

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:

Lešnik, A. 2012. Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Prinčič, T.): 71 str.

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:

Lešnik, A. 2012. Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Prinčič, T.): 71 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

ALEN LEŠNIK

**VPLIV VRSTE AGREGATA IN MINERALNEGA
DODATKA NA REOLOŠKE IN MEHANSKE
LASTNOSTI LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 3258/KS

**INFLUENCE OF AGGREGATE AND MINERAL
ADDITIVE TYPE ON THE RHEOLOGICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF HIGHLY FLOWABLE
CONCRETE**

Graduation thesis No.: 3258/KS

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Tina Prinčič, univ. dipl. inž. kem. inž.

Član komisije:

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

Ljubljana, 23. 10. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVE

Podpisani Alen Lešnik izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

»VPLIV VRSTE AGREGATA IN MINERALNEGA DODATKA NA REOLOŠKE IN MEHANSKE LASTNOSTI LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA«

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 12. oktober 2012

Alen Lešnik

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 66.018:691.3(043.2)
- Avtor:** Alen Lešnik
- Mentor:** izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
- Somentor:** asist. Tina Prinčič, univ. dipl. inž. kem. inž.
- Naslov:** Vpliv vrste agregata in mineralnega dodatka na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona
- Tip dokumenta:** Diplomsko naloga – univerzitetni študij
- Obseg in oprema:** 71 str., 30 pregl., 21 sl., 24 diag., 1 en.
- Ključne besede:** lahkogradljiv beton, vrsta agregata, elektrofiltrski pepel, obdelavnost betona, tlačna trdnost betona, elastični modul betona, vodoprepustnost betona

Izveček:

Diplomsko delo je zajemalo preiskave svežega in strjenega lahkogradljivega betona različnih sestav z enakim vodo-vezivnim razmerjem. Preiskovali smo štiri različne mešanice betonov, ki so se medsebojno razlikovale po vrsti agregata in/ali veziva. Vsi betoni so bili pripravljene z uporabo kemijskega dodatka – superplastifikatorja nove generacije. V preiskave smo vključili dve vrsti drobljenega karbonatnega agregata, Portland cement ter mineralni dodatek, elektrofiltrski pepel, ki je nadomestil 20 % cementa v vezivu.

V prvem delu preiskav smo vplive agregatov in mineralnega dodatka preverjali preko reoloških lastnosti svežih betonskih mešanic v časovnem intervalu ene ure po končanem mešanju. S posedom in razlezom smo preskušali konsistenco svežega betona, s porozimetrom pa vsebnost por v mešanici. Z reometrom smo določili napetost na meji tečenja in plastično viskoznost mešanic.

Drugi del preiskav je bil namenjen določanju mehanskih lastnosti. Na strjenih vzorcih betona smo po 3-eh, 28-ih in 90-ih dneh določali njihove tlačne trdnosti, module elastičnosti in odpornost proti prodoru vode. Nazadnje smo, s pomočjo rezultatov preiskav, primerjali omenjene karakteristike ter ocenili vplive različnih vrst agregata in uporabljenega mineralnega dodatka na karakteristike svežega in strjenega betona.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 66.018:691.3(043.2)
Author: Alen Lešnik
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Co-Supervisor: Assist. Tina Prinčič, B. Sc.
Title: Influence of aggregate and mineral additive type on the rheological and mechanical properties of highly flowable concrete
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 71 p., 30 tab., 21 fig., 24 sch., 1 eq.
Key words: highly flowable concrete, aggregate type, fly ash, workability of concrete, compressive strength of concrete, modulus of elasticity of concrete, permeability of concrete

Abstract:

This thesis deals with the properties of fresh and hardened highly flowable concrete of various compositions with the same water-binder ratio. We examined four different concrete mixtures which differed by the type of aggregate and/or binder. All concrete mixtures were prepared with a polycarboxylate superplasticizer. We studied the influence of two types of crushed carbonate aggregate, i.e. Portland cement CEM I and mineral additive fly ash, with which we replaced 20 % of the Portland cement in the binder.

In the first part of the study we tested the influences of the type of aggregates and mineral additive through rheological properties of fresh concrete mixtures in the period of one hour after mixing. Using slump test and flow table test we estimated the consistency of fresh concrete. We used porosimeter to determine the amount of air bubbles in concrete and rheometer to measure yield stress value and plastic viscosity of the concrete mixtures.

In the second part of the study we determined mechanical properties. Using samples of hardened concrete, we evaluated its compressive strength, modulus of elasticity and resistance to penetration of water after 3, 28 and 90 days. The results of the study were used to compare the above mentioned properties and to evaluate the influences of various types of aggregates and mineral additive on the properties of fresh and hardened concrete.

ZAHVALA

Za ves njun čas, strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge, se zahvaljujem mentorici prof. Violeti Bokan-Bosiljkov in somentorici asist. Tini Prinčič. Hvala Franciju Čeponu, ki mi je s svojimi bogatimi izkušnjami pomagal pri izvedbi preiskav.

Iskreno se zahvaljujem svojima staršema Marjanu in Branki, ki sta mi ves čas študija brezpogojno pomagala in verjela vame.

Hvala moji dragi Vesni za razumevanje, potrpežljivost in vse spodbudne besede takrat, ko sem jih najbolj potreboval.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFIKONSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
<hr/>	
1 UVOD	1
2 LAHKOVGRADLJIV BETON	4
3 MATERIALI ZA IZDELAVO LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA	7
3.1 AGREGAT	7
3.2 CEMENT	11
3.3 MINERALNI DODATKI.....	16
3.4 KEMIJSKI DODATKI	19
3.5 VODA	22
4 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA	23
5 MEHANSKE LASTNOSTI STRJENEGA BETONA	27
6 LASTNE PREISKAVE	29
6.1 PRIPRAVA BETONA.....	29
6.2 UPORABLJENI MATERIALI.....	31
6.2.1 Agregat.....	31
6.2.2 Cement	32
6.2.3 Voda.....	33
6.2.4 Kemijski dodatek – superplastifikator	33
6.2.5 Mineralni dodatek – elektrofilitrski pepel.....	33
6.3 PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC	34

6.3.1	Zahteve za betonske mešanice v skladu s SIST EN 206-1	34
6.3.2	Sestave betonskih mešanic	36
6.4	REZULTATI PREISKAV NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH	40
6.4.1	Metoda poseda.....	40
6.4.2	Metoda razleza.....	42
6.4.3	Preskušanje vsebnosti por.....	45
6.4.4	Metoda reometra – reološke lastnosti sveže mešanice	46
6.5	PREISKAVE NA STRJENEM BETONU	48
6.5.1	Tlačna trdnost	48
6.5.2	Statični modul elastičnosti.....	54
6.5.3	Vodoprepustnost.....	63
7	ZAKLJUČEK	66
	VIRI	69

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Značilnosti lahkogradljivega betona in njegove prednosti	5
Preglednica 2: Običajna kemijska sestava Portland cementa	11
Preglednica 3: Glavni minerali v cementnem klinkerju.....	12
Preglednica 4: Razvrstitev cementov po standardu SIST EN 197-1	15
Preglednica 5: Trdnostni razredi cementov [MPa]	15
Preglednica 6: Kemijska sestava silicijskega pepela	18
Preglednica 7: SIST EN 934-2: Klasifikacija in definicije kemijskih dodatkov	19
Preglednica 8: Sposobnost redukcije vode in učinek na trajnost betona	21
Preglednica 9: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni	28
Preglednica 10: Zrnavostna sestava uporabljenega agregata.....	31
Preglednica 11: Vodovpojnost uporabljenega agregata A in B	32
Preglednica 12: Kemijske lastnosti uporabljenega cementa.....	32
Preglednica 13: Kemijska sestava uporabljenega EFP	34
Preglednica 14: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona v odvisnosti od stopnje agresivnosti okolja	35
Preglednica 15: Projektirana sestava betonskih mešanic.....	36
Preglednica 16: Sestava betonskih mešanic za reološke preiskave	37
Preglednica 17: Sestave betonskih mešanic za preiskavo mehanskih lastnosti (45L).....	38
Preglednica 18: Sestava betonske mešanice za mehanske preiskave (40L)	38
Preglednica 19: Povprečna gostota mešanic	39
Preglednica 20: Stopnje poseda po SIST EN 206-1	40
Preglednica 21: Posed betonskih mešanic [mm] v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min).....	41
Preglednica 22: Stopnje razleza po SIST EN 206-1	42
Preglednica 23: Razlez betonskih mešanic [mm] v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min).....	43
Preglednica 24: Delež por [%] sveže mešanice pri času 0 in 60 min	45

Preglednica 25: Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti mešanic po 3, 28 in 90 dni	49
Preglednica 26: Razvoj tlačne trdnosti po EC 2: predlagana vrednost koeficienta $s = 0,20$..	52
Preglednica 27: Razvoj tlačne trdnosti po EC 2: različne vrednosti koeficienta s	53
Preglednica 28: Povprečne vrednosti statičnih elastičnih modulov	55
Preglednica 29: Pregled izmerjenih vrednosti vodoprepustnosti	63
Preglednica 30: Povprečna vrednost vodoprepustnosti	63

KAZALO SLIK

Slika 1: Porušena struktura betona kot posledica agresivnega okolja	2
Slika 2: Shema trajnostnega razvoja	3
Slika 3: Visoka stopnja armiranja konstrukcijskih elementov	5
Slika 4: Primerjava konsistenc lahkogradljivega(levo) in SCC betona (desno)	6
Slika 5 : Pridobivanje drobljenega agregata v kamnolomu	8
Slika 6: Alkalno agregatna reakcija	10
Slika 7: Diagram razvoja trdnosti osnovnih mineralov cementnega klinkerja	14
Slika 8: Elektrofitrski pepel pod mikroskopom	18
Slika 9: Princip delovanja SP - elektrostatični naboj na površini cementnih zrn	20
Slika 10: Shematski prikaz povprečne molekule polikarboksilata	21
Slika 11: Strižni tok v tekočini ob delovanju strižne sile.....	24
Slika 12: Primer krivulj tečenja	24
Slika 13: Princip določanja napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti	25
Slika 14: ConTec Viscometer 5	26
Slika 15: Sestavni deli koncentričnega sistema cilindrov	26
Slika 16: Meritev poseda mešanice.....	40
Slika 17: Merjenje razleza svežega betona	43
Slika 18: Porožimeter.....	45
Slika 19: Tlačna preša (levo) in tlačna porušitev vzorca (desno)	48
Slika 20: Proces porušitve vzorca pri tlačni preiskavi	49
Slika 21: Tlačna porušitev valja med preskusom po 90 dneh.....	56

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Mejne krivulje zrnivosti	8
Grafikon 2: Shema poteka mešanja betona	30
Grafikon 3: Sejalna krivulja uporabljenega agregata	31
Grafikon 4: Porazdelitev velikosti delcev EFP in cementa	33
Grafikon 5: Povprečna gostota svežih mešanic	39
Grafikon 6: Posed mešanic v odvisnosti od časa ($t = 0$ do 60 min)	41
Grafikon 7: Razlez mešanic v odvisnosti od časa ($t = 0$ do 60 min)	43
Grafikon 8: Rezultati – napetosti na meji tečenja τ_0	46
Grafikon 9: Rezultati – plastična viskoznost μ	47
Grafikon 10: Povprečnih vrednosti tlačnih trdnosti	49
Grafikon 11: Razvoj tlačne trdnosti do 28. dne v odvisnosti od koeficienta s	52
Grafikon 12: Razvoj tlačne trdnosti betonov	53
Grafikon 13: Povprečne vrednosti elastičnih modulov	55
Grafikon 14: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 3 dneh (valji)	57
Grafikon 15: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 28 dneh (valji)	58
Grafikon 16: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 90 dneh (valji)	58
Grafikon 17: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M1	59
Grafikon 18: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M2	59
Grafikon 19: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M3	60
Grafikon 20: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M4	60
Grafikon 21: Shema obremenjevanja vzorca po prEN 12390-13:2012	61
Grafikon 22: Prepustnost vode po 3 dneh	64
Grafikon 23: Prepustnost vode po 28 dneh	65
Grafikon 24: Prepustnost vode po 90 dneh	65

KRATICE

A	okrajšava za aluminijev oksid Al_2O_3
AB	armiran beton/ armirano betonski
ang.	angleško
C	okrajšava za kalcijev oksid CaO
EFP	elektrofiltrski pepel
EM	elastični modul (statični elastični modul)
HP.....	hiperplastifikator
P	plastifikator
PV	prodor vode
S	okrajšava za silicijev oksid SiO_2
SCC	Self-Compacting Concrete (samozgoščevalni beton)
SP	superplastifikator
TT	tlačna trdnost betona
ut.%	utežni odstotek
v/v	vodo–vezivno razmerje

1 UVOD

Beton je v gradbeništvu, zaradi svojih edinstvenih lastnosti, najpogosteje uporabljen konstrukcijski material. Njegova priprava je relativno enostavna in cena sorazmerno nizka. Z betonom lahko tvorimo najrazličnejše oblike konstrukcij in izdelkov ter dosežemo zavidljive tlačne trdnosti. Velika prednost je možnost takega načrtovanja in reoloških in mehanskih karakteristik, da najbolje služi svojemu namenu. Vzporedno z razvojem znanosti in tehnologije se spekter uporabe betona ves čas širi. S tem povezane so tudi vse strožje zahteve, ki jih mora ta gradbeni material izpolnjevati. Mnogi kemijski in mineralni dodatki močno vplivajo na njegove karakteristične lastnosti in s tem omogočajo izdelavo različnih vrst specialnih betonov. Dobro razumevanje vpliva dodatkov in osnovnih sestavin na lastnosti svežega in strjenega betona ima pri tem zelo velik pomen. Na ta račun se lahko proizvaja konkurenčen beton, ki brez večjih težav doseže vse zahtevane lastnosti.

Obstojnost betona

V preteklosti se je pri projektiranju betona pozornost večinoma usmerjalo v doseganje zadostne tlačne trdnosti. Neupravičeno je veljalo, da je beton z visoko trdnostjo tudi trajen beton, ki bo lahko dolgo in uspešno kljuboval agresivnim vplivom iz okolja. Omenjen pristop je privedel do številnih težav v zvezi s propadanjem AB konstrukcij (Vuk, 2005). Tako se je pokazala verjetno največja pomanjkljivost betona - njegova obstojnost (Slika 1). Posledice številnih propadajočih objektov so bili visoki stroški zaradi številnih sanacij. Danes se zavedamo, da glavni vzrok za poškodbe konstrukcij ni prenizka trdnost, ampak v splošnem slabo pripravljene projekti, slaba izvedba ali pomanjkljivo vzdrževanje. Možna je tudi kombinacija omenjenega (Šajna in Kavčič, 2005). Porozni in slabo vgrajeni betoni so veliko bolj občutljivi na napad agresivnega okolja. Nova spoznanja na tem področju so vidna v standardu za beton EN 206-1, ki uvaja dodatne zahteve za betone, ki bodo izpostavljeni agresivnejšim vplivom okolja. Tem novim zahtevam veliko lažje zadostimo z uporabo specialnih betonov, ki vsebujejo kemijske in/ali mineralne dodatke. Na ta račun se povečuje uporaba lahkogradljivega betona. Sodobne konstrukcije zahtevajo vse višje nosilnosti, ki jo

lahko zagotovi beton z zadostno trdnostjo in kvalitetno vgradnjo. Ker moramo poleg tega upoštevati še druge zahteve, je uporaba navadnega vibriranega betona le še redko kdaj upravičena.



Slika 1: Porušena struktura betona kot posledica agresivnega okolja
(Carrasquillo Associate, LTD. 2010)

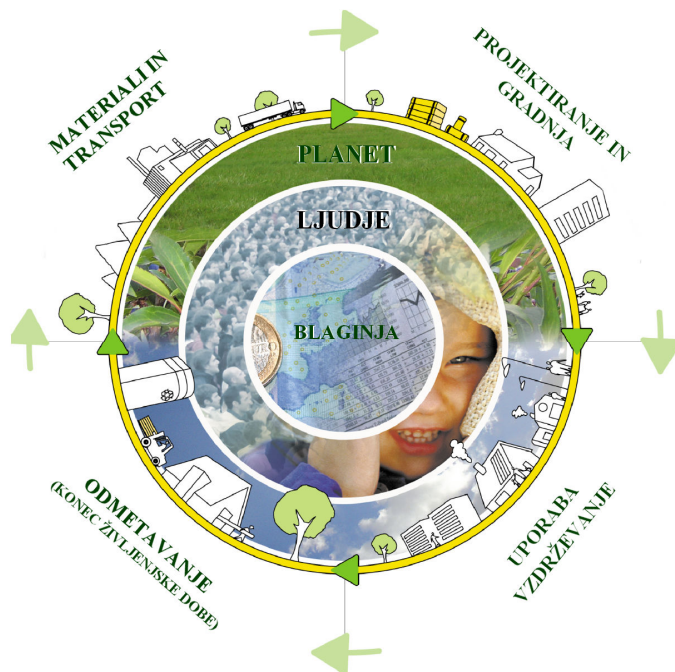
Uporaba materialov

Kadar omenjamo zahteve o trajnosti betona, nikakor ne smemo pozabiti na vse strožje okoljske in ekonomske zahteve v skladu z načeli trajnostnega razvoja (Slika 2). Zaradi njih se vse več pozornosti usmerja v uporabo odpadnih surovin iz gradbenih in nekaterih drugih industrijskih panog. Lep primer je elektrofiltrski pepel (v nadaljevanju EFP), ki lahko služi kot mineralni dodatek, ki nadomesti del hidravličnega veziva - cementa. Uporaba pepela pripomore k ohranjanju okolja, saj predstavlja stranski produkt pri kurjenju premoga. Njegov učinek se kaže tudi na prihranku energije in količini izpustov toplogrednih plinov, ki bi sicer nastajali pri proizvodnji cementa. Kako EFP pepel vpliva na mehanske in reološke lastnosti betona, smo na osnovi izvedenih preiskav preverili v tej diplomski nalogi.

Omenjena spoznanja in trendi načina gradnje narekujejo poglobljene raziskave betonskih mešanic in sestavin iz katerih proizvajamo beton. Nepremišljena uporaba materialov lahko

pripelje do prostorninsko neobstojnega betona, kar negativno vpliva na njegovo trajnost. V zadnjem času se pojavlja tudi vprašanje pravilne izbire agregata. V splošnem razumemo, da je to čist, trd in inerten material, ki s produkti hidratacije cementa ne reagira. Nekateri pojavi, ki se v betonu z določenimi vrstami agregata kažejo zlasti v daljšem časovnem obdobju pa nas opozarjajo, da nepremišljena izbira agregata lahko zelo ogrozi trajnost betona. Z namenom, da preverimo pomen različnih vrst agregata na lastnosti betona, bomo v preiskavah uporabili dve različni vrsti drobljenega agregata. Njun vpliv bomo določili na primerjavi reoloških in mehanskih lastnosti betonskih mešanic.

Bolje kot poznamo vplive vseh sestavin na lastnosti betona, lažje proizvedemo beton, ki ustreza predpisanim zahtevam. Premišljena in bolj uravnotežena gradnja manj obremenjuje okolje, zgrajene konstrukcije pa bolje in dlje služijo svojemu namenu. Nenazadnje bo tak način v prihodnosti prihranil veliko nepotrebnih stroškov iz naslova sanacij objektov in zagotovil manj gradbenih odpadkov. Morda bomo na tak način lahko kdaj povsem sledili načelom trajnostnega razvoja.



Slika 2: Shema trajnostnega razvoja
(Saint-Gobain (Isover), 2008)

2 LAHKOVGRADLJIV BETON

Lahkovgradljiv beton je specialni beton, ki ima v svežem stanju odlične reološke lastnosti in pri vgrajevanju potrebuje minimalno stopnjo vibriranja. Njegovo izdelavo so v veliki meri omogočili superplastifikatorji. To so kemijski dodatki, ki v svežemu betonu bistveno zmanjšajo potrebo po količini vode, zato lahko določeno konsistenčno stopnjo doseže z bistveno nižjim vodo-vezivnim¹ razmerjem (v nadaljevanju v/v razmerje). Reološke lastnosti svežega betona se lahko z nekoliko večjo količino superplastifikatorja bistveno izboljšajo, mehanske lastnosti strjenega betona se pri tem ne poslabšajo. Visoka stopnja obdelavnosti v svežem stanju omogoča kvalitetno vgradnjo betona, kar pomeni, da bo trajnejši ter z boljšimi mehanskimi lastnostmi.

Betoni, ki so v svežem stanju podobno obdelavni, vendar pripravljene brez kemijskega dodatka, imajo bistveno slabše mehanske karakteristike. V takem betonu dobro obdelavnost zagotavlja večja količina vode (večje v/v razmerje). Slabosti take mešanice se v strjenem betonu kažejo v nižji tlačni trdnosti, večji poroznosti in posredno manjši trajnosti oziroma obstojnosti betona. Prevelika količina vode lahko hitro privede do segregacije agregatnih zrn, kar še dodatno oslabi njegovo strukturo. Beton mora torej vsebovati zadostno količino superplastifikatorja, da lahko doseže primerno konsistenčno stopnjo, zraven pa zadosti še zahtevam o visoki trdnosti, obstojnosti in trajnosti.

Uporaba lahkogradljivega betonu se v zadnjem času povečuje, saj morajo nosilne konstrukcije prevzemati vse večje obremenitve, stopnja armiranja je visoka (Slika 3), poleg tega je potrebno graditi v skladu z načeli o trajnostnem razvoju. Lahkovgradljiv beton prinaša kar nekaj prednosti v primerjavi z navadnimi vibriranimi beton. Nekatere prednosti so izpostavljene v preglednici 1 (Kušar, 2012).

¹ Poenotimo izraza vodo-vezivno in vodo-cementno razmerje. Za vezivo uporabljamo cement oziroma cement skupaj z mineralnim dodatkom.



