

»Mladi za napredek Maribora 2016«
33. srečanje

Antični beton

Gradbeništvo

Raziskovalna naloga

PROSTOR ZA NALEPKO

Avtor: ANA MEĐUREČAN

Mentor: ANDREJ IVANIČ

Šola: SREDNJA GRADBENA ŠOLA IN GIMNAZIJA MARIBOR

Maribor, Februar 2016

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE.....	1
KAZALO SLIK.....	2
KAZALO TABEL.....	2
KAZALO GRAFOV	2
POVZETEK	3
ZAHVALA.....	4
UVOD	5
1. TEORETIČNI DEL.....	6
1.1. Podvigi v gradnji z betonom.....	6
1.1.1. Uporaba betona pri ostalih kulturah	6
1.1.2. Grki in njihovi akvadukti	6
1.1.3. Hagia Sophia	7
1.2. Rim in antični beton.....	8
1.2.1. Značilnosti materiala	10
1.3. Primerjava kemijskih značilnosti puzolana in elektrofiltrskega pepela 11	
1.3.1. Puzolan oz. vulkanski pepel	11
1.3.2. Elektrofiltrski pepel	13
1.3.3. Primerjava	14
1.4. Portlandski cement.....	14
2. EKSPERIMENTALNI DEL	15
2.1. Postopek.....	16
2.1.1. Ugotavljanje masnega deleža vode	16
2.1.2. Priprava standardne mešanice za kozice	17
2.1.3. Obremenitveni testi	18
3. REZULTATI IN RAZPRAVA	19
3.1. Masni delež vode	19
3.2. Kozice	20
3.3. Obremenitveni testi.....	21
3.4. Druga opažanja	23
4. ZAKLJUČEK.....	24
5. DRUŽBENA ODGOVORNOST.....	25

VIRI IN LITERATURA	26
Literatura	26
Viri.....	26

KAZALO SLIK

Slika 1: Hagia Sophia	7
Slika 2: Kolosej v Rimu	9
Slika 3: Panteon v Rimu	9
Slika 4: Akvadukt	10
Slika 5: Vulkanski izbruh	12
Slika 6: Elektrofilitrski pepel	13
Slika 7: Portlandski cement	14
Slika 8: Vicatov aparat	16
Slika 9: Kalup za kozice	17
Slika 10: Upogibni test	18
Slika 11: Vicatov aparat v uporabi	19
Slika 12: Kozice	20

KAZALO TABEL

Tabela 1: Sestava vulkanskega pepela	11
Tabela 2: Sestava elektrofilitrškega pepela	13
Tabela 3: Upogib	22
Tabela 4: Tlak.....	23

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Graf upogibov	21
Graf 2: Diferenca tlačne trdnosti	22

POVZETEK

V raziskovalni nalogi sem se ukvarjala z antičnim betonom in njegovo sestavo. Pri raziskavi sem uporabljala različno literaturo ter vire, pripravila različne mešavnice betona, katere bi naj bile približek antičnemu betonu ter jih analizirala v laboratoriju. Moj osnovni namen je bil ustvariti približek antičnemu betonu v katerem pa bi zamenjala vulkanski pepepl z elektrofitrskim pepelom ter probala poiskati nadomestilo za danes najbolj uporabljen portlandski cement. Skozi raziskovalno nalogo sem ugotovila, da kljub slabi trdnosti dosega zelo hitro velike deformacije in ob izboljšanju mešanice bi ga lahko uspešno uporabljali na potresnih območjih in bi imel dosti manjši vpliv na okolje pri proizvodnji kot pa portlandski cement.

ZAHVALA

Najprej bi se rada zahvalila svojim staršem, ki so mi sploh omogočili to delo in me podpirali, tudi ko je bilo treba zamižati na oko ali obe. Zahvaliti se morem tudi prijateljem, ki so z mano prebedeli noči, ter me ohranjali budno, da sem napisala nalogo. Posebej pa se morem zahvaliti tudi šolski koordinatoriki projekta katera mi je dala nešteto nasvetov in napotkov. Zahvaliti pa se morem tudi vsem profesrojem, ki so kazali razumevanje ob izostankih, da sem lahko opravila svoje laboratorijsko delo ter razredniku, ki je vse te izostanke skrbo tudi opravičil.

Posebna zahvala pa gre prav mojemu mentorju brez katerega ta naloga nebi bila možna, kateri me je skrbno vodil skozi celotni projekt in me tudi ustrezno usmerjav ter me veliko naučil. Ni pa me samo dosti naučil, vendar mi je tudi pokazal, da moja odločitev za naknadna leta šolanja ni napačna in je ne bom obžalovala, saj sem končno uzrla, da pot, ki jo bom izbrala bo sicer trnjeva, ampak bo vodila do zvezd in mi prinašala tako zaj kot tudi kasneje v življenju veliko sreče, saj šele zdaj vidim, da me ta smer, stroka res zanima in veseli.

