

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:

Dagarin, P., 2014. Raba stranskih produktov izgorevanja premoga za zasipe kanalov in geosond. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Petkovšek, A., somentor Maček, M.): 38 str.

Datum arhiviranja: 04-12-2014

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:

Dagarin, P., 2014. Raba stranskih produktov izgorevanja premoga za zasipe kanalov in geosond. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Petkovšek, A., co-supervisor Maček, M.): 38 pp.

Archiving Date: 04-12-2014

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

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI  
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE  
STOPNJE OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**PETER DAGARIN**

**RABA STRANSKIH PRODUKTOV IZGOREVANJA  
PREMOGA ZA ZASIPE KANALOV IN GEOSOND**

Diplomska naloga št.: 79/OG-MO

**THE USE OF COAL COMBUSTION PRODUCTS FOR  
GROUTS FOR BACKFILLING TRENCHES AND GEO-  
SOUNDS**

Graduation thesis No.: 79/OG-MO

**Mentorica:**

doc. dr. Ana Petkovšek

**Predsednica komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-  
Bosiljkov

**Somentor:**

asist. dr. Matej Maček

Ljubljana, 28. 11. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVE**

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Škofja Loka, 3. 10. 2014

Peter Dagarin

## **BIBLIOGRAFIKONSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK: 62-665.4:624.01(497.4)(043.2)**

**Avtor: Peter Dagarin**

**Mentorica: doc. dr. Ana Petkovšek**

**Somentor: asist. dr. Matej Maček**

**Naslov: Raba stranskih produktov izgorevanja premoga za zasipe kanalov in geosond**

**Tip dokumenta: Diplomaska naloga - VSŠ**

**Obseg in oprema: 38 str., 1 pregl., 21 sl., 28 graf., 5 en.**

**Ključne besede: Elektrofilitrski pepel, geosonda, preiskave, produkti izgorevanja premoga, tlačna trdnost, volumenska obstojnost, žlindra, zalivna masa.**

### **Izvleček**

Namen diplomskega dela je bil preveriti možnost uporabe stranskih produktov, ki nastanejo pri izgorevanju premoga v termoelektrarni Trbovlje za zalivne mase kanalov in geosond in jih primerjati z zalivnimi masami, ki jih je mogoče kupiti na trgu. Zalivna masa je mešanica polnila, veziva in vode, ki mora izpolnjevati zahteve glede pretočnosti, volumenske stabilnosti, trdnosti in druge, za specifične namene rabe, zahtevane lastnosti. Izvedli smo laboratorijske preiskave na različnih mešanicah stranskih produktov izgorevanja premoga ter na referenčni zalivni masi. Preizkusili smo volumensko stabilnost svežih mešanic, z reometrom smo izmerili njihovo viskoznost, opravili meritve vodovpojnosti po Enslinu, meritve adsorpcije na organsko barvilo metilen modro, po Atterbergu smo ugotavljali mejo židkosti bentonita ter merili tlačne trdnosti staranih mešanic.

Ugotovili smo, da ima količina dodane vode velik vpliv na rezultate vseh preiskav, da je njen vpliv nelinearen, da bentonit kot dodatek dobro vpliva na stabilnost sveže mešanice, cement pa pripomore k povečanju trdnosti. Žlindra kot polnilo ni izkazala ugodnih rezultatov, prvič zato, ker bi jo morali odsejati pred uporabo, drugič pa zato, ker ne veže in mešanice z žlindro ne dosežajo ustreznih trdnosti.

**BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT****UDC: 62-665.4:624.01(497.4)(043.2)****Author: Peter Dagarin****Supervisor: Assist. Prof. Ana Petkovšek, Ph.D****Co – advisor: Assist. Matej Maček, Ph.D****Title: The use of coal combustion products for grouts for backfilling trenches and geo-sounds****Document type: Graduation thesis - Higher education professional study****Notes: 38 p., 1 tab., 21 fig., 28 graph., 5 eq.****Key words: Fly ash, geo-sound, research, coal combustion products, compressive strength, volume stability, boiler slag, fill.****Abstract**

The purpose of the thesis was to investigate the coal combustion products - CCP- from the brown coal burning thermo-power plant as a component for grouts for backfilling trenches and geo-sounds. The grout is a mixture of inert material, hydraulic binder, additives and water. It must fulfil the criteria of viscosity, volumetric stability, strength and others, for specific usage required properties, like heat permeability. The laboratory tests were performed on different mixtures of fly ash, boiler slag, cement and bentonite. Additionally, a commercial grout was investigated as a reference material. Index properties like the grain size distribution, the Enslin Neff water adsorption test, the Methylene blue test and the Atterberg limit tests were performed on dry row materials. On mixtures with water the volumetric stability and the viscosity were investigated. The compressive strength of hardened grout was measured after 28 days.

The investigation shows that the water/dry mass ratio has a great influence to the mixture as well as to the hardened grout properties. Low addition of bentonite improves the stability of fresh mixture properties and the cement improves the strength of hardened fly ash grout. The boiler slag was found not to be suitable as a part of inert fill, because it is too coarse-grained and should be sieved before its use and it has not hydraulic properties.

## **Zahvale**

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Ani Petkovšek za ponujeno možnost izdelave tovrstne diplomske naloge in možnost spoznavanja laboratorijskega dela.

Prav tako se zahvaljujem somentorju asist. dr. Mateju Mačku za koordinacijo poteka laboratorijskih preiskav in strokovno pomoč ter Jasni Smolar in Miranu Mercu za pomoč pri izvajanju laboratorijskih preiskav.

Zahvaljujem se tudi ženi in družini, ki so me med študijem stalno podpirali in mi stali ob strani.

## Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Geotermalna energija.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Materiali, uporabljeni v nalogi.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Produkti izgorevanja premoga.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.1</b>	<b>EF pepel.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Žlindra.....</b>	<b>3</b>
<b>3.2</b>	<b>Cement.....</b>	<b>4</b>
<b>3.3</b>	<b>Bentonit .....</b>	<b>4</b>
<b>3.4</b>	<b>Voda.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Priprava vzorcev.....</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Izvedene preiskave.....</b>	<b>6</b>
<b>5.1</b>	<b>Volumenska obstojnost .....</b>	<b>6</b>
<b>5.2</b>	<b>Vodovpojnost po Enslinu .....</b>	<b>8</b>
<b>5.3</b>	<b>Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti .....</b>	<b>9</b>
<b>5.4</b>	<b>Adsorpcija za organsko barvilo Metilen modro .....</b>	<b>11</b>
<b>5.5</b>	<b>Merjenje viskoznosti z reometrom.....</b>	<b>13</b>
<b>5.6</b>	<b>Enosni tlačni preizkus .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Rezultati preiskav in razprava .....</b>	<b>19</b>
<b>6.1</b>	<b>Volumenska obstojnost .....</b>	<b>19</b>
<b>6.1.1</b>	<b>Referenčna zalivna masa.....</b>	<b>19</b>
<b>6.1.2</b>	<b>EF pepel.....</b>	<b>20</b>
<b>6.1.3</b>	<b>EF pepel z 2 % bentonita .....</b>	<b>21</b>
<b>6.1.4</b>	<b>EF pepel s 5 % cementa .....</b>	<b>22</b>
<b>6.1.5</b>	<b>EF pepel z 2 % bentonita in 5 % cementa.....</b>	<b>22</b>
<b>6.1.6</b>	<b>EF pepel in žlindra .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2</b>	<b>Vodovpojnost po Enslinu .....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Referenčna zalivna masa.....</b>	<b>23</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Bentonit .....</b>	<b>25</b>



<b>6.3</b>	<b>Adsorpcija za organsko barvilo metilen modro (MB)</b> .....	<b>25</b>
6.3.1	Referenčna zalivna masa .....	25
6.3.2	Bentonit .....	25
<b>6.4</b>	<b>Merjenje viskoznosti z reometrom</b> .....	<b>26</b>
6.4.1	Referenčna zalivna masa .....	26
6.4.2	EF pepel.....	27
6.4.3	EF pepel + 2 % bentonita .....	27
6.4.4	EF pepel + 5 % cementa .....	28
6.4.5	EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa.....	29
<b>6.5</b>	<b>Enoosni tlačni preskus</b> .....	<b>30</b>
6.5.1	Referenčna zalivna masa .....	30
6.5.2	EF pepel.....	31
6.5.3	EF pepel z 2 % bentonita.....	31
6.5.4	EF pepel s 5 % cementa.....	32
6.5.5	EF pepel z 2 % bentonita in 5 % cementa .....	33
6.5.6	EF pepel in žindra .....	34
<b>6.6</b>	<b>Toplotna prevodnost</b> .....	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Razprava</b> .....	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>Zaključek</b> .....	<b>37</b>
	<b>VIRI</b> .....	<b>38</b>

## Kazalo grafikonov in tabel

<b>Grafikon 1: Primer prikaza rezultata merjenja volumenske obstojnosti .....</b>	<b>7</b>
<b>Grafikon 2: Primer prikaza Enslinovega testa .....</b>	<b>9</b>
<b>Grafikon 3: Primer prikaza grafa za določitev meje židkosti .....</b>	<b>11</b>
<b>Grafikon 4: Prikaz rezultata merjenja viskoznosti .....</b>	<b>14</b>
<b>Grafikon 5: Primer prikaza rezultata enoosnega tlačnega preskusa.....</b>	<b>18</b>
<b>Grafikon 6: Izcejanje vode referenčne zalivne mase.....</b>	<b>19</b>
<b>Grafikon 7: Volumenska deformacija referenčne zalivne mase .....</b>	<b>19</b>
<b>Grafikon 8: Izcejanje vode EF pepela .....</b>	<b>20</b>
<b>Grafikon 9: Volumenska deformacija EF pepela .....</b>	<b>20</b>
<b>Grafikon 10: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita, v/c=0,7 .....</b>	<b>21</b>
<b>Grafikon 11: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita, v/c=0,9 .....</b>	<b>21</b>
<b>Grafikon 12: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 5 % cementa .....</b>	<b>22</b>
<b>Grafikon 13: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa.....</b>	<b>22</b>
<b>Grafikon 14: Izcejanje vode mešanice EF pepel + žindra .....</b>	<b>23</b>
<b>Grafikon 15: Volumenska deformacija mešanice EF pepel + žindra .....</b>	<b>23</b>
<b>Grafikon 16: Rezultati preiskave vodovpojnosti referenčne zalivne mase .....</b>	<b>24</b>
<b>Grafikon 17: Sprememba strižne sile s časom - referenčna zalivna masa .....</b>	<b>26</b>
<b>Grafikon 18: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel.....</b>	<b>27</b>
<b>Grafikon 19: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 2 % bentonit.....</b>	<b>28</b>
<b>Grafikon 20: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 5 % cementa.....</b>	<b>28</b>
<b>Grafikon 21: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa .....</b>	<b>29</b>
<b>Grafikon 22: Rezultat ETT - referenčna zalivna masa .....</b>	<b>30</b>
<b>Grafikon 23: Rezultat ETT – EF pepel .....</b>	<b>31</b>
<b>Grafikon 24: Rezultat ETT – EF pepel + 2 % bentonita .....</b>	<b>31</b>
<b>Grafikon 25: Rezultat ETT – EF pepel + 5 % cementa .....</b>	<b>32</b>
<b>Grafikon 26: Rezultat ETT – EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa.....</b>	<b>33</b>
<b>Grafikon 27: Rezultat ETT – EF pepel + žindra .....</b>	<b>34</b>
<b>Grafikon 28: Primerjava rezultatov ETT .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 1: Rezultati bistvenih preiskav .....</b>	<b>35</b>

## **Kazalo slik**

<b>Slika 1: Princip delovanja toplotne črpalke (vir: <a href="http://www.enertus.si/kako-deluje.html">http://www.enertus.si/kako-deluje.html</a>) .....</b>	<b>2</b>
<b>Slika 2: Vlití vzorci, v fazi staranja .....</b>	<b>5</b>
<b>Slika 3: Merjenje volumenske obstojnosti .....</b>	<b>6</b>
<b>Slika 4: Enslinov aparat.....</b>	<b>8</b>
<b>Slika 5: Konusni penetrometer .....</b>	<b>10</b>
<b>Slika 6: Posodica z vzorcem za izvajanje preskusa (levo) in posodica za določanje vlage (desno) .....</b>	<b>11</b>
<b>Slika 7: Čaša z magnetnim mešalom .....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 8: Pojav haloja (pri točki 69) .....</b>	<b>12</b>
<b>Slika 9: Reometer .....</b>	<b>13</b>
<b>Slika 10: Kalup reometra s sondo in preizkušancem.....</b>	<b>14</b>
<b>Slika 11: Beleženje odčitkov reometra .....</b>	<b>14</b>
<b>Slika 12: Merilni obroč med vzorcem in stiskalnico .....</b>	<b>15</b>
<b>Slika 13: Izravnava ploskev z rezilom.....</b>	<b>16</b>
<b>Slika 14: Merjenje višine s kljunastim merilom .....</b>	<b>16</b>
<b>Slika 15: Merilna oprema za potrebe enoosnega tlačnega preskusa .....</b>	<b>17</b>
<b>Slika 16: Porušitev vzorca .....</b>	<b>17</b>
<b>Slika 17: Pojav mehurčkov v Enslinovem aparatu zaradi kemične reakcije v prašku referenčne zalive mase .....</b>	<b>24</b>
<b>Slika 18: Obstanek haloja 4 minute brez dodajanja barvila pomeni vrednost MB.....</b>	<b>25</b>
<b>Slika 19: Porušitev po obliki peščene ure.....</b>	<b>32</b>
<b>Slika 20: Primerjava tekstur .....</b>	<b>33</b>
<b>Slika 21: Vzorci za preiskavo toplotne prevodnosti.....</b>	<b>34</b>

»Ta stran je namenoma prazna«

## 1 UVOD

Pri geotehničnih delih, kot so sidranje, izdelava kanalskih rovov za cevovode ali izvedba geosond, je potrebno prostor med zaledno zemljino/kamnino in vgrajenim objektom zapolniti. Za zapolnjevanje se lahko uporabljajo sipki materiali ali injekcijske mase, ki so med vgrajevanjem v tekočem stanju, nato pa otrdijo – vežejo.

Glede na namen rabe morajo zalivne mase izpolnjevati različne zahteve. Zalivne mase za jarke cevnih vodov, preko katerih poteka promet, morajo imeti zadostno togost in trdnost, saj bi prevelike deformacije strjene zalivne mešanice povzročile poškodbe na vozišču. Pri zalivnih masah, ki se uporabljajo pri zapolnjevanju vrtin za geosonde, pa je bolj kot visoka tlačna trdnost, pomembna čim boljša toplotna prevodnost, ki je ključnega pomena za učinkovito delovanje sistema. To velja tako za sisteme voda-voda kot tudi za sisteme, ki uporabljajo za prenosni medij hladilo (geosonda).

Pomembna lastnost svežih zalivnih mas je volumenska obstojnost. To je lastnost, ki pove, kako dolgo in do kakšne mere sveža mešanica ohranja svoj volumen, koliko se seseda in koliko se iz nje izloči vode. Ta lastnost je pomembna ne samo za zalivne mase, ampak za vse sveže mešanice v gradbeništvu. Sveža mešanica mora ohranjati volumen v okviru toleranc vse do strditve.

