

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:

Drčar, G., 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 31 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Drčar, G., 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 31 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRADBENIŠTVO (UN)
MODUL KONSTRUKCIJE

Kandidat:

GREGA DRČAR

**VPLIV NOTRANJNH REZERVOARJEV VODE NA KRČENJE
BETONA VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 65/B_GR

**IMPACT OF INTERNAL WATER RESERVOIRS ON
SHRINKAGE OF HIGH STRENGTH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 65/B-GR

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 25. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Grega Drčar izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti«.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

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

Ljubljana, 23.9.2013

Grega Drčar

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.4(043.2)
Avtor:	Grega Drčar
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	31 str., 18 pregl., 24 sl.
Ključne besede:	avtogeno krčenje, beton visoke trdnosti, hidratacija cementa, notranja nega betona, lahki agregati

Izвлеček

Betoni visoke trdnosti imajo, v primerjavi z betoni običajne trdnosti, nižji vodo cementni količnik, kar omogoča višjo končno trdnost betona. Med procesom hidratacije cementa začne zaradi nizkega vodo cementnega količnika primanjkovati proste vode. S črpanjem vode iz finih kapilarnih por se v podajni strukturi strjujoče se cementne paste pojavijo velike sile, zaradi katerih se beton krči in razpoka. Trajnost betonskega elementa se zmanjša.

V diplomski nalogi smo preučili vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betonov visoke trdnosti. Za notranji rezervoar vode smo uporabili predhodno namočen lahki agregat, frakcije od 0 do 2 mm. V preiskovani betonski mešanici smo 12 % agregata zamenjali s predhodno namočenim lahkim agregatom.

Krčenje notranje negovanega betona smo določili eksperimentalno in ga primerjali s krčenjem betona z oznako HSC 1600 iz doktorske disertacije doc. dr. Draga Sajeta. Vzoredno smo merili tlačno trdnost preiskovanega betona.

Ugotovili smo, da z uporabo notranjega rezervoarja v obliki z vodo nasičenega lahkega agregata, frakcije od 0 do 2 mm, vplivamo na krčenje betona, izboljša pa se tudi njegova tlačna trdnost.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDK:** 624.012.4(043.2)
- Author:** Grega Drčar
- Supervisor:** Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
- Title:** Impact of internal water reservoirs on shrinkage of high strength concrete
- Document type:** Graduation Thesis – University studies
- Notes:** 31 p., 18 tab., 24 fig.
- Key words:** high strength concrete, concrete shrinkage, compressive strength, water-cement ratio, internal water reservoirs

Abstract

High strength concrete has lower water-cement ratio compared to regular concrete, which allows higher strength of the concrete. Because of low water-cement ratio, there is a lack of water during the process of hydration. During the transport of water from the capillary pores of concrete, high forces to the structure of the hardening cement paste were created. Because of this forces, the concrete shrinks, which creates cracks and therefore reduces durability of the concrete elements.

In this bachelors thesis we analyzed the impacts of internal water reservoirs on high strength concrete shrinkage. Lightweight aggregate of fractions from 0 to 2 millimeters was pre-soaked and used for internal water reservoir. We used 12% of the pre-soaked lightweight aggregate in our analyzed concrete mix.

Shrinkage of our experimental concrete mix was then analyzed and compared to shrinkage of concrete HSC 1600 which was analyzed in Assist. Prof. Drago Saje's PhD thesis. Compressive strength of concrete was also measured in the process.

We found out that we can partially reduce concrete shrinkage process with the use of lightweight aggregate with fractions from 0 to 2 millimeters and also improve its compressive strength.

ZAHVALA

Doc. dr. Dragu Sajetu se zahvaljujem, da sem lahko opravljal diplomsko nalogo pod njegovim mentorstvom. Zahvaljujem se za strokovne nasvete in vso pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Prijateljem zahvala, da smo lahko skupaj preživljali čas povezan tako s študijem kot tudi z obštudijskimi dejavnostmi, ki so nam popestrile dneve.

Zahvalil bi se rad tudi celotni družini, ki me je podpirala tekom študija.

Posebna zahvala pa gre Poloni, ki me je spodbujala celotno študijsko obdobje in mi stala ob strani v kritičnih trenutkih. Hvala ti za vso pomoč in potrpljenje. Uspela sva skupaj.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO PREGLEDNIC	VIII
KAZALO SLIK	IX
1 UVOD	1
2 BETONI VISOKE TRDNOSTI	2
2.1 Sestavine betonov visoke trdnosti	2
2.1.1 Agregat	2
2.1.2 Cement	3
2.1.2.1 Hidratacija cementa	4
2.1.3 Voda	5
2.1.4 Mineralni dodatki	5
2.1.4.1 Mikrosilika	6
2.1.4.2 Elektrofilitrski pepel	6
2.1.5 Kemijski dodatki	6
2.1.5.1 Superplastifikatorji	6
3 MEHANSKE IN REOLOŠKE LASTNOSTI BETONA VISOKE TRDNOSTI	7
3.1 Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti.....	7
3.2 Krčenje betona visoke trdnosti.....	7
3.2.1 Plastično krčenje betona	8
3.2.2 Avtogeno krčenje betonov	8
3.2.3 Kemično krčenje	9
3.2.4 Krčenje zaradi sušenja	10
3.2.5 Temperaturno krčenje	10
4 NEGA BETONA	11
4.1 Lahki agregat.....	11
5 EKSPERIMENTALNI DEL DIPLOMSKEGA DELA	13
5.1 Uporabljeni materiali.....	13
5.2 Sestava betonske mešanice	15
5.3 Konsistenca sveže betonske mešanice	16
5.3.1 Postopek poseda po standardu SIST EN 12350-2	16

5.3.2 Postopek z razlezom po standardu SIST EN 12350-5	17
5.3.3 Razredi konsistence po SIST EN 206-1	18
5.3.4 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po SIST EN 12350-7	18
5.4 Merjenje krčenja betona	19
5.4.1 Avtogeno krčenje betona visoke trdnosti	23
5.4.2 Krčenje betona visoke trdnosti zaradi sušenja	24
5.4.3 Celotno krčenje betona visoke trdnosti.....	25
5.5 Primerjava krčenj betonov visoke trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	25
5.6 Primerjava trdnosti betona visoke trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	27
6 ZAKLJUČEK	29
VIRI	30

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Minerali cementnega klinkerja	3
Preglednica 2: Lastnosti mineralov cementnega klinkerja	3
Preglednica 3: Faze hidratacije cementa	5
Preglednica 4: Lastnosti uporabljene mivke	13
Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega agregata.....	13
Preglednica 6: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata	14
Preglednica 7: Lastnosti uporabljenega cementa	14
Preglednica 8: Uporabljeni dodatki za pripravo betonske mešanice.....	15
Preglednica 9: Sestava betonskih mešanic.....	15
Preglednica 10: Razredi poseda po SIST EN 206-1.....	18
Preglednica 11: Razredi razleza po SIST EN 206-1	18
Preglednica 12: Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%	24
Preglednica 13: Krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja	24
Preglednica 14: Celotno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%	25
Preglednica 15: Povprečen skrček betonov zaradi avtogenega krčenja [%].....	25
Preglednica 16: Povprečen skrček betonov zaradi sušenja [%]	26
Preglednica 17: Povprečen skrček betonov zaradi celotnega krčenja [%].....	27
Preglednica 18: Primerjava tlačnih trdnosti betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 [MPa]	27

KAZALO SLIK

Slika 1: Razvoj trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja [Žarnić, 2005]	4
Slika 2: Značilno spreminjanje temperature v betonskem elementu ter shematični prikaz negovanja elementa [Aitcin, P. - C., 1998]	8
Slika 3: Shematični prikaz avtogenega in kemičnega krčenja [Žnidaršič, 2012]	9
Slika 4: Shematično prikazan mehanizem kemičnega krčenja [Saje, 2001]	10
Slika 5: Razporeditev zrn lahkega agregata v podobnih mešanicah, (a) vsebuje grobi lahki agregat, (b) vsebuje drobni lahki agregat [Henkensiefken, 2008]	12
Slika 6: Nabijanje s standardno kovinsko palico	16
Slika 7: Prikaz poseda sveže betonske mešanice [Žarnić, 2008]	17
Slika 8: Nabijanje plasti z lesenim nabijačem	17
Slika 9: Shematični prikaz postopka z razlezom [Žarnić, 2008]	18
Slika 10: Posoda za merjenje zraka v betonu	19
Slika 11: Pripravljen kalup za vgraditev betona	20
Slika 12: Vgrajevanje betona v kalup	20
Slika 13: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preizkušancev	21
Slika 14: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona [Saje, 2001]	21
Slika 15: Merilna urica za elektronsko merjenje krčenja	22
Slika 16: Prikaz deformacij betona HSC-1600-LWA-12%	22
Slika 17: Shematični prikaz merjenja celotnega krčenja betona	23
Slika 18: Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%	23
Slika 19: Krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja	24
Slika 20: Celotno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%	25
Slika 21: Primerjava avtogenega krčenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	26
Slika 22: Primerjava krčenja zaradi sušenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	26
Slika 23: Primerjava celotnega krčenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	27
Slika 24: Razvoj tlačne trdnosti betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600	28

X

Drčar, G. 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti.
Dipl. nal. – UNI-B. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Modul konstrukcije.

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Materiale lahko razvrščamo v različne skupine po določenih merilih. Večina razvrščanj obravnava materiale površno, saj zavzema le del njihovih značilnosti ali lastnosti. Najbolj dosledna in splošna razvrstitev izhaja iz kemične narave materiala.

V splošnem se gradiva delijo v štiri ločene skupine in več podskupin. Glavne skupine so:

- kovine,
- polimeri,
- keramike,
- kompoziti.

Zadnja skupina je nastala zaradi potrebe po izboljšavi mehanskih in ostalih lastnosti osnovnih materialov. V matrico kompozita, osnovni material, se za izboljšanje ali spreminjanje določene njegove lastnosti običajno dodaja sekundarni material, ki to lastnost izboljša. Kompoziti z najbolj razširjeno uporabo so les in beton.

Beton je umetni keramični kompozit, sestavljen iz naslednjih sestavin:

- cementa,
- mineralnega agregata,
- vode,
- različnih dodatkov.

Cement je vezivo. Mineralni agregat predstavlja polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen otrdelega betona nastane v procesu hidratacije in strjevanja cementne paste. Cementna pasta je zmes cementa, vode in različnih dodatkov za izboljševanje lastnosti betona.

V nadaljevanju diplomske naloge so opisane glavne značilnosti posameznih sestavin betona in lastnosti betonov visoke trdnosti. Poglavje *Mehanske in reološke lastnosti betona visoke trdnosti* opisuje reološke pojave v betonu, s poudarkom na krčenju betonov visoke trdnosti. V poglavju *Nega betona* so predstavljeni znani načini negovanja betonov visoke trdnosti. Enega izmed njih smo uporabili pri raziskavah, opisanih v petem poglavju. *Zaključek povzema naše ugotovitve.*

2 BETONI VISOKE TRDNOSTI

Betoni visoke trdnosti imajo v primerjavi z običajnimi betoni drugačno sestavo mešanice in zato tudi drugačno mikrostrukturo. Mešanica je visoke kakovosti in goste konsistence. Pogosto se dodajajo različni dodatki, kot so razni superplastifikatorji in zmanjševalci potrebe po vodi. Običajno se vodo cementni količnik v betonih visoke trdnosti spreminja v mejah med 0.20 in 0.43.

V cementni pasti z nizkim vodo cementnim količnikom so delci cementa zelo blizu skupaj in že nizka stopnja hidratacije cementa zadostuje za tvorbo nosilne strukturne mreže. Nosilnost cementne paste in betona se z napredovanjem procesa hidratacije povečuje.

Sestava betona vpliva na časovni razvoj njegovih mehanskih in reoloških lastnosti. Večja količina veziva vpliva na proces hidratacije v betonu. Zaradi burnega procesa hidratacije in razmeroma majhne vsebnosti vode je avtogeno krčenje betonov visoke trdnosti veliko.

