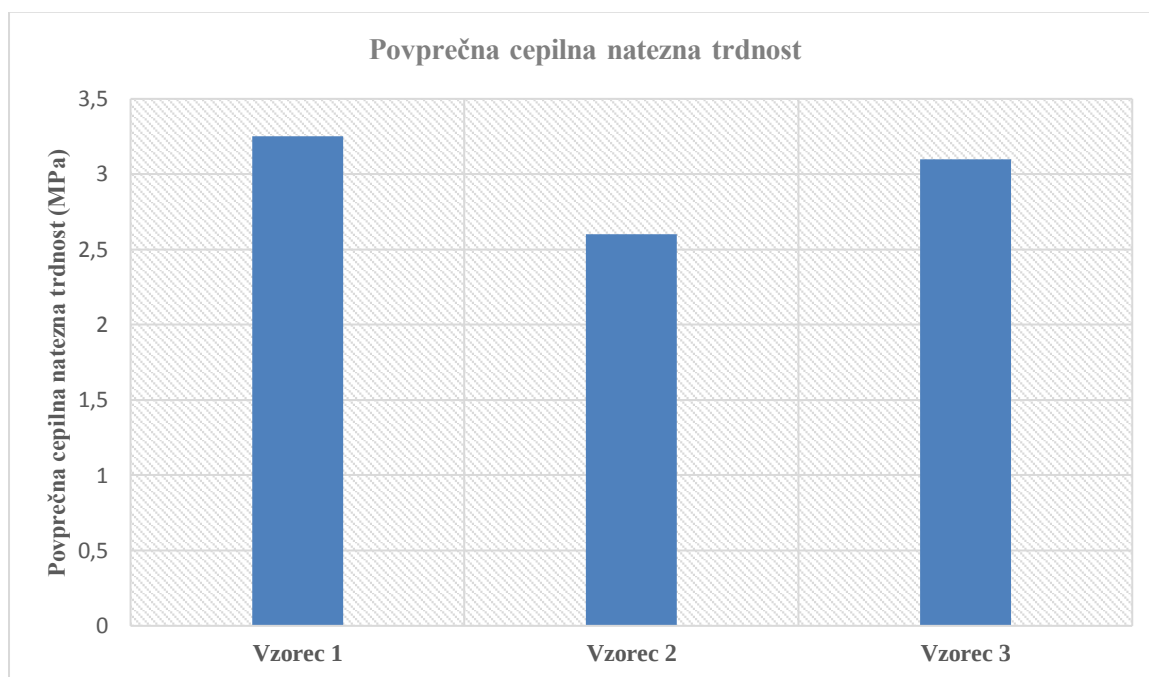
3.4.3.3 Cepilna natezna trdnost betona

Cepilna natezna trdnost je ena izmed pomembnih mehanskih lastnosti strjenega betona. V osnovi naj bi bila cepilna natezna trdnost 7 % tlačne trdnosti betona, določene na kocki (grafikon 8). Pri prvem vzorcu predstavlja cepilna natezna trdnost 6,8 % tlačne trdnosti, pri drugem vzorcu 5,5 % in pri tretjem vzorcu 7,0 % vrednosti tlačne trdnosti. Prvi in tretji vzorec sta približno znotraj tega okvirja, drugi vzorec pa ne. Rezultati vzorcev 1 in 3 so v okviru predvidenih vrednosti. Pri vzorcu 2 pa vidimo, da so kar velike razlike pri cepilni natezni trdnosti. Razlogov za to je lahko več, eden izmed njih je lahko neustrezno izveden cepilni preskus v stiskalnici. Pri finih delcih se lahko zgodi, da vsi ne hidratizirajo, zato nastane nehomogena struktura betona, ki ima slabšo trdnost. Ker je bila v tem primeru globina prodora vode največja, je bil slednji razlog verjetnejši. Da bi dobili merodajne rezultate cepilne natezne trdnosti, bi morali preskus izvesti na več preskušancih.

