

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:

Faletič, A., 2016. Metode za določevanje krčenja cementnih sistemov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentorica Jereb, V.): 61 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5794/>

Datum arhiviranja: 13-10-2016

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:

Faletič, A., 2016. Metode za določevanje krčenja cementnih sistemov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Jereb, V.): 61 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5794/>

Archiving Date: 13-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
KOMUNALNA SMER**

Kandidat:

**ANDREJ FALETIČ**

**METODE ZA DOLOČEVANJE KRČENJA CEMENTNIH  
SISTEMOV**

Diplomska naloga št.: 3504/KMS

**METHODS FOR DETERMINING SHRINKAGE OF  
CEMENTITIOUS SYSTEMS**

Graduation thesis No.: 3504/KMS

**Mentorica:**

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Somentorica:**

mag. Vesna Jereb

Ljubljana, 13. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Spodaj podpisani študent **ANDREJ FALETIČ**, vpisna številka **26108061**, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: »**Metode za določevanje krčenja cementnih sistemov**«

**IZJAVLJAM**

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

Kred, 22. 8. 2016

Podpis študenta:

\_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>691.54(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Andrej Faletič</b>
<b>Mentorica:</b>	<b>prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>mag. Vesna Jereb, univ. dipl. kem.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Metode za določevanje krčenja cementnih sistemov</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>61 str., 4 preg., 55 sl.</b>
<b>Gljučne besede:</b>	<b>krčenje, metode, merjenje, deformacije, nabrekanje, nega, čas nič</b>

### **IZVLEČEK**

Krčenje cementnih sistemov je pojav zmanjšanja prostornine, brez vpliva zunanjih sil. Lahko ima velik vpliv na trajnost gradbenih konstrukcij, zato je nujno merjenje krčenja in na podlagi teh meritev razviti manj krčljive materiale. Zaradi različnih sestav teh materialov in različnih vrst krčenja obstaja veliko metod za merjenje krčenja, ki so lahko standardizirane ali pa razvojne. Rezultati teh metod se večkrat med seboj razlikujejo in so si včasih celo nasprotujoči.

V prvem delu naloge je poudarek na pregledu metod za določevanje krčenja. Zajema njihov opis in medsebojno primerjavo. Za boljše razumevanje procesa krčenja je podano tudi teoretično ozadje o vrstah krčenja in vplivu materialov na krčenje.

V drugem delu je predstavljen eksperimentalni del naloge. Preiskave so bile opravljene v podjetju TTK d.o.o. iz Srpenice, kjer smo z metodo krčenja v stožcu merili zgodnje krčenje (do 24 ur), z metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002 pa smo merili krčenje v obdobju od 24 ur do 28 dni. Preiskave so potekale na različnih sestavah podlivnih malt. Na podlagi rezultatov eksperimentalnega dela smo uporabljeni metodi ovrednotili. Ocenili smo tudi optimalno časovno okno za začetek merjenja krčenja.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 691.54(043.2)  
**Author:** Andrej Faletič  
**Supervisor:** Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.  
**Cosupervisor:** Vesna Jereb, M. Sc.  
**Title:** Methods for determining the shrinkage of cementitious systems  
**Document type:** Graduation Thesis  
**Scope and tools:** 61 p., 4 tab., 55 fig.  
**Key words:** shrinkage, methods, measuring, strains, swelling, curing, time zero

**ABSTRACT**

Shrinkage of cementitious system is manifested in the reduction of the system's volume, without the influence of external forces. It can have a major impact on the durability of buildings and civil engineering structures. Therefore, it is essential to measure shrinkage and on the basis of these measurements to develop less-shrinkable materials. However, due to the different compositions of these materials and different shrinkage types, there are many methods for measuring shrinkage, which may be standardized or in development. The results of these methods often differ and are sometimes even contradictory.

The first part of the thesis focuses on the review of test methods for the determination of shrinkage. It includes their description and mutual comparison. To better understand the process of shrinkage the thesis includes also theoretical background on the shrinkage types and the influence of constituent materials on shrinkage.

The second part of the thesis presents the results of experimental work, which was carried out in the company TKK d.o.o. from Srpenica. In this part we measured early shrinkage (up to 24 hours) with non-standardised method "Shrinkage cone" and long term shrinkage (from 24 hours up to 28 days) with the method in accordance with standard EN 12617-4: 2002. The tests were carried out on different compositions of grouts. Based on the results of experimental work we evaluated the two methods. We also estimated the optimal time window to start the measurement of shrinkage.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorici mag. Vesni Jereb.

Hvala podjetju TKK d.o.o. iz Srpenice, da mi je omogočilo izdelavo diplome ter vsem zaposlenim, ki so kakorkoli pripomogli.

Hvala staršema, ki sta mi stala ob strani in vztrajno pričakovala dokončanje mojega študija.

Hvala tudi sošolcem in prijateljem za nesebično pomoč tekom študija.

**KAZALO VSEBINE**

Stran za popravke, Errata .....	I
Izjave.....	II
Bibliografsko – dokumentacijska stran in izvleček .....	III
Bibliographic – documentalistic information and abstract .....	IV
Zahvala.....	V
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 NAMEN IN CILJ DIPLOMSKE NALOGE.....</b>	<b>2</b>
<b>3 KRČENJE IN NABREKANJE .....</b>	<b>3</b>
3.1 Vrste krčenja.....	3
3.1.1 Krčenje zaradi karbonatizacije .....	3
3.1.2 Krčenje zaradi sušenja.....	3
3.1.3 Kemično krčenje .....	5
3.1.4 Avtogeno krčenje .....	6
3.1.5 Plastično krčenje .....	8
3.2 Temperaturno deformiranje.....	8
3.3 Nabrekanje.....	8
3.4 Vpliv materialov na krčenje .....	9
3.5 Vpliv nege na krčenje.....	9
3.6 Faze krčenja.....	11
3.6.1 Zgodnje krčenje.....	11
3.6.2 Dolgoročno krčenje .....	13



<b>4 METODE ZA DOLOČEVANJE KRČENJA CEMENTNIH SISTEMOV</b> .....	<b>14</b>
4.1 Standardizirane metode.....	15
4.1.1 SIST EN 12617-4:2002.....	19
4.1.2 SIST EN 14406:2004.....	21
4.1.3 SIST EN 445:2008.....	21
4.1.4 SIST EN 13872:2004.....	22
4.1.5 ISO 1920-8:2009.....	24
4.1.6 ASTM C157/C157M-08 (Ponovno sprejet 2014) <sup>e1</sup> .....	26
4.1.7 ASTM C1698-09.....	27
4.1.8 ASTM C827/ C827M-10.....	28
4.1.9 ASTM C1581/C1581M-09a.....	29
4.1.10 ASTM C1090-10.....	31
4.1.11 ASTM C878/C878M-14a.....	33
4.1.12 ASTM C1579-13.....	34
4.2 Nestandardizirane metode.....	36
4.2.1 Krčenje v stožcu.....	36
4.3 Analiza metod za določevanje krčenja cementnih sistemov.....	39
<b>5 EKSPERIMENTALNI DEL</b> .....	<b>41</b>
5.1 Uporabljeni materiali.....	41
5.2 Krčenje v stožcu.....	41
5.3 Metoda po SIST EN 12617-4:2002.....	46
5.4 Dodatne preiskave.....	53
5.5 Komentar eksperimentalnega dela.....	54
<b>6 ZAKLJUČKI</b> .....	<b>57</b>
<b>VIRI</b> .....	<b>59</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Minimalni časi nege (v dnevih) (Povzeto po [7])	10
Preglednica 2: Nabor standardov, ki se ukvarjajo z merjenjem krčenja cementnih sistemov	18
Preglednica 3: Analiza metod za merjenje krčenja cementnih sistemov	39
Preglednica 4: Izmerjeni začetni in končni časi vezanja podlivnih malt z dodatki za preprečevanje krčenja pri dozaciji 8 %	53

## KAZALO SLIK

Slika 1:	Primer razpoke zaradi krčenja zaradi sušenja	4
Slika 2:	Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja (vir: [1])	6
Slika 3:	Reakcije, ki povzročajo avtogeno in kemično krčenje C = nehidratiziran cement, V = nehidratizirana voda, H = produkt hidratacije P = pore, ki nastanejo s hidratacijo (Povzeto po [2])	6
Slika 4:	Diagram faz in vrst krčenja (Povzeto po [2])	11
Slika 5:	Diagram krčenja v zgodnjem obdobju (Povzeto po [2])	12
Slika 6:	Medsebojna odvisnost zgodnjega in dolgoročnega krčenja (Povzeto po [2])	13
Slika 7:	Rezultati medlaboratorijske preiskave merjenja avtogenega krčenja (Povzeto po [10])	14
Slika 8:	Vpliv izbire različnega časa nič (Povzeto po [10])	15
Slika 9:	Shema hierarhične piramide standardizacije (vir: [13])	16
Slika 10:	Prikaz nanosa sloja malte na betonsko podlago in merjenje sprijemnih trdnosti	20
Slika 11:	Merilna aparatura (Povzeto po [17])	22
Slika 12:	Merilna aparatura (Povzeto po [18])	23
Slika 13:	Primeri merilnih reperjev (Povzeto po [18])	23
Slika 14:	Primer kalupa (Povzeto po [19])	25
Slika 15:	Dva primera merilnih reperjev (Povzeto po [19])	25
Slika 16:	Dva primera merilnih aparatov (Povzeto po [19])	25
Slika 17:	Primerna aparatura za merjenje sprememb dolžin (vir: [21])	27
Slika 18:	Merilna aparatura po ASTM C1698-09 (vir: [22])	28
Slika 19:	Merilna aparatura ASTM C827/ C827M-10 (Povzeto po [23])	29
Slika 20:	Kalup (levo) in vzorec (desno) (vir: [24])	30
Slika 21:	Diagram deformacij merilnega valja s časom (Povzeto po [24])	30
Slika 22:	Dimenzije merilne aparature (Povzeto po [25])	32
Slika 23:	Merilna aparatura (vir: [26])	32
Slika 24:	Vložek za oviranje (Povzeto po [27])	33
Slika 25:	Dimenzije kalupa in vložka za oviranje krčenja (Povzeto po [28])	35
Slika 26:	Primer sistema za vzdrževanje okoljskih pogojev A (Povzeto po [28])	35
Slika 27:	Primer sistema za vzdrževanje okoljskih pogojev B (Povzeto po [28])	35
Slika 28:	Krčenje v odvisnosti od časa in primerne metode za posamezna obdobja (Povzeto po [31])	36
Slika 29:	Zakaj stožec deluje in cilinder ne (vir: [31])	37
Slika 30:	Sestava naprave za merjenje krčenja s stožcem (vir: [31])	38
Slika 31:	Vpliv izbire različnega časa nič na končno vrednost deformiranja podlivne malte z dodatkom za preprečevanje krčenja D po 24 urah	42

Slika 32:	Deformacije podlivnih malt z 8 % dozacijo dodatkov za preprečevanje krčenja v obdobju od začetka vezanja do starosti 24 ur z metodo krčenja v stožcu	42
Slika 33:	Trikrat ponovljeno merjenje deformiranja malte enake sestave pri enakih pogojih	43
Slika 34:	S plastično folijo prekrita površina vzorca za merjenje avtogenega krčenja	43
Slika 35:	Razlika med rezultati merjenja celotnega in avtogenega deformiranja	44
Slika 36:	Merjenje krčenja hitrovezoče malte z metodo krčenja v stožcu	44
Slika 37:	Merjenje krčenja drugačne podlivne malte z metodo krčenja v stožcu	45
Slika 38:	Merjenje temperature v notranjosti vzorca pri metodi krčenja v stožcu	45
Slika 39:	Izmerjeno deformiranje in spreminjanje temperature pri uporabi dodatka B	46
Slika 40:	Uporabljeni merilni reperji in njegova vgradnja v kalup (vir: [32])	46
Slika 41:	Merilna aparatura s primerjalno prizmo	47
Slika 42:	Kalup z vgrajenimi merilnimi reperji in pripravljene vzorci	48
Slika 43:	Vzorci v prostoru s konstantnimi pogoji	48
Slika 44:	Vzorci potopljeni v vodi	49
Slika 45:	Merjenje dolžin vzorcev	49
Slika 46:	Deformiranje vzorcev z dodatkom M pri 28 dnevni mokri negi	50
Slika 47:	Deformiranje vzorcev z dodatkom M pri 3 dnevni mokri negi	50
Slika 48:	Deformiranje vzorcev z dodatkom M brez mokre nege	51
Slika 49:	Prilagojene dozacije dodatkov za preprečevanje krčenja za dosego neskrčljivega materiala	51
Slika 50:	Vpliv mokre nege na krčenje zaradi sušenja v primeru malte z dodatkom D	52
Slika 51:	Vpliv mokre nege na krčenje zaradi sušenja v primeru malte brez dodatka (oznaka E)	52
Slika 52:	Rezultati krčenja šestih neodvisnih mešanic brez dodatka za preprečevanje krčenja, izraženi kot povprečna vrednost s standardnim odklonom.	53
Slika 53:	Izotermna kalorimetrija pri 20 °C za modelne podlivne malte z različnimi dodatki za preprečevanje krčenja pri dozaciji 8 %	54
Slika 54:	Vpliv časa nič na velikost deformacij pri podlivni malti z dodatkom B, 8 % dozacija	55
Slika 55:	Neuspelo razkalupljenje ob času konca vezanja	56

## 1 UVOD

Beton je eden temeljnih materialov v gradbeništvu. Je kompozitni material, v osnovi sestavljen iz agregata, vode in cementa. Cement s pomočjo vode hidratizira in tvori vezivo. Poznamo več vrst cementov, med katerimi je najpomembnejši tako imenovani portlandski cement. Poleg osnovnih sestavin betona se pogosto uporabljajo tudi različni dodatki. Z uporabo dodatkov izboljšamo lastnosti svežega in strjenega betona. S tem izboljšamo tudi njegovo trajnost.

Trajnost betona je bistvena pri ohranjanju dobrin in vzdrževanju konstrukcijskih sistemov v dobrem stanju. En od pojavov, ki ogrožajo trajnost betona je krčenje. Krčenje betona je pojav zmanjšanja njegove prostornine, brez vpliva zunanjih sil. Praviloma je posledica izgube vode. Voda se porablja pri procesu hidratacije cementa ali pa se izloča v okolico. Vzrok za krčenje betona je krčenje cementne paste oziroma cementnega kamna. V cementnih sistemih z večjim deležem agregata lahko pričakujemo manjše krčenje, saj agregat ovira deformiranje cementne paste oziroma cementnega kamna [1]. Krčenje lahko s časom povzroča razpokanje, ki močno zmanjša življenjsko dobo objektov, saj razpoke omogočajo dostop vode in agresivnih snovi v notranjost betona. Posledice krčenja betona lahko opazimo tudi brez natančnih meritev. V primeru betonskih plošč velikih površin se pogosto pojavijo površinske razpoke. Te poškodbe so običajno posledica plastičnega krčenja zaradi nepravilne nege betona in/ali oviranega krčenja zaradi sušenja strjenega betona. Novejše raziskave pa se osredotočajo tudi na zgodnje krčenje. V zgodnjem obdobju (do starosti 24 ur) beton prehaja iz tekočega v strjeno agregatno stanje in zato je merjenje krčenja zahtevno. Zaradi tega je bilo oteženo razumevanje faktorjev, ki vplivajo na zgodnje krčenje. Rezultati meritev v tem obdobju so redko dosegljivi v literaturi, zaradi težavnega merjenja in pomanjkanja standardiziranih metod merjenja. Čeprav so razpoke zaradi zgodnjega krčenja lahko samo notranje in mikroskopske, jih kasnejše krčenje zaradi sušenja poveča in s tem povzroči težave [2]. Krčenju cementnih sistemov se ne moremo izogniti, lahko pa ga zmanjšamo z ustrežno zasnovo sestave betona, negovanjem in uporabo dodatkov za zmanjšanje krčenja. Najbolj pogosta rešitev za zmanjšanje prostorninskih sprememb je izogibanje sušenju z ustreznim ravnanjem z betonom po vgradnji. Nega betona se mora začeti čim prej, trajati dovolj časa in potekati v skladu z ustreznimi metodami [2].

Poznamo več vrst krčenja betona, ki imajo različen učinek, različno obdobje delovanja in različne vzroke, zaradi katerih se pojavijo. Zaradi tega obstaja tudi več različnih metod za merjenje krčenja, ki so lahko standardizirane, pa tudi nestandardizirane. Merijo različne vrste krčenja v različnih časovnih obdobjih, različne vrste cementnih sistemov ter na raznolikih dimenzijah vzorcev. Zaradi tega so rezultati teh meritev težko primerljivi in včasih celo nasprotujoči. Zaradi zahtev, ki jih morajo izpolnjevati določeni gradbeni objekti ali njihovi deli, se na trgu kaže velika potreba po neskrčljivih cementnih sistemih, problem pa je, da so zaradi neenotnih zahtev glede začetka merjenja krčenja rezultati preiskav različnih avtorjev težko primerljivi.

## 2 NAMEN IN CILJ DIPLOMSKE NALOGE

V teoretičnem delu naloge je poudarek na pregledu standardov, ki obravnavajo merjenje krčenja. Za boljše razumevanje tega procesa je podano tudi teoretično ozadje o vrstah krčenja in vplivu materialov na krčenje. Kot primer praktične uporabe diplomske naloge smo v podjetju TKK d.o.o. iz Srpenice z dvema metodama merili krčenje podlivne malte z različnimi dodatki za preprečevanje krčenja betonov in malt. Z metodo krčenje v stožcu smo merili zgodnje krčenje do starosti 24 ur, na modelni sestavi podlivne malte z različnimi dodatki za preprečevanje krčenja. Z metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002 pa smo merili linearne deformacije vzorcev do starosti 28 dni pri različnih dolžinah nege in različnih dozacijah dodatkov za preprečevanje krčenja.

Cilj diplomske naloge je opraviti pregled obstoječih metod za merjenje krčenja cementnih sistemov, jih analizirati in na podlagi tega podati smernice za njihovo uporabo v praksi. V drugem delu naloge pa s praktičnim primerom uporabe ovrednotiti izbrane razpoložljive metode za določevanje krčenja. Poskusili bomo določiti tudi optimalno časovno okno za začetek merjenja krčenja.

### 3 KRČENJE IN NABREKANJE

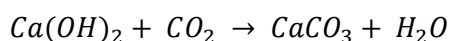
Krčenje cementnih sistemov je pojav zmanjšanja njihove prostornine, brez vpliva zunanjih sil. Pri vseh vrstah krčenja razen pri krčenju zaradi karbonatizacije, je ta pojav posledica izgube vode. Voda se porablja pri procesu hidratacije cementa (kemijsko vezana voda), ostaja v sistemu kapilarnih por kot fizikalno vezana voda, del vode pa se izloča v okolico. Vzrok za krčenje cementnih sistemov je krčenje cementne paste oziroma cementnega kamna. Na razvoj krčenja močno vpliva vrsta in količina agregata, ki ovira deformiranje cementne paste oziroma cementnega kamna [1].

#### 3.1 VRSTE KRČENJA

Celotno krčenje je vsota posameznih prostorninskih sprememb. V praksi se pri projektiranju betona običajno upošteva celotno krčenje, ki se določi z merjenjem krčenja samo v kasnejšem obdobju, ko beton doseže določeno trdnost (po odstranitvi kalupa pri starosti 24 ur, ali celo pozneje, po 48 ali 72 urah – kot to predpisujejo nekatere standardne metode preiskav). Tak pristop je lahko nevaren, saj zgodnje krčenje včasih celo prekorači krčenje betona, ki ga izmerimo na vzorcih, ki so ob začetku meritev stari en dan [2].

##### 3.1.1 KRČENJE ZARADI KARBONATIZACIJE

Krčenje zaradi karbonatizacija je posledica reakcije med kalcijevim hidroksidom, ki je en od produktov hidratacije cementa, in ogljikovim dioksidom iz ogljikove kisline (ogljikov dioksid raztopljen v vodi), ki poteka v skladu z enačbo v nadaljevanju:



Posledica reakcije je rahlo krčenje in zmanjšanje pH vrednosti z 12,5 na vrednosti tudi do 8,2 [4]. Znižanje pH vrednosti lahko povzroči korozijo armature, če se ta nahaja v območju karbonatizacije. Obseg karbonatizacije je odvisen od okoljskih pogojev, predvsem od relativne vlage okolja, pa tudi od gostote, starosti in kvalitete betona. Karbonatizacija je običajno omejena na 2 cm globine betona. Na splošno je karbonatizacija problem trajnosti betona in je zelo dolg in počasen proces [2].

##### 3.1.2 KRČENJE ZARADI SUŠENJA

Krčenje zaradi sušenja predstavlja zmanjšanje prostornine betona kot posledica izgube vode iz strjenega betona v okolico. Med vgrajevanjem svežega betona se del vode izcedi na površino. Ta voda lahko v začetnem obdobju neguje beton in prepreči njegovo krčenje. Ko ta voda izhlapi, se začne transport vode iz kapilarnih por v betonu proti površini in v okolico, in s tem se začne krčenje betona. Najbolj pogosta posledica krčenja zaradi sušenja v zgodnjem obdobju je pojav površinskih razpok, ki

nastanejo, ko natezna napetost v bližini površine preseže natezno trdnost materiala (slika 1). Na vrsto razpok zaradi sušenja vpliva vrsta in količina oviranja (armatura, agregat, podlaga) [2].



Slika 1: Primer razpoke zaradi krčenja zaradi sušenja

Mehanizem sušenja, ki povzroča krčenje betona v območju realnih vrednosti relativne vlage in temperature okolja, je odvisen od sistema kapilarnih por. Kapilarne pore so pore premera v območju od 10 nm do 1000 nm [3], ki so v začetku zapolnjene z vodo, pri relativni vlagi okolja pod 100 % pa se začne ta voda izločati v okolje.

Za krčenje, ki spremlja sušenje cementnega kamna v realnih pogojih, sta odgovorna dva mehanizma, in sicer mehanizem povečanja ločilnega pritiska v območju relativnih vlažnosti med 40 in 100 % ter mehanizem kapilarnega delovanja [3].

Idealno tanek element cementnega kamna, katerega vlažnost se zmanjšuje zaradi zniževanja vlage v okolici, je podvržen neoviranemu krčenju. Neovirano krčenje je materialna lastnost, ki je funkcija vodo-cementnega razmerja, stopnje hidratacije cementa (ti dve količini določata poroznost cementnega kamna), relativne vlage in temperature okolja. V območju med 100 in 40 % relativne vlage je krčenje sorazmerno izgubi vode iz materiala. Voda je prisotna v cementnem kamnu v več oblikah. Razlikujejo se po stopnji težavnosti, s katero jih lahko odstranimo iz cementnega kamna. Kapilarna voda predstavlja vodo, ki se nahaja v porah večjih od 5 nm. Lahko si jo predstavljamo kot nakopičeno vodo, na katero ne delujejo privlačne sile trdne površine. Glede na obnašanja kapilarne vode v cementnem kamnu razdelimo kapilarno vodo v dve kategoriji: vodo v porah večjih od 50 nm imenujemo prosta voda, saj njena odstranitev iz cementnega kamna ne povzroča nobenih prostorninskih sprememb, na vodo v majhnih porah (5-50 nm) pa delujejo kapilarne sile, zato je posledica odstranitve te vode iz sistema krčenje cementnega kamna [3]. Adsorbirana voda predstavlja vodo v neposredni bližini trdne površine. Pod vplivom privlačnih sil so vodne molekule fizikalno adsorbirane na površino cementnega kamna. Predpostavljajo, da je lahko do 6 monomolekularnih



slojev vode (1,5 nm) fizikalno vezanih z vodikovimi vezmi. Ker energija posamezne vodne molekule upada z njeno oddaljenostjo od trdne površine, se lahko večji del adsorbirane vode izgubi s sušenjem cementnega kamna pri relativni vlagi 30%. Prav izguba adsorbirane vode je največji vzrok za krčenje cementnega kamna zaradi sušenja [3].

Povprečno krčenje betonskega elementa zaradi krčenja cementnega kamna je drugačno od neoviranega krčenja cementnega kamna. Med sušenjem vzorca betona se pojavijo v materialu notranje napetosti zaradi različnih vlažnosti betona po prečnem prerezu. Poleg tega pa agregat, ki je nekrčljiv, predstavlja oviro krčenju cementnega kamna in s tem povzroča dodatne napetosti. Kot posledica opisanih mehanizmov lahko nastanejo mikrorazpoke v še neobteženih betonskih elementih. Proporcionalna zveza med hitrostjo sušenja in krčenjem velja približno tudi za beton.

Pri enaki količini cementa v mešanici se z zviševanjem vodo cementnega razmerja zmanjšuje gostota mikrostrukture. Zaradi tega lahko pričakujemo, da imajo podlivne malte redkejšo mikrostrukturo in višjo vsebnost kapilarnih por večjega premera, v primerjavi s standardno malto [2].

Krčenje zaradi sušenja se običajno meri v linearni smeri. Linearne deformacije zaradi krčenja so običajno velikosti 0,5 do 1 mm/m, vendar lahko presežejo tudi 5 mm/m. Del dolgoročnega krčenja zaradi sušenja je povraten, saj beton rahlo nabrekne v primeru ponovnega navlaženja [2].

### 3.1.3 KEMIČNO KRČENJE

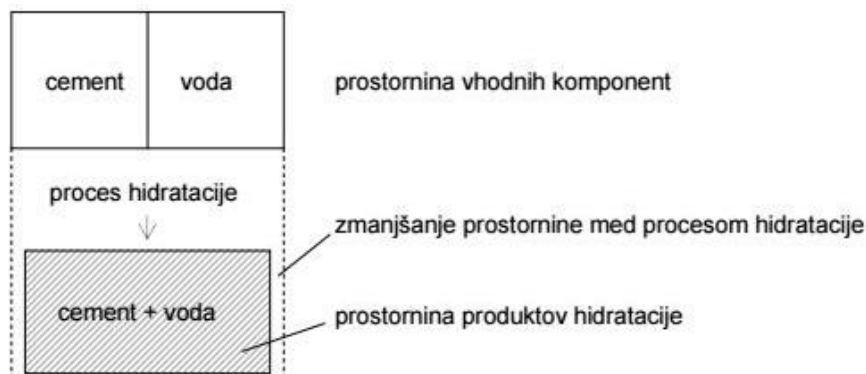
Kemično krčenje je posledica reakcije med cementom in vodo, kar privede do zmanjšanja prostornine. To zmanjšanje prostornine se začne takoj po stiku vode in cementa. Spodnja enačba je splošna enačba za kemično krčenje [2]:

$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hy}}{V_{ci} + V_{wi}} \times 100 \%,$$

kjer je CS = kemično krčenje,  $V_c$  = prostornina hidratiziranega dela cementa,  $V_w$  = prostornina porabljene vode,  $V_{hy}$  = prostornina produktov hidratacije,  $V_{ci}$  = prostornina cementa pred mešanjem,  $V_{wi}$  = prostornina vode pred mešanjem. Težava tega izračuna je v tem, da je brez zapletenih preizkusov pogosto težko določiti natančne prostornine posameznih komponent v cementnem kamnu. Ker kemično krčenje temelji na prostorninah vhodnih in izhodnih produktov, ga je možno izračunati na podlagi molekulskih mas posameznih cementnih faz po enačbi:

$$V_{faze} = \frac{V_s}{M}$$

kjer je  $V_s$  = razlika med molekulsko prostornino vhodnih produktov in molekulsko prostornino izhodnih produktov,  $M$  = molekulska masa cementne faze. Celotno kemično krčenje se nato odloči kot vsota vseh faz cementa [2].