UVOD

V raziskovalni nalogi sem se ukvarjala z sestavo antičnega betona ter njegovo vzdržljivostjo. Kot nam je znano arhitektura in gradbeništvo segata že v samo prazgodovino. Imeli smo mojstre gradnje že v samem starem Egiptu in antični Grčiji, vendar prave mojstre gradnje smo spoznali komaj v času Rima in Vitruvija. Prav po njih so si kasneje vzeli vzgled tudi Bizantinci. Tako kot danes so skozi celotno zgodovino zapisovali pomembna dejstva, tako tudi potek gradnje ter mešanice, ki so bile potrebne za gradnjo; tako je tudi mojster Vitruvij zapisal kakšno razmerje je potrebno za puzolanski oz. antični beton, vendar v dobenem do sedaj najdenem zgodovinskem zapisu ni bilo podanega razmerja vode. S tem problemom sem se skozi nekaj preteklih mesec ukvarjala in tudi s pomočjo mojega mentorja poskusila odkriti prav to razmerje. Moja predvidevanja pred samim začetkom eksperimenta so bila, da bo antični oz. puzolanski beton po sestavi precej podoben današnjemu portlandskemu betonu ter da bo prenesel večje obremenitve, torej se bo v njem pojavljalo več σ kot tudi ϵ napetosti in dosegal bo večjo stopnjo plastičnosti. Predvsem je pa bil cilj mojega raziskovalnega dela ugotoviti z izdelavo približka antičnemu betonu prav to razmerje. Med drugim pa sem tudi hotela najti zamenjavo za portlandski beton z betonom iz elektrofiltrskega pepela. Vse dosedanje raziskave so nakazovale ravno na to durabilnost antičnega betona tako v potresnih območjih kot tudi v obmorskih območjih, kjer stavbe prihajajo v stik z slano vodo. Odločila pa sem se tudi, da bom poiskala zamenjavo za portlandski cement ravno zaradi problemov onesnaževanja pri proizvodnji prav tega ter visokih stroškov. Proizvodnja prav tega pa je tudi kriva za približno 7% ogljikovega dioksida v zraku. Zanimivo je pa tudi, da med tem ko moremo portlandski cement žgati vsaj na 1400°C, pa so rimljani apno žgali na samo 900°C.

1. TEORETIČNI DEL

Skozi vso zgodovino se je človeštvo ukvarjalo z gradnjo, že v sami prazgodovini, vendar pravi začetki gradbenih podvigov so se začeli šele v času antike. Tako Egipčani kot Grki so bili mojstri gradnje, vendar so jih kaj kmalu prekosili Rimljani s Vitruvijem in svojim puzolanskim betonom. Prav tako pa so se po njih vzgledovali Bizantinci, kateri so prav po njihovem vzgledu in z njihovimi materiali zgradili tako imenovan sinonim za bizantinsko gradnjo, Hagio Sophio.

1.1. Podvigi v gradnji z betonom

Kljub temu, da so najbolj slavni pa Rimljani niso bili edini kateri so gradili z betonom oz. malto.

1.1.1. Uporaba betona pri ostalih kulturah

Na Filipinih so velike spomenike in grobnice konstruirali z uporabo opek iz apnenca. Skupaj so jih zlepili z neko vrsto antičnega oz. rimskega betona. Ko so določeno strukturo dokončali so jo prevlekli z maso podobno antičnemu betonu. Na podoben način so vrjetno skonstruirane tudi skulpture slonv iz Tabonskih jam.

1.1.2. Grki in njihovi akvadukti

Že približno 500 let pred našim štetjem so se pa s puzolanskim cementom oz. malto ukvarjali Grki. Prva znana uporaba pucolanske malte je bila med gradnjo grškega podzemnega akvadukta Magare, kjer so notranjsot akvadukta oblekli v 12mm debelo plast malte. Pucolanska malta vsebuje dodatke vulkanskega pepela, kar dovoljuje, da se trdi pod vodo-danes takšno mešanico poznamo kot hidravlični cement. Grki so dobili vulkanski pepel iz grških otokov Thira in Nisiros, ki ležita blizu Italije, kar je prispevalo k temu, da so Rimljani kasneje to mešanico izboljšali.

1.1.3. Hagia Sophia

Hagia sophia ali t.i. sinonim za bizantinsko arhitekturo naj bi spremenila zgodovino arhitekture. Vse od svojih začetkov leta 532 do 1520 je veljala za največjo katedralo. Ne samo njena zunanja struktura ampak tudi njena notranjost, kot tudi gradbene umetnine ji zagotavljajo neskončno slavo. Ampak to ni vse, njena največja posebnost je način kako je zgrajena oz. iz kakšnih materialov. Največja posebnost istanbulske mošeje je prav v malto iz mleto opeke, katera je dopuščala sami stavbi večjo razgibanost saj so kamne in opeke začeli lepiti prav s to malto, kar je dopuščalo tudi večje obremenitve same stavbe. Posebnost istanbulske mošeje pa je tudi, da kljub vzhodnim pridihom ni bil uporabljen skoraj doben lokalni material, ampak predvsem kamni in “opeke,” katerih izvor je bil v Rimski državi.



Slika 1: Hagia Sophia [Vir: http://hereandmal.com/wp-content/uploads/2015/07/hagia_sophia.jpg , 9.2.2016]

1.2. Rim in antični beton

Rimski beton, znan kot opus caementicium je material katerega so uporabljali v pozni Rimski republiki in kasneje skozi celoten čas Rimskega imperija. Rimski cement je baziran na hidravličnem cementu, vendar se kljub temu razlikuje od samega danes znanega in najpogosteje uporabljenega portlandskega cementa. Njegova najpomembnejša in najbolj znana lastnost je, da vsebuje vulkanski pepel, kateri ga naredi dosti bolj durable in vzdržljivega. Sredino 1. stoljetja so ga predvsem uporabljali, kot lepilo za opeke, kasneje pa so različne kombinacije z različnimi materiali dopuščale veliko večjo variacijo arhitekturnih oblik.

Kasnejše izboljševanje samega materiala pa je povzročilo t.i. betonsko revolucijo, ki je prispevala k bolj zapletenim arhitekturnim oblikam in zgradbam npr. Pantheon oz. templju vseh bogov, ki velja kot največji neojačan tempelj na svetu. Rimski beton so uporabljali tudi za gradnjo cest in pločnikov.