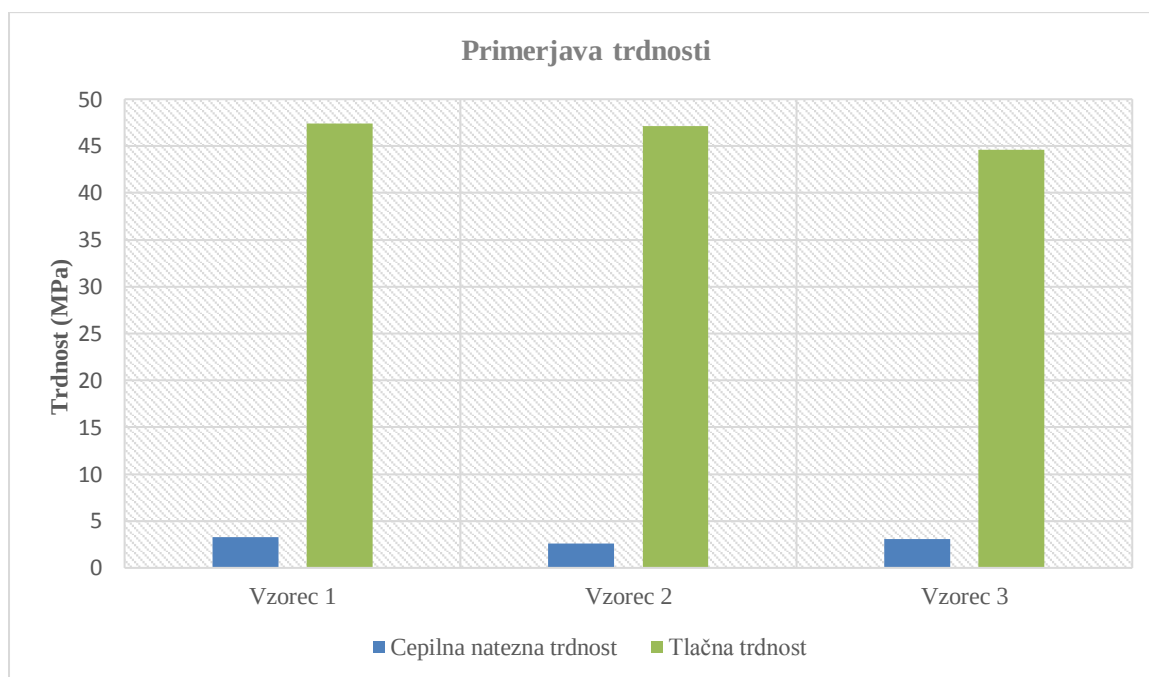
Rezultati cepilne natezne trdnosti so podani v preglednici 35 in grafikonu 7.

Preglednica 35: Rezultati cepilne natezne trdnosti

Vzorec	Preskušanec	Največja sila (kN)	Cepilna natezna trdnost preskušanca (MPa)	Povprečna cepilna natezna trdnost (MPa)
Vzorec 1	kocka 11	116,50	3,28	3,25
	kocka 12	122,90	3,45	
	kocka 13	109,10	3,08	
Vzorec 2	kocka 1	107,10	3,01	2,60
	kocka 2	83,84	2,34	
	kocka 3	87,21	2,42	
Vzorec 3	kocka 3	111,40	3,11	3,10
	kocka 7	113,80	3,16	
	kocka 9	106,70	2,99	



Grafikon 7: Povprečna cepilna natezna trdnost



Grafikon 8: Primerjava tlačne in cepilne natezne trdnost

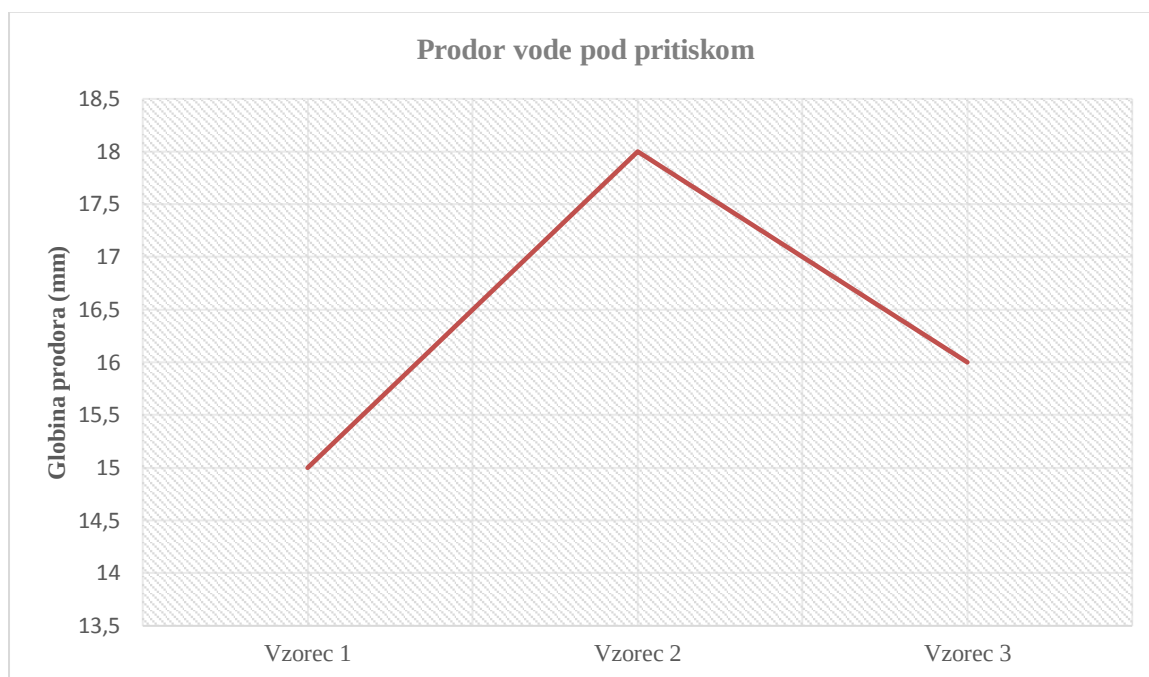
3.4.3.4 Globina prodora vode pod pritiskom

Pri posamezni vrsti betona smo preskus opravili na po treh kockah in rezultat izračunali kot povprečno vrednost treh meritev. Rezultati globine prodora vode so podani v skrajnem desnem stolpcu preglednice 36.

