

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:

Frankovič, A., 2015. Agregat iz elektrofiltrskega pepela pridobljen po postopku hladnega utrjevanja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Ducman, V.): 60 str.

Datum arhiviranja: 18-09-2015

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:

Frankovič, A., 2015. Agregat iz elektrofiltrskega pepela pridobljen po postopku hladnega utrjevanja. B.Sc Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Ducman, V.): 60 p.

Archiving Date: 18-09-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidatka:

ANA FRANKOVIČ

**AGREGAT IZ ELEKTROFILTRSKEGA PEPELA
PRIDOBLEN PO POSTOPKU HLADNEGA
UTRJEVANJA**

Diplomska naloga št.: 89/OG-MO

**FLY ASH AGGREGATE DEVELOPED BY MEANS OF
COLD-BONDING**

Graduation thesis No.: 89/OG-MO

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentorica:

dr. Vilma Ducman

Ljubljana, 22. 06. 2015

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE

Podpisana Ana Frankovič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom » Agregat iz elektrofiltrskega pepela pridobljen po postopku hladnega utrjevanja«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 4.6.2015

Ana Frankovič

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFIJSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.322(043.2)
Avtor:	Ana Frankovič
Mentor:	prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentor:	dr. Vilma Ducman, univ. dipl. inž. kem. inž.
Naslov:	Agregat iz elektrofiltrskega pepela pridobljen po postopku hladnega utrjevanja
Tip dokumenta:	diplomska naloga
Obseg in oprema:	60 str., 22 sl., 19 preg., 7 graf., 3.pril.,
Ključne besede:	Elektrofiltrski pepel, lahki agregat, lahki beton, postopek hladnega utrjevanja

Izvleček

V sklopu diplomske naloge smo razvili agregat iz elektrofiltrskega pepela po postopku hladnega utrjevanja z vlivanjem. Elektrofiltrski pepel smo pred uporabo analizirali glede kemijske in mineraloške sestave, izrisali smo njegovo sejalno krivuljo ter preverili njegov indeks aktivnosti. Kot vezivo smo uporabili portland cement v naslednjih deležih: 10 %, 20 % in 30 %. Maso smo vlivali v standardne kalupe dimenzij 160 x 40 x 40 mm ter vzorce negovali na stalni vlagi. Tako dobljene prizme smo testirali na tlak in upogib ter jih podrobili na zelene frakcije. Z enakim EFP smo naredili primerjalni agregat po postopku hladnega utrjevanja z granuliranjem. Ker smo iz preiskav trdnosti prizem ugotovili, da dosežemo zadostne trdnosti že z 10 % cementnega veziva, smo pri izdelavi granuliranega agregata uporabili le ta delež. Po formiranju granul na vrtečem bobnu in po njihovem 28 dnevem negovanju na stalni vlagi, smo na granulah izvedli test tlačne trdnosti. Izvedli smo še dodatne raziskave agregatov. S SEM mikroskopom smo si ogledali strukturo agregatov. S Hg-porozimetrom smo določili gostoto in poroznost agregata ter porazdelitev por v vzorcih. Nato smo preverili še vpojnost agregata in dobljene rezultate primerjali med seboj. Na koncu smo za oceno obnašanja agregatov v praksi uporabili agregate v betonski mešanici in dobljene trdnosti in gostote tako pripravljenih betonov primerjali z betonom iz naravnega apnenčevega agregata.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.322(043.2)
Author: Ana Frankovič
Supervisor: Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor: Vilma Ducman, Ph.D.
Title: Fly ash aggregate developed by means of cold-bonding
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools: 60 p., 22 fig., 19 tab., 7 graph., 3 ann.,
Keywords: Fly ash, lightweight aggregate, lightweight concrete, cold-bonding

Abstract

This graduation thesis is concerned with the development of a fly ash based aggregate by means of the cold-bonding process, by casting and then crushing into individual fractions. Three different proportions of Portland cement, i.e. 10%, 20%, and 30%, were used in the mixture as a binder. Prior to use, the chemical and mineral characteristics of the fly ash were determined, as well as the corresponding loss of ignition. The comparative aggregate was developed by means of the cold bonding pelletization process. Based on the results of tests of the tensile and compressive strengths of the crushed aggregate, a cement ratio of 10 % was used in this process. Density, water adsorption capacity, and porosity, as well as tensile and compressive strengths, were determined for the produced aggregates after aging them at constant humidity. SEM investigations were also performed, and the results obtained in the case of both produced aggregates were compared. In order to assess performance of the aggregates in practice, both of them were used in concrete, and the results of tensile and compressive strength tests were compared with those achieved in the case when the concrete was made using limestone aggregate.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Najprej bi se rada iskreno zahvalila mentorici prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov za trud, strokovno pomoč in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge.

Posebna zahvala gre somentorici dr. Vilmi Ducman iz Zavodu za gradbeništvo Slovenije za njen čas, trud, izkazano zaupanje in strokovno podporo, ki mi jo je nudila v času pripravljanja diplomske naloge.

Zahvalila bi se rada tudi Zavodu za gradbeništvo Slovenije, ki mi je omogočil izvajanje preiskav na njihovem Oddelku za materiale in sicer v laboratoriju za cemente in malte. Prav tako se zahvaljujem vsem tam zaposlenim za nasvete in pomoč pri raziskavah v laboratoriju.

Največja zahvala gre moji družini, še posebej očetu, mami in fantu, ki mi vedno stojijo ob strani in me podpirajo pri vseh mojih odločitvah.

Hvala za lepe spomine na študij tudi prijateljem in prijateljicam s katerimi smo skupaj študirali na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Brez vas bi bila študentska leta na fakulteti dolgočasna.

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVE	III
BIBLIOGRAFIJSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA	IX
1 UVOD	1
1.1 Opredelevitev problema, ki je predmet raziskave	1
1.2 Namen in cilj diplomskega dela	2
1.3 Metode preizkušanja	2
1.4 Pregled dosedanjih raziskav s področja izdelave agregatov iz elektrofiltrskega pepela	4
2 TEORETIČNI DEL	5
2.1 Elektrofiltrski pepel	5
2.1.1 Vlaga	5
2.1.2 Žarilna izguba	5
2.1.3 Indeks aktivnosti	6
2.2 Cement	6
2.2.1 Hidratizacija cementa	7
2.2.2 Vodocementno razmerje	8
2.2.3 Elektrofiltrski pepel, kot dodatek cementu	9
2.3 Voda	9
2.4 Agregat	10
2.4.1 Lahki agregat	12
2.4.2 Pridobivanje agregata po hladnem postopku z granuliranjem	14
2.4.3 Visokotemperaturno pridobivanje lahkega agregata s sintranjem	15
2.4.4 Hidrotermalni proces pridobivanja lahkega agregata	15
2.4.5 Pridobivanje agregata po hladnem postopku z vlivanjem in drobljenjem	16
2.5 Lahki betoni	16
2.6 Mineralni in kemijski dodatki	17
3 EKSPERIMENTALNI DEL	19
3.1 Uporabljeni materiali	19
3.1.1 Karakterizacija elektrofiltrskega pepela	19
3.1.2 Cement	24

3.1.3	Voda	24
3.1.4	Agregati uporabljeni v betonu	25
3.1.5	Kemijski dodatki v betonski mešanici	25
3.1.6	Mineralni dodatki v betonski mešanici	25
3.2	Priprava preizkusnih vzorcev drobljenega agregata iz EFP	26
3.2.1	Receptura za 4000 g suhe mešanice	26
3.2.2	Priprava sveže mešanice	27
3.2.3	Nega vzorcev	27
3.2.4	Drobljenje vzorcev	28
3.3	Priprava preizkusnih vzorcev granuliranega agregata iz EFP	29
3.3.1	Receptura za 4000 g suhe mešanice	29
3.3.2	Priprava svežih vzorcev	29
3.3.3	Nega vzorcev	30
3.4	Priprava betonskih prizem	31
3.4.1	Predpostavke	31
3.4.2	Recepture za betonske mešanice	32
3.4.3	Priprava svežih vzorcev	37
3.4.4	Nega vzorcev	37
3.5	Eksperimentalne metode	38
3.5.1	Hg porozimetrija	38
3.5.2	SEM analiza	39
3.5.3	Določanje vpojnosti vode s sušenjem v sušilniku	40
3.5.4	Preizkus upogibne in tlačne trdnosti drobljenega agregata in betonskih vzorcev	40
3.5.5	Preizkus tlačne trdnosti granuliranega agregata	42
3.5.6	Določitev gostote betonskih vzorcev	42
3.5.7	Preverjanje prostorninske obstojnosti agregata	43
3.6	Rezultati in diskusija	44
3.6.1	Hg porozimetrija drobljenega in granuliranega agregata	44
3.6.2	SEM analiza	46
3.6.3	Določanje vpojnosti vode s sušenjem v sušilniku	47
3.6.4	Preizkus upogibne in tlačne trdnosti prizmic pred pripravo drobljenega agregata	48
3.6.5	Preizkus tlačne trdnosti granuliranega agregata	49
3.6.6	Določitev gostote betonskih vzorcev	49
3.6.7	SEM analiza betonskih vzorcev	50
3.6.8	Preverjanje prostorninske obstojnosti agregata	51
3.6.9	Preizkus upogibne in tlačne trdnosti betonskih vzorcev	52
4	ZAKLJUČEK	54
VIRI.....		57

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Primer odlagališča elektrofiltrskega pepela (povzeto po: www.fhiplantservices.com dne 19.2.2015).</i>	1
<i>Slika 2: Vpliv vodocementnega razmerja na hidratacijo cementa (Žarnić, 2005).</i>	8
<i>Slika 3: Izgled preloma betona z zaobljenim in drobljenim agregatom - neobdelan in obdelan agregat (prirejeno po Rocco et al., 2009).</i>	12
<i>Slika 4: Opredelitev lahkih agregatov glede na izvor.</i>	12
<i>Slika 5: Shematsk prikaz faz formiranja posamezne granule (povzeto po: http://www.ipc-dresden.de, na dan 10.12.2014).</i>	14
<i>Slika 6: Rezultati sejalne analize EFP po posameznih frakcijah.</i>	22
<i>Slika 7: Dobljene posamezne frakcije agregata iz EFP po recepturi PT1.</i>	28
<i>Slika 8: Granulirni krožnik s shemo nastajanja granul (prirejeno po Sivakumar et al., 2012)</i>	30
<i>Slika 9: Posamezne frakcije granuliranega agregata iz EFP s sestavo GT1 po preteku 28 dni staranja</i>	31
<i>Slika 10: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 mm.</i>	33
<i>Slika 11: Stresalna mizica s konusom.</i>	35
<i>Slika 12: Prelomi betonskih prizem iz primerjanih agregatov po 28 dnevem negovanju.</i>	37
<i>Slika 13: Hg porozimeter na Zavodu za gradbeništvo Ljubljana (povzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).</i>	38
<i>Slika 14: Vrstični elektronski mikroskop (Scanning electron microscope) JEOL 5500 LV (prevzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).</i>	39
<i>Slika 15: Avtomatska stiskalnica ToniNorm na Zavodu za gradbeništvo Ljubljana (prevzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).</i>	40
<i>Slika 16: Shema tritočkovnega upogibnega preizkusa. (Dimenzije so podane v mm)</i>	41
<i>Slika 17: Shema tlačnega preizkusa. (Dimenzije so podane v cm).</i>	41
<i>Slika 18: Shematični prikaz preverjanaj tlačne trdnosti na granuliranem vzorcu. (prirejeno po Cheeseman et al., 2005)</i>	42
<i>Slika 19: Prerez drobljenega in granuliranega vzorca pri povečavi 35x.</i>	46
<i>Slika 20: Prerez drobljenega in granuliranega vzorca pri povečavi 100x.</i>	46
<i>Slika 21: Prerez drobljenega in granuliranega agregata, uporabljenega v betonu, pri povečavi 50x.</i>	50
<i>Slika 22: Prerez drobljenega in granuliranega agregata, uporabljenega v betonu, pri povečavi 200x.</i>	50

KAZALO TABEL

<i>Tabela 1: Pet glavnih skupin cementov.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2: Kemijska analiza elektrofiltrskega pepela</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3: Rezultati sejalne analize elektrofiltrskega pepela</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 4: Rezultati tlačne in upogibne trdnosti mešanic.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 5: Podani rezultati izračunanih indeksov aktivnosti in podani indeksi aktivnosti v standardu SIST EN 450-1: 2012 (E).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 6: Rezultati preiskave vsebnosti prostega CaO v EFP.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 7: Predstavljene izračunane količine sestavin za izdelavo mešanic.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 8: Dejansko porabljene količine, potrebne za izdelavo vsake od mešanic.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 9: Predstavljene izračunane količine, potrebne za izdelavo primerjalne mešanice GT1.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 10: Vsebnost posameznih frakcij določena po standardu SIST 1026: 2008.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 11: Poimenovanje posameznih delov stresalne mizice.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 12: Receptura za potrebno količino za 21 prizem, s količino porabljene vode.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 13: Količine posameznih sestavin preverjane mešanice.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 14: Rezultati Hg porozimetrije za drobljen in granuliran agregat iz EFP.</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 15: Rezultati preizkusa vpojnosti drobljenega in granuliranega agregata iz EFP.</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 16: Rezultati preiskave upogibne in tlačne trdnosti.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 17: Rezultati tlačne trdnosti posameznih granul granuliranega agregata.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 18: Rezultati določanja gostote betonskih vzorcev.</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 19: Izvrednoteni rezultati preizkusa prostorninske odpornosti agregata.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 20: Rezultati preiskave upogibne in tlačne trdnosti betonskih prizem iz različnih agregatov.....</i>	<i>52</i>

KAZALO GRAFIKONOV

<i>Grafikon 1: Kvantitativna porazdelitev posameznih mineralnih faz v EFP.</i>	20
<i>Grafikon 2: Prikaz rezultatov sejalne analize EFP.....</i>	21
<i>Grafikon 3: Prikaz sestave mešanic posameznih vzorcev.</i>	26
<i>Grafikon 4: Primerjava porazdelitve por v preizkušancih PT1, PT2 in PT3.</i>	45
<i>Grafikon 5: Primerjava porazdelitve por v preizkušancih PT1 in GT1.</i>	45
<i>Grafikon 6: Prikaz razvoja upogibnih in tlačnih napetosti posameznih vzorcev.</i>	48
<i>Grafikon 7: Prikaz razvoja upogibnih in tlačnih napetosti posameznih betonskih vzorcev. ...</i>	53

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

EFP	elektrofiltrski pepel
TE – TOL	Termoelektrarna - toplarna Ljubljana
TET	Termoelektrarna Trbovlje
TEŠ	Termoelektrarna Šoštanj
CEM	Cement
SiO ₂	silicijev dioksid
CaO	kalcijev oksid
Fe ₂ O ₃	diželezov trioksid
Al ₂ O ₃	aluminijev oksid
MgO	magnezijev oksid
K ₂ O	kalijev oksid
Na ₂ O	natrijev oksid
TiO ₂	titanov dioksid
PT1	Vzorec drobljenega agregata z razmerjem komponent: 90 % EFP in 10 % CEM
PT2	Vzorec drobljenega agregata z razmerjem komponent: 80 % EFP in 20 % CEM
PT3	Vzorec drobljenega agregata z razmerjem komponent: 70 % EFP in 30 % CEM
GT1	Vzorec granuliranega agregata z razmerjem komponent: 90 % EFP in 10 % CEM
PT1-B	Betonski vzorec iz drobljenega agregata
GT1-B	Betonski vzorec iz granuliranega agregata
APN-B	Betonski vzorec iz apnenčevega agregata
V _c	Vodocementno razmerje
Hg	Živo srebro
Ca(OH) ₂	Kalcijev hidroksid

pH	Merilo za koncentracijo hidroksidnih ionov v raztopini in s tem posledično za njeno kislost ali alkalnost
CEM I 42,5 R	Portlandski cement, ki pospešeno veže in dosega minimalno trdnost po 28 dneh $\geq 42,5$ MPa
m	Masa vzorca
V	Volumen vzorca
ρ	Gostota vzorca
r	Radij vzorca
ΔP	Sprememba kapilarnega tlaka
γ	Površinska napetost tekočine
θ	Kot omočenja
SEM	Vrstični elektronski mikroskop (Scanning electron microscope)
w	Vpojnost za vodo
M_1	Masa z vodo zasičenega površinsko suhega vzorca agregata
M_2	Masa suhega vzorca
R_f	Upogibna trdnost vzorca
F_f	Mejna sila pri določanju upogibne trdnosti
l	Razmak med podporami pri določanju upogibne trdnosti
a	Krajša stran epruvete pri določanju upogibne trdnosti
R_c	Tlačna trdnost
F_c	Mejna sila pri določanju tlačne trdnosti

Ta stran je namenoma prazna

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema, ki je predmet raziskave

V Sloveniji večino energije proizvedemo v termoelektrarnah, in sicer trenutno v Termoelektrarni Šoštanj (TEŠ) in Termoelektrarni – toplarni Ljubljana (TE-TOL), do pred kratkim pa tudi v Termoelektrarni Trbovlje (TET). Za kurilno sredstvo uporabljajo termoelektrarne lignit in rjavi premog različnih kakovosti. Kot stranski produkt pri izgorevanju premoga in lignita nastaja približno 50 % elektrofiltrskega pepela (EFP), 38 % sadre in 12 % žindre (ARSO, 2009).

Odlagališča teh odpadnih materialov so velik okoljski problem. Predstavljajo velik vpliv na posamezne sestavine okolja, kot so relief, voda, zrak, prst in vegetacija. Največjo vlogo pri tem ima veter, ki raznaša odpadne delce po okolici. Prav tako ima velik vpliv dež, ki izpira odpadne delce v podtalnice in vodotoke. Primer takšnega odlagališča pri nas je odlagališče Prapretno, kjer se je odlagal elektrofiltrski pepel iz Termoelektrarne Trbovlje. (Pogačnik, 2007)



Slika 1: Primer odlagališča elektrofiltrskega pepela (povzeto po: www.fhiplantservices.com dne 19.2.2015).

Že pred letom 1980 so v Sloveniji dajali velik poudarek recikliranju odpadnih materialov, natančneje ponovni uporabi elektrofiltrskega pepela. Uporabljali so ga za proizvodnjo zidakov, raznih vrst malt in pri proizvodnji cementa. Zaradi ugotovitev povišane koncentracije radona v objektih, kateri so bili zgrajeni iz zidakov narejenih iz EFP, so v devetdesetih letih prejšnjega stoletja omejili dovoljene proizvedene količine elektrofiltrskega pepela. S tem se je zavrgla njegova uporaba v gradbeništvo. (Petkovšek, 2004)

Danes se na odlagališčih odlaga le še 7% EFP. Ostalo že uporabljajo kot polnilo v rudnikih, dodatek v proizvodnji cementa, kot material za utrjevanje nasipov,... Kljub koristni uporabi, lahko pride do izpiranja težkih kovin in onesnaževanja podtalnice, zato si vse več ljudi prizadeva za ekonomično uporabo EFP, ki bi ob enem bila prijazna do okolja.

1.2 Namen in cilj diplomskega dela

V okviru diplomskega dela smo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije razvili agregata iz odpadnega elektrofiltrskega pepela po postopku hladnega utrjevanja z vlivanjem prizem (v nadaljevanju drobljeni agregat iz EFP) in granuliranjem (v nadaljevanju granulirani agregat iz EFP). Pri obeh smo kot dodatek za utrjevanje uporabili cementno vezivo v treh različnih deležih. Namen dela je bil medsebojno primerjati oba dobljena agregata in kasneje preizkusiti njun vpliv na trdnost betona. Agregata smo med seboj primerjali glede:

- gostote in poroznosti agregata,
- tlačne in upogibne trdnosti prizem iz mešanice EFP in cementa,
- tlačne trdnosti granul iz mešanice EFP in cementa,
- vpojnosti agregatov,
- gostote betona iz tako pripravljenih agregatov,
- tlačne in upogibne trdnosti betona.

Lastnosti betonov iz dobljenih agregatov smo primerjali z lastnostmi betona iz naravnega agregata (v nadaljevanju apnenčev agregat).

Cilj diplomske naloge je na podlagi rezultatov preiskav dokazati, da drobljeni agregat iz EFP pri ekonomični porabi cementa in energije dosega višje trdnosti, kakor granulirani agregat.