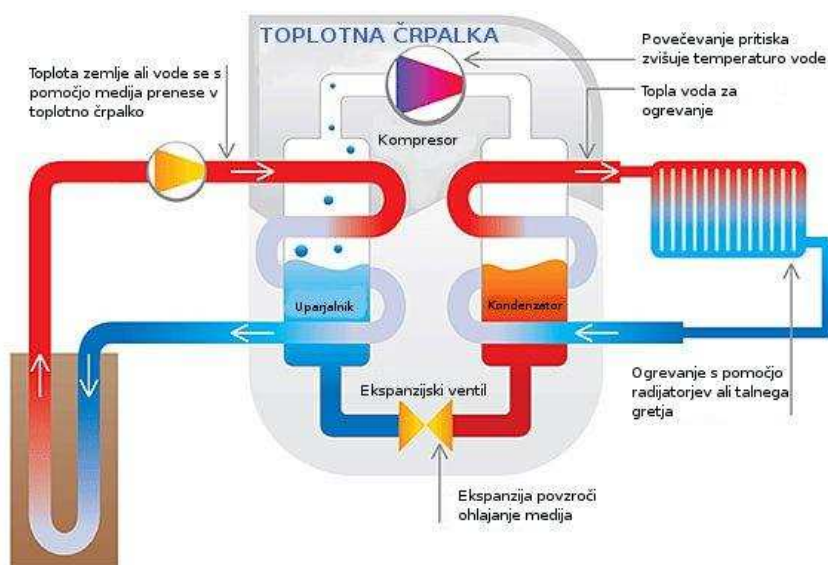
Zalivne mase po navadi vgrajujemo v vrtino ali kanalski jarek s črpalko, zato morajo biti tudi primerno pretočne, da je zagotovljena sposobnost črpanja. Črpanje je lažje, če je masa 'tekoča', se pravi, če vsebuje več vode, kar pa lahko negativno vpliva na druge lastnosti. Danes so na voljo različni kemijski dodatki za povečanje zmoglosti črpanja, a je vseeno potrebno previdno načrtovati sestavo mešanic.

V tej nalogi smo raziskovali možnost rabe stranskih produktov izgorevanja premoga iz TE Trbovlje za izdelavo zalivnih mas za geosonde in kanalske rove.

## 2 GEOTERMALNA ENERGIJA

Geotermalna energija pomeni v obliki toplote shranjeno energijo pod trdnim zemeljskim površjem [1]. Obstaja več vrst izkoriščanja geotermalne energije. Energijo lahko pridobivamo z ohlajanjem načrpane podzemne vode (sistem voda-voda), tam, kjer vode ni, pa energijo lahko pridobivamo z ohlajevanjem geološke okolice. Tak način imenujemo zemlja-voda ali ohlajanje vročih kamenin oz. način geosonda. V obeh primerih gre za enak princip, kjer se prenosnemu mediju odvzeta toplota izkorišča za ogrevanje/hlajenje, ohlajen medij pa se vrne nazaj v tla, kjer se ponovno segreje do prvotne temperature. Pri sistemu voda-voda gre za tako imenovani 'odprt' sistem, kar pomeni, da imamo direkten stik s podtalnico, zato moramo upoštevati stroge zahteve glede varovanja okolja. Pri sistemu zemlja-voda pa tega stika ni, saj hladilo potuje po ceveh in se ne izmenjuje z okolico, zato tak način imenujemo 'zaprt' sistem, pri katerem nevarnosti za onesnaženje ni, razen če pride do fizične poškodbe cevi. Meritve kažejo, da atmosferski vplivi ne segajo globlje od 20 m in da temperatura narašča približno 3 °C na vsakih 100 m globine. V vrtino vstavimo dve plastični zanki v obliki črke U, prostor med njima in okolico pa zapolnimo s snovjo, ki mora dobro prevajati toploto, kar je osnova za učinkovito delovanje sistema. Po teh zankah teče po že omenjenem zaprtem krožnem sistemu hladilo, ki ohlaja okolico in s tem odvzema toploto, ter jo prenese do toplotne črpalke. Toplotna črpalka deluje podobno kot hladilnik, vendar v obratni smeri. Iz zraka, vode ali zemlje pridobiva toploto po principu kompresije in ekspanzije hladila (slika 1).

Geosonda je najprimernejša v kombinaciji s talnim ali stenskim gretjem, kjer gre za nizkotemperaturno ogrevanje, kar pomeni, da toplotni črpalčki ni potrebno ustvarjati prevelikih temperaturnih razlik, kar je ugodno s stališča toplotnih izgub [2, 3].



Slika 1: Princip delovanja toplotne črpalke (vir: <http://www.enertus.si/kako-deluje.html>)

### **3 MATERIALI, UPORABLJENI V NALOGI**

#### **3.1 Produkti izgorevanja premoga**

Pri izgorevanju premoga nastajajo različni stranski produkti:

- Elektrofiltrski pepeli (EF pepeli, ang. fly ash),
- Žlindre (ang. boiler slag) in pepeli na kurišču (ang. bottom ash) ter
- Sadre (ang. FGD gypsum – flue gas desulphurisation gypsum).

##### **3.1.1 EF pepel**

EF pepeli so drobni delci, ki skupaj z dimnimi plini zapustijo kurišče in se pred izpustom v dimnik ujamejo v sistemu elektro filtrov.

Po sestavi razlikujemo 2 glavni skupini pepelov:

- silicijski EF pepeli, ki nastanejo pri kurjenju visoko energijskih premogov in imajo pucolanske lastnosti, zato za vezavo potrebujejo aktivator (npr. apno) in
- kalcitni (sulfo kalcitni) EF pepeli, ki nastanejo pri kurjenju lignita in rjavega premoga ter imajo poleg pucolanskih tudi hidravlične lastnosti, zato za vezavo ne potrebujejo aktivatorja, ob njegovi prisotnosti pa se proces vezanja izboljša.

EF pepel je predvsem v Združenih državah Amerike pogost aditiv k betonskim mešanici. Po podatkih ACAA (American Coal Ash Association) več kot polovica današnjih betonskih mešanic v ZDA vsebuje različne količine EF pepela kot nadomestek cementa, kar je ugodno tudi z vidika trajnostnega razvoja. Z vsako uporabljenim tonom EF pepela se zaradi manjše porabe cementa za približno eno tono zmanjša tudi izpust CO<sub>2</sub> v okolje [4, 5, 6].

##### **3.1.2 Žindra**

Nezgoreli delci, ki niso zapustili kurišča, padejo v vodo in se v njej zatalijo, pri čemer nastanejo žlindre (ang. boiler slag). Nekatera kurišča delujejo na principu suhega postopka, pri čemer nastanejo pepeli na kurišču (ang. bottom ash).

Žlindre so bolj debelozrnate kot pepeli in nimajo hidravličnih in pucolanskih lastnosti. V naših preiskavah je bila uporabljena žindra iz iste termoelektrarne kot EF pepel, vsa pa je bila presejana v laboratoriju skozi sito z odprtino 1mm.

### **3.2 Cement**

Cement, uporabljen pri raziskavah za diplomsko nalogo je bil mešani portlandski cement z 20-80 % klinkerja, vseboval je apnenec in silikatni EF pepel, imel je normalno hitrost vezanja ter predpisano minimalno tlačno trdnost po 28 dneh 42,5MPa (CEM II/B-M(LL-V) 42.5N) [7].

### **3.3 Bentonit**

Bentonit je glina, katere glavna sestavina je mineral montmorillonit, ki bentonitu daje njegove specifične lastnosti. V stiku z vodo bentonit nabreka, njegova prisotnost v majhnih količinah svežim mešaniciam izboljša volumensko stabilnost. Zaradi lastnosti kot so hidratacija, nabrekanje, dobro vpijanje vode in viskoznost, se bentonit uporablja na številnih področjih: v naftni industriji, gradbeništvu, farmaciji, agronomiji, njegovo uporabo pa zasledimo tudi pri proizvodnji detergentov in barv [8].

### **3.4 Voda**

Uporabljena je bila vodovodna voda, zaradi merjenja temperature pri preizkusih pa smo jo pustili, da je dosegla sobno temperaturo, preden smo jo uporabili za izdelavo mešanic.



#### 4 PRIPRAVA VZORCEV

Da bi ugotovili najboljšo in najbolj ekonomično kombinacijo sestavin, smo pripravili več mešanic z različnimi razmerji vhodnih sestavin. Preizkušance različnih mešanic smo vgrajevali v dveh paralelkah, z izjemo referenčne zalivne mase, ki smo jo pripravili v treh. Vzorce smo negovali predvideno število dni (7, 14, 28) (slika 2).

Pripravili smo sveže mešanice pri različnem razmerju voda:suho (v/c) in jih vgradili v standardne valjaste kalupe za preiskave tlačne trdnosti po vezanju:

- referenčna zalivna masa (v/c=0,6 in 0,75),
- EF pepel (v/c=0,6),
- EF pepel + 2 % bentonita, dodanega na suho težo pepela (v/c=0,7),
- EF pepel + 5 % cementa, dodanega na suho težo pepela (v/c=0,65),
- EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa, oboje dodano na suho težo pepela (v/c=0,7) in
- EF pepel + žindra v medsebojnem razmerju 1:1 (v/c=0,7).

Vsak vzorec smo stehali takoj po vgradnji ter po koncu staranja, da bi ugotovili morebitno izgubo mase, do katere po pričakovanjih ni prišlo, saj so bili vzorci neprodušno zaprti.

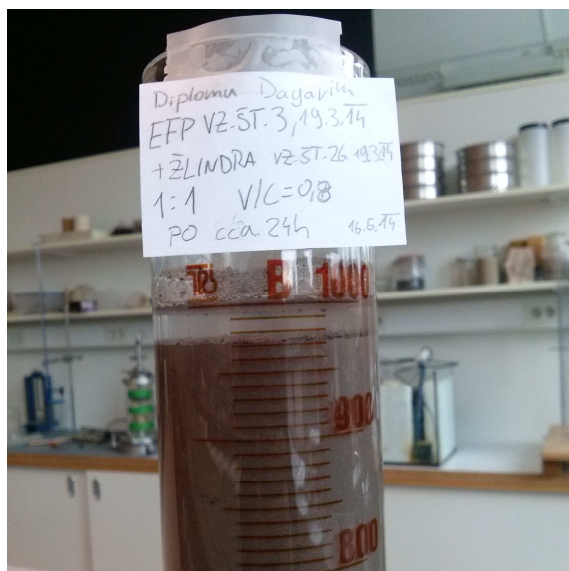


Slika 2: Vlti vzorci, v fazi staranja

## 5 IZVEDENE PREISKAVE

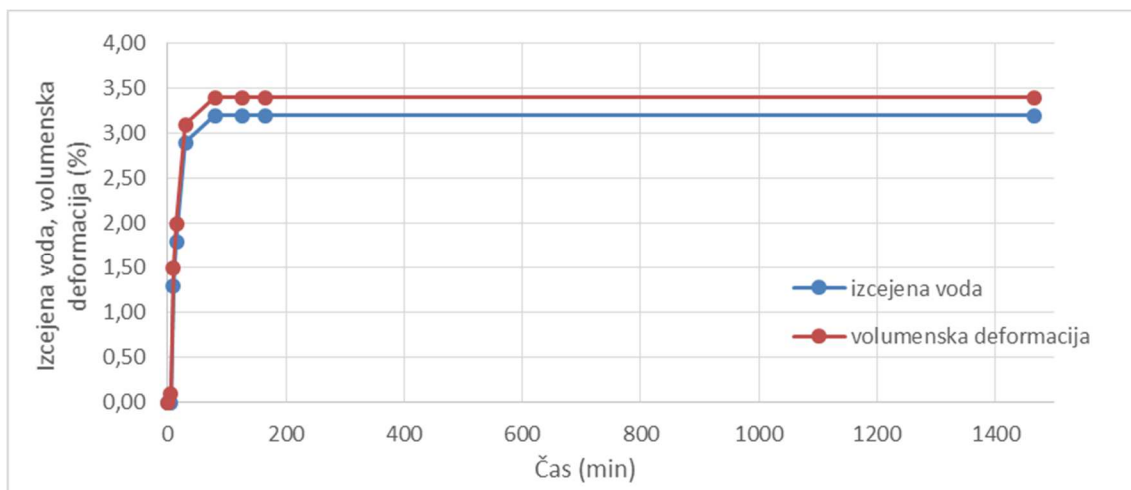
### 5.1 Volumenska obstojnost

Namen tega preskusa je ugotoviti koliko časa sveža mešanica ohranja svoj volumen, koliko vode se izloči iz nje in kako je to odvisno od v/c razmerja. Za izvedbo preskusa smo uporabili valj z oznakami do 1000 ml in štoparico za merjenje časa. V večji posodi smo zmešali sestavine skupaj z vodo in mešali do take mere, da ni bilo več prisotnih grudic. Stehtali smo prazen valj, vanj nalili 1000 ml sveže mešanice, valj skupaj z mešanico ponovno stehtali in pričeli meriti čas. Na začetku smo naredili ničelni odčitek, to je odčitek v času 0, takoj ko napolnimo valj in pričnemo meriti čas. Ker se začne iz sveže mešanice s časom izločati voda, smo beležili obe višini; gladino vode in gladino usedline (slika 3). Odčitke smo beležili v vnaprej določenih časovnih intervalih na obrazec. Valj s svežo mešanico je bilo potrebno pokriti, da smo preprečili izhlapevanje vode.



Slika 3: Merjenje volumenske obstojnosti

Rezultat preskusa sta volumen izločene vode in sprememba volumna po 24 urah, oboje izraženo v % (graf 1).



Grafikon 1: Primer prikaza rezultata merjenja volumenske obstojnosti

Odstotek izcejene vode se izračuna kot:

$$\frac{V_v - V_u}{V_0} * 100 [\%] \quad (1)$$

kjer je

$V_v$ .....volumen vzorca ob določenem času, merjeno na gladini vode

$V_u$ .....volumen vzorca ob določenem času, merjeno na gladini usedline

$V_0$ .....volumen vzorca na začetku preskusa.

Volumensko deformacijo pa izračunamo kot:

$$\frac{V_u - V_0}{V_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

kjer je

$V_u$ .....volumen vzorca ob določenem času, merjeno na gladini usedline

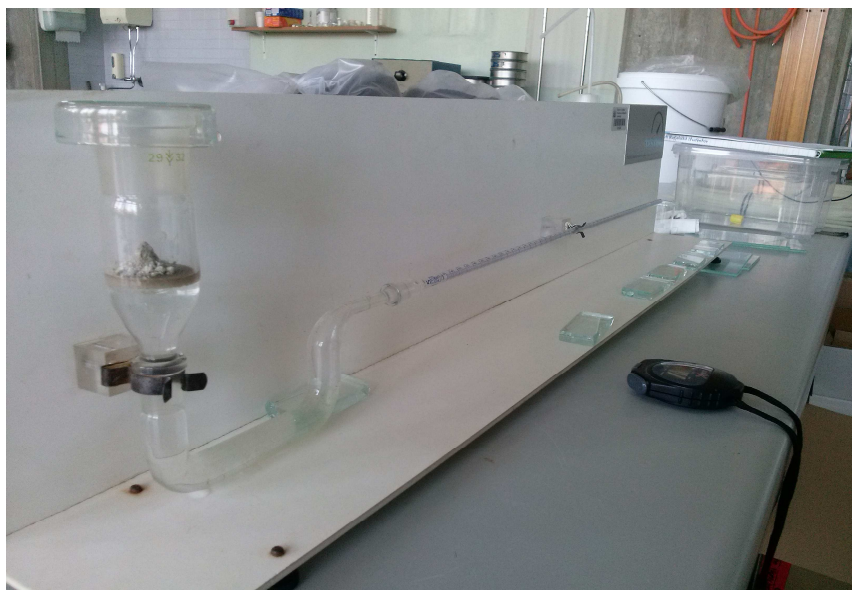
$V_0$ .....volumen vzorca na začetku preskusa.

