

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:

Turk, A., 2014. Lesni pepel kot sekundarno vezivo v betonu. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Mladenovič, A.): 71 str.

Datum arhiviranja: 04-05-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Turk, A., 2014. Lesni pepel kot sekundarno vezivo v betonu. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Mladenovič, A.): 71 p.

Archiving Date: 04-05-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
VODARSTVO IN OKOLJSKO
INŽENIRSTVO

Kandidatka:

ANITA TURK

LESNI PEPEL KOT SEKUNDARNO VEZIVO V BETONU

Diplomska naloga št.: 27/B-VOI

WOOD ASH AS A SECONDARY BINDER IN CONCRETE

Graduation thesis No.: 27/B-VOI

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentorica:

doc. dr. Ana Mladenovič

Ljubljana, 16. 09. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Anita Turk izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »**Lesni pepel kot sekundarno vezivo v betonu**«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, september 2014

Anita Turk

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.3(497.4)(043.2)
Avtor:	Anita Turk
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentor:	doc. dr. Ana Mladenovič
Naslov:	Lesni pepel kot sekundarno vezivo v betonu
Tip dokumenta:	Diplomsko delo – tip UNI
Obseg in oprema:	71 str., 15 pregl., 38 graf., 6 sl., 8 en., 1 pril.
Ključne besede:	lesni pepel, strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost, tlačna trdnost, upogibna trdnost, cepilna trdnost, krčenje, nabrekanje, dinamični modul elastičnosti

Izvleček

Diplomska naloga obravnava vpliv lesnega pepela na mehanske, fizikalne, kemične in mineraloške lastnosti betona v svežem in strjenem stanju. Cementno vezivo smo nadomestili z lesnim pepelom v različnih količinah (10, 15 in 20 mas %). V okviru preiskav smo uporabili štiri različne pepele iz podjetij, kjer lesni pepel predstavlja odpadke iz njihove proizvodnje.

Na začetku smo z reološkimi raziskavami preverili, kako pepel vpliva na lastnosti svežega betona. Nato smo na podlagi rezultatov tlačne, upogibne in cepilne trdnosti po 7 in 28 dneh ugotovili, kateri beton s pepelom daje najvišje trdnosti in kakšne so le te v primerjavi s trdnostmi referenčne sestave betona brez lesnega pepela. Z meritvami spreminjanja dolžin prizem s časom smo ugotavljali, kakšen vpliv ima lesni pepel na krčenje betona. Potem, ko so se deformacije zaradi krčenja umirile, smo prizme namočili v vodo za 42 dni in tedensko spremljali spremembo dolžin in mas prizem ter z merilnim instrumentom GrindoSonic določali dinamični modul elastičnosti. Na koncu smo na prizmah ponovno določili tlačno, upogibno in cepilno trdnost betonov in rezultate primerjali s tistimi pri starosti 28 dni.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.3(497.4)(043.2)
Author: Anita Turk
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Co-supervisor: Assist. Prof. Ana Mladenovič, Ph.D.
Title: Wood ash as a secondary binder in concrete
Document type: Graduation Thesis - University studies
Scope and tools: 71 p., 15 tab., 38 graph., 6 fig., 8 eq., 1 ann.
Keywords: wood ash, yield value, plastic viscosity, compressive strength, bending strength, splitting strength, concrete shrinkage, concrete swelling, dynamic modulus of elasticity

Abstract

This graduation thesis deals with the impact of wood ash on the mechanical, physical, chemical and mineralogical properties of fresh and hardened concrete. Cement binder was replaced by wood ashes in various quantities (10, 15 and 20 wt. %). In the framework of the study, we used four different ashes from companies where wood ash represents a waste from their production.

At the beginning we studied the impact of ashes on fresh concrete rheology. On the basis of the results of compressive, bending and splitting tests after 7 and 28 days, we determined which concrete with ash gives the highest strength and we compared the obtained results to the strengths obtained for the reference concrete without wood ash. By measurements of time dependent length change of the prisms we tried to find out the influence of the wood ash on the concrete shrinkage. After the shrinkage of the prisms had stabilised we put the prisms in water for 42 days. Every week we measured the changes in length and mass of the prisms and determined the dynamic modulus of elasticity, by using a measuring instrument GrindoSonic. At the end we once again determined compressive, flexural and splitting strengths of concrete mixtures and compared the obtained results to the strengths obtained at the age of concrete equal to 28 days.

ZAHVALA

Za nasvete in pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov in somentorici doc. dr. Ani Mladenovič iz Zavoda za gradbeništvo Slovenije. Hvala tudi Franciju Čeponu za vso pomoč pri eksperimentalnem delu naloge v Konstrukcijskem prometnem laboratoriju, UL FGG. Sabini Drnovšek iz ZAG-a hvala za pomoč pri pripravi vzorcev za XRD analizo in Vesni Zalar Serjun hvala za vse razlage in pomoč pri interpretaciji difraktogramov.

Posebna zahvala pa gre mami, očetu, sestri, starim staršem in fantu za vso podporo in spodbudne besede ter dejanja preko celotnega obdobja mojega študija.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
OKRAJŠAVE	XIII
1 UVOD	1
1.1 Cilj diplomske naloge.....	2
2 TEORETIČNI DEL.....	2
2.1 Lesna biomasa	2
2.2 Lesni pepel.....	3
2.2.1 Uporaba.....	5
3 EKSPERIMENTALNI DEL	6
3.1 Uporabljeni materiali	6
3.1.1 Agregat	6
3.1.1.1 Krivulja zrnivosti	6
3.1.2 Cement	8
3.1.3 Pepeli.....	8
3.1.3.1 Pepel Ribnica	8
3.1.3.2 Pepel Avstrija.....	9
3.1.3.3 Pepel Energoles	10
3.1.3.4 Pepel Vipap.....	13
3.1.4 Superplastifikator	14
3.1.5 Voda	14
3.1.6 Recepture betonskih mešanic	15
3.1.6.1 Priprava mešanic	16
3.2 Rezultati raziskav.....	17
3.2.1 Reološke raziskave	17
3.2.2 Tlačna trdnost f_c	20
3.2.2.1 Vpliv deleža pepela.....	21

3.2.2.2	Vpliv vrste pepela	24
3.2.3	Upogibna natezna trdnost f_{cf}	25
3.2.3.1	Vpliv deleža pepela.....	26
3.2.3.2	Vpliv vrste pepela	28
3.2.4	Cepilna natezna trdnost f_{ct}	30
3.2.4.1	Vpliv vrste pepela	31
3.2.5	Določanje dinamičnega modula elastičnosti E	32
3.2.5.1	Vpliv deleža pepela.....	34
3.2.5.2	Vpliv vrste pepela	37
3.2.6	Spremljanje mase	39
3.2.7	Krčenje/nabrekanje betonskih kompozitov	41
4	ZAKLJUČKI	45
	VIRI	47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kemična sestava lesa: les iglavcev in listavcev (Krajnc in sodel., 2009).....	3
Preglednica 2: Kemična sestava lesa: skorja iglavcev in listavcev (Krajnc in sodel., 2009)....	3
Preglednica 3: Kemična sestava pepela (Krajnc in sodel., 2009).....	4
Preglednica 4: Vrednosti parametrov izlužka pepela Ribnica (Pavšič in Mladenovič, 2013)...	9
Preglednica 5: Vrednosti parametrov izlužka pepela Energoles (Zavod za zdravstveno varstvo Celje, 2012).....	12
Preglednica 6: Vrednosti parametrov izlužka pepela Vipap (Pavšič in Mladenovič, 2013) ...	13
Preglednica 7: Receptura betonske mešanice z 10 mas % pepela.....	15
Preglednica 8: Receptura betonske mešanice s 15 mas % pepela.....	16
Preglednica 9: Receptura betonske mešanice z 20 mas % pepela.....	16
Preglednica 10: Reološki parametri vzorca R10.....	19
Preglednica 11: Reološki parametri mešanice s pepelom Ribnica.....	19
Preglednica 12: Reološki parametri mešanice s pepelom Avstrija.....	19
Preglednica 13: Reološki parametri mešanice s pepelom Energoles.....	19
Preglednica 14: Reološki parametri mešanice s pepelom Vipap.....	19
Preglednica 15: Reološki parametri mešanice s cementom - referenca.....	19

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 0/2 mm	7
Grafikon 2: Porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 4/8 mm	7
Grafikon 3: T/N diagram za vzorec R10.....	18
Grafikon 4: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Ribnica	21
Grafikon 5: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Avstrija.....	22
Grafikon 6: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Energoles	22
Grafikon 7: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Vipap	23
Grafikon 8: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov z 10 mas % pepela.....	24
Grafikon 9: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov s 15 mas % pepela.....	24
Grafikon 10: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov z 20 mas % pepela.....	25
Grafikon 11: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Ribnica	26
Grafikon 12: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Avstrija	27
Grafikon 13: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Energoles.....	27
Grafikon 14: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Vipap.....	28
Grafikon 15: Primerjava upogibnih trdnosti f_{ct} betonov z 10 mas % pepela.....	28
Grafikon 16: Primerjava upogibnih trdnosti f_{ct} betonov s 15 % pepela	29
Grafikon 17: Primerjava upogibnih trdnosti f_{ct} betonov z 20 mas % pepela.....	29
Grafikon 18: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov z 10 mas % pepela	31
Grafikon 19: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov s 15 mas % pepela	31
Grafikon 20: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov z 20 mas % pepela	32
Grafikon 21: Absolutne vrednosti dinamičnih modulov elastičnosti betonov po 28. dneh	33
Grafikon 22: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Ribnica	34
Grafikon 23: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Avstrija	35
Grafikon 24: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Energoles.....	35
Grafikon 25: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Vipap.....	36
Grafikon 26: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov z 10 mas % pepela	37
Grafikon 27: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov s 15 mas % pepela	37
Grafikon 28: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov z 20 mas % pepela	38
Grafikon 29: Mase betonov s pepelom Ribnica	39
Grafikon 30: Mase betonov s pepelom Avstrija	40
Grafikon 31: Mase betonov s pepelom Energoles	40
Grafikon 32: Mase betonov s pepelom Vipap	41
Grafikon 33: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 10 mas %	42
Grafikon 34: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 10 mas %	42
Grafikon 35: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 15 mas %	43

Grafikon 36: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 15 mas %	43
Grafikon 37: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 20 mas %	43
Grafikon 38: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 20 mas %	44

KAZALO SLIK

Slika 1: Tehtanje agregata	8
Slika 2: Tehtanje vode	15
Slika 3: Priprava betonske mešanice	17
Slika 4: Preizkus tlačne trdnosti betonov	20
Slika 5: Preizkus upogibne trdnosti betonov	26
Slika 6: Preizkus cepilne trdnosti betonov	30

OKRAJŠAVE

Skozi celotno diplomsko nalogo uporabljamo okrajšave za betonske mešanice z različnimi masnimi deleži pepela. Te so razložene v spodnji preglednici.

R10	Beton z 10 mas % pepela Ribnica
R15	Beton s 15 mas % pepela Ribnica
R20	Beton z 20 mas % pepela Ribnica
A10	Beton z 10 mas % pepela Avstrija
A15	Beton s 15 mas % pepela Avstrija
A20	Beton z 20 mas % pepela Avstrija
E10	Beton z 10 mas % pepela Energoles
E15	Beton s 15 mas % pepela Energoles
E20	Beton z 20 mas % pepela Energoles
V10	Beton z 10 mas % pepela Vipap
V15	Beton s 15 mas % pepela Vipap
V20	Beton z 20 mas % pepela Vipap
CEM	Beton z 0 mas % pepela - referenca

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Cementna pasta je poleg mineralnega agregata ključna sestavina betona. Ta s strjevanjem preide v cementni kamen in tvori od 25 do 40% celotne prostornine betona. Njene lastnosti so odvisne od cementa, vode in posebnih dodatkov (Žarnić, 2005).

Znano je, da proizvodnja cementa vključuje intenzivno rabo surovin ter energije, poleg tega se v ozračje sprosti velika količina ogljikovega dioksida. Raziskave so pokazale, da se s proizvodnjo 1 tona cementa v ozračje sprosti okoli 670 kg ogljikovega dioksida (Ban & Ramli, 2011). Povečevanje uporabe cementa posledično pomeni bolj onesnaženo okolje. V današnjem času je tudi v gradbeništvu upoštevana potreba po trajnostnem razvoju in učinkoviti rabi virov. To pomeni, da se naravne surovine morajo nadomeščati z alternativnimi ali sekundarnimi surovinami. Glede na količino in lastnosti alternativnih ali sekundarnih surovin so najbolj perspektivni različni industrijski ostanki, ki imajo lahko status odpadka ali stranskega proizvoda. Nadomeščanje cementa z lesnim pepelom pomeni ohranjanje naravnih surovin, zmanjšanje porabljene energije, ki je potrebna za proizvodnjo cementa in posledično nižje stroške priprave betona ter predvsem nižji ogljični odtis betona.

Glede na to, da današnji trend proizvodnje toplotne in električne energije stremi k uporabi obnovljivih virov, se lesna biomasa v velikih količinah že uporablja v ta namen.

Čeprav je termična obdelava lesne biomase trajosten in obnovljiv vir energije, lahko lesni pepel predstavlja veliko okoljsko obremenitev, če se z njim ne upravlja pravilno. Lesni pepel je pretežno v obliki prahu, ki se po zraku lahko širi v okolico in povzroči bolezni dihal pri ljudeh, ki živijo v bližini odlagališč pepela. Polega tega zaradi morebitne prisotnosti topnih težkih kovin predstavlja nevarnost za onesnaženje podtalnice.

Vključevanje lesnega pepela v betonske kompozite predstavlja trajosten način ravnanja z lesnimi pepeli.

V raziskavah je lesni pepel nadomestil del cementa v tako imenovanih zelenih betonih. Rezultati raziskav so pokazali, da lahko lesni pepel učinkovito uporabimo kot nadomestek cementa v maltah in betonu. Nekateri raziskovalci so že proučevali fizikalne in kemijske lastnosti lesnih pepelov ter reološke, mehanske in trajnostne lastnosti »zelene« malte in betona. Rezultati so izkazovali sprejemljive trdnostne in trajnostne karakteristike (Ban & Ramli, 2011).

1.1 Cilj diplomske naloge

Cilj diplomskega dela je ugotoviti ali je lesni pepel in pepel iz papirniškega mulja primeren nadomestek dela cementa v betonskih kompozitih iz vidika reoloških, mehanskih in mineraloških lastnosti. Z uporabo reometra smo ugotavljali, kako lesni pepel vpliva na strižno napetost na meji tečenja in viskoznost svežega betona. S pomočjo merjenja časovno odvisnih sprememb dolžine preizkušancev z deformetrom smo pokazali, kako lesni pepel vpliva na spremembo dolžine betonskega kompozita in ali v času namakanja v vodi nabreka. Preverili smo tlačno, upogibno in cepilno trdnost in ugotavljali, za koliko se razlikujejo od trdnosti referenčnega betona. Preverili smo tudi vpliv lesnega pepela v betonu na dinamični modul elastičnosti. Mikrostruktura novih betonov in fazna sestava sta bili analizirani z metodo rentgenske praškovne difrakcije (XRD) in vrstično elektronsko mikroskopijo, sklopljeno z elektronsko disperzijsko spektroskopijo (SEM/EDS). Preiskave z elektronskim mikroskopom smo opravili šele v začetku septembra 2014, zato rezultatov teh preiskav in pripadajočih analiz v diplomsko nalogo nismo uspeli vključiti. Rezultati bodo objavljeni v poročilu o preiskavah, ki ga bomo pripravili po končani diplomu.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Lesna biomasa

Vse vrste biomas nastajajo iz sončne energije, katera se v obliki kemične energije kopiči v organizmih rastlin in živali (Slonep, 2014).

Lesna biomasa je ena najbolj prepoznavnih vrst obstoječih biomas. Pridobljeno toploto, ki jo dobimo z njenim sežigom, lahko pretvorimo v mehansko ali električno energijo. Med lesno biomaso štejemo polena vseh vrst lesa, ves odpadni lesni material, kot so žagovina, odpadki pri sečnji (stebela, lubje, veje, listje), grmičevje, peleti, briketi, sekanci, itd.

Stranski produkt sežiga katerekoli vrste biomase je pepel, a najmanjšo količino pepela proizvedemo ravno s sežigom lesne biomase (Ban & Ramli, 2011).

Lesna biomasa je CO₂ nevtralna, kar pomeni, da ne prispeva k segrevanju ozračja. Lesna biomasa tako pri gnitju kot pri izgorevanju odda toliko CO₂, kot ga je drevo porabilo v času svoje rasti. Zato je bilanca CO₂ lesne biomase izravnana.

Ogljik (C), kisik (O) in vodik (H) so kemijski elementi, ki predstavljajo 99 % suhe snovi lesa. V različnih odstotkih so ti kemijski elementi razporejeni v lesu in skorji, spet drugače pri iglavcih kot pri listavcih (Krajnc in sodel., 2009). V Preglednici 1 je prikazana kemična sestava lesa iglavcev in listavcev v Preglednici 2 pa kemična sestava lubja iglavcev in listavcev.

Preglednica 1: Kemična sestava lesa: les iglavcev in listavcev (Krajnc in sodel., 2009)

Parameter	Enota	Les iglavcev		Les listavcev	
		značilna vrednost	značilna variacija	značilna vrednost	značilna variacija
Ogljik, C	w-% d ¹	51	od 47 do 54	49	od 48 do 52
Vodik, H		6,3	od 5,6 do 7,0	6,2	od 5,9 do 6,5
Kisik, O		42	od 40 do 44	44	od 41 do 45
Dušik, N		0,1	< 0,1 do 0,5	0,1	< 0,1 do 0,5
Žveplo, S		0,02	< 0,01 do 0,05	0,02	< 0,01 do 0,05
Klor, Cl		0,01	< 0,01 do 0,03	0,01	< 0,01 do 0,03
Fluor, F		< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005

Preglednica 2: Kemična sestava lesa: skorja iglavcev in listavcev (Krajnc in sodel., 2009)

Parameter	Enota	Skorja iglavcev		Skorja listavcev	
		značilna vrednost	značilna variacija	značilna vrednost	značilna variacija
Ogljik, C	w-% d ²	54	od 51 do 56	55	od 52 do 56
Vodik, H		6,1	od 5,9 do 6,5	6,1	od 5,9 do 6,5
Kisik, O		40	od 36 do 43	40	od 36 do 43
Dušik, N		0,5	< 0,3 do 1,2	0,3	< 0,1 do 1,0
Žveplo, S		0,10	< 0,02 do 0,20	0,10	< 0,02 do 0,20
Klor, Cl		0,02	< 0,01 do 0,05	0,02	< 0,01 do 0,05
Fluor, F		0,001	< 0,0005 do 0,002		

2.2 Lesni pepel

Lesni pepel je trdni mineralni ostanek po sežigu lesa in je sestavljen iz heterogenih, različno velikih delcev. Lahko ga razdelimo na dve skupini, in sicer na pepel izpod rešetke (bottom ash) in leteči pepel (fly ash), ki nastane pri čiščenju dimnih plinov. Pepel izpod rešetke predstavlja količinsko večinski delež pepela. Leteči pepel lahko razdelimo še na dve podskupini:

- lahki ciklonski pepel,
- drobni delci iz elektrostatičnih in vrečastih filtrov.

Kemijski elementi, kateri najbolj obremenjujejo okolje (baker, krom, arzen, barij, svinec, kadmij in cink) se večinoma nabirajo v drobnem pepelu (Krajnc in sodel., 2009).

Nizka gostota lesnega pepela v primerjavi s cementom kaže na možnost zmanjšanja teže samega betona. Mikroskopska analiza z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM) kaže, da je lesni pepel, ki je nastal ob sežigu lesa pri 1000 °C, sestavljen iz dveh prevladujočih faz. Iz

¹ w-% d – delež mase na suho osnovo

² w-% d – delež mase na suho osnovo

vlaknen, v obliki neprekinjenih plasti in kot granulirana faza. Vlakna imajo visoko vsebnost ogljika, medtem ko je granulirana faza večinoma iz silicijevega dioksida in aluminijevega oksida. Lesni pepel bi bil lahko zaradi svojih dobrih pucolanskih lastnosti dober nadomestek cementa (Ban & Ramli, 2011).

Obstaja več dejavnikov, ki vplivajo na kvantiteto in kvaliteto lesnega pepela. Mednje spadajo:

- temperatura toplotne obdelave lesne biomase,
- vrsta peči in
- drevesna vrsta iz katerega je bila pridobljena lesna biomasa.

Ti dejavniki poglavitno odločajo o primernosti uporabe lesnega pepela v maltah in betonih. S povišanjem temperature sežiga se količina lesnega pepela zmanjša. Zmanjšanje količine lesnega pepela za 45 % lahko dosežemo s povečanjem temperature s 538 °C na 1093 °C (to ni racionalno, vsako poviševanje T je strošek). Če gorenje poteka pri temperaturi pod 500 °C, v lesnem pepelu prevladujejo karbonatne in bikarbonatne spojine, še posebej kalcit (CaCO_3). Sežig lesnih odpadkov na temperaturi preko 1000 °C povzroči velik upad karbonatnih sestavin, kar je posledica kemične razgradnje nekaterih spojin. Torej, pri višji temperaturi sežiga, 1000 °C, kar je običajna operativna temperatura za večino peči na lesno biomaso, spojine, kot je apno (CaO), postanejo prevladujoča mineralna faza v lesnem pepelu.

Zmanjšanje vsebnosti karbonatnih in bikarbonatnih spojin, kot posledica povišane temperature, zviša alkalnost lesnega pepela. Tudi znižanje vsebnosti topnih kovin, kot so kalij, natrij in cink je posledica povišanja temperature.

Vrsta drevesa je najpomembnejši faktor, ki vpliva na kemijsko sestavo lesnega pepela. Kemijska sestava bistvenih oksidnih spojin, ki določa perspektivnost lesnega pepela kot nadomestek cementa, so silicijev oksid (SiO_2), aluminijev oksid (Al_2O_3), železov oksid (Fe_2O_3) in apno (CaO) in sicer v takšni obliki, da v alkalnem mediju reagirajo (Ban in Ramli, 2011). V Preglednici 3 je prikazana kemična sestava pepela.

Preglednica 3: Kemična sestava pepela (Krajnc in sodel., 2009)

Elementi	Ime elementa	Enote	Skorja	Lesni sekanci	Žaganje
C_{org}	organski ogljik	w-% d ³	0,8	1,3	5,9
CO_2	ogljikov dioksid		4	7,2	12,5
P_2O_5	fosforjev pentoksid		1,7	3,6	2,5
K_2O	kalijev oksid		5,1	6,7	7,1

se nadaljuje...