1.3 Metode preizkušanja

Vzorci iz elektrofiltrskega pepela smo pripravili po vnaprej določeni recepturi z vsebnostjo cementa 10 %, 20 % in 30%. Vse vzorce smo pripravili po poenotenem postopku mešanja in vlivanja, oz. pri granuliranem agregatu po postopku granuliranja. Za pridobivanje agregata po postopku vlivanja smo uporabili standardne kalupe dimenzij 40/40/160 mm. Preiskovali smo lastnosti strjene mešanice in drobljenega agregata. Pri postopku granuliranja smo izvedli preiskave na že narejenih in staranih granulah. Uporabili smo naslednje metode preizkušanja agregata:

- preizkus tlačne in upogibne trdnosti prizem za pridobivanje drobljenega agregata po 7 in 28 dneh,
- preizkus tlačne trdnosti granul po 28 dneh,
- preizkus določanja velikosti in porazdelitev por v agregatih z merjenjem kapilarnega tlaka (Hg-porozimetrija),
- preizkus vpojnosti agregatov,
- preizkus tlačne in upogibne trdnosti betonov po 7, 28 in 90 dneh,
- določanje gostote betonskih vzorcev.

Vsi preizkusi so bili izvedeni v skladu s standardi:

- SIST EN 450-1:2012 (E). Elektrofiltrski pepel - 1.del: Definicije, specifikacije in merila skladnosti.
- SIST EN 451-1:2004. Metode preskušanja elektrofiltrskega pepela – 1.del: Ugotavljanje deleža prostega kalcijevega oksida.
- SIST EN 196-1:2005. Metode preskušanja cementa - 1. del: Določanje trdnosti.
- SIST EN 196-2:2013. Metode preskušanja cementa – 2.del: Kemijska analiza cementa.
- SIST EN 196-3:2005+A1:2009. Metode preskušanja cementa – 3. Del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti
- SIST EN 197-1:2011. Cement - 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente
- SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.
- SIST EN 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarske malte - 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.
- SIST EN 1097-5:2008. Preskusi mehanskih in fizičnih lastnosti agregatov - 5. del: določevanje vode s sušenjem v prezračevanem sušilniku.
- SIST EN 13055-1:2002. Lahki agregati - 1. del: Lahki agregati za beton, malto in injekcijsko malto.
- SIST 1026:2008. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost- Pravila za uporabo SIST EN 206-1.
- SIST EN 206-1:2003. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost
- SIST EN 1015-3. Metode preskušanja malt za zidanje- 3. del: Določanje konsistence sveže malte

1.4 Pregled dosedanjih raziskav s področja izdelave agregatov iz elektrofiltrskega pepela

Različni avtorji so se v svojih raziskavah ukvarjali z razvijanjem postopkov za pridobivanje umetnega agregata iz elektrofiltrskega pepela. Največkrat omenjen postopek izdelave umetnega agregata je postopek granuliranja. Postopek je enostaven, ampak je za njegovo izvedbo potreben granulacijski krožnik. Kot pomanjkljivost tega postopka se pojavi tudi nenadzorovan vodocementni faktor mešanice, saj ne moremo določiti, koliko vode bo sprejela posamezna granula. Pri pridobivanju agregata po tem postopku so bile dobljene tlačne trdnosti agregata po 28 dneh staranja med 0,86 MPa in 5,2 MPa (Baykal et. al., 1999; Colangelo et. al., 2014). Dobljena tlačna trdnost je bila odvisna od dodane količine veziva. Najpogosteje je bilo uporabljeno 30 % cementa. Nekateri avtorji so kot vezivo uporabili apno, kar se je izkazalo za manj učinkovito.

Zasledili smo tudi postopek sintranja. Ta postopek združuje postopek granuliranja in postopek žganja granul. Pri tem postopku granule sicer dosežejo višjo trdnost kakor v prvem, vendar je višja poraba energije in za izvedbo postopka potrebuješ granulacijski krožnik ter rotacijsko peč. Pri pridobivanju agregata po tem postopku na osnovi pepela na rešetki (bottom ash) so bile dobljene tlačne trdnosti 5,4 MPa. (Cheeseman et. al., 2004).

Največje tlačne trdnosti umetnega agregata so dosegli pri postopku, kjer so združili sintranje in drobljenje mešanice iz EFP (Kayali et. al., 2008). Pri vseh teh postopkih se pojavi visoka poraba energije in zahteva po dragih aparataturah za vzpostavitev sistema proizvodnje umetnega agregata.

Rezultati že narejenih preiskav različnih avtorjev s podobno tematiko so predstavljeni v prilogi A.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel nastaja kot stranski produkt pri izgorevanju premoga in lignita v termoelektrarnah običajno pri temperaturi 1100 – 1200° C. V preteklosti se je EFP spuščal v ozračje, dokler niso naprave za merjenje onesnaženosti zaznale prevelike količine težkih kovin v ozračju, zato se v zadnjih desetletjih zahteva, da se dimni plini pred izpustom filtrirajo. EFP se odvaja po postopku suhega odvajanja pepela. Nekaj se ga kopiči na tleh, večina pa se ga z dimnimi plini dviguje v zrak, kjer se ulovi na elektrostatičnih filtrih.

Elektrofiltrski pepel je droben heterogen material, katerega v veliki večini sestavljajo okrogli ali zaobljeni steklasti delci. Premeri delcev znašajo od manj kot 10 μm do več kot 50 μm . Zaradi zelo različne sestave elektrofiltrskih pepelov, se zelo spreminja tudi gostota in sicer lahko znaša med 2000 kg/m^3 in 2700 kg/m^3 (Ercegovič et. al., 2010).

Kemijske sestave elektrofiltrskih pepelov se močno razlikujejo. Odvisne so od uporabljene vrste premoga, primešane jalovine, dodatkov za vezanje žvepla pri izgorevanju, načina kurjenja in popolnosti izgorevanja. Kljub temu vsi EFP vsebujejo glavni komponenti, silicijev dioksid (SiO_2) v amorfnih in kristalizirani obliki in kalcijev oksid (CaO). Obe komponenti se obravnavata kot pucolanska dodatka. Kljub ugodni pucolanski sestavi potrebuje elektrofiltrski pepel Ca(OH)_2 , da formira trden produkt.

SIST EN 197-1 klasificira pepel glede na vsebnost kalcija na silicijski pepel, kateri vsebuje manj kot 10 % CaO in kalcijski pepel, ki vsebuje več kalcijevega oksida.

2.1.1 Vlaga

Raven vlage je pomemben dejavnik predvsem zato, ker je vlažen pepel problematičen pri transportu in pri doziranju pepela mešanici. Pri hidravlično aktivnih pepelih lahko pri visoki vlažnosti pride do vezanja komponent pepela z vodo in tako pepel izgubi svojo učinkovitost. Da preprečimo naštetu, je pomemben način shranjevanja EFP.

2.1.2 Žarilna izguba

Žarilna izguba je ena od pomembnejših lastnosti EFP in jo določamo po standardu SIST EN 196-2:2013. Žarilno izgubo v pepelu v glavnem tvori neizgoreli ogljik, kateri nastane pri nepopolnem izgorevanju premoga. Pri visoki žarilni izgubi se poveča potreba po vodi. Poleg tega pa neizgoreli ogljik vpliva tudi na čas vezanja in na učinke kemijskih dodatkov, zlasti aeranta. (Dimić, 1990). Pri večanju žarilne izgube se spreminja tudi barva cementa ali betona, kar je v nekaterih primerih moteče.

2.1.3 Indeks aktivnosti

Indeks aktivnosti se določa po standardu SIST EN 450-1:2013 in nam pove ali ima EFP hidravlične oziroma cementne lastnosti. Taka reakcija nastane, ko silikatni ali alumosilikatni material reagira z mineralom portlanditom Ca(OH)_2 . Na indeks aktivnosti lahko vplivamo z mehansko predelavo pepela, kot je na primer mletje, sejanje ali s spremembami v proizvodnji. Na primer, pri naraščajočem času mletja se povečuje specifična masa, posledično se zaradi povečanega kontakta med zrni klinkerja in EFP poveča stopnja hidratacije oziroma zviša pucolanska aktivnost (Ercegovič et. al., 2008).

2.2 Cement

Cement je glavna vezivna komponenta v betonski mešanici. Je fino mleto hidravlično vezivo, ki ob stiku z vodo formira cementno pasto, katera se s pomočjo reakcije (hidratacije) strdi. Po končani hidrataciji cementne paste dobimo trden cementni kamen, ki je obstojen v vodi in lahko prenaša visoke tlačne obremenitve (Jackson, 2004). Poznamo dve glavni vrsti cementov:

- Silikatni, pri katerih so glavna sestavina silikati kalcija (C_3S)
- Aluminatni, pri katerih so glavna sestavina kalcijevi aluminati (C_3A)

Standard opredeljuje pet glavnih skupin cementov in jih označuje s naslednjimi oznakami:

Tabela 1: Pet glavnih skupin cementov.

OZNAKA	IME
CEM I	portlandski cement
CEM II	portlandski mešani cement
CEM III	žlindrin cement
CEM IV	pucolanski cement
CEM V	mešani cement

Portlandski cement je glavni predstavnik skupine silikatnih cementov. Pridobivamo ga z žganjem mešanice apnenca in gline, ali ostalih materialov podobne strukturne sestave ter zadostne reaktivnosti. Sestavine žgemo pri temperaturi 1450°C , kjer pride do fuzije komponent. Kot produkt žganja dobimo klinker, kateremu se po nadzorovanem hlajenju doda sadra in se ga pomelje, da dobimo cement. Klinkerju se lahko v fazi mletja dodajajo tudi drugi dodatki, kot so žlindra, naravna pucolanska zemlja, EFP, opalska breča.

Kemijska sestava klinkerja je običajno sledeča:

- CaO (60 do 67 %)
- SiO₂ (17 do 25 %)
- Al₂O₃ (3 do 8 %)
- Fe₂O₃ (0,5 do 6 %)
- SO₃ (1 do 3 %)
- Alaklije (K₂O, Na₂O) (0,2 do 1,3 %)

Z različnimi mineralnimi dodatki cementu izboljšamo njegove lastnosti. Portlandski cement je po standardih dovoljeno mešati z žlindro v količini do 35 % ter s pucolanom v količini do 35 %. Če cementu dodamo žlindro v količini med 36 % in 95 %, dobimo žlindrin cement. Če pa cementu dodamo pucolan v večji količini kakor 35 %, dobimo pucolanski cement (Žarnić, 2005, SIST EN 197-1:2011).

Nekateri mineralni dodatki vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice, nekateri pa na lastnosti strjenega betona. Žlindra in pucolan zmanjšujejo potrebo po vodi za doseganje želene konsistence, posledično izboljšajo obdelovalnost sveže betonske mešanice, preprečujejo segregacijo agregata ter izboljšajo odpornost betona na agresivne vplive iz okolja (Žarnić, 2005).

2.2.1 Hidratizacija cementa

Je kemijska reakcija pri kateri pride do vezanja vode in cementa. Do reakcije pride med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Na začetku je proces hidratacije odvisen od hitrosti raztapljanja mineralov klinkerja in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov. (Žarnić, 2005). Kot rezultat reakcije dobimo trden cementni kamen.

Med reakcijo pride do sproščanja temperature v cementni mešanici, katera lahko narašča od nekaj ur do nekaj dni. Ker pride do razlike v zunanji temperaturi in temperaturi v cementni mešanici, se lahko v strjeni mešanici pojavijo razpoke. Razvoj hidratacijske toplote ima lahko tudi pozitiven učinek, saj pri nizkih temperaturah okolja delno varuje cementno mešanico pred zmrzovanjem. Hidratacijsko temperaturo lahko nižamo z dodatki, kot so elektrofiltrski pepel, žlindra in mikrosilka (Kaushal et. al., 1988).

2.2.2 Vodocementno razmerje

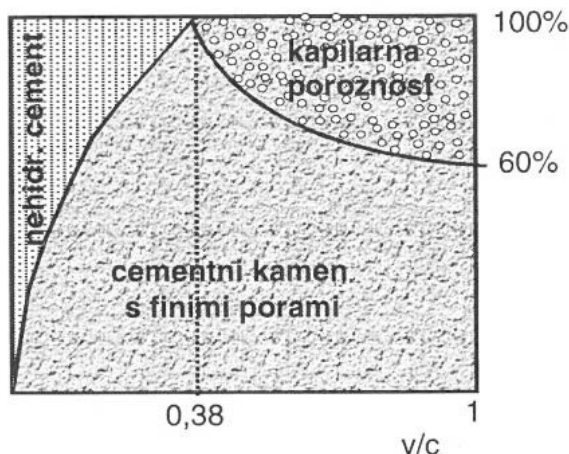
Vodocementno razmerje je razmerje med maso vode in maso cementa v mešanici in ima pomemben vpliv na proces vezanja in končno trdnost cementnega kamna. Cementne mešanice z nižjim vodocementnim razmerjem dosegajo višje trdnosti od mešanic z visokim vodocementnim razmerjem. Take mešanice je težje vgrajevati zaradi nižjega konsistenčnega stanja, kar pa lahko odpravimo z različnimi dodatki cementni pasti.

Pogosto je vodocementno razmerje definirano kot razmerje med maso vode (v) in vsoto mase cementa (c) in mase pucolanskih dodatkov (p) kot so žindra, elektrofiltrski pepel in ostali naravni pucolani. Pri kombinacijah cementa CEM I in CEM II/A z zgoraj navedenimi mineralnimi dodatki se upošteva koncept k -vrednosti (k). Tako vodocementno razmerje izračunamo po formuli:

$$\frac{v}{c} = \frac{v}{c + (k * p)}$$

Teoretično so možni sledeči primeri velikosti vodocementnega razmerja:

- $v/c < 0,38$, cement ostane nevezan v praškastem stanju, ker je v vzorcu premalo vode za popolno hidratacijo;
- $v/c = 0,38$, dovolj vode v vzorcu, da hidratizira ves cement;
- $v/c > 0,38$, odvečna voda se shrani v kapilarnih porah.



Slika 2: Vpliv vodocementnega razmerja na hidratacijo cementa (Žarnić, 2005).

Kar pa v dejanskih razmerah velikokrat ne velja, saj del vode izhlapi, hidratacija pa lahko traja do več let (Žarnić, 2005).

Odvečna voda v cementni mešanici lahko povzroči segregacijo agregata in finih frakcij. Prav tako se v mešanici z visokim vodocementnim razmerjem pojavi krčenje materiala zaradi izhlapevanja odvečne vode. Kot posledica krčenja se pojavijo notranje razpoke v cementnem kamnu.

2.2.3 Elektrofiltrski pepel kot dodatek cementu

Zaradi svojih pucolanskih lastnosti, katere se določajo po standardu SIST EN 450-1:2013 z določanjem indeksa aktivnosti, je EFP pomemben dodatek cementu. Njegova pomembna lastnost je nižanje hidratacijske temperature pri vezanju cementne paste. Kot pomembno lahko navedemo tudi to, da je EFP odpadni produkt in tako kot dodatek znižuje ceno cementu. Po standardu je določeno, da se ga lahko doda v mešan portlandski cement do 35 %. V pucolanskih cementih pa je njegova vsebnost lahko tudi do 55 % in se še vedno dosegajo zadovoljive trdnosti strjenega cementnega kamna (Mayer et. al., 2009).

Poon C. S. in sodelavci (2000) so v svojih raziskavah o vplivu elektrofiltrskega pepela na cementno pasto ugotovili, da ima EFP dvojni učinek kot dodatek cementu v betonski mešanici, in sicer deluje kot mikroagregat in kot vezni material.

Standard SIST EN 450-1:2013 (Elektrofiltrski pepel – 1.del – Definicije, specifikacije in merila skladnosti) velja za EFP, kateri vsebujejo nad 25% reaktivnega SiO_2 . Take pepele imenujemo silicijski EFP. Ta standard predpisuje zahtevane kemijske in fizikalno mehanske lastnosti EFP. V proizvodnji betona je možno uporabiti tudi druge vrste EFP, kot dodatek cementu tipa II, kot sta na primer silicijsko – kalcijski ali kalcijski EFP. Za take vrste EFP je treba pred uporabo pridobiti ustrezno tehnično soglasje ali pa je treba lastnosti takega EFP predpisati v nacionalnih standardih.

2.3 Voda

Znano je, da je pitna voda primerna za izdelavo betonskih in maltnih mešanic v kombinaciji z vezivi. Enako pa ne velja za morsko vodo, saj vsebuje velike količine mineralov in je zato le pogojno uporabna v nearmiranih betonih nižje trdnosti, pri ostalih vrstah betona pa ni uporabna. Kadar se za pripravo betona uporablja voda neznane kakovosti, moramo biti pozorni na dvoje: sestavo vode in namen uporabe strjenega betona.

Voda vsebuje drobne delce in soli, ki ustvarijo film na površini agregata, ki vpliva na sprijem cementnega veziva s površino agregata ter vpliva na proces hidratacije. Na strjevanje cementne paste močno vplivajo karbonati in natrijevi ter kalijeve bikarbonati. Natrijev karbonat pospešuje strjevanje, medtem ko natrijev bikarbonat lahko pospešuje in zavira strjevanje. Kontrolirati moramo tudi koncentracije magnezijevega sulfata in magnezijevega klorida, katere ne smejo preseči vsebnosti 4 %, saj lahko povzročijo t.i. magnezitno korozijo.

Vodi, ki se črpa iz podzemnih virov, površinski vodi in industrijski odpadni vodi ter vodi, reciklirani iz proizvodnje betona je potrebno dokazati primernost za uporabo v proizvodnji betona po SIST EN 1008. Pri uporabi teh voda za vgrajevanje v nearmirane konstrukcije, je dovoljeno takšne vode uporabiti že na podlagi primerjalnih preskusov časa vezanja in tlačne trdnosti betona pripravljenega z destilirano vodo in predvideno vodo za uporabo v betonski mešanici. Pri prečiščeni odpadni industrijski vodi je nujno potrebno pred uporabo izvesti kemično analizo in primerjalno preiskavo vpliva vode na trdnost cementnega kamna, saj vsebuje veliko različnih raztopljenih snovi, katere je skoraj nemogoče v celoti odstraniti s postopkom prečiščevanja.

Voda, primerna za uporabo v betonu je predpisana s standardom EN 1008 in mora imeti naslednje lastnosti:

- pH indeks mora biti v mejah med 4.5 – 9.5,
- količina sulfata (SO_4) ne sme presegati 2000 mg/l vode,
- vsebnost klorida ne sme presegati 500 mg/l za prednapeti beton, 1000 mg/l za beton z armaturo in 4500 mg/l za beton brez armature.
- za škodljive snovi kot so sladkor, fosfat, svinec in cink je določena največja dovoljena količina v višini 100 mg/l, medtem ko je za nitrat določena največja dovoljena količina 500 mg/l.
- za humusne snovi je predpisana meja, ko se testirani vodi doda NaOH, da ne sme barva vode biti temnejša od rumenkasto rjave.

Vodo mešanici dodajamo glede na želeno konsistenco mešanice. Pri določevanju potrebne količine vode v kubičnem metru sveže betonske mešanice si pomagamo z enačbo:

$$V = V_a + (V_p + \Delta V_p) + V_k + \Delta V_k$$

Kjer je:

- V_a – voda, ki jo vpije agregat,
- V_p – voda, ki omoči površino agregata,
- ΔV_p – dodatna voda odvisna od oblike, teksture in mineraloško petrografske sestave agregata,
- V_k – voda, potrebna za standardno konsistenco cementne paste,
- ΔV_k – dodatna voda, potrebna za doseganje zahtevane konsistence betonske mešanice.

2.4 Agregat

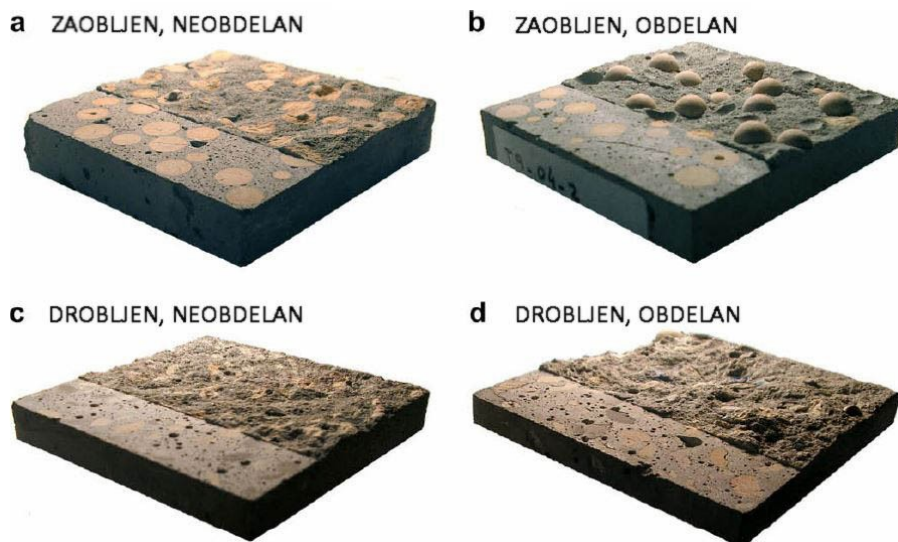
Agregati imajo pomemben vpliv na lastnosti in končno trdnost betona, v katerem so uporabljeni. V konstrukcijskih betonih zajema agregat tudi do 80% prostornine betonske mešanice, zato je pomembno, da ne podcenimo kakovosti agregata (Vengatachalapathy et.al., 2014). Kakovost agregata opredeljuje njegova zrnastostna sestava, čistost, oblika, primesi, itd. Znano je, da lastnosti agregata vplivajo na beton na sledeče načine (Žarnić, 2005):

- agregati znižujejo ceno betonu,
- agregati ustvarjajo koheziven beton, katerega je lažje obdelovati, če je agregat ustrezno sestavljen po frakcijah,

- kemično inertni agregati delujejo kot odvjalci toplote in s tem znižujejo hidratacijsko temperaturo betona,
- agregati na katere voda ne deluje, zmanjšujejo krčenje betona,
- v nekaterih primerih agregati uravnavajo površinsko trdoto betona,
- lahko vplivajo na barvitost betonske površine in na sposobnost odbijanja sončne svetlobe od površine betona,
- z agregati učinkovito kontroliramo gostoto betona,
- sposobni so tudi zviševati požarno odpornost betona.