V začetni fazi snovanja mešanice betonov visoke trdnosti je potrebno nameniti posebno pozornost izbiri materialov, saj le-ti odločilno vplivajo na lastnosti otrdelega betona.

2.1 Sestavine betonov visoke trdnosti

Osnovne sestavine betonov visoke trdnosti, kot so kameni agregat, cement, voda in različne vrste dodatkov, so enake kot pri betonih običajne trdnosti. Pri betonih visoke trdnosti, prav tako kot pri betonih običajne trdnosti, večji del prostornine betona zavzema agregat, le zahteve glede zrnastostne sestave in največjega zrna agregata so drugačne kot pri običajnih betonih. Za doseganje višjih trdnosti del cementa nadomeščamo z mineralnimi dodatki, ki jih pri betonih običajne trdnosti skoraj ne uporabljamo. Zaradi nizkega vodo cementnega količnika, ki je osnovni pogoj za doseganje višjih trdnosti, lahko primerno vgradljivost betona zagotovimo z dodajanjem superplastifikatorjev. V primerjavi z betoni običajne trdnosti vsebujejo betoni visoke trdnosti večje količine veziva, cementa in mineralnih dodatkov. Pri betonih običajne trdnosti se količina veziva spreminja med 300 in 400 kg/m³ betona, pri betonih visoke trdnosti pa med 400 in 550 kg/m³ betona [Neville & Aïtcin 1998].

2.1.1 Agregat

Agregat betonu znižuje ceno, saj je postopek pridobivanja, ki obsega izkop, pranje in sejanje, razmeroma poceni. Znižuje hidratacijsko temperaturo betona, ker je kemično pretežno nedejaven in deluje kot odvajalec toplote nastale med hidratacijo cementa. Ker na večino agregatov voda ne deluje, agregati zmanjšujejo krčenje betona. Agregat povišuje požarno odpornost betona.

Lastnosti betonov so v veliki meri odvisne od lastnosti agregata. Oblika, velikost in količina agregatnih zrn vpliva na gostoto betona in njegovo površinsko trdoto, saj so agregati večinoma bolj odporni na obrus kot cementni kamen. V običajnih betonih agregat tvori okoli 75 % prostornine.

Pri betonih visoke trdnosti je zelo pomembna zrnavostna sestava agregata. Premer največjega zrna praviloma ne sme biti večji od 16 mm. Drobni agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in omejuje segregacijo sveže betonske mešanice. Struktura betona je bolj homogena in gosta, vsebuje manj por, kar omogoča enakomernejšo razporeditev napetosti zaradi zunanje obtežbe.

2.1.2 Cement

Cement reagira z vodo v otrdelo cementno pasto ali cementni kamen. Pri tem postopno razvija svoje kohezijske in adhezijske lastnosti, ki omogočajo, da zrna agregata poveže v kompaktno maso betona. V gradbeništvo se najpogosteje uporablja portland cement. Za betone visoke trdnosti poleg običajnega portland cementa pogosto uporabljamo fino mleti portland cement z veliko specifično površino ($500 \text{ m}^2/\text{kg}$), katere posledica je povečana reaktivnost in burnost kemične reakcije cementa z vodo. Uporabljamo tudi cemente z nizko hidrationsko toploto, pri katerih se sprošča manj hidrationske toplote, kar je pomembno zlasti za konstrukcije velikih dimenzij. Če želimo zmanjšati krčenje betona, lahko uporabimo cemente, ki nabrekajo.

Osnovne surovine za pridobivanje portland cementa vsebujejo okside kalcija (CaO), silicija (SiO_2), aluminija (Al_2O_3) in železa (Fe_2O_3). Omenjeni oksidi se v večjih količinah nahajajo v apnencih in glinah. Z žganjem le-teh pri temperaturi med 1300 in $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ nastane klinker, ki ga sestavljajo štiri glavni minerali – nosilci lastnosti cementa.

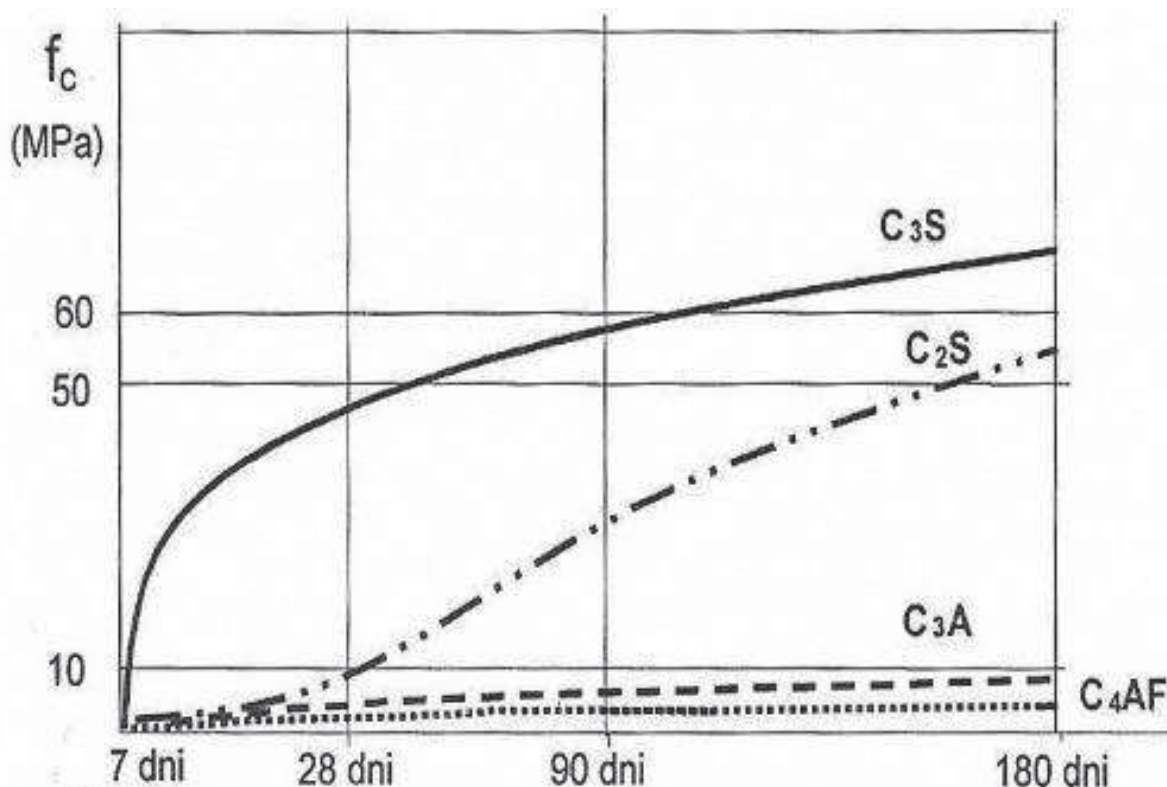
Preglednica 1: Minerali cementnega klinkerja

Mineral	Kemijska formula	Delež minerala v klinkerju
Trikalcijev silikat ali alit	$3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S)	45–60%
Dikalcijski silikat ali belit	$2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S)	20–30%
Trikalcijev aluminat ali aluminatna faza	$3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)	4–12%
Tetrakalcijev aluminat ferit ali feritna faza	$4 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)	10–20%

Preglednica 2: Lastnosti mineralov cementnega klinkerja

Oznaka minerala	Lastnosti
C_3S	<ul style="list-style-type: none"> · je najpomembnejši mineral običajnih portland cementnih klinkerjev, · pospešuje proces hidrationske, · pri strjevanju znatno prispeva k visokim trdnostim.
C_2S	<ul style="list-style-type: none"> · zavira in podaljšuje proces hidrationske, · se postopno strjuje, pri čemer sprošča manj hidrationske toplote kot C_3S.
C_3A	<ul style="list-style-type: none"> · na začetku hidrationske reagira hitro, · sprošča veliko hidrationske toplote, · je občutljiv na sulfatno korozijo.
C_4AF	<ul style="list-style-type: none"> · zavira strjevanje · je odporen na sulfatno korozijo

Časovni razvoji trdnosti mineralov klinkerja se med seboj razlikujejo. Na trdnosti najhitreje pridobivata trikalcijski silikat in dikalcijev silikat (Slika 1).



Slika 1: Razvoj trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja [Žarnić, 2005]

2.1.2.1 Hidratacija cementa

Vežanje vode in cementa je eksotermna kemična reakcija, imenovana hidratacija cementa, katere produkt je cementni kamen. Reakcija se začne na površini z vodo obdanih cementnih zrn.

Na proces hidratacije, količino sproščene toplote, časovni razvoj krčenja in trdnosti cementnega kamna in betona vplivajo naslednji parametri [Saje, 2001]:

- razmerje vsebnosti štirih glavnih mineralov portland cementnega klinkerja,
- specifična površina cementa,
- količina in vrsta mineralnega dodatka,
- začetna temperatura betona,
- vrsta kamenega agregata,
- temperatura in vlažnost okolja med procesom hidratacije,
- vodo vezivni količnik sveže betonske mešanice,
- vrsta in količina kemičnega dodatka v betonski mešanici.

Prehod cementnega gela v cementni kamen poteče v štirih fazah.

Preglednica 3: Faze hidratacije cementa

Faza	Trajanje	Značilnosti
Pred-indukcijsko obdobje	Nekaj minut po mešanju vode in cementa	Z mešanjem cementa in vode se v vodi raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Ob tem se sprošča veliko toplote. Zaradi kemijske reakcije med sadro in minerali kalcijevega aluminata nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Kristali etringita ustvarijo ovoj okoli cementnih zrn, ki upočasnijo hidratacijo.
Indukcijsko obdobje	Nekaj ur	Zaradi zaščitne plasti se hitrost hidratacije zmanjša. Hidratacija se nadaljuje, ko zaščitna plast postane propustna.
Obdobje pospešene hidratacije	Do dvanajste ure procesa	Mešanica prehaja v cementni gel, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. Pospešeno je hidratiziranje trikalcijevega in dikalcijevega silikata.
Obdobje pojemajoče hidratacije	Do konca hidratacije	Kot posledica hidratacije trikalcijevega in dikalcijevega silikata nastaja C-S-H gel. Kristali C-S-H gela rastejo in gostijo strukturno mrežo trdnih delcev cementnega kamna. Kristali so nosilci trdnosti cementnega kamna.

2.1.3 Voda

Primernost vode za mešanico betona določa standard SIST EN 1008:2003. Za pripravo betonske mešanice je primerna pitna voda. Pri zahtevnih konstrukcijah je potrebno analizirati sestavo vode, da ne bi imela neugodnih učinkov na betonski element. Drobni delci, ki ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnji cementa, vplivajo na hidratacijo cementne paste. Zgornja meja vsebnosti trdnih snovi v vodi je običajno 2 ‰.

2.1.4 Mineralni dodatki

Mineralni dodatki betonu povečujejo obdelavnost, trdnost in trajnost. So fini delci, manjši ali večji od cementnih zrn. Delimo jih na inertne in reaktivne materiale.

Inertni dodatki so zmleti polnilni materiali iz:

- apnenca,
- dolomita,
- kremenčevega peska,
- odpadnega stekla.

Med reaktivne dodatke uvrščamo:

- elektrofitrski pepel,
- mikrosiliko,
- mleto granulirano žlindro.

Fini delci imajo zaradi svoje majhnosti izredno veliko specifično površino, zato moramo pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode, kar omogoča boljšo vgradljivost betona. Okrogla oblika finih delcev ugodno vpliva na beton, saj ima najmanjšo površino pri dani prostornini, in zmanjšuje notranje trenje v pasti. S primernim zaporedjem dodajanja sestavin in pravilnim mešanjem zagotovimo enakomerni razpored praškastih delcev po strukturi betona ter dosegamo boljše lastnosti le-tega.

Pri betonih visoke trdnosti se kot mineralni dodatek najpogosteje uporabljata mikrosilika in elektrofitrski pepel.