Vitruvij je že približno 25 pr.n.št. začel določati mešanice, ki bi bili primerni za apenske betone. Za strukturne betone je povzel, da je najboljši in tudi priporočljiv puzolan. Določil je tudi razmerja kako bi se ga naj mešalo; 1 del vementa 3 deli puzolana za zgradbe, 1 del cementa in 2 dela puzolana pa za podvodno gradnjo. Delež vode v mešanici ni bil zasleden v dobenem zapisu in še danes neznan. Razmerje, ki ga je Vitruvij določil za podvodne zgradbe se uporablja še danes za obmorsko gradnjo. Uporaba betona pa je začela dopuščati tudi bolj razgibane arhitekturne oblike kot so obok, lok in kupola, ki pa so bile do Vitruvijevih časov zelo malo oz. skoraj neuporabljene.

Podvodna in obmorska gradnja je bila rimskim inženjerom zelo dobro znane, prvi znan primer podvodne rimske betonske tehnologije je bil v t.i. Cesarjevem mestu.

Po velikem požigu Rima leta 64, ki je uničil velik del mesta, so začeli graditi po Nerotovih načeli, ki so še bolj vpodbudili razvoj betonske industrije in industrije opeke.

Primer ene izmed zgradb katerih so zgrajene z rimskim betonom je še danes slaven Rimski kolosej oz. Flaviski amfiteater. Prava posebnost prav njega pa so uboki in njegovih 76 vhodov, kateri so bili zgrajeni prav z rimskim betonom, kar dokažemo ravno z temi razgibanimi arhitekturnimi oblikami. Še eden izmed primerov pa je prav tako rimski panteon katerega »betonska« posebnost je prav njegova kupola.



Slika 2: Kolosej v Rimu [Vir: http://www.svet-krizarjenj.si/uploads/picture/361_krizarjenje_kolosej_rim_m.jpg, 9.2.2016]



Slika 3: Panteon v Rimu [Vir: <http://www.poeurope.net/wp-content/uploads/2010/07/pantheon-01.jpg>, 9.2.2016]

1.2.1. Značilnosti materiala

Rimski beton sestoji tako iz agregatnega in hidravličnega cementa-mešanica, ki se z vodo sčasoma strdi. Agregat varira in lahko vsebuje dele kamena, keramike in opečne ruševine od predhodnih porušenih zgradb. Armatura se ni uporabljala. Mavec in apno so uporabljali kot veziva. Vulkanski pepel, imenovan tudi puzolan, je bil zelo zaželen, kjerkoli so ga lahko dobili. Puzolan je naredil beton bolj odporen na morsko vodo kot pa je danes moderni beton. Puzolanski beton je vseboval visoko koncentracijo kremenca in aluminija. Sam antični beton je imel veliko plastičnost. Sam proces trdenja hidravličnega betona poteka skozi hidracijo in prav v tej točki se je razlikoval od cementa iz dušenega apna, kateri je bil najpogostejši beton predrimskih časov. Rimski beton je bil prav tako bolj plastičen in zdržal večje natezne napetosti kot njegov predhodnik.

Sam puzolanski cement ima veliko podobnosti z današnjim najpogosteje uporabljenim portlandskim cementom. Visoka vsotnost silike v puzolanskem rimskem cementu je zelo podobna modernemu cementu z razliko, da danes namesto puzolana dodajamo žlindro iz plavžev, elektrofiltrski pepel ali same silike.

Današnji portlandski beton bi naj prenesel približno 50 MPa nateznih oz. navadnih ali sigma napetosti in se še vedno izboljšuje, največji preskok je doživel od leta 1860, ko so ga izboljšali za skoraj 10-krat. Antični beton bi naj prenesel približno iste napetosti, čeprav ni dobenih pravih podatkov o lastnosti antičnih betonov in bi naj tudi varirale glede na razmerje voda/cement. Kjer pa se pojavi druga težava saj razmerje voda/cement, ki so pa uporabljali v času Rima ni znan in tudi sami vplivi tega razmerja na puzolanski cement niso znani. Sam Vitruvij tudi nikoli ni opisal samega razmerja voda/cement.



Slika 4: Akvadukt [Vir: http://cdn.history.com/sites/2/2015/03/history-lists-10-innovations-that-built-ancient-rome-aqueducts_Corbis-A.jpeg, 9.2.2016]

1.3. Primerjava kemijskih značilnosti puzolana in elektrofilterskega pepela

1.3.1. Puzolan oz. vulkanski pepel

Vulkanski pepel so pravzaprav fragmenti uprašenih delcev kamnov, mineralov in vulkanskega stekla (nekrystaliziran produkt hitro hlajene magme), ki nastanejo med vulkanskimi izbruhi ter imajo premer manjši od 2mm. Sama kemijska sestava vulkanskega pepela pa varira glede na kemijsko sestavo magme vulkana iz katere je izbruhnil. Kljub temu pa so še vedno glavni deli kremen (SiO_2) in kisik (O_2). Pepel oz. izbruhe pa delimo glede na vsotnost kremenca:

- Nizko energetske izbruhi iz bazalta; ti imajo temnejši pepel in vsebujejo približno 45-55% kremenca, je pa zato bogat z železom (Fe) in Magnezijem (Mg).
- Visoko energetske izbruhi iz riolitov; ti proizvedejo felzični pepel, ki ima visoko vsotnost kremenca in sicer 69% ali več.
- Normalno energetske izbruhi; to so drugi tipi pepela ki nastanejo pri izbruhih iz andesita ali dacita in imajo srednjo vrednost kremenca-55-69% ter so najpogostejši v naravi.

