

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:

Robič, S., 2016. Uporaba odpadne plastike v betonskih kompozitih. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Šajna, A.): 150 str.

Datum arhiviranja: 14-10-2016

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:

Robič, S., 2016. Uporaba odpadne plastike v betonskih kompozitih. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Šajna, A.): 150 pp.

Archiving Date: 14-10-2016

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO**

Kandidat:

**SEBASTIJAN ROBIČ**

**UPORABA ODPADNE PLASTIKE V BETONSKIH  
KOMPOZITIH**

Magistrsko delo št.: 14/II.VOI

**APPLICATION OF WASTE PLASTIC IN CONCRETE  
COMPOSITES**

Graduation – Master Thesis No.: 14/II.VOI

**Mentorica:**

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Somentor:**

dr. Aljoša Šajna

Ljubljana, 04. 10. 2016



## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## IZJAVE

Spodaj podpisani Sebastijan Robič, vpisna številka 26450031, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Uporaba odpadne plastike v betonskih kompozitih

### 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 vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil 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.

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

**UDK:** 691.175:691.32(497.4)(043)  
**Avtor:** Sebastijan Robič  
**Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.  
**Somentor:** dr. Aljoša Šajna, univ. dipl. inž. grad.  
**Naslov:** Uporaba odpadne plastike v betonskih kompozitih  
**Tip dokumenta:** magistrska naloga  
**Obseg in oprema:** 150 str., 89 pregl., 57 sl., 51 diag., 9 en.  
**Ključne besede:** odpadna plastika, PP, PE, PVC, beton, tlačna trdnost, kloridi, karbonatizacija, segregacija, zmrzovanje in tajanje

### **Izvleček**

Plastika je prisotna v številnih aplikacijah. Njena množična uporaba povzroča velike količine odpadkov, ki jih je potrebno ustrezno predelati oz. reciklirati. Ena od možnosti je tudi recikliranje odpadne plastike in uporaba v gradbeništvu – v betonu. V sklopu magistrske naloge smo izvedli preiskave na odpadni plastiki tipa PE, PP in PVC. V prvem delu smo opravili pregled dosedanjih raziskav na področju uporabe plastike v betonu. Sledila je karakterizacija odpadne plastike za potrebe izdelav receptur betona. V zadnjem delu preiskav smo v betonu delno nadomestili naravni agregat z odpadno plastiko in opravili standardne laboratorijske preiskave.

---

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 691.175:691.32(497.4)(043)  
**Author:** Sebastijan Robič  
**Supervisor:** assoc. prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.  
**Co-Supervisor:** Aljoša Šajna, Ph.D.  
**Title:** Application of waste plastic in concrete composites  
**Document type:** Master's thesis  
**Scope and tools:** 150 p., 89 tab., 57 fig., 51 sch., 9 eq.  
**Key words:** waste plastic, PP, PE, PVC, concrete, compressive strength, chlorides, carbonation, segregation, freezing and thawing

**Abstract:**

Plastics have found uses in various applications. Their widespread use results in enormous amounts of waste which must be properly recycled or recovered. One possibility is the recycling of plastic waste and its use in concrete. As a part of my Master's thesis, we carried out our research on waste plastics such as PE, PP and PVC. In the first part of it, we reviewed the current research on the use of plastics in concrete. This was followed by plastic waste characterization in order to make concrete recipes. In the final part of our research, we partially replaced natural aggregate in concrete with waste plastics and subjected it to standard laboratory tests.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorici prof. Violeti Bokan-Bosiljkov, somentorju dr. Aljoši Šajna, zaposlenim na Zavodu za gradbeništvo Slovenije ter vsem ostalim, ki so mi pomagali pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi staršema, ki sta mi v času študija stala ob strani in me podpirala.



**KAZALO VSEBINE**

STRAN ZA POPRAVKE.....	III
IZJAVE .....	IV
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM .....	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....	VI
ZAHVALA .....	VII
1 UVOD.....	21
1.1 Predstavitev problema.....	21
1.2 Namen magistrske naloge.....	23
2 ZAKONODAJA.....	25
2.1 Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1), Uradni list RS, št. 39/2006 .....	25
2.2 Uredba o odpadkih, Uradni list RS, št. 37/2015 .....	26
2.3 Uredba o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo, Uradni list RS, št. 84/06 .....	28
2.4 Uredba o ravnanju z odpadnimi nagrobnimi svečami, Uradni list RS, št. 78/08 .....	28
2.5 Uredba EU št. 305/11 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov.....	29
2.6 Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro-1), Uradni list RS, št. 82/2013 .....	30
3 TEORETIČNI DEL.....	31
3.1 Lastnosti polimerov .....	31
3.2 Termoplasti .....	32
3.2.1 Polietilen (PE).....	35
3.2.2 Polipropilen (PP).....	35
3.2.3 Polivinil klorid (PVC) .....	36
3.3 Proizvodnja plastike .....	36
3.4 Plastični odpadki .....	38
3.5 Problematika plastičnih odpadkov .....	42
3.6 Recikliranje in predelava plastičnih odpadkov .....	43
3.7 Plastični odpadki v Republiki Sloveniji .....	45
3.8 Uporaba plastike v gradbeništvu .....	47
3.8.1 Plastični agregat .....	48
3.8.2 Lastnosti plastičnega agregata .....	48
3.8.3 Zrnavost plastike in obseg nadomestitve naravnega agregata.....	49
3.8.4 Priprava betona .....	49

3.8.5	Obdelavnost .....	49
3.8.6	Posed .....	50
3.8.7	Gostota.....	50
3.8.8	Vsebnost zraka.....	51
3.8.9	Tlačna trdnost.....	51
3.8.10	Natezna in upogibna trdnost .....	52
3.8.11	Modul elastičnosti .....	53
3.8.12	Žilavost in Poissonov količnik .....	54
3.8.13	Vodovpojnost.....	54
3.8.14	Karbonatizacija .....	54
3.8.15	Prodor kloridov .....	55
3.8.16	Zmrzljinska odpornost .....	55
3.8.17	Odpornost proti obrusu .....	55
3.8.18	Krčenje .....	55
3.8.19	Požarna odpornost .....	56
3.8.20	Termične lastnosti .....	56
3.8.21	Izluževanje .....	56
3.9	Reciklirana odpadna plastika podjetja Interseroh .....	57
3.9.1	Recythen .....	57
3.9.1.1	Recythen HDPE .....	57
3.9.1.2	Recythen PO.....	58
3.9.1.3	Recythen PP10 .....	58
3.9.1.4	Recythen LD AGG .....	59
3.9.1.5	Recythen PO AGG.....	60
3.9.2	Mahlgut.....	60
3.9.2.1	Mahlgut PP .....	60
3.9.2.2	Mahlgut HDPE .....	61
3.9.3	Odpadne nagrobne sveče iz PVC.....	61
4	EKSPERIMENTALNI DEL.....	63
4.1	Karakterizacija odpadne plastike.....	63
4.1.1	Zrnavostna sestava .....	63
4.1.2	Prostorninska masa zrn .....	64
4.1.3	Površina zrn pod mikroskopom.....	65
4.2	Uporabljeni materiali za izdelavo betonskih kompozitov .....	65
4.2.1	Cement.....	66
4.2.2	Naravni agregat .....	66

4.2.3	Voda.....	67
4.2.4	Odpadna plastika.....	67
4.2.5	Mineralni dodatki.....	67
4.2.6	Kemijski dodatki.....	68
4.3	Izdelava betonskih kompozitov.....	68
4.3.1	Izdelava betonskih kompozitov 1. del.....	69
4.3.1.1	Beton etalon.....	70
4.3.1.2	Beton s plastiko Recythen PP10.....	70
4.3.1.3	Beton s plastiko PVC.....	72
4.3.1.4	Beton s plastiko Recythen PO AGG.....	73
4.3.2	Izdelava betonskih kompozitov 2. del.....	74
4.3.2.1	Beton PP10_AER.....	74
4.3.2.2	Beton PP10_EFP.....	75
4.3.2.3	Beton PP10_optim. EFP.....	76
4.3.2.4	Beton PP10_optim. EFP_AER.....	76
4.3.2.5	Beton PP10_optim. EFP_GOST.....	77
4.3.3	Izdelava betonskih kompozitov 3. del.....	78
4.3.3.1	Beton etalon_novi.....	78
4.3.4	Izdelava betonskih kompozitov 4. del.....	79
4.3.4.1	Beton PP10_SCC.....	79
4.4	Lastnosti svežega betona.....	80
4.4.1	Posed.....	80
4.4.2	Razlez s posedom.....	81
4.4.3	Gostota.....	82
4.4.4	Vsebnost zraka.....	83
4.4.5	Segregacija.....	83
4.5	Lastnosti strjenega betona.....	84
4.5.1	Gostota.....	85
4.5.2	Tlačna trdnost.....	85
4.5.3	Globina prodora vode.....	86
4.5.4	Odpornost proti karbonatizaciji.....	87
4.5.5	Odpornost proti kloridom.....	87
4.5.6	Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju (NOZT).....	88
4.5.7	Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju (OPZT).....	89
5	REZULTATI IN ANALIZA.....	91
5.1	Karakterizacija odpadne plastike.....	91

5.1.1	Zrnavostna sestava .....	91
5.1.1.1	Recythen HDPE, Recythen PO in Recythen PP10.....	91
5.1.1.2	Recythen LD AGG in Recythen PO AGG .....	92
5.1.1.3	Mahlgut PP in Mahlgut HDPE .....	94
5.1.1.4	PVC .....	96
5.1.2	Prostorninska masa zrn .....	97
5.1.2.1	Recythen HDPE, Recythen PO in Recythen PP10.....	98
5.1.2.2	Recythen LD AGG in Recythen PO AGG .....	99
5.1.2.3	Mahlgut PP in Mahlgut HDPE .....	99
5.1.2.4	PVC .....	100
5.1.3	Površina zrn pod mikroskopom.....	100
5.2	Preiskave betona (1. del) .....	102
5.2.1	Preiskave svežega betona.....	102
5.2.1.1	Posed.....	102
5.2.1.2	Gostota .....	103
5.2.1.3	Vsebnost zraka .....	104
5.2.2	Preiskave strjenega betona .....	105
5.2.2.1	Gostota .....	105
5.2.2.2	Tlačna trdnost .....	107
5.2.2.3	Segregacija .....	109
5.3	Preiskave betona (2. del) .....	110
5.3.1	Preiskave svežega betona.....	110
5.3.1.1	Posed.....	110
5.3.1.2	Gostota .....	111
5.3.1.3	Vsebnost zraka .....	112
5.3.1.4	Segregacija .....	113
5.3.2	Preiskave strjenega betona .....	114
5.3.2.1	Gostota .....	114
5.3.2.2	Tlačna trdnost .....	116
5.3.2.3	Segregacija .....	118
5.4	Preiskave betona (3. del) .....	119
5.4.1	Preiskave svežega betona.....	119
5.4.1.1	Posed.....	119
5.4.1.2	Gostota .....	120
5.4.1.3	Vsebnost zraka .....	121
5.4.2	Preiskave strjenega betona .....	122
5.4.2.1	Gostota .....	122

---

5.4.2.2	Tlačna trdnost .....	123
5.4.2.3	Globina prodora vode.....	124
5.4.2.4	Odpornost proti karbonatizaciji .....	126
5.4.2.5	Odpornost proti kloridom .....	129
5.4.2.6	Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju (NOZT) .....	130
5.4.2.7	Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju (OPZT) .....	133
5.5	Preiskave betona (4. del).....	136
5.5.1	Preiskave svežega betona .....	136
5.5.1.1	Razlez s posedom.....	136
5.5.1.2	Gostota .....	137
5.5.1.3	Segregacija .....	137
5.5.2	Preiskave strjenega betona .....	138
5.5.2.1	Gostota .....	138
5.5.2.2	Tlačna trdnost .....	138
5.5.2.3	Segregacija .....	139
6	ZAKLJUČEK .....	140
VIRI.....		144

## KAZALO SLIK

Slika 1: Hierarhija ravnanja z odpadki. ....	27
Slika 2: Delitev polimerov. ....	31
Slika 3: Ravnanje z odpadno plastiko leta 2008 v EU + Norveška, Švica [19]. ....	43
Slika 4: Toplotna obdelava plastičnega agregata [28]. ....	48
Slika 5: Drobnozrnat plastični agregat [27]. ....	49
Slika 6: Stik plastičnega agregata s cementno matrico (levo) in naravnega agregata s cementno matrico (desno) [31]. ....	52
Slika 7: Slaba vez med plastičnim agregatom in cementno matrico [33]. ....	53
Slika 8: Recythen HDPE. ....	57
Slika 9: Recythen PO. ....	58
Slika 10: Recythen PP10. ....	59
Slika 11: Recythen LD AGG. ....	59
Slika 12: Recythen PO AGG. ....	60
Slika 13: Mahlgut PP. ....	60
Slika 14: Mahlgut HDPE. ....	61
Slika 15: PVC. ....	62
Slika 16: Sejanje plastičnega agregata na situ. ....	64
Slika 17: Piknometer [45]. ....	65
Slika 18: Mikroskop [46]. ....	65
Slika 19: Laboratorijski mešalec. ....	69
Slika 20: Standardni kalupi – prizme (levo) in kocke (desno). ....	69
Slika 21: Beton PP10. ....	71
Slika 22: Beton PVC. ....	72
Slika 23: Beton PO AGG. ....	73
Slika 24: Beton PP10_SCC. ....	79
Slika 25: Merjenje poseda betonskega stožca. ....	81
Slika 26: Merjenje razleza betona. ....	82
Slika 27: Merjenje vsebnosti zraka s porozimetrom. ....	83
Slika 28: Veliki in mali kalup. ....	84
Slika 29: Sejanje plastičnega agregata na sitih (levo) in namakanje v vodi (desno). ....	84
Slika 30: Preiskava tlačne trdnosti. ....	86
Slika 31: Izpostavljenost vzorcev vodnemu tlaku. ....	87
Slika 32: Tesnjenje vzorcev s parafinom. ....	87
Slika 33: Vakuumska komora (levo) ter hranjenje vzorcev v raztopini NaCl (desno). ....	88
Slika 34: Mletje vzorca po plasteh. ....	88

---

Slika 35: Hranjenje vzorcev v hladilni komori (levo) in določevanje relativnega dinamičnega modula elastičnosti (desno).....	89
Slika 36: Vzorci izpostavljeni raztopini NaCl (levo) in izpiranje odluščenega materiala (desno).....	90
Slika 37: Plavanje plastik Recythen na vodi. ....	97
Slika 38: Recythen HDPE (levo) in PO (desno).....	101
Slika 39: Recythen PP10. ....	101
Slika 40: Recythen LD AGG (levo) in PO AGG (desno). ....	101
Slika 41: Mahlgut PP (levo) in HDPE (desno). ....	101
Slika 42: PVC.....	102
Slika 43: Posed betona etalon (levo) in betona PP10 (desno).....	103
Slika 44: Slab stik med plastičnim agregatom in cementnim kamnom.....	109
Slika 45: Segregacija plastike Recythen PO AGG (levo) in Recythen PP10 (desno).....	109
Slika 46: Posed betona PP10_AER (levo) in betona PP10_optim. EFP (desno). ....	110
Slika 47: Površina in prečni prerez kocke z uporabo aeranta (levo) in brez aeranta (desno). .....	118
Slika 48: Površina kocke (levo) in prerez kocke z uporabo gostilca (desno).....	119
Slika 49: Posed betona etalon_novi (levo) in betona PP10_optim. EFP_GOST (desno)....	119
Slika 50: Globina prodora vode pri betonu s plastiko (levo) in etalonu (desno).....	125
Slika 51: Globina karbonatizacije pri etalonu (levo) in betonu s plastiko (desno) po 56 dneh. .....	128
Slika 52: Globina karbonatizacije pri etalonu (levo) in betonu s plastiko (desno) po 100 dneh. .....	128
Slika 53: Etalon pred preskusom (levo) in po 25 ciklih (desno).....	135
Slika 54: Beton s plastiko pred preskusom (levo) in po 25 ciklih (desno).....	135
Slika 55: Meritev razleza betona v obeh smereh. ....	136
Slika 56: Minimalna segregacija plastičnega agregata. ....	138
Slika 57: Odsotnost segregacije plastičnega agregata. ....	139

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Proizvodnja plastike od leta 1950 naprej (ne zajema PET, poliamidnih in poliakrilnih vlaken) [20].	37
Grafikon 2: Uporaba plastike v EU po sektorjih leta 2008 [19].	37
Grafikon 3: Tipi proizvedenih plastik v EU [20].	38
Grafikon 4: Rast energetske predelave in mehanskega recikliranja odpadne plastike v EU [20].	40
Grafikon 5: Deleži odpadne plastike v EU + Norveška, Švica v letu 2008 po posameznih področjih [18].	40
Grafikon 6: Primerjava energije, ki se sprošča pri gorenju različnih snovi [10].	45
Grafikon 7: Količina nastale odpadne plastike v Sloveniji [22].	46
Grafikon 8: Ravnanje z odpadno plastiko v Sloveniji [22].	46
Grafikon 9: Delež reciklaže oz. predelave odpadne plastike v Sloveniji [23].	47
Grafikon 10: Zrnavostna krivulja naravnega agregata, lahkega agregata in odpadne plastike [27].	49
Grafikon 11: Potrebno večanje v/c razmerja pri betonu s plastiko za zagotavljanje enake obdelavnosti [29].	50
Grafikon 12: Linearni upad mase betonskih kock [29].	51
Grafikon 13: Tlačna trdnost betona s plastiko [30].	52
Grafikon 14: Natezna trdnost betona s plastiko [33].	53
Grafikon 15: Upogibna trdnost betona s plastiko [33].	53
Grafikon 16: Elastični modul betona s plastiko [27].	54
Grafikon 17: Globina obrabe betona s plastiko [33].	55
Grafikon 18: Krčenje betona s plastiko [27].	56
Grafikon 19: Zrnavostne krivulje naravnega agregata.	66
Grafikon 20: Krivulja zrnavosti agregata v betonu etalon.	70
Grafikon 21: Krivulja zrnavosti agregata v betonu PP10.	71
Grafikon 22: Krivulja zrnavosti agregata v betonu PVC.	72
Grafikon 23: Krivulja zrnavosti agregata v betonu PO AGG.	74
Grafikon 24: Krivulja zrnavosti agregata v betonu etalon_novi.	79
Grafikon 25: Krivulja zrnavosti agregata v betonu PP10_SCC.	80
Grafikon 26: Krivulja zrnavosti Recythen HDPE, PO in PP10.	92
Grafikon 27: Krivulja zrnavosti Recythen LD AGG in PO AGG.	93
Grafikon 28: Krivulja zrnavosti Mahlgut PP in HDPE.	95
Grafikon 29: Krivulja zrnavosti PVC.	97
Grafikon 30: Prostorninska masa zrn suhega vzorca odpadne plastike.	100



---

Grafikon 31: Posed betonskega stožca.....	103
Grafikon 32: Gostota svežega betona.....	104
Grafikon 33: Vsebnost zraka.....	105
Grafikon 34: Povprečna gostota betona po 28 dneh.....	107
Grafikon 35: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.....	109
Grafikon 36: Posed betonskega stožca.....	111
Grafikon 37: Gostota svežega betona.....	112
Grafikon 38: Vsebnost zraka.....	113
Grafikon 39: Povprečna gostota betona po 28 dneh.....	115
Grafikon 40: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.....	118
Grafikon 41: Posed betonskega stožca.....	120
Grafikon 42: Gostota svežega betona.....	121
Grafikon 43: Vsebnost zraka.....	122
Grafikon 44: Povprečna gostota betona po 28 dneh.....	123
Grafikon 45: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.....	124
Grafikon 46: Globina prodora vode.....	125
Grafikon 47: Povprečna globina karbonatizacije.....	129
Grafikon 48: Vsebnost kloridov na različnih globinah betona.....	130
Grafikon 49: NOZT - povprečni relativni dinamični modul.....	133
Grafikon 50: OPZT - povprečna količina odluščenega materiala.....	135
Grafikon 51: OPZT - komulativna količina odluščenega materiala.....	136

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrste termoplastov [10].	33
Preglednica 2: Propadanje polimerov [10].	34
Preglednica 3: Mehanske lastnosti termoplastov [15, 16].	35
Preglednica 4: Klasifikacijski seznam plastičnih odpadkov [19, 21].	39
Preglednica 5: Lastnosti Recythen HDPE, PO in PP10 [36].	58
Preglednica 6: Lastnosti Recythen LD AGG in PO AGG [36].	59
Preglednica 7: Lastnosti Mahlgut PP in HDPE [36].	61
Preglednica 8: Receptura betona etalon.	70
Preglednica 9: Receptura betona PP10.	71
Preglednica 10: Receptura betona PVC.	72
Preglednica 11: Receptura betona PO AGG.	73
Preglednica 12: Receptura betona PP10_AER.	75
Preglednica 13: Receptura betona PP10_EFP.	75
Preglednica 14: Receptura betona PP10_optim. EFP.	76
Preglednica 15: Receptura betona PP10_optim. EFP_AER.	77
Preglednica 16: Receptura betona PP10_optim. EFP_GOST.	77
Preglednica 17: Receptura betona etalon_novi.	78
Preglednica 18: Receptura betona PP10_SCC.	80
Preglednica 19: Stopnje poseda [49].	81
Preglednica 20: Stopnje razleza s posedom [49].	82
Preglednica 21: Dovoljene vrednosti prodora vode [65].	86
Preglednica 22: Mejne vrednosti za NOZT [65].	89
Preglednica 23: Merila za ocenjevanje OPZT [65].	90
Preglednica 24: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen HDPE, PO in PP10.	91
Preglednica 25: Zrnavostna sestava Recythen HDPE, PO in PP10.	91
Preglednica 26: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen LD AGG.	92
Preglednica 27: Zrnavostna sestava Recythen LD AGG.	92
Preglednica 28: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen PO AGG.	93
Preglednica 29: Zrnavostna sestava Recythen PO AGG.	93
Preglednica 30: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Mahlgut PP.	94
Preglednica 31: Zrnavostna sestava Mahlgut PP.	94
Preglednica 32: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Mahlgut HDPE.	95
Preglednica 33: Zrnavostna sestava Mahlgut HDPE.	95
Preglednica 34: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri PVC.	96
Preglednica 35: Zrnavostna sestava PVC.	96

---

Preglednica 36: Prostorninska masa Recythen HDPE, PO in PP10.....	98
Preglednica 37: Prostorninska masa Recythen LD AGG in PO AGG.....	99
Preglednica 38: Prostorninska masa Mahlgut PP in HDPE.....	99
Preglednica 39: Prostorninska masa PVC.....	100
Preglednica 40: Posed betonskega stožca.....	102
Preglednica 41: Gostota svežega betona.....	103
Preglednica 42: Vsebnost zraka.....	104
Preglednica 43: Gostota betona etalon po 28 dneh.....	105
Preglednica 44: Gostota betona PP10 po 28 dneh.....	106
Preglednica 45: Gostota betona PVC po 28 dneh.....	106
Preglednica 46: Gostota betona PO AGG po 28 dneh.....	106
Preglednica 47: Tlačna trdnost betona etalon.....	107
Preglednica 48: Tlačna trdnost betona PP10.....	108
Preglednica 49: Tlačna trdnost betona PVC.....	108
Preglednica 50: Tlačna trdnost betona PO AGG.....	108
Preglednica 51: Posed betonskega stožca.....	110
Preglednica 52: Gostota svežega betona.....	111
Preglednica 53: Vsebnost zraka.....	112
Preglednica 54: Segregacija betona PP10_optim. EFP_GOST.....	113
Preglednica 55: Gostota betona PP10_AER.....	114
Preglednica 56: Gostota betona PP10_EFP.....	114
Preglednica 57: Gostota betona PP10_optim. EFP.....	114
Preglednica 58: Gostota betona PP10_optim. EFP_AER.....	115
Preglednica 59: Gostota betona PP10_optim. EFP_GOST.....	115
Preglednica 60: Tlačna trdnost betona PP10_AER.....	116
Preglednica 61: Tlačna trdnost betona PP10_EFP.....	116
Preglednica 62: Tlačna trdnost betona PP10_optim. EFP.....	117
Preglednica 63: Tlačna trdnost betona PP10_optim. EFP_AER.....	117
Preglednica 64: Tlačna trdnost betona PP10_optim. EFP_GOST.....	117
Preglednica 65: Posed betonskega stožca.....	119
Preglednica 66: Gostota svežega betona.....	120
Preglednica 67: Vsebnost zraka.....	121
Preglednica 68: Gostota betona etalon_novi.....	122
Preglednica 69: Gostota betona PP10_optim. EFP_GOST.....	122
Preglednica 70: Tlačna trdnost betona etalon_novi po 28 dneh.....	123
Preglednica 71: Tlačna trdnost betona PP10_optim. EFP_GOST po 28 dneh.....	124
Preglednica 72: Globina prodora vode pri betonu etalon_novi.....	124

Preglednica 73: Globina prodora vode pri betonu PP10_optim. EFP_GOST. ....	125
Preglednica 74: Globina karbonatizacije pri betonu etalon_novi: 1. del. ....	126
Preglednica 75: Globina karbonatizacije pri betonu etalon_novi: 2. del. ....	127
Preglednica 76: Globina karbonatizacije pri betonu PP10_optim. EFP_GOST: 1. del. ....	127
Preglednica 77: Globina karbonatizacije pri betonu PP10_optim. EFP_GOST: 2. del. ....	128
Preglednica 78: Vsebnost kloridov. ....	129
Preglednica 79: NOZT betona etalon_novi. ....	131
Preglednica 80: NOZT betona PP10_optim. EFP_GOST. ....	132
Preglednica 81: OPZT betona etalon_novi. ....	133
Preglednica 82: OPZT betona PP10_optim. EFP_GOST. ....	134
Preglednica 83: Razlez s posedom betona PP10_SCC. ....	137
Preglednica 84: Gostota svežega betona PP10_SCC. ....	137
Preglednica 85: Segregacija betona PP10_SCC. ....	137
Preglednica 86: Gostota betona PP10_SCC po 28 dneh. ....	138
Preglednica 87: Tlačna trdnost betona PP10_SCC po 28 dneh. ....	139
Preglednica 88: Prednosti in slabosti plastike. ....	140
Preglednica 89: Prednosti in slabosti uporabe odpadne plastike v betonu. ....	141

**Ta stran je namenoma prazna.**

## 1 UVOD

### 1.1 Predstavitev problema

Plastika (definicija: poglavje 3.1) je zaradi svojih pozitivnih lastnosti, kot so vsestranskost, prilagodljivost, dolgotrajnost, vzdržljivost in cenovna dostopnost, prisotna v številnih aplikacijah in tako velja za eno izmed najpomembnejših človekovih iznajdb moderne dobe.

Čeprav ima plastika na eni strani zelo veliko pozitivnih lastnosti, kar jo dela privlačno za množično uporabo, pa ima na drugi strani tudi veliko negativnih lastnosti, katerim se ni moč popolnoma izogniti, lahko pa jih vsaj skušamo omejiti.

Njen netrajosten način pridobivanja, prisotnost v velikih količinah, stihjska raba, nerazgradljivost ipd. negativno vplivajo na okolje in človeka ter so vzrok za številne ekološke nesreče, ki smo jim bili priča v zadnjih desetletjih. Še posebno velik del tega problema so plastične embalaže, saj zaradi svoje narave velikokrat končajo med odpadki kmalu po nakupu izdelka.

Osnovna naravna surovina, iz katere pridobivamo plastike, je surova nafta, ki spada med neobnovljive vire energije. Okoli 8 % svetovne proizvodnje nafte se porabi pri pridobivanju plastike, od tega pa se kar polovica uporabi za samo energijo, ki je potrebna za proizvodnjo plastike [1].

Nafto se pridobiva z vrtnjem na kopnem ali s črpanjem na naftnih ploščadih na morju. Sam proces pridobivanja nafte spada za okolje med bolj obremenjujoče procese, saj prihaja do posedanja tal, odplak, eksplozij, uhajanj nafte ipd. V zadnjih 150 letih, odkar je svet pričel s črpanjem nafte, smo bili priča velikim ekološkim nesrečam, katerih posledice čutimo še danes. Te nesreče so bile večinoma posledica razlitij nafte s tankerjev v morje, to pa je povzročilo pogin morskih bitij oz. je nafta preko prehranske verige prišla tudi do človeka.

Hitro naraščanje količine odpadkov je posledica bliskovitega naraščanja svetovnega števila prebivalstva in s tem povečanega povpraševanja po izdelkih oz. z njima povezane povečane proizvodnje in potrošnje. Zaradi nekaterih svojih lastnosti plastični odpadki (na primer ftalati pri PVC) ogrožajo tako okolje kot zdravje ljudi, zato je potrebno skrbno in ustrezno ravnanje z odpadki.

Prioriteta na področju ravnanja z odpadki je preprečevanje nastajanja odpadkov, kar dosežemo z večkratno ponovno uporabo izdelkov oz. z uporabo alternativnih, okolju bolj prijaznih materialov. Kljub veliki skrbi po zmanjšanju količin odpadkov, pa se jim ni moč popolnoma izogniti.

Industrijske in gospodinjske odpadke sestavlja, zaradi že zgoraj omenjenih pozitivnih lastnosti, pomemben delež plastičnih materialov. Ti plastični materiali predstavljajo še posebno težavo, saj niso biorazgradljivi, razgrajujejo se počasi in tako predstavljajo velik okoljski problem. V okolju lahko tako ostanejo tudi več sto let.

Z energetske predelavo (praviloma s so-sežigom) lahko sicer izkoristimo visoko kalorično moč plastike, vendar se pri tem lahko sproščajo strupeni plini (na primer klorovodikova kislina v primeru sežiga PVC) v zrak, ki škodljivo vplivajo na okolje in zdravje ljudi.

Odlaganje plastičnih odpadkov na odlagališčih ni trajnostna rešitev, saj so kapacitete odlagališč omejene. Prav tako je odlaganje odpadkov vprašljivo z ekološkega vidika, zato je recikliranje oz. predelava odpadkov v nove proizvode dobra alternativa konvencionalnemu odlaganju.

Zaradi vse večjih okoljskih problemov z odpadno plastiko in njihovo ogromno količino, je postalo področje ravnanja z odpadno plastiko oz. njeno recikliranje in predelava poglavitna tema večine raziskav s tega področja. Te vrste raziskav pa so tudi odraz novih oz. strožjih predpisov s področja varstva okolja in ravnanja z odpadki.

Evropska direktiva za odpadke spodbuja k čim manjšemu odlaganju, zato je potrebno iskati rešitve v smeri zmanjševanja količin, ponovne uporabe, recikliranja ter predelave odpadkov, kar pa zahteva določen trud. Zbrana odpadna plastika je povečini onesnažena, nesortirana mešanica različnih vrst plastik, kar zahteva precej veliko dela in stroškov pri prepoznavanju, ločevanju in čiščenju le-teh.

Po nekaterih ocenah naj bi približno 80 % vse odpadne plastike spadalo med vrsto termoplastov [2], katero se da ustrezno predelati in je tako zelo zanimiva iz ekološkega in trajnostnega vidika. Preostali delež predstavljajo duroplasti, ki so manj ugodni za predelavo. Hkrati z reševanjem problema nerazgradljivih odpadnih plastik poteka razvoj ekološko bolj sprejemljivih bioplastik, ki so biorazgradljive, pri katerih pa še ni povsem znan vpliv na okolje za čas njihovega življenjskega cikla.

Ker se je v gradbeništvu beton že uporabil oz. se uporablja kot medij za »odlaganje« določenih okoljsko problematičnih odpadkov, kot so različne žindre s procesov pridobivanja kovin in pepeli s procesov pridobivanja energije, je smiselno to idejo preizkusiti še na odpadni plastiki. Beton ne le fiksira nevarni odpadek, temveč si lahko s tem izboljša tudi nekatere svoje lastnosti.

Beton je najbolj razširjen gradbeni material, ker pa ima tudi nekatere pomanjkljivosti, se vedno iščejo nove metode oz. materiali, ki bi te pomanjkljivosti odpravili.

Ena od pomanjkljivosti je visoka gostota, zato se uporabljajo materiali, ki bi to gostoto zmanjšali. Najpogosteje se za izdelavo lahkega betona uporablja lahki agregat, ki

pomembno vpliva na zmanjšanje lastne teže betona in lahko delno ali v celoti nadomesti naravni agregat. Žal je slaba lastnost takega lahkega agregata višja absorpcija vode in nižja trdnost v primerjavi z naravnim agregatom.

Druga pomanjkljivost je netrajnostna, neekonomska in obsežna raba naravnega agregata iz naravnih nahajališč, kot so rečna prodišča, gramozne jame in kamnolomi.

Ker gradbeništvo porablja velike količine materialov za izdelavo betona (agregat predstavlja približno 75 % prostornine betonske mešanice), je smiselna aplikacija odpadne plastike v betonu kot nadomestilo naravnega agregata. Plastični odpadki so namreč v splošnem inertni in imajo nižjo gostoto kot naravni agregat. Če je iz okoljskega vidika počasna razgradnja plastike v naravnem okolju nezaželjena lastnost, je lahko to zelo zaželjena lastnost pri uporabi v gradbene namene – v betonu.

Uporaba plastike v betonu lahko tako pomembno pripomore k zmanjšanju problema količin odpadne plastike, varčevanju z energijo, zmanjševanju stroškov, ohranjanju naravnih virov surovin in zmanjševanju okoljskih težav.

Predpogoj uporabe plastike v betonu pa je seveda plastika očiščena onesnažil in ustrezno sortirana glede na različne tipe plastik. Ker gradbeništvo zahteva trajne in kvalitetne materiale, je zelo pomembno tudi dobro poznavanje lastnosti plastike in njeno obnašanje v betonu skozi celoten življenjski cikel betona.

## **1.2 Namen magistrske naloge**

V okviru magistrske naloge smo raziskali vprašanje, ali je možno uporabiti odpadno plastiko kot delno nadomestilo za naravni agregat v betonu. Vse preiskave smo opravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, Oddelek za materiale, Laboratorij za betone, kamen in reciklirane materiale.

Nalogo smo razdelili na tri dele. Prvi del je obsegal pregled dosedanjih raziskav na področju uporabe plastike kot nadomestilo naravnega agregata v betonu.

V drugem delu smo okarakterizirali odpadno plastiko tipa polipropilen (PP), polietilen (PE) in polivinil klorid (PVC) iz vrst termoplastov, ki smo jo pridobili od podjetja Interseroh d.o.o., specializiranega za ravnanje z odpadnimi materiali. Na odpadni plastiki smo preiskali fizikalne lastnosti, na podlagi katerih smo lahko pripravili recepture za beton.

Tretji del preiskav smo namenili vgradnji odpadne plastike, v vlogi delnega nadomestila za naravni agregat v betonu. Pripravili smo betonske mešanice z različnimi vrstami odpadnih plastik. Na svežih in strjenih betonih smo opravili laboratorijske preiskave v skladu z veljavnimi standardi. Rezultate preiskav betona z odpadno plastiko smo nato primerjali z rezultati preiskav referenčnega običajnega betona.



Cilji magistrske naloge so bili:

- pregledati dosedanje raziskave na področju uporabe odpadne plastike v betonu,
- okarakterizirati odpadno plastiko,
- nadomestiti del naravnega agregata z odpadno plastiko v betonski mešanici,
- narediti standardne laboratorijske preiskave na svežem in strjenem betonu,
- primerjati lastnosti betona iz odpadne plastike z lastnostmi običajnega betona.

Temeljno vprašanje magistrske naloge je bilo, ali je možno z uporabo odpadne plastike pripraviti takšen beton, ki bi ustrezal zahtevam v gradbeništvu in bil obstojen na dolgi rok.

## 2 ZAKONODAJA

Krovni zakon na področju varovanja okolja in s tem povezanega »okoljsko« pravilnega ravnanja z odpadki je Zakon o varstvu okolja. Temu zakonu so podrejene številne uredbe, ki bolj natančno obravnavajo področje odpadkov.

Temeljna zakonodaja s področja odpadkov je Direktiva o odpadkih 2008/98/ES. Konkretnije plastične odpadke oz. embalažo iz plastike opredeljuje Direktiva o embalaži in odpadni embalaži 94/62/ES, ki pa obravnava le skupno področje embalaž (steklo, papir, karton, kovine, plastika in les). Kljub temu, da plastični odpadki pomembno vplivajo na okolje, jih tako zakonodaja znotraj EU obravnava le skupaj s preostalimi vrstami embalaž. Zaradi njihove specifikacije je posledično težje izvajati politiko ravnanja s plastičnimi odpadki v skladu s trendi v proizvodnji, potrošnji in odstranjevanju. Ti dve direktivi sta prenešeni v slovenski pravni red kot Uredba o odpadkih, Uredba o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo ter Uredba o ravnanju z odpadnimi nagrobnimi svečami.

Uporabo proizvodov v gradbene namene in njihovo trženje definira Uredba EU št. 305/11 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov. V kolikor za gradbeni proizvod ne obstajajo harmonizirane tehnične specifikacije, kamor spada tudi beton z uporabo odpadne plastike kot nadomestilo naravnega agregata, pa velja tudi Zakon o gradbenih proizvodih.

### 2.1 Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1), Uradni list RS, št. 39/2006

- Namen

Zakon določa temeljna načela varstva okolja in ukrepe varstva okolja s ciljem spodbujati tak družbeni razvoj, ki ne bo ogrožal prihodnjih generacij in bo ohranjal biotsko raznovrstnost [3].

- Cilji

Zakon ima naslednje cilje [3]:

- preprečiti in zmanjšati obremenitve okolja,
- ohranjati in izboljšati kakovost okolja,
- trajnostno rabiti naravne vire,
- zmanjšati rabo energije in povečati uporabo obnovljivih virov energije,
- odpravljati posledice obremenjevanja okolja, izboljšati porušeno naravno ravnovesje in ponovno vzpostaviti njegove regeneracijske sposobnosti,
- povečati snovno učinkovitost proizvodnje in potrošnje ter
- opuščati in nadomeščati uporabo nevarnih snovi.

- Ukrepi

Zakon je predvidel naslednje ukrepe [3]:

- spodbuda take proizvodnje in potrošnje, ki prispeva k zmanjševanju obremenjevanja okolja,
- spodbuda takega razvoja in uporabe takih tehnologij, ki preprečujejo, odpravljajo ali zmanjšujejo obremenjevanje okolja,
- plačevanje onesnaževanja ter
- raba naravnih virov.

- Odpadek

Zakon definira, da je odpadek snov ali predmet, ki ga imetnik zavrže, namerava ali mora zavreči [3].

- Ravnanje z odpadki

Onesnaževalec mora preprečiti ali zmanjšati nastajanje odpadkov in njihov škodljiv vpliv na okolje. Če predelava ni mogoča, mora zagotoviti predelavo nastalih odpadkov ali pa jih varno odstraniti [3].

## 2.2 Uredba o odpadkih, Uradni list RS, št. 37/2015

- Namen

V uredbi so določena pravila ravnanja, ki preprečujejo ali zmanjšujejo škodljive vplive nastajanja odpadkov in ravnanja z njimi, zmanjšujejo vpliv uporabe naravnih virov ter izboljšujejo učinkovitost uporabe naravnih virov [4].

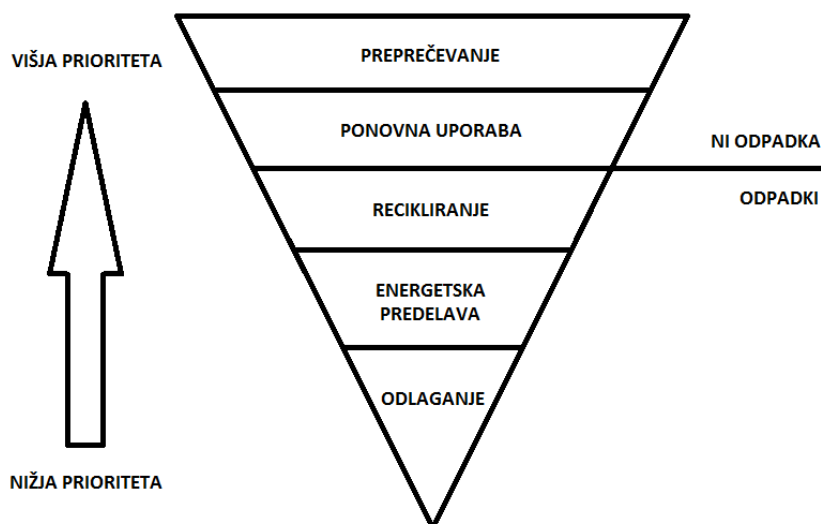
- Hierarhija ravnanja z odpadki

Pri nastajanju in ravnanju z odpadki (slika 1) je najbolj zaželeno preprečevanje nastajanja odpadkov in najmanj zaželeno odlaganje odpadkov [4].

