

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:

Zabret, J., 2014. Vpliv vrste karbonatnega agregata na mehanske lastnosti malt. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentorica Štukovnik, P.): 46 str.

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:

Zabret, J., 2014. Vpliv vrste karbonatnega agregata na mehanske lastnosti malt. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Štukovnik, P.): 46 pp.

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 ŠTUDIJ  
PRVE STOPNJE  
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

**JURE ZABRET**

**VPLIV VRSTE KARBONATNEGA AGREGATA NA  
MEHANSKE LASTNOSTI MALT**

Diplomska naloga št.: 99/B-GR

**INFLUENCE OF CARBONATE AGGREGATE TYPE ON  
MECHANICAL PROPERTIES OF MORTARS**

Graduation thesis No.: 99/B-GR

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednica komisije:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-  
Bosiljkov

**Somentorica:**

asist. Petra Štukovnik

Ljubljana, 28. 01. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica za napako**

**Namesto**

**Naj bo**

»Ta stran je namenoma prazna«

## **IZJAVA**

Podpisani Jure Zabret izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom: »Vpliv vrste karbonatnega agregata na mehanske lastnosti malt«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Preserje pri Radomljah, dne 25.12.2013

Jure Zabret

**BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>691.53(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Jure Zabret</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr.prof.dr. Violeta Bokan Bosiljkov</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. Petra Štukovnik, univ. dipl. inž. geol.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Vpliv vrste karbonatnega agregata na mehanske lastnosti malt</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomsko delo – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>46 str., 13 pregl., 8 sl., 16 graf., 6 en.</b>
<b>Ključne besede :</b>	<b>alkalno-agregatna reakcija, alkalno-karbonatna reakcija, tlačna trdnost, upogibna trdnost, sprememba dolžine, masa, razlez, dedolomitizacija</b>

**Izvleček**

Namen opravljenih preiskav je bil raziskati vpliv alkalno-agregatne reakcije na mehanske lastnosti malt. V ta namen smo pripravili vzorce - maltne prizme. Kot vezivo smo uporabili apno, apno z dodatkom tufa, cement in cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela. Uporabili smo tudi dve različni vrsti agregata in sicer apnenec in dolomit. Vse vzorce smo najprej negovali v ustreznih pogojih okolja. Vzorce na osnovi apnenega veziva smo negovali tri mesece v laboratorijskih pogojih. Vzorce na osnovi cementa smo negovali 28 dni v vodi. Nato smo jih izpostavili pospešenim pogojem staranja, povišani temperaturi in/ali raztopini NaOH ter referenčnim pogojem (deionizirana H<sub>2</sub>O pri 20°C). Vsem vzorcem smo po izpostavitvi izbranim pogojem okolja (staranju) merili spremembo dolžine in maso v izbranih časovnih intervalih do vključno treh mesecev. Opravljene so bile tudi upogibne in tlačne preiskave prizem z namenom določiti vpliv vrste karbonatnega agregata na mehanske lastnosti le-teh.

## **BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>691.53(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Jure Zabret</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>Petra Štukovnik, B.Sc.</b>
<b>Title:</b>	<b>Influence of carbonate aggregate type on mechanical properties of mortars</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>46 p., 13 tab., 8 fig., 16 graph., 6 eq.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>alkali-aggregate reaction, , alkali-carbonate reaction, compression test, flexural test, length change, mass, flow value, dedolomitization</b>

### **Abstract**

Aim of research work was to examine the effect of alkali-aggregate reaction on mechanical properties of mortars. There we prepared samples - mortar prisms. As a binder we used lime, lime with addition of tuff, cement and cement with fly ash. We also used two different types of aggregate, limestone and dolomite. All samples were first cured in adequate environmental conditions. Samples with lime binder were cured in the laboratory conditions for three months. Samples based on cement binder were cured for 28 days in water. After that samples were exposed to accelerated aging conditions, increased temperatures and/or NaOH solution, and reference conditions - deionized water with 20°C. We measured mass and length change in predetermined time intervals up to three months. Compressive and flexural test were carried out in order to determine influence of type of carbonate aggregate on mechanical properties of mortars.

## **ZAHVALA**

Zahvalil bi se mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov in somentorici Petri Štukovnik ter Franciju Čeponu, za vso strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi svoji družini, ki mi je omogočila študij in me spodbujala ter mi vedno stala ob strani.



## KAZALO VSEBINE

<b>STRAN ZA POPRAVKE .....</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVA .....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>IV</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ZAHVALA .....</b>	<b>VI</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>IX</b>
<b>KAZALO SLIK .....</b>	<b>X</b>
<b>KAZALO GRAFOV .....</b>	<b>XI</b>
<b>KAZALO ENAČB .....</b>	<b>XII</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ALKALNO-AGREGATNA REAKCIJA.....</b>	<b>2</b>
2.1 Alkalno-silikatna reakcija (ASR) .....	2
2.2 Alkalno-karbonatna reakcija (ACR) .....	3
<b>3 EKSPERIMENT .....</b>	<b>5</b>
3.1 Materiali .....	5
3.1.1 Agregat .....	5
3.1.2 Vezivo .....	6
3.1.3 Mineralni dodatki .....	9
3.1.4 Voda .....	10
3.1.5 Raztopina natrijevega hidroksida (NaOH) .....	10
3.2 Eksperimentalne preiskave.....	10
3.3 Priprava mešanic in receptura .....	11
3.3.1 Mešanje apnenih malt.....	11
3.3.2 Mešanje cementnih malt.....	11
3.3.3 Receptura cementne malte.....	12
3.3.4 Receptura cemente malte z dodatkom elektrofiltrskega pepela.....	12
3.3.5 Receptura apnene malte.....	13
3.3.6 Receptura apnene malte z dodatkom tufa.....	13

---

<b>4 MERITVE IN REZULTATI PREISKAV .....</b>	<b>14</b>
4.1 Meritve razleza sveže malte .....	14
4.2 Meritve in rezultati preiskav na strjenih maltah .....	15
4.2.1 Oznake vzorcev.....	15
4.2.2 Meritve mase .....	16
4.2.3 Meritve spreminjanja dolžin .....	20
4.3 Upogibne preiskave .....	25
4.3.1 Cemente prizme .....	26
4.3.2 Cementne prizme z dodatkom elektrofiltrskega pepela.....	28
4.3.3 Apnene prizme.....	30
4.3.4 Apnene prizme z dodatkom tufa.....	32
4.4 Tlačne preiskave .....	34
4.4.1 Cementne prizme .....	35
4.4.2 Cementne prizme z dodatkom elektrofiltrskega pepela.....	37
4.4.3 Apnene prizme.....	39
4.4.4 Apnene prizme z dodatkom tufa.....	41
<b>5 ZAKJUČEK .....</b>	<b>43</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>45</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Specifikacije agregata apnenca. ....	5
Preglednica 2: Specifikacije dolomitnega agregata.....	6
Preglednica 3: Specifikacije portlandskega cementa CEM I 42.5 R.....	8
Preglednica 4: Kemijske lastnosti elektrofiltrskega pepela.....	9
Preglednica 5: Receptura cementne malte z apnenčastim agregatom. ....	12
Preglednica 6: Receptura cementne malte z dolomitnim agregatom. ....	12
Preglednica 7: Receptura malte z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela in apnenčastim agregatom. ....	12
Preglednica 8: Receptura malte z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela in dolomitnim agregatom. ....	12
Preglednica 9: Receptura apnene malte z apnenčastim agregatom. ....	13
Preglednica 10: Receptura apnene malte z dolomitnim agregatom. ....	13
Preglednica 11: Receptura apnene malte z dodatkom tufa z apnenčastim agregatom. ....	13
Preglednica 12: Receptura apnene malte z dodatkom tufa z dolomitnim agregatom. ....	13
Preglednica 13: Razlez sveže cementne in apnene malte.....	14

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Krog preobrazbe apna (Štukovnik, 2011).....	7
Slika 2: Oznake prizem. ....	15
Slika 3: Digitalna tehtnica za merjenje mase vzorcev. ....	16
Slika 4: Graf – Kaufmanov deformeter.....	20
Slika 5: Predpriprava prizme za izvajanje upogibnega preizkusa po standardu SIST EN 12390-5 (SIST, 2001). ....	25
Slika 6: Prikaz upogibne preiskave apnene prizme.....	25
Slika 7: Prikaz tlačnega preizkusa na polovici prizme po standardu SIST EN 12390-3 (SIST, 2009b). ....	34
Slika 8: Prikaz tlačne porušitve na apnenem vzorcu.....	34

## KAZALO GRAFOV

Graf 1: Sprememba mase pri prizmah iz apnenčastega agregata z apnenim ali cementnim vezivom. ....	17
Graf 2: Sprememba mase pri prizmah iz apnenčastega agregata z vezivom iz apna in tufa ali z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela. ....	17
Graf 3: Sprememba mase prizem iz dolomitnega agregata z apnenim ali cementnim vezivom. ....	18
Graf 4: Sprememba mase prizme iz dolomitnega agregata in vezivom iz apna in tufa ali vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela. ....	18
Graf 5: Spremembe dolžin cementnih in apnenih prizem z apnenčastim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida. ....	22
Graf 6: Spremembe dolžin cementnih in apnenih prizem z dolomitnim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida. ....	22
Graf 7: Sprememba dolžin cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela ter apnenčastim agregatom in apnenih prizem z dodatkom tufa ter apnenčastim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida. ....	23
Graf 8: Sprememba dolžin cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela ter dolomitnim agregatom in apnenih prizem z dodatkom tufa ter dolomitnim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida. ....	23
Graf 9: Primerjava upogibnih trdnosti cementnih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	26
Graf 10: Primerjava upogibnih trdnosti cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	28
Graf 11: Primerjava upogibnih trdnosti apnenih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	30
Graf 12: Primerjava upogibnih trdnosti apnenih prizem z dodatkom tufa iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	32
Graf 13: Primerjava tlačnih trdnosti cementnih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	35
Graf 14: Primerjava tlačnih trdnosti cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	37
Graf 15: Primerjava tlačnih trdnosti apnenih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata. ....	39
Graf 16: Primerjava tlačnih trdnosti apnenih prizem z dodatkom tufa iz apnenega in dolomitnega agregata. ....	41

**KAZALO ENAČB**

Enačba 1: Enačba mehanizma alkalno-silikatne reakcije.....	2
Enačba 2: Enačba mehanizma dedolomitizacije.....	3
Enačba 3: Enačba tvorjenja sekundarnega kalcita.....	4
Enačba 4: Mehanizem za nastanek živega apna.....	6
Enačba 5: Mehanizem za nastanek hidratiziranega apna.....	7
Enačba 6: Enačba za izračun spremembe dolžine.....	21

## 1 UVOD

Beton v gradbeništvu poznamo, kot enega izmed najbolj uporabljenih konstrukcijskih elementov. Začeli so ga uporabljati že Rimljani in se je tekom stoletij razvil v zelo raznovrsten gradbeni material. Beton v širokem pomenu besede predstavlja vezno ali/in konstrukcijsko gradivo, ki je sestavljeno iz mineralnega veziva, agregata, vode ter dodatkov. Lahko je zelo obstojen material, ob primerni zasnovi, zaščiti in negi. Vendar kljub izbiri kvalitetnih osnovnih materialov in ustrezni negi, lahko pride do poškodb znotraj materiala. Razlog za to se skriva v neustrezni kombinaciji agregata in mineralnega veziva. Gre za agregate, katerih sestava je takšna, da niso inertni v alkalnem okolju, ki ga zagotavlja mineralno vezivo. Zaradi takšnih, očem nevidnih reakcij, prihaja do razjedanja strukture agregata v betonu, razpok in v skrajnem primeru lahko tudi do porušitve (Žarnic, 2003).

Predvsem v zadnjem času se posveča večja pozornost dvema reakcijama, ki sta zaradi svojega agresivnega vpliva na beton, vzrok za njegove poškodbe. Gre za alkalno-silikatno reakcijo (ASR) ter alkalno-karbonatno reakcijo (ACR) (Mladenovič, 2004, Prinčič, 2013, Štukovnik, 2013a).

Alkalno-silikatna reakcija (ASR) je kemična reakcija med alkalijami, ki se sproščajo ob hidrataciji cementa in reaktivnimi minerali iz silikatnih kamnin, ki so v zrnih agregata. Pri reakciji nastaja nabrekli gel, ki povzroča poškodbe betona. Reaktivne komponente so predvsem minerali in kamnine, ki vsebujejo aktivni silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ) (Mladenovič, 1997).

Alkalno-karbonatna reakcija (ACR) pa je kemična reakcija med karbonatnimi minerali v zrnih agregata in alkalijami v cementu. Celoten mehanizem reakcije je manj znan in slabše raziskan kot pri alkalno-silikatni reakciji (López-Buendía, 2006). Tu gre za proces dedolomitizacije. Dedolomitizacija je proces razpadanja dolomita zaradi kemične reakcije, pri kateri nastaneta minerala brucit ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) in kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) (Katayama, 2010).

Kot je razvidno iz geografskega atlasa Slovenije, v večji meri na ozemlju Slovenije prevladujeta kamnini apnenec in dolomit (Fridel, 1999). Zaradi obširnih nahajališč ter delujočih in zaprtih kamnolomov apnenca in dolomita lahko sklepamo, da sta bila oba agregata velikokrat uporabljena pri gradnji objektov po Sloveniji.

Cilj diplomske naloge je bil preučiti vpliv karbonatnega agregata na mehanske lastnosti malt. V večini znanih raziskav je kot mineralno vezivo uporabljen portlandski cement. V naši raziskavi pa smo uporabili tudi apno, apno z dodatkom tufa in cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela. Namen preiskav je bil opazovati spremembe upogibnih in tlačnih trdnosti preizkušancev glede na vrsto uporabljenega mineralnega veziva in agregata. Skozi obdobje treh mesecev smo spremljali tudi spremembo dolžine in maso maltnih prizem.

## 2 ALKALNO-AGREGATNA REAKCIJA

Alkalno-agregatna reakcija je kemična reakcija med zrni kamenega agregata in alkalijami iz cementa (Mladenovič, 1997). Reakcijo je prvi identificiral leta 1940 Tomas Stanton iz Kalifornije (Stanton, 1940). Poznamo dve vrsti reakcije in sicer alkalno-silikatno reakcijo (ASR) in alkalno-karbonatno reakcijo (ACR).

Že pred časom so bile opravljene študije o poteku reakcije in njeni škodljivosti, vendar čisto natančnega odgovora še vedno nismo dobili (Stanton, 1940, Katayama, 2004).

### 2.1 Alkalno-silikatna reakcija (ASR)

Alkalno-silikatna reakcija je kemična reakcija med zrni kamenega agregata, ki vsebuje reaktivne komponente in hidroksidi alkalij iz veziva ali drugih virov. Z izrazom alkalije poimenujemo natrij in kalij, ki sta prisotna v cementnem vezivu ali vstopata v vezivo na drug način. Potencialno reaktivne komponente so vse silikatne sestavine v agregatu, ki izjemno hitro reagirajo z alkalijami, predvsem so to minerali, ki jih gradi metastabilna kremenica in vulkansko steklo. Alkalna raztopina se v porni prostor cementne paste sprošča ob hidrataciji portlandskega cementa. Vsebnost alkalij v cementu kvantitativno izražamo kot  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalent. Alkalije lahko pridejo v cementno pasto tudi iz dodatkov betonu, zrn agregata ali pa se v beton vnesejo kasneje, ko je izpostavljen različnemu delovanju soli (Mladenovič, 1997).