2.1.4.1 Mikrosilika

Velika specifična površina mikrosilike povzroča veliko reaktivnost le-te ter ugodno vpliva na lastnosti betona, predvsem v zmanjšanju volumna por in doseganju večje trdnosti pri višji starosti betona. Povprečni premer zrnca je med 0.1 in 0.2 μm , kar je približno 1/100 premera zrna portland cementa. Mikrosilika nastane kot stranski produkt pri proizvodnji zmesi ferosilicija v elektroobločnih pečeh. Kremen se pri temperaturi 2000 °C pretvori v silicij, pri tem pa nastajajo hlapi silicijevega oksida, ki se v višjem in hladnejšem delu peči mešajo s kisikom ter kondenzirajo v zelo drobna zrnca. Mikrosilika običajno vsebuje 90 % silicijevega dioksida (SiO_2).

Mikrosilika med pucolansko reakcijo reagira s kalcijevim hidroksidom ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), pri čemer nastane kalcijev silikat hidrat, ki ugodno vpliva na trdnost in trajnost betona.

2.1.4.2 Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel pridobivamo z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov v peči, ki so kurjene z uprašenim premogom. Uporaba elektrofiltrskega pepela kot dela veziva izboljšuje lastnosti betonske mešanice in otrdelega betona. Dodatek pepela izboljša viskoznost in stabilnost betonske mešanice, poveča trdnost strjenega betona in podaljšuje trajnost betonskih konstrukcij.

Elektrofiltrski pepel je cenejši od mikrosilike, vendar pa so trdnosti betonov z mikrosiliko višje.

2.1.5 Kemijski dodatki

S kemijskimi dodatki dosegamo boljše lastnosti sveže betonske mešanice in otrdelega betona. Pri betonih visoke trdnosti uporabljamo:

- aerante,
- plastifikatorje,
- superplastifikatorje,
- zavlačevalce in pospeševalce vezanja,
- zgoščevalce,
- dodatke za betoniranje pri nizkih temperaturah,
- druge.

2.1.5.1 Superplastifikatorji

Pri betonih visoke trdnosti je superplastifikator nepogrešljiva sestavina mešanice betona. Zaradi nizkega vodo cementnega količnika je betonska mešanica gosta in težko vgradljiva. S superplastifikatorjem lahko dosežemo med 20 in 30 % zmanjšanje vodo cementnega količnika, kar izboljša vgradljivost sveže betonske mešanice.

3 MEHANSKE IN REOLOŠKE LASTNOSTI BETONA VISOKE TRDNOSTI

Mehanska lastnost betona je njegova tlačna trdnost, medtem ko so krčenje, lezenje in staranje betona reološke lastnosti. Tako mehanske kot reološke lastnosti betona se časovno spreminjajo. Zaradi dolgotrajnega procesa hidratacije cementa se s staranjem betona povečujeta trdnost in elastični modul betona. Ob nanosu obtežbe se s staranjem betona količnik lezenja zmanjšuje, krčenje pa je v največji meri posledica oddajanja vode pri sušenju.

Časovno spreminjanje lastnosti betona vpliva na obnašanje konstrukcijskih elementov in s tem na obnašanje celotne konstrukcije. V upogibnih elementih časovno spreminjanje deformacij povzroči povečevanje pomikov, pri statično nedoločenih sistemih pa tudi prerazporeditev notranjih sil. Pri prednapetih betonskih konstrukcijah zaradi reoloških pojavov v betonu pade sila prednapetja v kabljih. Pri stebrih lahko časovno povečanje deformacij vodi do porušitve zaradi uklona.

3.1 Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti

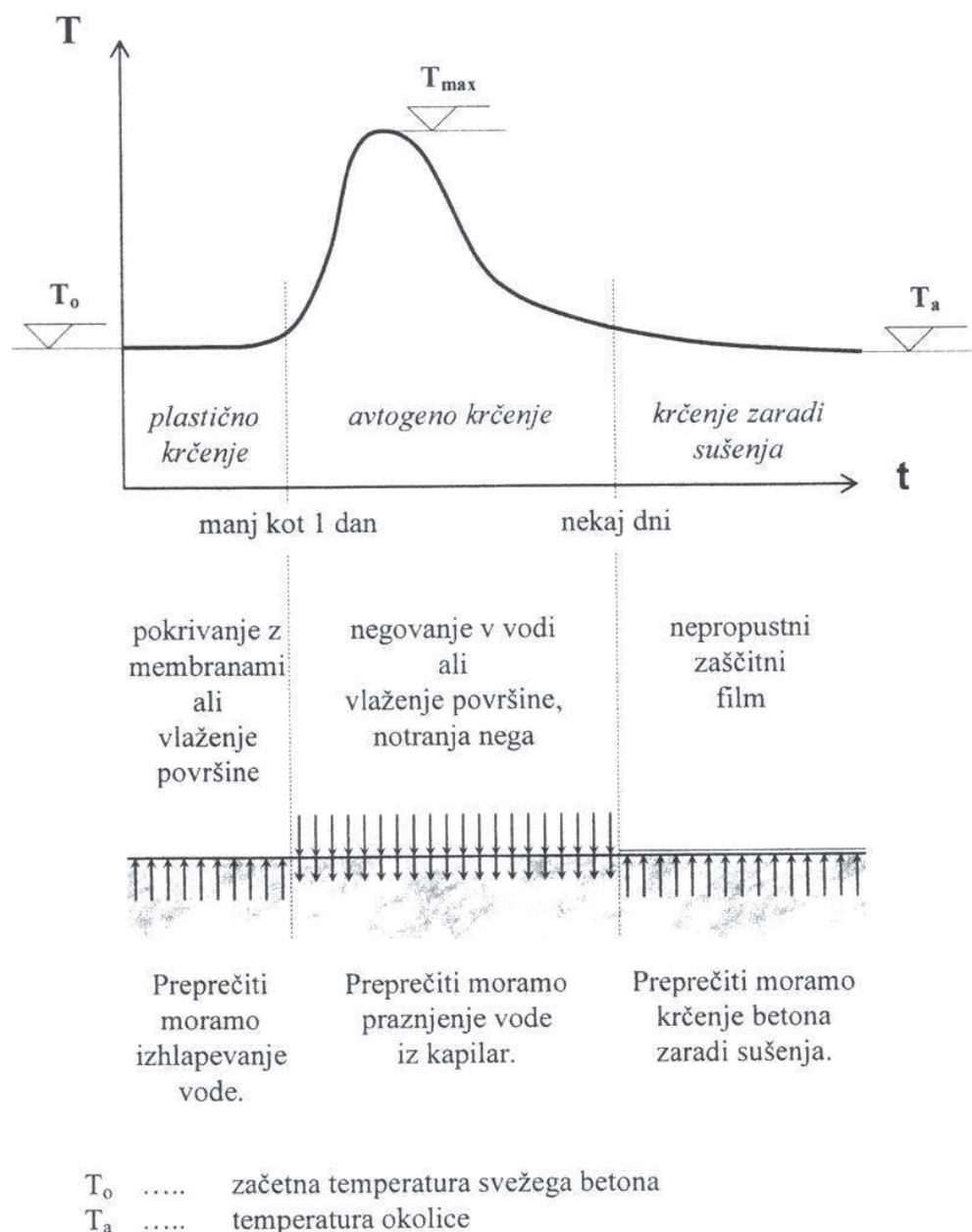
Značilnost betonov visoke trdnosti je hitro pridobivanje tlačne trdnosti v prvih dneh hidratacije cementne paste. Hitro pridobivanje tlačne trdnosti v zgodnji starosti betona je posledica povečanja temperature zaradi sprostitve več hidratacijske toplote na enoto betona in zaradi nizkega vodo cementnega količnika betona.

3.2 Krčenje betona visoke trdnosti

Krčenje betona se odraža v zmanjšanju prostornine betona, kar je posledica izgube vode (Slika 2). Izgube potekajo zaradi hidratacije in izhlapevanja pri vlažnosti zunanjega zraka pod 100%. Na velikost krčenja betona močno vpliva agregat, ki ovira deformiranje cementne paste ali cementnega kamna. Pri betonih visoke trdnosti je avtogeno krčenje veliko, ker je ob večji količini cementa burnejša hidratacija. Zaradi nizkega vodo cementnega količnika in ker je za izhlapevanje na razpolago manj vode, je krčenje zaradi sušenja manjše.

Krčenje betona je sestavljeno iz:

- plastičnega krčenja,
- avtogenega krčenja,
- krčenja zaradi karbonatizacije,
- kemičnega krčenja,
- krčenja zaradi sušenja,
- temperaturnega krčenja.



Slika 2: Značilno spreminjanje temperature v betonskem elementu ter shematični prikaz negovanja elementa [Aitcin, P. - C., 1998]

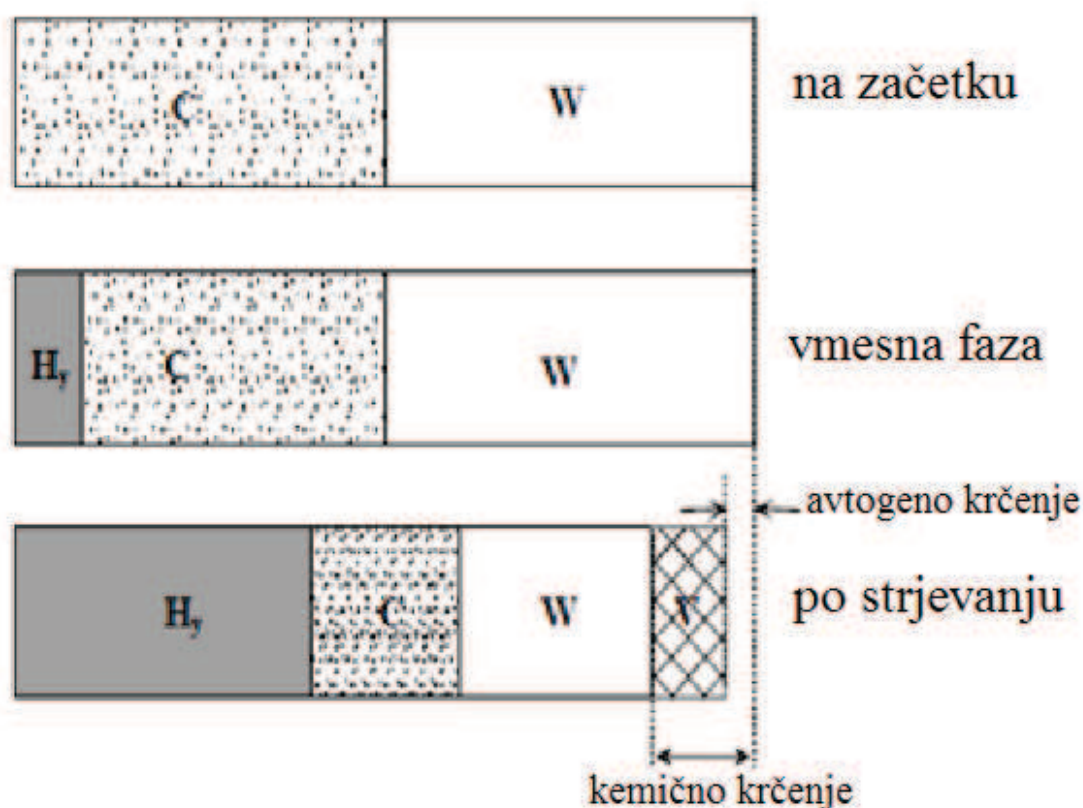
3.2.1 Plastično krčenje betona

Med površino in notranjostjo betonskega elementa se pojavijo napetosti, ki povzročajo plastično krčenje betonov. Le-to je izrazitejše ob slabi negi površine betona. Potrebno je preprečiti izhlapevanje vode iz betonskega elementa, da zmanjšamo krčenje na površini.