Preprečevanje nastajanja odpadkov je vrsta ukrepov, preden snov, material ali proizvod postane odpadek, z namenom zmanjšati količino odpadkov ter škodljivih vplivov na okolje in človekovo zdravje.

Pri ponovni uporabi se proizvod ali sestavni del proizvoda ponovno uporabi za enak namen, za katerega je bil prvotno izdelan.

Recikliranje je vrsta predelave, pri kateri se odpadki ponovno predelajo v proizvode, materiale ali snovi za prvotni ali drug namen.



Slika 1: Hierarhija ravnanja z odpadki.

Predelava odpadkov je postopek, pri katerem se odpadki uporabijo v obratu, v katerem so bili predelani ter tako nadomestijo druge materiale, ki bi jih sicer prvotno uporabili.

Odstranjevanje je postopek, ki ni predelava, tudi če je to posledica pridobivanja snovi ali energije [4].

- Ravnanje z odpadki

Odpadke ne smemo odmetavati v naravnem okolju ali z njimi nenadzorovano ravnati. Ločeno je potrebno zbirati odpadke iz papirja, kovine, plastike in stekla. Odpadke je nato potrebno ustrezno predelati. Prednost pred predelavo imata ponovna uporaba ter recikliranje. Odpadke, ki jih ni možno predelati, se odstrani oz. odloži na odlagališču odpadkov [4].

- Prenehanje statusa odpadka

Odpadek izgubi status odpadka, ko se ga predela v proizvode, materiale ali snovi za uporabo v prvotni ali drug namen ali za pridobivanje energije. To velja tudi za reciklirane odpadke med predelavo, če so bila v tem postopku izpolnjena vsa merila za prenehanje statusa odpadka [4].

- Varstvo okolja in varovanje človekovega zdravja

Pri ravnanju z odpadki ne smemo ogroziti človekovega zdravja in povzročati škodljivih vplivov na okolje tako v tleh, vodi in zraku [4].

### 2.3 Uredba o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo, Uradni list RS, št. 84/06

- Namen

Namen te uredbe je določiti pravila ravnanja v proizvodnji, distribuciji in uporabi embalaže ter določiti pravila ravnanja v zvezi z zbiranjem, ponovno uporabo, predelavo in odstranjevanjem odpadne embalaže [5].

- Embalaža

Po definiciji je embalaža vsak material, ki blago obdaja ali drži skupaj zaradi hranjenja ali varovanja, rokovanja z njim oz. njegove dostave [5].

- Ravnanje z odpadno embalažo

Končni uporabnik mora odpadno embalažo ločeno zbirati, hraniti in oddajati. Ponovna uporaba, recikliranje, energetska predelava in drugi načini predelave imajo prednost pred odstranjevanjem oz. odlaganjem odpadne embalaže [5].

- Okoljski cilji

Predelava, vključno z energetsko predelavo, mora znašati najmanj 60 % celotne mase odpadne embalaže. Reciklirati je potrebno med 55 in 80 % celotne mase odpadne embalaže. Za plastike vsebovane v celotni masi odpadne embalaže je potrebno zagotoviti najmanj 22,5 % recikliranje, pri čemer se upošteva le material, ki se ponovno reciklira v plastiko [5].

### 2.4 Uredba o ravnanju z odpadnimi nagrobnimi svečami, Uradni list RS, št. 78/08

- Namen

Uredba določa pravila ravnanja z odpadnimi nagrobnimi svečami. Zagotoviti je potrebno ločeno zbiranje od drugih komunalnih odpadkov, recikliranje ter druge načine predelave [6].

- Odpadna nagrobna sveča

Uredba odpadno nagrobno svečo definira kot komunalni odpadek, ki se uvršča med odpadno embalažo s klasifikacijo številko 15 01 06 [6].

- Ravnanje z odpadnimi nagrobnimi svečami

Recikliranje, energetska predelava in drugi načini predelave imajo prednost pred odstranjevanjem oz. odlaganjem odpadnih nagrobnih sveč. Pri recikliranju se odpadna nagrobna sveča ponovno uporabi za prvotni namen ali za druge namene. Energetska

predelava je uporaba plastičnih materialov in parafina iz odpadnih nagrobnih sveč za gorivo v napravah za sosežig ali v sežigalnicah komunalnih odpadkov. Če plastika odpadnih nagrobnih sveč vsebuje polimere PVC ali druge halogenirane organske spojine, se odpadne nagrobne sveče ne smejo uporabljati kot gorivo [6].

## **2.5 Uredba EU št. 305/11 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov**

- **Namen**

Uredba določa pogoje za dajanje na trg gradbene proizvode z uvedbo usklajenih pravil o načinu navajanja lastnosti gradbenih proizvodov v zvezi z njihovimi bistvenimi značilnostmi in o uporabi oznake CE na teh proizvodih [7].

- **Gradbeni proizvod**

Proizvod ali sklop proizvodov, ki so proizvedeni in dani na trg za trajno vgradnjo v gradbene objekte ali njihove dele, je gradbeni proizvod [7].

- **Zahteve za gradbene objekte**

Gradbeni objekti ali posamezni deli objekta morajo biti primerni za predvideno uporabo, pri tem pa je potrebno upoštevati zdravje in varnost ljudi skozi celoten življenjski cikel teh objektov. Pri tem se mora zagotoviti [7]:

- mehanska odpornost in stabilnost,
- varnost pred požarom,
- higijenska in zdravstvena zaščita ter varovanje okolja,
- varnost pri uporabi,
- zaščita pred hrupom,
- varčevanje z energijo in ohranjanje toplote,
- trajnostna raba naravnih virov.

- **Značilnosti gradbenih proizvodov**

Bistvene značilnosti gradbenih proizvodov se opredelijo v harmoniziranih tehničnih specifikacijah. V kolikor je gradbeni proizvod zajet v harmoniziranem standardu ali ustreza evropski tehnični oceni, proizvajalec izdela izjavo o lastnostih za proizvod [7].

---

## 2.6 Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro-1), Uradni list RS, št. 82/2013

- Namen

Zakon določa pogoje za dajanje na trg gradbene proizvode, za katere ne obstajajo harmonizirane tehnične specifikacije po Uredbi EU št. 305/11 [8].

- Zahteve

V kolikor gradbeni proizvod ni zajet v harmonizirani tehnični specifikaciji, mora proizvajalec gradbenega proizvoda, njegove lastnosti dokazati na podlagi naslednjih tehničnih specifikacij [8]:

- veljavnih slovenskih nacionalnih standardov ali
- slovenskega tehničnega soglasja ali
- drugih javno dostopnih tehničnih specifikacij, ki predstavljajo stanje tehnike in tehnologije.

### 3 TEORETIČNI DEL

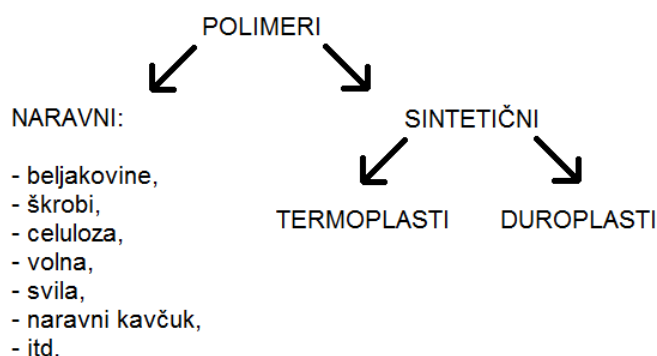
V magistrski nalogi smo uporabili odpadno plastiko kot nadomestilo za naravni agregat v betonu. Za uporabo polimerov v gradbene namene je potrebno zelo dobro poznati predvsem njihove lastnosti, ki nato določajo način oz. možnost njihove uporabe v betonu. V nadaljevanju teoretičnega dela so tako predstavljena osnovna dejstva o plastiki, problematika plastičnih odpadkov in dosedanje raziskave na področju uporabe plastike v betonu. Ker smo v magistrski nalogi uporabili odpadno plastiko tipa PE, PP in PVC, so bolj podrobno predstavljene te vrste termoplastov.

#### 3.1 Lastnosti polimerov

Plastika je material, ki ga sestavlja en ali več organskih polimerov z veliko molekulsko maso, ki je trden v svojem končnem stanju in ga je možno oblikovati na neki stopnji proizvodnje ali predelave [9]. Grška beseda »plastikos« namreč pomeni oblikovati oz. gnesti.

Ponavadi pa strokovno plastike imenujemo polimerne snovi oz. polimeri. Polimeri so makromolekularne organske spojine, ki so sestavljene iz več ponavljajočih se enot - monomer. Monomere sestavljajo ogljikovi atomi [10]. Beseda polimeri izhaja iz grške besede »polimeros«, kjer »poli« pomeni mnogo in »meros« delec.

V osnovi delimo polimere na naravne in umetne (slika 2). Umetne (sintetične) polimere, ki se jih pridobiva v kemičnih reaktorjih, delimo glede na obnašanje pri povišani temperaturi na termoplaste in duroplaste. Podskupina duroplastov so elastoplasti [10].



Slika 2: Delitev polimerov.

Naravna surovina, iz katere pridobivamo polimere je fosilno gorivo - nafta. Sintetični polimeri nastanejo s polimerizacijo, ki jo v splošnem delimo na poliadicijo in polikondenzacijo oz. verižno in stopenjsko polimerizacijo [10, 11].



Glede na to, kolikšno je število v molekuli polimera vezanih različnih monomerov, delimo lahko polimere na homopolimere in kopolimere. Homopolimer vsebuje le eno ponavljajočo se enoto (monomero) z razliko od kopolimera, ki vsebuje dva ali več monomerov, ki se vežejo na več različnih načinov [12].

Polimere lahko glede na urejenost polimernih verig delimo na amorfne in kristalinične polimere. Verige amorfnih polimerov so neurejene in prepletene, medtem ko so verige kristaliničnih polimerov urejene in se zlagajo v lamele in sferulite [11].

### 3.2 Termoplasti

Pri termoplastih (preglednica 1) gre za vrsto polimerov, ki se predelujejo pri povišani temperaturi, saj takrat postanejo primerni za preoblikovanje. Po ohladitvi pa polimeri otrdijo in obdržijo dano obliko. Njihova težava je povišana temperatura, saj se takrat začnejo mehčati in izgubljati svoje mehanske lastnosti. Vzrok za to so nitaste molekule termoplastov, ki so med seboj povezane s precej šibkimi Van der Waalsovimi vezmi ali pa vezi sploh ni. Šibke vezi jim omogočajo, da se jih da zelo enostavno oblikovati pri temperaturi nad temperaturo zmehčičišča. Pri sobni temperaturi so termoplasti togi in krhki. S povišanjem temperature se molekule termoplasta pričnejo gibati. Vezi med molekulami se postopoma zrahljajo in makromolekule se lahko medsebojno premikajo ob obremenitvi materiala. Če nadalje povečujemo temperaturo, postajajo termoplasti vedno bolj podajni in prehajajo v viskozno talino. Termoplasti zaradi zgoraj omenjenih lastnosti spadajo med najbolj uporabljane vrste polimerov, saj njihova posebna zgradba omogoča večkratno reciklažo oz. predelavo, kar jih dela zanimive tako z ekološkega kot trajnostnega vidika [10, 13, 14].

- Termične lastnosti

Termoplasti se pri segrevanju zmehčajo in na koncu stalijo. Pri ohlajanju se ponovno strdijo in ohranijo prvotne lastnosti. Na tej osnovi lahko termoplaste preoblikujemo s kombinacijo segrevanja in iztiskanja (ekstruzija), injektiranja, vpihovanja in centrifugiranja v kalupih. Nad temperaturo zmehčičišča (običajno med 100 in 250 °C) začnejo termoplasti spreminjati svojo obliko, zato je ta temperatura tudi meja obstojnosti plastičnih izdelkov. Na temperaturo zmehčičišča lahko vplivamo s kemijsko strukturo in z raznimi dodatki [10, 12].

Preglednica 1: Vrste termoplastov [10].

Vrsta termoplasta	Okrajšava
polistiren	PS
polimetilmetakrilat	PMMA
polietilen nizke gostote	LDPE
polietilen visoke gostote	HDPE
poliester	PEST
polipropilen	PP
poliamid	PA
polikarbonat	PC
polivinilklorid	PVC
polioksimetilen	POM
politetrafluoretilen	PTFE

- Mehanske lastnosti

Polimeri so visko-elastični materiali. Na njihovo porušitev močno vpliva temperatura in velikost deformacije. Polimeri se trajno plastično deformirajo pod vplivom dolgotrajne, stalne obtežbe [10].

Amorfni termoplasti (PVC) so pod temperaturo steklastega prehoda togi. Njihova elastičnost se s poviševanjem temperature naglo zmanjšuje. Pri višjih temperaturah postanejo viskozni. Po drugi strani imajo kristalinski polimeri (PE, PP) višjo žilavost, manjši modul elastičnosti, višjo trdnost, ter so zelo občutljivi na dinamične obremenitve. Z višanjem temperature se modul elastičnosti prav tako manjša. Pri nizkih temperaturah so togi in krhki. Žilavi polimeri z visoko molekulsko maso (HDPE) imajo izredno veliko obrabno trdnost in nizek koeficient trenja [10].

- Prepustnost

V trdnem stanju polimeri običajno niso porozni in ne prepuščajo tekočin in plinov [10].

- Toplotna prevodnost

Polimeri imajo dobre toplotno-izolativne lastnosti. Pri večini polimerov toplotna prevodnost znaša med 0,15 in 0,45 W/m×K. Posledica šibkih vezi je velik toplotni raztezek (med 5 in 20×10<sup>-5</sup> /K) [10,12].

- **Kemijska odpornost**

Polimeri so po večini odporni proti kislinam in bazam. Nekateri so manj odporni proti oksidantom. Nekoliko bolj so občutljivi na organska topila [12].

- **Trajnost**

Način propadanja polimerov je posledica kombinacije različnih vplivov iz okolja (preglednica 2). Ti vplivi spremenijo kemične in fizikalne lastnosti polimerov na molekularni ravni.

Polietilen je občutljiv na ultravijolično (sončno) svetlobo, v kolikor ni zaščiten z absorberji ultravijoličnih žarkov. Fotooksidacija in termalna oksidacija povzročata trganje polimernih verig na manjše oksidirane delce, ki so ponavadi topni v vodi [10].

Na nekatere polimere (PE) vplivajo organske snovi, ki lahko zmanjšujejo nosilnost in duktilnost. Zaradi tega postanejo polimeri krhki, površina pa razpoka zaradi lokalnih napetosti [10].

Piroliza povzroča poškodbe glavnih molekularnih verig pri temperaturah med 200 in 300 °C. Pri tem nastajajo krajše molekule, ki so v plinastem stanju in se lahko pri temperaturi blizu vžiga vnamejo [10].

Po večini so polimeri odporni na delovanje bakterij in glivic, problem pa lahko predstavljajo predvsem njihovi dodatki (plastifikatorji, stabilizatorji, polnila), ki pod vplivom delovanja bakterij in glivic lahko povzročajo biodegradacijo polimerov (PVC) [10].

Preglednica 2: Propadanje polimerov [10].

<b>Povzročitelji propadanja polimerov</b>	<b>Način propadanja</b>
kisik pri srednje visokih temperaturah	termalna oksidacija
kisik pri visokih temperaturah	zgorevanje
kisik in ultravijolično sevanje	fotooksidacija
voda	hidroliza
toplota	piroliza
ionizirajoče sevanje	radioliza
mikroorganizmi	biodegradacija
atmosferski kisik, voda in sončna svetloba	atmosferska degradacija

### 3.2.1 Polietilen (PE)

Polietilen je enostaven polimer, katerega lastnosti so zelo odvisne od načina polimerizacije etena (nastane LDPE oz. HDPE). Zanj je značilna gostota pod  $1 \text{ g/cm}^3$  (preglednica 3). Z višanjem gostote se mu povečuje togost, trdota, natezna in upogibna trdnost, temperaturna obstojnost, odpornost proti kemikalijam in topilom. Ima dobro kemično obstojnost (v razredčenih kislinah, bazah,...), elektro-izolacijske lastnosti in močan elektrostatičen naboj. Je neobstoje v močnih oksidacijskih sredstvih. Mejna temperatura uporabnosti pri LDPE je  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , pri HDPE pa  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lomljivost nastopi pri temperaturi  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Meja steklastega prehoda in tališče se lahko spreminjata glede na kristaličnost in molekulsko maso polietilena [14, 15].

LDPE je relativno mehak, pod vplivom sončne (UV) svetlobe počasi razpada. Večina se ga porabi za izdelavo vrečk in folij za pakiranje živil. HDPE je trd, čvrst, prožen in odpornejši na topila kot LDPE. Večina HDPE se porabi za izdelavo trde embalaže, posod, košar, plastenk, geosintetikov (folij), itd. [10, 12, 14].

Preglednica 3: Mehanske lastnosti termoplastov [15, 16].

Vrsta polimera	Enota	PE	PP	PVC
Gostota	$\text{g/cm}^3$	0,915 - 0,941	0,895 - 0,920	1,390
Modul elastičnosti	$\text{kN/mm}^2$	0,7 - 1,4	1,1 - 1,3	1,0 - 3,5
Natezna trdnost	$\text{N/mm}^2$	18 - 35	21 - 37	50 - 75
Trdota	$\text{N/mm}^2$	40 - 65	36 - 37	75 - 155
Temp. raztezanje	$\text{K}^{-1}$	$2 - 2,5 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-4}$
Toplotna prevodnost	$\text{W/m}\times\text{K}$	0,35 - 0,50	0,22	0,16
Temp. steklastega prehoda	$^\circ\text{C}$	-125	-10	81
Temp. tališča	$^\circ\text{C}$	109 - 130	175	212

### 3.2.2 Polipropilen (PP)

Polipropilen se pridobiva z adicijsko polimerizacijo (ni stranskih produktov) propilena. V osnovi je PP zelo podoben PE, vendar ima za razliko od PE boljše termične in mehanske lastnosti (preglednica 3), žal pa je na nizke temperature manj odporen. PP je tudi nekoliko bolj krhek v primerjavi s PE, vendar se že pri temperaturi nad  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  omehča. Ima nizko gostoto (pod  $1 \text{ g/cm}^3$ ), je trd, žilav in odporen proti večini kemikalij. Odporen je proti

kislinam, raztopinam soli, polarnim topilom pod 50 °C, itd. Neodporen pa proti kloriranim ogljikovodikom [14, 15].

Polipropilen se uporablja večinoma v avtomobilski industriji za notranjo opremo, embalažo (na primer lončki za jogurte), vodovodne cevi, vlakna, itd. [12, 14].

### 3.2.3 Polivinil klorid (PVC)

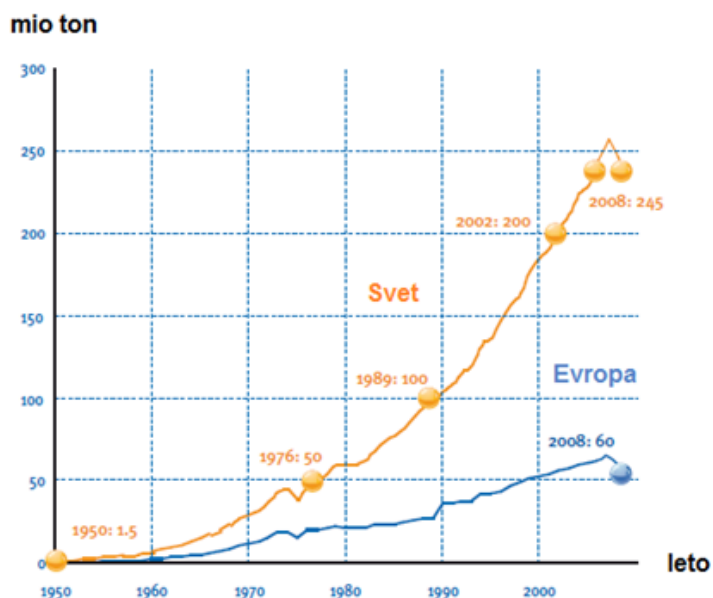
Z adicijsko polimerizacijo vinil klorida nastaja polivinil klorid. PVC je trd in rahlo krhek polimer. V primerjavi s PE in PP ima gostoto višjo od 1 g/cm<sup>3</sup> (preglednica 3). Je obstojen na vpliv vlage in kemikalij. Zaradi vsebnosti klora je slabo gorljiv. V kolikor se mu dodajo mehčala, postane mehak in upogljiv [12, 14].

Večina se ga uporabi v gradbeništvu za izdelavo cevi, oken, vrat ipd. Z dodanimi mehčali pa se uporablja za izdelavo oblog, folij, embalaže, obutve itd. [10, 12, 14].

## 3.3 Proizvodnja plastike

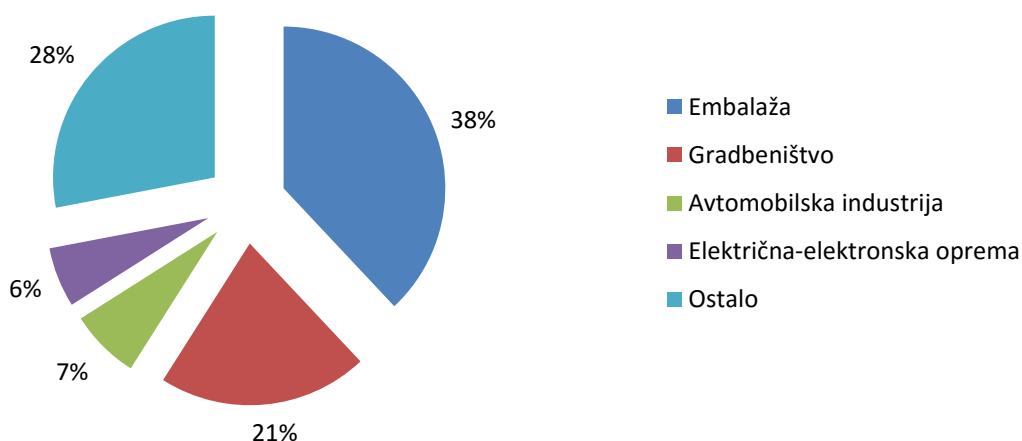
Zaradi že omenjenih pozitivnih lastnosti plastike, se svetovna proizvodnja plastike stalno povečuje (grafikon 1). Nenehna rast prebivalstva in bliskovit razvoj v svetu sta povzročila, da se je količina proizvedene plastike od leta 1950 povečala za kar 163-krat, na 245 mio ton v letu 2008. Svetovna proizvodnja plastike je hitrejša kot evropska, predvsem zaradi gospodarskega vzpona Azije. Proizvodnja plastike v EU je v letu 2008 predstavljala 25 % svetovne proizvodnje (60 mio ton). Rahel padec proizvodnje v letih 2008 in 2009 je bil zaradi gospodarske krize po svetu. V svetu naj bi se do leta 2050 proizvodnja plastike kar potrojila.ocene kažejo, da naj bi se proizvodnja plastike v EU do leta 2020 povečala za okoli 10 %, na 66,5 mio ton. Skupaj s povečano proizvodnjo plastike pa rastejo tudi količine plastičnih odpadkov po svetu [17, 18, 19].

Največja proizvodnica plastike na svetu je Kitajska (15 %), saj se je zaradi poceni delovne sile tja preselila večina globalnih proizvodnih enot. V Evropi je največja proizvodnica plastike, predvsem zaradi močne avtomobilske, gradbene in industrijske dejavnosti, Nemčija (7,5 %) [19].



Grafikon 1: Proizvodnja plastike od leta 1950 naprej (ne zajema PET, poliamidnih in poliakrilnih vlaken) [20].

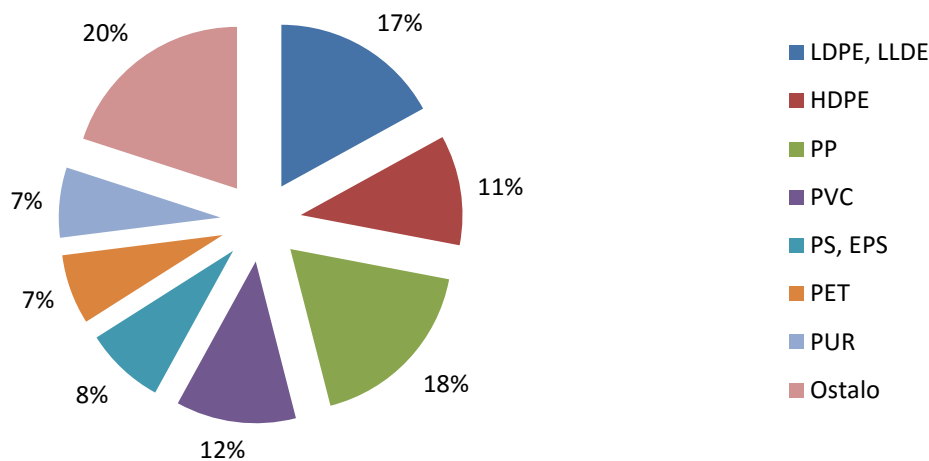
V EU se največ plastike uporabi za embalažo (38 %), od tega naj bi bilo plastične embalaže iz gospodinjstev kar 73 %, ostalo je večinoma embalaža iz industrije (grafikon 2). Embalaža iz gospodinjstev ima kratkotrajen rok uporabe, katere ponavadi zaradi nehomogenosti, nečistosti, nesortiranosti in slabe kakovosti ni moč ponovno uporabiti oz. reciklirati in se zato praviloma energetske izrabijo, medtem ko ima embalaža iz industrije, zaradi bolj strogih zahtev in standardov, precej daljšo življenjsko dobo [19].



Grafikon 2: Uporaba plastike v EU po sektorjih leta 2008 [19].

Polimera tipa PP in PE predstavljata skoraj polovico vse plastične proizvodnje v EU (46 %). PE ima daleč največji odstotek proizvodnje med vsemi vrstami polimerov in predstavlja več kot četrtno celotne proizvodnje polimerov (28 %). Na drugem mestu mu sledi PP (18 %), zaradi njegove vsestranskosti in nizkih stroškov proizvodnje. Tretje mesto zaseda PVC, ki

ima zaradi trajne narave in požarne odpornosti kar nekaj prednosti pred drugimi vrstami polimerov, zlasti pri uporabi v gradbeništvu (grafikon 3) [19, 20].



Grafikon 3: Tipi proizvedenih plastik v EU [20].

### 3.4 Plastični odpadki

Po definiciji je odpadke vsaka snov, ki ni več uporabna in jo oseba zavrže. S plastiko se srečujemo vsakodnevno in predstavlja pomemben del našega življenja. Današnji sodoben način življenja ni več mogoč brez plastike. Zaradi poceni izdelave, enostavnega oblikovanja, vsestranskosti in dolgotrajnosti jo uporabljamo za številne namene v industriji, medicini, gradbeništvu itd. Žal pa ima tudi nekatere slabosti. Največji problem je v večinoma kratkotrajni uporabi ter v počasnem razpadanju. Zgoraj navedena dejstva so tako razlog za ogromne količine odpadkov iz plastike.

V Sklepu 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 [21] je objavljen klasifikacijski seznam odpadkov (preglednica 4), kjer lahko najdemo različne vrste plastičnih odpadkov. Plastični odpadki so uvrščeni med 13 različnih skupin odpadkov, pri čemer ima vsaka skupina svojo klasifikacijsko številko.

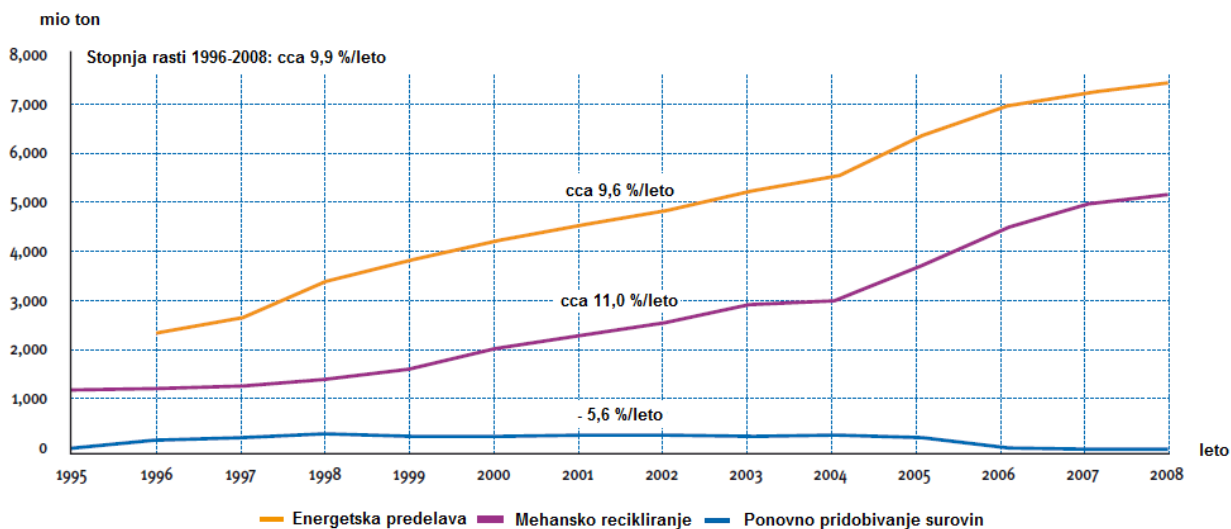
Preglednica 4: Klasifikacijski seznam plastičnih odpadkov [19, 21].

Opis		Skupina odpadka	Vir odpadka
Komunalni odpadki (gospodinjiski in njim podobni odpadki iz trgovine, proizvodnih, poslovnih, storitvenih in drugih dejavnosti ter javnega sektorja), vključno z ločenimi frakcijami.	mešani komunalni odpadki	20 03 01	trdi komunalni odpadki
	plastika	20 01 39	
Odpadna embalaža; absorbenti, čistilne krpe, filtrirna sredstva in zaščitna oblačila, ki niso navedeni drugje.	plastična embalaža	15 01 02	plastična embalaža in drugi odpadki iz plastike
	mešana embalaža	15 01 06	
	sestavljena (kompozitna) embalaža	15 01 05	
Gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov (vključno z zemeljskimi izkopi z onesnaženih območij).	plastika	17 02 03	rušenje objektov in gradbeni odpadki
	steklo, plastika in les, ki vsebujejo nevarne snovi ali so z njimi onesnaženi	17 02 04*	
Odpadki iz kmetijstva, vrtnarstva, ribogojstva, gozdarstva, lova in ribištva, iz priprave in predelave hrane.	odpadna plastika (razen embalaže)	02 01 04	odpadki iz kmetijstva
Odpadki iz organskih kemijskih procesov.	odpadna plastika	07 02 13	proizvodnja (industrija)
Odpadki iz postopkov oblikovanja ter fizikalne in mehanske površinske obdelave kovin in plastike.	drobci in ostružki plastike	12 01 05	
Odpadki, ki niso navedeni drugje na seznamu.	izrabljena vozila, iz katerih so odstranjene tekočine in druge nevarne sestavine	16 01 06	avtomobilska industrija
	plastika	16 01 19	
Odpadki iz naprav za ravnanje z odpadki, iz čistilnih naprav ter iz priprave pitne vode in vode za industrijsko rabo.	plastika in gume	19 12 04	odpadki iz mehanske obdelave odpadkov, ki niso navedeni drugje

Čeprav je v zadnjem desetletju letna rast količine odpadne plastike v EU približno 3 %, ostaja količina odložene plastike na odlagališčih odpadkov dokaj stabilna. Za rast letne količine odpadne plastike obstaja veliko različnih razlogov, kot so: industrializacija manj razvitega

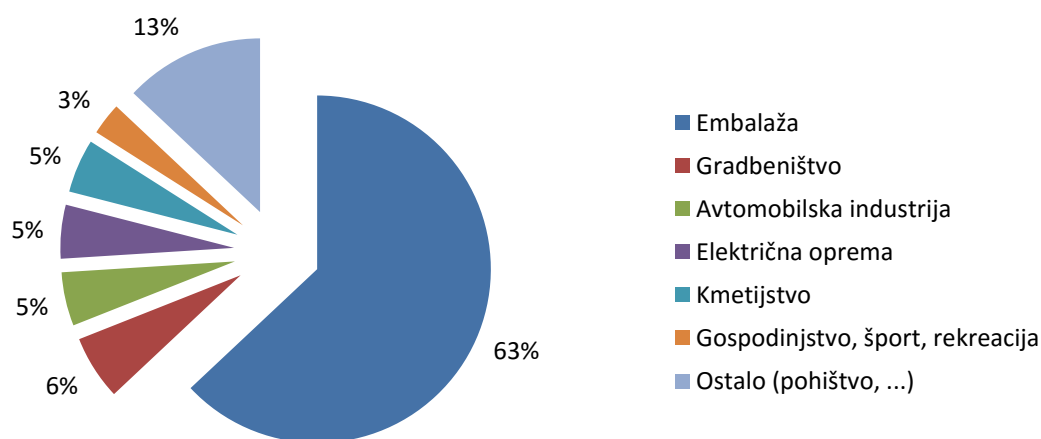


sveta, boljši življenjski standard, plastika nadomešča druge materiale, gospodarska rast v svetu, itd. Vzrok za stabilno količino odložene plastike pa je v vedno strožjih okoljskih zahtevah in predpisih ter posledično v rasti deleža mehanskega recikliranja in energetske predelave (grafikon 4) [20].



Grafikon 4: Rast energetske predelave in mehanskega recikliranja odpadne plastike v EU [20].

Največ plastičnih odpadkov (skoraj 2/3) generira področje embalaže (63 %), kar je posledica predvsem kratkotrajne uporabe plastične embalaže. Okoli 16 % plastičnih odpadkov nastane na področju gradbeništva, avtomobilske industrije in električno-elektronske opreme (grafikon 5) [19].



Grafikon 5: Deleži odpadne plastike v EU + Norveška, Švica v letu 2008 po posameznih področjih [18].

Viri plastičnih odpadkov so:

- mešani komunalni odpadki

Mešani komunalni odpadki predstavljajo okoli 40 do 50 % vseh plastičnih odpadkov, ki nastanejo znotraj EU. Plastike so v mešanih komunalnih odpadkih pomešane z drugimi vrstami odpadkov (organske snovi, kovine, papir, steklo itd.), kar otežuje njihovo sortiranje in predelavo oz. recikliranje. Kar 70 % teh plastičnih odpadkov predstavlja odpadna plastična embalaža. V mešanih komunalnih odpadkih najdemo največ polimerov tipa HDPE, LDPE in PP (60 %) [19].

- odpadna embalaža

Plastična embalaža predstavlja večino (63 %) vseh plastičnih odpadkov, ki nastanejo v EU. Razlog za to je njena kratka življenjska doba, saj se jo zavrže kmalu po nakupu. Največ odpadne plastične embalaže se zbere v trgovini in industriji. Zaradi prisotnosti v velikih količinah, lahko odpadna embalaža pomembno vpliva na samo recikliranje oz. predelavo, saj zaradi onesnaženja in mešanice različnih vrst plastik vpliva na sistem zbiranja in kakovost [19].

- gradbeni odpadki

Gradbeništvo je drugi največji uporabnik plastike v EU (21 %), vendar proizvede le 6 % plastičnih odpadkov na leto. Plastika, ki se uporablja za materiale v gradbeništvu, ima namreč pogosto bistveno daljšo življenjsko dobo kot plastike, ki se uporabljajo za druge namene. Vzrok temu so strogi standardi, ki zahtevajo trajne in vzdržljive gradbene materiale. Plastični gradbeni materiali so lahko tudi onesnaženi z različnimi snovmi, kar oteži njihovo recikliranje oz. predelavo [19].

- odpadki električno-elektronske opreme

Povprečna življenjska doba električno-elektronske opreme je med 3 in 12 let. Starejše plastične naprave lahko vsebujejo strupene bromirane zaviralce gorenja, kar zahteva posebno pozornost pri recikliranju oz. predelavi [19].

- odpadki iz avtomobilske industrije

Predelava in ponovna uporaba 70 do 80 % materiala vozil je razmeroma preprosta, zato količina avtomobilskih plastičnih odpadkov v EU narašča dokaj počasi [19].

- odpadki iz kmetijstva

Kmetijstvo v EU proizvede približno 0,4 do 0,6 mio ton plastičnih odpadkov na leto [19].

### 3.5 Problematika plastičnih odpadkov

Kljub vsem dobrim lastnostim plastike ima proizvodnja plastike kot tudi njena uporaba številne negativne vplive na okolje. Kot je že v uvodu povedano, zahteva izdelava plastike velike količine neobnovljivih naravnih virov, predvsem fosilnih goriv, ki se uporabljajo tako za samo izdelavo plastike kot tudi za zagotavljanje energije pri proizvodnji plastike. Kar 8 % letne svetovne proizvodnje nafte se porabi pri proizvodnji plastičnih mas. Pri sami proizvodnji plastik se lahko uporabljajo tudi potencialno škodljive kemikalije, s katerimi se modificirajo polimeri (stabilizatorji, barvila). Pri mnogih kemikalijah ni bilo opravljenih raziskav in ocen tveganj glede njihovega vpliva na zdravje ljudi in okolje. Primer za to so bili ftalati v PVC otroških igračah. Posledično proizvodnja plastike povzroča tako nastajanje odpadkov kot tudi sproščanje škodljivih emisij v okolje [1].

Plastična industrija se nenehno prilagaja, razvija in izboljšuje, kot odgovor na spreminjajoče se povpraševanje po plastičnih izdelkih in vedno bolj stroge okoljske zahteve in predpise. V luči okoljskih zahtev se je povprečna masa posameznih plastičnih embalaž zmanjšala (embalaže vsebujejo manj materiala). Kljub tej optimizaciji pa se v EU količine plastične embalaže povečujejo, kar je posledica predvsem kratke življenjske dobe določenih plastik. Okoli 60 % plastike je zasnovane za dolgo življenjsko dobo, medtem ko ima 40 % plastike (predvsem plastična embalaža) veliko krajšo življenjsko dobo. Plastična embalaža se lahko zbira bodisi z ločenim zbiranjem ali kot mešan komunalni odpadki. S pojavom problema odlaganja enormnih količin plastičnih odpadkov, se je pričelo s predelavo in recikliranjem plastike v nove proizvode. Medtem, ko je termoplaste zlahka reciklirati ali iz njih pridobiti energijo, je duroplaste veliko težje reciklirati. Med termoplasti je LDPE najbolje recikliran polimer, počasi pa tudi narašča recikliranje polimerov tipa PP in PET [18, 19].

Kot odgovor na vedno strožje okoljske zahteve in predpise, je plastična industrija začela tudi s proizvodnjo okolju bolj prijaznih bioplastik. Svetovna proizvodnja bioplastike znaša približno 0,3 mio ton na leto, kar je zanemarljiv delež v svetovni proizvodnji plastike (0,1 %). V EU se bioplastika uporablja predvsem za embalažo in vrečke za zbiranje odpadkov [19].