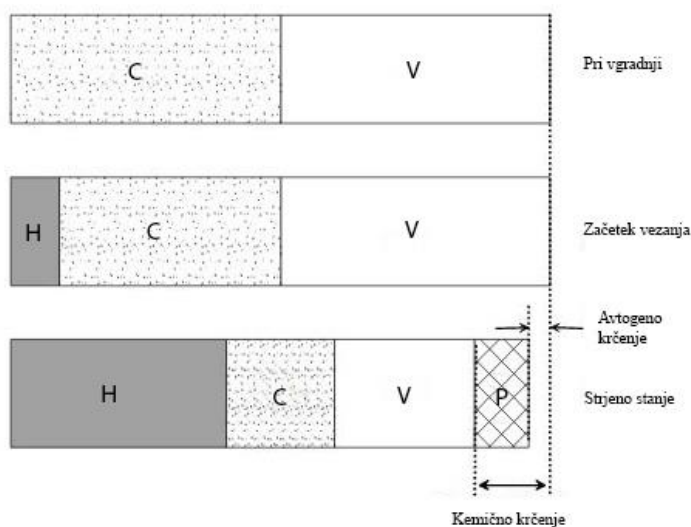


Slika 2: Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja (vir: [1])

Stopnja kemičnega krčenja je največja v prvih urah po betoniranju. Vodo cementni količnik nima vpliva na kemično krčenje. Specifična gostota cementa in v/c vplivata le na hitrost kemičnega krčenja. Na končno vrednost kemičnega krčenja imata vpliv samo kemična sestava cementa in stopnja hidratacije [2].

### 3.1.4 AVTOGENO KRČENJE

AvtoGENO krčenje cementne paste je definirano kot mikroskopske spremembe prostornine brez prehoda vlage v okolico. Je rezultat kemičnega krčenja, ki je posledica hidratacije cementnih delcev. Na sliki 2 je grafično upodobljena sprememba strukture betona zaradi hidratacije cementa [2].



Slika 3: Reakcije, ki povzročajo avtoGENO in kemično krčenje C = nehidratiziran cement, V = nehidratizirana voda, H = produkt hidratacije P = pore, ki nastanejo s hidratacijo (Povzeto po [2])

Slika 3 prikazuje avtogeno krčenje, ki je del kemičnega krčenja. Kemično krčenje je razlika med prostornino produktov hidratacije in prostornino vode ter cementa, iz katerih so ti produkti hidratacije nastali, avtogeno krčenje pa zunanja sprememba prostornine zaradi samoizsuševanja, to je porabe vode iz sistema por, ki nastaja zaradi kemičnega krčenja, za hidratacijo cementa. Zaradi tega se lahko avtogeno krčenje meri kot linearna deformacija betonskih vzorcev ali vzorcev iz malte [2].

Vzroki, ki vplivajo na razsežnost avtogenega krčenja pogosto niso enoznačni. Velja, da avtogeno krčenje ne more biti preprečeno z metodami opaževanja, vgradnje in nege, vendar mora biti upoštevano pri projektiranju betonske mešanice. Avtogeno krčenje je bilo dokumentirano in natančno izmerjeno šele ne dolgo nazaj. Najprej je veljalo, da se avtogeno krčenje pojavi samo pri betonih z zelo nizkim vodo cementnim razmerjem, ti betoni pa v tistih časih niso bili praktično uporabni. Kasneje so se z uporabo dodatkov, kot so superplastifikatorji in mikrosilika, betoni z nizkim vodo-cementnim razmerjem začeli vedno bolj uporabljati in avtogeno krčenje je pridobilo na pomembnosti, saj je začelo predstavljati velik delež celotnega krčenja [2].

Avtogeno krčenje se pojavi v treh različnih fazah. V tekočem stanju, takoj po zamešanju vode in cementa, se pojavi kemično krčenje kot posledica manjše prostornine produktov hidratacije. V tej prvi fazi, ko je beton še tekoč, je avtogeno krčenje enako kemičnemu krčenju. Čas, ko postane avtogeno krčenje odvisno tudi od samoizsuševanja, je odvisen od stopnje hidratacije cementa. Samoizsuševanje je definirano kot izsuševanje notranjih por v cementnem kamnu zaradi porabe vode za hidratacijo cementa. Je daljši proces od kemičnega krčenja in se ne začne takoj po vgradnji betona. Problematično je, ko v cementni pasti ni dovolj vode za potrebe procesa hidratacije cementa in se začne porabljati voda iz kapilarnih por med trdnimi delci. Ko se začne tvoriti ogrodje iz produktov hidratacije cementa, se lahko začne beton upirati delu napetosti zaradi kemičnega krčenja. Kmalu po tem se pojavi začetek vezanja. V tej fazi nastanejo kapilarne napetosti, ki so posledica izgube vode iz vedno manjših por, kar povzroča vedno večje napetosti v stenah por in s tem avtogeno krčenje. V naslednji fazi, ko postane beton trden, avtogeno krčenje ni več odvisno od kemičnega krčenja ampak samo od samoizsuševanja [2].

Raziskave kažejo, da se avtogeno krčenje zaradi samoizsuševanja pojavi pri betonih z vodo cementnim razmerjem pod 0,42, saj se vsa zamesna voda porabi za hidratacijo. Pri betonih z nižjim v/c je nujna neprekinjena mokra nega. Pri betonih z višjim v/c od 0,42 avtogenega krčenja pogosto ni zaslediti [2].

V diplomski nalogi [6] je bilo ugotovljeno, da se z uporabo notranjega rezervoarja v obliki z vodo nasičenega lahkega agregata, frakcije od 0 do 2 mm, vpliva na zmanjšanje avtogenega krčenja in s tem posledično na celotno krčenje.

### 3.1.5 PLASTIČNO KRČENJE

Plastično krčenje predstavlja celotno krčenje v obdobju, ko je beton še v plastičnem stanju. To je obdobje od zamešanja betona vse do meje obdelavnosti. Ta meja se pojavi kratek čas pred začetkom vezanja betona. Plastičnega krčenja se pri merjenju krčenja ne upošteva, saj ne povzroča napetosti v betonu in posledično razpokanja, razen pri zelo hitrem izsuševanju površine betona pred začetkom vezanja. Takšnemu izsuševanju površine se lahko izognemo z dovolj zgodnjim negovanjem.

### 3.2 TEMPERATURNO DEFORMIRANJE

Temperaturno deformiranje ni krčenje, temveč predstavlja odziv materiala na spremembe temperature. Pri naraščajoči temperaturi se pojavijo raztezki, pri ohlajanju pa skrčki. Temperaturne deformacije so lahko problematične pri hitrih spremembah temperature in kjer se z globino betona temperatura močno spreminja. Pri zgodnji starosti betona (do 24 ur) se temperatura spreminja zaradi hidratacije cementa. V splošnem velja, da hidratacija cementa povzroča dvig temperature v betonu za 5 do 8 °C [2]. Pri tem velja omeniti, da lahko pri maltah pričakujemo večji dvig temperature zaradi višje vsebnosti cementa. Dvig temperature zaradi hidratacije lahko pričakujemo v prvih 12 urah. V naslednji fazi, ko se beton ohlaja, se zaradi tega krči. Zaradi vpliva okolja ima lahko površina betona bistveno drugačno temperaturo, kot notranost betona. To povzroča notranje napetosti in lahko privede do razpokanja. Ta pojav je pogost pri masivnih betonih, kjer so med površino in notranostjo temperaturne razlike večje. Koeficient linearnega temperaturnega raztezka je odvisen od lastnosti materiala in se spreminja s strjevanjem betona. Pri stjenem betonu doseže koeficient linearnega temperaturnega raztezka konstanten nivo okoli  $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  [2]. Pri starosti betona več kot en dan so temperaturne deformacije posledica nihanj temperatur okolja in v primeru velikih nihanj lahko povzročajo tudi razpokanje [2].

### 3.3 NABREKANJE

Cementni pasti, ki hidratizira v nasičenem okolju, se prostornina s časom poveča. Nabrekanje betona in malte je veliko manjše od nabrekanja cementne paste zaradi vsebnosti agregata, ki predstavlja oviro. Ekspanzija cementnega kamna nastane zaradi rasti in pritiska hidratacijskih produktov, kot so etringit in kristali kalcijevega hidrata. Etringit je mineral, ki je prisoten v hidratiziranem cementnem kamnu in nastane kot posledica reakcije med kalcijevim aluminatom in kalcijevim sulfatom v Portland cementu. Ta reakcija steče kmalu po zamešanju cementa z vodo. Nabrekanje zaradi zgodnje tvorbe etringita ne povzroča škodljivih napetosti, saj beton takrat še ni v strjenem agregatnem stanju. Nabrekanje zaradi kasnejše tvorbe etringita pa je lahko tako veliko, da povzroči poškodbe betona [6].

### 3.4 VPLIV MATERIALOV NA KRČENJE

Agregat lahko občutno vpliva na krčenje, saj služi kot ovira deformiranju cementne paste ali cementnega kamna zaradi krčenja. Bolj kot je agregat tog in večji kot je njegov delež v betonu, večji je njegov pozitivni učinek [7].

Vpliv cementa na krčenje je odvisen tudi od količine sadre, ki služi kot regulator vezanja. Če je količina sadre manjša od optimalne, lahko pričakujemo večje krčenja zaradi sušenja [7]. Poleg sestave cementa na krčenje vpliva tudi njegova specifična površina. Bolj kot je cement fin, večje zgodnje krčenje lahko pričakujemo, saj takšen cement hitreje doseže dovolj velike trdnosti.

Vodo cementno razmerje ima velik vpliv na krčenje. Pri cementnih sistemih z nizkim v/c-jem (pod 0,42) predstavlja avtogeno krčenje večji delež celotnega krčenja, v primeru visokih v/c-jev pa lahko pričakujemo večje krčenje zaradi sušenja. Na preostale vrste krčenja pa v/c ne vpliva.

Kemični dodatki so pogosto uporabljeni v betonih. Najbolj pomemben je učinek superplastifikatorjev, saj ti običajno zmanjšajo potrebno zamesno vodo, to pa zmanjša krčenje zaradi sušenja in poveča možnost pojava avtogenega krčenja. V primeru njihove uporabe za povečanje obdelavnosti brez redukcije vode, pa lahko povečajo krčenje zaradi sušenja.

Dodatki za zmanjševanje krčenja zmanjšajo tako krčenje zaradi sušenja kot avtogeno krčenje. Ti dodatki ne zmanjšajo izhlapevanja vode iz betona, ki je izpostavljen nenasičenemu zraku. Prav tako nimajo velikega vpliva na tlačne trdnosti. Dodatkom za zmanjševanje krčenja pripisujemo učinek zmanjšanja površinske napetosti vode v porah. To zmanjša kapilarno napetost, ki nastane zaradi formiranja vodnega meniskusa v kapilarnih porah in povzroča krčenje cementne paste [7]. Ti dodatki vsebujejo kalcijev sulfoaluminat. Pri reakciji z vodo nastaja etringit, ki zaradi velike prostornine povzroči nabrekanje in tako kompenzira krčenje betona zaradi sušenja [8].

Stalna zaščita betonskih struktur s keramičnimi ploščicami ali različnimi premazi lahko občutno zmanjšajo krčenje zaradi sušenja [7].

### 3.5 VPLIV NEGE NA KRČENJE

Nega je definirana kot proces, katerega se izvaja, ko beton iz hidravličnega cementa pridobiva lastnosti trdnega materiala s hidratacijo cementa, ob prisotnosti zadostne vlage in toplote. Nega omogoča tolikšen razvoj hidratacije cementa (stopnjo hidratacije), da beton razvije ustrezne mehanske in trajnostne lastnosti. Cementni kamen deluje kot porozna matrica, ki veže agregat. Ko se hidratacija nadaljuje, se trdnost povezav notranjih delcev povečuje in njihova poroznost zmanjšuje. Stopnja in obseg hidratacije sta odvisna od razpoložljivost vode. Nega je bolj kritičen proces pri betonih visokih trdnosti kot pri običajnih betonih, zato je potrebna večja pozornost pri negi betonov visokih trdnosti,

če želimo, da dosežejo pričakovane lastnosti. Učinkovita nega je odvisna od več faktorjev, kot so razmerje med izpostavljeno površino in celotno prostornino elementa, lastnosti betona, ki se nanašajo na toploto in vlago, okoljski pogoji in dostopnost strukture za nego. V splošnem velja, da ko se razmerje med površino in prostornino elementa ter vsebnost cementnih materialov povečujeta, se povečuje tudi potreba po negi. Brez zadostne nege se lahko pojavijo resne težave, ki vplivajo na trajnost. Te se lahko pojavijo v več oblikah, kot so vidne razpoke, mikro razpoke in neodporne površine. Nezadostno negovanje ima običajno vpliv le na zunanjih 20 do 50 mm debeline elementa, vendar je ta kritična cona izpostavljena okolju in predstavlja zaščito jekleni armaturi [9].

Poznamo dve metodi ustreznega negovanja: mokra nega in nega z membranami. Trajanje obeh je odvisno od sestave betona in okoljskih pogojev med negovanjih in je podano v evropskem standardu EN 206-1 (preglednica 15.1) [7]. Glede na poznano vodo-cementno razmerje, vrsto cementa in pričakovano stopnjo izhlapevanja, mora projektant določiti minimalno število dni nege, ki je potrebna po odstranitvi opažev. Izbira minimalnega časa nege je lahko različna od primera do primera in je tudi odvisna od časa odstranitve opažev. Na primer, če je odstranitev opažev 3 dni po vgradnji betona, se ti 3 dnevi odštejejo od minimalnega časa nege, določenega v skladu s preglednico 1 [7].

Preglednica 1: Minimalni časi nege (v dnevih) (Povzeto po [7])

Hitrost pridobivanja trdnosti betona		Hitro*			Srednje**			Počasi***		
		0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15
Temperatura betona, °C		0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15	0-5	5-10	>15
Število dni nege	Brez sonca, $RV \geq 80\%$	2	2	1	3	3	2	3	3	2
	Srednje sonce ali veter ali $RV \geq 50\%$	4	3	2	6	4	3	8	5	4
	Močno sonce ali veter ali $RV < 50\%$	4	3	2	8	6	5	10	8	5

RV = relativna vlažnost v odstotkih

\*  $v/c < 0,50$  in CEM 42,5 R

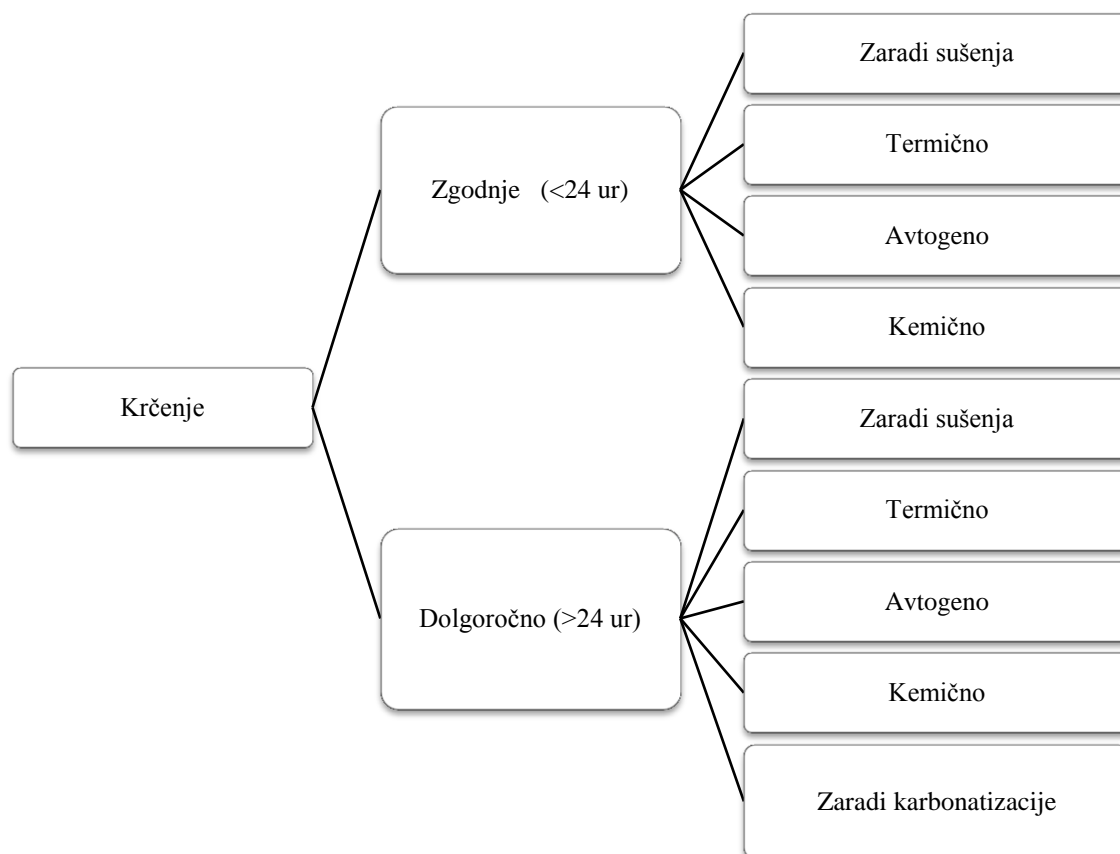
\*\*  $v/c < 0,50$  in CEM 42,5 N ali 32,5 R;  $v/c 0,50 - 0,60$  z CEM 42,5 R

\*\*\* pri vseh drugih pogojih

Mokro nego lahko dosežemo na več načinov: z neprestanim škropljenjem vode in s pokrivanjem površine betona s tkanino, ki jo periodično vlažimo. V primeru betonskih tlakov moramo z mokro nego začeti čim prej po vgradnji. Nega z membrano temelji na preprečevanju izgube proste vode s površine betona. To lahko dosežemo z uporabo različnih tehnik, kot so prekrivanje površine betona s plastično folijo ali z brizganjem sredstva za nego svežega betona [7].

### 3.6 FAZE KRČENJA

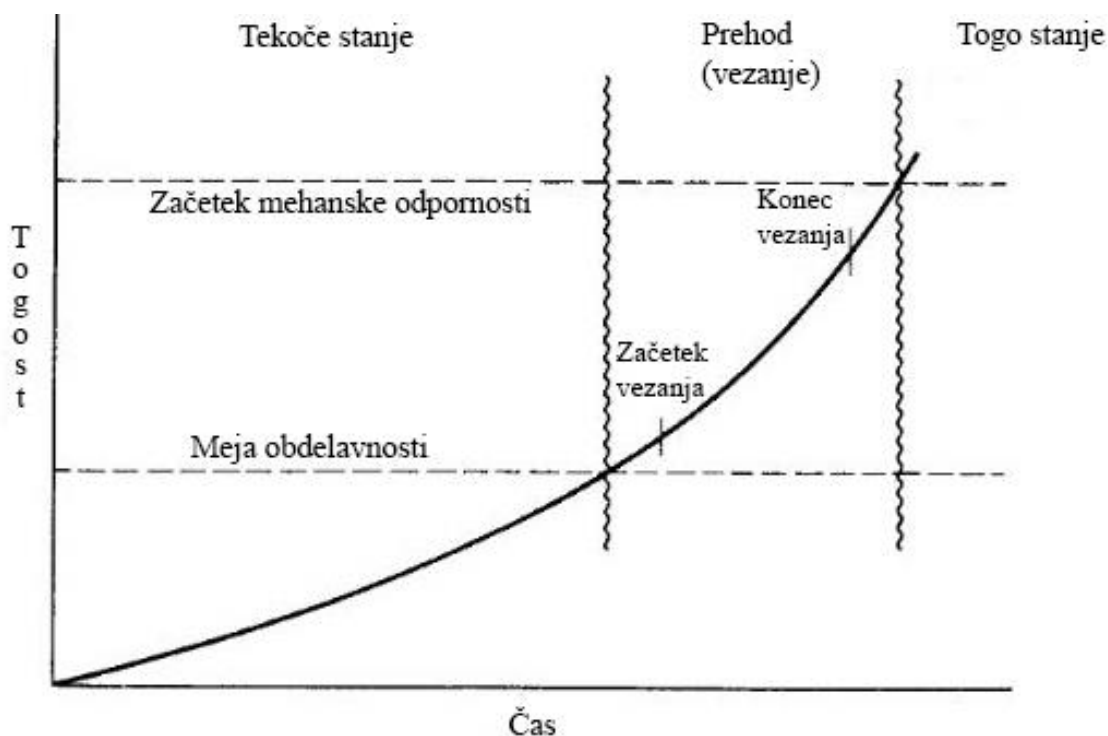
Krčenje lahko razdelimo glede na časovno obdobje oziroma glede na starost cementnega sistema. Krčenje cementnih sistemov poteka v dveh različnih fazah: zgodnje in dolgoročno obdobje. Za zgodnje obdobje se običajno smatra prvi dan, ko beton veže in začne s strjevanjem, za dolgoročno pa od 24 ur naprej. Po koncu zgodnjega obdobja se običajno beton razkalupi in prične se lahko merjenje krčenja. Dolgoročno krčenje je običajno edini del krčenja, ki se meri in upošteva pri dimenzioniranju betonskih konstrukcij. Večina vrst krčenja poteka v obeh časovnih obdobjih, kot prikazuje slika 4 :



Slika 4: Diagram faz in vrst krčenja (Povzeto po [2])

#### 3.6.1 ZGODNJE KRČENJE

Natančna omejitev zgodnjega obdobja je odvisna od vsebine in časovnega okvira preiskave. Za to diplomsko nalogo se zgodnje krčenje smatra kot prostorninske spremembe, ki se pojavijo od vgradnje vzorca do starosti 24 ur. To vključuje čas, ko je mešanica v tekočem stanju, prehodno obdobje, ko se tvori ogrodje in čas začetnega strjevanja, ko vzorec pridobi dovolj veliko trdnost za razkalupljenje. Zgodnje krčenje ima velik vpliv, saj beton v tem obdobju ne doseže dovolj velikih trdnosti. Že majhne napetosti v zgodnjem obdobju lahko povzročijo velike deformacije [2].



Slika 5: Diagram krčenja v zgodnjem obdobju (Povzeto po [2])

Takoj, ko je beton zamešan, se smatra kot tekočina. V tem stanju nima strukture, ki bi lahko obdržala obliko. Vsakršne spremembe zaradi napetosti se takoj izničijo s premikanjem delcev v betonu. V primeru izcejanja vode večji delci agregata tonejo in izpodrinejo odvečno vodo na površje betona [2].

Kasneje, ko cement in voda reagirata, se začne tvoriti ogrodje, kot posledica procesa hidratacije. To se običajno zgodi nekaj ur po betoniranju. V tem obdobju se zgodi tudi začetek vezanja. Na čas vezanja vplivajo vrste cementa, okolica (predvsem temperatura) in razni dodatki v betonu [2].

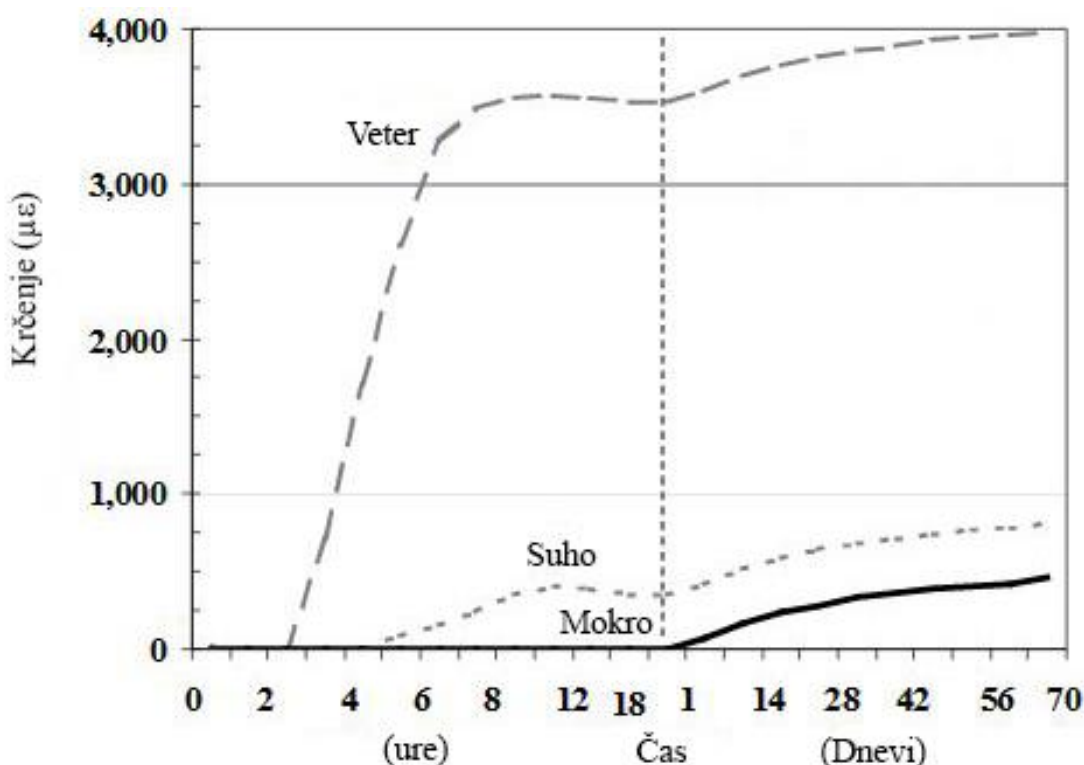
Ko je ogrodje dobro formirano, beton pridobi dovolj trdnosti, da se lahko upira napetostim v zgodnjem obdobju. Zato se hitrost krčenja upočasni. Čas, ko se beton lahko zoperstavi krčenju zaradi sušenja je okoli dve uri po začetku vezanja. V nekaterih primerih, ko beton ne pridobi dovolj trdnosti, se pojavijo razpoke. Te razpoke so sicer majhne, vendar se s krčenjem v kasnejšem obdobju povečajo. V splošnem velja, da zgodnje krčenje velikosti 1 mm/m že predstavlja možnost razpokanja. Ko beton otrdi, se še dolgo časa počasi krči, saj tudi cement še vedno počasi reagira. Napredek reakcije cementa z vodo, dokler cement ne veže v celoti, se imenuje stopnja hidratacije. Pri običajnih betonih se končna stopnja hidratacije doseže po mnogih letih. Pri betonih višjih trdnosti se hidratacija pogosto nikoli ne zaključi, zaradi pomanjkanja vode [2].



