

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

Dodatek k diplomski nalogi - Poročilo o
XRD in SEM analizah

WOOD ASH AS A SECONDARY BINDER IN CONCRETE

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

doc. dr. Ana Mladenovič

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	TEORETIČNI DEL	2
2.1	Proizvodnja cementa	2
2.2	Glavni minerali čistega portlandskega cementa	3
3	EKSPERIMENTALNI DEL	5
3.1	XRD analiza (XRD – X-ray- Powder Diffraction)	5
3.2	SEM/ EDS analiza (Scanning Electron Microscope with Energy dispersive spectrometry)	6
3.3	Mineraloška sestava pepelov	7
3.4	Mineraloška sestava betonov	9
4	ZAKLJUČKI	17
VIRI	19

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Glavni minerali portlandskega cementa (Povše, 2010)	3
Preglednica 2: Oksidi, ki so prisotni v portlandskem cementu in pepelih	7
Preglednica 3: Mineraloška sestava portlandskega cementa in pepelov	8
Preglednica 4: Mineraloška sestava betonov	9

KAZALO DIFRAKTOGRAMOV

Difraktogram 1: Primerjava med R20 in CEM.....	10
Difraktogram 2: Primerjava med R20 in CEM - povečava	10
Difraktogram 3: Primerjava med A20 in CEM.....	11
Difraktogram 4: Primerjava med A20 in CEM - povečava	11
Difraktogram 5: Primerjava med E20 in CEM.....	12
Difraktogram 6: Primerjava med E20 in CEM - povečava	12
Difraktogram 7: Primerjava med V20 in CEM.....	13
Difraktogram 8: Primerjava med V20 in CEM - povečava	13

KAZALO SLIK

Slika 1: Drobljenje kosa betona	5
Slika 2: Drobljenje betona v terilnici	5
Slika 3: Vzorci za SEM/EDS analizo	6
Slika 4: SEM mikroposnetek pepela Ribnica	14
Slika 5: SEM mikroposnetek pepela Avstrija	14
Slika 6: SEM mikroposnetek pepela Energoles	14
Slika 7: SEM mikroposnetek pepela Vipap	14
Slika 8: SEM mikroposnetek betona Ribnica	15
Slika 9: SEM mikroposnetek betona Avstrija	15
Slika 10: SEM mikroposnetek betona Energoles	15
Slika 11: SEM mikroposnetek betona Vipap	15
Slika 12: SEM mikroposnetek betona CEM	15

1 UVOD

Cement je hidravlično vezivo, ki v stiku z vodo hidratizira. Hidratizacija je eksotermni proces, kar pomeni, da med procesom prihaja do sproščanje toplote. Kemizem hidratacije je precej kompleksen, saj je kinetika hidratacijskega procesa odvisna od fazne sestave klinkerja ter količine in vrste tujih ionov v klinkerju in od njegove mikrostrukture. Mikrostruktura klinkerja je odvisna od pogojev žganja klinkerja, zlasti od hitrosti segrevanja, maksimalne temperature žganja in hitrosti ohlajanja. Na kemizem hidratacije vpliva tudi količina in oblika kalcijevega sulfata, ki se dodaja v fazi mletja klinkerja kot regulator vezanja. Pogoji pri pripravi cementnega kompozita, zlasti vodocementno razmerje in morebitni mineralni in/ali kemijski dodatki, pogoji nege in pogoji zorenja (vlaga in temperatura) imajo prav tako velik vpliv na procese hidratacije. (Zajc, 1999).

Z dodajanjem mineralnih dodatkov cementu ali betonu se pojavijo še druge reaktivne komponente, ki vstopajo v reakcijo hidratacije. Nekatere so podobne mineralom klinkerja, druge se od njih razlikujejo. Z dodajanjem teh komponent lahko bistveno vplivamo na spremembo končne strukture cementnega kamna v betonu, posredno pa tudi na njegovo fazno sestavo ter mehansko - fizikalne karakteristike.

Z XRD analizo smo poizkušali spremljati hidratizacijo ter tako časovno slediti zmanjševanju vsebnosti klinkerjevih mineralov (alit, belit, aluminat, ferit) in nastanku hidratacijskih produktov (etringit, portlandit, S-C-H gel) po 7 in 28 dneh nege betona v vodi. Nato smo na podlagi SEM analize dodatno okarakterizirali sestavo posameznega betona.

Omenjene analize so bile opravljene na betonih v katerih smo 20 mas % cementa nadomestili z lesnim pepelom. Sklepali smo namreč, da bo pri tem razmerju prišlo do največjih razlik v primerjavi z referenčnim betonom.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Proizvodnja cementa

Proizvodnja cementa se deli na štiri glavne procese. Prvi proces predstavlja pridobivanje surovine (lapor, apnenec, glina) iz kamnolomov ali glinokopov. Nato sledi proces priprave surovinske moke, kjer se surovina zmelje v fino surovinsko mešanico in homogenizira. Proizvodnja klinkerja, ki predstavlja ključni proces pri proizvodnji cementa je tretji proces v katerem se po potrebi doda surovinski moki žlindro, boksit in surovino, ki je nosilec železa (Povše, 2010).

Pri segrevanju surovinske moke najprej pride do izhlapevanje vode, nato se pri vstopu v peč delno dekarbonatizira, kar pomeni, da se zaradi visokih temperatur apnenec spremeni v CaO in CO_2 . Ta proces se začne pri $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ in konča nekje med $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Povše, 2010).

Pri temperaturi med 1400 in $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ potekajo najpomembnejše kemijske in fizikalne reakcije. Belit reagira s prostim apnom, pri čemer nastane glavni mineral klinkerja - alit. (Povše, 2010).

Sledi hlajenje klinkerja, ki je pomembna faza v proizvodnem procesu, saj odločilno vpliva na kvaliteto klinkerja. Najboljši klinker dobimo s počasnim ohlajanjem klinkerja do $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nato sledi hitro ohlajanje, z namenom, da se zadrži mineralna sestava klinkerja s čim več alita. Tako s pravilnim postopkom ohlajanja preprečimo, da minerali prehajajo nazaj v okside. V tej fazi pride do nastanka aluminata in ferita s kristalizacijo taline (Povše, 2010).

Hitro ohlajanje omogoča stabilizacijo alita in preprečuje razpad tega na C_2S in CaO , poleg tega omogoča stabilizacijo belita v beta obliki in preprečuje prehod tega v nereaktivno modifikacijo, gama C_2S . V primeru, da je delež magnezijevega oksida večji od 2% , pride do njegove kristalizacije. Hitro ohlajanje povzroči, da pri kristalizaciji tekoče faze nastanejo majhni kristali (Povše, 2010).

Zadnji proces je mletje cementa, kjer z mešanjem različnih deležev klinkerja in različnih mineralnih dodatkov pridobimo različne vrste cementa (Povše, 2010).

2.2 Glavni minerali čistega portlandskega cementa

Glavni oksidi čistega portlandskega cementnega klinkerja predstavljajo kalcijev oksid - CaO (60 - 70 %), silicijev oksid - SiO_2 (18 – 22 %), aluminijev oksid - Al_2O_3 (4 - 6 %) in železov oksid - Fe_2O_3 (2 - 4 %). Ti predstavljajo okoli 95 % klinkerja, medtem ko preostalih 5 % zastopajo: magnezijev oksid – MgO , alkalije; kalijev oksid – K_2O in natrijev oksid – Na_2O , titanov oksid - TiO_2 , manganov oksid – Mn_2O_3 in žveplov oksid – SO_3 . Glavni oksidi so v klinkerju prisotni v obliki različnih mineralnih faz (Ipavec, 2013).