Poenostavljena razlaga mehanizma alkalno-silikatne reakcije je predstavljena z enačbo (Enačba 1).



(Mladenovič, 1997)

Enačba 1: Enačba mehanizma alkalno-silikatne reakcije.

Aktivni  $\text{SiO}_2$  reagira s hidroksidi alkalij, pri čemer nastaja alkalno-silikatni gel, ki ima nekoliko variabilno sestavo. Ta je odvisna od količine alkalij v cementu ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) in od kremenice, ki je na razpolago. Vlaga in temperatura sta katalizatorja te reakcije. Poškodbe, ki so nastale zaradi alkalno-silikatne reakcije, znižujejo trdnostne in elastične lastnosti betona ter pospešujejo druge škodljive procese v betonu. Ker je beton razpokan, lahko skozi razpoke vstopajo različni škodljivi reaktanti, ki pospešujejo propadanje oz. razpadanje objekta (Mladenovič, 1997).



## 2.2 Alkalno-karbonatna reakcija (ACR)

Pri alkalno-karbonatni reakciji gre za drugo, manj znano in slabše raziskano, reakcijo iz skupine alkalno-agregatnih reakcij. Tudi pri alkalno-karbonatni reakciji gre za reakcijo, pri kateri alkalije iz cementa reagirajo z mineralom dolomitom iz agregata (Grattan-Bellew, 2010).

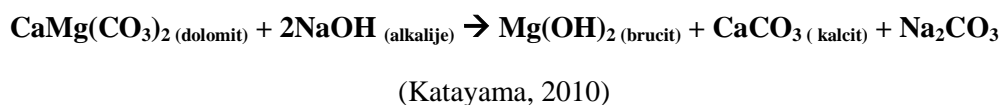
Alkalno-karbonatna reakcija naj bi potekala v treh oblikah:

- Alkalno-karbonatna reakcija (ACR) dolomitnega apnenca, zaradi česar nastane dedolomitizacija.
- Alkalno-karbonatna reakcija (ACR) nedolomitnega apnenca, zaradi česar nastane reakcijski obroči.
- Alkalno-silikatna reakcija (ASR) različnih karbonatnih kamenin, zaradi česar nastane silikatni gel ter ekspanzija (Katayama, 2004, Štukovnik, 2013c).

Pri izpostavljenosti visoko alkalnemu okolju in prisotnosti  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  in  $\text{CO}_3^{2-}$  ionov, pride v betonu do izmenjave ionov, ki vodijo v proces dedolomitizacije (enačba 2) (García, 2003, Katayama, 2010).

Reakcija je lahko razumljena dokaj preprosto, preko skupnega molarnega volumna trdnih snovi znotraj romboedrične mreže agregata dolomita. Volumen se pri procesu dedolomitizacije zmanjša (Katayama, 2010).

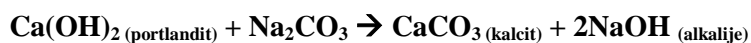
Prikazana je splošna reakcija (enačba 2):



Enačba 2: Enačba mehanizma dedolomitizacije.

Pri procesu dedolomitizacije se tvorita minerala brucit in kalcit, zaradi česar pride do spremembe volumna (Katayama, 2004, 2010). Gre za počasen proces v pogojih, kjer je voda zelo zasičena s kalcijem (Ca) (López-Buendía, 2006). Vendar se znotraj procesa dedolomitizacije pojavi še sekundarna reakcija, tvorjenje sekundarnega kalcita (Enačba 3). Sekundarni kalcit nastaja v vezivu vzdolž dolomitnih agregatnih zrn. Karbonatni ioni ( $\text{CO}_3$ ), ki se povežejo z alkalnimi ioni (na primer Na), prehajajo iz reaktivnega dolomitnega agregata v vezivo in se tam povežejo s Ca ioni iz portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) v vezivu (Katayama, 2010).

Nastanek sekundarnega kalcita lahko poenostavljeno prikažemo z reakcijo (Enačba 3):



(Katayama, 2010)

Enačba 3: Enačba tvorjenja sekundarnega kalcita.

Razvidno iz enačbe 3 je tudi to, da ponovno nastanejo hidroksidi alkalije (NaOH). Čeprav takšne reakcije ne povzročajo ekspanzije, je jasno razvidno, da ohranijo visoko stopnjo alkalnosti ali pH-ja, ki pospešuje hitrost alkalno-karbonatne reakcije (ACR) in zmanjšuje učinkovitost elektrofiltrskega pepela in drugih mineralnih dodatkov (Katayama, 2010).

Med prebiranjem strokovne literature smo naleteli na nekaj različnih hipotez glede zgoraj opisane reakcije.

- Gre za kanadsko-kitajsko sodelovanje, pri katerem so tekom raziskave ugotovili, da je  $ASR=ACR$  (Grattan-Bellew, 2010).
- Ugotovitev, da ACR ne tvori ekspanzije v betonu. (Katayama, 2010).
- Če se raztezek pojavi v karbonatnem agregatu, je to zaradi silikatnih mineralov v agregatu. (Katayama, 2010)
- Različni mehanizmi reakcije pri temperaturi 25°C in 75°C (García, 2003).

### 3 EKSPERIMENT

#### 3.1 Materiali

##### 3.1.1 Agregat

Pri raziskavah smo uporabili dve vrsti karbonatnega agregata, in sicer apnenec in dolomit, frakcije 0/4 mm, iz Slovenskih kamnolomov. Oba uporabljena agregata sta skladna s standardom SIST EN 12620:2002+A1:2008 (SIST, 2002).

V Sloveniji več kot dve tretjini ozemlja sestavljajo karbonatne kamnine, ki so se odlagale in nastajale v različnih geoloških obdobjih. Najpomembnejša minerala karbonatnih kamnin sta mineral kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ), ki gradi različne apnenice ter mineral dolomit  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , ki gradi kamnino dolomit (Ogorelec, 2001).

##### 3.1.1.1 Apnenec

Apnenec je sedimentna kamnina pretežno iz kalcijevega karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ) v obliki minerala kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Kalcit se izloča kemično iz nasičene vodne raztopine, izvira pa tudi iz lupin morskih organizmov, ki se usedajo na morsko dno. Apnenec je karbonatna kemična oziroma biokemična sedimentna kamnina. Apnencu najbolj podobna kamnina je dolomit. Ločimo ju s pomočjo 10% raztopine klorovodikove kisline (HCl), ki jo pokapamo na površino kamnine. Apnenec s kislino močno reagira (penjenje, šumenje), dolomit pa ne (Novak, 2008).

Specifikacija uporabljenega apnenčastega agregata je podana v preglednici 1:

Preglednica 1: Specifikacije agregata apnenca.

<b>Vrsta agregata A</b>	Apnenec
<b>Frakcija</b>	0/4
<b>Prostorninska masa zrn</b>	2700 kg / m <sup>3</sup>
<b>Vpijanje vode</b>	0.8 %
<b>Granulometrijska sestava</b>	$G_F$ 85

### 3.1.1.2 Dolomit

Dolomit je sedimentna karbonatna kamnina. Sestavljen je pretežno iz minerala dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ter v manjši meri iz kalcita ( $\text{CaCO}_3$ ), lahko pa vsebuje še druge minerale. Najpogosteje nastane iz apnenca z dolomitizacijo (Komac, 2006). Dolomitizacija je proces v katerem se apnenec spremeni v dolomit. Nastane, če skozi apnenčast sediment pronica raztopina bogata z magnezijem, kjer pride do prekristalizacije kalcita v apnencu (Pavšič, 2006). Dolomit je na slovenskem zelo pogosta kamnina, saj pokriva okoli 2500 km<sup>2</sup> državnega ozemlja (Komac, 2006).

Specifikacija uporabljenega agregata dolomita je podana preglednici 2:

Preglednica 2: Specifikacije dolomitnega agregata.

Vrsta agregata B	Dolomit s kalcitnimi žilicami
Frakcija	0/4
Prostorninska masa zrn	2847 kg / m <sup>3</sup>
Vpijanje vode	0.48 %
Granulometrijska sestava	$G_F$ 85

### 3.1.2 Vezivo

#### 3.1.2.1 Apno

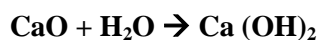
Apno je zračno vezivo, ki se je uporabljalo pri izdelavi malt in ometov vse do konca 19. stoletja, ko so odkrili cement. Apno pridobivamo z žganjem apnenca. Apnenec iz kamnoloma žgemo v peči, praviloma pri temperaturi med 800°C in 1000°C, pri čemer razpade na manjše kose velikosti med 2 in 8 cm. Kamni apnenca razpadejo zaradi procesa kalcinacije (enačba 4), ki povzroči raztezanje kristalov zaradi toplote (Berge, 2000).



(Berge, 2000)

Enačba 4: Mehanizem za nastanek živega apna.

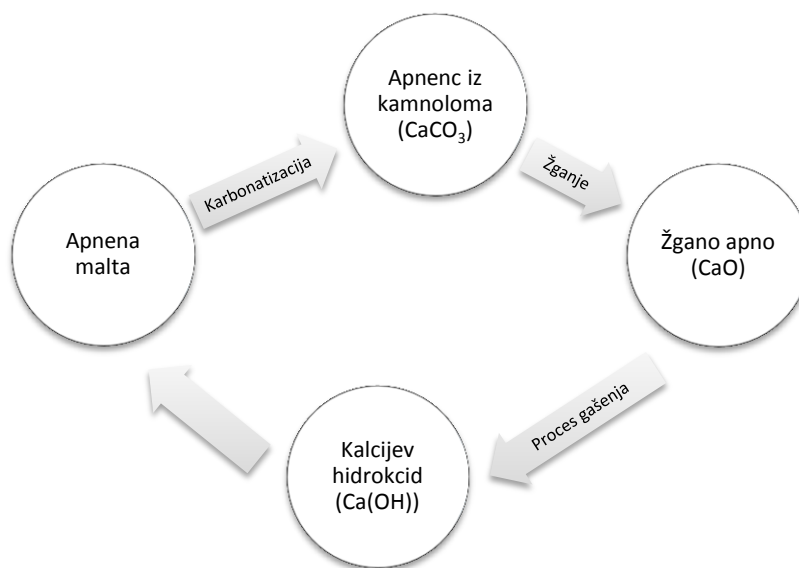
Z dodajanjem vode živo apno gasimo (enačba 5).



(Žarnić, 2003)

Enačba 5: Mehanizem za nastanek hidratiziranega apna.

Hidratizirano apno je zračno vezivo. Uporablja se kot vezivo v maltah ter skupaj z mineralnim agregatom po strjevanju in sušenju tvori trdno gradivo. Hidratizirana apna se strjujejo s sušenjem, med katerim vežejo  $\text{CO}_2$  in hkrati izločajo vodo ter se tako ponovno pretvorijo v kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Proces je hitrejši, če je malta v suhem in zračnem okolju, kjer je stalen dotok svežega zraka. Na sliki 1 je prikazan krog preobrazbe apna (Žarnić, 2003).



Slika 1: Krog preobrazbe apna (Štukovnik, 2011).

### 3.1.2.2 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki s pomočjo vode poveže skupaj agregat. Po mešanju z vodo se s procesom hidratacije začne strjevati v trdno vezivo (Bye, 1999).

Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebujejo naravni lapor, apnenec in glina. Ti se po izkopu drobijo in meljejo ter transportirajo v silose. Na osnovi kemijske analize se dodajo manjkajoči minerali (Žarnić, 2003).

Nato surovine v rotacijski peči žgemo v treh temperaturnih intervalih. Prvi interval poteka do 1300°C, drugi med 1300°C in 1500°C, v tretjem intervalu pa se reakcijski produkti ohlajajo. Dobljena zmes je cementni klinker, ki je podoben pepelu, ima granule premera 3 cm in je močno porozen. Klinker se hladi na sobno temperaturo in se v krogelnih mlinih melje v fini prah – portlandski cement (Žarnić, 2003).

Kot vezivo smo uporabili cement CEM I 42.5 R. Gre za portlandski cement trdnostnega razreda 42.5 MPa ter z visoko hitrostjo vezanja (R). Kemijske lastnosti cementa so podane v preglednici 3.

Preglednica 3: Specifikacije portlandskega cementa CEM I 42.5 R.

Lastnosti	Standard SIST EN 196-1, SIST EN 196-2
Čas začetka vezave	150 min
1 dnevna trdnost	24.9 MPa
28 dnevna trdnost	59.7 MPa
SiO <sub>2</sub> [%]	22.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	5.52
Na <sub>2</sub> O [%]	0.45
MgO [%]	2.54
CaO [%]	60.4

### 3.1.3 Mineralni dodatki

#### 3.1.3.1 Vulkanski tuf

Tuf je nastal kot posledica neeruptivnih vulkanskih izbruhov, ki so proizvajali vulkanski prah. Ta se je skozi čas konsolidiral in je nastala piroklastična kamnina. Tuf sam po sebi ob mešanju z vodo nima vezavnih sposobnosti. Vendar ob mešanju z vodo in kalcijevim hidroksidom (apnom) ali z materiali, ki oblikujejo kalcijev hidroksid (portlandski cement) postane trdna zmes. V veliki meri je sestavljen iz reaktivnih silicijevih oksidov ( $\text{SiO}_2$ ) in aluminijevih oksidov ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ter drugih sestavin (Hewlett, 2004).

#### 3.1.3.2 Elektrofitrski pepel

Nastane kot stranski produkt v termoelektrarnah ob sežigu premoga. Sam zase nima hidravličnih lastnosti. Elektrofitrski pepel vsebuje znatne količine silicijevega dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) in kalcijevega oksida ( $\text{CaO}$ ), ki sta tudi sestavini premoga. Izboljšuje kohezivnost ter pomaga zmanjševati vsebnost vode v betonski ali apneni mešanici. Z dodajanjem elektrofitrskega pepela se poveča tudi odpornost proti vdoru vode (Hewlett, 2004).

Kemijske lastnosti uporabljenega elektrofitrskega pepela so podane v preglednici 4.

Preglednica 4: Kemijske lastnosti elektrofitrskega pepela.

Lastnost	EFP
$\text{SiO}_2$ čisti, %	40.41
$\text{Al}_2\text{O}_3$ , %	18.93
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , %	10.33
$\text{CaO}$ , %	16.05
$\text{MgO}$ , %	2.94
$\text{Na}_2\text{O}$ , %	1.03
$\text{K}_2\text{O}$ , %	1.68

### 3.1.4 Voda

Voda pri mešanju cementnih in apnenih mešanic je bila voda iz ljubljanskega vodovoda.

### 3.1.5 Raztopina natrijevega hidroksida (NaOH)

Vsak liter raztopine natrijevega hidroksida vsebuje 40g natrijevega hidroksida (NaOH) in 1000 ml deionizirane vode. Koncentracija raztopine je bila eno-molarna (1M).

## 3.2 Eksperimentalne preiskave

Maltne prizmice dimenzij 40x40x160 mm smo izdelali iz osem (8) različnih sestav malte. Uporabili smo dva karbonatna agregata, apnenec in dolomit, in štiri mineralna veziva, hidratizirano apno, cement, cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela ter hidratizirano apno z dodatkom tufa. Maltne prizmice smo pri določeni starosti izpostavili različnim pogojem staranja vzorcev.