Povezli bomo, da so Rimljani predvsem imeli dostop do pepela, ki je nastal pri normalno energetskih izbruhih, saj so ti najpogostejši. Kot primer kemijske sestave bom predstavila kemijsko analizo vulkanskega pepela, ki je nastal med izbruhom vulkana Mout St. Helens, Washington, ZDA.

Tabela 1: Sestava vulkanskega pepela [Vir: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GL007i011p00949/abstract>]

Kemijska sestava	Masni delež [%]
Kremen (SiO_2)	65
Aluminijev oksid (Al_2O_3)	18
Železov oksid (Fe_2O_3)	5
Magnezijev oksid (MgO)	2
Kalcijev oksid (CaO)	4
Natrijev oksid (Na_2O)	4
Žveplo (S)	0,1

V samem pepelu pa se pojavljajo v manjših količinah tudi barij (Ba), baker (Cu), mangan (Mn), stroncij (Sr), vanadij (V), cink (Zn), cirkonij (Zr). Pojavljajo se tudi nekatere soli kot natrijev klorid (NaCl), kalijev klorid (KCl), kalcijev sulfat (CaSO_4), magnezijev sulfat (MgSO_4), vendar samo 1500-2000 $\mu\text{g/g}$. Zasedili so pa tudi sledi organskega gušika (130 $\mu\text{g/g}$), fluora (5 $\mu\text{g/g}$) in broma (0,5 $\mu\text{g/g}$).



Slika 5: Vulkanski izbruh [Vir: http://www.radio1.si/img/Gallery/Photo/pr_a1645fc1-86e4-4cdc-95df-3a180f22c641.jpg, 9.2.2016]

1.3.2. Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel je eden izmed produktov pri izgorevanju premoga. Sestavljajo ga fini delci, ki se izločajo med izgorevanjem iz kotla, ter skupaj s številnimi plini preidejo skozi filter, kjer se zaustavijo, med tem ko plini zapustijo skozi dimnik. Ta pepel se v večini primerih ujame v elektrofiltrih in ostalih filtracijskih sistemih za filtracijo finih delcev. V osnovi ima predcej podobno sestavo kot vulkanski pepel. Ima veliko vsotnost kremena (SiO_2), aluminijevega oksida (Al_2O_3) in kalcijevega oksida (CaO), to je glavna sestava premoga. V mojem raziskovalnem delu sem se poslužila elektrofiltrskega pepela iz termoelektrarne Šoštanj, kateri nastane ob izgorevanju lignita (nizko energetskega premoga).

Tabela 2: Sestava elektrofiltrskega pepela [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

Kemijska sestava	Masni delež [%]
Kremen (SiO_2)	38
Aluminijev oksid (Al_2O_3)	22
Železov oksid (Fe_2O_3)	4
Kalcijev oksid (CaO)	24
Magnezijev oksid (MgO)	5
Žveplov trioksid (SO_3)	3
Žaro izguba	1



Slika 6: Elektrofiltrski pepel [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

1.3.3. Primerjava

Kljub različnemu izvoru se pepela med seboj zelo malo razlikujeta. Predvsem se pepela med seboj razlikujeta po vsotnosti kremenca, saj ima elektrofilterski pepel iz lignita iz elektrarne Šoštanj pol manjšo vrednost kremenca kot pa povprečen vulkanski pepel. Prav tako se razlikujeta po vsebnosti kalcijevega oksida, ki je manjša v elektrofilterskem pepelu. Natrijev oksid in žveplo se nahajata le v vulkanskem pepelu, zato pa najdemo žaro izgubo le v elektrofilterskem pepelu.

1.4. Portlandski cement

Cement je hidravlično vezivo, ki se po hidratizaciji (reakciji z vodo) strdi in veže, ob tem pa iz cementne paste nastane trd cementni kamen. Ta prenaša visoke tlačne obremenitve in je zato zelo primeren gradbeni material. Najpomembnejša uporaba cementa je pri proizvodnji malte in betona, katera uporabljamo za lepljenje različnih naravnih in umetnih agregatov, ki skupaj ustvarja še močnejši gradbeni material. Cement sestavljajo kalcijevi, silicijevi in aluminijevi oksidi. Poznamo različne vrste cementa, vendar je danes najbolj razširjen in najpogosteje uporabljen portlandski cement. Portlandski cement se proizvaja predvsem iz žganega apnenca (CaCO_3) in gline (alumosilikati), če je potrebno pa se doda tudi glinica (Al_2O_3) in kremen (SiO_2). Osnovna reakcija ki se pojavi je: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$. Spojina, ki jo veže, je $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, zato se cement strjuje ob hidratizaciji.



Slika 7: Portlandski cement [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

2. EKSPERIMENTALNI DEL

Postopek preverjanja dejanske kvalitete približka antičnega betona sem izvedla tako, da sem najprej pripravila različne mešanice pucolanskega cementa, ustvarila standardno mešanico portlandskega betona in pucolanskega cementa ter pripravila standardne vzorce in jih kasneje preverila z ustreznimi metodami.