³ w-% d – delež mase na suho osnovo

...nadaljevanje Preglednice 3

CaO	kalcijev oksid - apno		42,2	44,7	35,5
MgO	magnezijev oksid		6,5	4,8	5,7
Na ₂ O	natrijev oksid		0,8	0,6	0,5
Al ₂ O ₃	aluminijev oksid		7,1	4,6	2,3
SiO ₂	silicijev dioksid		26	25	25
SO ₃	žveplov oksid		0,6	1,9	2,4
Fe ₂ O ₃	železov oksid		3,5	2,3	3,7
MnO	manganov oksid		1,5	1,7	2,6
Cu	baker	mg/kg _{d.b.} ⁴	87,8	126,8	177,8
Zn	cink		618,6	375,7	1429,8
Co	kobalt		23,9	15,3	16,7
Mo	molibden		4,8	1,7	3,4
As	arzen		11,4	8,2	7,8
Ni	nikelj		94,1	61,5	71,9
Cr	krom		132,6	54,1	137,2
Pb	svinec		25,3	25,4	35,6
Cd	kadmij		3,9	4,8	16,8
V	vanadij		58,4	42	26,7

2.2.1 Uporaba

Lesni pepel se že uporablja v več namenov. V iglastih gozdovih se z dodajanjem pepela (če ta ni onesnažen) rešuje problem zakisanja tal, poleg tega se na ta način zemlji vračajo odvzeta hranila. Pepel se zaradi enakih razlogov uporablja tudi pri gnojenju v kmetijstvu in za alkaliziranje kislih prsti. Na ta način se v zemlji ohranja naravno ravnotežje. Na odlagališčih nenevarnih odpadkov se uporablja pepel samostojno ali v kombinaciji z dehidriranim anaerobnim blatom kot dnevna sanitarna prekrivka. V gradbeništvu se v številnih evropskih državah lesni pepel uporablja kot sekundarni gradbeni material pri izdelavi nasipov, v cestogradnji za pripravo nevezane nosilne plasti ter kot polnilo v asfaltnih mešanicah. Prednosti se na tem področju kažejo v močnejših in bolj togih voziščnih konstrukcijah in boljši zmrzlini odpornosti. Pred tem je potrebno lesni pepel ustrezno obdelati, da ima nizko koncentracijo nezgorelega ogljika in ustrezno zrnavostno sestavo. Fini delci pepela pozitivno vplivajo na zgoščenost in trdnost asfaltne mešanice (Muratović, 2011).

⁴ d.b. – suha osnova

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

3.1.1 Agregat

Agregat je ena izmed treh osnovnih sestavin betona. Beton je poleg agregata sestavljen iz cementa in vode ter praviloma tudi iz kemijskih in mineralnih dodatkov. Agregat se razlikuje glede na način pridobivanja in po petrografski sestavi. Glede na način pridobivanja ga ločimo na drobljenec in separiran peščeni prod. Drobljenec nastane z drobljenjem kamnine v kamnolomu, medtem ko prod in pesek predstavljata nevezane aluvialne nanose rek. Drobljenec ima ostre robove in hrapavo površino, kar zagotavlja dober stik z vezivom. Je pa oblika takih zrn nekoliko bolj neugodna glede obdelavnosti in vgradljivosti v primerjavi s prodnatim in peščenim agregatom. Prodnati in peščeni agregat ima zaobljene robove in je zaradi svojega izvora bolj raznolik v petrografski sestavi. Po petrografski sestavi ločimo agregat glede na vrste kamnin, iz katerih je sestavljen, kar posledično vpliva na njegove mehanske lastnosti in obstojnost (Žarnić, 2005).

Pri eksperimentalnem delu smo v vseh betonskih mešanicah uporabili drobljen apnenčev agregat z nizkim deležem drugih primesi.

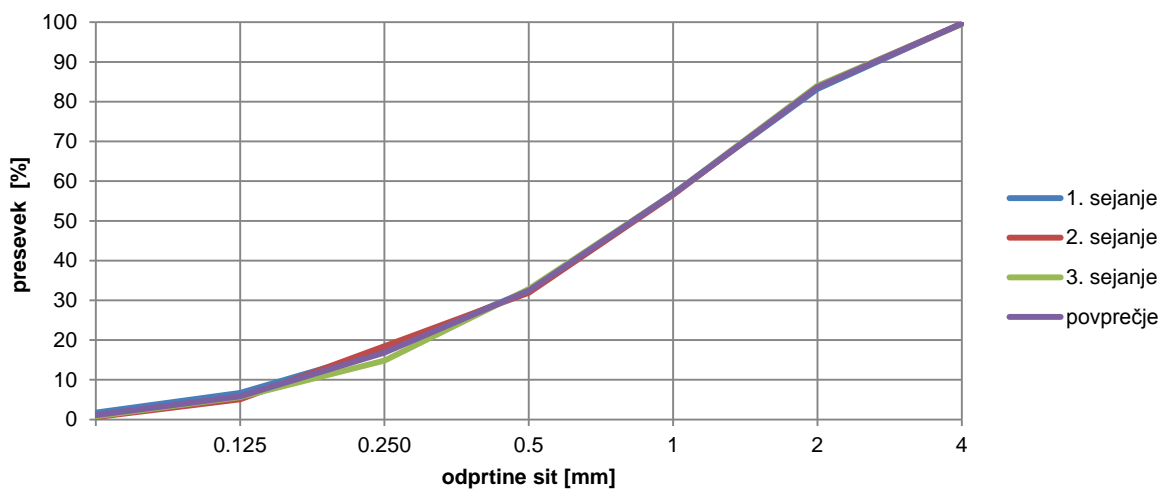
Za uporabo mineralnega agregata frakcij 0/2 mm in 4/8 mm smo se odločili na podlagi zaključkov avtorja iz predhodne diplomske naloge (Gašperič, 2013). Avtor navaja, da pri betonski mešanici, kjer je 74 mas. % agregata frakcije 0/2 mm in 26 mas. % frakcije 4/8 mm, segregacijska točka pri preiskavi določanja reoloških lastnosti svežega betona skoraj leži na regresijski premici, ki je rezultat preiskave (Gašperič, 2013), kar nakazuje na dobro zapolnjevanje praznin z manjšimi zrn. Lega segregacijske točke na regresijski premici preiskave določanja reoloških parametrov svežega betona pomeni visoko stabilnost betonske mešanice in s tem odpornost na segregacijo.

3.1.1.1 Krivulja zrnivosti

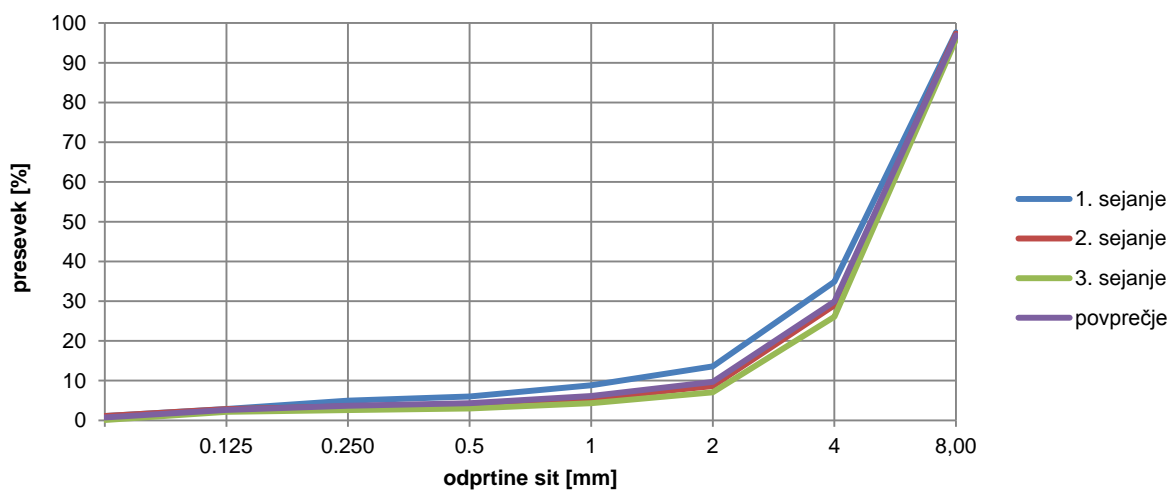
S pravilno izbiro zrnivosti sestave agregata zagotovimo ustrezne plastične lastnosti svežega betona ter dobre lastnosti strjenega betona. Ustrezna zrnivost agregata omogoča zapolnitev celega prostora in preprečuje segregacijo svežega betona (Žarnić, 2005).

Sejanje agregata frakcij 0/2 mm in 4/8 mm smo opravili trikrat, nato pa določili povprečje posamezne frakcije in izrisali krivulji. Porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 0/2 mm je

predstavljena v Grafikonu 1 in v Grafikonu 2 porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 4/8 mm.



Grafikon 1: Porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 0/2 mm



Grafikon 2: Porazdelitev velikosti zrn agregata frakcije 4/8 mm

Iz Grafikona 2 je razvidno, da agregat frakcije 4/8 mm vsebuje precej velik delež drobnih zrn, okoli 30 mas %.



Slika 1: Tehtanje agregata

3.1.2 Cement

V betonskih mešanicah smo uporabili portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 in z visoko zgornjo trdnostjo (R), z oznako CEM I 42,5 R v skladu z določili SIST EN 197-1: 2011. Krajši čas vezanja in visoke začetne in končne trdnosti so njegove glavne lastnosti. Dosežena vrednost začetne trdnosti (2 dni) je ≥ 31 MPa, končna trdnost (28 dni) pa ≥ 57 MPa. Sestavljen je iz minimalno 95 % portlandskega cementnega klinkerja in regulatorja vezanja - sadre.

3.1.3 Pepeli

V diplomski nalogi smo uporabili tri pepele iz različnih podjetij, kjer lesni pepel nastaja kot odpadek pri sežigu biomase in pepel, ki nastaja pri sežigu papirniškega mulja.

3.1.3.1 Pepel Ribnica

Lesni pepel Ribnica nastaja kot odpadek v kotlovnici na biomaso pri proizvodnji toplote za potrebe daljinskega ogrevanja, kjer se kot gorivo uporabljajo lesni sekanci iz neobdelanega lesa. Pepel je rjave barve z delci pod 1 mm (Pavšič in Mladenovič, 2013). Temperatura pri sežigu je cca 800 °C. Pepel podjetje odlaga na svoji deponiji pod klasifikacijsko številko odpadka 10 01 01 (pepel, žindra in kotlovski prah) (Mladenovič, osebna komunikacija). V Preglednici 4 so predstavljene vrednosti parametrov izlužka pepela Ribnica.

Preglednica 4: Vrednosti parametrov izlužka pepela Ribnica (Pavšič in Mladenovič, 2013)

Parameter		Enota	Vrednosti izlužka Ribnica pepela	Mejna vrednost parametra izlužka za INERTNE ODPADKE*	Mejna vrednost parametra izlužka za NENEVARNE ODPADKE*
pH			13		
As	Arzen	mg/kg suhe snovi	< 0,2	0,5	2
Ba	Barij		620	20	100
Cd	Kadmij		< 0,3	0,04	1
Cr	Celotni krom		7,4	0,5	10
Cu	Baker		0,7	2	50
Hg	Živo srebro		< 0,02	0,01	0,2
Mo	Molibden		3	0,5	10
Ni	Nikelj		< 0,1	0,4	10
Pb	Svinec		0,7	0,5	10
Sb	Antimon		< 0,02	0,06	0,7
Se	Selen		< 1	0,1	0,5
Zn	Cink		<10	4	50
Cl	Kloridi		460	800	15 000
F	Fluoridi		< 100	10	150
SO ₄	Sulfati		3460	1000	20 000

Glede na vrednosti elementov v izlužkih pepel uvrščamo med nenevarne odpadke, saj ga zaradi prekoračitve mejne vrednosti barija, celotnega kroma, molibdena, svinca in sulfatov (obarvano rumeno), ne moremo uvrstiti med inertne odpadke.

3.1.3.2 Pepel Avstrija

Gre za pepel čiste biomase iz podjetja Bioenergie, Steinach, Avstrija (Mladenovič, osebna komunikacija). Več podatkov ni bilo mogoče pridobiti.

*Mejne vrednosti glede na Uredbo o odlagališčih odpadkov (Ur.l. RS 10/2014)

3.1.3.3 Pepel Energoles

Osnovna dejavnost podjetja Energoles Bohor d.o.o. je žaganje, parjenje in sušenje lesa ter prodaja žaganega lesa in rezanega furnirja. Odpadke, ki nastanejo kot stranski proizvod njihove dejavnosti in odpadke, ki jih prejmejo od zunanjih dobaviteljev, na podlagi Uredbe o ravnanju z odpadki (Ur. l. RS, št. 34/08) razvrščajo pod naslednjimi klasifikacijskimi številkami:

- 03 01 05 (žagovina, oblanci, sekanci, odrezki, les, delci plošč in furnir, ki niso navedeni pod 03 01 04). 90 % odpadka je iz lesa drevesnih vrst bukve, hrasta in gabra, ostalo predstavlja les smreke in jelke. Odpadna lesna biomasa je rjavo obarvana in ima vonj po naravnem lesu. Sestavljajo jo predvsem sekanci, krajniki, odčelki, oblanci in žagovina. Odpadek ni lakiran, ni oplemeniten s PVC in v njem ni prisotnih ivernih plošč. Odpadek prejmejo od zunanjih dobaviteljev ter pri postopkih žaganja in razreza v lastni proizvodnji. Odpadek je zmlet. Na podlagi Uredbe o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo (Ur. l. RS št. 57/08), skladno s prilogo 2, vsebnosti bora, arzena, bakra, živega srebra in klora ne presegajo mejnih vrednosti za naravni les. Vsebnost fluora pa ne presega mejne vrednosti za obdelani les (Inštitut za ekološke raziskave d.o.o., 2013).
- 15 01 03 (lesna embalaža). Odpadek predstavlja zmleto odpadno lesno embalažo; lesne zabojnike in palete iz naravnega lesa. Prisotni so tudi posamezni delci ivernih plošč (<5 %). Posamezni delci so lakirani, nekateri tudi PVC oplemeniteni (<5 %). Odpadek je zmlet, njegova velikost znaša okoli 5 cm. Je rjavo obarvan (prisotni so posamezni beli delci) in ima šibak vonj po naravnem lesu. To vrsto odpadka podjetje prevzema od zunanjih dobaviteljev. Na podlagi Uredbe o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo (Ur. l. RS št. 57/08), skladno s prilogo 2, vsebnosti bora, arzena, bakra in živega srebra ne presegajo mejnih vrednosti za naravni les. Vsebnosti klora in fluora ne presegajo mejnih vrednosti za obdelani les (Inštitut za ekološke raziskave d.o.o., 2013).
- 19 12 07 (les, ki ni naveden pod 19 12 06). Odpadek predstavlja zmleto mešanico različne vrste odpadnega lesa, kjer prevladujejo stavbno pohištvo, pokvarjeno pohištvo in različni kosi lesa. Prisotni so tudi posamezni delci ivernih plošč (<10 %). Odpadek je zmlet, velikost delcev znaša do cca 5 cm. Je rjavo obarvan (prisotni so posamezni beli delci) in ima šibak vonj po naravnem lesu. Odpadke prevzemajo od zunanjih dobaviteljev. Na podlagi Uredbe o predelavi nenevarnih odpadkov v trdno gorivo (Ur. l. RS št. 57/08), skladno s prilogo 2, vsebnosti bora, arzena, bakra in živega srebra ne presegajo mejnih vrednosti za naravni les. Vsebnosti klora in fluora

ne presegajo mejnih vrednosti za obdelani les (Inštitut za ekološke raziskave d.o.o., 2013).

- 03 01 01 (lubje)
- 20 01 38 (les, ki ne vsebuje nevarne snovi) (Energoles Bohor d.o.o, osebna komunikacija).

Vse vrste odpadkov v podjetju sežigajo mešano glede na razpoložljivo količino (Energoles Bohor d.o.o, osebna komunikacija). Sežig sekancev se vrši na kurišču s poševnimi zračno hlajenimi rešetkami, s 7,8 MW. Temperatura v kurišču variira med 800 °C in 1100 °C. Temperatura v kurišču je odvisna predvsem od potreb po toploti ter od suhosti oz. vlažnosti lesnih sekancev. Toploto porabljajo za izdelovanje furnirja, parjenja lesa, sušenje žaganega lesa in ogrevanje objektov. S pomočjo batnega stroja proizvajajo električno energijo. Pepel nastaja v kurišču kot ostanek goriva, ki ne oksidira z vpihanim zrakom skozi rešetke. Najbolj droben in sipek pepel pada skozi rešetke, od koder ga vijačnice (»polži«) potisnejo v glavni zbirni vod, ki transportira pepel v dnevni zbirnik pepela. Bolj grob, včasih zaradi visoke temperature tudi delno raztaljen, sintrani pepel, potisnejo rešetnice v kanal na dnu kurišča, od koder ga vodno hlajeni polž potisne v glavni zbirni vod. Temu se pridruži tudi pepel, ki je tako droben, da se ujame šele na električno nabitih ploščah elektrofiltra, ki čisti dimne pline (Zavod za zdravstveno varstvo Celje, 2012). Pepela, ki prihaja iz kotlovnice ne ločujejo. Zberejo ga v zabojniku in ga nato odpeljejo na začasno deponijo (Energoles Bohor d.o.o, osebna komunikacija). Na podlagi Uredbe o odpadkih (Ur. l. RS, št. 103/11) je uvrščen v skupino 10 01 s klasifikacijsko številko 10 01 01. Pepel je na videz praškast material s primesmi manjših delcev (ostanki kovin) do velikosti 5 cm. Pepel lahko povzroči onesnaženje vode s trdnimi delci. Odpadek je ustrezen za odlaganje na odlagališču za nenevarne odpadke, pod pogojem, da omenjenemu pepelu niso dodani drugi odpadki (pepeli od sežiganja drugih odpadkov). Odpadki niso namenjeni prekrivanju odlagališč (Zavod za zdravstveno varstvo Celje, 2012). V Preglednici 5 so predstavljene vrednosti parametrov izlužka pepela Energoles.

Preglednica 5: Vrednosti parametrov izlužka pepela Energoles (Zavod za zdravstveno varstvo Celje, 2012)

Parameter		Enota	Vrednosti izlužka Energoles pepela	Mejna vrednost parametra izlužka za INERTNE ODPADKE*	Mejna vrednost parametra izlužka za NENEVARNE ODPADKE*
As	Arzen	mg/kg suhe snovi	< 0,1	0,5	2
Ba	Barij		37	20	100
Cd	Kadmij		< 0,01	0,04	1
Cr	Celotni krom		< 0,1	0,5	10
Cu	Baker		< 0,1	2	50
Hg	Živo srebro		< 0,01	0,01	0,2
Mo	Molibden		0,1	0,5	10
Ni	Nikelj		0,1	0,4	10
Pb	Svinec		1,6	0,5	10
Sb	Antimon		< 0,1	0,06	0,7
Se	Selen		< 0,1	0,1	0,5
Zn	Cink		2,2	4	50
Cl	Kloridi		ni bilo analizirano	800	15 000
F	Fluoridi		< 4	10	150
SO ₄	Sulfati		ni bilo analizirano	1000	20 000

Odpadek, glede na rezultate analiz preiskanih parametrov in določila Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališča (Ur. l. št. 61/11), skladno s priložo 3, ustreza za odlaganje na odlagališču za nenevarne odpadke, a pod pogojem, da omenjenemu pepelu niso dodani drugi odpadki (pepeli od sežiganja drugih odpadkov). Odpadki niso namenjeni prekrivanju odlagališč (Zavod za zdravstveno varstvo Celje, 2012). Parametra barij in svinec presegata mejne vrednosti za inertne odpadke.

Sedaj podjetju odpadni pepel odvažajo podjetja, ki se ukvarjajo s prevzemanjem odpadkov (Saubermacher, CEP, Simbio) (Energoles Bohor d.o.o, osebna komunikacija).

* Mejne vrednosti glede na Uredbo o odlagališčih odpadkov (Ur.l. RS 10/2014)

3.1.3.4 Pepel Vipap

Pepel papirniškega mulja Vipap nastaja kot odpadek na parnem kotlu podjetja Vipap d.d. Zanj ima podjetje slovensko tehnično soglasje s številko STS-09/0065. Proizvod imenovan Mulex se v gradbeništvu uporablja za konstrukcijske nasipe in zasipe, ki niso podvrženi dinamičnim obremenitvam, v cestogradnji za poboljšanje zemljin, v kmetijstvu in gozdarstvu za utrjevanje gozdnih in poljskih poti, pri sanaciji degradiranih območij (gramoznic in kamnolomov) in za gradnjo pokrovov (izravnalni oz. prekrivni sloj) na odlagališčih odpadkov. Na kotlu se kot gorivo uporablja odpadni vlaknasti mulji iz deinking procesa proizvodnje in predelave papirja (zmes pretežno grobih lesovinskih in celuloznih vlaken in polnil), lahko tudi odpadno lubje in lesni odpadki. Ostanek gorenja je sestavljen iz pepela izpod rešetke, ki ga imenujejo tudi žindra (90 mas %) in elektrofiltrskega pepela (10 mas %) (STS; ZAG, 2014). Pepel je sive barve z delci pod 1 mm (Mladenovič in Pavšič, 2013). V Preglednici 6 so predstavljene vrednosti parametrov izlužka pepela Vipap.

Preglednica 6: Vrednosti parametrov izlužka pepela Vipap (Pavšič in Mladenovič, 2013)

Parameter	Enota	Vrednosti izlužka Vipap pepela	Mejna vrednost parametra izlužka za INERTNE ODPADKE*	Mejna vrednost parametra izlužka za NENEVARNE ODPADKE*
pH		12,5		
As	Arzen	< 0,2	0,5	2
Ba	Barij	590	20	100
Cd	Kadmij	0,05	0,04	1
Cr	Celotni krom	< 0,1	0,5	10
Cu	Baker	< 0,7	2	50
Hg	Živo srebro	< 0,04	0,01	0,2
Mo	Molibden	< 0,5	0,5	10
Ni	Nikelj	0,5	0,4	10
Pb	Svinec	< 0,5	0,5	10
Sb	Antimon	< 0,06	0,06	0,7
Se	Selen	< 0,1	0,1	0,5
Zn	Cink	1	4	50
Cl	Kloridi	250	800	15 000
F	Fluoridi	50	10	150
SO ₄	Sulfati	< 50	1000	20 000

* Mejne vrednosti glede na Uredbo o odlagališčih odpadkov (Ur.l. RS 10/2014)

Na podlagi vodnih izlužkov pepel uvrščamo med nenevarne odpadke, saj zaradi povišane vrednosti barija, kadmija, niklja in fluoridov ne moremo pepela uvrščati med inertne odpadke.