Mešanje malt, izdelavo prizmic, nego ter staranje prizmic in vse meritve smo izvajali v prostorih Konstrukcijsko-prometnega laboratorija Fakultete za gradbeništvo in geodezijo UL. Na voljo smo imeli 33 3-delnih kalupov.

S pomočjo mešalca RILEM-CEN smo po standardu SIST EN 12390-2 (SIST, 2009a) mešali cementne malte ter cementne malte z dodatkom elektrofiltrskega pepela. Vgradili smo jih v kalupe ter postavili na vibracijsko mizo, da se je cementna malta lepo razporedila po kalupu. V določene kalupe smo vstavili reperje, za kasnejše meritve spremembe dolžine. Po 24 urah smo cementne prizme razkalupili in jih negovali v skladu s standardom SIST EN 12390-2 (SIST, 2009a) še 28 dni v vodi. Po preteku 28-ih dni smo vzorce dali v deionizirano vodo ali 1M NaOH raztopino ter jih izpostavili dvema različnima temperaturama, 20°C in 60°C.

Tudi vzorce z apnenim vezivom smo mešali s pomočjo mešalca RILEM-CEN. Apnene malte smo 3 mesece negovali na zraku v laboratoriju in jih potem izpostavili deionizirani vodi ali 1M NaOH raztopini ter dvema različnima temperaturama, 20°C in 60°C. Maltne prizmice z apnenim vezivom z dodatkom tufa pa smo negovali 56 dni ter jih nato izpostavili izbranemu režimu staranja.

Pri vsaki sveži maltni mešanici smo določili razlez, za katerega smo na začetku predpostavili, da bo znašal cca 140 mm. Izmerjene vrednosti so podane v preglednici 13. Skupaj smo izdelali kar 564 maltnih prizem, na katerih smo izvajali preiskave.

Na vzorcih z vgrajenimi reperji smo spremljali spreminjanje dolžine prizmic s pomočjo Graf – Kaufmanovega deformetra. Najprej smo izmerili začetne dimenzije vzorcev ter njihovo začetno maso (stanje nič). Po izpostavitvi prizem izbranim pogojem staranja (voda ali NaOH raztopina pri 20°C ali 60°C) smo meritve mase ter spreminjanja dolžine opravili vsakih 7 dni.



### **3.3 Priprava mešanic in receptura**

#### **3.3.1 Mešanje apnenih malt**

Apnene malte smo mešali s pomočjo standardnega mešalca za malte, ki se obrača okoli svoje vzdolžne osi in istočasno planetarno obrača okoli pogonske osi. Možni sta dve hitrosti mešanja mešalca (Žarnič, 2011). V mešalec smo najprej dodali apneno testo ter dolili malo vode ter ju dodobra premešali. Počasi smo dodajali agregata ter ostalo vodo. Ko je bilo vse skupaj dobro zmešano, smo apneno malto vgradili v kalup iz katerega dobimo tri prizme standardnih dimenzij 40/40/160 mm. Pred polnjenjem kalupa smo notranje površine predhodno namazali z mineralnim oljem. Kalupe smo do polovice napolnili z apneno malto ter z lesenim batom plast zbili, da se je vsa malta lepo razporedila po kalupu ter zgostila. Nato smo kalup prenapolnili in zgostili še vrhnji sloj malte ter ga na koncu poravnali.

#### **3.3.2 Mešanje cementnih malt**

Tudi cementne malte smo mešali z že zgoraj opisanim mešalcem RILEM-CEN. Pri cementnih maltah pa smo se natančno držali navodil mešanja cementa po standardu SIST EN 12390-2 (SIST, 2009a). V posodo za vodo smo najprej dodali odmerjeno količino vode, šele nato cement. Mešalec smo vklopili ter mešali s prvo hitrostjo 30 sekund. V naslednjih 30-ih sekundah smo dodajali stehtano količino peska, pri čemer je mešanje potekalo še vedno v prvi hitrosti. Nato smo mešalec preklopili na drugo hitrost in mešali še naslednjih 30 sekund. Potem smo naredili odmor dolg 90 sekund. V prvih 15 sekundah odmora smo z lopatico postrgali malto, ki je ostala prilepljena na steno posode. Po preteku 90-ih sekund smo nadaljevali mešanje pri drugi hitrosti še 60 sekund. Po končanem mešanju smo malto vgradili v pripravljene kalupe ter jo jo zgostili s pomočjo vibracijske mize. Na koncu smo odstranili odvečno malto in zgornjo površino prizmic poravnali (zagladili) (Žarnič, 2011).

### 3.3.3 Receptura cementne malte

Pri določitvi sestavin cementne malte smo izhajali iz izbranega vodo-cementnega razmerja 0.45 ter izbranega masnega razmerja cement : agregat = 1:3. Recepturi cementne malte sta podani v preglednicah 5 in 6.

Preglednica 5: Receptura cementne malte z apnenčastim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Cement</b>	0.515 kg
<b>Agregat apnenec</b>	1.535 kg
<b>Voda</b>	0.245 kg

Preglednica 6: Receptura cementne malte z dolomitnim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Cement</b>	0.530 kg
<b>Agregat dolomit</b>	1.585 kg
<b>Voda</b>	0.245 kg

### 3.3.4 Receptura cemente malte z dodatkom elektrofiltrskega pepela

Pri cementnih mešanicah z dodatkom elektrofiltrskega pepela smo uporabili enak izračun določanja potrebnih količin kot pri cementni malti, le da smo prostornino cementnih zrn v malti zmanjšali za 25% in jo nadomestili z elektrofiltrskim pepelom. Z dodajanjem elektrofiltrskega pepela smo izboljšali kohezivnost oz vgradljivost sveže malte (Hewlett, 2004).

Preglednica 7: Receptura malte z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela in apnenčastim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Cement</b>	0.412 kg
<b>Elektrofiltrski pepel</b>	0.103 kg
<b>Agregat apnenec</b>	1.535 kg
<b>Voda</b>	0.245 kg

Preglednica 8: Receptura malte z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela in dolomitnim agregatom..

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Cement</b>	0.425 kg
<b>Elektrofiltrski pepel</b>	0.106 kg
<b>Agregat dolomit</b>	1.585 kg
<b>Voda</b>	0.245 kg

### 3.3.5 Receptura apnene malte

Pri določanju recepture za apneno malto smo izhajali iz razmerja med apnenim testom in agregatom ter ustrezne konsistence malte. Izbrano prostorninsko razmerje med apnenim testom in peskom je bilo 1:3, količino dodane vode pa smo prilagodili želeni konsistenci.

Preglednica 9: Receptura apnene malte z apnenčastim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Apno (apneno testo)</b>	0.320 kg
<b>Agregat apnenec</b>	1.312 kg
<b>Voda</b>	0.125 kg

Preglednica 10: Receptura apnene malte z dolomitnim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Apno</b>	0.320 kg
<b>Agregat dolomit</b>	1.312 kg
<b>Voda</b>	0.125 kg

### 3.3.6 Receptura apnene malte z dodatkom tufa

Tudi pri apnenih mešanicah z dodatkom tufa smo uporabili enak postopek določanja potrebnih količin kot pri čisti apneni malti, le da smo količino apna zmanjšali za cca. 10% na račun tufa. Z dodajanjem tufa apnu povečamo trdnost in odpornost malte, zato je bil tuf pogosto dodatek k apneni malti.

Preglednica 11: Receptura apnene malte z dodatkom tufa z apnenčastim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Apno</b>	0.342 kg
<b>Tuf</b>	0.042 kg
<b>Agregat apnenec</b>	1.142 kg
<b>Voda</b>	0.162 kg

Preglednica 12: Receptura apnene malte z dodatkom tufa z dolomitnim agregatom.

Priprava mešanice za 1 liter	
<b>Apno</b>	0.342 kg
<b>Tuf</b>	0.042 kg
<b>Agregat dolomit</b>	1.142 kg
<b>Voda</b>	0.162 kg

## 4 MERITVE IN REZULTATI PREISKAV

### 4.1 Meritve razleza sveže malte

Pri vsaki mešanici smo opravili preiskavo razleza na sveži malti. Doseženi razlezi so se gibali v območju  $140 \pm 10$  mm.

Na stresalno mizo smo postavili skrajšan kovinski konus, ki smo ga napolnili z malto. Malto smo vgrajevali v dveh plasteh, pri čemer smo vsako plast zbili z lesenim batom, z 20-timi udarci. Minuto po končanem vgrajevanju smo konusni lijak vzdignili in začeli s tresenjem stresalne mizice. Hitrost tresenja znaša en udarec na sekundo. Po 15-ih padcih stresalne mizice za 10 mm smo zmerili razlez sveže malte. Izmerili smo velikost razleza v pravokotnih smereh ter izračunali povprečno vrednost obeh meritev (Žarnič, 2011).

Rezultati meritev povprečnih vrednosti, glede na mešanico so podani v preglednici 13.

Preglednica 13: Razlez sveže cementne in apnene malte.

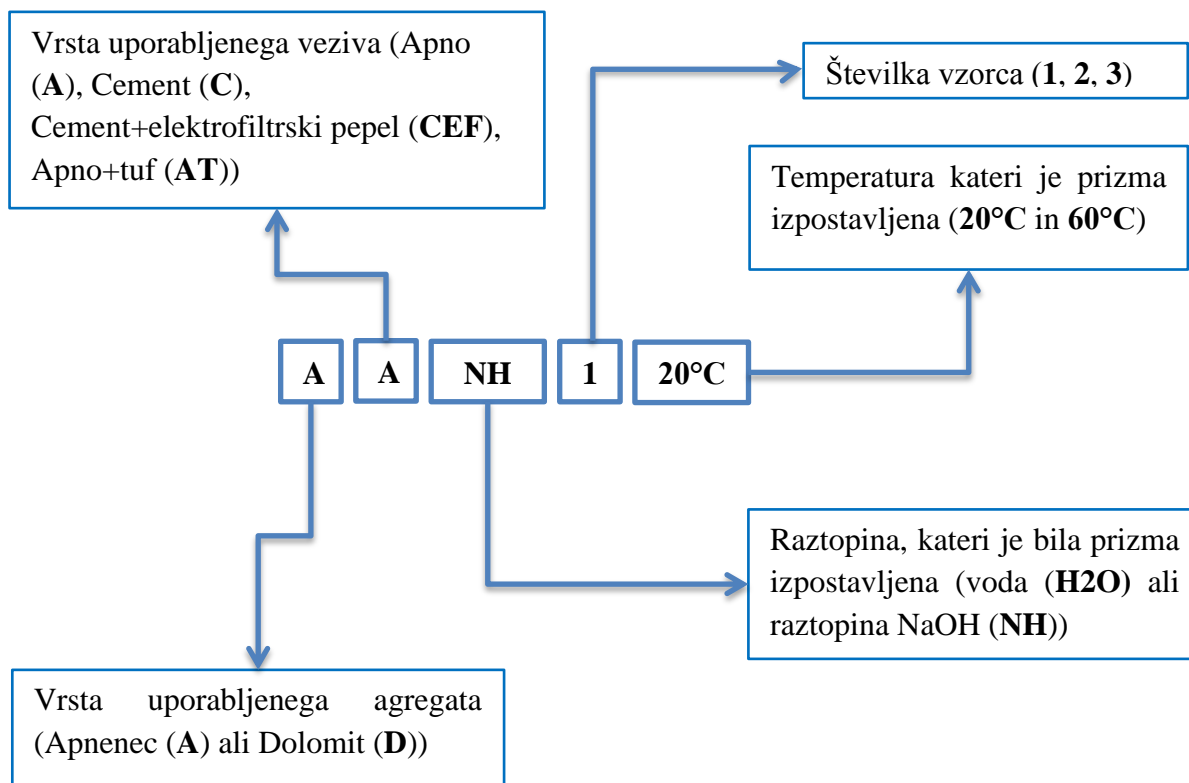
<b>Agregat apnenec</b>		
Vrsta veziva	Velikost razleza [mm]	Standardni odklon [mm]
<b>Apno</b>	130	$\pm 3$
<b>Apno + tuf</b>	133	$\pm 2$
<b>Cement</b>	141	$\pm 2$
<b>Cement + elektrofiltrski pepel</b>	133	$\pm 4$
<b>Agregat dolomit</b>		
Vrsta veziva	Velikost razleza [mm]	Standardni odklon [mm]
<b>Apno</b>	129	$\pm 6$
<b>Apno + tuf</b>	132	$\pm 2$
<b>Cement</b>	141	$\pm 9$
<b>Cement + elektrofiltrski pepel</b>	130	$\pm 6$

## 4.2 Meritve in rezultati preiskav na strjenih maltah

### 4.2.1 Oznake vzorcev

Pri izdelavi prizem smo naredili po tri paralelke, na katerih smo izvajali meritve. Za predstavitev mas in spremembe dolžin smo si za grafičen prikaz rezultatov izbrali prizmo številka 1 (prvo izmed treh paralelek), saj bi bili drugače grafi, zaradi prevelike zasičenosti s podatki, nepregledni. Če je bila prizma 1 poškodovana, smo namesto tega vzeli prizmo 2 ali 3. Oznake so prikazane na sliki 2.

Pri tlačnih in upogibnih trdnostih pa smo prikazali rezultate, dobljene na treh prizmah ter določili povprečne vrednosti dobljenih rezultatov in pripadajoče standardne odklone.

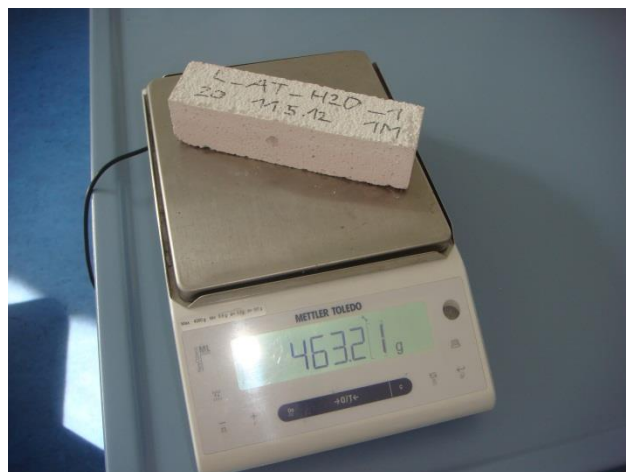


Slika 2: Oznake prizem.