V mineraloški sestavi silikatni fazi klinkerja predstavljata alit – C_3S , ki zavzema od 55 – 65 % klinkerja in belit – C_2S , ki predstavlja 15 – 25 % klinkerja. Aluminatno fazo predstavlja – C_3A s 8 – 14 % klinkerja. Feritno fazo pa zavzema ferit – C_4AF , ki predstavlja 8 – 12 % celotnega klinkerja (Ipavec, 2013).

V Preglednici 1 so predstavljeni glavni minerali portlandskega cementa.

Preglednica 1: Glavni minerali portlandskega cementa (Povše, 2010)

Faza	Oznaka	Ime minerala	Kemijska formula	Spojina
SILIKATNI FAZI	C_3S	alit	$3 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$	Trikalcijev silikat
	C_2S	belit	$2 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$	Dikalcijev silikat
ALUMINATNA FAZA	C_3A	aluminat	$3 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$	Trikalcijev aluminat
FERTINA FAZA	C_4AF	ferit	$4 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetrakalcijev aluminoforit

Silikatna minerala v največji meri prispevata k tlačni trdnosti betona. Pri reakciji z vodo nastajata kalcijev hidroksid (Ca(OH)_2) in C-S-H, ki ga drugače imenujemo tudi C-S-H gel. Alit je zelo reaktiven in hitro reagira z vodo. V prvih 28 dneh hidratacije največ prispeva k razvoju mehanske trdnosti cementne paste. Pri hidrataciji sprošča veliko toplote. Belit z vodo reagira počasneje, k mehanski trdnosti prispeva šele po 28 dneh hidratacije in pri tem sprošča malo toplote (Ipavec, 2013).

Aluminat je med vsemi minerali najbolj reaktiven. V zgodnji fazi hidratacije ima velik vpliv na reološke lastnosti cementne paste/betona. Sprošča veliko hidratacijske toplote in je občutljiv na sulfatno korozijo (Žarnič, 2010). Aluminat ob prisotnosti sadre – $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ razmeroma hitro reagira z vodo, pri čemer nastaja kalcijev sulfoaluminat oz. etringit. Ko se sadra porabi, etringit reagira z aluminatom in pri tem nastaja monosulfat ($\text{SO}_4 - \text{AFm}$) (Ipavec, 2013).

Sadra v cementu deluje kot zaviralec hidratacije alita. Njena prisotnost je nujna, saj bi v nasprotnem primeru cement v stiku z vodo takoj otrdel (Povše, 2013).

Hidratizacija feritne faze je precej podobna hidrataciji aluminatne, le da se proces odvija bistveno počasneje. Aluminij v etringitu in monosulfatu se lahko delno nadomešča z železom (Ipavec, 2013). Ferit je bolj odporen na sulfatno korozijo od aluminata (Žarnič, 2010).

Mineraloška sestava cementnega veziva je precej kompleksna. Poenostavljeno lahko rečemo, da je sestavljena iz kalcijevega hidroksida, C-A-H (AFm, AFt faze) in C-S-H gela. C-S-H gel predstavlja 50 – 60 % celotnega volumna cementnega kamna. Njegova sestava ni popolnoma definirana, saj je razmerje med Ca in Si precej variabilno, prav tako se zelo spreminja vsebnost kemijske vezane vode. Morfologija gela je prav tako nedefinirana. Najdemo ga v obliki delno kristaliziranih vlaken ter v obliki prepletenih in amorfnih struktur (Ipavec, 2013).

Portlandit oz. kalcijev hidroksid predstavlja 20 – 25 % volumna cementnega kamna. Pojavlja se kot zrno z značilno morfologijo heksagonalnih lamel. Njegova glavna naloga je ohranjanje visoke bazičnosti, vzdrževanje alkalnosti in zagotavljanje kemijske obstojnosti cementnega kamna (Ipavec, 2013).

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 XRD analiza (XRD – X-ray- Powder Diffraction)

Vzorci za XRD analizo smo pripravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Reprezentativne kose betonov smo do priprave vzorcev hranili v izopropanolu, v inertnem mediju. Pri pripravi vzorcev za XRD analizo smo posamezen kos betona najprej grobo strli v večjem terilniku in nato manjšo količino vzorca pomleli v terilnici na frakcijo, ki smo jo presejali skozi sito z odprtinami 45 μm . Difraktograme smo posneli na Katedri za mineralogijo, petrologijo in materiale na Oddelku za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Snemanje je bilo izvedeno pri sobni temperaturi, z rentgenskim difraktometrom Philips PW3710 v $\text{CuK}\alpha 1$ konfiguraciji ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Podatki so bili pridobljeni v območju od 2° do 70° 2θ s korakom $0,020^\circ$, integracijskim časom 5 s in območjem detektorja $2,0^\circ$ 2θ . Snemanje je bilo izvedeno z nikljevim filtrom in grafitnim monokromatorjem.



Slika 1: Drobljenje kosa betona



Slika 2: Drobljenje betona v terilnici

3.2 SEM/ EDS analiza (Scanning Electron Microscope with Energy dispersive spectrometry)

Za SEM/EDS analizo smo pripravili polirane obruse. Reprezentativne kose betona smo zalili z epoksidno smolo in nato površino polirali do visokega sijaja s pomočjo diamantnih past različne zrnivosti. Do analize smo vzorce hranili v izopropanolu. Vrstična elektronska mikroskopija z energijsko disperzijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov (EDS) (Oxford instruments, UK) je bila izvedena z mikroskopom JEOL 5500 LV (Tokio, Japonska). Analize so bile narejene s pomočjo povratno odbitih elektronov (BSE) pri napetosti 20 kV v nizkem vakuumu pri različnih povečavah. SEM/EDS analizo smo opravili na Zavodu za Gradbeništvo Slovenije.



Slika 3: Vzorci za SEM/EDS analizo

3.3 Mineraloška sestava pepelov

Mineraloško sestavo portlandskega cementa in treh pepelov smo privzeli iz že predhodno narejenih raziskav. Mineraloško sestavo pepela Avstrija pa smo opravili sami s pomočjo XRD analize.

Portlandski cement in pepeli, ki smo jih v raziskavah uporabili, se po kemijski sestavi med seboj razlikujejo. Glavni oksidi, ki se nahajajo v cementu se nahajajo tudi v lesnem pepelu, toda v različnih masnih odstotkih. Odstotna sestava oksidov portlandskega cementa in pepelov Ribnica ter Vipap je predstavljena v spodnji Preglednici 2.

Preglednica 2: Oksidi, ki so prisotni v portlandskem cementu in pepelih

Parameter	Portlandski cement [%] (Kuzmanović, 2009)	Pepel Ribnica [%](Pavšič, 2013)	Pepel Vipap [%](Pavšič, 2013)
CaO	62 – 67	55,86	54,65
SiO ₂	19 – 25	4,46	16,51
Al ₂ O ₃	2 – 8	1,41	11,68
Fe ₂ O ₃	1 – 5	0,89	0,42
SO ₃	max 3,05 – 4,5		
K ₂ O	0,5 – 1,3	5,02	0,36
Na ₂ O			
MgO	max 5	4,72	2,59
CaO (nevezan)	max 2		
TiO ₂		0,19	0,25
P ₂ O ₅		1,69	0,17
MnO		0,71	

Kot je razvidno iz Preglednice 2, se oksidi (kalcijev, silicijev, aluminijev, magnezijev in železov) čistega portlandskega cementa nahajajo tudi v pepelih iz Ribnice in Vipapa. Pri pepelu iz Ribnice in Vipapa poleg oksidov, ki jih najdemo tudi v portlandskem cementu evidentiramo tudi titanov, fosfatni in manganov oksid. V pepelu Ribnica se nahaja še manganov oksid. Natrijev in žveplov oksid ter prost kalcijev oksid najdemo le v portlandskem cementu.