Poznamo naravne agregate, pridobljene iz narave in umetne agregate pridobljene z različnimi procesi. Naravni agregat se pridobiva iz peskokopov (gramoznih izkopov v aluvialnih dolinah) ali kamnolomov. V peskokopih dobimo naravne prodnate granulacije medtem, ko v kamnolomih dobimo drobljeni mineralni agregat. Kamnolomi so v hribini in puščajo rano v okolju, kar je iz geološkega in okoljevarstvenega vidika neugodno. Umetne agregate pridobivamo po različnih postopkih, kot so sintranje, penjenje, vlivanje z drobljenjem, granuliranje, itd. V večini primerov so to agregati pridobljeni s ponovno uporabo odpadnih produktov iz proizvodnje. S svojo nizko gostoto spadajo večinoma med lahke agregate.

Trdnost betona ni odvisna samo od vodocementnega razmerja in konsistence, ampak nanjo pomembno vplivata tudi oblika in velikost zrn agregata. Na to temo je bilo narejenih že veliko raziskav (Donza et al., 1996; Rocco et al., 1999; Rosello et al., 2006; Rocco et al., 2009) in ugotovili so, da se razpoke v betonu hitreje razvijejo pri okroglem in gladkem agregatu, kakor pri drobljenem in hrapavem agregatu. Dokazano je, da drobljen in neobdelan agregat deluje kot zaustavljalca razpok, saj pride do dobrega sprijema elementov. V nasprotnem primeru pa gladek in obdelan (to stanje so avtorji dosegli s premaznim sredstvom, ki preprečuje oprijem) agregat razpoke zaobidejo in se tako lažje razvijejo, posledično tak beton dosega nižje trdnosti. Rezultati teh preiskav so prikazani na sliki 3.



Slika 3: Izgled preloma betona z zaobljenim in drobljenim agregatom - neobdelan in obdelan agregat (prirejeno po Rocco et al., 2009).

Pomemben vpliv na trdnost betonov in malt ima tudi sprejemnost cementne matrike in površine agregata. Za stično cono velja, da so prisotni trije mehanizmi (Zhang et al., 1990):

- fizikalna interakcija: pri agregatih z zelo gladko površino (denimo kremen) in brez kemijskih interakcij (trdnost na stični coni je izredno majhna; stična cona je najšibkejši člen sistema);
- fizikalno-kemijska interakcija: pri agregatih, kjer nastopi tudi kemijska vez (denimo pri karbonatnih agregatih);
- mehanska vez: značilna za porozne agregate z grobo površino, kjer lahko cementna pasta oziroma produkti hidratacije penetrirajo v pore agregata in s tem izboljšajo oprijem.

2.4.1 Lahki agregat



Slika 4: Opredelitev lahkih agregatov glede na izvor.

Večinoma gostota takih agregatov variira med 560 kg/m^3 in 2000 kg/m^3 (Žarnić, 2005). Zaradi njihove nizke gostote in majhne teže jih uporabljamo pri proizvodnji lahkih betonov, lahkih betonskih zidakov in pri ostalih elementi lahkih konstrukcij. Ponekod se lahki agregati uporabljajo za nasipe, drenaže, nasutja ravnih streh, kot filtri in podobno. Pomembne lastnosti lahkih umetnih agregatov so predvsem:

- uporaba odpadnega materiala, kateri nastaja kot stranski produkt pri določenem procesu,
- manjši posegi v naravo, saj jih uporabimo kot nadomestilo za naravne agregate,
- njihova lastna teža, saj z različnimi tehnološkimi procesi lahko ustvarimo veliko lažje agregate od naravnih agregatov,
- uporabni so predvsem za področja sveta, kjer nimajo naravnih virov agregata (Kayali, 2007).

Dobre lastnosti betonskih konstrukcij iz lahkih agregatov povezane z nizko gostoto so boljša toplotna izolativnost, boljša požarna odpornost in večja paropropustnost, predvsem pa nižja lastna teža. Glede na temperaturo, pri kateri se formirajo lahki agregati, jih delimo na (Chandra et al., 2003):

- visokotemperaturno pridobljene lahke agregate, kjer je temperatura proizvodnje praviloma nad $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (sintranje, penjenje),
- hidrotermalni proces, hidravlično utrjevanje pod pritiskom, kjer je temperatura med 100 in $250 \text{ }^\circ\text{C}$.
- nizkotemperaturni proces utrjevanja, ki poteka med $5 \text{ }^\circ\text{C}$ in $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Najbolj značilna lastnost lahkih agregatov je njihova velika poroznost, ki je lahko odprta ali zaprta. Odprta poroznost bistveno vpliva na vpojnost agregata in posledično na vodocementno razmerje v betonu, zaradi tega ga je pred vgrajevanjem v beton potrebno navlažiti do zasičenja. Ostale lastnosti agregata, ki lahko bistveno vplivajo na trdnost betona, so:

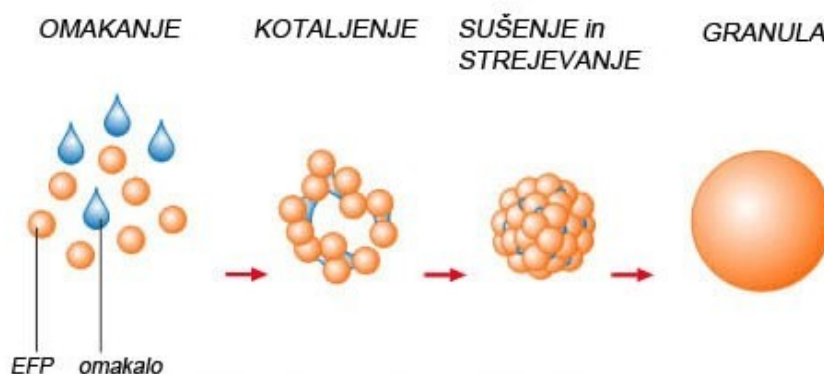
- oblika zrn agregata (zrna nepravilnih oblik dajejo večjo trdnost cementni matrici, kakor zrna ovalnih oblik),
- trdnost posameznega zrna agregata,
- sprijemnost med agregatom in cementnim vezivom.

2.4.2 Pridobivanje agregata po hladnem postopku z granuliranjem

Poznamo več načinov pridobivanja agregata z granuliranjem (J. M. J. M. Bijen, 1986):

- aglomeracija EFP na granulacijskem krožniku,
- aglomeracija EFP v granulacijskem bobnu,
- aglomeracija EFP v granulacijskem stožcu,
- aglomeracija EFP v granulacijskem mešalniku.

Pri postopku granuliranja se posamezna granula agregata formira samo s silo kotaljenja in s pomočjo omakala, katero nam služi kot sredstvo za strjevanje. Kot omakalo lahko uporabljamo navadno vodo, vodno steklo, emulzijo mineralnih olj, škrobno raztopino in odpadno vodo iz proizvodnje papirja. Z večanjem količine omakala se večja sila med posameznimi delci elektrofiltrskega pepela. Faze formiranja posamezne granule so shematsko predstavljene na sliki 5. Optimalna vsebnost vode je pri elektrofiltrskih pepelih med 20 in 25 % (J. M. J. M. Bijen, 1986). Večinoma so naprave za pršenje omakala že vgrajene v granulatorje, kjer je doziranje avtomatsko, v ostalih primerih je potrebno ročno dodajanje omakala. Pri doziranju je potrebno biti pazljiv, saj ne sme biti dodanega preveč niti premalo omakala. V primeru, ko je omakala premalo, ne pride do formiranja granul, v nasprotnem primeru lahko pride do formiranja razmočenih in prevelikih aglomeratov.



Slika 5: Shematsk prikaz faz formiranja posamezne granule (povzeto po: <http://www.ipc-dresden.de>, na dan 10.12.2014).

V primeru, ko želimo granule z manjšo poroznostjo in večjo tlačno trdnostjo, sveže granule stiskamo v stiskalnici. Na tak način dobimo kompakten agregat v obliki briket.

Sveže granule nimajo primernih lastnosti za uporabo v gradbeništvu, zato jih je potrebno utrditi. To dosežemo z visokotemperaturnim postopkom (sintranje), s hidrotermalnim procesom ali s postopkom hladnega utrjevanja. Pri postopku hladnega utrjevanja se mešanici EFP dodajo veziva, kot so cement ali apno. Po končanem formiranju granul se granule primerno neguje do dosežene zadovoljive trdnosti. Postopek pridobivanja umetnega agregata po postopku hladnega utrjevanja z granuliranjem predstavlja alternativo postopku pridobivanja agregata s sintranjem, saj je postopek okolju prijaznejši in bolj ekonomičen. Agregat pridobljen po tem postopku dosega nekoliko nižje trdnosti.

2.4.3 Visokotemperaturno pridobivanje lahkega agregata s sintranjem

Namen sintranja je s pomočjo toplote izboljšati medsebojni stik med delci elektrofiltrskega pepela. Temperatura mora biti tako visoka, da dosežemo pojav, podoben točkovnemu varjenju. Obenem pa mora biti temperatura tako nizka, da preprečimo prekomerno fuzijo delcev. Iz prakse je razvidno, da se temperature sintranja gibljejo med 900 °C in 1800 °C (Cheeseman et. al., 2005).

Proces sintranja se izvaja v rotacijskih pečeh. Opišemo ga lahko z naslednjimi tremi fazami:

- V začetni fazi se zgladijo stene por, zgladi se površina hrapavih delcev in utrjujejo se stiki med delci. V tej fazi se tvori porozni skelet materiala, pore pa ostanejo povezane med sabo. Pride do zgostitve materiala iz začetne relativne gostote 50 – 60% na 70% relativne gostote.
- V drugi fazi se pojavi zgoščevanje materiala sorazmernega difuzijskemu toku, odprta poroznost izginja in nastaja stanje zaprte poroznosti, ki je navadno dosežena pri relativnih gostotah med 92 % in 95 %. To se na zunaj izraža kot hitro krčenje. Pojavlja se rast nekaterih zrn na račun manjših.
- V zadnji fazi se zgoščevanje zelo upočasni. Zaprte pore, v katerih je ujet plin, se krčijo in izginjajo, nekatere pore pa se združijo v večje. Opazimo lahko pretirano rast nekaterih zrn, ki niso bila omejena s porami. V tej fazi dobimo končno mikrostrukturo materiala.

Zaradi boljše povezanosti med delci pepela lahko sintrani materiali dosežajo večje trdnosti pri manjši vsebnosti vezivnega medija. Kot slabo lastnost tega postopka lahko navedemo veliko porabo energije.

2.4.4 Hidrotermalni proces pridobivanja lahkega agregata

Pri tem procesu dosežemo utrjevanje delcev elektrofiltrskega pepela s kemijsko reakcijo apna ali cementa z elektrofiltrskim pepelom in vodo. Na reakcijo ugodno vpliva dodatek sadre. Postopek je že uveljavljen v proizvodnji apnenca – silikatnih zidakov in penjenega betona. Tipična sestava mešanice v hidrotermalnem procesu se sestoji iz 50 % EFP, 45 % finega kremenčevega peska, 5 % apna, vode in dodatkov. Kremenčev pesek se uporablja v mešanici, da se doseže boljša porazdelitev zrn in posledično tudi manjše število por. Zgoraj opisano mešanico moramo pred uporabo homogenizirati in napojiti z vodo. Nato počakamo, da se začne reakcija vezanja med elektrofiltrskim pepelom in apnom. Ko nastopi reakcija vezanja, formiramo granule v granulacijskem bobnu. Nastale granule je treba pregledati in izbrati granule ustrezne velikosti. Te granule premaknemo v avtoklav, kjer jih utrjujemo pod pritiskom z nasičeno paro. Pri tej reakciji se v mešanici kemično vežeta Ca(OH)_2 in SiO_2 in nastane hidrat kalcijevega silikata. Ta se razlikuje od tistega, ki nastane pri strjevanju cementa na sobni temperaturi po tem, da so ti hidrati kristalizirani. Stopnja kristalizacije je odvisna od časa izvajanja hidrotermalnega procesa in od dosežene temperature. V praksi je uveljavljen postopek avtoklaviranja, ki se izvaja 2 uri na temperaturi 140 °C. Za razliko od običajnega postopka pridobivanja granuliranega agregata, pri tem postopku dosežemo

močnejšo vez med vezivom in EFP, manjše krčenje med sušenjem, manj razpok v končnem materialu in večje tlačne trdnosti končnega materiala (Bijen, 1986).

2.4.5 Pridobivanje agregata po hladnem postopku z vlivanjem in drobljenjem

S postopkom vlivanja in drobljenja dobimo hrapav agregat poligonalne oblike. Agregati take oblike bolje vplivajo na mehanske lastnosti betonov in malt. Taki agregati poleg EFP kot osnove vsebujejo še vodo. V primeru nizke ali nične aktivnosti pepela, je mešanici potrebno dodati vezivo. Kot vezivo se v večini primerov uporablja cement, lahko pa se uporabi tudi apno.

Za proizvodnjo umetnih agregatov je razvitih že veliko metod. A pri vseh je pri samem procesu izdelave potrebna velika poraba energije. Pri pridobivanju agregata s postopkom vlivanja je le-ta nekoliko nižja, saj končnega produkta ni potrebno žgati. V prvem koraku procesa je treba med sabo dobro premešati elektrofiltrski pepel in cement, da dobimo homogeno mešanico. Nato mešanici dodamo vodo. Pri tem je potrebno biti pozoren na vodocementno razmerje, saj mešanica ne sme vsebovati premalo ali preveč vode. Dobljeno mešanico vgrajujemo v kalupe. Vzorce strjene mešanice negujemo na stalni temperaturi in vlagi, dokler ni dosežena zadostna trdnost. Zadnji korak pri pridobivanju umetno pridobljenega agregata je drobljenje v drobilniku in sejanje na zelene frakcije.

2.5 Lahki betoni

V zadnjem času je opazno povečana uporaba lahkih betonov, saj gre za beton, kateri lahko izpolnjuje hkrati zahteve po toplotni izolativnosti, višji požarni odpornosti in zahteve po ustrezni nosilnosti. Dobra lastnost konstrukcij iz lahkih betonov je njihova mala lastna teža, zato so uporabni v stavbah, pri katerih večino skupne obremenitve predstavlja lastna teža betonske konstrukcije. Posledično temu se v konstrukcijah lahko uporabijo manjši temelji in nižje število ojačitev.

Nekatere lastnosti lahkih betonov se bistveno razlikujejo od lastnosti normalnih betonov. Take lastnosti so:

- gostota in posledično lastna teža betona,
- vez med betonsko mešanico in armaturo,
- obstojnost betona,
- natezna trdnost,
- odpornost na utrujanje...

Pri lahkih betonih se velikokrat pojavijo razpoke, katere nastanejo zaradi krčenja materiala. Do pojava pride, ko agregata predhodno ne nasitimo z vodo in agregat posrka vodo iz mešanice, katera je namenjena hidrataciji cementa. Nastajanju razpok med sušenjem betona se izognemo s predhodnim nasičenjem agregata z vodo.

Wasserman s sodelavci (1997) je dokazal, da trdnosti betona ne moremo predpostaviti samo glede na trdnost agregata. Na razvoj trdnosti betona vplivata tudi vpojnost in indeks aktivnosti agregata. Zaradi velike poroznosti agregatov je treba recepture betonske mešanice prilagoditi lastnostim lahkih agregatov.

Vgrajevanje betonov z lahкими agregati je enako vgrajevanju normalnih betonov, le da so hitrosti mešanja prilagojene lahkim agregatom. Nekoliko drugače je pri lahkih agregatih nižje trdnosti, kjer najprej v mešalniku zamešamo cement in vodo in nato še ročno primešamo agregat. Vgradljivost lahkih betonov je pogojena s konsistenčnim stanjem betonske mešanice. Zaradi nižje gostote lahkega agregata se agregat pri enakem konsistenčnem stanju posede nekoliko manj, kakor pa agregat običajne gostote. Pri lahkih agregatih z nekoliko manjšo maso lahko pri vgrajevanju z vibriranjem pride do segregacije agregata in agregat izplava na površje mešanice.

Betoni narejeni iz lahkih in pollahkih agregatov dosegajo tlačno trdnosti od 20 do 35 MPa (Žarnić, 2005). Taki betoni se lahko uporabljajo za konstrukcijski beton. S posebnimi dodatki in postopki vgrajevanja lahko tlačno trdnost še povečamo, toda posledično se dvignejo stroški proizvodnje betona.

2.6 Mineralni in kemijski dodatki

Pri betonih, kateri vsebujejo lahke agregate, se kot problem pojavlja velika vpojnost agregata. To pripelje do večje potrebe po vodi, kar pa posledično dviguje vodocementno razmerje betonske mešanice. Da bi dosegli boljšo vgradljivost takega agregata pri nižjem vodocementnem razmerju, uporabljamo kemijske in mineralne dodatke. Ti dodatki vplivajo na doseganje boljših mehanskih in tehnoloških lastnosti betona. Kemijski dodatki, katere uporabljamo pri pripravi betonske mešanice, vplivajo na:

- strjevanje cementne malte in na časovni potek vezanja,
- zmanjševanje potrebe po vodi,
- izboljšanje obdelovalnosti betona,
- ustvarjanje zaprte poroznosti betona z vgradnjo zračnih mehurčkov,
- uravnavanje ostalih lastnosti (Žarnić, 2005).

Kemijske dodatke dodajamo betonski mešanici v majhnih količinah pred ali med mešanjem. Dodajamo jih v odmerkih od 0,1 % do 10 % glede na maso cementa. Za doseganje optimalnih želenih lastnosti betonske mešanice, moramo biti pozorni na izbiro kompatibilnega dodatka z uporabljenim cementom in agregatom. Pri uporabi več dodatkov v eni mešanici moramo biti pozorni na združljivost posameznih dodatkov.

Poznamo več vrst kemijskih dodatkov. Delimo jih glede na njihovo osnovno funkcijo v betonski mešanici:

- aerante,
- plastifikatorje,
- superplastifikatorje,
- zavlačevalce vezanja,
- pospeševalce vezanja, sredstva za kontrolo viskoznosti,
- ostale dodatke.

Plastifikatorji in superplastifikatorji delujejo tako, da se absorbirajo na površino delcev cementa in zaradi elektrostatskega in v določenih primerih tudi steričnega odboja preprečujejo njihovo združitve. Absorpcija zaradi specifičnosti strukture polimera poteka postopno in dlje časa. To poveča učinkovitost oziroma čas obdelovalnosti.

Mineralni dodatki, ki se dodajajo cementu in betonu, so sledeči:

- mleta granulirana plavžna žindra,
- mikrosilika,
- naravni pucolan,
- kalcijski in silicijski elektrofiltrski pepeli,
- žgani skrilavec,
- apnenec.

Ti dodatki v betonu nadomestijo del cementnega veziva. V primeru vključitve mineralnega dodatka v cement, so dovoljeni deleži določeni v standardu SIST EN 197-1:2011 za vsak dodatek posebej ali za kombinacijo mineralnih dodatkov. V standardu so določene tudi zahtevane kemijske sestave dodatkov.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

3.1.1 Karakterizacija elektrofiltrskega pepela

V preiskavi smo uporabili elektrofiltrski pepel iz Termoelektrarne-toplarne Ljubljana, kjer uporabljajo kot kurilno sredstvo uvožen indonezijski rjavi premog, s kurilno vrednostjo okoli 18 MJ/kg ter nizkim deležem pepela in žvepla (www.te-tol.si).