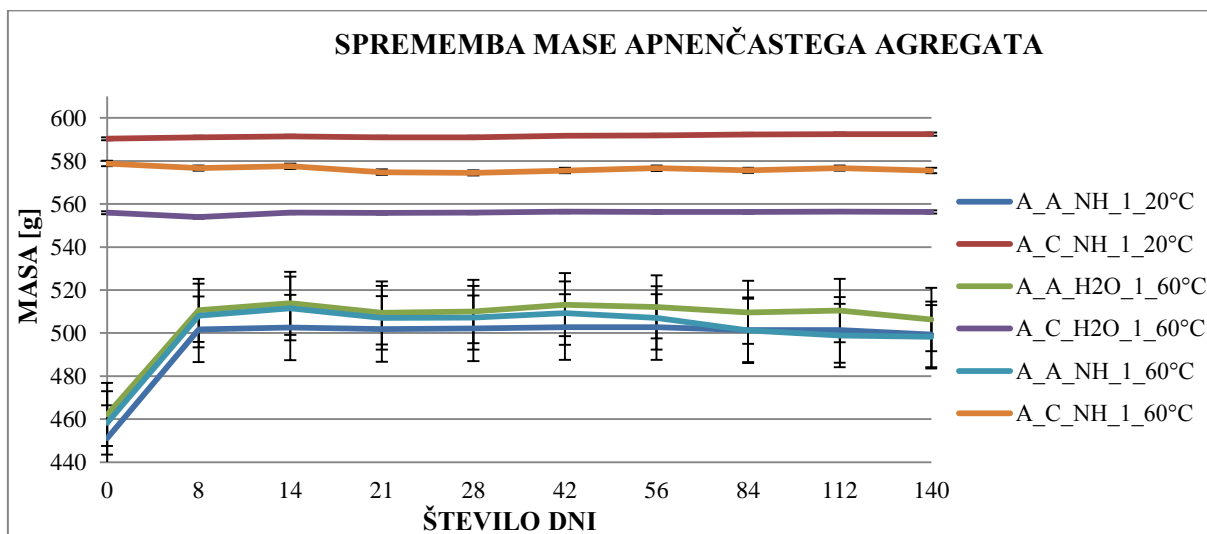
#### 4.2.2 Meritve mase

Meritve mase smo opravljali z elektronsko tehtnico z natančnostjo 0.001 g (slika 3). Preden smo dali preizkušance v deionizirano vodo ali 1M NaOH raztopino, smo izmerili mase v stanju nič. Nato smo prizme dali v deionizirano vodo ali v raztopino 1M NaOH in jih izpostavili temperaturama 20°C in 60°C. Najprej smo jih izmerili čez 4 dni, nato pa na vsakih 7 dni. Po 28 dneh pa smo mase merili samo še enkrat na mesec.

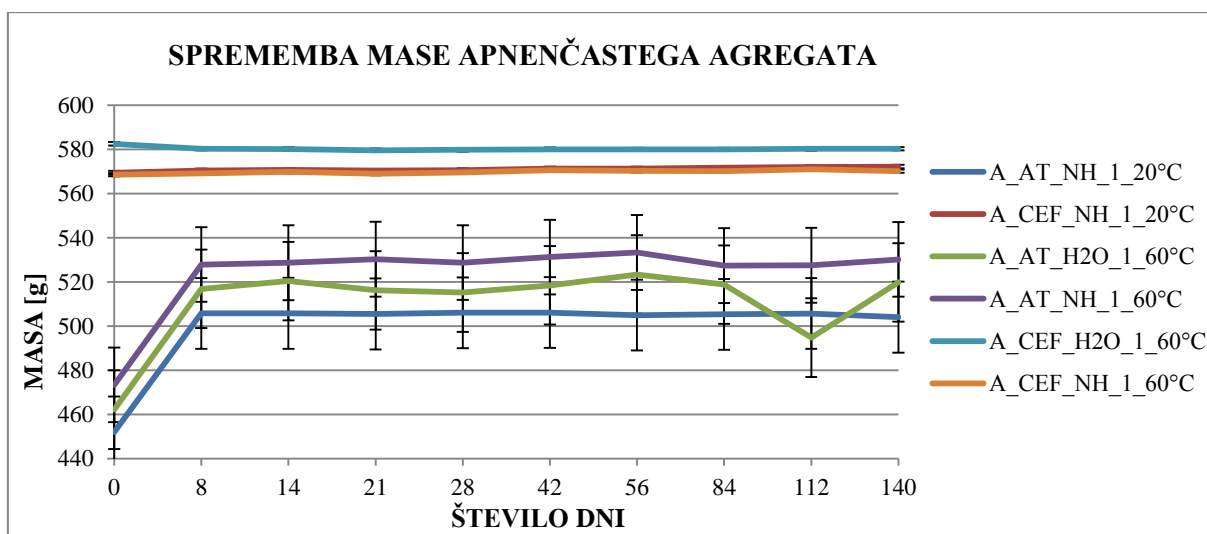
Ko smo prizme vzeli iz raztopine, smo jih naprej zložili in vsako posebej obrisali. Tako smo poskušali zagotoviti enake pogoje vlažnosti za vse preizkušance.



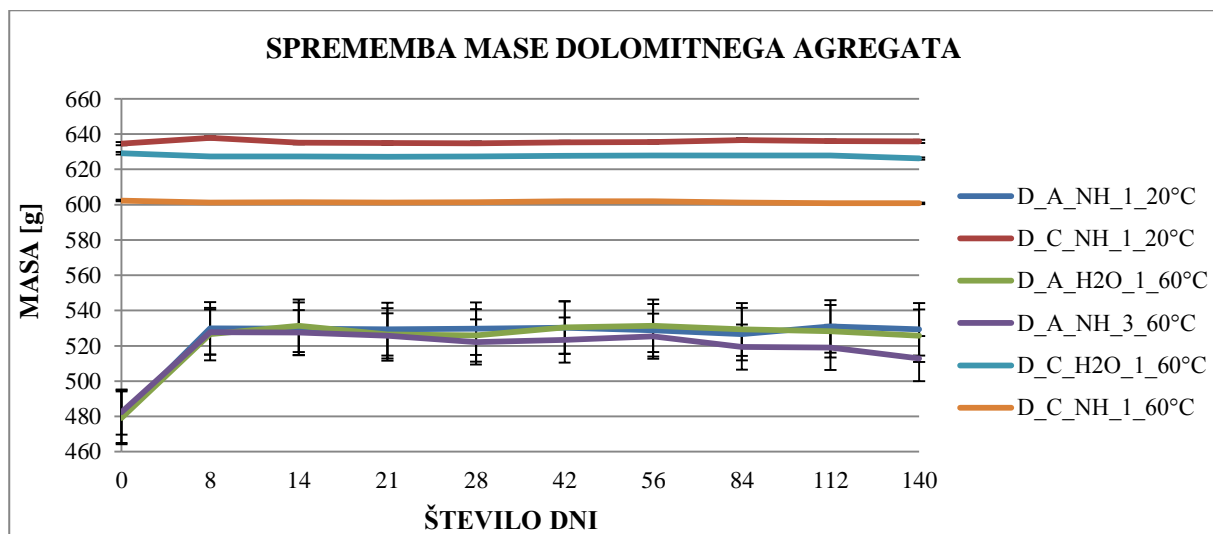
Slika 3: Digitalna tehtnica za merjenje mase vzorcev.



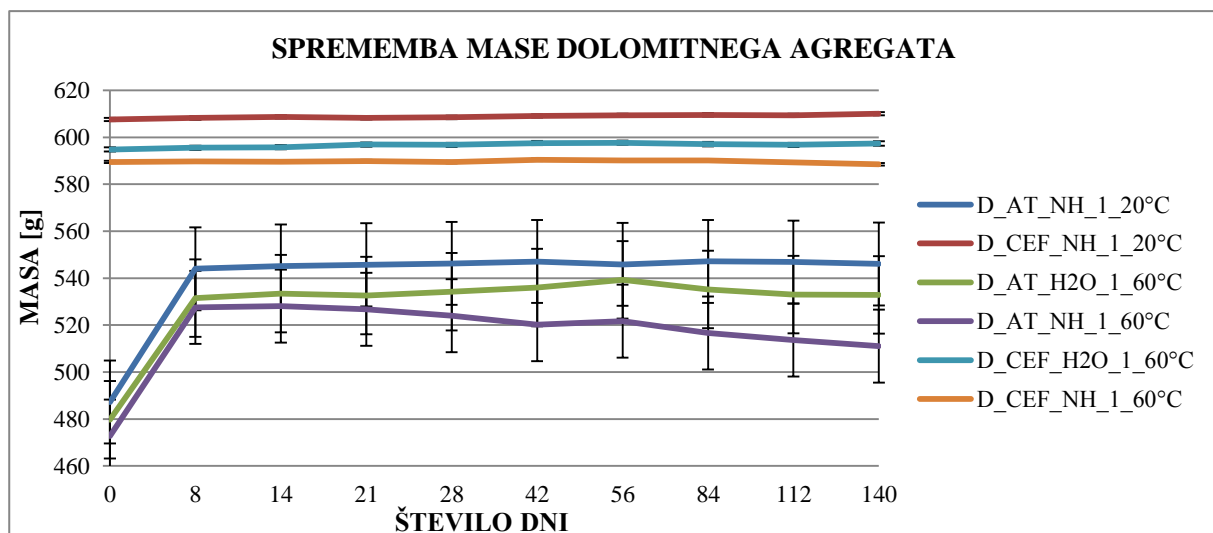
Graf 1: Sprememba mase pri prizmah iz apnenčastega agregata z apnenim ali cementnim vezivom.



Graf 2: Sprememba mase pri prizmah iz apnenčastega agregata z vezivom iz apna in tufa ali z vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela.



Graf 3: Sprememba mase prizem iz dolomitnega agregata z apnenim ali cementnim vezivom.



Graf 4: Sprememba mase prizme iz dolomitnega agregata in vezivom iz apna in tufa ali vezivom iz cementa in elektrofiltrskega pepela.



### **Apno in apno s tufom:**

Apnene prizme smo negovali 3 mesece v laboratoriju pri konstantni temperaturi. Apnene prizme z dodatkom tufa pa 56 dni. Nato smo jih dali v raztopini deionizirane vode in 1M natrijevega hidroksida ter izpostavili različnim temperaturama, 20°C in 60°C. Spremembe mase smo prikazane na grafu 1, 2, 3 in 4.

Pri vseh prizmah z vezivom iz apna ali apna in tufa je bilo v prvih 8-ih dneh veliko povečanje mase, tudi do 50 g. Prizme so bile zelo porozne in suhe. Zato so ob potopitvi v raztopino absorbirale veliko količino vode. Vendar se je po cca 21 dneh masa prizem začela postopoma zmanjševati, predvsem pri prizmah izpostavljenih temperaturi 60°C. Znižala se je največ do nekje 10 g.

### **Cement in cement z elektrofiltrskim pepelom:**

Cementne prizme in cementne prizme z dodatkom elektrofiltrskega pepela pa smo za 28 dni potopili v vodo, preden smo jih dali v raztopini in izpostavili temperaturama 20°C in 60°C. Spremembe mase so prav tako prikazane na grafu 1, 2, 3 in 4.

Tudi pri cementnih prizmah, ki so bile izpostavljene temperaturi 20°C in 60°C, je bil opazen zelo majhen trend padanja mase. Sprememba mas je bila največ nekje do 5 g. Vendar je bila sprememba mase vseeno manj skokovita, kot pri apnenih prizmah. Sprememba je bila manjša kot pri apnenih prizmah, saj so bile prizme tudi manj porozne ter so bile že 28 dni potopljene v vodno raztopino, preden so bile izpostavljene različnim raztopinam za staranje preizkušancev. Razlog za opaženo zmanjševanje mas malt s pretežno cementnim vezivom pri dolomitnem agregatu bi lahko bila tudi prisotnost alkalno-karbonatne reakcije, saj jo izpostavljenost povišanim temperaturam in agresivnemu alkalnemu okolju le še pospeši (Prinčič, 2013).

#### **❖ Temperatura 20°C**

- Cementne prizme: mase preizkušancev so se v času treh mesecev počasi povečevale nekje do 3 g.
- Apnene prizme: mase preizkušancev so se do cca 21 dneva postopoma povečevale ali so bile konstantne ter nato začele počasi padati. Spremembe mase so bile od začetka do konca merjenja tudi do 50 g.

#### **❖ Temperatura 60°C**

- Cementne prizme: masa preizkušancev na začetku počasi narašča ali pa je konstantna, proti koncu trimesečnega obdobja merjenja pa začne padati. Spremembe so bile nekje do 5 g.
- Apnene prizme : masa preizkušancev ponekod niha, najprej pada, nato spet raste, proti koncu pa začne spet padati. Večinoma pa se je nekje do 21. dneva povečevala, nato pa začela počasi padati. Spremembe mase so bile od začetka do konca merjenja tudi do 60 g.

### 4.2.3 Meritve spreminjanja dolžin

Spreminjanje dolžine maltnih prizmic (krčenje ali raztezanje) smo merili z Graf – Kaufmanovim deformetrom (slika 4). Izdelan je za meritve deformacij prizem velikosti 40/40/160 mm. Sestavljen je iz stojala za prizme in merilne urice, s katere odčitamo velikost skrčka oz. raztezka. Prizmo, ki ima reperje, postavimo v stojalo in na urici odčitamo izmerjeno vrednost. Na začetku vsakega merjenja moramo merilno urico najprej umeriti (nastavimo vrednost nič) s pomočjo kovinske prizme iz invar jekla (Žarnič, 2011). Rezultate meritev sem predstavil na grafih 5 in 6 ter 7 in 8. Gre za meritve, ki so bile izmerjene za stanje nič (preden so bile prizme položene v raztopine) ter potem po 3, 7, 14, 28, 56, .... dneh.



Slika 4: Graf – Kaufmanov deformeter.

Kot je zapisano v priporočilu RILEM TC 191-ARP:AAR-2 (RILEM, 2000), lahko s pomočjo izmerjenih sprememb dimenzij prizem ugotovimo, če gre za alkalno-agregatno reakcijo (AAR), ki povzroča ekspanzije. Vendar je postopek preiskave v tem priporočilu drugačen, kot smo ga uporabili sami, saj preiskave potekajo v 1M NaOH raztopini pri temperaturi 80 °C. Kljub temu lahko kot kriterij uporabimo priporočene meje vsaj za primer, ko so naše prizme odležavale v 1M NaOH raztopini pri temperaturi 60 °C, pri čemer je potrebno vrednosti pomnožiti z 0.54, ker smo mi uporabili prizme 40x40x160 mm, priporočene mejne vrednosti pa veljajo za prizme 25x25x285 mm. Priporočene mejne vrednosti so naslednje:

Ekspanzije po 14 dneh izpostavljenosti pospešenemu staranju (starost prizem 16 dni):

- Če je ekspanzija  $< 0.10\%$  gre po vsej verjetnosti za nereaktivne materiale.
- Če je ekspanzije  $> 0.20\%$  gre po vsej verjetnosti za reaktivne materiale, ki znajo sprožiti alkalno agregatno reakcijo.

Dolžine prizem smo merili z Graf-Kaufmanovim deformetrom, ki nam na 0.001 mm natančno izmeri spremembo dolžine prizme. Vse meritve smo sproti beležili in jih potem v Excelu ustrezno analizirali in prikazali na grafih 5 in 6 ter 7 in 8.

Spremembo dolžine prizem smo računali po enačbi (enačba 6) za spremembo dolžine :

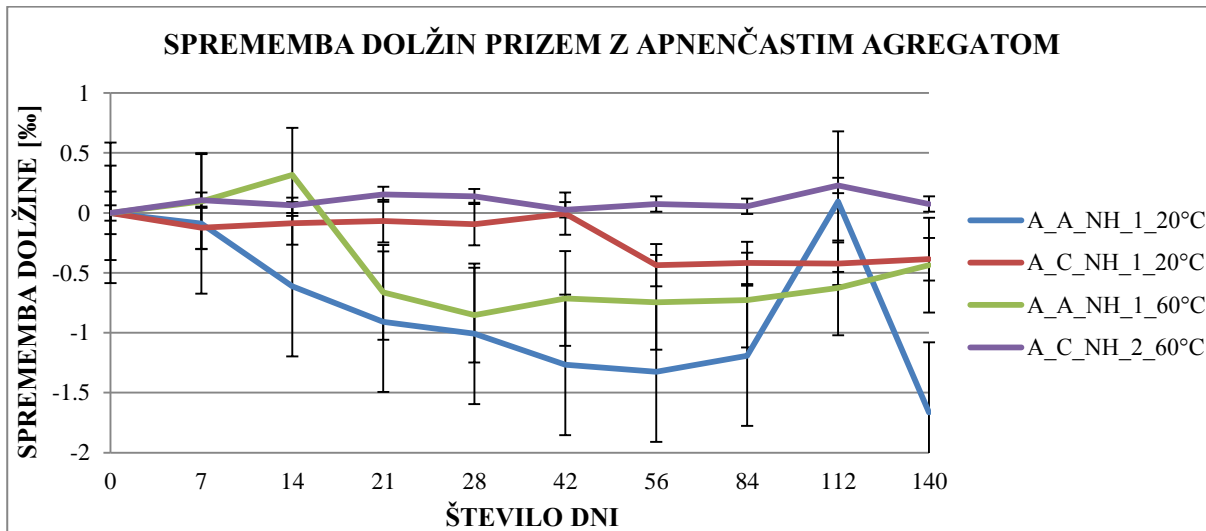
$$\% = 1000 * (L_n - L_0) / \text{začetna dolžina prizme}$$

Enačba 6: Enačba za izračun spremembe dolžine.