3.1.4 Superplastifikator

Superplastifikatorji so najpomembnejša skupina kemijskih dodatkov za beton. Njihov učinek je odvisen od vrsto dejavnikov, kot so kemijska in mineralna sestava cementa (C_3A , topni sulfati, specifična površina, vsebnost mineralnih dodatkov, dodatkov za mletje cementa,...), doza cementa, vrsta in sestava agregata, morebitnih drugih kemijskih dodatkov in pogojev dela. Ne glede na kemijsko sestavo, vsi superplastifikatorji izkazujejo v betonu enak učinek:

- omogočajo zmanjšanje količine cementa in
- vodocementnega razmerja (V/C faktor) za določeno obdelavnost (Černilogar, 2010).

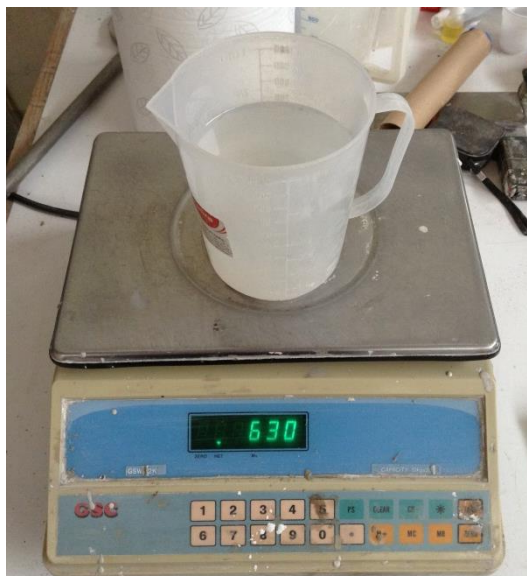
Glavna vloga superplastifikatorjev je zmanjševanje viskoznosti betona.

V betonskih mešanica smo uporabili superplastifikator polifosfonatnega tipa, katerega proizvaja slovensko podjetje. Gre za nov proizvod, ki še ni dostopen na trgu. V mešanico smo ga dodajali v količini 2 mas % glede na skupno maso cementa in pepela. Za tehtanje smo uporabili tehtnico z natančnostjo $\pm 0,01$ grama.

Na podlagi ugotovitve predhodne diplomske naloge (Gašperič, 2011) smo se odločili za razkalupljenje preizkušancev po dveh dneh, saj se je v tej nalogi pokazalo, da so pri uporabi te vrste superplastifikatorja preizkušanci po približno 24 urah od vgradnje v kalupe, dobesedno razpadli. Avtor navaja, da so po dveh dneh imeli preizkušanci veliko večjo tlačno trdnost.

3.1.5 Voda

Voda, ki smo jo uporabili pri pripravi betonskih mešanic, je bila odvzeta iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in je ni bilo potrebno dodatno preizkusiti glede na standard SIST EN 1008:2003. Na Sliki 2 je prikazano tehtanje vode.



Slika 2: Tehtanje vode

3.1.6 Recepture betonskih mešanic

Za eksperimentalni del diplomske naloge smo pripravili 13 sestav betonskih mešanic, v katerih smo cement nadomestili z različnimi deleži pepela. Uporabili smo štiri različne vrste pepela, kot referenčno (primerjalno) mešanico pa smo izbrali betonsko mešanico s 100 mas % cementa. Deleži pepela, s katerimi smo nadomestili cement, znašajo 10, 15 in 20 mas %. Vse recepture so preračunane na 3,5 l svežega betona. To je količina za napolnitev treh tridelnih kalupov za izdelavo maltnih prizem (9 prizem). Za tehtanje vhodnih materialov smo uporabili tehtnico z natančnostjo ± 2 grama.

Preglednica 7: Receptura betonske mešanice z 10 mas % pepela

komponenta	masa [g]
agregat (frakcija 0/2)	4610
agregat (frakcija 4/8)	1620
cement	1261
pepel	116
voda	630
superplastifikator	27,54

Preglednica 8: Receptura betonske mešanice s 15 mas % pepela

komponenta	masa [g]
agregat (frakcija 0/2)	4610
agregat (frakcija 4/8)	1620
cement	1190
pepel	174
voda	630
superplastifikator	27,28

Preglednica 9: Receptura betonske mešanice z 20 mas % pepela

komponenta	masa [g]
agregat (frakcija 0/2)	4610
agregat (frakcija 4/8)	1620
cement	1120
pepel	232
voda	630
superplastifikator	27,07

3.1.6.1 Priprava mešanic

Betonske mešanice smo pripravili v mešalcu za malte, v katerem se lahko uporabi agregat z največjim premerom zrna 8 mm. Mešalnik je sestavljen iz mešalne posode in lopatice, ki se med mešanjem obrača okoli svoje lastne in pogonske osi.

Na začetku smo pripravili potrebne sestavine, z vlažno krpo omočili notranjost posode in lopatico. Nato smo v posodo stresli natehtan cement ter pepel in nastavili mešalec na 1. stopnjo hitrosti. V prvih 30 sekundah smo dodali vodo in superplastifikator. V naslednjih 30 sekundah smo postopoma dodajali obe vrsti agregata in nato nastavili mešalnik na 2. stopnjo hitrosti za čas 3 min., da smo dobili pravilno konsistenco betona. Po opravljenih reoloških raziskavah smo beton vgradili v maltne kalupe. Po 48 h smo jih razkalupili in položili v vodo (nega betona). Na Sliki 3 je prikazana priprava betonske mešanice.



Slika 3: Priprava betonske mešanice

3.2 Rezultati raziskav

3.2.1 Reološke raziskave

Na podlagi reoloških meritev lahko preučimo vplive posameznih komponent na lastnosti svežega betona in si pomagamo pri optimizaciji opreme v procesu vgradnje betona. Osnovna naloga teh meritev je izmeriti strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala.

Reološki konstanti τ_0 (strižna napetost na meji tečenja) in μ (plastična viskoznost) sta rezultat naših meritev. Vendar do njih ne pridemo neposredno, ampak preko konstant G in H. Začetni rezultat naših meritev je predstavljen v diagramu kot moment v odvisnosti od hitrosti, preko enačbe:

$$T = G + H * N \quad (1)$$

T...upor proti striženju (merjena vrednost momenta stacionarnega notranjega valja) [Nm]

G...moment na meji tečenja (moment potreben za začetek ali konec gibanja tekočine v vzorcu) [Nm]

H...koeficient viskoznosti (odpornost sveže mešanice proti naraščanju hitrosti gibanja) [Nm/s]

N...frekvenca vrtenja zunanjega valja [obrat/s]

B. Štupar (2012) je v svoji diplomski nalogi izmeril polmer zunanjega valja ($r_i = 101,59$ mm) in polmer notranjega valja ($r_o = 86,17$ mm), ter določil najprimernejšo višino vzorca ($h = 81$ mm) za reometrične meritve na maltah in betonih z največjim zrnom 8 mm.

Za izračun parametrov τ in μ , B. Štupar (2012) podaja poenostavljeni enačbi:

$$\tau_0 = G * \frac{K_{\tau_0}}{h} \quad (2)$$

$$\mu = H * \frac{K_{\mu}}{h} \quad (3)$$

kjer sta faktorja K_{τ_0} in K_{μ} odvisna samo od polmera notranjega in zunanjega valja. Vrednost $K_{\tau_0} = 18,264 \text{ m}^{-2}$ in $K_{\mu} = 0,479 \text{ m}^{-2}$. (B. Štupar, 2012)

Najbolj pogost zapis Binghamove enačbe je:

$$\tau = \tau_0 + \dot{\gamma} * \mu \quad (4)$$

τ ...strižna napetost [Pa]

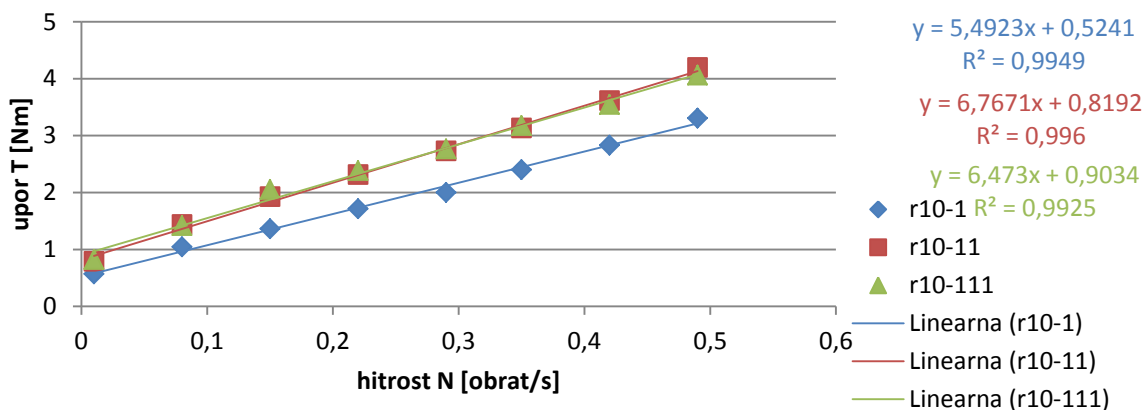
$\dot{\gamma}$...strižna hitrost [rad/s]

τ_0 ...strižna napetost na meji tečenja (začetna napetost, da tekočina steče ali neha teči) [Pa]

μ ...plastična viskoznost [Pas]

Ko je bila mešanica pripravljena, smo jo vlili v reometrično posodo in reološke raziskave opravili po 0 min, 30 min in 60 min, da bi ugotovili, kako se lastnosti svežega betona v tem časovnem okviru spreminjajo. Na podlagi podatkov T/N točk, ki smo jih dobili s pomočjo reometra, smo izrisali diagrame, T/N točkam določili regresijsko premico in pripadajočo enačbo in na podlagi te odčitali parametra G in H. Nato smo z enačbama (2) in (3), izračunali parametra τ_0 in μ .

V Grafikonu 3 navajamo primer izrisa diagrama na podlagi T/N točk, ki nam jih je podal reometer za mešanico A10.



Grafikon 3: T/N diagram za vzorec R10

Preglednica 10: Reološki parametri vzorca R10

	r10-1	r10-11	r10-111
G	0,5241	0,8192	0,9034
H	5,4923	6,7671	6,473
τ_0	118,17	184,71	203,70
μ	32,48	40,02	38,28

Preglednica 11: Reološki parametri mešanice s pepelom Ribnica

	R10			R15			R20		
	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min
τ_0 [Pa]	118,17	184,71	203,70	188,25	326,18	337,32	263,90	406,00	415,34
μ [Pas]	32,48	40,02	38,28	41,49	53,30	52,43	52,81	57,63	62,57

Preglednica 12: Reološki parametri mešanice s pepelom Avstrija

	A10			A15			A20		
	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min
τ_0 [Pa]	219,46	233,37	270,53	222,10	252,02	285,28	279,85	284,22	291,73
μ [Pas]	52,36	52,23	51,03	47,95	49,77	48,91	48,15	48,28	50,36

Preglednica 13: Reološki parametri mešanice s pepelom Energoles

	E10			E15			E20		
	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min
τ_0 [Pa]	229,13	239,33	259,87	194,86	210,08	216,01	307,71	324,02	327,65
μ [Pas]	46,06	44,35	44,27	38,00	41,00	40,66	51,94	52,96	52,84

Preglednica 14: Reološki parametri mešanice s pepelom Vipap

	V10			V15			V20		
	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min	0 min	30 min	60 min
τ_0 [Pa]	340,91	418,09	451,14	509,66	568,62	612,95	621,47	635,61	658,72
μ [Pas]	26,13	29,30	31,15	24,46	29,75	33,37	24,15	28,86	31,00

Preglednica 15: Reološki parametri mešanice s cementom - referenca

	CEM		
	0 min	30 min	60 min
τ_0 [Pa]	209,45	236,91	246,59
μ [Pas]	44,49	48,68	46,41

Na podlagi rezultatov lahko vidimo, da se strižna napetost na meji tečenja pri vseh mešanicah s časom in povečanjem količine pepela povečuje, kar nakazuje na potrebno povečanje energije za premik betonske mešanice v gibanje (za črpanje, za zgoščanje betona z vibratorjem). Plastična viskoznost se v danem časovnem obdobju nekoliko poveča pri vseh mešanicah, prav tako s povečanjem količine pepela. Vrednostim referenčne mešanice se še najbolj približa mešanica z oznako E10, medtem ko je največja razlika ugotovljena pri mešanicah s pepelom Vipap. Reološki parametri mešanice s pepelom Vipap imajo nizko viskoznost in visoko strižno napetost na meji tečenja.

3.2.2 Tlačna trdnost f_c

Tlačna trdnost betona je definirana kot največja izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Na trdnost betona vpliva vodocementni količnik (V/C) ter stopnja dosežene hidratacije cementnega kamna, ki je v normalnih razmerah proporcionalna starosti betona (Žarnić, 2005). Na Sliki 4 je prikazan preizkus tlačne trdnosti betonov.



Slika 4: Preizkus tlačne trdnosti betonov

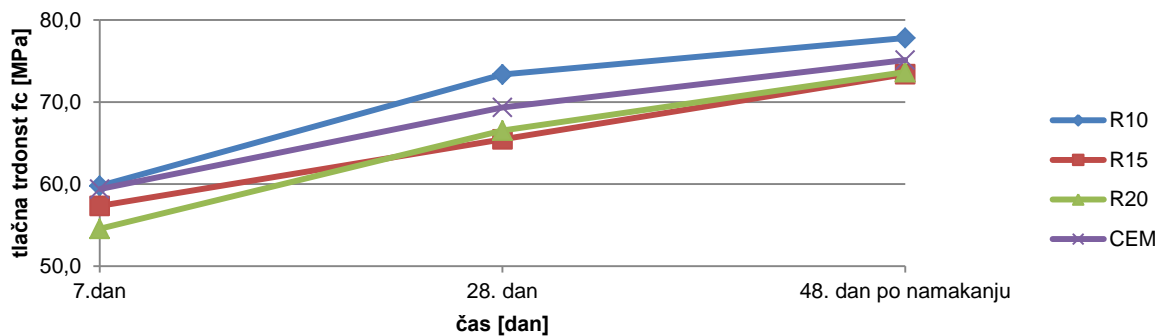
Preizkus tlačne trdnosti smo najprej izvedli po 7 in 28 dneh starosti betona. Opravili pa smo ga tudi na prizmah, na katerih smo spremljali spreminjanje dimenzij prizem s časom. Ko se je krčenje prizem zaradi sušenja prenehalo, smo prizme položili v vodo za 48 dni in na njih spremljali nabrekanje. Potem smo jih vzeli iz vode in ponovno preverili tlačno trdnost. Za vsako vrsto betonske mešanice smo pripravili po tri preizkušance. Tlačno trdnost betona je povprečje treh meritev po enačbi:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5)$$

F...tlačna sila

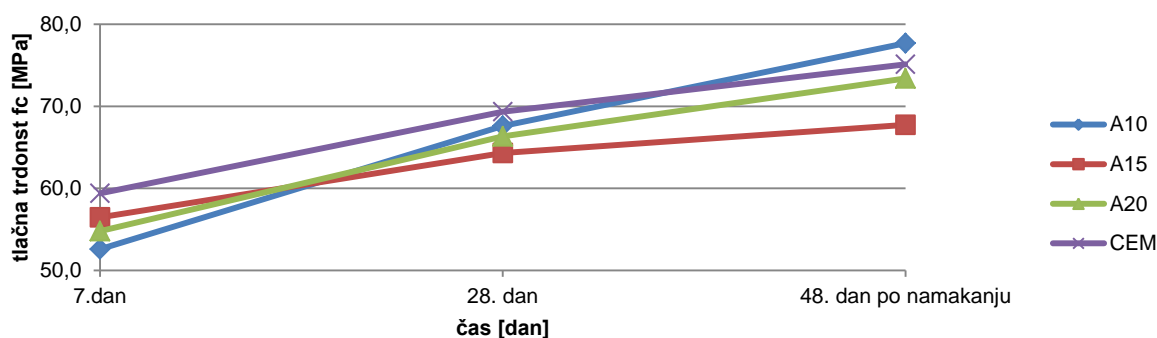
A_c...površina vodoravnega prereza preizkušanca

3.2.2.1 Vpliv deleža pepela



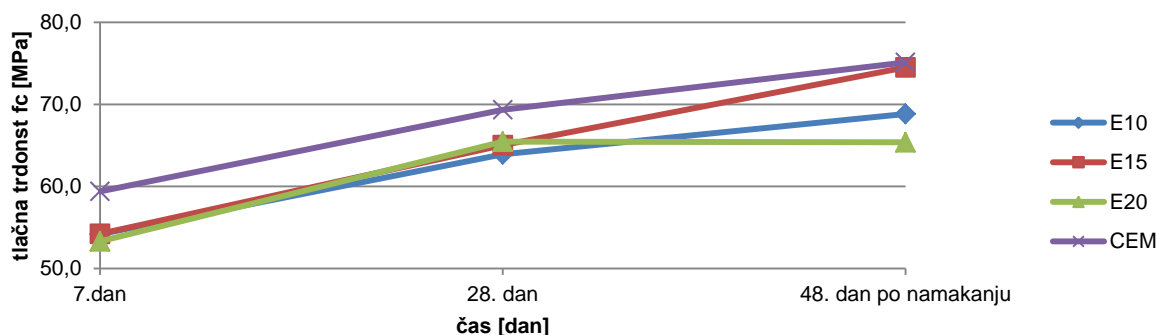
Grafikon 4: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Ribnica

V Grafikonu 4 so prikazane tlačne trdnosti betonov s pepelom Ribnica. Primerjave rezultatov kažejo, da se tlačne trdnosti betonov s starostjo povečujejo. Beton z oznako R10 celo presega vrednosti tlačne trdnosti referenčnega betona. S povečevanjem količine pepela se tlačne trdnosti zmanjšujejo.



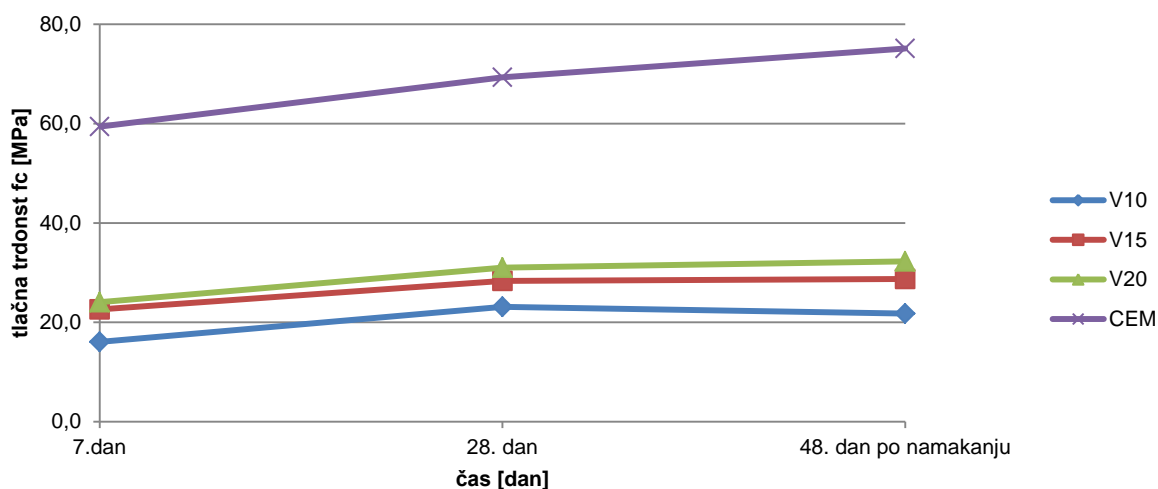
Grafikon 5: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Avstrija

V Grafikonu 5 so prikazane tlačne trdnosti betonov s pepelom Avstrija. Tlačne trdnosti vseh betonov se s starostjo povečujejo, vendar je razvidno, da se trdnosti povečujejo neenakomerno glede na količino vključenega pepela. Vse dobljene vrednosti so manjše od referenčne, le vzorec A10 nekoliko odstopa z višjo vrednostjo tlačne trdnosti po 48 dneh namakanja prizem v vodi.



Grafikon 6: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Energoles

V Grafikonu 6 so prikazane tlačne trdnosti betonov s pepelom Energoles. Tlačne trdnosti vseh treh betonskih mešanic s pepelom Energoles se med starostjo 7 in 28 dni povečajo enako in tudi absolutne vrednosti so enake. Po 48 dneh namakanja vzorcev E10 in E15 se njuni tlačni trdnosti dodatno povečata, pri vzorcu E20 pa ostane enaka kot je bila po 28 dneh starosti. Vse dobljene vrednosti so nižje od referenčne, le trdnost vzorca E15 se približa referenčni po 48 dneh namakanja.

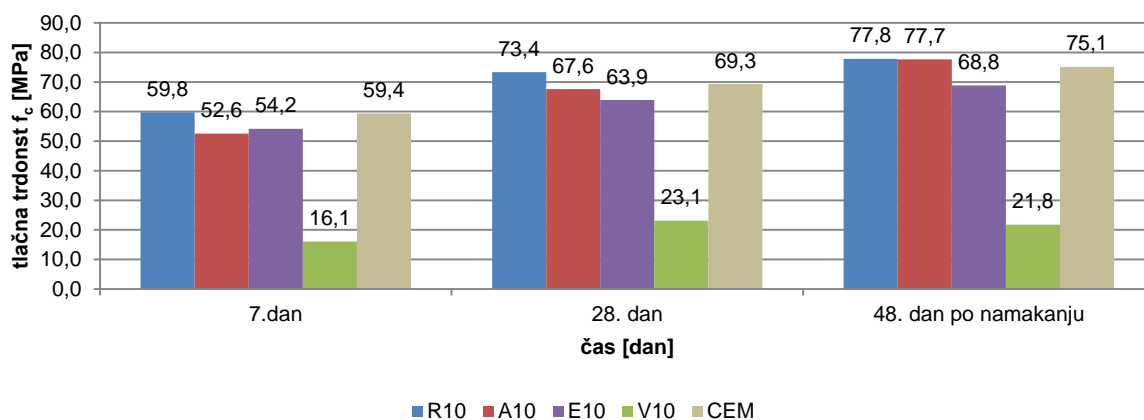


Grafikon 7: Tlačne trdnosti betonov s pepelom Vipap

V Grafikonu 7 so prikazane tlačne trdnosti betonov s pepelom Vipap. Na podlagi grafikona je razvidno, da se tlačne trdnosti betonov s starostjo rahlo povečujejo, vendar pri mešanici V10 tlačna trdnost po 48 dneh namakanja vzorcev v vodi pade s 23,1 MPa na 21,8 MPa, ostali dve mešanici pa tlačni trdnosti zadržita na enaki ravni kot pri starosti 28 dni. Dobljene vrednosti so glede na referenčne bistveno nižje.