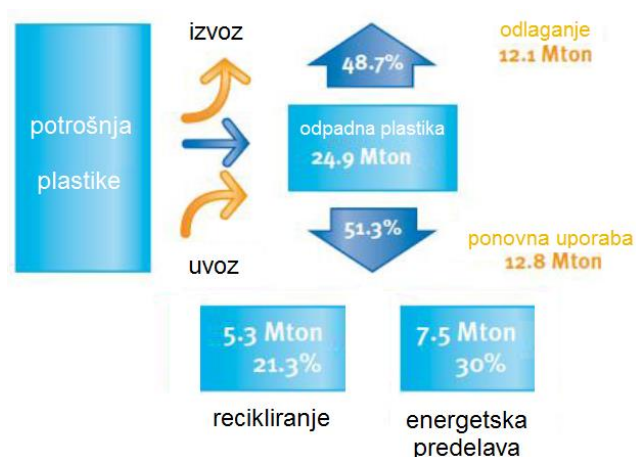
Velik problem plastičnih odpadkov je tudi precej obsežno onesnaženje s plastiko na kopnem, ki je posledica nelegalnega odmetavanja, neustreznega prevoza, raznašanja s pomočjo vetra itd. Odvržena odpadna plastika se v okolju lahko razgrajuje več sto let. Večina te plastike pa ponavadi s spiranjem oz. z erozijo konča v oceanih. Odlagališča odpadkov v Atlantskem in Tihem oceanu naj bi po nekaterih ocenah obsegala 100 mio ton odpadkov, od tega plastike predstavljajo 80 % vseh odpadkov. Plastični odpadki povzročajo težave morskim organizmom, saj se lahko v njih zapletejo ali pa jih zamenjajo za hrano. Preko

prehranske verige pa pride plastika tudi do človeka. Plastika lahko tudi vsebuje kemične aditive, ki so rakotvorni ali strupeni. Obstojna organska onesnaževala, kot so na primer pesticidi DDT ali poliklorirani bifenili se lahko iz vode pritrdijo na plastične delce ter tako zaidejo v prehransko verigo. Poseben problem predstavlja mikroplastika, posledica fotorazgradnje in mehanske abrazije, saj zaradi ogromnih količin obstaja možnost, da jo morski organizmi zamenjajo za hrano ter zaide v prehransko verigo [17].

### 3.6 Recikliranje in predelava plastičnih odpadkov

Odstranjevanje plastičnih izdelkov pomembno vpliva na okolje. Ker večina plastik ni razgradljivih, se pojavlja skrb, kam z ogromnimi količinami odpadnih plastik. Z vedno večjo proizvodnjo in povpraševanjem po plastiki ta skrb tudi vedno bolj narašča. Kot smo že ugotovili, odlaganje plastičnih odpadkov ni trajnostna rešitev. Vedno strožje okoljske zahteve in predpisi s področja odpadkov zahtevajo vedno večje deleže recikliranja in predelave odpadne plastike.

V EU je po statističnih podatkih leta 2008 nastalo okoli 25 mio ton plastičnih odpadkov. Približno polovica teh odpadkov je bila odložena na odlagališčih, druga polovica pa predelana oz. reciklirana (slika 3). Od nastalih plastičnih odpadkov je bilo recikliranih le dobrih 20 %. Cilj je doseči 30 % recikliranje, vendar bosta najverjetneje odlaganje na odlagališčih odpadkov in energetska predelava še naprej vodilna pri ravnanju s plastičnimi odpadki [17].



Slika 3: Ravnanje z odpadno plastiko leta 2008 v EU + Norveška, Švica [19].

Recikliranje je precej privlačno, zaradi ekoloških in ekonomskih prednosti. Samo recikliranje pa je odvisno od cen surove plastike, kot tudi od kakovosti recikliranih plastik. Ovira za uporabo reciklirane plastike je, da proizvodnja iz odpadne plastike zahteva strogo

nadzorovane lastnosti. Takšne velike omejitve so zahtevane zaradi izredne raznolikosti virov in vrst plastičnih odpadkov in možnosti za onesnaženje. Zaradi tega je potrebno že na samem začetku procesa razvrstiti plastične odpadke na tiste, ki so primerni za reciklažo in na tiste, ki so primerni za energetsko predelavo - sežig. Odpadke, ki so primerni za reciklažo, je potrebno predhodno očistiti in primerno obdelati. Zelo pomembno je namreč razlikovati med odpadno plastiko, ki nastane v proizvodnji in odpadno plastiko, ki nastane v gospodinjstvu. Odpadno plastiko iz proizvodnje je možno reciklirati v večji meri kot pa odpadno plastiko iz gospodinjstev, saj je relativno čista, sortirana in na voljo v velikih količinah. Proces recikliranja plastike je tudi precej dražji, v primerjavi s klasičnim pridobivanjem plastike. Nenazadnje pa je treba zagotoviti zadostne količine odpadne plastike, če želimo vzdrževati kontinuirano proizvodnjo izdelkov iz recikliranih plastičnih materialov [10, 19].

V osnovi obstajata dve možnosti recikliranja. Konvencionalno (mehansko) recikliranje pridobiva vhodne surovine za nove plastične izdelke neposredno iz reciklirane odpadne plastike, medtem ko sodobnejše (kemično) recikliranje plastične odpadke razgradi na osnovne kemične spojine, ki so nato osnova za nove plastične izdelke [10].

- Mehansko recikliranje

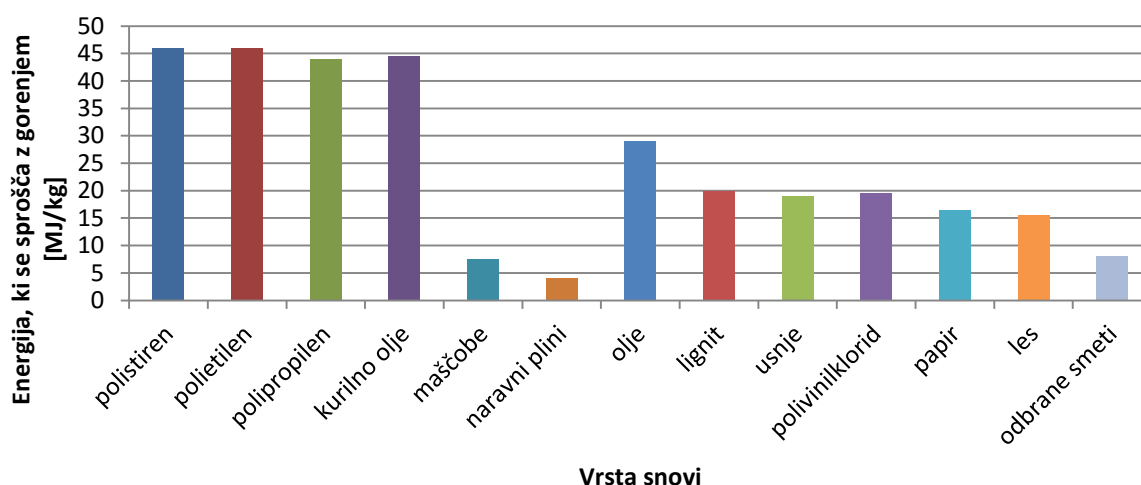
Ta vrsta konvencionalnega recikliranja vključuje različne postopke kot so drobljenje, granuliranje ali taljenje odpadne plastike. Pogoji za mehansko recikliranje je odpadna plastika, razvrščena po barvi oz. vrsti polimera. Pretežni del sortiranja opravi človeška delovna sila, ki ročno razvrsti plastike. Postopoma pa človeško delovno silo nadomeščajo nove tehnologije, kot so metode z uporabo rentgenskih žarkov, infrardeče in blizu infrardeče spektroskopije, elektrostatike ali flotacije. Po razvrščanju se lahko plastika neposredno stali (pri temperaturah od 140 do 180 °C) in oblikuje s postopkom iztiskanja (ekstruzija) v novo obliko, ali pa najprej razreže na kosmiče, nato pa stali in oblikuje v granule oz. t.i. regranulate [1, 10].

- Kemično recikliranje

Sodobno kemično recikliranje obsega vrsto postopkov, kjer se odpadne plastike razgradi na osnovne kemične spojine - monomere, ki se lahko nato ponovno uporabijo v proizvodnji za izdelavo novih plastičnih izdelkov. Ta proces vključuje razne postopke, kot so: piroliza, hidroliza, hidrogeniranje, uplinjanje in termično razpadanje. Kemično recikliranje v osnovne surovine ima precej večjo prilagodljivost in je bolj odporno na nečistoče kot mehansko recikliranje. Ker je zelo intenzivno naravnano, zahteva ogromne količine odpadne plastike, da bi bilo ekonomsko upravičljivo [1, 10].

- Energetska predelava

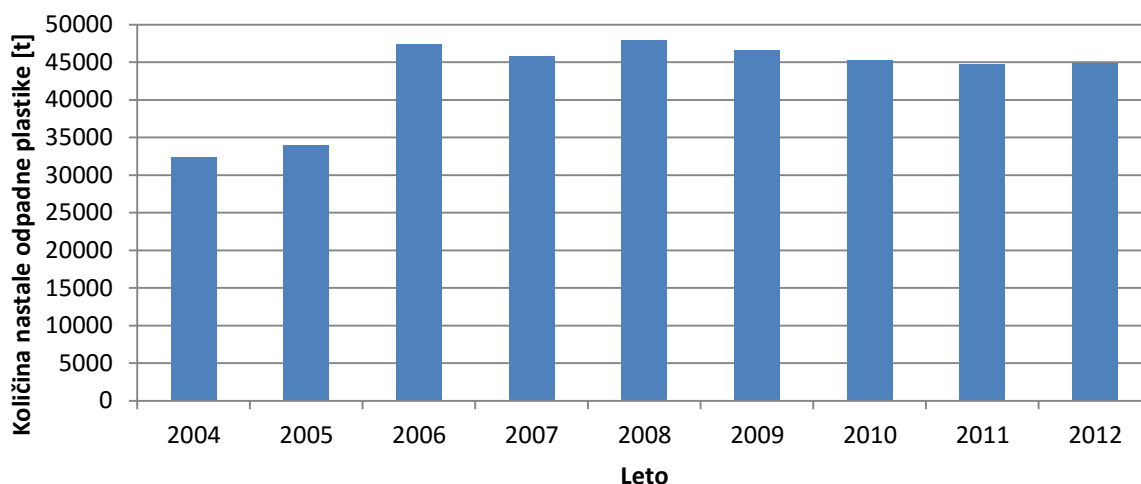
V kolikor ni mogoče reciklirati odpadne plastike, je zadnja možnost energetska predelava. Polimerom namreč njihova visoka kalorična vrednost (grafikon 6) omogoča, da se te vrste odpadkov lahko uporabljajo kot sekundarni reagenti. Slabost tega procesa je, da lahko njihovo zgorevanje proizvaja nevarne pline (v primeru nekontroliranega sežiga PVC nastaja strupena klorovodikova kislina HCl), ki so škodljivi za zdravje ljudi in okolje [10]. Z razvojem novih tehnologij in s kontroliranim sežigom plastičnih odpadkov, pa so bile te slabosti odpravljene.



Grafikon 6: Primerjava energije, ki se sprošča pri gorenju različnih snovi [10].

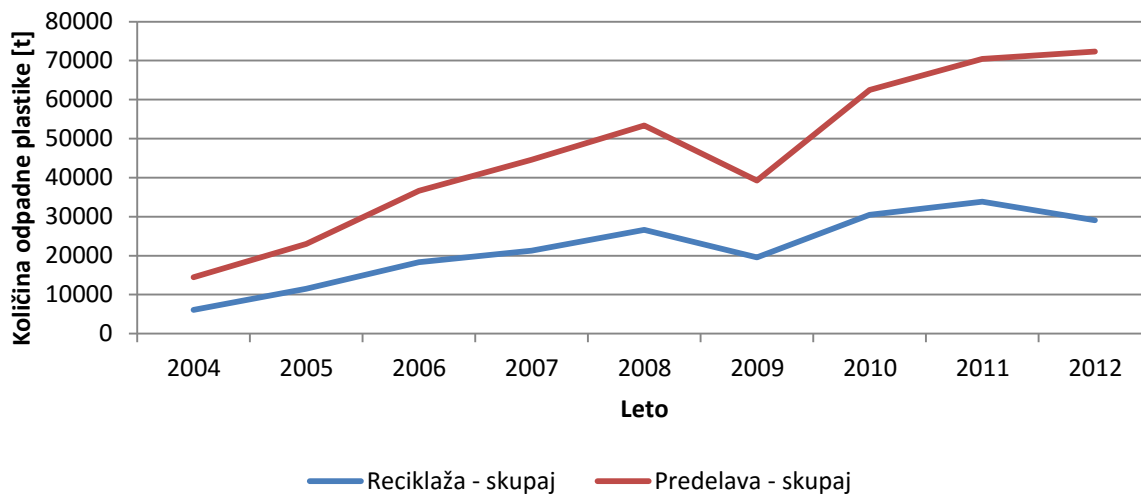
### 3.7 Plastični odpadki v Republiki Sloveniji

V Republiki Sloveniji se količina nastale odpadne plastike po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije od leta 2004 povečuje (grafikon 7). Višek je bil dosežen leta 2008, ko je nastalo 47.890 ton odpadne plastike. Po letu 2008 pa je viden rahli upad količine odpadne plastike, zaradi gospodarske krize tako v Republiki Sloveniji kot po svetu, kar kaže na tesno povezavo proizvodnje oz. uporabe plastike z gibanjem bruto družbenega proizvoda (BDP).



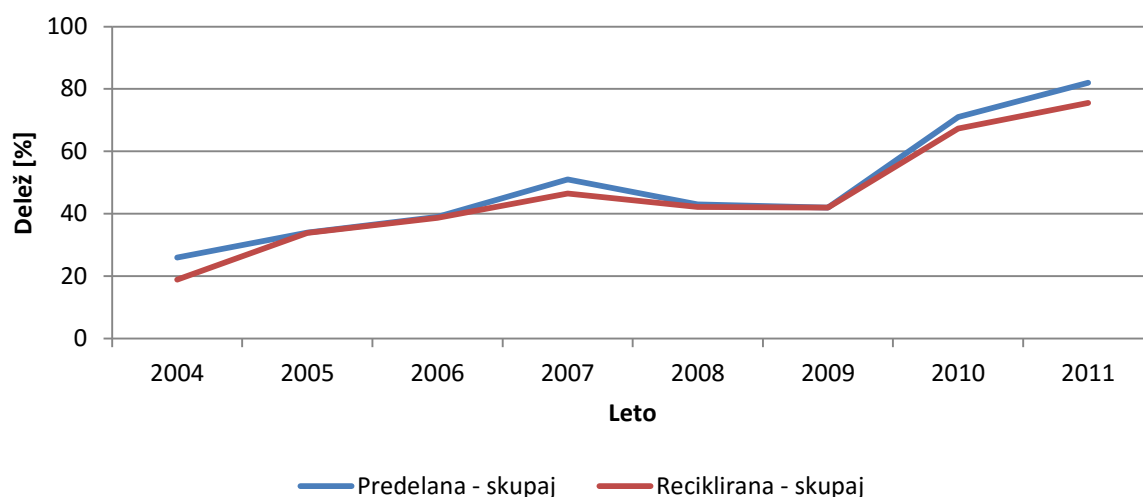
Grafikon 7: Količina nastale odpadne plastike v Sloveniji [22].

Z vstopom Republike Slovenije v Evropsko unijo so se v slovenski pravni red prenesle številne evropske uredbe in direktive s področja ravnanja z odpadki. Od leta 2004 tako količina reciklirane in predelane odpadne plastike narašča, zaradi vedno strožjih okoljskih zahtev in predpisov glede odlaganja odpadkov ter razvoja novih tehnologij s področja predelave in recikliranja odpadkov (grafikon 8).



Grafikon 8: Ravnanje z odpadno plastiko v Sloveniji [22].

Po dostopnih podatkih Agencije Republike Slovenije za okolje – Kazalci okolja v Sloveniji [23], reciklaža odpadne plastike z leti narašča in je v letu 2011 dosegla 75 % oz. 33.791 ton. Prav tako pa z leti narašča tudi predelava, ki je v letu 2011 dosegla 82 % (grafikon 9).



Grafikon 9: Delež reciklaže oz. predelave odpadne plastike v Sloveniji [23].

Posebnost Republike Slovenije na področju odpadne plastike so nagrobne sveče, saj spadamo v sam svetovni vrh porabe sveč na prebivalca. Na leto porabimo 23 milijonov sveč. Zaradi tega odpadne nagrobne sveče predstavljajo kar 3 % vseh komunalnih odpadkov, ki nastanejo v Republiki Sloveniji. Zaradi nekaterih njihovih lastnosti niso primerne za odlaganje ali energetsko predelavo (v primeru PVC), vendar pa je možno večino (90 %) njihovih sestavnih delov reciklirati [24].

### 3.8 Uporaba plastike v gradbeništvu

Za gradbeništvo na splošno velja, da gre za relativno konzervativno panogo. Že dolga desetletja in stoletja uporablja konvencionalne materiale. Vzrok temu je dolga življenjska doba gradbenih konstrukcij (vsaj 50 let) ter zahteva po njihovi varnosti in stabilnosti med življenjsko dobo. Zato se za gradnjo uporabljajo materiali, katerih lastnosti so dobro poznane in preverjene. Hiter razvoj na vseh področjih v zadnjih desetletjih je pripomogel k temu, da tudi na področje gradbeništva, v luči novih okoljskih zahtev, vse pogosteje vstopajo novi materiali.

Plastika je v primerjavi z ostalimi materiali, ki se uporabljajo v gradbeništvu, relativno nov material. Začetek bolj množične industrijske proizvodnje plastike sega v leto 1907, ko je Leo Hendrik Baekeland iznašel bakelit na osnovi kemijske reakcije formaldehida s fenolom [10, 17].

Prva raziskava na področju uporabe plastike v betonu sega v leto 1990 in se nanaša na ojačitev betona s plastičnimi vlakni. Temu razvoju je sledila ojačitev betona s polimernimi smolami [25]. Uporaba plastike v betonu je znana na področju polimernih in s polimeri

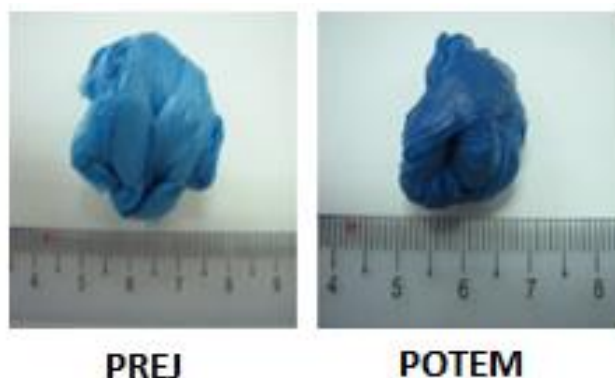


modificiranih betonov. Tukaj gre za kombiniranje cementnega in polimernega veziva ali samo za polimerno vezivo, ki poveže zrna agregata v beton, ki ima drugačne lastnosti, kot beton s cementnim vezivom. Polimeri pa se lahko dodajajo v betonsko mešanico tudi v obliki mikrovlaknen, ki imajo vlogo mikroarmature. Polimeri se uporabljajo tudi za impregnacijo strjenih betonov, še posebej poškodovanih [10].

Pri pregledu literature smo se osredotočili na raziskave, ki govorijo o možnosti nadomestitve naravnega agregata s plastičnimi odpadki – termoplasti. V svetu je uporaba plastičnih odpadkov kot nadomestek naravnega agregata v betonu razmeroma nov koncept, katerega je potrebno zaradi že prej omenjene varnosti še dodobra raziskati.

### 3.8.1 Plastični agregat

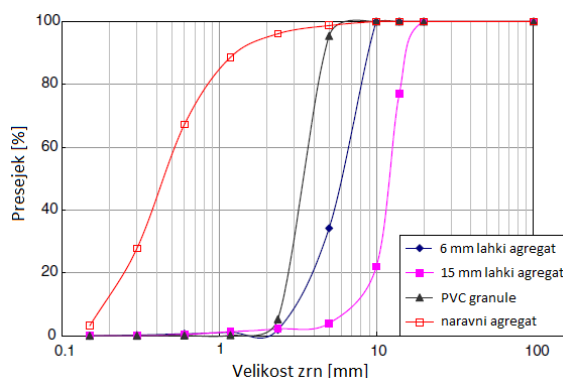
Odpadni plastični agregat je bil v raziskavah pridobljen iz različnih virov (odlagališča plastike, podjetja za predelavo plastike). V nekaterih primerih so plastiko oprali, da so odstranili nečistoče. [26] V betonu so uporabili že zdrobljeno plastiko ali pa so jo dodatno zmleli v laboratoriju [27] in jo nato presejali na ustrezne frakcije. Nekateri so plastični agregat pred vgradnjo v beton toplotno obdelali s segrevanjem pri temperaturah nad tališčem (slika 4). S tem so dosegli spremembo fizikalnih lastnosti (krčenje, večja gostota) in spremembo mikrostrukture plastike [28].



Slika 4: Toplotna obdelava plastičnega agregata [28].

### 3.8.2 Lastnosti plastičnega agregata

V raziskavah so uporabili, kot pri naravnem agregatu, standardne postopke za določitev gostote in nasipne gostote. V večini primerov preizkusa vodovpojnosti niso izvajali oz. so predpostavili, da plastika ni vodovpojna. Sejalna analiza plastičnega agregata je bila večinoma narejena s standardno sejalno analizo (grafikon 10) [26, 27].



Grafikon 10: Zrnovostna krivulja naravnega agregata, lahkega agregata in odpadne plastike [27].

### 3.8.3 Zrnovost plastike in obseg nadomestitve naravnega agregata

V raziskavah so z odpadno plastiko nadomestili tako droben [27, 29] kot grob naravni agregat [28] (do 25 mm) v betonu (slika 4 in 5). Naravni agregat v betonu so nadomestili z odpadno plastiko v deležu od 5 % [27] pa vse do 100 % (v/v) [28].



Slika 5: Drobnozrnat plastični agregat [27].

### 3.8.4 Priprava betona

Projektiranje, priprava in vgrajevanje betona je bila v večini primerov narejena v skladu z običajnimi postopki in veljavnimi standardi za izdelavo običajnega betona [26].

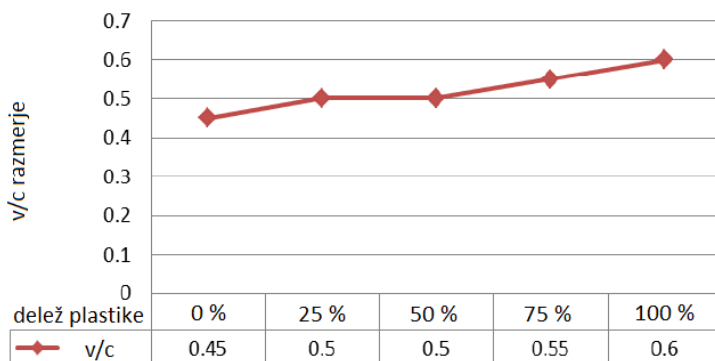
### 3.8.5 Obdelavnost

Oblika, velikost in površinska tekstura plastičnih delcev je močno vplivala na obdelavnost svežega betona ter na vez med plastičnim agregatom in cementno pasto. [28] Plastični agregat, ki je nepravilne, lamelarne oblike, ima drugačen učinek kot agregat sferične, pravilne oblike. Dodajanje agregata nepravilne, lamelarne oblike je naredilo svežo betonsko mešanico manj obdelavno, medtem ko je agregat pravilne, sferične oblike izboljšal

obdelavnost betona. Rezultati so pokazali, da imajo plastični delci manjšo sposobnost absorpcije vode kot naravni agregat, kar močno vpliva na obdelavnost sveže betonske mešanice [25, 28].

### 3.8.6 Posed

V večini raziskav je bil posed betonskega stožca manjši, kot pri običajni betonski mešanici. Prav tako se je s povečevanjem količine odpadne plastike vrednost poseda manjšala. Razlog za manjši posed je bil v obliki plastičnega agregata (oglate in nepravilne oblike) [26]. Tako se je v primeru 100 % (v/v) nadomestitve naravnega agregata z odpadno HDPE plastiko posed zmanjšal za 76 % [28]. Da bi dosegali podoben posed, kot pri običajnem betonu, so s povečevanjem količine odpadne PVC plastike povečevali tudi količino dodanega superplastifikatorja [27]. Obdelavnost betona se je z uporabo superplastifikatorja povečala za 10 do 15 %. Posed betona pri 15 % (v/v) vsebnosti plastike se je brez uporabe plastifikatorja zmanjšal za 50 %, v primerjavi s primerjalnim običajnim betonom [30]. Nekateri avtorji so povečali v/c razmerje, če so želeli ohraniti podoben posed, kot pri primerjalnem običajnem betonu (grafikon 11) [29].



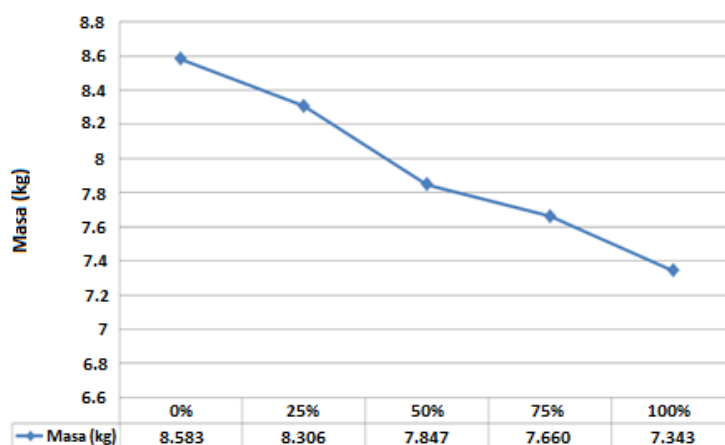
Grafikon 11: Potrebno večanje v/c razmerja pri betonu s plastiko za zagotavljanje enake obdelavnosti [29].

V nekaterih raziskavah pa so ugotovili ravno obratno. Večji posed je bil posledica prisotnosti več proste vode v betonski mešanici, saj plastični agregat ne absorbira vode. Nekateri avtorji so pripisali povečani posed stožca betona plastičnemu PET agregatu, ki je bil okrogle oblike in z gladko površino, kar zmanjšuje trenje med cementno pasto in agregatom [26].

### 3.8.7 Gostota

V vseh raziskavah je bilo ugotovljeno zmanjšanje gostote betona zaradi prisotnosti lahkega plastičnega agregata, ne glede na vrsto ali obliko odpadne plastike. Zmanjšanje gostote je

odvisno od gostote uporabljene plastike in deleža nadomestitve naravnega agregata. Gostota betona je upadala s povečevanjem deleža odpadne plastike v njem (grafikon 12). Zmanjšanje gostote je posledica manjše gostote odpadne plastike v primerjavi z naravnim agregatom (okoli  $2765 \text{ kg/m}^3$ ) [26, 30]. Ugotovljeno je bilo, da je padec mase betonskih kock linearen z naraščanjem količine odpadne HDPE plastike [29].



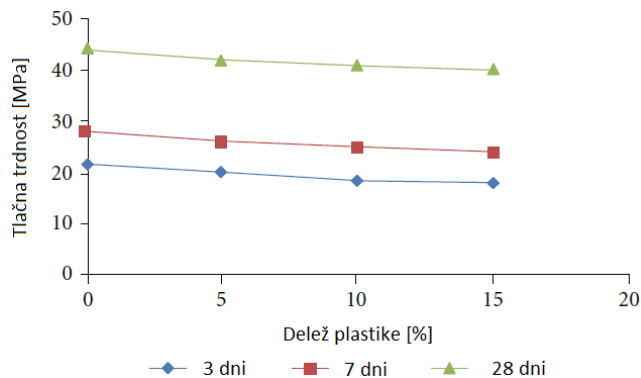
Grafikon 12: Linearni upad mase betonskih kock [29].

### 3.8.8 Vsebnost zraka

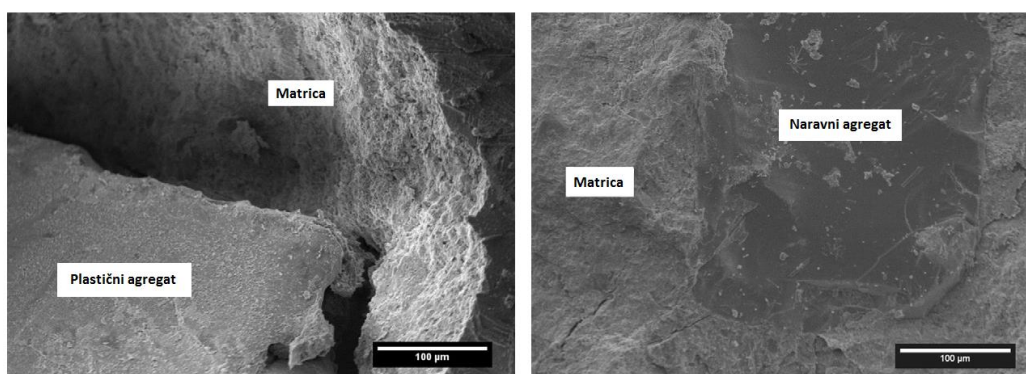
V raziskavah ni zaslediti rezultatov o vsebnosti zraka v betonskih mešanich, v katerih je bil uporabljen plastični agregat [26].

### 3.8.9 Tlačna trdnost

V vseh raziskavah se je z vključitvijo plastičnega agregata zmanjšala tlačna trdnost izdelanega betona. Tlačna trdnost je upadala s povečevanjem količine odpadne plastike. Na tlačno trdnost pa vpliva tudi sama količina in oblika odpadne plastike [26]. V primeru 100 % (v/v) nadomestitve naravnega agregata s plastičnim HDPE agregatom je upadla tlačna trdnost tudi za 60 % [28]. Z uporabo superplastifikatorja, se je zaradi boljše obdelavnosti betona, tlačna trdnost povečala za 5 % (grafikon 13) [30]. Faktorji, ki so lahko odgovorni za manjšo tlačno trdnost betona so: slaba vez med površino plastike in cementnim kamnom (slika 6) [30, 31], hidrofobna narava plastičnih odpadkov, ki lahko zavira hidratacijo cementa [26], delci odpadne plastike imajo nižji modul elastičnosti, kot cementni kamen [27], nižja trdnost plastike v primerjavi z naravnim agregatom [32].



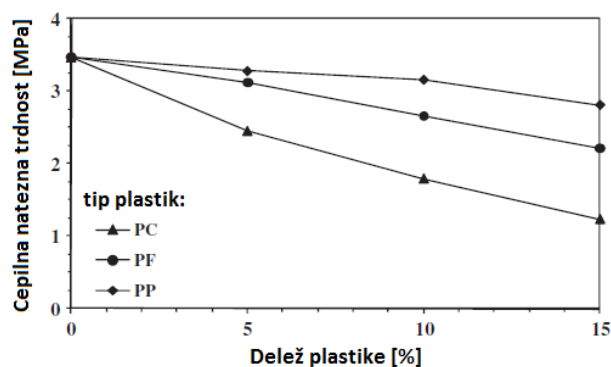
Grafikon 13: Tlačna trdnost betona s plastiko [30].



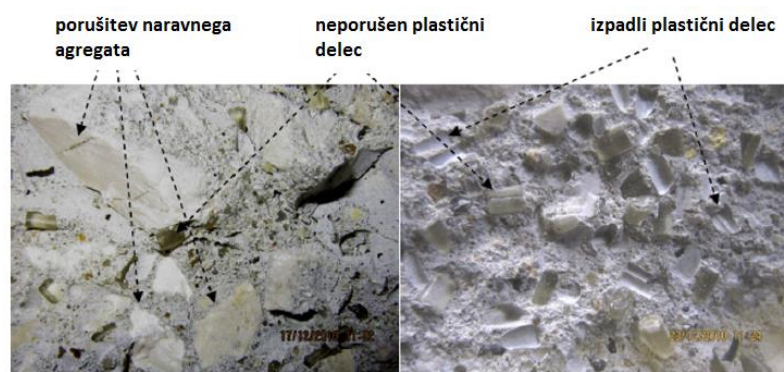
Slika 6: Stik plastičnega agregata s cementno matrico (levo) in naravnega agregata s cementno matrico (desno) [31].

### 3.8.10 Natezna in upogibna trdnost

Raziskave so pokazale, da vključitev plastičnega agregata zmanjšuje natezno trdnost betona (grafikon 14). Vzroki za zmanjšanje natezne trdnosti betonov so bili podobni tistim, ki so navedeni pri razlagi zmanjšanja tlačne trdnosti [26]. V primeru nadomestitve 15 % (v/v) naravnega agregata s plastičnim PET agregatom je natezna trdnost betona upadla za 65 %. Na zmanjšanje natezne trdnosti močno vpliva prehodno območje med plastičnim agregatom in cementnim kamnom. Gladka površina plastičnih delcev in prosta voda na njihovi površini lahko povzročita šibkejšo vez med temi delci in cementnim kamnom. Ko je vzorec betona dosegel končno trdnost, se plastični delci niso porušili, ampak so izpadli iz cementne matrice, kar dodatno kaže na slab stik med plastičnim agregatom in cementnim kamnom (slika 7) [33]. Ta problem je mogoče odpraviti z uporabo primerno oblikovanega plastičnega agregata ali pa z obdelavo plastičnega agregata s katero naredimo njegovo površino bolj grobo [26, 31].

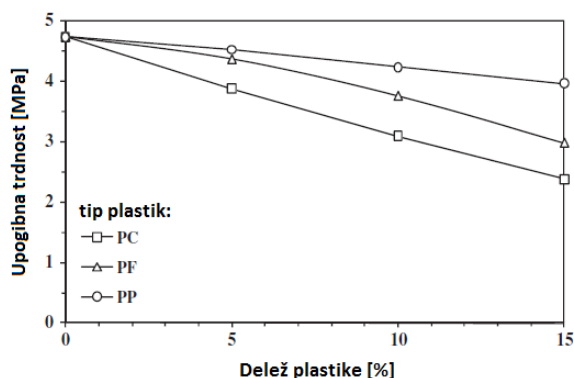


Grafikon 14: Natezna trdnost betona s plastiko [33].



Slika 7: Slaba vez med plastičnim agregatom in cementno matrico [33].

V raziskavi je bilo ugotovljeno, da se s povečevanjem količine odpadne PET plastike upogibna trdnost betona zmanjšuje (grafikon 15). Razlaga je precej podobna kot pri zmanjšanju tlačne oz. natezne trdnosti [33]. V primeru 100 % (v/v) nadomestitve naravnega agregata s plastičnim HDPE agregatom je upogibna trdnost upadla za 47 % [28].

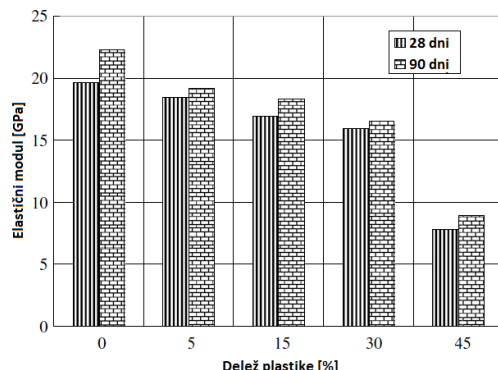


Grafikon 15: Upogibna trdnost betona s plastiko [33].

### 3.8.11 Modul elastičnosti

Raziskava je pokazala, da je z večanjem deleža plastičnega PVC agregata padal modul elastičnosti (grafikon 16). Pri 45 % (v/v) nadomestitvi naravnega agregata s plastičnim je

modul padel za približno 60 %. Vzrok za to je, da ima plastika manjši elastični modul kot cementni kamen ter da imajo betoni z manjšo tlačno trdnostjo posledično tudi manjši elastični modul [27].



Grafikon 16: Elastični modul betona s plastiko [27].

### 3.8.12 Žilavost in Poissonov količnik

Raziskave so pokazale, da lahko beton absorbira velike količine energije, saj uporaba plastike v betonu izboljša njegovo žilavost. Tak beton bi bil lahko primeren za gradnjo potresno odpornih stavb [26].

Rezultati so pokazali, da se je vrednost Poissonovega količnika povečevala z večanjem vsebnosti PVC plastike v betonu. Pri 45 % (v/v) količini plastičnega agregata se je količnik povečal za okoli 60 %. Večji Poissonov količnik pomeni večjo duktilnost betona, ki pa so jo pripisali elastični naravi PVC plastike [27].

### 3.8.13 Vodovpojnost

Raziskava vodovpojnosti je pokazala, da imajo betoni z odpadno PET plastiko višjo vodovpojnost. Vodovpojnost se povečuje z večanjem količine odpadne plastike, z uporabo večjih zrn plastičnega agregata ter z višanjem v/c razmerja. Na povečanje vodovpojnosti je vplivala predvsem zrnavostna sestava, oblika in velikost plastičnih delcev, ki se precej razlikuje od naravnega agregata [26].

### 3.8.14 Karbonatizacija

Preiskava karbonatizacije je pokazala, da je globina karbonatizacije nižja pri celotni nadomestitvi naravnega agregata s PET plastiko, kot pri mešanicah z naravnim in plastičnim agregatom skupaj. Tako je bila globina karbonatizacije pri celotni nadomestitvi s plastičnim agregatom za 15 % manjša. Vzrok temu je v slabi interakciji med naravnim in plastičnim

agregatom, kar privede do bolj porozne mešanice, kot pri betonu, ki je vseboval le plastični agregat [26].

### 3.8.15 Prodor kloridov

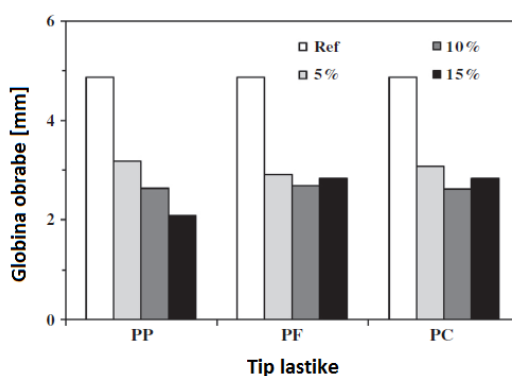
Raziskava je pokazala, da se je odpornost betona proti prodoru kloridov večala z večanjem količine PVC plastike v betonu. Dosegli so približno 36 % zmanjšanje prodora kloridov pri betonski mešanici, ki je vsebovala 45 % (v/v) plastičnega agregata. Razlog za boljšo odpornost betona proti prodoru kloridov, je v neprepustnih PVC delcih, ki zavirajo prehod kloridnih ionov [27].

### 3.8.16 Zmrzljinska odpornost

V raziskavi, kjer so v betonu uporabili modificirano ekspanzirano polistirensko peno (MEPS), se je izkazalo, da ima tak beton večjo odpornost proti zmrzovanju in tajanju ter posledično večjo obstojnost [26].

### 3.8.17 Odpornost proti obrusu

Raziskava po Böhmejevi metodi je pokazala, da uporaba plastičnega PET agregata v betonu izboljša odpornost betona proti obrusu (grafikon 17). V primerjavi s primerjalnim običajnim betonom se je globina obrabe betona pri 15 % (v/v) količini PET plastike zmanjšala za 40 do 60 % [33].



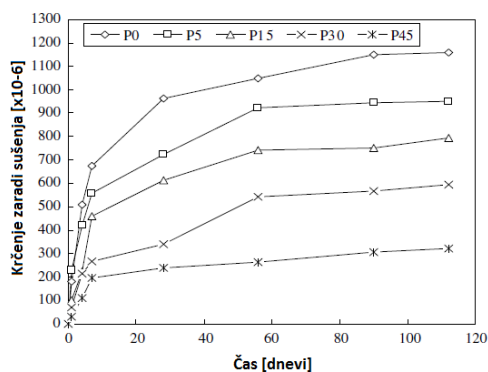
Grafikon 17: Globina obrabe betona s plastiko [33].

### 3.8.18 Krčenje

V primeru uporabe PVC agregata je prišlo do manjših razpok zaradi krčenja betona. Z večanjem količine plastičnega agregata, se je manjšalo krčenje betona. Krčenje se je



zmanjšalo za okoli 72 % pri 45 % (v/v) količini plastičnega agregata (grafikon 18). PVC agregat je v primerjavi z naravnim agregatom neprepusten in ne absorbira vode, zato se ne krči in je zato lahko zmanjšal krčenje celotnega betona [27].



Grafikon 18: Krčenje betona s plastiko [27].