Povprečna globina prodora vode je bila pri prvem vzorcu (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) 15 mm, pri drugem (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm francoski agregat) 18 mm, pri tretjem vzorcu (0 – 16 mm recikliran agregat) pa 16 mm. Najmanjši prodor vode je bil pri prvem vzorcu, kjer je bilo vodocementno razmerje najmanjše, posledično naj bi bil tudi najbolj odporen na agresivne vplive okolja. Najmanjšo obstojnost ima drugi vzorec. Vendar pa so razlike v globini prodora vode med vzorci minimalne in vsi imajo najvišjo stopnjo odpornosti proti prodoru vode, in sicer PV-III, v skladu s SIST 1026.

Preglednica 36: Rezultati globine prodora vode

Vzorec	Preskušane	Največja globina prodora vode (mm)	Povprečna globina prodora vode (mm)
Vzorec 1	kocka 11	12	15
	kocka 12	13	
	kocka 13	20	
Vzorec 2	kocka 10	20	18
	kocka 11	18	
	kocka 12	17	
Vzorec 3	kocka 3	14	16
	kocka 7	17	
	kocka 9	16	



Grafikon 9: Prodor vode pod pritiskom

3.4.3.5 Dinamični modul elastičnosti

Osnovna predpostavka določanja dinamičnega modula elastičnosti E_D je bilo merjenje hitrosti longitudinalnih ultrazvočnih valov z merilnim inštrumentom. Na betonskih kockah starih 7 in 28 dni smo pred preskusom tlačne trdnosti izmerili hitrost prehoda ultrazvočnih valov skozi preskušanece. Čas smo odčitali v mikrosekundah. Za izračun E_D smo potrebovali še gostoto betona, s kljunastim merilom izmerjeno dimenzijo s , ki je predstavljala pot valov in vrednost Poissonovega koeficienta, ki je za beton običajno 0,2.

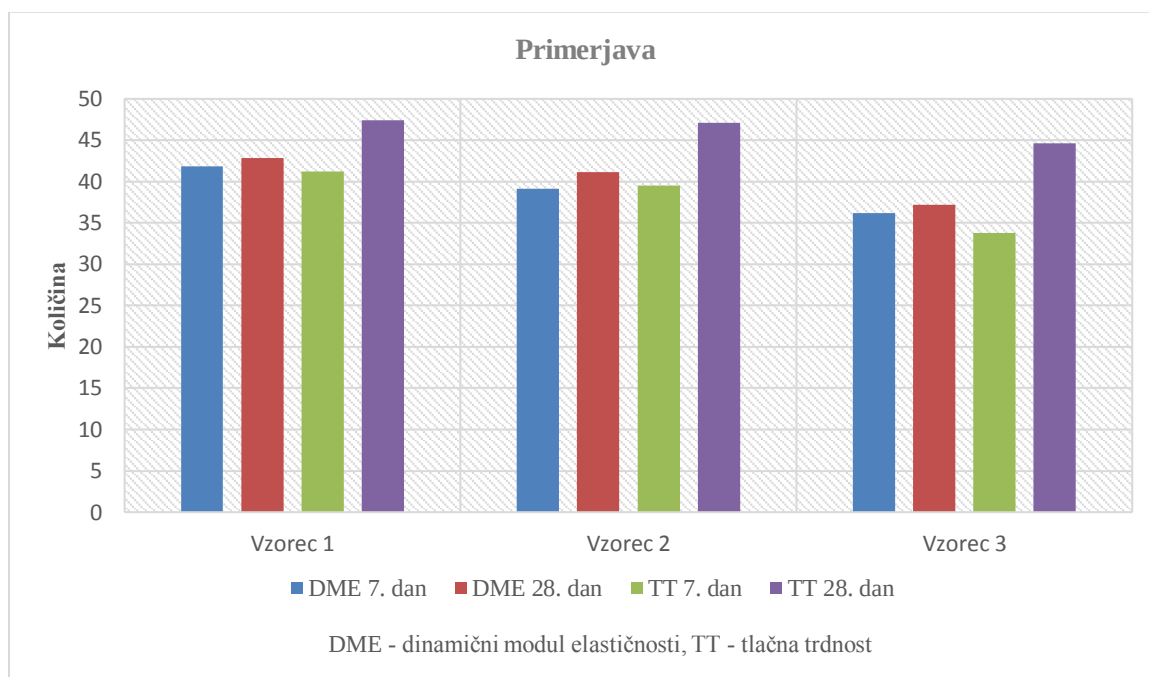
Z večanjem časa prehoda valov se E_D zmanjšuje in obratno. Glede na rezultate v preglednicah 37 in 38 smo imali največji E_D pri prvem vzorcu (0 – 4 mm francoski agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat), videli pa smo tudi da E_D narašča s časom (povprečne vrednosti po 28. dneh so večje kot po 7. dneh). Z naraščanjem tlačne trdnosti betona narašča tudi E_D , kar kaže na povezavo med njima (grafikon 10). Posledično pa gre tudi za povezavo med časom, hitrostjo in tlačno trdnostjo: več časa potrebujejo ultrazvočni valovi za prehod skozi preskušanece, manjšo hitrost imajo, manjši je dinamični modul elastičnosti oziroma manjša je tlačna trdnost betonske kocke.