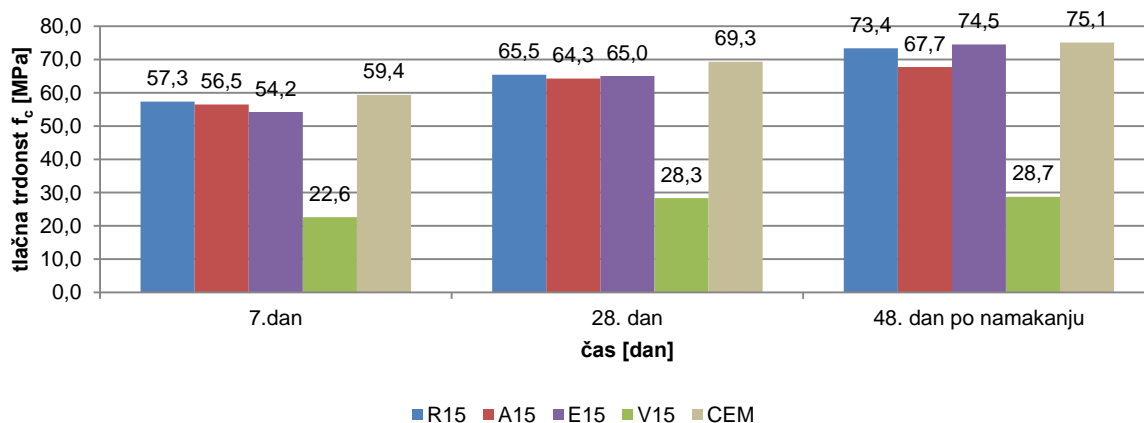
Če bi razvrstili mešanice po klasifikaciji za beton glede na tlačno trdnost po SIST EN 206-1, bi lahko betonsko mešanico R10 razvrstili v razred C45/55, A10 in CEM v razred C 40/50, E10, E15 in E20 ter A15 in A20 ter R15 in R20 v C 35/45, V10 v C 8/10 ter V15 in V20 v C12/15. Ugotavljamo, da edino beton s pepelom Vipap ne izpolnjuje kriterija za konstrukcijske betone (C 20/25 ali več).

3.2.2.2 Vpliv vrste pepela



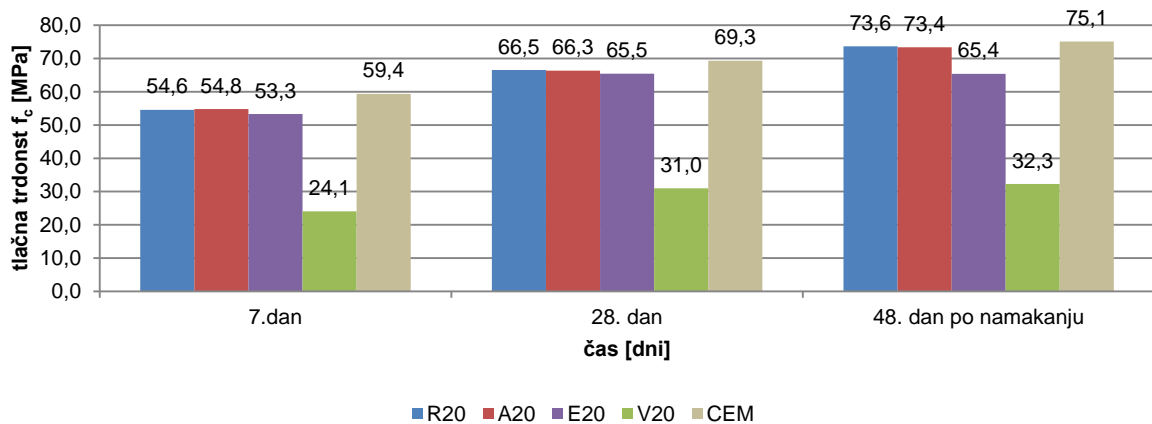
Grafikon 8: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov z 10 mas % pepela

V Grafikonu 8 je prikazana primerjava tlačnih trdnosti betonov z 10 mas % pepela. Pri primerjavi rezultatov na grafikonu opazimo, da se tlačne trdnosti betonov vseh preizkušancev s starostjo povečujejo, le pri vzorcu V10 se po 6 tednih namakanja tlačna trdnost zmanjša za 5,6 % glede na tlačno trdnost po 28 dneh. Tlačni trdnosti vzorcev R10 in A10 celo izkazujeta boljšo tlačno trdnost po 48 dneh namakanja vzorcev v vodi v primerjavi z referenčnim vzorcem.



Grafikon 9: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov s 15 mas % pepela

V Grafikonu 9 je prikazana primerjava tlačnih trdnosti betonov s 15 mas % pepela. Vse vrednosti tlačnih trdnosti se s starostjo povečujejo, tudi po 6 tednih namakanja vzorcev v vodi, vendar so vse vrednosti manjše od referenčne tlačne trdnosti.



Grafikon 10: Primerjava tlačnih trdnosti f_c betonov z 20 mas % pepela

V Grafikonu 10 je prikazana primerjava tlačnih trdnosti betonov z 20 mas % pepela. Najboljše tlačne karakteristike glede na referenčno vrednost izkazuje betona s pepelom Ribnica in Avstrija. Tik za njima sledi beton s pepelom Energoles. Beton s pepelom Vipap ima izrazito nižjo tlačno trdnost.

Na podlagi rezultatov in primerjav lahko komentiramo, da se vrednosti tlačnih trdnosti s starostjo betona povečujejo, vendar glede na količino pepela v betonu precej variirajo in ni pravil, kako delež zamenjave cementa s pepelom vpliva na tlačno trdnost betona.

3.2.3 Upogibna natezna trdnost f_{cf}

S pomočjo tritočkovnega preizkusa, kjer se obtežba nanaša preko valjčkov, smo izmerili največjo upogibno silo, ki jo je prenesel posamezen preizkušaneč. Na podlagi spodaj navedene enačbe smo izračunali upogibno trdnost.

$$F_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (6)$$

F...največja upogibna sila [kN]

l...razpetina med podporama [mm]

d_1 ...širina prizme [mm]

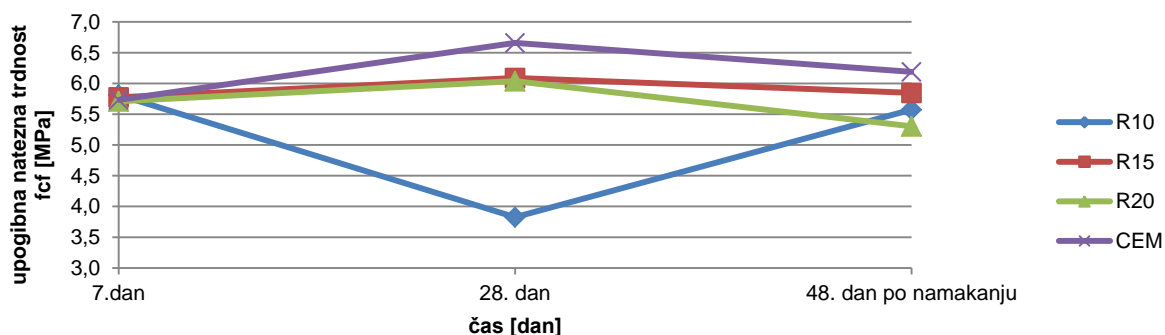
d_2 ...višina prizme [mm]

Na Sliki 5 je prikazan preizkus upogibne trdnosti betonov.



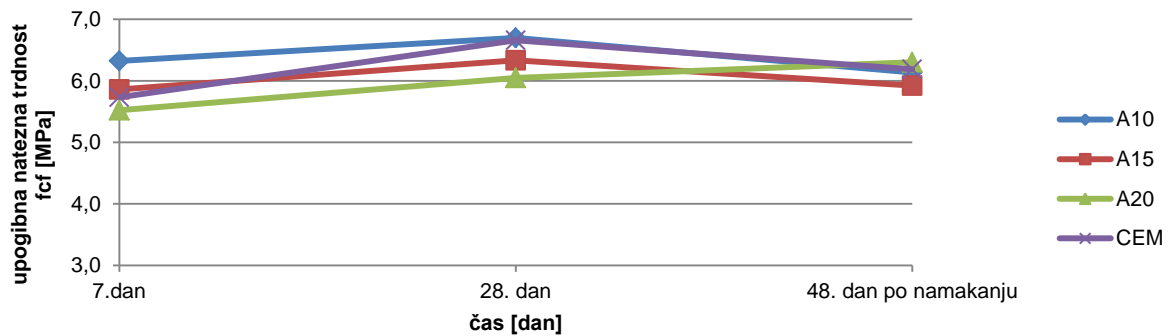
Slika 5: Preizkus upogibne trdnosti betonov

3.2.3.1 Vpliv deleža pepela



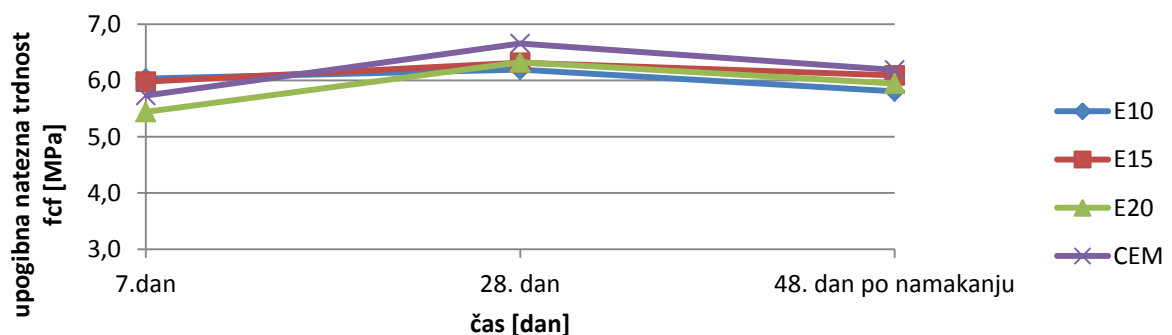
Grafikon 11: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Ribnica

V Grafikonu 11 so prikazane upogibne trdnosti betonov s pepelom Ribnica. Iz grafikona je razvidno, da so upogibne trdnosti vseh preizkušancev po 7 dneh enake. Po 28 dneh imajo betonske mešanice, v katerih je pepel, upogibne trdnosti nižje od trdnosti referenčnega betona. Do enake ugotovitve pridemo tudi po 48 dneh namakanja preizkušancev. Upogibna trdnost preizkušanca R10 pri starosti 28 dni izrazito odstopa od ostalih rezultatov. Razlog bi lahko bile poškodbe preizkušancev ali napaka med samo preiskavo (napačen odčitek največje sile). Prikazan rezultat zanemarimo – ga ne upoštevamo v analizah.



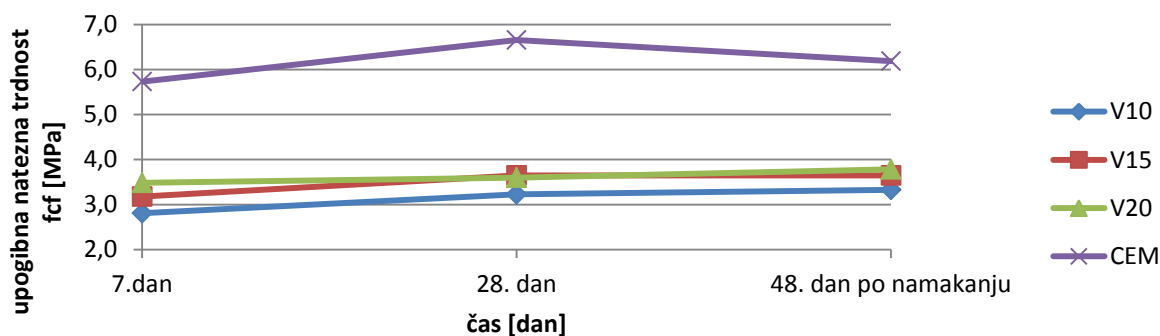
Grafikon 12: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Avstrija

V Grafikonu 12 so prikazane upogibne trdnosti betonov s pepelom Avstrija. Rezultati preizkusa kažejo, da se upogibne trdnosti betonov s starostjo nekoliko povečajo, a z namakanjem vzorcev v vodi ponovno padejo. Najboljše vrednosti dosega preizkušavec A10, ki po 7 dneh starosti izkazuje boljšo trdnost od trdnosti referenčnega betona.



Grafikon 13: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Energoles

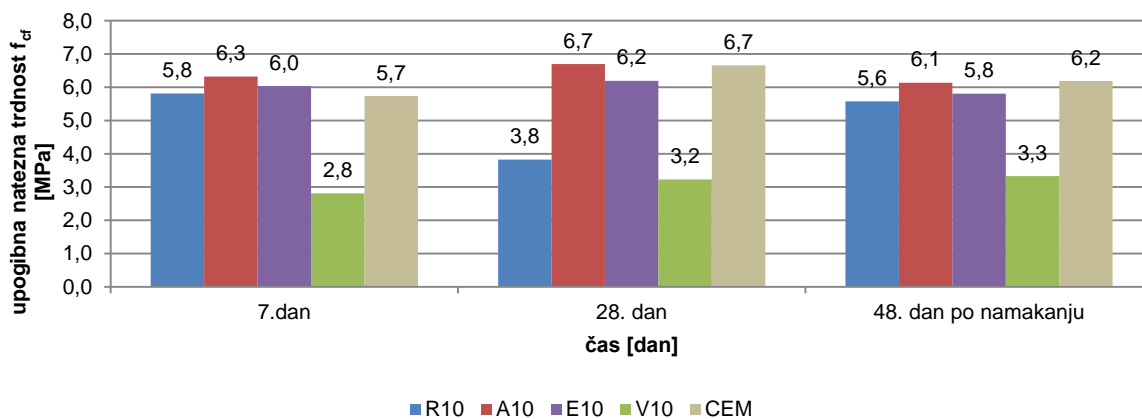
V Grafikonu 13 so prikazane upogibne trdnosti betonov s pepelom Energoles. Grafikon kaže, da se upogibne trdnosti preizkušancev s pepelom Energoles s starostjo minimalno spreminjajo, ne glede na količino pepela v betonu. Po 7 dneh vzorca E10 in E15 izkazujeta malo višje trdnosti od referenčne.



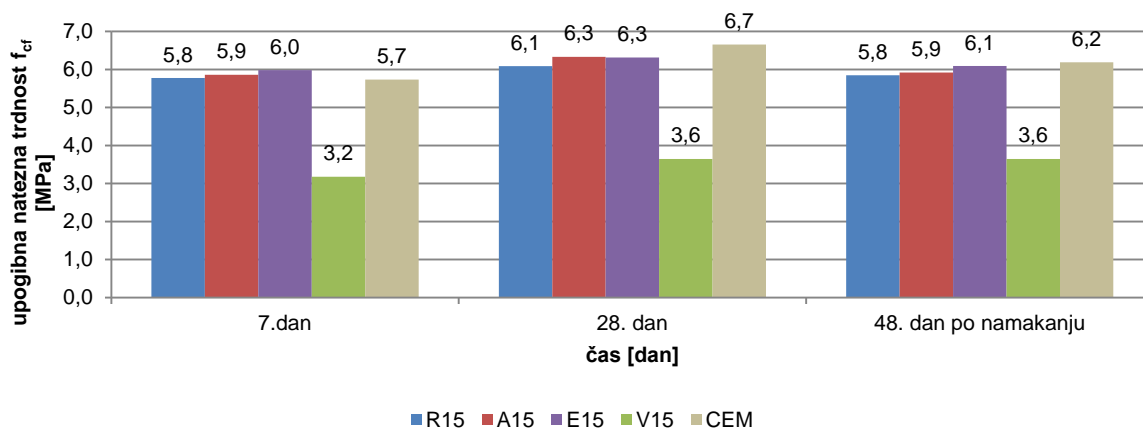
Grafikon 14: Upogibne trdnosti betonov s pepelom Vipap

V Grafikonu 14 so prikazane upogibne trdnosti betonov s pepelom Vipap. Upogibne trdnosti vseh preizkušancev s pepelom Vipap variirajo med 3 MPa in 4 MPa. Rezultati izkazujejo rahlo linearno povečanje upogibnih trdnosti z večanjem količine pepela v betonu, tudi po namakanju. Vendar so vse vrednosti izrazito nižje od referenčne.

3.2.3.2 Vpliv vrste pepela

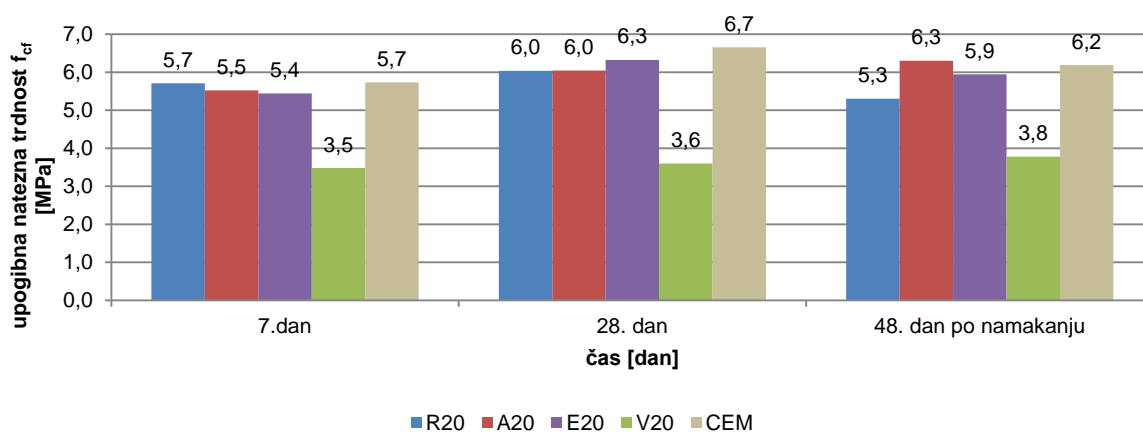
Grafikon 15: Primerjava upogibnih trdnosti f_{cf} betonov z 10 mas % pepela

V Grafikonu 15 je prikazana primerjava upogibnih trdnosti betonov z 10 mas % pepela. Iz grafikona je razvidno, da najvišjo upogibno trdnost izkazuje beton s pepelom Avstrija, po 7 in 28 dneh celo boljše od referenčne vrednosti. Preizkušanci s pepelom Energoles skorajda ohranjajo svojo upogibno trdnost skozi ves čas, medtem ko preizkušancem z Vipap pepelom trdnost rahlo narašča.



Grafikon 16: Primerjava upogibnih trdnosti f_{cf} betonov s 15 % pepela

V Grafikonu 16 je prikazana primerjava upogibnih trdnosti betonov s 15 mas % pepela. Pri primerjavi upogibnih trdnosti lahko vidimo, da pri vseh starostih trdnosti preizkušancev naraščajo od najnižje proti najvišji trdnosti v enakem zaporedju: V15, R15, A15 in E15. Preizkušanci s pepeli Ribnica, Avstrija in Energoles po 7 dneh izkazujejo celo višjo trdnost od karakteristične.



Grafikon 17: Primerjava upogibnih trdnosti f_{cf} betonov z 20 mas % pepela

V Grafikonu 17 je prikazana primerjava upogibnih trdnosti betonov z 20 mas % pepela. Pri vseh betonskih preizkušancih se upogibne trdnosti s staranjem do 28. dne rahlo povečajo. Po 48 dneh namakanja vzorcev v vodi trdnosti vzorcev R20 in E20 padejo, A20 in V20 pa

narastejo, glede na trdnost po 28 dneh. Po 48 dneh A20 celo izkazuje višjo upogibno vrednost od referenčne.

3.2.4 Cepilna natezna trdnost f_{ct}

Preiskavo cepilne natezne trdnosti smo izvajali za vsako mešanico na treh preizkušancih. Med preizkusom vzorcev po 48 dneh namakanja v vodi smo opazili, da prihaja do drobljenja betona, zato so bili dobljeni rezultati nerealni in smo jih iz primerjav izključili. Le pri betonu s cementnim vezivom (brez pepela) smo dobili realne rezultate. Izmerjene največje cepilne sile smo povprečili in izračunali cepilno trdnost po spodnji enačbi:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (7)$$

F...največja cepilna sila [kN]

l...dolžina raznosa sile [mm]

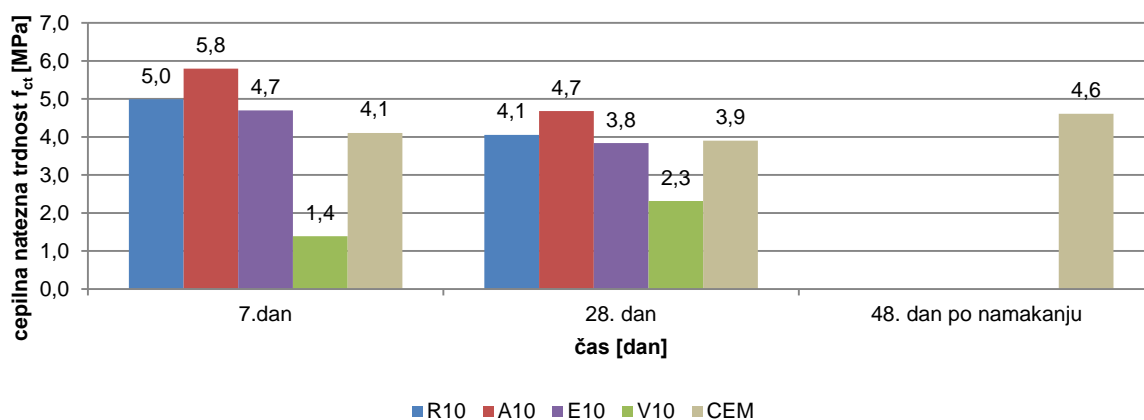
d...merodajna dimenzija preizkušanca [mm]

Na Sliki 6 je prikazan preizkus cepilne trdnosti betona.