Prisotnost prostega MgO v večjih količinah lahko med procesom hidratacije povzroči ekspanzijo in tako negativno vpliva na trdnost končnega produkta (Pavšič, 2013). Na podlagi končnih rezultatov preizkusov trdnosti pa lahko sklepamo, da količina prostega MgO v pepelu Ribnica ni bila kritična, saj beton z 20 mas % nadomestka cementa s pepelom dosega zadovoljive vrednosti.

V Preglednici 3 so predstavljeni minerali, ki so bili identificirani v čistem portlandskem cementu in posameznem pepelu.

Preglednica 3: Mineraloška sestava portlandskega cementa in pepelov

Ime minerala	Kemijska formula	Portlandski cement (Ipavec, 2013)	Pepel Ribnica (Pavšič, 2013)	Pepel Avstrija [Zalar-Serjun, os. kom.]	Pepel Energoles (Sušnik, 2014)	Pepel Vipap (Pavšič, 2013)
alit	Ca_3SiO_5	x				
belit	Ca_2SiO_4	x				
trikalcijev aluminat	Ca_3SiO_5	x				
brownmillerit	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$	x		x		
prosto apno	CaO		x			x
kalcit	CaCO_3		x	x	x	x
portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$		x	x	x	x
periklaz	MgO		x	x	x	
dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$		x	x	x	
hematit	Fe_2O_3		x			x
kremen	SiO_2		x	x	x	x
steklasta faza			x			x
gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$				x	x
lojevec	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$					x
belit	Ca_2SiO_4				x	x
brucit	$\text{Mg}(\text{OH})_2$			x	x	
mayenit	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$			x		
protoenstatit	MgSiO_3			x		
etringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$				x	
glinenec	$(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$				x	

3.4 Mineraloška sestava betonov

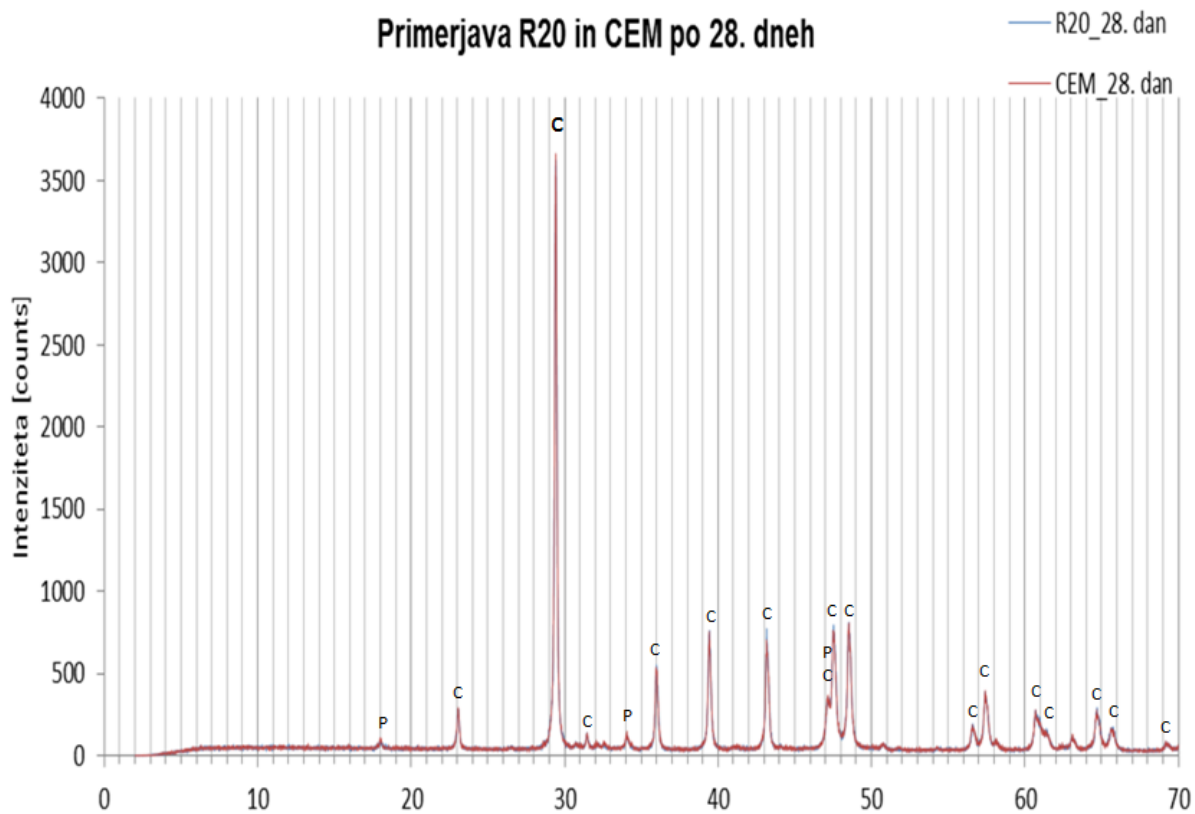
Prisotnost mineralov v betonih, ki smo jih identificirali na podlagi analize difraktogramov, smo predstavili tabelarično, v nadaljevanju pa tudi grafično z difraktogrami.

Kemijska formula	Poimenovanje	Oznaka minerala na difraktogramu	CEM	R20	A20	E20	V20
CaCO_3	kalcit	C	x	x	x	x	x
Ca(OH)_2	portlandit	P	x	x	x	x	x
Ca_3SiO_5	alit	A	x	x	x	x	x
Ca_2SiO_4	belit	B	x	x	x	x	x
SiO_2	kremen	K			x	x	
$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	lojevec						x

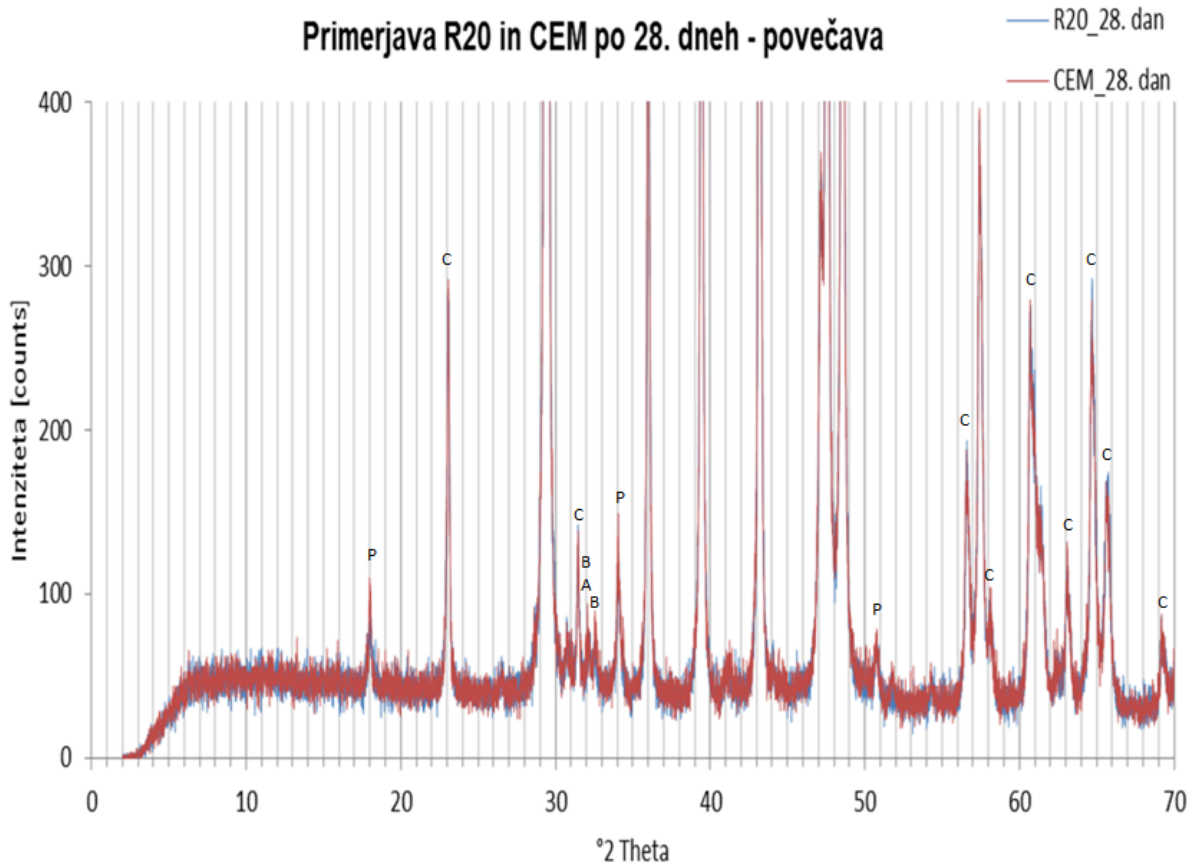
Preglednica 4: Mineraloška sestava betonov