### 3.8.19 Požarna odpornost

Raziskava je pokazala, da se je pri povišani temperaturi upogibna trdnost betona s plastiko zmanjšala v odvisnosti od količine vključenega plastičnega PET agregata in velikosti plastičnih delcev. Plastični agregat je namreč bolj občutljiv na povišano temperaturo, kot naravni agregat. Zaradi volumske spremembe in degradacije plastičnega agregata je prišlo do večje vsebnosti por v betonu. Toplotna stabilnost PET agregata se je zmanjšala zaradi hidrolitične razgradnje plastičnih delcev. Ker je bilo sproščanje vodne pare v okolje pri visokih temperaturah ovirano, je v strukturi betona narastel tlak, ki je razpokal beton [26].

### 3.8.20 Termične lastnosti

Plastični agregat ima precej nižjo toplotno prevodnost (preglednica 3) kot naravni agregat (apnenec 1,26 - 1,33 W/m $\times$ K oz. peščenjak 1,7 W/m $\times$ K). Tako ima beton, ki vsebuje plastični agregat, boljše toplotno-izolacijske lastnosti, v primerjavi z običajnimi betoni [26].

### 3.8.21 Izluževanje

Odpadne plastike lahko vsebujejo strupene organske in anorganske kemične snovi, kot so svinec, kadmij, krom, živo srebro, itd. Zaenkrat pa še ni bolj podrobnih raziskav glede izluževanja teh strupenih snovi iz betona [26].

### 3.9 Reciklirana odpadna plastika podjetja Interseroh

Za potrebe magistrske naloge smo pridobili reciklirano odpadno plastiko podjetja Interseroh. Preiskali smo osem vrst različnih plastik iz skupine termoplastov, katerih sestava je mešanica polipropilena (PP), polietilena (PE) in polivinil klorida (PVC). Te odpadne plastike so bile različnih velikosti, oblik, sestave in načina predelave. V nadaljevanju so predstavljene posamezne vrste recikliranih odpadnih plastik, ki smo jih uporabili pri magistrskem delu.

#### 3.9.1 Recythen

Pri postopku recikliranja odpadne plastike, imenovan tudi »up cycling« metoda, iz nehomogene in umazane plastike mešanih komunalnih odpadkov in nepovratne transportne embalaže, izdelajo granulat. Ta granulat je po tehničnih lastnostih v celoti primerljiv ter zamenljiv za plastične materiale v primarni obliki, ki so proizvedeni iz fosilnih goriv. Prva faza tega postopka obsega avtomatizirano ločevanje različnih tipov plastičnih odpadkov na podlagi infrardeče svetlobe. Končni produkt te faze je 14 različnih tipov plastičnih materialov, ki so min. 95 % sortno homogeni. Nadalje se ti plastični odpadki mehansko zmeljejo in očistijo nečistoč. Nato material ekstrudirajo in s pomočjo filtriranja v talini in laserske filtracije odstranijo še preostale mehanske nečistoče ter ostanke drugih tipov plastike. Rezultat te faze je granulat Recythen. Ta granulat se lahko uporablja kot dodatek k plastiki v primarni obliki ali pa kot surovina za nadaljno predelavo. Zaradi svoje zelo visoke čistosti in suhosti, je še posebej primeren za izdelavo enostavnih in robustnih proizvodov, kot so vrtno pohištvo ali plastične cevi in tudi za mešanje z drugimi proizvodi [34, 35].

##### 3.9.1.1 Recythen HDPE

Reciklat Recythen HDPE v obliki granul (slika 8) je mešanica različnih tipov PE z vodilnim deležem HDPE (preglednica 5) [36].



Slika 8: Recythen HDPE.

Preglednica 5: Lastnosti Recythen HDPE, PO in PP10 [36].

Parameter	Preizkusna metoda	Enota	HDPE	PO	PP10
E-modul	DIN ISO 527-1	MPa	950	600	1100
natezna trdnost	DIN ISO 527-1	MPa	30	25	26
raztezek	DIN ISO 527-2	%	10	19	10
udarna žilavost po Charpyju	ISO 179 eA	kJ/m <sup>2</sup>	14	8	5
nasipna masa	DIN EN ISO 60	kg/m <sup>3</sup>	590	540	530
preostala vlaga (120 °C)	DIN EN ISO 585	%	0,1	0,1	0,1

### 3.9.1.2 Recythen PO

Reciklat Recythen PO v obliki granul (slika 9) je zmes homopolimera in kopolimera PP z delci PE (preglednica 5) [36].



Slika 9: Recythen PO.

### 3.9.1.3 Recythen PP10

Reciklat Recythen PP10 v obliki granul (slika 10) je zmes homopolimera in kopolimera PP (preglednica 5) [36].



Slika 10: Recythen PP10.

### 3.9.1.4 Recythen LD AGG

Aglomerat Recythen LD AGG (slika 11) je mešanica prevladujočega LDPE in majhnega deleža homopolimera in kopolimera PP (preglednica 6) [36].



Slika 11: Recythen LD AGG.

Preglednica 6: Lastnosti Recythen LD AGG in PO AGG [36].

Parameter	Preizkusna metoda	Enota	LD AGG	PO AGG
nasipna masa	DIN EN ISO 60	kg/m <sup>3</sup>	330	330
velikost zrn (1-10 mm)	interno	%	> 98	> 97
tujki	interno	%	< 5	< 5
preostala vlaga	DIN EN ISO 585	%	0,1	0,1
E-modul	DIN ISO 527-1	MPa	600	400
natezna trdnost	DIN ISO 527-1	MPa	19	19
udarna žilavost po Charpyju	ISO 179 eA	kJ/m <sup>2</sup>	17	13

### 3.9.1.5 Recythen PO AGG

Aglomerat Recythen PO AGG (slika 12) je mešanica PE in homopolimera in kopolimera PP (preglednica 6) [36].



Slika 12: Recythen PO AGG.

### 3.9.2 Mahlgut

Vhodni material za plastiko Mahlgut je odpadna HDPE in PP embalaža. Najprej se opravi testiranje za onesnaževala, ki bi lahko negativno vplivala na proces predelave. Tovrstna onesnaževala nato odstranijo. Temu sledi večstopenjsko drobljenje in separiranje ter večkratno čiščenje oz. spiranje plastike. Nastali plastični material v obliki kosmičev, ki je očiščen nečistoč in tujkov, mehansko posušijo [37].

#### 3.9.2.1 Mahlgut PP

Mahlgut PP (slika 13) je mešanica kosmičev iz homopolimera in kopolimera PP (preglednica 7) [36].



Slika 13: Mahlgut PP.

Preglednica 7: Lastnosti Mahlgut PP in HDPE [36].

Parameter	Preizkusna metoda	Enota	PP	HDPE
nasipna masa	DIN EN ISO 60	kg/m <sup>3</sup>	180	250
velikost zrn (1-10 mm)	interno	%	> 95	> 95
tujki	interno	%	< 3	< 3
preostala vlaga (80 °C)	DIN EN ISO 585	%	0,3	0,3

### 3.9.2.2 Mahlgut HDPE

Mahlgut HDPE (slika 14) je mešanica kosmičev iz različnih tipov PE z vodilnim deležem HDPE (preglednica 7) [36].



Slika 14: Mahlgut HDPE.

### 3.9.3 Odpadne nagrobne sveče iz PVC

Tipične nagrobne sveče sestojijo iz parafina, plastičnega ohišja in kovinskega pokrovčka. Ohišje sveč je lahko narejeno iz PVC, PP, PE ali PET plastike. V Sloveniji prevladujejo sveče s PVC ohišjem (96 %). Odpadne nagrobne sveče se v sortirnici najprej sortirajo in razvrščajo po materialih s pomočjo ročne in magnetne separacije. Odstranijo se kovinski pokrovčki, sveče iz stekla in keramike, sveče iz PP in PET plastike, itd. Ta postopek je izredno pomemben, saj se kemijske lastnosti plastik med seboj zelo razlikujejo. V kolikor ni zagotovljena čistost posameznega tipa plastike, je nadalje v procesu onemogočeno reciklirani material uporabiti za nove proizvode. Preostala PVC plastika gre v nadaljno strojno predelavo. Tam plastiko najprej stiskajo in drobijo, ter s pomočjo magnetov odstranijo še morebitne preostale kovinske delce. Na pralni liniji se s pomočjo mešal loči vosek od plastike, prav tako pa lahko odstranijo ostanke drugih plastik, saj za razliko od plastike PVC ostale plastike priplavajo na površje. Nato mlin in preša pretvorita posamezne frakcije

plastike v regranulate ali v fini prah (slika 15), ki se ju lahko uporabi kot surovina za proizvodnjo novih izdelkov [38, 39, 40].



Slika 15: PVC.

## 4 EKSPERIMENTALNI DEL

Celotne preiskave smo opravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije, v Laboratoriju za betone, kamen in reciklirane materiale. Eksperimentalno delo je bilo v grobem razdeljeno na dva dela.

V prvem delu preiskav smo se posvetili karakterizaciji odpadne plastike. Ta karakterizacija je bila osnova za pripravo različnih receptur betona, v katerih je odpadna plastika nadomeščala del naravnega agregata. Priprava betonskih mešanic z agregatom iz odpadne plastike je potekala v drugem delu raziskav.

V drugem delu preiskav smo na svežem in strjenem betonu opravili standardne laboratorijske preiskave. Na podlagi teh raziskav smo poskušali ugotoviti vpliv odpadne plastike na lastnosti svežega betona ter mehanske lastnosti in obstojnost betonov v strjenem stanju. Na podlagi analize rezultatov preiskav smo predlagali možnosti uporabe takega betona v gradbene namene.

### 4.1 Karakterizacija odpadne plastike

Prvi del preiskav je obsegal karakterizacijo odpadne plastike. Naredili smo sejnalno analizo, določili prostorninsko maso zrn ter pogledali površino zrn odpadne plastike pod mikroskopom. Vse vzorce odpadne plastike smo za potrebe karakterizacije pridobili in zmanjšali v skladu s standardoma SIST EN 932-1:1999 [41] in SIST EN 932-2:1999 [42].

#### 4.1.1 Zrnastostna sestava

Ustrezna zrnastostna sestava agregata je zelo pomembna lastnost, saj vpliva na plastične lastnosti svežega betona in na lastnosti strjenega betona. Pravilno granuliran agregat omogoča dobro zapolnitev vseh praznih prostorov in onemogoča segregacijo betona [10]. Zrnastostno sestavo odpadne plastike smo določili z ročnim sejanjem skozi sistem sit (slika 16) na podlagi standarda SIST EN 933-1:2012 [43]. Najprej smo vzorec odpadne plastike stehali in ga oprali. Nato smo ga posušili pri temperaturi 110 °C do stalne mase, ga ohladili in ponovno stehali. Ta vzorec smo nato ročno presejali skozi sita. V kolikor se masa vzorca v eni minuti med dvema zaporednima sejanjema na situ ni zmanjšala za več kot 1 %, smo sejanje na tistem situ končali. Na podlagi enačbe 1 smo izračunali odstotek finih delcev pod 0,063 mm  $f$  [%].

$$f = \frac{((m_1 - m_2) + P) \times 100}{m_1} \quad (\text{enačba 1})$$



Pri čemer je:

$m_1$  – masa vzorca [g]

$m_2$  – masa vzorca po pranju [g]

$P$  – masa preostalega vzorca v posodi [g]



Slika 16: Sejanje plastičnega agregata na situ.

#### 4.1.2 Prostorninska masa zrn

Ker agregat predstavlja velik delež v betonski mešanici, je zelo pomembno poznavanje njegove prostorninske mase (prostorninska masa zrn), saj posledično vpliva na gostoto same betonske mešanice. Prostorninsko maso delcev odpadne plastike smo določili podobno kot navaja standard SIST EN 1097-6:2013 Annex C za lahki agregat, s pomočjo piknometra [44]. Odpadno plastiko smo sprva namakali v vodi 24 ur. Nato smo vzorec plastičnega agregata vsuli v piknometar (slika 17) ter dolili vodo do oznake na njem. Odvečen zrak smo odstranili s stresanjem in obračanjem piknometra. Piknometar smo nato hranili 24 ur v vodni kopeli. Nato smo ga ponovno stresali, dolili manjkajočo količino vode ter ga stehali. Po tehtanju smo vodo odlili in vzorec pustili sušiti na zraku 24 ur in ga nato ponovno stehali. Ko je bil vzorec površinsko suh, smo ga posušili v sušilniku pri temperaturi 110 °C do konstantne mase. Na podlagi vseh tehtanj smo določili prostorninsko maso zrn vzorca. Po spodaj navedenih enačbah smo izračunali navidezno prostorninsko maso zrn  $\rho_a$  [Mg/m<sup>3</sup>] (enačba 2), prostorninsko maso zrn suhega vzorca  $\rho_{rd}$  [Mg/m<sup>3</sup>] (enačba 3) ter prostorninsko maso zrn nasičenega površinsko suhega vzorca  $\rho_{ssd}$  [Mg/m<sup>3</sup>] (enačba 4).

$$\rho_a = \frac{m_4 \times \rho_w}{m_4 - (m_2 - m_3)} \quad (\text{enačba 2})$$

$$\rho_{rd} = \frac{m_4 \times \rho_w}{m_1 - (m_2 - m_3)} \quad (\text{enačba 3})$$

$$\rho_{ssd} = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_1 - (m_2 - m_3)} \quad (\text{enačba 4})$$

Pri čemer je:

$m_1$  - masa z vodo nasičenega, površinsko suhega vzorca [g]

$m_2$  - masa piknometra, z vodo nasičenega vzorca in vode [g]

$m_3$  - masa piknometra, napolnjenega z vodo [g]

$m_4$  - masa suhega vzorca [g]

$\rho_w$  - gostota vode [ $\text{Mg/m}^3$ ]



Slika 17: Piknometer [45].

#### 4.1.3 Površina zrn pod mikroskopom

Vzorke odpadne plastike smo pogledali pod mikroskopom (slika 18), z namenom ugotoviti, kakšna je površina zrn. V kolikor je površina plastičnih zrn hrapava, pride do boljšega stika med agregatom in cementnim kamnom, žal pa to lahko poslabša obdelavnost in vgradljivost samega betona.



Slika 18: Mikroskop [46].

#### 4.2 Uporabljeni materiali za izdelavo betonskih kompozitov

Pripravili smo različne betonske mešanice, ki so sestavljene iz cementnega veziva, naravnega agregata, vode, kemijskih in mineralnih dodatkov. Količine posameznih sestavin betona smo spreminjali glede na določene potrebe. Na podlagi prebrane literature smo se

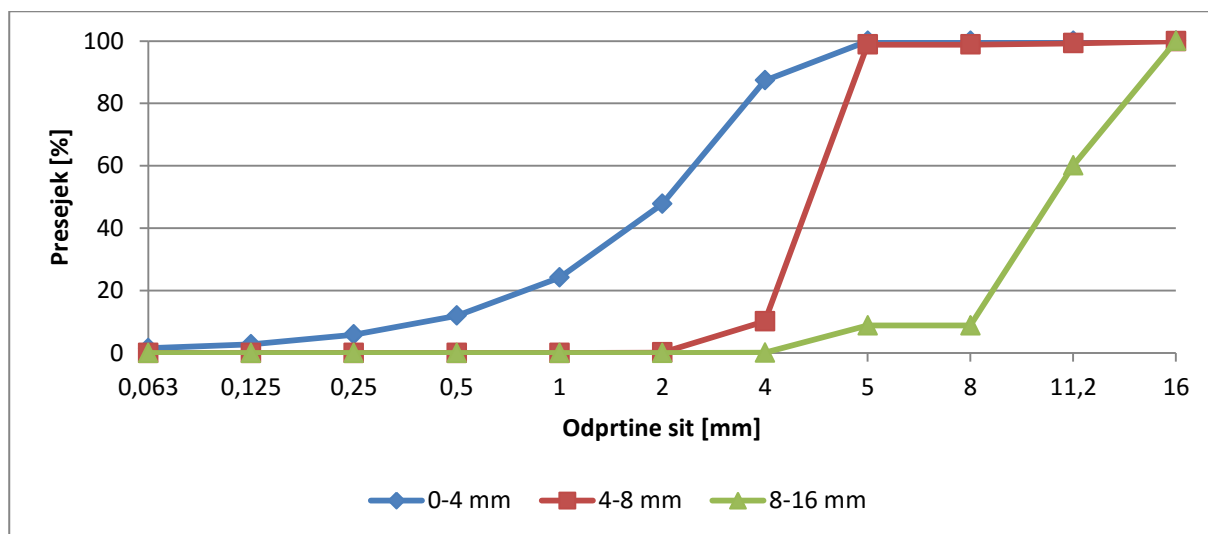
odločili, da bomo pri pripravi betona nadomestili naravni agregat z odpadno plastiko v obsegu 10 % (v/v). Za tak delež nadomestitve naravnega agregata smo se odločili, saj so raziskave pokazale, da odpadna plastika vpliva na zmanjšanje tlačne trdnosti (slab sprjem plastičnih zrn s cementnim kamnom). Prav tako pa se lahko pojavi problem segregacije plastičnih zrn (plastika ima precej nižjo gostoto kot naravni agregat).

#### 4.2.1 Cement

Za izdelavo betona smo uporabili navaden portland cement CEM I 42,5 R, ki ga proizvaja Lafarge. Sestavlja ga vsaj 95 % portlandskega klinkerja, kot regulator vezanja se uporablja sadra. Cement ustreza zahtevam standarda SIST EN 197-1:2011 [47]. Portland cement spada v skupino silikatnih cementov, katerih glavna sestavina je silikat kalcija  $C_3S$ , ki močno reagira z vodo. Zaradi svojih hidravličnih lastnosti cement ob stiku z vodo veže in se nato strdi v cementni kamen ter tako vpliva na trdnost strjenega betona.

#### 4.2.2 Naravni agregat

V betonih naravni agregat predstavlja večinski delež v mešanici ter daje betonu predvsem prostorninsko stabilnost, vpliva pa tudi na njegovo trdnost. Agregat mora ustrezati standardu SIST EN 12620:2002+A1:2008 [48]. Naravni agregat, ki smo ga uporabili v betonu, je savski prod, ki ga pridobiva PGM Hotič. Za rečni prod je značilna visoka trdnost. Ker absorbira zelo malo vode (vodovpojnost med 0,6 in 0,8 %), ne vpliva na dejansko (efektivno) v/c razmerje. Pri pripravi betonske mešanice smo uporabili tri frakcije: 0-4 mm, 4-8 mm in 8-16 mm (grafikon 19).



Grafikon 19: Zrnastostne krivulje naravnega agregata.

### **4.2.3 Voda**

Za pripravo betona smo uporabili vodo iz vodovodnega omrežja. Ustrezna količina vode je potrebna za hidracijo cementa ter zagotavljanje ustrezne konsistence sveže betonske mešanice.

### **4.2.4 Odpadna plastika**

Odločili smo se, da bomo izmed osmih vrst različnih odpadnih plastik uporabili v betonu samo tri odpadne plastike in to so Recythen PP10, Recythen PO AGG in PVC. Za odpadno plastiko vrste Mahlgut pa se nismo odločili, zaradi izrazito neugodne dvodimenzijske oblike kosmičev (naravni agregat je trodimenzijske oblike). Izbira ostalih vrst plastik je bila naključna. V betonski mešanici je odpadna plastika nadomestila 10 % (v/v) naravnega agregata. Nadomestila je frakcijo naravnega agregata v odvisnosti od njene zrnivosti.

### **4.2.5 Mineralni dodatki**

Evropski standard SIST EN 206:2013 [49] navaja dva tipa mineralnih dodatkov. Mineralni dodatki tipa I so inertni, medtem ko imajo mineralni dodatki tipa II pucolanske ali latentno hidravlične lastnosti. Z njihovo uporabo pridobimo določene lastnosti svežega oz. strjenega betona. Pri pripravi betonskih mešanic smo uporabili oba tipa dodatkov.

Ker je imel naravni agregat zelo nizko vsebnost finih delcev, smo dodali v vse betonske mešanice kameno moko Calpex 0-1 mm (mineralni dodatek tipa I) iz naravnega kalcijevega karbonata, ki jo proizvaja Calcit. Kamena moka je ustrezala standardu SIST EN 12620:2002+A1:2008 [48]. Z njo smo želeli izboljšati zrnovostno sestavo naravnega agregata oz. zapolniti praznine med večjimi zrni agregata.

Elektrofiltrski pepel (mineralni dodatek tipa II) je stranski proizvod v termoelektrarnah, ki nastaja pri zgorevanju premoga in se nabira na elektrofiltrih kot odpadni prah. Je fin praškast material, sestavljen pretežno iz silicijevega dioksida, ki smo ga zaradi njegove sferične oblike uporabili za izboljšanje obdelavnosti nekaterih svežih betonskih mešanic. Zaradi svojih pucolanskih lastnosti pa tudi pripomore k višji trdnosti strjenega betona. Elektrofiltrski pepel je ustrezal standardu SIST EN 450-2:2005 [50].

#### 4.2.6 Kemijski dodatki

Uporabo kemijskih dodatkov določa standard SIST EN 206:2013 [49]. Dodajanje teh vrst dodatkov v beton vpliva na lastnosti svežega in strjenega betona. Betonske mešanice smo pripravili s pomočjo treh dodatkov.

V vse betonske mešanice smo dodali superplastifikator nove generacije – hiperplastifikator TKK Cementol Hiperplast 179. Superplastifikator je ustrezal standardu SIST EN 934-1:2008 [51]. Uporaba superplastifikatorjev omogoča zmanjšanje potrebne količine vode za pripravo betonske mešanice. S pomočjo superplastifikatorja smo lahko dosegli povečano obdelovalnost pri nespremenjenem v/c razmerju.

V nekaterih betonskih mešanicah smo uporabili aerant TKK Cementol Eta S, s pomočjo katerega smo uvedli zračne mehurčke in s tem izboljšali konsistenco pri istem v/c razmerju. Ustrezal je standardu SIST EN 934-2:2009+A1:2012 [52]. Dodan aerant lahko tudi pripomore k manjši segregaciji in večji zmrzlini odpornosti betona.

Za preprečitev segregacije plastičnih zrn smo v nekatere betonske mešanice dodali gostilec TKK Cementol L. Gostilec je stabilizator, ki zaradi visoke bazičnosti poveča viskoznost cementne paste ter tako zmanjša izločanje vode in s tem preprečuje nevarnost segregacije betona.

#### 4.3 Izdelava betonskih kompozitov

Na podlagi karakterizacije odpadne plastike in betonskih receptur smo pripravili betonske mešanice, na katerih smo opravili standardne laboratorijske preiskave. S tem smo želeli ugotoviti vpliv odpadne plastike na lastnosti betona.

Betonske mešanice smo pripravili v skladu s standardom SIST EN 206:2013 [49]. Na podlagi narejenih receptur smo zamešali beton v laboratorijskem mešalcu (slika 19). Najprej smo suho zamešali cement, naravni agregat, odpadno plastiko in mineralne dodatke, nato pa dodali vodo in kemijske dodatke. Mešanje v laboratorijskem mešalcu je trajalo do homogenega videza betonske mešanice.



Slika 19: Laboratorijski mešalec.

Betonske mešanice smo vgradili v standardne kalupe (slika 20) v skladu s standardoma SIST EN 12390-1:2013 in SIST EN 12390-2:2009 [53, 54]. Predhodno smo kalupe namazali z opažnim oljem, da smo preprečili sprijemanje betona in kalupov. Beton smo vgrajevali v kalupe v dveh plasteh s pomočjo vibracijske igle in pazili, da ni prišlo do segregacije agregata ali izločanja cementnega mleka. Odvečni beton smo s kalupov odstranili, površino pa s pomočjo zidarske žlice zgladili. Samozgoščevalni beton pri vgradnji v kalupe ni potreboval dodatnega vibriranja. Vse preizkušance smo nato ustrezno označili.



Slika 20: Standardni kalupi – prizme (levo) in kocke (desno).

Nega vzorcev je potekala v skladu s standardom SIST EN 12390-2:2009 [54]. Vzorce betona smo najprej hranili v kalupih pokritih s plastično folijo 24 ur pri temperaturi 20 °C, nato pa smo jih razopažili in jih negovali v klimatizirani komori s temperaturo 20 °C in relativno vlažnostjo 95 %, ki je zagotavljala nemoten proces hidratacije betona.

#### 4.3.1 Izdelava betonskih kompozitov 1. del

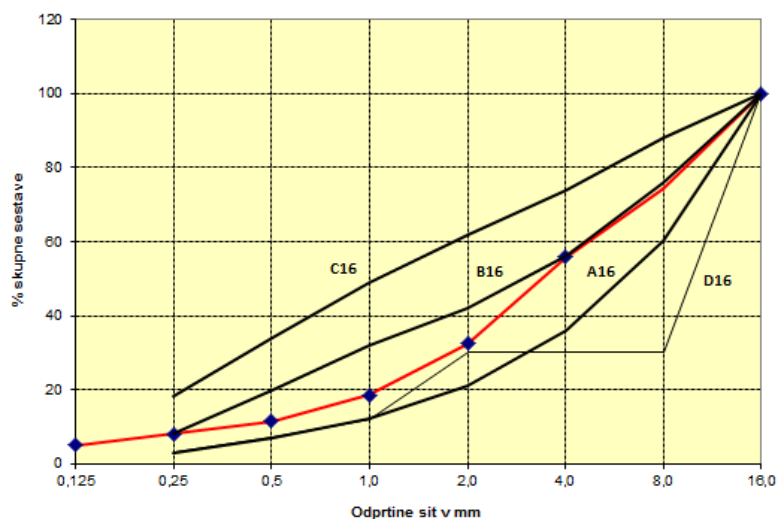
Sprva smo pripravili štiri vrste betona. Primerjalni beton (etalon) ni vseboval odpadne plastike in je služil za primerjavo lastnosti z betonom z odpadno plastiko. Ostali trije betoni so vsebovali po eno vrsto odpadne plastike (Recythen PP10, PVC in Recythen PO AGG), ki je nadomeščala 10 % (v/v) naravnega agregata. Na svežem betonu smo določili posed, gostoto in vsebnost zraka. Na strjenem betonu smo določili gostoto, tlačno trdnost in vizualno ocenili segregacijo.

#### 4.3.1.1 Beton etalon

Etalon je primerjalni beton, ki ne vsebuje odpadne plastike (grafikon 20). Vsebuje 300 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,61 (preglednica 8). Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Preglednica 8: Receptura betona etalon.

Vodocementni faktor (v/c)		0,61		Izračun	
Osnovni materiali:				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
cement	CEM I			300,0	100,0
voda				183,0	181,6
dodatek	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,5	1,4
pore	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
0–1 mm	Calpex	4	%	77,1	27,9
0–4 mm		58	%	1119,8	404,3
4–8 mm		10	%	192,4	69,7
8–16 mm		28	%	538,6	195,2
plastika		0	%	0,0	0,0



Grafikon 20: Krivulja zrnivosti agregata v betonu etalon.

#### 4.3.1.2 Beton s plastiko Recythen PP10

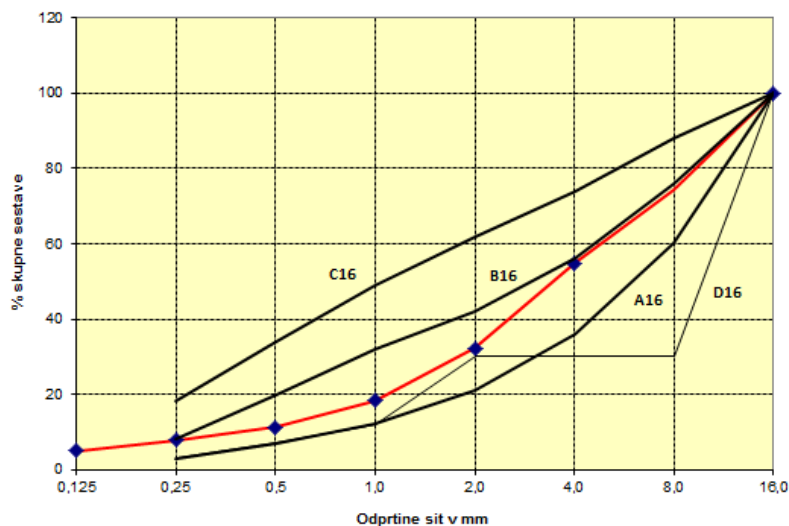
Beton PP10 (slika 21) vsebuje 10 % (v/v) odpadne plastike Recythen PP10 in tako nadomešča celoten naravni agregat v velikosti 4-8 mm (grafikon 21). Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,61 (preglednica 9). Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).



Slika 21: Beton PP10.

Preglednica 9: Receptura betona PP10.

Vodocementni faktor (v/c)		0,61		Izračun	
Osnovni materiali:				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
cement	CEM I			300,0	100,0
voda				183,0	181,6
dodatek	hiperplast. Cementol 179	0,5 %		1,5	1,4
pore	predvidena poroznost	2 %			20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
0–1 mm	Calpex	4 %		77,1	27,9
0–4 mm		58 %		1119,8	404,3
4–8 mm		0 %		0,0	0,0
8–16 mm		28 %		538,6	195,2
plastika	PP10	10 %		59,9	69,7



Grafikon 21: Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10.



### 4.3.1.3 Beton s plastiko PVC

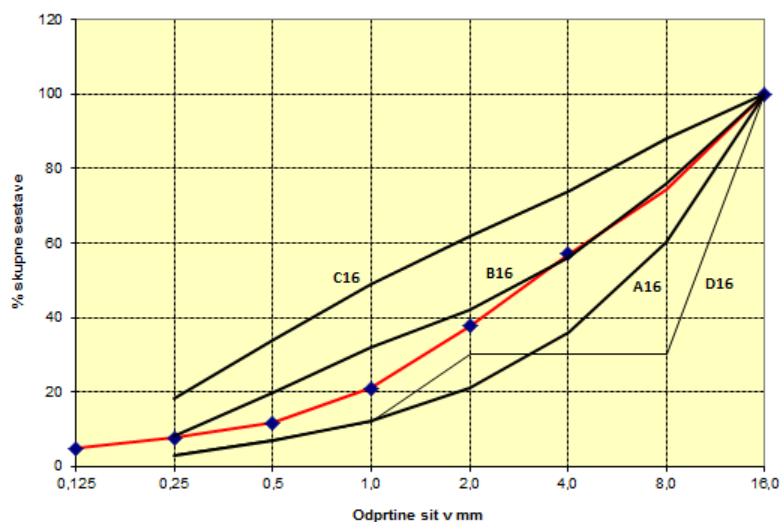
Beton PVC vsebuje 10 % (v/v) odpadne plastike PVC (slika 22) in tako nadomešča del naravnega agregata v velikosti 0-4 mm (grafikon 22). Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,61 (preglednica 10). Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).



Slika 22: Beton PVC.

Preglednica 10: Receptura betona PVC.

Vodocementni faktor (v/c)		0,61		Izračun	
Osnovni materiali:				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
cement	CEM I			300,0	100,0
voda				183,0	181,6
dodatek	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,5	1,4
pore	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
0–1 mm	Calpex	4	%	77,1	27,9
0–4 mm		48	%	926,7	334,6
4–8 mm		10	%	192,4	69,7
8–16 mm		28	%	538,6	195,2
plastika	PVC	10	%	73,2	69,7



Grafikon 22: Krivulja zrnivosti agregata v betonu PVC.

#### 4.3.1.4 Beton s plastiko Recythen PO AGG

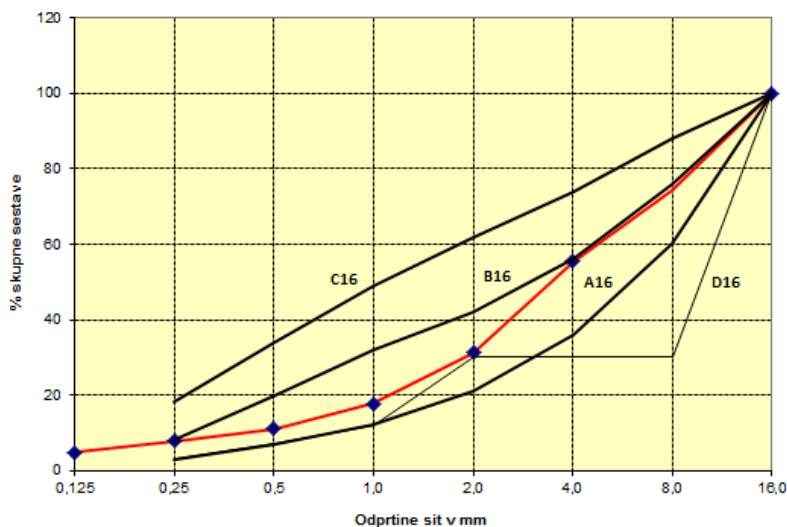
Beton PO AGG vsebuje 10 % (v/v) odpadne plastike Recythen PO AGG (slika 23) in tako nadomešča del naravnega agregata v velikosti 0-8 mm (grafikon 23). Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,61 (preglednica 11). Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).



Slika 23: Beton PO AGG.

Preglednica 11: Receptura betona PO AGG.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>voda</b>				183,0	181,6
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,5	1,4
<b>pore</b>	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	77,1	27,9
<b>0–4 mm</b>		55	%	1061,9	383,4
<b>4–8 mm</b>		3	%	57,7	20,9
<b>8–16 mm</b>		28	%	538,6	195,2
<b>plastika</b>	PO AGG	10	%	57,9	69,7



Grafikon 23: Krivulja zrnivosti agregata v betonu PO AGG.

### 4.3.2 Izdelava betonskih kompozitov 2. del

V drugem delu preiskav smo se posvetili samo uporabi odpadne plastike Recythen PP10 v betonu. Za izbiro te plastike smo se odločili, saj je po obliki najbolj podobna naravnemu agregatu. Za osnovo smo vzeli beton PP10 (poglavje 4.3.1.2). Želeli smo namreč zamešati tak beton, ki bi bil po svojih lastnostih podoben etalonu (poglavje 4.3.1.1). Z aerantom in elektrofiltrskim pepelom smo želeli vplivati na konsistenco betona, medtem ko smo segregacijo plastike poskušali odpraviti z uporabo aeranta in gostilca. Na svežem betonu smo določili posed, gostoto, vsebnost zraka in segregacijo. Na strjenem betonu smo določili gostoto, tlačno trdnost in vizualno ocenili segregacijo.

#### 4.3.2.1 Beton PP10\_AER

Ker smo želeli pri betonu z odpadno plastiko Recythen PP10 doseči večji posed, smo dodali aerant Cementol Eta S (0,08 %), s čimer naj bi izboljšali konsistenco pri istem v/c razmerju (preglednica 12). Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_AER je enaka kot pri betonu PP10 (grafikon 21).

Preglednica 12: Receptura betona PP10\_AER.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>voda</b>				183,0	181,4
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,5	1,4
<b>dodatek</b>	aerant Cementol Eta S	0,08	%	0,2	0,2
<b>pore</b>	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	77,1	27,9
<b>0–4 mm</b>		58	%	1119,8	404,3
<b>4–8 mm</b>		0	%	0,0	0,0
<b>8–16 mm</b>		28	%	538,6	195,2
<b>plastika</b>	PP10	10	%	59,9	69,7

#### 4.3.2.2 Beton PP10\_EFP

Drugi način, kako doseči večji posed betonskega stožca z odpadno plastiko Recythen PP10, je bil z dodajanjem elektrofiltrskega pepela. Z njim naj bi, zaradi njegove sferične oblike, dosegli boljše obdelavnost sveže betonske mešanice. Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in 60 kg elektrofiltrskega pepela (preglednica 13). Z upoštevanjem k-faktorja (0,33) znaša v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_EFP je enaka kot pri betonu PP10 (grafikon 21).

Preglednica 13: Receptura betona PP10\_EFP.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>elektrofiltrski pepel</b>				60,0	20,0
<b>voda</b>				195,0	193,4
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,8	1,6
<b>pore</b>	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	73,5	26,6
<b>0–4 mm</b>		58	%	1068,3	385,7
<b>4–8 mm</b>		0	%	0,0	0,0
<b>8–16 mm</b>		28	%	513,9	186,2
<b>plastika</b>	PP10	10	%	57,2	66,5

#### 4.3.2.3 Beton PP10\_optim. EFP

Da bi dosegli podoben posed betonskega stožca z odpadno plastiko Recythen PP10 kot pri etalonu, smo optimirali količino elektrofiltrskega pepela. Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in 40 kg elektrofiltrskega pepela (preglednica 14). Z upoštevanjem k-faktorja (0,33) znaša v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_optim. EFP je enaka kot pri betonu PP10 (grafikon 21).

Preglednica 14: Receptura betona PP10\_optim. EFP.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>elektrofiltrski pepel</b>				40,0	13,3
<b>voda</b>				190,0	188,4
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,7	1,5
<b>pore</b>	predvidena poroznost	4	%		40,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	74,8	27,1
<b>0–4 mm</b>		58	%	1087,2	392,5
<b>4–8 mm</b>		0	%	0,0	0,0
<b>8–16 mm</b>		28	%	523,0	189,5
<b>plastika</b>	PP10	10	%	58,2	67,7

#### 4.3.2.4 Beton PP10\_optim. EFP\_AER

Da bi preprečili segregacijo plastike Recythen PP10, smo uporabili aerant Cementol Eta S (0,08 %). S tem naj bi naredili betonsko mešanico nekoliko bolj plastično. Predvidena poroznost betona je 4 %. Pri tem smo uporabili tudi optimirano količino elektrofiltrskega pepela. Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in 40 kg elektrofiltrskega pepela (preglednica 15). Z upoštevanjem k-faktorja (0,33) znaša v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_optim. EFP\_AER je enaka kot pri betonu PP10 (grafikon 21).

Preglednica 15: Receptura betona PP10\_optim. EFP\_AER.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>elektrofiltrski pepel</b>				40,0	13,3
<b>voda</b>				190,0	188,2
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,7	1,5
<b>dodatek</b>	aerant Cementol Eta S	0,08	%	0,3	0,2
<b>pore</b>	predvidena poroznost	4	%		40,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	72,6	26,3
<b>0–4 mm</b>		58	%	1055,1	380,9
<b>4–8 mm</b>		0	%	0,0	0,0
<b>8–16 mm</b>		28	%	507,5	183,9
<b>plastika</b>	PP10	10	%	56,5	65,7

#### 4.3.2.5 Beton PP10\_optim. EFP\_GOST

Drugi način, ki smo ga uporabili za preprečitev segregacije plastike Recythen PP10, je bila uporaba gostilca Cementol L (0,1 %). Pri tem smo uporabili tudi optimirano količino elektrofiltrskega pepela. Beton vsebuje 300 kg cementa CEM I in 40 kg elektrofiltrskega pepela (preglednica 16). Z upoštevanjem k-faktorja (0,33) znaša v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_optim. EFP\_GOST je enaka kot pri betonu PP10 (grafikon 21).

Preglednica 16: Receptura betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>elektrofiltrski pepel</b>				40,0	13,3
<b>voda</b>				190,0	188,1
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,7	1,5
<b>dodatek</b>	gostilec Cementol L	0,1	%	0,3	0,3
<b>pore</b>	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	74,8	27,1
<b>0–4 mm</b>		58	%	1087,2	392,5
<b>4–8 mm</b>		0	%	0,0	0,0
<b>8–16 mm</b>		28	%	523,0	189,5
<b>plastika</b>	PP10	10	%	58,2	67,7

### 4.3.3 Izdelava betonskih kompozitov 3. del

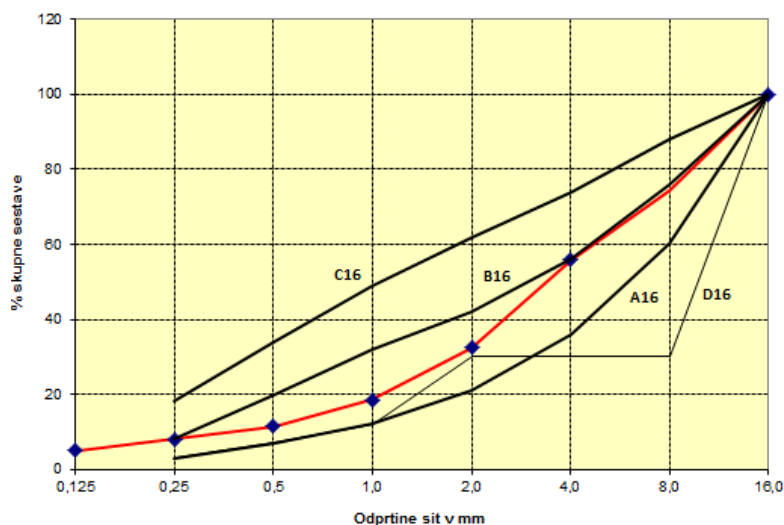
Da bi preverili obstojnost betona s plastiko Recythen PP10, smo v tretjem delu preiskav izdelali beton PP10\_optim. EFP\_GOST (poglavje 4.3.2.5.) in ga neposredno primerjali z betonom etalon\_novi (poglavje 4.3.3.1). Na svežem betonu smo določili posed, gostoto in vsebnost zraka. Na strjenem betonu smo določili gostoto, tlačno trdnost, globino prodora vode, odpornost proti karbonatizaciji, odpornost proti kloridom, notranjo odpornost proti zmrzovanju in tajanju ter odpornost površine proti zmrzovanju in tajanju.