3.1.1.1 Kemijska analiza

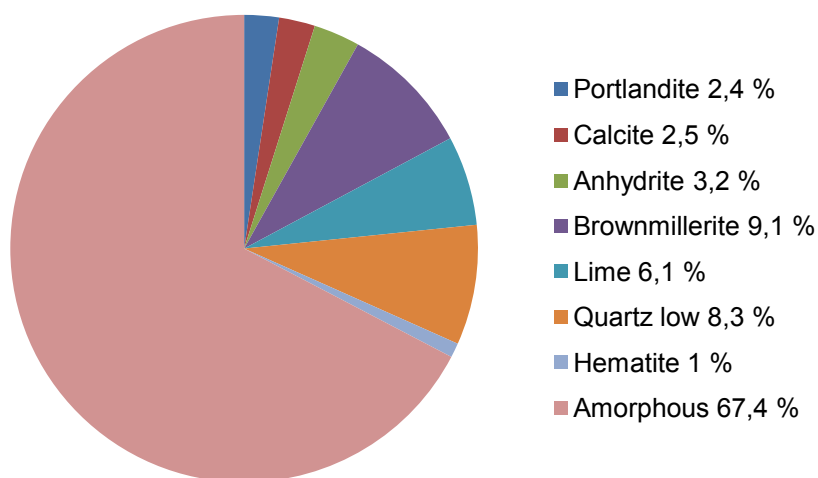
Vzorec je bil analiziran z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom SRL 8480S po postopku vlite taline. Analiziran je bil v laboratoriju Salonit Anhovo, gradbeni materiali d.d.. Kemijska analiza je pokazala, da ta pepel vsebuje 27.6 % SiO_2 , 23 % CaO , 16% Fe_2O_3 , 8.4% Al_2O_3 , 7% MgO , ostalo so še K_2O , Na_2O in TiO_2 . Po kemijski sestavi sodeč spada uporabljen EFP pod kalcijske elektrofiltrske pepela. Material ima 12,6 % žarilne izgube, kar pa ne zadostuje standardu SIST EN 450-1:2012. V tabeli 2 je podana dobljena kemijska analiza elektrofiltrskega pepela iz Te-Tol Ljubljana.

Tabela 2: Kemijska analiza elektrofiltrskega pepela

KARAKTERISTIKA	Pepel TE-TOL (%)
SiO_2	27,57
Al_2O_3	8,37
Fe_2O_3	16,24
MgO	7,06
CaO	22,99
Na_2O	0,67
K_2O	2,67
TiO_2	0,50
žarilna izguba	12,57

3.1.1.2 Mineraloška analiza elektrofiltrskega pepela

Mineraloška analiza potrjuje, da je v veliki večini prisotna steklasta faza (cca 67 %), ki se tvori pri hitrem ohlajevanju EFP. V nekoliko manjši količini je prisoten tudi mineral Brownmillerite (9.1 %). To je redek mineral, ki se pojavlja v portlandskih cementih in se sestoji iz oksida kalcija, aluminija in železa. Prisoten je tudi kremen (8.3 %), kateri je sestavljen iz silicijevega dioksida in je najbolj razširjena mineralna struktura. Že omenjenim mineralom sledijo še apno (6.1 %), anhidrit (3.2 %), kalcit (2.5 %), portlandit (2.4 %) in hematit (1 %). Delež posameznih mineralnih faz v uporabljenem EFP je prikazan na grafikonu 1.



Grafikon 1: Kvantitativna porazdelitev posameznih mineralnih faz v EFP.

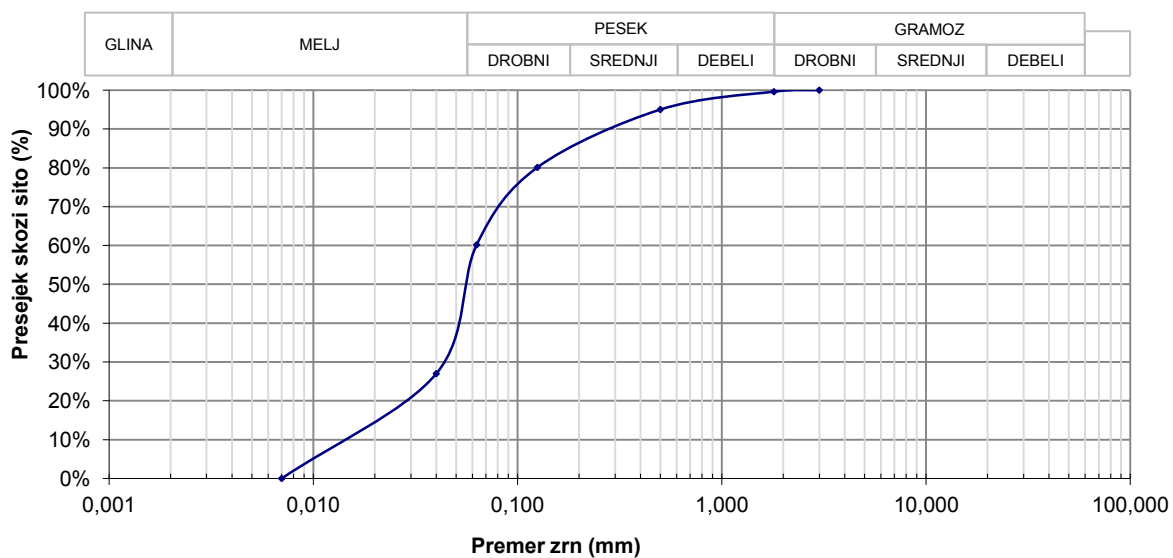
3.1.1.3 Sejalna analiza elektrofiltrskega pepela

Elektrofiltrski pepel smo presejali skozi sita z velikostmi odprtin premera 1.80 mm, 0.50 mm, 0.125 mm, 0.063 mm in 0.04 mm. Sejalna analiza je pokazala, da pepel vsebuje kar 60 % delcev, manjših od 0.063 mm, 19,9 % delcev premera med 0.063 in 0.125 mm. Ostalo so delci nad 0.125 mm premera.

Rezultati sejalne analize so predstavljeni v tabeli 3. Na grafikonu 2 je izrisana sejalna krivulja EFP, iz katere je razvidno, da je zrnavost elektrofiltrskega pepela podobna kot pri meljih.

Tabela 3: Rezultati sejalne analize elektrofiltrskega pepela

Sito (mm)	Ostane na situ		Presevek skozi sito (%)
	(g)	(%)	
1.80	0,84	0,4	99,6
0.50	8,96	4,5	95,1
0.125	30,00	15	80,1
0.063	39,88	19,94	60,16
0.040	66,43	33,2	26,96
Ostane	51,3	25,65	1,31
Izguba	2,59	1,31	



Grafikon 2: Prikaz rezultatov sejalne analize EFP.



Slika 6: Rezultati sejalne analize EFP po posameznih frakcijah.

Iz slike 6 je razvidno, da so na silih velikosti 0,5 mm in 0,125 mm večinoma ostajali neizgoreli delci premoga (saje) in zlepljeni delci EFP.

3.1.1.4 Določanje indeksa aktivnosti elektrofiltrskega pepela

Indeks aktivnosti elektrofiltrskega pepela smo določili po standardu SIST EN 450-1: 2012 (E). Določili smo ga na standardnih prizmah dim. 160 x 40 x 40 mm, v katere smo vlili dve mešanici. Prva mešanica je bila sestavljena iz 75 % testnega cementa in 25 % elektrofiltrskega pepela, druga mešanica pa je bila sestavljena samo iz 100 % testnega cementa. Sestava mešanic in rezultati testa tlačne trdnosti po standardu SIST EN 196-1 so predstavljeni v tabeli 4.

Tabela 4: Rezultati tlačne in upogibne trdnosti mešanic

Oznaka	Sestava	Tlačna trdnost (MPa)	
		Po 28 dneh	Po 90 dneh
Pepel Te-Tol	75 % testnega cementa + 25 % EFP	46.4, 48.1, 49.2, 47.2, 48.8, 47.6 (povp. 47,9)	57.5, 55.8, 56.6, 58.4, 58.4, 54.6 (povp. 56,9)
Pepel Te-Tol etalon	100 % testnega cementa	62.4, 60.6, 61.4, 62.1, 61.0, 61.2 (povp. 61,4)	70.5, 66.7, 68.9, 69.5, 69.4, 70.7 (povp. 69,3)

Indeks aktivnosti je koeficient med tlačno trdnostjo prizem iz mešanice 75 % cementa in 25 % EFP in tlačno trdnostjo prizem iz 100 % testnega cementa. Indeks aktivnosti smo določali s pomočjo tlačnih trdnosti, določenih po 28 dneh in 90 dneh staranja vzorcev v komori s stalno temperaturo 21°C in 93,7 % vlažnostjo.

Izračunani indeksi aktivnosti in mejne vrednosti indeksov, podanih v standardu, so predstavljeni v tabeli 5.

Tabela 5: Podani rezultati izračunanih indeksov aktivnosti in podani indeksi aktivnosti v standardu SIST EN 450-1: 2012 (E).

	po 28 dneh (%)		po 90 dneh (%)	
	Izračunan	Določen v standardu	Izračunan	Določen v standardu
Indeks aktivnosti	78	≥ 75	82	≥ 85

Iz rezultatov je razvidno, da elektrofilterski pepel iz Termoelektrarne in toplarne Ljubljana nima sam po sebi zadostne sposobnosti vezanja (cementnih lastnosti), saj prepočasi dobiva na trdnosti ali pa celotna reakcija vezanja poteče že v prvih 28 dneh vezanja.

3.1.1.5 Vsebnost prostega kalcijevega oksida

Glavni razlog nastanka prostega kalcijevega oksida je ponavadi neustrezna kemijska sestava elektrofilterskega pepela ali nepravilno vodenje peči med žganjem. Od količine prostega CaO v EFP je odvisna prostorninska obstojnost strjene mešanice.

Vsebnost prostega kalcijevega oksida (CaO) v uporabljenem EFP smo določili po postopku opisanem v standardu SIST EN 451-1:2004. Rezultati izračuna so predstavljeni v tabeli 6. Pri izračunu smo uporabili sledečo formulo:

$$W_{CaO} = \frac{28,04 \times C \times V}{m \times 1000} \times 100$$

kjer je:

W_{CaO} Vsebnost prostega kalcijevega oksida;

C Koncentracija raztopine solne kisline v mol/l;

V Volumen raztopine solne kisline uporabljene za titracijo izražen v ml;

m Stetan delež posušenega EFP izražen v g;

Tabela 6: Rezultati preiskave vsebnosti prostega CaO v EFP.

	pepel Te-tol	pepel Te-tol
masa EFP (g)	1,5000	1,5000
poraba HCl (ml)	14,24	14,36
CaO_{prosti} (%)	2,66	2,68
Povprečna vrednost CaO_{prosti} (%)	2,67	

V standardu SIST EN 450-1:2013 je najvišja dovoljena količina prostega kalcijevega oksida v EFP 1,5 % glede na maso. Iz tabele je razvidno, da ima naš elektrofiltrski pepel previsoko vsebnost prostega CaO, zato je potrebno izvesti test prostorninske obstojnosti.

3.1.2 Cement

V preiskavah smo uporabili portlandski cement, trdnostnega razreda 42,5 in z doseganjem visoke zgodnje trdnosti z oznako CEM I 42,5 R. Cement je sestavljen iz najmanj 95% Portland cementnega klinkerja ter sadre, kot regulatorja vezanja. Izdelek ima krajši čas vezanja ter visoke začetne in končne trdnosti. Cement je v skladu z zahtevami SIST EN 197-1. Zaradi večje ekonomičnosti agregata smo si prizadevali za čim nižjo količino cementa pri izdelavi agregata. Podrobnejši opis lastnosti cementa je podan v prilogi B.

3.1.3 Voda

V maltni mešanici smo uporabili navadno pitno vodo iz javnega vodovodnega omrežja Ljubljana s pH vrednostjo 7,5. Letna raziskava vode je pokazala, da voda ni korozivna. V standardu SIST 1026:2008 je zapisano, da se pitna voda vedno šteje za primerno za uporabo v betonski mešanici in je zato ni treba preiskovati.

Pri izdelavi primerjalnega granuliranega agregata iz EFP smo vodi dodali omakalo in sicer nekaj kapljic lauryla na 1l vode. S tem smo dosegli znižanje površinske napetosti pri izdelavi granul.

3.1.4 Agregati uporabljeni v betonu

Pripravili smo tri različne mešanice lahkega betona, in sicer enega z drobljenim agregatom (PT1-B), enega z granuliranim agregatom (GT1-B) in enega z navadnim apnenčevim agregatom (APN-B). Prva dva agregata spadata med lahke agregate, apnenčev agregat pa spada med agregate z normalno gostoto. Lahke agregate smo predhodno namočili v vodo, da smo dobili agregat, nasičen z vodo, a površinsko suh. Apnenčev agregat ima že tako majhno vpojnost, zato je bilo potrebno poskrbeli le, da je bil površinsko suh.

3.1.5 Kemijski dodatki v betonski mešanici

Pri primerjavi vplivov izdelanih agregatov na lastnosti betona, smo pri pripravi betonske mešanice uporabili superplastifikator Cementol Hiperplast 179. Superplastifikator se betonski mešanici dozira predhodno primešan vodi v količini od 0,4 % do 2,1 % glede na maso veziva. Dodatek je visoko učinkovit superplastifikator primeren za izdelavo gradbiščnih ter transportnih betonov z dolgimi časi obdelovalnosti in za betone pri višjih temperaturah.

Superplastifikator deluje tako, da se adsorbira na cementne delce. Polimerne molekule s svojo strukturo omrežijo cementne delce in preprečijo njihovo združevanje. Adsorpcija tako poteka postopno in dlje časa. Podrobnejši opis lastnosti kemijskega dodatka Cementol hiperplast 179 je podan v prilogi C.

3.1.6 Mineralni dodatki v betonski mešanici

Ker smo si pri pripravi betonskih vzorcev prizadevali za čim manjšo porabo cementa, smo mu dodali mineralni dodatek elektrofiltrski pepel. Največjo dovoljeno količino mineralnega dodatka smo določili po standardu SIST 1026:2008, kateri določa k - vrednost za elektrofiltrski pepel po SIST EN 450 enak 0,4.

Največja količina elektrofiltrskega pepela za uporabljen cement CEM I mora ustrezati naslednjemu masnemu razmerju:

CEM I	elektrofiltrski pepel/cement $\leq 0,33$
-------	--

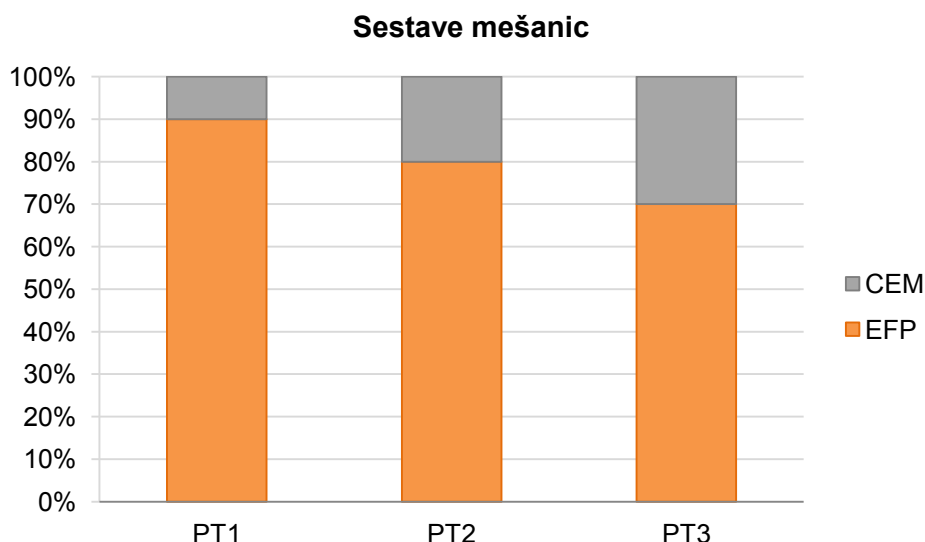
Lahko se uporabi tudi večja količina EFP, vendar se ne sme upoštevati v izračunu vodocementnega razmerja.

Odločili smo se, da v uporabljeni betonski mešanici 30 % cementa CEM I zamenjamo z mineralnim dodatkom (EFP). V primeru zmerne do močne nasičenosti z vodo, ki vsebuje sredstva za tajanje ali z morsko vodo se koncept k – vrednosti odsvetuje.

3.2 Priprava preizkusnih vzorcev drobljenega agregata iz EFP

3.2.1 Receptura za 4000 g suhe mešanice

Za izdelavo agregata smo pripravili tri mešanice iz EFP in CEM I. Uporabili smo tri različne količine CEM I, in sicer 10 %, 20 % ter 30 %, preostalo je bil EFP, kakor je prikazano v grafikonu 3.



Grafikon 3: Prikaz deležev posameznih sestavin v vzorcih.

Kot zahtevo pri izračunu potrebnih količin, smo podali vodocementno razmerje in sicer:

$$v/c = 0,5$$

kjer je v količina vode (g) in c količina cementa (g). Kot količino cementa smo upoštevali vsoto mase cementa in mase fino mletega EFP. Na podlagi vodocementnega razmerja smo izračunali količino potrebne vode. V tabeli 7 so prikazane izračunane količine za 4000 g suhe mešanice.

Tabela 7: Predstavljene izračunane količine sestavin za izdelavo mešanic.

OZNAKA	SESTAVA MEŠANICE	EFP (g)	CEMENT (g)	VODA (g)
PT1	90 % EFP + 10 % CEM	3600	400	2000
PT2	80 % EFP + 20 % CEM	3200	800	2000
PT3	70 % EFP + 30 % CEM	2800	1200	2000

3.2.2 Priprava sveže mešanice

Za začetek je bilo treba natehtati izračunano količino mešanice in med seboj temeljito premešati suhe komponente. Da so se komponente res temeljito premešale, smo jih po ročnem mešanju še presejali skozi sito premera 0,5 mm. S tem smo razbili eventualne aglomerate in dodatno podrobili trdnejše ostanke na situ.

Vse mešanice smo pripravili po standardu SIST EN 196-1:2005 v električnem mešalniku Hobart s časom mešanja 2 minuti. Vgrajevali smo jih v standardne kalupe dim. 160 x 40 x 40 mm. Pri mešanju mešanic se je pokazala večja potreba po vodi, kakor pa je bila z izračunom predpostavljena količina. Menimo, da je prišlo do tega zaradi majhne nasipne gostote in zaradi visoke žarilne izgube uporabljenega EFP, saj ko se je zmanjševala količina EFP v vzorcu, se je nižala tudi potreba po vodi. Količine dejansko porabljenih komponent mešanice so predstavljene v tabeli 8. Da je bila vgradnja lažja, smo vzorce med vgradnjo 2 minuti vibrirali na vibracijski mizici. Posledično smo s tem zmanjšali vsebnost zračnih mehurčkov v vzorcih.

Tabela 8: Dejansko porabljene količine, potrebne za izdelavo vsake od mešanic.

OZNAKA	SESTAVA MEŠANICE	CEMENT (g)	EFP (g)	VODA (g)
PT1	90 % EFP + 10 % CEM	400	3600	2050
PT2	80 % EFP + 20 % CEM	800	3200	2065*
PT3	70 % EFP + 30 % CEM	1200	2800	1890

Opomba: *Pri pripravi vzorca PT2 je bilo dodane nekoliko preveč vode.

3.2.3 Nega vzorcev

Hidratacija je kompleksna serija reakcij, ki nastanejo pri procesu vezanja vode in cementa. Za vzpostavitev teh reakcij je potrebna voda, zato smo takoj po vgradnji dali vzorce na negovanje v komoro s stalno temperaturo 21°C in 93,7 % vlažnostjo. Vzorci so že po enem dnevu toliko pridobili na trdnosti, da smo jih lahko razkalupili in nadaljevali z njihovo nego v komori.

3.2.4 Drobljenje vzorcev

Vzorčne prizme je bilo potrebno predhodno zdrobiti s pomočjo kladiva na manjše delce. Te delce smo nato podrobili še v čeljustnem mlinu BB – 50, znamke Retsch, v katerem se lahko melje vsak trd in krhek material s trdoto po Moshu večjo kot 3.

Začeli smo pri drobljenju na delce premera 7 mm. Zdrobljene vzorce smo presejali skozi sita premera odprtin 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1mm in 0.5 mm. Ostanke na situ s premerom 8 mm smo še enkrat zdrobili na delce manjše od 5 mm. Posamezne frakcije dobljenega agregata smo do njihove uporabe shranili v vrečah na suhem. Vzorci posameznih frakcij drobljenega agregata so prikazani na sliki 7.



Slika 7: Dobljene posamezne frakcije agregata iz EFP po recepturi PT1.