### 3.6.2 DOLGOROČNO KRČENJE

Dolgoročno krčenje je že dobro raziskano in upoštevano v praksi. Običajno je merjeno od starosti vzorcev 24 ur naprej in to na prizmatičnih vzorcih, v skladu s standardi kot so ASTM C157/C157M-08 in SIST EN 12617-4:2002. Krčenje zaradi sušenja poteka več let, vendar se okoli 80 % krčenja, merjenega v laboratoriju zgodi v prvih treh mesecih. Trajanje krčenja je odvisno od velikosti in oblike preskušancev. Ta dva faktorja vplivata na stopnjo izgube vlage in sta upoštevana v razmerju med prostornino betonskega elementa in njegovo površino. Višje razmerje med prostornino in površino običajno pomeni manjše krčenje. V primeru, da je krčenje ovirano z armaturo, podlago ali drugimi elementi, se pričakuje, da bo manjše od prostega krčenja [2]. Ker pa je v teh primerih krčenje ovirano, se kot posledica oblikujejo napetosti v strukturi betona, ki lahko povzročijo nastanek razpok.

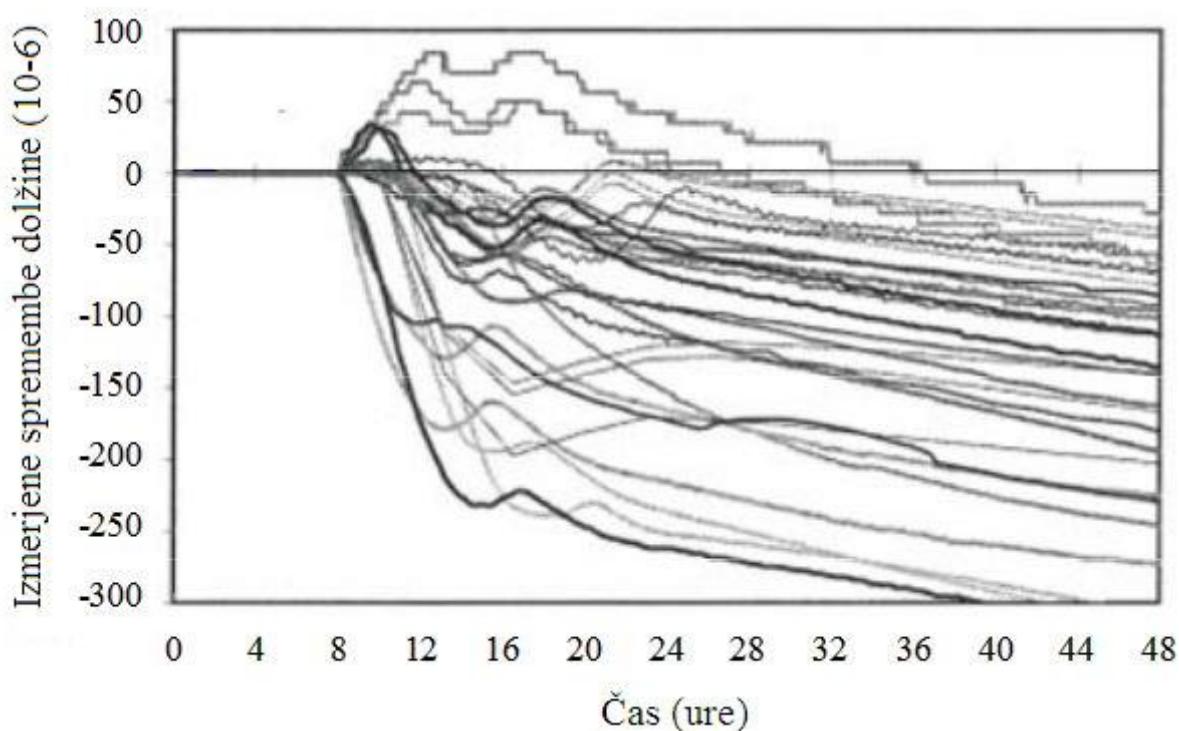
Med velikostjo zgodnjega in dolgoročnega krčenja ni medsebojne odvisnosti, kot to prikazuje slika 6. Dolgoročno krčenje je bilo v vseh treh primerih merjeno na enak način. Bistven vpliv na zgodnje krčenje imajo različni pogoji nege v prvem dnevu, na velikost dodatnega krčenja v kasnejšem obdobju pa nimajo vpliva. V določenih primerih, kot so slabi pogoji nege, lahko zgodnje krčenje zlahka preseže dolgoročno krčenje. Krčenje teh dveh obdobj se mora upoštevati kot celotno krčenje [2].



Slika 6: Medsebojna odvisnost zgodnjega in dolgoročnega krčenja (Povzeto po [2])

#### 4 METODE ZA DOLOČEVANJE KRČENJA CEMENTNIH SISTEMOV

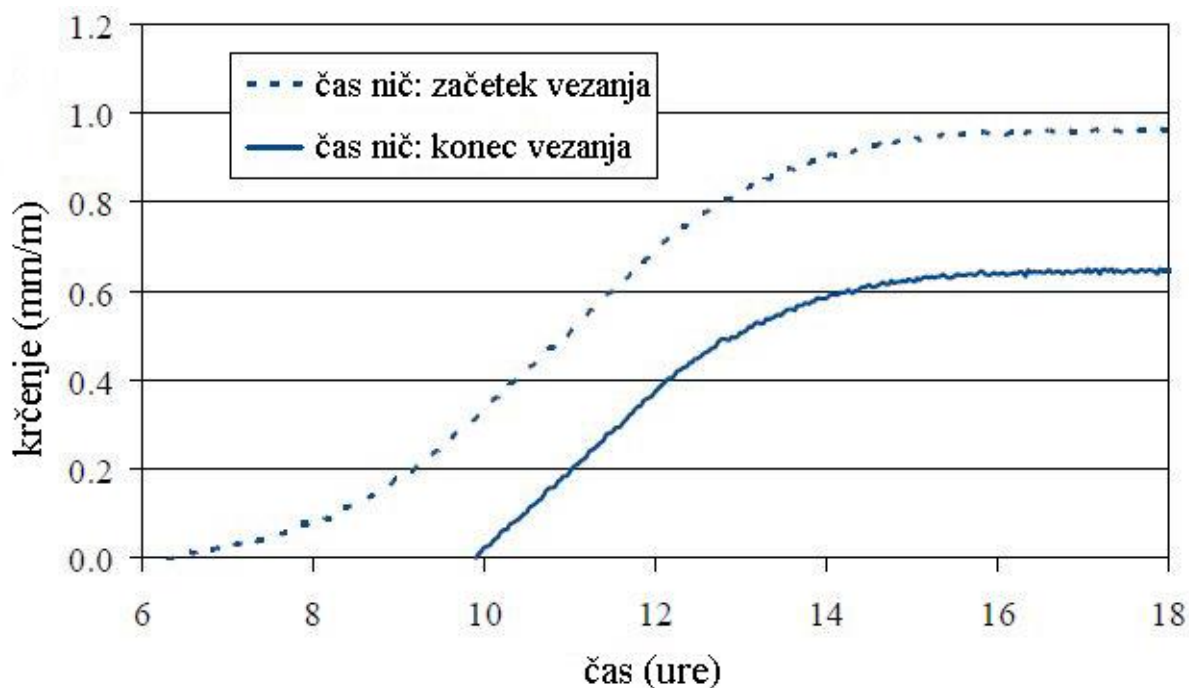
Obstaja več različnih metod za merjenje krčenja, ki so lahko standardizirane, pa tudi nestandardizirane. Z njimi merimo različne vrste krčenja v različnih časovnih obdobjih, različne vrste materialov ter raznolike velikosti vzorcev. Zaradi tega so rezultati različnih postopkov merjenja deformacij zaradi krčenja težko medsebojno primerljivi. Včasih dobimo z različnimi metodami celo nasprotujoče si rezultate. Slika 7 prikazuje rezultat medlaboratorijske raziskave (round robin test), s katerim so z različnimi metodami merili avtogeno krčenje malte. Enak material je bil poslan vsem sodelujočim laboratorijem z namenom, da sestava malte ne bi vplivala na rezultate meritev krčenja [10].



Slika 7: Rezultati medlaboratorijske preiskave merjenja avtogenega krčenja (Povzeto po [10])

Ker se krčenje, ki lahko vpliva na trajnost cementnih sistemov, običajno prične ob začetku vezanja ali kmalu za tem, mora časovno obdobje merjenja krčenja zajemati tudi prehod iz viskoznega v trdno agregatno stanje. Zato mora biti na vzorcu cementne paste, malte ali betona pričeto merjenje vsaj ob začetku vezanja. Mnoge metode pa tega ne omogočajo, zato rezultati teh metod ne zajemajo celotnega krčenja. Strjevanje, zmanjšanje relativne vlage in sočasna sprememba kapilarnega pritiska se začnejo zelo počasi, zato je praktično nemogoče določiti točen čas začetka teh procesov. Zato je smiselno poiskati drug kriterij za določitev praga, kjer se prične merjenje krčenja. Ta čas se imenuje čas nič (Time - zero). Namen časa nič je razmejiti plastično krčenje od krčenja, ki povzroča oblikovanje razpok. Najbolj pogosta kriterija za določitev te meje sta časa začetka in konca vezanja cementa, določena z Vicatovo metodo. Različni nacionalni standardi za določanje začetka in konca vezanja

cementa z Vicatovo metodo se med seboj nekoliko razlikujejo, poleg tega obstaja relativno veliko območje globin prodora igle, pri kateri je določen začetek vezanja cementa. To posledično vpliva na različen čas nič v različnih laboratorijih. Slika 8 prikazuje vpliv izbire različnega časa nič na vrednost izmerjenega krčenja. V primeru zgodnejšega časa nič dobimo večje krčenje, v primeru kasnejšega pa manjše krčenje [10].



Slika 8: Vpliv izbire različnega časa nič (Povzeto po [10])

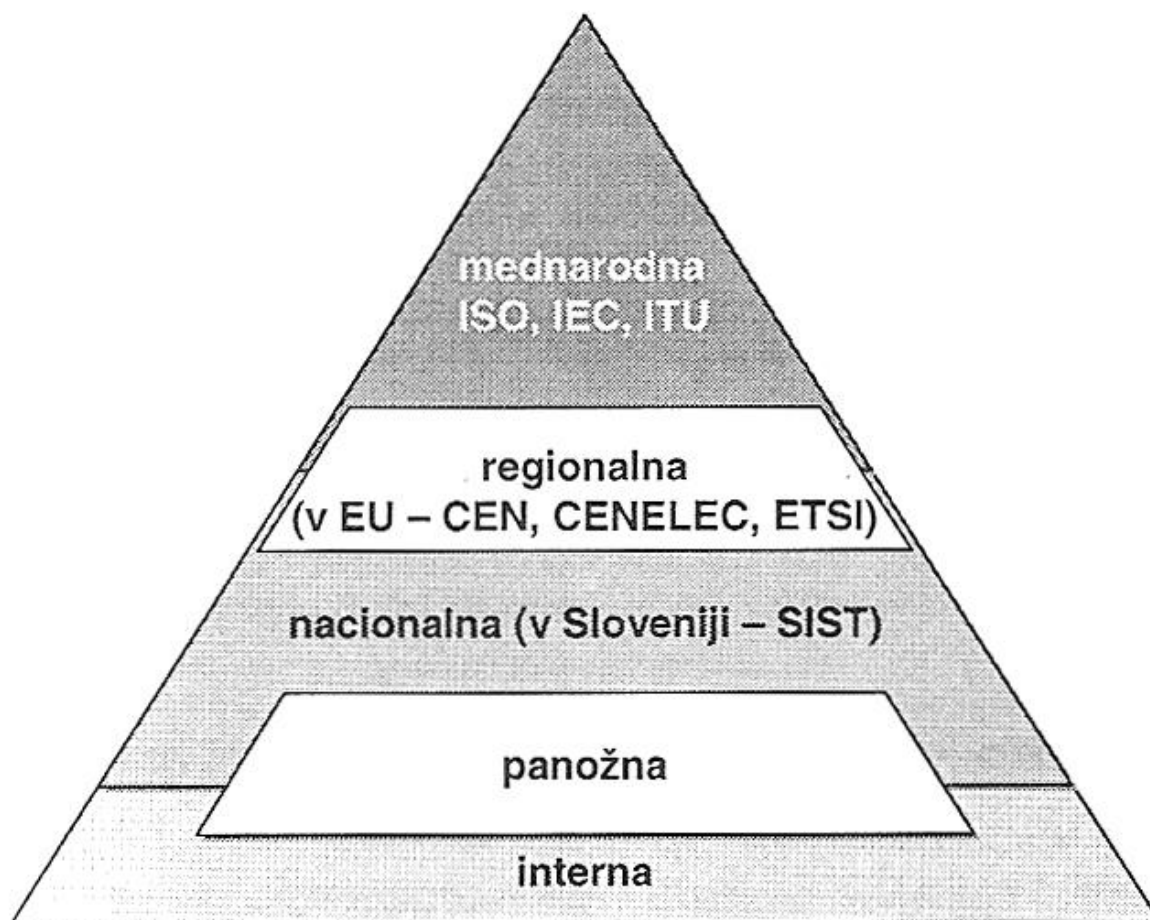
Poleg časa nič so še drugi razlogi za velik raztros rezultatov pri različnih metodah preiskav. Sam kalup in trenje med stenami kalupa ter vzorcem lahko ovirajo deformacije. Velik vpliv imajo tudi temperatura, izcejanje vode, linearno ali prostorninsko merjenje, vertikalno ali horizontalno merjenje [10].

Pri zahtevah po nekrčljivih betonih na terenu so podane največje dovoljene deformacije, običajno pa ni podan podatek s katero metodo in v kakšnem časovnem obdobju naj se te merijo.

#### 4.1 STANDARDIZIRANE METODE

Pod pojmom standardizacija si predstavljamo poenotenje in posplošenje. Z uvedbo standardizacije se odpravijo odvečne raznovrstnosti [11]. Njen namen je optimalna stopnja urejenosti na področju kakovosti, oblik, mer, materialov, varnosti, zanesljivosti in življenjske dobe. Posebej pomembne cilje standardizacije predstavljajo skrb za varnost proizvodov, uporabnikov in širšega okolja, večja kakovost in pocenitev proizvodov, enostavnejše vzdrževanje ter postavljanje enotnih in nedvoumih

definicij ter enotnih metod preskušanja. Izvaja se na mednarodni, regionalni in nacionalni ravni [12]. Vse to velja tudi na področju metod za določevanje krčenja cementnih sistemov.



Slika 9: Shema hierarhične piramide standardizacije (vir: [13])

Na področju mednarodne standardizacije delujejo tri organizacije: mednarodna organizacija za standardizacijo, mednarodna elektrotehniška komisija in mednarodna zveza za telekomunikacije. Mednarodna organizacija za standardizacijo – ISO (International Organization for Standardisation) se ukvarja z vsemi področji razen elektronike in elektrotehnike. Slovenija je včlanjena od leta 1992. Slovenija prevzame mednarodni standard v primeru, ko ne obstaja evropski standard določenega področja [13].

»Regionalne standardizacijske organizacije združujejo nacionalne standardizacijske organizacije iz skupnega zemljepisnega, političnega in gospodarskega prostora. Njihov namen je usklajevanje obstoječih nacionalnih standardov in razvoj novih regionalnih standardov s pomočjo mednarodnih standardov« [8, str. 25].

Nacionalna standardizacija deluje znotraj ene države. V Sloveniji je za to odgovoren Slovenski inštitut za standardizacijo - SIST. V Sloveniji je to državna funkcija. Sicer je lahko tudi privatna, če jo financira gospodarstvo [12].

Panožna standardizacija dopolnjuje nacionalno standardizacijo. Nastala je z usklajevanjem internih standardov sorodnih podjetij. Panožne standarde sprejemajo strokovna ali gospodarska društva na podoben način kot se sprejemajo nacionalni standardi. Ti standardi so javno dostopni [13].

Interna standardizacija je prvotna oblika standardizacije v okviru posameznega podjetja. »Interna standardizacija ustvarja pogoje za racionalno proizvodnjo in pripravo na usklajevanje proizvodnje z novimi standardi« [8, str. 27].

»Standard je dokument, ki nastane s konsenzom in ga sprejme priznani organ in ki določa pravila, smernice ali značilnosti za dejavnosti in njihove rezultate ter je namenjen za občo in večkratno uporabo in usmerjen v doseganje optimalne stopnje urejenosti na danem področju« [7, str. 21]. Uporaba standardov ni obvezna, vendar je priporočljiva. Njihova uporaba postane obvezujoče, ko upravni organ izda ustrezen predpis [14].

Standardizirane metode so opisane v standardih. Preglednica 2 podaja nabor standardov, ki se ukvarjajo z merjenjem krčenja cementnih sistemov. Standarde smo iskali glede na ključne besede in glede na medsebojne sklice med standardi. Iskali smo jih med standardi, ki so bili na voljo v podjetju TKK d.o.o., v raznih spletnih prodajalnah in knjižnicah. Italijanski standard UNI 11307:2008, japonski standardi JIS A 1151:2011, JIS A 1129-1:2010, JIS A 1129-2:2010, JIS A 1129-3:2010 in kitajska standarda JGJ/T 178-2009 ter JC/T 603-2004 so nam dostopni samo v izvornem jeziku, razen naslova standarda, ki je preveden v angleščino. Iz naslova standarda in iz slik je možno razbrati vsebino standarda, vendar bi bilo za nadaljnjo analizo potrebno te standarde prevesti. Sicer pa za kitajske standarde velja, da so pogosto prevzeti po mednarodnih standardih. Za preostale standardne metode iz preglednice 2 so v nadaljevanju podani opisi aparaturnih, postopki merjenja in izračuna ter področje uporabe metode. Pri analizi standardov smo opazili, da imajo standardi različnih geografskih področij različno organiziranost. Tako se na primer ASTM standardi delijo na standardne metode in na standardne postopke, pri kitajskih standardih predstavlja oznaka T tehnično specifikacijo, pri japonskih standardih pa že sama kratica JIS predstavlja japonske industrijske standarde.

Preglednica 2: Nabor standardov, ki se ukvarjajo z merjenjem krčenja cementnih sistemov

Področje	Oznaka standarda	Naslov standarda
Evropa	SIST EN 12617-4:2002	Določevanje krčenja in nabrekanja
	SIST EN 14406:2004	Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje stopnje in razvoja nabrekanja in hitrosti nabrekanja injekcijske mase
	SIST EN 445:2008	Injekcijska masa za prednapete kable – Preskusne metode
	SIST EN 13872:2004	Metode za preskušanje talnih izravnalnih in/ali livelirnih mas za hidravlično nanašanje – Ugotavljanje krčenja
	UNI 11307:2008	Testing For Hardened Concrete - Shrinkage Determination
Mednarodno	ISO 1920-8:2009	Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory
Severna Amerika	ASTM C157/C157M-08 (Reapproved 2014) <sup>e1</sup>	Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
	ASTM C1698-09	Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar
	ASTM C490/C490M-11	Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
	ASTM C827/ C827M-10	Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures
	ASTM C1581/C1581M-09a	Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage
	ASTM C1090-10	Standard test method for measuring changes in height of cylindrical specimens of hydraulic-cement grout
	ASTM C878/C878M-14a	Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete
	ASTM C1579-13	Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
Azija	JIS A 1151:2011	Method of test for drying shrinkage cracking of restrained concrete
	JIS A 1129-1:2010	Methods of measurement for length change of mortar and concrete -- Part 1: Method with comparator
	JIS A 1129-2:2010	Methods of measurement for length change of mortar and concrete -- Part 2: Method with contact-type strain gauge
	JIS A 1129-3:2010	Methods of measurement for length change of mortar and concrete -- Part 3: Method with dial gauge
	JGJ/T 178-2009	Technical specification for application of shrinkage-compensating concrete
	JC/T 603-2004	Standard test method for drying shrinkage of mortar

#### 4.1.1 SIST EN 12617-4:2002

##### **Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – 4. del: Določevanje krčenja in nabrekanja**

Ta slovenski standard je povzet po evropskem standardu EN 12617-4:2002. Opisuje dve metodi za določevanje dimenzijske stabilnosti materialov za popravila in sistemov podvrženim pogojem sušenja in vlaženja [15].

Prva metoda meri neovirane linearne deformacije, ki so posledica namakanja v vodi (nabrekanje) ali sušenja (krčenje) na prizmatičnih vzorcih dimenzij 40 mm x 40 mm x 160 mm v časovnem obdobju od 24 ur do 56 dni po zamešanju. Najmanj šest prizem mora biti pripravljenih za vsako mešanico, ki se testira. Tri se uporabijo za merjenje povprečnega krčenja, tri pa za merjenje povprečnega nabrekanja. Vsi materiali morajo biti najmanj 24 ur pred mešanjem kondicionirani na temperaturi  $21 \pm 2$  °C. Kalupi morajo imeti vsaj tri prekate za istočasno pripravo vzorcev. Vsak prekat mora imeti na sredini obeh končnih stranic luknjo, ki sprejme merilni reper, ki ostane vgrajen v vzorec. Merilni reperji so iz nerjavečega jekla ali drugega trdega materiala, ki ne reagira z malto. Merilna naprava - deformeter, ki meri dolžino vzorcev, mora imeti takšno merilno območje, da lahko meri minimalno spremembo dolžine vzorcev  $\pm 5$  mm in ima natančnost  $\pm 0,001$  mm. Deformeter mora biti tako prilagojen, da sprejme merilne reperje. Pri  $24 \pm 1$  urah po vgradnji se vzorci previdno odstranijo iz kalupov. Vsakega se označi s svojo oznako in puščico, ki zagotavlja vedno enako orientiranost prizme pri merjenju. Pred prvim merjenjem mora biti vsa oprema kondicionirana na temperaturo  $21 \pm 2$  °C. Potrebno je tudi preveriti ali so vsi reperji dobro vgrajeni v prizme. Pred in po vsaki seriji merjenja dolžin prizem je potrebno napravo preveriti s primerjalno palico. V primeru različnih vrednosti se preveri čistost deformetra in prizem ter se meritve ponovi. Primerjalna palica iz jeklene legure mora biti dolžine  $160 \pm 1$  mm s konci enake oblike kot so merilni reperji. Nato se vzorcem izmeri začetno maso, začetno dolžino s pomočjo kljunastega merila in začetno vrednost na deformetru. Po prvem merjenju sledi nega vzorcev. Prizme se postavi na mrežo, ki ne ovira krčenja in nabrekanja ter omogoča dovolj velik razmik med vzorci in podlago. Mokra nega poteka v vodi s temperaturo  $21 \pm 2$  °C, drug način nege pa na zraku s temperaturo  $21 \pm 2$  °C in relativno vlago  $60 \pm 10$  %. Rokovanje z vzorci med meritvami naj je čim krajše. Pogostost in časovni interval merjenja so odvisni od namena preiskave. Najpogosteje so dovolj meritve 1, 3, 7, 14, 28 in 56 dni po razkalupljenju. Sprememba dolžine ( $\Delta L$ ) predstavlja razliko med izmerjeno vrednostjo in začetno vrednostjo ( $L_0$ ) na deformetru. Deformacija se izračuna po enačbi:

$$\text{Deformacija} = \frac{\Delta L \times 1000}{L_g} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right],$$



kjer je  $L_g$  začetna dolžina prizme brez upoštevanja reperjev, izmerjena s kljunastim merilom. Poleg deformacij se lahko izračuna tudi specifično spremembo mase ( $m$ ). Pri vsaki meritvi dolžin se izmeri tudi masa na 0,1 g natančno. S tem se določi izguba ali absorpcija vode. Specifično spremembo mase se izračuna po enačbi:

$$m = \frac{\Delta M \times 100}{M_0} [\%],$$

kjer je  $\Delta M$  sprememba mase in  $M_0$  začetna masa [15].

Druga metoda meri izgubo oprijema in nagnjenost k razpokanju v primeru, ko je malta nanesena na betonsko podlago dimenzij 300 mm x 300 mm x 100 mm in podvržena namakanju v vodi ali sušenju. Za merjenje oviranega krčenja je potrebnih pet betonskih plošč. Dve sta namenjeni za merjenje krčenja, dve za nabrekanje in preostala za kontrolo. Betonske plošče morajo biti v standardnih pogojih do starosti najmanj šest mesecev. Nato se nanje nanese malto, skladno s postopkom v standardu EN 1542. Po preteku 24 ur od vgradnje se vzorce razkalupi in potopi v vodo. Po koncu 28 dnevne nege se na vseh petih vzorcih preveri razpokanost in izguba oprijema ter se opaženo zabeleži. Na enem vzorcu se določijo sprijemne trdnosti v skladu z določili standarda EN 1542. Za določitev oviranega krčenja zaradi sušenja se naslednjih 56 dni dva vzorca shrani na temperaturi  $21 \pm 2$  °C in relativni vlagi  $60 \pm 10$  %. Za doseg enakomerne izmenjave vlage je potreben minimalen odmik vzorcev enak  $100 \pm 10$  mm. Za določitev oviranega nabrekanja se naslednjih 56 dni dva vzorca shrani v vodi temperature  $21 \pm 2$  °C. Po končani dobi shranjevanja se na vseh štirih testnih vzorcih preveri razpokanost in možna delaminacija ter se opaženo zabeleži. Priporočljivo je tudi merjenje širine razpok in fotografiranje površine. Nato se na teh vzorcih določijo še sprijemne trdnosti [15].



Slika 10: Prikaz nanosa sloja malte na betonsko podlago in merjenje sprijemnih trdnosti



#### 4.1.2 SIST EN 14406:2004

##### **Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje stopnje in razvoja nabrekanja in hitrosti nabrekanja injekcijske mase**

Ta slovenski standard je prevzet evropski standard EN 14406:2004. Opisuje testno metodo za določevanje stopnje in razvoja nabrekanja in hitrost nabrekanja injekcijskih produktov, namenjenih za prožno zapolnjevanje vlažnih razpok, praznin in rež [16].

V prozorno akrilno cev, notranjega premera  $48 \pm 2$  mm in dolžine npr. 400 mm (dolžino prilagodimo glede na nabrekanje materiala), se vsuje toliko injekcijske mase (suhe mešanice), da ta doseže višino  $20 \pm 1$  mm. Glede na izmerjeno maso vsutega materiala se določi količina zamesne vode (5 g za 100 g produkta). S pomočjo pipete se v cev doda voda in prične se 10 sekund mešanja pri približno 400 obratih na minuto. Nato sledi merjenje. Izmeri se začetna višina mešanice  $H_i$ , maksimalna višina ekspaniranega produkta  $H_m$ , najmanj 5 dobro razporejenih vmesnih meritev  $H_t$  in končna višina  $H_f$ , ki je izmerjena vrednost eno uro po doseženi maksimalni višini. Meritve morajo biti opravljene na najmanj treh vzorcih. Končno stopnjo nabrekanja  $E_f$  se določi po enačbi:

$$E_f = \frac{H_f}{H_i}$$

Hitrost nabrekanja se predstavi z diagrami  $E_t$  f(t), kjer je  $E_t$  funkcija časa in je določen z enačbo:

$$E_t = \frac{H_t}{H_i}$$

Določi se še indukcijski čas, ki predstavlja čas med zamešanjem in pričetkom nabrekanja ter čas, ko masa doseže maksimalno nabrekanje [16].