#### 4.3.3.1 Beton etalon\_novi

Da bi preverili obstojnost betona s plastiko Recythen PP 10 v primerjavi z običajnim betonom, smo izdelali primerjalni beton, ki ni vseboval plastike (preglednica 17). 10 % plastike je nadomestil naravni agregat 4-8 mm (grafikon 24). Pri tem je ostala optimirana količina elektrofiltrskega pepela (40 kg). Beton prav tako vsebuje enako količino cementa CEM I (300 kg). Z upoštevanjem k-faktorja (0,33) znaša v/c razmerje 0,61. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %) ter gostilec Cementol L (0,1 %).

Preglednica 17: Receptura betona etalon\_novi.

<b>Vodocementni faktor (v/c)</b>		0,61		<b>Izračun</b>	
<b>Osnovni materiali:</b>				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
<b>cement</b>	CEM I			300,0	100,0
<b>elektrofiltrski pepel</b>				40,0	13,3
<b>voda</b>				190,0	188,1
<b>dodatek</b>	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	1,7	1,5
<b>dodatek</b>	gostilec Cementol L	0,1	%	0,3	0,3
<b>pore</b>	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
<b>0–1 mm</b>	Calpex	4	%	74,8	27,1
<b>0–4 mm</b>		58	%	1087,2	392,5
<b>4–8 mm</b>		10	%	186,8	67,7
<b>8–16 mm</b>		28	%	523,0	189,5
<b>plastika</b>		0	%	0,0	0,0



Grafikon 24: Krivulja zrnivosti agregata v betonu etalon\_novi.

#### 4.3.4 Izdelava betonskih kompozitov 4. del

V zadnjem delu preiskav smo izdelali samozgoščevalni beton (poglavje 4.3.4.1), s katerim smo želeli preprečiti segregacijo plastike, ki se nam je pojavljala pri vibriranih betonih. Posebnost samozgoščevalnega betona je sposobnost zapolnitve opaža brez dodatnega vibriranja. To pa dosežemo s pravilno zrnavostjo agregata in kamene moke ter z ustrežno količino vode in superplastifikatorja. Na svežem betonu smo določili razlez s posedom, gostoto in segregacijo. Na strjenem betonu smo določili gostoto, tlačno trdnost in vizualno ocenili segregacijo.

##### 4.3.4.1 Beton PP10\_SCC

Beton PP10\_SCC vsebuje 10 % (v/v) odpadne plastike Recythen PP10 (slika 24) in tako nadomešča celoten naravni agregat v velikosti 4-8 mm (grafikon 25). Frakcija 0-8 mm predstavlja 60 % prostornine agregata, ostalo je frakcija 8-16 mm. Beton vsebuje 330 kg cementa CEM I in ima v/c razmerje 0,50 (preglednica 18). Kot mineralni dodatek je bila dodana kamena moka Calpex 0-1 mm v količini 300 kg. Dodali smo hiperplastifikator TKK 179 (0,5 %).

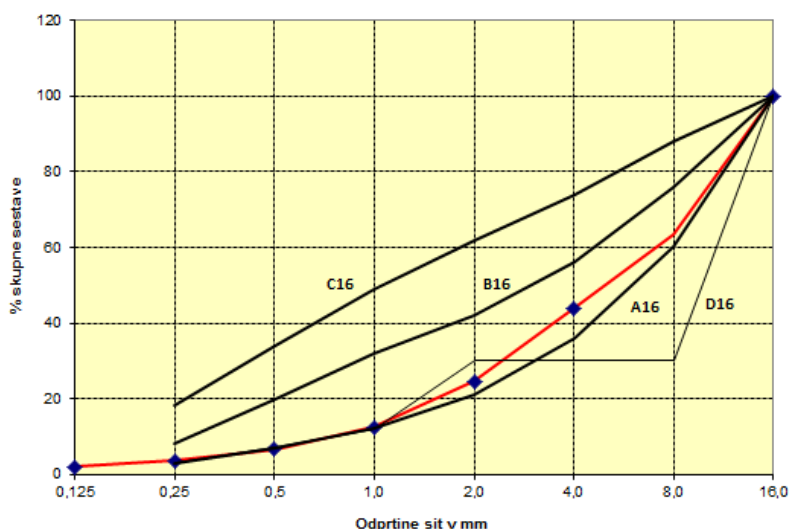


Slika 24: Beton PP10\_SCC.



Preglednica 18: Receptura betona PP10\_SCC.

Vodocementni faktor (v/c)		0,50		Izračun	
Osnovni materiali:				[kg]	[dm <sup>3</sup> ]
cement	CEM I			330,0	110,0
kamena moka	Calpex 0-1 mm			300,0	115,4
voda				163,8	161,0
dodatek	hiperplast. Cementol 179	0,5	%	3,2	2,8
pore	predvidena poroznost	2	%		20,0
<b>Agregat nazivne frakcije:</b>					
0–1 mm		0	%	0,0	0,0
0–4 mm		50	%	818,3	295,4
4–8 mm		0	%	0,0	0,0
8–16 mm		40	%	652,3	236,3
plastika	PP10	10	%	50,8	59,1



Grafikon 25: Krivulja zrnivosti agregata v betonu PP10\_SCC.

#### 4.4 Lastnosti svežega betona

Na betonu smo sprva preiskali lastnosti, ki jih ima v svežem stanju. Vzorce betona smo odvzeli v skladu s SIST EN 12350-1:2009 [55].

##### 4.4.1 Posed

Posed svežega betona je pokazatelj konsistence, ki določa plastičnost svežega betona. Konsistenca betona je lastnost, ki vpliva na vgrajevanje in obdelavnost svežega betona [10]. Konsistenco (posed) svežega betona smo opravili na podlagi standarda SIST EN 12350-2:2009 [56], v standardu SIST EN 206:2013 [49] pa so določene stopnje poseda stožca (preglednica 19). Sveži beton smo vgradili v kovinski kalup v obliki konusa. Z zidarsko

zajemalko smo kalup napolnili v treh slojih, pri čemer smo vsak sloj betona zgostili s 25 prebodi zgoščevalne palice. Ko je bil vrhnji sloj zgoščen, smo odvečni beton odstranili in vrhnji sloj poravnali z vrhom kalupa. Kalup smo nato enakomerno, pazljivo dvignili v navpični smeri in ga postavili poleg betonskega stožca. Posed (konsistenco) svežega betona smo določili tako, da smo izmerili razliko med višino posedenega betonskega stožca in višino kovinskega kalupa (slika 25).



Slika 25: Merjenje poseda betonskega stožca.

Preglednica 19: Stopnje poseda [49].

Stopnja	Posed
	[mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

#### 4.4.2 Razlez s posedom

Prav tako kot posed, je tudi razlez s posedom pokazatelj konsistence svežega betona. Pri samozgoščevalnem betonu smo naredili namesto preskusa poseda betona, kot ga izvajamo pri običajnem betonu, preskus razleza betona s posedom, po standardu SIST EN 12350-8:2010 [57]. V standardu SIST EN 206:2013 [49] pa so določene stopnje razleza s posedom (preglednica 20). Na gladko ravno ploščo smo postavili enak kovinski stožec, kot ga uporabljamo za preskus poseda betona (SIST EN 12350-2:2009). Nato smo v stožec vlili sveži beton brez kakšnegakoli zbijanja ali stresanja. Z enim gibom smo vertikalno dvignili stožec in začeli meriti čas  $t_{500}$ , dokler ni razlez betona dosegel krožnice s premerom 500 mm. Ko se je razlez betona umiril, smo izmerili največji premer razleza betona  $d_1$  in premer  $d_2$ , ki

je pravokoten na premer  $d_1$  (slika 26). Nato smo še preverili, ali so se na razlezenem betonu pojavili znaki segregacije. Razlez betona s posedom  $SF$  [mm] izrazimo kot povprečje premerov  $d_1$  in  $d_2$  (enačba 5).

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad (\text{enačba 5})$$

Pri čemer je:

$d_1$  – največji premer razleza [mm]

$d_2$  – premer razleza pravokotno na  $d_1$  [mm]



Slika 26: Merjenje razleza betona.

Preglednica 20: Stopnje razleza s posedom [49].

Stopnja	Razlez s posedom
	[mm]
SF 1	550 – 650
SF 2	660 – 750
SF 3	760 – 850

#### 4.4.3 Gostota

Gostota betona je odvisna od gostote posameznih uporabljenih materialov. Gostoto svežega betona smo določili na podlagi standarda SIST EN 12350-6:2009 [58], v kalupih dimenzij 150x150x150 mm. Sveži beton smo vgradili v kalup in ga zghostili z vibracijsko iglo. Ob zgoščevanju smo bili še posebej previdni, da ni prišlo do segregacije agregata ali izločanja cementnega mleka. V primeru samozgoščevalnega betona ni bilo potrebnega vibriranja pri vgradnji betona v kalup. Po zgoščevanju betona v kalupu, smo odstranili odvečni beton in vrhnji sloj poravnali z vrhom kalupa. Kalup skupaj z betonom smo stehali. Iz tega smo izračunali maso betona in določili gostoto  $D$  [kg/m<sup>3</sup>] na podlagi enačbe 6.

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

Pri čemer je:

$m_1$  – masa posode [kg]

$m_2$  – masa posode skupaj z betonom [kg]

$V$  – prostornina posode [m<sup>3</sup>]

#### 4.4.4 Vsebnost zraka

Do prisotnosti zraka v svežem betonu pride med samim mešanjem, vgradnjo betona in z različnimi dodatki, ki jih dodajamo betonu. Visoka vsebnost zraka lahko povzroči manjšo trdnost in poveča prepustnost betona, poveča lahko tudi zmrzlinško odpornost. V skladu s standardom SIST EN 12350-7:2009 [59] smo z manometrično metodo določili vsebnost zraka v svežem betonu. Sveži beton smo vgradili v posodo porozimetra (slika 27) v treh enako visokih slojih, pri čemer smo vsak sloj zgostili z vibracijsko iglo. Po zapolnitvi posode smo odstranili odvečni beton in vrhnji sloj poravnali z vrhom posode. Na posodo smo namestili pokrov porozimetra ter jo z vodo zapolnili preko ventila, dokler voda ni začela izhajati skozi drugi ventil. Oba ventila smo zaprli, ko je prenehal izhajati ujeti zrak iz posode porozimetra. Zatam smo z ročno črpalko začeli vnašati v zračno komoro zrak, dokler nismo dosegli začetnega tlaka. Z izpustnim ventilom smo nato izenačili tlak, odprli glavni zračni ventil in na merilniku odčitali vsebnost zraka v betonu.



Slika 27: Merjenje vsebnosti zraka s porozimetrom.

#### 4.4.5 Segregacija

Segregacija agregata je pojav, zaradi katerega pride do nehomogenosti betonske mešanice. Vzrok temu so lahko različna gostota, zrnastost in oblika agregata ter delujoča sila gravitacije. Temu se izognemo s pravilno zrnastostno sestavo agregata in pravilnim vgrajevanjem betona. Segregacijo smo določili tako vizualno (na strjenem beton) kot z izračuni (na svežem betonu). Za izračun segregacije odpadne plastike smo nekoliko priredili metodo [60], ki so jo

sicer uporabili za izračun segregacije lahkega agregata v primeru lahkega betona. Izračun segregacije smo izvedli z uporabo valjastih kalupov, izdelanih iz plastičnih cevi s skupno višino 160 mm (mali kalup) oz. 320 mm (veliki kalup) in premerom 100 mm. Plastična cev je bila predhodno narezana na dve enako visoki rezini (80 mm oz. 160 mm) in spojena z lepilnim trakom (slika 28). Kalup z vgrajenim betonom smo zvibrirali na vibracijski mizi. V primeru samozgoščevalnega betona kalupa nismo vibrirali. Po vibriranju smo odstranili presežek betona in ga izravnali z vrhom kalupa. Zatem smo počakali približno pol ure, preden smo razmaknili spodnji in zgornji del kalupa. Plastični agregat smo izločili s pomočjo sejanja na sitih in namakanja betona v vodi, kjer so plastična zrna splavala na vodno površino (slika 29). Maso plastičnega agregata iz zgornjega in spodnjega dela kalupa smo nato določili s predhodnim sušenjem do konstantne mase v sušilniku. Metoda ni primerna za plastični agregat, ki ima gostoto podobno ali višjo od vode, saj ni mogoče ločiti plastičnega agregata od naravnega s pomočjo razlike v gostoti.



Slika 28: Veliki in mali kalup.



Slika 29: Sejanje plastičnega agregata na sitih (levo) in namakanje v vodi (desno).

#### 4.5 Lastnosti strjenega betona

Lastnosti strjenega betona smo določali na vzorcih starih 28 dni po tem, ko smo jih negovali v klimatizirani komori pri standardnih pogojih v skladu s standardom SIST EN 12390-2:2009 [54].

#### 4.5.1 Gostota

Gostota strjenega betona vpliva na lastnosti strjenega betona. Beton z višjo gostoto je bolj zgoščen in ima običajno tudi boljše mehanske lastnosti in vodoneprepustnost [61]. Gostoto strjenega betona smo določili na podlagi standarda SIST EN 12390-7:2009 [62]. Na vzorcu betona v dostavljenem stanju smo določili maso strjenega betona. Na podlagi mase vzorca strjenega betona in njegovih dimenzij smo izračunali gostoto  $D$  [kg/m<sup>3</sup>] betona starega 28 dni po enačbi 7.

$$D = \frac{m}{V} \quad (\text{enačba 7})$$

Pri čemer je:

$m$  – masa preskušanca [kg]

$V$  – prostornina preskušanca [m<sup>3</sup>]

#### 4.5.2 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost je zelo pomembna mehanska lastnost strjenega betona, ki vpliva na njegovo kakovost in namen uporabe. Od trdnosti betona je odvisno, ali se bo beton uporabil v konstrukcijske ali nekonstrukcijske namene. Na podlagi standarda SIST EN 12390-3:2009 [63] smo določili tlačno trdnost strjenega betona. Vzorec betona smo postavili v stiskalnico, tako da je bila smer uvajanja sile pravokotna na smer vgrajevanja betona v kalup. Na stiskalnici (slika 30) smo določili največjo silo, pri kateri se je vzorec betona porušil. Tlačno trdnost  $f_c$  [MPa] betonskih preizkušancev starih 28 dni smo izračunali na podlagi dimenzij betonskih kock (150x150x150 mm) in največje sile po enačbi 8.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{enačba 8})$$

Pri čemer je:

$F$  – porušna sila [N]

$A_c$  – površina preizkušanca, na katerega deluje tlačna sila [mm<sup>2</sup>]



Slika 30: Preiskava tlačne trdnosti.

#### 4.5.3 Globina prodora vode

Globina prodora vode je zelo pomembna lastnost pri betonih, ki so izpostavljeni vodi oz. atmosferskim pojavom. Globino prodora vode pod pritiskom na strjenem betonu smo določili na podlagi standarda SIST EN 12390-8:2009 [64], standard SIST EN 1026:2008 [65] pa določa stopnje odpornosti betona proti prodoru vode, glede na največji prodor vode (preglednica 21). Preiskavo smo opravili na 28 dni starem betonu. Vzorec betona v obliki kocke (150x150x150 mm) smo po razkalupljanju nadržali z žičnato krtačo tam, kjer bo izpostavljen delovanju vodnega tlaka (opažena stranica kocke). Kocko smo nato postavili v za to namenjeno napravo (slika 31), kjer je nanjo deloval vodni tlak velikosti 500 kPa. Po 72 urah smo kocko vzeli iz naprave in jo na polovici razcepili pravokotno na površino, na katero je deloval vodni tlak. Rezultat preskusa je izražen kot največja globina prodora vode, izmerjena na razcepljeni površini.

Preglednica 21: Dovoljene vrednosti prodora vode [65].

Stopnja odpornosti proti prodoru vode	Največji dovoljeni prodor vode	Največji dovoljeni odklon
	[mm]	[mm]
PV – I	50	+15
PV – II	30	+10
PV – III	20	+5



Slika 31: Izpostavljenost vzorcev vodnemu tlaku.

#### 4.5.4 Odpornost proti karbonatizaciji

Karbonatizacija je pojav, kjer se zaradi  $\text{CO}_2$  iz zraka, ki reagira s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v betonu, tvorita kalcijev karbonat in voda. Pri tem se znižuje bazičnost betona in zaščita armature pred korozijo [10]. Globino pospešene karbonatizacije smo določevali na podlagi predstandarda FprCEN/TS 12390-12:2010 [66]. Preiskavo karbonatizacije smo začeli na 28 dni starih prizmah (100x100x400 mm). Sprva smo prizme hranili v laboratoriju 14 dni, nato pa njihove stranice (z izjemo dveh nasprotnih daljših stranic) zatesnili s parafinom. Zatesnjene vzorce smo hranili v karbonatizacijski komori, kjer je bila koncentracija  $\text{CO}_2$  4 %, temperatura 20 °C in relativna vlažnost 55 %. Po 56, 63, 72 in 100 dneh smo vsakič odlomili 50 mm kos prizme in ga testirali za globino karbonatizacije. Preostali del prizme pa smo zatesnili (slika 32) in ga vrnil nazaj v komoro. Na odlomljenem kosu prizme smo določili globino karbonatizacije s pomočjo indikatorske raztopine fenolftaleina. Globino karbonatizacije smo izmerili na obeh izpostavljenih stranicah na petih mestih. Debelina neobarvanega dela prizme predstavlja globino karbonatizacije.



Slika 32: Tesnjenje vzorcev s parafinom.

#### 4.5.5 Odpornost proti kloridom

Kloridi povzročajo propadanje betona in korozijo armature. Na podlagi standarda SIST-TS CEN/TS 12390-11:2010 [67] smo ugotavljali odpornost betona proti prodoru kloridov - enosmerna difuzija. Preskus smo izvajali na 28 dni starih valjih (100x200 mm). Valj smo razdelili na dva podvzorca, in sicer na »začetni vzorec«, ki se uporablja za določitev začetne



stopnje kloridov in na »profilni vzorec«, ki se uporablja za določanje profila kloridov po izpostavljenosti enosmerni difuziji kloridov. Na odrezani stranici začetnega vzorca smo z mletjem odvzeli 20 g vzorca ter ga poslali v laboratorij, kjer so na podlagi standarda EN 14629 določili začetno vrednost kloridov  $C_i$ . Profilni vzorec pa smo dali v vakuumsko komoro in ga izpostavili podtlaku (1-5 kPa) za 3 ure. Po 3 urah smo v komoro natočili demineralizirano vodo, tako da je bil vzorec hkrati izpostavljen podtlaku in potopljen v vodi za 1 uro (slika 33). Za tem smo dovolili vstop zraka v komoro in pustili vzorec potopljen v vodi, dokler ga nismo zatesnili (z izjemo odrezane stranice) z epoksi premazom (v roku 24 ur). Po zatesnitvi smo za 18 ur vzorec postavili v raztopino kalcijevega hidroksida. Nato smo vzorec postavili v 3 % raztopino NaCl za 90 dni (slika 33). Po 90 dneh, v roku 8 ur od odstranitve iz NaCl, smo vzorec mleli po plasteh (8 plasti). Iz vsake plasti smo odvzeli 5 g prahu (slika 34), ki smo ga poslali v laboratorij za določitev vrednosti kloridov po standardu EN 14629.



Slika 33: Vakuumska komora (levo) ter hranjenje vzorcev v raztopini NaCl (desno).



Slika 34: Mletje vzorca po plasteh.

#### 4.5.6 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju (NOZT)

Zmrzljinska odpornost je zelo pomembna lastnost, ki vpliva na trajnost betona. Cikli zmrzovanja in tajanja namreč povzročajo propadanje betona. Preizkus notranje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju smo naredili v skladu s standardom SIST 1026:2008 [65]. Preizkus smo opravljali na 28 dni starih prizmah (100x100x400 mm). Pred pričetkom preskusa smo najprej 4 dni prizme negovali v vodi s temperaturo 20 °C, ki je segala 2 cm nad zgornjo površino preizkušancev. Preizkušanci so bili nato v hladilni komori izpostavljeni

ciklom zmrzovanja in tajanja. Posamezen cikel sestoji iz 4 ur zmrzovanja (-20 °C) in 4 ur tajanja v vodi (+20 °C). Na začetku preskusa smo določili osnovno transversalno frekvenco nihanja  $v_{oi}$ , nato pa na vsakih 25 ciklov opravili ponovno meritev osnovne frekvence (slika 35). Osnovno meritev frekvence smo izvajali na popolnoma odtajanih preskušancih. Na podlagi osnovne transversalne frekvence preskušanca pred začetkom preskusa in po določenem številu ciklov, smo izračunali relativni dinamični modul  $P_n$  (enačba 9). Standard tudi določa povprečno in najnižjo vrednost relativnega dinamičnega modula elastičnosti (preglednica 22).

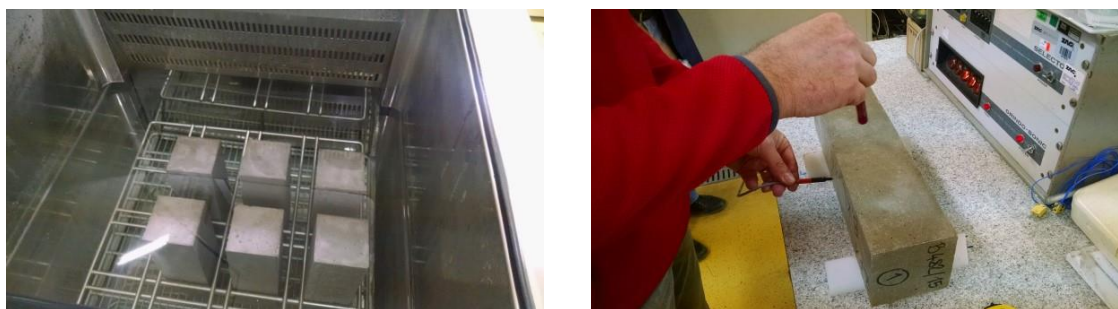
$$P_{ni} = \left( \frac{v_{ni}^2}{v_{oi}^2} \right) \times 100 \% \quad (\text{enačba 9})$$

Pri čemer je:

$P_{ni}$  - relativni dinamični modul elastičnosti i-tega preiskušanca po n ciklih zmrzovanja in tajanja [%]

$v_{ni}$  - vrednost osnovne transversalne frekvence nihanja i-tega preiskušanca po n ciklih zmrzovanja in tajanja [Hz]

$v_{oi}$  - vrednost osnovne transversalne frekvence nihanja i-tega preiskušanca pred začetkom preskusa [Hz]



Slika 35: Hranjenje vzorcev v hladilni komori (levo) in določevanje relativnega dinamičnega modula elastičnosti (desno).

Preglednica 22: Mejne vrednosti za NOZT [65].

<b>Povprečna vrednost relativnega dinamičnega modula <math>P_n</math></b>	$\geq 75 \%$
<b>Najnižja ugotovljena vrednost <math>P_{ni}</math></b>	$\geq 65 \%$

#### 4.5.7 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju (OPZT)

Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju je pomembna predvsem tam, kjer je beton izpostavljen soli (na primer ceste). Odpornost površine betona proti zmrzovanju in

tajanju ob prisotnosti talilnih soli smo določili na podlagi standarda SIST 1026:2008 [65]. Preiskavo smo opravili na 28 dni starih kockah (150x150x150 mm). Nato smo preskušance hranili 7 dni pri temperaturi 20 °C in 65 % relativni vlažnosti. Po tem obdobju smo na preskušance namestili okvir, kjer je stik površine preskušanca in stene okvirja tesnjen. Izpostavljena površina je bila opažena stranica kocke. V okvir smo nato natočili 3 % raztopino NaCl višine 3-5 mm (slika 36). Tak preskušanec smo hranili v komori, kjer je izpostavljen ciklom zmrzovanja (-20 °C), ki traja 16 do 18 ur in tajanja (+20 °C), ki traja 6 do 8 ur. Na vsakih 5 ciklov pa se je določila količina odluščenega materiala. Odluščen material se je zbral in prefiltriral na filtrskem papirju, nato pa posušil v sušilniku do stalne mase. Na podlagi izračunane mase in ploščine preiskovanega preskušanca (določene s planimetriranjem) se je določila količina odluščenega materiala. Standard tudi določa mejne vrednosti odluščenega materiala po 10 ali 25 ciklih (preglednica 23).

Preglednica 23: Merila za ocenjevanje OPZT [65].

<b>Rezultat preskusa</b>	<b>Osnovne mejne vrednosti po 10 ali 25 ciklih</b>	<b>Skrajne mejne vrednosti po 10 ali 25 ciklih</b>	<b>Dovoljene mejne vrednosti po 20 ali 50 ciklih</b>
	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]	[mg/mm <sup>2</sup> ]
<b>Povprečje</b>	0,20	0,35	0,40
<b>Posamezna vrednost</b>	0,25	0,40	0,50



Slika 36: Vzorci izpostavljeni raztopini NaCl (levo) in izpiranje odluščenega materiala (desno).

## 5 REZULTATI IN ANALIZA

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati opravljenih preiskav in primerjava primerjalnega betona (etalona) z betonom, ki vsebuje odpadno plastiko.

### 5.1 Karakterizacija odpadne plastike

#### 5.1.1 Zrnavostna sestava

##### 5.1.1.1 Recythen HDPE, Recythen PO in Recythen PP10

Odpadne plastike Recythen HDPE, Recythen PO in Recythen PP10 imajo enake krivulje zrnivosti (preglednici 24 in 25). So v obliki granul ter imajo enovito zrnavost. Granule so zaobljene in gladke oblike v velikosti 4-5 mm (grafikon 26). Zrnavost granule uvršča med grobi agregat (nad 4 mm) [10].

Preglednica 24: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen HDPE, PO in PP10.

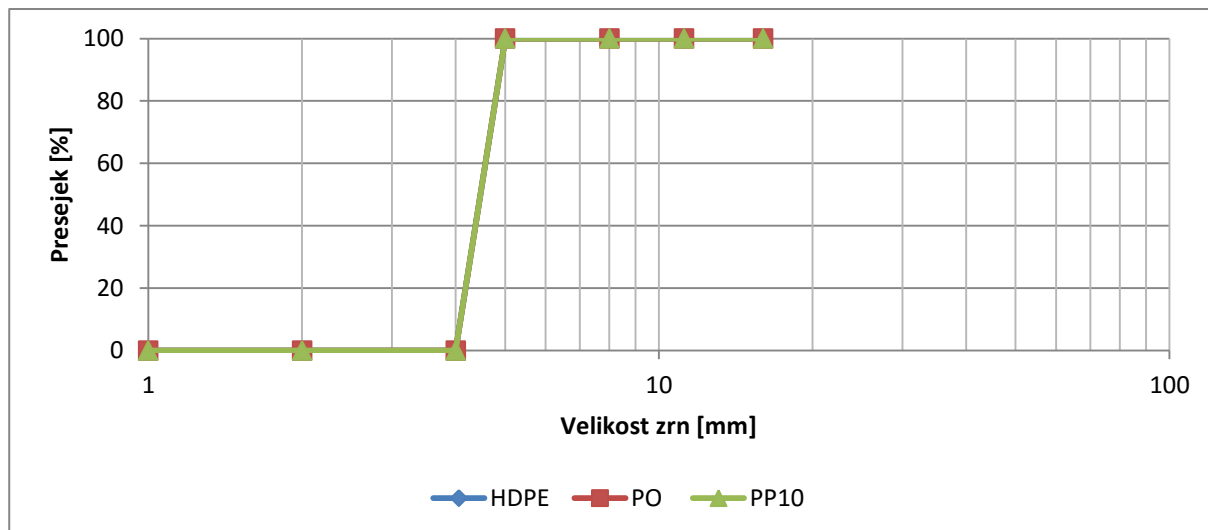
<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	100
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0

Preglednica 25: Zrnavostna sestava Recythen HDPE, PO in PP10.

<b>Sito [mm]</b>	<b>Ostane na situ [g]</b>	<b>Ostane na situ [%]</b>	<b>Presejek [%]</b>
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	0	0	100
5	0	0	100
4	100	100	0
2	0	0	0
1	0	0	0
0,5	0	0	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0

se nadaljuje...

0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0



Grafikon 26: Krivulja zrnivosti Recythen HDPE, PO in PP10.

### 5.1.1.2 Recythen LD AGG in Recythen PO AGG

Odpadni plastiki Recythen LD AGG in Recythen PO AGG imata zelo podobni krivulji zrnivosti (preglednice 26 - 29). Zrna so nepravilnih oblik v velikosti med 0,5 mm in 11,2 mm (grafikon 27). Pri obeh plastikah je večina zrn med 4 in 8 mm (približno 65 %).

Preglednica 26: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen LD AGG.

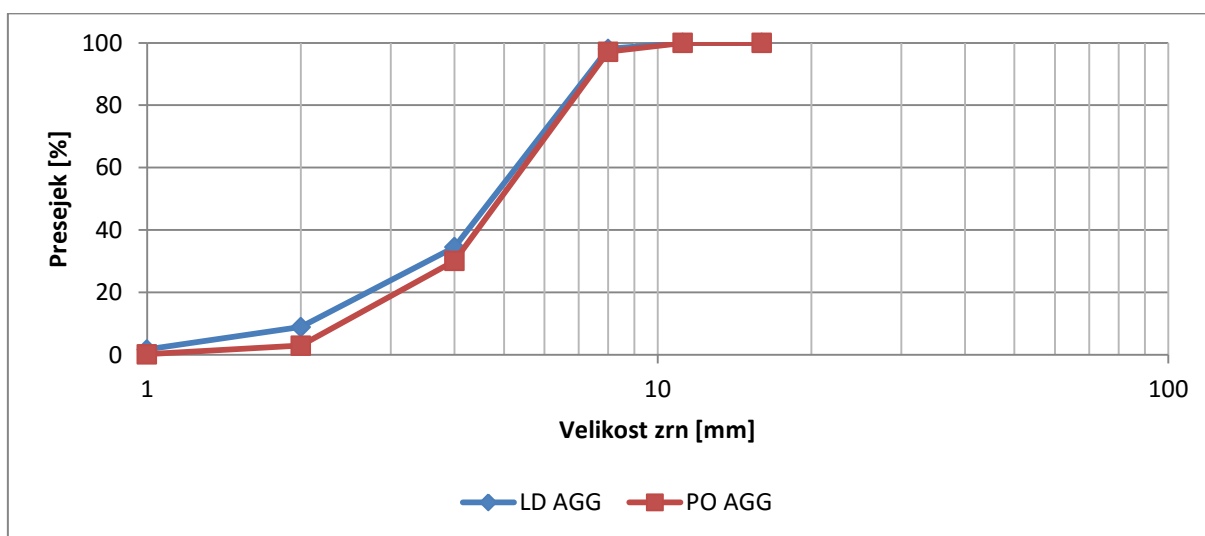
<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	108,9
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0

Preglednica 27: Zrnovostna sestava Recythen LD AGG.

Sito [mm]	Ostanek na situ [g]	Ostanek na situ [%]	Presejek [%]
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	2,1	1,9	98
4	69,2	63,5	35
2	27,9	25,6	9

se nadaljuje...

1	7,8	7,2	2
0,5	1,9	1,7	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0
0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0



Grafikon 27: Krivulja zrnastosti Recythen LD AGG in PO AGG.

Preglednica 28: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Recythen PO AGG.

<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	108,0
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0

Preglednica 29: Zrnavostna sestava Recythen PO AGG.

Sito [mm]	Ostanek na situ [g]	Ostanek na situ [%]	Presejek [%]
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	3,1	2,9	97
4	72,4	67,0	30
2	29,3	27,1	3

se nadaljuje...

1	3	2,8	0
0,5	0,2	0,2	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0
0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0

### 5.1.1.3 Mahlgut PP in Mahlgut HDPE

Opadni plastiki Mahlgut PP in Mahlgut HDPE imata podobni krivulji zrnivosti (preglednice 30 - 33). Pri obeh plastikah so zrna velikosti od 1 do 11,2 mm (grafikon 28). Zrna v obliki kosmičev so nepravilne, ploščate oblike in imajo zaradi tega dokaj neugodno obliko. Pri obeh je večina zrn med 4 in 8 mm (približno 55 % oz. 74 %).

Preglednica 30: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Mahlgut PP.

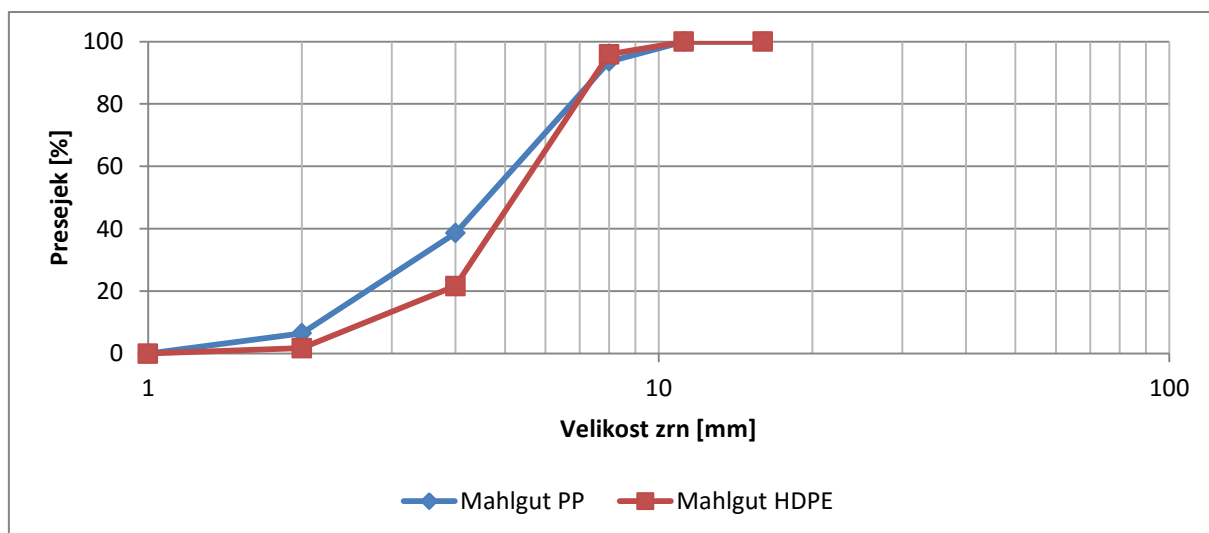
<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	81,3
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0

Preglednica 31: Zrnovostna sestava Mahlgut PP.

Sito [mm]	Ostanek na situ [g]	Ostanek na situ [%]	Presejek [%]
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	5,2	6,4	94
4	44,7	55,0	39
2	26,1	32,1	7
1	5,3	6,5	0
0,5	0	0	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0

se nadaljuje...

0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0



Grafikon 28: Krivulja zrnivosti Mahlgut PP in HDPE.

Preglednica 32: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri Mahlgut HDPE.

<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	85,4
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0

Preglednica 33: Zrnovostna sestava Mahlgut HDPE.

Sito [mm]	Ostanek na situ [g]	Ostanek na situ [%]	Presejek [%]
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	3,5	4,1	96
4	63,4	74,2	22
2	17	19,9	2
1	1,5	1,8	0
0,5	0	0	0
0,25	0	0	0
0,125	0	0	0

se nadaljuje...



0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0

#### 5.1.1.4 PVC

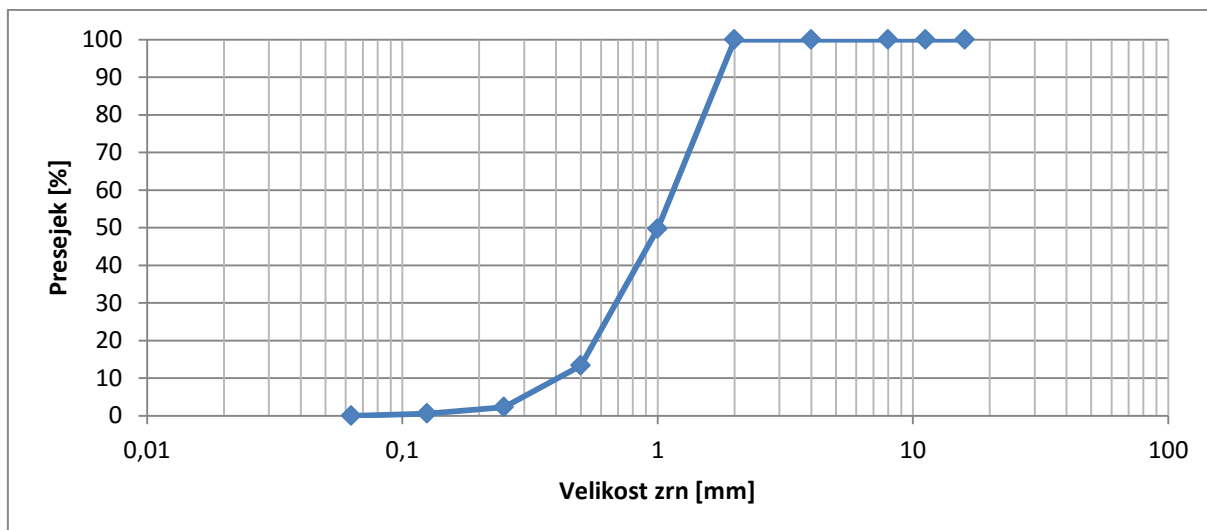
Odpadna plastika PVC ima zrna velikosti med 0 in 2 mm (preglednici 34 in 35). Zrna so oglate oblike. Večina zrn (50 %) je med velikostjo 1 in 2 mm (grafikon 29). Odstotek finih delcev pod 0,063 mm je 0,6 %. PVC zrna se s tako zrnastostjo uvrščajo med droben agregat (pod 4 mm) [10].

Preglednica 34: Odstotek finih delcev pod 0,063 mm pri PVC.

<b>Masa vzorca</b>	$m_1$ [g]	117,4
<b>Masa vzorca po pranju</b>	$m_2$ [g]	116,7
<b>Masa finih delcev</b>	$m_1 - m_2$ [g]	0,7
<b>Masa vzorca preostalega na dnu posode</b>	$P$ [g]	0
<b>Odstotek finih delcev pod 0,063 mm</b>	$f$ [%]	0,6

Preglednica 35: Zrnastostna sestava PVC.

Sito [mm]	Ostane na situ [g]	Ostane na situ [%]	Presejek [%]
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	0	0	100
4	0	0	100
2	0	0	100
1	59	50,6	50
0,5	42,7	36,6	13
0,25	13	11,1	2
0,125	2	1,7	1
0,063	0	0	0
ostanek na dnu posode	0	0	0



Grafikon 29: Krivulja zrnivosti PVC.

### 5.1.2 Prostorninska masa zrn

Preiskava prostorninske mase zrn je pokazala, da imajo tudi odpadne plastike istega tipa precej različno prostorninsko maso (preglednica 36-39). Najvišjo prostorninsko maso ima plastika PVC ( $970 \text{ kg/m}^3$ ), najnižjo pa Mahlgut PP in HDPE ( $790 \text{ kg/m}^3$ ). V primerjavi z uporabljenim naravnim agregatom, ki ima prostorninsko maso okoli  $2765 \text{ kg/m}^3$ , so plastike lažje za okoli 65 – 70 % (grafikon 30).