3.3 Priprava preizkusnih vzorcev granuliranega agregata iz EFP

3.3.1 Receptura za 4000 g suhe mešanice

Cilj nam je bil narediti čim bolj ekonomičen agregat. Ker agregatu ceno dviguje visoka cena cementa, smo težili k čim manjši porabi le tega. Iz tlačnih trdnosti prizem, ki smo jih kasneje podrobili v drobljen agregat in so predstajene v tabeli 16 je razvidno, da že z 10 % vsebnosti cementa v mešanici dosežemo zadovoljive trdnosti za lahke agregate. Na podlagi teh podatkov smo se odločili za izdelavo primerjalnega granuliranega agregata z vsebnostjo cementa 10% celotne mešanice. Celotna sestava mešanice je predstavljena v tabeli 9.

Tabela 9: Predstavljene izračunane količine, potrebne za izdelavo primerjalne mešanice GT1.

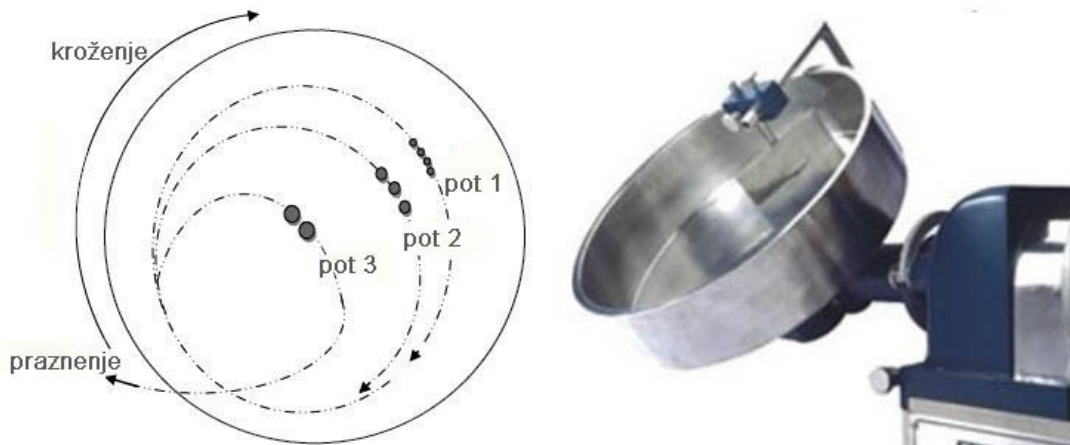
OZNAKA	SESTAVA MEŠANICE	CEMENT (g)	EFP (g)	VODA (g)
GT1	90 % EFP + 10 % CEM	400	3600	Po potrebi

3.3.2 Priprava svežih vzorcev

Za začetek je bilo treba natehtati izračunane količine mešanice in med seboj temeljito premešati suhe komponente. Ker smo hoteli doseči res temeljito pomešanje komponent, smo jih po ročnem mešanju še presejali skozi sito premera 0,5 mm. S tem smo razbili eventualne aglomerate in dodatno podrobili trdnejše ostanke na situ.

Pomembni tehnološki parameter za formiranje granul je znižanje površinske napetosti. V ta namen je vodi treba dodati omakalo, voda tako lažje omoči fini prah in se zato granule lažje tvorijo. Na laboratorijskem nivoju smo dodali nekaj kapljic laurya na 1l vode.

Učinkovitost izdelave granul je odvisna od pogojev granuliranja, kot so naklon granularnega krožnika, število obratov in čas vrtenja. Ti pogoji so odvisni od velikosti in zmožnosti granulatorja, zato je treba za vsakega posebej določiti najbolj optimalne pogoje.



Slika 8: Granulirni krožnik s shemo nastajanja granul (prirejeno po Sivakumar et. al., 2012)

Vzorke smo pripravljali na granulirnem krožniku znamke Eirich pri naslednjih pogojih:

Naklon granulirnega krožnika: 60°

Število obratov: 280 obratov/min

Čas vrtenja: cca 5 min

Na granulirni krožnik smo nasuli mešanico EFP in cementa ter pričeli z mešanjem. Mešali smo 5 min in mešanici z dozirno ampulo enakomerno dodajali vodo. Najprej so nastale majhne granule, katere so postopno povečevale svoj obseg z višanjem števila obratov granulirnega krožnika (prikazano na sliki 8). Po končanem mešanju smo nastale granule presejala skozi sita s premerom 8 mm, 4 mm in 2 mm. Zaradi vlažnosti mešanice ni bilo mogoče presejati skozi sita z manjšimi premeri odprtin. Nadmerna zrna in ostanek smo vrnili nazaj v granulator. Sveže pripravljene granule smo shranili na pladnjih v tankih plasteh.

3.3.3 Nega vzorcev

Pri izdelavi granul smo ugotovili, da v granulah ni zadosti vode, ki bi omogočala hidratacijo cementa. Zato smo vse granule takoj po izdelavi premaknili za 28 dni v komoro s stalno 93,7 % vlažnostjo, zaradi česar se je znatno povečala trdnost materiala. Po preteku 28 dni smo agregat presejali skozi sita premera 8 mm, 4 mm, 2 mm in 1 mm. Tak agregat smo shranili v označenih vrečah po posameznih frakcijah. Na sliki 9 je prikazan dobljen granuliran agregat presejan po posameznih frakcijah.



Slika 9: Posamezne frakcije granuliranega agregata iz EFP s sestavo GT1 po preteku 28 dni staranja .

3.4 Priprava betonskih prizem

3.4.1 Predpostavke

Pri izračunu recepture za betonske prizme smo izhajali iz predpostavk za najbolj osnoven primer betona brez dodatkov za količino 1 m^3 :

$$m_{cem} = 400 \text{ kg (CEM + 30 \% EFP)}$$

$$m_{vode} = 180 \text{ kg} - 200 \text{ kg (+ voda, ki jo vpije agregat)}$$

$$V_{zraka} = 3 \%$$

Superplastifikator po potrebi do razleza na stresalni mizici 150 – 200 mm.

Predpostavljene količine smo preračunali na potrebno vzorčno količino s pomočjo sledečih prostorninskih mas in gostot posameznih sestavin:

$$\rho_{cem} = 3100 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{agr\ apn} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{agr\ EFP\ Drobljen} = 1460 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{agr\ EFP\ Granuliran} = 920 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{vode} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Iz predpostavljenih količin za 1m^3 smo preračunali potrebno količino agregata v mešanici. Nato smo še določili, kolikšni delež mešanice posamezna količina zavzame.

DELEŽ MEŠANICE:

$V_{cem} = \frac{m_{cem}}{\rho_{cem}} = 0,129 \text{ m}^3$	12,9 %
$V_{vode} = \frac{m_{vode}}{\rho_{vode}} = 0,18 \text{ m}^3$	18 %
$V_{zrak} = 1 \text{ m}^3 \cdot 0,03 = 0,03 \text{ m}^3$	3 %
$V_{agr} = 1 \text{ m}^3 - 0,129 \text{ m}^3 - 0,18 \text{ m}^3 - 0,03 \text{ m}^3 = 0,661 \text{ m}^3$	66,1%

3.4.2 Recepture za betonske mešanice

Ker imata drobljen in granuliran agregat iz elektrofiltrskega pepela visoko vpojnost, smo recepturo za betonske mešanice z lahkimi agregati nekoliko prilagodili, in sicer tako, da smo dosegli konsistenčno stanje 150 mm razleza na stresalni mizici. To smo dosegli tako, da smo agregat predhodno namočili, da se je nasitil z vodo in mešanici dodali superplastifikator Hiperplast 179 v predpisani količini. Priredili smo tudi recepturo za apnenčev agregat, saj kljub temu, da smo mešanici dodali superplastifikator, se je pokazala večja potreba po vodi za konsistenčno stanje 150 mm razleza na stresalni mizici. Dobljene deleže posamezne sestavine mešanice smo preračunali na prostornino $V = 5376 \text{ cm}^3$, ki zadošča za izvedbo 21 prizem.

Vsebnost posameznih frakcij drobljenega in granuliranega agregata smo določili po standardu SIST 1026:2008, dodatek 2 – Priporočene mejne krivulje zrnivosti mešanice agregata, in sicer po krivulji B₈ za drobljen agregat in po krivulji A₈ za granuliran agregat (slika 10). Vsebnost posameznih frakcij je predstavljena v tabeli 10.

Preračunane količine za $V = 5376 \text{ cm}^3$:

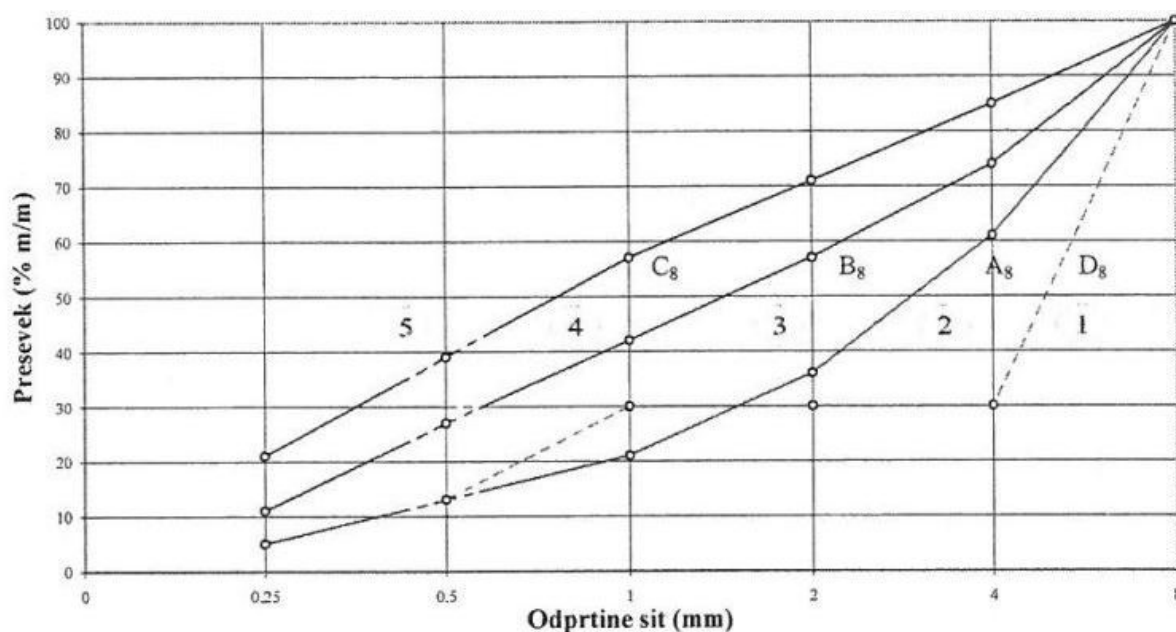
Vezivo: $V_{cem} = 5376 \text{ cm}^3 \cdot 0,129 = 693,5 \text{ cm}^3$
 $m_{cem} = 3,1 \text{ g/cm}^3 \cdot 693,5 \text{ cm}^3 = 2149,9 \text{ g}$

Voda: $V_{voda} = 5376 \text{ cm}^3 \cdot 0,18 = 967,7 \text{ cm}^3$
 $m_{cem} = 1 \text{ g/cm}^3 \cdot 967,7 \text{ cm}^3 = 967,7 \text{ g}$

Drobljeni agregat iz EFP: $V_{PT1} = 5376 \text{ cm}^3 \cdot 0,66 = 3553,5 \text{ cm}^3$
 $m_{PT1} = 1,46 \text{ g/cm}^3 \cdot 3553,5 \text{ cm}^3 = 5188 \text{ g}$

Granulirani agregat iz EFP: $V_{GT1} = 5376 \text{ cm}^3 \cdot 0,66 = 3553,5 \text{ cm}^3$
 $m_{GT1} = 0,92 \text{ g/cm}^3 \cdot 3553,5 \text{ cm}^3 = 3269,2 \text{ g}$

Naravni agregat: $V_{APN} = 5376 \text{ cm}^3 \cdot 0,66 = 3553,5 \text{ cm}^3$
 $m_{APN} = 2,7 \text{ g/cm}^3 \cdot 3553,5 \text{ cm}^3 = 9594,5 \text{ g}$



Slika 10: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za mešanico agregata 0/8 mm po standardu SIST 1026:2008.

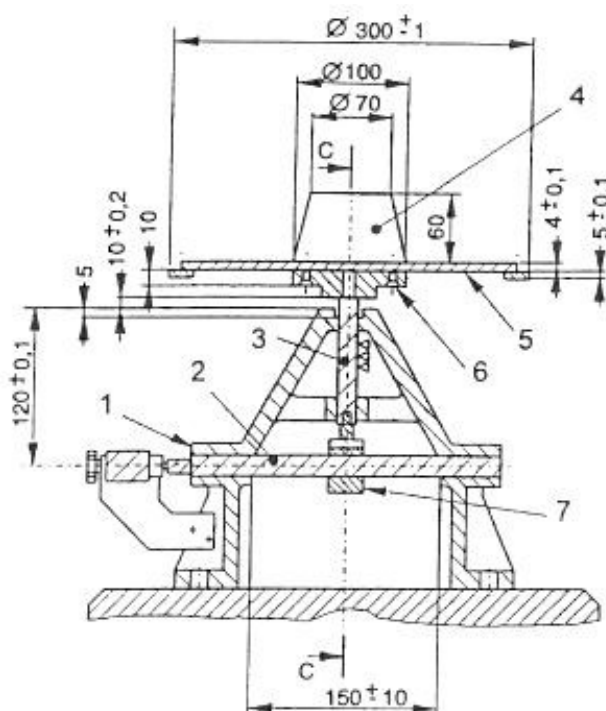
Tabela 10: Vsebnost posameznih frakcij določena po standardu SIST 1026: 2008.

Frakcija (mm)	Drobljeni agregat		Granuliran agregat		Apnenčev agregat	
	Delež frakcije (%)	Masa frakcije (g)	Delež frakcije (%)	Masa frakcije (g)	Delež frakcije (%)	Masa frakcije (g)
4 – 8	26	1349	39	1275	26	2495
2 – 4	17	882	25	817	17	1631
1 – 5	15	778	15	490	15	1439
0 – 1	42	2179	21	687	42	4030
SKUPAJ	100	5188	100	3269	100	9595

Preden smo se lotili vgrajevanja vzorcev, smo na količini 1000 g od vsake mešanice določili potrebno vodo in količino superplastifikatorja za razlez na stresalni mizici med 150 in 200 mm. Stresalna mizica je shematsko prikazana na sliki 11. Zaradi največje velikosti zrna 8 mm smo se odločili, da uporabimo metodo za določanje konsistence malt po standardu SIST EN 1015-3.

Tabela 11: Poimenovanje posameznih delov stresalne mizice.

- 1 stojalo
- 2 horizontalna os
- 3 dvižna od
- 4 odrezani stožčasti modul
- 5 plošča
- 6 toga plošča
- 7 dvižni mehanizem



Slika 11: Stresalna mizica s konusom.

Pred izvedbo preizkusa smo agregat nasitili z vodo. Testno mešanico smo namešali v mešalcu po predpostavljene recepturi, ji dodali vodo in superplastifikator v količini 0.5 % od mase cementa. Mešali smo jo 2 minuti in jo vgradili v odrezani stožčasti modul. Stresalno mizico smo 15-krat dvignili in spustili in odmerili razlez mešanice. Odmerili smo ga po dveh pravokotnih radijih in preračunali njegovo srednjo vrednost. Razlezi vseh mešanic so bili enaki. Merili so 155 mm. S tem preizkusom smo dobili količino vode, ki jo še moramo dodati mešanici, da bo lahko vgradljiva.

Pred vgradnjo smo vzorce agregata namočili, da so se zasitili z vodo in jih stekali, da smo določili količino vsrkanе vode. To vodo smo prišteli izračunani vodi in dodatno dodali vodi za doseg želenega konsistenčnega stanja. Receptura mešanice za izvedbo 21 prizem z dejansko porabljenе vodo je predstavljena v tabeli 12. Po standardu SIST EN 206 – 1: 2003 smo količino 30 % cementa nadomestili z elektrofiltrskim pepelom po formuli:

$$\frac{EFP}{cement} \leq 0,30$$

Tabela 12: Receptura za potrebno količino za 21 prizem, s količino porabljene vode.

Oznaka	PT1-B	GT1-B	APN-B
Tip agregata	drobljen	granuliran	drobljen
količina (g)			
agregat	5188	3269	9595
cement	1505	1505	1505
EFP (kot dodatek cementu)	645	645	645
voda v agregatu	917	1531	0
dodana voda	1110	769	1227
superplastifikator	7,5	7,5	7,5
v/c razmerje			
v/c razmerje (upoštevana voda v agregatu)	1,15	1,30	0,69
v/c razmerje (voda v agregatu ni upoštevana)	0,63	0,44	0,69

Vodocementno razmerje smo preračunali z upoštevanjem k-vrednosti po formuli:

$$\frac{v}{c} = \frac{v}{c + (k * p)}$$

3.4.3 Priprava svežih vzorcev

Za drobljeni in granulirani agregat smo natehtali izračunane količine in ju predhodno namočili v vodno kopel s temperaturo vode 20 °C za 30 min. Ko sta se zasitila z vodo, smo ju osušili do površinsko suhega stanja in ju ponovno stehtali. Natehtali smo še apnenčev agregat, cement in EFP. Cement in EFP smo za vsako zmes posebej dobro premešali med seboj. V električni mešalec smo stresli agregat in suhe komponente betonske mešanice ter začeli mešanje. Med mešanjem smo postopoma dodajali vodo. Mešanico smo mešali 2 min, ustavili mešalec, premešali zmes ročno in zbrali maso na sredini posode ter še enkrat na hitro premešali z mešalnikom. Zmes smo vgrajevali v standardne kalupe dimenzij 160 x 40x 40 mm na vibracijski mizici s časom vibriranja 2 min. Postopek smo ponovili za vsak agregat posebej.

3.4.4 Nega vzorcev

Hidratacija je kompleksna serija reakcij, ki nastanejo pri procesu vezanja vode in cementa. Za vzpostavitev teh reakcij je potrebna voda, zato smo takoj po vgradnji dali vzorce na staranje v komoro s stalno temperaturo 21°C in 93,7% vlažnostjo. Vzorce smo po enem dnevu nege razkalupili in nadaljevali njihovo nego v komori do izvajanja upogibnega in tlačnega preizkusa.



Slika 12: Prelomi betonskih prizem iz primerjanih agregatov po 28 dnevem negovanju.

3.5 Eksperimentalne metode

3.5.1 Hg porozimetrija

Določili smo velikost in porazdelitev velikosti por v vzorcih ter gostoto vzorcev drobljenega in granuliranega agregata iz elektrofiltrskega pepela. Uporabljen je bil instrument Porozimeter Hg AutoPore IV 9510.

Izhodišče za merjenje velikosti por je Young-Laplacejeva enačba, katero je Washbrun priredil za okrogle kapilare (Stražičar, 1996):

$$\Delta P = -\frac{2\gamma}{r} \cos\theta ,$$

kjer je r radij kapilare (m), ΔP kapilarni tlak (Pa), γ površinska napetost tekočine (N/m) in θ kot omočenja ($^{\circ}$).

Za izračun rezultatov smo uporabili standardne vrednosti parametrov: omočitveni kot med Hg in površino vzorca, $\theta = 130^{\circ}$ in površinska napetost Hg, $\gamma = 0,485$ N/m. Gostota Hg pri temperaturi meritve, $\rho = 13.5335$ g/cm³. Meritve smo opravili na velikostih vzorcev približno 5 mm³.



Slika 13: Hg porozimeter na Zavodu za gradbeništvo Ljubljana (povzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).

3.5.2 SEM analiza

Pri preiskavi smo uporabili vrstični elektronski mikroskop (Scanning electron microscope) JEOL 5500 LV. Pod mikroskopom smo si ogledali mikrostrukturo in kemijsko sestavo vzorcev PT1 in GT1, na predhodno spoliranih prerezih posameznih zrn agregata.

S pomočjo mikroskopa smo zbirali podatke o površini spoliranih vzorcev. Pri SEM analizi zelo tanek curek elektronov (premera od 0,5 – 5nm) pade na površino vzorca. Med tem, ko se elektronski žarek premika po vzorcu, elektroni različno reagirajo s površino vzorca in tako mikroskop pridobiva podatke o topologiji površine.



Slika 14: Vrstični elektronski mikroskop (Scanning electron microscope) JEOL 5500 LV (prevzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).

Priprava vzorca:

Vzorec smo zalili z umetno smolo, ki služi kot držalo. Nato smo vzorec brusili s smirkovimi papirji. Brušenje smo stopnjevali od najbolj grobega smirkovega papirja pa do bolj finega. Ker smo imeli vzorce, ki niso vpijali veliko vode, smo njihovo površino pobrusili še s fino tkanino, ki je bila prevlečena z lubrikantom, ki vsebuje diamantni prah. Tako je bila vzorčna površina res gladka in pripravljena za gledanje pod mikroskopom.