Slika 3: Visoka stopnja armiranja konstrukcijskih elementov
(North Dakota State Government, 2012)

Preglednica 1: Značilnosti lahkogradljivega betona in njegove prednosti

	Prednost lahkogradljivega betona v primerjavi z navadnim vibriranim betonom
Lastnosti v svežem stanju	Kljub nizkemu v/v razmerju ima beton zelo dobre reološke lastnosti v svežem stanju (superplastifikator)
Proces vgrajevanja	Potrebno je minimalno vibriranje: <ul style="list-style-type: none"> • hitrejše vgrajevanje = hitrejša gradnja • manj hrupa • boljše delovno okolje
Mehanske lastnosti	Kvalitetno vgrajevanje in nizko v/v razmerje zagotovi visoke trdnosti in obstojen beton

Lahkovgradljiv beton ima podobno sestavo kot navaden beton, zaradi boljše obdelavnosti v svežem stanju je zaželena večja količina finih delcev (mineralni dodatki) in manjša količina grobozrnatega agregata.

Med lahkogradljive betone praviloma uvrščamo tiste betone, ki dosegajo stopnjo konsistence S5 (posed večji od 210mm). V okviru te diplomske naloge pa bodo med lahkogradljive betone uvrščeni tudi betoni s stopnjo konsistence S4 (posed od 160 do 210 mm). Lahkovgradljiv beton se običajno pripravlja z uporabo superplastifikatorjev.

Lahkovgradljivega betona nikakor ne smemo enačiti s samozgoščevalnim betonom (SCC beton). Bistvena razlika med njima je, da slednji pri vgrajevanju ne potrebuje nobenega vibriranja, saj je zmožen že samo zaradi delovanja lastne teže popolnoma zapolniti opaž ter tvoriti homogeno in zgoščeno strukturo (Kušar, 2012). Nekoliko se razlikujeta tudi po sestavi, saj SCC betoni praviloma vsebujejo velik delež finih delcev (mineralni dodatki). Za primerjavo lahko na sliki 4 vidimo razliko v konsistenci pri metodi poseda.



Slika 4: Primerjava konsistenc lahkovgradljivega(levo) in SCC betona (desno)

(Renovation-Headquarters.com, 2012)

(WhatWow, 2010)

3 MATERIALI ZA IZDELAVO LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA

Beton kot tehnični material uvrščamo v skupino kompozitnih materialov. V osnovi ga sestavljata agregat in cementni kamen, ki nastane v procesu vezanja cementa z vodo (proces hidratacije). Gledano z inženirskega vidika je beton veliko več kot le omenjeni kompozit. Gre za izrazito heterogen material z neenakomerno porazdeljenimi zrnji agregata, z različno velikimi porami, ki poleg tega svoje lastnosti še ves čas spreminja (Duh, 2008). Proces strjevanja betona je zelo kompleksen proces, ki še vedno ni raziskan v celoti. Reološke in mehanske lastnosti betona so zelo odvisne od njegove mikrostrukture, na katero vplivajo vse sestavine. V sodobne betone se poleg osnovnih materialov (agregat, cement in voda) redno vključuje tudi različne mineralne in kemijske dodatke, ki dajo betonom specialne lastnosti. Za lahkogradljiv beton, ki smo ga preiskovali v nalogi je značilna uporaba superplastifikatorja nove generacije, ki mu zagotovi dobro obdelavnost v svežem in dobre mehanske lastnosti v strjenem stanju.

3.1 AGREGAT

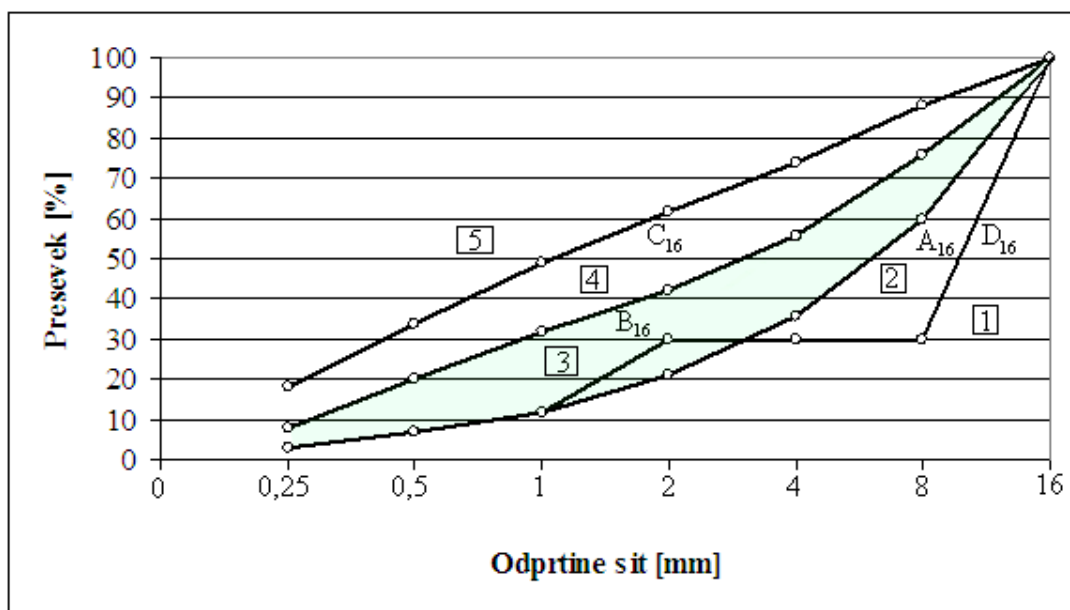
Agregat je količinsko najbolj zastopan material v betonu in zavzema od 60 do 80 % njegove prostornine. Najpogosteje se za pripravo betona v Sloveniji uporablja drobljeni mineralni agregat, ki nastane z drobljenjem večjih kosov kamna (Slika 5). Tak agregat ima ostre robove, bolj homogeno mineralno sestavo in tudi nekaj notranjih razpok, ki nastanejo med drobljenjem. Rezultat ostrih robov so boljše mehanske lastnosti betona, ker se zrna na ta način medsebojno zaklinijo. Druga vrsta agregata glede na njegov izvor je gramoz aluvialnega izvora. Takšni agregati imajo zaobljene robove in pestrejšo mineralno sestavo, ki je odvisna od izvora rečnih nanosov. Betoni s takšno vrsto agregatov so lepše vgradljivi, ker je zaradi oblih robov medsebojno trenje agregata zmanjšano (Žarnić, 2003). V naših krajih prevladujejo karbonatni drobljeni agregati na osnovi apnenca in dolomita. Gostota agregatov za normalne betone se giblje med 2200 in 2800kg/m³(Žarnić, 2003).



Slika 5 : Pridobivanje drobljenega agregata v kamnolomu
(Mikec, 2008)

Granulometrijska sestava

Za izdelavo betona z ustreznimi reološkimi in mehanskimi lastnostmi je zelo pomembna zrnavostna sestava uporabljenega agregata. Agregat s pravilno zastopanostjo vseh frakcij bo zagotovil, da bo imel svež beton nižjo napetost na meji tečenja in manjšo viskoznost. Hkrati bo mešanica bolj stabilna proti segregaciji agregatnih zrn, beton pa bolje obdelaven (Mehta in Monteiro, 2006). Slovenski standard SIST 1026 predpisuje mejne krivulje zrnivosti (Grafikon 1). Agregat z ustrežno granulometrijsko sestavo ima sejhalno krivuljo, ki običajno poteka v območju 3.



Grafikon 1: Mejne krivulje zrnivosti

Maksimalno zrno agregata

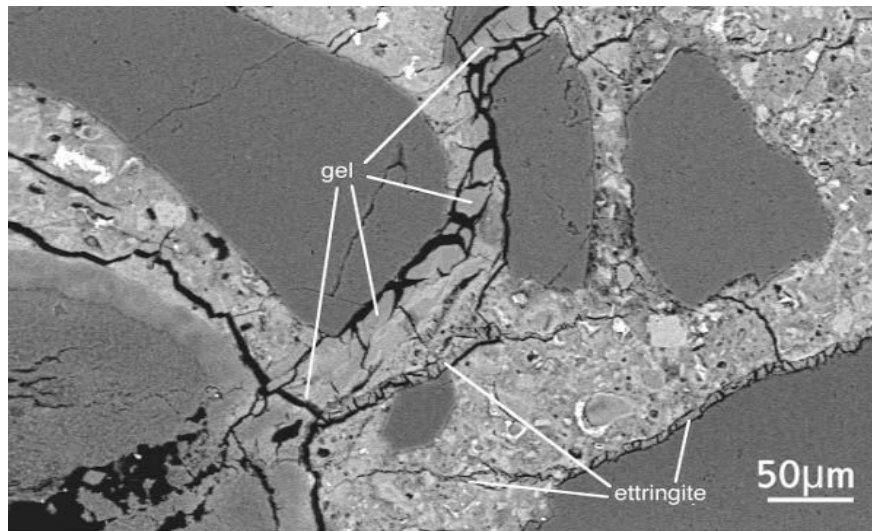
Z izrazom maksimalno zrno agregata imenujemo zgornjo nazivno velikost največje frakcije agregata za izdelavo betona. Agregat s premerom zrn nad 4 mm imenujemo grobi, z zrnji premera pod 4 mm pa drobni agregat. Velikost maksimalnega zrna v betonu ne sme biti večja od predpisane v standardu SIST 1026 (Tč. 5.4.4. Največje zrno agregata). S povečanjem velikosti agregatnih zrn, se zmanjša skupna površina zrn v masi betona in potreba po vodi. Ugodno lahko velika zrna agregata vplivajo v primerih, ko se v betonu razvija visoka hidratacijska toplota. Slabost velikih zrn agregata je nižja tlačna trdnost (Žarnić, 2003).

Vlažnost

Vsak agregat vsebuje določeno količino vlage, zato je pred pripravo betona potrebno predvideti, kakšen bo njen vpliv na obdelavnost betona oziroma vodo-vezivno razmerje. Povsem suh agregat lahko vpije precejšnjo količino vode, ki je bila projektirana za hidratacijo cementa. Obratno lahko zelo moker agregat občutno poviša konsistenco oziroma vodo-vezivno razmerje sveže betonske mešanice. S pomočjo podatkov o vodovpojnosti oziroma vlažnosti agregata, moramo projektirano količino vode prilagoditi vlažnosti agregata. Za pripravo betona je najbolj primeren z vlago zasičen agregat s suho površino (Žarnić, 2003).

Alkalno-agregatna reakcija

Ena najpogostejših reakcij, ki jih lahko povzroči neustrezen agregat, je reakcija alkalij (Na_2O , K_2O) iz cementnega kamna s silikatnimi minerali v agregatu. Imenujemo jo alkalno-silikatna reakcija. Produkt alkalno-silikatne reakcije je alkalno-silikatni gel različnih kemijskih sestav, ki povzroči spremembe v strukturi agregata. Značilna lastnost nastalega produkta je velika sposobnost nabrekanja v agregatu in cementnem kamnu. Nabrekanje povzroči visok hidravlični pritisk in nastanek razpok, ki vodijo v proces degradacije betona (Slika 6). Alkalno-agregatna reakcija je lahko vidna šele po več letih po betoniranju, njena hitrost je odvisna od količine in velikosti silikatnih delcev ter ostalih pogojev okolja (Neville, 1991).



Slika 6: Alkalno agregatna reakcija
(Understanding Cement, 2012)

V splošnem agregat definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ne reagira z drugimi komponentami betona (Mehta in Monteiro, 2006). Standard SIST 1026 za agregate z vsebnostjo različnih silikatov zahteva, da se na preverjene načine prepreči alkalno-silikatno reakcijo. To velja še posebej, če bo beton izpostavljen vlagi.

3.2 CEMENT

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo (hidrataciji) veže in tvori cementni kamen, ki zapolni votline med zrni agregata. Trdnost in struktura cementne paste vplivata na mehanske lastnosti betona v strjenem stanju. Trden in odporen beton vsebuje cementni kamen z majhno vsebnostjo por, kar je tesno povezano z vodo-vezivnim razmerjem.

Osnovne surovine za proizvodnjo cementa so minerali iz naravnega laporja, apnenca in glinice. Mešanica surovin mora vsebovati okoli 75 % CaCO_3 , ki ga prispevata lapor in apnenec, medtem ko glinene komponente prispevajo okside, kot so SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Po mletju osnovnih surovin v drobilnikih se le te homogenizira ter zmelje v mlinu surovin. Po procesu segrevanja surovin v toplotnem izmenjevalcu se surovinsko moko dozira v rotacijsko peč, kjer poteka proces kalcinacije in sintranja materiala pri temperaturi okoli 1450 °C. V peči se surovinska moka pretvori v klinker, ki se ga hitro ohladi in ob dodatku majhne količine sadre nastane Portland cement.

V preglednici 2 je prikazana običajna kemijska sestava Portland cementa (Žarnić, 2003). V preglednici 3 so prikazani minerali in njihov delež v cementnem klinkerju (Žarnić, 2003). Pri kemijskem zapisu mineralov upoštevamo okrajšave, ki se uporabljajo v kemiji cementa. Posamezne okside na tak način zapišemo z eno črko.

Preglednica 2: Običajna kemijska sestava Portland cementa

Komponenta	Povprečna količina (ut. %)
CaO	65
SiO₂	22
Al₂O₃	5
Fe₂O₃	3
Alkalije (K₂O, Na₂O)	0,2 do 1,3%
nevezan CaO	do 2%
prosti MgO	do 4%

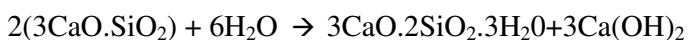
Preglednica 3: Glavni minerali v cementnem klinkerju

Ime minerala	Kemijska formula	Okrajšava	Delež v portland cementu
trikalcijev silikat (ALIT)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	70-80%
dikalcijev silikat (BELIT)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	
trikalcijev aluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	5-12%
tetrakalcijev aluminat	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8-11%

Proces in način strjevanja cementne paste in s tem betona je v veliki meri odvisen od zastopanosti posameznega minerala v cementu. V nadaljevanju so opisane značilnosti osnovnih mineralov klinkerja pri procesu hidratacije cementa. Na sliki 7 je prikazan časovni razvoj trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja od sedmega dne naprej.

Trikalcijev silikat - alit

C_3S je najpomembnejši mineral Portland cementa, saj je nosilec trdnosti v betonu. Hidratacija C_3S je intenzivnejša do 28-ega dneva, ko cement doseže večino svoje končne trdnosti. Alit najbolj prispeva k visokim trdnostim cementnega kamna in s tem betona. Hidratijsko reakcijo se lahko predstavi s sledečo enačbo (De Belie, 2010):



Alit + Voda → Kalcijev silikat hidrat + Kalcijev hidroksid

Produkt reakcije je kalcijev silikat hidrat $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, ki ga imenujemo tudi C-S-H gel, in predstavlja okoli 60 % produktov hidratacije cementa. Drugi produkt, kalcijev hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$, zagotavlja visoko pH vrednost v raztopini v porah in se nahaja v trdni obliki v kristalih na stenah por.

Dikalcijev silikat - belit

C_2S v procesu hidratacije bistveno počasneje in postopno reagira, ob tem se sprošča nižja hidratijska toplota kot pri reakciji alita. Tako kot alit tudi belit prispeva k visokim tlačnim

trdnostim cementnega kamna, vendar se njegov prispevek izraža na poznejših tlačnih trdnostih (po 28 dneh). Reakcija je predstavljena z enačbo (De Belie, 2010):



Belit + Voda \rightarrow Kalcijev silikat hidrat + Kalcijev hidroksid

Trikalcijev aluminat

Reakcija trikalcijevega aluminata (C_3A) z vodo privede do hipne reakcije, pri kateri se sprosti znatna količina hidratacijske toplote. Zaradi tega se cementnemu klinkerju med mletjem za regulacijo vezanja doda sadro, CaSO_4 (Žarnić, 2003). Kemijsko reakcijo, ki predstavlja nastanek etringita zapišemo (De Belie, 2010):



Aluminat + Sadra (kalcijev sulfat) + Voda \rightarrow Etringit

V svežem betonu etringit tvori ovoj okoli aluminatnih delcev in s tem upočasni nadaljnji proces hidratacije C_3A . Etringit nastaja dokler so za reakcijo še na razpolago sulfatni ioni. Ko se sadra porabi, postane etringit nestabilen in se pretvori v monosulfoaluminat (De Belie, 2010).

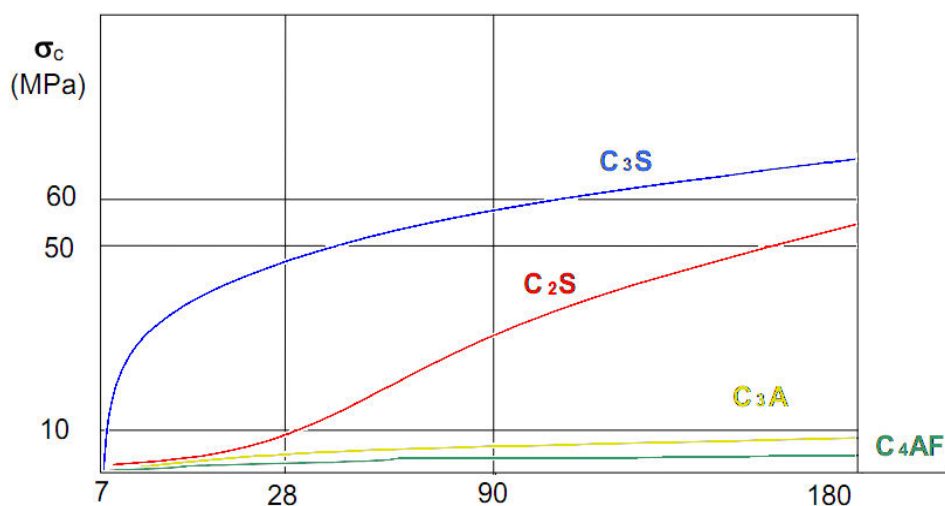


Aluminat + Etringit + Voda \rightarrow Monosulfoaluminat

C_3A ima na končno trdnost betona zelo majhen vpliv in je zelo občutljiv na sulfatno korozijo. Njegov prispevek na zgodnjo tlačno trdnost pa je zelo velik. V primeru, ko se etringit, zaradi vdora sulfatov, tvori v strjenem betonu, začne zaradi svoje ekspanzivnosti rušiti betonsko strukturo.

Tetrakalcijev aluminoferit

Produkti hidratacije C_4AF so podobni produktom, ki se tvorijo iz C_3A , vendar je hitrost teh reakcij počasnejša in se pri tem razvije manj hidratacijske toplote. C_4AF je bolj odporen na sulfatno korozijo kot C_3A . K trdnosti betona prispeva zelo malo, vendar enakomerno pri vsaki starosti.



Slika 7: Diagram razvoja trdnosti osnovnih mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2003)

Vrste cementa

Na tržišču je moč dobiti veliko vrst cementov. Med seboj se razlikujejo po kemijski sestavi, ki je odvisna od količine in vrste mineralnih dodatkov, ki se jih med mletjem dodaja Portlandskemu klinkerju. Standard SIST EN 197-1 loči pet glavnih skupin cementov (Preglednica 4). Nadalje se tipi cementa ločijo po razredu trdnosti in po hitrost vezanja. Poznamoemente z normalno hitrostjo strjevanja (N) in take s pospešenim strjevanjem (R), trdnostni razredi pa so trije (Preglednica 5).

Preglednica 4: Razvrstitev cementov po standardu SIST EN 197-1

Vrsta	Opis	Glavne sestavine in oznake	Delež mineralnih dodatkov
CEM I	Čisti portlandski cement	klinker	0%
CEM II	Portlandski cement z mineralnimi dodatki	klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V,W) žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A (S,P,Q,V,W,T,L) 6-20%
			II/B (S,P,Q,V,W,T,L) 21-35%
CEM III	Žlindrin cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S)	III/A (S) 36-65%
			III/B (S) 66-80%
			III/C (S) 81-95%
CEM IV	Pucolanski cement	klinker, mikrosilika (D)-max 10% pucolan (P,Q) Elektrofiltrski pepel (V)	IV/A (D,P,Q,V) 11-35% IV/A (D,P,Q,V) 36-55%
CEM V	Mešani cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V)	V/A (S,P,Q,V) 36-60% V/B (S,P,Q,V) 61-80%

Preglednica 5: Trdnostni razredi cementov [MPa] (Žarnić, 2003)

Trdnostni razred	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	Minimalna	Maksimalna
32,5 N	-	≥ 16,0	32,5	52,5
32,5 R	≥ 10,0	-	32,5	52,5
42,5 N	≥ 10,0	-	42,5	62,5
42,5 R	≥ 20,0	-	42,5	62,5
52,5 N	≥ 20,0	-	52,5	-
52,5 R	≥ 30,0	-	52,5	-

Primeren cement moramo izbrati glede na namen uporabe betona. Standard SIST EN 206-1 zahteva izbor med tistimi, ki veljajo za primerne. Ob tem moramo upoštevati sledeče:

- način izvajanja del
- končno rabo betona
- pogoje negovanja
- dimenzije konstrukcije (razvoj hidratacijske toplote)
- pogoje okolja katerim bo konstrukcija izpostavljena
- potencialno reaktivnost agregata z alkalijami iz osnovnih materialov

3.3 MINERALNI DODATKI

Mineralni dodatki so fino presejani silikatni ali aluminosilikatni materiali, ki se dodajajo betonski mešanici, da bi izboljšali nekatere lastnosti, ali pa dosegli posebne lastnosti svežega oziroma strjenega betona. Standard SIST EN 206-1 obravnava dve vrsti mineralnih (neorganskih) dodatkov

- tip I (skoraj inertni mineralni dodatki)
- tip II (pucolanski ali latentno hidravlični mineralni dodatki)

V prvo skupino sodita apnenčeva oz. dolomitna kamena moka, v drugo se poleg naravnega pucolana vulkanskega izvora (finozrnati vulkanski pepel) uvrščajo tudi nekateri materiali, ki nastanejo kot stranski produkti v industriji. To so elektrofiltrski pepel EFP, granulirana plavžna žindra in mikrosilika. Pucolanski dodatki v prisotnosti vode in pri običajnih temperaturah zreagirajo s kalcijevim hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Wikipedia, 2012). Na ta način nastane produkt s podobnimi lastnostmi kot jih ima C-S-H gel.