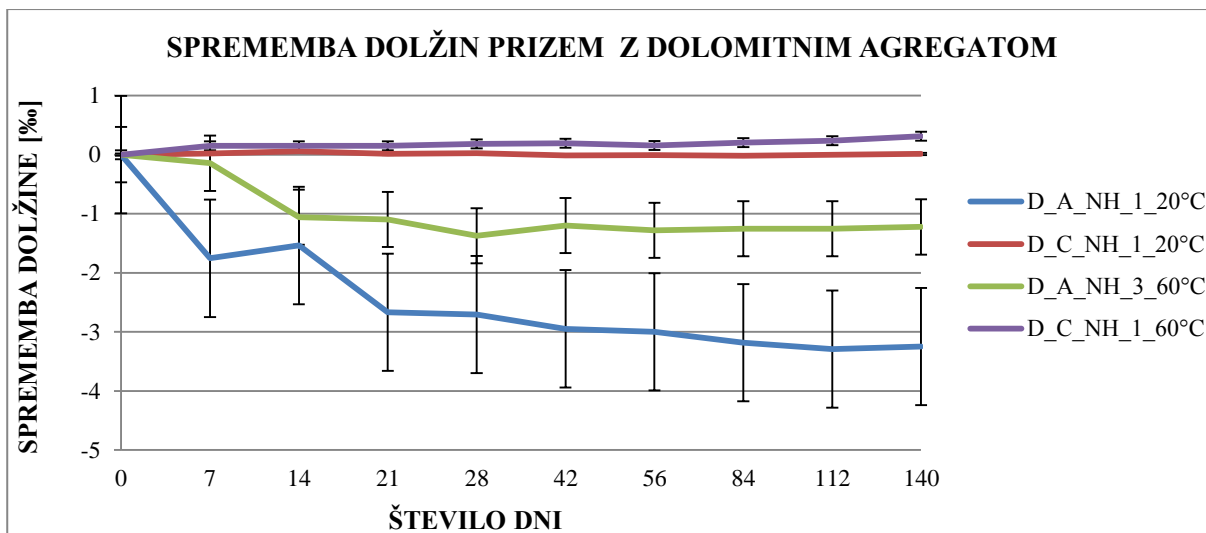
$L_n$  ... odčitek na merilni urici za prizmo, ki je bila n dni v raztopini 1M NaOH ali v destilirani vodi

$L_0$  ... odčitek na merilni urici, preden so bile prizme izpostavljene izbranim pogojem okolja (običajno ali pospešeno staranje)

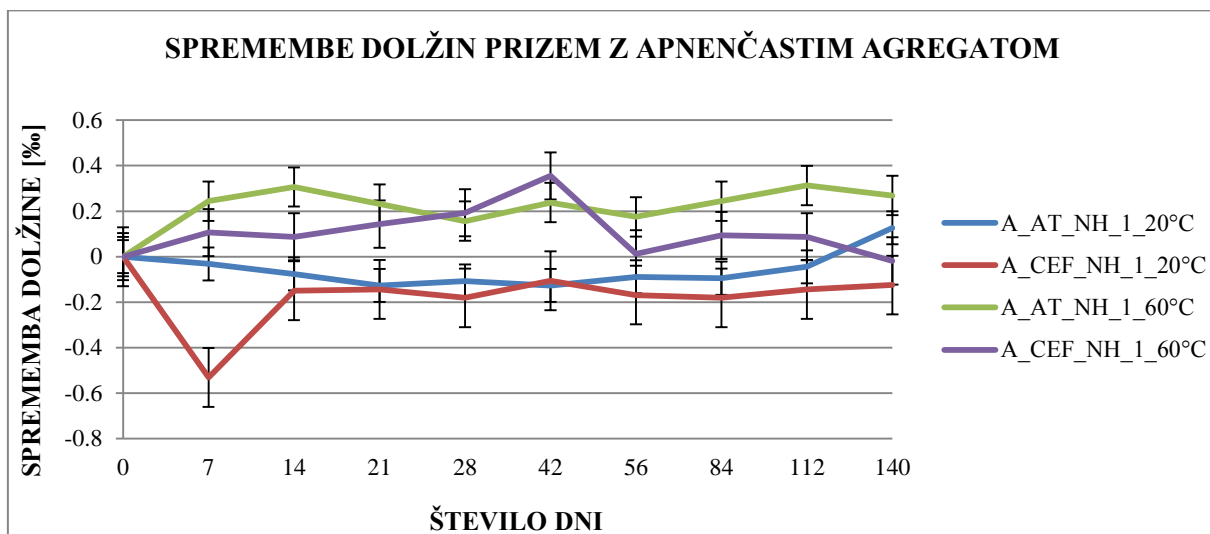
Pri grafih 5, 6, 7, 8 sem uporabil funkcijo standardnega odklona. Standardni odklon nam pove za koliko izmerjene vrednosti odstopajo od povprečja.



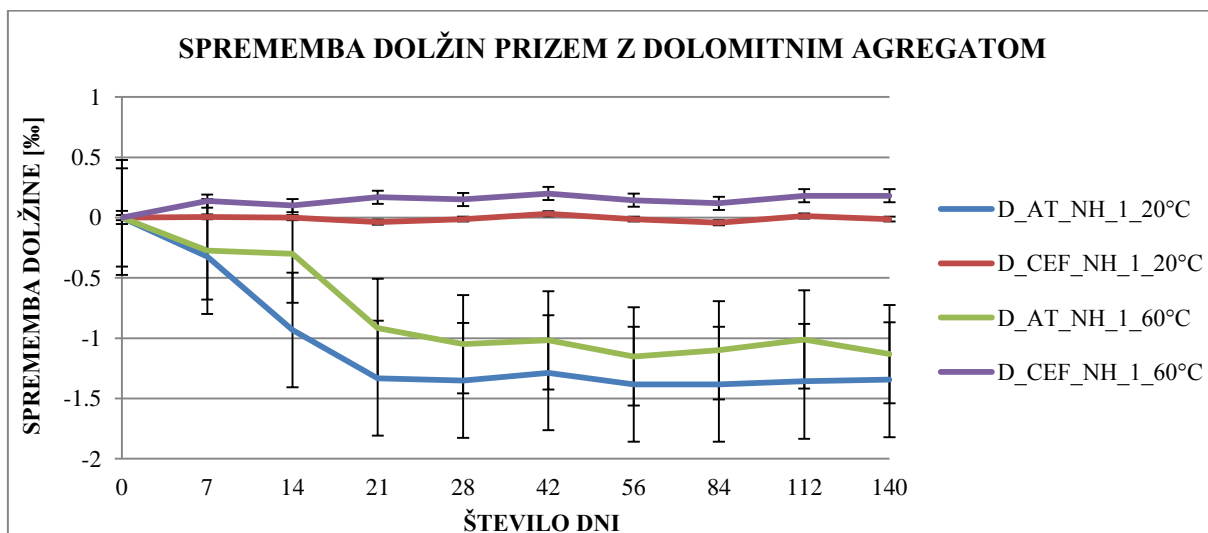
Graf 5: Spremembe dolžin cementnih in apnenih prizem z apnenčastim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida.



Graf 6: Spremembe dolžin cementnih in apnenih prizem z dolomitnim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida.



Graf 7: Sprememba dolžin cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela ter apnenčastim agregatom in apnenih prizem z dodatkom tufa ter apnenčastim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida.



Graf 8: Sprememba dolžin cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela ter dolomitnim agregatom in apnenih prizem z dodatkom tufa ter dolomitnim agregatom v 1M raztopini natrijevega hidroksida.

Pri merjenju spremembe dolžine apnenih in cementnih prizem ni bilo zaznati velikih sprememb dolžin. Spremembe dolžin, merjene na serijah s tremi vzorci niso pretirano odstopale med seboj. Pri cementnih prizmah in prizmah iz cementa in elektrofiltrskega pepela se je pojavilo manjše raztezanje. Predvsem je lepo vidna razlika med 20°C in 60°C. Pri apnenih prizmah in prizmah iz apna in tufa pa je šlo v večini primerov za krčenje oziroma zmanjševanje dolžine, ki je najverjetneje posledica izgube veziva. Krčenje je bilo manjše pri temperaturi 60°C.

Prizme izpostavljene temperaturi 60°C so imela manjše krčenje (apnene prizme) oz. večje raztezanje (cementne prizme), kar je razvidno iz grafov 5, 6, 7 in 8. Da do večjih sprememb dolžin ne prihaja v primerjavi z alkalno-silikatno reakcijo (ASR), je v svojem članku opisal že Katayama (Katayama, 2004).

Za bolj podrobno raziskavo alkalno-karbonatne reakcije (ACR), je bila med opravljanjem moje diplomske naloge narejena tudi mikroskopska raziskava obruskov cementnih in apnenih prizem (Prinčič, 2013, Štukovnik, 2013a, Štukovnik, 2013b, Štukovnik, 2013c).

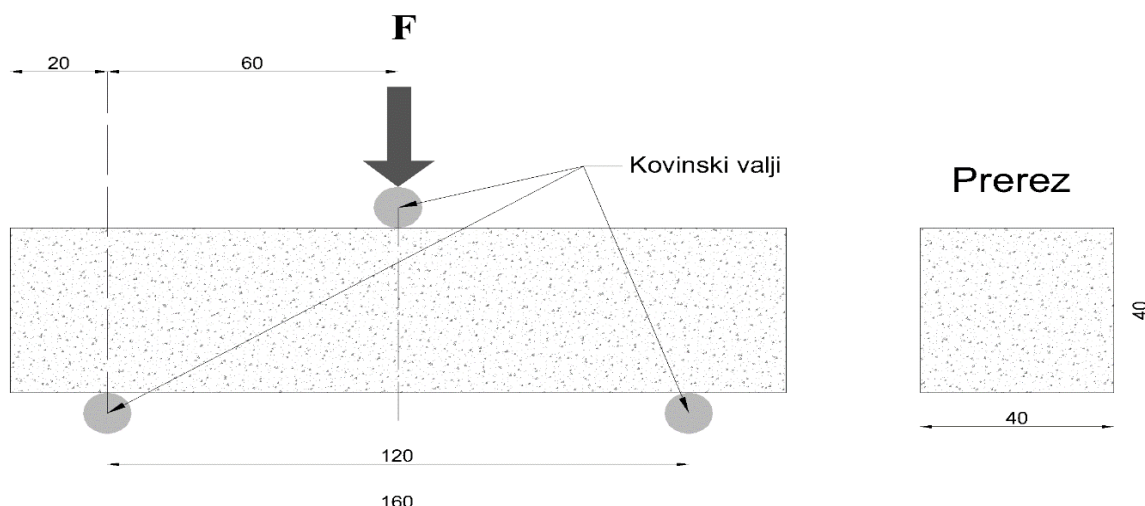
#### Opažanja:

Problem, ki se je pojavljal tekom meritev dolžin je bil, da reperjev ponekod apnena malta ni dovolj dobro objela. Zato reper ni bil dobro vsidran v prizmo in se je začel premikati. To je razlog, da se ponekod na grafih pojavijo manjši skoki. Ta problem se je najbolj pojavljal pri apnenih maltah. Poskusili smo ga popraviti z dvokomponentnim epoksi lepilom, vendar sta ga agresivno alkalno okolje in temperatura 60°C uničila.

Vizualen pregled prizem je pokazal, da so prizme z apnenim vezivom bile podvržene izgubi materiala, predvsem veziva. Tovrstno obnašanje je bilo najbolj izrazito pri prizmah izpostavljenih temperaturi 60°C in raztopini natrijevega hidroksida (1M NaOH). Visoka temperatura in agresivno alkalno okolje imata očitno zelo uničujoč vpliv na preizkušance z apnenim vezivom, še posebej na čiste apnene prizme.

### 4.3 Upogibne preiskave

Upogibne preiskave smo opravljali v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Preiskave smo izvajali na cementnih in apnenih prizmah dimenzij 40/40/160 mm. Pred upogibnimi preiskavami je bilo potrebno pravilno pripraviti prizme in ustrezno označiti točke podpor (slika 5). Preizkus je bil opravljen s standardnimi porušnimi metodami po standardu SIST EN 12390-5 (SIST, 2001).



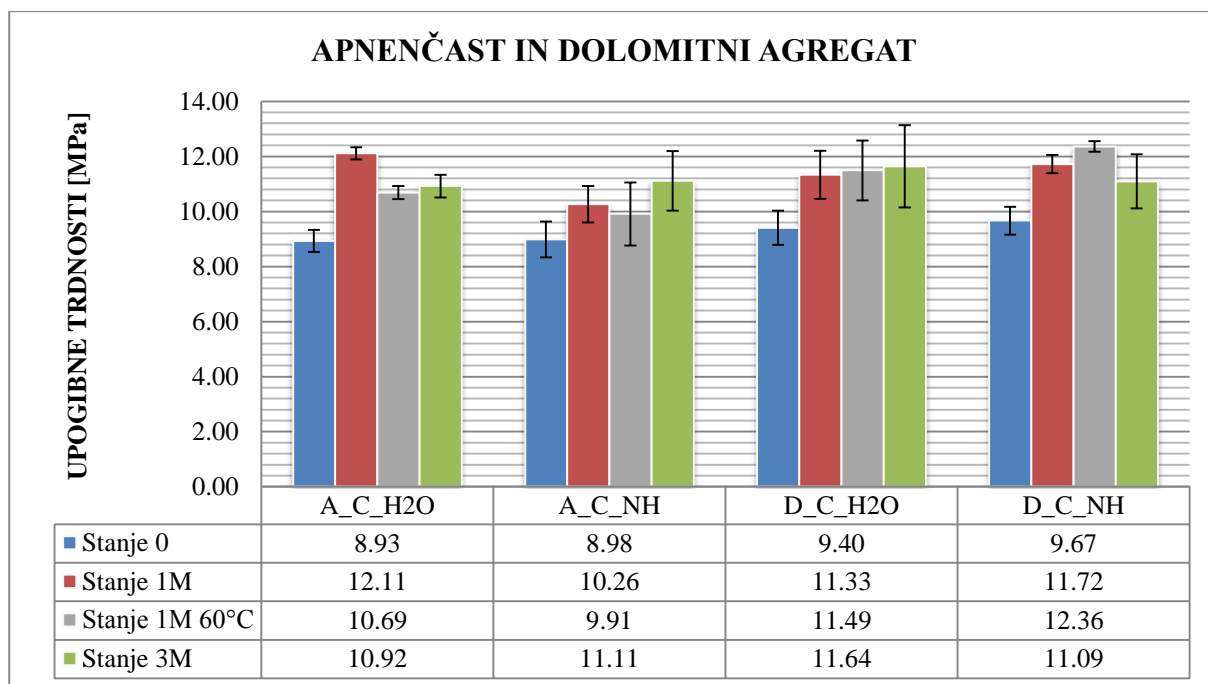
Slika 5: Predpriprava prizme za izvajanje upogibnega preizkusa po standardu SIST EN 12390-5 (SIST, 2001).