3.5.3 Določanje vpojnosti vode s sušenjem v sušilniku

Vpojnost vode lahkega agregata smo določali po postopku sušenja agregata v sušilniku WTB-BIDER z zmožnostjo sušenja do 300°C. Odvzem vzorca smo naredili po standardu SIST EN 932-2:1999 in ga stehali. Vzorec smo potopili v vodno kopel s stalno temperaturo 21° C za 24 ur. Nato smo vzorec agregata osušili do površinsko suhega stanja. Tak vzorec smo stehali in od natehtane mase odšteli predhodno določeno maso pladnja, da smo dobili maso z vodo nasičenega površinsko suhega vzorca. Nato smo vzorec s pladnjem vred položili v sušilnico s stalno temperaturo 110°C za 24 ur. Posušen vzorec smo stehali in od natehtane mase odšteli predhodno določeno maso pladnja ter tako dobili maso suhega vzorca.

Vpojnost smo določili po formuli: $w = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$,

kjer vpijanje vode označeno z w , masa z vodo zasičenega površinsko suhega agregata z M_1 in masa popolnoma suhega agregata z M_2 .

3.5.4 Preizkus upogibne in tlačne trdnosti drobljenega agregata in betonskih vzorcev

Upogibno in tlačno trdnost agregata smo določali na vzorcih drobljenega agregata (preden smo jih podrobili) in sicer na prizmah dimenzij 160 x 40 x 40 mm. Preiskavo smo opravljali v skladu s standardom SIST EN 196-1. Pri tem smo uporabljali avtomatsko stiskalnico ToniNorm, predstavljeno na sliki 15.



Slika 15: Avtomatska stiskalnica ToniNorm na Zavodu za gradbeništvo Ljubljana (prevzeto po www.zag.si na dan 4.1.2015).

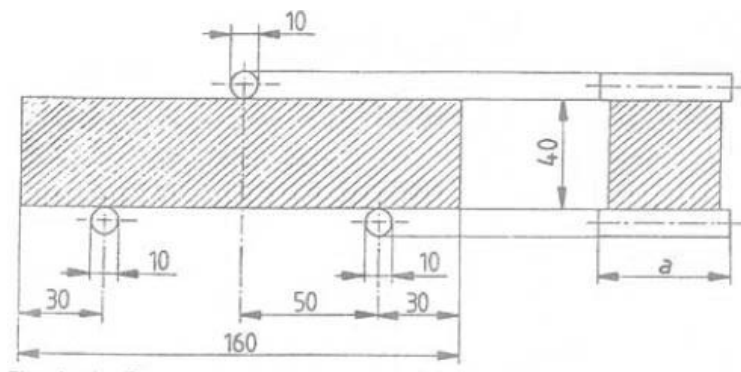
Preiskavo smo izvedli v dveh delih. V prvem delu smo vzorce preizkusili s tritočkovnim upogibnim preizkusom. V drugem delu pa smo na dobljenih polovičkah izvedli še preizkus tlačne trdnosti materiala. Preizkus smo opravili na prizmah pripravljenih za drobljeni agregat, po 7 dneh in 28 dneh. Pri betonskih vzorcih, v katerih smo uporabili narejene agregate, smo naredili preizkus po 7 dneh, 28 dneh in 90 dneh. Za preizkus trdnosti betonskih vzorcev po 90 dneh smo se odločili zato, da preverimo, če mogoče pride do razpadanja materiala v vzorcih.

3.5.4.1 Preizkus upogibne trdnosti

Upogibno trdnost R_f se izračuna po sledeči formuli:

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * l}{a^3} \text{ [N / mm}^2\text{]},$$

kjer so F_f mejna sila izražena v kN, a krajša stran epruvete izražena v mm in l razmik med podporami izražen mm. Shema tritočkovnega upogibnega preizkusa je prikazana na sliki 16.



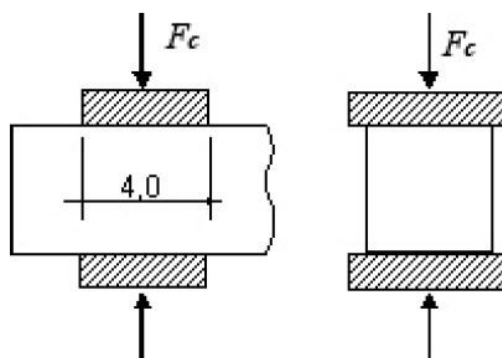
Slika 16: Shema tritočkovnega upogibnega preizkusa. (Dimenzije so podane v mm)

3.5.4.2 Preizkus tlačne trdnosti

Tlačno trdnost smo določili na polovicah, dobljenih iz preizkusa upogibne trdnosti. Tlačno trdnost R_c se izračuna po formuli:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \text{ [N / mm}^2\text{]},$$

kjer je F_c tlačna sila podana v N. Shema principa izvrševanja tlačnega preizkusa je prikazana na sliki 17.

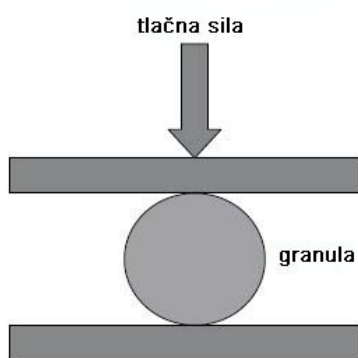


Slika 17: Shema tlačnega preizkusa. (Dimenzije so podane v cm)

3.5.5 Preizkus tlačne trdnosti granuliranega agregata

Tlačna trdnost granuliranega agregata je bila prav tako izvedena na avtomatski stiskalnici ToniNorm, katera je predstavljena na sliki 18. Ker se je tlačna trdnost preverjala za vsako granulato posebej, smo dno stiskalnice prilagodili s posebnim nastavkom. Preiskavo smo opravljali v skladu s standardom SIST EN 196-1, na 10 naključno izbranih vzorcih premera med 6 in 8 mm, po metodi, ki jo opisuje C. R. Cheeseman s soavtorji (Cheeseman et. al., 2005), kjer določimo trdnost posameznih granul tako, da jih obremenjujemo do zloma. Tlačno trdnost smo izrednotili s pomočjo izmerjene tlačne sile F_c (N), površine vzorčka izračunane iz premera granul h (mm) in oblikovnim koeficientom v vrednosti 2.8, po naslednji

enačbi: $R_c = \frac{2,8 * F_c}{h^2 * \pi}$



Slika 18: Shematični prikaz preverjanja tlačne trdnosti na granuliranem vzorcu. (prirejeno po Cheeseman et. al., 2005)

3.5.6 Določitev gostote betonskih vzorcev

Gostoto betonskih vzorcev smo določali na zračno suhih standardnih prizmah za preizkušanje maltnih vzorcev dimenzij 40 x 40 x 160 mm. Iz podanih dimenzij betonskih prizem smo izračunali volumen vzorcev (V). Nato smo vzorce še tehtali, da smo dobili maso posameznega vzorca (m). Gostoto betonskih vzorcev (ρ) smo preračunali iz dobljenih podatkov po naslednji formuli:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

3.5.7 Preverjanje prostorninske obstojnosti agregata

Prostorninsko obstojnost agregata smo preverjali po postopku, opisanem v SIST EN 196-3. Za to preiskavo smo se odločili zaradi povišane vsebnosti prostega kalcijevega oksida v EFP. V preiskavi smo uporabili le drobljen agregat frakcije med 0,5 mm in 2 mm. Uporabljen cement je bil tipa CEM I – 42 R iz cementarne v Trbovlju. Dodano količino vode smo določili s preverjanjem standardne konsistence z Vicatovim aparatom in sicer do vgreza 8 mm nad ploščo. Uporabljene količine posameznih sestavin mešanice so predstavljene v tabeli 13.

Tabela 13: Količine posameznih sestavin preverjane mešanice.

Oznaka	Količina (g)
EFP- agregat	250
CEM	250
voda	153

V mešalnem aparatu smo pripravili vlago 93,9 % in stalno temperaturo 21°C za 24 ur. Po 24 urah smo izmerili razliko med koncema igel prstanov na 0,5 mm natančno (*A*). Nato smo dali prstane v vodno kopel in segreti vodo v 30 min do vrelišča. Kuhali smo jih pri temperaturi vrenja 3 ure. Po preteklem času pasto standardne konsistence. S to pasto smo napolnili valjaste prstane in jih položili v vlažilno komoro z stalno smo prstane odstranili iz vodne kopeli in jih ohladili na sobno temperaturo 20°C in ponovno izmerili razliko med koncema igel (*B*). Razlika med izmerjenima količinama *A* in *B* ne sme presežati 10 mm.

3.6 Rezultati in diskusija

3.6.1 Hg porozimetrija drobljenega in granuliranega agregata

Iz raziskave smo pridobili podatke o skeletni gostoti agregatov, kjer smo upoštevali volumen mase brez por in o volumski gostoti agregatov, kjer smo pri računu upoštevali maso in celoten volumen vzorca.

Preizkus smo naredili na drobljenem (PT1, PT2 in PT3) in granuliranem (GT1) agregatu. Rezultati so predstavljeni v tabeli 14.

Tabela 14: Rezultati Hg porozimetrije za drobljen in granuliran agregat iz EFP.

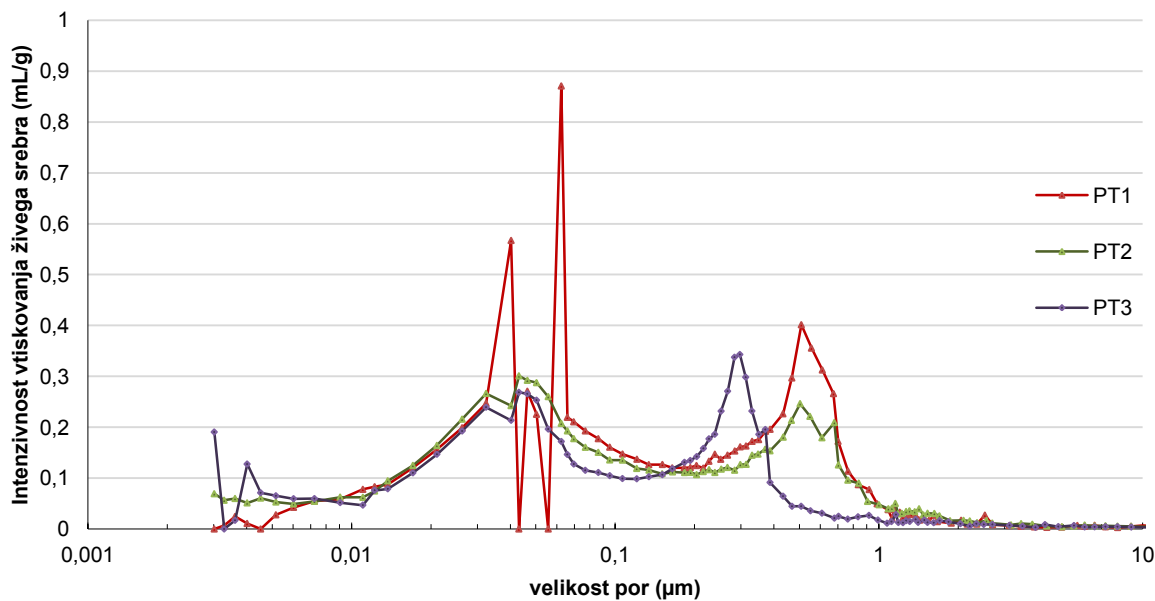
Oznaka vzorca	Volumen por (cm ³ /g)	Površina por (m ² /g)	Povprečni premer por (μm)	Volumska gostota (g/cm ³)	Skeletna gostota (g/cm ³)	Poroznost (%)
PT1	0,3899	33,171	0,047	1,182	2,1923	46,08
PT2	0,3710	46,925	0,0316	1,258	2,359	46,67
PT3	0,3178	50,231	0,0253	1,333	2,313	42,37
GT1	0,6429	31,4	0,0819	0,9195	2,2487	59,11

V standardu SIST EN 13055-1:2002 (E) je določeno, da gostota posameznega delca lahkega agregata ne sme presegati vrednosti 2,0 g/cm³. Kot je razvidno iz rezultatov predstavljenih v tabeli 14, imajo izdelani agregati majhno gostoto in tako spadajo pod lahke agregate. Volumska gostota pri drobljenem agregatu (PT1) znaša 1,18 g/cm³, pri granuliranem agregatu (GT1) pa 0,92 g/cm³ in pri nobenem gostota ne presega vrednost 2,0 g/cm³.

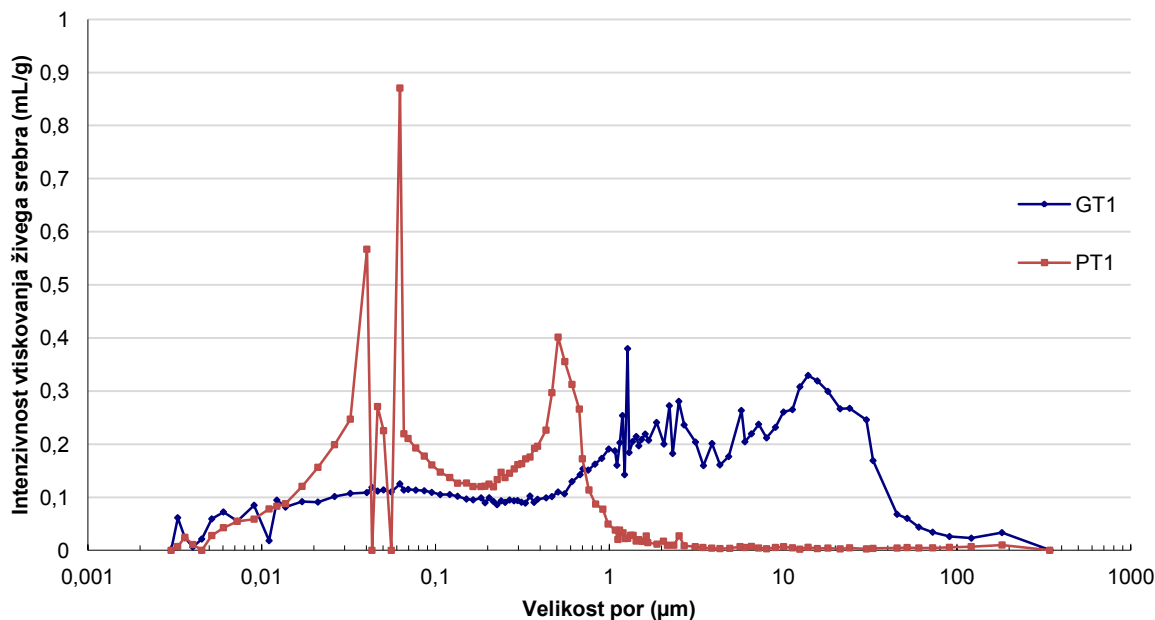
Na grafikonu 4 je prikazan vpliv vsebnosti cementa na porazdelitev por v materialu. Bistvenih razlik ni opaziti, saj so si grafi zelo podobni. Razvidno je, da se z večanjem vsebnosti cementa pore manjšajo. Posledično se viša gostota materiala in nižja poroznost.

Iz grafikona 5, kjer je prikazana primerjava porazdelitve por v preizkušancih PT1 in GT1, je razvidno, da ima drobljen agregat (PT1) vsebnost por premera od 0,003 μm do 1 μm in povprečno velikost por 0,047 μm. Medtem ko ima granuliran agregat (GT1) vsebnost por premera od 0,003 μm do 100 μm in povprečno velikost por 0,082 μm. Pri granuliranem agregatu pride do medsebojnega zlepljanja manjših granul, zaradi česa se v materialu pojavijo večje pore.

Če primerjamo rezultate poroznosti preizkušancev PT1 in GT1 z rezultati pridobljenimi s preizkusom vpojnosti materiala lahko sklepamo, da gre v veliki večini za odprte pore v preizkušancih. Visoka zaprta poroznost agregata vpliva na višjo toplotno izolativnost in manjšo gostoto lahkega betona, kar pa je v gradbeništvu velikokrat dobrodošlo. Medtem ko odprta poroznost vpliva na večjo paro propustnost betonske konstrukcije.

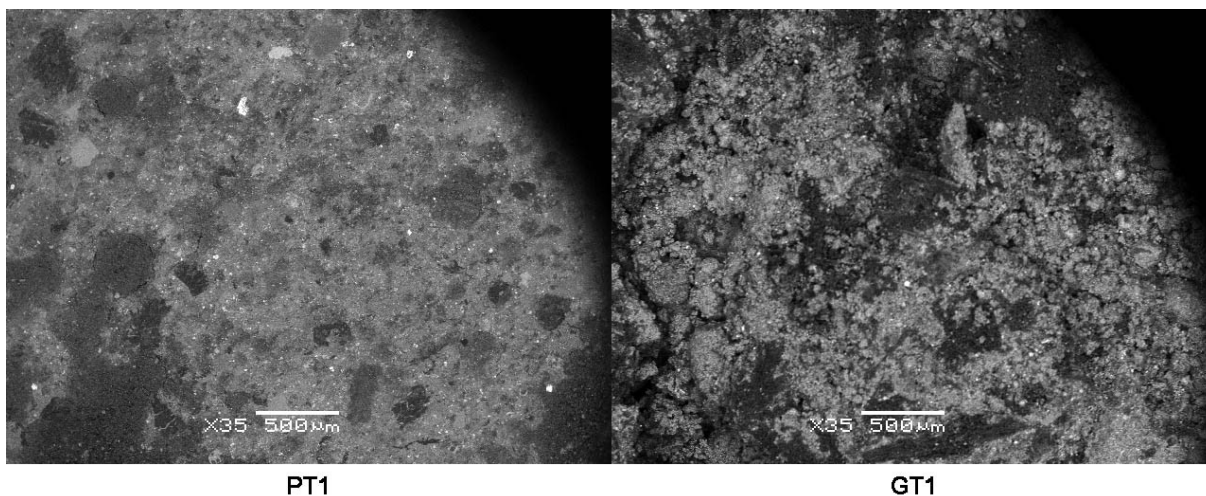


Grafikon 4: Primerjava porazdelitve por v preizkušancih PT1, PT2 in PT3.

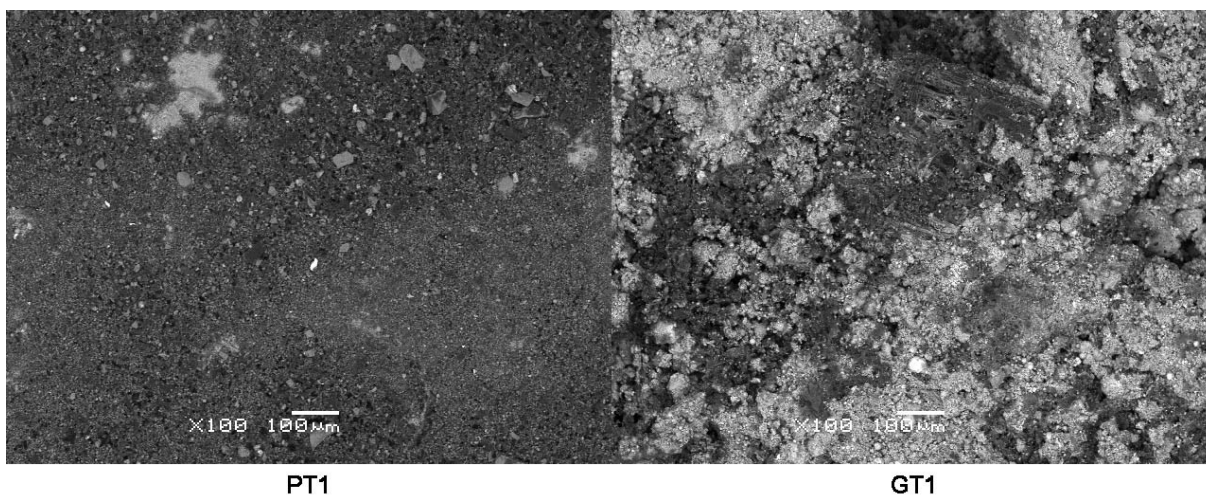


Grafikon 5: Primerjava porazdelitve por v preizkušancih PT1 in GT1.

3.6.2 SEM analiza



Slika 19: Prerez drobljenega in granuliranega vzorca pri povečavi 35x.



Slika 20: Prerez drobljenega in granuliranega vzorca pri povečavi 100x.

Iz primerjave vzorcev SEM analize na sliki 19 in sliki 20 je razvidno, da je drobljeni agregat (PT1) veliko bolj homogen, kakor granuliran agregat (GT1). Na obeh vzorcih se še vedno vidijo posamezna zrna elektrofiltrskega pepela. Prav tako je vidno, da so se pri granuliranem agregatu med sabo sprijele manjše granule in tako tvorijo bolj porozen material z veliko porami, posledično se to odraža tudi na trdnosti granul, katera je veliko nižja od trdnosti drobljenega agregata. V granuliranem agregatu so vidne tudi velike reže, katere so nastale zaradi neenakomernega sprijemanja zrn EFP in manjših granul. Te diskontinuitete pomembno vplivajo na trdnost agregata.