Kot rezultat volumenske deformacije dobimo negativno vrednost (krčenje), pozitivna vrednost pa pomeni nabrekanje vzorca. Za bolj pregledno prikazovanje grafov bomo volumenski skrček prikazali kot pozitivno, nabrekanje pa kot negativno vrednost.

## 5.2 Vodovpojnost po Enslinu

Z Enslinovim testom ugotavljamo sposobnost adsorpcije vode za različne praškaste materiale. Materiali, ki imajo vodovpojnost po Enslinu večjo, potrebujejo za tvorbo mešanice večjo količino vode. Bentonit ima veliko adsorpcijo, prav tako pa vodo vpija dalj časa.

Za izvedbo preskusa potrebujemo Enslinov aparat (slika 4), ki je sestavljen iz steklene kapilare, na kateri so zarisane črte za odčitavanje prostornine adsorbirane vode, steklenega kolena v obliki sifona ter steklene čaše s porozno ploščico. Potrebujemo tudi stojalo za to pripravo, majhen steklen lijak, štoparico za merjenje časa, libelo ter tehtnico z natančnostjo 0,001 g.

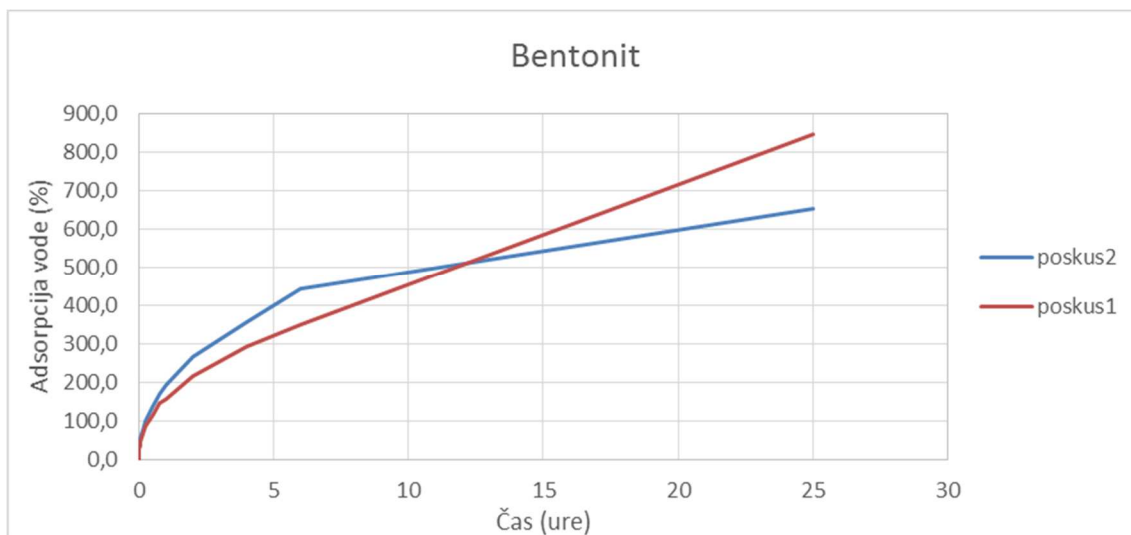


Slika 4: Enslinov aparat

Preskus pričnemo s pripravo Enslinovega aparata. Najprej aparat očistimo, splaknemo, sestavimo ter ga napolnimo z vodo tako, da pod porozno ploščico ni nobenega zračnega mehurčka, saj zračni mehurček zmanjša površino stika vode s porozno ploščico in posledično otežuje vpijanje vode. Vpnemo ga v stojalo, tako, da je merilna kapilara nameščena vodoravno, pri čemer si pomagamo z libelo. S papirnatim robčkom popivnemo vodo preko porozne ploščice, ter tako zmanjšamo volumen vode v aparatu, zaradi česar se vodni menisk v kapilari premakne. Popivnemo toliko vode, da se menisk ustavi na prvi črtici, ki označuje volumen vode, ter zabeležimo ničelni odčitek. Pripravimo 1 gram materiala, posušenega pri  $105 \pm 5$  °C ter ga skozi steklen lijak vsujemo na porozno ploščico. Pazimo, da ima nasut material obliko stožca. Ker je vpijanje vode močno odvisno od oblike stožca, saj ta s svojo spodnjo ploskvijo določa površino vpijanja, izvedemo dva poskusa, da je točnost rezultatov večja. V trenutku, ko material vsujemo v aparat, pričnemo meriti čas. Odčitke delamo na s standardom predpisane časovne intervale. Preskus se konča po 24 urah, oziroma ko material preneha vpijati vodo. Kadar preskušamo material, ki

ima hidravlične lastnosti, moramo preskus končati prej, da material ne začne vezati, saj bi s tem zamašili porozno ploščico.

Rezultat preskusa je graf adsorpcije vode v odvisnosti od časa (graf 2).



Grafikon 2: Primer prikaza Enslinovega testa

Adsorpcija vode je izražena kot masa adsorbirane vode na začetno maso vzorca, pomnoženo s 100 (%) za določen časovni interval. Masa adsorbirane vode je zmnožek njene gostote in volumna.

$$w_A = \frac{\rho \cdot V}{m_0} * 100 \text{ [ \% ]} \quad (3)$$

kjer je

$\rho$ ..... gostota vode v g/ml

$V$ ..... volumen vode ob določenem času v ml

$m_0$ ..... začetna masa vzorca v g.

### 5.3 Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti

Atterbergove meje so:

- meja kohezije (vlažnost, pri kateri se delci zemljine še komaj držijo skupaj)
- meja lepljenja (vlažnost, pri kateri se zemljina še oprime kovinske površine)
- meja krčenja (vlažnost, pri kateri se zemljina neha krčiti ob nadaljnjem sušenju)
- meja plastičnosti  $w_p$  (vlažnost, pri kateri material preide iz plastičnega v krhko stanje)
- meja židkosti  $w_L$  (vlažnost, pri kateri material preide iz plastičnega v židko stanje).

V preskusih smo se osredotočili na mejo židkosti uporabljenega bentonita. Rezultat take preiskave se uporablja za klasifikacijo drobnozrnatih zemljin in za določanje konsistenčnega stanja zemljine, oziroma v našem primeru, bentonita [9]. Uporabili smo standardni konusni penetrometer, napravo, ki omogoča merjenje pogreza standardnega konusa (slika 5).

Vzorec pripravimo tako, da mu postopoma dodajamo vodo do meje, ko ugrez zadostuje pogoju globine prvega ugreza. Z nožem ali z lopatko po plasteh napolnimo posodico (slika 6), ki je sestavni del konusnega penetrometra, in pri tem pazimo, da je vzorec popolnoma brez zračnih mehurjev. Ko je posodica polna, z nožem zgladimo površino. Postavimo jo pod vpet konus in ga ročno približamo vzorcu. Približamo ga previdno, tako blizu, da s premikanjem posode v vodoravni smeri konica konusa povzroča rahle sledi na vzorcu. S pritiskom na gumb sprostimo zatič, tako, da se konus neovirano pogrezne v vzorec ter odčitamo pogrez. Vzorec nato damo v posodico z znano maso, ponovno stehtamo ter ga posušimo, da mu določimo vlago. Postopek ponavljamo, dokler ni odstopanje med dvema zaporednima odčitkoma znotraj predpisanih meja. Po preskusu konus previdno očistimo, da ga ne opraskamo. Vzorcju, ki je namenjen za naslednji preskus, po občutku dodamo vodo in ga premešamo. Ponovno napolnimo posodo, izmerimo ugrez in vzorcju prav tako določimo vlago. Merilno območje posameznega konusa je določeno s standardom. Uporabili smo konus 60/60, kjer prva številka označuje njegovo težo v gramih, druga številka pa kot stožca v stopinjah. Merilno območje pogreza uporabljenega konusa znaša od 7 do 15 mm. Stremimo k temu, da bi odčitek prvega pogreza znašal 7 mm, odčitek zadnjega pa 15 mm. Če je ugrez manjši od 7 mm uporabimo težji konus, če pa je pogrez globlji od 15 mm, pa lažjega.

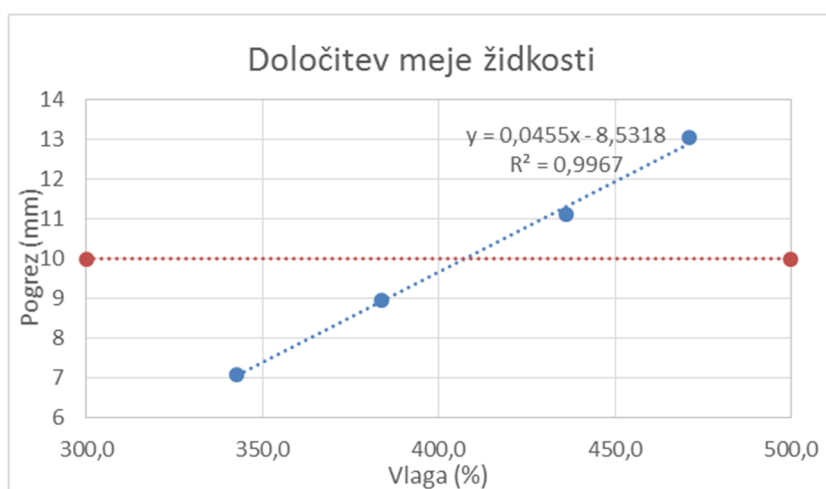


Slika 5: Konusni penetrometer



Slika 6: Posodica z vzorcem za izvajanje preskusa (levo) in posodica za določanje vlage (desno)

Rezultat preskusa je meja židkosti, ki je določena kot vlaga pri pogrezu 10 mm. Odčitamo jo iz grafa na katerem je na x osi nanešena vlaga v %, na y osi pa pogrez v mm (graf 3).



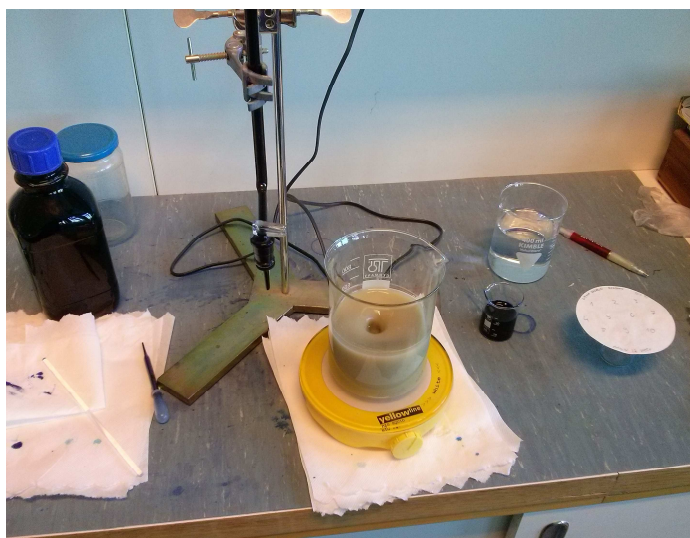
Grafikon 3: Primer prikaza grafa za določitev meje židkosti

#### 5.4 Adsorpcija za organsko barvilo Metilen modro

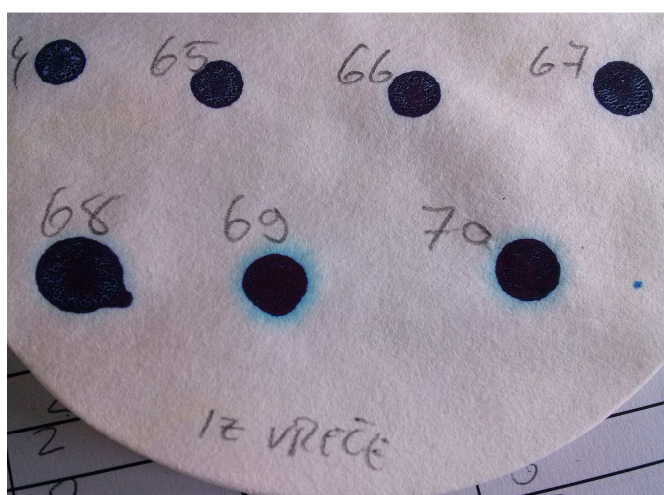
S postopkom metilen modro ugotavljamo izmenjalno kapaciteto delcev glinenega značaja, torej koliko barvila se je 'vpilo' na površino delcev [10].

Najprej vzorec posušimo v peči pri  $105 \pm 5$  °C in ga po potrebi presejemo čez sito 2 mm, da dobimo zahtevano frakcijo 0–2 mm. V čaši pripravimo suspenzijo 30 g materiala v 500 ml vode in dobro premešamo. Pripravimo tudi raztopino metilen modrega in z njim napolnimo bireto za lažje doziranje

raztopine. Za poskus potrebujemo tudi filter papir na katerega kapnemo suspenzijo po tem, ko ji dodamo metilen modro. Čašo s suspenzijo postavimo na magnetno mešalo, ki omogoča samodejno mešanje na podlagi rotirajočega magnetnega polja (slika 7). Po 5-minutnem mešanju v čašo z mešanico materiala in vode dodamo 5 ml raztopine metilen modro in mešamo 1 minuto. S pipeto vzamemo vzorec in ga kapnemo na filter papir ter opazujemo barvo. Dokler je kapljica temno modre barve pomeni, da material še ni zasičen z barvilom in je še sposoben vpijati metilen modro. Postopek ponavljamo do pojave 'haloja', ki zglada kot svetlo moder sij okoli kapljice (slika 8). Mesta, kamor kapnemo vzorec prej oštevilčimo, da polnih listkov med seboj ne pomešamo, saj bi nam to oteževalo kasnejše štetje količine dodanega metilen modrega.



Slika 7: Čaša z magnetnim mešalom



Slika 8: Pojav haloja (pri točki 69)



Vrednost metilen modro, MB, je izražena v gramih skupno dodane raztopine barvila in vode na kilogram materiala. Koncentracija raztopine je 10 g/l.

$$MB = \frac{V_{MB}}{m_p} * 10 \quad (4)$$

kjer je

$V_{MB}$ ..... volumen dodane raztopine metilen modro

$m_p$ ..... masa preskušane materiala.

### 5.5 Merjenje viskoznosti z reometrom

Viskoznost je lastnost tekočine, ki podaja odpor na strižno deformacijo in je odvisna tudi od hitrosti striženja in temperature. Ta lastnost pomembno vpliva na sposobnost pretakanja in črpanja tekočin. Manj kot je tekočina viskozna, lažje jo pretakamo in črpamo. Pri zalivnih masah in ostalih svežih mešanicah, ki vsebujejo vezivo, se viskoznost s časom spreminja zaradi vezanja. Viskoznost merimo z reometrom (slika 9), ki meri strižno odpornost preizkušanca v kalupu. Reometer je sestavljen iz pogonskega dela z merilnim instrumentom ter valjastega kalupa, v katerega vstavimo sondo in preizkušaneec.