Pribor in materiali:

Zaščitna sredstva:

- Zaščitna halja
- Zaščitna očala

Materiali:

- Apno
- Elektrofilterski pepel iz lignita iz elektrarne Šoštanj
- Normni pesek
- Cement Lafarge: CEM II/A-M (S-L) 42,5N
- Voda

Pribor:

- Elektronska tehnica
- Mešalnik betona in betonskih mešanic
- Plastična posoda
- Žlica
- Kapaljka
- 800mL in 200mL čaša
- Vicatov aparat
- Kalup za standardne kozice (40×40×140)
- Stroj za testiranje trdnosti materiala

2.1. Postopek

2.1.1. Ugotavljanje masnega deleža vode

Eksperimentalno delo sem začela z določanjem oz. ugotavljanjem masnega deleža vode v približku antičnega betona. Poslužila sem se Vitruvijevega razmerja za antični beton: 3 deli pepela, 1 del apna. Pripravila sem 500g veziva, torej 375g elektrofilterskega pepela in 125g apna. Vezivo sem nato položila v mešalnik kateri ga je mešal približno 90s, dokler ni bilo vezivo homogeno. Nato sem stehala 200g vode na 2 decimalna mesta natančno in jo dodala vezivu, nato sem ponovno vklopila mešalnik za 90s, tako kot tudi določa standard. Po končanem mešanju je vzorec bil presuh, zato sem stehala še dodatnih 100g vode in jo dodala v mešanico in ponovno vklopila mešalnik za 90s. Po dodatnih 100g vode je bila mešanica pre redka in zato sem jo morala zavreči. Ponovila sem zgoraj že naveden postopek vendar sem tokrat stehala in dodala samo 15g vode, kar je zadoščalo, zato sem mešanico mešala 90s in jo nato pustila 30s počivati. Nato sem določila standardno konsistenco, za kar sem uporabila vicatov aparat z jeklenim batom. Aparat umerimo tako, da spustimo bat na površino podložene plošče, nastavimo kazalec na ničelno točko in dvignemo iglo v začetno lego. Napolnila sem vicatov obroč z mešanico in postavila obroč pod bat, nato sem spustila bat in počakala približno 30s, dokler se bat ni nehal ugrezati. Ker je bil ugrez bata 6mm je to dokazalo, da sem ustrezno oz. standardno konsistenco in da se je začel postopek vezanja.



Slika 8: Vicatov aparat [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

2.1.2. Priprava standardne mešanice za kozice

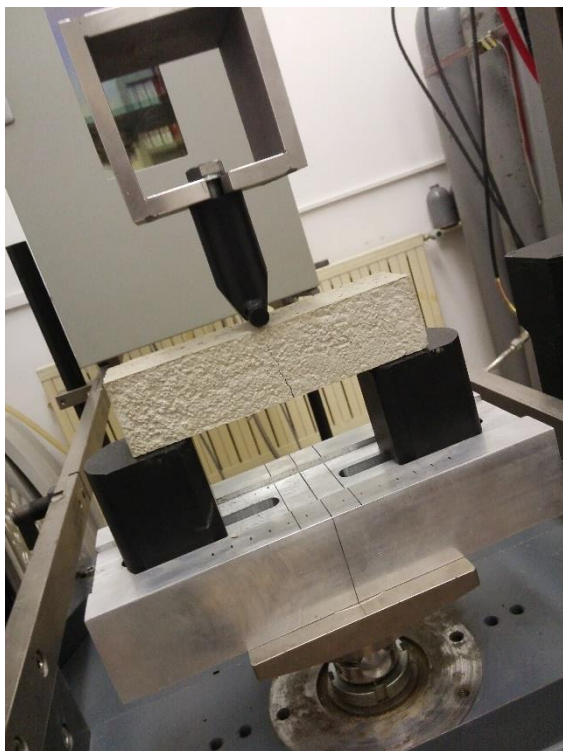
Po določitvi razmerja vode in veziva sem se lotila priprave standardne mešanice za 3 tri kozice. Po standardih potrebujemo za 3 kozice 450g veziva. Tokrat sem se lotila priprave dveh mešanic; portlandskega betona in približka antičnega betona. Pri prvi mešanici, torej pri portlandskem betonu, sem stejala 450g veziva, torej portlandskega cementa oz. natančneje cement oznake CEM II/A-M (S-L) 42,5N proizvajalca Lafarge. Nato sem pripravila še 1350g normnega peska EN 196-1 (ISO 679), katerega pa sem stresla v dozirko na mešalniku. Pripravila pa sem še 225g vode, saj more biti razmerje med vodo in vezivom 0,5 pri portlandskem cementu. Vse skupaj sem nato dala mešati v mešalnik, kateri je sam uravnaval mešanje in dodajanje peska, saj je tako sprogramiran. Med tem, ko se je mešanica mešala sem pripravila kalup za kozice, katerega sem premazala z opažnim oljem, da sem kasneje lahko lažje odstranila kozice iz modela. Ko se je mešanica dokončno zmešala sem jo enakomerno razporedila v kalup ter jih ročno tudi malo pretresla, da se je mešanica še boljše porazdelila. Na podoben način sem se tudi lotila priprave 450g mešanice veziva približka antičnemu betonu, torej sem najprej pripravila 112,5g apna, nato pa še 337,5g elektrofiltrskega pepela. Vezivo sem dala mešati v mešalnik, da je mešanica postala homogena, med tem pa sem pripravila 205,5g vode, ter 1350g normnega peska. Ko se je mešanje veziva zaključilo sem mu dodala pesek in vodo in pustila da se je mešalo približno 90s, ker pa sem opazila, da je mešanica pregosta sem dodala 7-krat po 10g vode tako, da je nakoncu bilo v mešanici vse skupaj 275,5g vode. Po zaključenem mešanju sem mešanico pustila počivati 30s in jo nato ponovno dala mešati za 90s. Med drugim oz. tretjim mešanjem sem ponovno pripravila kalup in ga namazala z opažnim oljem, po končanem mešanju pa sem ponovno enakomerno porazdelila mešanico v kalup in ga ročno pretresla, da se je še enakomerneje porazdelilo. Obe mešanici sem pustila počivati v kalupih 24 ur, nato pa sem jih odstanila iz kalupov in nadaljevala sušenje kozic v klimatski komori.