Kot je razvidno iz Preglednice 4 so v vseh betonih prisotne mineralne faze: kalcit, portlandit, alit in belit. Na tem mestu je potrebno poudariti, da so zaradi prisotnosti agregata, ki predstavlja velik volumski delež betona, piki kalcita zelo izraziti. Težko pa je natančno določiti pike mineralov, ki so zastopani v manjših količinah.

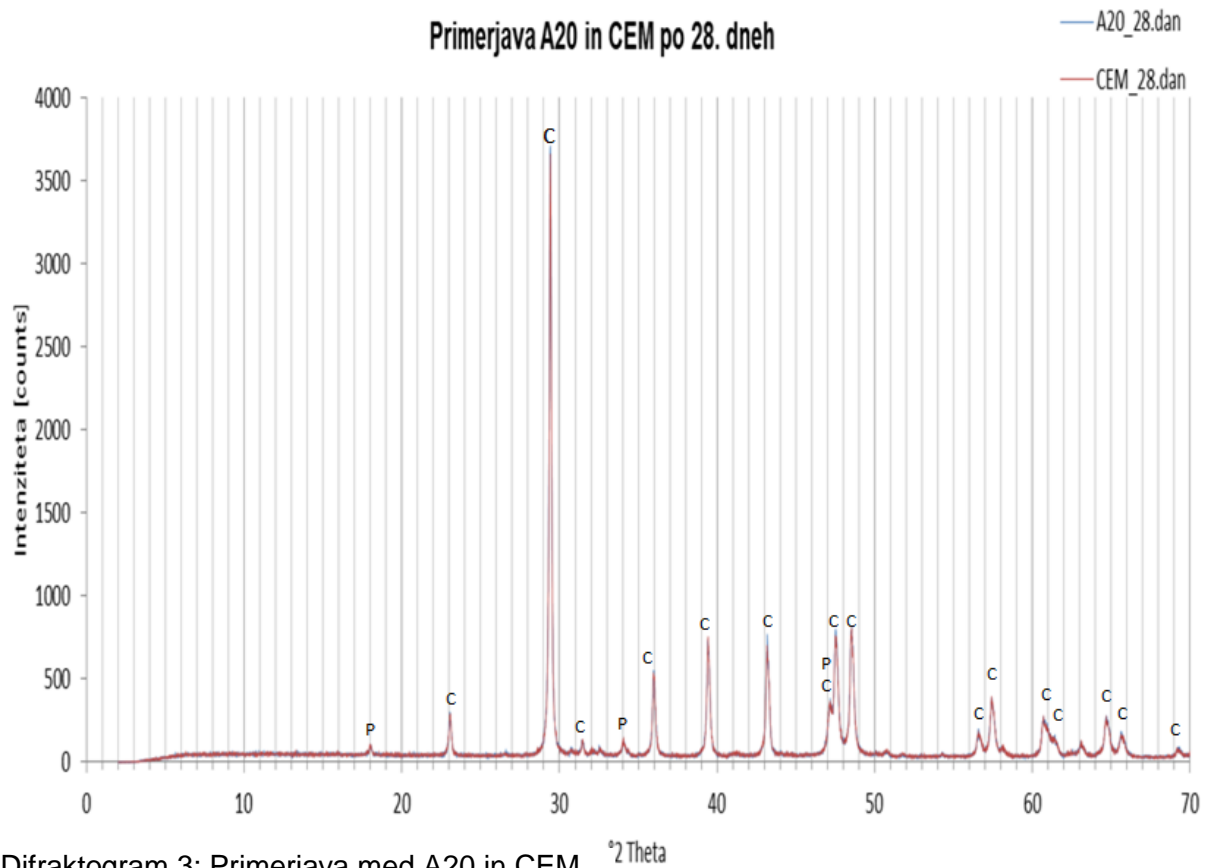
V betonu Ribnica nismo našli mineralov, ki bi se razlikovali od betona brez dodatka pepela. Pri betonu s pepelom Avstrija se pojavi prisotnost kremenca, ki ga v primerjavi z referenčnim betonom ne najdemo. Tudi pri betonu Energoles je prisoten kremen. Kremen je prisoten v vhodni surovini (pepelu) in tako je bil identificiran tudi v betonu. Beton Vipap se od ostalih betonov razlikuje v tem, da ima prisoten mineral lojevec, kot posledica sestave vhodne surovine.



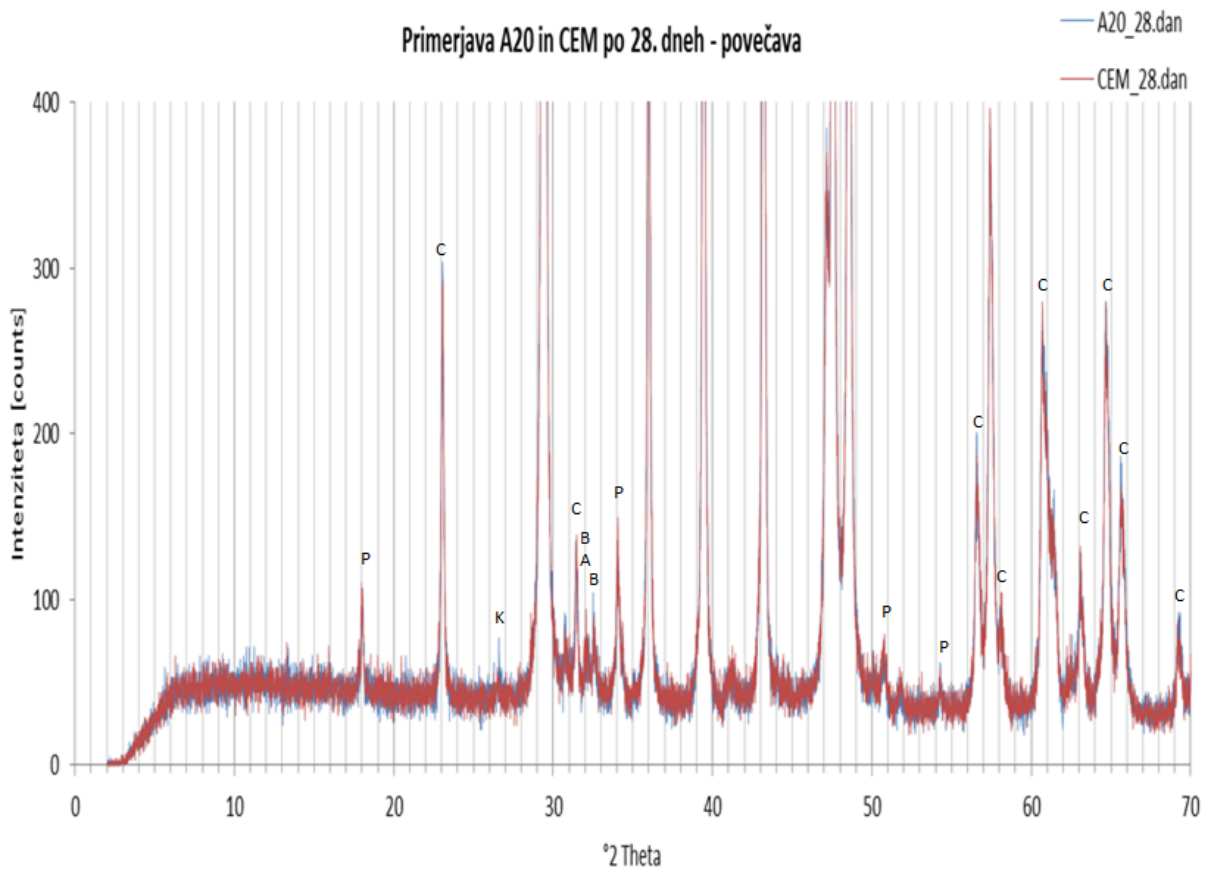
Difraktogram 1: Primerjava med R20 in CEM $^{\circ}2\text{ Theta}$



