



Ključni rezultati ispitivanja tehničkih i ekoloških karakteristika morta i betona s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a

Domagoj Nakić, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



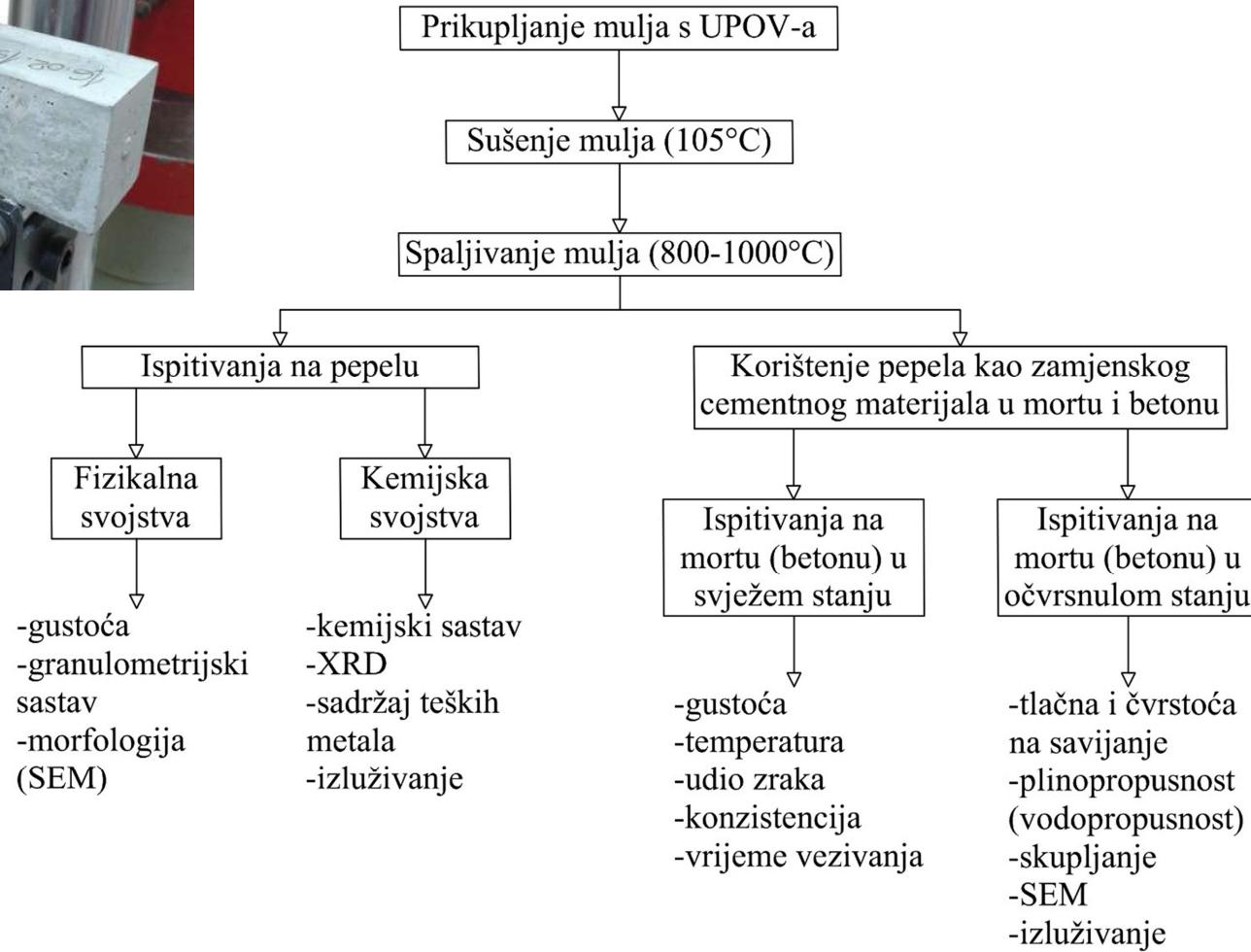
- Ispitivana je mogućnost i opravdanost zbrinjavanja pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV-a u proizvodnji morta i betona koristeći pepeo kao zamjenu za dio cementa
- Najveći dio ispitivanja odrađen je na mortu budući da je pogodan za početne faze ispitivanja radi praktičnosti pri ugrađivanju (manje dimenzije ispitnih uzoraka, odnosno manje potrebne količine materijala) i ispitivanju (više uzoraka i više ispitanih parametara)





Analiziran utjecaj većeg broja parametara:

- Temperatura spaljivanja (800, **900** i 1000 °C)
- Primijenjena tehnologija pročišćavanja otpadne vode i obrade mulja
- Vodocementni (v/c), odnosno vodovezivni (v/v_e) omjer (0.45, **0.50**, 0.55)
- Maseni udio pepela (%) kao zamjena za cement (5, **10**, **20** i 30%)
- Dodaci prilikom spaljivanja mulja (suspaljivanje) ili prilikom miješanja morta i betona

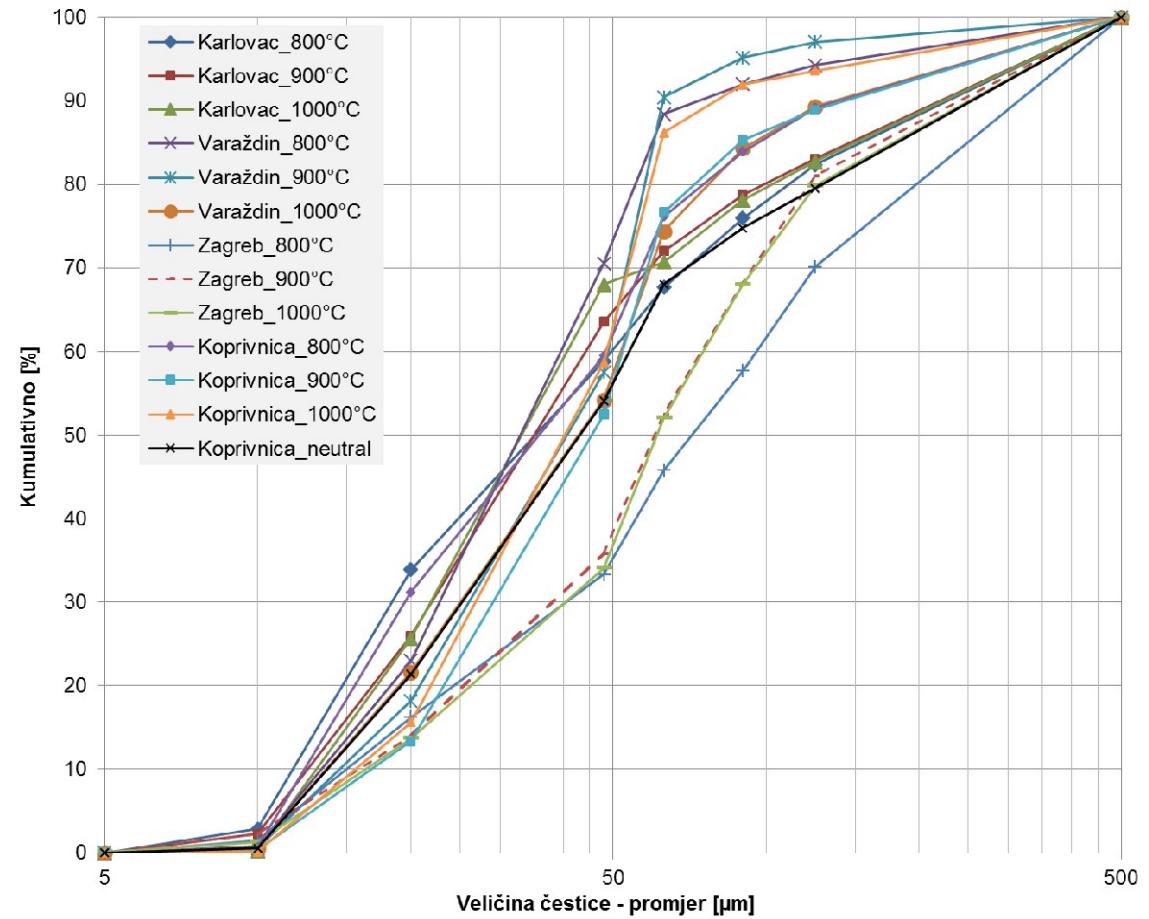
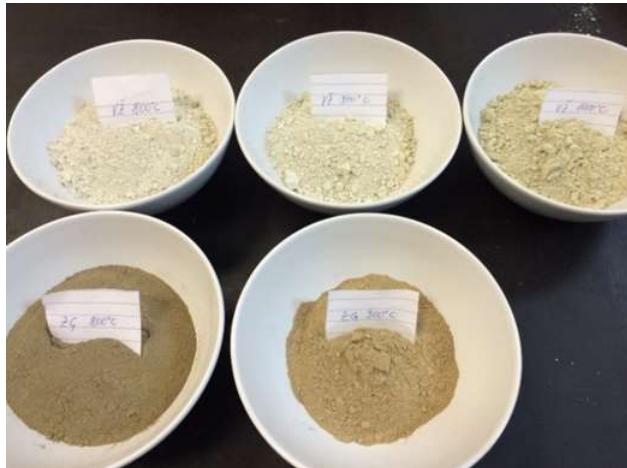


Karakteristike pepela

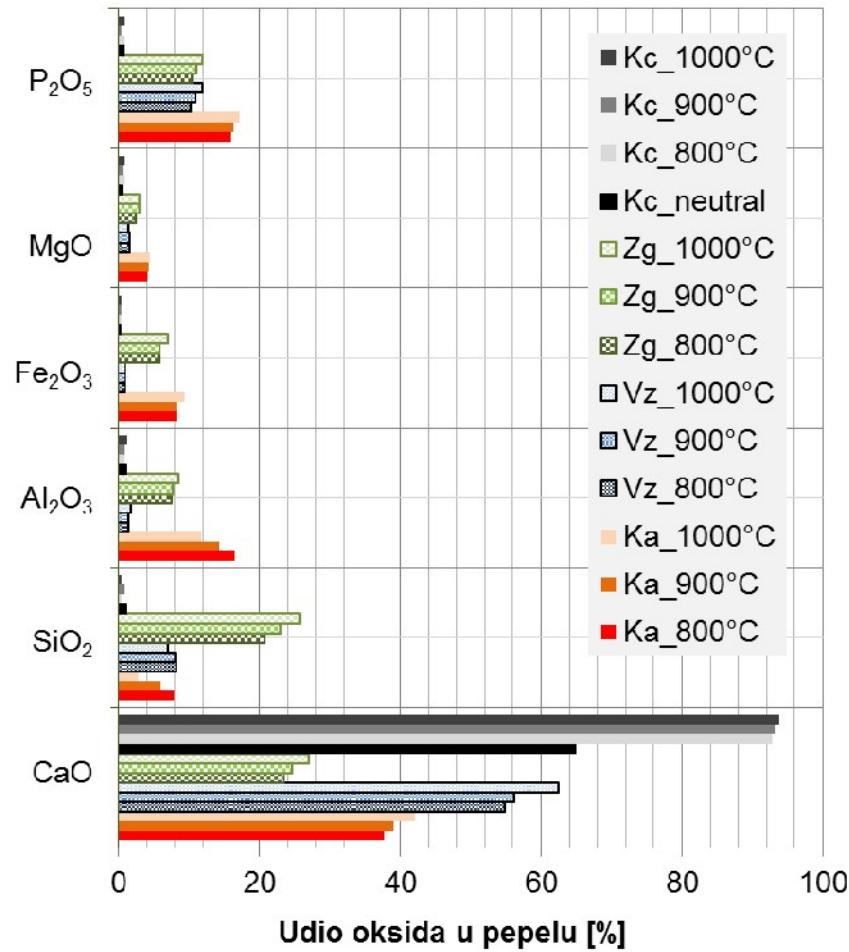
Porijeklo mulja (lokacija UPOV-a)	Gustoća (kg/dm ³)			
	neutral	800°C	900°C	1000°C
Karlovac	-	2.62	2.69	2.83
Koprivnica	2.05	2.78	2.90	2.95
Varaždin	-	2.52	2.66	2.94
Zagreb	-	2.69	2.75	2.83