3.2.2 Avtogeno krčenje betonov

Med procesom hidratacije se voda porablja za tvorbo hidratacijskih produktov (Slika 3). Z napredovanjem procesa hidratacije se povečuje prostornina por, ki so posledica kemičnega

krčenja cementne paste. Po »Boylovem zakonu«¹ je povečanje prostornine zaprtih por povezano z zmanjševanjem tlaka zraka v porah, kar posredno vpliva na relativno vlažnost v porah. Ob vzpostavljanju termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste izhlapeva najprej prosta kapilarna voda, nato pa voda iz adsorpcijske ploskve stene pore. Tanjšanje adsorpcijske plasti vode na stenah por povzroča natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi. Natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi povzročajo znatne deformacije, ki se jim struktura upira s svojo trenutno togostjo. V začetnem obdobju procesa strjevanja, ko je modul elastičnosti cementne paste še razmeroma nizek, lahko omenjene natezne napetosti povzročijo velike zunanje deformacije, ki jih imenujemo avtogeno krčenje. Velikost avtogenega krčenja betona je močno odvisna od vodo cementnega količnika betonske mešanice [Saje, 2001].



Slika 3: Shematični prikaz avtogenega in kemičnega krčenja [Žnidaršič, 2012]

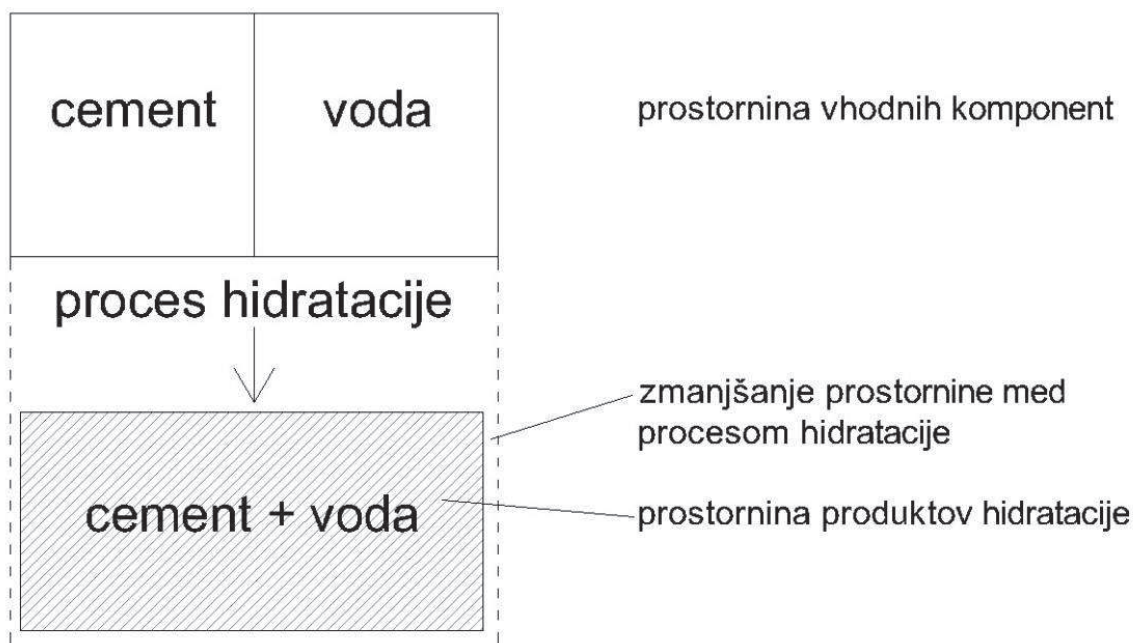
Oznake na Sliki 3:

C = nehidratiziran cement, W = nehidratizirana voda, H_v = produkti hidratacije, V = pore z nastankom med hidratacijo

3.2.3 Kemično krčenje

Kemično krčenje se pojavi zaradi kemičnih reakcij med procesom hidratacije. Kemično vezana voda ima večjo gostoto kot prosta voda, zato ima cementni gel manjšo prostornino v primerjavi s skupno prostornino cementa in vode pred začetkom hidratacije (Slika 4).

¹Boylov zakon: $p \cdot V = konst.$



Slika 4: Shematično prikazan mehanizem kemičnega krčenja [Saje, 2001]

3.2.4 Krčenje zaradi sušenja

Voda, ki se ne porabi pri hidrataciji, izhlapeva iz notranjosti betonskega elementa v okolico, kar se odraža v krčenju betona. Pri betonih visoke trdnosti krčenje zaradi sušenja ni izrazito, zaradi nizkega vodo cementnega količnika, majhne poroznosti ...

3.2.5 Temperaturno krčenje

Sproščanje toplote pri hidrataciji povišuje temperaturo v betonu in posledično povzroča deformiranje. Sprememba temperature je odvisna od razmer okolice in sestave betona. Obseg deformiranja betona je odvisen od temperaturnega raztezka α_T , ki se med strjevanjem betona spreminja. Koeficient temperaturnega raztezka je težje določljiv. Pogosto upoštevamo vrednost $\alpha_T = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

4 NEGA BETONA

Pri običajnih betonih je vodo cementi količnik razmeroma visok, zato je avtogeno krčenje majhno. Izrazitejše je površinsko krčenje, zato je v začetni fazi pomembna zunanja nega. Zaradi nizkega vodo cementnega količnika primanjkuje vode. S črpanjem vode iz najfinejših kapilarnih por se v podajni strukturi pojavijo velike sile. Struktura betona se močno krči in razpoka, zmanjša se trajnost betonskih elementov.

Z zunanjo nego betona preprečimo izhajanje vlage iz betona in zmanjšamo krčenje betona zaradi sušenja. Izhajanje vlage preprečujemo z vlaženjem betonskih površin in pokrivanjem z nepropustno membrano.

Da bi v betonih visoke trdnosti omejili velikost avtogenega krčenja, beton notranje negujemo. Notranje negovanje betona dosežemo z enakomerno porazdelitvijo rezervoarjev vode v betonski mešanici. Ko poide prosta voda, rezervoarji vode omogočijo vodo za proces hidratacije, preden se začne črpati iz finih por. S tem se zmanjšajo avtogene deformacije.

Možnosti notranje nege betona z rezervoarji vode so:

- z vodo nasičena lahka agregatna zrna (LWA),
- z vodo nasičeni polimerni super absorbanti (SAP),
- z vodo nasičeni normalni agregat (NWA),
- z vodo nasičena lesena vlakna,
- z vodo nasičena polipropilenska vlakna,
- z vodo nasičen recikliran agregat.

V praksi je notranja nega betonov zelo razširjena. Materiali, ki jih uporabljamo za rezervoarje, imajo večjo poroznost in sprejemljivo trdnost. Zaradi nizke cene in lahke predelave se najpogosteje uporablja lahki agregat.

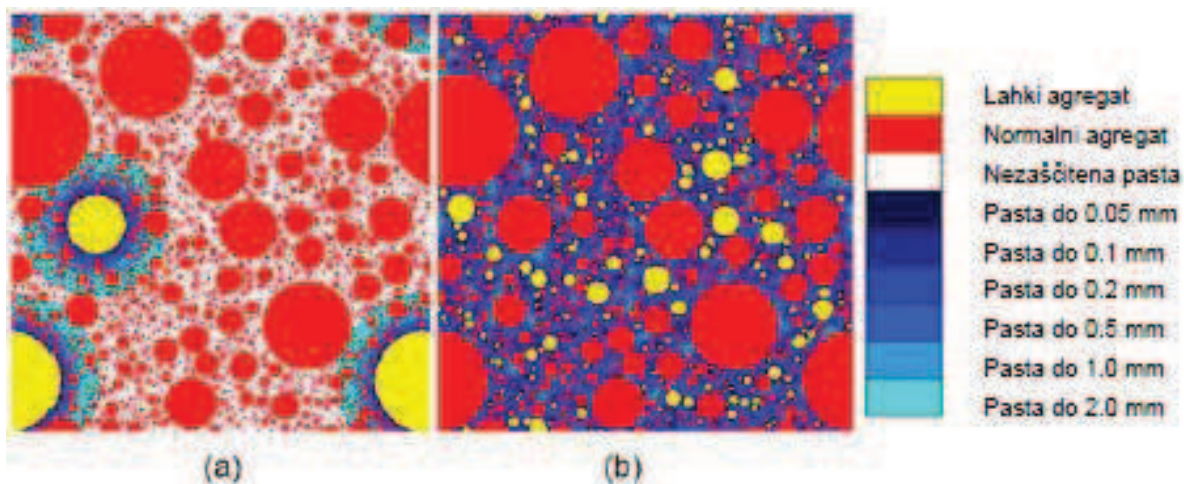
Pri zamenjavi običajnega agregata z lahkim je smiselno zamenjati drobne frakcije, saj se le-te enakomerneje razporedijo po betonski strukturi.

4.1 Lahki agregat

Lahka agregatna zrna imajo manjšo gostoto, nižjo trdnost in veliko poroznost. Pore nudijo prostor za skladiščenje vode. V svoji strukturi lahko nosijo med 5 % in 25 % vode, ki jo zajamejo v časovnem obdobju 24 ur. Po predpostavki ne vplivajo na vodo cementni količnik.

Pri izbiri lahkega agregata moramo biti pozorni na njegovo poroznost, velikost zrn in odpornost na obrabo. Večja agregatna zrna v betonu tvorijo nosilno strukturo in razmeroma veliko doprinesejo k trdnosti, zato bi bila uporaba le-teh, kot notranjih rezervoarjev vode, nesmiselna. Betonu bi bistveno zmanjšali tlačno trdnost, saj je trdnost lahkega agregata majhna in predstavlja v betonu šibki člen pri obremenitvi. Obenem se avtogeno krčenje ne bi zmanjšalo, saj se velika zrna lahkega agregata neenakomerno razporedijo v betonski mešanici. Fini delci lahkega agregata se enakomerneje razporejajo v betonu in na končno trdnost betona nimajo velikega vpliva, bistveno pa zmanjšajo avtogeno krčenje (Slika 5).

Uporaba drobnih zrn lahkega agregata celo poveča tlačno trdnost betona, ker je hidratacija cementa boljša.



Slika 5: Razporeditev zrn lahkega agregata v podobnih mešanica, (a) vsebuje grobi lahki agregat, (b) vsebuje drobni lahki agregat [Henkensiefken, 2008]

Z ustrezno notranjo nego lahko izboljšamo lastnosti betona, kar nam pri odločitvi pretehta višji začetni vložek denarja. Pri prednapetih betonih so manjše izgube sile prednapetja zaradi krčenja betona.

5 EKSPERIMENTALNI DEL DIPLOMSKEGA DELA

Eksperimentalni del diplome je razdeljen na dva dela.

Prvi del, ki smo ga opravili v laboratoriju, je obsegal pripravo betonske mešanice, v kateri smo uporabili lahki agregat, ki je predstavljal 12 % celotnega agregata. Mešanico smo poimenovali HSC-1600-LWA-12%.

V drugem delu smo analizirali rezultate krčenja in jih primerjali z rezultati krčenja betona HSC-1600, obravnavanega v doktorski disertaciji doc. dr. Draga Sajeta.

5.1 Uporabljeni materiali

Za pripravo betonske mešanice HSC-1600-LWA-12% smo uporabili 400 kg/m^3 veziva, od tega 90 % cementa in 10 % mineralnega dodatka mikrosilike. Delež predhodno namočenega lahkega agregata v betonski mešanici je znašal 12 % celotne prostornine agregata. Uporabili smo frakcijo lahkega agregata 0/2 mm, namesto dela klasičnega agregata enake frakcije. Vodo vezivni količnik sveže mešanice je bil 0.36. Uporabili smo cement CEM II / A-M (LL-S) 42.5 R in superplastifikator, ki je po kemijski sestavi sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzat.

Lastnosti materialov, uporabljenih v betonski mešanici HSC-1600-LWA-12%, so podane v spodnjih preglednicah.