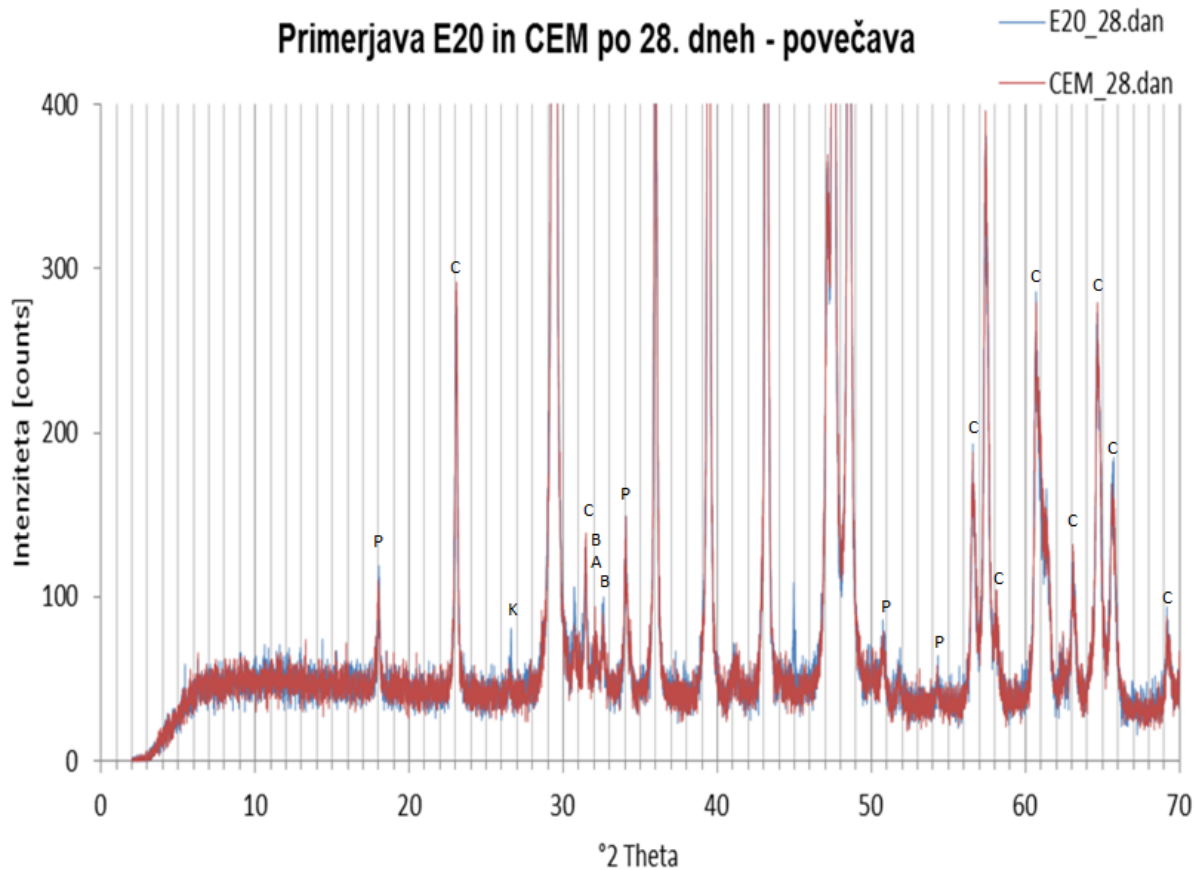
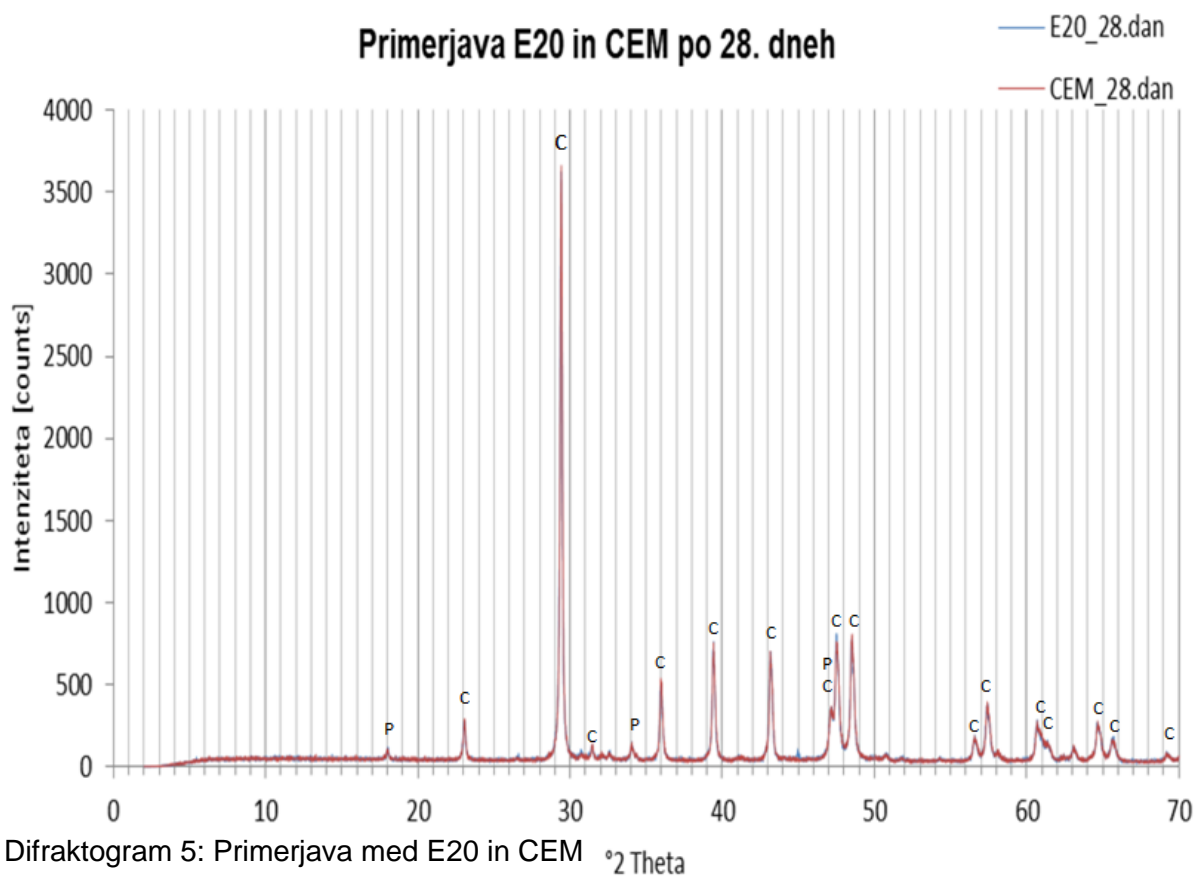
Difraktogram 2: Primerjava med R20 in CEM - povečava