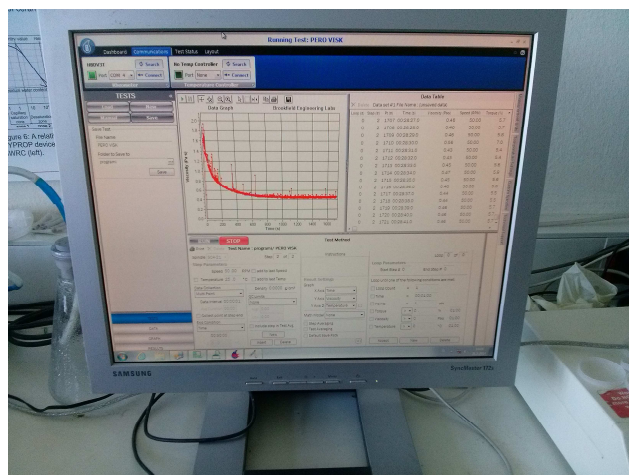
Slika 9: Reometer

Pripravili smo 20 g suspenzije in jo vlili v kalup. Kalup pritrdimo na drsno vodilo, ki omogoča vstavljanje sonde. Sondo nato pritrdimo v pogonski del, kalup dvignemo, tako, da mešanica popolnoma oblije sondo (slika 10) in ga privijemo z vijakom. Izberemo hitrost in čas vrtenja, program pa sam beleži

spreminjanje strižnega odpora s časom (slika 11). Samodejno zabeležene meritve smo uredili in rezultate podali v obliki graf. Na x os je nanesen čas v sekundah, na y os pa strižna sila v Pa (graf 4).



Slika 10: Kalup reometra s sondo in preizkušancem



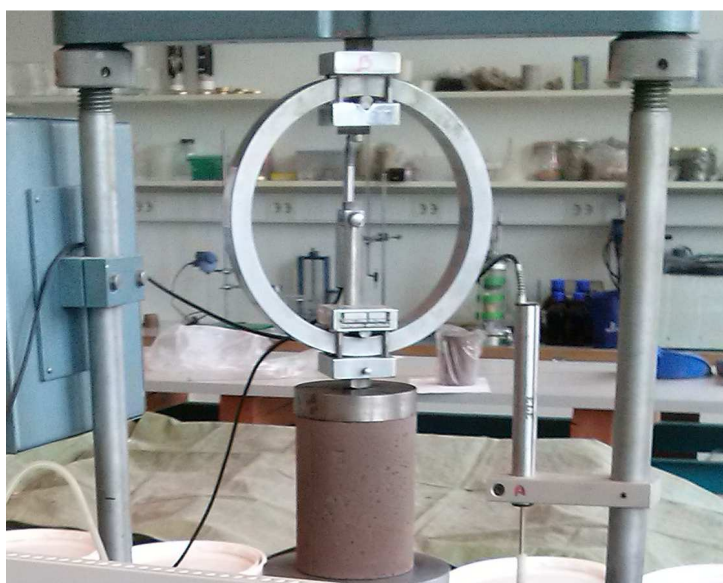
Slika 11: Beleženje odčitkov reometra



Grafikon 4: Prikaz rezultata merjenja viskoznosti

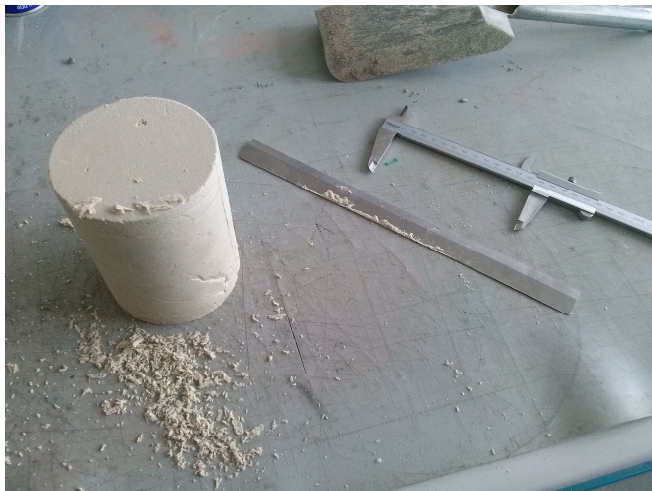
## 5.6 Enoosni tlačni preizkus

Enoosni tlačni preizkus je standardna preiskava določanja tlačne trdnosti strjenih vzorcev. Preizkus daje podatke o sili, ki je porušila vzorec, katero preračunamo na enoto površine ter tako dobimo tlačno trdnost, izraženo v MPa oziroma v kPa. Z izvedbo preskusa potrebujemo stiskalnico ter primeren kalibriran merilni instrumentarij. V našem primeru smo glede na pričakovane trdnosti izbrali merilni obroč (slika 12), ki meri pomik zaradi svoje deformacije v radialni smeri. Nameščen je med vzorec in stiskalnico, tako, da se zaradi odpora vzorca deformira. Ta obroč ima znano deformabilnost, ki skupaj s pomikom služi za izračun sile.



Slika 12: Merilni obroč med vzorcem in stiskalnico

Ko je vzorec dosegel predvideno starost, smo ga previdno razkalupili, da ga ne bi poškodovali in mu z rezilom izravnali zgornjo in spodnjo površino do te mere, da sta bili ploskvi ravni in med sabo vzporedni (slika 13). Izmerili smo mu srednji premer in srednjo višino, ki smo ju dobili z izračunom povprečja treh meritev na različnih mestih vzorca. Za merjenje višine smo uporabili kljunasto merilo (slika 14), za merjenje premera pa  $\pi$ -trak, s katerim izmerimo obseg, na skali pa odčitamo preračunane premere. Na koncu vzorec tudi stehtamo. Vse podatke zapišemo na vnaprej pripravljen obrazec za potrebe kasnejšega računa.



Slika 13: Izravnava ploskev z rezilom



Slika 14: Merjenje višine s kljunastim merilom

Ko je bil vzorec pripravljen za preskus, smo ga vstavili v stiskalnico med dve vzporedni plošči. Pomembno je, da to storimo v čim krajšem možnem času po ločevanju od kalupa, saj vzorec na zraku izgublja vlago, kar pa lahko vpliva na rezultate preizkusa. Izbrali smo hitrost stiskanja 1 mm/min in časovni interval beleženja odčitkov. Pomik plošče na zgornjem delu vzorca zaradi deformiranja obroča in pomik spodnje plošče zaradi delovanja naprave samodejno beležita dva ločena merilnika pomikov, program pa sprti riše graf pomika zaradi deformiranja obroča v odvisnosti od pomika spodnje plošče (slika 15). Preskus se konča, ko pomik deformiranja obroča spremeni predznak, kar pomeni, da se preizkušane začne rušiti (slika 16). Odčitke smo uredili, pomike zaradi deformacije obroča pa smo pomnožili s konstanto, ki opisuje deformabilnost obroča, saj je le-ta skoraj linearna in je napaka zaradi nekonstantne deformabilnosti zanemarljiva.



Slika 15: Merilna oprema za potrebe enoosnega tlačnega preskusa



Slika 16: Porušitev vzorca

Rezultat preskusa sta graf  $\sigma$ - $\epsilon$ , na katerem x os predstavlja deformacijo vzorca v %, y os pa napetost pri določeni deformaciji v MPa ali v kPa (graf 5), ter maksimalna napetost, ki je bila dosežena med preizkusom, in je hkrati tudi tlačna trdnost preizkušanca.

Napetost izračunamo kot silo normirano na ploskev:

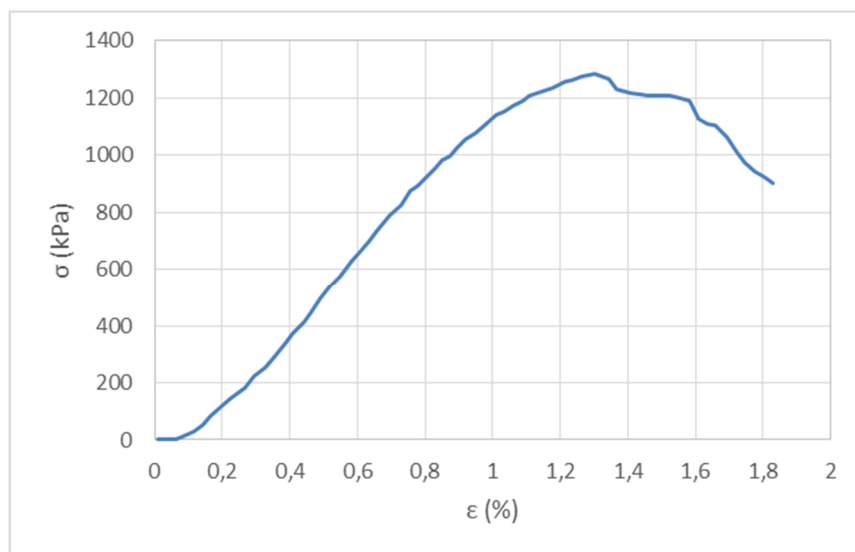
$$q_u = \frac{P}{A} \text{ [kPa, MPa]} \quad (5)$$

kjer je

$q_u$ ..... napetost pri poružitvi (tlačna trdnost)

P..... sila pri poružitvi

A..... ploščina osnovne ploskve preizkušanca.



Grafikon 5: Primer prikaza rezultata enoosnega tlačnega preskusa

## 6 REZULTATI PREISKAV IN RAZPRAVA

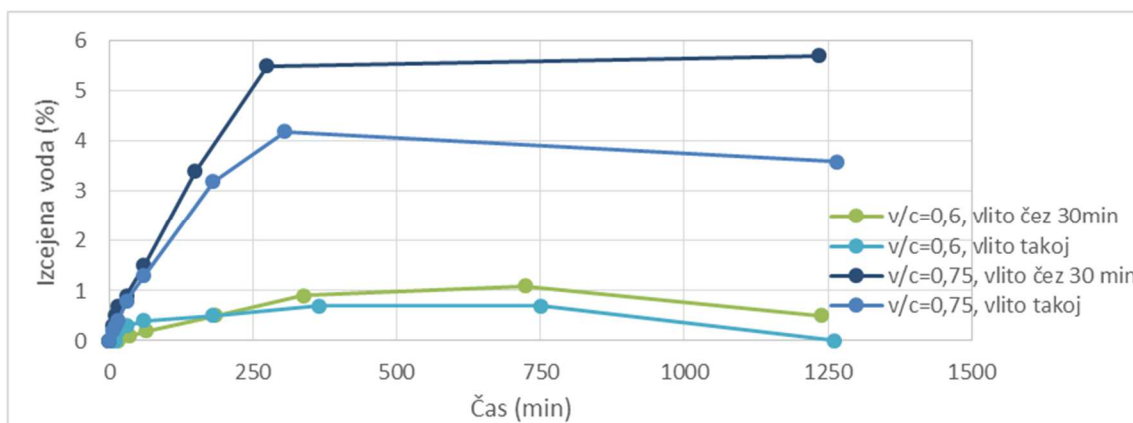
### 6.1 Volumenska obstojnost

#### 6.1.1 Referenčna zalivna masa

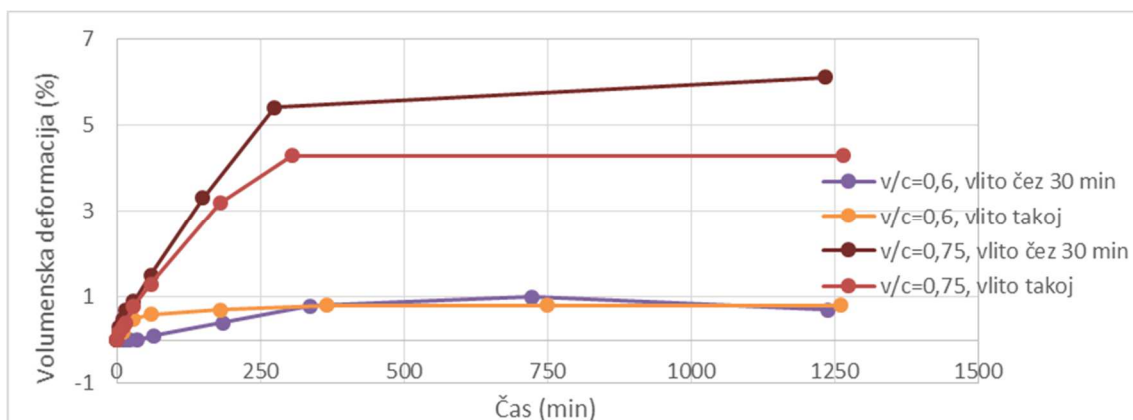
Pri  $v/c = 0,6$  in ob takojšnji vgradnji po koncu preskusa (21 ur) vode na vrhu ni bilo več, volumen pa se je zmanjšal za 0,7 %. Ob povečanju  $v/c$  razmerja na 0,75 se je izločilo 4,2 % vode, volumen pa je bil manjši za 4,3 %.

Poskus smo ponovili, vendar smo pred vlivanjem v valje počakali 30 minut. Pri  $v/c = 0,6$  se je po 21 urah izločilo 0,5 % vode, vzorec pa se je sesedel za 0,7 %. Vzorec z  $v/c$  razmerjem 0,75 je izločil kar 5,7 % vode, volumen pa se je zmanjšal za 6,1 %.

Oba vzorca s povečanim  $v/c$  razmerjem sta vsebovala nekaj anomalij. Vzorec vlit takoj je vseboval po 30 minutah nekaj leč vode, tisti, katerega smo pustili odležati pol ure pa leč ni vseboval, imel pa je precej zračnih mehurčkov na gladini, ki so se pojavili že po 10 minutah. Časovna poteka izcejanja vode in deformiranja volumna sta prikazana na grafih 6 in 7.



Grafikon 6: Izcejanje vode referenčne zalivne mase



Grafikon 7: Volumenska deformacija referenčne zalivne mase

### 6.1.2 EF pepel

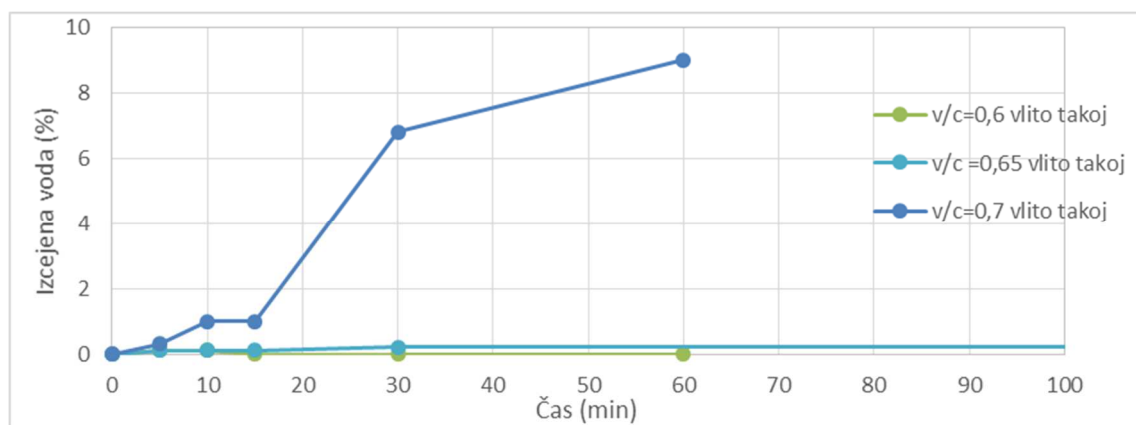
Pripravili smo mešanice EF pepela in vode pri  $v/c$  razmerjih 0,6, 0,65 in 0,7.

Pri mešanici za  $v/c = 0,6$  že po 15 minutah vode na vrhu ni več bilo, vzorec pa je po pol ure začel nabrekati, zato smo po 60 minutah preiskavo ustavili.