SIST EN 206-1 zahteva, da morajo biti količine mineralnih dodatkov v betonu preverjene z začetnim preskusom. Kadar mineralni dodatki tipa II veljajo za primerne, se smejo upoštevati v računu vsebnosti cementa in vodo-vezivnega razmerja. Primernost dodatkov se dokaže na podlagi evropskega tehničnega soglasja ali ustreznega nacionalnega standarda v skladu s SIST EN 206-1. Kadar cement že vsebuje mineralne dodatke, je za uporabo dodatnih mineralnih dodatkov potrebno preveriti njihovo združljivost in primernost uporabe potrditi s preskusi.

Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel (EFP) je fino zrnati prah. Pridobiva se ga z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči termoelektrarn, v katerih izgoreva uprašeni premog. V osnovi ga sestavljajo okrogli ali zaobljeni steklasti delci (Slika 8), kemijska sestava je odvisna od vrste premoga v peči. Po svoji naravi je lahko silicijski ali kalcijjski. Silicijski EFP ima pucolanske lastnosti, kalcijjski ima dodatno lahko tudi hidravlične lastnosti. Gostota EFP se giblje med 800 do 1100 kg/m³

- Silicijski EFP se kot mineralni dodatek označuje s črko V (SIST EN 1026) in mora vsebovati reaktivni silicijev dioksid (SiO₂) in aluminijev oksid (Al₂O₃). Delež reaktivnega kalcijevega oksida (CaO) mora biti manjši od 10 % mase. Predpisana je tudi količina reaktivnega SiO₂, ki mora biti vsaj 25 % celotne mase (25 ut.%). V preglednici 6 je predstavljena kemijska sestava silicijskega EFP (Povše, 2010)
- Kalcijjski EFP se označuje s črko W (SIST EN 197-1). Ima lahko pucolanske in/ali hidravlične lastnosti. V tem primeru mora znašati količina reaktivnega kalcijevega oksida (CaO) vsaj 10 % mase. EFP, ki vsebuje od 10 do 15 ut.% reaktivnega kalcijevega oksida, mora vsebovati tudi najmanj 25 ut.% reaktivnega silicijevega dioksida SiO₂ (Povše, 2010)

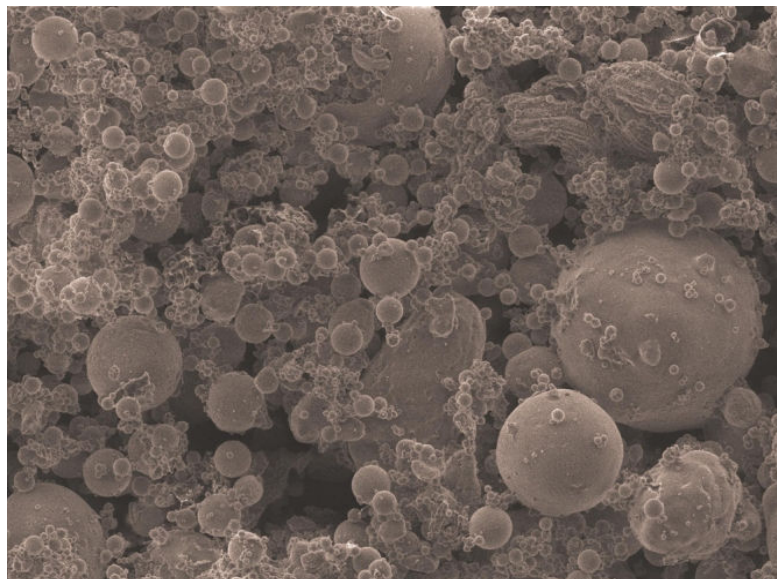
EFP se lahko v skladu z zahtevami SIST EN 197-1 uporablja kot mineralni dodatek pri proizvodnji cementov (CEM II, CEM V). Zaradi svojih pucolanskih lastnosti v betonu reagira s kalcijevim hidroksidom in tvori kalcijev silikat hidrat.

Zlasti v zadnjem času zaradi številnih ekonomskih in okoljevarstvenih zahtev dobiva uporaba odpadkov in stranskih produktov v industriji vse večji pomen. S tem se povečuje uporaba EFP pri izdelavi betonov (Povše, 2010).

Preglednica 6: Kemijska sestava silicijskega pepela (Benscheidt et al., 2008)

Komponenta	Delež [ut. %]
SiO₂	36 do 59
Al₂O₃	20 do 35
Fe₂O₃	3 do 19
CaO	1 do 12
MgO	0,7 do 4,8
K₂O	0,5 do 6
Na₂O	0,1 do 3,5
SO₃	0,1 do 2
TiO₂	0,5 do 1,8
nezgoreli delci premoga	0,5 do 5

Z zamenjavo dela cementa z EFP zmanjšujemo vpliv betona na okolje. Z njim se nadomešča cement, ki je največji onesnaževalec okolja med vsemi sestavinami betona (visoki izpusti CO₂ med proizvodnjo). Pepel na več načinov izboljšuje lastnosti betona. Na račun finostrukture se lahko doseže zelo dobro zgoščenost. Svežemu betonu se izboljša viskoznost (večja obdelavnost), poviša stabilnost, strjenemu pa povečuje trdnost in odpornost proti prodoru vode. Vse to se pozna na povečani obstojnosti betona.



Slika 8: Elektrofилtrski pepel pod mikroskopom
(Tescan a.s., 2012)

3.4 KEMIJSKI DODATKI

Po definiciji standarda SIST EN 934-2 so kemijski dodatki snovi/produkti, ki jih dodamo betonu v času mešanja v količinah manjših od 5 % na maso cementa, z namenom da spremenimo lastnosti svežega in/ali strjenega betona (Černilogar, 2010). V sodobni gradnji so konstrukcijski betoni brez kemijskih dodatkov že redkost, saj je njihova vloga pri zagotavljanju trajnosti betona zelo velika. Mnogokrat je njihova uporaba zahtevana že v standardu, saj bi beton brez ustreznih dodatkov ne izpolnjeval zahtevanih karakteristik. Predvsem to velja za betone iz razreda visoke izpostavljenosti agresivnemu okolju. V preglednici 7 je prikazana klasifikacija in definicije kemijskih dodatkov po SIST EN 934-2. V nadaljevanju se predstavi le skupino dodatkov, ki je bila uporabljena med preiskavami.

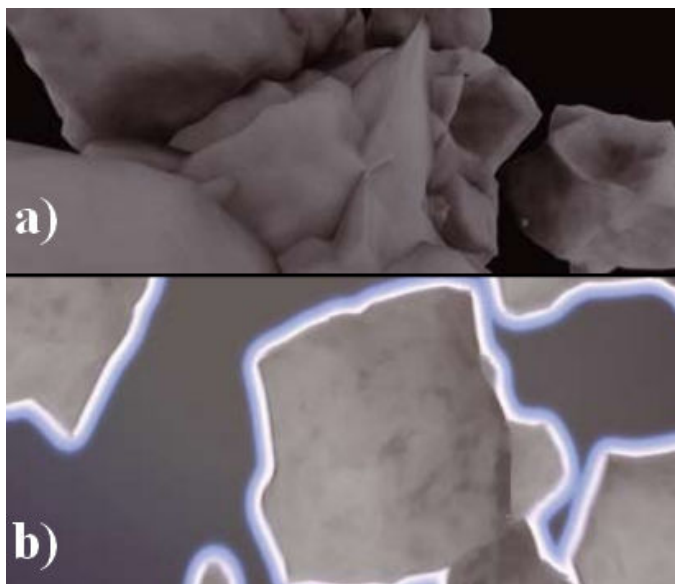
Preglednica 7: SIST EN 934-2: Klasifikacija in definicije kemijskih dodatkov (Černilogar, 2010)

Klasifikacija	Definicija
Plastifikator	Omogoča znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oba načina
Superplastifikator	Omogoča visoko znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali znatno zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oba načina
Dodatek za zadrževanje vode	Z zmanjšanjem izločanja vode zmanjša izgubo vode
Aerant	Med mešanjem betona vneše kontrolirano količino majhnih, enakomerno porazdeljenih zračnih mehurčkov, ki po strditvi ostanejo v betonu
Pospešilo vezanja	Skrajšuje čas do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdo stanje
Pospešilo strjevanja	Povečuje hitrost razvoja začetnih trdnosti brez ali z vplivom na čas vezanja
Zavlačilo vezanja	Podaljšuje do začetka prehoda mešanic iz plastičnega v trdo stanje
Gostilo	Zmanjšuje kapilarno vpijanje strjenega betona
Zavlačilo vezanja/plastifikator	Učinkuje kot plastifikator (osnovni učinek) in zavlačilo vezanja (dodaten učinek)
Zavlačilo vezanja/superplastifikator	Učinkuje kot superplastifikator (osnovni učinek) in zavlačilo vezanja (dodaten učinek)
Pospešilo vezanja/plastifikator	Učinkuje kot plastifikator (osnovni učinek) in pospešilo vezanja (dodaten učinek)

Plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji

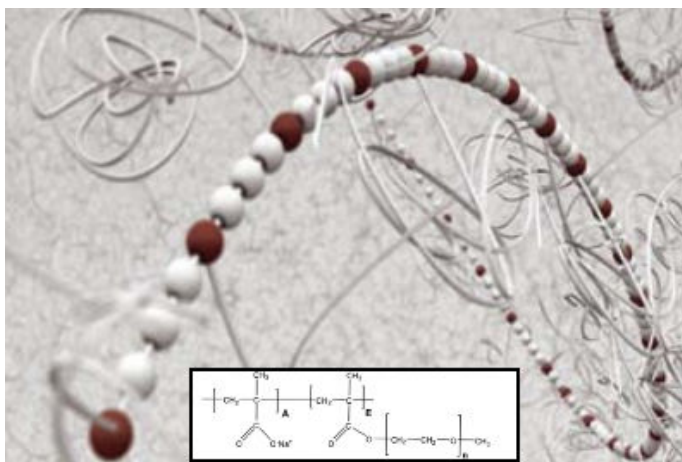
Plastifikatorji, superplastifikatorji in hiperplastifikatorji so skupina dodatkov, ki se v proizvodnji betona najbolj pogosto uporabljajo. Njihova lastnost je sposobnost redukcije vode. Prvi tovrstni dodatki so se pojavili že okoli leta 1930. To so bili plastifikatorji (P) na osnovi modificiranih lignin-sulfonatov in kasneje na osnovi glukonatov. Naslednji v razvoju so bili superplastifikatorji (SP) prve generacije, z začetkom uporabe okoli leta 1970. Obdobje hiperplastifikatorjev (HP) ali superplastifikatorjev nove generacije se je začelo leta 1990. Najprej na osnovi polivinilnih kopolimerov, konec naslednjega desetletja so jih nadomestili še učinkovitejši HP na osnovi polikarboksilatov.

P/SP/HP se z negativno nabitimi molekulami adsorbirajo na pozitivno nabito površino cementa. P in SP prve generacije se adsorbirajo s cementnimi delci in jih omrežijo. Elektrostatični naboj enako nabitih delcev prepreči medsebojno združevanje cementnih delcev v stiku z vodo. Na sliki 9a je prikazana cementna pasta brez SP, na sliki 9b pa cementna pasta z dodanim SP (Černilogar, 2010).



Slika 9: Princip delovanja SP - elektrostatični naboj na površini cementnih zrn (Černilogar, 2010)

Princip delovanja polikarboksilatnih HP je podoben. Negativne molekule se vežejo na pozitivno nabito površino cementa. Združevanje cementnih delcev v tem primeru preprečuje tudi sterično-prostorski odboj. Povzročajo ga dolge glavne in stranske verige HP (Slika 10).



Slika 10: Shematski prikaz povprečne molekule polikarboksilata (Černilogar, 2010)

Učinek P/SP in HP v betonu je podoben, razlika je praviloma le v stopnji učinkovitosti. Z njimi lahko dosežemo sledeče:

- nižje v/v razmerje pri enaki obdelavnosti
- pri določenem v/v razmerju boljše obdelovalnost
- omogočimo manjšo dozo cementa pri določeni trdnosti betona

Učinek na trajnost posameznih kemijskih dodatkov je sledeč (Preglednica 8) .

Preglednica 8: Sposobnost redukcije vode in učinek na trajnost betona (Černilogar, 2010)

Vrsta dodatka	Sposobnost redukcije vode	Učinek na trajnost betona v konstrukciji
P	5-10%	Znižanje v/v razmerja - gostejši cementni kamen - - manjša poroznost - manjši prodor vode z raztopljenimi plini in solmi.
SP	5-25%	Zmanjšana doza cementa - manjša možnost krčenja - - manjša možnost nastanka razpok.
HP	5-40%	Povečanje vgradljivosti ob nespremenjenem v/v razmerju - - boljše kompaktiranje - manjša poroznost.

3.5 VODA

Voda v betonu aktivno sodeluje v procesu hidratacije cementa, hkrati ima njen delež v mešanici odločilen vpliv na obdelavnost svežega betona in na njegove končne karakteristike. Masno razmerje vode in veziva (vodo-vezivno razmerje) je tesno povezano s prepustnostjo betona, kar posredno odločilno vpliva na obstojnost betona. Prevelik delež vode v svežem betonu lahko privede do segregacije agregatnih zrn, povečuje poroznost betona in zmanjšuje tlačno trdnost. Premalo vode pomeni težko vgradljiv beton, ki za kvalitetno vgradnjo potrebuje veliko dodatne energije.

Neprimerna voda lahko močno ogrozi tako trdnost kot trajnost betona, zato je potrebno nekaj pozornosti nameniti tudi kakovosti vode. To velja še toliko bolj v primeru, ko se uporablja površinske vode, ki lahko vsebujejo organske primesi. Kritični faktor pri armiranem betonu je lahko tudi vsebnost kloridov v vodi. Neprimerna voda lahko močno ogrozi trdnost in trajnost betona. V splošnem velja, da je pitna voda iz vodovodnega omrežja primerna za pripravo betona, v ostalih primerih je njeno kakovost potrebno dokazati v skladu s standardom SIST EN 1008:2003.

4 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA

Obdelavnost betona

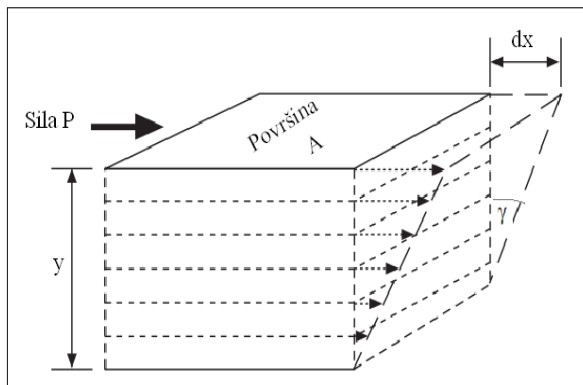
Svež beton je material, katerega lastnosti se ves čas spreminjajo. Bistveno pri tem je, da bo v svojem svežem stanju zagotovil zahtevam o obdelavnosti, transportu in vgrajevanju. Poleg tega mora kasneje v strjenem stanju zadostiti še zahtevam o trdnosti in trajnosti. Obdelavnost betona je lastnost, ki se jo težko številsko (kvantitativno) ovrednoti. Vsak tehnolog oziroma gradbeni delavec lahko pojem obdelavnosti betona dojema na svoj način. Pri tem uporabljajo najrazličnejše pridevnike za opis lastnosti svežega betona (koheziven, lepjiv, tekoč, gost, težek,...). V splošnem obdelavnost razumemo kot količino potrebnega dela, s katero se beton lahko kvalitetno vgradi. Na žalost številne meritve, s katerimi v praksi kvantitativno ocenjujemo konsistenco mešanic (posed, razlez, Vebe,...), o obdelavnosti betona ne dajo povsem realne slike. Tem testom je skupno to, da je njihov rezultat le ena vrednost, zato v tem primeru govorimo o eno-točkovnih testih.

Pomanjkljivost teh metod je pripeljala do potrebe po bolj znanstvenem opisovanju lastnosti svežega betona, še posebej odkar se povečuje uporaba kemijskih in mineralnih dodatkov v betonih. To se lahko doseže z uporabo principov iz reologije. Reologija je definirana kot znanost o tečenju in deformaciji snovi. V primeru svežega betona preučuje odnose med strižno napetostjo in hitrostjo strižne deformacije.

Osnovni princip reologije

Sila P nanesena na zgornjo ploskev delca s površino A povzroči strižno napetost $\tau = P/A$. Ta povzroči deformacijo delca dx v času dt (Slika 11). Deformacijo lahko izrazimo s kotom $\gamma = dx/y$, ki ga imenujemo strižna deformacija. Sprememba strižne deformacije s časom $\gamma' = d\gamma/dt$ je strižna hitrost. Ko strižno napetost povežemo s strižno hitrostjo, dobimo t.i. viskoznost η oziroma viskoznostno funkcijo $\eta(\gamma') = \tau/\gamma'$. Odnos med (τ) in (γ') imenujemo krivulja tečenja, ki lahko zavzame različne oblike. Najpreprostejša je linearna oblika odnosa,

ki poteka skozi izhodišče diagrama. Značilna je za Newtonske tekočine (voda, olje, bencin). Viskoznostna funkcija ima v tem primeru konstantno vrednost.



Slika 11: Strižni tok v tekočini ob delovanju strižne sile

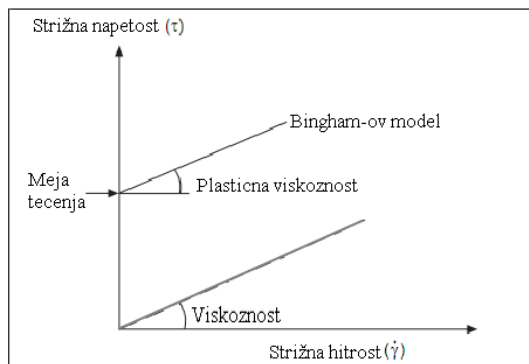
Proces tečenja

Druge oblike krivulj sekajo ordinato pri neki ne ničelni vrednosti strižne napetosti, ki jo imenujemo meja tečenja τ_0 in predstavlja odpornost materiala na tečenje (Slika 12). To pomeni, da dokler strižna napetost v tekočini ne doseže te mejne vrednosti, ta ne bo stekla. Naklon krivulje označuje plastično viskoznost, ki predstavlja odpornost na povečevanje hitrosti tečenja. Svež beton, ki smo ga obravnavali v okviru diplomske naloge je tipičen primer suspenzije, ki mu odgovarja reološki model, ki ga imenujemo Bingham-ov model tekočine. Zanj je značilna konstantna vrednost plastične viskoznosti μ in meja tečenja τ_0 . Zapišemo ga kot:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}'$$

kjer so:

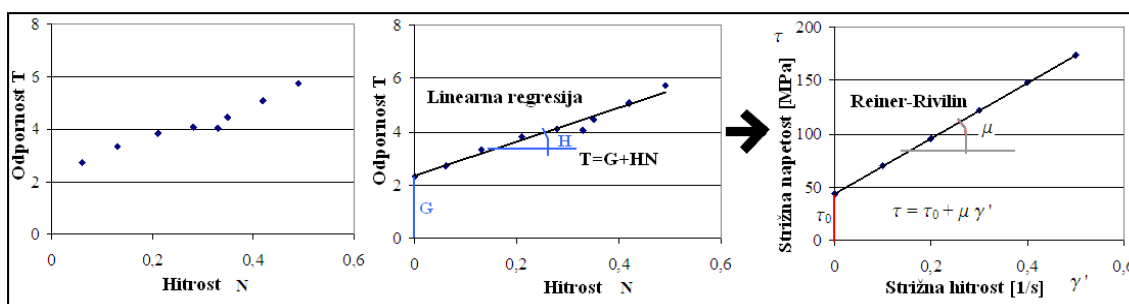
- τ strižna napetost
- τ_0 meja tečenja
- μ plastična viskoznost
- $\dot{\gamma}'$ strižna hitrost



Slika 12: Primer krivulj tečenja

Reometer

Obstajajo različni inštrumenti, s katerimi lahko izmerimo napetost na meji tečenja in plastično viskoznost materiala (suspenzije). V nadaljevanju opišemo princip delovanja reometra, ki smo ga uporabljali za preiskave betona v tej diplomski nalogi. Naprava se imenuje ConTec Viscometer 5 (Slika 14) in je sestavljena iz dveh koncentričnih cilindrov in elektromotorja, ki ga nadzira računalnik. Elektromotor vrti zunanji cilinder (posoda), v katerem se nahaja betonska mešanica. Notranji cilinder je dvodelen in rebričast, namenjen merjenju navora T med preiskavo (slika 15). Posoda z betonom se vrti pri različnih hitrostih N in s tem proizvaja navor na notranji cilinder. Programska oprema v računalniku izriše diagram navora v odvisnosti od hitrosti $T(N)$ in nato s pomočjo linearne regresije določi vrednost parametrov G in H . Silo (navor) potrebno za začetek mešanja (odpornost na tečenje) označuje parameter G , odpornost mešanice na povečevanje hitrosti mešanja (faktor viskoznosti) pa parameter H . Oba parametra sta s pomočjo t.i. Reiner-Rivlin-ove enačbe pretvorjena v napetost na meji tečenja (τ_0) in plastično viskoznost betona (μ). Slika 13 na primeru shematsko prikazuje postopek določanja bistvenih parametrov za ocenjevanje reoloških lastnosti betonske mešanice. Na sliki 14 je reometer, kakršnega smo uporabljali za preiskave. Rezultat preiskave sta torej dva parametra, ki opisujeta lastnost sveže betonske mešanice, zato preiskavo z reometrom označujemo kot dvo točkovni test (Wallevik, 2009).