Preglednica 4: Lastnosti uporabljene mivke

Material	Mivka Termit
Nahajališče	Moravče
Opis	Mivka je značilne rjavkasto sive barve s posameznimi temnejšimi zrci. Mineraloško pregledan vzorec pod mikroskopom kaže kremenovo sestavo (>99 %). Oblika zrn je večinoma zaobljena do zaobljeno/ostroroba. Primerjava osi a, b in c (ocenjena dimenzija pod mikroskopom glede na relief) v zrnih kaže, da imajo zrna visok volumski koeficient – dimenzije a, b in c so približno enako velike. Mivka ne vsebuje delcev s premerom pod 0.09 mm, ugodno sestavo ima tudi v zgornjem delu z nizkim deležem zrn velikosti nad 0.4 mm.

Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega agregata

Nahajališče	Separacija Kresnice	
Vrsta kamnine	Apnenec	
Mineraloško-petrografska analiza	Makroskopski opis	Vzorec je svetlo siv apnenec. Kamnina je trdna in gosta. Razpoke v obliki šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom - glineni materiali. Del razpok je zapolnjen s prekristaliziranim kalcitom.
	Mikroskopski opis	Osnova kamnine je mikrit, v kateri opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom – glineni materiali. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekristaljen v mikrosparit ali sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.

Preglednica 6: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata

Nahajališče	Kamnolom Jezersko
Vrsta kamnine	Lahek agregat
Opis	Je močno porozna in luknjičava kamnina svetlo rumene barve. Tekstura je votličasta, nehomogena, spreminjajo se njegova barva, razpokanost, mehanske lastnosti ter vsebnosti odlomkov drugih kamnin. Poroznost zrna znaša od 10 do 15 %. Lehnjak je sestavljen iz mineralov kalcita, dolomita in limonita. V primerjavi z drugimi kamninami ima slabše mehanske lastnosti, večinoma se uporablja za okrasne predmete.

Preglednica 7: Lastnosti uporabljenega cementa

CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	
Kemijska sestava cementa	
A. hidravlično vezivo	
· SiO ₂	22.05%
· Al ₂ O ₃	5.47%
· Fe ₂ O ₃	2.63%
· CaO	60.59%
B. primesi	
· netopni ostanek v HCl	0.31%
· žaroizguba	1.72%
· prosti CaO	0.91%
· MgO	2.72%
· SO ₃	2.43%
· Cl ⁻	0.02%
Fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementa	
Finost mletja	
· ostanek na situ odprtine	90µm 0.65%
· specifična površina	3550 cm ² /g
Prostorninska masa	3.08 g/cm ³
Vezanje	
· poraba vode za standardno konsistenco	27.1%
· pričetek	120 min
· konec	150 min
Prostorninska obstojnost	
· (metoda s kolačem)	obstojen
Upogibna trdnost	
· pri starosti 3 dni	5.9 MPa
· pri starosti 28 dni	7.8 MPa
Tlačna trdnost	
· pri starosti 3 dni	5.9 MPa
· pri starosti 28 dni	51.8 MPa

Preglednica 8: Uporabljeni dodatki za pripravo betonske mešanice

MIKROSILIKA	
Kemijska sestava mikrosilike	
· SiO ₂	95.50-95.90%
· Al ₂ O ₃	0.13 - 0.17%
· Fe ₂ O ₃	0.09 - 0.12%
· CaO	0.35 - 0.55%
· C prosti	1.10 - 1.30%
· C iz SiC	0.30 - 0.50%
· C celotni	1.50 - 1.80%
· SiC	1.10 - 1.60%
· MgO	0.25 - 0.30%
· SO ₃	0.20 – 0.30%
· N ₂ O	0.10 – 0.15%
· K ₂	0.45 – 0.60%
· žaroizguba	0.80 – 1.40%
Fizikalno-kemijske lastnosti mikrosilike	
· nasipna gostota	400 – 550 kg/m ³
· prostorninska masa	2200 kg/m ³
· specifična površina	21 – 23 m ² /g
· velikost delcev	0.1 – 0.3 μm
· vlaga	0.25 – 0.30%
SUPERPLASTIFIKATOR	

5.2 Sestava betonske mešanice

Preglednica 9 prikazuje sestavo preiskovanih betonov. Betonsko mešanico smo načrtovali za posed oznake S4, to je v mejah med 160 in 200 mm (z odstopanjem ± 30 mm).

Preglednica 9: Sestava betonskih mešanic

Mešanica	HSC-1600	HSC-1600-LWA-12%
Agregat		
· agregat Kresnice 0-2mm	853 kg/m ³	114 kg/m ³
· agregat Kresnice 2-4mm		512 kg/m ³
· agregat Kresnice 4-8mm	284 kg/m ³	284 kg/m ³
· agregat Kresnice 8-16mm	474 kg/m ³	474 kg/m ³
· lahki agregat lehnjak 0-2mm	/	121 kg/m ³
Mivka	285 kg/m ³	285 kg/m ³
Količina veziva	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Količina mikrosilike	10 % veziva	10 % veziva
Superplastifikator	2.05 %	2.05 %
Vodovezivno razmerje	0.36	0.36
Vsebnost zraka	1.6 %	1.6 %
Posed	15 cm	15 cm
f _{cm,28dni}	81.4 MPa	89.1 MPa

HSC-1600-LWA-12% je beton visoke trdnosti, z dodatkom predhodno namočenega lahkega agregata.

HSC-1600 je primerjalni beton visoke trdnosti, ki ni bil notranje negovan.

5.3 Konsistenca sveže betonske mešanice

Konsistenca je lastnost betonske mešanice, ki opiše njene transportne lastnosti, vgradljivost, obdelavnost in zgostitev. Glede na standarde jo določamo na štiri načine:

- z aparatom Vebe,
- s postopkom poseda,
- s postopkom razleza,
- s postopkom zgoščevanja pri vibriranju.

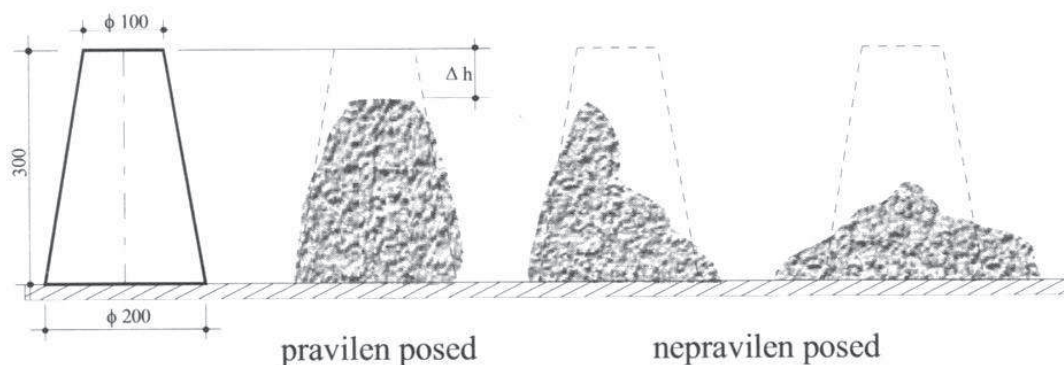
Uporabili smo metodo s postopkom razleza in metodo s postopkom poseda, ker sta primerni za plastične mešanice betonov.

5.3.1 Postopek poseda po standardu SIST EN 12350-2

Konus napolnimo z zidarsko žlico v treh plasteh približno enake višine. Po vsaki tretjini napolnjene višine 25-krat udarimo s standardno kovinsko palico, premera 16 mm, z zaobljenim vrhom, dolžine 60 cm. Prvo plast prebadamo po celi višini, vsako nadaljnjo pa prebadamo do predhodne plasti (Slika 6). Ko napolnimo konus, odstranimo presežek betona in zravnamo površino. Počakamo 30 sekund, nato pa v 5 do 10 sekundah dvignemo konus in ga postavimo ob betonski stožec. Na zgornji rob konusa postavimo ravnilo in izmerimo razliko višin, ki je merilo za konsistenco po tej metodi.



Slika 6: Nabijanje s standardno kovinsko palico



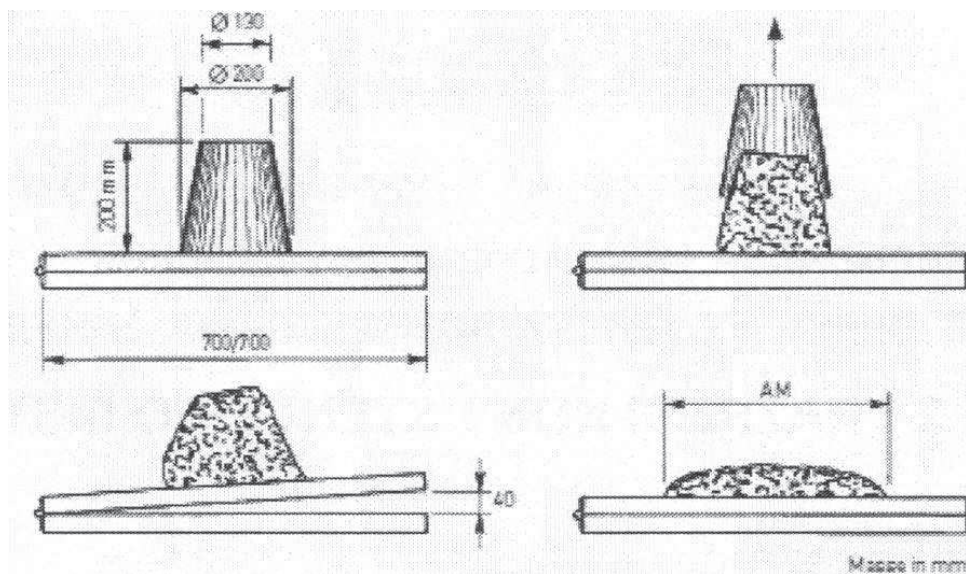
Slika 7: Prikaz poseda sveže betonske mešanice [Žarnić, 2008]

5.3.2 Postopek z razlezom po standardu SIST EN 12350-5

Na razlezno mizo postavimo skrajšan kovinski konus in ga napolnimo v dveh približno enako visokih plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci lesenega nabijača, prečnega prereza 40 x 40 mm (Slika 8). Po nabijanju druge plasti odstranimo presežek betona. Po 30 sekundah pazljivo odstranimo konus in stopimo na stopalko na sprednji strani razlezne mize. 15-krat zapored dvigujemo ploščo za 4 cm ter jo hipno spustimo. Betonska masa se razleže po mizi, nato pa zmerimo dva radija razlezene betonske mešanice (Slika 9). Mera konsistence je povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene betonske mešanice.



Slika 8: Nabijanje plasti z lesnim nabijačem



Slika 9: Shematični prikaz postopka z razlezom [Žarnić, 2008]

5.3.3 Razredi konsistence po SIST EN 206-1

Spodnji preglednici podajata razreda konsistence, določena po metodi poseda in razleza.

Preglednica 10: Razredi poseda po SIST EN 206-1

Razred	Posed [mm]
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	nad 220

Preglednica 11: Razredi razleza po SIST EN 206-1

Razred	Razlez [mm]
F1	pod 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	nad 630

5.3.4 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po SIST EN 12350-7

Posodo napolnimo s svežim betonom, ki ga vgradimo v treh slojih. Višek betona odstranimo, da ostane zgornja površina betona gladka. Posodo zapremo s pokrovom. Skozi odprtino z ventilom vlijemo vodo, s katero napolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Z ročno zračno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nič (Slika 10). Če je pritisk previsok, odvečen zrak spustimo skozi izpuštilni ventil. Nekaj sekund po izravnanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks.

Če je porozimeter pravilno umerjen, predstavlja porozimetrijski indeks odstotek zraka celotne prostornine svežega betona v posodi.



Slika 10: Posoda za merjenje zraka v betonu

5.4 Merjenje krčenja betona

Beton smo vgradili v 6 jeklenih kalupov prizmatične oblike z merami 400 x 100 x 100 mm. Na prvih treh preizkušancih smo merili avtogeno krčenje, na drugih treh pa celotno krčenje.