Slika 9: Kalup za kozice [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

2.1.3. Obremenitveni testi

Po 7 dneh sem nadaljevala moj eksperiment z obremenitvenimi testi, kjer sem najprej izvedla upogibne teste nato pa še tlačne teste. Pri obeh testih sem uporabljala enak stroj za testiranje trdnosti materiala, kateri je računalniško voden. Najprej sem na upogib testirala tri kozice iz portlandskega cementa. Kozico sem nastavila v napravo tako, da je bilo razmaka med podporama 100mm in točkovna obremenitev 50mm od obeh podpor, ter pravokotno na gladko stran. Nato sem nastavila mašino, da se je spustila in ji določila začetno pozicijo, silo s katero naj pritiska in z kakšno hitrostjo. Po končanem posameznem testu sem umaknila kozico in postopek ponovila pri naslednji. Za tem sem na upogib testirala tudi eno kozico iz približka antičnemu cementu, kjer sem ponovila enak postopek kot pri testiranju kozic iz portlandskega cementa. Sledili so tlačni teste, pri katerih sem uporabila enake vzorce kot pri upogibnih, kljub temu, da se prvotne dimenzije kozic niso ohranile, saj sem potrebovala le površino 40×40mm. Najprej sem morala pripraviti napravo, da je bila primerna za izvajanje tlačnih obremenitev, tako fizično kot programsko. Odločila sem se, da bom tokrat najprej testirala vzorec iz približka antičnemu cementu. Vstavila sem vzorec v napravo, katera je začela pritiskati. Po končanem posameznem poskusu sem vzorec odstranila iz naprave in jo očistila, za tem pa vstavila nov vzorec. Ko sem preizkusila vse vzorce iz prve mešanice, sem enak postopek opravila pri vzorcu iz portlandskega, kjer pa sem morala test predčasno prekiniti.



Slika 10: Upogibni test [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

3. REZULTATI IN RAZPRAVA

3.1. Masni delež vode

Glede na poskus z vicatovim aparatom sem lahko določila, da je razmerje voda proti vezivu pri približku antičnemu betonu enako 0,612, kar pomeni da na 450g veziva potrebujemo 275,5g vode. To razmerje je za kar 0,1 večje kot pa razmerje voda/vezivo pri portlandskem cementu, kjer je razmerje enako 0,5, iz česar povzamemo, da na 450g veziva potrebujemo 225g vode. Rezultat oz. primerjava me pravzaprav ni presenetila, saj apno, ki je del veziva pri približku antičnega betona absorbira večjo količino vode kot pa portlandski cement.



Slika 11: Vicatov aparat v uporabi [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

3.2. Kozice

V tej fazi je prišlo do kompikacij, saj se eksperiment ni obnesel kot je bilo predvideno. Ko sem kozice po 24 urah odstranila iz kalupov se je ena zlomila na pol in sicer ena izmed tistih, ki bi naj bila po strukturi približek antičnemu betonu. Ostali sta še samo dve, ampak ne za dolgo, saj ko sem jih želela premestiti v klimatsko komoro se je zlomila še ena. Kljub nesreči z približkom antičnemu betonu, pa sem lahko po 24 urah normalno odstanila iz kalupa tri kozice iz portlandskega cementa, katere sem brez kakršnih koli komplikacij lahko prenesla v klimatsko komoro, kjer so skupaj z preostalo kozico iz približka antičnega betona nadaljevale proces sušenja na 20°C pri 98% relativni vlažnosti zraka. Prelomljeni kozici sicer nisem odnesla v klimatsko komoro kjer bi se naj sušili, ampak sem ju pustila na suhi negi, torej na 20°C pri 40% relativni vlažnosti. Glede na te opažnje lahko sklepam, da so kozice, katere sem prve odstranila iz kalupa, ali krhkejše ali pa bi jih morala pustit dlje časa v kalupih, saj sem dobila občutek, da se niso dovolj posušile.