Slika 13: Princip določanja napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti



Slika 14: ConTec Viscometer 5
(Feys, D., Verhoeven, R. 2008)



Slika 15: Sestavni deli koncentričnega sistema cilindrov
(ConTec, 2012)

5 MEHANSKE LASTNOSTI STRJENEGA BETONA

Ko govorimo o odpornosti betona, ločimo dva pojma.

TRAJNOST materiala je zmožnost upiranja predvidenim pogojem uporabe, brez znatnega poslabšanja v projektirani življenjski dobi.

OBSTOJNOST je karakteristika procesa ali stanja, ki se lahko vzdržuje na nekem nivoju. (De Belie, 2010)

Tlačna trdnost

Tlačna trdnost betona je obravnavana kot ena njegovih najpomembnejših lastnosti, vendar kot sama še zdaleč ni zagotovilo za trajen beton. Kljub temu je dober pokazatelj splošne kakovosti betona. Definirana je kot maksimalna izmerjena odpornost betona na enoosno centrično tlačno obremenitev pri starosti 28 dni. Na tlačno trdnost vpliva mnogo parametrov (vodo-cementni količnik, poroznost, vrsta veziva in agregata,...).

Odpornost betona proti prodoru vode

Odpornost betona proti prodoru vode je lastnost betona odvisna predvsem od njegove prepustnosti. Večja prepustnost pomeni hitrejši vdor tekočin ali plinov v porozno notranjost betona (Mehta in Monteiro, 2006). Odvisna je od mnogih parametrov in sicer od poroznosti, oblike in sistema por, vodo-cementnega razmerja, stopnje vibriranja med vgrajevanjem, granulometrijske sestave agregata, maksimalnega zrna agregata,... Od te lastnosti je neposredno odvisna trajnost betona, saj vdor agresivnih snovi v beton povzroča njegovo degradacijo. V kolikor je beton relativno neprepusten, bo napad agresivnega okolja omejen le na površino betona. Če ima beton nizko odpornost na prodor vode, se lahko zgodi da voda, ki jo vsrka v pore, pri nižjih zunanjih temperaturah zamrzne in povzroči visoke notranje napetosti, ki rezultirajo v degradaciji strukture v notranjosti betona.

Standard SIST 1026 narekuje, da je potrebno stopnjo odpornosti betona proti prodoru vode predpisati v projektu, kadar moramo zagotoviti ali visoko kakovost zaščitne plasti betona nad armaturo glede na predvideno stopnjo izpostavljenosti ali vodotesnost betonske konstrukcije.

Preiskava poteka v skladu z določili standarda SIST EN 12390-8. Razredi stopnje odpornosti proti prodoru vode so navedeni v standardu SIST 1026:2008 in se nanašajo na starost betona najmanj 28 dni in največ 35 dni (Preglednica 9).

Preglednica 9: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni

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

6 LASTNE PREISKAVE

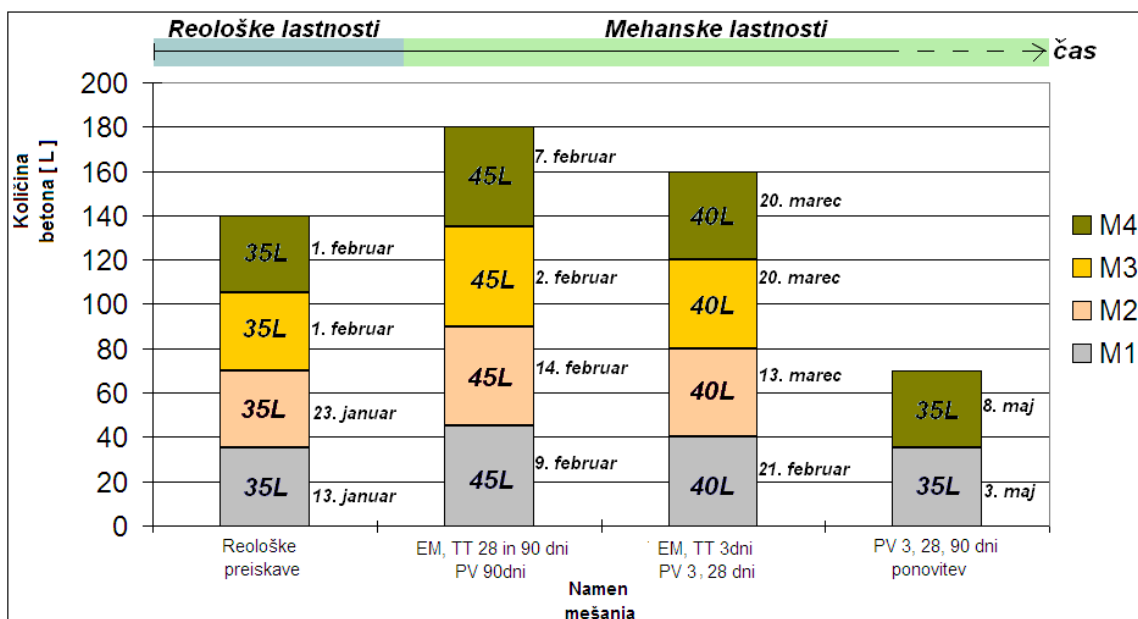
Preiskave so bile opravljene v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani v času od januarja do avgusta 2012. Prvi sklop preskusov je bil namenjen preverjanju reoloških lastnosti štirih različnih svežih betonskih mešanic. V drugem delu so se izvajale preiskave mehanskih lastnosti strjenega betona, natančneje tlačne trdnosti, statičnega modula elastičnosti in odpornosti proti prodoru vode. Recepture mešanic so bile vnaprej pripravljene in so se med seboj razlikovale v vrsti agregata in/ali vrsti veziva. Skupno vsem sestavam je bilo vodo-vezivno razmerje $v/v=0,45$. Namen opravljenih preskusov je bilo preiskati vpliv mineralnega dodatka in dveh različnih agregatov na reološke in mehanske karakteristike lahkogradljivega betona.

6.1 PRIPRAVA BETONA

Po tehtanju osnovnih sestavin za beton smo v laboratorijski mešalec za beton najprej stresli agregat in vezivo. Med seboj smo ju dobro premešali in tako dobili homogeno mešanico agregata in veziva. Sledilo je dodajanje polovice predpisane količine vode in mešanje z mešalcem eno minuto. V preostanek vode smo dodali predvideno količino kemijskega dodatka in ju enakomerno zlili v mešalec. Zmes smo mešali nadaljnji dve minuti in nato vizualno preverili konsistenco. Naknadno se je dodalo morebitno manjšo količino vode ali kemijskega dodatka, če smo ocenili, da je to potrebno za doseganje predpisane konsistenčne stopnje. V tem primeru smo mešanico še enkrat dobro premešali. Ko smo ocenili, da je konsistenca betona primerna, smo začeli s preiskavami. Vzorce svežega betona smo jemali iz šarže 35-ih litrov betona. Najprej smo izmerili posed in zatem razlez, da smo lahko primerjali rezultate obeh metod za določanje konsistenčne stopnje betona. Sledilo je preverjanje vsebnosti por s porozimetrom in določanje prostorninske mase sveže betonske mešanice. Omenjeni postopek smo ponovili še trikrat v dvajset minutnih intervalih. Na podlagi dobljenih rezultatov smo primerjali vpliv uporabljenih sestavin betona na časovni razvoj reoloških lastnosti, ki je še posebej pomemben pri betonih, ki niso mešani na gradbišču (npr. transportni beton). Vzporedno z izvedbo omenjenih preskusov smo z reometrom določali vrednost

napetosti na meji tečenja in viskoznost mešanic. Po končanih preskusih smo betonsko mešanico zavrgli kot gradbeni odpadek.

Sledila je priprava vzorcev in izvedba preiskav mehanskih lastnosti. Za vsako mešanico smo ločeno pripravili dve šarži betona (45 in 40 litrov). Na Grafikonu 2 je prikazana shema, ki natančno prikazuje potek mešanja betona. Postopek mešanja je bil v drugem delu enak kot v prvem. Po mešanju sta sledila omenjena preskusa za določanje konsistenčne stopnje, preskus vsebnosti por s porozimetrom in tehtanje. Tokrat le po končanem mešanju. Reometra tedaj nismo uporabili. Mešanico smo vgradili v jeklene kalupe (kocke in valji). Da bi bil beton kvalitetno in čim bolj enakomerno vgrajen, smo ga povibrirali z igličnim vibratorjem. Takoj po postopku vgrajevanja smo kalupe prekrili s plastično folijo, da smo zagotovili ustrezno nego. Dan kasneje se je beton toliko strdil, da smo vzorce lako razkalupili in označili. Potopili smo jih v bazen z vodo, kjer so ostali vse do preiskave. S tem smo izpolnili zahteve o negi vzorcev, torej zahtevi o konstantni temperaturi $T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativni vlagi $RH = 100 \%$. Skupno je bilo pripravljenega 550 litrov betona.



Grafikon 2: Shema poteka mešanja betona

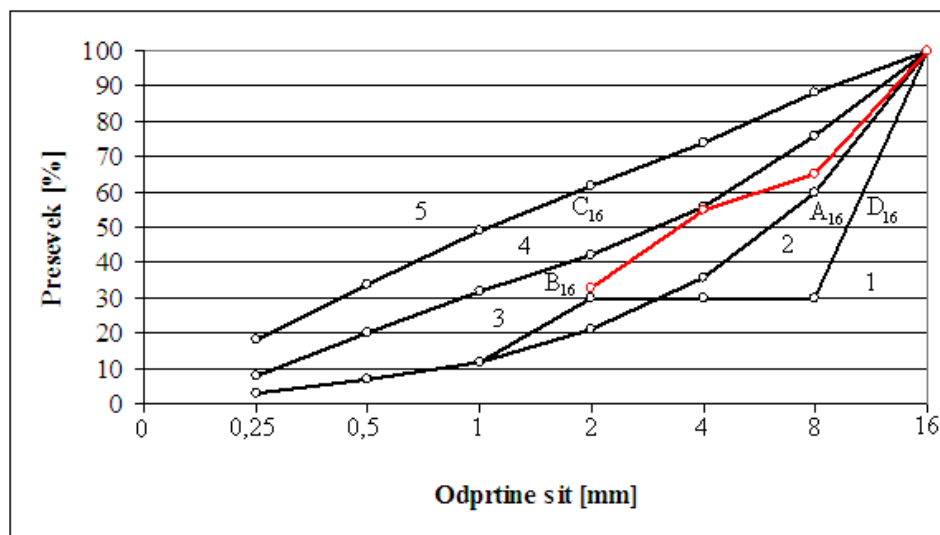
6.2 UPORABLJENI MATERIALI

6.2.1 Agregat

V preiskavah smo uporabili dve vrsti drobljenega agregata. V dveh mešanicah smo uporabili drobljen apnenčev agregat (v nadaljevanju agregat A). Agregat A je homogen apnenec, ki vsebuje 98 ut.% kalcita ter 2 ut.% dolomita. V drugih dveh mešanicah smo uporabili drobljeni dolomitni agregat (v nadaljevanju agregat B), katerega sestavlja 96 ut.% dolomita ter 4 ut.% kalcita. Oba agregata sta slovenskega izvora. Izbrana zrnavostna sestava je podana v preglednici 10, sejalna krivulja pa na Grafikonu 3. Agregata sta bila zelo suha. K intenzivnemu izsuševanju je pripomogla nizka relativna vlaga prostora, kjer je bil shranjen (laboratorij). Zato smo pri oceni dodatne potrebne količine vode upoštevali, da je agregat popolnoma suh in tako na podlagi podatkov o vodovpojnosti agregata (Preglednica 11) računsko ocenili količino potrebne dodatne vode.

Preglednica 10: Zrnavostna sestava uporabljenega agregata

Frakcija	Delež [%]
0/2	33
0/4	22
4/8	10
8/16	35



Grafikon 3: Sejalna krivulja uporabljenega agregata

Zrnavostna krivulja uporabljenih agregatov leži v območju 3.

Preglednica 11: Vodovpojnost uporabljenega agregata A in B

Frakcija	Vodovpojnost agregata [%]
0/2	0,9
0/4	0,8
4/8	0,6
8/16	0,4

6.2.2 Cement

Uporabili smo cement vrste CEM I/42,5R. To je Portland cement brez dodanih mineralnih dodatkov. Vsebuje od (90-100) % cementnega klinkerja (SIST EN 179-1), ki se mu med mletjem dodaja zgolj manjšo količino sadre (0-5) %, ki služi kot regulator vezanja cementa. Trdnostni razred uporabljenega cementa je 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo, ki jo označuje črka R (ang. "Rapid"). Ta vrsta cementa se uporablja za zahtevne gradnje, ki zahtevajo visoke začetne in končne trdnosti (Pajk, 2009).

Uporabljeni cement ima prostorninsko maso zrn $3,09 \text{ g/cm}^3$ in specifično površino $3760 \text{ cm}^2/\text{g}$. Njegova kemijska sestava je predstavljena v preglednici 12.

Preglednica 12: Kemijske lastnosti uporabljenega cementa

Lastnost	Vsebnost [%]
SiO ₂ čisti	19,33
Al ₂ O ₃	5,62
Fe ₂ O ₃	2,7
CaO	62,06
SO ₃	3,23
MgO	2,07
Na ₂ O	0,35
K ₂ O	0,75
Cl ⁻	0,009
netopni ostanek, %	0,75

6.2.3 Voda

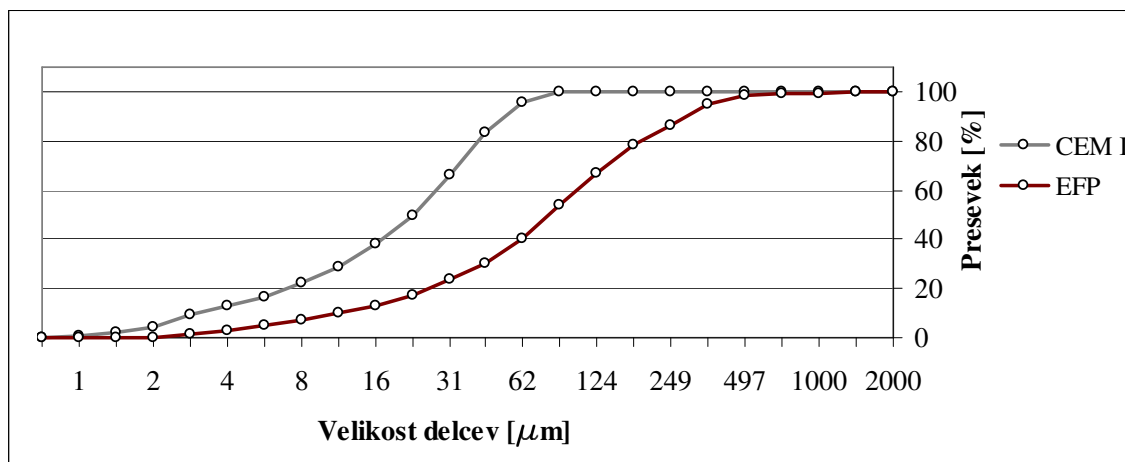
Betonske mešanice so bile pripravljene s pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

6.2.4 Kemijski dodatek – superplastifikator

Vsi betoni so bili pripravljene s kemijskim dodatkom, brez katerega bi težko izpolnili zahteve za trajen in lahko vgradljiv beton. V ta namen smo uporabili komercialni superplastifikator nove generacije ali hiperplastifikator (HP) na osnovi polikarboksilatov.

6.2.5 Mineralni dodatek – elektrofiltrski pepel

Dodani mineralni dodatek je EFP, ki je kot vezivo nadomestil 20 % cementa. Njegova zrnavostna sestava je vidna na grafikonu 4. Za primerjavo je na grafikonu tudi zrnavostna krivulja uporabljenega cementa. Izkazuje se, da razporeditev delcev EFP v primerjavi s cementom zajema širši granulacijski interval. Premer delcev pri 50 % presevek za cement znaša 22 μm , za EFP pa 75 μm .



Grafikon 4: Porazdelitev velikosti delcev EFP in cementa

Kemijska sestava EFP je vidna v preglednici 13.

Preglednica 13: Kemijska sestava uporabljenega EFP

Komponenta	Vsebnost [%]
SiO ₂	41,98
Al ₂ O ₃	18,51
Fe ₂ O ₃	9,67
CaO	15,20
MgO	2,62
K ₂ O	1,91
Na ₂ O	1,06
SO ₃	2,38
nezgoreli delci	4,19

6.3 PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC

Beton je bil projektiran na tlačno trdnost C40/45 in stopnjo izpostavljenosti XC4 (prisotnost korozije zaradi karbonatizacije v izmenično vlažnem okolju (izmenično mokro in suho)) in XD3 (prisotnost kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode). Iz stopnje izpostavljenosti XD3 izvira zahteva po največjem dovoljenem vodo-cementnem razmerju 0,45 in stopnji odpornosti proti prodoru vode PV III. Zahtevana je bila konsistenca razreda S4 (posed), in največje zrno agregata $D_{\max} = 16\text{mm}$.

Zapis:

C40/45 - XC4, XD3 (PV III) - S4 - $D_{\max} 16$

6.3.1 Zahteve za betonske mešanice v skladu s SIST EN 206-1

Standard podaja različne zahteve v odvisnosti od stopnje delovanja okolja, ki jih morajo betoni izpolnjevati. Iz tega naslova betone uvrščamo v eno izmed petih stopenj agresivnosti okolja. Na podlagi razredov so predpisane nekatere mehanske lastnosti, ki jih mora izpolnjevati beton (Preglednica 14).

Preglednica 14: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona v odvisnosti od stopnje agresivnosti okolja

Stopnja agresivnosti okolja	Stopnja izpostavljenosti po SIST EN 206-1	Posebne lastnosti betona za preverjanje izbranih parametrov sestave svežega betona	Priporočeni parametri sestav svežega betona	
			$(v/c)_{max}$	Najmanjša vsebnost cementa [kg/m ³]
I nizka	X0	XC, XD, XS, XA	0,75	260
	XC1		0,65	
II zmerna	XC2, XC3	PV-I	0,55	300
	XC2 + XF 1	PV-I	0,55	300
III normalna	XD1, XS1, XA1, XM1	PV-I	0,55	320
	XD1 + XF2	PV-I	0,6 ae* /0,55	300/320
IV močna	XC4, XD2, XS2,	PV-II	0,5	340
	XA2, XM2		0,55 ae	320
	XC4 + XF3	PV-II	0,5	340
V zelo močna	XD3, XS3, XA3, XM3	PV-III	0,45	360
	(XD2, XD3) + XF4	PV-II	0,5 ae	360

6.3.2 Sestave betonskih mešanic

Sestave betonskih mešanic so bile izbrane na podlagi preverjenih receptur za betone, ki morajo izpolnjevati podobne zahteve kot beton v teh preiskavah. V nadaljevanju so razpredelnice z natančnimi recepturami za vse betone, ki smo jih uporabili. Začetno predvideno recepturo (Preglednica 15) smo nekoliko spremenili, ker je bilo v vseh primerih potrebno dodati nekaj vode zaradi izredno suhega agregata. Vsi betoni so bili pripravljani s kemijskim dodatkom.

Mešanice smo poimenovali s kraticami M1 do M4 (Mešanica 1 do Mešanica 4). V nadaljevanju se uporabljajo skrajšana imena. Prvi dve mešanici (M1 in M2) sta vsebovali drobljeni agregat A. Drugi dve mešanici (M3 in M4) sta vsebovali agregat B. V dveh mešanicah smo 20 % veziva (Portland cement) nadomestili z mineralnim dodatkom, elektrofiltrskim pepelom. To sta bili mešanici s sodo cifro (M2 in M4). Vse mešanice so bile projektirane na enako vodo-vezivno razmerje 0,45 ($m_{\text{vode}}/m_{\text{veziva}} = 0,45$). V nadaljevanju uporabljamo izraz vodo-vezivno namesto vodo-cementno razmerje. Kjer je v mešanici dodan mineralni dodatek je ta izraz upravičen, saj mineralni dodatek zamenja Portland cement in sodeluje kot vezivo v procesu hidratacije. Kjer mineralnega dodatka ni, bi bilo praviloma potrebno uporabiti izraz vodo-cementno razmerje, vendar zaradi enotnega izražanja tudi v tem primeru uporabljamo izraz vodo-vezivno razmerje.

- M1 = agregat A + vezivo (100 % CEM I) + HP
- M2 = agregat A + vezivo (80 % CEM I + 20 % MINERALNI DODATEK) + HP
- M3 = agregat B + vezivo (100 % CEM I) + HP
- M4 = agregat B + vezivo (80 % CEM I + 20 % MINERALNI DODATEK) +HP

Preglednica 15: Projektirana sestava betonskih mešanic

	agregat A		agregat B	
	M1	M2	M3	M4
agregat [kg/m ³]	1878	1822	1878	1822
cement [kg/m ³]	380	304	380	304
EF pepel [kg/m ³]	0	76	0	76
superplastifikator [kg/m ³]	2,01	2,66	2,01	2,66
voda [kg/m ³]	169	169	169	169
v/v	0,45	0,45	0,45	0,45

Mešanicama, ki sta vsebovali EFP je bila dodana nekoliko večja količina kemijskega dodatka za doseg enake konsistenčne stopnje.

Preglednica 16: Sestava betonskih mešanic za reološke preiskave

	agregat A		agregat B	
	M1	M2	M3	M4
agregat [kg/m^3]	1878	1822	1878	1822
cement [kg/m^3]	380	304	380	304
EF pepel [kg/m^3]	0	76	0	76
superplastifikator [kg/m^3]	2,010	2,660	2,010	2,660
dod. SP [kg/m^3]	0,571	0,571	0,571	0,571
skupaj SP [kg/m^3]	2,571	3,229	2,571	3,229
voda [kg/m^3]	169	169	169	169
dod. voda [kg/m^3]	14,29	14,29	14,29	14,29
skupaj voda [kg/m^3]	183,29	183,29	183,29	183,29
v/v	0,48	0,48	0,48	0,48
v/v _{eff}	0,45	0,45	0,45	0,45

V vseh mešanicah smo količino vode povečali za toliko, kolikor jo vsrka popolnoma suh agregat, ki smo ga uporabili. To količino vode smo določili na podlagi podatkov o vodovpojnosti agregata. Pri mešanici M4 smo nekoliko predozirali količino hiperplastifikatorja, zato je imel ta beton nekoliko višjo konsistenco (razred S5) od predvidene. Naslednje recepture so bile namenjene pripravi betona za pripravo vzorcev, s katerimi smo preskušali mehanske lastnosti strjenega betona.