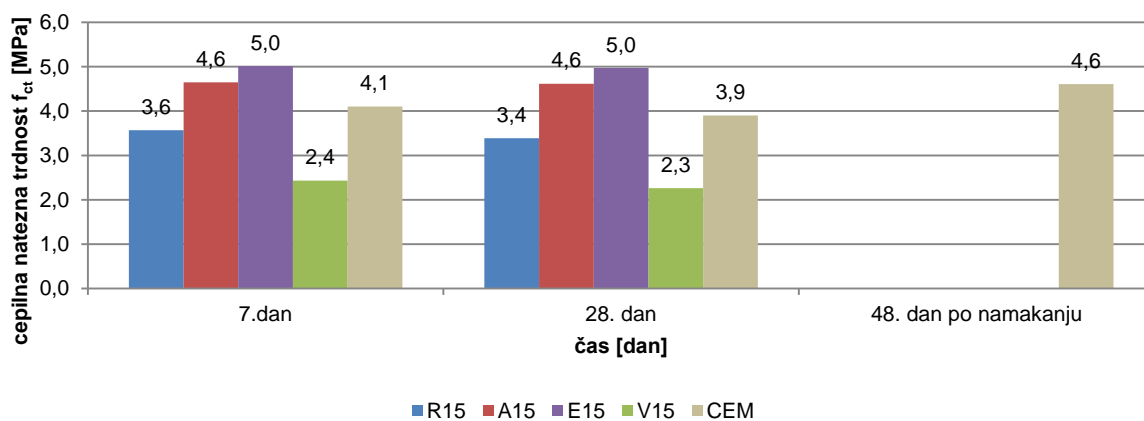
Slika 6: Preizkus cepilne trdnosti betonov

3.2.4.1 Vpliv vrste pepela



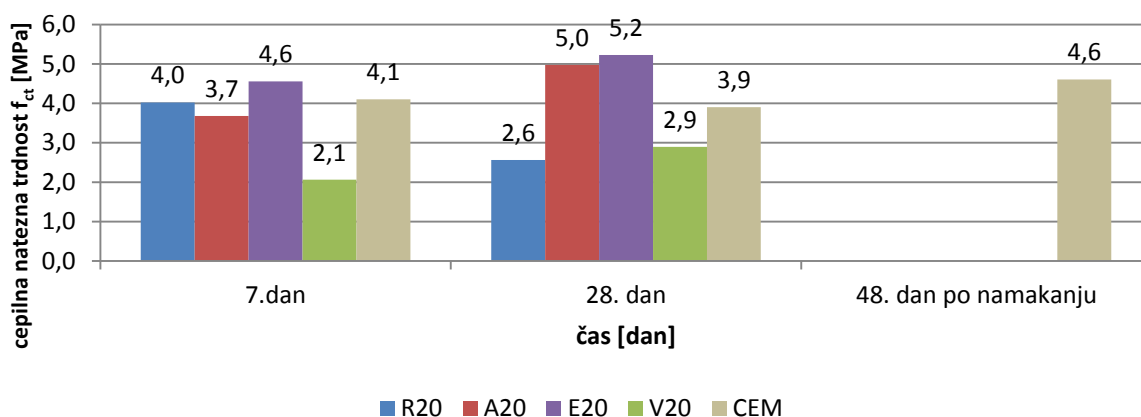
Grafikon 18: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov z 10 mas % pepela

V Grafikonu 18 je prikazana primerjava cepilnih trdnosti betonov z 10 mas % pepela. Iz grafikona je razvidno, da se je cepilna trdnost vzorca V10 povečala iz 1,4 MPa na 2,3 MPa, medtem ko so se cepilne trdnosti preostalih preizkušancev s starostjo zmanjšale.



Grafikon 19: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov s 15 mas % pepela

V Grafikonu 19 je prikazana primerjava cepilnih trdnosti betonov s 15 mas % pepela. Na podlagi rezultatov lahko ugotovimo, da se cepilne trdnosti preizkušancev s 15 mas % pepela s starostjo skorajda ne spreminjajo, saj prihaja le do rahlih odstopanj v cepilnih trdnostih med starostjo 7 in 28 dni.



Grafikon 20: Primerjava cepilnih trdnosti f_{ct} betonov z 20 mas % pepela

V Grafikonu 20 je prikazana primerjava cepilnih trdnosti betonov z 20 mas % pepela. Na grafikonu lahko vidimo, da se pri vzorcih R20 in CEM cepilni trdnosti s starostjo zmanjšajo, pri vseh ostalih sestavah betona pa se trdnosti povečajo. Razlike so velike.

Zgornje primerjave rezultatov pokažejo, da ni logične povezave med povečanjem količine pepela v betonskih kompozitih in cepilno trdnostjo betona pri obeh starostih, ki sta bili predmet raziskav. Postavlja pa se še vprašanje, zakaj se na prizmah, ki smo jih po umiritvi krčenja namočili v vodo, cepilne trdnosti niso mogle izmeriti – zakaj se je material drobil.

3.2.5 Določanje dinamičnega modula elastičnosti E

Za določanje dinamičnega modula elastičnosti smo uporabili instrument GrindoSonic. Izbrana metoda je neporušna in enostavna za uporabo. Princip delovanja instrumenta temelji na impulzni tehniki. Dobljena frekvenca vibracije je odvisna od mase in togosti preizkušanca. Dinamični modul elastičnosti za pravokotni prerez se izračuna na podlagi dobljenih frekvenc, mase in izmerjenih dolžin prizem, po enačbi:

$$E = \frac{0,9465 * m * f_f^2 * L^3}{T_1 * t^3} \quad (7)$$

kjer predstavlja:

E...dinamični modul elastičnosti (Pa)

m...masa vzorca (g)

f_f ...osnovna resonančna frekvenca vzorca za upogib (Hz)

L...dolžina vzorca (mm)

b...širina vzorca (mm)

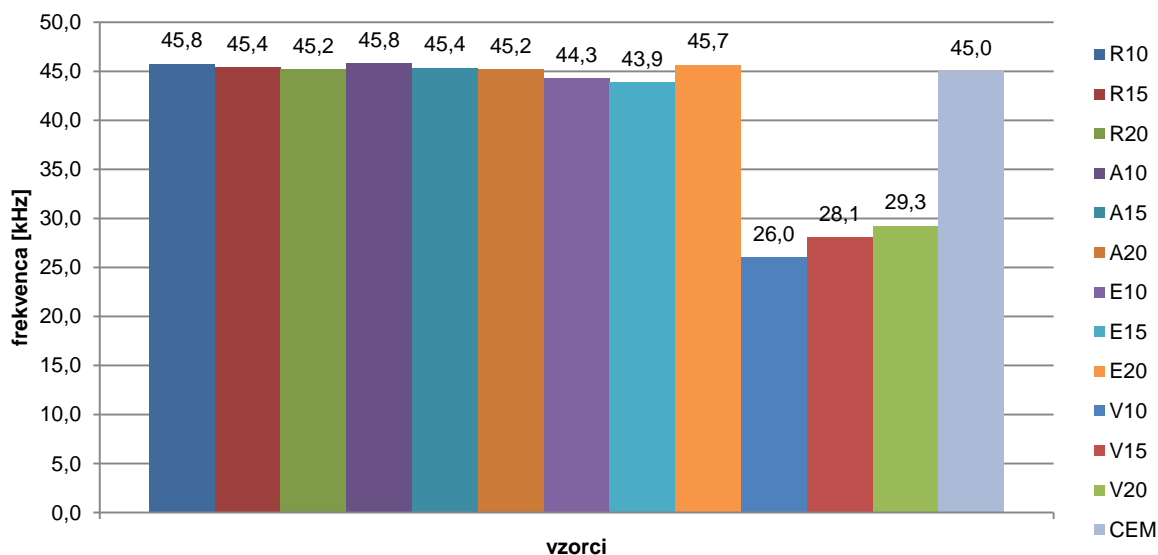
t...debelina vzorca (mm)

T1...korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco.

Vendar, če je $L/t \geq 20$ lahko uporabimo izraz:

$$T1 = 1 + 6,585 * \left(\frac{t}{L}\right)^2 \quad (8)$$

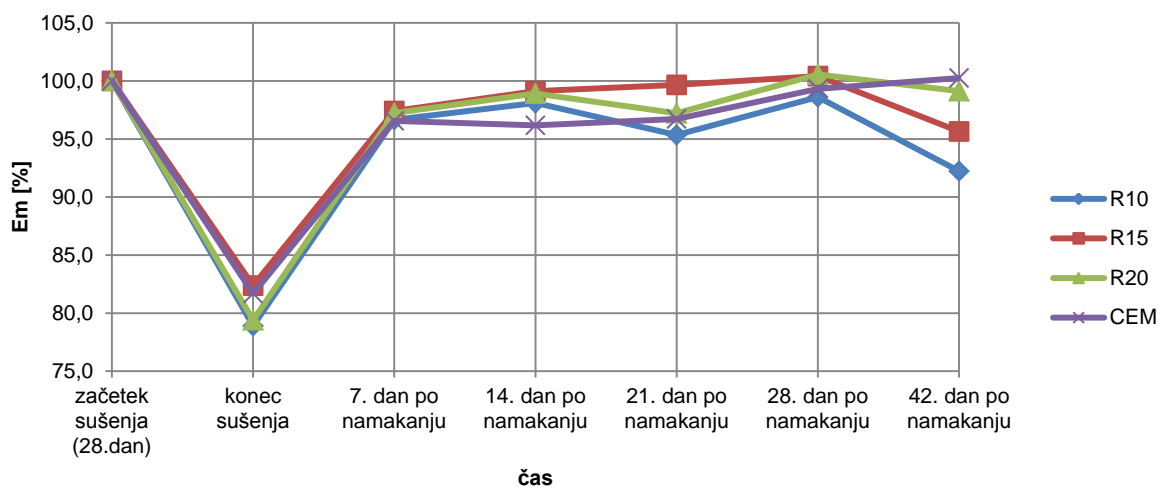
Preizkušanece smo položili na dve trikotni podpori. S pomočjo naprave za vzbujanje impulzov (palčke, na koncu katere je pritrjena kroglica) smo udarjali po sredini zgornje ploskve preizkušanca in s tem ustvarjali mehanski impulz. Medtem smo se z detektorjem signala dotikali stranske ploskve preizkušanca v sredini. Ta sprejema signale valovanja in jih prenaša v sistem za zajemanje podatkov.



Grafikon 21: Absolutne vrednosti dinamičnih modulov elastičnosti betonov po 28. dneh

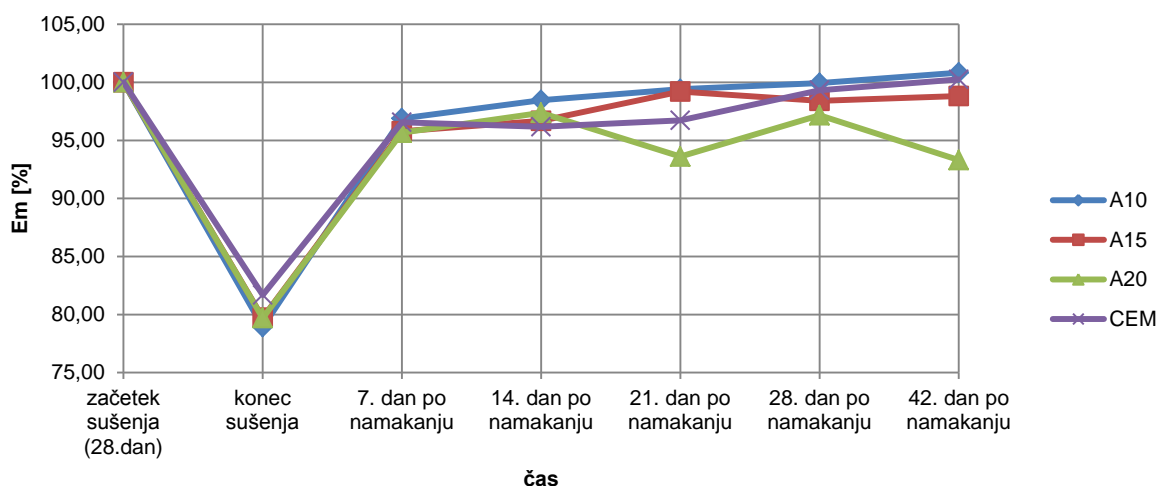
V Grafikonu 21 so predstavljene absolutne vrednosti dinamičnih modulov elastičnosti po 28 dneh. Iz rezultatov vidimo, da so moduli elastičnosti betonov s pepelom Ribnica in s pepelom Avstrija tako rekoč enaki, kot pri referenčnem betonu (blizu 45 GPa) in niso bistveno odvisni od deleža pepela v betonu. Podobno bi lahko zaključili tudi za pepel Energoles, čeprav sta pri 10 in 15 % zamenjavi cementa s pepelom modula elastičnosti za spoznanje manjša kot pri referenčnem betonu. Module elastičnosti pa bistveno zniža pepel Vipap, pri katerem beton z 10, 15 in 20 mas % pepela dosega vrednosti 26 GPa, 28 GPa oziroma 29 GPa.

3.2.5.1 Vpliv deleža pepela



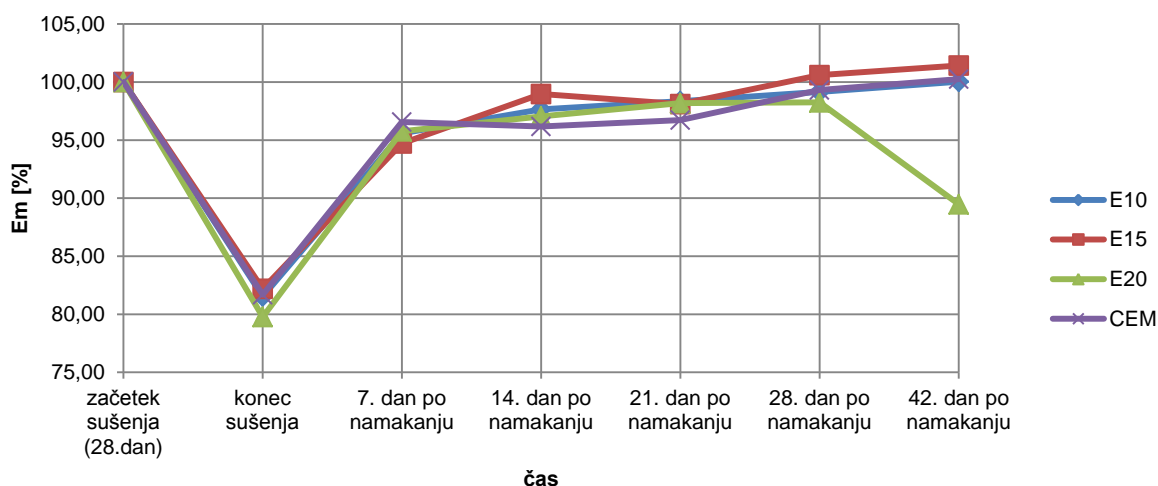
Grafikon 22: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Ribnica

V Grafikonu 22 so predstavljeni dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Ribnica. V grafikonu je prikazano, da s sušenjem betona moduli elastičnosti izrazito padejo, nato pa po 7 dneh namakanja suhih vzorcev v vodi ponovno zrastejo, vendar na vrednosti, ki so nižje od tiste pri starosti 28 dni. Po 14 dneh namakanja imajo vsi betoni glede na referenčnega višje elastične module. V nadaljevanju modula elastičnosti vzorcev R10 in R20 nekoliko padeta, R15 pa se poveča. Po 28 dneh namakanja imajo vsi vzorci skorajda enake elastične module kot na začetku sušenja vzorcev. Po 42 dneh namakanja, pri vseh betonih s pepelom Ribnica, elastični moduli glede na referenčnega padejo.



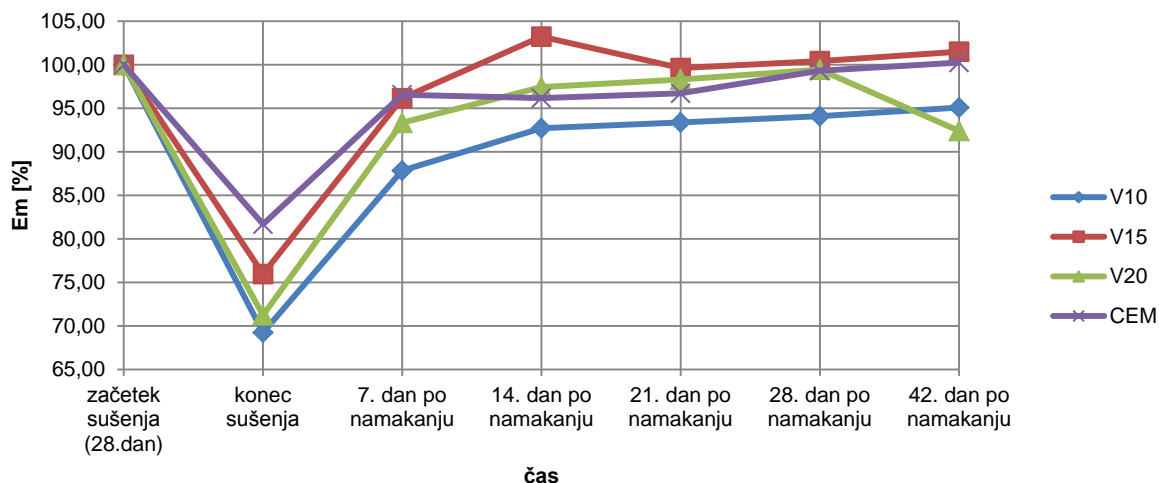
Grafikon 23: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Avstrija

V Grafikonu 23 so predstavljeni dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Avstrija. Tudi ti elastični moduli betonov se s sušenjem precej znižajo in se s ponovnim namakanjem vzorcev v vodi povečajo in čez 42 dni dosežejo enake vrednosti kot pri starosti 28 dni, z izjemo vzorca A20, pri katerem modul elastičnosti izrazito variira. Najvišje vrednosti izkazuje beton z 10 mas % pepelom, ki na koncu preiskave doseže celo nekoliko višji elastični modul kot na začetku sušenja, pri starosti 28 dni.



Grafikon 24: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Energoles

V Grafikonu 24 so predstavljeni dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Energoles. Elastični moduli betonov z različnimi deleži pepela Energoles so skozi vse faze preiskav skoraj enaki. Izjema so rezultati po 42 dneh ponovnega namakanja vzorcev v vodi, ko elastični modul vzorca E20 izrazito pade. Vsi ostali vzorci po 42 dneh namakanja v vodi dosežejo enake elastične module kot na začetku sušenja.

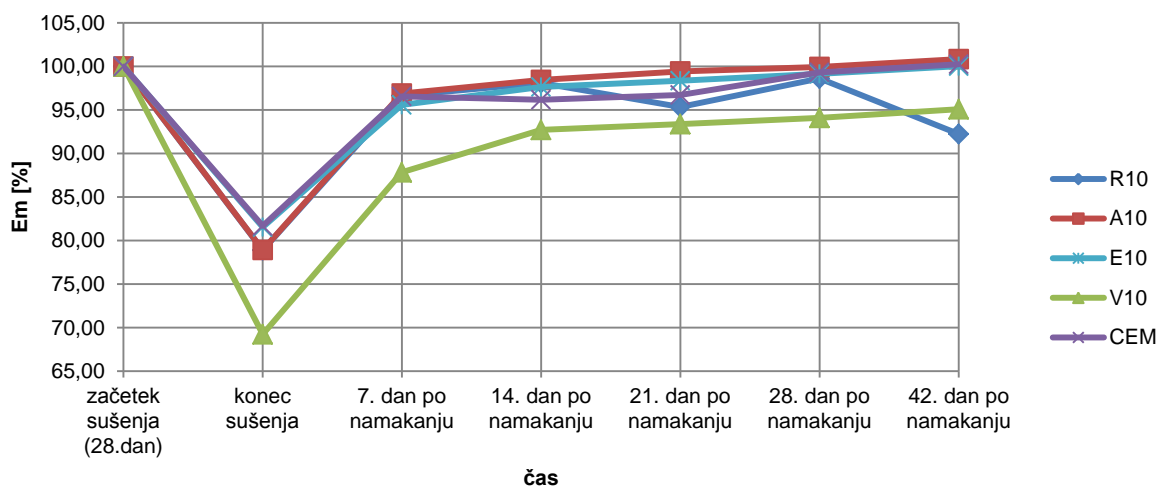


Grafikon 25: Dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Vipap

V Grafikonu 25 so predstavljeni dinamični moduli elastičnosti betonov s pepelom Vipap. Iz grafikona je razvidno, kako se elastični moduli s sušenjem vzorcev znižajo in se nato po 7 dnevnom namakanju vzorcev v vodi ponovno povišajo, vendar ne na enake vrednosti kot na začetku sušenja. Elastični moduli ne naraščajo ali padajo v nekem logičnem zaporedju glede na količino pepela v betonu. V primerjavi z referenčnim betonom se najboljšše obnaša vzorec V15, ki doseže najvišje vrednosti modula elastičnosti, po 14 dneh namakanja celo boljše kot pred sušenjem. Najnižje vrednosti modula elastičnosti so pri betonu V10.

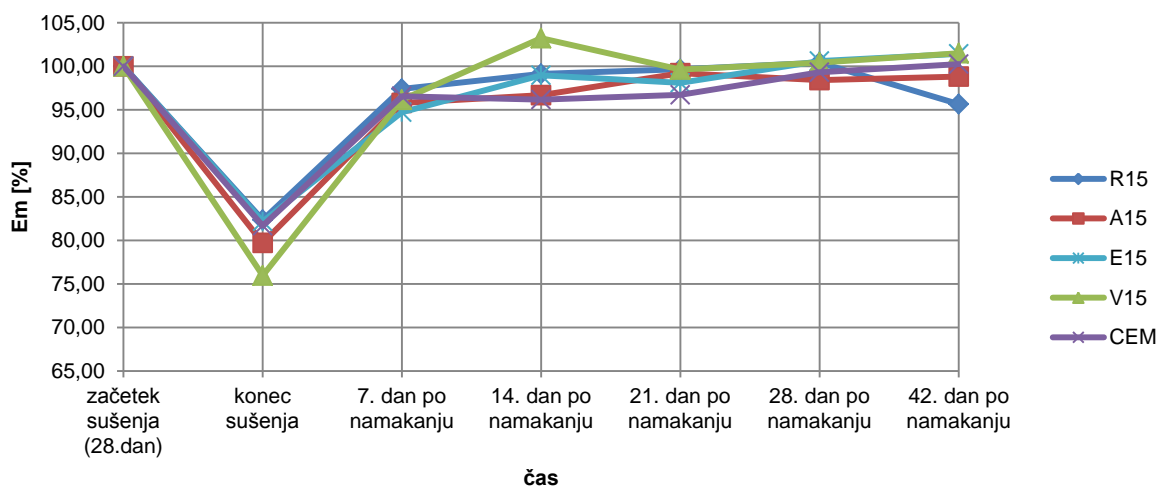
Generalno je iz grafikonov razvidno, da elastični moduli betonov s pepelom po namakanju naraščajo, vendar ne dosežejo enakih vrednosti kot pred sušenjem, oziroma redke izjeme.