Preglednica 37: Rezultati dinamičnega modula elastičnosti po 7 dneh

Vzorec	Preskušane	Čas (μs)	Dinamični modul elastičnosti (GPa)	Povprečni dinamični modul elastičnosti (GPa)
Vzorec 1	kocka 4	33,30	41,39	41,82
	kocka 6	33,20	42,39	
	kocka 8	33,20	41,67	
Vzorec 2	kocka 4	33,90	40,56	39,13
	kocka 6	35,00	37,76	
	kocka 8	34,60	39,08	
Vzorec 3	kocka 2	35,50	36,09	36,20
	kocka 5	34,90	37,44	
	kocka 11	35,90	35,07	

Preglednica 38: Rezultati dinamičnega modula elastičnosti po 28 dneh

Vzorec	Preskušane	Čas (μs)	Dinamični modul elastičnosti (GPa)	Povprečni dinamični modul elastičnosti (GPa)
Vzorec 1	kocka 4	32,90	42,44	42,86
	kocka 6	32,70	43,01	
	kocka 8	32,60	43,13	
Vzorec 2	kocka 4	33,40	41,71	41,15
	kocka 6	33,60	41,13	
	kocka 8	33,80	40,62	
Vzorec 3	kocka 2	34,30	38,78	37,20
	kocka 5	35,10	37,39	
	kocka 11	34,80	37,07	

Grafikon 10: Primerjava E_D in tlačne trdnosti 7. in 28. dan

3.4.4 Skupni rezultati

Recepture vzorcev 1, 2 in 3 so bile v osnovi enake, saj so bili deleži sestavin v betonu v enakem razmerju. Do sprememb je prišlo pri mešanju betona, ko smo morali zaradi velikega deleža finih delcev, ki so vplivali na konsistenco betona, povečati količino superplastifikatorja 2 in vode. To pa je seveda vplivalo na lastnosti svežega in strjenega betona.

Preglednica 39: Izbor rezultatov preiskav svežega in strjenega betona

Lastnost	Vzorec		
	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3
Konsistenca poseda s stožcem (mm)	110 S3	60 S2	30 (60) S1 (S2)
Prostorninska masa	2290	2310	2270
Vsebnost zraka (%)	3,4	3,6	4,2
Vsebnost cementa (kg/m ³)	320	320	320
v/c	0,52	0,60	0,66 (0,69)
Prostorninska masa	2261	2276	2235
Povprečna cepilna natezna trdnost (MPa) po 31 dneh	3,25	2,60	3,10
Prodor vode (mm)	15 PV-III	18 PV-III	16 PV-III
Poprečna tlačna trdnost (MPa) po 28 dneh	47,4	47,1	44,6
Razred tlačne trdnosti	C30/37	C30/37	C25/30 (C30/37)
Primernost uporabe	Konstrukcijski beton (glej preglednica SIST 1026)	Konstrukcijski beton (glej preglednica SIST 1026)	Konstrukcijski beton (glej preglednica SIST 1026)
Stopnja izpostavljenosti	XC3 XD2 XA1	XC2	XO

Na osnovi rezultatov preskusov svežega in strjenega betona smo betonske mešanice na koncu še klasificirali glede na stopnjo izpostavljenosti. Mejne vrednosti sestave in lastnosti betona, ki predstavljajo okvire za določanje stopnje izpostavljenosti, so podane v standardu SIST 1026. Za

ustrezno klasifikacijo smo morali poznati naslednje vrednosti: vodocementno razmerje, trdnostni razred, vsebnost cementa, vsebnost zračnih por, stopnjo odpornosti proti prodoru vode, stopnjo notranje odpornosti proti zmrzovanju/tajanju, odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju s solmi, stopnjo odpornosti proti obrabi.

Preskusi, ki smo jih izvedli na preskušancih, so nam omogočili določitev stopnje izpostavljenosti v kategoriji XO (brez nevarnosti korozije ali agresinega delovanja), XC (korozija zaradi karbonatizacije), XD (korozija zaradi drugih kloridov) in XA (kemijsko agresivno okolje).

Vzorec 1

Vzorec 1 (0 – 4 mm naravni agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat) je imel vodocementno razmerje 0,52. Izmerjeni posed stožca je znašal 110 mm, kar ga uvršča v razred poseda S3. Povprečna globina prodora vode je bila 15 mm, kar ga uvrsti v razred PV-III. Povprečna tlačna trdnost je bila 47,4 MPa, kar ga uvršča v razred tlačne trdnosti C30/37. Vzorec je primeren za uporabo kot konstrukcijski beton. Glede na izvedene poskuse in dobljene rezultate ga lahko uvrstimo v razred XO in XC1, kjer je stopnja agresivnosti nizka ter XC2 in XC3, kjer je stopnja agresivnosti zmerna. Prav tako pa tudi v razrede XD1, XD2 ter XA1. Stopnjo izpostavljenosti smo določili v skladu z nacionalnim standardom SIST 1026 (Priloga A).