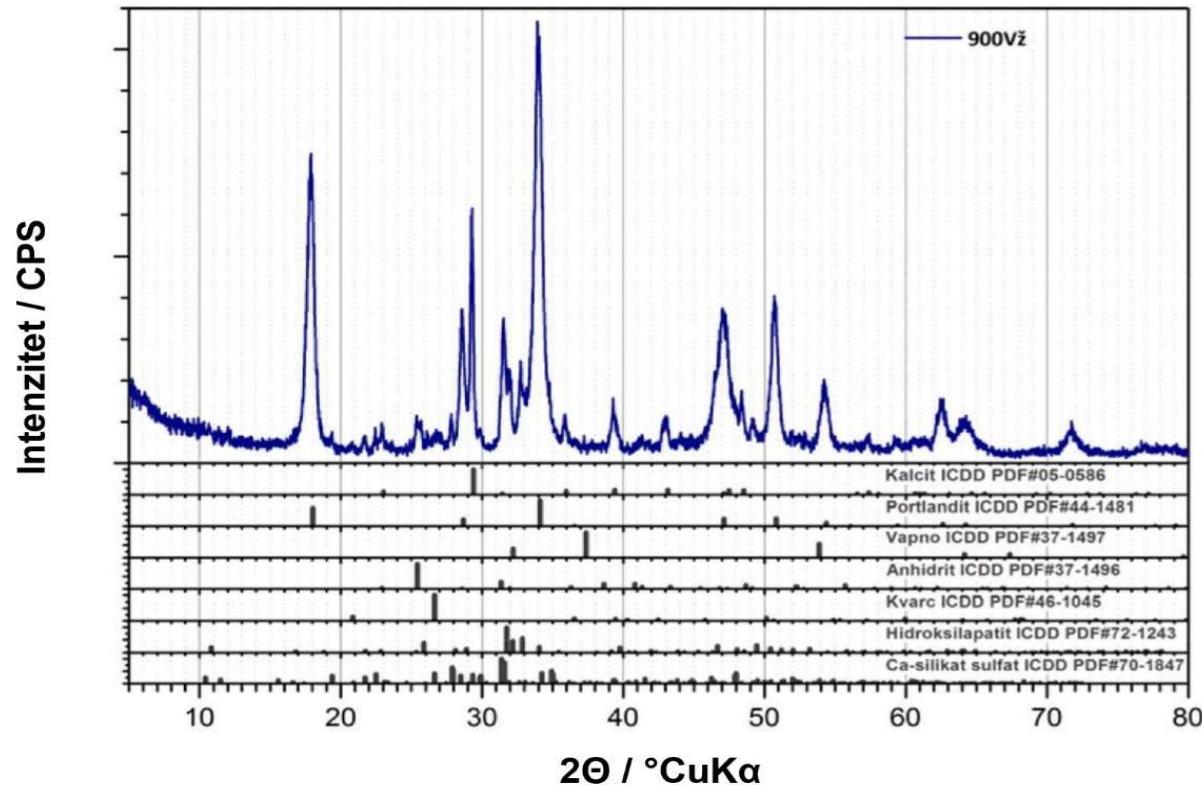
Karakteristike pepela



Karakteristike pepela



Karakteristike pepela



Kristalni sastav: kvarc, kalcit, portlandit, vapno, anhidirt, ilit...

Sastav mješavina cementnog morta

- Miješani portlandski cement CEM II/B-M (S-V) 42,5N (manji dio ispitivanja i s CEM I 52.5N)
- Drobljeni dolomit granulacije 0–4 mm
- Voda iz vodovoda
- Pepeo dobiven spaljivanjem mulja



Materijal	KA M ₂₀ -B		
	Masa (kg)	Gustoća (kg/dm ³)	Volumen (dm ³)
Cement	2,027	2,947	0,688
Pepeo (20%)	0,507	2,667	0,190
Voda	1,267	1,000	1,267
v/v _e = 0,5	-	-	-
Zrak 2,5%	-	-	0,125
Agregat	7,508	2,750	2,730
Ukupno	11,309	2,262	5,000

Sastav mješavina betona

- CEM II/B-M (S-V) 42.5N
- Drobjeni dolomit granulacije:
 - 0 – 4 mm
 - 4 – 8 mm
 - 8 – 16 mm
- Voda iz vodovoda
- Pepeo dobiven spaljivanjem mulja
- Superplastifikator

21 mješavina betona

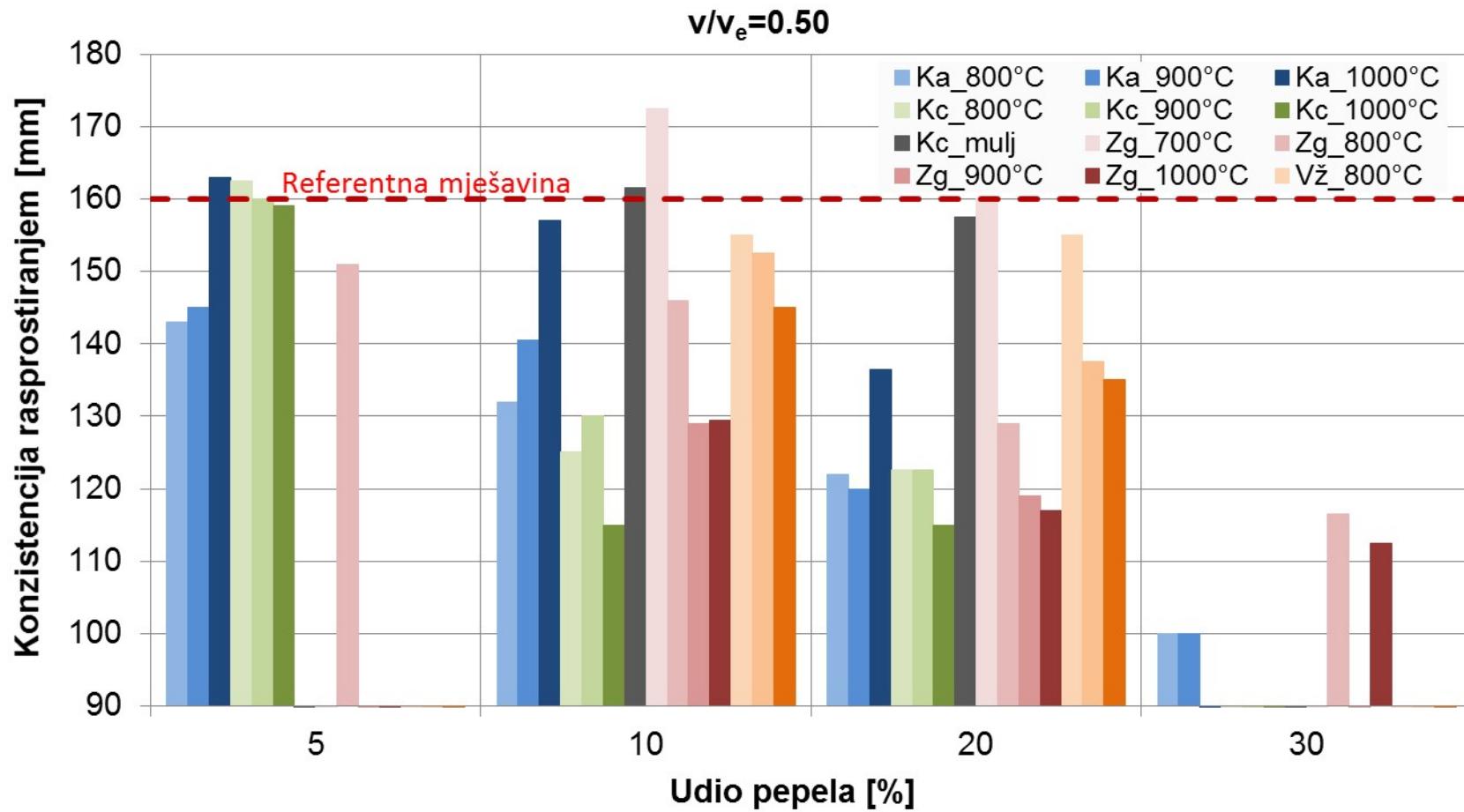
Materijal		KC M ₂₀ -B			
		Masa (kg)	Gustoća (kg/dm ³)	Volumen (dm ³)	Masa za 37,5 l (kg)
Cement		240,00	2,947	81,44	9,00
Pepeo (20%)		60,00	2,778	21,60	2,25
Voda		150,00	1,000	150,00	5,63
v/v _e = 0.50		-	-	-	-
Zrak 2.50%		-	-	25,00	-
AGREGAT	0 – 4	50%	992,70	2,750	360.98
	4 – 8	20%	397,08	2,750	144.39
	8 – 16	30%	595,62	2,750	216.59
Ukupno		2435,40	2,435	1000,00	91,33

Rezultati ispitivanja na mortu i betonu u svježem stanju

- ✓ Generalni trend manje odgode vezivanja mortova s dodatkom pepela
- ✓ Povećanje poroznosti s povećanjem udjela pepela
- ✓ Povećanje temperature svježeg morta/betona s dodatkom pepela
- ✓ Porast potreba za vodom s povećanjem udjela pepela
- ✓ Obradljivost nelinearno opada s povećanjem udjela pepela; pad obradljivosti je pri većim udjelima pepela manje značajan

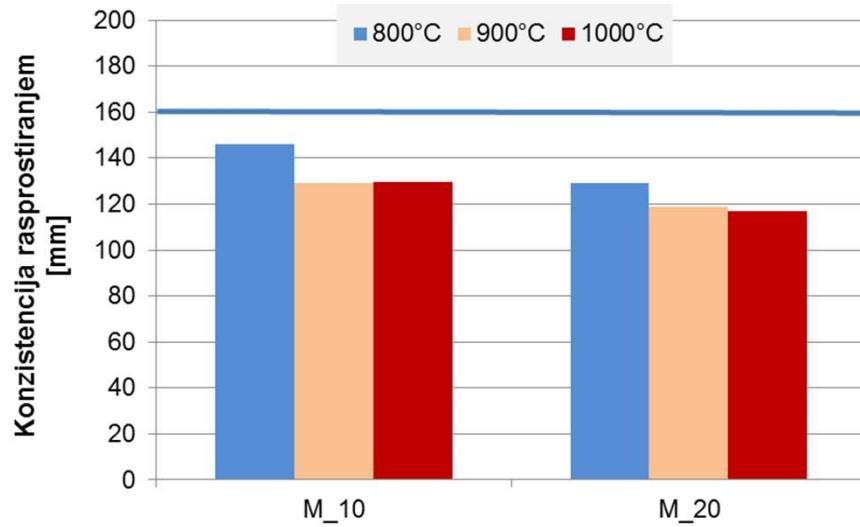


Rezultati ispitivanja na mortu i betonu u svježem stanju



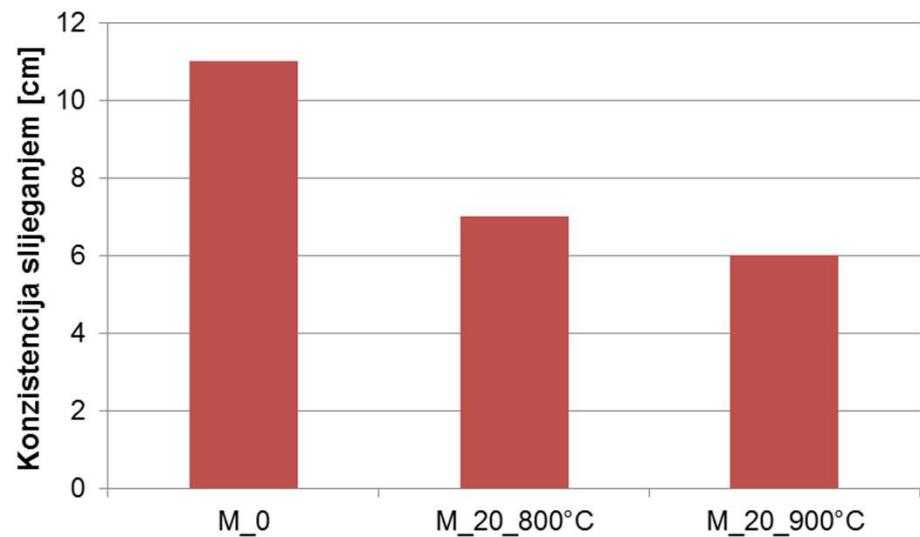
Rezultati ispitivanja na mortu i betonu u svježem stanju