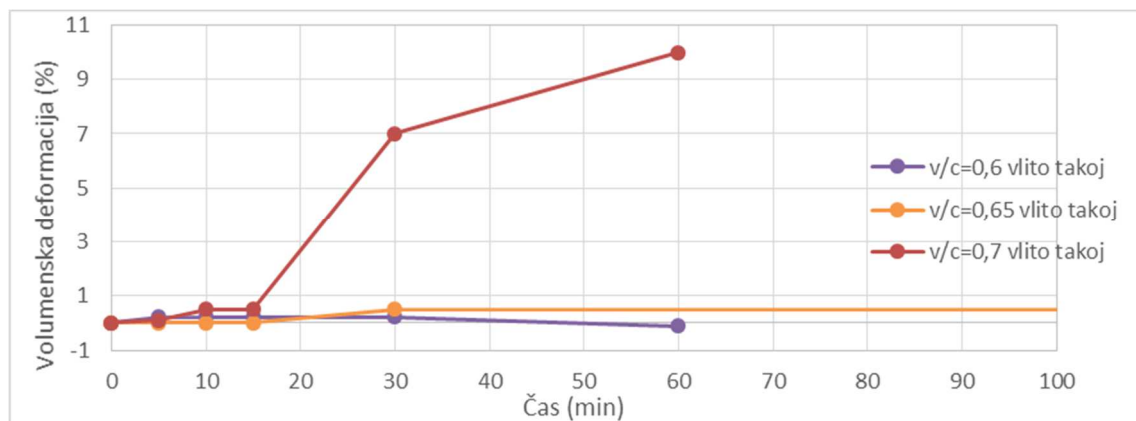
Vzorec z  $v/c = 0,65$  je izločil 0,2 % vode, a je po 9 urah na površju ni bilo več. Vzorec se je po 22 urah sesedel za 0,3 %, kljub vmesnemu nabrekanju in ponovnemu sesedanju.

Zadnji vzorec je pri  $v/c = 0,7$  v eni uri izločil precej več vode (9 %), volumen pa se je prav tako bolj zmanjšal (10 %) (grafa 8 in 9).

Ugotovili smo, da imata vzorca z nižjimi  $v/c$  razmerji podobne rezultate, pri zadnjem, najredkejšem vzorcu pa so bil vrednosti mnogo višje. Na spremembo volumna in izločanje vode sveže mešanice EF pepela in vode torej  $v/c$  razmerje močno vpliva. Ta vpliv ni linearen, saj ob podobnem povečanju dodatka vode ( $v/c$  iz 0,65 na 0,7), količine izločene vode močno narasejo (nekaj 10x).



Grafikon 8: Izcejanje vode EF pepela



Grafikon 9: Volumenska deformacija EF pepela

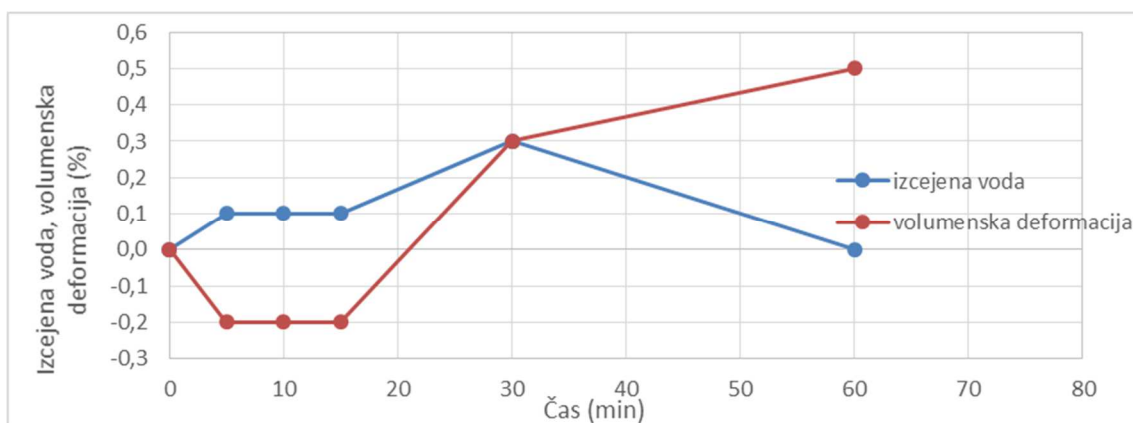


### 6.1.3 EF pepel z 2 % bentonita

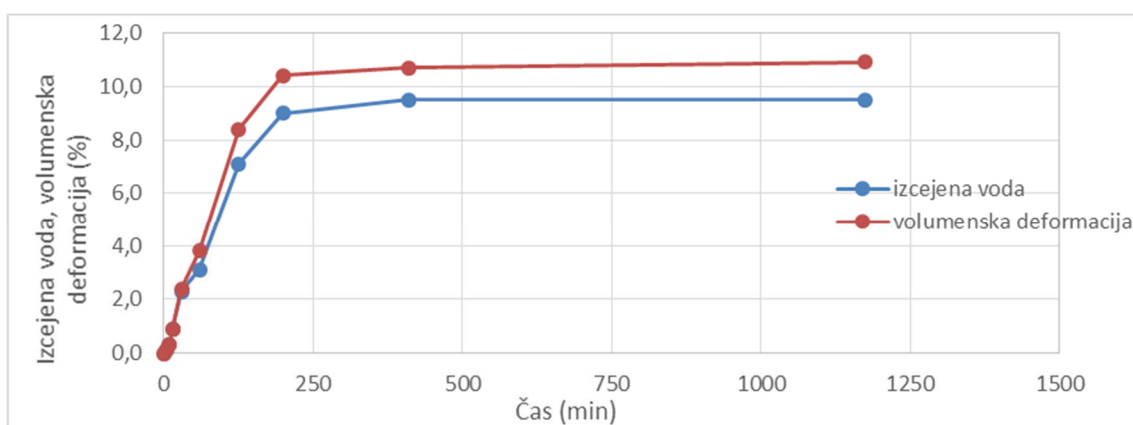
Preskus smo izvedli pri dveh v/c razmerjih: 0,7 in 0,9. Vzorec z v/c = 0,7 je že takoj po začetku preskusa začel nabrekati, na koncu, po eni uri, pa se je skrčil za 0,5 %. Vode se je izcedilo 0,3 % po pol ure, na koncu pa je na površju ni bilo.

Ob povečanju v/c razmerja na 0,9 se je izločilo 9,5 % vode, volumen pa se je zmanjšal za 10,9 %, kar prikazujeta grafa 10 in 11.

Ugotovili smo, da ob sorazmerno majhnem povečanju v/c razmerja, nabrekanja mešanice ni več zaznati, je pa volumsko dosti manj stabilna kot mešanica z manjšim v/c razmerjem.



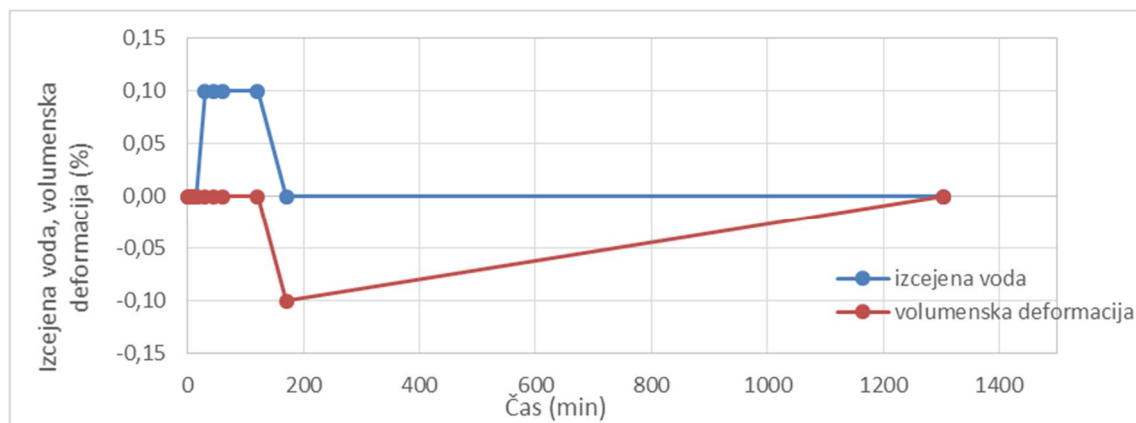
Grafikon 10: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita, v/c=0,7



Grafikon 11: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita, v/c=0,9

### 6.1.4 EF pepel s 5 % cementa

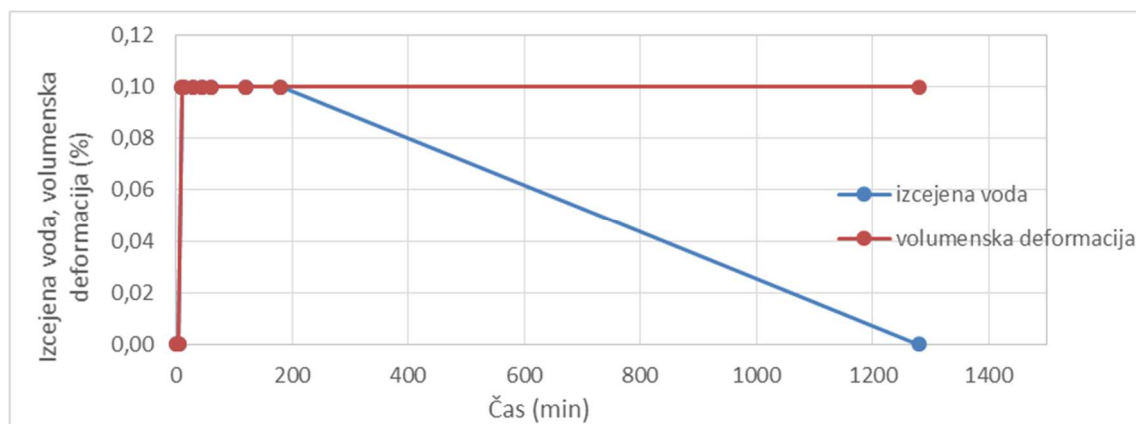
Mešanico s cementom smo pripravili pri  $v/c = 0,65$  in ugotovili, da je volumen po dveh urah začel nabrekati, po pretečenih 3 urah pa se je začel krčiti in je do konca preskusa, ki je trajal skoraj 23 ur, dosegel spet začetno vrednost. Vode se je izcedilo 0,1 %, ki je po 3 urah ni več bilo na površini.



Grafikon 12: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 5 % cementa

### 6.1.5 EF pepel z 2 % bentonita in 5 % cementa

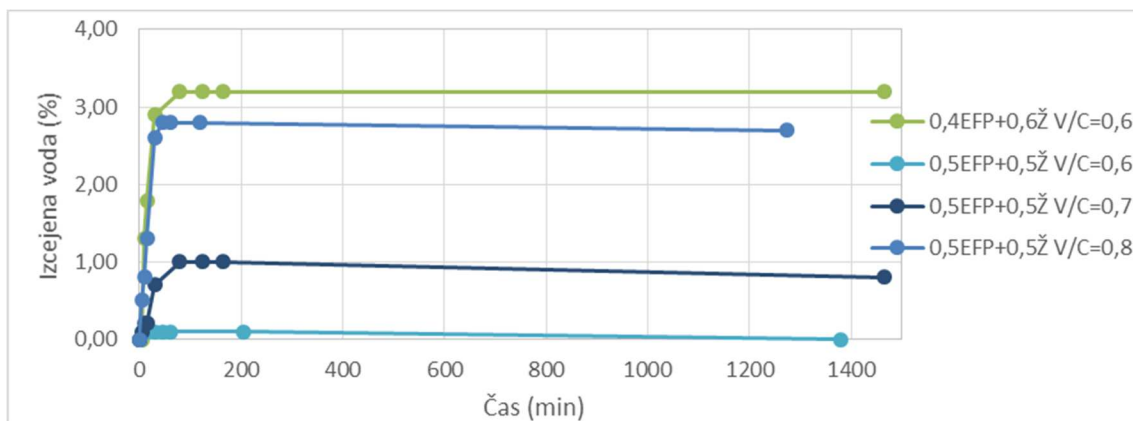
S kombinacijo vseh treh sestavin smo poskusili ustvariti teoretično najboljšo mešanico, v kateri naj bi pepel in cement vplivala na končno trdnost, bentonit pa na volumensko stabilnost sveže mešanice. Po 10 minutah se je izcedilo 0,1 % vode, vzorec pa jo je do konca preizkusa vpil. Prav tako se je volumen zmanjševal le prvih 10 minut in obstal pri vrednosti 0,1 % (graf 13).



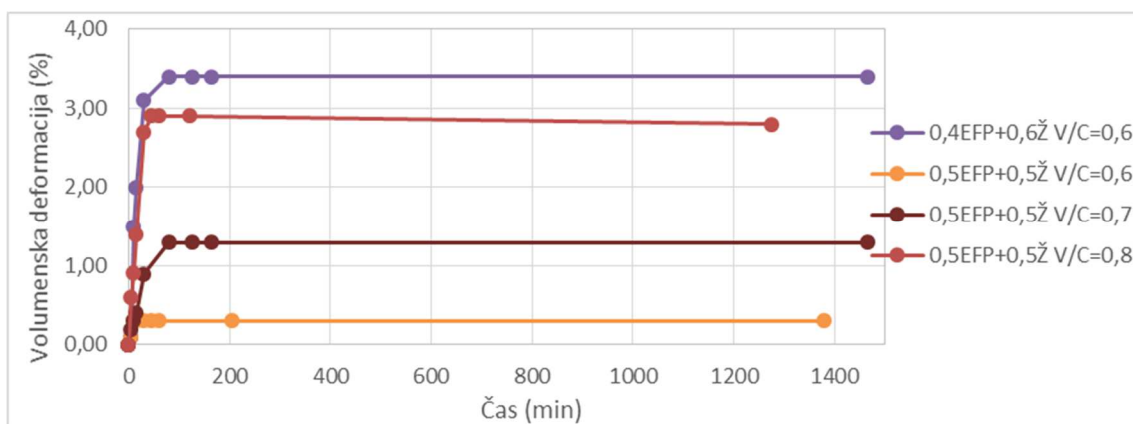
Grafikon 13: Volumenska obstojnost mešanice EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa

### 6.1.6 EF pepel in žindra

Pripravili smo mešanice EF pepela in žindre v utežnem razmerju 0,4:0,6 pri  $v/c = 0,6$  in v utežnem razmerju 0,5:0,5 pri  $v/c$  je 0,6, 0,7 in 0,8 (grafa 14 in 15).



Grafikon 14: Izcejanje vode mešanice EF pepel + žindra



Grafikon 15: Volumenska deformacija mešanice EF pepel + žindra

## 6.2 Vodovpojnost po Enslinu

Vodovpojnost smo preverjali na dveh materialih in sicer na prašku za referenčno zalivno maso in na bentonitu.