Za merjenje avtogenega krčenja smo v kalupe namestili polietilensko folijo (Slika 11), s katero smo po vgraditvi betona vzorce zapečatili, s čimer smo preprečili krčenje zaradi sušenja. Ker je avtogeno krčenje najbolj burno v prvih nekaj dneh po betoniranju, smo ga merili elektronsko v prilagojenih kalupih (Slika 12). Na vsakem koncu imajo izvrtano luknjico, skozi katero vstavimo merski reper za merjenje krčenja s pomočjo elektronskih uric, ki so povezane z računalnikom. Da bi bilo začetno krčenje čim bolj neovirano, smo na obeh koncih kalupa namestili stiropor debeline 3 mm. V prostoru, kjer smo shranjevali vzorce v času preiskav, smo vzdrževali konstantno vlago $70 \% \pm 5 \%$ in temperaturo $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Odčitki krčenja so se zapisovali v računalnik na eno minuto, sočasno smo merili še temperaturo preizkušancev s pomočjo termo člena. Z merjenjem temperature smo lahko določili temperaturno krčenje, ki je poleg avtogenega krčenja prisotno v začetnih urah. Elektronsko merjenje krčenja smo izvajali 48 ur, vendar se je krčenje že po prvem dnevu umirilo. Naslednje dni smo meritve krčenja nadaljevali mehansko z nasadnim deformetrom.



Slika 11: Pripravljen kalup za vgraditev betona



Slika 12: Vgrajevanje betona v kalup

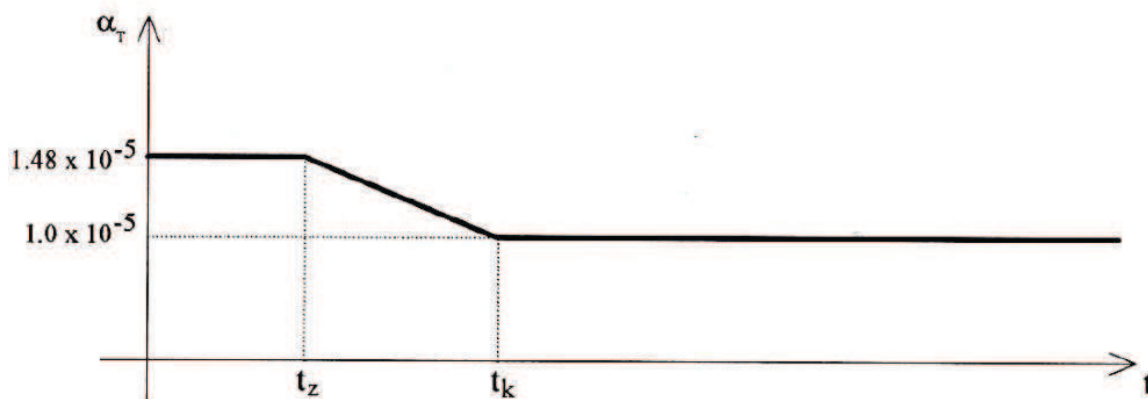


Slika 13: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preizkušancev

Velikost avtogenega krčenja v prvih 48 urah smo dobili kot razliko izmerjenega krčenja in temperaturnega krčenja betona. Slednje smo dobili s pomočjo merjenja temperatur v preizkušancu in temperaturnega koeficienta betona α_T . Temperaturni koeficient se v procesu strjevanja spreminja, saj je odvisen od količine vode, ki pa jo je v svežem betonu več.

V fazi hidratacije, od začetka naraščanja temperature t_z do časa izenačitve temperature z okolico t_k , smo upoštevali linearno zmanjševanje temperaturnega koeficienta. V začetnem svežem in kasneje otrdelem stanju betona upoštevamo konstantni vrednosti α_T .

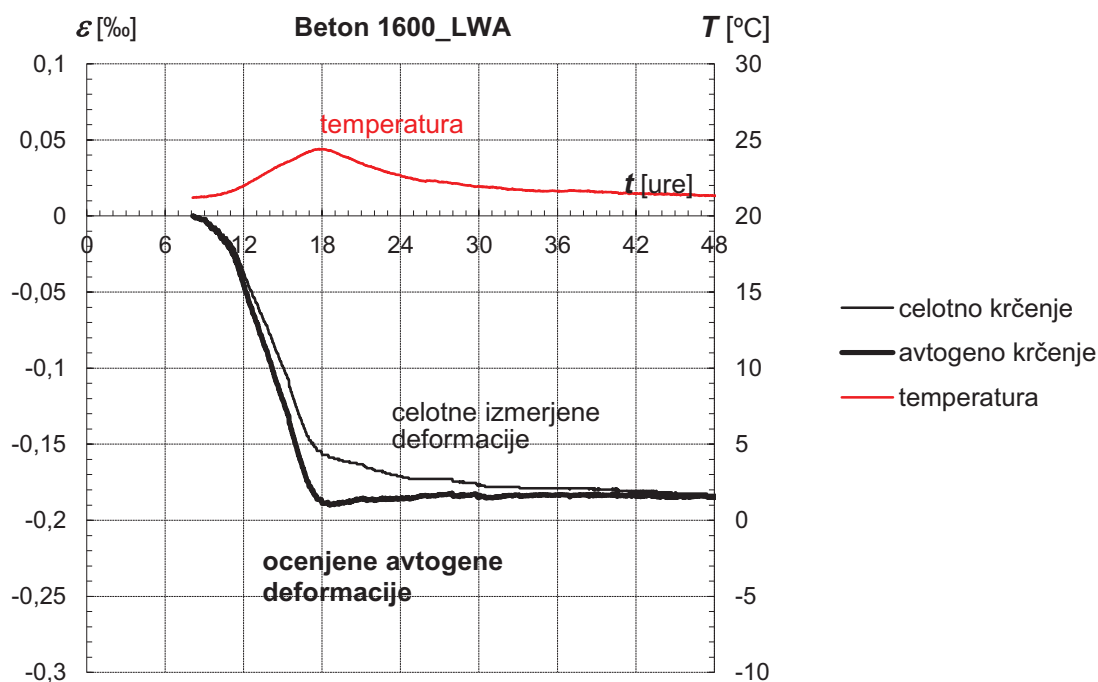
Za svežo betonsko mešanico je $\alpha_{T1} = 1,48 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, za otrdeli beton pa $\alpha_{T2} = 1,00 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ (Slika 14).



Slika 14: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona [Saje, 2001]



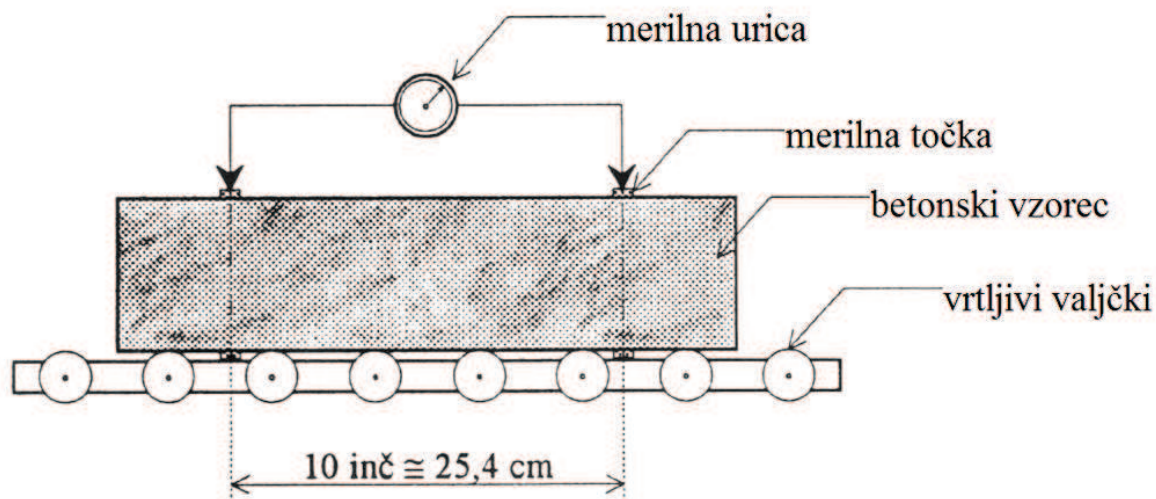
Slika 15: Merilna urica za elektronsko merjenje krčenja



Slika 16: Prikaz deformacij betona HSC-1600-LWA-12%

Na sliki sta prikazana temperatura in krčenje vzorca HSC-1600-LWA-12% v odvisnosti od časa v prvih 48 urah po zamešanju (Slika 16). Iz slike je razvidno, da je ocenjeno avtogeno krčenje v začetnih urah večje kot celotno krčenje. Zaradi naraščanja temperature beton nabreka. Začetek procesa hidratacije se kaže v naraščanju temperature, to je osem ur po zamešanju betonske mešanice. Ta čas predstavlja tudi začetek prikazovanja podatkov na sliki 16.

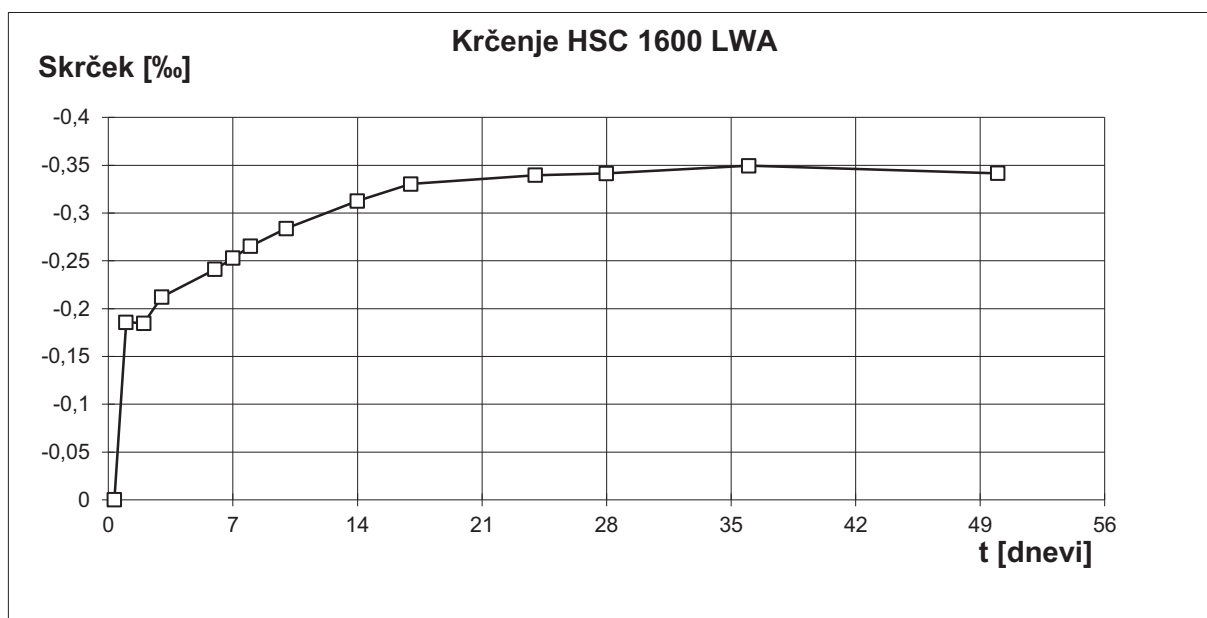
Po vgradnji betona v kalupe smo preizkušance pokrili s polietilensko folijo, da smo se izognili krčenju zaradi sušenja. Po prvem dnevu smo razkalupili preizkušance in jih izpostavili sušenju. Celotno krčenje smo merili z nasadnim deformetrom (Slika 17). Krčenje zaradi sušenja smo določili kot razliko celotnega krčenja in avtogenega.



Slika 17: Shematični prikaz merjenja celotnega krčenja betona

5.4.1 Avtogeno krčenje betona visoke trdnosti

Slika 18 prikazuje časovno spreminjanje avtogenega krčenja vzorca HSC-1600-LWA-12%.