MORT



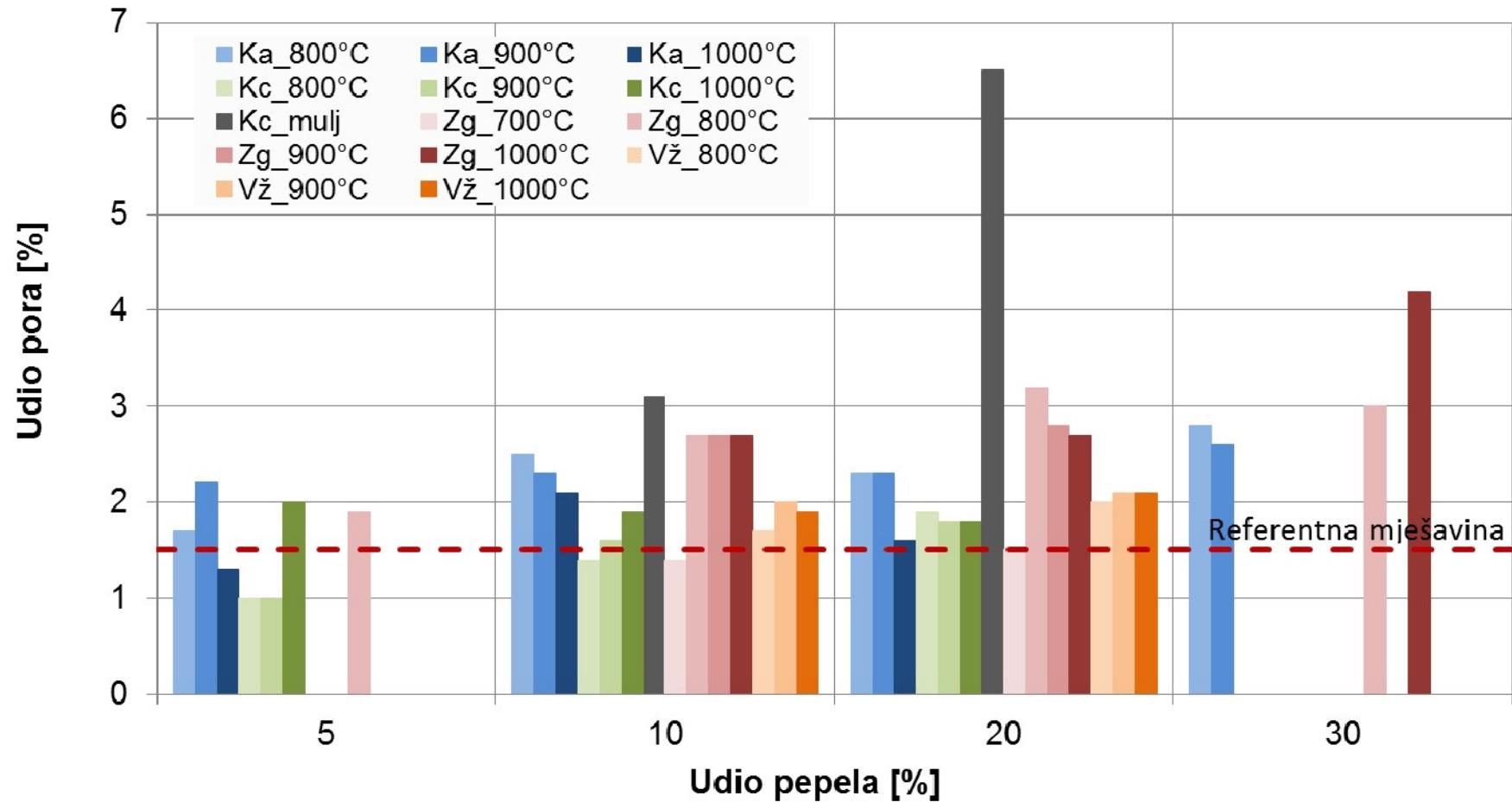
BETON

(uz dodatak
superplastifikatora)



Pepeo iz mulja s UPOV-a Zagreb

Rezultati ispitivanja na mortu u svježem stanju

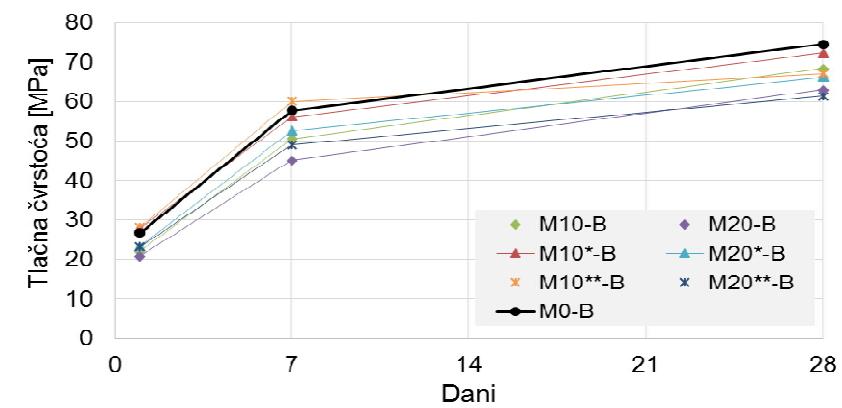
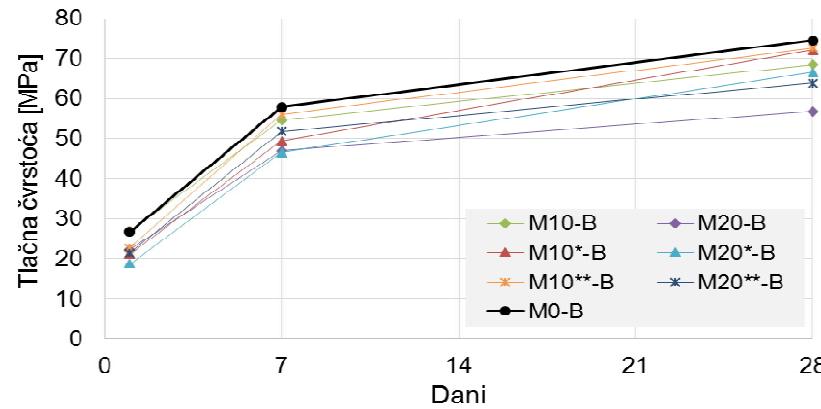
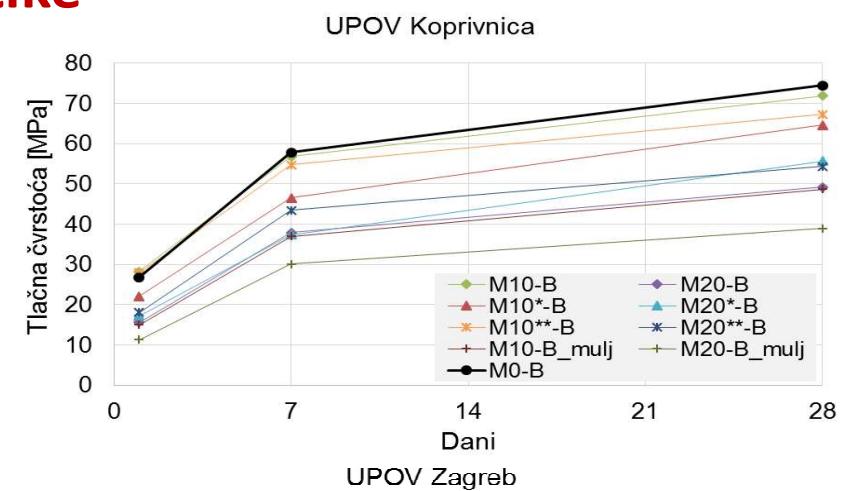
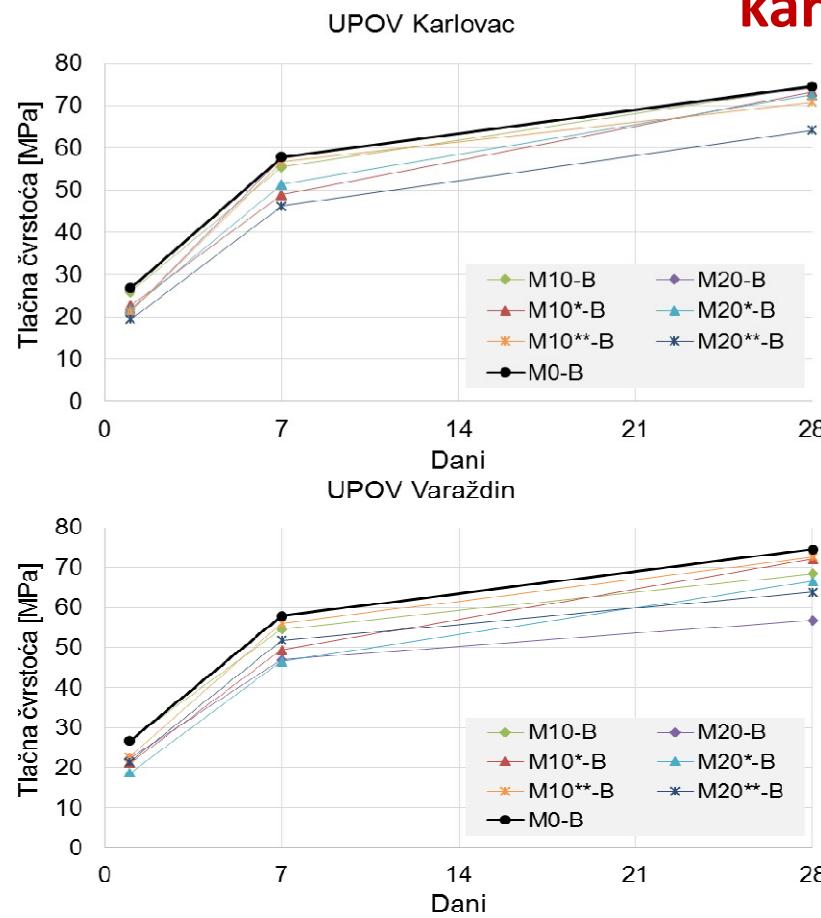


Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike

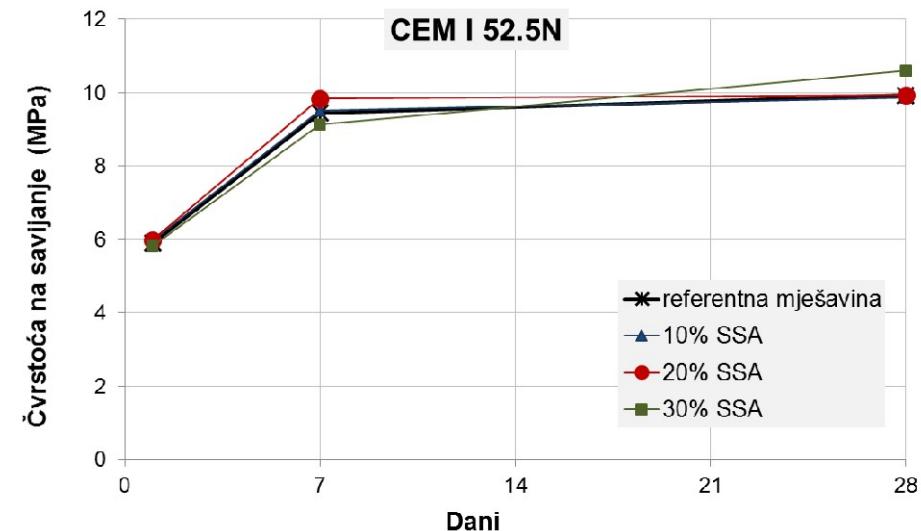
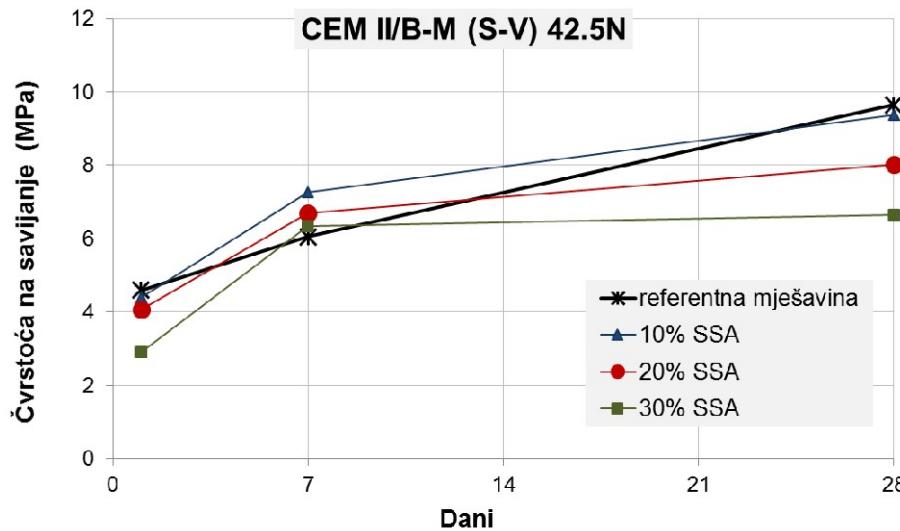
- Generalno je prisutan **blagi** pad čvrstoća s povećanjem udjela dodanog pepela, ali su pojedini uzorci razvili i jednakovrijedne ili veće čvrstoće od referentnih
- Vrijednosti čvrstoća rastu s povećanjem starosti morta za sve analizirane uzorke što je naznaka da u mortovima s dodanim pepelom dolazi do pucolanskih reakcija i posljedičnih pozitivnih učinaka na mehaničke karakteristike
- Utjecaj temperature spaljivanja mulja na mehaničke karakteristike uzorka morta s dodatkom pepela
(900°C optimalna temperatura)



Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike

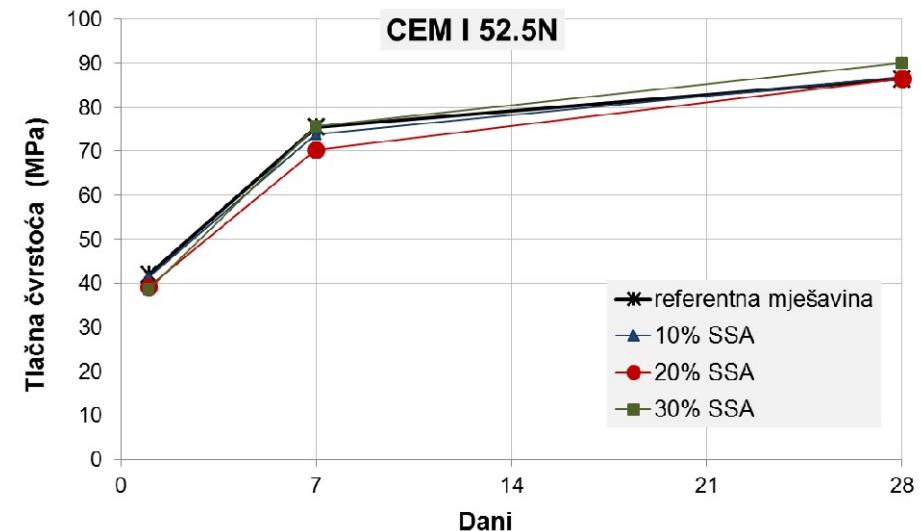
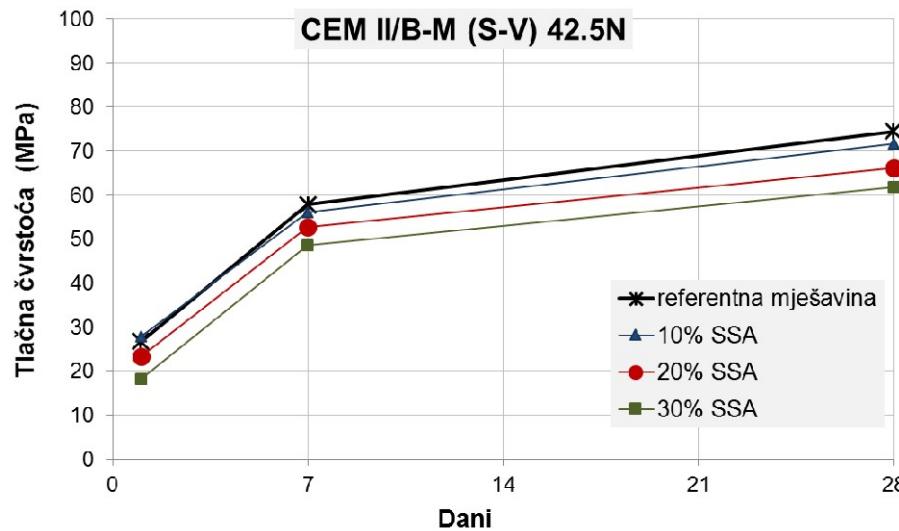


Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike



Pepeo iz mulja s UPOV-a Karlovac

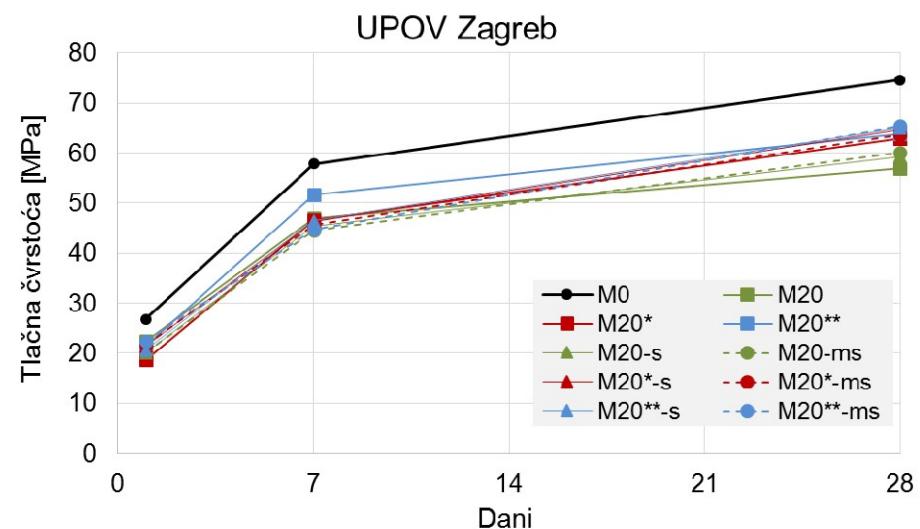
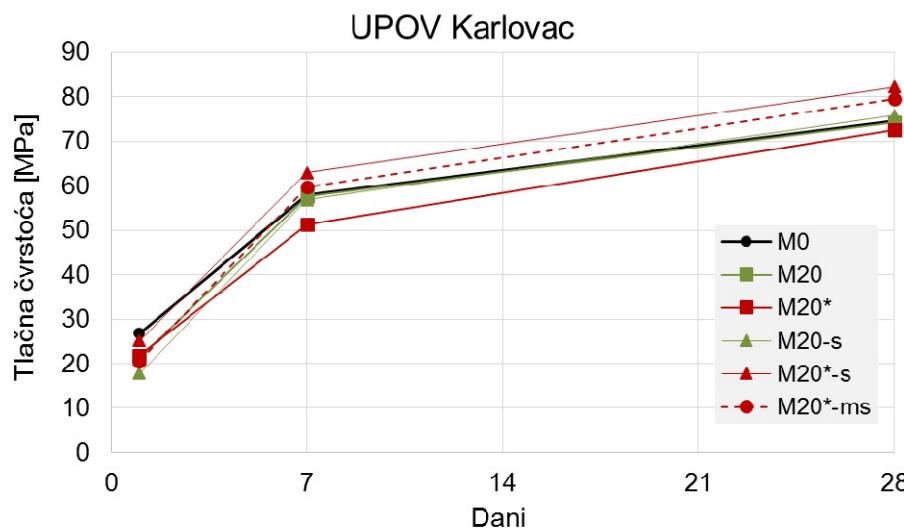
Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike



Pepeo iz mulja s UPOV-a Karlovac

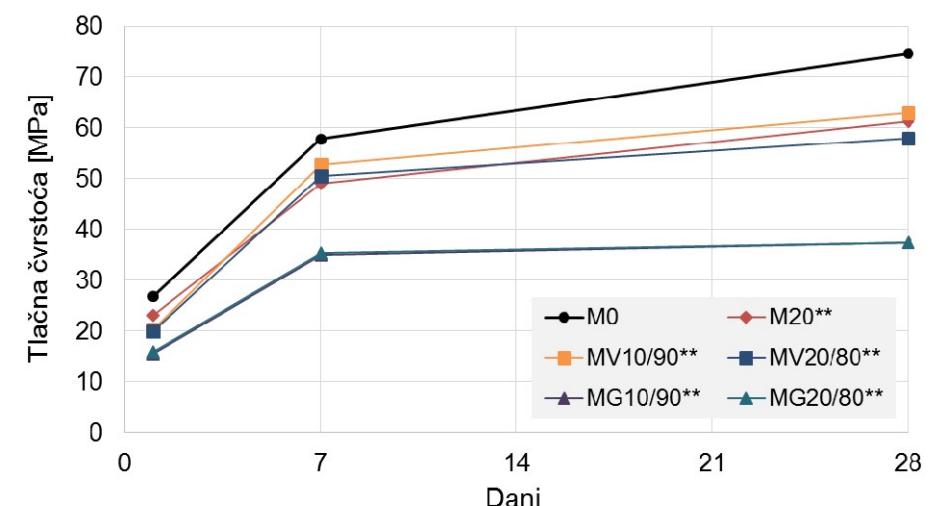
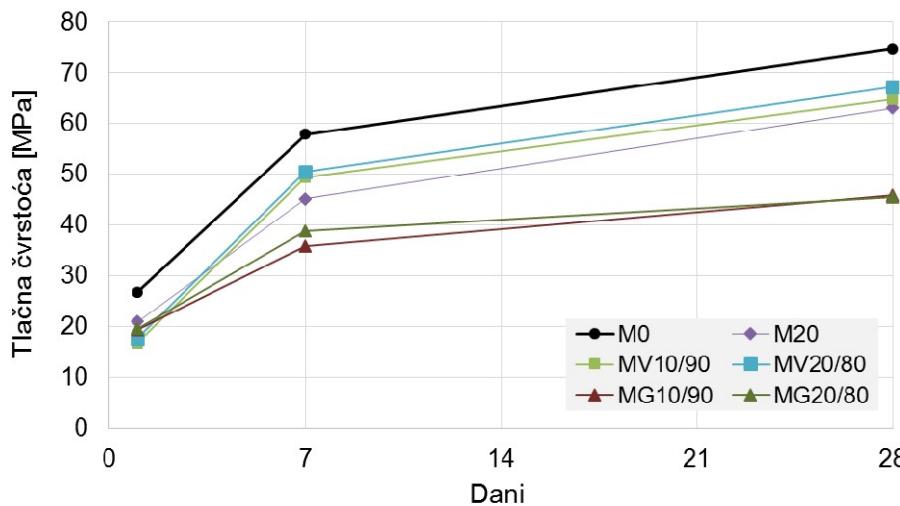
Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike