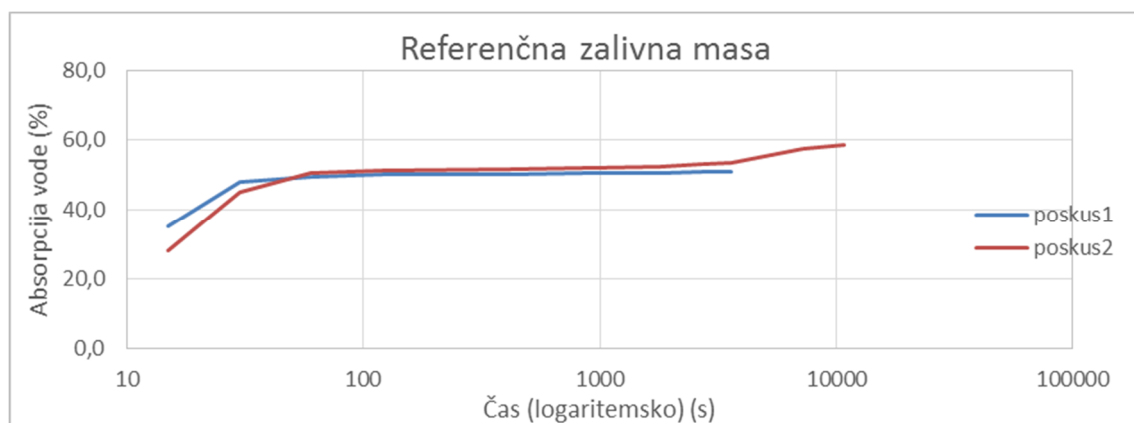
### 6.2.1 Referenčna zalivna masa

Vzorec praška referenčne zalivne mase smo posušili na  $105 \pm 5$  °C, a se je izkazalo, da se zaradi previsoke temperature zgodi kemična reakcija, ki se je pokazala kot močno pojavljanje mehurčkov v Enslinovem aparatu (slika 17). S tem se je povečal volumen mešanice vode in zraka, kar pa je povzročilo pomik vodnega meniska v kapilari v drugo smer. Zato smo sklenili, da ta poskus ni merodajen in smo pripravili nov vzorec, tokrat zračno suh. Po preizkusu dveh zračno suhih vzorcev se je izkazalo, da

prašek za referenčno zalivno maso vpije večino vode v prvi minuti, nato pa se intenzivnost vpijanja močno zmanjša. Poskus naj bi po standardu trajal 24 ur, a ker ima prašek sposobnost vezanja, smo prvi poskus zaključili po eni, drugega pa po treh urah, da ne bi uničili porozne ploščice, ki vzorcu omogoča vpijanje vode (graf 16).



Slika 17: Pojav mehurčkov v Enslinovem aparatu zaradi kemične reakcije v prašku referenčne zalivne mase



Grafikon 16: Rezultati preiskave vodovpojnosti referenčne zalivne mase

Rezultat raziskave vodovpojnosti referenčne zalivne mase je:

$w_A = 51\%$  v prvem in  $w_A = 59\%$  v drugem poskusu.

## 6.2.2 Bentonit

Rezultat raziskave vodovpojnosti bentonita je:

$w_A = 848 \%$  v prvem in  $w_A = 650 \%$  v drugem poskusu.

Časovni potek vpivanja vode je prikazan na grafu 2.

## 6.3 Adsorpcija za organsko barvilo metilen modro (MB)

### 6.3.1 Referenčna zalivna masa

Po postopku opisanem v poglavju 5.4 in po formuli (3) smo izračunali MB vrednost referenčne zalivne mase:

$MB = 1,7 \text{ g/1 kg}$  preizkušanca.

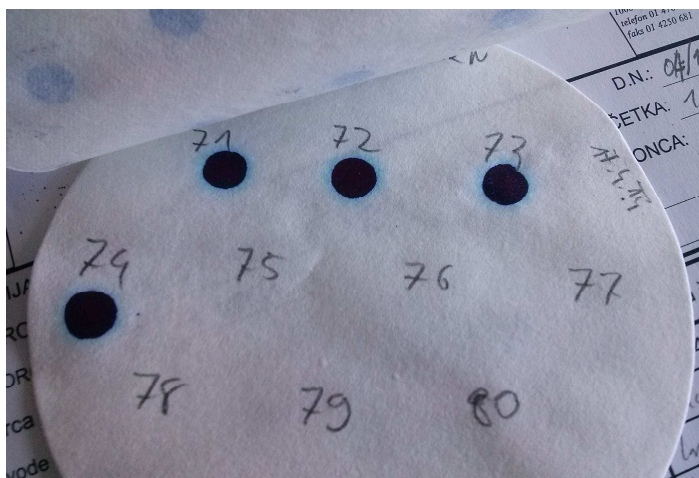
Opomba: 'halo' se je pojavil že po prvi kapljici, zato je to vrednost MB.

### 6.3.2 Bentonit

Bentonit je adsorbiral dosti več barvila kot referenčna zalivna masa, njegova vrednost izračunana po formuli (3) pa znaša:

$MB = 270 \text{ g/1 kg}$  preizkušanca.

Opomba: po 54 g dodane raztopine se je suspenzija bentonita in vode tako zgostila, da magnetno mešalo ni več delovalo, zato smo ga zamenjali z mešalnikom. Po 270 g dodane raztopine se je pojavil 'halo' in ni izgini v naslednjih 4 odvzemih, zato je to vrednost MB (slika 18).



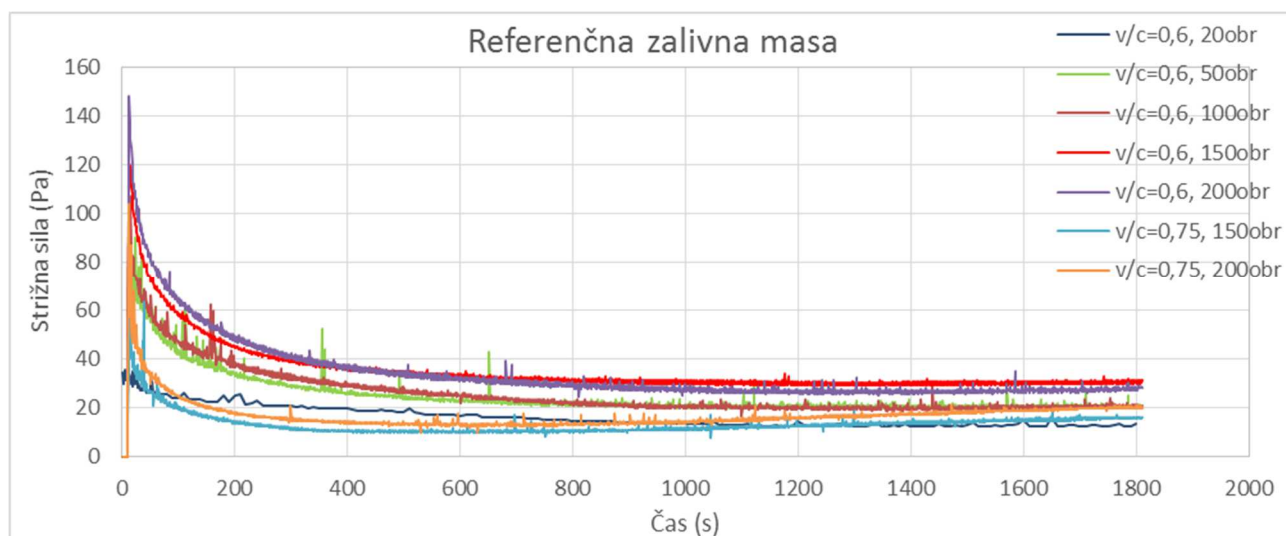
Slika 18: Obstanek haloja 4 minute brez dodajanja barvila pomeni vrednost MB

## 6.4 Merjenje viskoznosti z reometrom

Vse preizkuse smo opravili z enako sondo, vsak vzorec pa smo merili pri različnih hitrostih rotacije vretena.

### 6.4.1 Referenčna zalivna masa

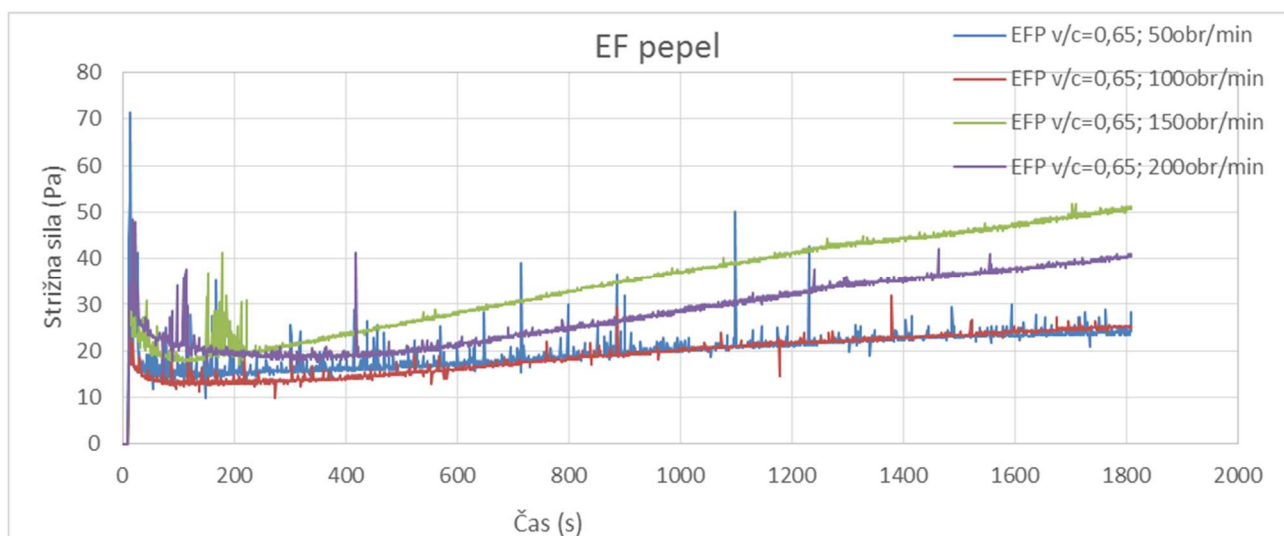
Odpor na strižno silo smo merili na vzorcih z  $v/c$  razmerjem 0,6 in 0,75. Vzorce z nižjim  $v/c$  razmerjem smo merili pri hitrostih 20, 50, 100, 150 in 200 obratov/minuto, tiste z višjim  $v/c$  razmerjem pa pri hitrostih 150 in 200 obratih/min, saj smo sklenili, da tako velik razpon obratov ni potreben. Izkazalo se je, da je razlika v vrednostih strižne sile le na začetku preizkusa, na koncu pa so vrednosti bolj skupaj ne glede na hitrost vrtenja sonde. Hitrost vrtenja pri referenčni zalivni masi torej vpliva večinoma le v začetnih nekaj minutah (graf 17). Maksimalno vrednost 148 Pa je dosegel vzorec z  $v/c$  razmerjem 0,6 pri 200 obratih/min.



Grafikon 17: Sprememba strižne sile s časom - referenčna zalivna masa

### 6.4.2 EF pepel

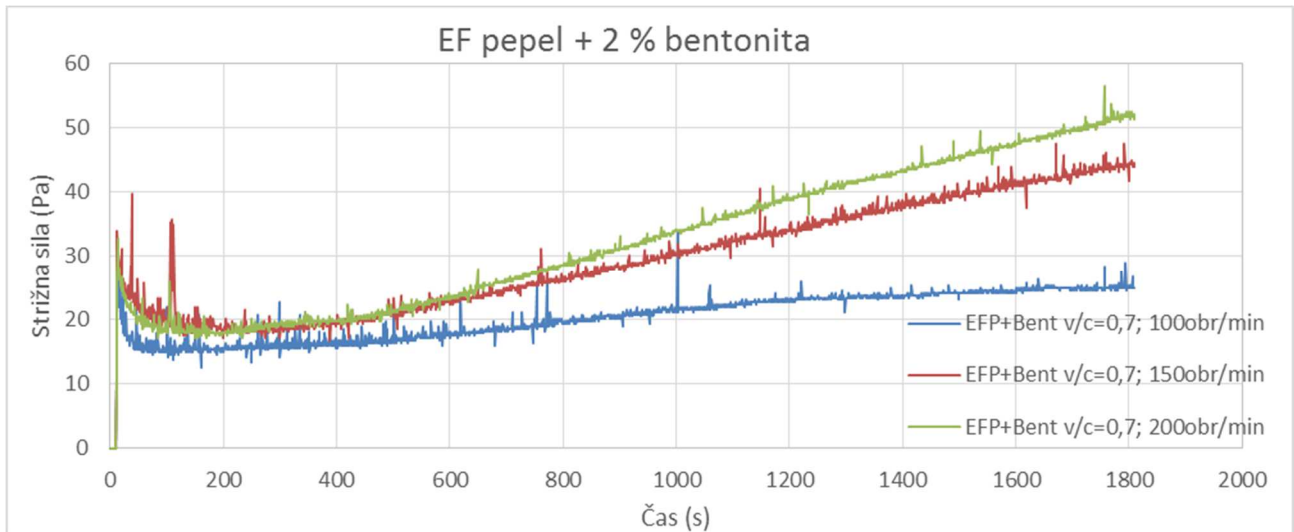
Vzorci smo pripravili pri v/c razmerju 0,65, hitrosti vretena pa so bile 50, 100, 150 in 200 obratov/min. Prav tako kot pri referenčni zalivni masi so bile vrednosti tudi pri vzorcu EF pepela večje v začetnih nekaj minutah preizkusa (graf 18). Graf preizkusa vzorcev EF pepela kaže pri nizkih hitrostih veliko anomalij, krivulje vsebujejo veliko skokov. Končne vrednosti strižne sile so bile večje pri vzorcih z višjimi hitrostmi.



Grafikon 18: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel

### 6.4.3 EF pepel + 2 % bentonita

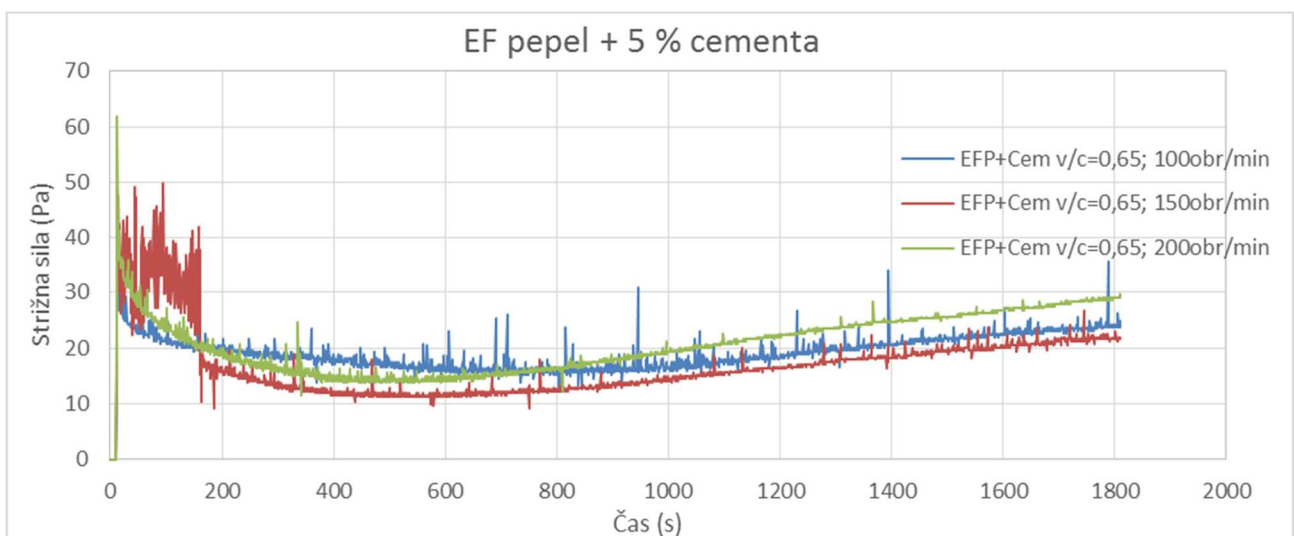
EF pepel v kombinaciji z bentonitom smo merili pri v/c razmerju 0,7 in pri hitrostih vretena 100, 150 ter 200 obratih/min. Razlike med vrednostmi zaradi različnih hitrosti vrtenja sonde naraščajo s časom. Najvišje vrednosti strižne sile so bile pri največjih hitrostih vretena, kjer so končne vrednosti tudi vidno presegle začetne. Višja kot je bila hitrost vretena, hitreje in do višjih vrednosti je naraščala strižna sila (graf 19). Skoki vrednosti v graf so bili manjši kot pri seriji narejeni samo iz EF pepela, prav tako so njihove skrajne vrednosti po velikosti manj odstopale od krivulje. Maksimalno vrednost 51 Pa je dosegel vzorec preizkušen na 200 obratih/min po 30 minutah, najnižjo pa vzorec pri 100 obratih/min po minuti in pol.