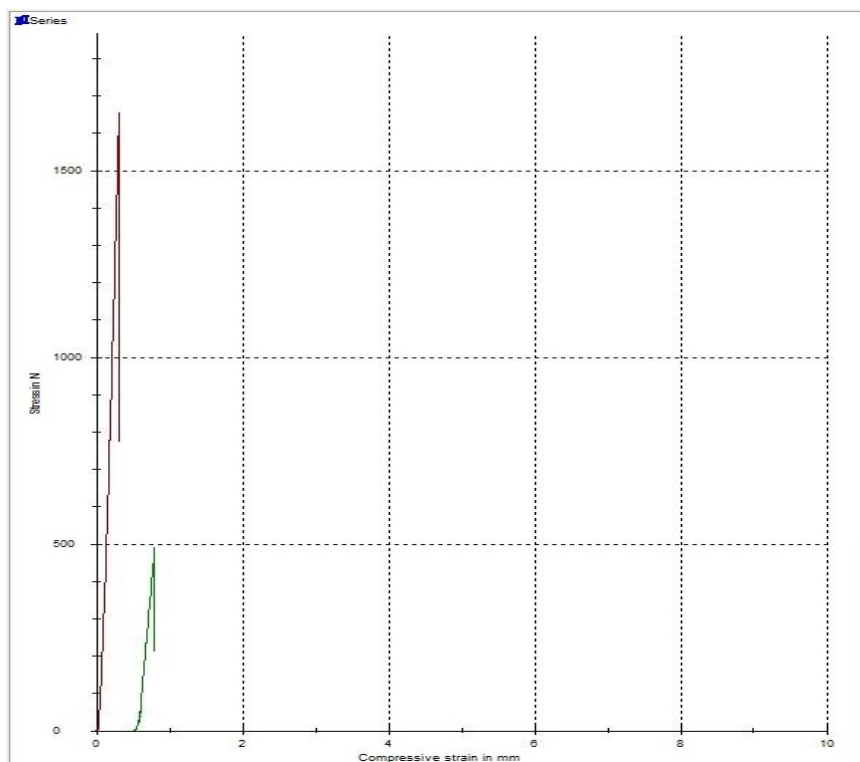


Slika 12: Kozice [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

3.3. Obremenitveni testi

Obremenitvene teste sem opravila po 7 dneh sušenja kozic v klimatski komori. Kot sem omenila že v prejšnjem poglavju sem opravila tako upogibne kot tudi tlačne teste.

Portlandski beton prenese na upogibnih testih po 28 dneh napetost približno 8MPa. Moji vzorci so, kljub temu da so se sušili le 7 dni, povprečno prenesli približno polovico pričakovane končne maksimalne napetosti, torej 4MPa, pri obremenitvi približno 1500N. Pri tej obremenitvi so se deformirali za povprečno 0,30mm. Kozica iz približka antičnemu betonu je prenesla komaj 1/3 te obremenitve preden je počila, torej slabih 500N, v njej pa se je pojavila napetost 1,15MPa. Kljub slabi nosilnosti pa se je že pri tako majhni obremenitvi deformirala za kar 0,29mm, iz česar lahko povzamemo, da je ta material dosti bolj plastičen kot pa portlandski cement, kar tudi obrazloži zakaj so številne antične stavbe preživele številčne potrese.

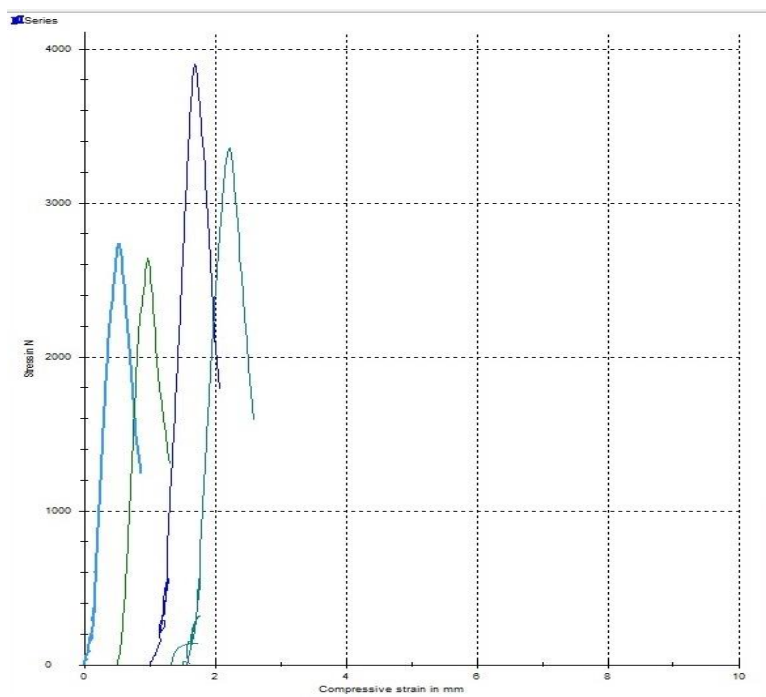


Graf 1: Graf upogibov [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

Tabela 3: Upogib [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

Nr	A mm ²	F _{max.} N/mm ²	s F _{max.} mm
1	1600	3,88	0,30
2	1600	1,15	0,29

Tako kot pri upogibnih testih se je tudi pri tlačnih testih boljše obnesel portlandski beton kot približek antičnemu betonu. Na tlak sem testirala 4 vzorce približka antičnemu betonu, kjer so me pa rezultati presenetili. Vzorca, ki sta imela suho nego sta prenesla obtežbo približno 2500N, napetost, ki pa se je pojavila v teh dveh vzorcih pa je znašala približno 1,7MPa, deformacija pa 0,5mm. Vzorca, ki sta pa bila deležna sušenja v klimatski komori pa sta prenesla obtežbo kar 4000N, ter napetost 2,4MPa, deformirala pa sta se za 0,7mm. Kljub tem razlikam pa vseeno ni primerljivo z portlandskim betonom, pri katerem sem mogla prekiniti eksperiment, kateri je kljub starosti 7 dni presegel obremenitev 12000N, kar pa je maksimalna obremenitev, ki jo premore naprava, katero sem uporabljala za preizkuse.