Utjecaj dodataka u procesu miješanja



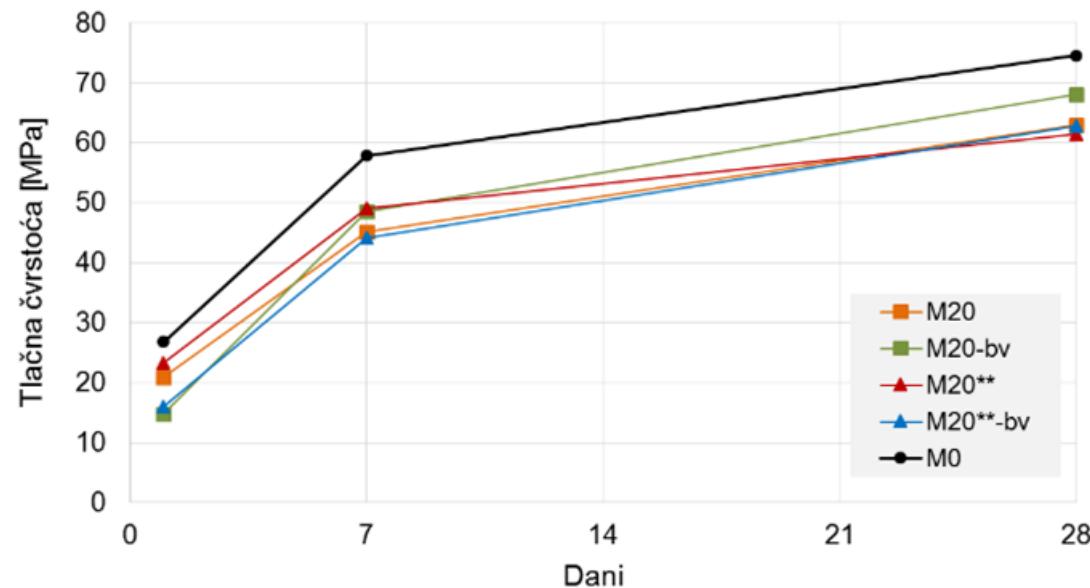
Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike

Utjecaj dodataka u procesu spaljivanja mulja

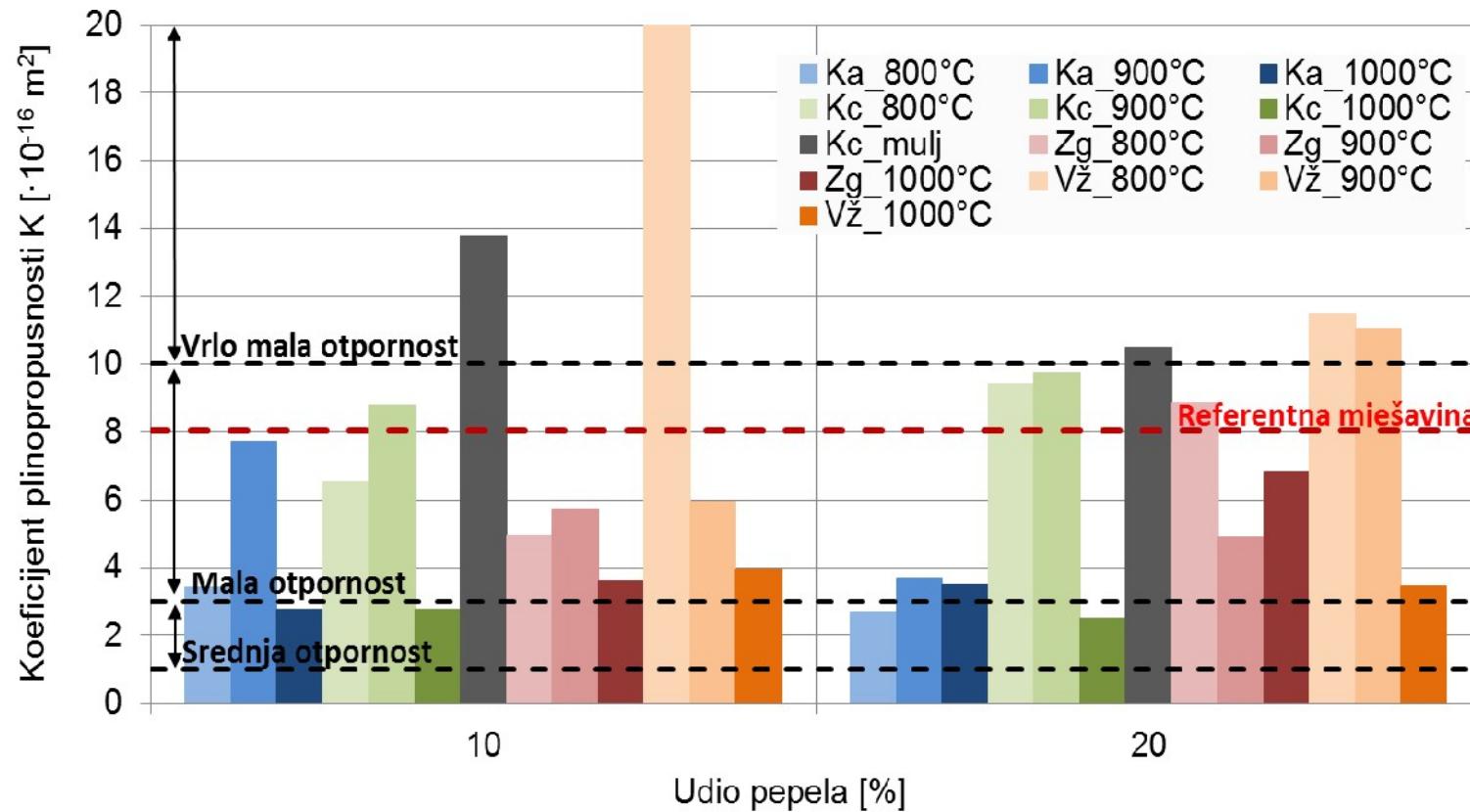


Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike

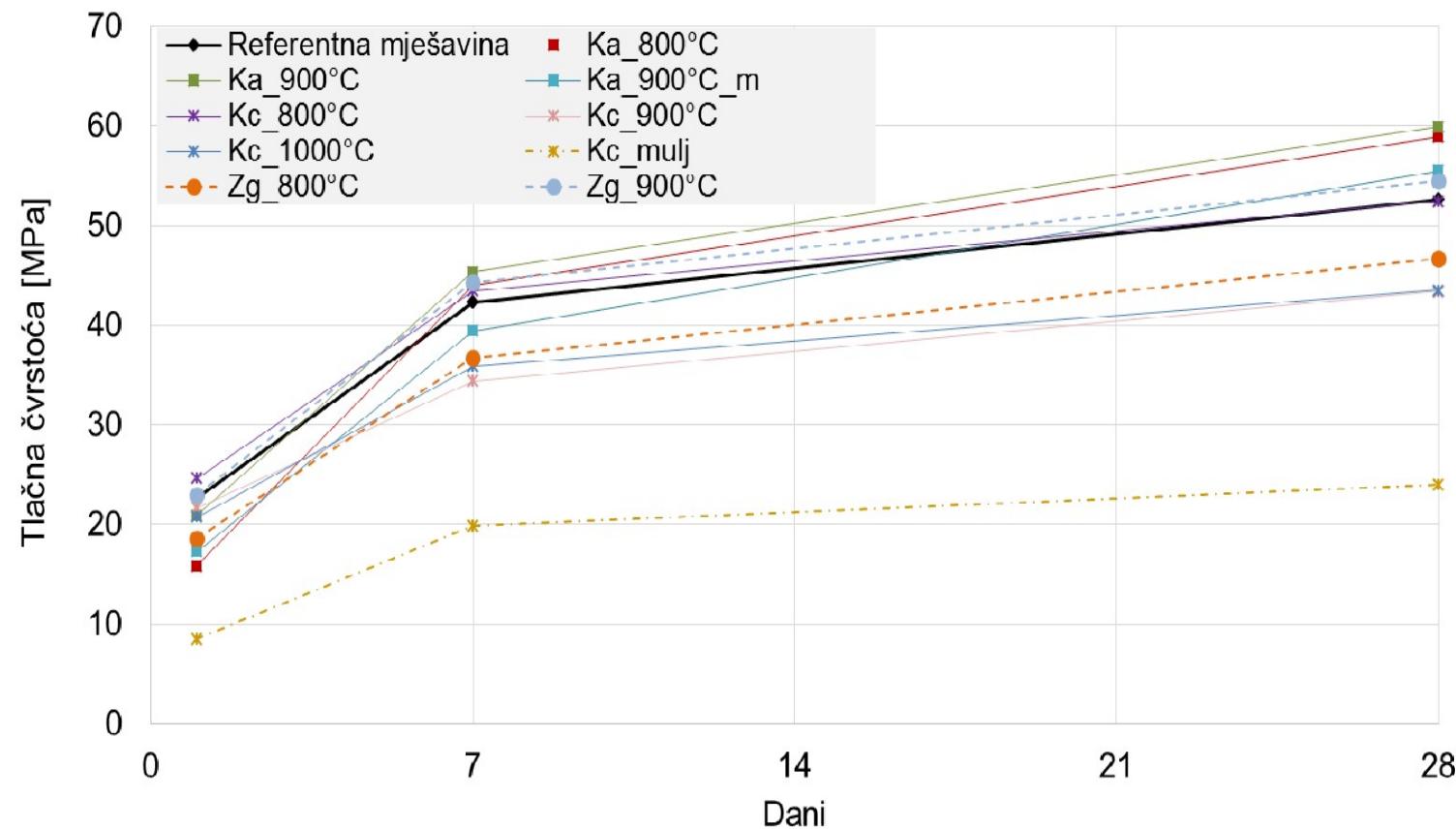
Utjecaj korištenja vapna u procesu obrade mulja



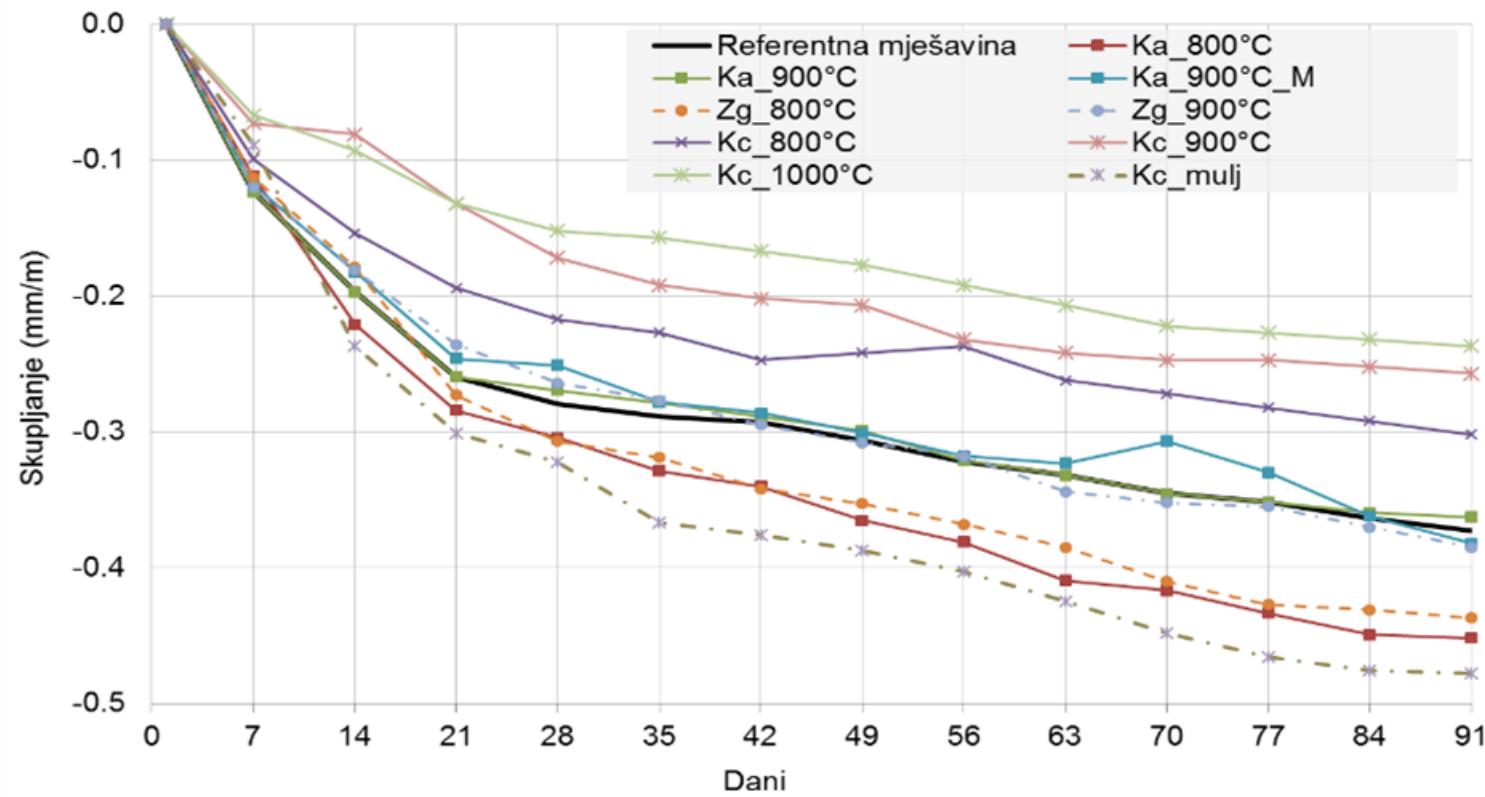
Ispitivanja na mortu u očvrsnulom stanju – plinopropusnost