Preglednica 17: Sestave betonskih mešanic za preiskavo mehanskih lastnosti (45L)

	agregat A		agregat B	
	M1	M2	M3	M4
agregat [kg/m ³]	1878	1822	1878	1822
cement [kg/m ³]	380	304	380	304
EF pepel [kg/m ³]	0	76	0	76
superplastifikator [kg/m ³]	2,010	2,660	2,010	2,660
dod. SP [kg/m ³]	0,644	0,133	0,644	0,200
skupaj SP [kg/m ³]	2,644	2,800	2,644	2,867
voda [kg/m ³]	169	169	169	169
dod. voda [kg/m ³]	12,67	11,33	11,33	11,33
skupaj voda [kg/m ³]	181,67	180,33	180,33	180,33
v/v	0,48	0,47	0,47	0,47
v/v _{eff}	0,45	0,45	0,45	0,45
dosežen posed [mm]	170	210	170	230
dosežen razlez [mm]	420	475	365	527
vsebnost por [mm]	2,8	2,8	2,7	2,3

Preglednica 18: Sestava betonske mešanice za mehanske preiskave (40L)

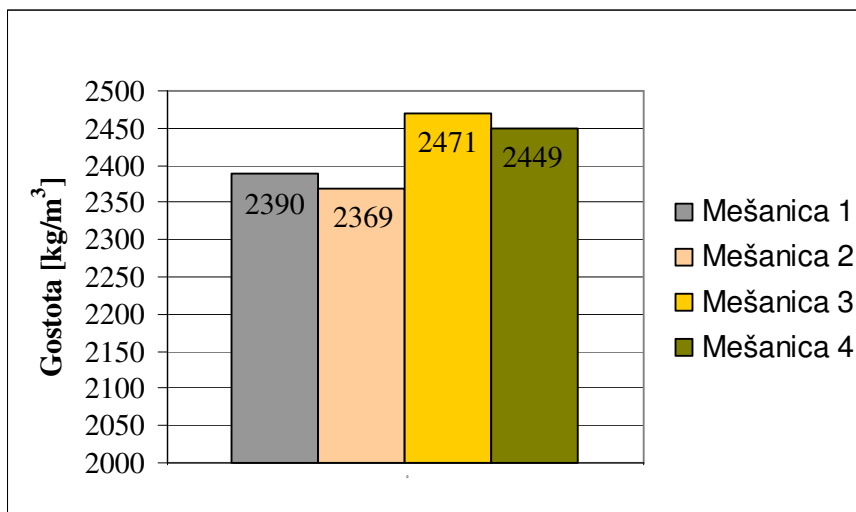
	agregat A		agregat B	
	M1	M2	M3	M4
agregat [kg/m ³]	1878	1822	1878	1822
cement [kg/m ³]	380	304	380	304
EF pepel [kg/m ³]	0	76	0	76
superplastifikator [kg/m ³]	2,010	2,660	2,010	2,660
dod. SP [kg/m ³]	0,644	0,390	0,644	0,390
skupaj SP [kg/m ³]	2,644	3,040	2,644	3,040
voda [kg/m ³]	169	169	169	169
dod. voda [kg/m ³]	12,75	13,50	9,00	12,50
skupaj voda [kg/m ³]	181,75	182,50	178,00*	181,50
v/v	0,48	0,48	0,47	0,48
v/v _{eff}	0,45	0,45	0,45	0,45
dosežen posed [mm]	165	200	210	210
dosežen razlez [mm]	390	465	500	480
vsebnost por [mm]	3,7	2,3	2	2,2

*zelo vlažen agregat 0/4

Po vsakem končanem mešanju smo določili gostoto svežega betona. Rezultati v preglednici 19 so povprečne vrednosti, ki smo jih dobili na podlagi meritev iz večih šarž posamezne mešanice. Bruto maso posode in betona smo izmerili z laboratorijsko tehtnico z nosilnostjo 50 kg in natančnostjo $\pm 0,02$ kg, s katero smo tehtali vse ostale sestavine betona, z izjemo kemijskega dodatka. Od bruto mase smo odšteli maso posode. Uporabili smo posodo s prostornino 8 litrov ($V_p = 0,008 \text{ m}^3$). Gostoto mešanice $\rho_{b,sv}$ smo določili po enačbi $\rho_{b,sv} = (m_{p+b} - m_p) / V_p$, kjer je m_{p+b} bruto masa posode in betona, m_p masa posode in V_p prostornina posode.

Preglednica 19: Povprečna gostota mešanic

Betonska mešanica	Gostota[kg/m ³]
M1	2390
M2	2369
M3	2471
M4	2449



Grafikon 5: Povprečna gostota svežih mešanic

Iz grafikona 5 je lepo razvidno, da sta mešanici, ki vsebujeta agregat A (M1 in M2) za okoli 3 % lažji od mešanic z agregatom B. Enako velja, da sta mešanici, ki vsebujeta EFP nekoliko lažji, vendar so razlike minimalne. EFP je lažji od cementa, ki ga nadomešča.

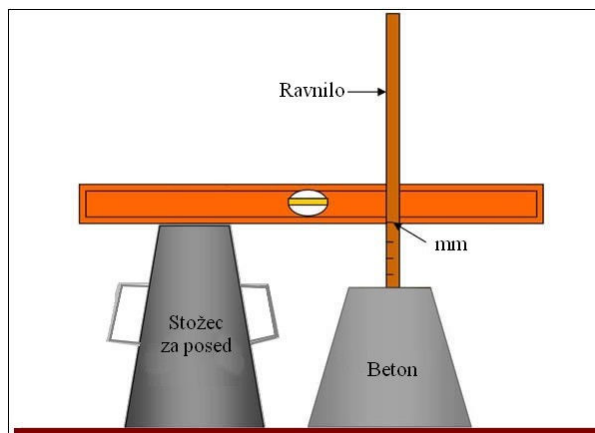
6.4 REZULTATI PREISKAV NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH

6.4.1 Metoda poseda

Posed betonskih mešanice (Slika 16) smo merili v skladu s standardom SIST EN 12350-2. Za vsako mešanico smo opravili štiri meritve, ki so si sledile na vsakih 20 minut, kot je to razvidno iz preglednice 21. Prva meritev je bila izvedena ob končanem mešanju. Posed mešanice je za boljše predstavo prikazan grafično na grafikonu 6.

Preglednica 20: Stopnje poseda po SIST EN 206-1

Stopnja	Posed v mm
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	več kot 220

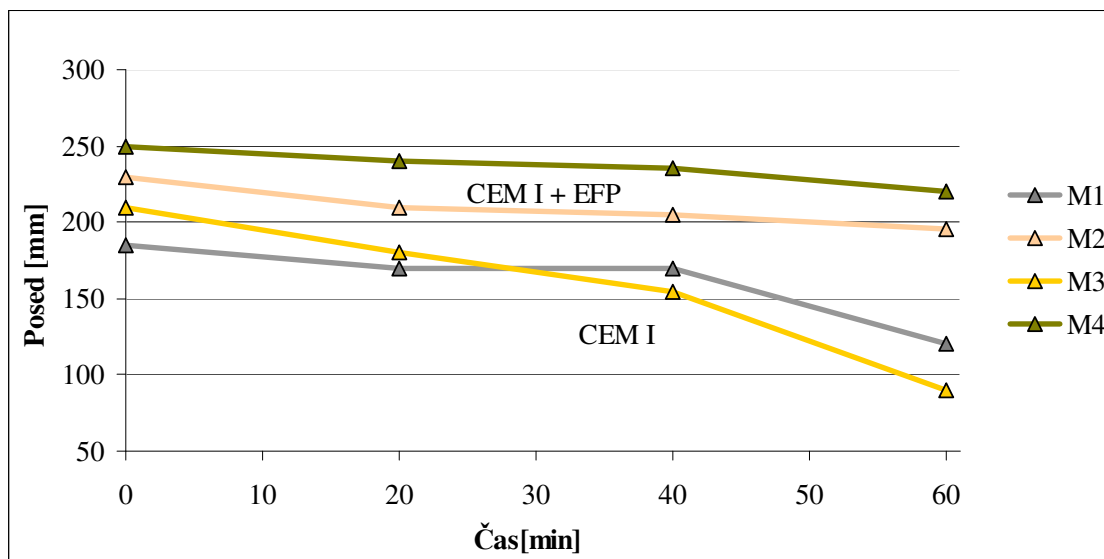


Slika 16: Meritev poseda mešanice
(Renovation-Headquarters, 2012)

Preglednica 21: Posed betonskih mešanic [mm] v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min)

Betonska mešanica	t = 0 min	t = 20 min	t = 40 min	t = 60 min
M1	185	170	170	120
M2	230	210	205	195
M3	210	180	155	90
M4	250	240	235	220

Beton je bil projektiran na konsistenšno stopnjo S4 (izraženo s posedom). Posed, ki pripada temu razredu je med 160 in 210 mm (Preglednica 20). Rezultati kažejo, da smo s predpisano recepturo predstavljeno v preglednici 16, dosegli zahtevane vrednosti. Vsi betoni so ostali v omenjenem konsistenčnem razredu tudi po 20 minutah in z izjemo mešanice M3, celo po 40 minutah. Mešanici M2 in M4 sta padli celo v konsistenčni razred S5 (posed večji od 220 mm). Mešanica M4 je v njem ostala celo po 60 minutah. Domneven razlog za to "napako" je bila prevelika odmerjena količina doziranega hiperplastifikatorja. S stališča vgradljivosti je tak beton najbolj ugoden, vendar se je potrebno zavedati nevarnosti segregacije. V naslednjih šaržah te mešanice smo nekoliko zreducirali količino hiperplastifikatorja. Natančna količina je razvidna v preglednicah 17 in 18.

**Grafikon 6:** Posed mešanic v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min)

Mešanici, ki sta vsebovali mineralni dodatek (EFP), sta ves čas dosegali večji posed kot mešanici brez mineralnega dodatka, vendar sta vsebovali nekoliko večjo količino superplastifikatorja. Iz grafikona 6 je lepo razvidno, da je posed teh mešanic tudi po eni uri še vedno znotraj razreda S4. Nekoliko drugače je pri mešanicah brez mineralnega dodatka. Opazi se, da tak beton začne pospešeno vezati že po 40 minutah, po 60 minutah je že zelo neprimeren za kvalitetno vgrajevanje. Iz teh ugotovitev lahko sklepamo, da mineralni dodatek pripomore k večji obdelavnosti betona, hkrati tak beton veže nekoliko počasneje, saj vsebuje manj Portland cementa, ki začne vezati hitreje. Vpliv agregata pri stopnji poseda je nemogoče oceniti, čeprav se kaže, da bi lahko nekoliko večji posed dosegli mešanici z agregatom B, kar morda lahko pripišemo večji specifični teži dolomitnega agregata.

6.4.2 Metoda razleza

Razlez betonskih mešanic smo merili v skladu s standardom SIST EN 12350-5 (Slika 17). V preglednici 23 so prikazani rezultati meritev. Grafikon 7 prikazuje razlez v odvisnosti od časa. Prvo meritev smo enako kot pri posedu opravili takoj po končanem mešanju, zatem so na 20 minut sledile še tri meritve. Ciljna konsistenčna stopnja je bila F4 (izraženo z razlezom), kar pomeni razlez znotraj intervala vrednosti od 490 do 550 mm. V tem primeru, sta zahtevani razred dosegli samo mešanici, ki sta vsebovali mineralni dodatek, drugi dve sta izpolnili zgolj pogoj za konsistenčni razred F3 (posed od 420 do 480 mm). Konsistenčne stopnje razleza v skladu s standardom so prikazane v preglednici 22.

Preglednica 22: Stopnje razleza po SIST EN 206-1

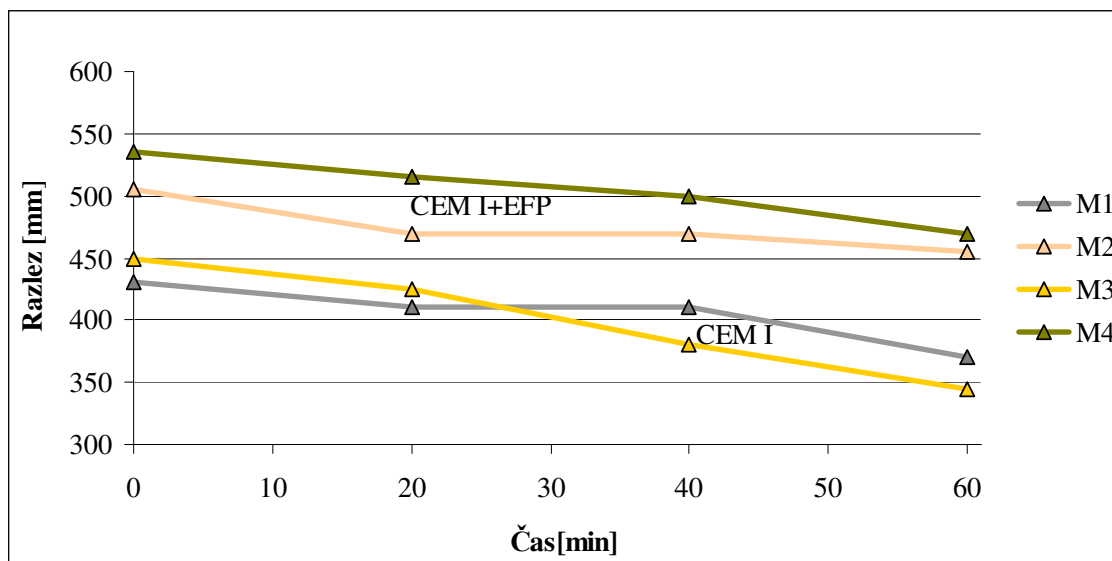
Stopnja	Premer v mm
F1	manj kot 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	več kot 630



Slika 17: Merjenje razleza svežega betona
(WhatWow, 2010)

Preglednica 23: Razlez betonskih mešanic [mm] v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min)

Betonska mešanica	t = 0 min	t = 20 min	t = 40 min	t = 60 min
M1	430	410	410	370
M2	505	470	470	455
M3	450	425	380	345
M4	535	570	500	470



Grafikon 7: Razlez mešanic v odvisnosti od časa (t = 0 do 60 min)

Če metodo poseda primerjamo z metodo razleza vidimo, da se isti beton po obeh metodah ne uvršča v isti konsistenčni razred. Kriterij za določanja konsistence z razlezom je iz tega stališča nekoliko bolj strog. Ko primerjamo grafikona 6 in 7, lahko ugotovimo, da iz rezultatov obeh metod lahko naredimo podoben zaključek med primerjavami lastnosti mešanic. Tudi pri metodi razleza je vidno, da sta mešanici, ki vsebujeta mineralni dodatek bolj (več HP) in dlje časa obdelovalni.

6.4.3 Preskušanje vsebnosti por

Postopek preiskave vsebnosti por s porozimetrom (Slika 18) določa SIST EN 12350-7. Posodo s prostornino 8 litrov smo v dveh plasteh napolnili s svežo betonsko mešanico in vsako plast zgostili z igličnim vibratorjem. Vibrirali smo toliko časa, da na površini betona ni bilo večjih mehurčkov. Na očiščen vrhnji rob posode smo pritrdili tog pokrov z manometrom



in preverili vsebnost por.

Vsebnost por smo merili takoj po končanem mešanju in po eni uri po mešanju. Rezultati v preglednici 24 se nanašajo na betone z recepturo iz preglednice 16, ki so bili namenjeni zgolj preiskavam reoloških lastnosti svežega betona. Vsebnost por smo izmerili tudi mešanici, ki so bile namenjene pripravi vzorcev za preskušanje mehanskih lastnosti. Vrednosti so podane v preglednicah 17 in 18.

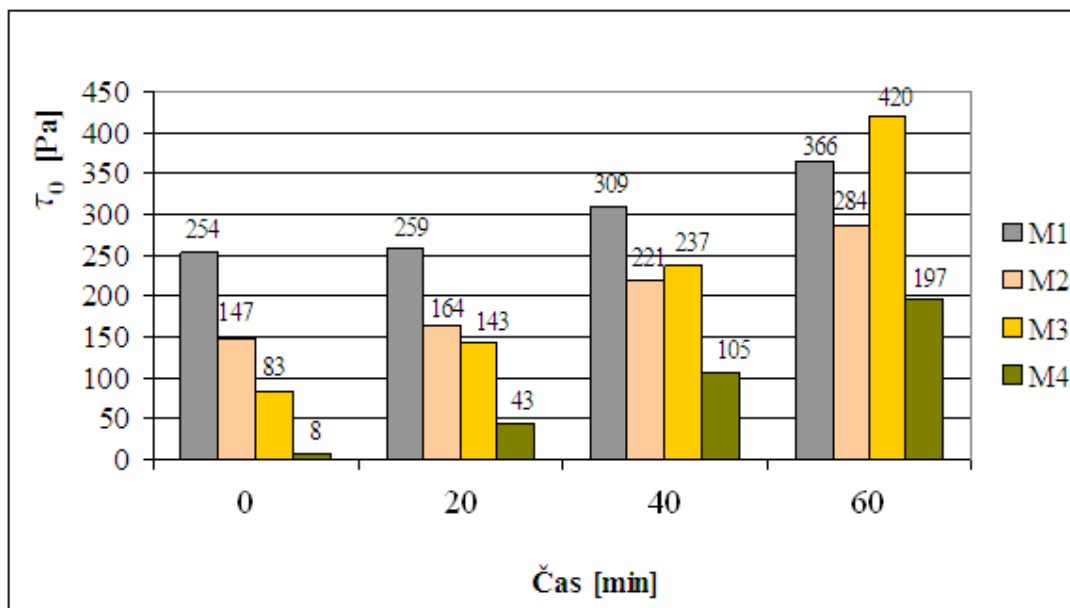
Slika 18: Porozimeter
(Građevinski fakultet, 2012)

Vsebnost por v svežem betonu se je gibala od 2,1 do 4,5 %. Slednja vrednost je bila kar nekoliko nad pričakovanji. Razlog za to je bila morda nekoliko slaba zgoščenost (premalo vibriranja), saj se tako visoka vrednost ni nikoli več ponovila (naslednje šarže mešanice M1). Iz rezultatov v preglednici 24 lahko sklepamo, da ima beton, ki vsebuje mineralni dodatek (EFP) nižji delež por v primerjavi z betonom, ki dodatka ne vsebuje. To pomeni, da je vpliv EFP v tem primeru ugoden, saj bo tak beton dosegel višjo trdnost in pridobil na trajnosti, ker je predvidoma manj prepusten za vodo in pline, ki lahko vsebujejo agresivne snovi.

Preglednica 24: Delež por [%] sveže mešanice pri času 0 in 60 min

Betonska mešanica	t = 0 min	t = 60 min
M1	4,5	4,3
M2	2,1	2,1
M3	3,6	3,4
M4	2,2	2,7

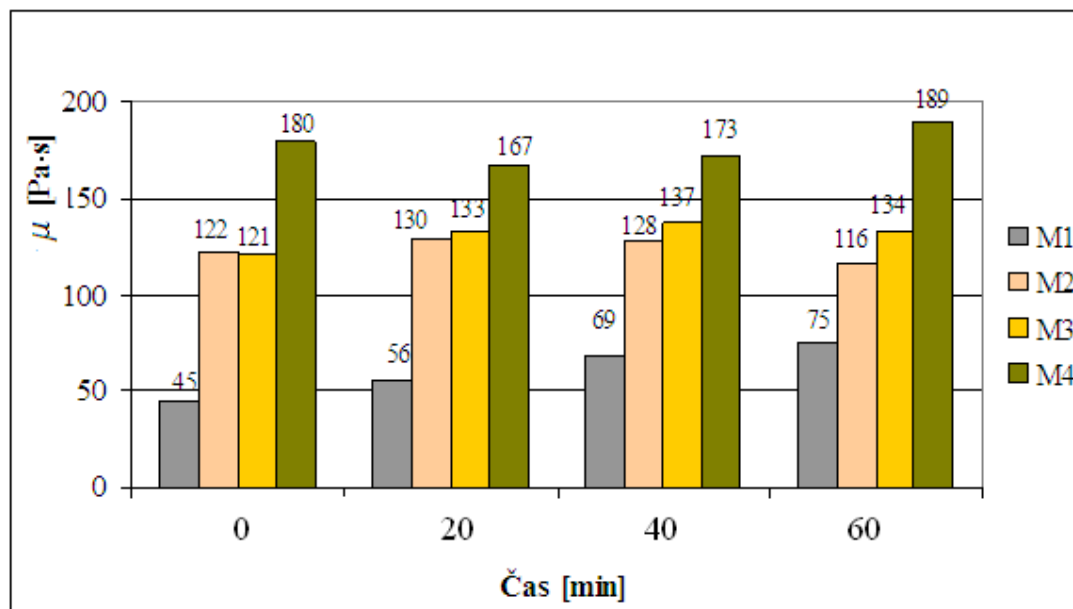
6.4.4 Metoda reometra – reološke lastnosti sveže mešanice



Grafikon 8: Rezultati – napetosti na meji tečenja τ_0

Večjo napetost na meji tečenja sta dosegla betona z agregatom A. Mineralni dodatek omenjeno količino močno zmanjša. Najnižjo vrednost τ_0 je dosegel beton M4, ki je vseboval agregat B in mineralni dodatek. Poleg tega smo pri mešanju nekoliko predozirali količino HP, zato je imel beton zelo visoko konsistenco. Tak beton je za vgrajevanje najbolj primeren, vendar je potrebno biti pozoren na možnost pojava segregacije, ki ga z reometrom lahko preverimo.