Graf 2: Diferenca tlačne trdnosti [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

Nr	A mm ²	F _{max.} N/mm ²	s F _{max.} mm
1	1600	1,71	0,53
2	1600	1,65	0,47
3	1600	2,44	0,69
4	1600	2,10	0,72

Tabela 4: Tlak [Vir: Avtorjeva osebna zbirka]

3.4. Druga opažanja

Zaradi obstojnosti rimskega betona, za kar imamo dokaz stavbe iz rimskega časa, ki še danes stojijo, kot na primer kolosej in phanteon v Rimu sklepam, da bi približek antičnemu betonu, ki sem ga ustvarli prinesel boljše rezultate, če bi vzorec pustila stati več časa. Druga stvar, ki sem jo opazla pa je tudi, da mešanica med sušenjem potrebuje dosti vlage, kar dokazujejo tudi rezultati tlačnih testov. V zakup pa tudi jemljem, da ima vpliv na rezultate različna vsotnost kremena v pepelih, saj elektrofiltrski pepel, katerega sem jas uporabila, ima skoraj za polovico manjšo vsotnost kremena (SiO₂), kot pa povprečni vulkanski pepel. Možen vpliv na rezultate pa je tudi majhna razlika v vsebnosti mikrospojin kot so recimo žveplo (S), natrijev oksid (Na₂O), ki se pojavljajo v vulkanskem pepelu, v elektrofiltrskem pa ne, to sklepam po Liebigovem pravilu minimuma.

4. ZAKLJUČEK

Skozi raziskovalno nalogo sem probavala odkriti približek antičnemu betonu, v katerem sem pucolan oz. vulkanski pepel nadomestila z elektrofилtrskim pepelom iz lignita iz termo elektrarne Šošanj. Zanimalo me je kakšno razmerje vode je sploh potrebno, saj v dobenem dosedanem zapisu še ni bilo razkrito. Med drugim pa me je tudi zanimalo ali je možno ustvariti približek antičnemu betonu z elektrofилtrskim pepelom, ki bi lahko nadomestil danes najpogosteje uporabljen portlandski beton ter kako je možno, da so stave, ki izvirajo iz antičnih časov obstale toliko let in preživele številne potrese. Zaradi neprimerne izvedbe raziskovalne metode, pa morem ovreči svoje hipoteze, katere sem si zastavla na začetku raziskovalnega dela.

Postavljeno hipotezo, da bo moj približek prenesel večji upogib sem lahko ovrgla takoj po zadnjem opravljenem eksperimentu. Saj je dosegel komaj obremenitev 500N, med tem ko je portlandski beton dosegel 1500N. Hitro pa sem tudi ovrgla hipotezo, da bi lahko ta beton nadomestil portlandskega saj so tlačne obremenitve, ki jih betoni izredno dobro prenašajo, tudi bili neprimerljivo manjši in neprimerni za uporabo v gradnji, saj 4000N, ki jih je prenesel je slabih 400kg, kar pa presežemo že pri osnovni konstrukciji. Kljub spodrslajem pa se je izkazalo, da bi ob izboljšanju mešanice in z dodatki drugih substanc bil lahko beton z elektrofилtrskim pepelom zelo primeren za potresna območja, ker je zelo plastičen, kar se je izkazalo ob upogibnih obremenitvah, saj je v dosegel isto deformacijo pri obremenitvi 500N, kar je približno 1/3 od obremenitve pri kateri portlandski beton doseže takšno deformacijo. Čeprav ni bil to namen moje raziskovalne naloge pa sem ugotovila, da portlandski beton proti pričakovanjem hitro pridobiva na trdnosti. Moji vzorci so po 7 dneh prenesli napetost 4MPa, v povprečju pa prenese povprečen vzorec portlandskega betona po 28 dneh napetosti 8MPa.

Trenutno nemorem upravičeno trditi, da bi lahko cement iz elektrofилtrskega pepela nadomestil priljubljen portlandski beton, vendar definitivno vidim v njem perspektivo na podlagi zgodovinskih konstrukcij.

5. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Kljub neuspehim eksperimentom pa vidim prihodnost v cementu iz elektrofilterskega pepela, saj bi bila cenovno ugodnejša in okolju bolj prijazna rešitev. Sama proizvodnja portlandskega cementa ima velik vpliv na okolje, saj že samo za pridobitev surovin moramo grozno posegati v naravo-miniranje kamnolomov. Med samo proizvodnjo pa se kljub filtraciji v ozračje spuščajo plini ter prašni delci, ki imajo težki vpliv na okolje. Za pridelavo pa se porabi tudi ogromno energije, ki ima tako velik ekološki vpliv kot tudi ekonomski. Proizvodnja pa je nasploh tudi zelo draga, saj že samo pridobivanju surovin zahteva veliko finančni sredstev. Ob pravih raziskavah pa bi lahko imel beton iz elektrofilterskega pepela veliko prihodnost, lahko bi celo rekli, da bi postal »zeleni beton.« Ob proizvodnji elektrofilterskega betona bi tako finančno profitirali kot tudi ekološko, saj bi glavna sestavina bila prav odpad iz termoelektrarn, kateri ima nizko cenovno vrednost in bi ga sicer zavrgli v okolje. Ob raziskavah in odprtju proizvodnje pa bi tudi pridobili na novih delovnih mestih ter gospodarski rasti.

VIRI IN LITERATURA

Literatura

MARINKO, Jože. Antična arhitektura. Ljubljana: Družina, 1997. 391 str. ISBN 961-222-087-5

OSMANOVIĆ, Zehrudin. Proizvodnja portland-cementa. Tuzla: Univerzitet, 2010. 323 str. ISBN 978-9958-897-04-7

Viri

https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_concrete , 3.2.2016

http://slocem.si/proizvodnja_cementa/ , 3.2.2016

<http://www.finance.si/8333077/Opus-caementicum-temelj-za-preporod-rimske-arhitekture> , 1.2.2016

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Cement> , 28.1.2016

http://www.mariamilani.com/colosseum/colosseum_structure.htm , 20.1.2016

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GL007i011p00949/abstract> , 6.2.2016