3.2.5.2 Vpliv vrste pepela



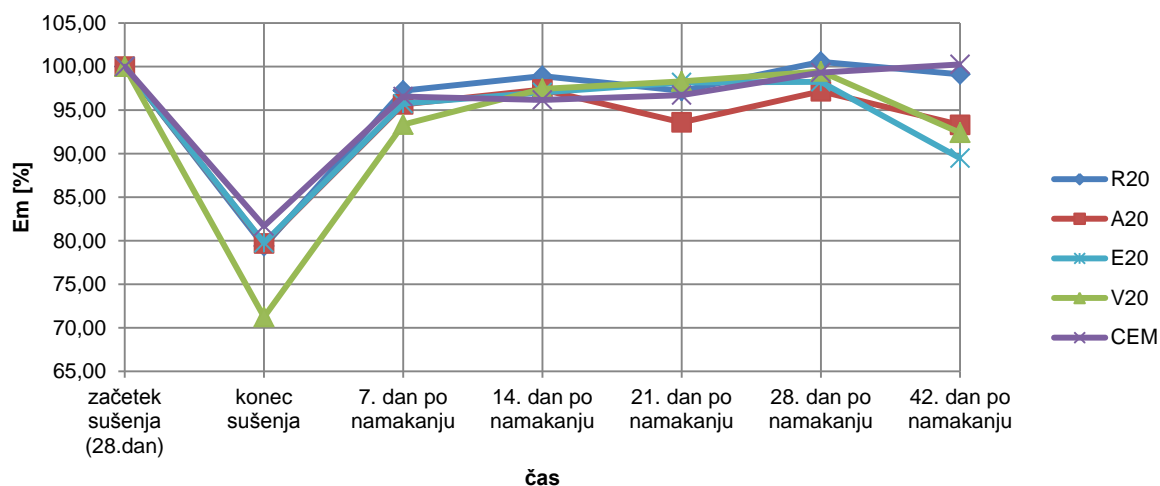
Grafikon 26: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov z 10 mas % pepela

V Grafikonu 26 je prikazana primerjava dinamičnih modulov elastičnosti z 10 mas % pepela. Iz grafikona je razvidno, da elastični moduli ob koncu sušenja, v primerjavi z elastičnimi moduli na začetku sušenja, izrazito padejo, največ pri V10. Po namakanju moduli ponovno narastejo in se s trajanjem odležavanja vzorcev v vodi rahlo povečujejo. Elastični moduli vseh betonov, razen V10, dosegajo približno enake vrednosti kot pri referenčnem betonu. Po 42 dneh namakanja dosežejo enako vrednost kot na začetku sušenja, z izjemo R10 in V10.



Grafikon 27: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov s 15 mas % pepela

V Grafikonu 27 je prikazana primerjava dinamičnih modulov elastičnosti s 15 mas % pepela. Na podlagi grafikona lahko opazimo, da imajo vsi vzorci v tem primeru enak trend in že po 28 dneh namakanja dosežejo enak elastični modul kot pred začetkom sušenja.

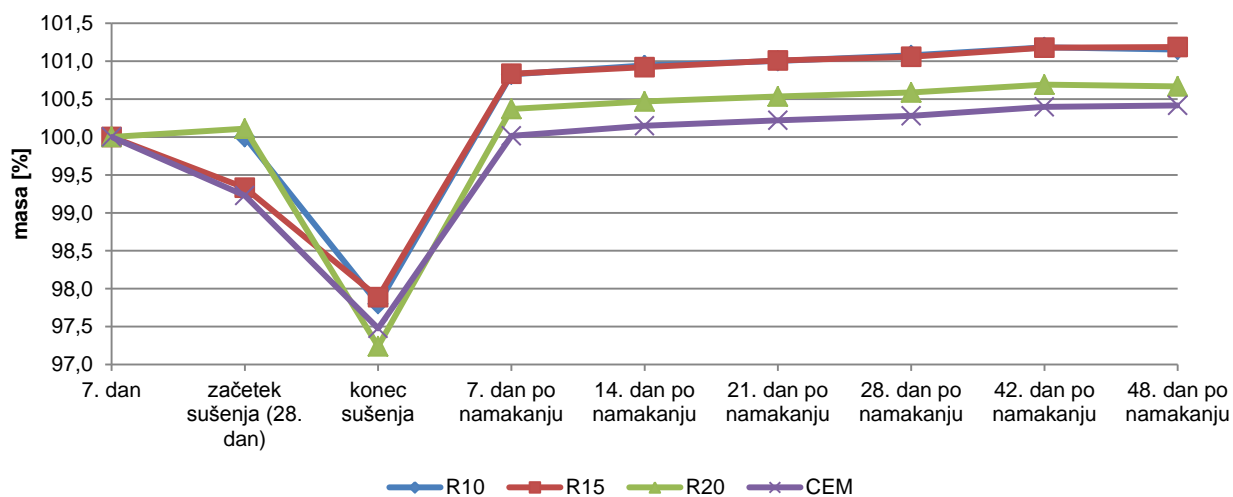


Grafikon 28: Primerjava dinamičnih modulov elastičnosti betonov z 20 mas % pepela

V Grafikonu 28 je prikazana primerjava dinamičnih modulov elastičnosti z 20 mas % pepela. Tudi ta grafikon potrjuje, da se dinamični moduli elastičnosti povečajo z namakanjem v vodi in po 28 dneh namakanja večina vzorcev doseže enake dinamične module kot pred začetkom sušenja. Vseskozi se opazi rahel trend naraščanja, kar pa se spremeni po 42 dneh namakanja, ko elastični moduli večine betonov z 20 mas % pepela izrazito padejo, z izjemo R20.

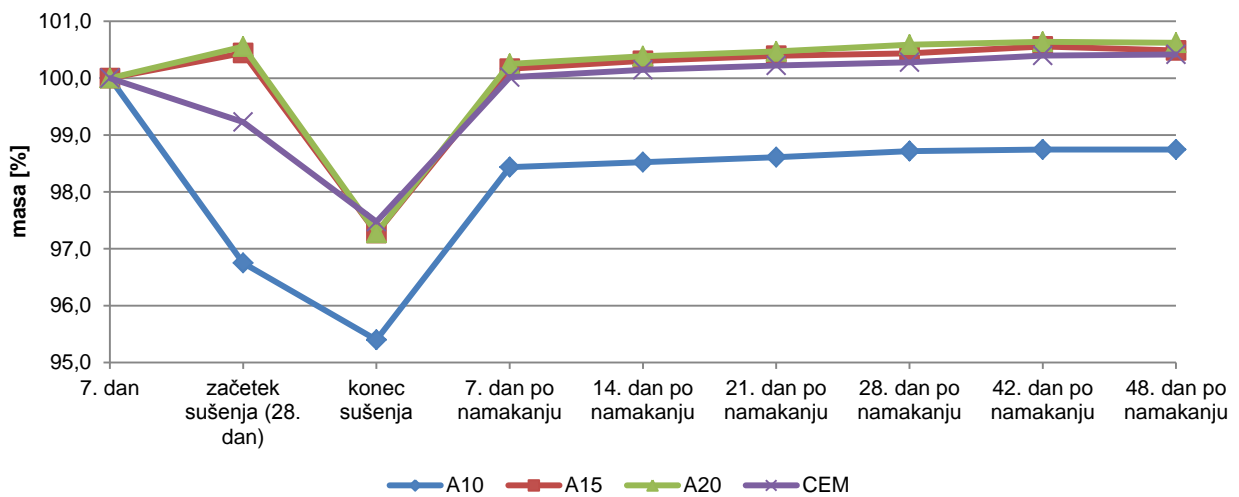
3.2.6 Spremljanje mase

Do spremembe mase pri betonu pride zaradi hidratacije veziva in izhlapevanja ali vpijanja vode. Na spodnjih grafikonih smo prikazali mase pri starostih 7 in 28 dni, nato pa smo vzorce ponovno stehali ob stabilizaciji krčenja (sušenja), kar se v grafu izraža z izrazitim znižanjem mase betona. Nato smo suhe vzorce namakali v vodi 48 dni in jim vsak teden merili maso.



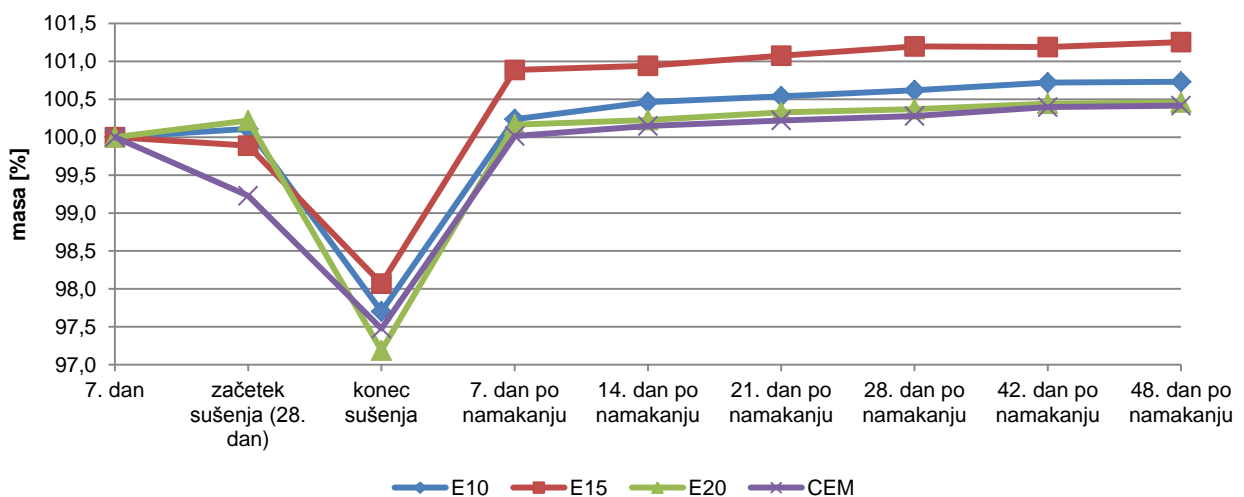
Grafikon 29: Mase betonov s pepelom Ribnica

V Grafikonu 29 so predstavljene mase betonov s pepelom Ribnica. Masa vzorca R15 je pri 7 in 28 dneh enaka masi referenčnega betona. Pri sestavah R10 in R20 se masi med 7 in 28 dnevom ne spreminjajo. Je pa res, da so razlike izrazito majhne, red velikosti 0,5 %, zato težko zaključimo, da ima delež pepela vpliv na spremembo mase vzorcev. Splošen vtis je, da je odziv vseh vzorcev na sušenje in vpijanje vode enak, kar pomeni, da vključitev pepela Ribnica ne poveča sposobnosti vpijanja vode ali zmanjša sposobnost sušenja betona.



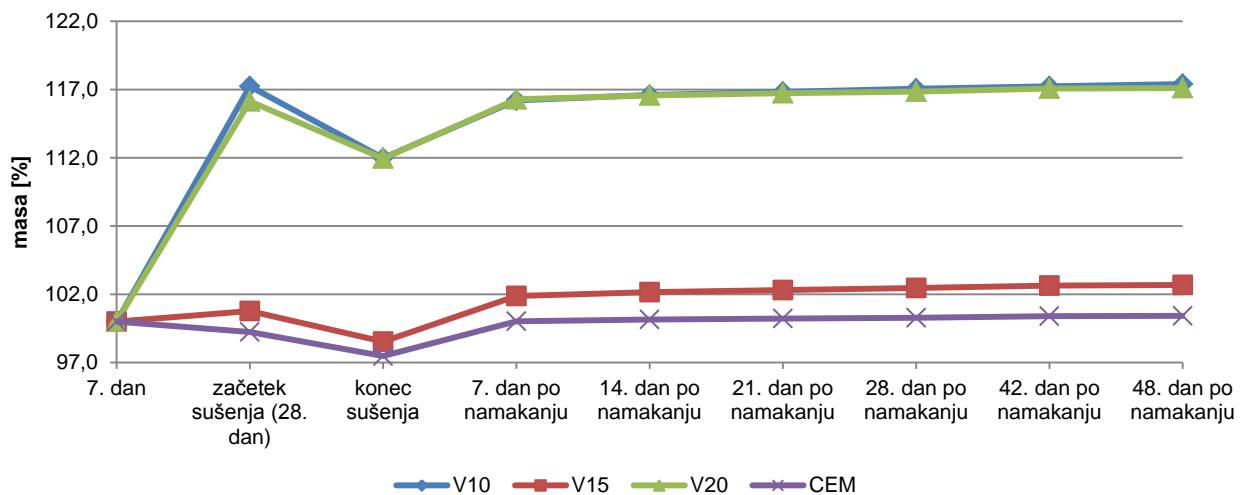
Grafikon 30: Mase betonov s pepelom Avstrija

V Grafikonu 30 so predstavljene mase betonov s pepelom Avstrija. Masa vzorca A10 izrazito odstopa od mas ostalih vzorcev skozi ves potek merjen. Pri ostalih vzorcih pa je odziv vzorcev na hidratacijo in vpijanje vode ali sušenje enak.



Grafikon 31: Mase betonov s pepelom Energoles

V Grafikonu 31 so predstavljene mase betonov s pepelom Energoles. Trend razvoja mas pri betonu s pepelom Energoles je zelo podoben kot pri referenčnem betonu, saj so vsi rezultati znotraj ± 1 %.



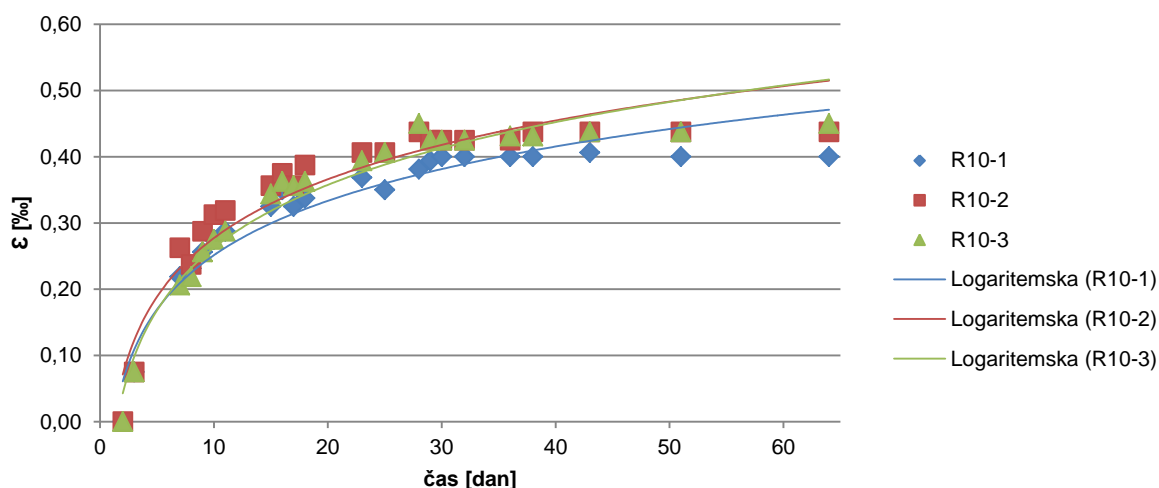
Grafikon 32: Mase betonov s pepelom Vipap

V Grafikonu 32 so predstavljene mase betonov s pepelom Vipap. Pri betonih s pepelom Vipap so rezultati spreminjanja mase vzorcev zelo drugačni, kot pri ostalih pepelih. Spreminjanje mase vzorcev V10 in V20 s sušenjem med starostjo 7 in 28 dni izrazito odstopa od odziva vzorca V15, ki se obnaša zelo podobno kot referenčni beton. Masi vzorcev V10 in V20 izrazito narasteta do starosti betona 28 dni in se po koncu sušenja in ponovni potopitvi v vodo postopoma približata masam pri 28 dneh.

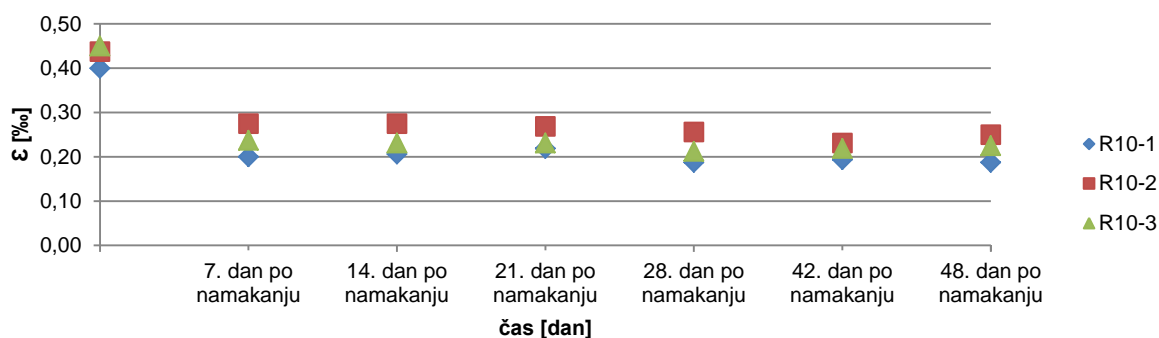
3.2.7 Krčenje/nabrekanje betonskih kompozitov

Krčenje betonskih prizem potem, ko smo jih pri starosti 28 dni vzeli iz vode, je predvsem posledica izhlapevanja vode iz preizkušancev v okolico. Krčenje prizem smo spremljali z meritvami z deformetrom, s pomočjo merilne urice, ki omogoča merjenje sprememb dimenzij na 0,005 mm natančno. Za vse sestave betona se je pokazalo, da so se na zraku s časom krčile. Izmerjene vrednosti lahko modeliramo z logaritmičnimi krivuljami, ki so za oceno dolgoročnega krčenja betonov na varni strani. Ko smo opazili, da se prizme ne krčijo več intenzivno, to pomeni, da se je krčenje umirilo, smo se odločili, da jih ponovno namakamo v vodi, da preverimo vpliv pepelov na nabrekanje in morebitne poškodbe, ki bi jih lahko zaznali z meritvami dinamičnega modula elastičnosti. Nabrekanje je v prvi fazi največje, potem pa ostaja skoraj konstantno. V tem primeru bi lahko odziv ponazorili z bi-linearnim diagramom z dvema premicama: eno do 7 dni ponovnega namakanja in drugo med 7 in 48 dnevi namakanja. Prva bi ponazarjala čas intenzivnega vpivanja vode in s tem intenzivnega nabrekanja, druga premica pa umirjen del nabrekanja.

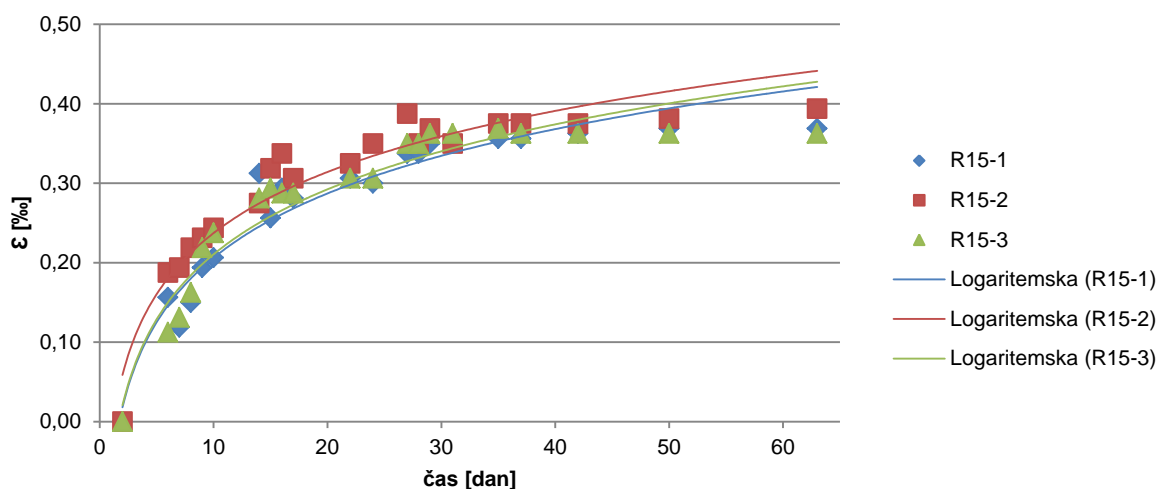
Končne deformacije betonskih prizem s pepelom Ribnica, ki so bile posledica krčenja, so se gibale okoli 0,39 ‰, deformacije zaradi nabrekanja pa okoli 0,21 ‰. Prizme s pepelom Avstrija so se zaradi sušenja krčile v povprečju okoli 0,37 ‰, zaradi nabrekanja pa deformirale enako kot beton s pepelom Ribnica. Prizme s pepelom Energoles so se deformirale zaradi krčenja okoli 0,38 ‰, zaradi nabrekanja pa okoli 0,19 ‰. Od rezultatov krčenja in nabrekanja izrazito izstopa beton s pepelom Vipap, ki se je zaradi krčenja deformiral za okoli 0,52 ‰, zaradi nabrekanja pa v povprečju 0,31 ‰. Referenčni beton ima deformacije zaradi krčenja okoli 0,38 ‰ in zaradi nabrekanja okoli 0,19 ‰, kar pomeni, da lesni pepeli Ribnica, Avstrija in Energoles niso spremenili deformiranja betona zaradi krčenja ali nabrekanja. To pa ne velja za pepel Vipap, ki poveča deformacije betona zaradi krčenja ali nabrekanja, kar je neugodno. V spodnjih grafikonih so kot primer prikazani grafikon skrčkov in raztezkov betonov s pepelom Ribnica pri vseh treh (10, 15 in 20) masnih deležih.