Vzorec 2

Vzorec 2 (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm naravni agregat) je imel vodocementno razmerje 0,60, povprečno globino prodora vode pa 18 mm, kar ga je vrstilo v razred PV-III. Stopnja poseda je bila S2. Povprečna tlačna trdnost je bila 47,1 MPa, kar ga uvršča v razred tlačne trdnosti C30/37. Vzorec je primeren za uporabo kot konstrukcijski beton. Stopnja poseda je bila v primerjavi z vzorcem 1 manjša, kljub temu da smo betonu dodali več vode. Tlačna trdnost je kljub višjemu vodocementnemu razmerju primerljiva z vzorcem 1 in je najverjetneje posledica uporabe superplastifikatorja 2 pri vzorcu 2 ter prisotnosti neshidratiziranih zrn cementa v recikliranem agregatu. Zaradi višje vrednosti vodocementnega razmerja ga lahko uvrstimo le v razrede izpostavljenosti XO in XC1 (nizka stopnja) ter XC2 (zmerna stopnja) glede na določila SIST 1026.

Vzorec 3

Vzorec 3 (0 – 16 mm recikliran agregat) je imel vodocementno razmerje 0,66 oz. 0,69, stopnjo poseda pa S1 oz. S2. Povprečna globina prodora vode je bila 16 mm, kar ga uvršča v razred PV-III. Povprečna tlačna trdnost je bila 44,6 MPa, kar ga je uvrščalo v razred tlačne trdnosti C25/30. Pogojno bi ga lahko uvrstili tudi v razred C30/37, vendar bi morali izvesti več dodatnih preiskav. Vzorec je primeren za uporabo kot konstrukcijski beton. Lastnosti vzorca izpolnjujejo zahteve za stopnjo izpostavljenosti XO (nizka stopnja agresivnosti) zaradi dokaj visokega vodocementnega razmerja.

Če primerjamo dobljene rezultate preiskav vzorcev svežega in strjenega betona lahko trdimo, da so rezultati primerljivi. V kolikor ne potrebujemo beton visoke trdnosti, je uporaba recikliranega agregata upravičena. Vendar pa moramo poudariti, da smo vzorcema 2 in 3 poleg ostalih sestavin dodali še superplastifikator 2. Če bi tudi v sestavo vzorca 1 vključili superplastifikator 2, bi najverjetneje dobili še višje trdnosti. To nam pove da kakovost drobnega agregata vpliva na trdnost betona, uporaba recikliranega drobnega agregata je zmanjšala trdnost in povečala vodocementno razmerje. Velja pa seveda tudi nasprotno, če bi vzorcema 2 in 3 dodali samo superplastifikator 1 bi dosegli nižje trdnosti, kot smo jih dobili ob dodajanju superplastifikatorja 2.

Rezultati prodora vode pod pritiskom so dobri, saj so vsi trije vzorci dosegli stopnjo PV-III. Manjša kot je globina prodora vode, večja je trajnost konstrukcije. Beton, ki prepušča vodo do večjih globin, s tem omogoča vstop agresivnim substancam v strukturo betona.

Vsi trije vzorci imajo razred tlačne trdnosti C30/37 oziroma C25/30 kar jih uvršča med splošne oziroma konstrukcijske betone, ki se uporabljajo v visoki gradnji. Konstrukcijski betoni predstavljajo približno 90 % vseh uporabljenih betonov v Sloveniji.

Na betonu iz recikliranega agregata bi morali opraviti še dodatne preiskave strjenega betona na večjem številu vzorcev, za določanje odpornosti proti obrabi ter odpornosti proti zmrzovanju in tajanju. S pomočjo rezultatov dodatnih preiskav bi lahko še bolj natančno določili relevantne stopnje izpostavljenosti.

3.4.5 Primerjava rezultatov diplomske naloge z rezultati etalona

V Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju so v okviru projekta »COST Action TU1404« izdelali betonske preskušance, v katerih je bil uporabljen samo naravni francoski regat. Osnovna receptura je bila enaka pri vseh vzorcih, le da smo pri vzorcu 2 in 3 izmerjeno količino vode in superplastifikatorja 2 dodali naknadno, ker beton ni imel ustrezne konsistence. Beton se je mešal pri približno enakih pogojih, cement, naravni agregat in superplastifikator 1 so bili odvzeti iz istega vira, uporabljena je bila pitna voda iz vodovoda. Vzorci so imeli naslednjo sestavo agregata:

- etalon: 0 – 16 mm naravni agregat,
- vzorec 1: 0 – 4 mm naravni agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat,
- vzorec 2: 0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm naravni agregat,
- vzorec 3: 0 – 16 mm recikliran agregat.

Pri svežem betonu bomo primerjali preskuse poseda s stožcem, gostoto ter vsebnost zraka (preglednica 40).