3.6.3 Določanje vpojnosti vode s sušenjem v sušilniku

Pri obeh agregatih smo odmerili količino preizkušanca 200 g frakcije med 4 mm in 8 mm. Preizkus smo izvedli na vzorcih starih 28 dni. Izmerjene in preračunane vrednosti vpojnosti agregata so prikazane v tabeli 15.

Tabela 15: Rezultati preizkusa vpojnosti drobljenega in granuliranega agregata iz EFP.

Oznaka	Masa suhega vzorca (g)	Masa vlažnega vzorca (g)	Vpojnost (%)
PT1	166,24	230,01	38,4
PT2	184,00	250,00	35,9
PT3	179,00	234,00	30,7
GT1	192,4	303,7	57,8

Vpojnost drobljenega agregata je nekoliko nižja od vpojnosti granuliranega agregata, zaradi manjše poroznosti materiala. Vpojnost drobljenega agregata z najmanjšo vsebnostjo cementnega veziva je za 19,4 % nižja od vpojnosti granuliranega agregata z enako sestavo. Z višanjem vsebnosti cementa za 10 % (PT2) se zmanjša vpojnost za 2,5 %. Pri zvišanju vsebnosti cementa v mešanici za 20 % (PT3) pa se zmanjša vpojnost za 7,7 %.

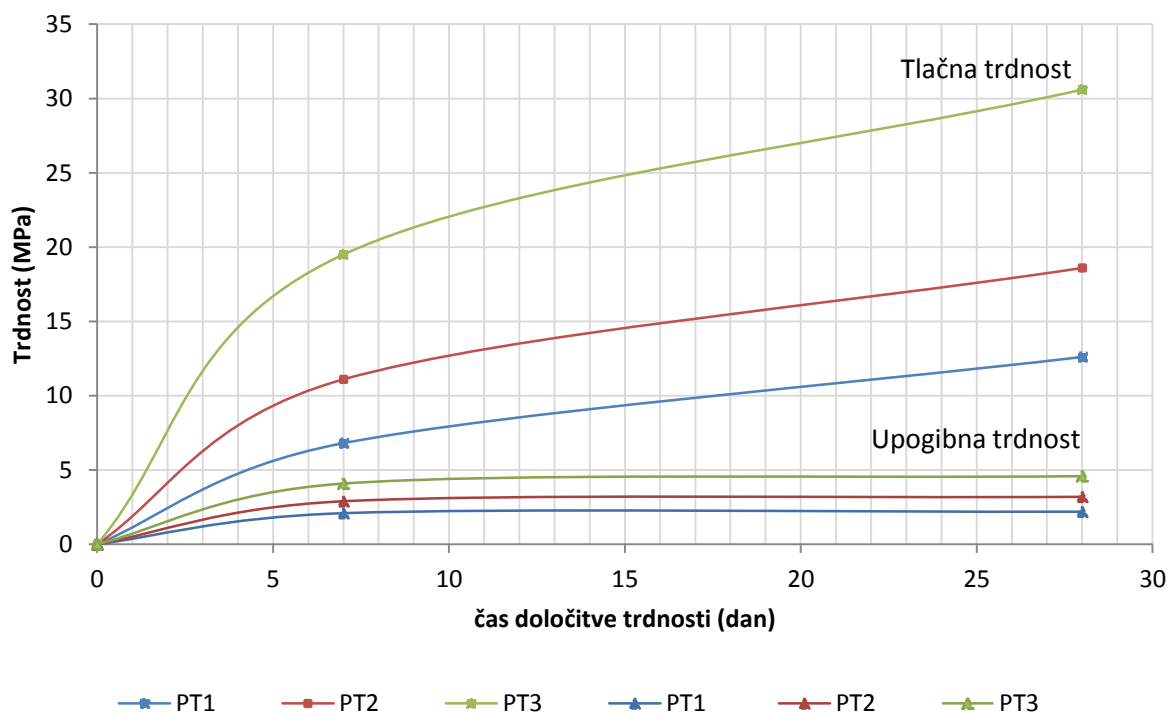
F. Colangelo in sodelavci so v svoji raziskavi na granuliranem agregatu iz EFP dokazali, da je vpojnost umetnega agregata odvisna od vsebnosti cementa. Višja, ko je njegova vsebnost, manjša je vpojnost končnega agregata. To teorijo smo potrdili tudi v naši raziskavi. Ugotovili so tudi, da je vpojnost odvisna od uporabljenega veziva in od velikosti delcev, na katerih izvajamo preiskavo. Dokazali so, da se s cementnim vezivom doseže nižjo vpojnost, kakor z apnenim vezivom. Prav tako so dosegli višjo vpojnost pri frakcijah premera med 12 mm in 18 mm, kakor pri frakcijah med 4 mm in 12 mm (F. Colangelo, et. al., 2014).

3.6.4 Preizkus upogibne in tlačne trdnosti prizmic pred pripravo drobljenega agregata

Preizkus natezne in upogibne trdnosti smo izvedli na standardnih prizmah. Najprej smo izvedli test upogibne trdnosti, na dobljenih polovicah preizkušanca pa še test tlačne trdnosti. Rezultati preizkusa so predstavljeni v tabeli 16 in na grafikonu 6.

Tabela 16: Rezultati preiskave upogibne in tlačne trdnosti.

Oznaka	Upogibna trdnost		Tlačna trdnost	
	Upogibna trdnost po 7 dneh na 95 % vlagi (MPa)	Upogibna trdnost po 28 dni na 95 % vlagi (MPa)	Tlačna trdnost po 7 dneh na 95 % vlagi (MPa)	Tlačna trdnost po 28 dni na 95 % vlagi (MPa)
PT1	2,1	2,2	6,8	12,6
PT2	2,9	3,2	11,1	18,6
PT3	4.1	4,6	19,5	30,6



Grafikon 6: Prikaz razvoja upogibnih in tlačnih napetosti posameznih vzorcev.

Iz rezultatov je razvidno, da z vsebnostjo cementa narašča tudi odpornost materiala na tlak in nateg. Prizadevali smo si, da bo dobljen material čim bolj ekonomičen, zato smo primerjalni granulirani agregat pripravili samo z enakim razmerjem količin kakor pri vzorcu PT1.

3.6.5 Preizkus tlačne trdnosti granuliranega agregata

Tlačno trdnost na granulah smo preverjali samo po 28 dneh staranja na 93,7 % vlagi in po 14 dneh sušenja na sobni temperaturi. Rezultati preiskave so predstavljeni v tabeli 17.

Tabela 17: Rezultati tlačne trdnosti posameznih granul granuliranega agregata.

Oznaka	Sestava	zlomna sila P_c (N)	tlačna trdnost (MPa)
GT1	90 % EFP, 10 % CEM	60,8	0,96

Pri preizkusu tlačne trdnosti granuliranega agregata smo dobili zelo nizke tlačne trdnosti v razponu od 0,6 do 1,7 MPa. Iz tega sklepamo, da se zaradi velike količine pripravljene mase (4000 g) komponente EFP in 10 % cementa kljub intenzivnemu mešanju sestavin, niso uspele do dobra premešati predvsem pa so nizke trdnosti odraz večje poroznosti. Verjetno pa igra pomembno vlogo tudi oblika vzorca in pripadajoč koncentriran vnos obremenitve.

3.6.6 Določitev gostote betonskih vzorcev

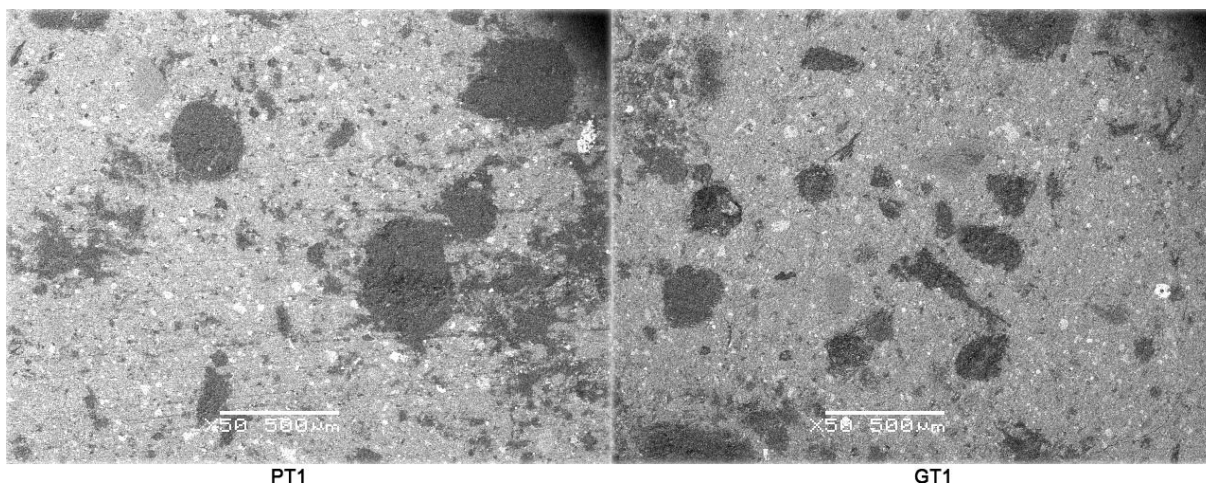
Preiskavo smo opravili na petih različnih vzorcih posamezne vrste betona. Opravili smo jo po 90 dneh staranja vzorcev v komori na 21°C in 93,7 % vlažnosti ter 14 dni sušenja na sobni temperaturi in vlagi. Rezultati preiskave so predstavljeni v tabeli 18.

Tabela 18: Rezultati določanja gostote betonskih vzorcev.

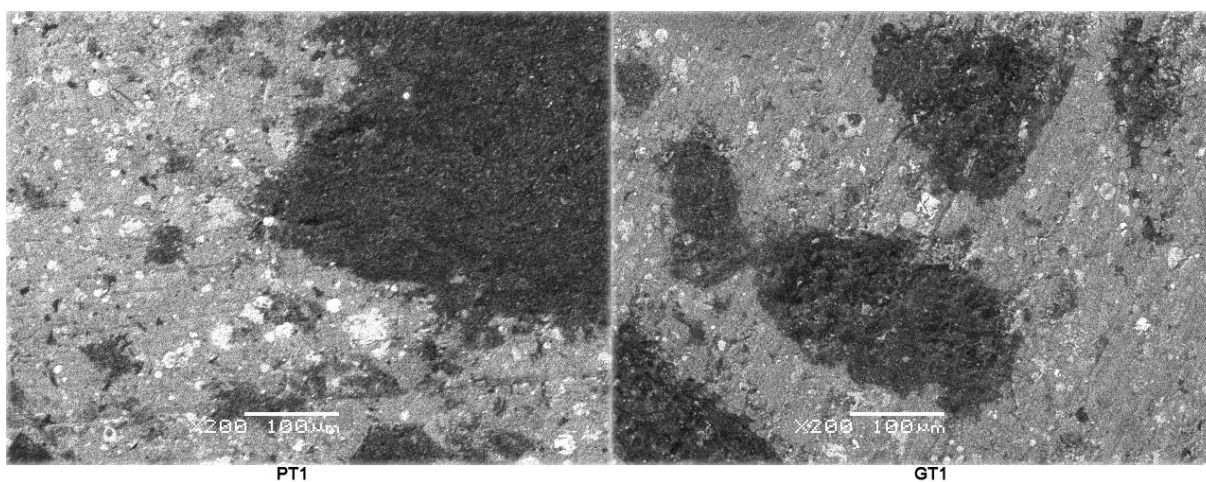
	Oznaka	PT1-B	GT1-B	APN-B
Gostota (kg/m ³)	po 90 dneh	1610	1490	2290

Vzorci betona PT1-B in GT1-B spadajo s svojo gostoto med betone nizke gostote in srednje trdnosti. Gostote takih betonov znašajo od 800 do 1900 kg/m³, medtem ko trdnosti znašajo od 7 do 15 MPa (Žarnić, 2005). Vzorec betona APN-B z doseženo gostoto 2290 kg/m³ po pričakovanjih spada pod konstrukcijske betone običajne gostote.

3.6.7 SEM analiza betonskih vzorcev



Slika 21: Prerez drobljenega in granuliranega agregata, uporabljenega v betonu, pri povečavi 50x.



Slika 22: Prerez drobljenega in granuliranega agregata, uporabljenega v betonu, pri povečavi 200x.

Pri opazovanju betonskih vzorcev pod mikroskopom smo opazili, da se pri betonskih vzorcih z agregatom PT1 pojavi veliko več cementa, ki je ostal nezreagiran, kakor pa pri betonskih vzorcih z agregatom GT1. Do tega pojava pride, ker ima cement v primeru agregata GT1-B, zaradi njegove visoke vpojnosti, na voljo veliko več vode za hidratacijo kakor pa v primeru agregata PT1-B. Na slikah je nezreagiran cement prikazan z belimi lisami.

Prav tako lahko na slikah opazimo, da je v obeh primerih cementna pasta lepo prodrla v posamezne delce agregata. Ta pojav vpliva na večjo trdnost betonskih vzorcev.

3.6.8 Preverjanje prostorninske obstojnosti agregata

Preizkus smo opravili na štirih valjastih prstanih, polnjenih z enako pasto. Dobljeni rezultati so predstavljeni v tabeli 19.

Tabela 19: Izvrednoteni rezultati preizkusa prostorninske odpornosti agregata.

	Razlika med koncema igel (mm)			
Meritev	prstan št. 1	prstan št. 2	prstan št. 3	prstan št. 4
A	16,24	9,51	9,25	32,66
B	16,89	10,53	10,42	32,85
B - A	0,65	1,02	1,17	0,19
povprečno	0,76			

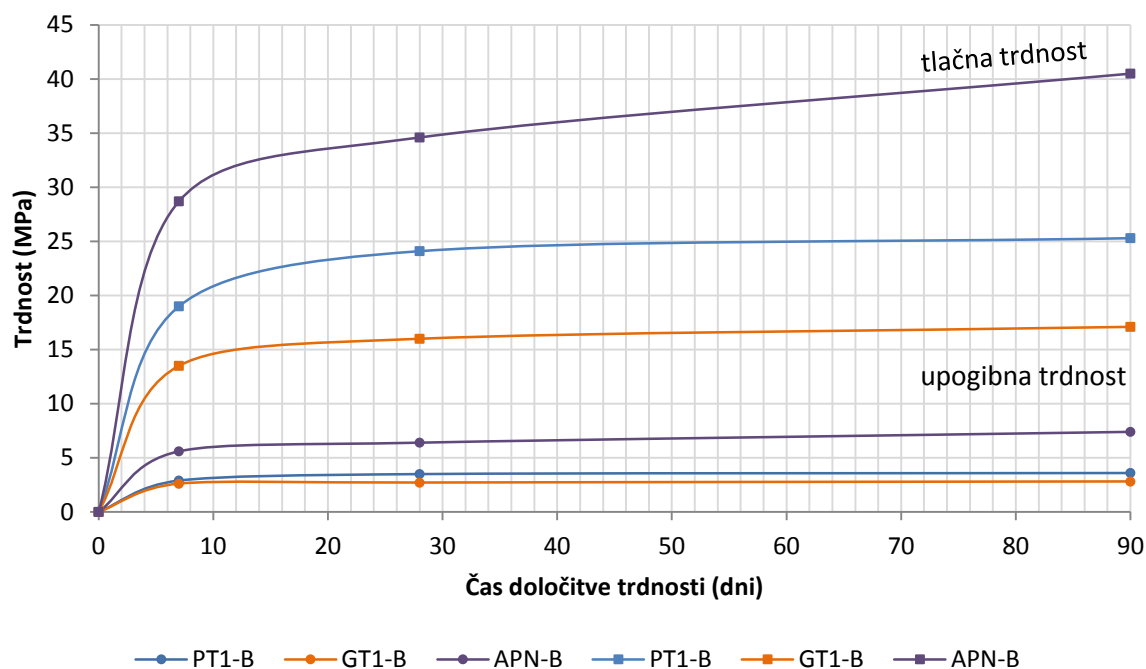
Iz rezultatov je razvidno, da razlika B - A ne presega mejne vrednosti 10 mm. S tem preizkusom smo dokazali, da kljub previsoki vsebnosti prostega CaO v elektrofiltrskem pepelu ne pride do bistvenih prostorninskih sprememb pri uporabi umetno proizvedenega agregata.

3.6.9 Preizkus upogibne in tlačne trdnosti betonskih vzorcev

Preizkus upogibne in tlačne trdnosti betonskih vzorcev smo izvedli na standardnih prizmah. Najprej smo izvedli test upogibne trdnosti, na dobljenih polovicah preizkušanca pa še test tlačne trdnosti. Rezultati preizkusa so predstavljeni v tabeli 10 in grafikonu 7.

Tabela 20: Rezultati preiskave upogibne in tlačne trdnosti betonskih prizem iz različnih agregatov.

	Oznaka	PT1-B	GT1-B	APN-B
Upogibna trdnost (MPa)	<i>po 7 dneh na 95 % vlažnosti</i>	2,9	2,6	5,6
	<i>po 28 dneh na 95 % vlažnosti</i>	3,5	2,7	6,4
	<i>po 90 dneh na 95 % vlažnosti</i>	3,6	2,8	7,4
Tlačna trdnost (MPa)	<i>po 7 dneh na 95 % vlažnosti</i>	19,0	13,5	28,7
	<i>po 28 dneh na 95 % vlažnosti</i>	24,1	16,0	34,6
	<i>po 90 dneh na 95 % vlažnosti</i>	25,3	17,1	40,5



Grafikon 7: Prikaz razvoja upogibnih in tlačnih trdnosti posameznih betonskih vzorcev.

Iz grafikona 7 je razvidno, da betonski vzorec iz apnenčevega agregata (APN-B) dosega večje tlačne trdnosti od betonskih vzorcev iz drobljenega agregata (PT1-B). To smo tudi pričakovali, saj apnenčev agregat dosega od 200 do 290 MPa tlačne trdnosti. Vidna je tudi bistvena razlika v tlačni trdnosti med vzorcem PT1-B in betonskim vzorcem iz granuliranega agregata (GT1-B). Vzorec PT1-B dosega višjo tlačno trdnost zaradi višje trdnosti agregata in zaradi ugodnejše oblike le-tega.

Vzorca PT1-B in GT1-B po sedmih dneh razvijeta približno enako upogibno trdnost in bistveno nižjo od trdnosti vzorca APN-B. Med 7 in 28 dnevom staranja pa vzorec PT1-B, za razliko od vzorca GT1-B, bistveno pridobi na upogibni trdnosti.

Ta stran je namenoma prazna

4 ZAKLJUČEK

V Sloveniji je veliko elektrofiltrskih pepelov, ki ne ustrezajo standardoma SIST EN 450-1:2013 ter SIST EN 197-1 in jih zato ne moremo uporabiti kot dodatek cementu ali betonski mešanici. Kot tak se je po preiskavah izkazal tudi pepel iz Toplarne in termo elektrarne Ljubljana. V naših raziskavah smo dokazali, da lahko take pepele koristno uporabimo pri proizvodnji lahkih agregatov. Prizadevali smo si, da bi razvili agregat po postopku, pri katerem porabimo kar se da malo energije in s tako sestavo mešanice, da z minimalno porabo veziva dosežemo kar se da visoko trdnost agregata. Tako smo naredili agregat po hladnem postopku z vlivanjem in drobljenjem in ga primerjali z granuliranim agregatom. Opazne so bistvene razlike v doseženih tlačnih trdnostih agregatov, v mikrostrukturi in v samem procesu proizvodnje agregata.