Slika 18: Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%

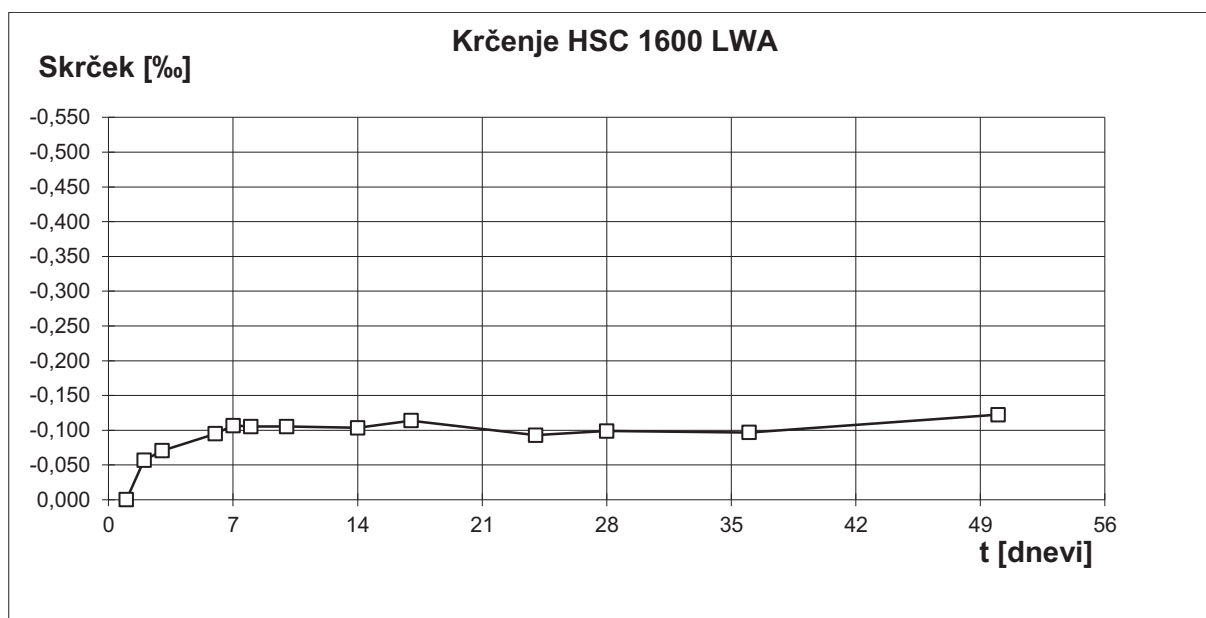
Opazimo lahko, da je avtogeno krčenje burno v prvem dnevu strjevanja betona, nato pa narašča počasi.

Preglednica 12: Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%

Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12% [‰]				
Preizkušanec	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	-0,178	-0,220	-0,254	-0,337
2	-0,178	-0,215	-0,258	-0,346
3	-0,200	-0,203	-0,248	-0,342
Povprečje skrčkov	-0,186	-0,213	-0,253	-0,342
Standardni odklon	±0,010	±0,007	±0,004	±0,004

5.4.2 Krčenje betona visoke trdnosti zaradi sušenja

Slika 19 prikazuje časovni potek krčenja betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja v 50 dneh.



Slika 19: Krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja

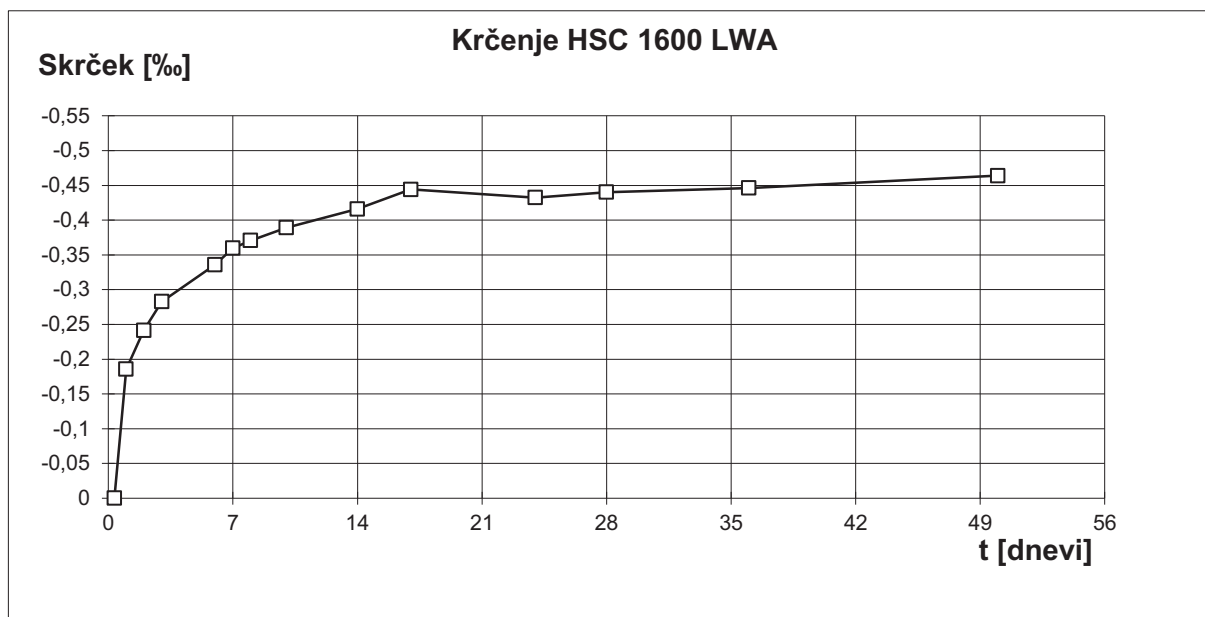
Upoštevali smo, da se prvi dan preizkušanci ne sušijo. Izvedli smo ustrezno zunanjo nego. Krčenje zaradi sušenja opazno narašča prvih sedem dni, potem so prirastki zanemarljivi.

Preglednica 13: Krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja

Krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja [‰]				
Preizkušanec	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	0,000	-0,062	-0,101	-0,093
2	0,000	-0,065	-0,099	-0,088
3	0,000	-0,083	-0,119	-0,116
Povprečje skrčkov	0,000	-0,070	-0,106	-0,099
Standardni odklon	±0,000	±0,009	±0,009	±0,012

5.4.3 Celotno krčenje betona visoke trdnosti

Slika 20 prikazuje celotno krčenje betona, ki smo ga merili 50 dni.



Slika 20: Celotno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%

Krčenje je dva tedna hitro naraščalo, kasneje pa je bil prirastek zanemarljiv.

Preglednica 14: Celotno krčenje betona HSC-1600-LWA-12%

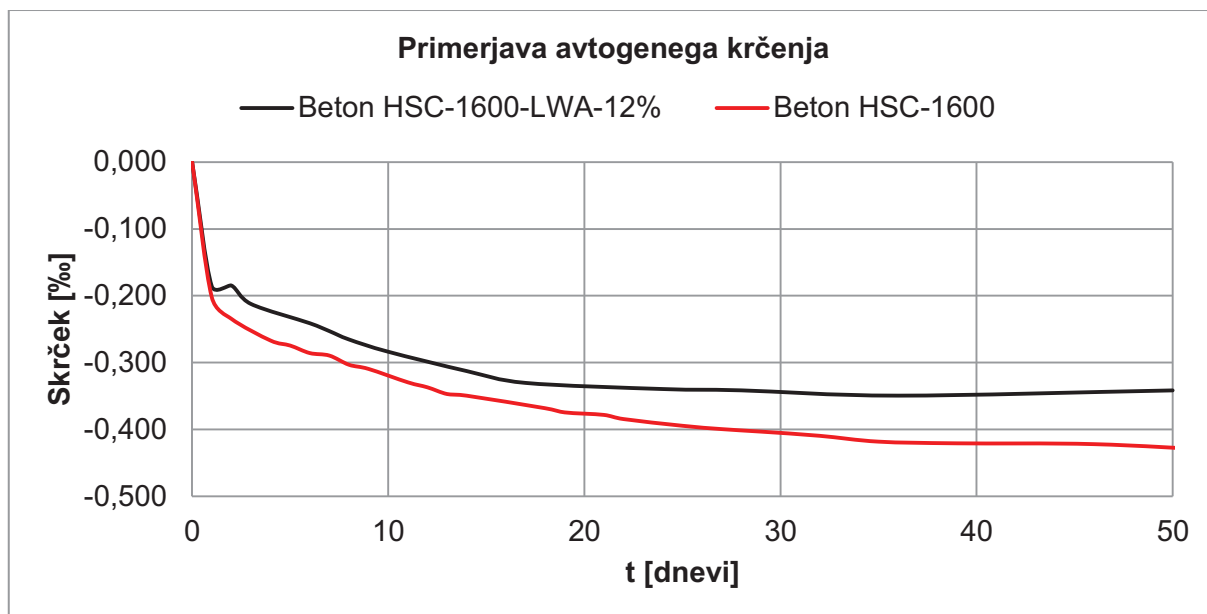
Celotno krčenje betona HSC-1600-LWA-12% [%]				
Preizkušane	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	-0,178	0,282	0,355	0,430
2	-0,178	0,280	0,357	0,434
3	-0,200	0,286	0,367	0,458
Povprečje skrčkov	-0,186	0,283	0,360	0,441
Standardni odklon	±0,010	±0,002	±0,005	±0,012

5.5 Primerjava krčenj betonov visoke trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Preglednice 15 – 17 in slike 21 – 23 prikazujejo časovni razvoj krčenj in primerjavo krčenj betonov visoke trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 v prvih 50 dneh.

Preglednica 15: Povprečen skrček betonov zaradi avtogenega krčenja [%]

Starost betona					
Mešanica	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	50 dni
(1) HSC-1600-LWA-12%	-0,186	-0,213	-0,253	-0,342	-0,342
(2) HSC-1600	-0,202	-0,251	-0,290	-0,401	-0,427
Delež (1)/(2)	0,919	0,847	0,874	0,852	0,800

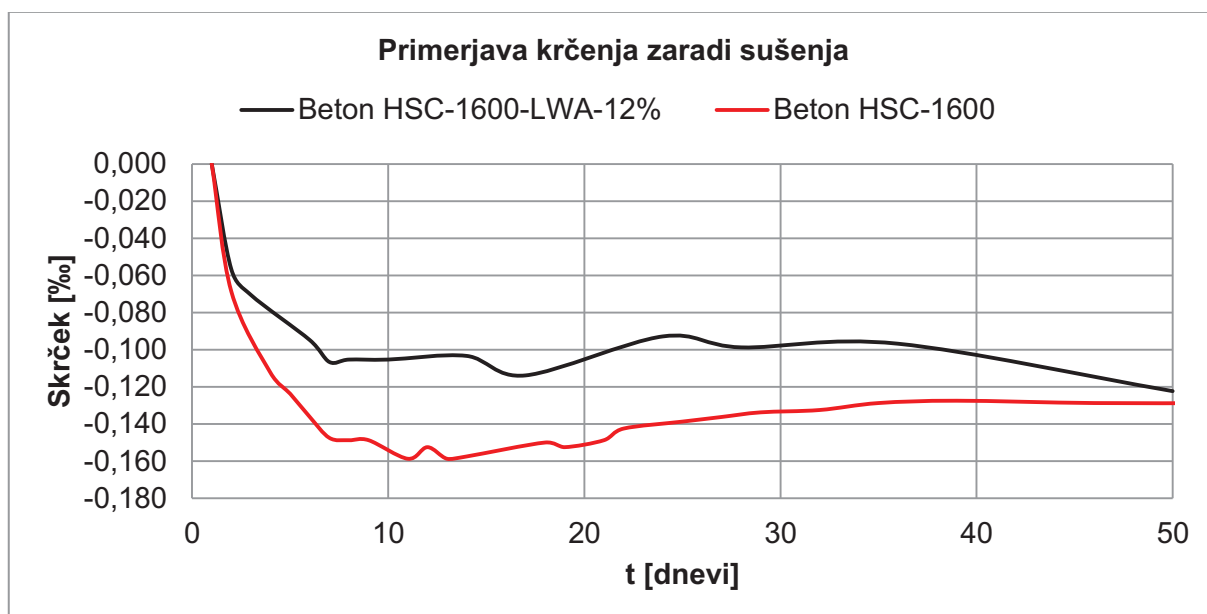


Slika 21: Primerjava avtogenega krčenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Avtogeno krčenje betona HSC-1600-LWA-12% je v primerjavi s krčenjem betona HSC-1600 manjše. V prvem dnevu je manjše 8,1 %, 50. dne pa 20 %..