#### 4.1.3 SIST EN 445:2008

##### **Injekcijska masa za prednapete kable – Preskusne metode**

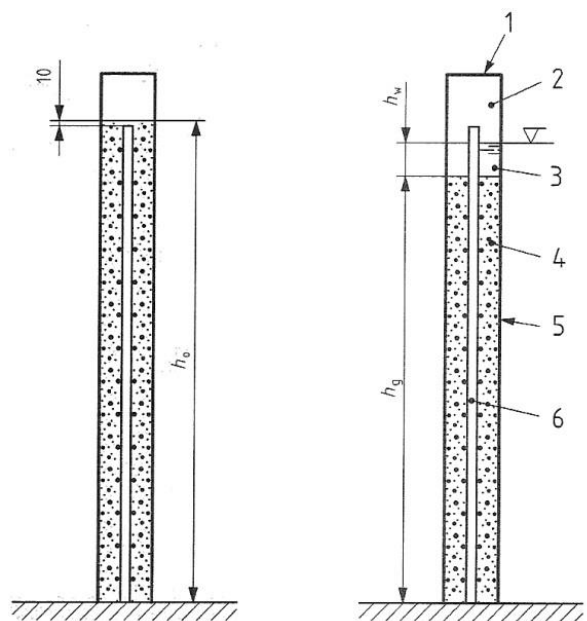
Ta slovenski standard je prevzet evropski standard EN 445:2007. Ena izmed preskusnih metod tega standarda je tudi tako imenovan Wick-induced test. Ta metoda meri prostorninske spremembe in izločanje vode injekcijskih mas. Sprememba prostornine je merjena kot razmerje med prostornino injekcijske mase na začetku in na koncu testa. Merijo se spremembe zaradi sedimentacije ali nabrekanja [17].

Za izvedbo meritev se uporabi prozorno cev notranjega premera 60 do 80 mm in dolžine približno 1 m, ki je na obeh koncih opremljena s čepi. Po sredini cevi se vstavi jeklena vrv iz sedmih prepletenih pramenov. Nato se v cev vgradi injekcijska masa do višine  $h_0$ , ki je 10 mm nad vrhom jeklene vrvi.

Izmeri se začetna višina  $h_0$  in zabeleži čas vgradnje. Meritev se ponovi vsakih 15 minut v prvi uri, nato pa ob starosti 2, 3 in 24 ur. Sprememba prostornine se določi po enačbi:

$$\Delta V = \frac{(h_g - h_0)}{h_0} \times 100 \%,$$

Kjer je  $h_g$  višina pri času  $t_n$  v mm in  $h_0$  začetna višina v mm [17].



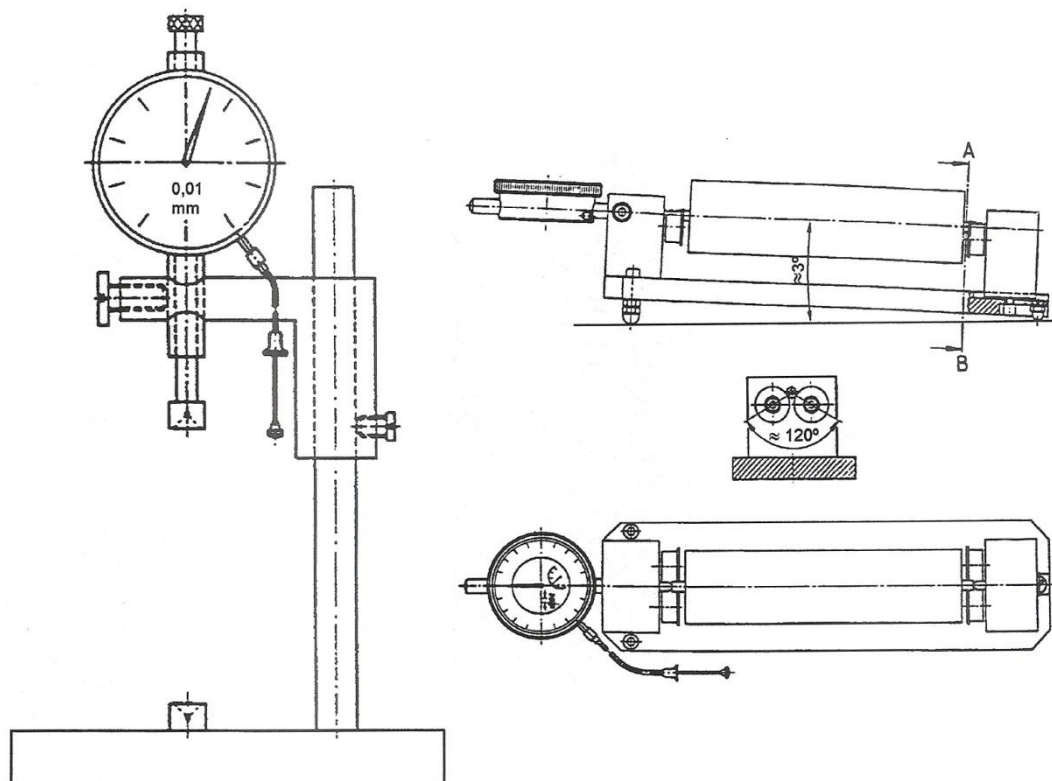
- |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| 1 - zatesnjeno       | 5 - prozorna cev           |
| 2 - zrak             | 6 - jeklena vrv ali palica |
| 3 - voda             | $h_0$ - višina pri $t_0$   |
| 4 - injekcijska masa | $h_g$ - višina pri $t_n$   |

Slika 11: Merilna aparatura (Povzeto po [17])

#### 4.1.4 SIST EN 13872:2004

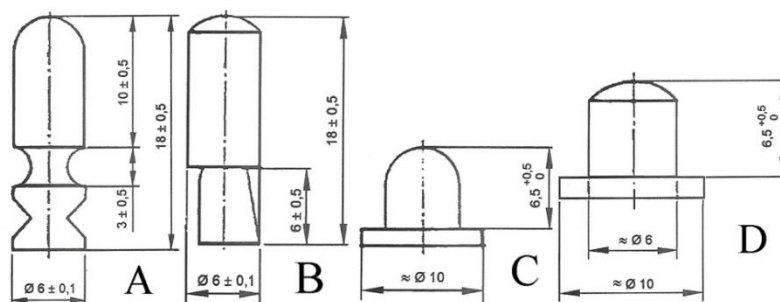
##### Metode za preskušanje talnih izravnalnih in/ali livelirnih mas za hidravlično nanašanje – Ugotavljanje krčenja

Ta slovenski standard je prevzet evropski standard EN 13872:2004. S to metodo se meri dimenzijske spremembe talnih izravnalnih in/ali livelirnih mas za hidravlično nanašanje. Merijo se spremembe v dolžini vzorcev dimenzij 10 x 40 x 160 mm pri vnaprej določenih pogojih in časih shranjevanja. Merilna aparatura mora imeti natančnost 0,005 mm. Dva primera merilne aparature prikazuje slika 12.



Slika 12: Merilna aparatura (Povzeto po [18])

Merilna aparatura mora biti tako prilagojena, da sprejme merilne reperje. Lahko se uporabi reperje, ki se vgradijo v preizkušane ali pritrdijo na njegovo površino. Kalupi morajo omogočati istočasno pripravo treh vzorcev dimenzij 10 x 40 x 160 mm. Primerjalna palica iz jekla mora imeti nizek koeficient toplotnega raztezka s konci enake oblike kot so merilni reperji. Med potekom preiskav mora biti temperatura prostora  $23 \pm 2$  °C in relativna vlaga  $50 \pm 5$  %. Pred vgradnjo mešanice v kalupe morajo ti biti zatesnjeni, v notranjosti pa rahlo premazani z oljem. Kalupi morajo biti najmanj 24 ur pred mešanjem predhodno kondicionirani na temperaturi  $23 \pm 2$  °C. Za preiskavo so potrebni najmanj trije vzorci. Mešanico se vgradi v kalupe takoj po zamešanju. Odvečno maso se odstrani s pomočjo lopatice in nato se zapolnjene kalupe pokrije s ploščo iz plastike ali stekla. Po 24 urah se vzorce odstrani iz kalupov. V primeru uporabe merilnih reperjev vrste C ali D, se jih pritrdi na končne stranice prizem [18].



Slika 13: Primeri merilnih reperjev (Povzeto po [18])

V merilno aparaturu se vstavi primerjalno palico in se nastavi merilno urico na položaj 0. Nato se v prvih 30 minutah po razkalupljenju vstavi vzorec, se ga zavrti in odčita vrednost na merilni urici  $l_1$ . Nato se ponovno vstavi primerjalno palico in odčita vrednost na merilni urici. V primeru večjega odstopanja od 0,01 mm (merilna urica bi načeloma morala pokazati vrednost 0) se meritve ne upošteva. Preveri se čistost, prileganje in poravnava vzorca ter ponovi meritve. Vzorce se shrani v prostoru s standardnimi pogoji. Meritve se ponovijo pri starostih 3, 7, 14 in 28 dni po zamešanju. Dodatno se lahko meri deformacije pri nadaljnji 28 dnevni mokri negi. V tem primeru je začetni odčitek  $l_{28}$  izmerjena pred potopitvijo v vodi. Linearne deformacije se za prvo obdobje shranjevanja določi po enačbi:

$$\Delta l_A = \frac{(l_t - l_1)}{160} \times 100 \%,$$

kjer je  $l_t$  odčitek na merilni urici pri času  $t$  v mm,  $l_1$  odčitek na merilni urici ob razkalupljenju v mm in  $\Delta l_A$  linearna deformacija za prvo obdobje v %. Linearne deformacije se za drugo obdobje shranjevanja določi po enačbi:

$$\Delta l_B = \frac{(l_t - l_{28})}{160} \times 100 \%,$$

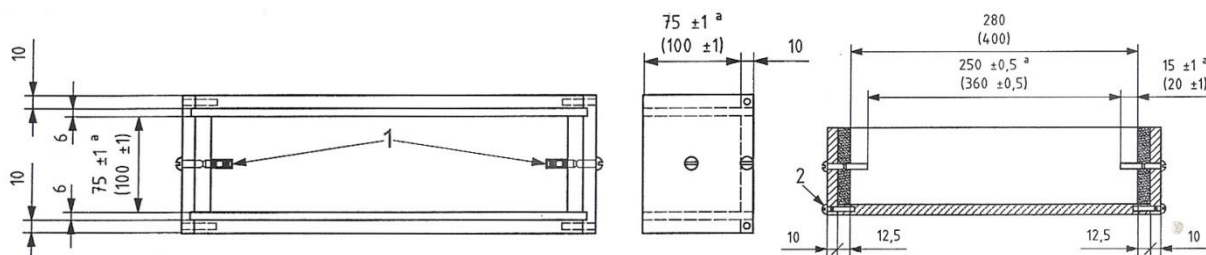
kjer je  $l_{28}$  odčitek na merilni urici ob začetku mokre nege v mm in  $\Delta l_B$  linearna deformacija za drugo obdobje v % [18].

#### 4.1.5 ISO 1920-8:2009

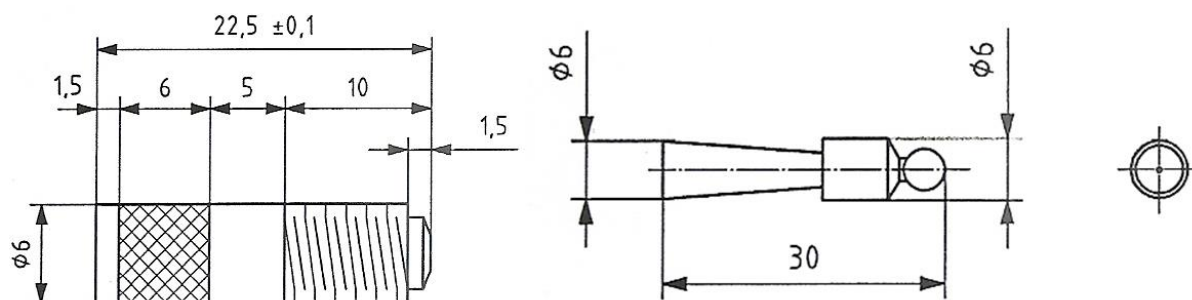
##### **Metoda za določevanje krčenja zaradi sušenja betonskih vzorcev, pripravljenih na terenu ali v laboratoriju**

Ta del standarda ISO 1920 navaja metodo za določevanje sprememb v dolžini betonskih vzorcev zaradi sušenja na zraku in navodila za pripravo ter nego betonskih vzorcev za testiranje. Metoda je primerna za testiranje vzorcev pripravljenih v laboratoriju ali na terenu. Največje zrno agregata ne sme presegati 25 mm. Kalupi morajo biti primerni za izdelavo prizem dimenzij 75 x 75 x 280 mm ali 100 x 100 x 400 mm in omogočati uporabo merilnih reperjev. Po vgradnji betona v kalupe morajo biti ti shranjeni v prostoru z visoko vsebnostjo vlage, po vgradnji na terenu pa v prostoru, zaščiteni pred vetrom in pokriti tako, da je preprečena izguba vode zaradi izhlapevanja. Vzorce s terena je potrebno po preteku 18 ur prenesti v laboratorij. Pri starosti vzorcev 24 ur od vgradnje se jih razkalupi, označi in da v vodo za naslednjih 6 dni. Pri starosti vzorcev 7 dni od vgradnje se jih vzame iz vode, obriše odvečno vodo, izmeri maso, preveri stanje merilnih reperjev in izmeri dolžino vzorcev. Merilna aparatura mora imeti natančnost 0,002 mm. Pred in po meritvi se odčita vrednost na merilni urici, ko je v aparaturu vstavljena primerjalna palica. V primeru večjega odstopanja od 0,002 mm se meritve

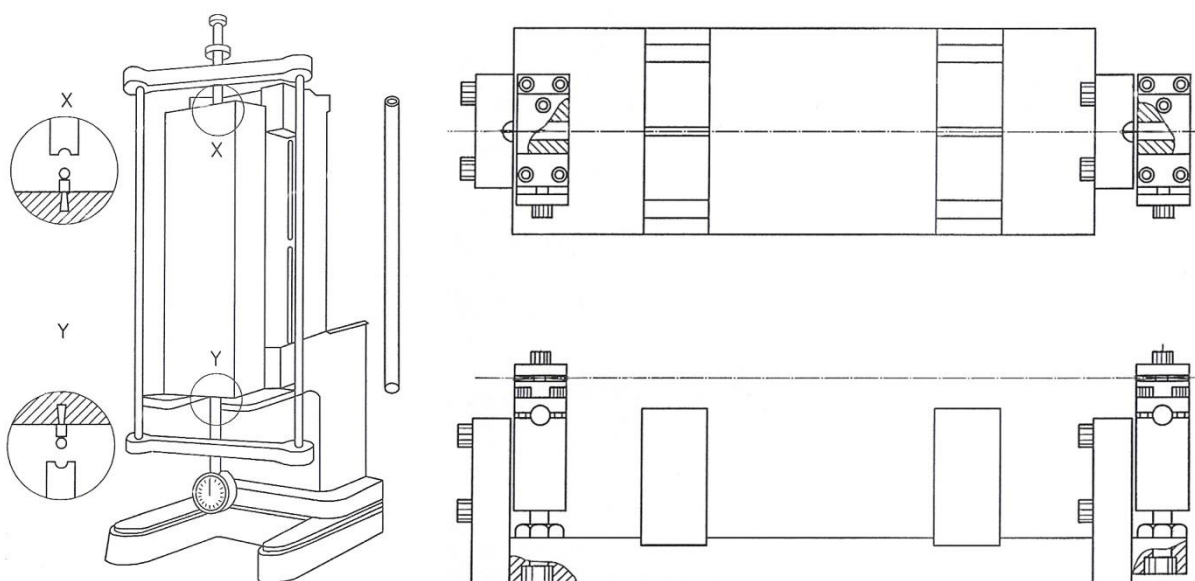
ponovijo. Po prvi meritvi z merilno urico (stanje 0) se preizkušanci prestavijo v prostor za sušenje. Meritve mas in dolžin se ponovijo po 7, 14, 21, 28, 56 in 112 dnevnem sušenju. Za vsak termin merjenja se izračuna sprememba mase in dolžine. Za izračun deformacije se razlika dolžine deli z dolžino med merilnimi reperji, ki je 250 mm za prizme 75 mm x 75 mm x 280 mm in 360 mm za prizme 100 mm x 100 mm x 400 mm [19].



Slika 14: Primer kalupa (Povzeto po [19])



Slika 15: Dva primera merilnih reperjev (Povzeto po [19])



Slika 16: Dva primera merilnih aparatov (Povzeto po [19])

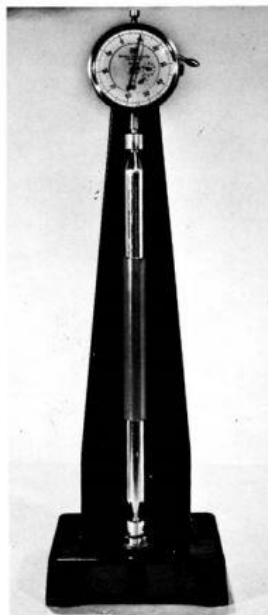
#### 4.1.6 ASTM C157/C157M-08 (Ponovno sprejet 2014)<sup>e1</sup>

##### Standardna metoda za določevanje sprememb dolžin strjene cementne paste, malte ali betona

Ta metoda pokriva pripravo in nego vzorcev, pogoje za testiranje in nego ter natančen postopek izračuna sprememb dolžin vzorcev, ki so narejeni v laboratoriju in izpostavljeni kontroliranim pogojem okolja, predpisani temperaturi in vlagi. S to metodo se določi spremembe dolžin, na katere ne vplivajo zunanje sile in spremembe v temperaturi. Ta metoda je predvsem primerna za primerjavo prostorninskih sprememb različnih materialov s cementnim vezivom. Zahteve za aparaturu in opremo za pripravo vzorcev, njihovo uporabo in izvajanje določevanja sprememb dolžin vzorcev najdemo v standardu ASTM C490/C490M-11<sup>e1</sup>. Za vsako mešanico se naredi tri vzorce. Vzorci malte so dimenzij 25 mm x 25 mm x 285 mm. Za betone, pri katerih gre ves agregat skozi 50 mm sito, so prizme dimenzij 100 mm x 100 mm x 285 mm, za betone pri katerih gre ves agregat skozi 25 mm sito pa 75 mm x 75 mm x 285 mm. Glede na to, da velikost vzorca vpliva na spremembe dolžin, naj bodo vsi primerjani vzorci enakih dimenzij. Mešanico se v kalup z reperji vgradi v dveh slojih z vmesnim zgoščevanjem. Odvečna masa se odstrani z gladilko. Pri starosti 24 ur se vzorci odstranijo iz kalupov in se prvič opravijo meritve. Nato se prične nega v vodi temperature 23 °C do starosti 28 dni, vključno s časom v kalupih. Po končani negi se ponovno odčita vrednost na merilni urici za vzorce in se jih potem shrani v vodi ali na zraku. Naslednje meritve se opravijo pri starostih 8, 16, 32 in 64 tednov, vključno s časom nege pri vzorcih, hranjenih v vodi. Za vzorce na zraku se meritve opravijo 4, 7, 14, 28 dni in 8, 16, 32, 64 tednov po končani negi. Meritve na vzorcih se izvajajo tako, da se vzorec vstavi v stojalo merila in se med vrtenjem vzorca odčita minimalno vrednost na merilni urici. Vzorec naj bo vedno enako orientiran med merjenjem. V primeru hranjenja vzorcev v vodi, se pred merjenjem očisti le reperje in utore kamor nalegajo, po merjenju pa se jih takoj vrne v vodo. Na koncu vseh meritev se ponovno izmeri vrednost na merilni urici, ko je v stojalu nameščena referenčna palica in se v primeru različne vrednosti od prvotne, upošteva povprečna vrednost. Izračun spremembe dolžine v odstotkih se določi po enačbi:

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \times 100 \%,$$

kjer je L sprememba dolžine pri starosti x v %,  $L_x$  odčitek na merilni urici pri starosti vzorca x zmanjšan za odčitek na referenčni palici pri starosti x v mm,  $L_i$  začetna meritev (odčitek na merilni urici) na vzorcu zmanjšana za meritev na referenčni palici v mm in G dolžina med reperji = 250 mm [20].



Slika 17: Primerna aparatura za merjenje sprememb dolžin (vir: [21])

#### 4.1.7 ASTM C1698-09

##### Standardna metoda za merjenje avtogenih deformacij cementnih past in malt

S to metodo se meri avtogeno krčenje cementnih past ali malt z različnimi dodatki in cementi pri konstantni temperaturi, to je brez vpliva sprememb v okolju. Meri se od časa konca vezanja do določene starosti. Ta metoda meri večji del deformacij vzorcev cementnih past in malt v zatesnjenih kalupih iz valovite plastike v obliki cevi notranjega premera 29 mm in dolžine 420 mm. Kalup je z obeh strani tesno zaprt s konusnimi čepi. Kalup z vzorcem je v horizontalni smeri položen v aparaturo z deformetrom (merilna urica), ki meri spremembe dolžine z natančnostjo 2,5  $\mu\text{m}$ . Za vsak material se pripravi tri vzorce, ki morajo biti med meritvami podprti po celotni dolžini in položeni v horizontalni smeri, da ostanejo ravni. Prva meritev se opravi ob koncu vezanja. To se določi s pomočjo metode ASTM C191 za paste in ASTM C403/C403M za malte. Vzorci za določanje vezanja so iz enake mešanice kot za določevanje krčenja in so zaščiteni pred izhlapevanjem. Najprej se s pomočjo referenčne palice umeri deformater (merilna urica), nato se opravi meritev z deformetrom na vzorcu, ki naj bo vedno enako orientiran. Pogostost in trajanje (časovni interval) meritev je odvisna od cementnih mešanic in od okvira preiskav. Če ni drugače predpisano, se meri ob koncu vezanja in ob starostih 1, 3, 7, 14 in 28 dni po zamešanju. Dolžina vzorca paste ali malte se v času  $t$  od zamešanja določi z enačbo:

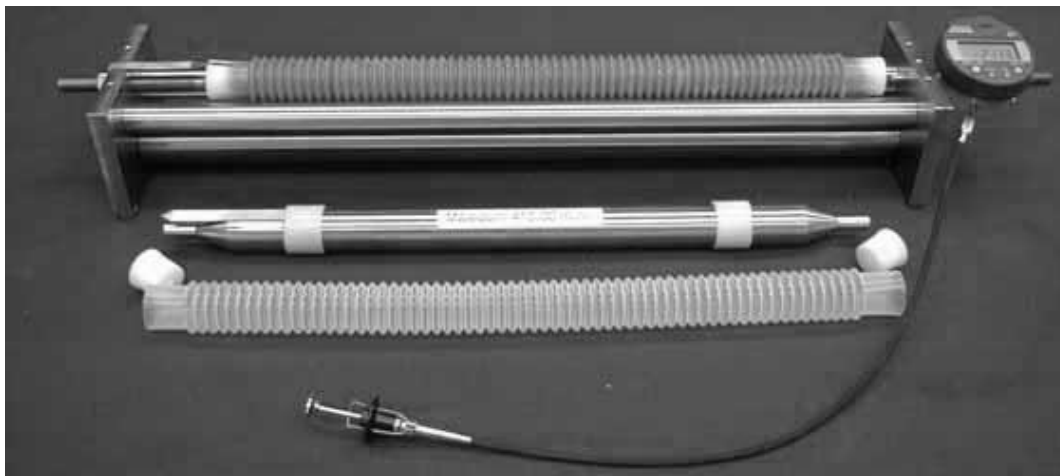
$$L(t) = L_{ref} + R(t) - 2 \times L_{plug},$$

kjer je  $L_{ref}$  dolžina referenčne palice v mm,  $R(t)$  meritev spremembe dolžine vzorca pri času  $t$  v mm,  $L_{plug}$  povprečna dolžina čepov v mm [22].

Avtogene deformacije se določi z enačbo:

$$\varepsilon_{autogenous} = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} \times 10^6 = \frac{R(t) - R(t_{fs})}{L(t_{fs})} \times \frac{10^6 \mu m}{m},$$

kjer je  $t_{fs}$  čas konca vezanja v minutah [22].



Slika 18: Merilna aparatura po ASTM C1698-09 (vir: [22])

#### 4.1.8 ASTM C827/ C827M-10

##### Standardna metoda za merjenje sprememb v višini cilindričnih vzorcev svežih cementnih mešanic

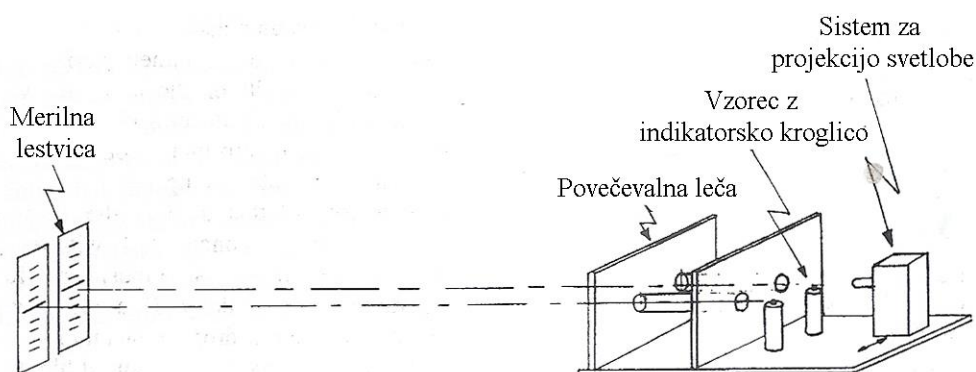
Ta metoda meri spremembe v višini od časa vgradnje dokler malta, pasta, beton ali injekcijska masa ni strjena. Čas zaključka merjenja se lahko določi s časom konca vezanja. Spremembe v višini lahko povzročajo krčenje ali nabrekanje zaradi hidratacije, posedanja, izhlapevanja in drugih kemičnih ter fizikalnih procesov. Spremembe so izražene kot pozitivne ali negativne razlike v višini vzorca, ki ima preprečene pomike v bočni smeri. Ta metoda je zlasti primerna za primerjavo materialov za injektiranje, sanacijo in vlivanje izdelkov, kjer masa zasede celotno prostornino kalupa ali drugega prostora, kamor se vgradi in taka ostane tudi po strditvi. Ker ta metoda omogoča samo delno neovirano krčenje, so rezultati uporabni za primerjavo različnih materialov, ne pa tudi kot absolutne vrednosti. Aparatura te metode sestoji iz luči, ki je vir dovolj močne svetlobe, da projicira meritev na 5 m oddaljen zid. Med lučjo in vzorcem je postavljen zastor iz stekla ali prozorne plastike, ki preprečuje zračne tokove in pretok toplote luči, ki bi lahko vplivala na hidratacijo. Kalup za vzorec je iz kovine ali drugega nevpojnega materiala, cilindrične oblike z višino 100, 150 ali 300 mm, ki je dvakrat večja od notranjega premera kalupa. Na površino vzorca se položi kroglico premera med 6 in 16 mm iz nevpojnega materiala gostote, ki je 55 % gostote cementne mešanice, katero se testira. Med vzorcem in zidom je postavljena povečevalna leča s 90 do 110 kratno povečavo. Za preiskavo se pripravi dva



vzorca ene mešanice in se ju hkrati meri. S pomočjo kovinske palice premera 10 mm, ki se jo postavi na vrh kalupa, se določi velikost povečave. Na sredino površine vzorca se položi kroglico in se jo potopi do polovice. List s horizontalnimi razdelki, ki je pripet na zidu se prilagodi tako, da senca vrha kroglice sovпада s črto z vrednostjo nič. Po tem se aparature ne sme dotikati, dokler ni preiskava končana. Prvih 90 minut se spremembe merijo vsakih 5 minut, naslednjo uro vsakih 10 minut in nato vsakih 20 minut, dokler vzorec se ne strdi. Sprememba v višina vzorca se določi po enačbi:

$$^{\circ}H = (l/M \times H) \times 100 \%,$$

kjer je  $^{\circ}H$  sprememba višine v %, l odčitana vrednost na zidu v mm, H začetna višina vzorca v mm in M povečava leče. Rezultati preiskave se podajo kot graf kjer so pozitivne spremembe višine nad absciso, negativne pa pod. Poda se tudi največja sprememba [23].