Prostorninska masa plastik je manjša kot prostorninska masa vode ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ), zato plastike plavajo na vodi (slika 37). Izjema je plastika PVC, ki ima zelo podobno prostorninsko maso kot voda, zato del te plastike potone, del pa plava na vodi. Vse to lahko nakazuje na morebiten problem segregacije plastike v betonu.



Slika 37: Plavanje plastik Recythen na vodi.

Prostorninska masa plastičnega agregata se lahko primerja s prostorninsko maso lahkih agregatov (ekspandirane gline itd.), ki imajo običajno prostorninsko maso med 560 in 1120 kg/m<sup>3</sup>. Ker plastični agregat v primerjavi z lahkim agregatom ni vodovpojen, ni potrebna predhodna navlažitev agregata [10].

Uporabljen metoda določevanja prostorninske mase zrn plastike v vodi s piknometrom, ki se sicer uporablja za lahki agregat, ni najbolj primerna za karakterizacijo plastike. Z dodatnimi ukrepi smo zagotovili, da plastika v piknometru ni splavala na površje.

### 5.1.2.1 Recythen HDPE, Recythen PO in Recythen PP10

Preglednica 36: Prostorninska masa Recythen HDPE, PO in PP10.

	Oznaka	Enota	T <sub>vode</sub> [°C]	HDPE	PO	PP10
<b>Površinsko suh, vodozasičen vzorec</b>	$m_1$	g	/	204,7	199,8	201,5
<b>Piknometer + vzorec + voda</b>	$m_2$	g	25	1993,8	1992,5	1987,0
<b>Piknometer + voda</b>	$m_3$	g	25	2019,8	2019,8	2019,2
<b>Suh vzorec</b>	$m_4$	g	/	204,1	198,8	200,6
<b>Navidezna prostorninska masa</b>	$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,88	0,88	0,86
<b>Prostorninska masa suhega vzorca</b>	$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,88	0,87	0,86
<b>Prostorninska masa nasičenega površinsko suhega vzorca</b>	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,88	0,88	0,86

### 5.1.2.2 Recythen LD AGG in Recythen PO AGG

Preglednica 37: Prostorninska masa Recythen LD AGG in PO AGG.

	Oznaka	Enota	T <sub>vode</sub> [°C]	LD AGG	PO AGG
<b>Površinsko suh, vodozasičen vzorec</b>	$m_1$	g	/	124,3	121,3
<b>Piknometer + vzorec + voda</b>	$m_2$	g	25	1989,3	1994,1
<b>Piknometer + voda</b>	$m_3$	g	25	2013,3	2019,2
<b>Suh vzorec</b>	$m_4$	g	/	121,3	120,1
<b>Navidezna prostorninska masa</b>	$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,83	0,83
<b>Prostorninska masa suhega vzorca</b>	$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,82	0,82
<b>Prostorninska masa nasičenega površinsko suhega vzorca</b>	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,84	0,83

### 5.1.2.3 Mahlgut PP in Mahlgut HDPE

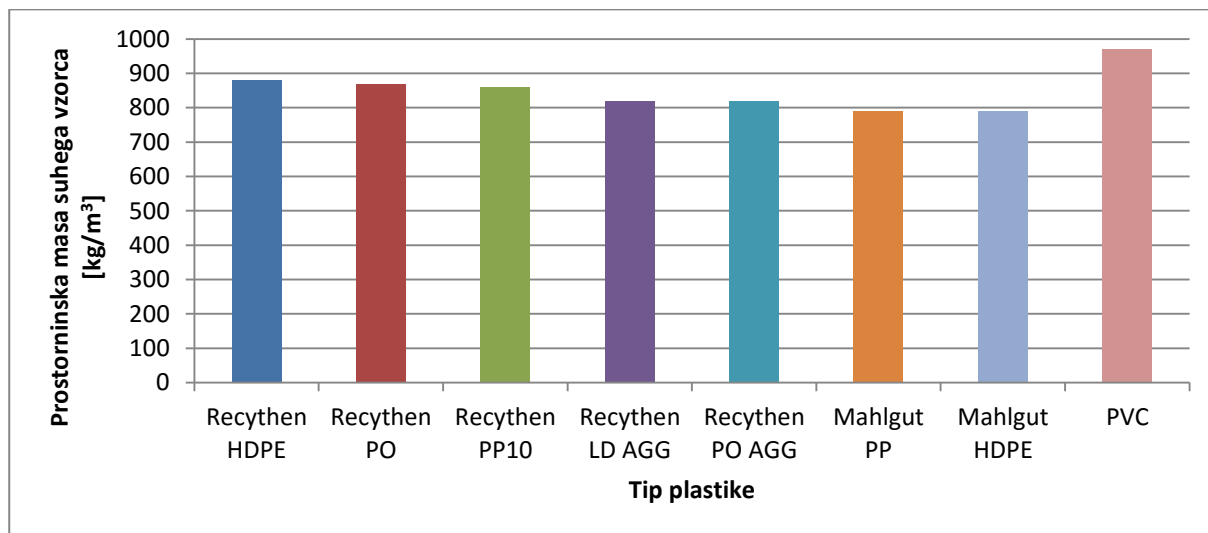
Preglednica 38: Prostorninska masa Mahlgut PP in HDPE.

	Oznaka	Enota	T <sub>vode</sub> [°C]	PP	HDPE
<b>Površinsko suh, vodozasičen vzorec</b>	$m_1$	g	/	87,3	86,9
<b>Piknometer + vzorec + voda</b>	$m_2$	g	25	1999,7	2001,9
<b>Piknometer + voda</b>	$m_3$	g	25	2019,2	2023
<b>Suh vzorec</b>	$m_4$	g	/	84,3	85,4
<b>Navidezna prostorninska masa</b>	$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,81	0,80
<b>Prostorninska masa suhega vzorca</b>	$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,79	0,79
<b>Prostorninska masa nasičenega površinsko suhega vzorca</b>	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,82	0,80

### 5.1.2.4 PVC

Preglednica 39: Prostorninska masa PVC.

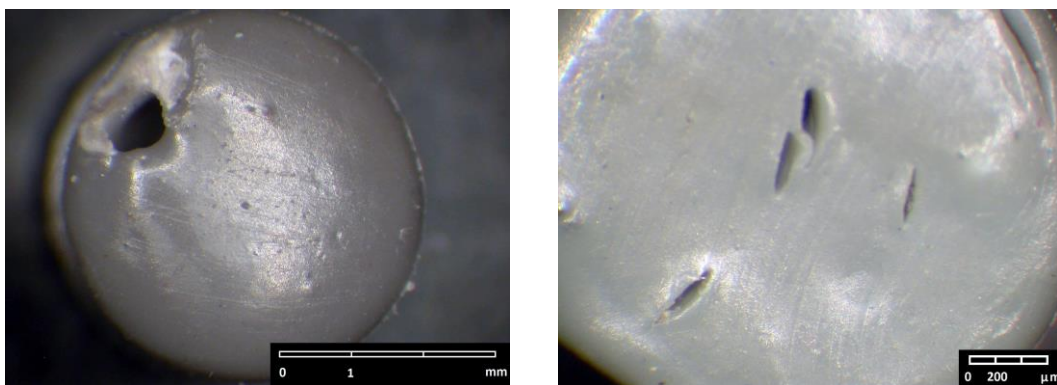
	Oznaka	Enota	T <sub>vode</sub> [°C]	Vrednost
<b>Površinsko suh, vodozasičen vzorec</b>	$m_1$	g	/	268,4
<b>Piknometer + vzorec + voda</b>	$m_2$	g	25	2034,6
<b>Piknometer + voda</b>	$m_3$	g	25	2023
<b>Suh vzorec</b>	$m_4$	g	/	250,3
<b>Navidezna prostorninska masa</b>	$\rho_a$	Mg/m <sup>3</sup>	/	1,05
<b>Prostorninska masa suhega vzorca</b>	$\rho_{rd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	0,97
<b>Prostorninska masa nasičenega površinsko suhega vzorca</b>	$\rho_{ssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	/	1,04



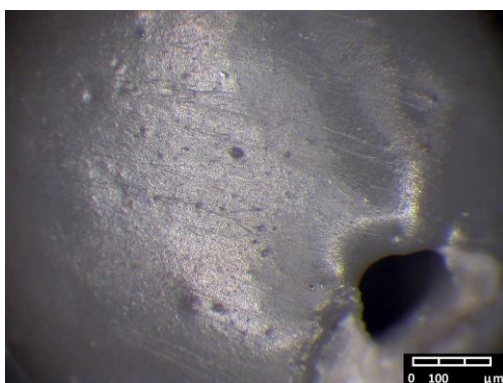
Grafikon 30: Prostorninska masa zrn suhega vzorca odpadne plastike.

### 5.1.3 Površina zrn pod mikroskopom

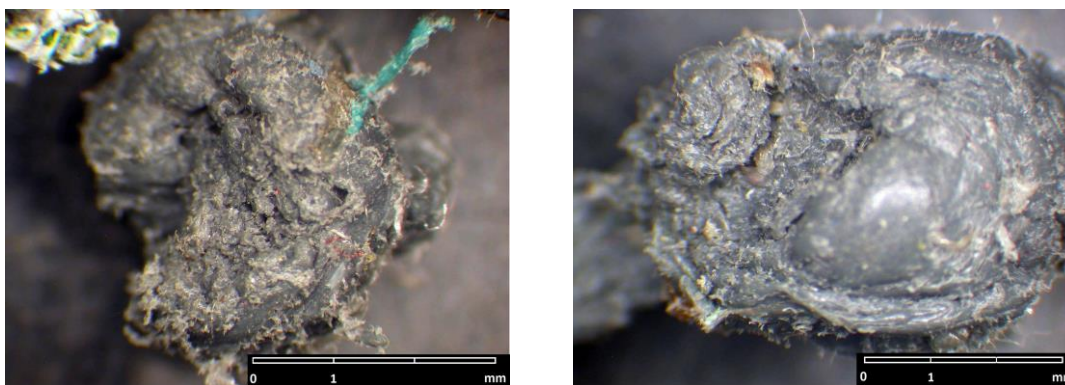
Plastična zrna tipa Recythen HDPE, PO in PP10 imajo gladko površino (sliki 38 in 39). Gladka površina zrn agregata omogoča boljšo obdelavnost betona. Plastični agregati Recythen LD AGG, PO AGG, Mahlgut HDPE, PP ter PVC imajo grobo, hrapavo površino (slika 40, 41 in 42). Groba površina zrn agregata lahko povzroči slabšo obdelavnost betona, vendar ima tak beton ponavadi višjo trdnost zaradi boljšega stika med agregatom in cementnim kamnom.



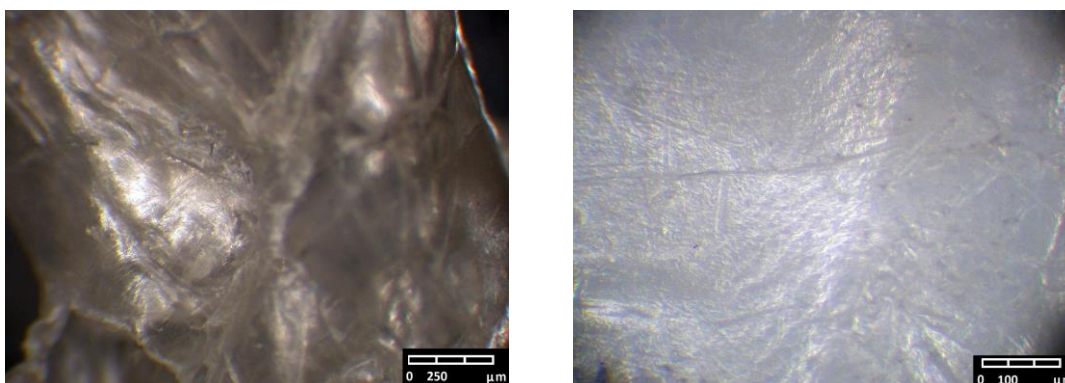
Slika 38: Recythen HDPE (levo) in PO (desno).



Slika 39: Recythen PP10.



Slika 40: Recythen LD AGG (levo) in PO AGG (desno).



Slika 41: Mahlgut PP (levo) in HDPE (desno).



Slika 42: PVC.

## 5.2 Preiskave betona (1. del)

### 5.2.1 Preiskave svežega betona

#### 5.2.1.1 Posed

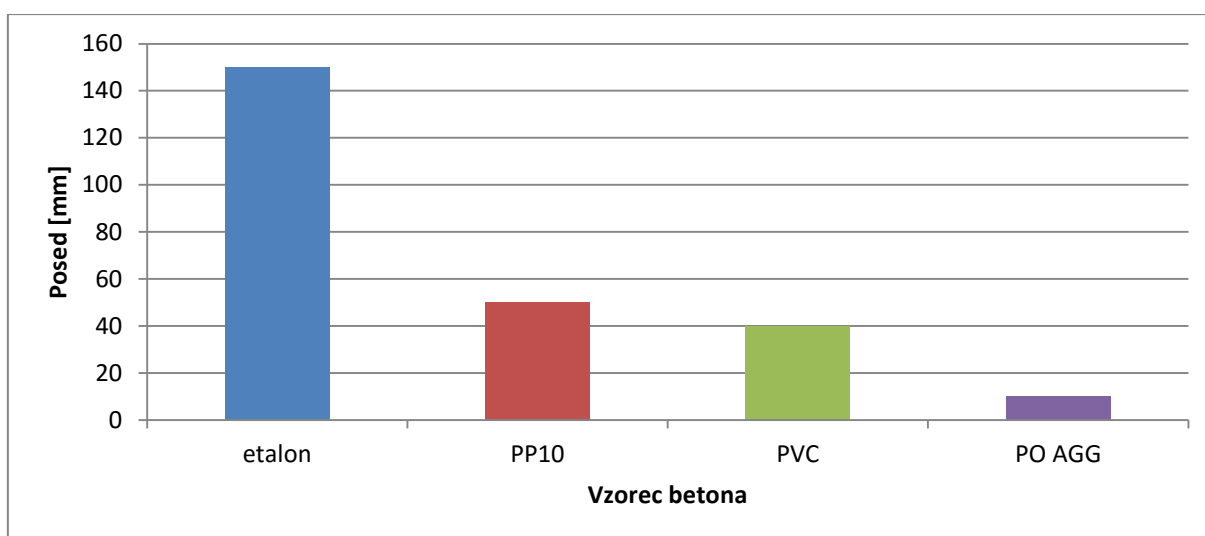
Betoni s plastiko so dosegli bistveno manjši posed, kot primerjalni beton brez plastike (preglednica 40). V primeru betona PP10 smo pričakovali sicer nekoliko večji posed od etalona, predvsem zaradi okrogle, gladke oblike plastike in hidrofobne narave plastike (slika 43). Mogoč vzrok za manjši posed je v manjši gostoti plastike, saj se v primerjavi z naravnim agregatom manj poseda pod lastno težo. Vseeno pa se lahko opazi, da ima beton PP10 zaradi gladke površine zrn plastike boljšo obdelavnost kot pa betona PVC in PO AGG (grafikon 31). Najnižjo vrednost je dosegel beton PO AGG (10 mm), kar je verjetno dodatno posledica nepravilne, grobe oblike zrn. Posed je bil v tem primeru za kar 93 % manjši, kot pri etalonu. Vsi betoni s plastiko so dosegli razred poseda S1 [49]. Rezultati so primerljivi tudi z rezultati iz literature [29, 27, 30, 28].

Preglednica 40: Posed betonskega stožca.

Oznaka	Posed betonskega stožca	Razred poseda [49]
	$\Delta h$ [mm]	
etalon	150	S3
PP10	50	S1
PVC	40	S1
PO AGG	10	S1



Slika 43: Posed betona etalon (levo) in betona PP10 (desno).



Grafikon 31: Posed betonskega stožca.

### 5.2.1.2 Gostota

Izračun gostote je pokazal, da se gostota betona s plastiko zmanjša, v primerjavi z etalonom (preglednica 41). Vzrok temu je manjša gostota plastike v primerjavi z naravnim agregatom (65 – 70 % manjša). Najnižjo gostoto ima beton PP10 ( 2240 kg/m<sup>3</sup>), ki je tako približno 7 % nižja kot pri etalonu, ki ne vsebuje plastike (grafikon 32). Manjša gostota betonov s plastiko lahko kasneje pomeni tudi slabše mehanske lastnosti betona in večjo prepustnost betona. V literaturi so prišli do podobnih rezultatov [29, 27, 30].

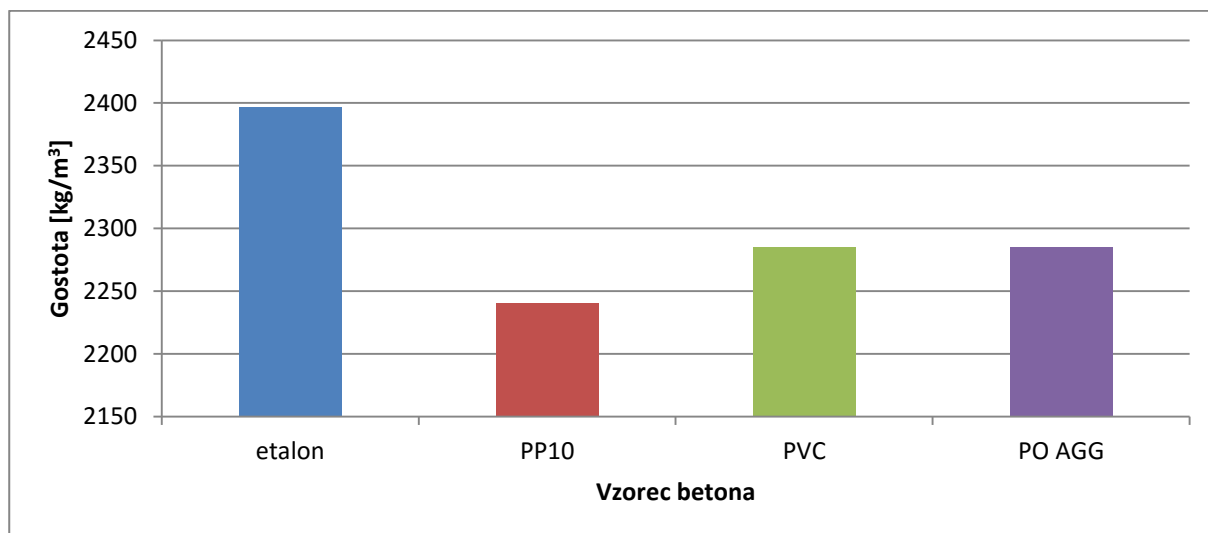
Preglednica 41: Gostota svežega betona.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
etalon	8,089	0,003375	2397
PP10	7,560	0,003375	2240
PVC	7,713	0,003375	2285

se nadaljuje...



PO AGG	7,713	0,003375	2285
--------	-------	----------	------



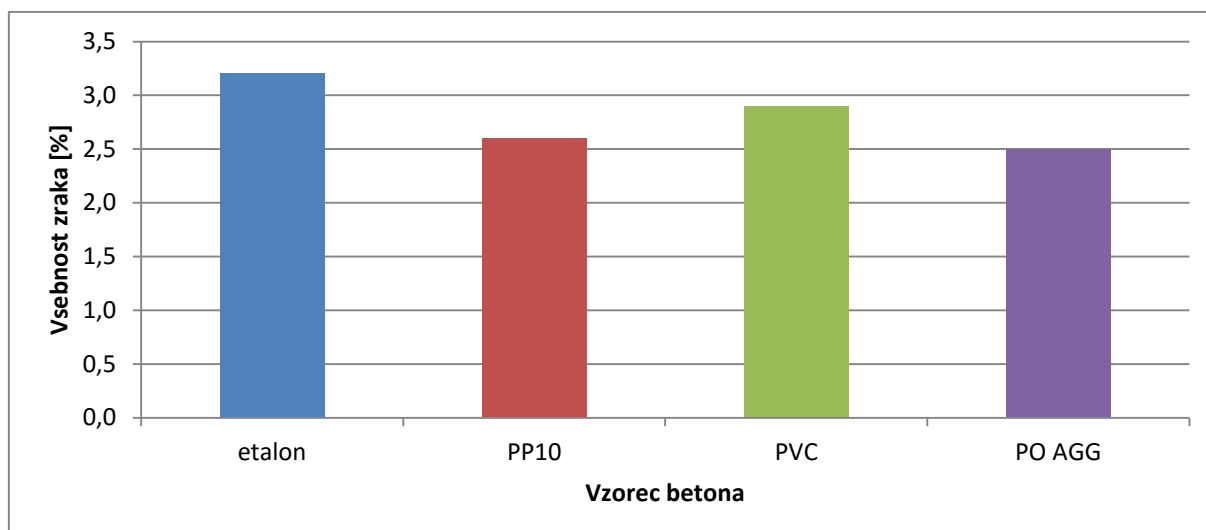
Grafikon 32: Gostota svežega betona.

### 5.2.1.3 Vsebnost zraka

Z dodatkom plastičnega agregata je vsebnost zraka v betonu upadla (preglednica 42). Najvišjo vsebnost zraka je dosegel etalon (3,2 %), medtem ko ima najnižjo vsebnost zraka beton PO AGG (2,5 %), ki je tako približno 22 % manjša kot pri etalonu (grafikon 33).

Preglednica 42: Vsebnost zraka.

Oznaka	Vsebnost zraka
	$\Delta\rho$ [%]
etalon	3,2
PP10	2,6
PVC	2,9
PO AGG	2,5



Grafikon 33: Vsebnost zraka.

## 5.2.2 Preiskave strjenega betona

### 5.2.2.1 Gostota

Rezultati gostote (preglednice 43 – 46) so primerljivi z rezultati, ki smo jih dobili pri svežem betonu. Izračun gostote strjenega betona je namreč pokazal, da je gostota betona s plastiko manjša, kot pri etalonu (grafikon 34). Rezultati so skladni z rezultati iz literature [29, 27, 30]. Vzrok temu je manjša gostota plastike v primerjavi z naravnim agregatom. Beton z uporabljeno količino odpadne plastike (10 %) in njeno gostoto še ne dosega gostote lahkih betonov ( $2100 \text{ kg/m}^3$ ) [49]. Če bi želeli doseči gostoto lahkega betona, bi morali povečati količino plastičnega agregata v betonu. Vseeno pa manjša gostota betona omogoča manjšo potrebo po armaturi v betonu, saj je lastna teža betonske konstrukcije manjša.

Preglednica 43: Gostota betona etalon po 28 dneh.

Oznaka	Masa betona	Prostornina betona	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
etalon_1	8,099	0,003375	2400
etalon_2	8,086	0,003375	2396
etalon_3	8,042	0,003375	2383
<b>Povprečje:</b>			2393

Preglednica 44: Gostota betona PP10 po 28 dneh.

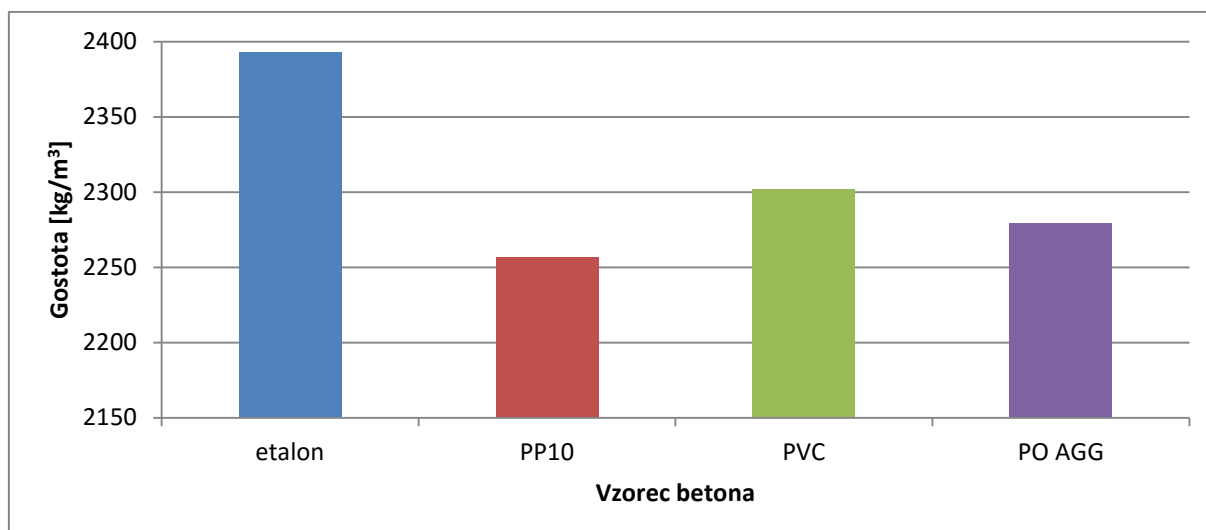
Oznaka	Masa betona	Prostornina betona	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_1	7,580	0,003375	2246
PP10_2	7,646	0,003375	2265
PP10_3	7,622	0,003375	2258
<b>Povprečje:</b>			2257

Preglednica 45: Gostota betona PVC po 28 dneh.

Oznaka	Masa betona	Prostornina betona	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PVC_1	7,758	0,003375	2299
PVC_2	7,728	0,003375	2290
PVC_3	7,821	0,003375	2317
<b>Povprečje:</b>			2302

Preglednica 46: Gostota betona PO AGG po 28 dneh.

Oznaka	Masa betona	Prostornina betona	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PO AGG_1	7,718	0,003375	2287
PO AGG_2	7,680	0,003375	2276
PO AGG_3	7,683	0,003375	2276
<b>Povprečje:</b>			2280



Grafikon 34: Povprečna gostota betona po 28 dneh.

### 5.2.2.2 Tlačna trdnost

Preizkus tlačne trdnosti je po 28 dneh pokazal, da se z vključitvijo plastike tlačna trdnost betona zmanjša (preglednica 47 - 50). Porušitev vseh kock je bila pravilna. Trdnost je upadla za en do dva trdnostna razreda. Pri betonu PP10 in PVC je trdnost manjša za 15 %, v primerjavi z etalonom (grafikon 35). Najbolj je trdnost upadla pri betonu PO AGG, ki je bila za 25 % manjša kot pri etalonu. V dostopni literaturi so navedeni podobni rezultati [29, 27, 30, 32, 31]. Pri betonu PO AGG bi sicer pričakovali višjo trdnost, v primerjavi z betonoma PP10 in PVC, predvsem zaradi izrazito nepravilne oblike in grobe površine zrn plastičnega agregata. Verjetna vzroka za manjše tlačne trdnosti sta slabša sprijemnost med cementnim kamnom in plastičnim agregatom ter manjša trdnost plastičnega agregata, v primerjavi z naravnim agregatom. Na porušenih vzorcih smo lahko opazili, da so nekatera plastična zrna izpadla iz cementne matrice (zrna se niso porušila), kar še dodatno kaže na slab stik med plastičnimi zrn in cementnim kamnom, kljub temu da imajo plastična PO AGG zrna grobo površino. V primeru betona PP10 je bil slab stik s cementnim kamnom pričakovan zaradi gladke površine plastičnih zrn (slika 44).

Preglednica 47: Tlačna trdnost betona etalon.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
etalon_1	22500	933	41,5
etalon_2	22500	923	41,0
etalon_3	22500	943	41,9

se nadaljuje...

<b>Povprečje:</b>			41,5
-------------------	--	--	------

Preglednica 48: Tlačna trdnost betona PP10.

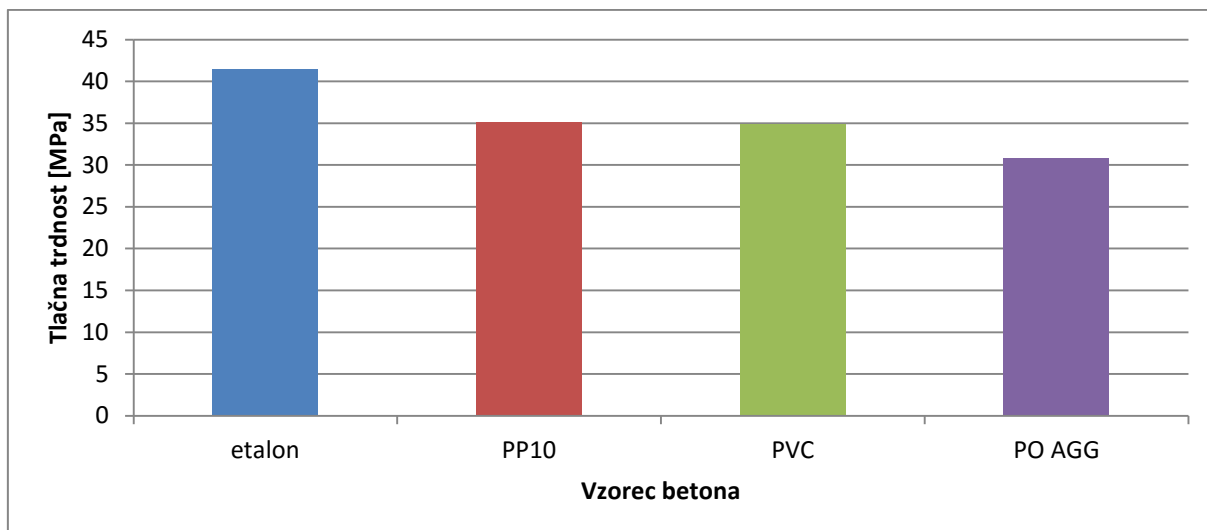
Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
PP10_1	22500	769	34,2
PP10_2	22500	803	35,7
PP10_3	22500	796	35,4
<b>Povprečje:</b>			35,1

Preglednica 49: Tlačna trdnost betona PVC.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
PVC_1	22500	763	33,9
PVC_2	22500	787	35,0
PVC_3	22500	803	35,7
<b>Povprečje:</b>			34,9

Preglednica 50: Tlačna trdnost betona PO AGG.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
PO AGG_1	22500	702	31,2
PO AGG_2	22500	693	30,8
PO AGG_3	22500	685	30,4
<b>Povprečje:</b>			30,8



Grafikon 35: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.



Slika 44: Slab stik med plastičnim agregatom in cementnim kamnom.

### 5.2.2.3 Segregacija

Na svežih in strjenih betonskih kockah smo opazili znake segregacije (slika 45). Pri vibriranju betona so delci plastike splavali na površje. Na neopaženi zgornji stranici kocke smo lahko opazili delce plastike, ki so gledali ven iz cementne matrice. To je verjetno posledica tega, da ima plastika precej manjšo gostoto (pod  $1000 \text{ kg/m}^3$ ), kot naravni agregat.



Slika 45: Segregacija plastike Recythen PO AGG (levo) in Recythen PP10 (desno).

## 5.3 Preiskave betona (2. del)

### 5.3.1 Preiskave svežega betona

#### 5.3.1.1 Posed

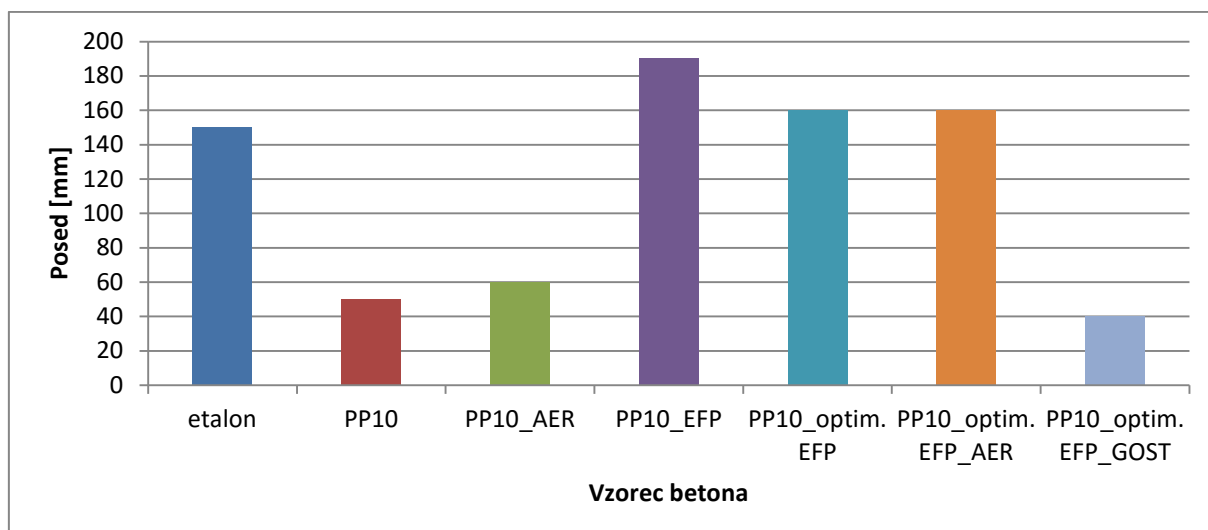
Rezultati poseda betonskega stožca so pokazali, da uporaba aeranta sicer vpliva na večji posed, vendar beton še ne dosega poseda etalona (preglednica 51). Z aerantom smo tako pri betonu PP10\_AER dosegli 20 % večji posed, v primerjavi z betonom PP10 (grafikon 36). Z uporabo optimalne količine elektrofiltrskega pepela smo, zaradi njegove sferične oblike, dosegli podoben posed (160 mm) kot pri etalonu (slika 46). S tem je dosegel stopnjo poseda S4 [49]. Z gostilcem se je pri betonu PP10\_optim. EFP\_GOST posed precej zmanjšal, saj je lastnost gostilca, da zadržuje vodo oz. zmanjšuje izločanje vode iz betona in s tem preprečuje možnost segregacije. Tako je beton zaradi gostilca sicer dosegel najnižji posed (40 mm), vendar s tem ni poslabšal subjektivnega občutka obdelavnosti betona.

Preglednica 51: Posed betonskega stožca.

Oznaka	Posed betonskega stožca	Stopnja poseda [49]
	$\Delta h$ [mm]	
PP10_AER	60	S2
PP10_EFP	190	S4
PP10_optim. EFP	160	S4
PP10_optim. EFP_AER	160	S4
R PP10_optim. EFP_GOST	40	S1



Slika 46: Posed betona PP10\_AER (levo) in betona PP10\_optim. EFP (desno).



Grafikon 36: Posed betonskega stožca.

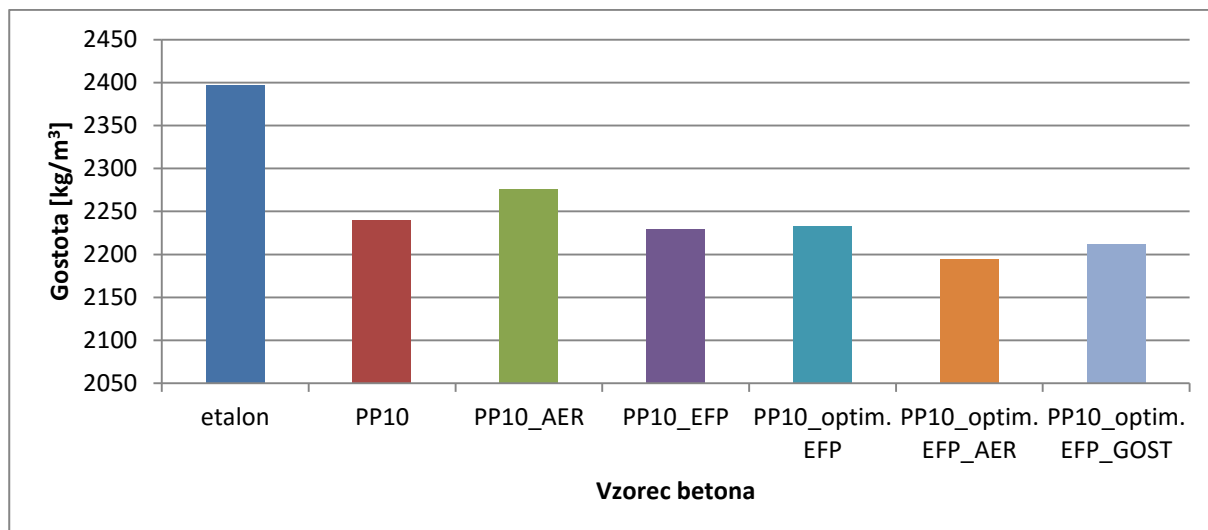
### 5.3.1.2 Gostota

Izračun gostote svežega betona je pokazal, da je gostota betona odvisna od vrste in količine uporabljenih dodatkov (preglednica 52). Z uporabo aeranta je gostota betona PP10\_optim. EFP\_AER upadla, saj se je v betonsko mešanico vneslo dodatne zračne pore. Ta pojav pa ni razviden pri betonu PP10\_AER, kar je lahko posledica same nehomogenosti betona. Z uporabo elektrofiltrskega pepela in gostilca se je gostota betona, v primerjavi z betonom PP10, nekoliko zmanjšala (grafikon 37).

Preglednica 52: Gostota svežega betona.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_AER	7,681	0,003375	2276
PP10_EFP	7,523	0,003375	2229
PP10_optim. EFP	7,534	0,003375	2232
PP10_optim. EFP_AER	7,406	0,003375	2194
PP10_optim. EFP_GOST	7,464	0,003375	2212





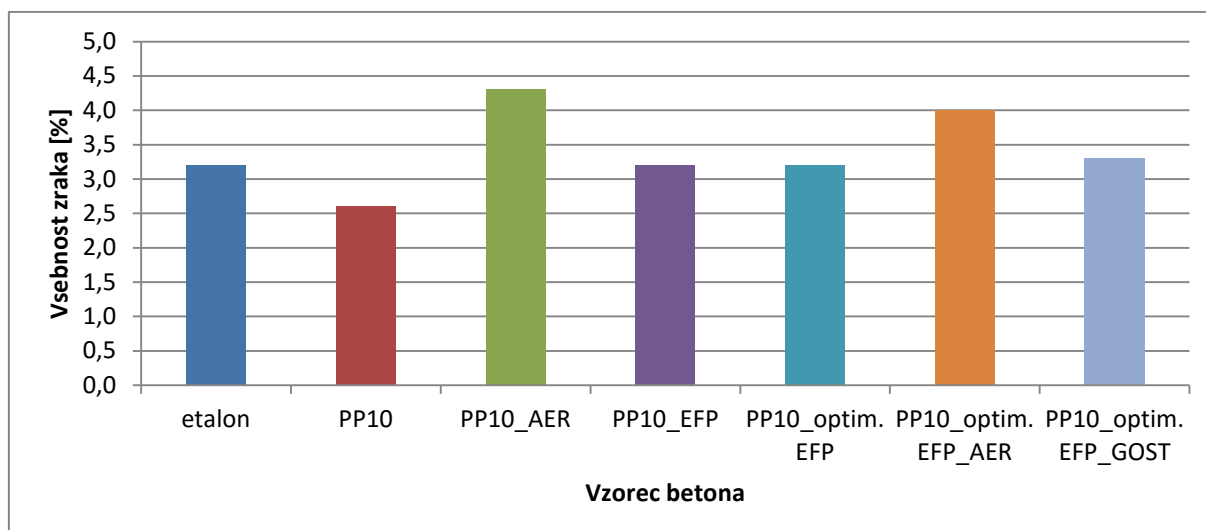
Grafikon 37: Gostota svežega betona.

### 5.3.1.3 Vsebnost zraka

Z uporabo elektrofiltrskega pepela smo dosegli enako vsebnost zraka kot pri etalonu (3,2 %) in nekoliko večjo kot pri betonu PP10 (preglednica 53). Z dodatkom aeranta se je vsebnost zraka pričakovano povečala (4,3 %) in je večja za 25 % v primerjavi z betonom z elektrofiltrskim pepelom (grafikon 38). Tak beton ima lahko kasneje slabšo tlačno trdnost in boljšo zmrzlino odpornost. Uporaba gostilca je minimalno vplivala na povečanje vsebnosti zraka (3,3 %).

Preglednica 53: Vsebnost zraka.

Oznaka	Vsebnost zraka
	$\Delta p$ [%]
PP10_AER	4,3
PP10_EFP	3,2
PP10_optim. EFP	3,2
PP10_optim. EFP_AER	4,0
PP10_optim. EFP_GOST	3,3



Grafikon 38: Vsebnost zraka.