Grafikon 19: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 2 % bentonit

#### 6.4.4 EF pepel + 5 % cementa

Vzorci so bili preizkušeni pri v/c razmerju 0,65 in pri treh hitrostih vretena (100, 150, 200 obratov/min). Pri tem preizkusu je najvišjo končno vrednost strižne sile dosegel vzorec merjen pri najvišji hitrosti, vzorec merjen pri 150 obratih/min pa v začetnih nekaj minutah kaže velike skoke v graf, kar kaže na slabo premešan ali pa na slabo vgrajen vzorec (graf 20). Po treh minutah se nihanje prekine in graf poteka po bolj naravni smernici. Najnižjo vrednost strižne sile je dosegel vzorec, ki je bil preizkušan pri 150 obratih/min, a merodajnosti ni mogoče zatrditi zaradi začetnih anomalij v grafu. Vsi poskusi so se končali po 30 minutah, zato ni bilo pričakovati močno povišanega strižnega odpora testirane mase zaradi morebitne vezave cementa.

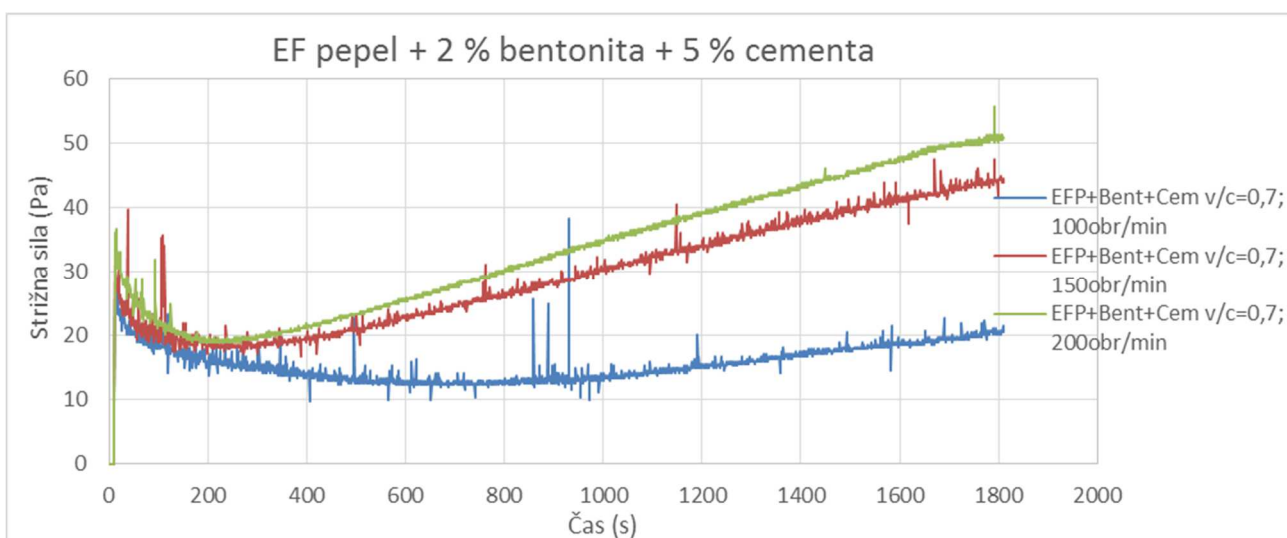


Grafikon 20: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 5 % cementa



#### 6.4.5 EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa

Vzorci so bili pripravljene pri v/c razmerju 0,7 in prav tako pri treh hitrostih (100, 150 in 200 obratov/min). Prvi vzorec smo preizkusili pri najnižji hitrosti, njegov strižni odpor je prvih 12 minut padal, nato pa je začel počasi naraščati. Vrednost strižne sile pri ostalih dveh vzorcih je za razliko od prvega začela hitro naraščati že po 5 minutah in je na koncu dosegla maksimalno silo 50 Pa pri vzorcu, ki smo ga preizkušali pri največji hitrosti. Minimalna sila je znašala 12 Pa pri vzorcu testiranim z najnižjimi obrati po 12 minutah (graf 21).



Grafikon 21: Sprememba strižne sile s časom – EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa

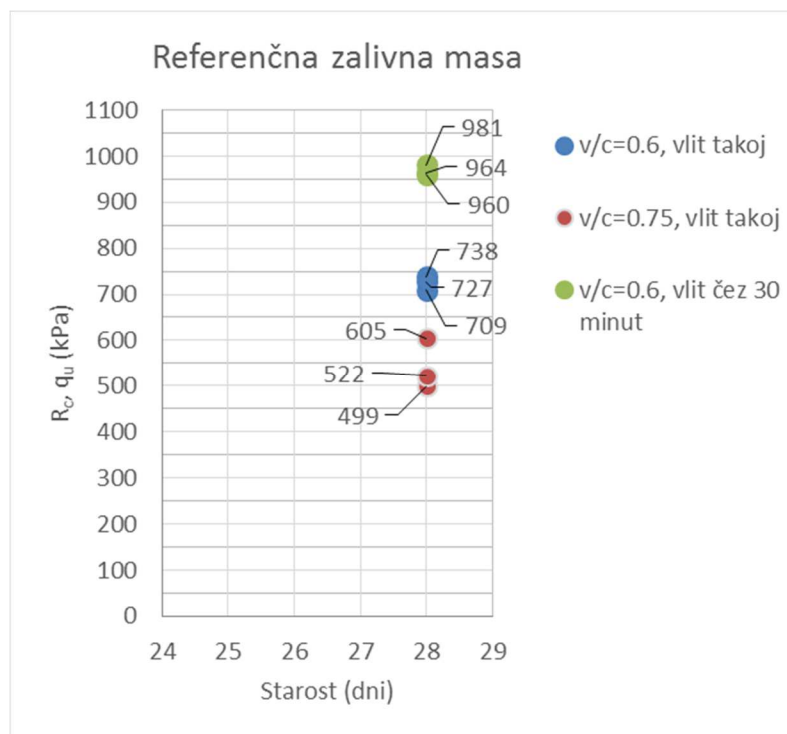
## 6.5 Enosni tlačni preskus

### 6.5.1 Referenčna zalivna masa

Enosni tlačni preskus referenčne zalivne mase smo opravili na treh serijah s tremi vzorci. Prvo serijo vzorcev smo pripravili pri v/c razmerju 0,6, kot ga predpisuje proizvajalec. Dosežene tlačne trdnosti so znašale 709 kPa, 727 kPa in 738 kPa.

Druga serija vzorcev je bila pripravljena pri višjem v/c razmerju (0,75) z namenom ugotovitve znižanja trdnosti vzorca zaradi večje količine vode. Tako visoko v/c razmerje je bilo preveliko, saj se je po 28 dneh negovanja ob odprtju kalupa voda še vedno nahajala na površini, zato smo jo odlili. Tlačne trdnosti vseh treh vzorcev so bile manjše in so znašale 499 kPa, 522 kPa in 605 kPa.

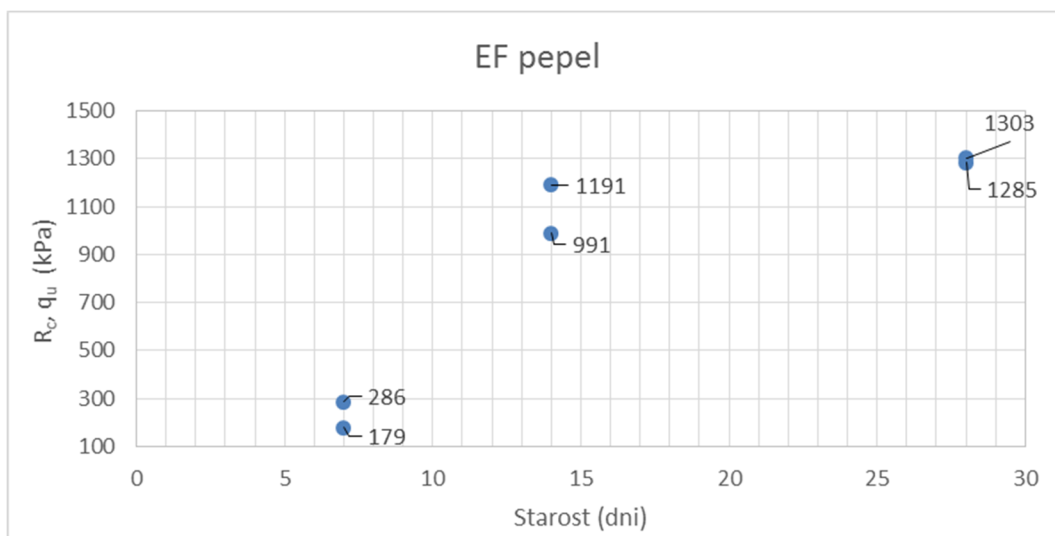
Zadnja serija vzorcev je izmed vseh treh serij dosegla najvišje vrednosti tlačnih trdnosti, pripravljena pa je bila pri predpisanem v/c razmerju 0,6, a smo pred vgradnjo počakali 30 minut, maso še enkrat premešali ter jo vlili. Vrednosti tlačnih trdnosti so znašale 960 kPa, 964 kPa in 981 kPa (graf 22).



Grafikon 22: Rezultat ETT - referenčna zalivna masa

### 6.5.2 EF pepel

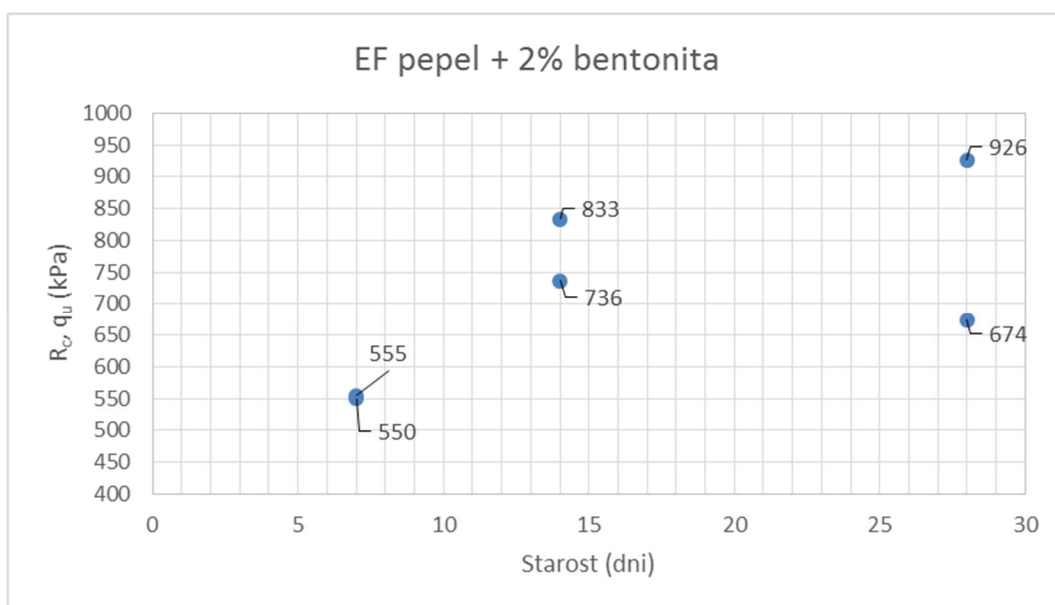
Vzorci zalivne mase EF pepela smo pripravili pri  $v/c = 0,65$  (graf 23).



Grafikon 23: Rezultat ETT – EF pepel

### 6.5.3 EF pepel z 2 % bentonita

Vzorci so bili pripravljene hkrati pri  $v/c = 0,7$  (graf 24).

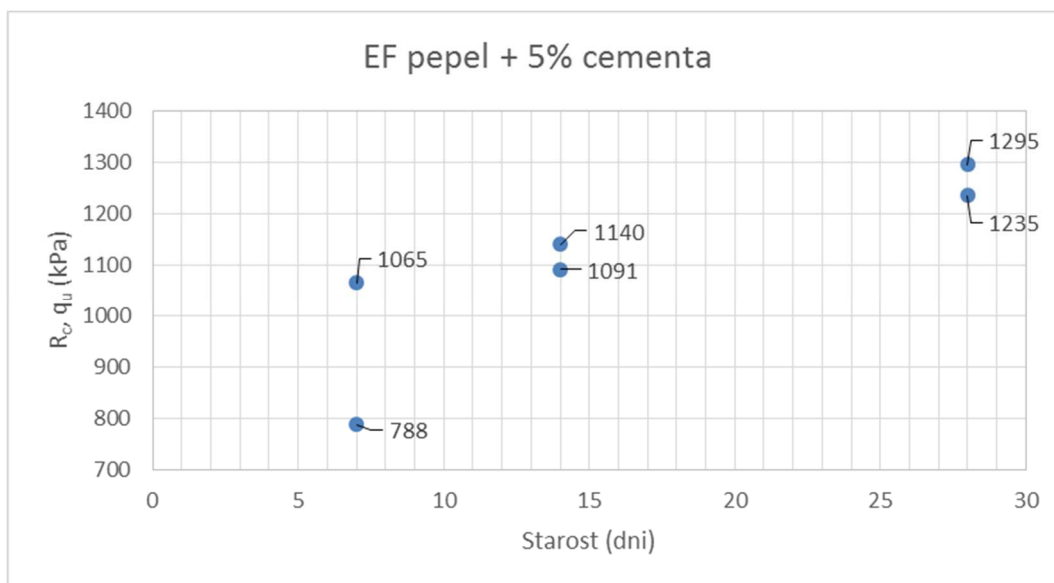


Grafikon 24: Rezultat ETT – EF pepel + 2 % bentonita

### 6.5.4 EF pepel s 5 % cementa

Vzorci so bili pripravljani pri  $v/c = 0,65$  (graf 25).

Opomba: pri vseh vzorcih, ki so vsebovali cement je bila izrazita porušitev v obliki peščene ure (slika 19).