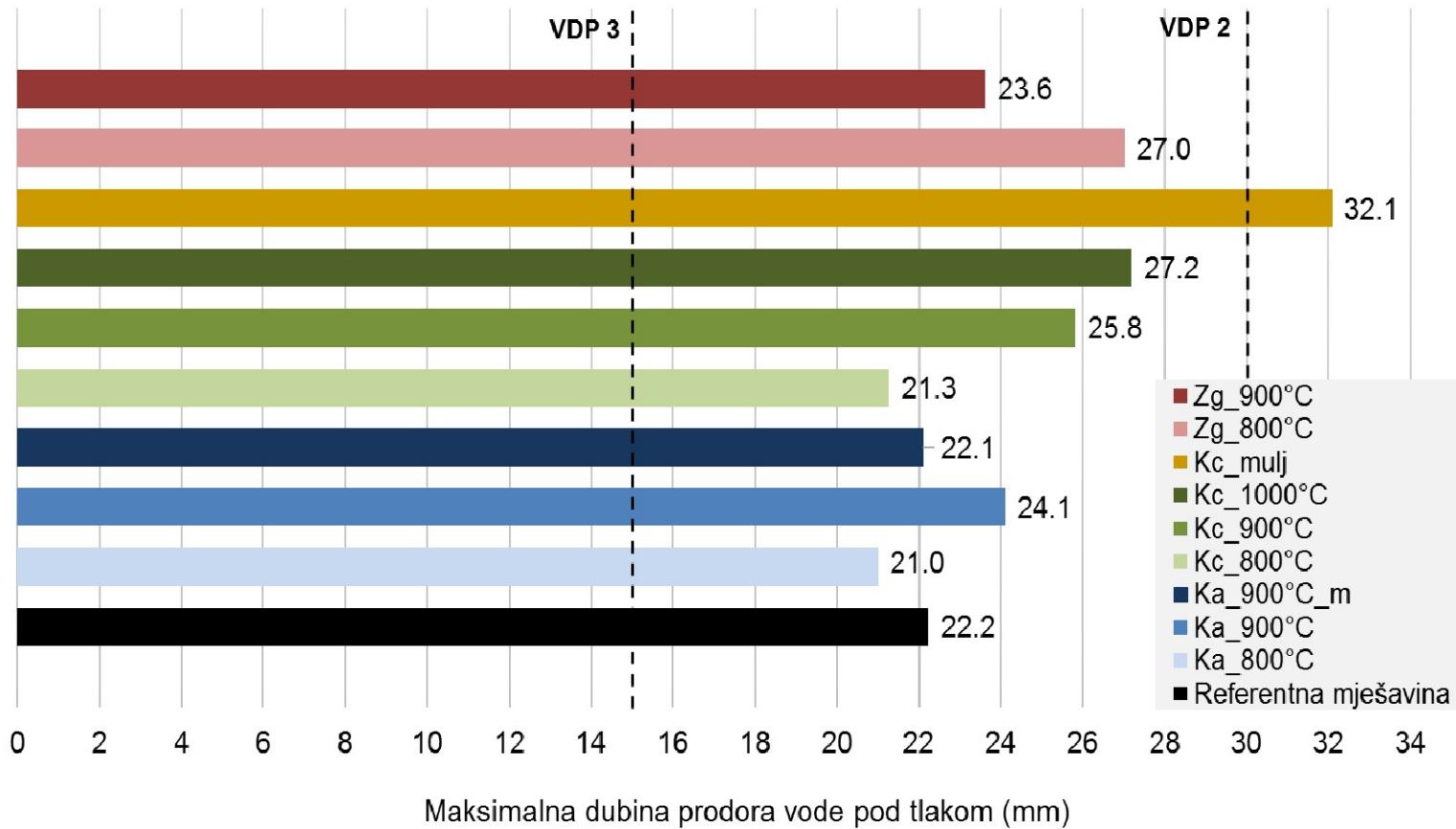
Ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju – mehaničke karakteristike



Ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju – skupljanje



Ispitivanja na betonu u očvrsnulom stanju – vodopropusnost



Ispitivanje izluživanja iz pepela i krhotina morta s ugrađenim pepelom

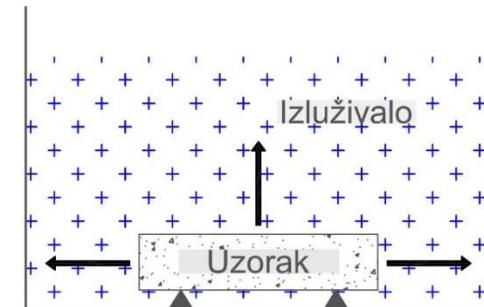
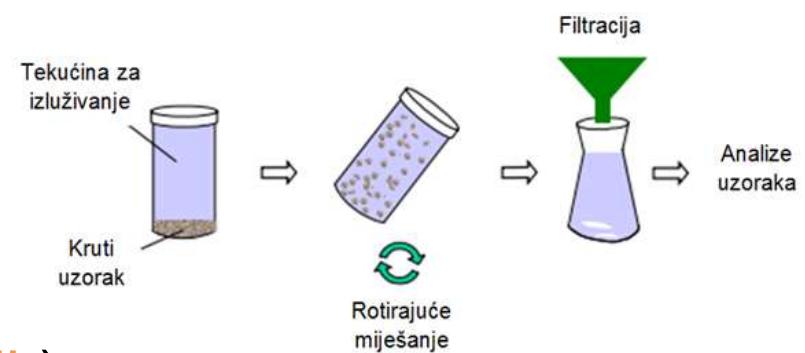
- batch leaching test:

ispitivanja na pepelu i krhotinama morta s ugrađenim pepelom

(WAC kriteriji, EU Direktiva, Pravilnik)

- tank leaching test:

ispitivanja na monolitnim uzorcima morta s ugrađenim pepelom





Rezultati ispitivanja izluživanja iz pepela

Parametar	Temp. Jed. mjere	UPOV Karlovac			UPOV Koprivnica		UPOV Zagreb		
		800°C	900°C	1000°C	neutral	900°C	800°C	900°C	1000°C
Cl ⁻	mg/l	23.8	215	322	14	10	58.5	220	26
F ⁻	mg/l	0.55	0.90	0.70	< DL	1.41	0.04	0.35	0.65
SO ₄ ²⁻	µg/l	900	211	840	1	6	41	11	1085
Cu	mg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	0.21	< DL	< DL	< DL
Zn	mg/l	0.0004	< DL	0.009	0.018	0.012	0.004	< DL	0.014
Ba	mg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0.036
Pb	µg/l	< DL	< DL	< DL	1.00	0.10	1.21	< DL	8.08
Cd	µg/l	< DL	0.021	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Ni	µg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	51.85	< DL	< DL	< DL
As	µg/l	1.935	2.870	0.908	< DL	4.318	0.705	< DL	2.236
Cr	µg/l	56.0	39.33	184.0	3.596	8.918	16.0	4.425	234.0
Se	µg/l	3.52	6.211	2.27	1.258	1.779	3.97	14.805	1.92
Co	µg/l	-	< DL	-	< DL	0.451	-	< DL	-
Mo	µg/l	681.0	169.8	912.0	50.43	114.28	394.0	114.28	657
Hg	µg/l	0.038	-	0.031	-	-	0.039	-	0.044

*< DL – ispod granice detekcije

→ Dobiveni pepeo – neopasan otpad



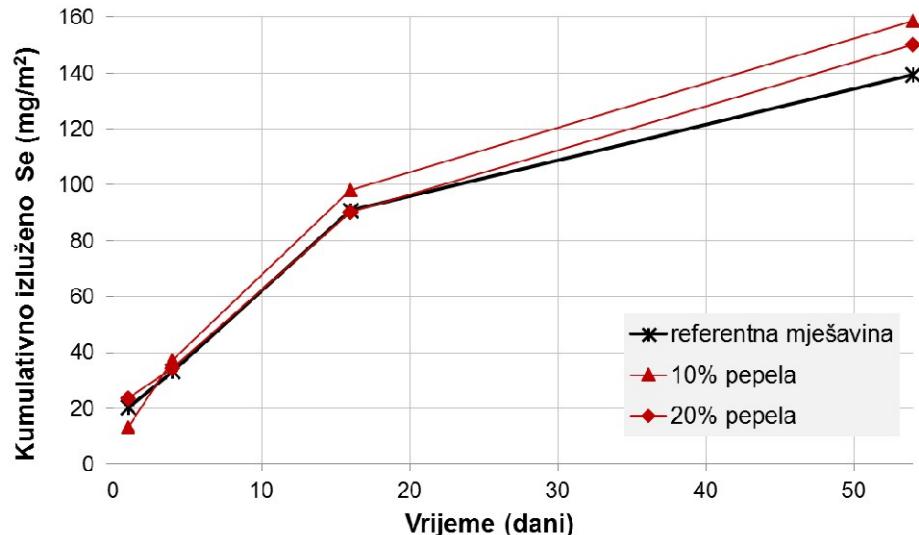
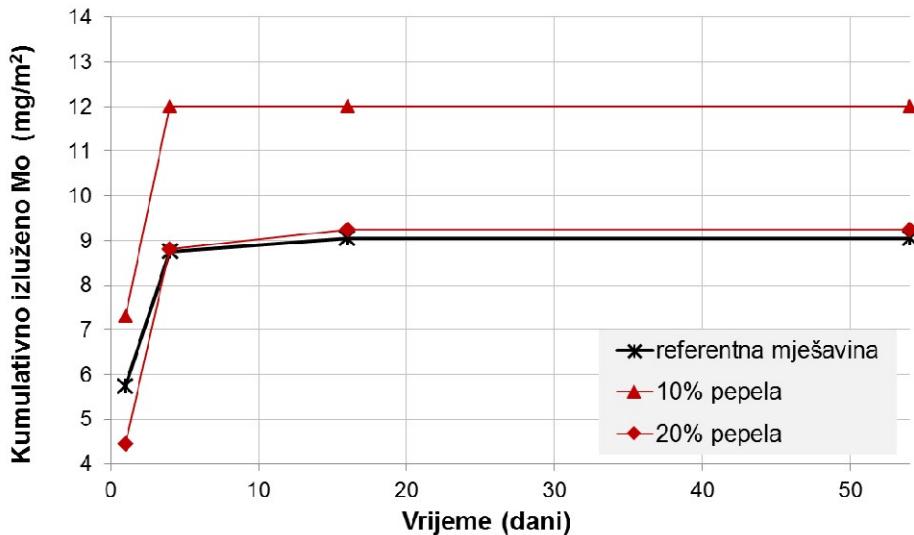
Rezultati ispitivanja izluživanja iz krhotina morta s ugrađenim pepelom