Prizme smo postavili na dva valja s točno predpisano medsebojno razdaljo. Na vrhu smo jih na sredini obtežili z valjem, preko katerega smo postopoma večali silo na prizmo na sredini razpona med podporama. Ko je sila dosegla upogibno nosilnost prizme, se je preizkušanec porušil oz prelomil. Zabeležili smo največjo silo, preden je nastopila porušitev (slika 6).



Slika 6: Prikaz upogibne preiskave apnene prizme.

### 4.3.1 Cemente prizme



Graf 9: Primerjava upogibnih trdnosti cementnih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Pri cementnih prizmah z apnenčastim in dolomitnim agregatom, preden so bile potopljene v raztopino 1M NaOH in deionizirano vodo, ni bilo opaziti večjih razlik med upogibnimi trdnostmi. Vrednosti pri apnenčastem agregatu so bile slabih 9 MPa, pri dolomitnem agregatu pa nekje do 9.7 MPa.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Upogibne trdnosti so se pri obeh agregatih povečale glede na začetno stanje. Največji skok se je zgodil pri apnenčastem agregatu in sicer za 36 %. Pri dolomitnem agregatu se je upogibna trdnost povečala za slabih 20 %.

Upogibna trdnost pri apnenčastem agregatu, ki je bil izpostavljen temperaturi 60°C, se je povečala za 20 % in za 22 % pri dolomitnem agregatu, glede na začetno stanje.



- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Upogibna trdnost se je glede na začetno stanje pri apnenčastem agregatu povečala za 14 % in pri dolomitnem agregatu za 21 %.

Upogibna trdnost pri apnenčastem agregatu, ki je bil izpostavljen temperaturi 60°C, se je po enem mesecu povečala za 10 % in za 28 % pri dolomitnem agregatu.

### Stanje 3 meseci:

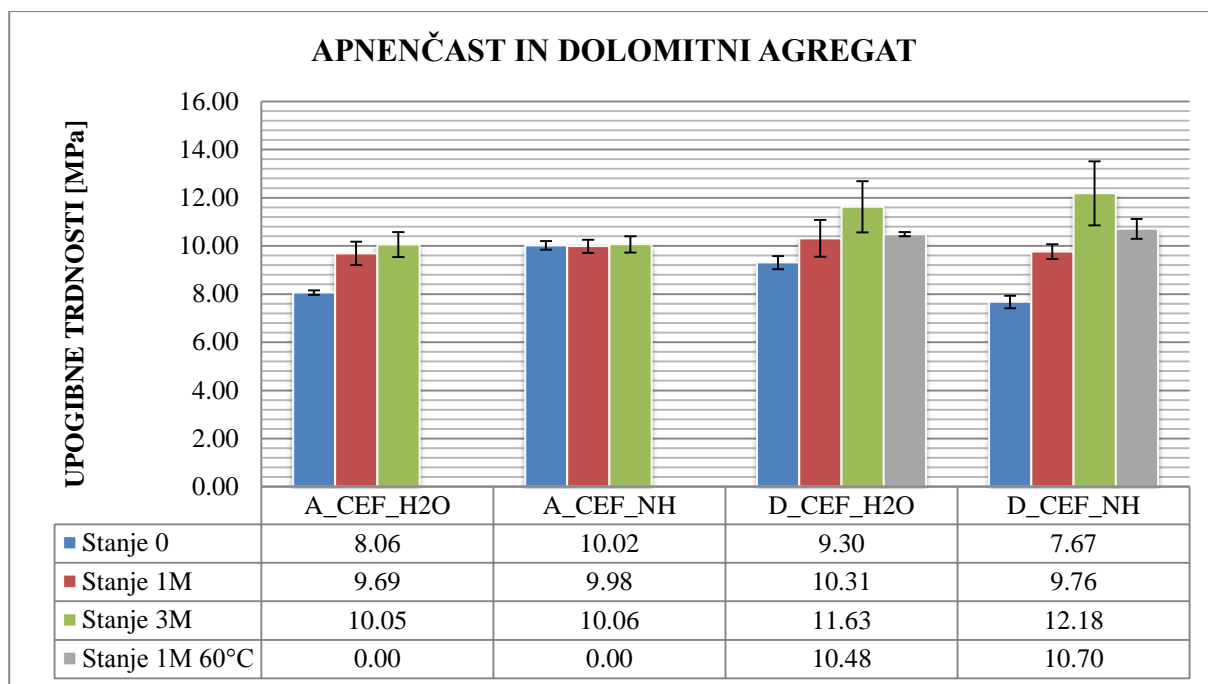
- **Prizme v deionizirani vodi**

Upogibne trdnosti so se, glede na stanje po enem mesecu, zmanjšale za 10 % pri apnenčastem agregatu in povečala za 3 % pri dolomitnem agregatu

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri izpostavljenosti 1M natrijevemu hidroksidu pa so se upogibne trdnosti, glede na stanje po enem mesecu, povečale pri apnenčastem agregatu za 8 % in zmanjšale pri dolomitnem agregatu za 5 %.

### 4.3.2 Cementne prizme z dodatkom elektrofiltrskega pepela



Graf 10: Primerjava upogibnih trdnosti cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Preden so bile prizme potopljene v vodo ali NaOH raztopino, so dosegale dokaj različne upogibne trdnosti, nekje med 7.5 MPa in 10 MPa. Razlike med upogibnima trdnostima med vodo in raztopino NaOH so bile pri apnenčastem agregatu 24 %, pri dolomitnem agregatu pa 17 %.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Trdnost se je pri malti iz apnenčastega agregata v deionizirani vodi povečala za 20 %, pri dolomitnem agregatu pa za 11 %, glede na začetno stanje.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri dolomitnem agregatu se je trdnost povečala glede na začetno stanje, in sicer za 27 %, pri prizmah z apnenčastim agregatom pa je ostala enaka, in sicer 10 MPa.

### **Stanje 3 meseci:**

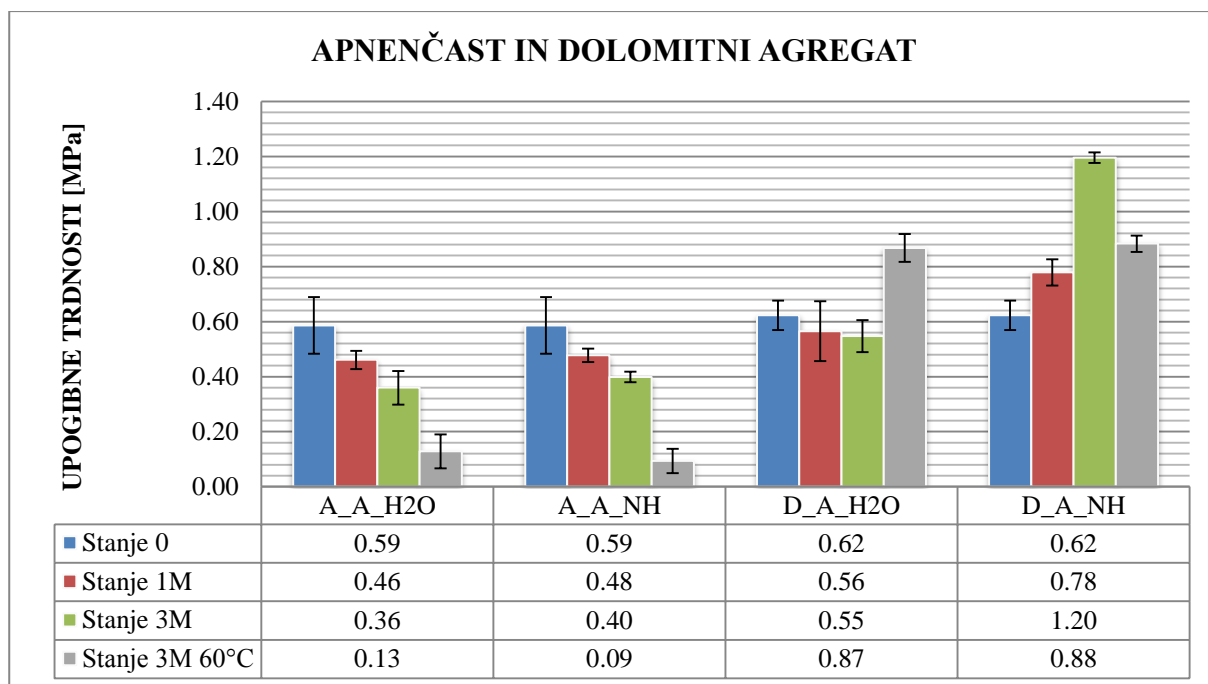
- **Prizme v deionizirani vodi**

Po treh mesecih se upogibne trdnosti niso bistveno povečale, nekje do 4 % pri apnenčastem agregatu. Večje povečanje pa je bilo pri dolomitnem agregatu, in sicer za 13 %. Vse ta povečanja smo opazovali glede na stanje po enem mesecu.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Prizmam iz apnenčastega agregata se, glede na stanje po enem mesecu, upogibne trdnosti niso veliko spremenile. Povečanje trdnosti je bilo za slab odstotek. Večje povečanje pa je bilo moč zaznati pri dolomitnem agregatu, in sicer za 25 %.

### 4.3.3 Apnene prizme



Graf 11: Primerjava upogibnih trdnosti apnenih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Upogibne trdnosti preizkušancev so pri apnenčastem in dolomitnem agregatu skoraj enake. Pri apnenčastem agregatu so znašale 0.59 MPa in pri dolomitnem agregatu pa 0.62 MPa.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Upogibne trdnosti po enem mesecu izpostavljenosti raztopini začnejo padati. Padec pri apnenčastem agregatu znaša 21 %, pri dolomitnem agregatu pa le 9 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Prizmam iz apnenčastega agregata so se upogibne trdnosti glede na začetno stanje zmanjšale za 19 %. Pri dolomitnem agregatu, ki je bil izpostavljen 1M natrijevemu hidroksidu, so se upogibne trdnosti povečale za 25 %.

### **Stanje 3 meseci:**

- **Prizme v deionizirani vodi**

Upogibne trdnosti glede na stanje po enem mesecu še vedno padajo. Pri apnenčastem agregatu se zmanjšajo za 22 %. Manjši padec trdnosti je pri dolomitnem agregatu in sicer 3%.

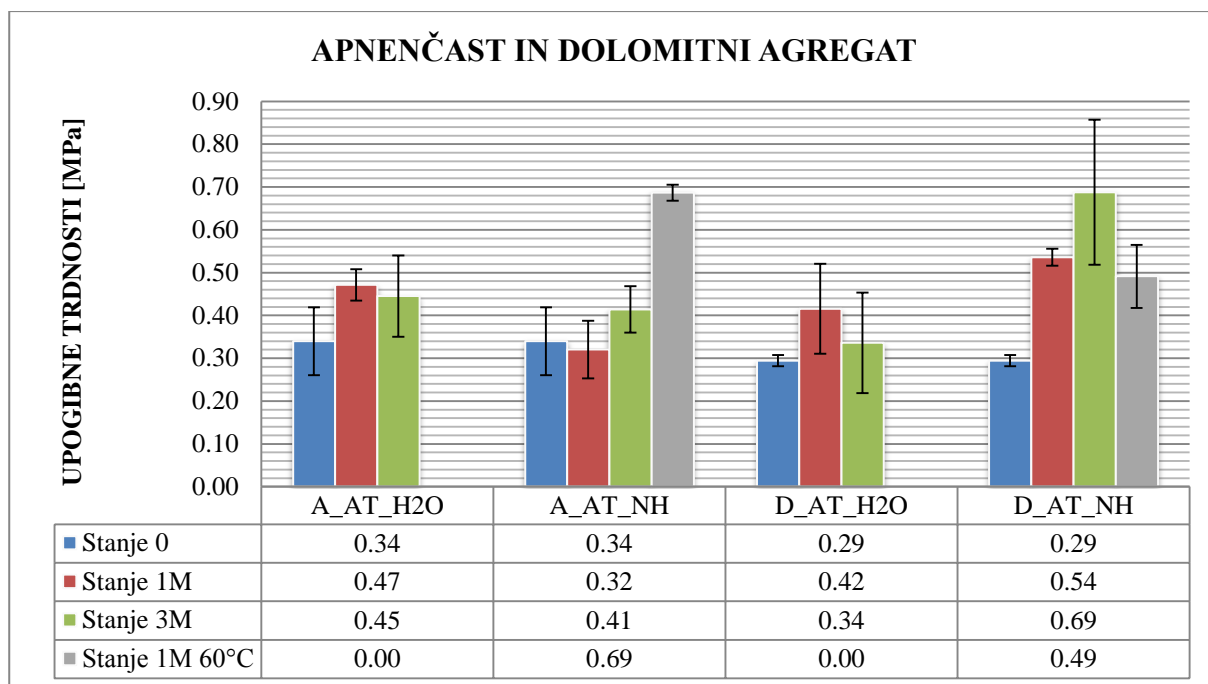
Upogibna trdnost malte iz apnenčastega agregata, izpostavljene temperaturi 60°C, se zmanjša za 78 %. Pri dolomitnem agregatu pa se poveča za 39 %. Vsa opažanja so glede na dobljene rezultate preiskav pri začetnem stanju.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Upogibne trdnosti glede na stanje po enem mesecu še vedno padajo, razen pri dolomitnem agregatu. Pri apnenčastem agregatu se zmanjšajo za 17 %. Povečanje upogibne trdnosti pa se pojavi pri dolomitnem agregatu in sicer za 53 %.

Pri izpostavljenosti temperaturi 60°C se pri apnenčastem agregatu upogibna trdnost zmanjša za 84 % in pri dolomitnem agregatu pa se zmanjša za slabih 42 %, glede na začetno stanje.

#### 4.3.4 Apnene prizme z dodatkom tufa



Graf 12: Primerjava upogibnih trdnosti apnenih prizem z dodatkom tufa iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

##### Stanje 0 mesecev:

Tudi tu so upogibne trdnosti v začetnem stanju dokaj podobne: 0.34 MPa pri apnenčastem agregatu in 0.29 MPa pri dolomitnem agregatu. Razlika upogibnih trdnosti med apnenčastim in dolomitnim agregatom je dobrih 14 %.

##### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Upogibne trdnosti pri obeh agregatih narastejo glede na začetno stanje. Povečanje upogibnih trdnosti pri apnenčastem agregatu je 39 %, pri dolomitnem agregatu pa 41 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri apnenčastem agregatu izpostavljenem 1M natrijevem hidroksidu je padec upogibnih trdnosti v času enega meseca slabih 6 %. Velik skok v upogibni trdnosti pa je pri dolomitnem agregatu in sicer za 82 %.