Grafikon 25: Rezultat ETT – EF pepel + 5 % cementa

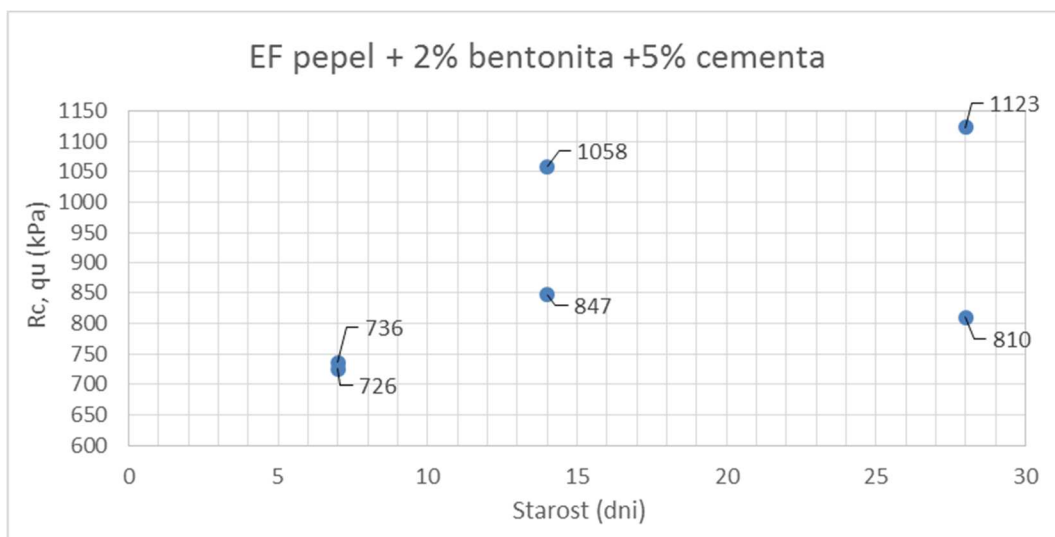


Slika 19: Porušitev po obliki peščene ure

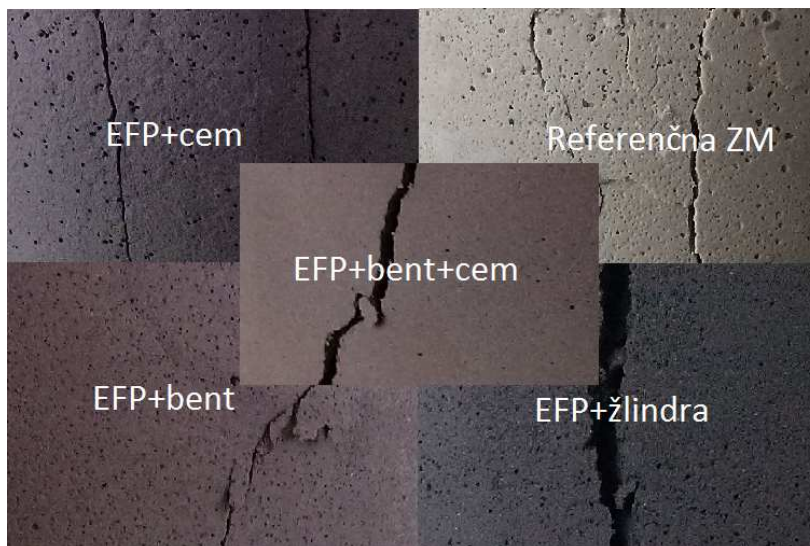
### 6.5.5 EF pepel z 2 % bentonita in 5 % cementa

Vzorci so bili pripravljani pri  $v/c = 0,7$ .

Opomba: Ta serija vzorcev je izmed vseh imela najlepšo teksturo in je bila najmanj porozna (slika 20).



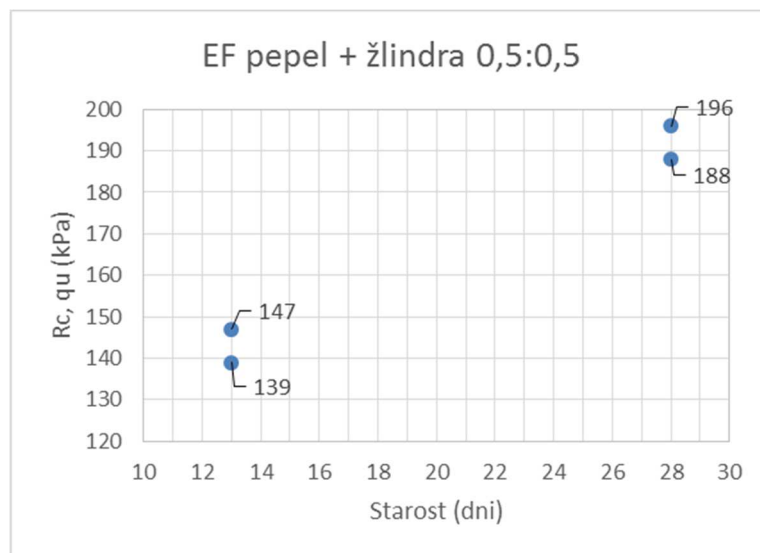
Grafikon 26: Rezultat ETT – EF pepel + 2 % bentonita + 5 % cementa



Slika 20: Primerjava tekstur

### 6.5.6 EF pepel in žindra

Vzorci so bili pripravljene pri razmerju EF pepel : žindra = 0,5:0,5 (graf 27).



Grafikon 27: Rezultat ETT – EF pepel + žindra

### 6.6 Toplotna prevodnost

Toplotno prevodnost so merili na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani po standardnem postopku na vzorcih (slika 21), ki smo jih pripravili na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

Vrednosti so navedene v tabeli 1.



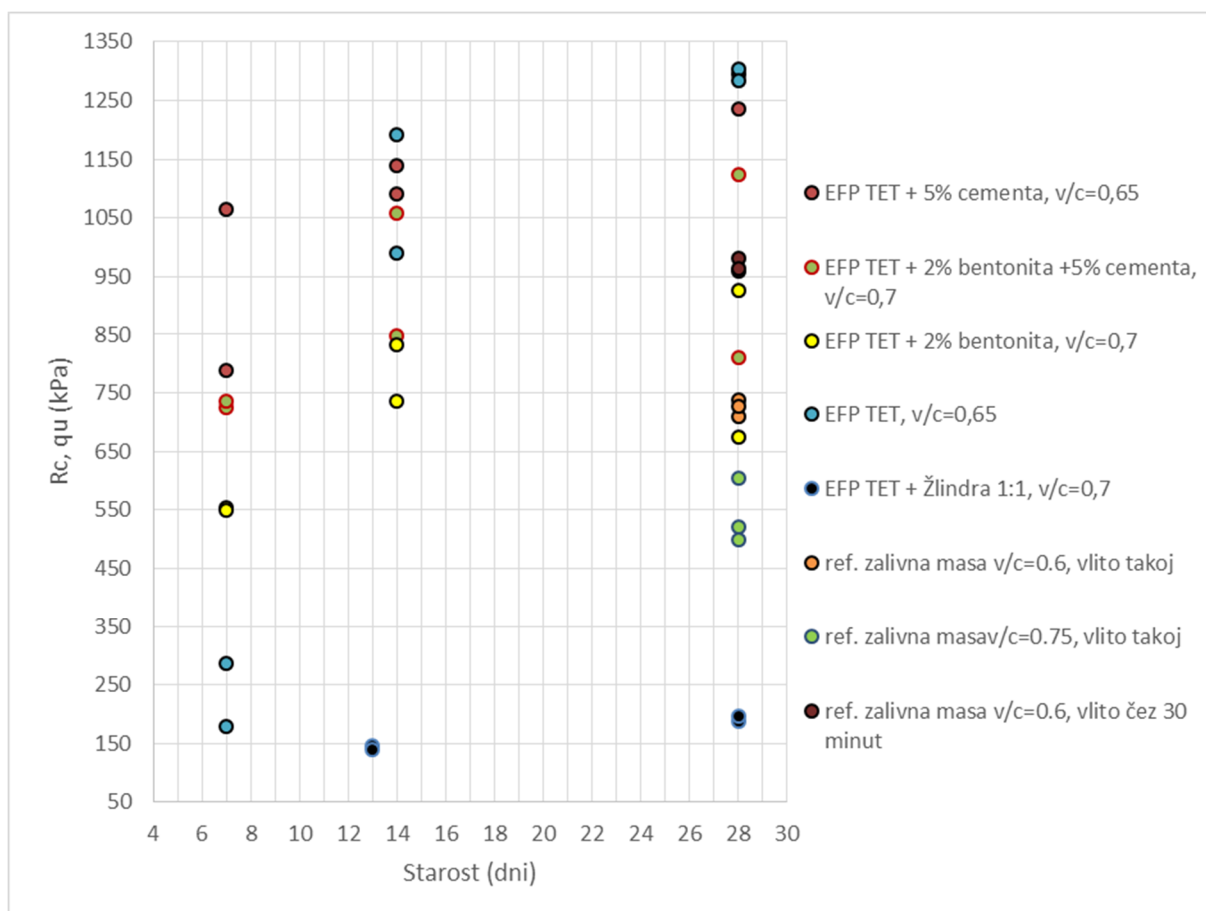
Slika 21: Vzorca za preiskavo toplotne prevodnosti

Tabela 1: Rezultati preiskav toplotne prevodnosti v povezavi z lastnostmi mase

mešanica	v/c razmerje	qu, Rc po 28 dneh (kPa)	izcejena voda (%)	volum. def. (%)	trajanje preskusa vol. obstojnosti (h)	toplotna prevodnost ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	suha gostota ( $t/m^3$ )	vlaga (%)
referenčna masa	0,6 takoj	725	0,0	0,8	21,0	0,6	1,64	52,0
	0,6 30min	968	0,5	0,7	21,0	np	1,64	52,4
	0,75 takoj	542	3,6	4,3	21,0	np	1,33	62,9
	0,75 30min	np	5,7	6,1	21,0	np	np	np
EFP	0,6	np	0,0	-0,1*	1,0	np	np	
	0,65	1294	0,0	0,3*	22,0	0,38	1,54	58,7
	0,7	np	9,0	10,0	1,0	np	np	
EFP +2 %bent	0,7	800	0,0	0,5*	1,0	np	1,63	62,6
	0,9	np	9,5	10,9	19,5	np	np	np
EFP +5 %cem	0,65	1265	0,0	0,0*	21,8	np	1,49	58,5
EFP +2 %bent +5 %cem	0,7	967	0,0	0,1	21,3	0,48	1,59	63,8
EFP +žlindra (0,4:0,6)	0,7	np	10,0	11,1	0,3	np	np	np
EFP +žlindra (1:1)	0,6	np	3,2	3,4	24,4	np	np	np
	0,7	192	0,8	1,3	24,4	0,21	1,56	66,1
	0,8	np	2,7	2,8	21,3	np	np	np
cement	0,7	np	np	np	np	0,64	np	np
np= ni podatka								
*=nabrekanje								

## 7 RAZPRAVA

1. V/c razmerje močno vpliva na izcejanje vode. Vsaka mešanica ima mejo, ob prestopu katere volumenska obstojnost sveže mešanice močno pade. Bentonit kot dodatek za zmanjšanje izcejanja vode in sesedanja suspenzije deluje ugodno, saj ob ohranitvi v/c razmerja, ti dve lastnosti kažeta veliko boljše rezultate. Na volumensko obstojnost mešanice pepela in žlindre pa bolj kot v/c razmerje vpliva medsebojno razmerje pepela in žlindre.
2. Pri preskusih viskoznosti smo ugotovili, da vrednost strižne sile povsod razen pri referenčni zalivni masi narašča s časom, ter, da ima višje vrednosti pri višjih hitrostih vretena. Bentonit vpliva na povečevanje strižne sile s časom.
3. Od vseh vzorcev je imela najvišjo toplotno prevodnost cementna masa, sledil mu je vzorec referenčne zalivne mase. Za 20 % slabšo toplotno prevodnost je imel vzorec sestavljen iz EF pepela, bentonita in cementa, za 40 % pa vzorec EF pepela. Najslabšo toplotno prevodnost je imel vzorec EF pepela in žlindre.
4. Na rezultate enoosne tlačne trdnosti vplivajo: sestava mase, čas staranja, v/c razmerje in pretečen čas od izdelave do vgradnje sveže mešanice. Grafična ponazoritev rezultatov enoosnih tlačnih trdnosti je prikazana na graf 28.



Grafikon 28: Primerjava rezultatov ETT



## 8 ZAKLJUČEK

V laboratoriju smo raziskali možnosti rabe EF pepelov in žlindre za zalivne mase za zalivanje kanalov in geosond samostojno ali v kombinaciji z dodatki cementa in bentonita. Vzporedno smo raziskali referenčno zalivno maso. Poudarek raziskav je bil na volumenski obstojnosti svežih mešanic in na tlačni trdnosti strjenih vzorcev.

Volumenska stabilnost EF pepela je že brez dodatkov boljša kot pri referenčni zalivni masi, ob dodatku bentonita pa lahko v/c razmerje povečamo, izboljšamo pretočnost, in tako ohranimo volumensko stabilnost.

Žindra se je kot polnilo v mešanici pokazala za neuporabno v uporabljenem razmerju z EF pepelom, zato bi bilo potrebno njeno uporabnost preveriti pri manjšem deležu v mešanici z EF pepelom.

Izmed vseh kombinacij bi bila za zalivne mase kanalov najbolj primerna mešanica, ki bi vsebovala samo EF pepel, vendar pa tudi cement in bentonit v pravih razmerjih in kombinacijah ugodno vplivata na določene lastnosti.

Raziskave toplotne prevodnosti mešanic z EF pepelom kažejo nižje vrednosti od priporočenih vrednosti za mase, primerne za zalivanje geosond.

## VIRI

- [1] EU Direktiva 2009/28/ES o spodbujanju OVE.
- [2] Delovanje toplotne črpalke. 2014. [www.geotermalna-energija.com](http://www.geotermalna-energija.com) (Pridobljeno 1. 7. 2014.)
- [3] Društvo za sonaraven razvoj. [www.focus.si](http://www.focus.si) (Pridobljeno 1. 7. 2014.)
- [4] American coal ash association. About coal ash. <http://www.acaa-usa.org/AboutCoalAsh/WhatareCCPs/FlyAsh.aspx> (Pridobljeno 21. 7. 2014.)
- [5] Coal ash facts. <http://www.coalashfacts.org/> (Pridobljeno 21. 7. 2014.)
- [6] Ismail, K. N., Hussin, K., Idris, M. S. 2007. Physical, chemical & mineralogical properties of fly ash. *Journal of Nuclear and Related Technology* (4), Special Edition: 47-51. [http://www.academia.edu/891890/PHYSICAL\\_CHEMICAL\\_and\\_MINERALOGICAL\\_PROPERTIES\\_OF\\_FLY\\_ASH](http://www.academia.edu/891890/PHYSICAL_CHEMICAL_and_MINERALOGICAL_PROPERTIES_OF_FLY_ASH) (Pridobljeno 21. 7. 2014.)
- [7] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 88.
- [8] Industrial Minerals Association North America. What is bentonite. [http://www.imana.org/?page=what\\_is\\_bentonite](http://www.imana.org/?page=what_is_bentonite) (Pridobljeno 21. 7. 2014.)
- [9] Petkovšek, A. 2013. Osnove mehanike tal. Vaje za drugi letnik operativnega gradbeništva, vaja 8b: str. 10/12  
Namesto 9 navedi:  
SIST/ISO/TS 17892-12:2004. Geotehnično preiskovanje in preskušanje - Laboratorijsko preskušanje zemljin - 12. del: Ugotavljanje Atterbergovih meja plastičnosti.
- [10] Bohar, F. 2006. Določitve metilen modro na značilnih kamenih agregatih – kaj pa zemljine? V: Logar, J. (ur.), Petkovšek, A. (ur.). *Razprave petega posvetovanja slovenskih geoteknikov*, Nova Gorica 2008, Nova Gorica, 12. do 14. junij 2008. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 105-114.

## SLIKE

- (1) Enertus d.o.o. Kako deluje toplotna črpalka. (Pridobljeno 29. 9. 2014)  
<http://www.enertus.si/kako-deluje.html>