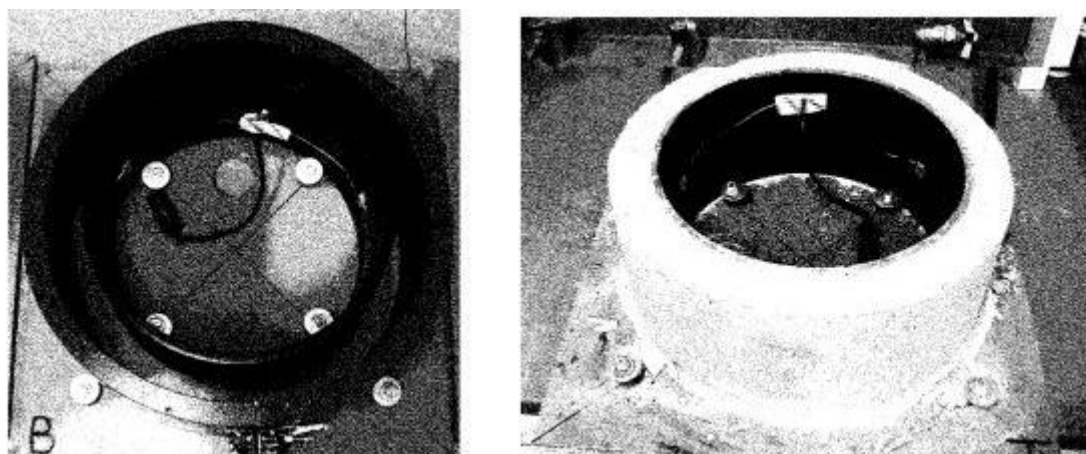
Slika 19: Merilna aparatura ASTM C827/ C827M-10 (Povzeto po [23])

#### 4.1.9 ASTM C1581/C1581M-09a

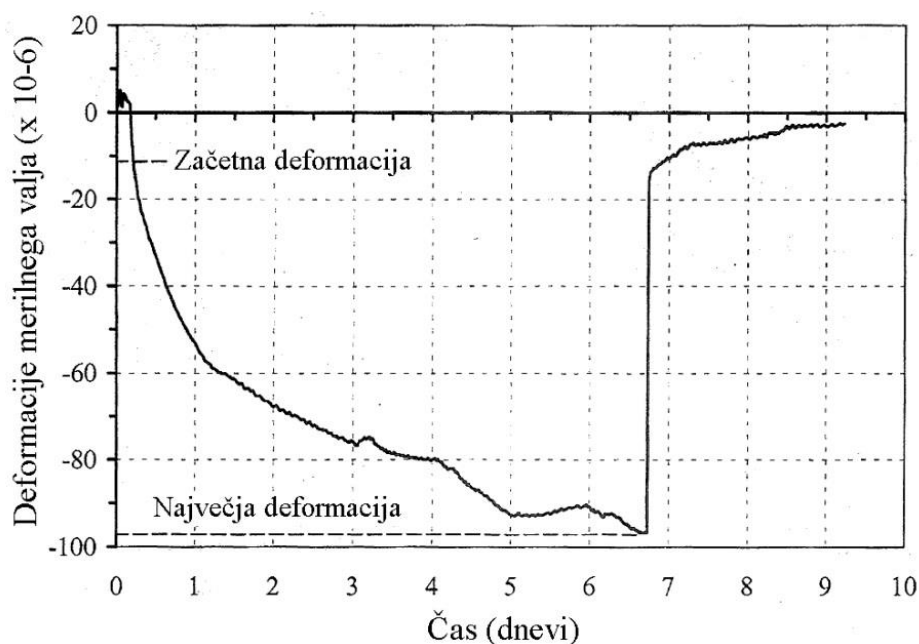
##### Standardna metoda za določevanje starosti pri razpokanju in vrednosti vsiljenih nateznih napetosti malt in betonov pri oviranem krčenju

Ta metoda določa vpliv različnih razmerij dimenzij in lastnosti malt in betonov na razpokanje, katero povzroča krčenje zaradi sušenja in deformacije zaradi avtogenega krčenja in hidratacijske toplote. Ta metoda ni primerna za materiale, pri katerih pričakujemo nabrekanje. Vzorec sveže malte ali betona se vgradi v cilindričen kalup, ki je postavljen okoli jeklenega merilnega valja. Tlačna obremenitev na merilnem valju, ki jo povzroča krčenje vzorca, se meri vse od vgradnje. Razpokanje testnega vzorca se zazna kot nenaden padec obremenitve na merilnem valju. Starost ob razpokanju in hitrost naraščanja tlačnih napetosti v vzorcu sta pokazatelj zmožnosti upiranja razpokanju pri oviranem krčenju. Ta metoda je primerna za primerjavo različnih materialov, ne pa za določevanje starosti pri razpokanju materialov v različnih strukturah, izpostavljenostih in oblikah. S pomočjo te metode se lahko ugotovi relativna verjetnost za razpokanje pri zgodnjih starostih in za pomoč pri izbiри materialov na cementni osnovi, ki so manj občutljivi na razpokanje pri oviranem krčenju. Merilni valj je oblike cevi zunanega

premera 330 mm, z debelino stene 13 mm in višino 150 mm. Za merjenje obremenitve se uporabi najmanj dva uporabna merilna lističa. Podatki naj se zajemajo avtomatsko vsaj vsakih 30 minut za vsak listič posebej. Zunanja cev kalupa je lahko iz različnih materialov z notranjim premerom 405 mm. Za vsak material se vgradi vsaj tri kalupe v dveh slojih, z vmesnim zgoščevanjem z batom ali z vibriranjem. Po vgradnji se izmeri začetna vrednost. Vzorcem v kalupih mora biti v prvih 24 urah zagotovljena mokra nega z vlažnimi krpami. Nato se odstranijo krpe in zunanji del kalupa, vrhni del vzorca se zatesni s parafinskim voskom ali samolepilno aluminijevo folijo. Določi se čas, pri katerem se pojavijo prve vrednosti napetosti. Vsak dan se izmerita temperatura in relativna vlaga. Rezultati preiskave so povprečna starost pri razpokanju, povprečna začetna in končna napetost ter hitrost naraščanja napetosti [24].



Slika 20: Kalup (levo) in vzorec (desno) (vir: [24])



Slika 21: Diagram deformacij merilnega valja s časom (Povzeto po [24])

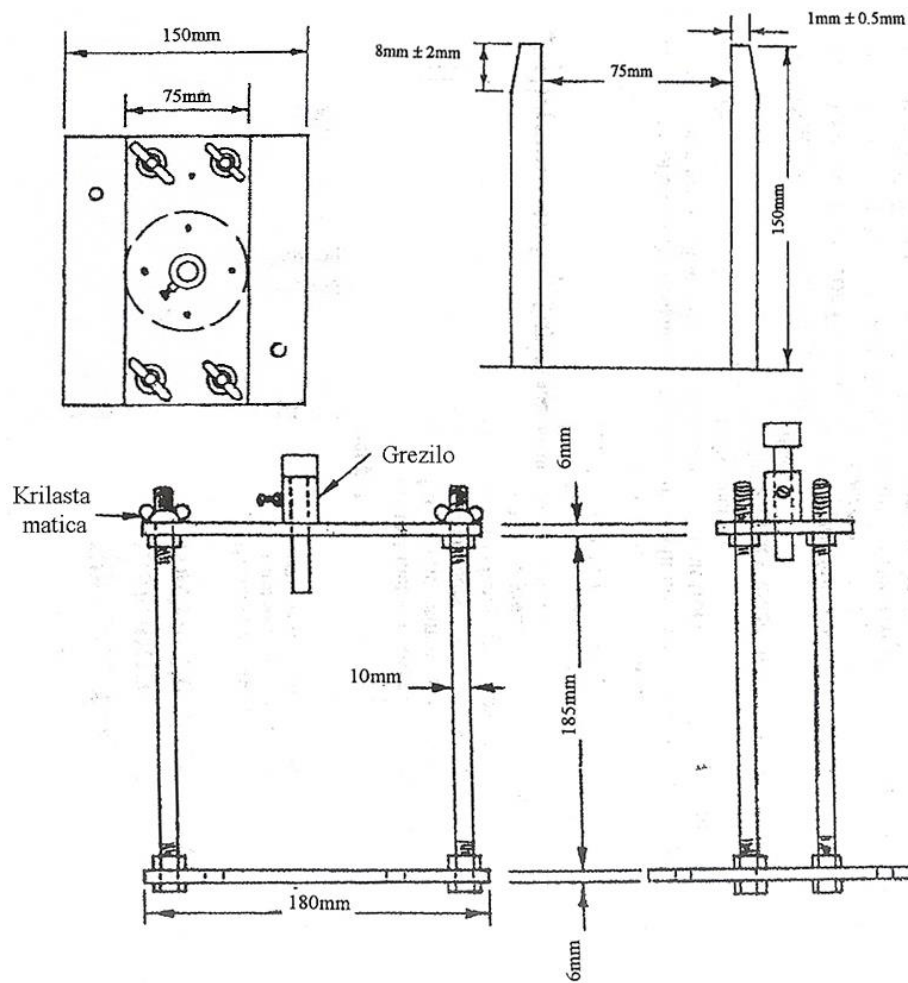
#### 4.1.10 ASTM C1090-10

##### **Standardna metoda za merjenje spremembe v višini cilindričnih vzorcev hidravlično-cementnih injekcijskih mas**

Ta metoda meri spremembe v višini hidravlično-cementnih injekcijskih mas. Vzorec v kalupu je zaščiten tako, da na spremembo višine ne vplivajo izhlapevanje, absorpcija vlage, karbonatizacija ali izpostavljenost temperaturam izven območja  $23 \pm 2$  °C. Po potrebi se lahko to metodo uporabi za merjenje spremembe višine glede na različne vplive, kot so v standardnem postopku. Jekleni kalup cilindrične oblike ima stene debeline 6 mm in je opremljen s sponami za zapiranje. Notranji premer kalupa je 65 mm in višina meri 150 mm. Podložna plošča debeline 6 mm je pritrjena na kalup, a se jo lahko odstrani. Pred vgradnjo vzorca se kalup premaže z mineralnim oljem. Na vrh kalupa se po vgradnji mase postavi z oljem premazana steklena plošča debeline 6 mm in kvadratne oblike s stranico 100 mm. Steklena plošča mora izpodriniti majhno količino odvečne injekcijske mase. Skozi steklo se preveri količina zračnih mehurčkov in se v primeru prevelikega števila vzorec zavrže. Nato se na štiri navojne palice pritrdi jekleno ploščo, ki je nastavljena v vodoravno ravnino. Nato se s pomočjo vijaka spusti grezilo, da pride v kontakt s stekleno ploščo in se ga obteži z 1,5 kg utežjo. Skozi štiri luknje v jekleni plošči se s pomočjo mikrometra izmeri razdalje med vrhom jeklene in steklene plošče. Mesta merjenja na stekleni plošči se označi in se po odstranitvi steklene plošče izmeri tamkajšnje debeline, kar se kasneje prišteje k izmerjeni vrednosti. Pri starostih 24 ur, 3, 14 in 28 dni od zamešanja se izmeri razdalje med vrhom jeklene plošče in površino vzorca. Izračuna se povprečje meritev pri posamezni starosti. Vzorec mora biti ves čas, razen med meritvami zaščiten pred izhlapevanjem, karbonatizacijo, absorpcijo vlage in izpostavljenosti temperaturam izven območja  $23 \pm 2$  °C. Na koncu se izračuna sprememba višine po enačbi:

$$V = \frac{V_1 - V_2}{H} \times 100 \%,$$

kjer je V sprememba višine v %,  $V_1$  povprečje vsaj treh meritev mikrometra na začetku v mm,  $V_2$  povprečje vsaj treh meritev mikrometra pri dani starosti v mm in H višina vzorca v mm [25].



Slika 22: Dimenzije merilne aparature (Povzeto po [25])

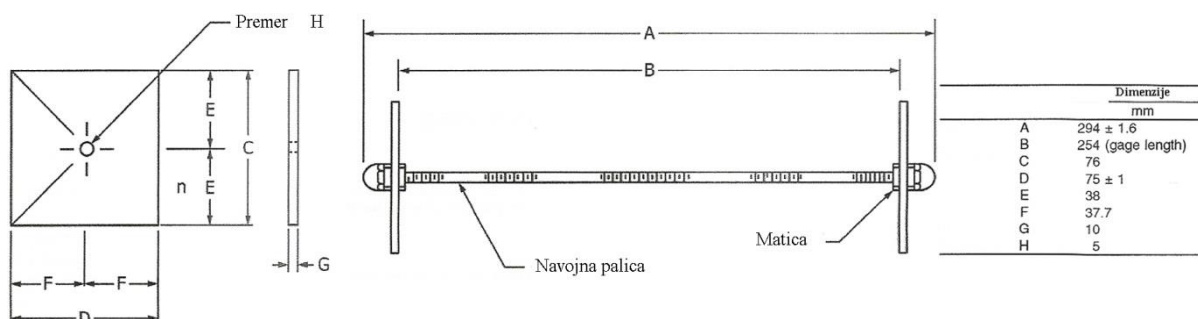


Slika 23: Merilna aparatura (vir: [26])

#### 4.1.11 ASTM C878/C878M-14a

### Standardna metoda za določevanje oviranega nabrekanja betonov s cementi za zmanjšanje krčenja

S to metodo se meri nabrekanje betonov, ki vsebujejo cement za zmanjšanje krčenja. To metodo se lahko uporabi tudi za merjenje nabrekanja glede na stopnjo oviranja, primerjavo različnih cementov in njihovih vsebnosti, razmerja sestavin in glede na različne vplive okolja. Kalupi za pripravo vzorcev morajo ustrezati zahtevam v standardu ASTM C490/C490M-11<sup>e1</sup>. Vzorci so dimenzij 75 mm x 75 mm x 250 mm. Vložek, ki ovira nabrekanje, sestoji iz navojne palice iz jekla z nizko vsebnostjo ogljika in iz dveh jeklenih plošč, ki sta na konce navojne palice pritrjeni z maticami. Vložek se vstavi v kalup pred vgradnjo betona. Matice, ki so na zunanji strani, morajo biti iz nerjavečega jekla. Na skrajnih koncih navojne palice se privijejo posebne slepe matice, ki služijo kot stična površina, ko se vzorec betona meri s pomočjo merilne urice, ki se uporablja tudi v metodi po standardu ASTM C157/C157M-08 (Reapproved 2014)<sup>e1</sup>. Celotna dolžina vzorca z navojno palico in slepimi maticami meri v dolžino približno 290 mm. Za vsako mešanico je potrebno pripraviti najmanj 3 vzorce. Temperature materialov, ki se uporabijo za mešanje betonov, naj bodo podobne pričakovanim temperaturam s terena. Beton se v kalup vgradi v dveh slojih, z vmesnim zgoščevanjem. Kalupi morajo biti pokriti s plastično folijo do razkalupljenja, ki naj bi bilo opravljeno 6 ur po zamešanju. Če to ni možno, se to opravi kasneje, vendar čim prej. 30 minut po razkalupljenju se opravijo prve meritve in od takrat se slepih matic ne odvijte več. Nato sledi nega v vodi z vsebnostjo apna in temperaturo 23 °C, dokler beton ne doseže starosti 7 dni. Po končani negi se ponovno opravijo meritve, po potrebi pa tudi med nego. Sprememba dolžine se določi kot odstotek deformacij po enačbi: sprememba dolžine v % = [(popravljen izmerjena dolžina – popravljen izmerjena začetna dolžina) / dolžina med reperji] x 100, kjer je popravljen dolžina enaka razliki med izmerjeno dolžino vzorca in izmerjeno dolžino primerjalne palice [27].



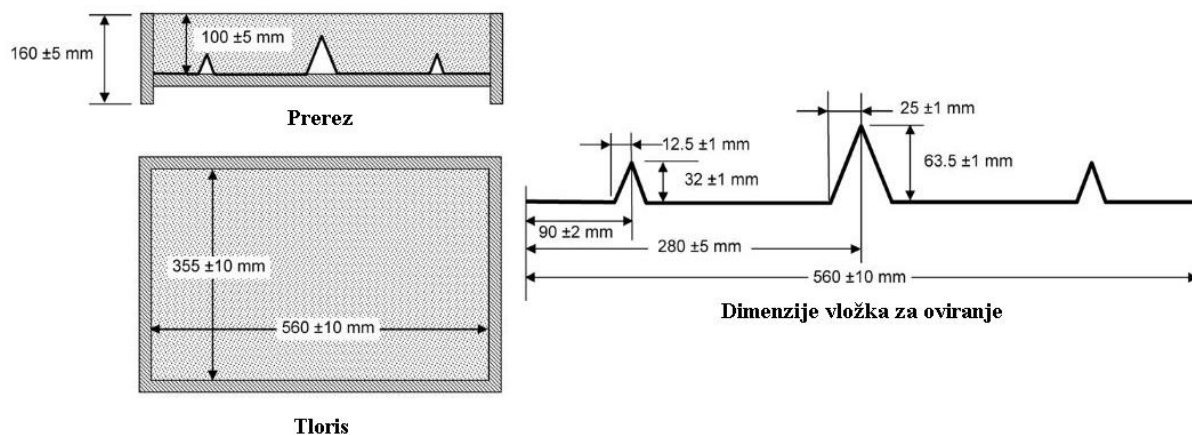
Slika 24: Vložek za oviranje (Povzeto po [27])

#### 4.1.12 ASTM C1579-13

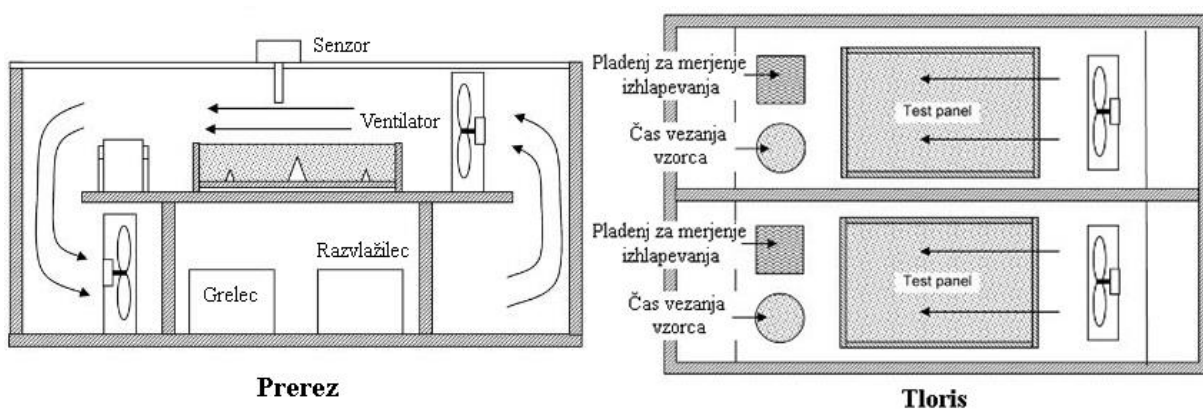
##### **Standardna metoda za določevanje razpokanosti zaradi oviranega plastičnega krčenja betona z vlakni (z uporabo jeklenega vložka)**

Ta metoda primerja površinsko razpokanost betona z vlakni s površinsko razpokanostjo primerjalnega betona. Vzorčni plošči obeh betonov sta izpostavljeni izgubi vlage in oviranim deformacijam, ki povzročijo razpokanje pred koncem vezanja betona. Ta metoda je lahko uporabljena za primerjavo razpokanja zaradi plastičnega krčenja različnih mešanic betonov z vlakni. Plošči primerjalnega betona in betona z vlakni sta pripravljene v skladu z določili standarda in sta izpostavljeni nadziranemu pogojem sušenja po vgradnji. Stopnja izhlapevanja je nadzorovana s posodami z vodo, položenimi poleg testnih plošč. Preiskava se zaključi ob zaključku vezanja betona v skladu s standardom ASTM C403/C403M. Po 24 urah od zamešanja se določi povprečna širina razpok. Iz povprečne širine razpok betona z vlakni in referenčnega betona se izračuna razmerje zmanjšanja razpokanosti (CRR – cracking reduction ratio). Ta metoda je namenjena oceni vpliva izhlapevanja, posedanja in zgodnjega avtogenega krčenja na razpokanje zaradi plastičnega krčenja betona z vlakni do nekaj ur po končanem vezanju. Rezultati, pridobljeni s to metodo se lahko uporabijo za primerjavo betonov z različno sestavo, betonov brez in z vlakni, betonov z vlakni različnih vrst in betonov, ki vsebujejo različne količine in vrste dodatkov. Za uporabne primerjave mora biti izhlapevanje dovolj močno, da povzroči razpoke širine najmanj 0,5 mm v kontrolni mešanici. Kalup je lahko izdelan iz kovine, plastike ali lesa. Maksimalno zrno agregata je 19 mm. Jekleni vložek, ki povzroča povišanje napetosti in notranje oviranje, mora biti izdelan iz enega kosa pločevine, debeline 1,2 mm. Dve 32 mm visoki konici sta od roba oddaljeni za 90 mm v notranjost. Sredinska konica višine 64 mm služi kot začetno mesto razpokanja. Ta vložek se postavi na dno kalupa. Oba morata biti premazana z oljem za lažje razopaženje. Ventilator mora povzročati veter hitrosti več kot 4,7 m/s preko celotne površine preizkušanca. Za merjenje pogojev se uporabi senzorje za temperaturo, vlago in hitrost vetra. Za merjenje širine razpoke se lahko uporabi več vrst meril kot so ročni mikroskop ali merilo za primerjavo širin razpok natančnosti 0,05 mm. Na začetku in vsakih 30 minut se izmeri temperatura zraka, relativna vlaga in hitrost zraka na višini 100 mm nad površino preizkušanca. Po opravljenih meritvah se izračuna razmerje zmanjšanja razpokanosti po enačbi:

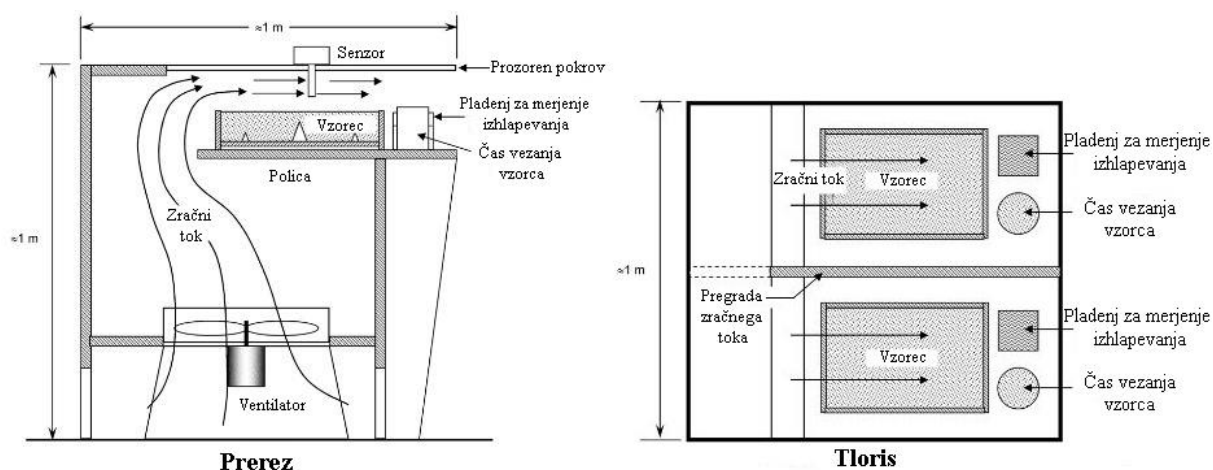
$$CRR = \left[ 1 - \frac{\text{povprečna širina razpok betona z vlakni}}{\text{povprečna širina razpok kontrolnega betona}} \right] \times 100 \% [28].$$



Slika 25: Dimenzije kalupa in vložka za oviranje krčenja (Povzeto po [28])



Slika 26: Primer sistema za vzdrževanje okoljskih pogojev A (Povzeto po [28])



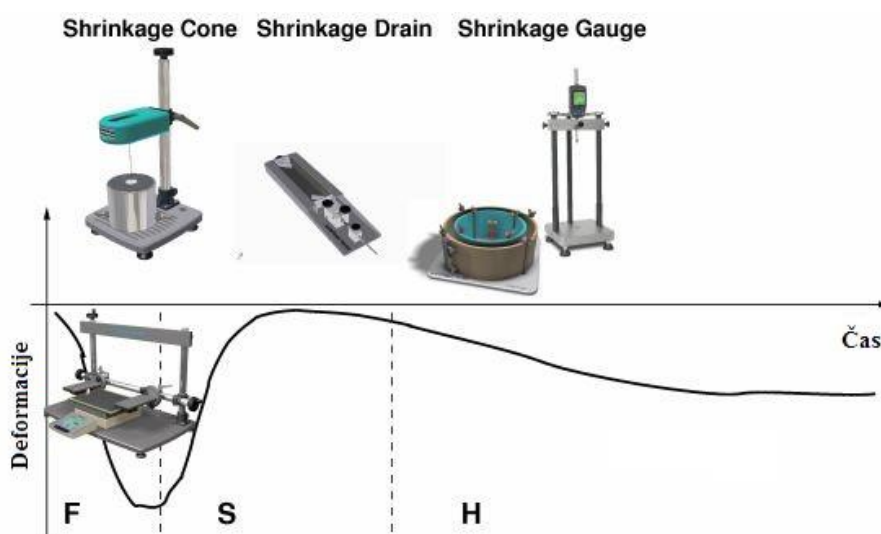
Slika 27: Primer sistema za vzdrževanje okoljskih pogojev B (Povzeto po [28])

## 4.2 NESTANDARDIZIRANE METODE

To so metode v razvoju in interne metode. Da bi postale standardizirane metode, morajo iti skozi postopek standardizacije. Predpogoji so natančnost (rezultati morajo biti ponovljivi), točnost (rezultati morajo razumno sovpadati s pravo vrednostjo) in ekonomičnost. Ekonomičnost metode omogoča večje število merenj in posledično hitrejši razvoj ter izboljšanje natančnosti. Takšna metoda mora omogočati tudi kontrolo temperature. Vsa oprema, katero potrebuje takšna metoda mora biti serijske proizvodnje in dostopna na trgu [29].