### **Stanje 3 meseci:**

- **Prizme v deionizirani vodi**

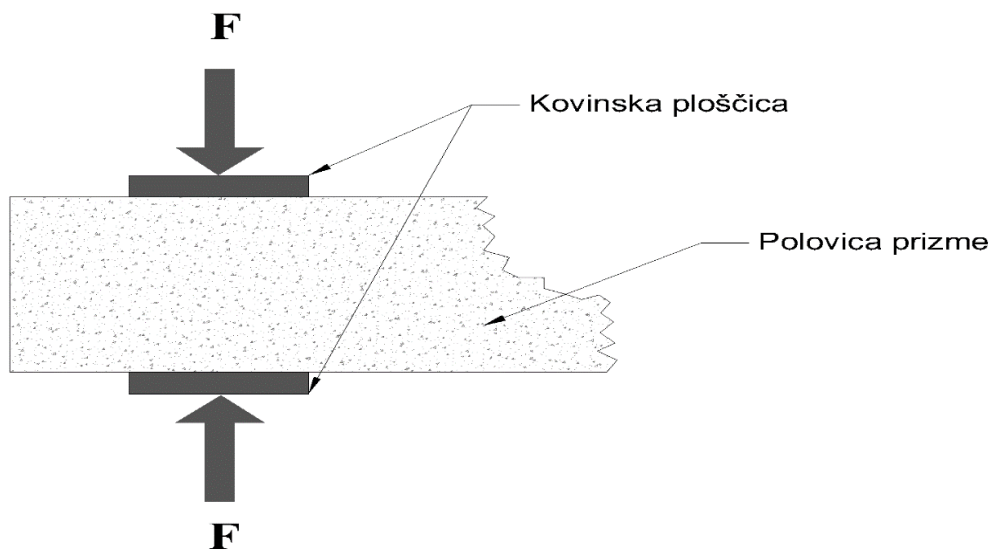
Upogibni trdnosti malt iz apnenčastega in dolomitnega agregata, ki so izpostavljene deionizirani vodi, se zmanjšata za 5 % in 19 %, glede na stanje po enem mesecu.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Povečajo pa se upogibne trdnosti malt iz apnenčastega in dolomitnega agregata, ki so izpostavljene 1M natrijevemu hidroksidu, in sicer za dobrih 28 % in 29 % glede na trdnosti izmerjene po 1 mesecu.

#### 4.4 Tlačne preiskave

Na polovičkah preizkušancev, ki smo jih dobili z upogibnimi preiskavami, smo opravili tlačne preiskave. Polovico preizkušanca smo položili v jarem za tlačne preiskave ter zabeležili maksimalno silo, preden se je preizkušanec porušil (slika 7 in 8).



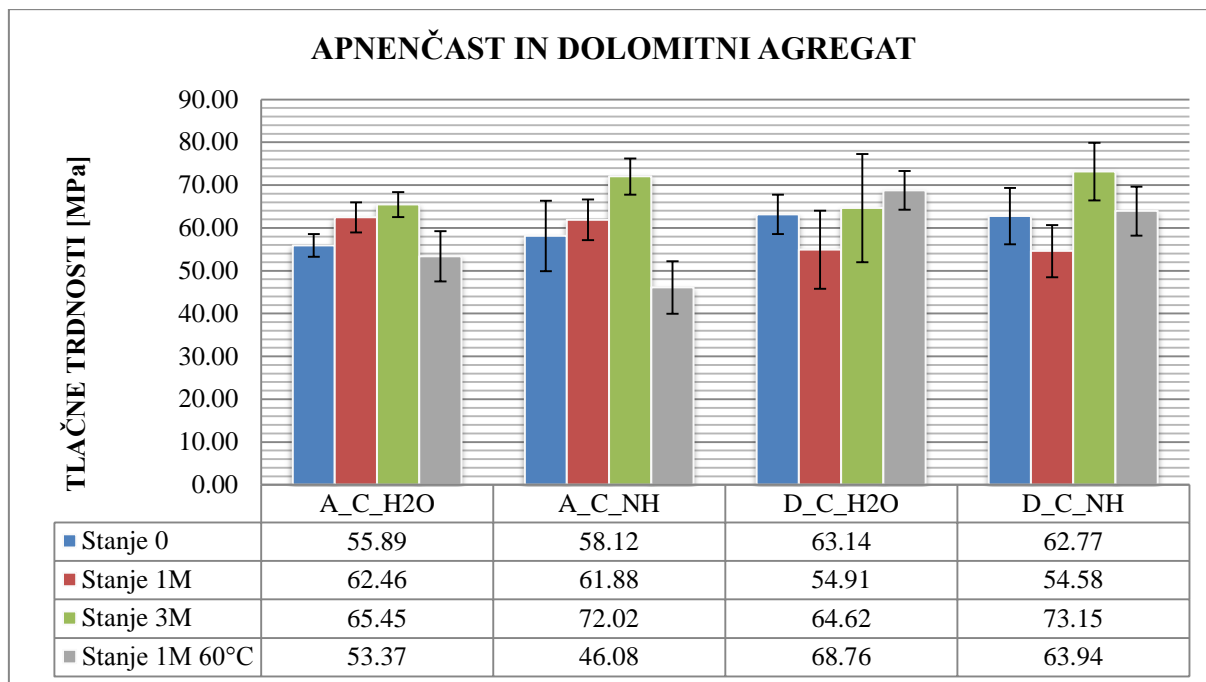
Slika 7: Prikaz tlačnega preizkusa na polovici prizme po standardu SIST EN 12390-3 (SIST, 2009b).



Slika 8: Prikaz tlačne porušitve na apnenem vzorcu.



#### 4.4.1 Cementne prizme



Graf 13: Primerjava tlačnih trdnosti cementnih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Pri začetnem stanju je tlačna trdnost malte iz dolomitnega agregata večja za slabih 11 %, glede na malto iz apnenčastega agregata. Tlačne trdnosti se gibljejo med 55 MPa in 63 MPa.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Pri temperaturi 20°C se tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu povečajo za 12 %, pri dolomitnem agregatu pa se tlačne trdnosti zmanjšajo za 13 %, glede na začetno stanje.

Tlačne trdnosti po enem mesecu izpostavljenosti temperaturi 60°C pri prizmah iz apnenčastega agregata, padejo za 5 %, pri prizmah iz dolomitnega agregata pa se tlačne trdnosti povečajo za 9 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri temperaturi 20°C se tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu povečajo za slabih 7 %, pri dolomitnem agregatu pa se zmanjšajo za 13 %, glede na začetno stanje.

Pri temperaturi 60°C se tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu zmanjšajo za 21%, pri dolomitnem agregatu pa se povečajo za 2%.

### Stanje 3 meseci:

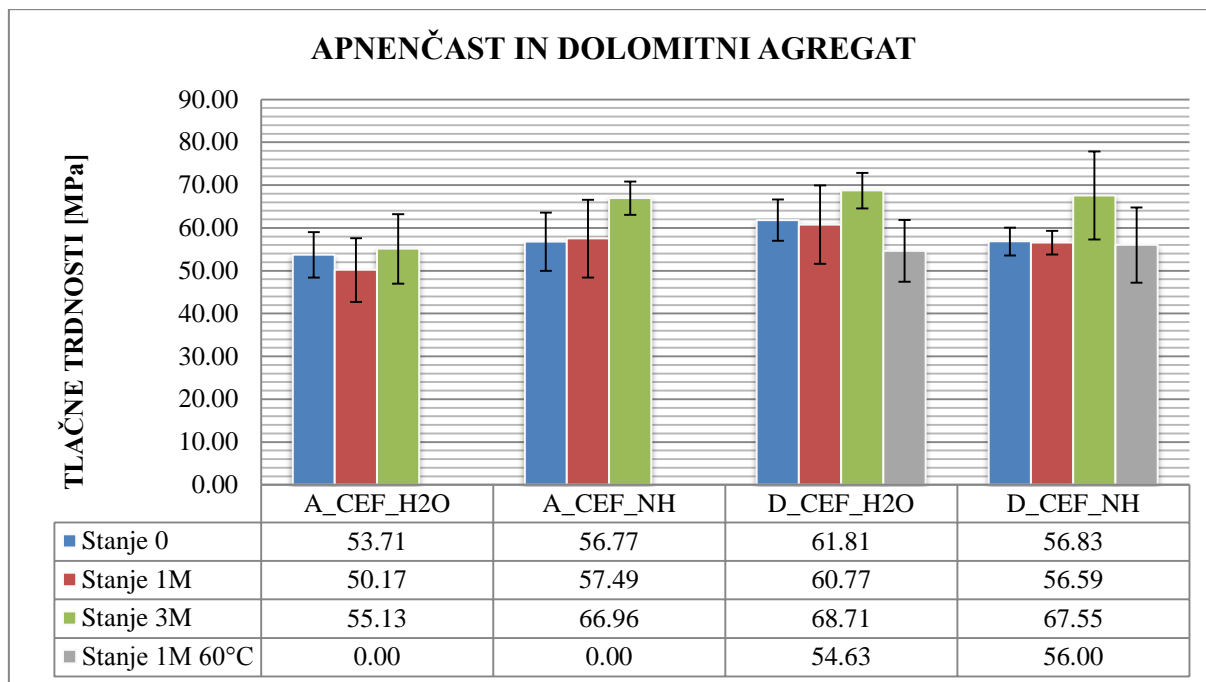
- **Prizme v deionizirani vodi**

Glede na trdnosti po 1 mesecu tlačne trdnosti še vedno naraščajo. Pri apnenčastem agregatu se povečajo za 5 %, pri dolomitnem agregatu pa za 18 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Tudi v raztopini 1M natrijevega hidroksida je opazno povečanje tlačnih trdnosti, glede na stanje po enem mesecu. Tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu se povečajo za 16 %, pri dolomitnem agregatu pa celo za 34 %.

#### 4.4.2 Cementne prizme z dodatkom elektrofiltrskega pepela



Graf 14: Primerjava tlačnih trdnosti cementnih prizem z dodatkom elektrofiltrskega pepela iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

##### Stanje 0 mesecev:

Tlačne trdnosti pri začetnem stanju, preden so bile prizme potopljene v vodo ali NaOH raztopino, se gibljejo od 54 do 62 MPa.

##### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Tlačne trdnosti so se zmanjšale pri obeh agregatih in sicer za 7 % pri apnenčastem in za 2% pri dolomitnem agregatu, glede na začetno stanje.

Pri temperaturi 60°C pa smo, zaradi pomanjkanja prostora v sušilniku, preizkušali le prizme z dolomitnim agregatom. Zabeležili smo padec tlačnih trdnosti za 12 %, glede na rezultate pri stanju 0 mesecev.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri prizmah izpostavljenih 1M natrijevemu hidroksidu, so se tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu povečale za dober 1 %, pri dolomitnem agregatu pa se niso spremenile.

Pri prizmah izpostavljenim temperaturi 60°C, pa je pri dolomitnem agregatu tlačna trdnost padla za 1 %.

### **Stanje 3 meseci:**

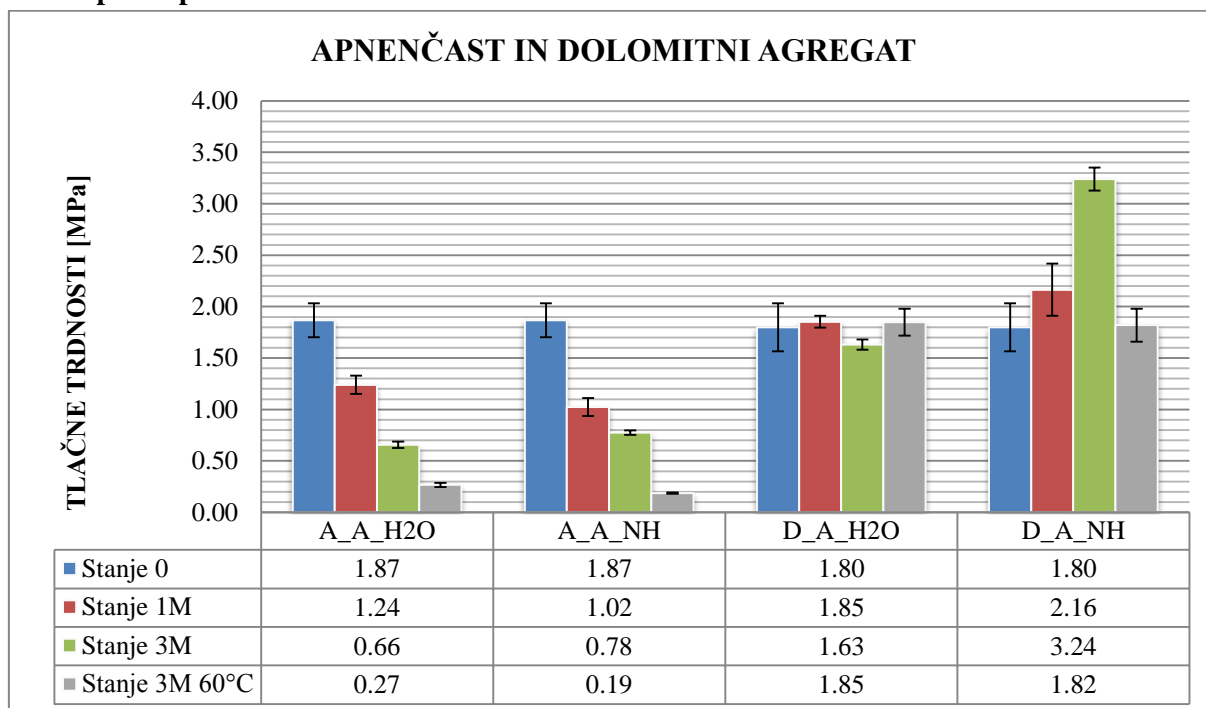
- **Prizme v deionizirani vodi**

Tlačne trdnosti malt iz obeh agregatov so se od enega meseca naprej še povečale. Pri apnenčastem agregatu se je trdnost povečala za 10 %, pri dolomitnem agregatu pa za 13 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Tudi pri prizmah izpostavljenim 1M natrijevemu hidroksidu je bilo, glede na stanje po enem mesecu, opaziti povečanje tlačnih trdnosti, in sicer za 16 % pri apnenčastem agregatu ter 19 % pri dolomitnem agregatu.

#### 4.4.3 Apnene prizme



Graf 15: Primerjava tlačnih trdnosti apnenih prizem iz apnenčastega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Tlačne trdnosti prizem, preden smo jih položili v tekočine, se gibljejo med 1.8 in 1.87 MPa. Razlika tlačnih trdnosti med maltami iz obeh agregatov je 4 %.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Po enem mesecu izpostavljenosti deionizirani vodi so se pojavile večje razlike med agregatoma. Tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu, ki je bil izpostavljen deionizirani vodi, so se zmanjšale za 34 %, pri dolomitnem agregatu pa povečale za 3 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Tlačne trdnosti so se pri apnenčastem agregatu zmanjšale za 45 %, pri dolomitnem agregatu pa so se povečale za 20 %, glede na začetno stanje.

**Stanje 3 meseci:**

- **Prizme v deionizirani vodi**

Tlačne trdnosti so pri apnenem agregatu še vedno padale. Pri prizmah iz apnenčastega agregata so se zmanjšale za 47 % in 12 % pri dolomitnem agregatu, glede na trdnosti izmerjene po 1 mesecu.