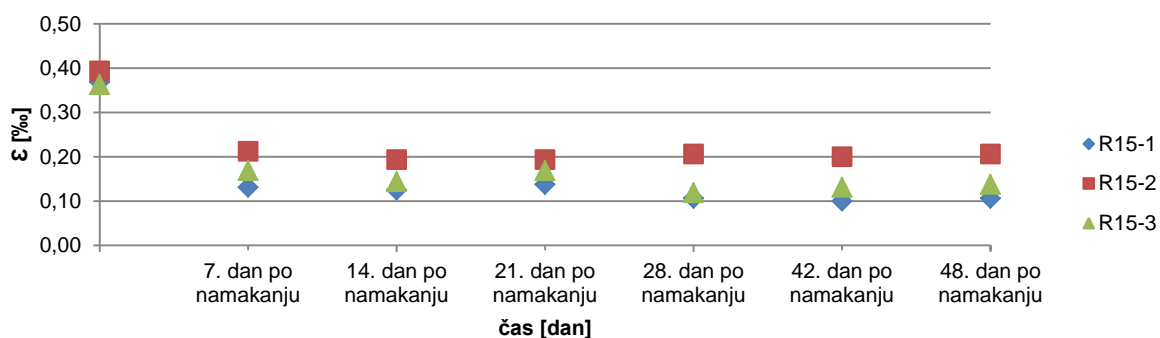
Grafikon 33: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 10 mas %



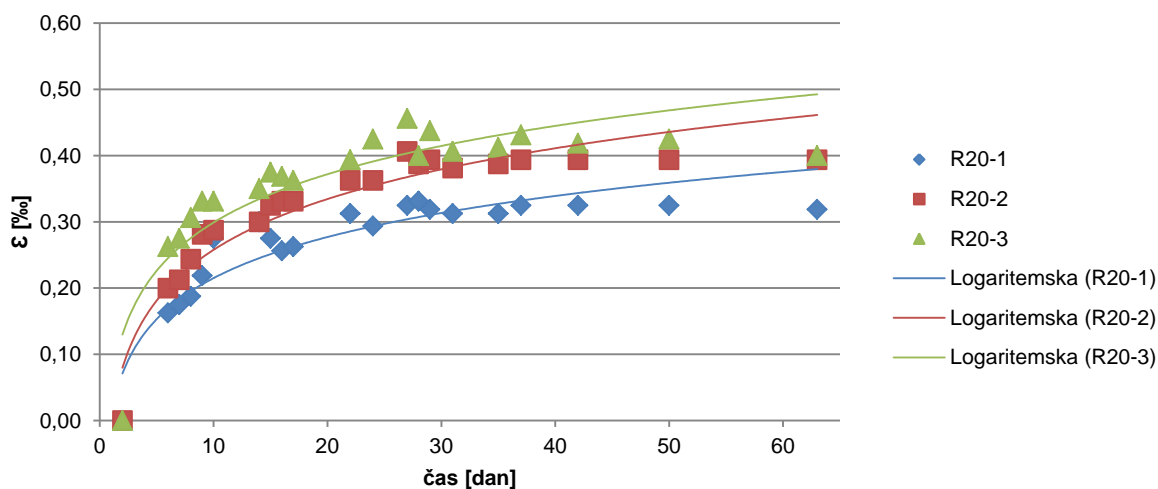
Grafikon 34: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 10 mas %



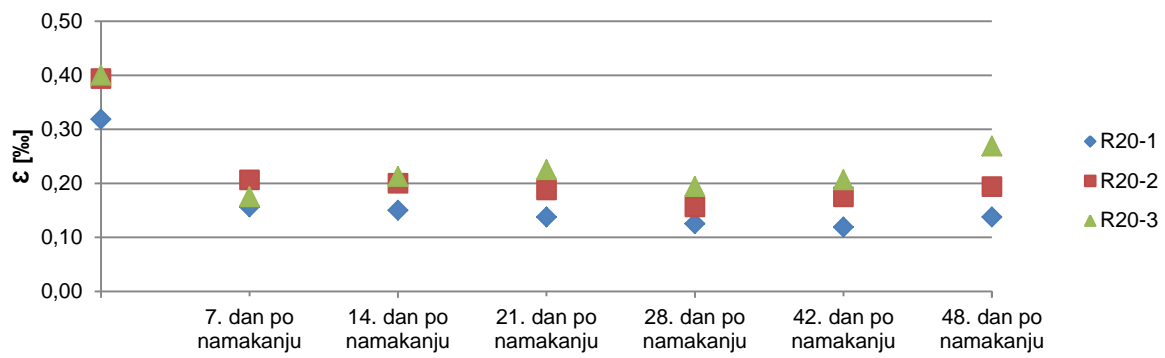
Grafikon 35: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 15 mas %



Grafikon 36: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 15 mas %



Grafikon 37: Skrčki betonov s pepelom Ribnica – 20 mas %



Grafikon 38: Raztezki betonov s pepelom Ribnica – 20 mas %

Ostali grafikoni so prikazani v PRILOGI A.

4 ZAKLJUČKI

Rezultati vseh preizkusov kažejo na določen vpliv nadomeščanja dela cementa s pepelom v betonu, vendar se postopno povečanje količine pepela v betonskih mešanica ne odraža v nekem logičnem trendu rezultatov. To kaže na morebiten premajhen razkorak v deležih pepela v mešanica, s katerimi smo nadomestili cement v okviru diplomske naloge.

Splošni vtis je, da nadomeščanje cementa s pepelom ne poslabša lastnosti betona (z izjemo pepela Vipap), vendar ga tudi ne izboljša. Na podlagi tega bi lahko zaključili, da so pepeli Ribnica, Avstrija in Energoles primeren material, s katerim lahko zamenjamo vsaj do 20 mas % cementa v betonu. Drugače je pri pepelu Vipap, ki izrazito poslabša lastnosti betona. Zato menimo, da je za pepel Vipap potrebno najti druge namene uporabe ali proizvode, v katere bi ga lahko vključili.

Na podlagi rezultatov reoloških meritev vidimo, da imata mešanici R10 in E15 nižje vrednosti reoloških parametrov v primerjavi z referenčnim betonom, kar kaže na to, da bi za transport betonske mešanice s črpalkami in njeno zgostitev z vibriranjem potrebovali manj energije. Primerljive karakteristike reoloških parametrov z referenčnim betonom imajo mešanice A10, A15 in E10.

Pri tlačni obremenitvi dosegajo najvišje vrednosti trdnosti pri vseh zamenjavah deleža cementa s pepelom betoni s pepelom Ribnica, pri upogibu pa daje v splošnem najboljše rezultate lesni pepel Avstrija. Cepilna trdnost betona je zelo odvisna od vrste in deleža zamenjave cementa s pepelom. Pri 10 % masni zamenjavi daje najvišje vrednosti pepel Avstrija, pri 15 in 20 % masni zamenjavi pa pepel Energoles.

Moduli elastičnosti betonov s pepeli Ribnica, Avstrija in Energoles dosegajo pri starosti betona 28 dni vrednosti, ki so tako rekoč enake, kot pri referenčnem beton (blizu 45 GPa). Delež teh pepelov v betonu nima bistvenega vpliva na modul elastičnosti. Modul elastičnosti pa bistveno zniža pepel Vipap, pri katerem je najvišja vrednost modula elastičnosti (29 GPa) pri 20 % masni zamenjavi cementa s pepelom.

Če pogledamo vse obravnavane karakteristike betona, dosega najboljše rezultate še vedno referenčni beton brez pepela. Za njim pa bistveno ne zaostajajo karakteristike betonov s pepeli Ribnica, Avstrija in Energoles, zato je, glede na rezultate opravljenih preiskav, vključitev teh treh lesnih pepelov v betone primerna in trajnostna rešitev.

Uporaba pepela v betonih bi iz ekonomskega vidika pomenila znižanje cene betona zaradi manjše količine cementa v betonu, v primeru izboljšanja reoloških lastnosti pa tudi prihranek pri energiji v fazi transporta in vgradnje s črpalkami ter pri zgoščevanju z vibriranjem.

Iz okoljskega vidika bi uporaba pepela v betonih pomenila zmanjšanje količin odpadkov in zmanjšanje števila potrebnih odlagališč za tovrstne odpadke. Prav tako pa, zaradi manjše potrebe po cementnem klinkerju, pripomogla k zmanjšanju izpustov CO₂ v ozračje.

Menimo, da bi bila uporaba lesnega pepela, kot nadomestek dela cementa, sprejemljiva tudi s strani ljudi, saj v percepciji, les in tudi lesni pepel veljata človeku prijazen material.

VIRI

Ban, C.C., Ramli, M. 2011. The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 7: 669-685.

Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. *Gradbenik* 12/2010: 101.

Energoles Bohor d.o.o. 2012. Izdelava ocene odpadka, Celje, Zavod za zdravstveno varstvo Celje: 13 str.

Energoles Bohor d.o.o. 2013. Določitev vsebnosti nevarnih snovi v lesu za podjetje Energoles Bohor d.o.o., Inštitut za ekološke raziskave d.o.o., Velenje: 68. str.

Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste superplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Gašperič): 74 str.

Krajnc, N., Piškur, M., Klun, J., Premrl, T., Piškur, B., Robek, R., Mihelič, M., Sinjur, I. 2009. *Lesna goriva: drva in lesni sekanci; proizvodnja, standardi kakovosti in trgovanje*. Ljubljana, Gozdarski inštitut Slovenije: 81 str.

Muratović, B. 2011. *Razvoj postopkov predelave odpadnih lesnih pepelov*. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Muratović): 51 str.

Štupar, B. 2012. *Vpliv višine notranjega valja reometra na izmerjene reološke lastnosti malt*. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, (samozaložba B. Štupar): 64 str.

Žarnič, R. 2005. *Lastnosti gradiv*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 53-55,110

Žarnič, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V. 2009. *Gradiva-vaje*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 43,71.

Standardi

SIST EN 206-1:2003/A2:2005. Beton – 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

Ostali viri

Energoles Bohor d.o.o. 2014. Povpraševanje o odpadnih materialih in pepelu. Sporočilo za: Tomaž Salobir, Toplarna. 4. in 7. avgust 2014. Osebna komunikacija.

Grindosonic. 2014. Technology.

<http://www.grindosonic.com/en/technology/index.htm> (Pridobljeno 10. 3. 2014.)

Ogrevanje na biomso. 2014. Slonep, gradnja in montaža hiš.

<http://www.slonep.net/zakljucna-dela/ogrevanje-in-klimatizacija/biomasa> (Pridobljeno 10. 8. 2014.)

Pavšič, P., Mladenovič, A. 2013. Odpadna blata stabilizirana s pepeli biomase za zelene kompozite v gradbeništvu, Ljubljana, Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., Zavod za gradbeništvo Slovenije.

http://www.sdzy-drustvo.si/si/images/vodni_dnevi/2013/referati/15-Pavsic-ref.pdf (Pridobljeno 15. 8. 2014.)

Pregled tehničnega soglasja STS-09/0065. 2014. Zavod za gradbeništvo Slovenije,

<http://www.zag.si/si/index.php?nav0=storitve&nav1=ts&nav2=ts2&id=1140> (Pridobljeno, 15. 8. 2014.)

Uredba o odlagališčih odpadkov. Uradni list RS št. 10/2014: 827.

<http://www.uradni-list.si/1/content?id=116227> (Pridobljeno 15. 8. 2014.)

Zavod za gradbeništvo. 2014. Povpraševanje o pepelih. Sporočilo za: Ana Mladenovič, Laboratorij za betone, kamen in reciklirane materiale. 3. januar, 6. avgust 2014. Osebna komunikacija.

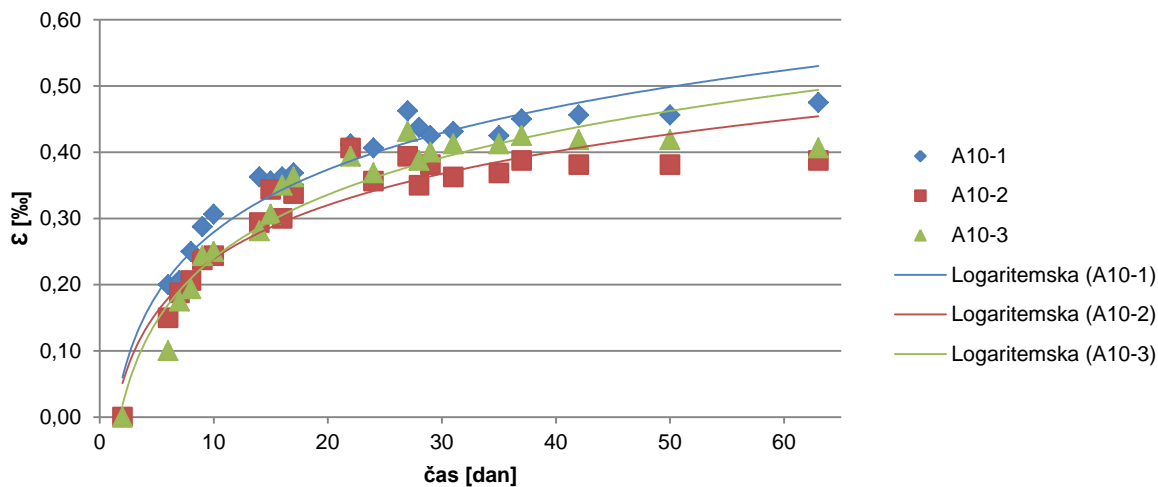
SEZNAM PRILOG

Priloga A: SKRČKI IN RAZTEZKI POSAMEZNIH BETONOV

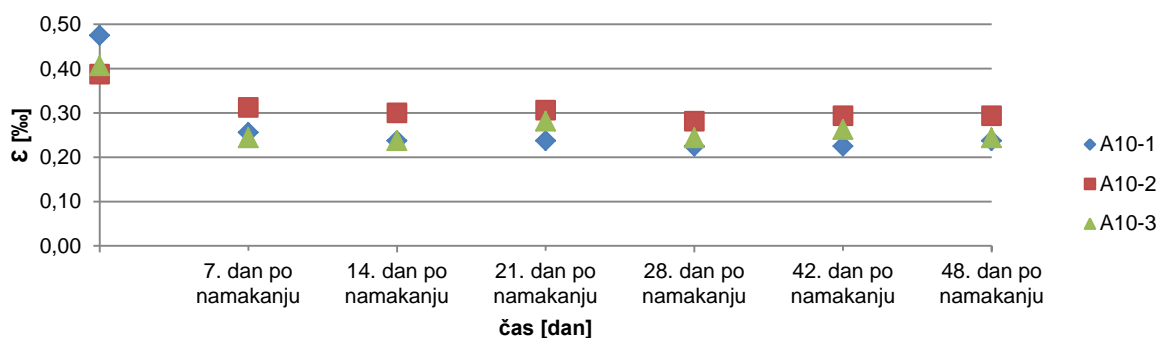
Priloga A 1: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 10 mas %	C
Priloga A 2: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 10 mas %	C
Priloga A 3: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 15 mas %	D
Priloga A 4: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 15 mas %	D
Priloga A 5: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 20 mas %	D
Priloga A 6: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 20 mas %	E
Priloga A 7: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 10 mas %.....	E
Priloga A 8: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 10 mas %.....	E
Priloga A 9: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 15 mas %.....	F
Priloga A 10: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 15 mas %.....	F
Priloga A 11: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 20 mas %.....	F
Priloga A 12: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 20 mas %.....	G
Priloga A 13: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 10 mas %.....	G
Priloga A 14: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 10 mas %.....	G
Priloga A 15: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 15 mas %.....	H
Priloga A 16: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 15 mas %.....	H
Priloga A 17: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 20 mas %.....	H
Priloga A 18: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 20 mas %.....	I
Priloga A 19: Skrčki betonov z 0 mas % pepela – referenca.....	I
Priloga A 20: Raztezki betonov z 0 mas % pepela - referenca.....	I

Ta stran je namenoma prazna.

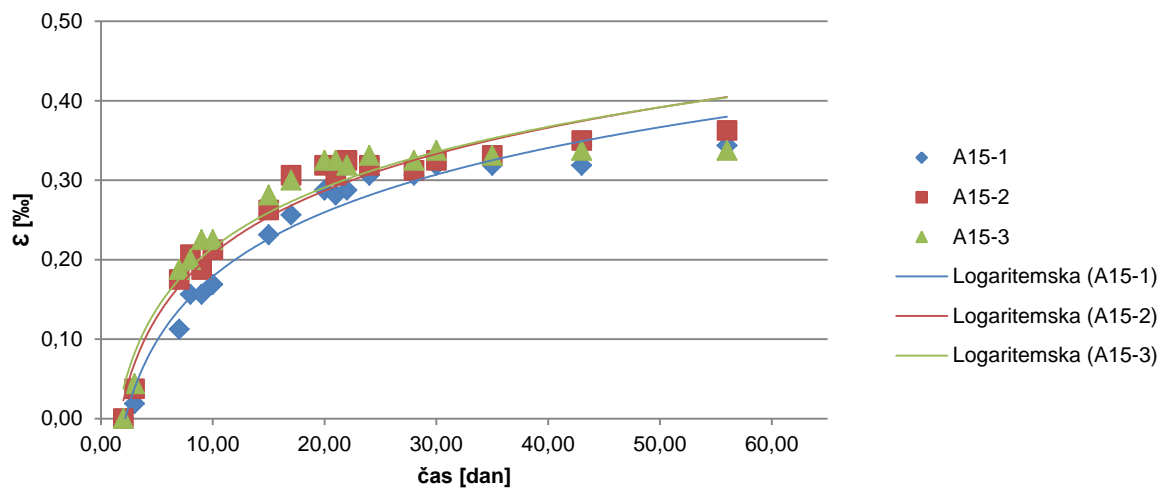
PRILOGA A: SKRČKI IN RAZTEZKI POSAMEZNIH BETONOV



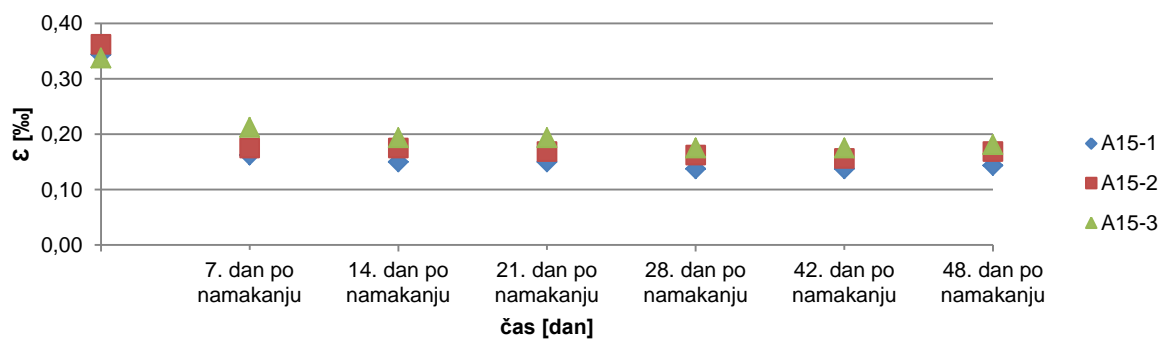
Priloga A 1: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 10 mas %



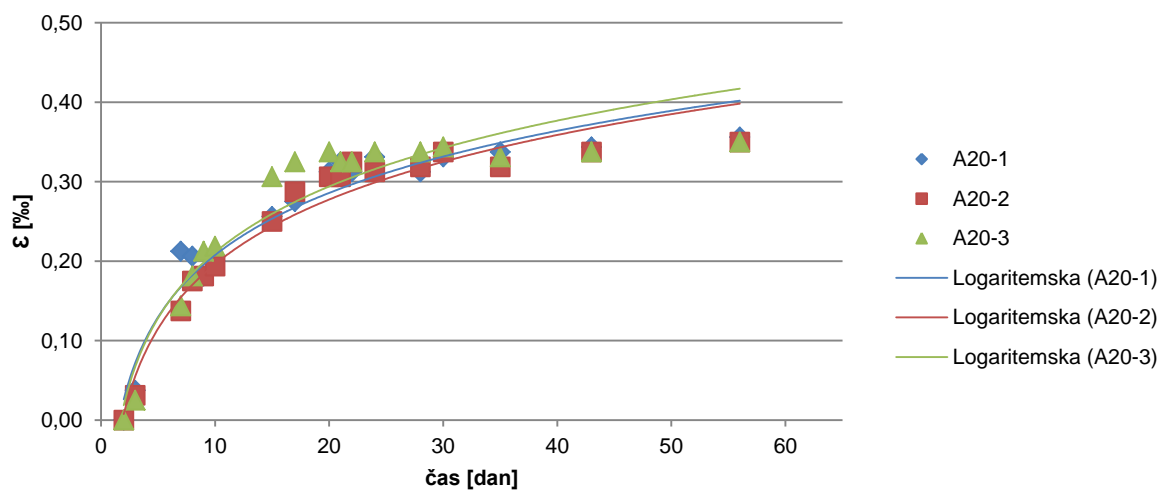
Priloga A 2: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 10 mas %



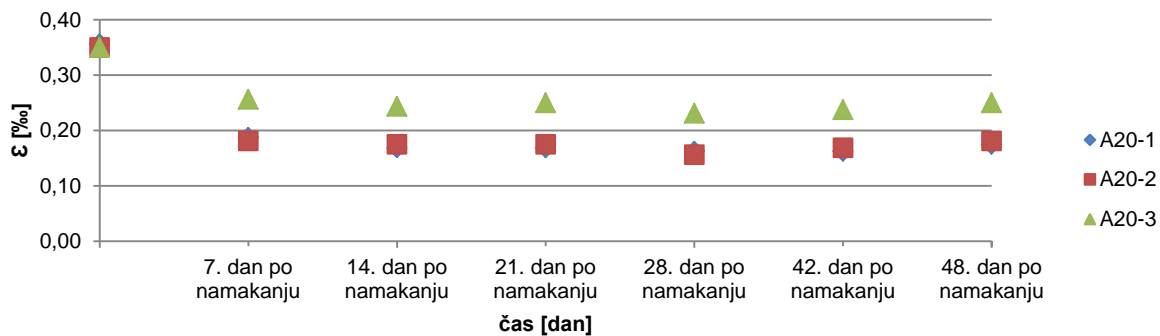
Priloga A 3: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 15 mas %