Podjetje Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH iz Nemčije, ustanovljeno leta 1990, razvija merilne metode in proizvaja merilne naprave za merjenje reologije, trajnosti, vezanja in krčenja gradbenih materialov [30]. Za merjenje krčenja konstrukcijskih materialov ponujajo več različnih aparatov. Slika 28 prikazuje prosto krčenje s časom na splošno in primerne metode za posamezna obdobja. Razlikovati moramo tri območja trdnosti materiala za uporabo različnih metod meritev:

- Tekoče (F)
- Začetek vezanja (S)
- Strjeni material (H)



Slika 28: Krčenje v odvisnosti od časa in primerne metode za posamezna obdobja (Povzeto po [31])

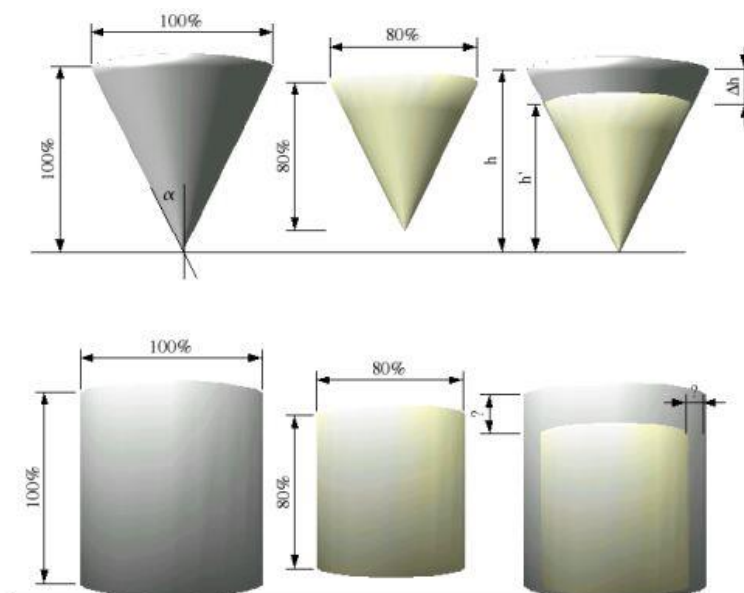
Ta tri območja se lahko naprej razdelijo glede na geometrijo materiala in okoljske pogoje. Prikazane so tudi primerne aparature za merjenje krčenja [31]. Za potrebe eksperimentalnega dela diplomske naloge smo uporabili metodo krčenja v stožcu.

### 4.2.1 KRČENJE V STOŽCU

Metoda krčenje v stožcu je novejša metoda, ki omogoča merjenje krčenja in nabrekanja materiala takoj po zamešanju. Dolžina merjenja ni časovno omejena, vendar se hkrati ne da meriti več vzorcev,



kar predstavlja omejitev te metode, posebej kadar je potrebno večje število preskušanj. V primeru uporabe cilindričnega kalupa lahko merimo deformacije samo v vertikalni smeri. Ta metoda se temu izogne z uporabo kalupa oblike obrnjenega stožca. S predpostavko izotropnosti, se ob deformiranju prostornina vzorca spremeni, kot vzorca pa ostane enak. Manjšemu stožcu se spremeni samo višina (glej sliko 29).



Slika 29: Zakaj stožec deluje in cilinder ne (vir: [31])

Matematično se lahko pokaže, da je sprememba prostornine sorazmerna s spremembo višine na tretjo in sprememba višine sorazmerna s spremembo prostornine na 1/3, kot prikazujejo naslednje enačbe:

$$V = \frac{1}{3}\pi r^2 h; \quad V' = \frac{1}{3}\pi r'^2 h'$$

$$r = h \tan(\alpha) \rightarrow V = \frac{1}{3}(h \tan(\alpha))^2 \pi h$$

$$\alpha = \text{const} \rightarrow V = c h^3; \quad V' = c h'^3$$

$$\frac{V'}{V} = \frac{h'^3}{h^3} \rightarrow \frac{h'}{h} = \sqrt[3]{\frac{V'}{V}}$$

Na sliki 30 je prikazana sestava celotne naprave. Dvojna stena kalupa stožčaste oblike omogoča kontrolo temperature. Za merjenje deformiranja malt je namenjen kalup višine 100 mm in prostornine 349 cm<sup>3</sup>, za betone pa višine 125 mm in prostornine 682 cm<sup>3</sup>. Polipropilenska folija preprečuje trenje ob stenah. Triangulacijski laser meri spremembo višine z natančnostjo nekaj μm. Za preprečitev izhlapevanja vode na gornji površini, se površina lahko pokrije s prozorno silikonsko folijo. Če obstaja

nevarnost nastajanja zračnih mehurčkov na površini vzorca, se lahko na točko, kamor meri laser, položi odbojno ploščico [31].



Slika 30: Sestava naprave za merjenje krčenja s stožcem (vir: [31])

V kalup oblike stožca, ki je narejen iz posebnega polimera, se vstavi tanka folija, prav tako oblike stožca. Nato se napolni posoda s svežo mešanico. Na površino vzorca se lahko položi majhna plastična ploščica prevlečena z mat aluminijevo folijo, ki omogoča odboj laserja. Laserski merilnik je pritrjen na konzolo, ki se premika po višini. Kalup z vzorcem se položi pod laserski merilnik. S pomočjo vijaka in zobnika se laser približa površini vzorca tako, da je v sredini delovnega območja velikosti  $\pm 2$  mm. Točnost laserja v celotnem delovnem območju je boljša kot  $8\mu\text{m}$ . Resolucija je boljša kot  $0,5\mu\text{m}$ . Podatki z laserskega merilnika so digitalizirani in shranjeni v napravo za shranjevanje podatkov. Za nadaljnjo obdelavo jih lahko izvozimo v program Microsoft Excel. Hkrati je možno tudi merjenje temperature in vlažnosti. Dvojna stena kalupa omogoča kontrolo temperature in s tem izključitev vpliva temperature na krčenje. V času merjenja mora biti naprava v prostoru s konstantnimi pogoji [31].

### 4.3 ANALIZA METOD ZA DOLOČEVANJE KRČENJA CEMENTNIH SISTEMOV

Preglednica 3 prikazuje analizo obravnavanih metod za določevanje krčenja cementnih sistemov.

Preglednica 3: Analiza metod za merjenje krčenja cementnih sistemov

Oznaka metode	Primerni materiali za merjenje	Časovno obdobje merjenja	Ovirano/neovirano krčenje	Dimenzije vzorcev	Vrsta merjenega krčenja	Čas razkalupljenja
SIST EN 12617-4:2002 (1. metoda)	Beton (največji premer zrna je 10 mm) in malta	Običajno zadošča od starost 24 ur do 56 dni, lahko pa prilagodimo glede na namen preizkušanja	Neovirano	40 mm x 40 mm x 160 mm	Celotno krčenje	24 ± 1 ura od vgradnje
SIST EN 12617-4:2002 (2. metoda)	Vsi cementni sistemi	Od vgradnje do starosti 81 dni	Ovirano	Sloj na podlagi dimenzije 300 mm x 300 mm	Celotno krčenje	24 ur od vgradnje
SIST EN 14406:2004	Injekcijske mase	Od zamešanja do starosti ene ure po doseženi maksimalni višini	Ovirano	Valj premera 48 mm in višine npr. 400 mm	Celotno krčenje	/
SIST EN 445:2008	Injekcijske mase	Od vgradnje do starosti 24 ur	Ovirano	Valj premera od 60 do 80 mm in višine približno 1 m	Celotno krčenje	/
SIST EN 13872:2004	Izravnalne in/ali livelirne mase	Od starost 24 ur do 56 dni	Ovirano	10 mm x 40 mm x 160 mm	Celotno krčenje	24 ur od vgradnje
ISO 1920-8:2009	Beton (največji premer zrna je 25 mm)	Od starost 7 dni do 112 dni	Neovirano	75 mm x 75 mm x 280 mm ali 100 mm x 100 mm x 400 mm	Krčenje zaradi sušenja	Najmanj 24 ± 2 ure od vgradnje
ASTM C157/C157M-08 (Reapproved 2014) <sup>e1</sup>	Beton in malta	Od starosti 24 ur do 64 tednov	Neovirano	75 mm x 75 mm x 285 mm in 100 mm x 100 mm x 285 mm za betone ter 25 mm x 25 mm x 285 mm za malte	Celotno krčenje	23,5 ± 0,5 ure od zamešanja
ASTM C1698-09	Cementna pasta in malta	Od konca vezanja do starosti najmanj 28 dni	Neovirano	Palica dolžine 420 mm in premera 29 mm	Avtogeno krčenje	/
ASTM C827/C827M-10	Vsi cementni sistemi	Od vgradnje dokler ni material strjen	V primeru nabrekanja je ovirano, v primeru krčenja pa neovirano	Cilinder višine 100, 150, 300 mm; premer je dvakrat manjši od višine	Celotno krčenje	/
ASTM C1581/C1581M-09a	Beton in malta	Od vgradnje do starosti 28 dni (razen če vzorec prej razpoka)	Ovirano	Cev višine 150 mm, zunanjega premera 405 mm, debeline 37,5 mm	Celotno krčenje	24 ur od vgradnje
ASTM C1090-10	Injekcijske mase	Od vgradnje do starosti 28 dni	V primeru nabrekanja je ovirano, v primeru krčenja pa neovirano	Cilinder višine 150 mm in premera 75 mm	Avtogeno krčenje	/
ASTM C878/C878M-14a	Beton	Od starosti 6 ur (oziroma ko je možno razkalupljenje) do starosti 28 dni	Ovirano	75 mm x 75 mm x 250 mm	Celotno krčenje	6 ur od vgradnje, oziroma čim prej, ko je možno
ASTM C1579-13	Beton z vlakni (največji premer zrna je 19 mm)	Od vgradnje do starosti 24 ur	Ovirano	Plošče 355 mm x 560 mm x 100 mm	Plastično krčenje	/
Krčenje v stožcu (Shrinkage cone)	Vsi cementni sistemi	Od vgradnje do starosti 24 ur (lahko tudi daljše)	Neovirano	Stožec višine 100 mm in prostornine 349 cm <sup>3</sup> za malte in stožec višine 125 mm in prostornine 682 cm <sup>3</sup> za betone	Celotno krčenje	/

Metode so si med seboj zelo različne. Direktna primerjava je možna le med 1. metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002 in metodo po standardu ASTM C157/C157M-08 ter med ASTM C827/C827M-10 in krčenjem v stožcu. Metode po standardih SIST EN 12617-4:2002, SIST EN 13872:2004 in ISO 1920-8:2009 so si po principu merjenja in izračuna podobne, vendar so namenjene za različne materiale.

### **Primerjava med SIST EN 12617-4:2002 in ASTM C157/C157M-08**

Pri obeh metodah se merijo linearne deformacije zaradi celotnega neoviranega krčenja na vzorcih iz malt in betonov od starosti 24 ur naprej. Princip merjenja in izračuna ter zahtevana merilna aparatura so pri obeh metodah primerljivi. Zahtevana natančnost mikrometra je pri metodi po SIST EN 12617-4:2002 0,001 mm z merilnim območjem 10 mm, pri metodi po ASTM C157/C157M-08 pa 0,002 mm z merilnim območjem 8 mm. Druga razlika je v dimenzijah preizkušancev. ASTM C157/C157M-08 podaja tri različne velikosti glede na različen material, SIST EN 12617-4:2002 pa samo eno. ASTM C157/C157M-08 predpisuje 64 tednov dolgo časovno obdobje merjenja, slovenski standard pa prepušča, da se čas merjenja prilagodi glede na namen preizkusa.

### **Primerjava med ASTM C827/ C827M-10 in metodo krčenja v stožcu**

Obe metodi merita celotno krčenje, pri obeh pa bi bilo možno meriti samo avtogeno krčenje, če bi se s folijo prekrilo površino vzorca in se s tem preprečilo krčenje zaradi sušenja. Namen obeh metod je merjenje zgodnjega krčenja, vendar je pri metodi krčenje v stožcu možno poljubno dolgo merjenje, težava pa je v tem, da je možno meriti krčenje samo enega vzorca naenkrat. Obe metodi lahko merita krčenje vseh cementnih sistemov. Za merjenje krčenja in nabrekanja tekočih materialov ali materialov v strjevanju mora biti uporabljena brezstična metoda merjenja. To zahtevo izpolnjujeta obe metodi. Tehnika merjenja razdalj je pri metodi krčenje v stožcu bistveno bolj napredna, saj uporablja lasersko tehniko. Poleg tega se močno razlikujeta po obliki kalupa. Prednost kalupa v obliki obrnjenega stožca je v tem, da omogoča merjenje prostorninskega deformiranje, medtem ko se v cilindričnem kalupu lahko meri samo deformiranje v vertikalni smeri (linearne deformacije). Glede na predpogoj izotropnega krčenja in nabrekanja, se materialu spreminjajo dimenzije poleg vertikalne tudi v horizontalni smeri. Dokler je celoten material dovolj tekoč, dobimo samo spremembo v višini. V primeru širjenja materiala v horizontalni smeri, se ta dviguje, kot v termometru. Takoj, ko ima material določeno togost, pa postane širjenje v horizontalni smeri ovirano. V primeru uporabe stožca pa se s predpostavko izotropnosti prostornina spremeni, kot vzorca pa ostane enak. Manjšemu ali večjemu stožcu se pri tem spremeni samo višina. Dodatna prednost metode krčenja v stožcu je avtomatsko merjenje s poljubno gostoto meritev. Merjenje je tudi računalniško podprto, kar omogoča enostavno nadaljnjo obdelavo podatkov.

## 5 EKSPERIMENTALNI DEL

Raziskave za potrebe eksperimentalnega dela diplomske naloge smo opravili v laboratoriju podjetja TKK Srpenica d.o.o., ki izdeluje proizvode, ki se pretežno uporabljajo na področju gradbeništva. Njihov proizvodni program sestoji iz tesnilnih mas, dodatkov za betone, malte in injekcijske mase, specialne sanacijske malte in poliuretanske montažne pene. Je pomemben proizvajalec omenjenih izdelkov doma, v prostoru nekdanje Jugoslavije, kakor tudi v Evropi in svetu.

Opravili smo meritve krčenja na modelni sestavi podlivne malte z dvema od opisanih metod. Izbrali smo dve metodi, ki sta dostopni v omenjenem laboratoriju in ki zajemata obe fazi krčenja – zgodnje in kasnejše krčenje. Meritve smo opravili z obema metodama na enakih materialih in pri enakih pogojih okolice.

S prvo metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002 smo merili linearne deformacije vzorcev starosti od 24 ur do 28 dni pri različnih dolžinah nege in različnih dozacijah dodatkov za preprečevanje krčenja cementnih sistemov.

Z metodo krčenje v stožcu smo merili zgodnje krčenje podlivnih malt z dodatki za preprečevanje krčenja v obdobju od zamešanja do starosti 24 ur.

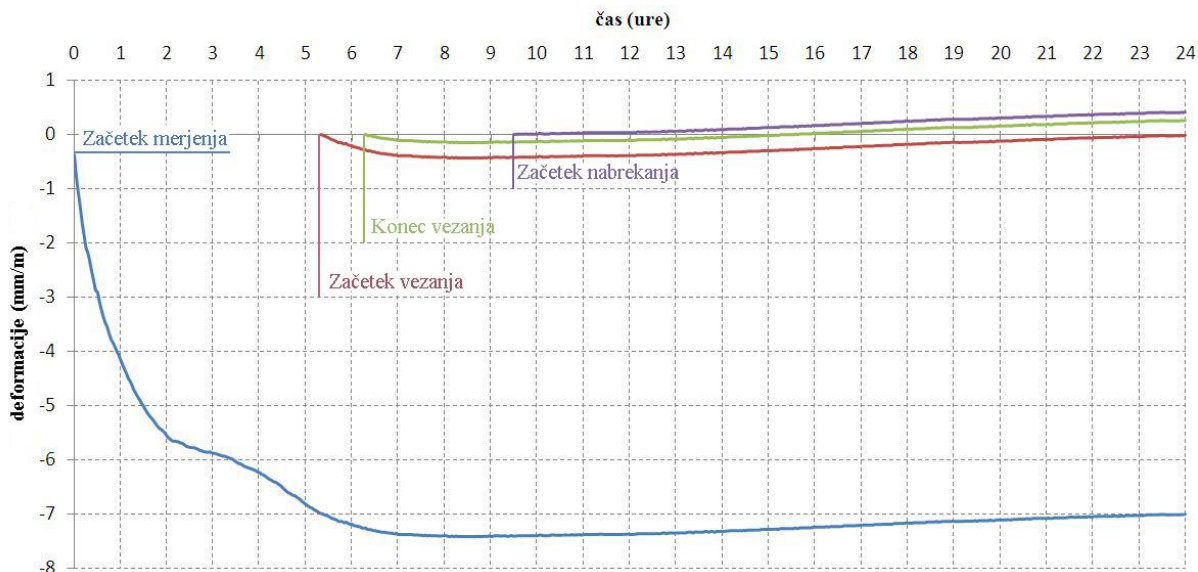
### 5.1 UPORABLJENI MATERIALI

Podlivna malta, katero smo uporabili za merjenje krčenja je sestavljena iz cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R proizvajalca Salomit Anhovo in kremenčevega peska frakcij od 0 do 3 mm. Za preiskave smo uporabili 5 različnih dodatkov za preprečevanje krčenja. Označili smo jih s kraticami D, L, B, S in M. Poleg dodatkov za preprečevanje krčenja so v podlivni malti še drugi dodatki. Uporabili smo vodo iz vodovodnega sistema. Količino zamesne vode smo prilagajali, dokler nismo dosegli ciljne konsistence mešanice – 190 mm razleza.

### 5.2 KRČENJE V STOŽCU

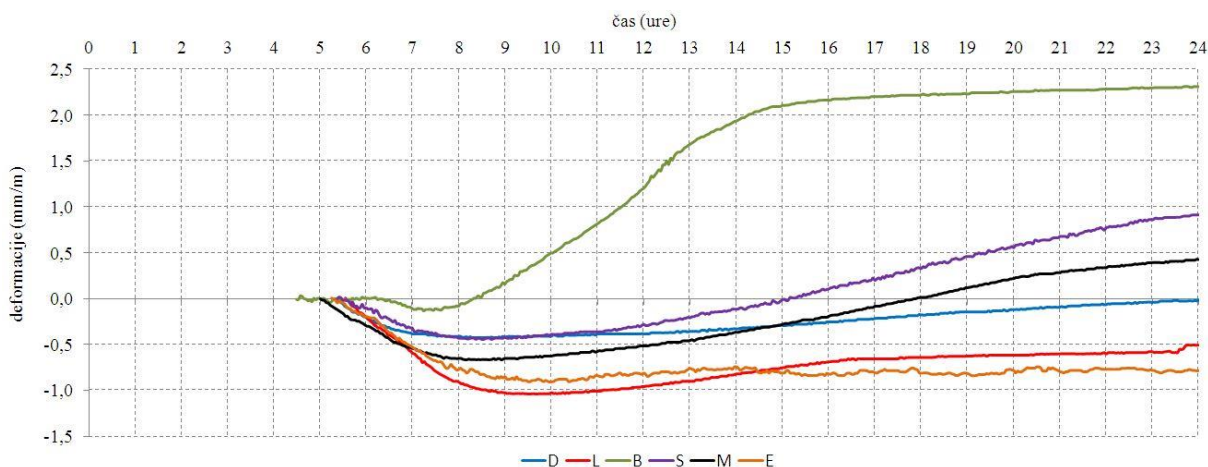
Z merjenjem smo začeli 15 minut po začetku mešanja malte.

Za čas nič smo vzeli čas začetka vezanja, katerega smo določili s pomočjo Vicat-ovega aparata v skladu s standardom SIST EN 480-2:2006. Slika 31 prikazuje vpliv izbire različnega časa nič pri dodatku za preprečevanje krčenja D na končno vrednost deformiranja. V primeru uporabe začetka vezanja (5,35 ur) dobimo pri 24 urah vrednost deformacij -0,01 mm/m, v primeru uporabe konca vezanja (6,27 ur) 0,26 mm/m in v primeru, da za čas nič vzamemo trenutek, ko se prične nabrekanje, dobimo pri 24 urah vrednost deformacij 0,41 mm/m. V primeru, da ne izključimo plastičnega krčenja, pa dobimo pri 24 urah vrednost deformacij kar -6,99 mm/m.



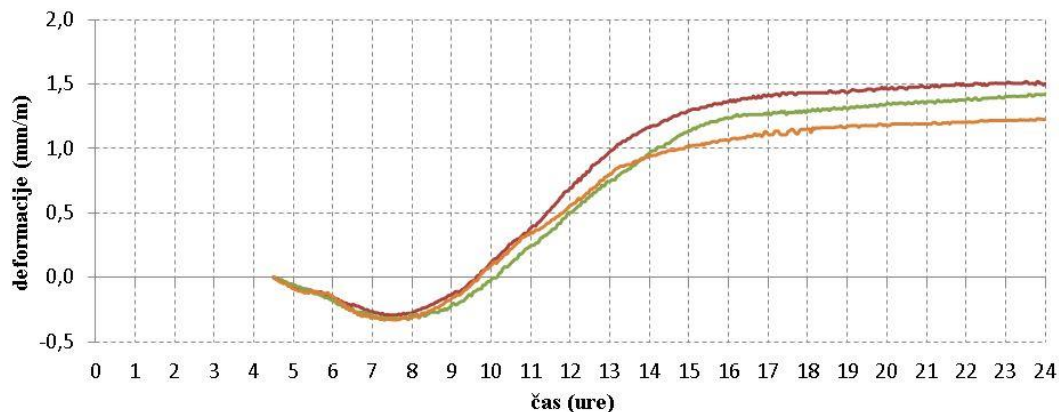
Slika 31: Vpliv izbire različnega časa nič na končno vrednost deformiranja podlivne malte z dodatkom za preprečevanje krčenja D po 24 urah

Slika 32 prikazuje deformiranje podlivnih malt z 8 % dozacijo dodatkov za preprečevanje krčenja v obdobju od začetka vezanja do starosti 24 ur, z metodo krčenja v stožcu. Krivulja z oznako E prikazuje deformiranje podlivne malte brez dodatka za preprečevanje krčenja. Kot smo pričakovali, pri tej krivulji ni nabrekanja. Močno izstopa krivulja B, ki ima največ nabrekanja v času od 7,5 do 15 ur po začetku merjenja in končno deformiranje 2,31 mm/m. Preostale mešanice imajo nižje končne deformacije (od -0,51 mm/m do 0,91 mm/m). Med njimi pa izstopa krivulja S, ki od začetka nabrekanja narašča z največjim naklonom. S takšnim naklonom krivulje oziroma trendom deformiranja lahko pričakujemo večje nabrekanje v prihodnjih dneh (starost več kot 24 ur) v primerjavi z ostalimi vzorci, ki imajo manjši naklon krivulje.



Slika 32: Deformacije podlivnih malt z 8 % dozacijo dodatkov za preprečevanje krčenja v obdobju od začetka vezanja do starosti 24 ur z metodo krčenja v stožcu

Slika 33 prikazuje 3 ponovitve meritve deformiranja malte enake sestave pri enakih pogojih. Povprečna vrednost pri 24 urah je 1,38 mm/m, standardni odklon pa 0,11 mm/m. Vidimo, da je ponovljivost rezultatov preiskave relativno dobra.



Slika 33: Trikrat ponovljeno merjenje deformiranja malte enake sestave pri enakih pogojih

Metoda krčenje v stožcu omogoča merjenje tudi samo avtogenega krčenja. Vpliv krčenja zaradi sušenja se izključi s pomočjo plastične folije, s katero se pokrije površino vzorca in se jo pritrdi na obod kalupa s pomočjo elastike, kot prikazuje slika 34. S pomočjo obojstranskega lepilnega traku se prilepi odbojno ploščico na spodnjo stran folije. Del folije nad centrom odbojne ploščice odrežemo tako, da ima laser prosto pot do odbojne ploščice in ga folija ne ovira.

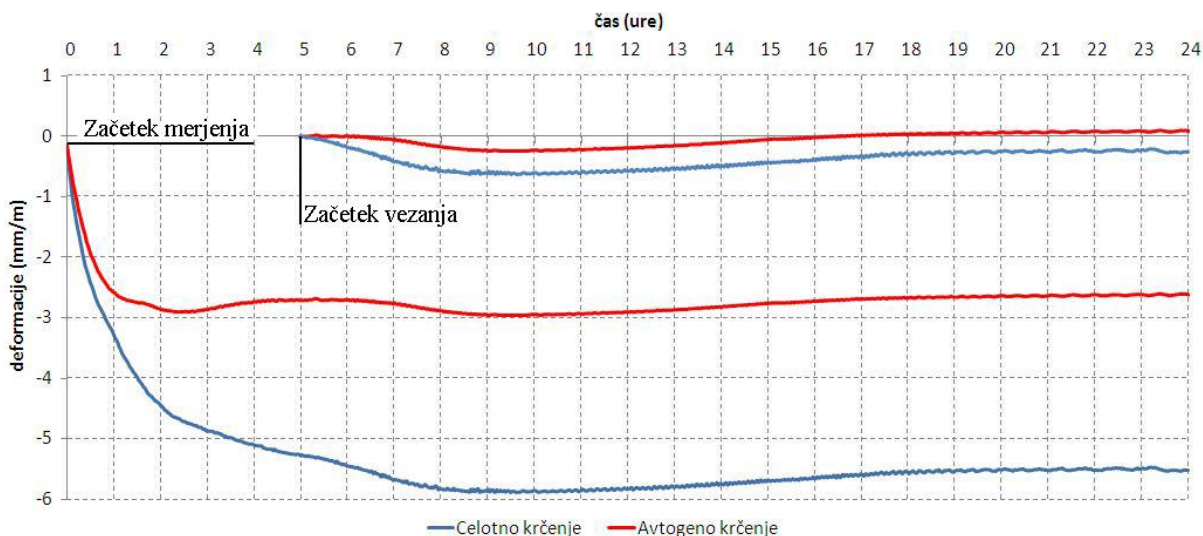


Slika 34: S plastično folijo prekrita površina vzorca za merjenje avtogenega krčenja

Slika 35 prikazuje rezultate merjenja avtogenih in celotnih deformacij podlívne malte enake sestave pri enakih pogojih. V primeru upoštevanja začetka vezanja kot časa nič, dobimo pri merjenju avtogenega deformiranja pri 24 urah vrednost deformacij 0,09 mm/m, v primeru merjenja celotnega

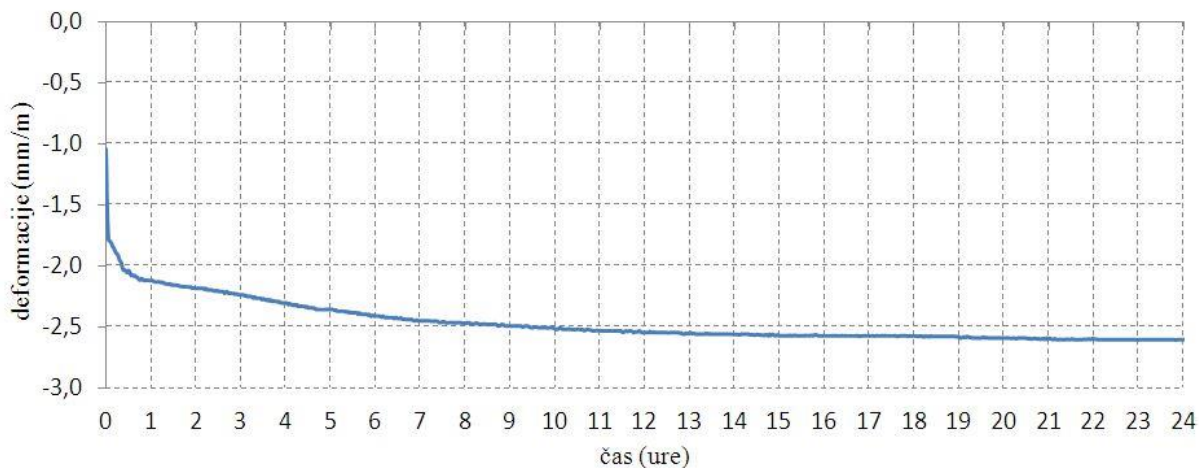


deformiranja pa  $-0,34$  mm/m. V primeru da gledamo celotno deformiranje, vidimo, da s prekrivanjem površine vzorca s folijo vplivamo tudi na potek plastičnega krčenja.