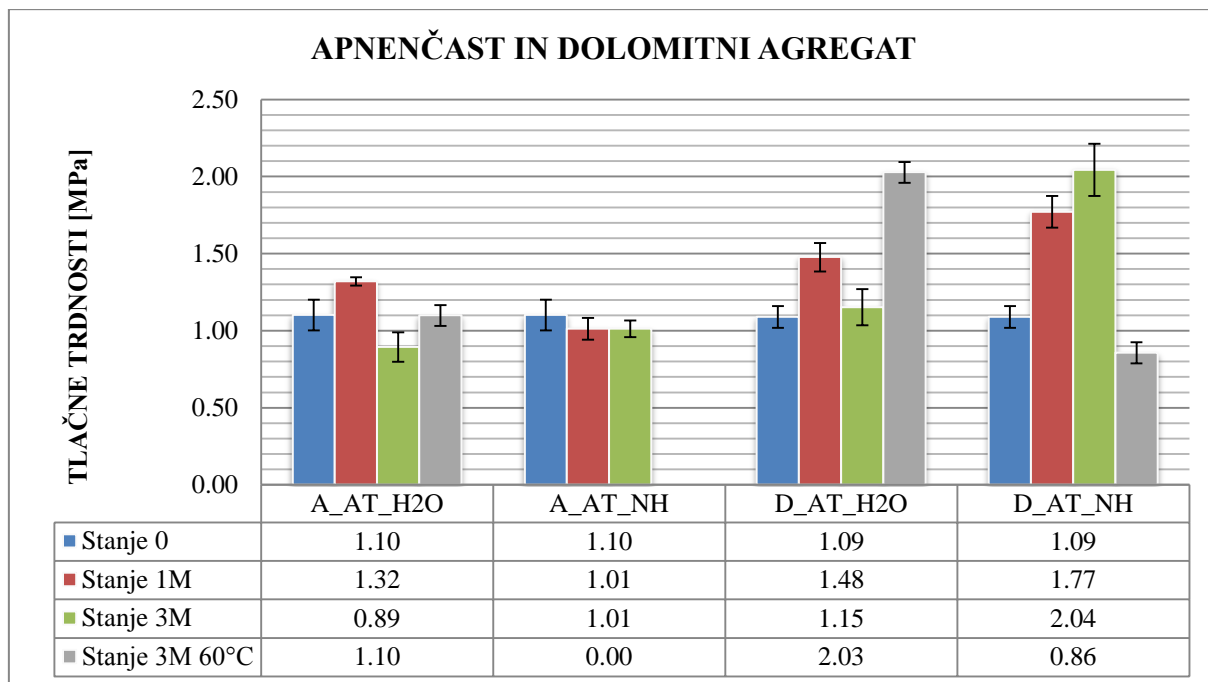
Tudi prizme, ki so bile izpostavljene temperaturi 60°C in deionizirani vodi, so pri apnenčastem agregatu zabeležile padec trdnosti, in sicer za 86 % glede na začetno stanje. Pri dolomitnem agregatu pa so se tlačne trdnosti v enakem obdobju povečale za 3 %.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Tlačne trdnosti so se v času med enim in tremi meseci pri apnenčastem agregatu zmanjšale za 24 %. Ravno obratno se je zgodilo pri prizmah iz dolomitnega agregata, kjer se je trdnost povečala in sicer za 50 %.

Pri prizmah izpostavljenih temperaturi 60°C se je tlačna trdnost glede na začetno stanje pri apnenčastem agregatu zmanjšala za 90 %. Če pa pogledamo na začetno stanje pri dolomitnem agregatu, kjer je tlačna trdnost znašala 1.80 MPa, pa je bilo povečanje za slab odstotek.

#### 4.4.4 Apnene prizme z dodatkom tufa



Graf 16: Primerjava tlačnih trdnosti apnenih prizem z dodatkom tufa iz apnenega in dolomitnega agregata.

#### Stanje 0 mesecev:

Pri maltah z apnom z dodatkom tufa so bile začetne tlačne trdnosti tako rekoč enake za obe vrsti agregata, in sicer 1.10 MPa pri apnenčastem agregatu in 1.09 MPa pri dolomitnem agregatu. Razlika med obema agregatoma je bila le slab odstotek.

#### Stanje 1 mesec:

- **Prizme v deionizirani vodi**

Po enem mesecu izpostavljenosti deionizirani vodi, so se pri apnenčastem agregatu tlačne trdnosti povečale za 20 %. Pri dolomitnem agregatu so prizme pridobile 36 % večjo tlačno trdnost.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu so se zmanjšale za 8 %, glede na začetno stanje. Za 62 % večjo tlačno trdnost pa so pridobile prizme iz dolomitnega agregata.

Pri temperaturi 60°C smo določili tlačno trdnost samo za prizme iz dolomitnega agregata. V tem primeru so se tlačne trdnosti zmanjšale za 21 % glede na začetno stanje.

**Stanje 3 meseci:**

- **Prizme v deionizirani vodi**

V času med enim in tremi meseci v deionizirani vodi so se pri apnenčastem agregatu tlačne trdnosti zmanjšale za 32 %. Pri dolomitnem agregatu, pa so se tlačne trdnosti zmanjšale za 22 %.

Pri apnenčastih prizmah, ki so bile na temperaturi 60°C potopljene v deionizirani vodi, je tlačna trdnost ostala enaka glede na začetno stanje, in sicer 1.10 MPa. Pri prizmah iz dolomitnega agregata pa se je tlačna trdnost povečala za 86 % glede na začetno stanje.

- **Prizme v raztopini 1M natrijevega hidroksida**

Pri prizmah iz apnenčastega agregata so tlačne trdnosti ostale enake kot pri stanju enega meseca in sicer 1.01 MPa. Prizmam iz dolomitnega agregata pa se je tlačna trdnost povečala na 2.04 MPa, to je za 15 %.

Pri prizmah, ki so bile izpostavljene temperaturi 60°C in so vsebovale dolomitni agregat, se je tlačna trdnost zmanjšala za 21 %, glede na začetno stanje.



## 5 ZAKJUČEK

Glede na zgoraj dobljene rezultate so bili rezultati pri prizmah s cementnim vezivom in prizmah s kombiniranim vezivom iz cementa in EF pepela nekako v okviru pričakovanj. Tlačne trdnosti so v času 3 mesecev izpostavljenosti različnim pogojem okolja naraščale. Pojav, ki je vreden večje pozornosti je bil ta, da smo pri temperaturi 60°C in izpostavljenosti raztopini natrijevega hidroksida v primeru dolomitnega agregata dobili relativno visoke trdnosti, glede na to, da je tovrstno okolje izrazito neugodno vplivalo na mehanske lastnosti malt z apnenčastim agregatom. Možen razlog za tovrsten odziv materiala bi bil, da se je ob razvoju alkalno-karbonatne reakcije pojavila dodatna »ojačitev« med agregatom in vezivom. Ta »ojačitev« bi lahko nastala med procesom dedolomitizacije.

Pri apnenih prizmah tlačne trdnosti pri apnenčastem agregatu padajo. Rezultat je bil pričakovan, saj so apnene prizme zelo porozne. Razlog za to pa je tudi stalna izpostavljenost mokremu okolju. Še hitrejše propadanje oz. nižanje trdnosti prizem povzroči izpostavljenost temperaturi 60°C. Tudi mase so se tekom preiskav začele zniževati zaradi zgoraj navedenih vzrokov. Nasproten pojav - naraščanje tlačnih in upogibnih trdnosti se pojavi pri apnenih prizmah z dolomitnim agregatom. Tlačne in upogibne trdnosti so se najbolj povečale pri prizmah, ki so bile izpostavljene raztopini 1M natrijevega hidroksida. Glede na to, da smo opravljali samo porušne preiskave in smo si porušene vzorce lahko ogledali le s prostim očesom, dejanskih razlogov za tako različno obnašanje apnenih malt iz apnenčastega in dolomitnega agregata le na podlagi lastnih rezultatov preiskav ne moremo pojasniti.

Za podrobnejše zaključke smo zato proučili članke, ki so tovrstno obnašanje analizirali tudi na nivoju mikrostrukture preizkušancev ter povzeli njihove ugotovitve (Katayama, 2010, Prinčič, 2013, Štukovnik, 2013a, Štukovnik, 2013b, Štukovnik, 2013c).

Pri cementnih prizmah z apnenčastim agregatom, izpostavljenim temperaturi 60°C in NaOH, po 6 in 9 mesecih ni bilo vidne reakcije, zato lahko sklepamo, da je apnenčasti agregat stabilen v visoko alkalnih raztopinah (Prinčič, 2013).

Pri dolomitnem agregatu izpostavljenem temperaturi 60°C in NaOH se po enem mesecu ACR reakcija še ni razvila – raziskovalci je s pomočjo mikroskopskih metod niso zaznali. Šele po treh mesecih so videli spremembe v mikrostrukturi malte. Vsa fina in groba zrna agregata so začela dedolomitizirati. Pri veliki povečavi pod mikroskopom so bila vidna območja s povečano gostoto Mg, Si in Ca ionov ter prisotnost Si ionov med kalcitom in brucitom (Prinčič, 2013, Štukovnik, 2013b).

Pri apnenih prizmah izpostavljenim temperaturi 60°C in deionizirani vodi ali NaOH, so se pri dolomitnem agregatu dogajale spremembe. Večja agregatna zrna so ostala v večini nespremenjena, spremenjena so bila le manjša agregatna zrna. Vendar je bilo v nekaterih primerih zaznati tudi spremembe velikih agregatnih zrn. Dedolomitizacija se je začela na robu zrn agregata in nadaljevala vzdolž že obstoječih razpok v agregatu. Nastali so tudi reakcijski obroči na obodu zrn agregata. Vzrok za povečanje tlačnih trdnosti je tudi tvorjenje sekundarnega kalcita vzdolž dolomitnih zrn agregata, ki se odraža kot izrazito povečanje koncentracije kalcijevih (Ca) ionov (Štukovnik, 2013a).

Pri apnenih prizmah z dodatkom tufa in dolomitnim agregatom, izpostavljenim temperaturi 60°C in raztopini NaOH, so se po 6 mesecih zgodile spremembe. Ker so bile prizme izpostavljene višji temperaturi in alkalnem okolju, je to le še pospešilo hitrost reakcije. Avtorji ocenjujejo, da se pri apnenih prizmah z dodatkom tufa alkalno-karbonatna reakcija počasneje razvija, zaradi vpliva pucolanske reakcije (Štukovnik, 2013b, 2013c).

Pojavila se je še ena zanimivost pri apnenih maltah. Mehanizem alkalno-karbonatne reakcije je lahko drugačen pri čistih apnenih prizmah, kot pri apnenih prizmah z dodatkom tufa. Mehanizma procesa dedolomitizacije in tvorjenja sekundarnega kalcita naj bi bila enaka. Razlika se lahko pojavi zaradi prisotnosti silicijevih (Si) in aluminijevih (Al) ionov, ki bi lahko omogočala pojav dodatne reakcije, ki vpliva na mehanske lastnosti (Štukovnik, 2013a).

Po pregledanih rezultatih in s pomočjo zaključkov mikroskopiranja (Prinčič, 2013, Štukovnik, 2013a, Štukovnik, 2013b, Štukovnik, 2013c), bi bil pri cementnih maltah, kot agregat najboljša izbira apnenec, saj je odporen na alkalno okolje in stabilen tudi pri višjih temperaturah. Pri apnenih maltah, pa bi dali prednost dolomitnemu agregatu, saj smo dokazano dobili večje tlačne trdnosti (Štukovnik, 2013a), kot pri apnenčastem agregatu, ki je bil izpostavljen alkalnemu okolju in povišani temperaturi.

Pri izbiri agregata moramo biti zelo pozorni predvsem pri projektiranju infrastrukturnih objektov z dolgo življenjsko dobo. Pri teh objektih napačna izbira agregata na dolgi rok lahko prinese prezgodnje sanacije objektov in z njimi veliko več nepričakovanih stroškov ter v skrajnem primeru tudi porušitev objekta, zaradi zmanjšanja trdnosti betona in spremembe morebitnih drugih karakteristik betona.

## VIRI

- Berge, B. 2000. The ecology of building materials. Oxford, Reed educational and professional publishing: 1-453.
- Bye, G.C. 1999. Portland Cement: Composition, Production and Properties, 2nd edition. London, Tomas Telford publishing: 1-224.
- Fridel, J. 1999. Metodologija tematske kartografije nacionalnega atlasa Slovenije. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 1-135.
- García, E., Alfonso, P., Labrador, M., idr 2003. Dedolomitization in different alkaline media: Application to Portland cement paste. Cement and Concrete Research 33: 1443-1448.
- Grattan-Bellew, P.E., Mitchell, L.D., Margeson, J., idr 2010. Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR=ASR? Cement and Concrete Research 40: 556-562.
- Katayama, T. 2004. How to identify carbonate rock reactions in concrete. Materials Characterization 53: 85-104.
- Katayama, T. 2010. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) — Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. Cement and Concrete Research 40: 643-675.
- Komac, B. 2006. Dolec kot značilna oblika dolomitnega površja. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 1-174.
- López-Buendía, A.M., Climent, V., Verdú, P. 2006. Lithological influence of aggregate in the alkali-carbonate reaction. Cement and Concrete Research 36: 1490-1500.
- Mladenovič, A., Šuput, J.S., Ducman, V., idr 2004. Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates. Cement and Concrete Research 34: 1809-1816.
- Mladenovič, A., Vižintin, N. 1997. Alkalno-silikatna reakcija v betonu. Kovine, zlitine, tehnologije 31: 173-175.
- Novak, M. 2008. Kamnina leta 2008. Proteus-mesečnik za poljudno naravoslovje 8/70: 1-48.
- Ogorelec, B. 2001. Karbonatne kamnine: njihov nastanek in razširjenost v Sloveniji. Tržič, Društvene novice - Društvo prijateljev mineralov in fosilov Tržič 26.
- Pavšič, J. 2006. Geološki terminološki slovar. Ljubljana, Založba ZRC. 1-331.
- Prinčič, T., Štukovnik, P., Bosiljkov, V.B., idr 2013. Observation on dedolomitization of carbonate aggregates, implications for ACR and expansion. Cement and Concrete Research 54: 151-160.
- RILEM 2000. RILEM TC 106-2 Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - The ultra accelerated mortar-bar test. Materials and Structures 33: 283-293.
- SIST EN 12390-2:2001. Preskušanje strjenega betona - 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti.
- SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.
- SIST EN 12390-5:2001. Preskušanje strjenega betona - 5. del: Upogibna trdnost preskušancev.

SIST EN 12620:2002. Agregati za beton.

Stanton, T.E. 1940. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proceedings American society of civil engineers 66: 1781-1881.

Štukovnik, P. 2011. Material z mineralnim vezivom na osnovi apna. Seminarska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1-14.

Štukovnik, P., Marinšek, M., Bosiljkov, B.V. 2013a. Observation for reactions between dolomite aggregate grains and lime-based binder in lime mortars. V: Hughes, J. (ur.). 3rd historic mortars conference : HCM 13: Glasgow: 1-8.

Štukovnik, P., Marinšek, M., Bosiljkov, B.V. 2013c. Vpliv alkalno-karbonatne reakcije na lastnosti malt. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik konstrukterjev : zbornik 35. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 147-154.

Štukovnik, P., Prinčič, T., R.S., P., idr 2013b. Alkali-carbonate reaction in concrete and its implication for a high rate of long -term compressive strength increase. Construction and building materials 50: 699-709.

Žarnič, R., Bosiljkov, B.V., Bosiljkov, V. 2011. Gradiva vaje 2011/2012. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1-146.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 1-347.