Preglednica 40: Primerjava rezultatov svežega betona

Karakteristike	Vzorec			
	Etalon	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3
Posed s stožcem (mm)	21,4	110,0	60,0	30,0 (60,0)
Vsebnost zraka (%)	2,27	3,4	3,6	4,2
Gostota (kg/m ³)	2340	2261	2276	2235

Etalon je imel najmanjši posed, in sicer 21,4 mm, kar ga uvršča v razred S1 in naj bi bil najmanj plastičen. Gostota svežega beton je po pričakovanjih pri naravnih agregatih višja kot pri agregatih, ki so delno ali v celoti iz recikliranega betona v vlogi agregata. Vsebnost zraka je bila najnižja pri etalonu, najvišja pa pri betonu, ki je bil izključno iz recikliranega agregata.

V preglednici 41 so podane povprečne trdnosti preskušancev.

Preglednica 41: Primerjava rezultatov strjenega betona

Karakteristike	Vzorec			
	Etalon	Vzorec 1	Vzorec 2	Vzorec 3
7. dan				
Porušna sila (kN)	957	932	898	768
Tlačna trdnost (MPa)	43,3	41,20	39,50	33,80
28. dan				
Porušna sila (kN)	1285	1071	1071	1018
Tlačna trdnost (MPa)	57,89	47,7	47,1	44,6

Pričakovano je bila največja povprečna tlačna trdnost pri etalonu, in sicer 57,89 MPa pri starosti 28 dni, kar ga uvršča v razred tlačne trdnosti C 35/45, najmanj pa pri betonu, ki je bil v celoti iz recikliranega agregata. Na zmanjšanje trdnosti je med drugim vplivala dodana voda. Vzrok za najmanjšo tlačno trdnost vzorca 3 je velika vrednost vodocementnega razmerja.

»Ta stran je namenoma prazna.«

4 ZAKLJUČEK

Za lastnosti recikliranega agregata veljajo splošne smernice o uporabi, ki pa jih ne gre posploševati, saj je recikliran agregat lahko zelo raznovrsten. Razlike nastanejo že zaradi različne osnovne zgradbe odpadnega betona, načina rušenja, postopka recikliranja (predvsem drobljenja) in načina shranjevanja drobljenega betona. Pred uporabo za betonsko mešanico moramo najprej pridobiti referenčni vzorec recikliranega agregata in ga preskusiti. Le tako dobimo vpogled v njegove fizikalne lastnosti, ki bodo vplivale na lastnosti svežega in strjenega betona.

V naši preiskavi je bil recikliran agregat po večini sestavljen iz odpadnega betona. V kolikor bi preiskovali beton, katerega agregat bi bil bolj mešane narave, bi verjetno dobili drugačne rezultate, saj ima vsak material (opeka, les, steklo itd.) svoje specifične lastnosti.

Preiskave, ki smo jih izvedli za naš recikliran agregat (zrnavost, delež finih delcev, modul oblike zrn, prostorninska masa, vpijanje vode, vlažnost, prisotnost humoznih delcev) so pokazale ustreznost za uporabo v betonu.

Za pridobitev kvalitetnega recikliranega agregata je potrebno izvesti racionalno razgradnjo gradbenih ruševin, katere je potrebno selekcionirati in tehnično-tehnološko primerno predelati. Drobljen odpadni beton je sekundarna surovina, ki se najpogosteje uporablja v cestogradnji za tampone in nosilne sloje cest, nasipe, kot agregat se uporablja v cementno betonskih in asfaltno betonskih mešanicah, za izdelavo različnih betonskih elementov itd.

Vodilo pri diplomski nalogi sta bili podani hipotezi, ki ju lahko na podlagi rezultatov potrdimo ali ovržemo.

Hipoteza 1: s pomočjo superplastifikatorja lahko znižamo količino vode, s tem pa lahko uporabimo večji delež finih delcev ter tako pripravimo beton, ki je dovolj plastičen in lažje vgradljiv.

Najmanj težav smo imeli pri pripravi vzorca 1 (0 – 4 mm naravni agregat, 4 – 16 mm recikliran agregat), ki je bil tudi najlažje vgradljiv. Pri tej mešanici smo uporabili superplastifikator 1. Betona vzorcev 2 (0 – 4 mm recikliran agregat, 4 – 16 mm naravni agregat,) in 3 (0 – 16 mm recikliran agregat) pri prvi sestavi mešanic nista bila vgradljiva. Vgradljivo mešanico svežega betona smo dobili šele po naknadnem

dodajanju vode ter superplastifikatorja 2. Fini delci v recikliranem agregatu so vplivali na obdelavnost betona, saj zaradi večje specifične površine vpijajo več vode.

Sklepamo, da v kolikor ne bi dodali superplastifikatorja 2, bi morali vzorcema 2 in 3 dodati še več vode, da bi dobili ustrezno vgradljivost, vendar pa bi s tem bistveno znižali trdnost strjenega betona. Sklepamo lahko, da nam uporaba superplastifikatorjev polikarboksilatnega tipa, ki so superplastifikatorji nove generacije, omogoča izdelavo vgradljivega betona kljub večjemu deležu finih delcev in manjši količini vode.

Hipoteza 2: Trdnosti betona iz naravnega agregata in betona iz recikliranega agregata sta primerljivi.