#### 5.3.1.4 Segregacija

Izračun segregacije smo opravili zgolj na betonu PP10\_optim. EFP\_GOST z optimirano količino elektrofilitrskega pepela in gostilcem (preglednica 54). V našem primeru so bile pri majhnem kalupu razlike v masi delcev plastike med spodnjim in zgornjim delom 15,3 %. V literaturi je zapisano, da segregacija ni problematična, v kolikor je razlika v masi agregata med spodnjim in zgornjim slojem betona pod 10 % [60]. Pri velikem kalupu pa je prišlo do anomalije, saj je bila masa delcev plastike v spodnjem sloju večja kot v zgornjem sloju. To je lahko posledica tega, da je naravni agregat preprečil potovanje delcev plastike navzgor. Kljub anomaliji pa je bila razlika v masi izven meja za pojav segregacije (3,4 %). Z uporabo gostilca smo sicer zmanjšali segregacijo plastičnih zrn, vendar je nismo uspeli povsem preprečiti.

Preglednica 54: Segregacija betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

	Mali kalup	Veliki kalup
<b>Zgornji del [g]</b>	43,7	79,6
<b>Spodnji del [g]</b>	37,9	82,4
<b>Razlika [g]</b>	5,8	2,8
<b>Razlika [%]</b>	15,3	3,4

### 5.3.2 Preiskave strjenega betona

#### 5.3.2.1 Gostota

Izračun gostote strjenega betona (preglednice 55 – 59) je pokazal enake ugotovitve, kot pri svežem betonu. Najnižjo gostoto je imel beton PP10\_optim. EFP\_GOST (grafikon 39), ki je za približno 6,5 % nižja od etalona.

Preglednica 55: Gostota betona PP10\_AER.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_AER_1	7,615	0,003375	2256
PP10_AER_2	7,609	0,003375	2255
PP10_AER_3	7,700	0,003375	2281
<b>Povprečje:</b>			2264

Preglednica 56: Gostota betona PP10\_EFP.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_EFP_1	7,550	0,003375	2237
PP10_EFP_2	7,558	0,003375	2239
PP10_EFP_3	7,620	0,003375	2258
<b>Povprečje:</b>			2245

Preglednica 57: Gostota betona PP10\_optim. EFP.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_optim. EFP_1	7,657	0,003375	2269
PP10_optim. EFP_2	7,678	0,003375	2275
PP10_optim. EFP_3	7,600	0,003375	2252

se nadaljuje...

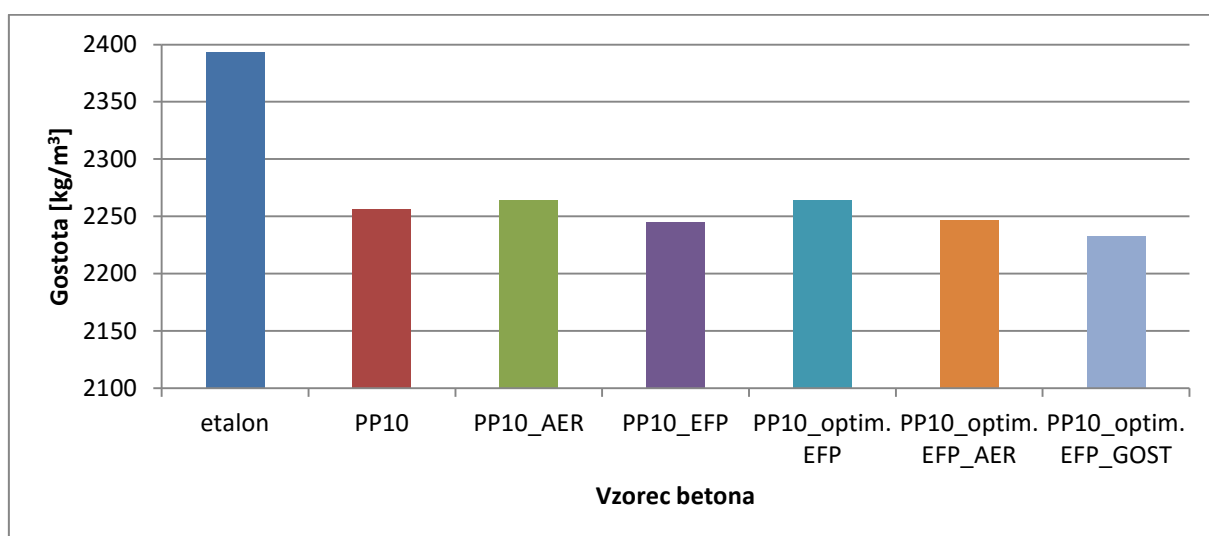
PP10_optim. EFP_4	7,633	0,003375	2262
<b>Povprečje:</b>			2264

Preglednica 58: Gostota betona PP10\_optim. EFP\_AER.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_optim. EFP_AER_1	7,639	0,003375	2263
PP10_optim. EFP_AER_2	7,548	0,003375	2236
PP10_optim. EFP_AER_3	7,552	0,003375	2238
PP10_optim. EFP_AER_4	7,595	0,003375	2250
<b>Povprečje:</b>			2247

Preglednica 59: Gostota betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_optim. EFP_GOST_1	7,487	0,003375	2218
PP10_optim. EFP_GOST_2	7,537	0,003375	2233
PP10_optim. EFP_GOST_3	7,576	0,003375	2245
<b>Povprečje:</b>			2232



Grafikon 39: Povprečna gostota betona po 28 dneh.

### 5.3.2.2 Tlačna trdnost

Z uporabo odpadne plastike se je tlačna trdnost na kockah starih 28 dni zmanjšala za 15 do 20 % v primerjavi z etalomom (preglednice 60 - 64). Porušitev vseh kock je bila pravilna. Z dodatkom aeranta se je tlačna trdnost pričakovano še dodatno zmanjšala (32 MPa), zaradi večje vsebnosti zračnih por. Z uporabo optimirane količine elektrofiltrskega pepela smo dosegli nekoliko večjo tlačno trdnost, kot pri betonu brez uporabe elektrofiltrskega pepela (grafikon 40). To je verjetno posledica pucolanskih lastnosti elektrofiltrskega pepela, ki smo ga dodali k cementu in imeli tako več veziva. Z uporabo gostilca je tlačna trdnost upadla za približno 1 MPa.

Preglednica 60: Tlačna trdnost betona PP10\_AER.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
PP10_AER_1	22500	708	31,5
PP10_AER_2	22500	722	32,1
PP10_AER_3	22500	728	32,4
<b>Povprečje:</b>			32,0

Preglednica 61: Tlačna trdnost betona PP10\_EFP.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	$f_c$ [MPa]
PP10_EFP_1	22500	776	34,5
PP10_EFP_2	22500	748	33,2
PP10_EFP_3	22500	785	34,9
<b>Povprečje:</b>			34,2

Preglednica 62: Tlačna trdnost betona PP10\_optim. EFP.

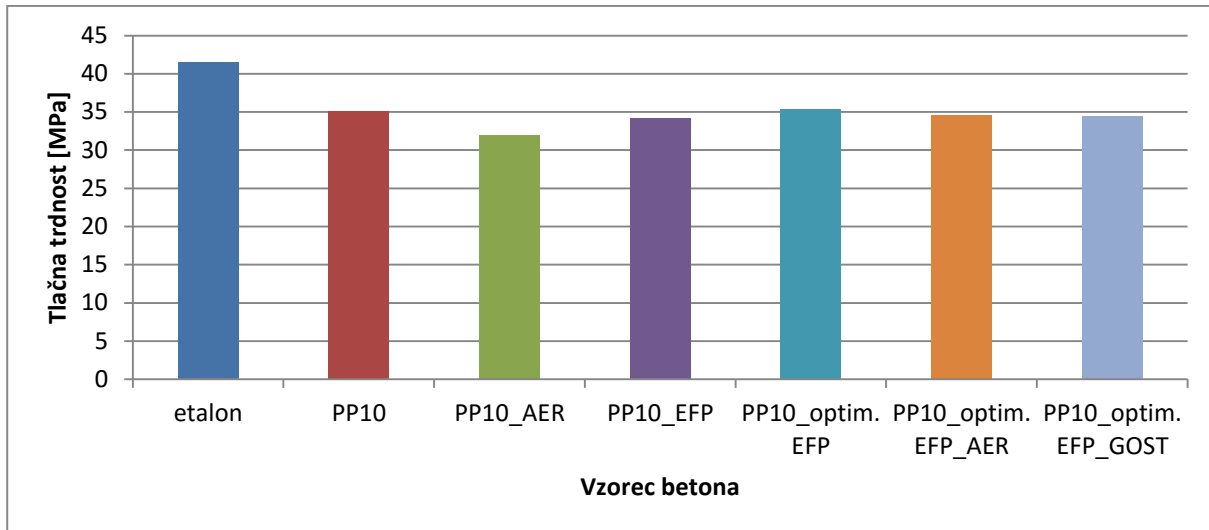
<b>Oznaka</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost 28 dni</b>
	$Ac [mm^2]$	$F [N]$	$f_c [MPa]$
PP10_optim. EFP_1	22500	819	36,4
PP10_optim. EFP_2	22500	775	34,4
PP10_optim. EFP_3	22500	797	35,4
PP10_optim. EFP_4	22500	786	34,9
<b>Povprečje:</b>			35,3

Preglednica 63: Tlačna trdnost betona PP10\_optim. EFP\_AER.

<b>Oznaka</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost 28 dni</b>
	$Ac [mm^2]$	$F [N]$	$f_c [MPa]$
PP10_optim. EFP_AER_1	22500	769	34,2
PP10_optim. EFP_AER_2	22500	799	35,5
PP10_optim. EFP_AER_3	22500	780	34,7
PP10_optim. EFP_AER_4	22500	769	34,2
<b>Povprečje:</b>			34,6

Preglednica 64: Tlačna trdnost betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

<b>Oznaka</b>	<b>Površina</b>	<b>Porušna sila</b>	<b>Tlačna trdnost 28 dni</b>
	$Ac [mm^2]$	$F [N]$	$f_c [MPa]$
PP10_optim. EFP_GOST_1	22500	784	34,8
PP10_optim. EFP_GOST_2	22500	769	34,2
PP10_optim. EFP_GOST_3	22500	770	34,2
<b>Povprečje:</b>			34,4



Grafikon 40: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.

### 5.3.2.3 Segregacija

Pri vizualni oceni segregacije se je izkazalo, da niti aerant niti gostilec nista povsem odpravila segregacije plastičnih zrn (sliki 47 in 48). Z aerantom smo sicer naredili betonsko mešanico nekoliko bolj plastično, vendar to ni preprečilo segregacije plastičnih zrn. Gostilec je sicer zmanjšal izločanje vode iz betona, vendar ni uspel popolnoma odpraviti segregacije. V obeh primerih lahko na neopaženi stranici kocke opazimo množico zrn plastičnega agregata, ki gledajo ven iz cementne matrice. Vseeno pa lahko vidimo malenkostno izboljšanje pri uporabi gostilca (manj segregirane plastike na površini kocke), v primerjavi z aerantom.



Slika 47: Površina in prečni prezek kocke z uporabo aeranta (levo) in brez aeranta (desno).



Slika 48: Površina kocke (levo) in prerez kocke z uporabo gostilca (desno).

## 5.4 Preiskave betona (3. del)

### 5.4.1 Preiskave svežega betona

#### 5.4.1.1 Posed

Na posed obeh betonskih mešanic je vplival predvsem gostilec (slika 49), ki je preprečil izhajanje vode iz betona in tako onemogočil večji posed betonskega stožca (preglednica 65). Beton s plastiko (grafikon 41) je imel 50 mm poseda in dosega stopnjo poseda S2 [49].

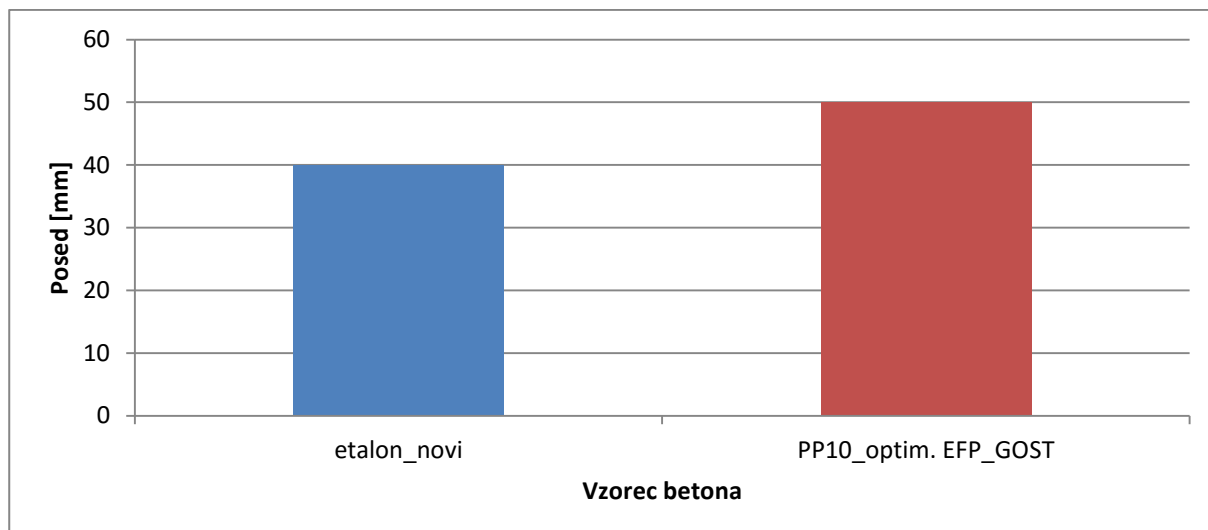
Preglednica 65: Posed betonskega stožca.

Oznaka	Posed betonskega stožca	Stopnja poseda [49]
	$\Delta h$ [mm]	
etalon_novi	40	S1
PP10_optim. EFP_GOST	50	S2



Slika 49: Posed betona etalon\_novi (levo) in betona PP10\_optim. EFP\_GOST (desno).





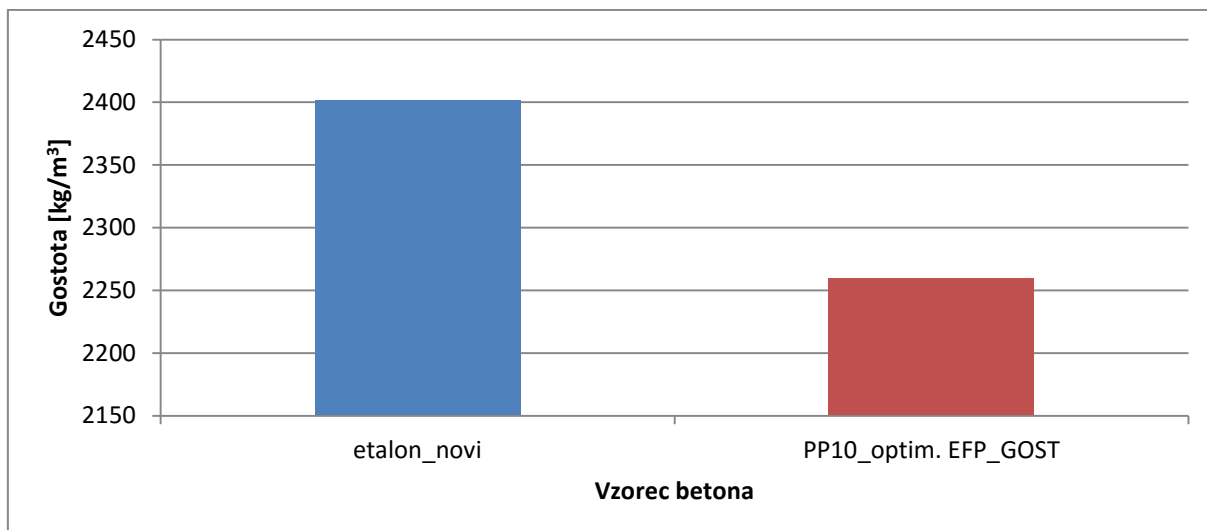
Grafikon 41: Posed betonskega stožca.

#### 5.4.1.2 Gostota

Izračun gostote svežega betona je pokazal, da se z vključitvijo plastičnega agregata gostota betona zmanjša (preglednica 66). Beton s plastiko ima za 6 % nižjo gostoto (grafikon 42). Kot je že bilo ugotovljeno, je to posledica manjše gostote plastičnega agregata, v primerjavi z naravnim agregatom.

Preglednica 66: Gostota svežega betona.

Oznaka	Masa betona	Prostornina posode	Gostota
	$m_2 - m_1$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Etalon_novi	8,104	0,003375	2401
PP10_optim. EFP_GOST	7,625	0,003375	2259



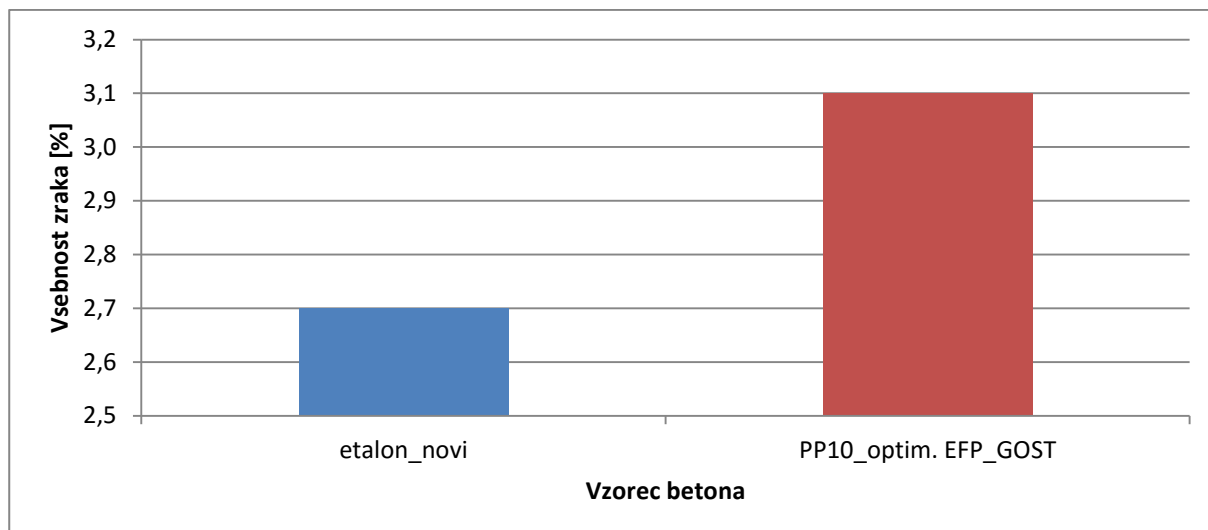
Grafikon 42: Gostota svežega betona.

#### 5.4.1.3 Vsebnost zraka

Beton s plastiko je imel 3,1 % vsebnost zraka (preglednica 67). Primerjava vsebnosti zraka med etalom in betonom s plastiko je pokazala, da se je z vključitvijo plastičnega agregata nekoliko povečala vsebnost por v betonski mešanici (grafikon 43).

Preglednica 67: Vsebnost zraka.

Oznaka	Vsebnost zraka
	$\Delta p$ [%]
etalon_novi	2,7
PP10_optim. EFP_GOST	3,1



Grafikon 43: Vsebnost zraka.

## 5.4.2 Preiskave strjenega betona

### 5.4.2.1 Gostota

Gostota strjenega betona po 28 dneh kaže podobne rezultate, kot gostota svežega betona (preglednici 68 in 69). Beton s plastiko ima za 6 % nižjo gostoto kot etalon (grafikon 44). Razlog je v manjši gostoti plastičnega agregata. Beton z nižjo gostoto ima lahko posledično tudi manjšo tlačno trdnost oz. slabše mehanske lastnosti.

Preglednica 68: Gostota betona etalon\_novi.

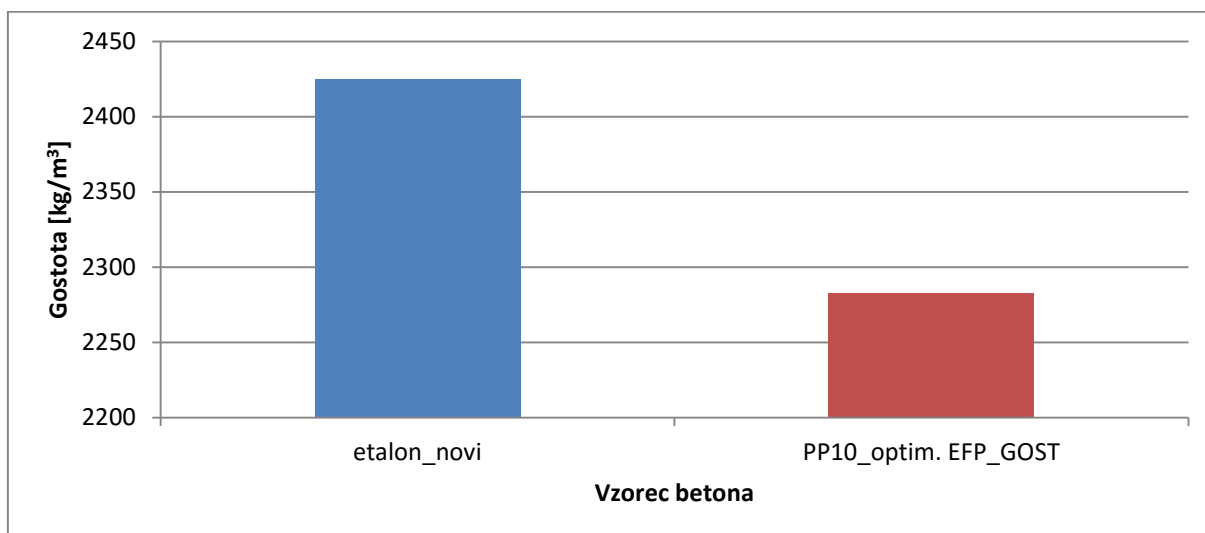
Oznaka	Masa	Volumen	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
etalon_novi_1	8,169	0,003375	2420
etalon_novi_2	8,225	0,003375	2437
etalon_novi_3	8,160	0,003375	2418
<b>Povprečje:</b>			2425

Preglednica 69: Gostota betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

Oznaka	Masa	Volumen	Gostota
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]
PP10_optim. EFP_GOST_1	7,658	0,003375	2269

se nadaljuje...

PP10_optim. EFP_GOST_2	7,731	0,003375	2291
PP10_optim. EFP_GOST_3	7,726	0,003375	2289
<b>Povprečje:</b>			2283



Grafikon 44: Povprečna gostota betona po 28 dneh.

#### 5.4.2.2 Tlačna trdnost

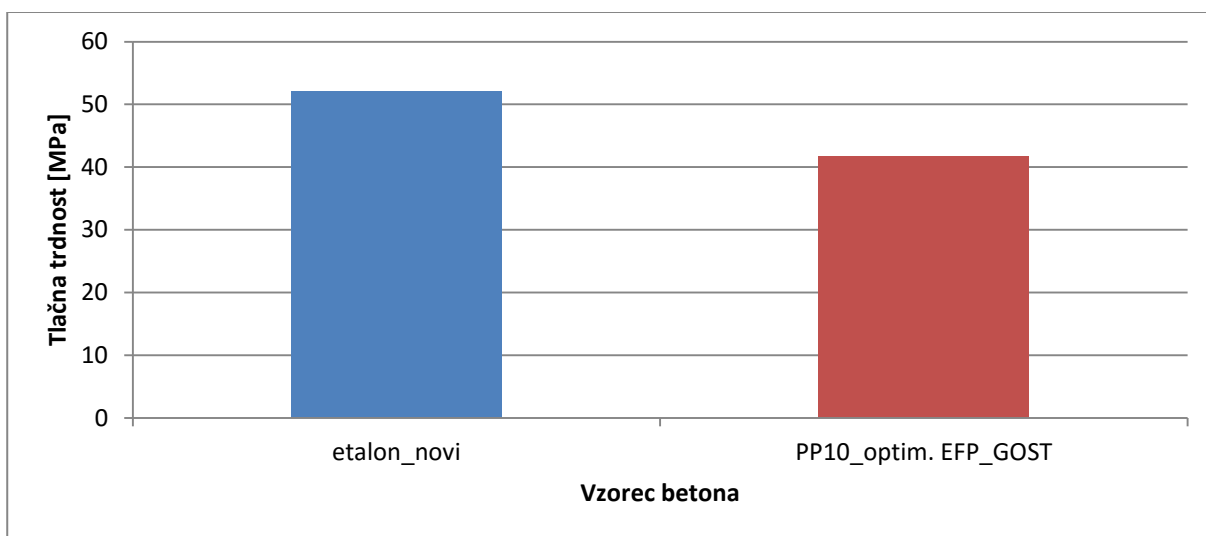
Tlačna trdnost 28 dni starega betona je pokazala, da beton z odpadno plastiko dosega manjše trdnosti (preglednici 70 in 71). Beton s plastiko ima za 20 % nižjo tlačno trdnost (grafikon 45). Porušitev vseh kock je bila pravilna. Kot je bilo že ugotovljeno, je to verjetno posledica slabšega stika med odpadno plastiko in cementnim kamnom ter manjše trdnosti plastičnega agregata, v primerjavi z naravnim agregatom.

Preglednica 70: Tlačna trdnost betona etalon\_novi po 28 dneh.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]
etalon_novi_1	22500	1148	51,0
etalon_novi_2	22500	1190	52,9
etalon_novi_3	22500	1177	52,3
<b>Povprečje:</b>			52,1

Preglednica 71: Tlačna trdnost betona PP10\_optim. EFP\_GOST po 28 dneh.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost 28 dni
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]
PP10_optim. EFP_GOST_1	22500	866	38,5
PP10_optim. EFP_GOST_2	22500	961	42,7
PP10_optim. EFP_GOST_3	22500	983	43,7
<b>Povprečje:</b>			41,6



Grafikon 45: Povprečna tlačna trdnost betona po 28 dneh.

#### 5.4.2.3 Globina prodora vode

Rezultati preiskave globine prodora vode pod pritiskom v betonu so pokazali, da ima beton s plastiko boljšo odpornost proti prodoru vode (preglednici 72 in 73). Globina omočenega območja je bila namreč večja pri etalonu (slika 50). Beton s plastiko ima 35 % manjši prodor vode, v primerjavi z etalonom in dosega stopnjo odpornosti PV-III (grafikon 46) [65]. To ugotovitev je mogoče pripisati neprepustni naravi plastike, ki tako nekoliko zavira prodiranje vode skozi beton.

Preglednica 72: Globina prodora vode pri betonu etalon\_novi.

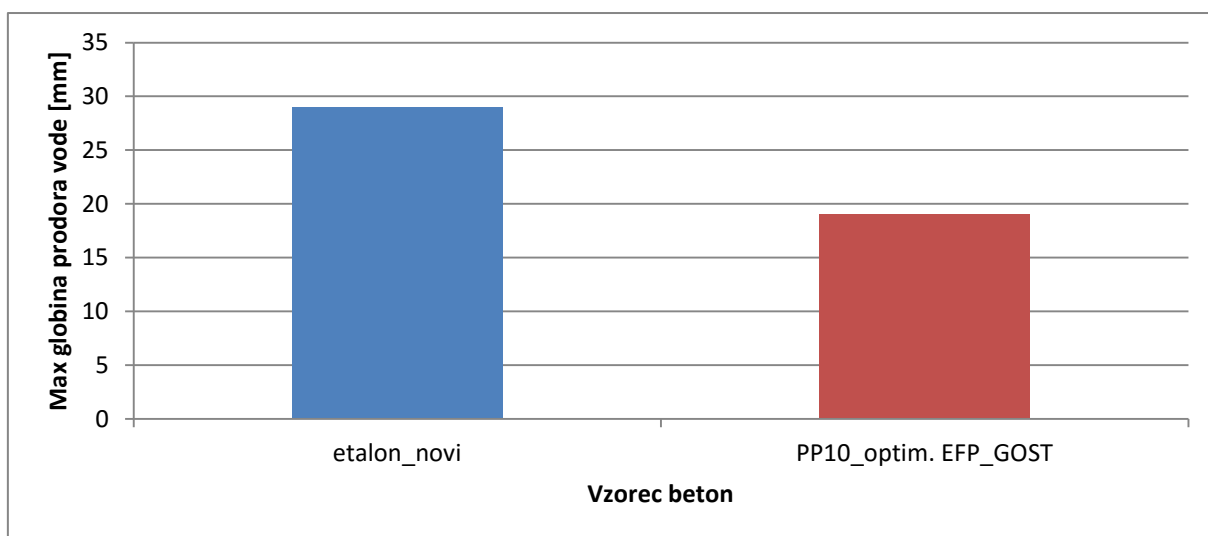
Oznaka	Prodor vode	Stopnja odpornosti proti prodoru vode [65]
	$h$ [mm]	
etalon_novi_1	29	

se nadaljuje...

etalon_novi_2	9	
etalon_novi_3	13	
<b>Max prodor vode:</b>	29	PV – II

Preglednica 73: Globina prodora vode pri betonu PP10\_optim. EFP\_GOST.

Oznaka	Prodor vode	Stopnja odpornosti proti prodoru vode [65]
	$h$ [mm]	
PP10_optim. EFP_GOST_1	19	
PP10_optim. EFP_GOST_2	12	
PP10_optim. EFP_GOST_3	8	
<b>Max prodor vode:</b>	19	PV – III



Grafikon 46: Globina prodora vode.



Slika 50: Globina prodora vode pri betonu s plastiko (levo) in etalonu (desno).

#### 5.4.2.4 Odpornost proti karbonatizaciji

Analiza odpornosti betona proti karbonatizaciji po pospešeni metodi karbonatizacije je pokazala, da ima etalon nekoliko boljše odpornost proti karbonatizaciji (grafikon 47). Območje, ki ni reagiralo na indikatorsko raztopino fenolftaleina, ima nižji pH kot obarvano območje (sliki 51 in 52). Globina karbonatizacije je v obeh primerih s časom naraščala (preglednice 74, 75, 76 in 77). Do odstopanja pa je prišlo pri etalonu, kjer se je globina karbonatizacije zmanjšala v času od 70 do 100 dni, kar pa je verjetno posledica nehomogenosti betona. Beton s plastiko je imel po 70 dneh za 8 % večjo globino karbonatizacije kot etalon. Kljub vsemu uporaba plastike (v 10 % deležu) v betonu bistveno ne poslabša njegove odpornosti proti karbonatizaciji. Kot navaja literatura, je možen vzrok za nižjo odpornost proti karbonatizaciji slabša interakcija med plastičnim in naravnim agregatom [26].

Preglednica 74: Globina karbonatizacije pri betonu etalon\_novi: 1. del.

Oznaka vzorca	1_56 dni		2_56 dni		1_63 dni		2_63 dni	
	Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]	
1	8,4	7,9	10,0	8,9	8,6	8,8	6,3	10,9
2	7,8	8,1	7,8	8,4	6,8	8,4	7,0	9,6
3	7,8	7,8	8,6	9,0	8,8	8,0	7,6	11,2
4	10,3	5,9	13,1	9,3	9,7	9,0	7,6	10,9
5	9,4	6,4	9,8	7,7	10,5	11,0	8,8	9,5
<b>Povpr. ploskve [mm]</b>	8,7	7,2	9,9	8,7	8,9	9,0	7,5	10,4
<b>Povpr. preskuš. [mm]</b>	8,0		9,3		9,0		8,9	
<b>Povpr. skupno [mm]</b>	8,6				9,0			
<b>Max globina [mm]</b>	13,1				11,2			
<b>Min globina [mm]</b>	5,9				6,3			

Preglednica 75: Globina karbonatizacije pri betonu etalon\_novi: 2. del.

Oznaka vzorca	1_70 dni		2_70 dni		1_100 dni		2_100 dni	
	Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]	
1	10,5	8,9	10,0	9,9	8,4	11,4	14,0	8,0
2	10,9	11,1	10,6	10,3	8,6	11,8	9,1	8,8
3	10,6	11,7	10,5	8,4	10,6	11,9	9,7	8,9
4	9,4	9,9	10,6	8,2	10,9	1,4	10,3	9,3
5	9,4	11,2	11,0	10,3	8,4	11,7	9,7	9,4
<b>Povpr. ploskve [mm]</b>	10,2	10,6	10,5	9,4	9,4	9,6	10,6	8,9
<b>Povpr. preskuš. [mm]</b>	10,4		10,0		9,5		9,7	
<b>Povpr. skupno [mm]</b>	10,2				9,6			
<b>Max globina [mm]</b>	11,7				14,0			
<b>Min globina [mm]</b>	8,2				1,4			

Preglednica 76: Globina karbonatizacije pri betonu PP10\_optim. EFP\_GOST: 1. del.

Oznaka vzorca	1_56 dni		2_56 dni		1_63 dni		2_63 dni	
	Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]	
1	12,9	7,8	9,3	10,3	10,3	7,9	11,6	9,8
2	13,2	7,8	8,4	9,3	10,3	8,4	8,7	7,6
3	7,6	8,9	8,6	7,2	9,4	7,2	11,0	9,1
4	7,6	9,7	8,9	7,9	9,4	9,8	8,1	12,9
5	8,3	11,7	9,6	7,5	9,3	9,1	8,6	13,2
<b>Povpr. ploskve [mm]</b>	9,9	9,2	9,0	8,4	9,7	8,5	9,6	10,5
<b>Povpr. preskuš. [mm]</b>	9,6		8,7		9,1		10,1	
<b>Povpr. skupno [mm]</b>	9,1				9,6			
<b>Max globina [mm]</b>	13,2				13,2			
<b>Min globina [mm]</b>	7,2				7,2			



Preglednica 77: Globina karbonatizacije pri betonu PP10\_optim. EFP\_GOST: 2. del.

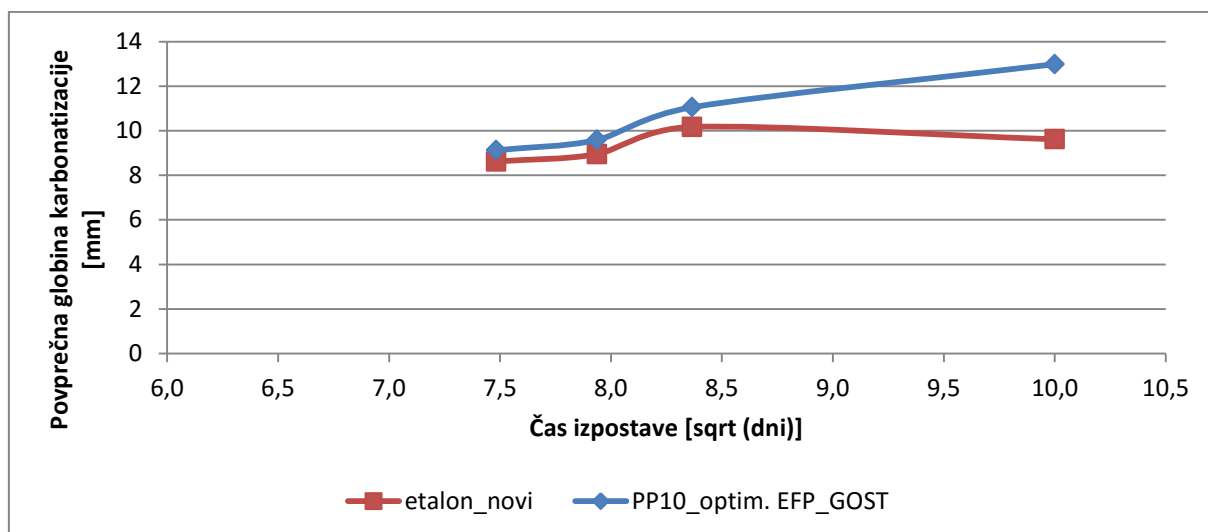
Oznaka vzorca	1_ 70 dni		2_ 70 dni		1_ 100 dni		2_ 100 dni	
	Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]		Globina [mm]	
1	10,1	11,8	12,6	13,8	8,6	13,5	16,6	13,6
2	9,7	10,5	10,4	13,8	8,6	13,5	16,3	14,1
3	9,4	10,0	11,2	13,1	9,2	15,2	13,9	13,2
4	8,9	11,1	10,7	13,3	11,2	13,7	12,6	10,9
5	9,9	9,6	11,2	10,0	11,6	14,8	16,1	12,5
<b>Povpr. ploskve [mm]</b>	9,6	10,6	11,2	12,8	9,8	14,1	15,1	12,9
<b>Povpr. preskuš. [mm]</b>	10,1		12,0		12,0		14,0	
<b>Povpr. skupno [mm]</b>	11,1				13,0			
<b>Max globina [mm]</b>	13,8				16,6			
<b>Min globina [mm]</b>	8,9				8,6			



Slika 51: Globina karbonatizacije pri etalonu (levo) in betonu s plastiko (desno) po 56 dneh.



Slika 52: Globina karbonatizacije pri etalonu (levo) in betonu s plastiko (desno) po 100 dneh.



Grafikon 47: Povprečna globina karbonatizacije.

#### 5.4.2.5 Odpornost proti kloridom

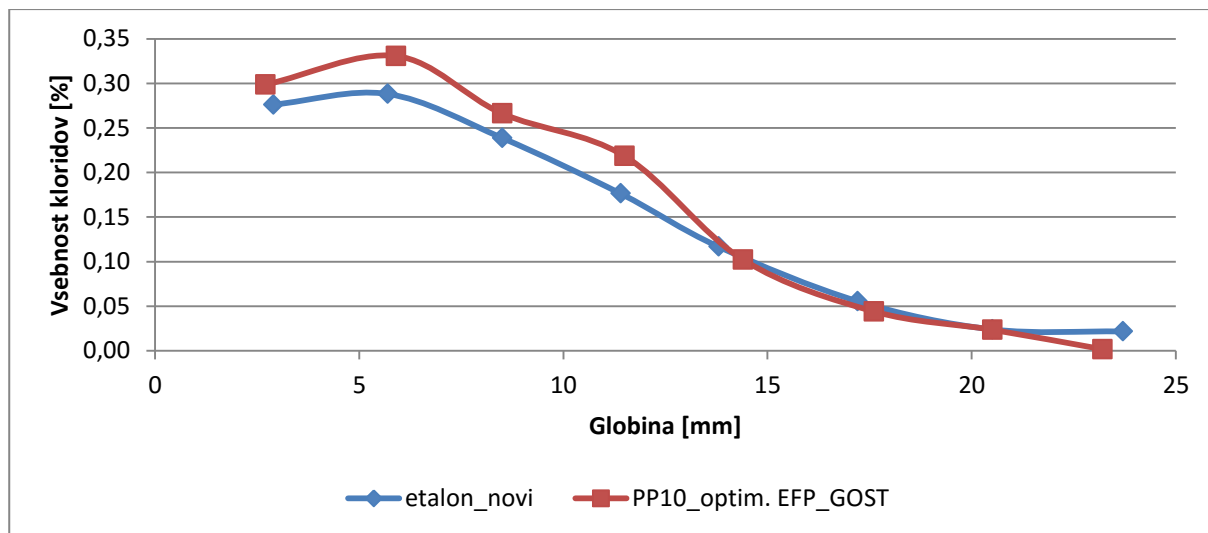
Preiskava odpornosti betona proti kloridom je pokazala, da imata betona začetno vrednost kloridov enako (preglednica 78), ker plastični agregat Recythen PP10 ne vsebuje kloridnih ionov, ki bi prispevali k začetni vrednosti kloridov. Po tem, ko sta bila betona izpostavljena raztopini NaCl, je vsebnost kloridov z globino pri obeh upadala (grafikon 48). Beton s plastiko je imel v primerjavi z etalonom večjo vsebnost kloridov vse do 5 sloja, nato pa je imel vsebnost kloridov manjšo. Kljub vsemu pa uporaba plastike (v 10 % deležu) bistveno ne spremeni odpornosti betona proti kloridom. Literatura navaja, da je imel beton s plastiko večjo odpornost proti kloridom, kar pa v našem primeru ne moremo trditi [27].