Napetost na meji tečenja τ_0 se s časom povečuje. To pomeni, da beton s časom potrebuje vse večjo silo, da steče. Enak pojav se kaže pri metodi poseda, kjer se posed s časom manjša. Povezave med vrednostjo poseda in napetostjo na meji tečenja v našem primeru ni mogoče dobiti. Lahko le sklepamo, da je posed neposredno odvisen od napetosti na meji tečenja.



Grafikon 9: Rezultati – plastična viskoznost μ

Plastična viskoznost se v nasprotju z napetostjo na meji tečenja ne povečuje s časom. Vrednost s časom nekoliko niha. Za najbolj viskozno mešanico se je izkazala M4, ki je imela najmanjšo napetost na meji tečenja. Mineralni dodatek povečuje viskoznost, po drugi strani pa, kot smo videli, zmanjša napetost na meji tečenja. Kombinacija takih vrednosti nam ponuja zelo dobro obdelovalen beton, vendar se moramo zavedati nevarnosti segregacije agregatnih zrn in jo preveriti.

Iz grafikonov 8 in 9 ugotovimo, da sta obravnavani lastnosti mešanic obratno sorazmerni. Mešanice z nižjo napetostjo na meji tečenja imajo večjo viskoznost in obratno. Mešanica M4 se po svojih karakteristikah približuje samozgoščevalnim betonom.

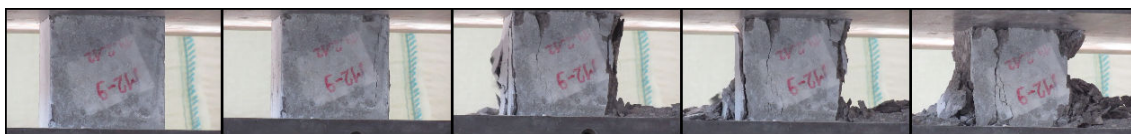
6.5 PREISKAVE NA STRJENEM BETONU

6.5.1 Tlačna trdnost

Tlačno trdnost (TT) strjenega betona f_c smo določali po 3-eh, 28-ih in 90-ih dneh na betonskih kockah z robom 150 mm v skladu z navodili standarda SIST EN 12390 – 3 (2009). Rezultat preiskave je povprečje tlačnih trdnosti treh vzorcev, ki smo jih izračunali po izrazu, ki ga podaja standard, torej $f_c = F/A_c$. Centrično tlačno silo smo nanašali preko hidravlične tlačne preše s kapaciteto 5000 kN (Slika 19). Vrednost nanešene sile smo zajemali s pomočjo računalniške opreme. Raztros rezultatov je bil pri vseh meritvah zelo majhen, kar pomeni, da je bil beton v kalupe kvalitetno vgrajen, mešanica pa homogena. Izjema je bila le ena meritev, katere rezultat se je v primerjavi z ostalima dvema razlikoval za kar 40 %. Razlog za takšno odstopanje je bila napaka pri nameščanju vzorca v stiskalnico, kar je povzročilo ekscentrično tlačno obremenitev na vzorcu. To meritev smo izključili, saj je bila porušitev vzorca nepravilna. Na sliki 20 je prikazan potek porušitve vzorca, ko nanj nanašamo silo s predpisano hitrostjo $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Pri tlačnem preskusu mora biti porušitev vzorca v skladu s standardom, ki grafično prikazuje zadovoljive načine porušitve. V primeru ko porušitev ni ustrezna, je to potrebno navesti v poročilu o preiskavi. V našem primeru so bile vse prušitve, razen že omenjene, v skladu z zahtevanimi. Primer porušitve vzorca je prikazan na sliki 19.



Slika 19: Tlačna preša (levo) in tlačna porušitev vzorca (desno)

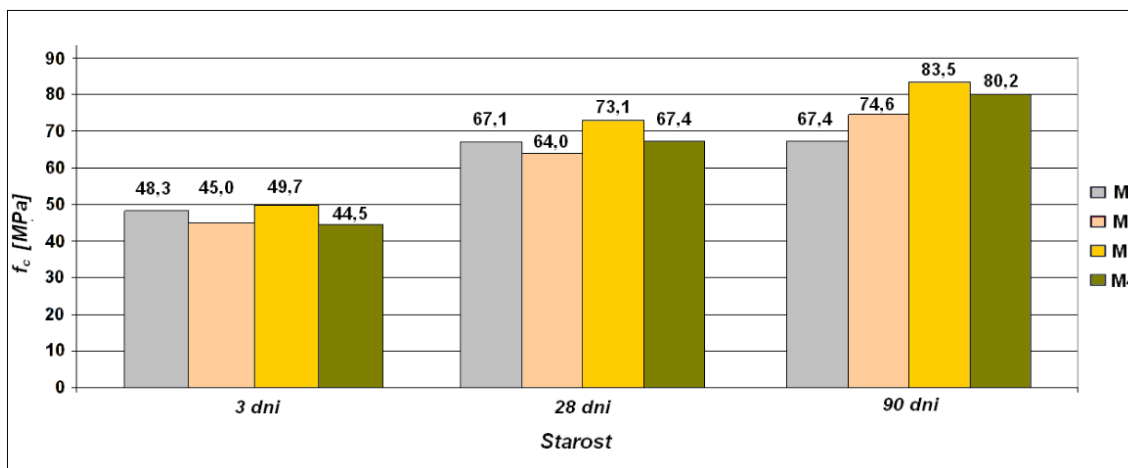


Slika 20: Proces porušitve vzorca pri tlačni preiskavi

V preglednici 25 se nahajajo povprečne vrednosti TT betonov, ki smo jih določili v okviru diplomske naloge. Za lažjo primerjavo vplivov agregata in mineralnega dodatka, so na grafikonu 10 rezultati prikazani grafično.

Preglednica 25: Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti mešanic po 3, 28 in 90 dni

Betonska mešanica	3 dni [MPa]	28 dni [MPa]	90 dni [MPa]
M1	48,3	67,1	67,4
M2	45,0	64,0	74,6
M3	49,7	73,1	83,5
M4	44,5	67,4	80,2



Grafikon 10: Povprečnih vrednosti tlačnih trdnosti

Primerjava betonov brez mineralnega dodatka in z različnim agregatom (M1:M3)

Najvišjo TT je pri vseh starostih dosegel beton s sestavo M3. Po treh dneh je ta znašala 49,7 MPa kar je 68 % njegove 28-dnevne TT (73,1 MPa). V nadaljevanju je beton še vedno intenzivno pridobival na TT, ki je po 90-ih dneh znašala 83,5 MPa. V 62-ih dneh je torej v primerjavi z 28-dnevno pridobil še 14 % tlačne trdnosti. To je tudi največja povprečna vrednost TT, ki smo jo med preiskavami izmerili. Tu bi bilo smiselno preverjati TT betona po 180 dneh, da bi videli, če se proces strjevanja med tem časom konča. Pojav je zanimiv, ker beton M1 po 28 dneh doseže že 99,6 % trdnosti, ki jo ima po 90 dneh (67,1 oz. 67,4 MPa). To pomeni, da se je v tem primeru proces strjevanja betona končal že po 28 dneh ali celo prej. To je nekako bolj razumljivo, saj mešanica M1 vsebuje hidravlično vezivo, ki večino svoje trdnosti razvije v prvih 28 dneh. Vzrok za razvoj poznejše tlačne trdnosti pri betonu M3 je s preiskavami, ki so bile vključene v to nalogo, težko ugotoviti. Lahko rečemo zgolj, da je za to kriv agregat B, saj je to edina razlika v sestavi betona M1 in M3. Vzrok lahko tiči v boljši oprijemljivosti agregat s cementnim gelom. Druga možnost je lahko reakcija mineralov agregata B z ostalimi produkti. Ta pojav v betonu ni zaželen, kljub temu da lahko TT betona naraste. Zaradi reakcije agregata in cementa lahko po daljšem časovnem obdobju pride do degradacije betona in uničenja njegove strukture.

Primerjava betonov z mineralnim dodatkom in različnim agregatom (M2:M4)

Medsebojna primerjava betonov, ki vsebujeta mineralni dodatek (EFP) nam pokaže, da ima večjo TT beton z agregatom B. Razlika je očitnejša pri višji starosti betona. Po treh dneh mešanici dosežeta praktično enaki TT, po 28 dneh ima beton M4 5 %, po 90 dneh pa 7 % višjo trdnost kot beton M2 (agregat A). Na podlagi primerjave TT lahko zaključimo, da agregat B nekoliko bolj prispeva k TT betona (enako sledi iz primerjave M1:M3).

Primerjava betonov z in brez mineralnega dodatka (M1:M2 in M3:M4)

Naslednje vprašanje je, kako na TT vpliva prisotnost mineralnega dodatka v betonu. Primerjava rezultatov kaže, da betoni ki vsebujejo EFP v povprečju dosežajo nekoliko nižjo TT, še posebej to velja za zgodnje TT. Po 3 dneh razlika povprečno znaša 8,5 %, po 28 dneh

pa že nekoliko manj, 6,5 %. Po 90 dneh je razlika med M3 in M4 še manjša in znaša le še 4 %. Nekoliko drugače je po 90 dneh z betonoma, ki vsebujeta agregat A. V tem primeru je višjo 90-dnevno TT dosegel beton z EFP. Razlog je v pucolanski reakciji EFP s produkti hidratacije cementa. Ta reakcija se prične, ko je bazičnost raztopine nad pH 13,2. Z višanjem pH, se tudi reaktivnost EFP povečuje. Portland cement doseže na začetku hidratacije vrednost pH okrog 12, zato je hitrost začetne pucolanske reakcije zelo nizka in se s časom povečuje. To se izraža na prirastu poznejših tlačnih trdnosti.

V nadaljevanju za obravnavan beton preverimo razvoj tlačne trdnosti s pomočjo računskega modela – formule (en. 1), ki jo podaja standard SIST EN 1992-1-1 (2005). Formula se glasi:

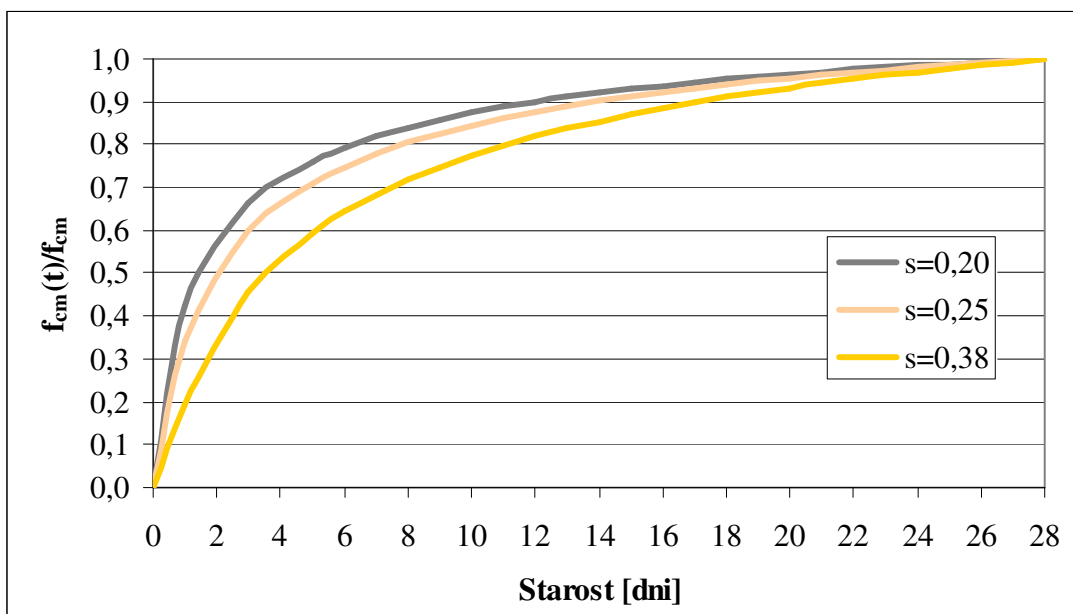
$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} ; \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right\} \quad (1)$$

kjer je $f_{cm}(t)$ povprečna tlačna trdnost betona pri času t , f_{cm} povprečna tlačna trdnost po 28 dneh in $\beta_{cc}(t)$ koeficient časovnega razvoja tlačne trdnosti betona. Koeficient s je odvisen od vrste veziva. Standard predlaga sledeče vrednosti koeficienta:

- $s = 0,2$... hitrovezoči cementi visoke trdnosti
(CEM 42,5R; CEM 52,5N in CEM 52,5R)
- $s = 0,25$... za običajne in hitro vezoče cemente
(CEM 42,5N in CEM 32,5R)
- $s = 0,38$... za počasivezoče cemente
(CEM 32,5N)

V preglednici 26 je na osnovi doseženih 28-dnevnih TT mešanic ocenjena 3-dnevna TT. Pri tem je uporabljen računski model iz omenjenega standarda. Upoštevana vrednost koeficienta s je 0,20. Izkaže se, da model dobro oceni razvoj tlačne trdnosti, še posebej pri mešanici z agregatom B. V preglednici 27 je postopek ponovljen, le da smo vrednost koeficienta določili

sami na način, da je model najbolje opisal razvoj tlačne trdnosti v prvih 28 dneh. V tem primeru so vrednosti koeficienta nekoliko nižje od predlaganih. Na podlagi vrednosti koeficienta iz preglednice 27 lahko vidimo, da beton z EFP v prvih 28 dnevih veže počasneje. Nižja vrednost koeficienta s namreč pomeni intenzivnejši razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti (Grafikon 11)



Grafikon 11: Razvoj tlačne trdnosti do 28. dne v odvisnosti od koeficienta s

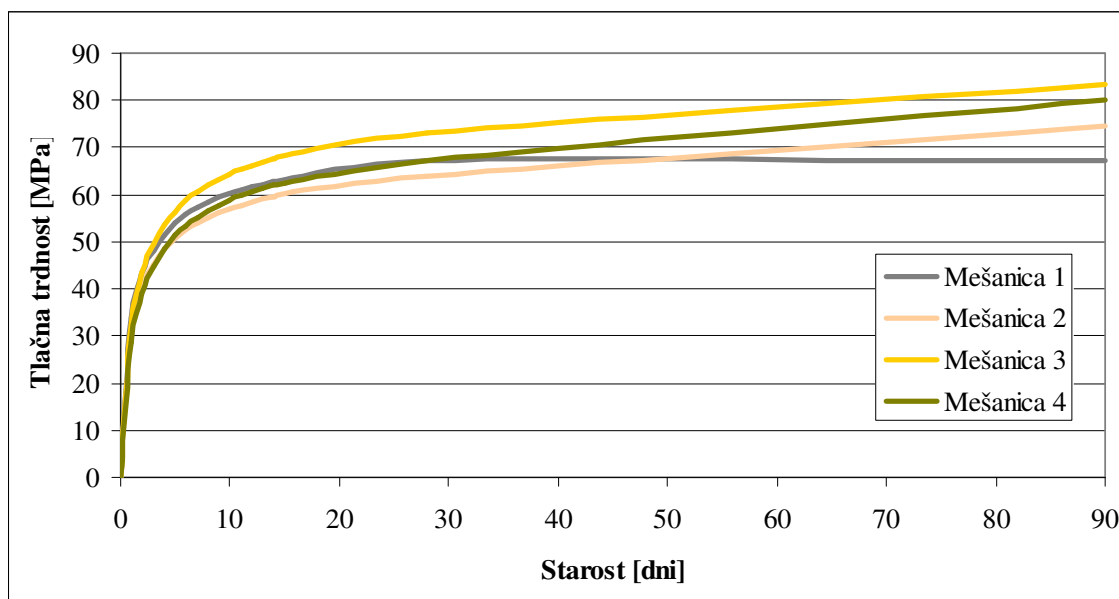
Preglednica 26: Razvoj tlačne trdnosti po EC 2: predlagana vrednost koeficienta $s = 0,20$

Sestava betona	TT (28dni) f _{cm} [MPa]	Vrednost koef. s	f _{cm} (3dni) [MPa] po EC2	Napaka modela [%]
M1	67,1	0,20	44,5	8
M2	64,0	0,20	42,4	6
M3	73,1	0,20	48,5	2
M4	67,4	0,20	44,7	0

Preglednica 27: Razvoj tlačne trdnosti po EC 2: različne vrednosti koeficienta s

Sestava betona	TT (28dni) fcm[MPa]	Vrednost koef. s	fcm(3dni) [MPa] po EC2	Napaka modela [%]
M1	67,1	0,16	48,3	0
M2	64,0	0,17	45,1	0
M3	73,1	0,19	49,5	0
M4	67,4	0,20	44,7	0

Grafikon 12 prikazuje razvoj tlačne trdnosti vseh betonov v času od 0 do 90 dni. Za potek razvoja TT v prvih 28 dneh smo upoštevali računski model in vrednost koeficienta s iz preglednice 27. Potek razvoja TT od 28 dni naprej pa smo na podlagi dveh podatkov (TT 28 in TT 90dni) določil s programom Excel.

**Grafikon 12:** Razvoj tlačne trdnosti betonov

6.5.2 Statični modul elastičnosti

Statične elastične module betonov smo določali na valjih dimenzij D/H=100/200 mm v skladu s standardom JUS U.M.1.025 (1982). Vsak vzorec je imel enakomerno po obodu nalepljene tri merilne lističe dolžine 60 mm. Princip preiskave je, da se preizkušane v petih ciklih enoosno tlačno obremenjuje in razbremenjuje s silo znotraj mej, ki odgovarjata napetosti $\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$ in $\sigma_a = f_c/3$. Slednja napetost predstavlja tretjino ocenjene tlačne trdnosti preizkušane vzorca. Z obremenjevanjem in razbremenjevanje vzorcev stabiliziramo material in merilno opremo. Po končanem petem ciklu preiskave sledi obremenitev do porušitve vzorca. Hitrost nanosa obtežbe znaša $0,6 \pm 0,4 \text{ MPa/s}$. Med preiskavo se ves čas beleži deformacija lističev in sila na vzorec (napetosti). Rezultat meritev je $\sigma - \varepsilon$ diagram, s pomočjo katerega se preko podane formule določi statični modul elastičnosti:

$$E_c = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon \text{ [MPa]}$$

kjer je:

E_c – sekantni modul elastičnosti [MPa]

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

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

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

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

σ_a – napetost pri 1/3 tlačne trdnosti preizkušanca

σ_b – začetna napetost ($\sigma_b = 0,5 \text{ MPa}$)

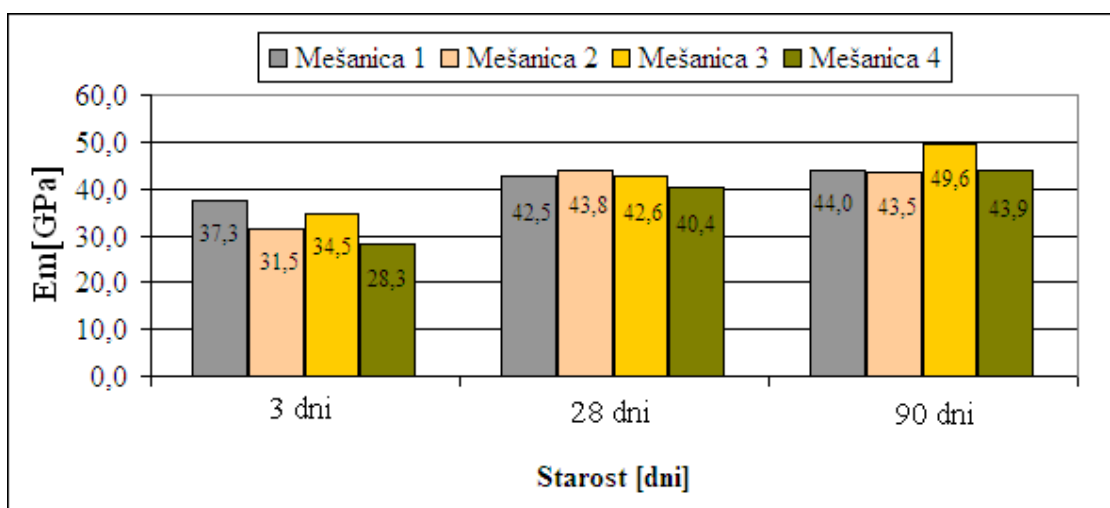
Elastične module različnih betonov smo določali na treh valjih po 3-ih, 28-ih in 90-ih dneh. Tlačno trdnost valjev smo ocenili s pomočjo preskusa tlačne trdnosti treh kock, ki smo jih pred tem preskušali za tlačno trdnost. Pri tem smo upoštevali razliko zaradi oblike

preizkušanca s faktorjem oblike $k=0,8$. Podatke smo nato obdelali v programu Excel in dobljene rezultate podal v preglednici 28.