Slika 35: Razlika med rezultati merjenja celotnega in avtogenega deformiranja

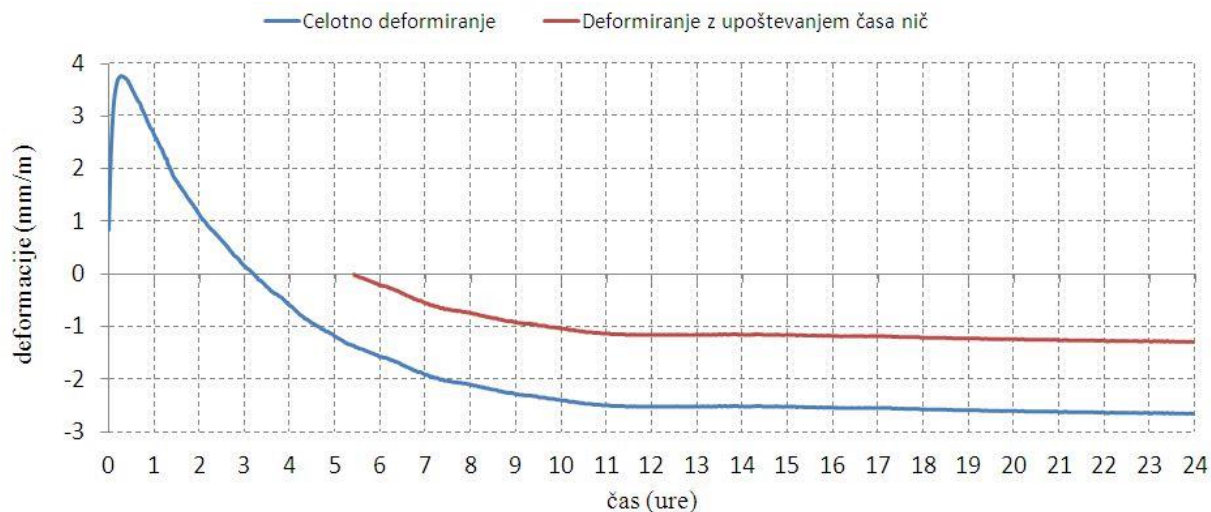
Z metodo krčenja v stožcu je mogoče merjenje deformacij različnih materialov. Slika 36 prikazuje primer deformacij hitrovezoče malte, ki vsebuje aluminatni cement in specialne kemijske dodatke za dosego hitrega vezanja. Ta material hitro veže, zato je težko določiti mejo med plastičnim krčenjem in krčenjem, ki vpliva na lastnosti strjenega materiala.



Slika 36: Merjenje krčenja hitrovezoče malte z metodo krčenja v stožcu

Slika 37 prikazuje primer deformacij podlívne malte, ki vsebuje drugačen dodatek, ki učinkuje že v času plastičnega krčenja. V primeru upoštevanja začetka vezanja (5,4 ur) kot čas nič, učinek nabrekanja ne bi bil viden.





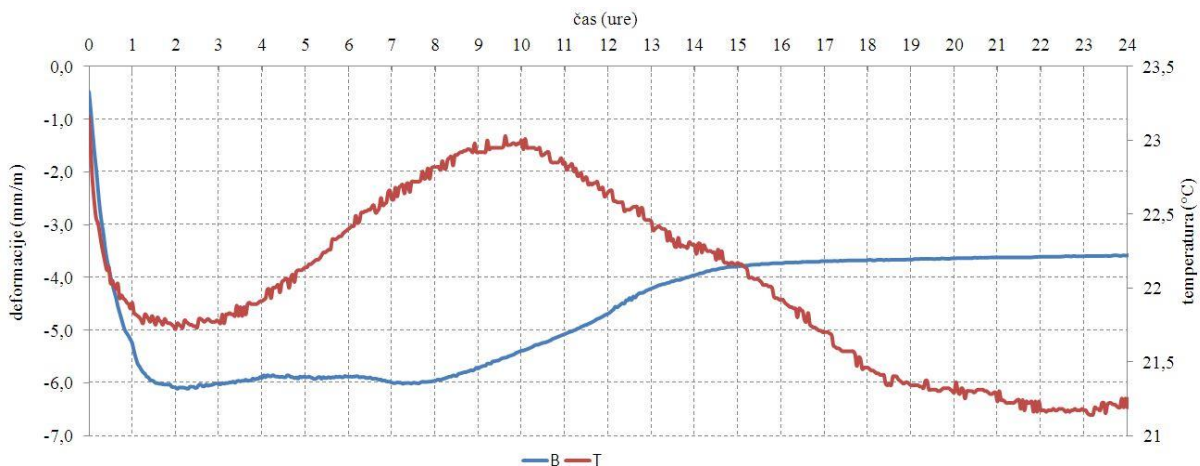
Slika 37: Merjenje krčenja drugačne podlívne malte z metodo krčenja v stožcu

Metoda krčenja v stožcu omogoča merjenje temperature v notranjosti vzorca s pomočjo temperaturne sonde, kot prikazuje slika 38:



Slika 38: Merjenje temperature v notranjosti vzorca pri metodi krčenja v stožcu

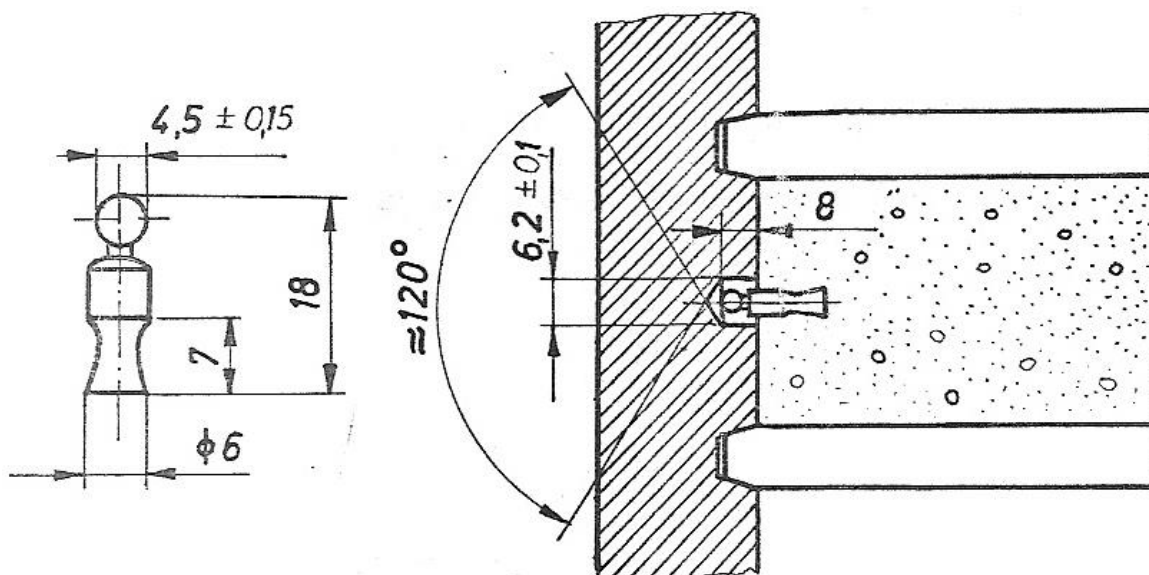
Temperatura se pri dodatku za preprečevanje krčenja B zaradi hidratacije prične dvigovati približno po treh urah, po približno desetih urah pa začne padati, kot prikazuje slika 39. Krivulja B predstavlja celotno deformiranje v prvih 24 urah pri uporabi dodatka za preprečevanje krčenja B, za katerega se je izkazalo, da ima v prvih 24 urah največji učinek. Krivulja T predstavlja istočasno izmerjeno temperaturo. Temperatura naraste za približno 1,3 °C, zato ima temperaturno deformiranje, ki je posledica spremembe temperature zaradi hidratacije, v tem primeru majhen delež pri celotnem deformiranju. Temperaturno deformiranje lahko povzroča tudi vpliv nihanja temperature okolice, kar pa je v našem primeru izključeno, zaradi konstantnih laboratorijskih pogojev.



Slika 39: Izmerjeno deformiranje in spreminjanje temperature pri uporabi dodatka B

### 5.3 METODA PO SIST EN 12617-4:2002

S to metodo smo merili linearne deformacije podlivnih malt v skladu s standardom SIST EN 12617-4:2002. Uporabili smo Graaf – Kaufmann-ov deformeter opremljen z merilno urico Mitutoyo Absolute ID-S 1012 natančnosti 0,01 mm in merilnim obsegom 12,7 mm. Natančnost merilne urice je manjša od zahtevane v standardu (0,001 mm). Prav tako od standarda odstopa oblika uporabljenih merilnih reperjev, katere prikazuje spodnja slika:



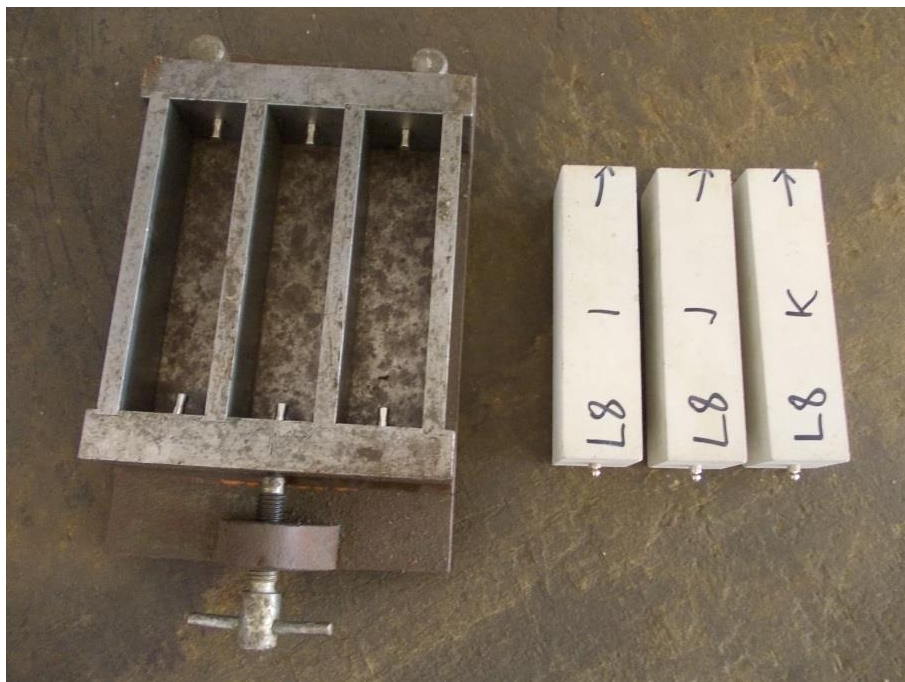
Slika 40: Uporabljeni merilni reperji in njegova vgradnja v kalup (vir: [32])



Slika 41: Merilna aparatura s primerjalno prizmo

Za preiskave smo imeli na voljo 5 različnih dodatkov za preprečevanje krčenja. Označili smo jih s kraticami D, L, B, S in M. Vsak dodatek smo testirali pri dozacijah 4, 6, 8 in 10 % glede na maso cementa. Poleg podlivnih malt z različnimi dodatki smo merili linearne deformacije mešanice brez dodatka za preprečevanje krčenja. To mešanico smo označili s kratico E. Za vsako dozacijo in za vsak dodatek smo vgradili tri kalupe po tri prizme. En set prizem smo od razkalupljenja pri starosti 24 ur do starosti 28 dni negovali v vodi s stalno temperaturo 22 °C. Drugi set prizem smo po treh dneh mokre nege prenesli v prostor s konstantno temperaturo 20 °C in vlago 55 %. Na preostalih prizmah pa smo merili krčenje v primeru brez negovanja. Poleg petih dodatkov smo pri vsakem setu mešanic merili tudi podlivno malto brez dodatka, s katero smo preverili vpliv vhodnih materialov in natančnost same metode.



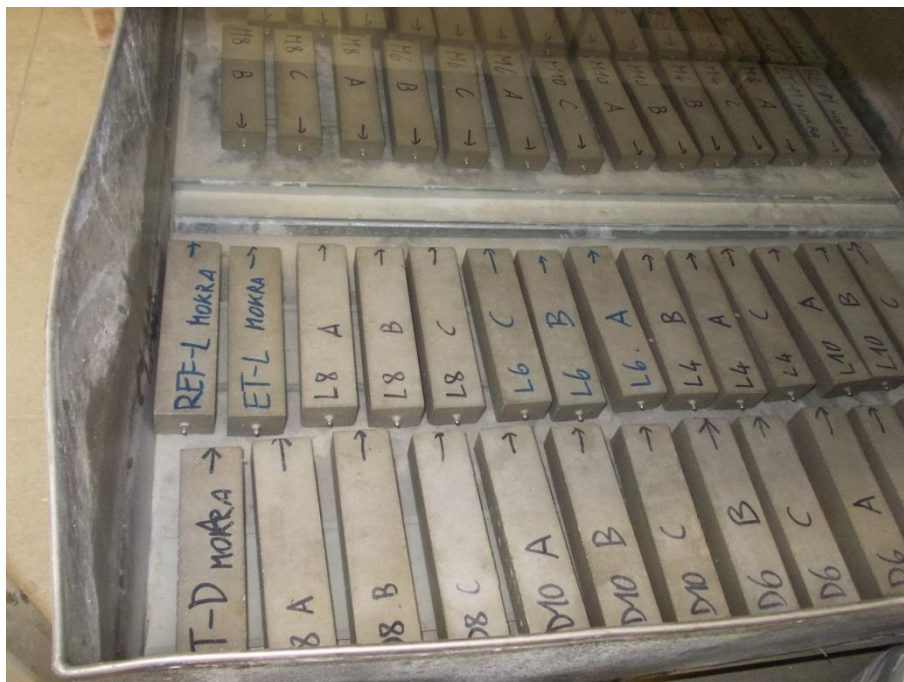


Slika 42: Kalup z vgrajenimi merilnimi reperji in pripravljene vzorci

Po zamešanju smo malto vgradili v kalupe in jih pokrili s plastično folijo. Po preteku 24 ur smo jih razkalupili, označili in določili njihovo začetno dolžino. Po opravljeni prvi meritvi smo vzorce izpostavili različnim negam.



Slika 43: Vzorci v prostoru s konstantnimi pogoji



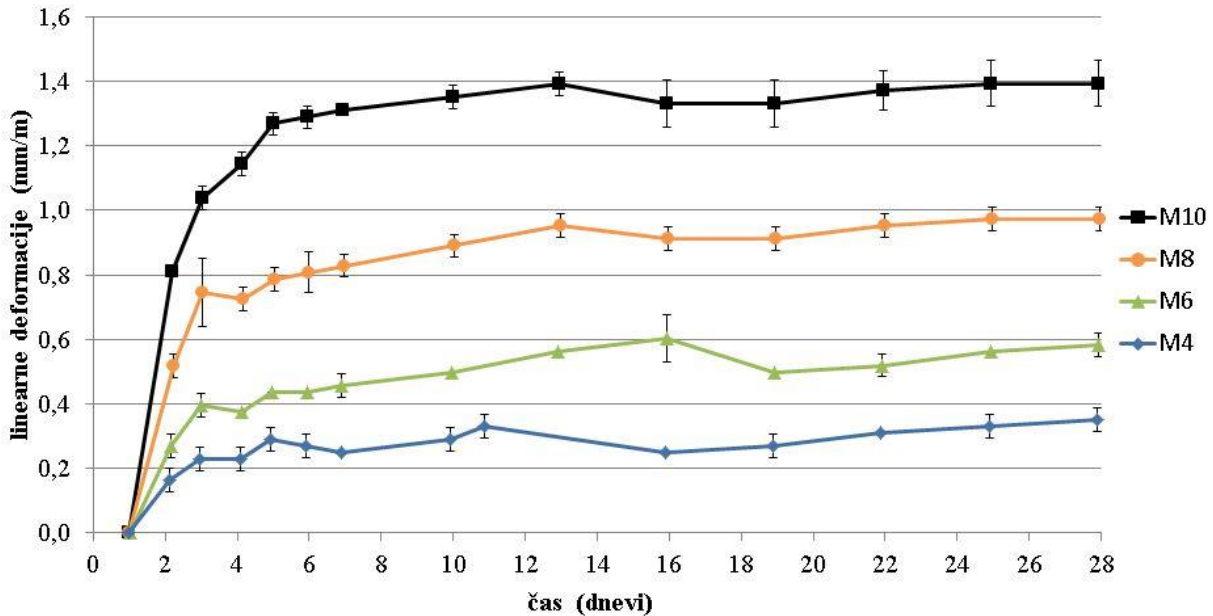
Slika 44: Vzorci potopljeni v vodi

Prvih 7 dni smo meritve opravili vsak dan, naprej pa vsak tretji dan. Vzorce, ki smo jih po treh dneh mokre nege prenesli v suh prostor, smo dodatno merili tudi osmi in deveti dan, saj so bile takrat pričakovane večje spremembe med meritvami.

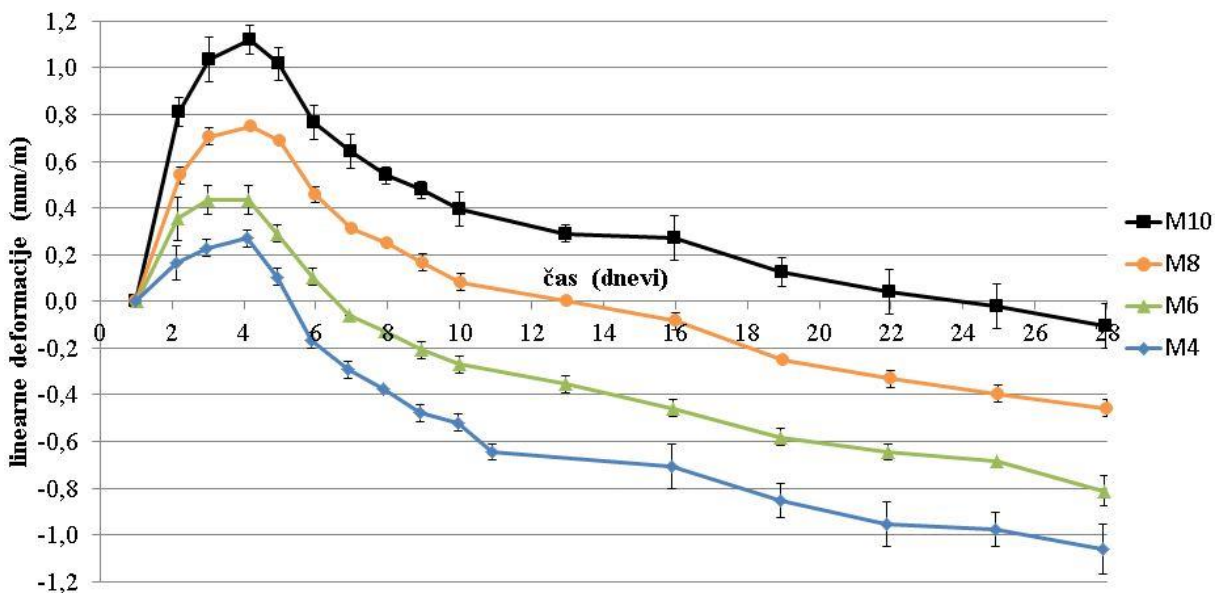


Slika 45: Merjenje dolžin vzorcev

Slike 46, 47 in 48 prikazujejo deformiranje vzorcev z različnimi dozacijami dodatka M pri različno dolgi mokri negi (28 dni, 3 dni in brez mokre nege). Izmerjene vrednosti predstavljajo povprečne vrednosti treh meritev s standardnim odklonom. Pri podlivnih maltah s preostalimi dodatki za preprečevanje krčenja je potek deformiranja podoben, le njihove vrednosti se razlikujejo.

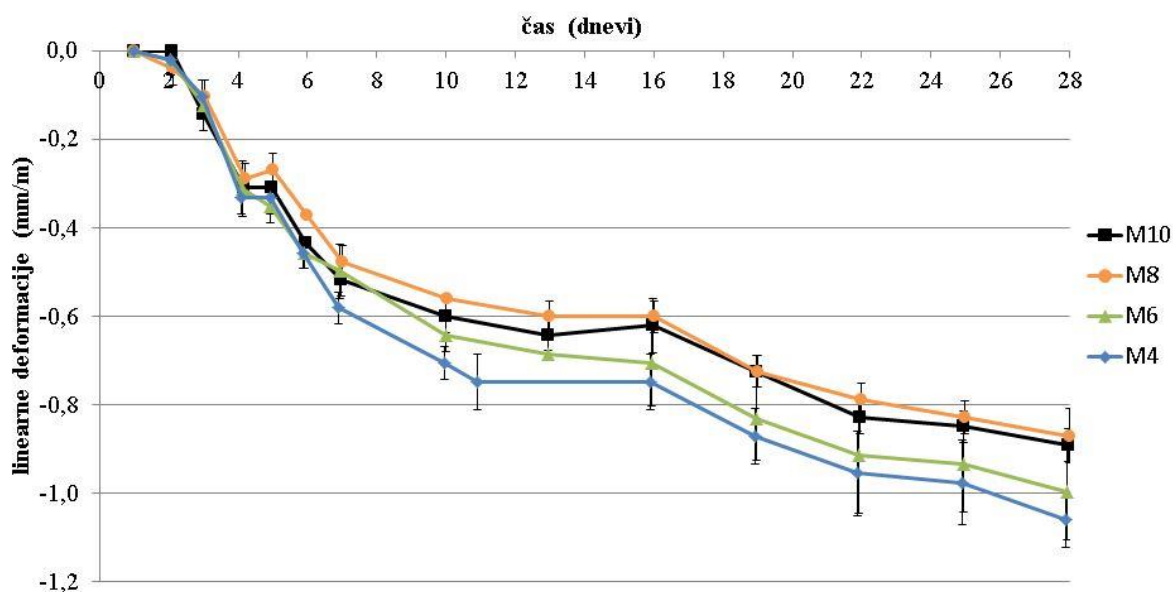


Slika 46: Deformiranje vzorcev z dodatkom M pri 28 dnevni mokri negi



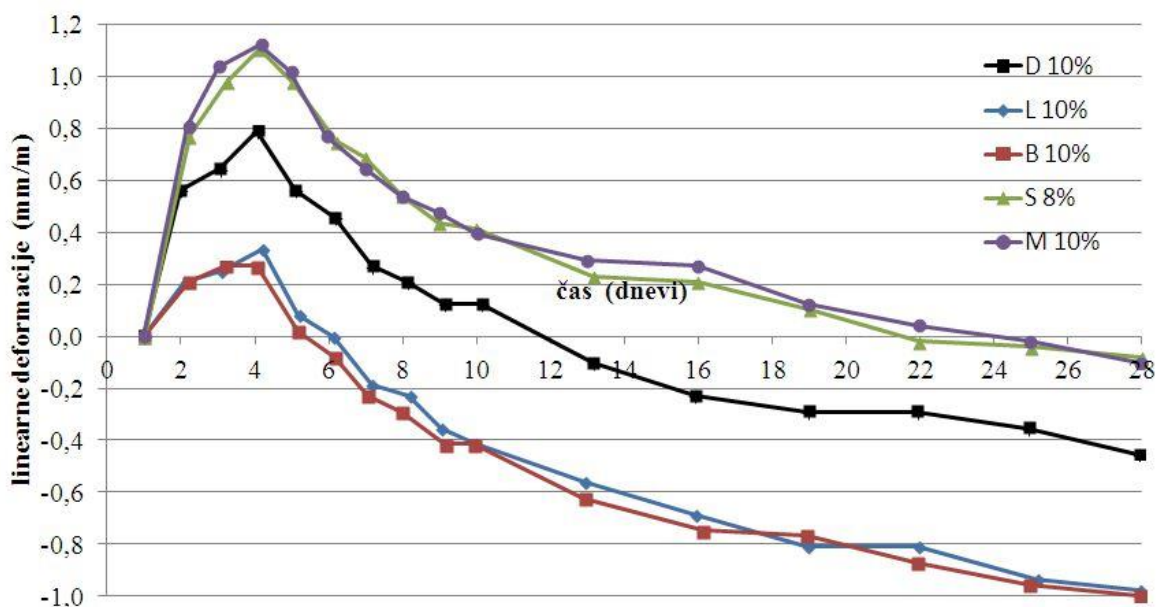
Slika 47: Deformiranje vzorcev z dodatkom M pri 3 dnevni mokri negi





Slika 48: Deformiranje vzorcev z dodatkom M brez mokre nege

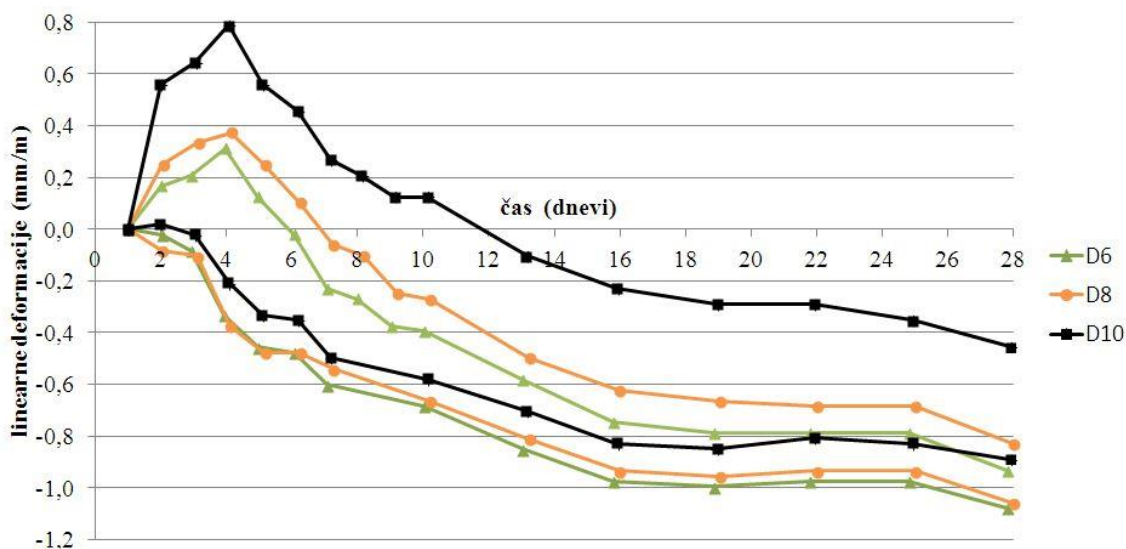
Za uporabo tega materiala v praksi je najbolj zanimiv potek deformacij pri 3 dnevni mokri negi in sušenju v nadaljevanju. Slika 49 prikazuje deformiranje pri 3 dnevni mokri negi vseh uporabljenih dodatkov pri dozacijah, pri katerih se končna vrednost deformiranja čim bolj približa vrednosti 0, kar predstavlja neskrčljiv material. Glede na dobljene vrednosti bi morali dozacije dodatkov D, L in B povišati.