Preglednica 16: Povprečen skrček betonov zaradi sušenja [%]

Mešanica	Starost betona				
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	50 dni
(1) HSC-1600-LWA-12%	0,000	-0,070	-0,106	-0,099	-0,122
(2) HSC-1600	0,000	-0,090	-0,147	-0,135	-0,129
Delež (1)/(2)	/	0,778	0,723	0,733	0,950



Slika 22: Primerjava krčenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 zaradi sušenja

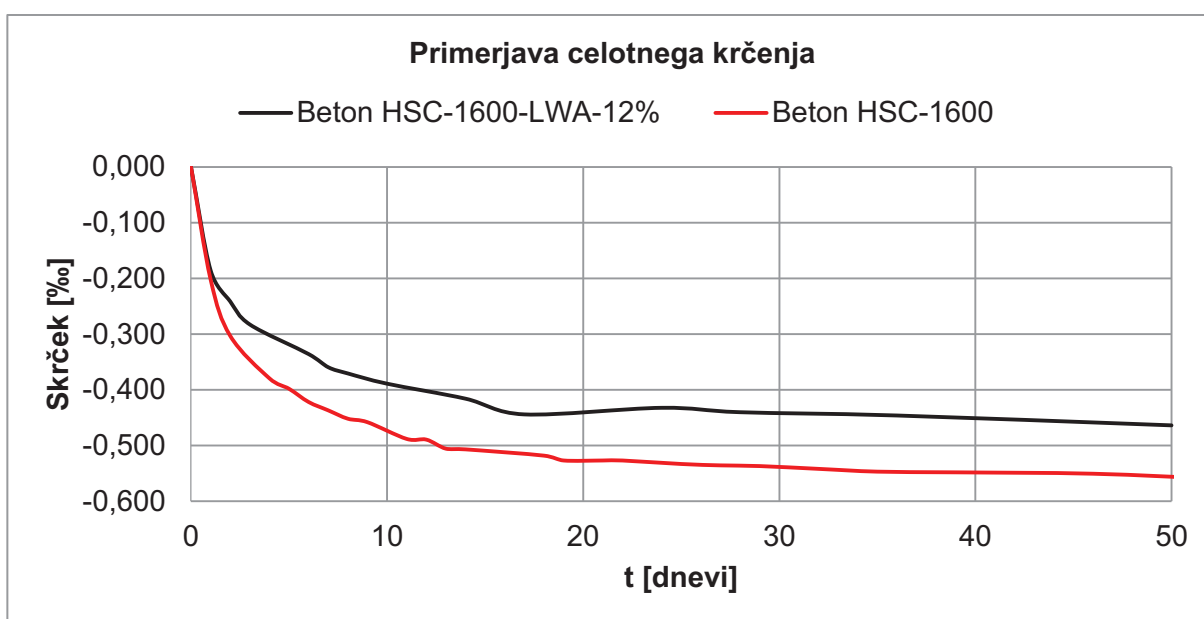
Iz slike 22 in preglednice 16 je razvidno, da je krčenje betona HSC-1600-LWA-12% zaradi sušenja v prvi polovici trajanja preiskav manjše v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona

zaradi sušenja. Po 50 dneh je krčenje obeh preiskovanih betonov zaradi sušenja približno enako.

Preglednica 17: Povprečen skrček betonov zaradi celotnega krčenja [‰]

Starost betona					
Mešanica	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	50 dni
(1) HSC-1600-LWA-12%	-0,186	-0,283	-0,360	-0,441	-0,464
(2) HSC-1600	-0,202	-0,341	-0,437	-0,536	-0,556
Delež (1)/(2)	0,919	0,829	0,823	0,822	0,834

Časovni prirastek celotnega krčenja obeh preiskovanih betonov je od 10 dne naprej skoraj enak. Krčenje je manjše pri notranje negovanem betonu.



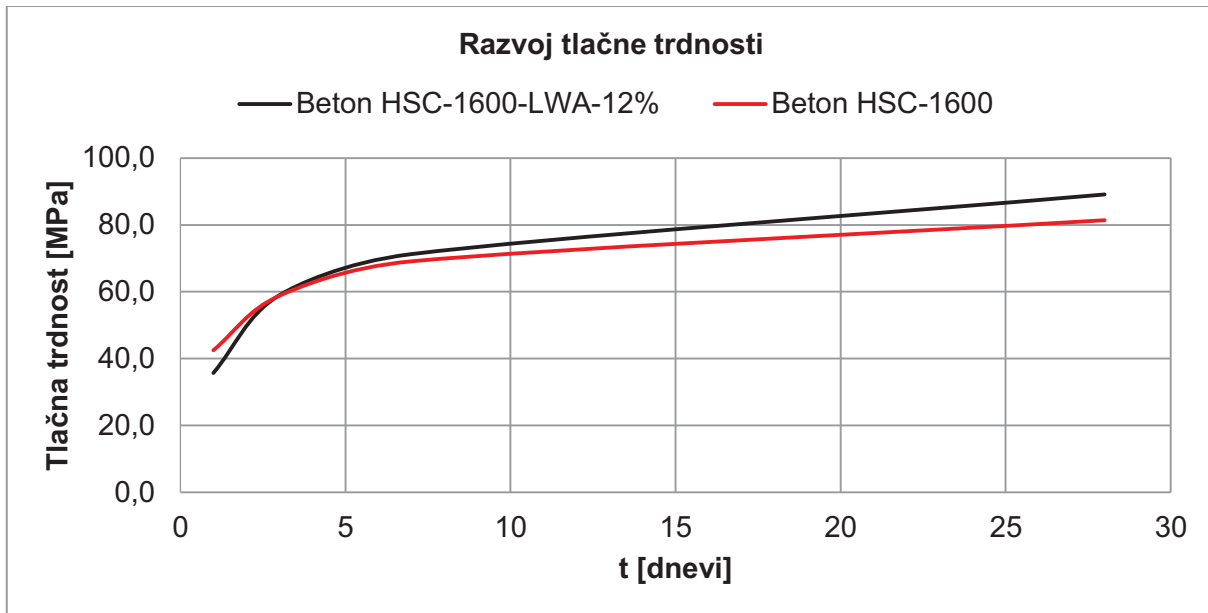
Slika 23: Primerjava celotnega krčenja betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

5.6 Primerjava trdnosti betonov visoke trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Trdnost betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 primerjamo prvih 28 dni. Podrobnejšo analizo tlačnih trdnosti preiskovanih betonov je v diplomski nalogi obdelal Nejc Legat [Legat, 2012].

Preglednica 18: Primerjava tlačnih trdnosti betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 [MPa]

Starost betona				
Mešanica	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
(1) HSC-1600-LWA-12%	35,7	59,0	71,3	89,1
(2) HSC-1600	42,5	58,8	69,1	81,4
Delež (1)/(2)	0,840	1,003	1,031	1,095



Slika 24: Razvoj tlačne trdnosti betonov HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Beton HSC-1600-LWA-12% ima prvi dan manjšo trdnost v primerjavi z betonom HSC-1600, potem je časovni prirastek večji in tretjega dne se vrednosti izenačita. 28 dan ima beton HSC-1600-LWA-12% v primerjavi z betonom HSC-1600 vrednost tlačne trdnosti večjo 9.5 % [Legat, 2012].

6 ZAKLJUČEK

Vpliv predhodno namočenega lahkega agregata na avtogeno krčenje smo uspešno dokazali z raziskavami. Avtogeno in celotno krčenje notranje negovanega betona sta v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona HSC-1600, ki ni bil notranje negovan, manjša. V prvem dnevu je razlika med vrednostma avtogenega krčenja 8.1 %, po 50 dneh pa 20.0 %. Vrednost celotnega krčenja, ki je seštevek avtogenega krčenja in krčenja zaradi sušenja, se pri 50 dneh razlikuje za 16.6 %. Rezultati kažejo, da namočen lahki agregat služi kot notranji rezervoar vode.

Meritve tlačne trdnosti betona so pokazale, da se je kljub uporabi agregata manjše trdnosti, tlačna trdnost notranje negovanega betona povečala. Večja stopnja hidratacije cementa je prevladala nad manjšo trdnostjo lahkega agregata. Pri starosti 28 dni je bila tlačna trdnost notranje negovanega betona HSC-1600-LWA-12% v primerjavi s tlačno trdnostjo betona HSC-1600 večja za 9.5 %.

Rezultate smo pridobili na majhnem vzorcu. Za večjo verodostojnost trditev bi morali opraviti preiskave na večjem številu preizkušancev.

Ker pri delu vedno stremimo k najboljšim rešitvam, bi lahko betonsko mešanico še dodatno izboljšali. V mešanici betona HSC-1600-LWA-12% smo uporabili lahki agregat frakcije od 0 do 2 mm, ki vsebuje precej finih delcev. Taki delci niso najbolj primerni za notranje rezervoarje vode, ker imajo majhno možnost hranjenja vode. Predvidevamo, da bi z uporabo frakcij lahkega agregata, ki ne vsebujejo finih delcev, dobili ugodnejše rezultate. Frakcije z zrni večjimi od 4 mm, pa se zaradi svoje velikosti slabše razporedijo v betonski mešanici in niso učinkovite ali imajo celo neugoden vpliv.

VIRI

Aitcin, P. - C. 1998. High – performance concrete. London, E&FN Spon: 591 str.

Bandelj, B. 2010. Reološke lastnosti vlaknastih betonov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Bandelj): 194 str.

Cusson, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with presoaked fine light weight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Research 38, 757-765.

Dodatki za beton in malte. 2012. TKK Srpenica d.d.
<http://www.tkk.si/default.asp?id=2594> (Pridobljeno 01.09.2013.)

Henkensiefken, R., 2008. Internal curing in cementitious systems made using saturated lightweight aggregate. Master of Science Thesis. Purdue University: 170 p.

Karakteristike lehnjak. 2011. Hotavlje, izdajatelj: Marmor Hotavlje: str. 1.

Kovler, K. 2007. Internal Curing of Concrete. RILEM TC 196-ICC, State-of-the-Art Report, str. 140

Kvitsel, V. 2005. Creep and Shrinkage of High Performance Lightweight Aggregate Concrete. V: Hermes Science Publishing (ur.). Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures. London, Hermes Science Publishing: str. 585-590.

Legat, N. 2012. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Legat): 31 str.

Poročilo o preiskavi kamnine iz kamnoloma Ušenišče. 17.04.1997. Ljubljana, izdajatelj: IGMAT: loč. pag.

Saje, D., Bandelj, B., Lopatič, J. 2008. Notranja nega betona. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 9. – 10. Oktober 2008. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 245-252.

Saje, D., Saje, F., Kavčič, F. 1999. Krčenje betonov visoke trdnosti. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 21. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 14. – 15. Oktober 1999. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207-214.

Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): 157 str.

Saje, D., Lopatič, J. 2007. Lastnosti betona visoke trdnosti z vsebnostjo mikrosilike. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 29. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 18. – 19. oktober 2007. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 241-248.

Saje, D. 1997. Posebnosti betonov visokih trdnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): 90 str.

Šušteršič, J. 2004. Betoni visokih zmogljivosti v praksi. V: Slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 5–10.

Tehnične karakteristike mikrokremenica/mikrosilika TKK. 1997. Srpenica, izdajatelj: TKK Srpenica: loč. pag.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

Žarnić, R. 2008. Gradiva vaje 2008/2009. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

Žnidaršič, Š. 2012. Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Žnidaršič): 35 str.