Preglednica 28: Povprečne vrednosti statičnih elastičnih modulov

Betonska mešanica	3 dni [GPa]	28 dni [GPa]	90 dni [GPa]
M1	37,3	42,5	44,0
M2	31,5	43,8	42,0
M3	34,5	42,6	49,6
M4	28,3	40,4	43,9

V grafikonu 13 so rezultati predstavljeni grafično:



Grafikon 13: Povprečne vrednosti elastičnih modulov

Elastični moduli po 3-eh dneh

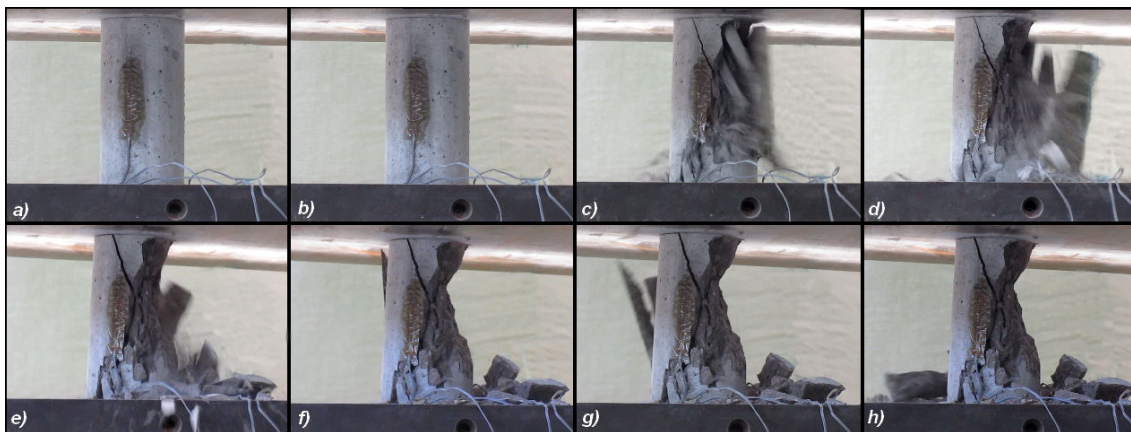
V povprečju je najvišjo vrednost modula elastičnosti po treh dneh dosegel beton M1 (37,3 GPa), najnižjo pa M4 (28,3 GPa). Betona, ki sta vsebovala EFP sta dosegala v povprečju za 17 % manjši elastični modul v primerjavi z betoma brez EFP. Vpliv agregata na velikost elastičnega modula je nekoliko bolj izrazit le pri starosti betona 3 dni. Iz rezultatov lahko sklepamo, da ima po treh dneh višji elastični modul beton z agregatom A.

Elastični moduli po 28 dneh

Po 28 dneh so si vrednosti elastičnih modulov pri vseh mešanicah zelo podobne. Njihova povprečna vrednost je 42,3 GPa. V tem primeru lahko rečemo, da niti agregat, niti vrsta veziva nista vplivali na vrednost elastičnega modula.

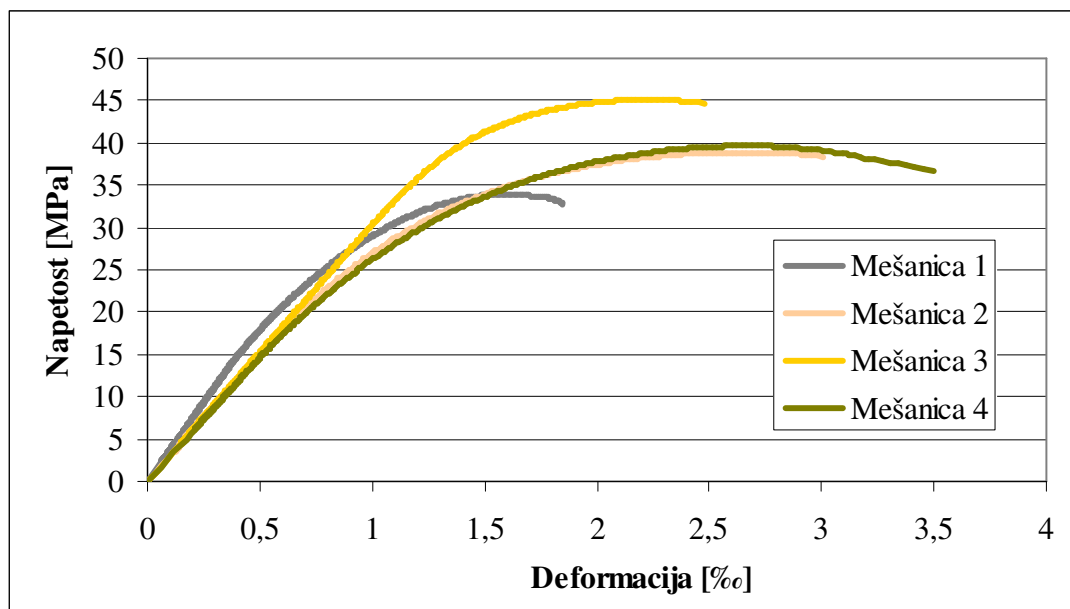
Elastični moduli po 90 dneh

Vrednosti modulov so si po 90 dneh še bolj enotne kot po 28 dneh. Izjema je beton M3, katerega vrednost elastičnega modula je v primerjavi z ostalimi po 90 dneh višja za okoli 13 % in znaša 49,6 GPa. Povprečna vrednost modulov ostalih treh betonov znaša 43,8 GPa, kar je za dobre 3 % več kot po 28 dneh. Ponovno pridemo do podobnega zaključka, kot na podlagi rezultatov TT. Vzrokov za povišane EM po 90-ih dneh z opravljenimi preiskavami ne moremo najti, moramo pa se zavedati, da je potrebno natančneje preiskati vpliv agregata B na mikrostrukturo betona. Šele tedaj bomo morda lahko brez tveganja uporabljali agregat, kot je ta.



Slika 21: Tlačna porušitev valja med preskusom po 90 dneh

Slika 21 prikazuje proces porušitve 90 dni starega vzorca. Pri tej starosti je beton veliko trdnjši in manj duktilen, zato je porušitev veliko bolj "eksplozivna" kot pri starosti 3 dni, kjer beton praktično le razpoka. Duktilnost vzorcev razločimo iz grafikonov v nadaljevanju.

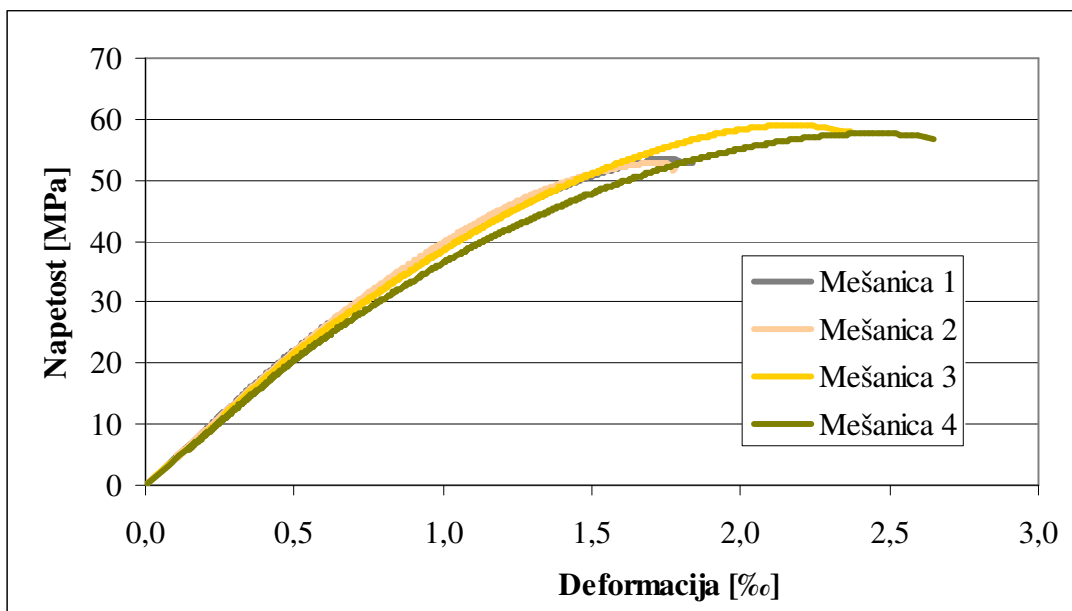


Grafikon 14: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 3 dneh (valji)

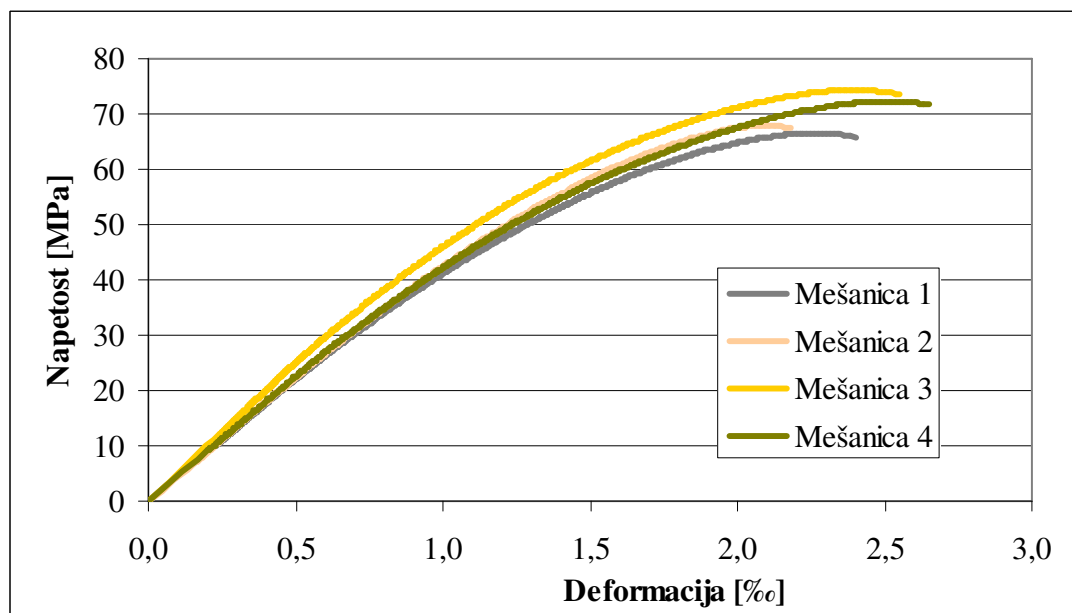
Najvišjo porušno napetost so med preiskavo v povprečju dosegali vzorci iz betona M3. Ugotovitev je skladna z rezultati tlačnih trdnosti, kjer je isti beton dosegal najvišjo trdnost pri vseh starostih vzorcev. Po treh dneh so imeli najnižjo tlačno trdnost (porušno napetost) vzorci iz betona M1 (Grafikon 14). Ta rezultat se ne ujema z rezultati preskusa TT merjenih po treh dneh, zato bi bilo smiselno preskus ponoviti. Betona z EFP sta po treh dneh veliko bolj duktilna kot betona brez EFP. Ob poružitvi sta v povprečju dosegla deformacijo preko 3 ‰, betona brez EFP dobra 2 ‰. Betona z EFP sta bila po treh dneh še precej nehomogena. To se je videlo med preiskavo, ko so se deformacije neenakomerno prerazporejale po merilnih lističih. Vzorci z agregatom B dosegajo večjo duktilnost.

Na 28 dan so preizkušanci dosegli nižje porušne deformacije. Iz grafikona 15 je razvidno, da je beton iz agregata B nekoliko bolj duktilen kot beton z agregatom A. Deformacija na meji poružitve betona M4 je bila 2,6 ‰, betona M3 nekoliko manj (2,3 ‰). Betona z agregatom A sta dosegla deformacijo 1,75 ‰.

Enaka ugotovitev velja tudi po 90 dneh. Betona z dolomitnim agregatom dosegata večjo duktilnost (deformacije 2,5 ‰). Razlika med agregatoma je bila tedaj nekoliko manjša (deformacija 2,2 ‰).

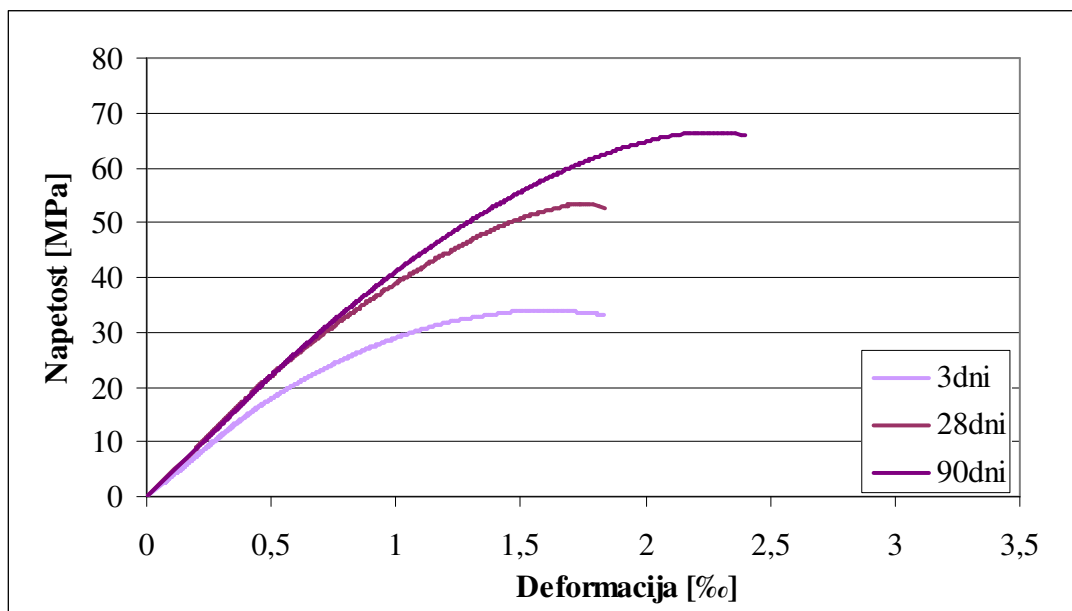


Grafikon 15: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 28 dneh (valji)



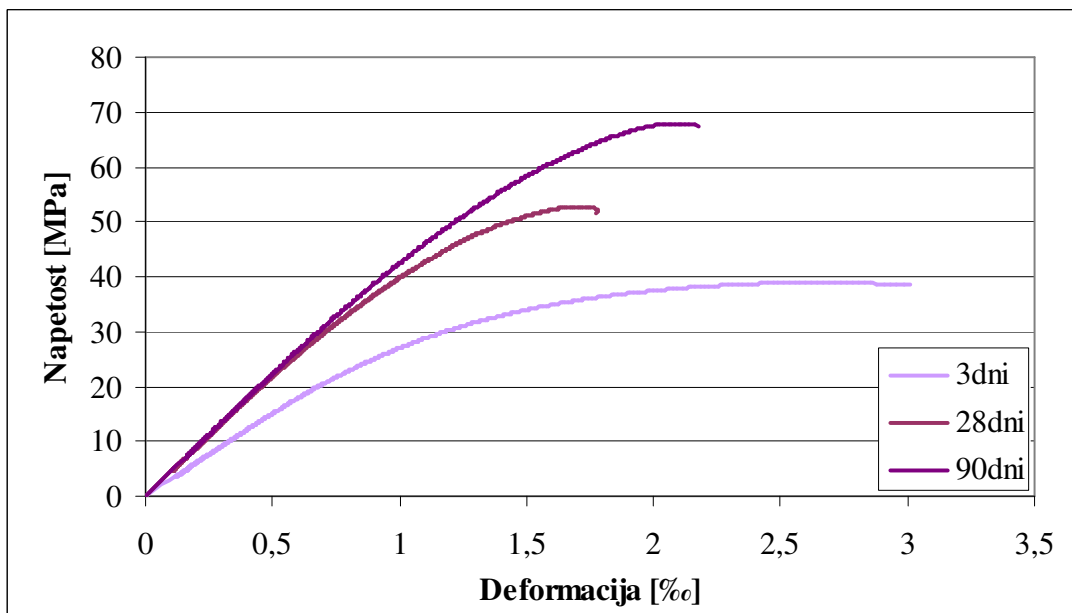
Grafikon 16: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona po 90 dneh (valji)

V nadaljevanju je v grafikonih 17-20 predstavljen časovni razvoj diagrama napetost – deformacija za vsak beton posebej.



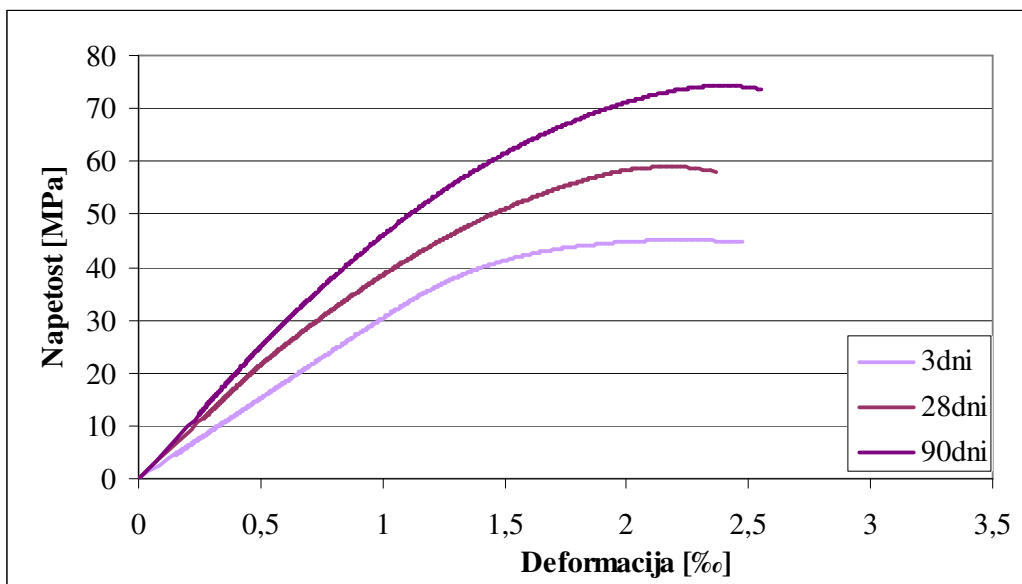
Grafikon 17: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M1

Beton M1 je dosegel največjo duktilnost po 90 dneh. Deformacija na meji porušitve je tedaj znašala približno 2,4 %.

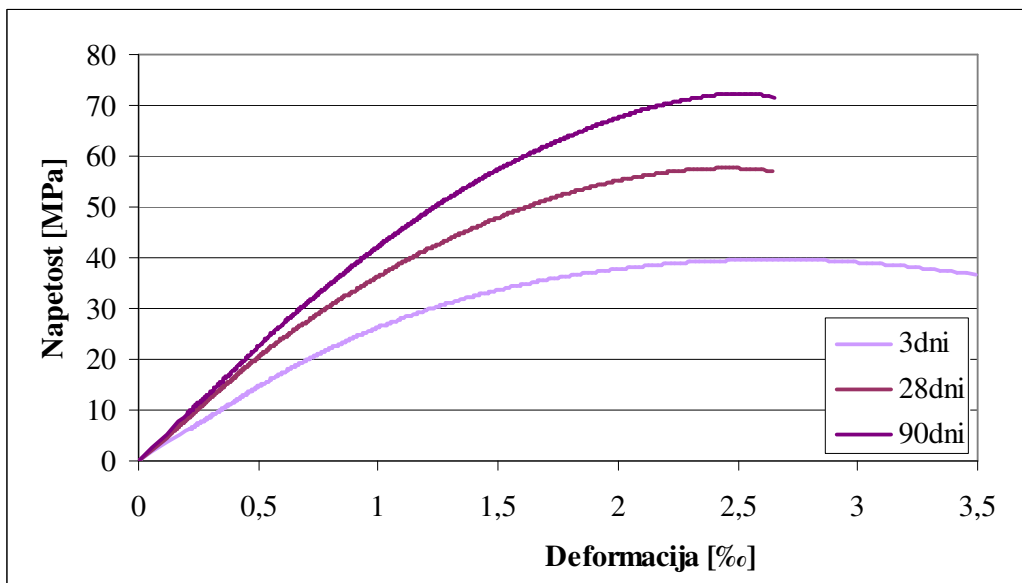


Grafikon 18: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M2

Beton M2 je vseboval EFP, zaradi tega je imel po 3-eh dneh nekoliko nižjo trdnost, vendar večjo duktilnost. Deformacija je znašala 3 %.



Grafikon 19: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M3



Grafikon 20: Razvoj sovisnosti med napetostmi in deformacijami – beton M4

Primerjava M3 in M4 ponovno dokazuje, da beton z EFP izkazuje nižjo zgodnjo tlačno trdnost in večjo duktilnost po 3-eh dneh.

Osnutek standarda prEN 12390-13:2012

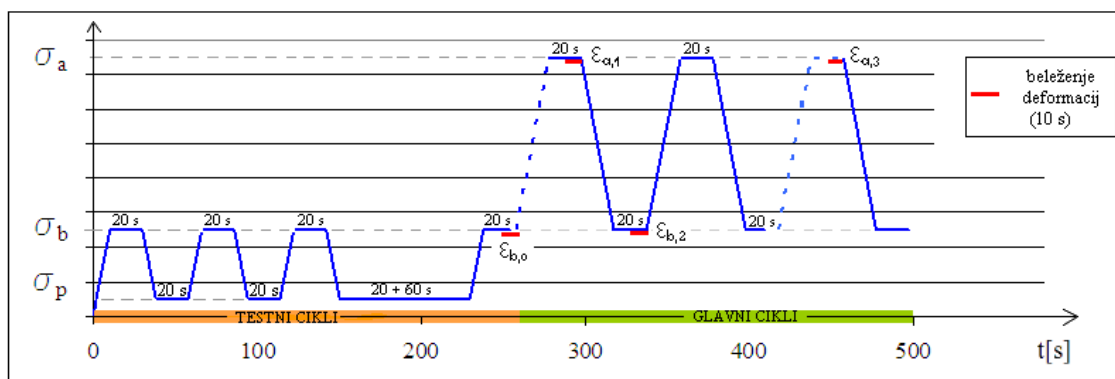
Nov osnutek SIST EN standarda iz letošnjega leta na novo določa pravila za določevanje sekantnega modula elastičnosti betona.