Pri uporabi recikliranega agregata (delno ali v celoti) se je tlačna trdnost zmanjšala. Najbolj se je trdnost zmanjšala, ko smo v celoti uporabili recikliran agregat. Če primerjamo tlačne trdnosti po enem tednu, so vrednosti etalona, vzorca 1 in 2 primerljive. Po 28. dneh pa je trdnost etalona močno narasla. Betoni, ki so sestavljeni delno ali v celoti iz recikliranega betona v vlogi agregata, imajo za en, dva oz. tri trdnostne razrede manjšo tlačno trdnost. Beton, ki je v celoti iz recikliranega agregata uvrstimo v razred tlačne trdnosti 25/30 oz. pogojno 30/37, če bi izvedli dodatne preiskave. Etalon pa je glede na rezultate preiskav spadal v razred 35/45 oz. pogojno v 40/50, če bi izvedli dodatne preiskave. Zaradi visokih vodocementnih razmerij lahko betone, ki vsebujejo droben recikliran agregat ali recikliran agregata v celoti, vgradimo v konstrukcijske elemente, s stopnjo izpostavljenosti XO in XC1, torej v malo agresivna okolja. Primerni so za konstrukcijske elemente v notranjosti stavb, v zelo suhem oziroma suhem okolju.

Rezultati raziskav kažejo, da vrednost tlačne trdnosti etalona in vzorca 3 niso primerljive, saj je med njima približno razlike za tri trdnostne razrede. Torej trdnost betona iz recikliranega agregata v našem primeru ni ravno primerljiva s trdnostjo betona iz naravnega agregata. Recikliran agregat je vseboval velik delež finih delcev, zato smo pri pripravi mešanice morali dodati vodo, s tem se je posledično povečalo vodocementno razmerje. Z dodatnimi preiskavami na več preskušancih bi dobili več podatkov, ki bi nam omogočili bolj točno vrednotenje betonov iz recikliranega agregata.

Ideja o predelavi oziroma o ponovni uporabi odpadnega gradbenega materiala se je pojavila po 2. svetovni vojni in je v 70. letih prejšnjega stoletja postala zelo pomembna iz dveh razlogov: zaradi vse manjših zalog naravnih virov ter zaradi zapolnjevanja deponij, ki bi bile lahko namenjene komunalnim odpadkom. Slovenija je v zadnjih desetih letih dosegla velik napredek pri zmanjšanju odlaganja

odpadkov in zvišanju predelave. Eden izmed ciljev, ki si ga je zastavila, je doseženo 70 % recikliranje gradbenih odpadkov do leta 2020.

Z recikliranjem gradbenih ruševin, iz katerih dobimo recikliran agregat, se trudimo ohranjati čisto okolje in zmanjševati porabo naravnih neobnovljivih virov. Vendar pa zadeva z okoljevarstvenega vidika ni tako preprosta, saj sta za izdelavo betona poleg agregata potrebna še cement in voda. Pri proizvodnji cementa nastajajo emisije, ki onesnažujejo ozračje, voda pa je dragocen naravni vir, ki ga je treba ohranjati. Alternative za zamenjavo cementa zaenkrat še ni. Delno lahko cement nadomestimo z žlindro (do 50 %), elektrofiltrskim pepelom (do 35 %) ali kameno moko (do 25 %), odpadno vodo, ki je nastala pri proizvodnji betona, pa je mogoče uporabiti kot zamesno vodo.

V diplomski nalogi je prikazana pot od gradbenih ruševin do njihove predelave v recikliran agregat ter uporabe pri pripravi betonske mešanice. Pomemben vidik pri uporabi recikliranega agregata je ekonomičnost, torej kakšni so stroški reciklaže, pri čemer cena recikliranega agregata ne sme preseči cene naravnih agregatov, obenem pa mora recikliran agregat dosegati enake ali vsaj podobne karakteristike kot naraven agregat, saj bomo le tako poskrbeli za trajnostni razvoj ponovne uporabe in recikliranja odpadkov, ki sta del krožnega gospodarstva.