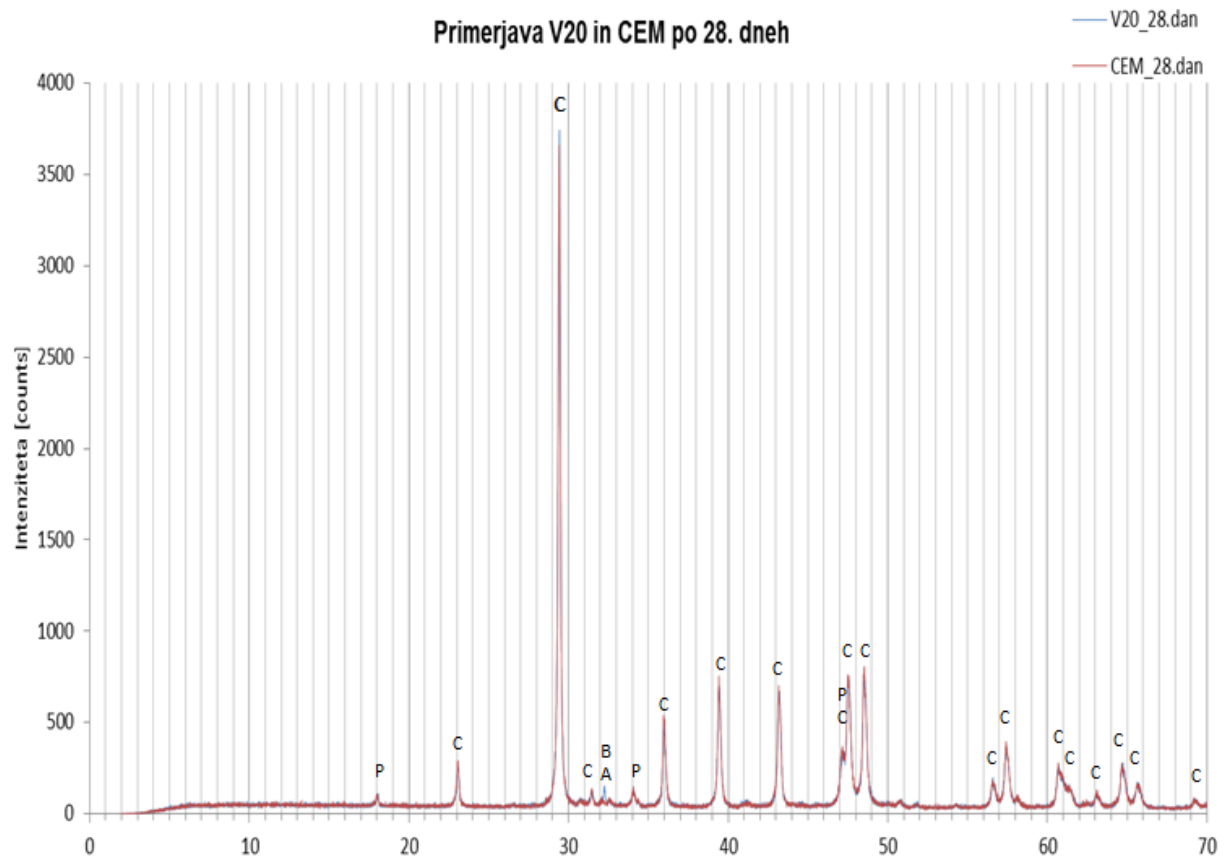


Difraktogram 3: Primerjava med A20 in CEM

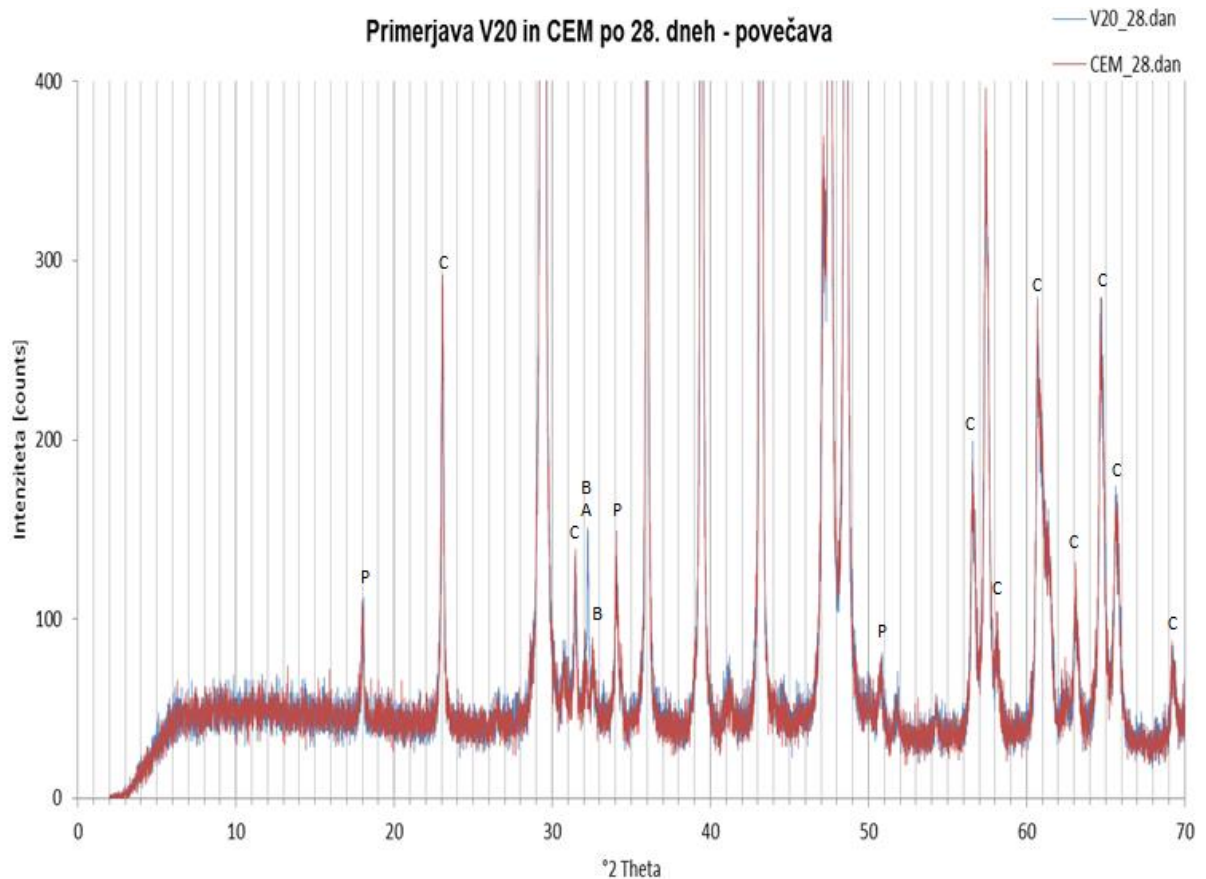


Difraktogram 4: Primerjava med A20 in CEM - povečava

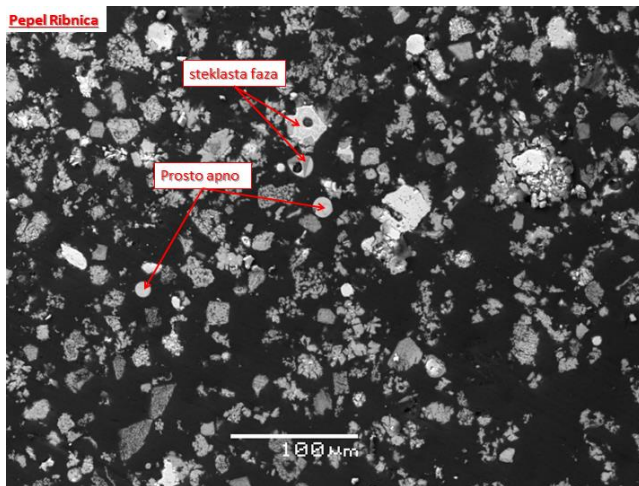




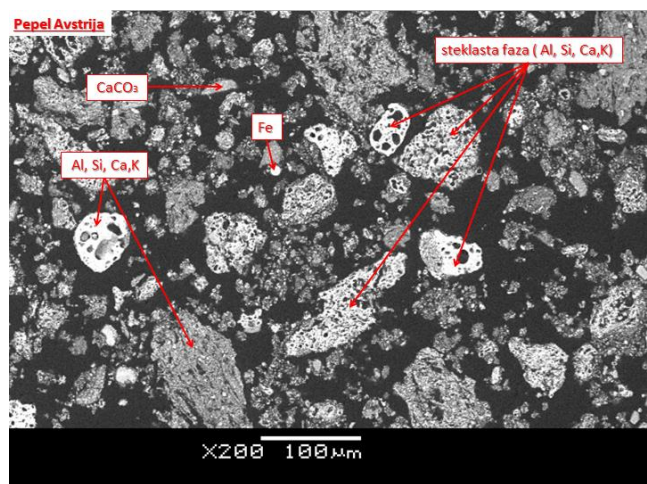
Difraktogram 7: Primerjava med V20 in CEM



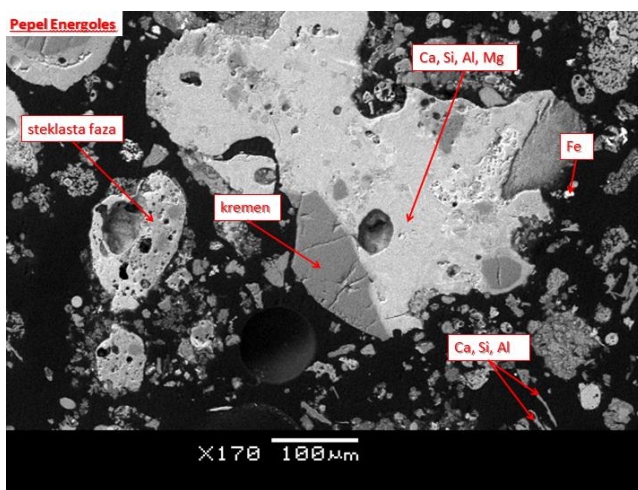
Difraktogram 8: Primerjava med V20 in CEM - povečava



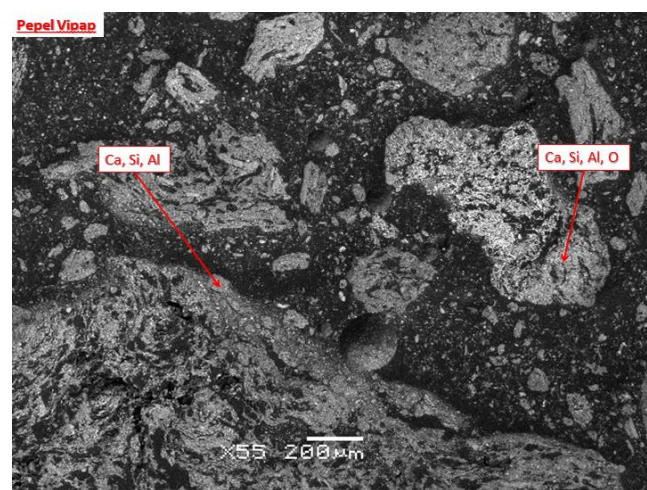
Slika 5: SEM mikroposnetek pepela Ribnica



Slika 7: SEM mikroposnetek pepela Avstrija

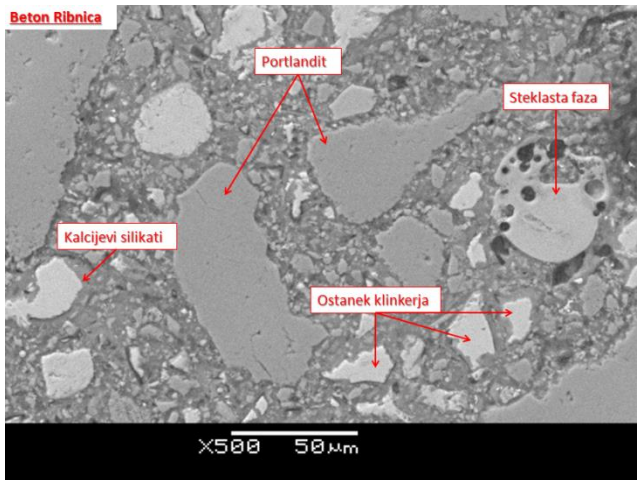


Slika 4: SEM mikroposnetek pepela Energoles

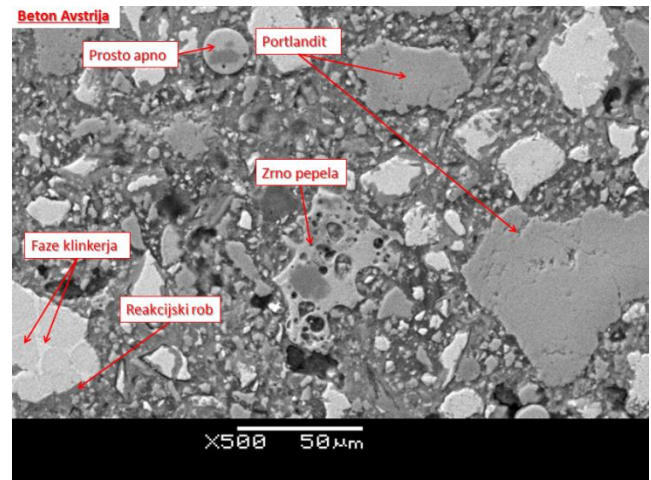