Na podlagi rezultatov izvedenih preiskav smo prišli do naslednjih ugotovitev:

- Z vlivanjem in drobljenjem dobimo agregat višjih kakovosti in trdnosti, kakor z granuliranjem. Prav tako ima ta agregat ugodnejšo obliko kakor granuliran, saj se pri poligonalni obliki agregata težje razvijejo razpoke v betonu.
- Agregata s svojo nizko volumsko gostoto spadata med lahke agregate. Volumska gostota drobljenega agregata znaša $1,18 \text{ g/cm}^3$, granuliranega agregata pa znaša $0,92 \text{ g/cm}^3$.
- Iz primerjave rezultatov Hg porozimetrije in vpojnosti agregatov ugotovimo, da gre v obeh primerih večinoma za odprto poroznost. Ta lastnost pozitivno vpliva na sprejemnost cementne matrike in agregata.
- Agregata zaradi svoje odprte poroznosti dosegata visoko vpojnost, katera znaša pri drobljenem agregatu 38,4 %, pri granuliranem pa 57,8 %. Ta lastnost v betonu zmanjšuje avtogeno krčenje, saj voda v porah naknadno vstopa v hidratacijo. V raziskavi smo dokazali, da ta voda vpliva na boljšo hidratizacijo cementa, saj ima cement na voljo večjo količino vode.
- Iz rezultatov tlačnih trdnosti granuliranega agregata je razvidno, da s postopkom granuliranja dosegamo zelo nizke trdnosti agregata. Kljub temu, da smo ga 28 dni negovali na stalni 94 % vlagi, dosežemo tlačno trdnost 0,96 MPa.
- Tlačne trdnosti drobljenega agregata bistveno naraščajo z večjo vsebnostjo cementa. Tlačna trdnost vzorca PT2 je za 48 % višja od tlačne trdnosti vzorca PT1, med tem ko je tlačna trdnost vzorca PT3 za več kot 2 krat večja od tlačne trdnosti vzorca PT1.
- Iz zbranih rezultatov preteklih raziskav različnih avtorjev (Cioffi et. al., 2010; Cheeseman et. al., 2004; Colangelo et. al., 2014; Baykal et. al., 1999) predstavljenih v prilogi A, je razvidno, da drobljen agregat PT1 dosega tudi do 42 % višje tlačne trdnosti kakor agregati pridobljeni po postopku granuliranja in sintranja s podobno sestavo mešanice. Kljub svoji nizki vrednosti cementa dosega boljše rezultate od opravljenih raziskav z večjo vsebnostjo cementa.

- Kljub temu, da smo v betonu kot dodatek cementu uporabili EFP, ki vsebuje prevelik odstotek žarilne izgube (12,6 %), standard dovoljuje le 9%, dosežemo sprejemljivo končno trdnosti betona z drobljenim agregatom iz EFP. Posledično se pojavi le večja potreba po vodi.
- Prav tako se je pri zadnji kontroli (90 dni) določanja indeksa aktivnosti izkazalo, da EFP nima zadostne sposobnosti vezanja ali pa reakcija vezanja pri EFP hitro poteče. Kljub temu so dosežene sprejemljive trdnosti agregatov iz tega pepela in betonov, v katerih smo uporabili pepel kot dodatek cementu.
- V proizvodnji lahkih agregatov lahko EFP uspešno uporabimo tudi do 90 % vsebnosti v mešanici za agregat. V proizvodnji lahkih betonov z razvitim agregatom (PT1) pa je poraba EFP okrog 63 %.

Treba je poudariti, da se predstavljeni rezultati opravljenih raziskav navezujejo le na EFP enake kemijske in mineralne sestave, kakor jo ima EFP uporabljen v raziskavah. Na to je potrebno biti pozoren, ker se sestave elektrofiltrskih pepelov močno razlikujejo, rezultati raziskav pa so v večini odvisni od sestave pepela. Na razlike v mineralni in kemijski sestavi elektrofiltrskih pepelov vplivajo dejavniki, kot so: izvor osnovnega materiala, postopek sežiga osnovnega materiala, finost mletja pepela, ... Tsimas (2005) in sodelavci so v svojem delu opredelili nekatere probleme, ki vplivajo na spremembo sestave EFP in podali nekaj ključnih rešitev za proizvodnjo enotnih sestav pepelov.

Menimo, da smo v okviru diplomske naloge razvili agregat, ki bi ga lahko v gradbeništvo uporabili pri izdelavi lahkih in pollahkih betonov, ki jih uporabljamo za konstrukcije, katerih tlačna trdnost je od 20 do 35 MPa (Žarnić, 2005). Taki agregati na trgu ne bi dosegali visokih cen, saj je agregat narejen po postopku, pri katerem je minimalna poraba energije z minimalnim deležem veziva in kar je najpomembnejše, narejen je iz odpadnega materiala.

VIRI

- Bijen J. M. J. M. 1986. Manufacturing processes of artificial lightweight aggregates from fly ash. *The international journal of cement composites and lightweight concrete*. 8, 3: 191-199.
- Cheeseman C. R., Makinde A., Bethanis S. 2005. Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash. *Resources, Conservation and Recycling*. 43: 147–162.
- Cioffi R., Colangelo F., Montagnaro F., Santoro L. 2011. Manufacture of artificial aggregate using MSWI bottom ash. *Waste management*. 31: 281-288.
- Colangelo F., Ferone C., Messina F., Cioffi R. 2014. MSWI fly ash cementation by means of cold-bonding pelletization. 34th Cement and concrete science conference and workshop on waste cementation. University of Sheffield, 14-17 September 2014.
- Dimic D. 1988. Elektrofiltrski pepel kot pucolan. V: I Jugoslovenski simpozijum o sekundarnim sirovinama. Beograd, November 1988: 47-57.
- Ercegovič R., Zajc A., Šuštaršič J. 2010. Vpliv pomletosti elektrofiltrskega pepela na razvoj tlačnih trdnosti. V: Gostinčar A. (ur.). Zbornik referatov, Konferenca "beton 21. Stoletja", Lipica, 25-26 marec 2010: 78-86.
- Ercegovič, R., Zajc, A., Šuštaršič, J. 2008. Uporaba elektrofiltrskega pepela v betonu. V: Zbornik referatov, 9. Slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, Slovenija, 22-24 oktober 2008: 642-652.
- Gesoğlu M., Güneyisi E., Mahmood S.F., Öz H.Ö., Mermerdaş K. 2012. Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete. *Journal of hazardous materials*. 15: 235-236.
- Gesoğlu M., Güneyisi E., Öz H.Ö. 2012. Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Materials and Structures*. 45: 1535-1546.
- Geetha S., Ramamurthy K. 2010. Reuse potential of low-calcium bottom ash as aggregate through pelletization. *Waste Management*. 30: 1528-1535.
- Kayali O. 2008. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction and Building materials*. 22: 2393-2399.
- Kaushal S., Roy D.M., Licastro P.H. 1988. Heat of hydration and characterization of reaction products of adiabatically cured fly ash and slag mixtures. V: Raymond T. Hemmings (ur.), Edwin E. Berry (ur.), Gregory j. McCarthy (ur.) in Frederik P. Glasser (ur.). Symposium Fly ash and coal conversion by-products. Boston. U.S.A. December 1-3: 87 – 97.
- Mayer C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement & concrete composites*. 31: 601-605.
- Petkovšek A., 2004. Vloga geotehnike pri prepoznavanju in odpravljanju tveganj, ki jih v okolju predstavljajo odpadne snovi-nekaj primerov iz Slovenije. V: Trauner, L. (ur.),

Dolinar, B. (ur.). 5. Šukljetovi dnevi, Rogaška Slatina, 10. Junij 2004. Zbornik referatov. Ljubljana: Slovensko geotehniško društvo: 35-71.

Pogačnik M. 2007. Vpliv odlagališča elektrofiltrskega pepela Termoelektrarne Trbovlje na okolje. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta (samozaložba M. Pogačnik).

Poon C. S., Lam L., Wong Y. L. 2000. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low- calcium fly ash. *Cement and concrete research*. 30: 447-455.

Rocco C., Guinea G. V., Planas J., Elices M. 1999. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: experimental verification. *Materials and Structures*. 32: 210-217.

Rocco C., Elices M. 2009. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 76: 286-298.

Roselló C., Elices M., Guinea G. V. 2006. Fracture of model concrete: 2. The fracture energy and characteristic length. *Cement and concrete research*. 36: 1345-1353.

Sivakumar A., Gomathi P. 2012. Pelletized fly ash lightweight aggregate concrete: A promising material. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*. 3: 42-48.

Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A. 2005. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. *Cement & concrete composites*. 27: 231-237.

Vengatachalapathy C., Thirugnanasambandam S. 2014. Fly ash – based lightweight aggregate concrete containing steel fibers and polyesters fibers. *The IUP journal of structural engineering*. 7. 2: 15-24.

Zhang M. H., Gjorv O. E. 1990. Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste. *Cement and concrete research*. 20. 4: 610–618.

Standardi:

SIST EN 450-1:2012 (E). Elektrofiltrski pepel - 1.del: Definicije, specifikacije in merila skladnosti.

SIST EN 451-1:2004. Metode preskušanja elektrofiltrskega pepela – 1.del: Ugotavljanje deleža prostega kalcijevega oksida.

SIST EN 196-1:2005. Metode preskušanja cementa - 1. del: Določanje trdnosti.

SIST EN 196-2:2013. Metode preskušanja cementa – 2.del: Kemijska analiza cementa.

SIST EN 196-3:2005+A1:2009. Metode preskušanja cementa – 3. Del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti

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

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

SIST EN 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarske malte - 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte.

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

SIST EN 13055-1:2002. Lahki agregati - 1. del: Lahki agregati za beton, malto in injekcijsko malto.

SIST 1026:2008 (dodatek 2). Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost-Pravila za uporabo SIST EN 206-1.

SIST EN 206-1:2003. Beton - 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost

SIST EN 1015-3. Metode preskušanja malt za zidanje- 3. del: Določanje konsistence sveže malte

Ostali viri:

ARSO, 2009.

http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=260. (Pridobljeno 14.5.2014).

Shema procesa nastajanja granul,

<http://www.cjtech.co.kr/Process%20Principles%20Pel%20Direct%20Pelletizing.htm>.
(Pridobljeno 13.6.2014).

Te-Tol, 2014.

http://www.te-tol.si/index.php?sv_path=2455,2468. (Pridobljeno 23.9.2014).

Vodovod – Kanalizacija, 2014.

<http://www.vo-ka.si/aktualno/letno-porocilo-o-skladnosti-pitne-vode-za-letno-2013>. (Pridobljeno 13.3.2015).

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Zbrani rezultati podobnih raziskav različnih avtorjev

Priloga B: Tehnični list uporabljenega cementa CEM I 45,2 (R)

Priloga C: Tehnični list superplastifikatorja Hiperplast 179

PRILOGA A: Zbrani rezultati podobnih raziskav različnih avtorjev

POSTOPEK	SESTAVA	V/C	Opombe	TLAČNA TRDNOST (Po 28 dni) (MPa)
<i>Cioffi R., Colangelo F., Montagnaro F., Santoro L., Manufacture of artificial aggregate using MSWI bottom ash (2010)</i>				
Granuliranje	70% pepel na rešetki+ 30% CEM	0,33	Pepel: SiO ₂ (52%), Al ₂ O ₃ (28%) in CaO (8,1%)	4,5
	80% pepel na rešetki+ 20 % CEM	0,31	Granule so bile sušene na 40°C	3,3
	90 %pepel na rešetki+ 10 % CEM	0,28		2,5
<i>Cheeseman C.R., Makinde A., Bethanis S., Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash (2004)</i>				
Sintranje	100 % pepel na rešetki	0,24	Pri 1020 °C Dodano 24% vode (ni kemijske sestave)	5,4
<i>Colangelo F., Ferone C., Messina F., Cioffi R., MSWI fly ash cementation by means of cold-bonding pelletization (2014)</i>				
Granuliranje	70% EFP A+ 30% CEM	0,25	EFP A: SiO ₂ (7,9%), Al ₂ O ₃ (7,6%) in CaO (32,1%)	3,5
	70% EFP B+ 30% CEM	0,41	EFP B: SiO ₂ (11%), Al ₂ O ₃ (3,9%) in CaO (41,2%)	5,2
<i>Gokhan Baykal, Ata Gurhan Doven, Utilization of fly ash by pelletization process (1999)</i>				
Granuliranje	100% EFP	/	EFP: SiO ₂ (50,5%), Al ₂ O ₃ (23,7%) in CaO (9,3%)	0,86
	92% EFP + 8% CEM	/		2,4

PRILOGA B: Tehnični list uporabljenega cementa CEM I 45,2 (R)



Profi cement

Cement za najzahtevnejše gradnje

Standardno ime po SIST EN 197-1:2011

CEM I 42,5 R

OPIS

Portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 in visoko zgodnjo trdnostjo (R).

SESTAVA

Minimalno 95 % Portland cementnega klinkeja, regulator vezanja - sadra.

UPORABA

Profi cement je namenjen za:

- pripravo transportnega betona z visokimi začetnimi in končnimi trdnostmi
- v proizvodnji prefabriciranih prednapetih betonskih elementov npr. votlih plošč, nosilcev ...
- proizvodnjo zahtevnih betonskih elementov npr. varnostnih ograj, montažnih hal ...
- injektiranje prednapetih kablov
- individualno gradnjo, predvsem pozimi pri nizkih temperaturah, vendar ne nižjih od 0 °C

LASTNOSTI IZDELKA

- krajši čas vezave
- visoke začetne in končne trdnosti

DOBAVA

Cement je na voljo v rinfuzi in 25 kg vrečah.

POGOJI SKLADIŠČENJA

Cement se skladišči v neprepustnih suhih betonskih ali kovinskih silosih, zaščiten pred vdorom vode. V silosih se ne sme mešati različnih tipov cementa.

KARAKTERISTIKE

Fizikalno kemijske lastnosti

Parameter	Enota	Zahteve standarda	Dosežene vrednosti
Fizikalne zahteve			
Prostominska obstojnost	mm	≤ 10	< 1
Čas začetka vezanja	min	≥ 60	≥ 140

Mehanske zahteve

Začetne trdnosti (2 dni)	MPa	≥ 20,0	≥ 31
Končne trdnosti (28 dni)	MPa	≥ 42,5 ≤ 62,5	≥ 57

Kemijske zahteve

Vsebnost sulfata (SO ₃)	%	≤ 4,0	≤ 3,5
Vsebnost klorida	%	≤ 0,10	≤ 0,02

Dosežene vrednosti vsakega posamičnega parametra so podane kot povprečne vrednosti, ovrednotene na osnovi notranjega kontrolnega preizkušanja.

Lafarge Cement d.o.o.
Kolodvorska cesta 5, 1420 Trbovlje
Tel.: 03 56 52 322 (prodaja), Faks: 03 56 52 443
narocila@lafarge.si, www.lafarge.si

PRILOGA C: Tehnični list superplastifikatorja Hiperplast 179

CEMENTOL[®] Hiperplast 179

superplastifikator, SIST EN 934-2: T 3.1/3.2
superplastifikator / hiperplastifikator za
transportne betone

PODROČJE UPORABE

Cementol Hiperplast 179 je specialen visoko učinkovit superplastifikator nove generacije – hiperplastifikator, posebej primeren za izdelavo gradbiščnih ter transportnih betonov z dolgimi časi obdelavnosti in za betoniranje pri višjih temperaturah.

Njegova uporaba omogoča:

- bistveno boljše držanje konsistence svežega betona s časom kot pri uporabi superplastifikatorjev predhodnih generacij,
- močno zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betona in s tem povečanje trdnosti betona,
- močno izboljšanje obdelavnosti betona ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- nima negativnih učinkov na razvoj zgodnjih trdnosti

Cementol Hiperplast 179 je posebej primeren za izdelavo lahko vgradljivih betonov in SCC (Self-Compacting Concrete) – samozgoščevalnih betonov, ob upoštevanju osnovnih načel za pripravo SCC betonov. Učinek je seveda odvisen od: vrste cementa, količine cementa, v/c razmerja, sestave agregata in dozacije **Cementola Hiperplast 179**.

SKLADNOST S STANDARDOM SIST EN 934-1: TABELA 1

Lastnost	Vrednosti
Izgled	tekočina rjavo rumene barve
Gostota, 20°C	(1,06 ± 0,02) kg/dm ³
pH	6,2 ± 1,0
Vsebnost vodotopnih kloridov (Cl ⁻)	ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalijskih (ekvivalent Na ₂ O)	< 3,0 %

DELOVANJE

Cementol Hiperplast 179 se adsorbira na cementne delce. Zaradi svoje prostorske strukture polimerne molekule omrežijo cementne delce in preprečijo njihovo združevanje. Adsorpcija zaradi specifičnosti strukture polimera poteka postopno in dalj časa, zato je učinkovitost večja oz. čas obdelavnosti betonov pripravljenih s **Cementolom Hiperplast 179** daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih.

DOZIRANJE IN NAVODILA ZA UPORABO

- Okvirne dozacije:
0,4 - 2,1 % na maso veziva: odvisno od v/c razmerja in želene obdelavnosti betona, vrste in količine cementa (DC) in vrste betona. Nižje dozacije ustrezajo običajnim, manj zahtevnim betonom, višje dozacije pa so primerne za SCC in visokotrde betone.
Dozacije 0,4 - 0,7 % na maso cementa so primerne za najbolj pogoste vrste betona (črpani betoni konsistence S3 in S4).

- **Cementol Hiperplast 179** lahko dodajamo betonski mešanici razredčenega z zamesno vodo ali še bolje, koncentriranega na že pripravljeno svežo betonsko mešanico manjše obdelavnosti. Optimalne rezultate dosežemo, če dodatek dodamo betonski mešanici, potem ko smo najprej dodali 70-80 % zamesne vode. Dodajamo previdno!
- Priporočljiv čas mokrega mešanja je 3 minute, najkrajši pa 1 minuto. Optimalen čas mešanja moramo določiti na vsaki betonarni.
- Če **Cementol Hiperplast 179** dodajamo naknadno na gradbišču v hruško transportnega vozila zaradi popraviljanja obdelavnosti betona, je obvezno mešanje pri polnih obratih mešalca in sicer 1 minuto na 1 m³, najmanj pa 5 minut.

Opozorilo:

- **Cementol Hiperplast 179** je zaradi visoke učinkovitosti nekoliko bolj občutljiv na spremembe v sestavi betona (količina cementa, sestava agregata, v/c razmerje).
- Zaradi specifičnega delovanja **Cementola Hiperplast 179**, ne moremo primerjati vrednosti v/c razmerja in obdelavnosti betonov pripravljenih z njim in z vrednostmi pri običajnih betonih.
- Zaradi lažjega vgrajevanja in obdelave naj bo vgradljivost – posed nekoliko višji kot pri običajnih betonih.
- Pri relativno visokih v/c razmerjih pri SCC betonih so trdnosti betonov višje kot pri običajnih betonih z enakimi v/c razmerji. Razlog za to je dobro skompaktirana, homogena struktura SCC betonov.
- **Cementol Hiperplast 179** je z družijiv z aerantom **Cementolom Eta S** in **Cementolom Eta S1**.
- **Cementol Hiperplast 179** je z družijiv s pospešilom strjevanja **Cementol B NOVI**.
- **Cementol Hiperplast 179** je z družijiv s plastifikatorjema **Cementoli Delta Ekstra / Ekstra W**.
- **Cementol Hiperplast 179** NI ZDRUŽLJIV z običajnimi superplastifikatorji **Cementoli Zeta / Zeta P / Zeta T**, pospešilom strjevanja **Cementolom Omega F** in aerantom **Cementolom SPA**.
- Naknadno popraviljanje obdelavnosti je možno s hiperplastifikatorji, npr. iz družine **Cementol Hiperplast**.

EKONOMSKA UPRAVIČENOST UPORABE DODATKA

- Daljši čas obdelavnosti betona – tudi pri višjih temperaturah.
- Prihranek energije, posebej pri SCC.
- Lažje in hitrejšo vgrajevanje in črpanje betona, posebej pri SCC.
- Manjše obremenjevanje ljudi in okolja s hrupom in vibracijami, posebej pri SCC.
- Visoke zgodnje in visoke končne trdnosti.
- Izboljšana vodonepropustnost.
- Počasnejša karbonatizacija.
- Betoniranje pri višjih temperaturah.
- Trajnost.
- Prihranek na kalupih.

PAKIRANJE

- baloni 50 kg, kontejnerji 1 m³

SKLADIŠČENJE

- Izdelek mora biti skladiščen pri temperaturah od + 5°C do + 35°C, zavarovati ga moramo pred poškodbami, zmrzovanjem in pred direktno sončno svetlobo.
- V dobro zaprti nepoškodovani embalaži je rok uporabnosti min. 2 leti od datuma proizvodnje.
- Po preteku datuma uporabnosti izdelek ni nujno neuporaben, vendar je potrebno preiskati tiste lastnosti, ki so pomembne za nameravano uporabo.

VARNOSTNA OPOZORILA

- Pri delu s **Cementolom Hiperplast 179** moramo upoštevati splošna navodila za delo s kemikalijami:
- med delom ne jemo, na pijemo in ne kadimo,
 - po končanem delu roke temeljito umijemo z vodo.

OPOZORILO

Navodila in priporočila so podana na osnovi preiskav v naših laboratorijih in dosedanjih izkušenj. Zaradi specifičnih pogojev dela in načina dela priporočamo predhodne preskuse za vsak primer uporabe **Cementola Hiperplast 179** samega ali v kombinaciji z drugimi dodatki. Posebno pozornost pri predhodnih preiskavah in konzultaciji s tehnično službo priporočamo pri uporabi **Cementola Hiperplast 179** v samozgoščevalnih betonih – SCC! Ker na izvajanje del ne moremo vplivati, tudi ne odgovarjamo za kvaliteto del!

Cementol Hiperplast 179 – superplastifikator je skladen z zahtevami standardov **SIST EN 934-1** in **SIST EN 934-2**.