Temp. Parametar	Jed. mjere	M ₀	M ₂₀ KA	M ₂₀ * KA	M ₂₀ ** KA	M ₂₀ _mulj KC	M ₂₀ * KC	M ₂₀ ZG	M ₂₀ * ZG	M ₂₀ ** ZG
Cl ⁻	mg/l	5.90	8.30	2.80	14.90	45.90	42.60	14.00	12.70	10.00
F ⁻	mg/l	0.16	0.54	0.21	0.33	0.49	0.08	0.35	0.23	0.37
SO ₄ ²⁻	µg/l	13.00	< DL	< DL	1.00	48.00	1.00	2.00	17.00	15.00
Cu	mg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	0.01	< DL	< DL	< DL	< DL
Zn	mg/l	0.002	< DL	0.04	< DL	0.007	< DL	< DL	0.001	< DL
Pb	µg/l	0.11	< DL	0.38	< DL	0.40	1.44	< DL	< DL	< DL
Cd	µg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0.02	< DL	< DL	< DL
Ni	µg/l	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
As	µg/l	< DL	0.11	< DL	0.19	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Cr	µg/l	4.73	8.57	4.66	35.34	3.77	3.69	16.85	2.86	21.87
Se	µg/l	0.86	4.03	0.94	8.93	2.42	3.33	9.98	0.99	9.46
Co	µg/l	< DL	0.12	< DL	0.95	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
Mo	µg/l	22.16	22.74	11.05	21.4	13.91	20.80	24.38	4.80	27.07

*< DL – ispod granice detekcije

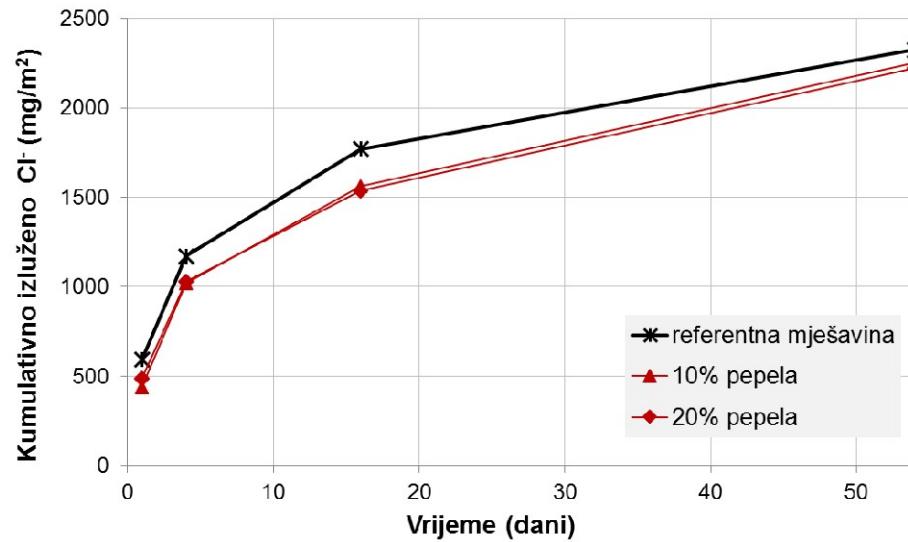
→ Krhotine morta – inertan otpad

Rezultati ispitivanja izluživanja iz monolitnih uzoraka morta („tank leaching test“)



$$L/A = 50 \text{ l/m}^2$$

Rezultati ispitivanja izluživanja iz monolitnih uzoraka morta („tank leaching test“)



$$L/A = 50 \text{ l/m}^2$$



ZAKLJUČAK

Na temelju prikazanih rezultata provedenih laboratorijskih ispitivanja na cementnom mortu i betonu, a promatrajući **tehničke i okolišne zahtjeve**, zbrinjavanje pepela dobivenog spaljivanjem mulja s UPOV-a u betonskoj industriji čini se mogućim i opravdanim rješenjem

ZAKLJUČAK

- **Smanjenje obradljivosti uspješno se nadoknađuje korištenjem superplastifikatora**
- **Najbolji rezultati dobiveni korištenjem pepela dobivenog pri 900°C**
- **Suspaljivanje s vapnom ili glinom ne daje pepeo boljih karakteristika**
- **Korištenje vapna u procesu obrade mulja nije opravdano u slučaju spaljivanja mulja i korištenja nastalog pepela kao zamjene za cement**
- **Ovisno o vrsti korištenog cementa moguće je zbrinuti različite maksimalne udjela pepela (20 – 30 mas. %)**
- **Mulj (neutral) dobiven MID-MIX® postupkom obrade ima vrlo ograničenu primjenu kao zamjena za cement (bez dodatne termičke ili neke druge obrade)**



Rezultati pilot projekta

Proizvodnja betonskih elemenata s ugrađenim
pepelom iz mulja s UPOV-a u realnoj veličini

Domagoj Nakić, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet



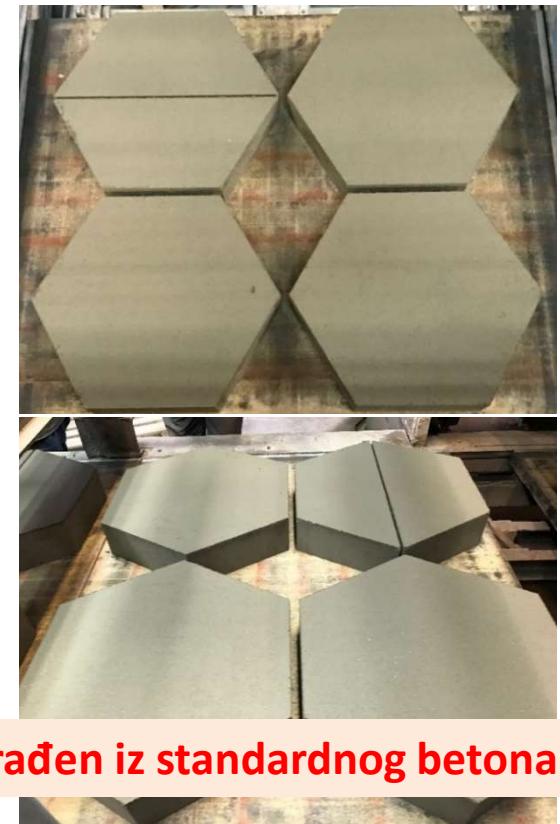
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET



- Osnovni cilj provođenja pilot projekta je ispitati mogućnosti korištenja pepela u betonskoj industriji u stvarnoj proizvodnji („real scale“)
- Pozitivni rezultati pilot projekta mogu poslužiti kao dodatni motiv svim zainteresiranim dionicima u eventualnoj kasnijej primjeni pepela u proizvodnji betonskih proizvoda u praksi
- Projekt proveden u suradnji s Beton Lučko d.o.o.

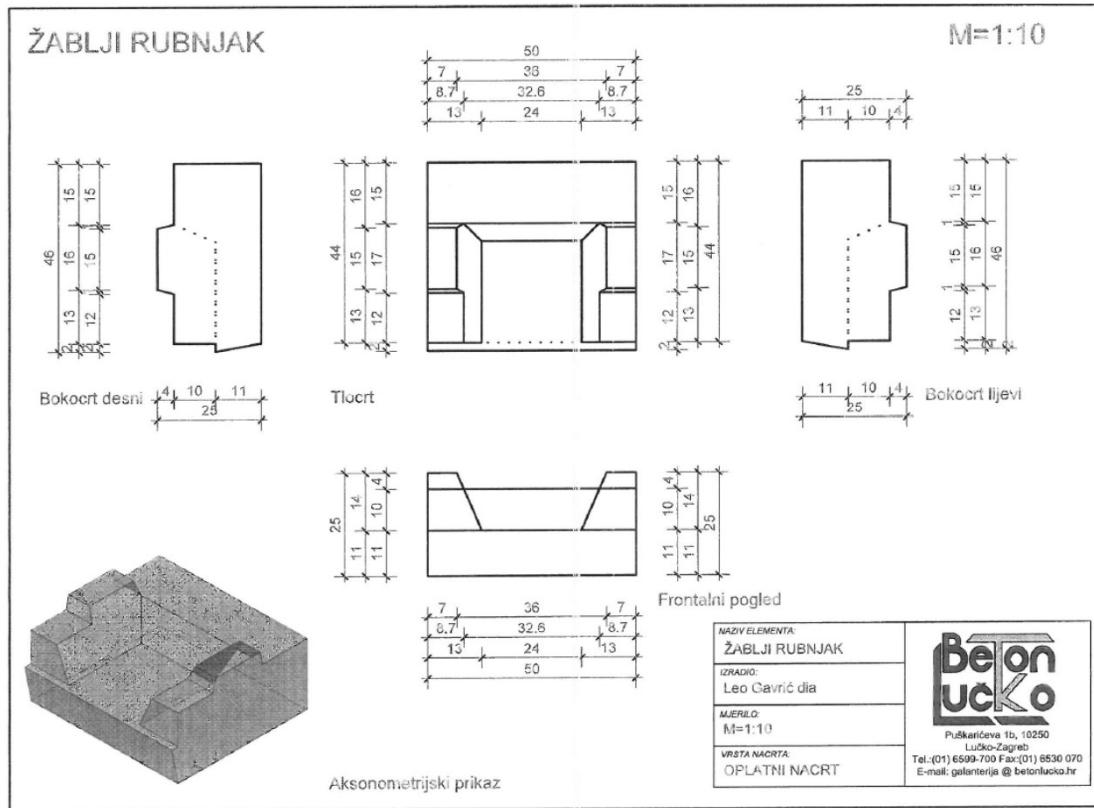


- Korišten pepeo iz muljeva s UPOV-a u Zagrebu i Koprivnici (900 °C)
- U originalnoj recepturi pepelom zamijenjeno 10 % cementa



Pepeo ugrađen samo u donji (nosivi) sloj, dok je završni sloj izrađen iz standardnog betona!

- Korišten pepeo iz muljeva s UPOV-a u Zagrebu i Koprivnici (900 °C)
- U originalnoj recpeturi pepelom zamijenjeno 10 % cementa



Namjena odabranih elemenata

- **Opločnik (šeststrukutna prizma):**
 - oblaganje otvorenih kanala vodotoka te otvorenih kanala sustava odvodnje
 - zbog svoje izrazite nosivosti i mehaničkih karakteristika koristi se i za popločavanje parkirališnih površina i nekih jače opterećenih kolničkih konstrukcija
- **Žablji rubnjak:**
 - oblikovni elementi uljevnog dijela sustava odvodnje prometnica



Postupak miješanja betona

- Automatizirano, uobičajenim procedurama koje se koristi u redovnoj proizvodnji odabranih betonskih elemenata unutar tvrtke Beton Lučko d.o.o., uz ručno doziranje zamjenskih udjela pepela



Rezultati provedenih ispitivanja

- Ispitivanja tehničkih zahtjeva za gotove betonske proizvode provedena prema normama definiranim zahtjevima i ustaljenoj praksi u tvrtki Beton Lučko d.o.o.
- Izvršena je provjera vanjskog izgleda gotovih betonskih elemenata za svaku mješavinu: **nisu zabilježena vidljiva oštećenja i pukotine, kao niti ljuštenje ili odvajanje između slojeva, a tekstura i boja u skladu su s deklariranim svojstvima**





Rezultati provedenih ispitivanja – šesterokutne prizme

- Dimenzije ispitivanih elemenata odstupaju maksimalno **± 2 mm** od radnih dimenzija deklariranih od strane proizvođača (490 mm x 490 mm x 100 mm) čime je zadovoljen uvjet traženog razreda
- Maksimalne dimenzije između bilo koje dvije izmjerene dijagonale **2 mm** čime je zadovoljen uvjet traženog razreda
- Zadovoljeni uvjeti maksimalne razlike između bilo koje dvije izmjerene duljine, širine i debljine (**≤ 3 mm**), uvjet minimalne debljine gornjeg (habajućeg) sloja od **4 mm** te maksimalna dopuštena konkavnost (**≤ 2.5 mm**) i konveksnost (**≤ 4.0 mm**) gornje površine