»Ta stran je namenoma prazna.«

VIRI

- [1] Naravno okolje. 2016. https://sl.wikipedia.org/wiki/Naravno_okolje (Pridobljeno 12. 5. 2016.)
- [2] Zakon o varstvu okolja (ZVO-1). Uradni list RS, št. 39/06, 49/06, 66/06, 33/07, 57/08, 70/08, 108/09, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 102/15, 30/16. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1545> (Pridobljeno 13. 5. 2016.)
- [3] Uredba o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih. Uradni list RS, št. 34/08. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED4788> (Pridobljeno 20. 5. 2016.)
- [4] Požarni sektor d.o.o. 2016. Gradbeni odpadki. <http://www.pozarni-sektor.si/gradbeni-odpadki> (Pridobljeno 20. 5. 2016.)
- [5] Odpadek. 2016. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Odpadek> (Pridobljeno 20. 5. 2016.)
- [6] Uradni list Evropske unije. Sklep komisije. <http://www.stat.si/dokument/5681/KlasifikacijskiSeznamOdpadkov.pdf> (Pridobljeno 21. 5. 2016.)
- [7] Uredba o odpadkih. Uradni list RS, št. 37/15, 69/15. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7011> (Pridobljeno 26. 5. 2016.)
- [8] Vlada RS. 2016. Podatki Programa ravnanja z odpadki in preprečevanja odpadkov RS. http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/varstvo_okolja/operativni_programi/op_odpadki.pdf (Pridobljeno 12. 7. 2016.)
- [9] SURS. 2016. Nastale količine odpadkov iz proizvodnih in storitvenih dejavnosti. http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/viewplus.asp?ma=H011S&ti=&path=../Database/Hitre_Repozitorij/&lang=2 (Pridobljeno 12. 7. 2016.)
- [10] RS MOP. 2016. Zbiranje, ponovna uporaba in recikliranje komunalnih odpadkov. http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/odpadki/zbiranje_ponovna_uporaba_in_recikliranje_komunalnih_odpadkov/ (Pridobljeno 5. 6. 2016.)
- [11] Jurjavčič, P., Mladenovič, A., Cotič, Z., Leban, J., Šprinzer, M., Božič Cerar A. 2014. Priročnik za trajnostno rušenje objektov in recikliranje gradbenih odpadkov. https://www.google.si/search?q=priro%C4%8Dnik+za+trajnostno+ru%C5%A1enje+objektov&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gws_rd=cr&ei=vFC4V866CKSOgAaykKywAg#str.10,11,13 (Pridobljeno 20. 5. 2016.)
- [12] Zakon o graditvi objektov. Uradni list RS št. 102/04, 14/05, 92/05, 93/05, 111/05, 126/07, 108/09, 61/10, 20/11, 57/12, 101/13, 110/13 in 19/15, <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO3490> (Pridobljeno 12. 7. 2016.)

- [13] Bressi, G., Volpe, G., Pavesi, E. 2011. Pridobivanje recikliranih kamenih agregatov iz inertnih odpadkov. Italija, Bologna, Romania, Tiskovni center dežele Emilija: str. 11, 27
- [14] RS MOP. 2016. Odpadek je vir surovin. http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/odpadki/odpadek_je_vir_surovin/ (Pridobljeno 5. 6. 2016.)
- [15] Poliklorirani bifenili. 2016. https://sl.wikipedia.org/wiki/Poliklorirani_bifenili (Pridobljeno 2. 7. 2016.)
- [16] Pravilnik o projektni dokumentaciji. Uradni list RS, št. 55/08. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV8788> (Pridobljeno 12. 7. 2016.)
- [17] Slonep. 1998-2016. Postopek rušenja celega objekta. <http://www.slonep.net/prenova-in-obnova/rusenje-objektov/celotna-stavba> (Pridobljeno 6. 7. 2016.)
- [18] Kortnik, J. 2012. Gradbeni odpadki v Republiki Sloveniji – včeraj, danes, jutri, 19. slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana: str. 4 -5.
- [19] Žitnik, D., Žitnik, J., Berdajs, A. idr. 2012. Gradbeniški priročnik. 5. dopolnjena izdaja. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: str. 767-771.
- [20] Kuhar Mehta, P., Monteiro, P. J. M. 2006. Concrete Microstructure, Properties and Materials. ZDA, The McGraw-Hill Companies, Inc.: str. 4-8, 14
- [21] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. Gradiva vaje 2011/2012. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo UL, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 50.
- [22] Goodship, V. 2010. Management, recycling and reuse of waste composites. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC: str. 571.
- [23] Lyons, A. 2007. Materials for Architects & Builders. UK, Oxford, Elsevier: str. 50-53, 61, 62.
- [24] Černilogar, L. 12/2010 - 01/2011. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik: str. 100–103. http://www.tkk.si/si/files/default/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (Pridobljeno 1. 8. 2016.)
- [25] Bevanda, I., Šaravanja, K. Reciklirani beton. <http://www.igh.ba/pdf/Radovi/Reciklirani%20beton.pdf> (Pridobljeno 2. 8. 2016.)

Standardi

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

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

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

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

SIST EN 932-2:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov – 2. del: Metode zmanjševanja laboratorijskih vzorcev.

SIST EN 933-4:2008. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov – 4. del: Določanje oblike zrn – Modul oblike.

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 1744-1:2010. Preskusi kemičnih lastnosti agregatov – 1. del: Kemijska analiza.

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

SIST EN 1097-6:2002 / AC:2004 / A1:2005. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov – 6. del: Določanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode.

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

SIST EN 12350:2-2001. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom stožca.

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

SIST EN 12350-7:2009. Preskušanje svežega betona – 7. del: vsebnost zraka – Metode s pritiskom.

SIST EN 12390-1:2013. Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe.

SIST EN 12390-2:2009. Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti.

SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.

SIST EN 12390-6:2010. Preskušanje strjenega betona – 6. del: Natezna trdnost preskušancev.

SIST EN 12390-7:2009. Preskušanje strjenega betona – 7. del: Gostota strjenega betona.

SIST EN 12390-8:2009. Preskušanje strjenega betona – 8. del: Globina vpijanja vode pod pritiskom