Preglednica 78: Vsebnost kloridov.

	etalon_novi		PP10_optim. EFP_GOST	
	Vsebnost kloridov	Globina	Vsebnost kloridov	Globina
	[%]	[mm]	[%]	[mm]
<b>Začetni kloridi <math>C_i</math> [%]</b>	0,0007		0,0007	
<b>1. sloj</b>	0,2762	2,9	0,2985	2,7
<b>2. sloj</b>	0,2881	5,7	0,3307	5,9
<b>3. sloj</b>	0,2388	8,5	0,2662	8,5
<b>4. sloj</b>	0,1764	11,4	0,2184	11,5
<b>5. sloj</b>	0,1168	13,8	0,1022	14,4

se nadaljuje...

6. sloj	0,0557	17,2	0,0442	17,6
7. sloj	0,0240	20,5	0,0236	20,5
8. sloj	0,0217	23,7	0,0018	23,2



Grafikon 48: Vsebnost kloridov na različnih globinah betona.

#### 5.4.2.6 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju (NOZT)

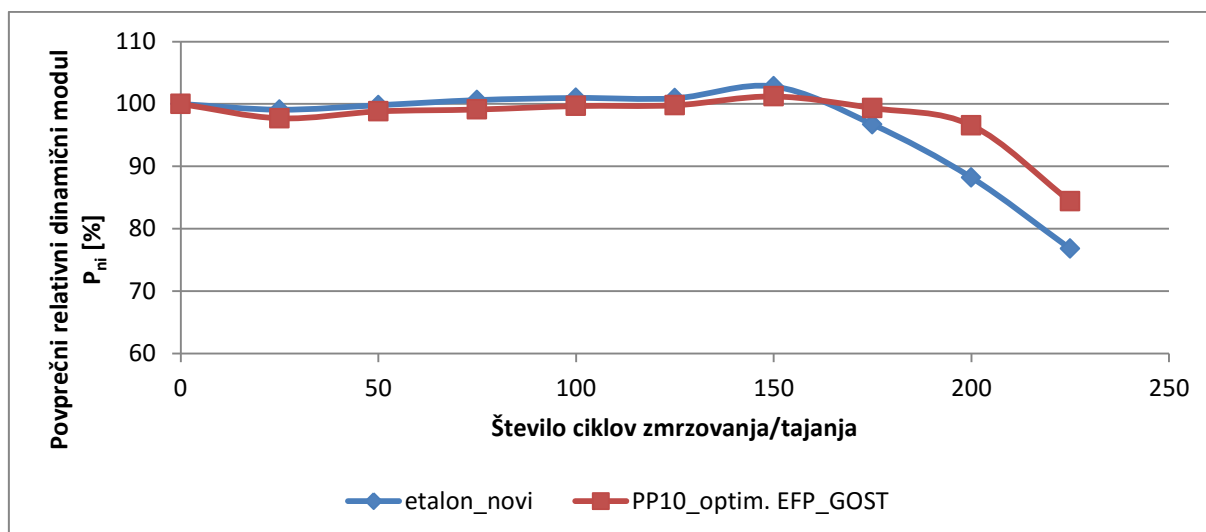
Preizkus notranje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju je pokazal, da imata betona do 150 ciklov zmrzovanja in tavanja približno enak povprečni relativni dinamični modul, ki se glede na začetno vrednost (100 %) ni znižal (grafikon 49). Plastika tako ni bistveno vplivala na notranjo odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju. Oba betona sta, glede na standard SIST 1026:2008, odporna proti zmrzovanju in tajanju [65]. Do 225 ciklov zmrzovanja in tavanja pa je začel povprečni relativni dinamični modul hitreje upadati pri etalonu. To pomeni, da je imel beton s plastiko boljšo odpornost proti zmrzovanju in tajanju. Pri 225 ciklu zmrzovanja in tavanja je imel beton s plastiko povprečni relativni dinamični modul približno za 9 % višji kot etalon (preglednici 79 in 80). Te ugotovitve so skladne z ugotovitvami v literaturi, kjer je imel beton s plastiko boljšo zmrzlinsko odpornost [26]. V primeru upoštevanja standarda SIST 1026:2008 se po 225 ciklih zmrzovanja in tavanja etalon ne bi mogel več šteti kot odporen proti zmrzovanju in tajanju, saj je imel najmanjši posamezni rezultat relativnega dinamičnega modula manjši od 65 %, in sicer 51,4 %. Beton s plastiko pa je po 225 ciklih zmrzovanja in tavanja še vedno dosegal zahteve standarda [65].

Preglednica 79: NOZT betona etalon\_novi.

Število ciklov zmrzovanja/ tajanja	Oznaka vzorca		1	2	3
	Dimenzije širina/višina/dolžina	[mm]	101/99/400	100/100/400	101/100/400
	Masa	[g]	9590	9710	9670
	Gostota	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2430	2390
<b>0</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2277	2315	2295
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	100	100	100
<b>25</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2288	2294	2273
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,0	98,2	98,1
<b>50</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2291	2307	2282
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,2	99,3	98,9
<b>75</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2301	2311	2296
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	102,1	99,7	100,1
<b>100</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2295	2320	2305
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,6	100,4	100,9
<b>125</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2308	2319	2291
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	102,7	100,3	99,7
<b>150</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2347	2327	2308
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	106,2	101,0	101,1
<b>175</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2312	2327	2129
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	103,1	101,0	86,1
<b>200</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2254	2298	1894
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	98,0	98,5	68,1
<b>225</b>	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2123	2221	1646
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	86,9	92,0	51,4
<b>Povpr. vrednost relat. dinam. modula</b> $P_{225}$		[%]	76,8		
<b>Najnižja ugotovljena vrednost <math>P_{225i}</math></b>		[%]	51,4		

Preglednica 80: NOZT betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

Število ciklov Z/T	Oznaka vzorca		1	2	3
	Dimenzije Širina/Višina/Dolžina	[mm]	102/99/400	101/100/400	101/100/400
	Masa	[g]	9260	9200	9260
	Gostota	[kg/m <sup>3</sup> ]	2290	2280	2290
0	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2154	2172	2172
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	100	100	100
25	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2134	2138	2151
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	98,2	96,9	98,1
50	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2151	2151	2157
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	99,7	98,1	98,6
75	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2151	2152	2166
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	99,7	98,2	99,4
100	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2161	2156	2170
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	100,7	98,5	99,8
125	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2166	2146	2179
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,1	97,6	100,6
150	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2167	2185	2185
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,2	101,2	101,2
175	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2165	2134	2177
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	101,0	96,5	100,5
200	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	2118	2132	2136
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	96,7	96,4	96,7
225	frekvenca $v_{ni}$	[Hz]	1964	2022	1983
	relat. dinam. modul $P_{ni}$	[%]	83,1	86,7	83,4
<b>Povpr. vrednost relat. dinam. modula <math>P_{225}</math></b>		[%]	84,4		
<b>Najnižja ugotovljena vrednost <math>P_{225i}</math></b>		[%]	83,1		



Grafikon 49: NOZT - povprečni relativni dinamični modul.

#### 5.4.2.7 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju (OPZT)

Analiza odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju ob prisotnosti talilnih soli je pokazala, da ima etalon v primerjavi z betonom s plastiko boljšo odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju prvih 20 ciklov (grafikon 50). Vzrok za slabši rezultat pri betonu s plastiko je verjetno v slabem stiku med plastičnim agregatom in cementnim kamnom (sliki 53 in 54). Po 25 ciklu pa se je nekoliko bolje odrezal beton s plastiko. V primerjavi z betonom s plastiko, je imel etalon povprečno količino odluščenega materiala manjšo ( $0,32 \text{ mg/mm}^2$ ), medtem ko je imel posamezno vrednost odluščenega materiala največjo ( $0,44 \text{ mg/mm}^2$ ). Beton s plastiko je imel skupno količino odluščenega materiala po 25 ciklih ( $1,059 \text{ mg/mm}^2$ ) za 9 % višjo kot etalon (grafikon 51). Glede na majhna odstopanja uporaba plastike v betonu ni bistveno poslabšala odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju. Niti etalon niti beton s plastiko ne dosejata zahtev standarda SIST 1026:2008, kjer sta navedeni povprečna količina odluščenega materiala ( $\leq 0,20 \text{ mg/mm}^2$ ) ter najvišja količina odluščenega materiala ( $\leq 0,25 \text{ mg/mm}^2$ ) po 25 ciklih (preglednici 81 in 82) [65]. Razlog, da betona ne dosejata zahtev standarda, je verjetno v odsotnosti aeranta, ki bi z uvedbo dodatnih zračnih por izboljšal zmrzlinško odpornost betona.

Preglednica 81: OPZT betona etalon\_novi.

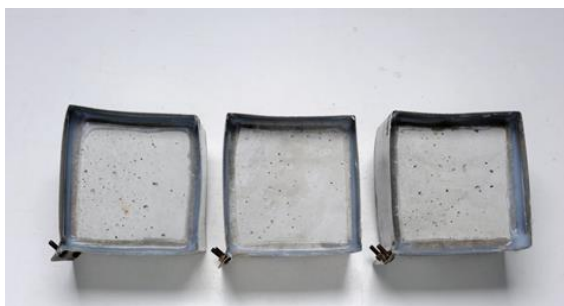
Oznaka vzorca	1	2	3	Skup. izguba mase	Povpr. izguba mase
Preiskovana površina [mm <sup>2</sup> ]	17800	19090	18170		
Število ciklov Z/T	Izguba mase [mg/mm <sup>2</sup> ]			[mg/mm <sup>2</sup> ]	
5	0,053	0,087	0,076	0,216	0,072

se nadaljuje...

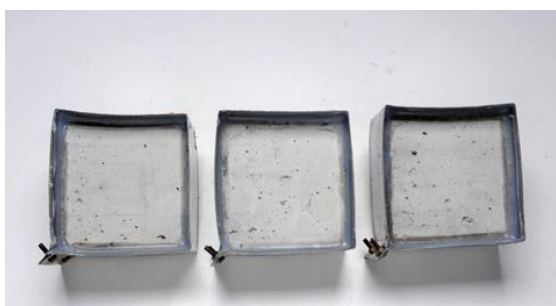
<b>10</b>	0,057	0,129	0,048	0,234	0,078
<b>15</b>	0,051	0,105	0,092	0,248	0,083
<b>20</b>	0,054	0,056	0,041	0,151	0,050
<b>25</b>	0,025	0,058	0,039	0,122	0,041
<b>Skupna izguba mase [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,240	0,435	0,296	0,971	0,324
<b>Povprečna količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,32				
<b>Najvišja količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,44				
<b>Vizualni opis površine</b>	grob luščenje cementnega mleka	slabo luščenje cementnega mleka	slabo luščenje cementnega mleka		

Preglednica 82: OPZT betona PP10\_optim. EFP\_GOST.

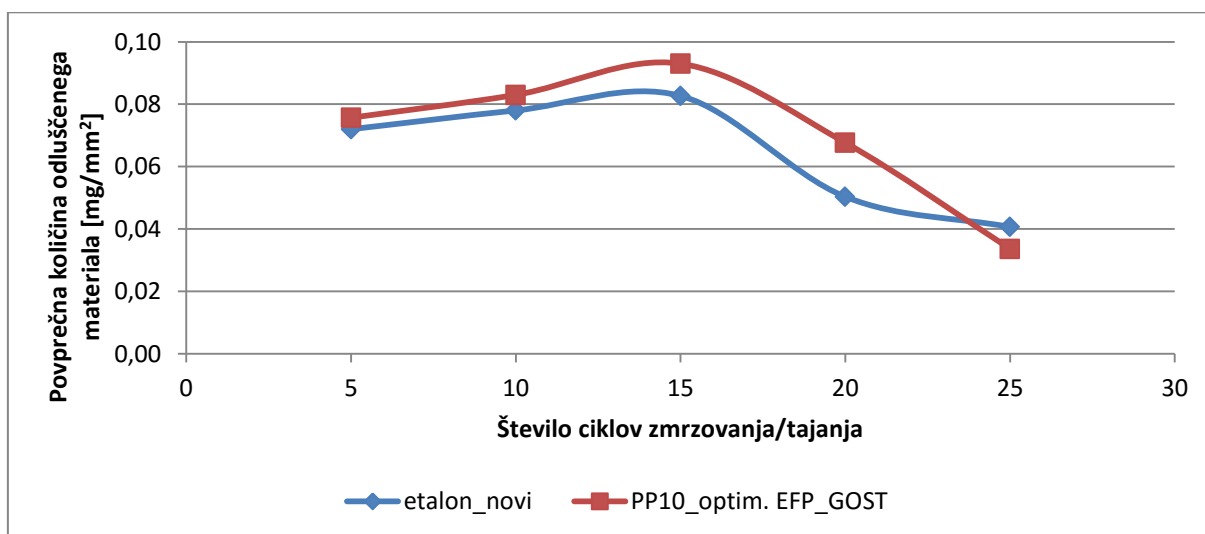
<b>Oznaka vzorca</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Skup. izguba mase</b>	<b>Povpr. izguba mase</b>
<b>Preiskovana površina [mm<sup>2</sup>]</b>	18260	19370	18480		
<b>Število ciklov Z/T</b>	<b>Izguba mase [mg/mm<sup>2</sup>]</b>			<b>[mg/mm<sup>2</sup>]</b>	
<b>5</b>	0,073	0,037	0,117	0,227	0,076
<b>10</b>	0,097	0,072	0,080	0,249	0,083
<b>15</b>	0,070	0,120	0,089	0,279	0,093
<b>20</b>	0,077	0,061	0,065	0,203	0,068
<b>25</b>	0,044	0,042	0,015	0,101	0,034
<b>Skupna izguba mase [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,361	0,332	0,366	1,059	0,353
<b>Povprečna količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,35				
<b>Najvišja količina odluščenega materiala [mg/mm<sup>2</sup>]</b>	0,37				
<b>Vizualni opis površine :</b>	grob luščenje cementnega mleka	grob luščenje cementnega mleka	grob luščenje cementnega mleka		



Slika 53: Etalon pred preskusom (levo) in po 25 ciklih (desno).

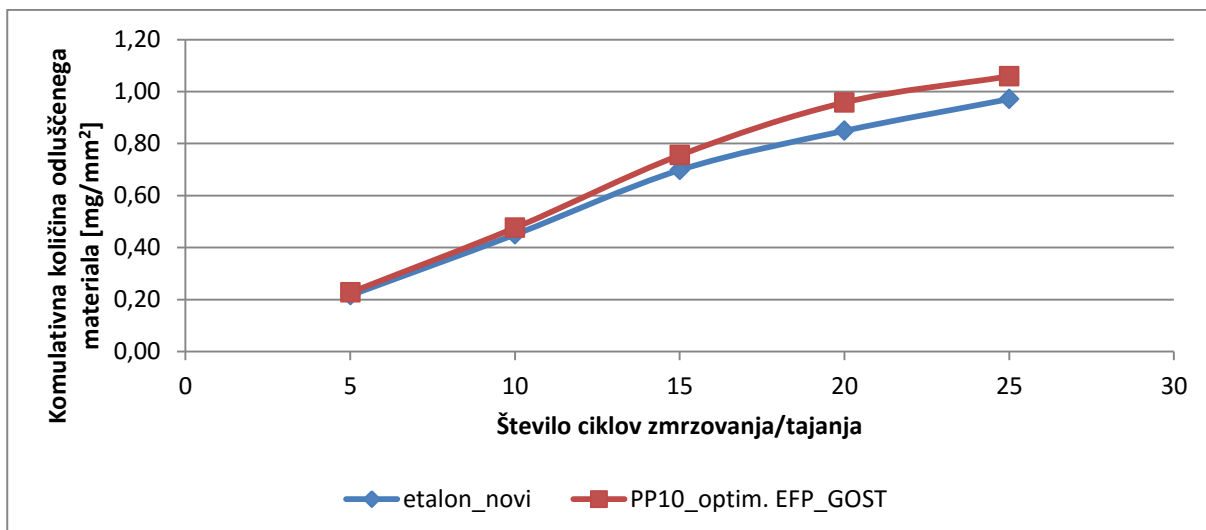


Slika 54: Beton s plastiko pred preskusom (levo) in po 25 ciklih (desno).



Grafikon 50: OPZT - povprečna količina odlučenega materiala.





Grafikon 51: OPZT - komulativna količina odluščene materiala.

## 5.5 Preiskave betona (4. del)

### 5.5.1 Preiskave svežega betona

#### 5.5.1.1 Razlez s posedom

Samozgoščevalni beton je dosegel razlez 430/450 mm (slika 55). Standard SIST EN 206:2013 opredeljuje območje razleza s posedom samozgoščevalnega betona med 550 in 850 mm [49]. V našem primeru smo izven tega predpisanega območja (preglednica 83), zato lahko naš beton uvrstimo le med lahkogradljive betone. Vizualna ocena segregacije betona je pokazala, da ni prišlo do segregacije cementne paste, saj se cementna pasta ni razprostrla dlje kot grobozrnat agregat (slika 55).



Slika 55: Meritev razleza betona v obeh smereh.

Preglednica 83: Razlez s posedom betona PP10\_SCC.

<b>Premer</b>	$d_1$ [mm]	430
<b>Premer</b>	$d_2$ [mm]	450
<b>Razlez s posedom</b>	$SF$ [mm]	440
<b>Čas</b>	$t_{500}$ [s]	4,6

### 5.5.1.2 Gostota

Gostota svežega betona znaša  $2244 \text{ kg/m}^3$  (preglednica 84).

Preglednica 84: Gostota svežega betona PP10\_SCC.

<b>Masa betona</b>	$m_2 - m_1$ [kg]	7,574
<b>Prostornina posode</b>	$V$ [m <sup>3</sup> ]	0,003375
<b>Gostota</b>	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2244

### 5.5.1.3 Segregacija

Preiskava segregacije na lahkogradljivem betonu (preglednica 85) je pokazala, da je prišlo do manjše segregacije plastičnih zrn. Glede na spodnji del kalupa je v zgornjem delu 8,3 oz. 3,7 % več plastičnega agregata (slika 56). Kljub tej segregaciji so ti rezultati izven meja za pojav segregacije (10 %) [60]. Do manjše segregacije plastičnih zrn v betonu je prišlo, ker nismo vibrirali oz. zgoščevali betona pri vgrajevanju v kalup. Tako plastična zrna niso splavala na površje. Z lahkogradljivim betonom smo torej rešili problem segregacije.

Preglednica 85: Segregacija betona PP10\_SCC.

	<b>Majhen kalup</b>	<b>Veliki kalup</b>
<b>Zgornji del [g]</b>	36,6	72,5
<b>Spodnji del [g]</b>	33,8	69,9
<b>Razlika [g]</b>	2,8	2,6
<b>Razlika [%]</b>	8,3	3,7



Slika 56: Minimalna segregacija plastičnega agregata.

## 5.5.2 Preiskave strjenega betona

### 5.5.2.1 Gostota

Gostota strjenega betona po 28 dneh kaže podobne rezultate, kot pri svežem betonu. Povprečna gostota strjenega betona znaša  $2263 \text{ kg/m}^3$  (preglednica 86).

Preglednica 86: Gostota betona PP10\_SCC po 28 dneh.

Oznaka	Masa	Volumen	Gostota
	$m \text{ [kg]}$	$V \text{ [m}^3\text{]}$	$D \text{ [kg/m}^3\text{]}$
SCC_1	7,673	0,003375	2273
SCC_2	7,618	0,003375	2257
SCC_3	7,621	0,003375	2258
<b>Povprečje:</b>			2263

### 5.5.2.2 Tlačna trdnost

Povprečna tlačna trdnost lahkovgradljivega betona po 28 dneh znaša  $31,3 \text{ MPa}$  (preglednica 87). Porušitev vseh kock je bila pravilna.

Preglednica 87: Tlačna trdnost betona PP10\_SCC po 28 dneh.

Oznaka	Površina	Porušna sila	Tlačna trdnost po 28 dneh
	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [kN]	$f_c$ [MPa]
SCC_1	22500	719	32,0
SCC_2	22500	698	31,0
SCC_3	22500	693	30,8
<b>Povprečje:</b>			31,3

### 5.5.2.3 Segregacija

Vizualni ogled segregacije na strjenem betonu je potrdil ugotovitve, ki smo jih pridobili z izračunom segregacije na svežem betonu. Na zgornji površini betonske kocke ni moč opaziti segregiranega plastičnega agregata (slika 57). Kot smo že ugotovili, je to posledica odsotnosti vibriranja pri vgrajevanju betona v kalup.



Slika 57: Odsotnost segregacije plastičnega agregata.

## 6 ZAKLJUČEK

Rast števila prebivalstva in večanje potreb po novih izdelkih rezultira tudi v večji količini različnih vrst odpadkov. Zaradi svoje vsestranskosti so plastike zelo priljubljene v vsakdanjem življenju in tako predstavljajo velik delež med odpadki, dodatno pa situacijo poslabšuje njihova kratkotrajna uporaba. Zaradi nizke stopnje biorazgradljivosti, sproščanja strupenih plinov ob nekontroliranem sežiganju in prisotnosti v velikih količinah, predstavlja odlaganje teh vrst odpadkov velik ekološki problem. Mnoge odpadne plastike na žalost končajo kot odpadki v okolju in tam zaradi svoje nerazgradljivosti tudi zelo dolgo obstanejo. Rešitev tega perečega problema je v recikliranju oz. predelavi plastičnih odpadkov v nove, okolju bolj prijazne izdelke.

Področje ravnanja z odpadno plastiko sicer obravnavajo številni zakoni in uredbe, ki pa v osnovi obravnavajo le celovito področje odpadkov oz. odpadnih embalaž (poleg plastike tudi steklo, les, papir, itd.). Potrebno bi bilo sprejeti ukrepe, ki bodo ciljno usmerjeni v ravnanje z vsemi plastičnimi odpadki. S tem bi preprečili neobvladljivo nastajanje vedno novih plastičnih produktov za kratkotrajno rabo oz. zmanjšali količine odpadnih plastik.

Termoplasti imajo zaradi lastnosti, kot so obstojnost, prilagodljivost in nizka gostota izrazito vsestransko uporabo (preglednica 88). Šibke vezi med makromolekulami omogočajo večkratno predelavo. Pri povišani temperaturi se lahko poljubno oblikujejo, glede na določene potrebe. Po ohlavitvi pa otrdijo in ohranijo obliko. Prav te lastnosti jih delajo zanimive tudi za recikliranje oz. predelavo.

Preglednica 88: Prednosti in slabosti plastike.

<b>Prednosti plastike</b>	<b>Slabosti plastike</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- enostavno oblikovanje</li> <li>- vsestranska uporaba</li> <li>- dolgotrajnost (nerazgradljivost)</li> <li>- majhna gostota</li> <li>- dobre toplotno-izolacijske lastnosti</li> <li>- odpornost proti različnim vplivom</li> <li>- možnost predelave in recikliranja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- prisotnost v velikih količinah</li> <li>- problematično odlaganje (nerazgradljivost)</li> <li>- sproščanje strupenih plinov pri gorenju</li> <li>- slabša toplotna obstojnost</li> <li>- drago ravnanje oz. sortiranje odpadkov</li> </ul>

V Evropi vsako leto nastane vedno več plastičnih odpadkov. Večina teh odpadkov spada med termoplaste, ki se jih da ustrezno predelati oz. reciklirati. Odlaganje teh odpadkov je

nezaželeno, saj so nerazgradljivi oz. lahko vsebujejo strupene snovi, ki bi prišle v okolje. Sama energetska predelava, kljub visoki kalorični vrednosti, pa je ravno tako omejena, saj lahko plastični odpadki pri gorenju sproščajo strupene snovi v zrak. Recikliranje plastike tako prinaša številne koristi okolju, saj se s tem zmanjša potreba po neobnovljivih fosilnih gorivih in poraba energije ter zmanjša količina odloženih plastik na odlagališčih. Reciklirana plastika lahko tako predstavlja alternativne, okolju bolj prijazne materiale, prav tako pa se zmanjšajo škodljive emisije v okolju.

Cilj te magistrske naloge je bil oceniti možnost uporabe odpadne plastike v betonu kot nadomestilo naravnemu agregatu. Na podlagi prebrane literature s področja uporabe odpadne plastike v betonu smo ugotovili, da bi se lahko odpadna plastika uporabljala predvsem v nekonstrukcijskih lahkih betonih. Plastika lahko nadomešča tako droben kot grob naravni agregat. Delež nadomestitve pa variira od 0 pa vse do 100 % (v/v). Na lastnosti betona s plastiko bistveno vpliva oblika, velikost in zrnastostna sestava plastičnega agregata. Raziskave so pokazale, da je obdelavnost oz. vgradljivost slabša in gostota manjša, kot pri običajnih betonih. Tlačne, natezne in upogibne trdnosti so manjše, kot pri betonih brez odpadne plastike ter se manjšajo z večanjem količine odpadne plastike v betonu. Prišlo je do manjših razpok zaradi krčenja betona, izboljšala se je odpornost proti prodoru kloridov in zmrzljinska odpornost ter zmanjšala globina karbonatizacije (preglednica 89).

Preglednica 89: Prednosti in slabosti uporabe odpadne plastike v betonu.

<b>Prednosti uporabe</b>	<b>Slabosti uporabe</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- možnost prilagajanja določenim potrebam oz. zahtevam</li><li>- precej lažja od naravnega agregata</li><li>- vzdržljivost oz. dolga življenjska doba</li><li>- odpornost na vodo in kemikalije</li><li>- dobre toplotno-izolacijske lastnosti</li><li>- prisotnost v velikih količinah, lokalna dostopnost</li><li>- manjši okoljski problem</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- plastiko je potrebno očistiti in ustrezno sortirati</li><li>- slabša sprijemnost plastičnih zrn s cementnim kamnom</li><li>- možnost segregacije plastičnih zrn</li></ul>

Preiskave, kjer smo okarakterizirali odpadne plastike, so pokazale, da se plastike med seboj razlikujejo tako po sestavi, velikosti in obliki. Določene plastike sestojijo samo iz enega tipa termoplasta, medtem ko so druge mešanica različnih vrst termoplastov. Nekatere lahko uvrščamo med droben druge med grob agregat. Prav tako so nekatere plastike pravilnih, gladkih oblik, medtem ko so druge nepravilnih, oglatih oblik. Izračun prostorninske mase zrn

je pokazal, da so plastike precej lažje od naravnega agregata in vode. Standard za določitev prostorninske mase lahkega agregata ni najbolj primeren za uporabo pri določevanju prostorninske mase zrn plastike, zato bi bilo treba ta preizkus opraviti s standardom, ki je primeren za polimere. Pod mikroskopom smo lahko ugotovili, da je površina zrn nekaterih plastik gladka, pri drugih pa hrapava.

V prvem delu preiskav, kjer smo se posvetili uporabi odpadne plastike v betonu, smo ugotovili precejšnje podobnosti med našimi ugotovitvami, v primerjavi z ugotovitvami v literaturi. Z uporabo plastike se je posed betona precej zmanjšal. Gostota betona je pričakovano upadla, zaradi manjše gostote plastike. Tlačna trdnost se je zmanjšala, zaradi slabšega stika med plastičnim agregatom in cementnim kamnom ter manjše trdnosti plastike, v primerjavi z naravnim agregatom. V betonu je prišlo tudi do segregacije plastičnih zrn.

Ker smo želeli doseči pri betonu s plastiko podobno konsistenco, kot pri primerjalnem betonu, in odpraviti segregacijo plastičnih zrn, smo v drugem delu preiskav iskali rešitve za ta dva problema. Z aerantom nismo uspeli doseči podobnega poseda betona kot pri etalonu. To nam je uspelo doseči z optimalno količino elektrofiltrskega pepela. Segregacije nismo uspeli uspešno odpraviti niti z aerantom niti z gostilcem.

Ker nas je zanimala tudi obstojnost betona s plastiko, smo v tretjem delu preiskav opravili primerjave z obstojnostjo etalona brez plastike. Beton s plastiko je imel boljšo odpornost proti prodoru vode. Globina karbonatizacije je bila večja, kot pri etalonu. Odpornost betona proti kloridom je bila v prvih slojih slabša, kot pri etalonu. Beton s plastiko je imel notranjo odpornost proti zmrzovanju in tajanju boljšo, kot etalon, medtem ko je bila odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju ob prisotnosti talilnih soli slabša. Kljub vsemu uporaba plastike v betonu ni bistveno poslabšala oz. izboljšala obstojnosti betona. Vzrok je verjetno v majhni količini (10 %) nadomestitve naravnega agregata.

Četrty del preiskav smo namenili izdelavi lahkogradljivega betona. S tem betonom oz. z odsotnostjo vibriranja pri vgrajevanju betona v kalupe, smo uspeli odpraviti segregacijo plastičnih zrn.

Kljub temu da obstajajo alternative kot so ponovna uporaba in energetska predelava odpadkov, je primer recikliranja odpadne plastike za izdelavo novih, sodobnih gradbenih materialov tudi eden od možnih načinov za »odstranjevanje« le-teh, saj lahko prinaša tako ekološke, tehnične kot ekonomske prednosti. Z uporabo odpadne plastike v betonu smo izboljšali naslednje lastnosti betona:

- zmanjšali smo lastno težo betona,
- zmanjšali smo porabo naravnega agregata,
- zmanjšali smo okoljski problem odpadnih plastik.

Raziskave so sicer pokazale, da plastika v betonu predstavlja oslabitev za beton. Kot je bilo že ugotovljeno, bi bila primerna za uporabo v nekonstrukcijskih betonih, torej tam, kjer trdnost betona ni glavni kriterij. V nadaljnjih raziskavah bi se lahko uporabila še večja količina plastičnega agregata v betonu. Poleg tega bi bilo smiselno izboljšati stik med odpadno plastiko in cementnim kamnom ter ugotoviti, kako to vpliva na mehanske lastnosti in obstojnost betona. V sklopu nadaljnjih preiskav bi bilo smiselno na betonih s plastičnim agregatom opraviti še sledeče preiskave:

- obstojnost odpadne plastike v betonu (bazično okolje),
- toplotno-izolativne lastnosti betona,
- upogibna in natezna trdnost betona,
- odpornost betona na obrabo,
- požarna odpornost betona ter
- vpliv kloridov (pri gorenju betona s PVC agregatom) na beton.



**VIRI**

- [1] Waste Watch. 2008. Waste Watch information sheet. Plastics.  
<http://www.wastewatch.org.uk> (Pridobljeno 20. 5. 2015.)
- [2] Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*. 29, 10: 2625–2643.
- [3] Zakon o varstvu okolja (ZVO-1-UPB1). Uradni list RS št. 39-1682/2006: 4151.
- [4] Uredba o odpadkih. Uradni list RS št. 37-1513/2015: 4088.
- [5] Uredba o ravnanju z embalažo in odpadno embalažo. Uradni list RS št. 84-3703/2006: 9178.
- [6] Uredba o ravnanju z odpadnimi nagrobnimi svečami. Uradni list RS št. 78-3494/2008: 11367.
- [7] Uredba EU št. 305/11 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 9. marca 2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov in razveljavitvi Direktive Sveta 89/106/EGS. Uradni list EU št. 305-L88/5/2011: 5-43.
- [8] Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro-1). Uradni list RS št. 82-3032/2013: 9183.
- [9] Kiran Kumar, B. V., Prakash, P. Use of waste plastics in cement concrete pavement. Karnataka. Dayananda Sagar College of Engineering: 12 str.
- [10] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [11] Šebenik, U. Osnove polimernega inženirstva. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo. 2015.  
[http://studentski.net/gradivo/ulj\\_fkt\\_ki1\\_opi\\_sno\\_uvod\\_v\\_polimere\\_01](http://studentski.net/gradivo/ulj_fkt_ki1_opi_sno_uvod_v_polimere_01)  
(Pridobljeno 5. 8. 2015.)
- [12] Polimerni materiali. Učno gradivo. Šolski center Novo mesto. 2015.

[http://www.sc-nm.si/szks/file/open/306\\_ccf315eb05e1/POLIMERNI%20MATERIALI-u%C4%8Dno%20gradivo.pdf](http://www.sc-nm.si/szks/file/open/306_ccf315eb05e1/POLIMERNI%20MATERIALI-u%C4%8Dno%20gradivo.pdf) (Pridobljeno 5. 8. 2015.)

[13] Zgodovinski pregled razvoja in delitev polimernih gradiv. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za preoblikovanje. 2015.

<http://lab.fs.uni-lj.si/lap/html/pages/si-polimerna-gradiva-materiali.htm>

(Pridobljeno 5. 8. 2015.)

[14] Kemijski portal. Polimeri. 2015.

<http://www.kemija.org/index.php/kemija-mainmenu-38/24-kemijacat/22-polimeri>

(Pridobljeno 20. 11. 2015.)

[15] Šturm, R. Nekovinska in kompozitna gradiva. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2015.

[http://lab.fs.uni-lj.si/latem/IZPITI-IN-PREDAV/STURM/NKG/Seminarski\\_pregled\\_teorije.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/latem/IZPITI-IN-PREDAV/STURM/NKG/Seminarski_pregled_teorije.pdf)

(Pridobljeno 20. 11. 2015.)

[16] Šturm, R. Polimeri. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. 2015.

<http://lab.fs.uni-lj.si/latem/IZPITI-IN-PREDAV/STURM/Slike%20s%20predavanj/19-Polimeri.pdf>

(Pridobljeno 20. 11. 2015)

[17] Evropska komisija. 2013. Zelena knjiga o evropski strategiji za plastične odpadke v okolju. Bruselj: 23 str.

[http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/green\\_paper/green\\_paper\\_sl.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/green_paper/green_paper_sl.pdf)

(Pridobljeno 8. 9. 2015.)

[18] European Commission. 2011. Study on coherence of waste legislation. Final report: 124 str.

[http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Coherence\\_waste\\_legislation.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Coherence_waste_legislation.pdf)

(Pridobljeno 8. 9. 2015.)

[19] European Commission. 2011. Plastic waste in the environment. Revised final report: 171 str.

<http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/plastics.pdf>

(Pridobljeno 8. 9. 2015.)

- 
- [20] Association of Plastics Manufacturers. 2009. The Compelling Facts About Plastics 2009. An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008: 24 str.  
<http://www.plasticseurope.org/document/the-compelling-facts-about-plastics-2009.aspx>  
(Pridobljeno 8. 9. 2015.)
- [21] 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. Uradni list EU št. 955-L 370/44/2014: 44-86.
- [22] Statistični urad Republike Slovenije. Odpadki. 2015.  
<http://www.stat.si/StatWeb/pregled-podrocja?idp=70&headerbar=11>  
(Pridobljeno 18. 10. 2015.)
- [23] Agencija republike Slovenije za okolje. Kazalci okolja v Sloveniji. Odpadki in snovni tok. 2015.  
[http://kazalci.arso.gov.si/?data=group&group\\_id=18](http://kazalci.arso.gov.si/?data=group&group_id=18) (Pridobljeno 18. 10. 2015.)
- [24] Interseroh. Odpadne nagrobne sveče. 2015.  
<http://www.interseroh-slo.si/odpadne-nagrobne-svece> (Pridobljeno 19. 10. 2015.)
- [25] Ferreira, L., de Brito, J., Saikia, N. 2012. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*. 36: 196–204.
- [26] Saikia, N., de Brito, J. 2012. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*. 34: 385–401.
- [27] Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L. 2009. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*. 29: 621–628.
- [28] Mustafa Al Bakri, A. M., Mohammad Tamizi, S., Rafiza, A. R., Zarina, Y. 2011. Investigation of HDPE plastic waste aggregate on the properties of concrete. *Journal of Asian Scientific Research*. 1, 7: 340–345.

[29] Suganthy, P., Chandrasekar, D., Sathish Kumar, P. K. 2013. Utilization of pulverized plastic in cement concrete as fine aggregate. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2, 6: 1015–1019.

[30] Baboo, R., Tabin Rushad, S., Kr, B., Duggal, S. K. 2012. Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer. *International Scholarly Research Network Civil Engineering*. 2012: 5. str.

[31] Akçaözöğlü, S., Akçaözöğlü, K., Duran Atiş, C. 2013. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). *Composites: Part B*. 45: 721–726.

[32] Ghernouti, Y., Rabehi, B., Safi, B., Chaid, R. 2014. Use of recycled plastic bag waste in the concrete. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*. 8: 480–487.

[33] Saikia, N., de Brito, J. 2014. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*. 52: 236–244.

[34] Zelena Slovenija. Plastenka manj obremenjuje okolje kot steklenice – EOL 81. Inovativna tehnologija reciklaže. 2013.

<http://www.zelenaslovenija.si/revija-eol-/arhiv-stevilk-eol/arhiv/2495-plastenka-manj-obremenjuje-okolje-kot-steklenica-eol-81> (Pridobljeno 5. 8. 2015.)

[35] Interseroh. Kunststoffrecycling mit Interseroh. 2015.

<http://www.interseroh.de/systemdienstleistungen/interseroh-recycled-resource/> (Pridobljeno 5. 8. 2015.)

[36] Interseroh. 2014. Interni podatki podjetja. (Pridobljeno 11. 6. 2014.)

[37] Multiport Kunststoffe. Kunststoffrecycling. 2015.

<http://www.mp-bbg.eu/de/kunststoffrecycling.html> (Pridobljeno 5. 8. 2015.)

[38] Ekologi brez meja. Ločeno zbiranje odpadnih nagrobnih sveč. 2012.

<http://ebm.si/o/sl/koristno/locevanje-odpadkov/314-loceno-zbiranje-odpadnih-nagrobnih-svec> (Pridobljeno 5. 8. 2015.)

- 
- [39] Prons. Nova proizvodna linija za celovito predelavo nagrobnih sveč. 2015.  
<http://www.prons.si/aktualno-predelava> (Pridobljeno 5. 8. 2015.)
- [40] Košmrlj, N. 2011. Razvoj postopka zbiranja in recikliranja odpadnih nagrobnih sveč. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Košmrlj): 85 str.
- [41] SIST EN 932-1:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov - 1. del: Metode vzorčenja.
- [42] SIST EN 932-2:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov - 2. del: Metode zmanjševanja laboratorijskih vzorcev.
- [43] SIST EN 933-1:2012. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov - 1. del: Ugotavljanje zrnivosti - metoda sejanja.
- [44] SIST EN 1097-6:2013. Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov - 6. del: Določevanje prostorninske mase zrn in vpijanja vode.
- [45] Pikonometer. 2016.  
[http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id\\_cat=aggregates&id\\_prod=sand-absorption-cone-and-pyknometer](http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id_cat=aggregates&id_prod=sand-absorption-cone-and-pyknometer) (Pridobljeno 5. 6. 2016.)
- [46] Mikroskop. 2016.  
<https://sites.google.com/site/osioniki/home/mikroskopi> (Pridobljeno 5. 6. 2016.)
- [47] SIST EN 197-1:2011. Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.
- [48] SIST EN 12620:2002+A1:2008. Agregati za beton.
- [49] SIST EN 206:2013. Beton – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.
- [50] SIST EN 450-2:2005. Elektrofilitrski pepel – 2. del: Ovrednotenje skladnosti.
- [51] SIST EN 934-1:2008. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso - Kemijski dodatki za beton - 1. del: Splošne zahteve.

[52] SIST EN 934-2 :2009+A1:2012. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso - 2. del: Kemijski dodatki za beton – Definicije, zahteve, skladnost, označevanje in etiketiranje.

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

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

[55] SIST EN 12350-1:2009. Preskušanje svežega betona - 1. del: Vzorčenje.

[56] SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona - 2. del: Preskus s posedom stožca.

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

[58] SIST EN 12350-6:2009. Preskušanje svežega betona - 6. del: Gostota.

[59] SIST EN 12350-7:2009. Preskušanje svežega betona - 7. del: Vsebnost zraka – metode s pritiskom.

[60] Kok Seng, C. 2006. Workability and stability of lightweight aggregate concrete from rheology perspective. Doktorska disertacija. Singapur, National University of Singapore, Department of Civil engineering (samozaložba C. Kok Seng): 207 str.

[61] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V., Dujič, B. 2008. Gradiva vaje 2008/2009. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 142 str.

[62] SIST EN 12390-7:2009. Preskušanje strjenega betona - 7. del: Gostota strjenega betona.

[63] SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.

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

[65] SIST 1026:2008. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1.

[66] FprCEN/TS 12390-12:2010. Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method.

[67] SIST-TS CEN/TS 12390-11:2010. Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.

[68] Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., Maallem, M. 2013. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 43: 436–442.