Slika 6: SEM mikroposnetek pepela Vipap

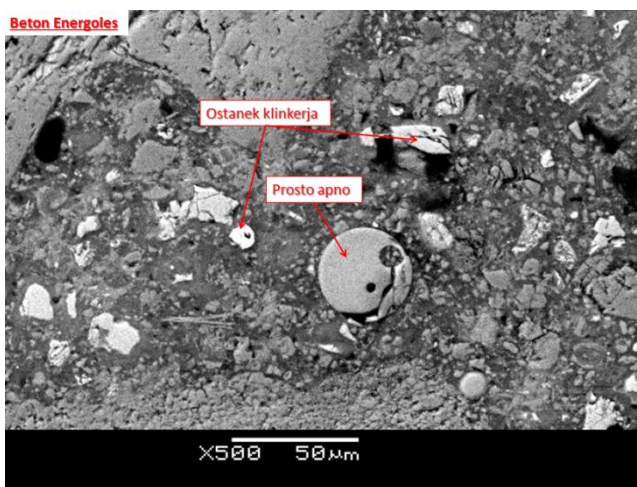
Na podlagi SEM/EDS analize smo potrdili ali ovrgli domneve o pristnosti posameznih mineralov. SEM/EDS analiza je pokazala, da pepel Ribnica vsebuje tudi steklasto fazo ter prosto apno. Pepel Avstrija vsebuje prav tako precej steklaste faze z različnim masnim razmerjem Al, Si in Ca. Nekatera steklasta zrna so bolj homogena, druga bolj heterogena. Omenjeni pepel vsebuje tudi kovinske delce. Tudi pri pepelu Energoles se pojavljajo steklasta zrna. Prisotna so tudi zrna kremenca. Pri pepelu Vipap izrazito izstopa velikost zrn, saj so ta v primerjavi z ostalimi pepeli precej večja in bolj heterogena.