Osnutek standarda dovoljuje določitev dveh sekantnih modulov elastičnosti:

- Začetni modul elastičnosti $E_{C,0}$ izmerjen pri prvi obremenitvi
- Stabilizirani modul elastičnosti $E_{C,S}$ izmerjen po treh obtežnih ciklih

Predpisani postopek določanja elastičnega modula je naslednji. Najprej je zahtevana izvedba treh predobremenitvenih ciklov, s katerimi testiramo merilno opremo, električne povezave in centričnost nameščenega vzorca. Hitrost obremenjevanja oziroma razbremenjevanja je $0,6 \pm 0,2$ MPa/s. Na shemi je natančno predstavljen način izvedbe preiskav (Grafikon 21). Rdeča črta na sliki označuje čas beleženja deformacij, ki jih potrebujemo za izračun elastičnega modula. Predvideno tlačno trdnost vzorca f_{cm} moramo predhodno določiti na primerljivih vzorcih. Pred preiskavo moramo določiti tri nominalne vrednosti napetosti. To so:

- σ_p ... predobtežna napetost (0,5 do 1 MPa)
- σ_b ... nižja nominalna napetost ($f_{cm} / 9$)
- σ_a ... višja nominalna napetost ($f_{cm} / 3$)



Grafikon 21: Shema obremenjevanja vzorca po prEN 12390-13:2012

Začetni elastični modul $E_{C,0}$ določimo kot:

$$E_{C,0} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon_s$$

kjer sta : $\Delta\sigma = \sigma'_a - \sigma'_b$

$$\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}$$

σ'_a ... realna napetost podobna nominalni σ_a

σ'_b ... realna napetost podobna nominalni σ_b

$\varepsilon_{a,1}$... povprečna deformacija pri σ_a v prvem ciklu

$\varepsilon_{b,0}$... povprečna deformacija pri σ_b pred prvim ciklom

Stabiliziran elastični modul $E_{C,S}$ pa kot:

$$E_{C,S} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon_s$$

, kjer sta : $\Delta\sigma = \sigma'_a - \sigma'_b$

$$\Delta\varepsilon_s = \varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,0}$$

σ'_a ... realna napetost podobna nominalni σ_a

σ'_b ... realna napetost podobna nominalni σ_b

$\varepsilon_{a,3}$... povprečna deformacija pri σ_a v tretjem ciklu

$\varepsilon_{b,2}$... povprečna deformacija pri σ_b po drugem ciklom

Rezultat zaokrožimo na 0,1 GPa natančno.

6.5.3 Vodoprepustnost

Preskus za določanje globine prodora vode pod pritiskom mora potekati v skladu s SIST EN 12390-8 (2009). Princip metode je, da se na strjen beton preko ustrezne naprave za 72 ± 2 uri nanese vodo pod tlakom 500 ± 50 kPa. Po končanem preskusu je potrebno vzorec razcepiti na polovico ter izmeriti globine prodora vode na milimeter natančno. Standard predpisuje minimalno starost vzorca 28 dni, vendar smo v okviru te naloge preverjali tudi vodoprepustnost betona po 3 dneh. S tem smo želeli pokazati, kako se s časom razvija struktura betona v odvisnosti od agregata in mineralnega dodatka. Iz rezultatov je tudi v tem primeru vidno, da je beton po treh dneh še nehomogen. Podobno se je izkazalo pri preskusu valjev za določanje modula elastičnosti. Betoni so moral v skladu z zahtevami doseči razred PV-III.

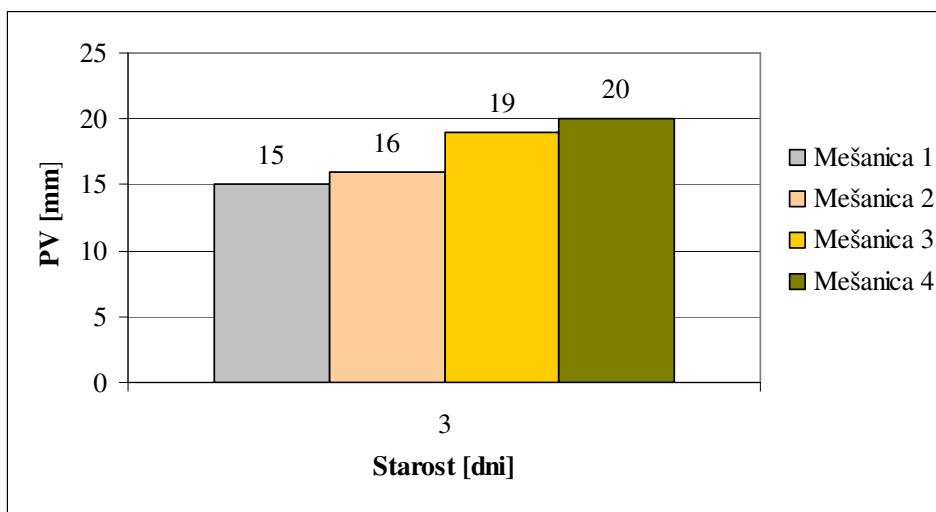
Preglednica 29: Pregled izmerjenih vrednosti vodoprepustnosti

Mešanica	Preskušanelec	PV 3dni [mm]	PV 28dni [mm]	PV 90dni [mm]	
M1	Vzorec 1	14*	16*	17	A g r e g a t B
	Vzorec 2	16*	13*	17	
	Vzorec 3	16*	12*	16	
M2	Vzorec 1	18	13	17	
	Vzorec 2	16	12	16	
	Vzorec 3	15	10	14	
M3	Vzorec 1	17	18	19	
	Vzorec 2	17	20	16	
	Vzorec 3	24	19	20	
M4	Vzorec 1	19*	14	18*	
	Vzorec 2	21*	15	17*	
	Vzorec 3	19*	15	16*	

*rezultati iz ponovljenih meritev

Preglednica 30: Povprečna vrednost vodoprepustnosti

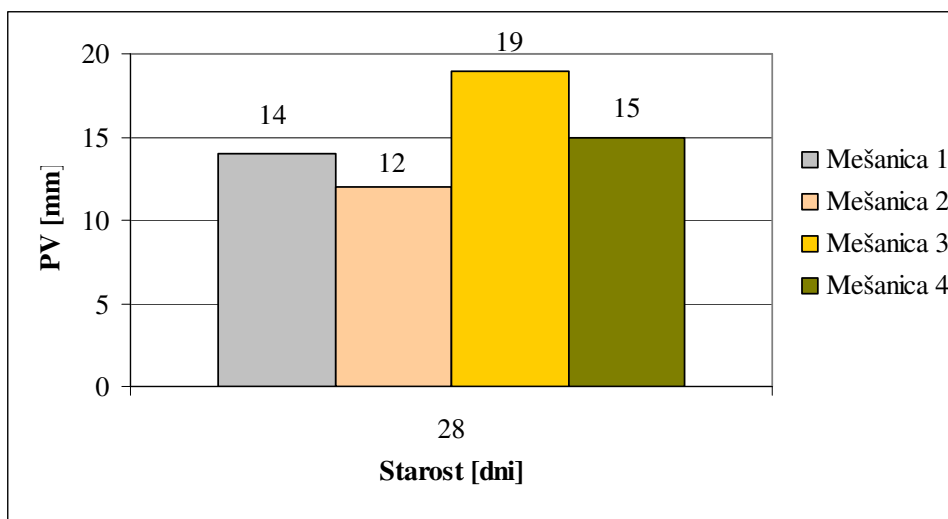
Mešanica	PV 3dni [mm]	PV 28dni [mm]	PV 90dni [mm]
M1	15	14	17
M2	16	12	16
M3	19	19	18
M4	20	15	17



Grafikon 22: Prepustnost vode po 3 dneh

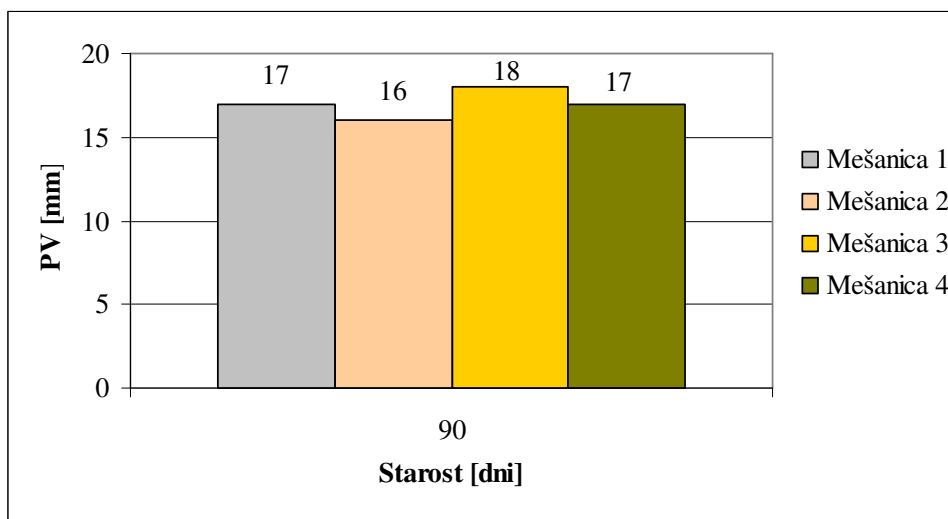
Meritve prepustnosti vode za beton po 3 dneh (grafikon 22) niso v skladu s standardom. Raztros rezultatov je bil pri meritvah neprimerno večji, kot po 28 ali 90 dneh. Da bi se prepričali o vrednosti rezultatov, smo se odločili ponoviti vse meritve mešanic M1 in M4, ker so rezultati močno odstopali od povprečnih vrednosti ali pa je bil njihov raztros izredno velik. Za primer bom podal vrednosti prepustnosti po 3 dneh za beton M1. S prvo serijo preskusov smo dobili globino prodora vode 8 mm na vseh treh vzorcih, pri ponovljeni seriji pa so bili rezultati popolnoma drugačni. En vzorec je imel tedaj prepustnost 14mm, druga dva 16 mm. Ker so bili ti rezultati bolj v skladu z ostalimi, smo le-te upoštevali, ostale pa zavrgli. Podobno so po 3-eh dneh vzorci iz prve šarže betona M4 izkazovali velik raztros rezultatov, zato smo ponovili preskuse z mešanico M4. Pri prvi meritvi je prodor vode na treh vzorcih znašal 9, 13 in 19 mm, pri ponovni meritvi pa dvakrat 19 in enkrat 21mm. Zaradi manjšega raztrosa smo upoštevali slednje rezultate. Iz enakega razloga smo za vzorce M1 po 28-ih in M4 po 90-ih dneh upoštevali rezultate iz ponovljenih preskusov.

Izkazalo se je, da je metoda določanja globine vpijanja vode pod pritiskom v skladu s SIST EN 12390-8:2009 neponovljiva, saj so rezultati zelo odvisni od posamezne šarže betona in imajo lahko velik raztros vrednosti. V primeru, da bi beton izkazal prepustnost, ki je ravno na meji med dvema razredoma, bi težko ugotovili, v kateri razred dejansko spada. Verjetno bi bila metoda, ki temelji na drugačnem principu bolj primerna za določanje vodoprepustnosti betona. V primeru, da beton uvrstimo v napačen razred vodoprepustnosti se lahko zgodi, da ne bo kljuboval pogojem okolja, na katere je bil projektiran.



Grafikon 23: Prepustnost vode po 28 dneh

Po 28-ih dneh (grafikon 23) je imel največjo odpornost proti prodoru vode z apnenčevim agregatom in mineralnim dodatkom (M2). Enako je bilo tudi po 90 dneh (grafikon 24). EFP torej ugodno vpliva na odpornost proti prodoru vode. Vsi betoni so ustrezali stopnji odpornosti proti prodoru vode PV-III in s tem zadostili zahtevam.



Grafikon 24: Prepustnost vode po 90 dneh

7 ZAKLJUČEK

Dobro poznavanje vplivov sestavin betona na njegove karakteristične lastnosti v sodobnem času postaja nepogrešljiv element projektiranja betonskih mešaníc. Z namenom, da se lahko proizvede obstojne konstrukcije ter zadosti številnim okoljevarstvenim in ekonomskim zahtevam, se za proizvodnjo betonov uporablja vse več mineralnih in kemijskih dodatkov.

V diplomski nalogi smo preučevali vpliv dveh vrst agregatov na reološke in mehanske lastnosti lahkogradljivega betona, z zamenjavo 20 % Portland cementa z EFP pa preučili vpliv le-tega na njegove karakteristike.

Dve mešanici (M1 in M2) sta vsebovali apnenčev drobljeni agregat (agregat A), drugi dve (M3 in M4) pa dolomitni drobljeni agregat (agregat B). Rezultati preskusov konsistence betona z metodo poseda oziroma razleza so pokazali, da je beton z agregatom B lažje dosegel zahtevano konsistenčno stopnjo kot beton z agregatom A. Z reometrom smo rezultate lahko potrdili z nižjo izmerjeno vrednostjo napetosti na meji tečenja ter višjo plastično viskoznostjo betona, ki pomenita boljšo vgradljivost (obdelavnost) in stabilnost mešanice. Rezultati TT so pokazali, da višjo TT doseže beton z agregatom B. Razvoj TT se je med betonoma A in B razlikoval, in sicer je beton z agregatom B glede na 28-dnevno TT pridobil še 14 % TT, med tem ko je beton z agregatom A po 28-ih dneh dosegel že 99,6 % končne trdnosti. Kaj je vzrok temu, je s pomočjo naših rezultatov težko ugotoviti. Glede na to, da se mešanici razlikujeta le v vrsti agregata, je vzrok lahko boljša oprijemljivost agregata s produkti hidratacije ali potek kakšne kemijske reakcije med njimi. Za natančen odgovor bi bilo potrebno pogledati v mikrostrukturo betona s pomočjo elektronskega mikroskopa. Podobno izstopa vrednost EM po 90. dneh za beton z agregatom B, ki je za 13 % višja od ostalih vrednosti pri tej starosti. Vpliv vrste agregata na velikost EM je glede na naše rezultate težko določiti, očitnejša razlika pa se je pokazala pri duktilnosti. Agregat B pripomore k večji duktilnosti betona. Rezultati preskusa odpornosti betona proti prodoru vode (PV) kažejo večjo prepustnost betona z agregatom B. Z izjemo slednje ugotovitve bi lahko sklepali, da je agregat B nekoliko boljša izbira za pripravo betona. Kljub temu se, zaradi omenjenega neraziskanega vzroka za višjo TT in EM po 90-ih dneh pojavlja dvom o uporabi takega agregata, dokler se z dodatnimi

preiskavami ne prepričamo o neškodljivosti pojava. Agregat mora biti inerten, kar pomeni, da ne sme reagirati s produkti hidratacije.

Mineralni dodatek (EFP) sta vsebovali dve mešanici. Ena z agregatom A (M2) in ena z agregatom B (M4). Vse primerjave v nadaljevanju so glede na beton brez EFP. Mešanici z EFP sta izkazali boljše obdelavnost (večji posed in razlez). Hkrati smo opazili, da tak beton dlje časa ostane obdelaven, kar je zagotovo dobrodošlo v primeru, ko beton transportiramo z agitatorjem do gradbišča. Rezultati preiskave z reometrom so pokazali, da pepel zviša viskoznosti svežega betona in zniža njegovo napetost na meji tečenja. Ugoden vpliv betona z EFP se je pokazal v nižji poroznosti in posledično nižji prepustnosti za vodo. Tak učinek je zelo ugoden, saj je prvič tak beton bolj homogen in drugič trajnejši, ker je manj prepusten za agresivne snovi in pline. Beton z EFP- je v povprečju dosegal nekoliko nižje tlačne trdnosti, vendar se je ta razlika s časom zmanjševala. Beton z agregatom A, ki vsebuje EFP (M2) po 90-ih dneh doseže celo višjo TT, kot beton enake sestave brez EFP (M1). Zaradi tega lahko rečemo, da se TT po 28-ih dneh v tem primeru ne sme gledati kot končna, ker beton zaradi narave pepela dlje pridobiva na TT. Nadalje smo preverili vpliv EFP na EM. Izkaže se, da nima velikega vpliva na velikost EM, niti na duktilnost betona po 28-ih ali 90-ih dneh. Na duktilnost v prvi vrsti vpliva agregat. Nekoliko večjo duktilnost ima beton z EFP po 3-eh dneh. Pri tej starosti je bilo med preskusom opaziti zelo nehomogeno strukturo vzorca. Deformacije so se ves čas prerazporejale po merilnih lističih okoli plašča vzorca.

S praktičnega vidika je uporaba EFP v primernih količinah torej smiselna. Z zamenjavo dela cementa z EFP, se lahko prihrani veliko izpustov ogljikovega dioksida in energije, ki je sicer potrebna za proizvodnjo Portland cementa. Ker pepel predstavlja stranski produkt v termoelektrarnah je na razpolago v velikih količinah. Z njegovo uporabo v betonu rešujemo najprej problematiko njegovega odlaganja. Po drugi strani pa pomeni vključitev EFP v betonsko mešanico trajnejši beton z boljšimi lastnostmi v svežem stanju. Z uporabo EFP se nekoliko zniža tudi cena betona, saj je v primerjavi s cementom veliko cenejši.

Za kakovosten beton je potrebno izbrati ustrezne sestavine, katerih vplive na njegove karakteristike dobro poznamo. Na ta način bo projektirani beton najbolje služil svojemu namenu. To pomeni, da se izognemo morebitnim težavam med vgrajevanjem, po vgradnji ali morda celo več desetletij po vgradnji. Pred uporabo katerekoli nove sestavine ali dodatka v

betonu, je potrebno izvesti številne preskuse na svežih in strjenih betonih. Vsako novo spoznanje je lahko že prvi korak v smeri novih odkritij.

VIRI

Benscheidt, N., Berg, W., Feuerborn, H.-J., Heinz, D., Hohberg, I., Hugot, A., Lutze, D., Mengede, M., Pierkes, R., Schneider, E., Wiens, U. 2008. Handbuch Flugasche im Beton. Dusseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH: 145 str.

Carrasquillo Associate, LTD. 2010. Durability Gallery.
http://www.carrasquilloassociates.com/gallery_durability.html (pridobljeno 28. 9. 2012)

ConTec. 2012. Measuring Systems
<http://www.contec.is/accessories.htm#M-200> (pridobljeno 26. 9. 2012)

Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik 12/2010 – 01/2011, str: 100-103.

De Belie, N. 2010, Lectures: Sustainability of materials, Ghent, University of Ghent, Faculty of Engineering.

Duh, D. 2008. Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko. Doktorska disertacija. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Duh): 200 str.

Feys, D., Verhoeven, R. 2008. Fresh self compacting concrete, a shear thickening material. V: Cement and Concrete Research, Volume 38, Issue 7, July 2008. Pages 920-929.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884608000495>
(pridobljeno 26. 9. 2012)

Spletna stran Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2012. Zavod za materiale
http://www.grad.unizg.hr/zavod_za_materijale/laboratorij/oprema (pridobljeno 14.9.2012)

JUS.U.M1.025:1982. Beton – Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom. Zbirka jugoslovenskih standarda za primenu pravilnika BAB 87 o tehničkim normativima za beton I armirani beton. Simpozijum SDGKJ. Dubrovnik, 25.-27. April 1989. Beograd, JUDIMK, SDGKJ: str 266-268.

Kušar, M. 2012. Mehanske lastnosti lahkogradljivega in samozgoščevalnih betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kušar): 66 str.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2006. Concrete: Microstructure, Properties, And Materials. Third Edition. New York, McGraw-Hill: 659 str.

Mikec, J. 2008. Kamnolom Camberk. Mikec blog , objavljeno 14. 9. 2008
<http://www.mikec.si/2008/09/peskokop-camberk.html> (pridobljeno 19. 9. 2012)

Neville, A.M. 1991. *Properties Of Concrete*. London, Pitman, cop. 1991: 779 str.

North Dakota State Government. 2012. *Liberty Memorial Bridge*
<http://www.memorialbridge.info/images/090508> (pridobljeno 28. 9. 2012)

Pajk, U. 2009. *Vpliv različnih mlevnih dodatkov na lastnosti cementa CEM V/A (S-V-P) 42,5N LH*. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba U. Pajk): 80 str.

Povše, B. 2010. *Razvoj cementa CEM V v Lafarge cement d.d.* Diplomaska naloga. Maribor, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba B. Povše): 70 str.

Pucolan. Wikipedia. 2012.
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Pucolan> (pridobljeno 14. 9. 2012)

Renovation-Headquarters.com. 2012. *Slump Test for Architectural Concrete*.
<http://www.renovation-headquarters.com/concrete-slump-test-countertops.html>
(pridobljeno 14. 9. 2012)

Saint-Gobain (Isover). 2008. *What is sustainable construction?*
<http://www.isover.com/Our-commitment-to-sustainability/Toward-sustainable-buildings/What-is-sustainable-construction> (pridobljeno 19. 9. 2012)

Šajna, A., Kavčič, L. 2005. *Betonski premostitveni objekti in vozišča – pregled poškodb in analiz vzrokov*. V: *Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah*. Lipica, 10.-11. marec 2005. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije: str. 33-40.

Spletna stran Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu. 2012. *Zavod za materiale*
http://www.grad.unizg.hr/zavod_za_materijale/laboratorij/oprema (pridobljeno 14.9.2012)

Tescan a.s. 2012. *Material Science, Fly Ash*.
<http://www.tescan.com/en/applications/gallery/materials-science/fly-ash>
(pridobljeno 19. 9. 2012)

Understanding Cement. 2012. *Alkali-silica reaction in concrete*
<http://www.understanding-cement.com/alkali-silica.html> (pridobljeno 19. 9. 2012)

Vuk, T. 2005. *Sodobni trendi v razvoju cementov in vloga veziva pri zagotavljanju obstojnosti betona*. V: *Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah*. Lipica, 10.-11. marec 2005. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije: str. 41-48.

Wallevik, O. H., 2009. *Introduction to Rheology of Fresh Concrete*. Reykyavik, Innovation center of Iceland: 181 str.

WhatWow, 2010. *Categories Building Technique, Material*
<http://whatwow.org/infra-lightweight-concrete-2> (pridobljeno 14. 9. 2012)

Žarnić, R. 2003. *Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.*

Standardi:

SIST EN 197-1:2001. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cimente.

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

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

SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij -1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus posedom stožca.

SIST EN 12350-5:2009. Preskušanje svežega betona – 5. del: Preskus z razlezom.

SIST EN 12350-7:2001. Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka. Porozimeterske metode.

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

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