Slika 49: Prilagojene dozacije dodatkov za preprečevanje krčenja za dosego neskrčljivega materiala

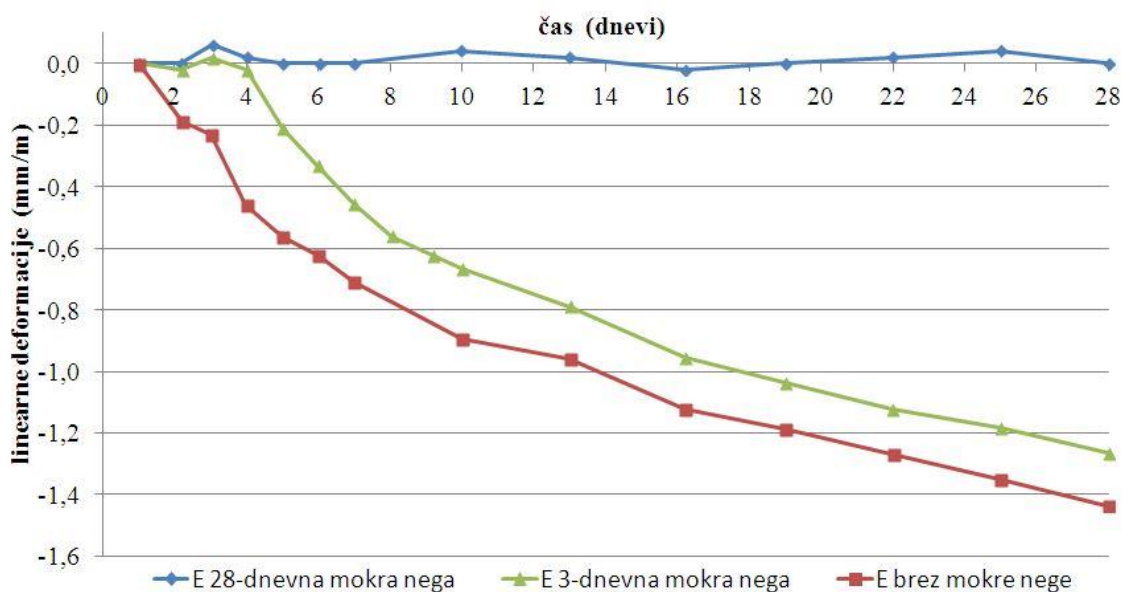
Meritve opravljene s to metodo so pokazale, da dolžina mokre nege ne vpliva na potek kasnejšega krčenja, kot prikazuje slika 50 za podlívno malto z dodatkom za preprečevanje krčenja D pri dozacijah

6, 8 in 10 %. Krivulje, ki ob začetku merjenja naraščajo predstavljajo nabrekanje vzorcev, ki so bili prve tri dni merjenja negovani v vodi, preostale krivulje pa predstavljajo deformacije vzorcev, ki so bili med celotnim merjenjem shranjeni v prostoru s konstantnimi pogoji. Vidi se, da je po prekinitvi mokre nege potek krčenja podoben kot v primeru brez mokre nege. Čeprav nega ne vpliva na potek nadaljnega krčenja, pa ima vpliv na končno vrednost krčenja, zaradi nabrekanja malte v času negovanja. Smiselno bi bilo meriti tudi nadaljnje krčenje vzorcev, ki so bili ves čas merjenja potopljeni v vodi.



Slika 50: Vpliv mokre nege na krčenje zaradi sušenja v primeru malte z dodatkom D

Enako velja pri malti brez dodatka za preprečevanje krčenja (slika 51), le da v tem primeru ni znatnega nabrekanja v dneh negovanja.

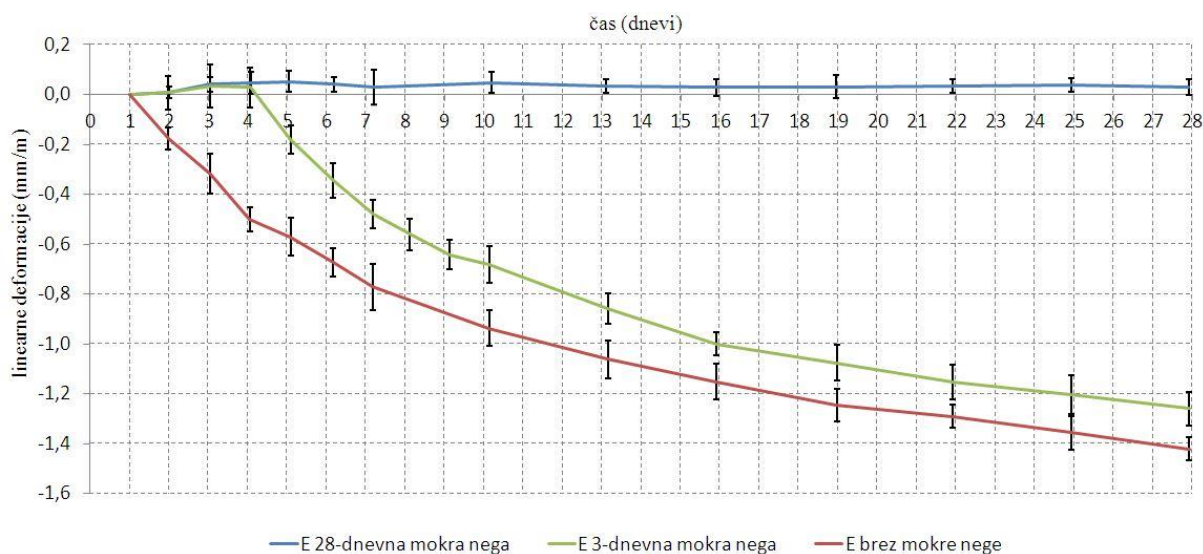


Slika 51: Vpliv mokre nege na krčenje zaradi sušenja v primeru malte brez dodatka (oznaka E)



V primeru malte brez dodatka za preprečevanje krčenja se v času od začetka vezanja do časa razkalupljenja zgodi nekaj krčenja. Določen delež tega krčenja povzroči sušenje zaradi izpostavljenosti površine vzorca. Del teh deformacij je v primeru ponovne navlažitve povraten. S tem lahko pojasnimo rahlo nabrekanje takšne malte v primeru mokre nege, kot prikazuje slika 51.

Slika 52 prikazuje rezultate krčenja šestih neodvisnih mešanic brez dodatka za preprečevanje krčenja, ki so prikazani s povprečno vrednostjo in standardnim odklonom. Na natančnost rezultatov meritev in njihovo ponovljivost vpliva natančnost same merilne naprave, ki je nižja od zahtev v standardu, natančnost osebja in vhodni materiali.



Slika 52: Rezultati krčenja šestih neodvisnih mešanic brez dodatka za preprečevanje krčenja, izraženi kot povprečna vrednost s standardnim odklonom.

#### 5.4 DODATNE PREISKAVE

Čas začetka in konca vezanja smo določili s pomočjo Vicat-ovega aparata v skladu s standardom SIST EN 480-2:2006. Spodnja preglednica (preglednica 4) prikazuje čase vezanja mešanic z 8 % dozacijo dodatkov za preprečevanje krčenja in mešanice brez omenjenega dodatka (oznaka E).

Preglednica 4: Izmerjeni začetni in končni časi vezanja podlivnih malt z dodatki za preprečevanje krčenja pri dozaciji 8 %

Vzorec	D	L	B	S	M	E
Začetek vezanja (min)	321	332	270	323	300	315
Konec vezanja (min)	376	397	310	348	345	375

Prostorninsko maso sveže malte smo določili v skladu s standardom SIST EN 1015-6:1999/A1:2007

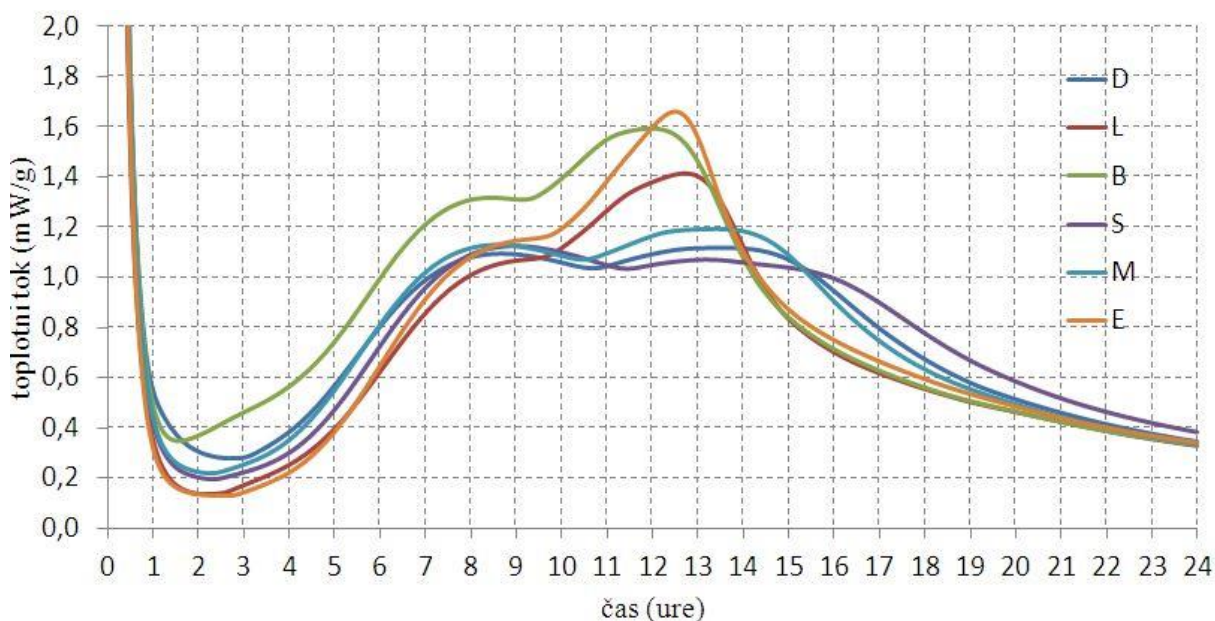
Količino zraka v sveži malti smo določili v skladu s standardom SIST EN 1015-7:1999.

Razlez smo določili tako, da smo na predhodno navlaženo stekleno ploščo na sredino postavili konus, ki je v skladu s standardom SIST EN 1015-3:2001/A2:2007. Konus smo do vrha napolnili s svežo mešanico. Po previdnem dvigu konusa smo izmerili razlez sveže mešanice (brez potresanja).

Tlačne trdnosti malt smo določili v skladu s standardom SIST EN 12190:2000. Merili smo jih pri starostih 1, 7 in 28 dni.

Opravljen je bila tudi sejalna analiza na uporabljenih peskih.

S pomočjo kalorimetra MC-CAL/100P proizvajalca C3 Prozess- und analysentechnik GmbH smo določili toplotni tok zaradi hidratacije veziva. Rezultati so prikazani na sliki 53:



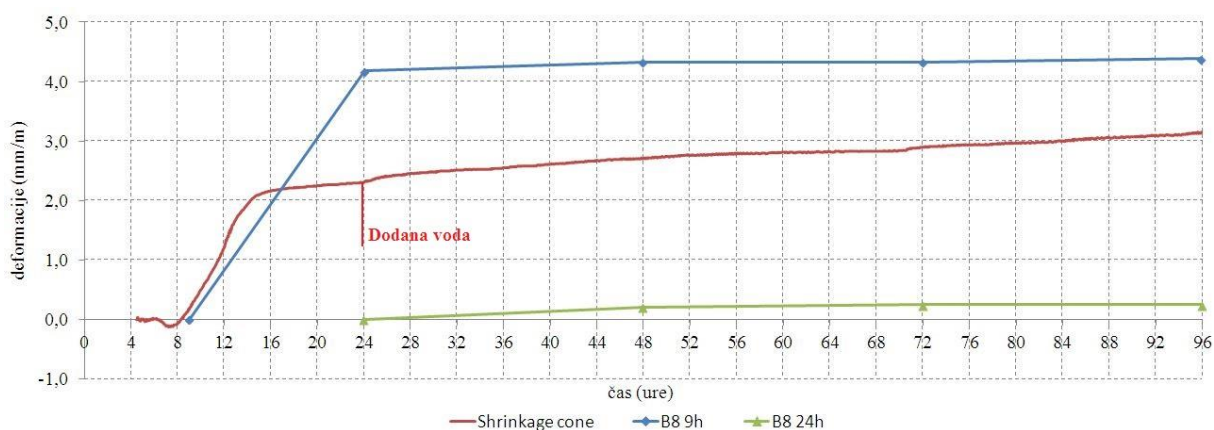
Slika 53: Izotermna kalorimetrija pri 20 °C za modelne podlivne malte z različnimi dodatki za preprečevanje krčenja pri dozaciji 8 %

## 5.5 KOMENTAR EKSPERIMENTALNEGA DELA

Metoda krčenje v stožcu je novejša metoda, zato tudi ni toliko opravljenih raziskav, kot s starejšimi in standardiziranimi metodami. V raziskavah, kjer je bila uporabljena, pa zasledimo dobro ponovljivost. V okviru naših preiskav smo dobili nekoliko slabšo ponovljivost, kar pa pripisujemo vplivu vhodnih materialov. Vhodni materiali namreč niso povsem homogeni, to pa povzroča določene razlike med posameznimi mešanici. Metoda omogoča kontrolo temperature, kar je nujno za nadaljnjo raziskovanje vpliva temperature na krčenje. Postopki pri tej metodi so dokaj enostavni, zato so tudi

rezultati med različnimi raziskovalci bolj primerljivi. Metoda omogoča merjenje avtogenega krčenja in zato predstavlja alternativo metodi po standardu ASTM C1698-09, za merjenje celotnega krčenja pa alternativo metodi po standardu ASTM C827/ C827M-10.

Slabost metode po standardu SIST EN 12617-4:2002 je v tem, da izvzame deformacije, ki se zgodijo v času od časa nič do starosti 24 ur, ko se vzorce razkalupi in se lahko prične merjenje. Dodatki za preprečevanje krčenja povzročajo nabrekanje v prvih dneh po zamešanju, vendar le v obdobju, ko poteka negovanje. Posebno zanimivo je delovanje vzorca B, za katerega se z merjenjem z metodo krčenja v stožcu izkaže, da ima v prvem dnevu po zamešanju največji učinek, kot prikazuje slika 32 (stran 40). Plastično krčenje, ki se zgodi v času od zamešanja do začetka vezanja ne vpliva na lastnosti strjenega materiala, zato ga ni potrebno vključiti v merjenje. V primeru zgodnjega nabrekanja malte z dodatkom B je to deformiranje v kalupih ovirano. Zaradi oviranega nabrekanja in zaradi izvzetega zgodnjega deformiranja so vrednosti končnega deformiranja v tem primeru manjše, kar prikazuje slika 54:



Slika 54: Vpliv časa nič na velikost deformacij pri podlivni malti z dodatkom B, 8 % dozacija

Da bi v merjenje zajeli tudi zgodnje krčenje, smo poskusili razkalupiti vzorce že ob času konca vezanja. To nam zaradi načina vgradnje merilnih reperjev v kalup ni uspelo, kot prikazuje slika 55. Da bi bilo razkalupljenje ob času vezanja uspešno, bi morali uporabiti drugačno vrsto merilnih reperjev. To pa bi zahtevalo prilagoditev kalupov in merilne naprave. Brez poškodb nam je uspelo razkalupiti 3 vzorce 9 ur po zamešanju. Takrat smo jih pomerili in dali v vodo. Pri starosti 24, 48, 72 in 96 ur smo jih ponovno pomerili kar predstavlja krivulja B8 9h na sliki 54. Za primerjavo smo 3 vzorce razkalupili in prvič pomerili šele po 24 urah, kar predstavlja krivulja B8 24h. Rdeča krivulja predstavlja merjenje deformiranja z metodo krčenja v stožcu v obdobju od začetka vezanja do starosti 96 ur. Čeprav ta metoda meri prostorninsko krčenje (krčenje v horizontalni smeri prispeva h krčenju v merjeni vertikalni smeri) in bi zato pričakovali večje vrednosti kot pri metodi, ki meri samo linearne deformacije, so te vrednosti precej nižje. Predvidevamo, da je razlog za to mokra nega pri merjenju linearnih deformacij od 9 ur naprej, pri metodi krčenja v stožcu pa smo vodo dodali šele ob starosti 24

ur. S tem smo poskušali simulirati pogoje mokre nege, vendar od starosti 24 ur naprej ta nima večjega vpliva. Poleg tega je učinek mokre nege samo na površini vzorca, saj je preostali del vzorca vodi nedosegljiv, zaradi sten kalupa in ločevalne folije med vzorcem in kalupom. Pri prizmah je bila površina, ki je bila izpostavljena vodi, v primerjavi s prostornino prizem, bistveno večja, kot pri stožcu, kjer je bila vodi izpostavljena le zgornja površina. To je verjetno vplivalo na učinkovitost dodatka za preprečevanje krčenja, ki je bil bolj učinkovit pri prizmah.



Slika 55: Neuspelo razkalupljenje ob času konca vezanja

Pri hidrataciji cementa se sprošča toplota. Čeprav vsebuje obravnavana malta velik delež cementa, je vpliv dviga temperature na krčenje malte majhen. Pri obeh uporabljenih metodah so velikosti vzorcev tako majne, da je dvig temperature zaradi hidratacije majhen. Dodatno se zmanjša zaradi vpliva okolice na toplotno neizolirane vzorce. Poleg dviga temperature zaradi hidratacije ima na krčenje vpliv tudi sprememba temperature okolice. Ta vpliv v našem primeru odpade, zaradi konstantnih temperatur v prostorih, kjer so potekale preiskave.

Delež avtogenega krčenja je zaradi visokega vodo-cementnega količnika ocenjen kot majhen. Pri podlivnih maltah je vodo-cementno razmerje relativno visoko, zato ne pride do izrazitega samoizsuševanja in posledično avtogenega krčenja.

Zaradi zelo dolgega in počasnega procesa karbonatizacije, ta nima vpliva na krčenje v obravnavanem časovnem obdobju (28 dni).

Največji delež celotnega krčenja predstavlja v našem primeru krčenje zaradi sušenja.



## 6 ZAKLJUČKI

Metode za določevanje krčenja cementnih sistemov so med seboj zelo različne. Razlikujejo se zaradi različnih vrst krčenja, ki jih obravnavajo, zaradi različnih časovnih obdobij merjenja, dimenzij vzorcev, vrst cementnih sistemov, itd. Zaradi teh razlik ni mogoča direktna primerjava metod in rezultatov.

Končna vrednost krčenja je vsota krčenja v zgodnjem in dolgoročnem obdobju, zato je potrebno meriti krčenje obeh časovnih obdobij. Vsaka od v eksperimentalnem delu uporabljenih metod meri krčenje v svojem časovnem obdobju. Rezultati posameznih metod žal niso združljivi, ker metoda krčenje v stožcu meri prostorninske deformacije, metoda po standardu SIST EN 12617-4:2002 pa linearne. Da bi z eno metodo izmerili celotno krčenje, bi morali merjenje prilagoditi. Z metodo krčenja v stožcu je to sicer mogoče, vendar bi v tem času dobili izmerjene deformacije samo enega vzorca, saj vzorca med merjenjem ne smemo premikati. Poleg tega ni mogoče imeti vzorca med merjenjem v vodi. Da bi z metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002 zajeli celotno krčenje, bi morali vzorce razkalupiti in pričeti z merjenjem takoj, ko je to mogoče. Tudi v primeru prekrivanja časovnega obdobja merjenja obeh metod rezultati niso direktno primerljivi, zaradi različnega načina merjenja in različnega vpliva mokre nege na učinkovitost dodatka za preprečevanje krčenja.

Metoda po standardu SIST EN 12617-4:2002 predpisuje uporabo togih jeklenih kalupov, ki v primeru nabrekanja vzorcev pred razkalupljenjem predstavljajo oviro. Največja slabost te metode pa je, da ne upošteva zgodnjega krčenja, ki ga v določenih primerih ne smemo zanemariti. Z metodo krčenja v stožcu smo ugotovili, da ima dodatek za preprečevanje krčenja B največji učinek v prvem dnevu. Če bi učinek tega dodatka merili samo z metodo po standardu SIST EN 12617-4:2002, kot predpisuje standard, bi ta dodatek označili kot manj učinkovit.

Metoda krčenja v stožcu se je izkazala kot enostavna za uporabo, natančna in uporabna, saj omogoča tudi kontrolo in merjenje temperature ter možnost merjenja avtogenega krčenja. Predstavlja dobro alternativo metodi po standardu ASTM C827/ C827M-10 in ASTM C1698-09.

Običajno je v praksi glede deformiranja materialov podana samo zahteva za največje dovoljeno krčenje v mm/m. Poleg tega bi morala biti podana metoda za merjenje krčenja, dimenzije vzorcev, čas razkalupljenja in časovno obdobje merjenja. Metoda merjenja krčenja bi morala biti izbrana kot najbolj primerna glede na primer v praksi. Za pomoč bi lahko služila preglednica 3 na strani 37. To metodo bi uporabili v laboratoriju pri dimenzioniranju materiala in kasneje za kontrolo na vzorcih vgrajenih v betonarnah ter na gradbišču.

V eksperimentalnem delu se je pokazalo, da tridnevna mokra nega ne vpliva na potek nadaljnega krčenja zaradi sušenja po prekinjenem negovanju. Ob uporabi dodatkov za preprečevanje krčenja

mokra nega omogoči nabrekanje zaradi teh dodatkov in posledično vpliva na velikost končnih deformacij.

V diplomski nalogi so prikazani rezultati prvih 28 dni merjenja linearnih deformacij zaradi krčenja. Merjenje bi bilo smiselno nadaljevati do starosti treh mesecev oziroma dokler krčenje še poteka. Po koncu merjenja bi bilo smiselno vzorce, ki so bili ves čas v vodi, izpostaviti sušenju in ugotoviti nadaljnji potek krčenja zaradi sušenja.

Brez negovanja imajo dodatki za preprečevanje krčenja zelo majhen učinek. Za dosego zahtevane kompenzacije krčenja je potrebno prilagoditi dozacijo teh dodatkov in dolžino nege.

## VIRI

- [1] Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 157 str.
- [2] Early age autogenous shrinkage of concrete. 2015.  
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P446.pdf> (Pridobljeno 12. 7. 2016.)
- [3] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2006. Concrete : Microstructure, Properties, and Materials. Third Edition. New York, McGraw-Hill: 659 str.
- [4] Karbonatizacija betona in trajnost(nost) AB konstrukcij. 2013.  
<http://www.zabeton.si/pdf/6.pdf> str. 6 (Pridobljeno 12. 7. 2016.)
- [5] Drčar, G. 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 31 str.
- [6] Klobasa, A. 2015. Učinek delcev mlete gume na kompenzacijo krčenja cementnega kamna. Diplomaska naloga. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo. (mentor Lubej, S.): 39 str.
- [7] Collepardi, M. 2006. The new concrete: 421 str.
- [8] Ekspanditor. 2006.  
[http://www.tkk.si/si/files/default/tehnici\\_listi/cementol/ekspanditor\\_slo.pdf](http://www.tkk.si/si/files/default/tehnici_listi/cementol/ekspanditor_slo.pdf) (Pridobljeno 14. 7. 2016.)
- [9] High-strength concrete. 2009.  
<http://books.google.com/books?id=0wl2rW5OTXMC&pg=PP1> str. 164 (Pridobljen 13.7.2016.)
- [10] Eppers, S. 2010. Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test. Doktorska disertacija. Dresden, Tehnična univerza v Dresdnu, Fakulteta za gradbeništvo: 157 str.
- [11] Standardizacija. 2015.  
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Standardizacija> (Pridobljeno 22. 7. 2016.)
- [12] Kiralj, E. 2010. Oblikovanje izvornih Slovenskih standardov. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za družbene vede. (mentor Mayer, J.): 128 str.
- [13] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

- 
- [14] Zakon o standardizaciji (ZSta-1). Uradni list RS št. 59-2794/1999: 7540
- [15] SIST EN 12617-4:2002 Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – 4. del: Določevanje krčenja in nabrekanja
- [16] SIST EN 14406:2004 Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij – Preskusne metode – Določevanje stopnje in razvoja nabrekanja in hitrosti nabrekanja injekcijske mase
- [17] SIST EN 455:2008 Injekcijska masa za prednapete kable – Preskusne metode
- [18] SIST EN 13872:2004 Metode za preskušanje talnih izravnalnih in/ali livelirnih mas za hidravlično nanašanje – Ugotavljanje krčenja
- [19] ISO 1920-8:2009 Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory
- [20] ASTM C157/C157M-08 (Reapproved 2014)<sup>e1</sup> Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic – Cement Mortar and Concrete
- [21] ASTM C490/C490M-11<sup>e1</sup> Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete
- [22] ASTM C1698-09 Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar
- [23] ASTM C827/ C827M-10 Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures
- [24] ASTM C1581/C1581M-09a Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage
- [25] ASTM C1090-10 Standard Test Method for Measuring Changes in Height of Cylindrical Specimens of Hydraulic-Cement Grout
- [26] Slika merilne aparature. 2016.  
<http://www.geneq.com/en/material-testing/sector-market/micrometer-bridge-set-astm-c1090.html> (Pridobljeno 19. 7. 2016.)
- [27] ASTM C878/C878M-14a Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete
- [28] ASTM C1579-13 Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)



- [29] Autogenous shrinkage and time-zero of UHPC determined with the shrinkage cone. 2009.  
<http://books.google.com/books?id=WL0FQp7vdWgC&pg=PA709> str. 709 (Pridobljeno 20. 7. 2016.)
- [30] O podjetju Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH. 2016  
[http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?About\\_us..](http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?About_us..) (Pridobljeno 21. 7. 2016.)
- [31] O metodi krčenje v stožcu. 2015  
<http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?download=USkegel.pdf> (Pridobljeno 21. 7. 2016.)
- [32] JUS B.C8.022:1976 Cement. Ispitivanje čvrstoće cementa