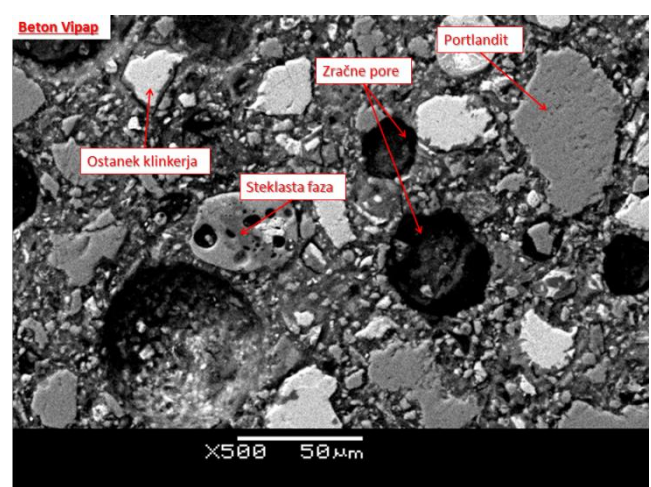
Slika 9: SEM mikroposnetek betona Ribnica



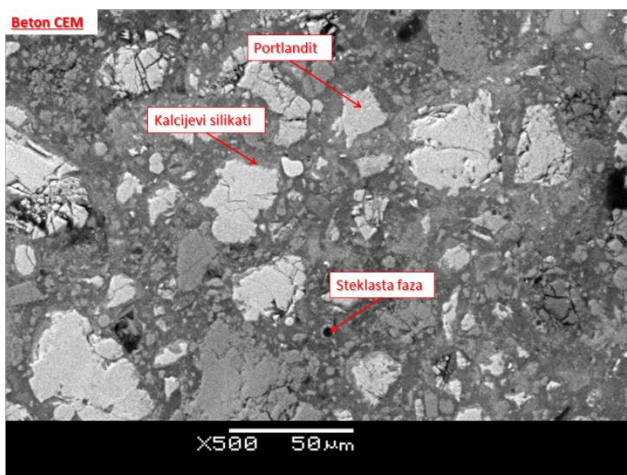
Slika 11: SEM mikroposnetek betona Avstrija



Slika 10: SEM mikroposnetek betona Energoles



Slika 12: SEM mikroposnetek betona Vipap



Slika 8: SEM mikroposnetek betona CEM

Iz Slike 8 smo razbrali, da so v betonu Ribnica prisotni portlandit, kalcijevi silikati, steklasta faza ter ostanki klinkerja. Pri betonu Avstrija smo opazili podobno sestavo. Na sliki 9 je prikazan reakcijski rob, katerega sestavljajo različni hidratacijski produkti in zrno kjer se nahaja več faz klinkerja. V betonu Energoles so prav tako prikazani ostanki klinkerja ter prosto apno. Iz SEM/EDS analize lahko zaključimo, da po svoji strukturi posebej izstopa beton Vipap. Ta vsebuje velik del zračnih por, kar (domnevno) prispeva k slabšim mehanskim karakteristikam. To se odraža v manjših tlačni in upogibni trdnosti ter v izrazito nižjem dinamičnem modulu elastičnosti betona. Slednji je že pred SEM/EDS analizo nakazoval na precejšnje notranje razpoke.

Prisotnost ostankov klinkerja kaže na to, da hidratacija še ni končana. Na tem mestu je potrebno opozoriti, da v primeru prevelike prisotnosti prostega CaO, lahko pride do ekspanzije zaradi novonastalih produktov in posledično do notranjih poškodb betona.

4 ZAKLJUČKI

Na podlagi opravljenih dodatnih analiz smo ugotovili, da bi s pepelom lahko nadomestili del portlandskega cementa, saj pepeli vsebujejo reaktivne mineralne faze, ki imajo hidravlične in/ali pucolanske lastnosti.

Na podlagi SEM/EDS analize smo zaključili, da betoni s pepelom v primerjavi z referenčnim betonom vsebujejo večjo količino steklaste faze, hkrati pa so večja zrna bolj heterogena. Znano je, da so kemijski procesi v betonu v procesu strjevanja zelo kompleksni, ob nadomeščanju cementom s pepeli pa je ta kompleksnost še večja.

Z dodatnimi preiskavami smo lahko pojasnili slabe mehanske lastnosti betona v primeru nadomeščanja cementa s pepelom Vipap. Kot smo že omenili, beton s pepelom Vipap vsebuje veliko zračnih por, kar se je že pri mehanskih preizkusih pokazalo v doseganju nižjih vrednosti v primerjavi z referenčnim betonom.

Pri analizi difraktogramov se je pokazalo, da so piki kalcita kot posledica prisotnosti apnenčevega agregata tako izraziti, da so ostale faze težje zaznavne. Za prepoznavanje mineralnih faz, ki so zastopane v manjših količinah, bi bilo morda bolj primerna analiza cementne paste.

Potrebno je poudariti, da pepeli v industriji ne nastajajo vedno pod enakimi pogoji. To pomeni, da se kemijska in mineralna sestava pepela lahko spreminjata, kar pomembno vpliva na sam potek hidratizacije betona. Zaradi tega pepel v betonu ne reagira vedno enako. Za namene praktične uporabe v betonu recepture morajo biti dovolj robustne, da brez škoda za kakovost betona prenesejo variacije v sestavi.

Ta stran je namenoma prazna.

VIRI

Ipavec, A. 2013. Vpliv sestave cementnega veziva na potek kemijskih reakcij s kloridnimi in sulfatnimi ioni. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba A. Ipavec): str. 11-15.

Kuzmanović, S. 2009. Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti vdoru vode. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Kuzmanović): 3 str.

Pavšič, P. 2013. Stabiliziranje odpadnih blat s pepelom biomase in uporabnost dobljenega materiala v gradbeništvu. Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba P. Pavšič): str. 65, 66, 68.

Povše, B. 2010. Razvoj cementa CEM v Lafarge cement d.d.. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba B. Povše): str. 2, 13 -15.

Sušnik, M. 2014. Kvalitativna in kvantitativna fazna analiza kompozitov iz komunalnega mulja in različnih pepelov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba M. Sušnik): str. 41.

Zajc, A. 1999. Slovenski kolokvij o betonih, Hidrotehnični beton, Zbornik gradiv in referatov. Ljubljana, Irma inštitut za raziskavo materialov in aplikacije Ljubljana. str. 23, 24.

Zavod za gradbeništvo. 2014. Sem avstrija in vipap. Sporočilo za: Vesna Zalar Serjun, Laboratorij za beton, kamen in reciklirane materiale. 1. 12. 2014. Osebna komunikacija.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.