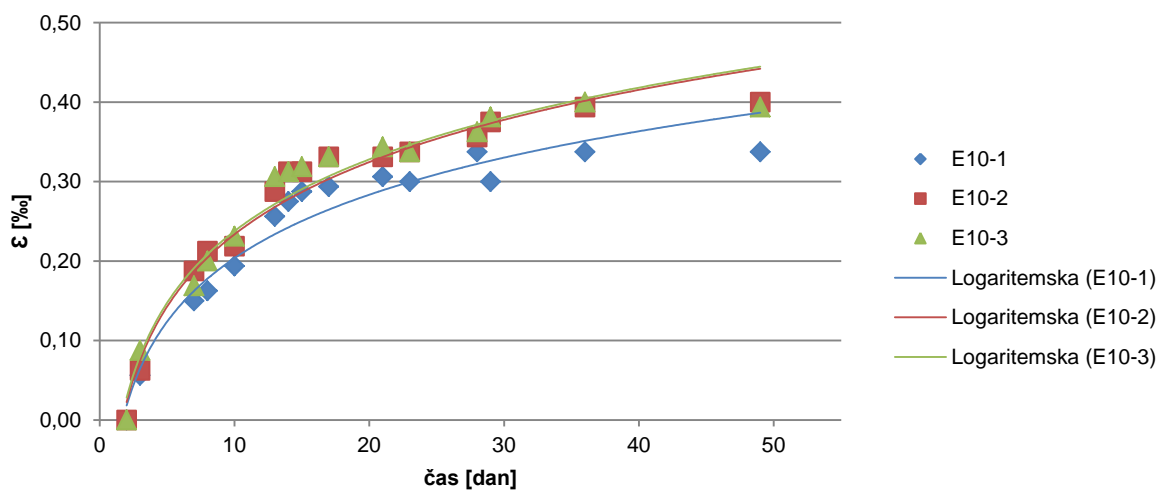
Priloga A 4: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 15 mas %



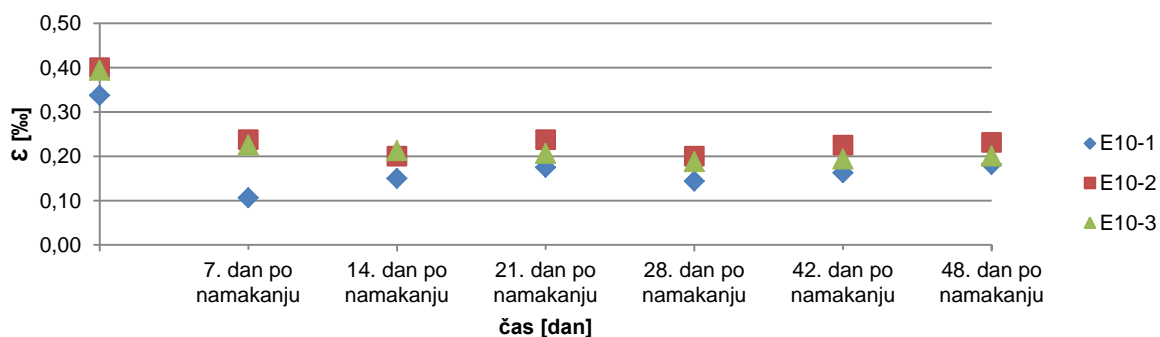
Priloga A 5: Skrčki betonov s pepelom Avstrija – 20 mas %



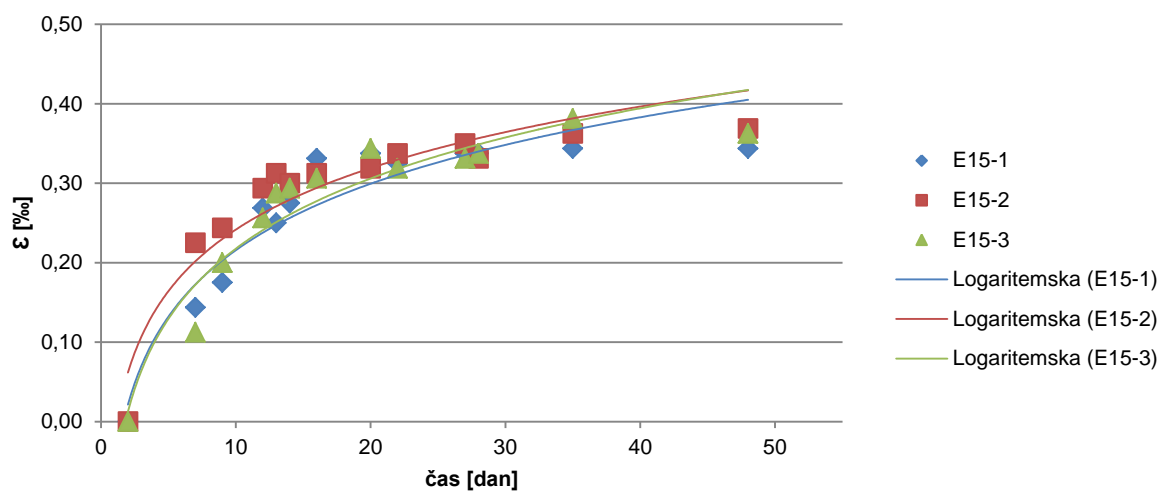
Priloga A 6: Raztezki betonov s pepelom Avstrija – 20 mas %



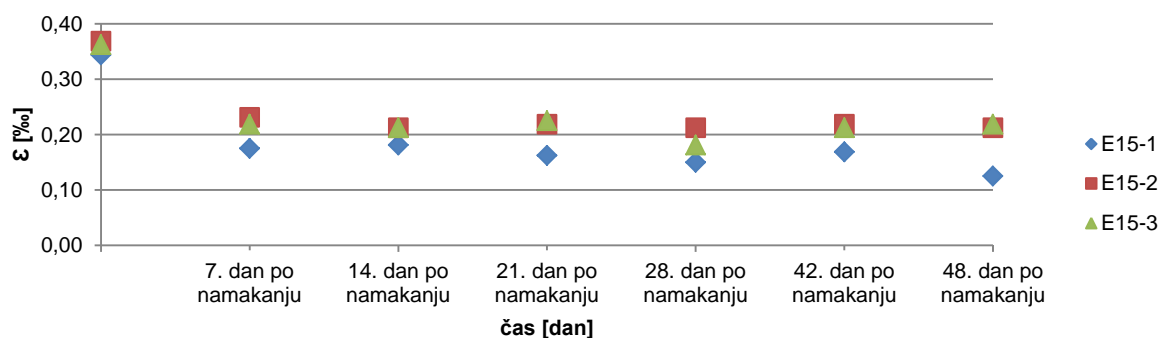
Priloga A 7: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 10 mas %



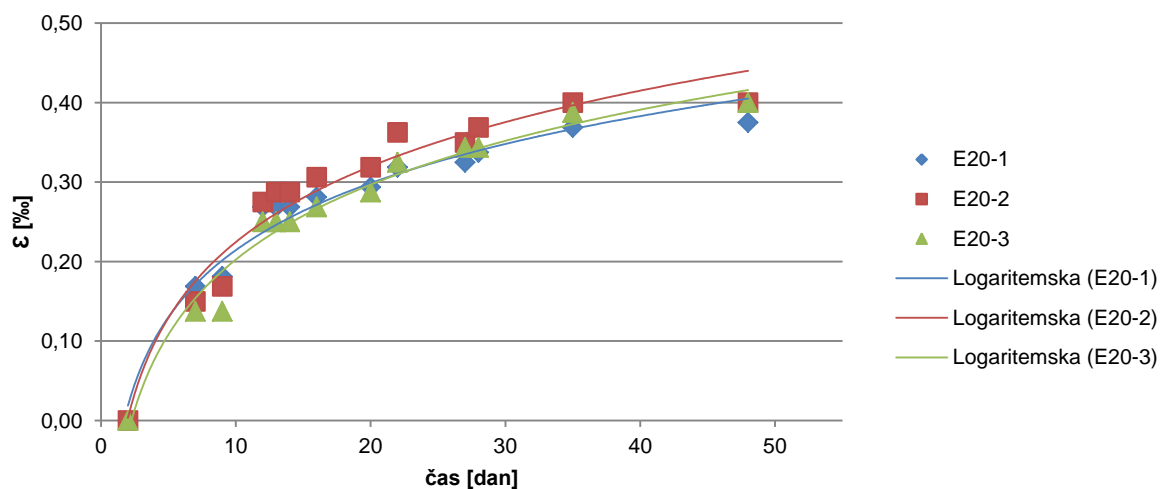
Priloga A 8: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 10 mas %



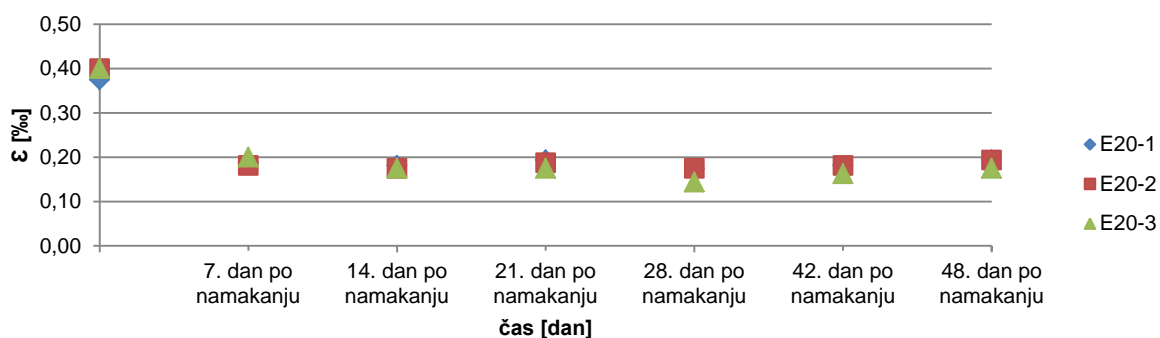
Priloga A 9: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 15 mas %



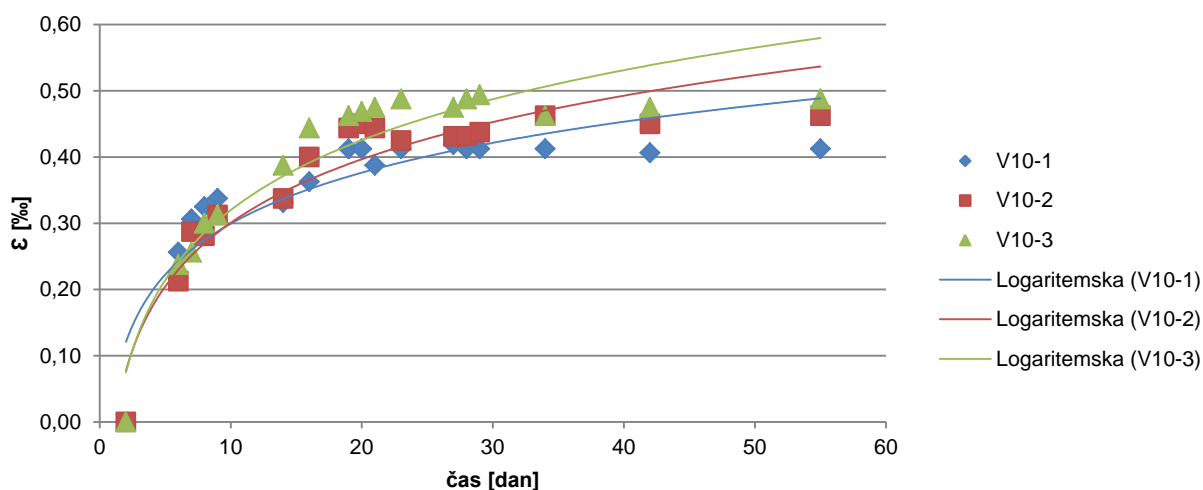
Priloga A 10: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 15 mas %



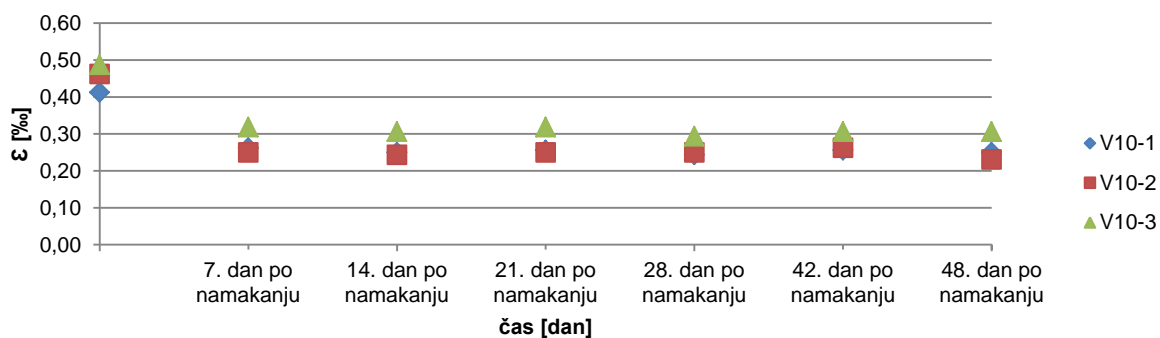
Priloga A 11: Skrčki betonov s pepelom Energoles – 20 mas %



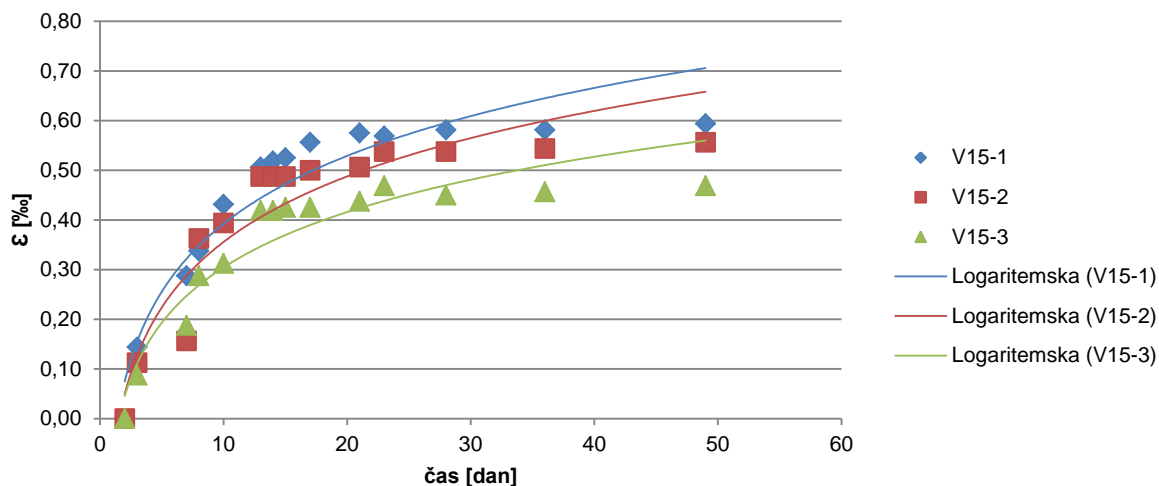
Priloga A 12: Raztezki betonov s pepelom Energoles – 20 mas %



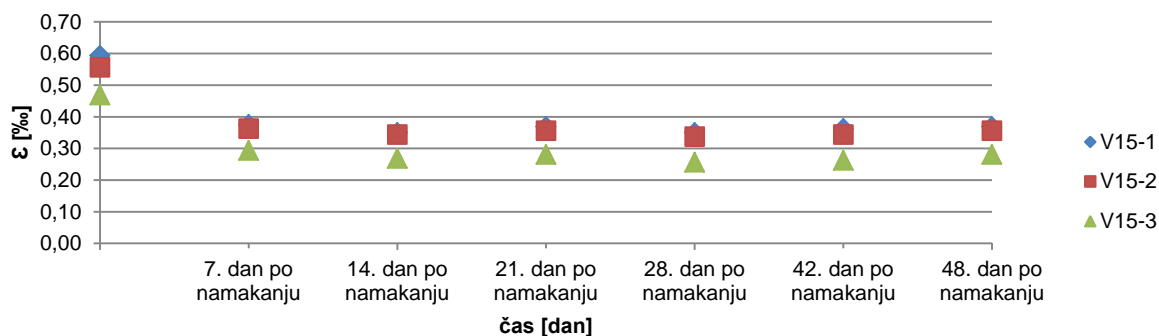
Priloga A 13: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 10 mas %



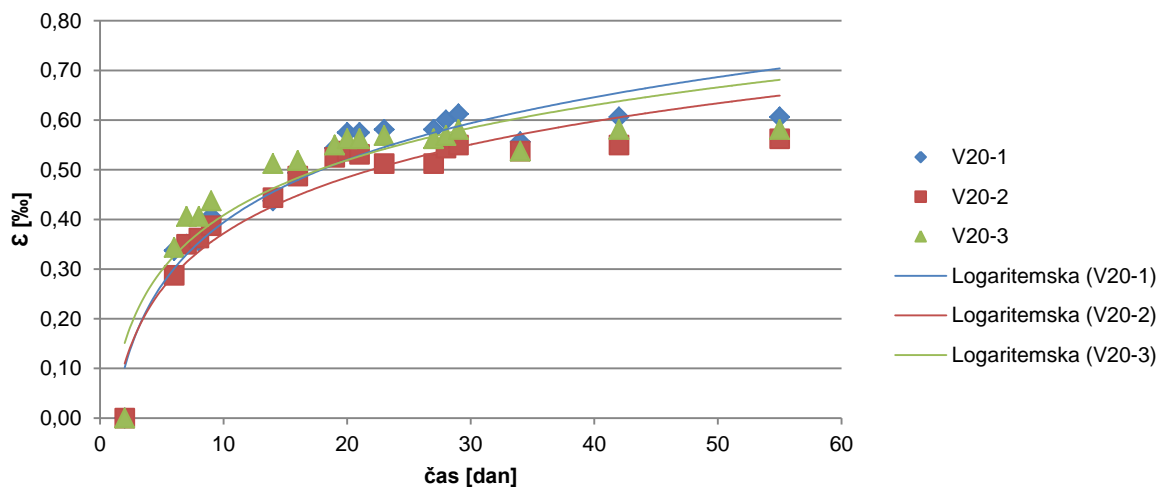
Priloga A 14: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 10 mas %



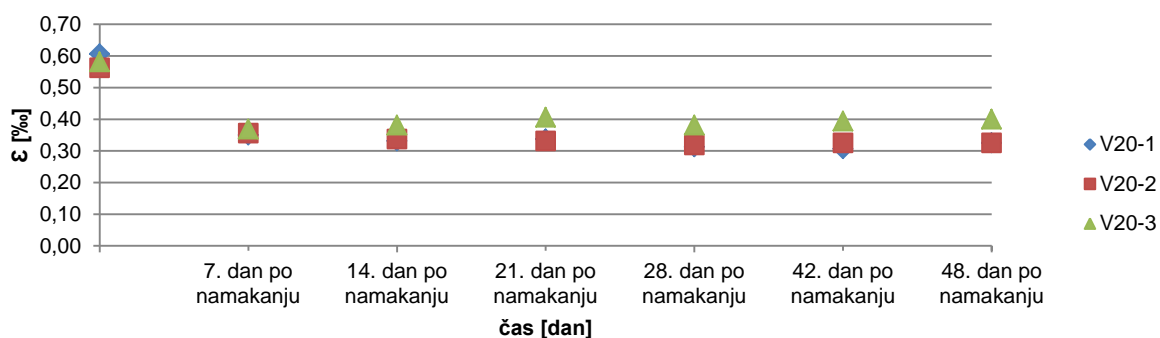
Priloga A 15: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 15 mas %



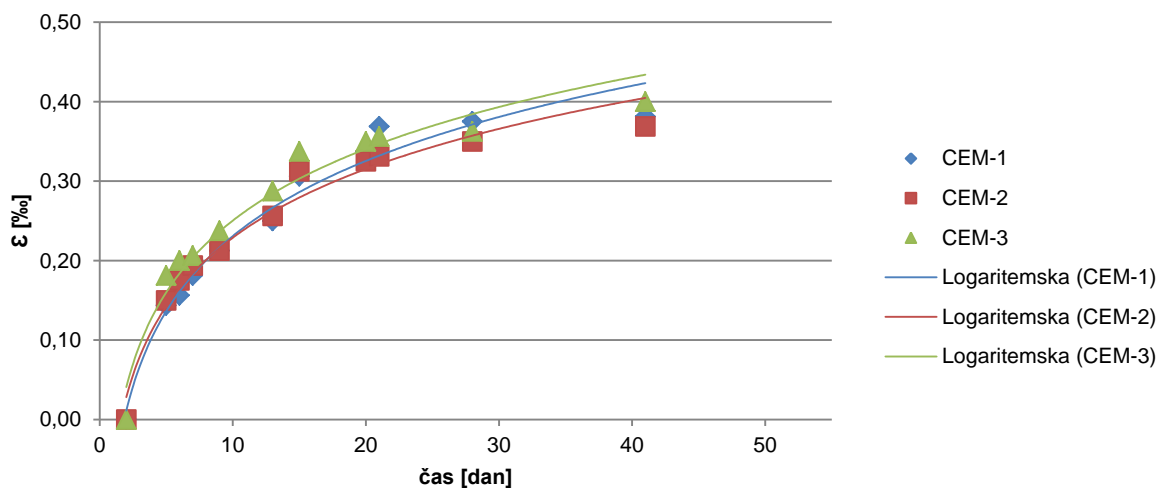
Priloga A 16: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 15 mas %



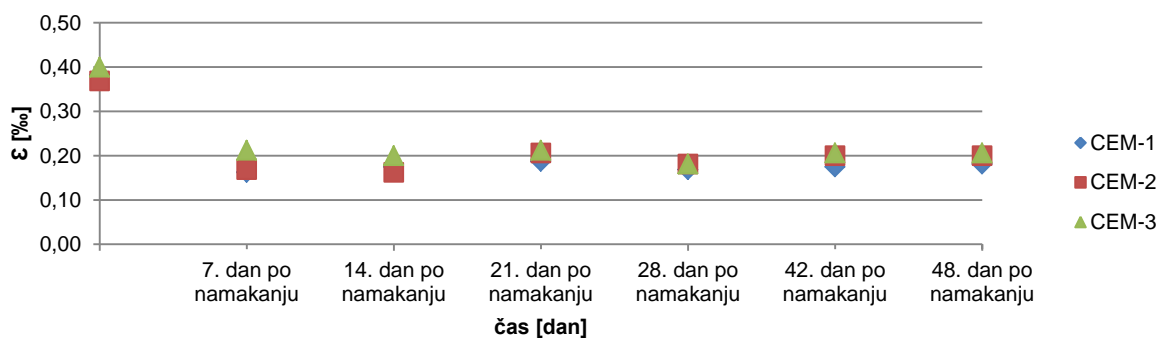
Priloga A 17: Skrčki betonov s pepelom Vipap – 20 mas %



Priloga A 18: Raztezki betonov s pepelom Vipap – 20 mas %



Priloga A 19: Skrčki betonov z 0 mas % pepela – referenca



Priloga A 20: Raztezki betonov z 0 mas % pepela - referenca