Rezultati provedenih ispitivanja – šesterokutne prizme

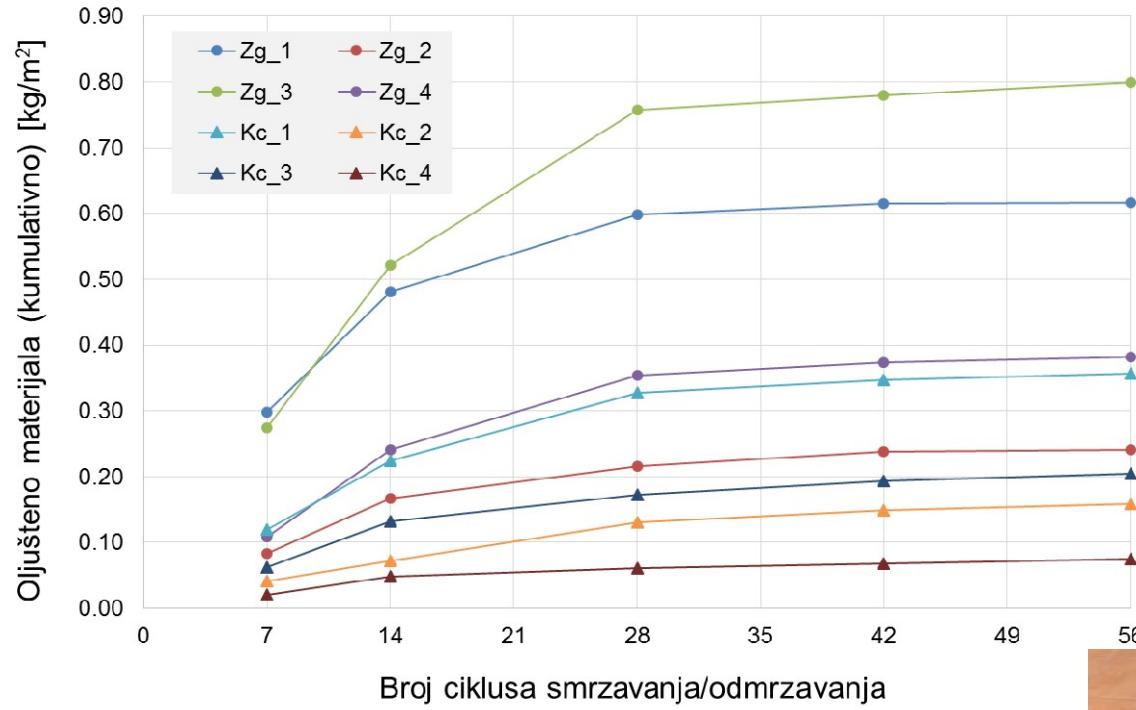
Svojstvo	Šesterokutna prizma s pepelom iz mulja s UPOV-a Zagreb	Šesterokutna prizma s pepelom iz mulja s UPOV-a Koprivnica	Uvjet odgovarajućeg razreda
→ Čvrstoća na savijanje	4.7 MPa	4.5 MPa	$\geq 4.0 \text{ MPa}$
→ Sila loma	20.3 kN	20.1 kN	$\geq 14.0 \text{ kN}$
→ Upijanje vode	4.6 %	3.9 %	$\leq 6 \%$
→ Otpornost na smrzavanje/odmrzavanje sa soli nakon 28 ciklusa	$L_{\text{srednje}} = 0.29 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maksimalno}} = 0.38 \text{ kg/m}^2$	$L_{\text{srednje}} = 0.29 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maksimalno}} = 0.38 \text{ kg/m}^2$	$L_{\text{sr.}} \leq 1.0 \text{ kg/m}^2$ $L_{\text{maks.}} < 1.5 \text{ kg/m}^2$
Otpornost na habanje	16000 mm ³ /5000 mm ²	16000 mm ³ /5000 mm ²	$\leq 18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$

Rezultati provedenih ispitivanja – žablji rubnjak

Svojstvo	Oznaka uzorka	Rezultat ispitivanja	Uvjet odgovarajućeg razreda	Oznaka razreda	Ocjena
Razred konzistencije slijeganjem (slump)	ZG	90 mm	50-90 mm	S2	✓
	KC	80 mm			✓
Razred čvrstoće betona (28-dnevna tlačna čvrstoća)	ZG	35,98 MPa	45 MPa	C35/45	✗
	KC	38,94 MPa			✗
Vodopropusnost HRN EN 12390-8	ZG	19 mm	15 mm	VDP3	✗
	KC	17 mm			✗
Mikroskopska analiza HRN EN 480-11	ZG	0,087 mm	faktor razmaka mikro pora ne smije biti veći od 0,20 mm	XF4	✓
	KC	0,117 mm			✓
Otpornost na smrzavanje/ odmrzavanje sa soli nakon 56 ciklusa HRN CEN/TS 12390-9	ZG	$L_{srednje} \leq 0,51 \text{ kg/m}^2$ $L_{pojedinačno} \leq 0,80 \text{ kg/m}^2$	$L_{srednje} \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ $L_{pojedinačno} \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$	XF4	✗
	KC	$L_{srednje} \leq 0,20 \text{ kg/m}^2$ $L_{pojedinačno} \leq 0,36 \text{ kg/m}^2$			✓



Rezultati provedenih ispitivanja – žablji rubnjak



Rezultati ispitivanja ekoloških karakteristika

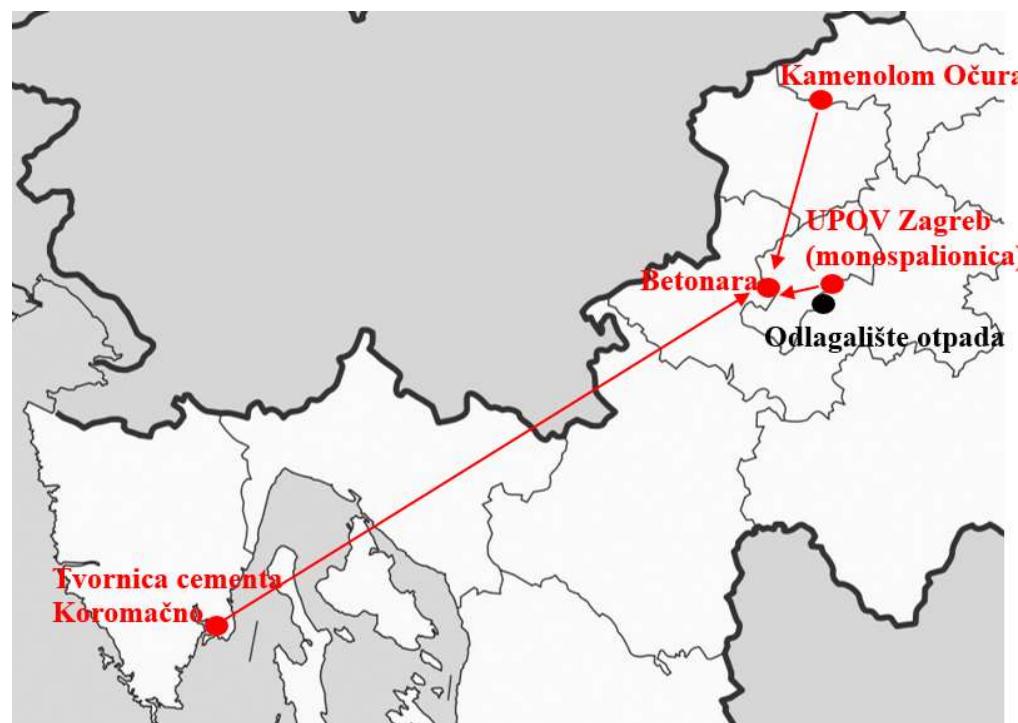
- Izluživanje iz pepela \Rightarrow neopasan otpad
- Izluživanje iz krhotina betona s ugrađenim pepelom \Rightarrow inertan otpad
- Ispitivanje radioaktivnosti pepela (članak 4. *Pravilnika o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu*) \Rightarrow koncentracija aktivnosti radionuklida u građevnim proizvodima ne smije biti veća od dopuštenih granica
- ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th – Pravilnikom propisane granične vrijednosti aktivnosti [Bq/kg] svakog od analiziranih radionuklida kao i skupna vrijednost aktivnosti



LCA

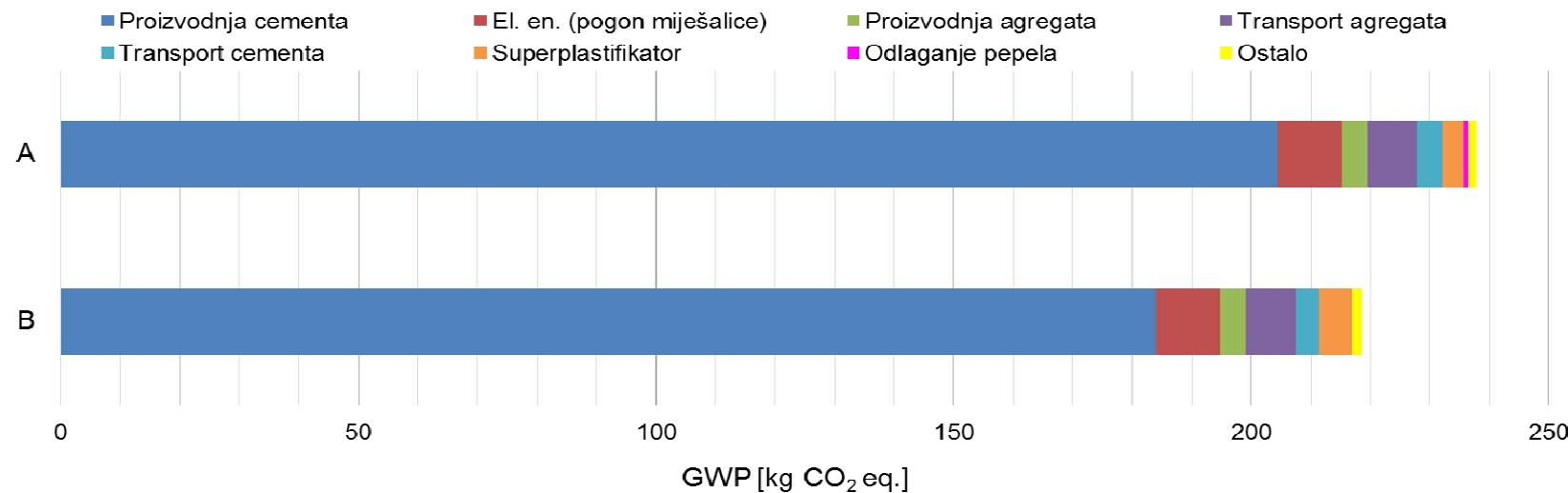
Proizvodnja običnog betona i odlaganje pepela
VS

Proizvodnja betona s ugrađenim pepelom



LCA

Proizvodnja običnog betona i odlaganje pepela VS Proizvodnja betona s ugrađenim pepelom



16.500 t pepela \Rightarrow 550.000 m³ betona (10 %) \Rightarrow smanjenje GWP za > 10 milijuna kg CO₂ eq.

ZAKLJUČAK

- Proizvodnja betonskih elemenata s ugrađenim pepelom iz mulja s UPOV-a u realnoj veličini je moguća, **ali...**
- Rezultati ovog istraživanja od posebnog su interesa za područje vodnog gospodarstva s ciljem zbrinjavanja mulja, ali i za industriju proizvodnje građevnih proizvoda s ciljem smanjenja emisija CO_2 zamjenom dijela originalnih sirovina (cementa) u proizvodnji betona



H v a l a n a p a ž n j i !

