

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:

Udir, R., 2014. Vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 52 str.

Datum arhiviranja: 16-10-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Udir, R., 2014. Vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 52 pp.

Archiving Date: 16-10-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

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

Kandidat:

## **ROK UDIR**

### **VPLIV NOTRANJIH REZERVOARJEV VODE IN VSEBNOSTI VLAKEN NA KRČENJE BETONOV VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 68/OG-MK

### **IMPACT OF INTERNAL WATER RESERVOIRS AND STEEL FIBRES CONTENT ON SHRINKAGE OF HIGH STRENGTH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 68/OG-MK

**Mentor:**  
doc. dr. Drago Saje

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 25. 09. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE**

Stran za napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

## **IZJAVE**

Podpisani Rok Udir izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 25. 9. 2014

Rok Udir

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>624.012.4(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Rok Udir</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Drago Saje</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – visokošolski študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>52 str., 21 pregl., 20 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>beton visoke trdnosti, vlaknasti betoni, notranja nega, lahki agregat, tlačna trdnost, krčenje betona</b>

### **Izвлеček**

Betoni visoke trdnosti imajo majhno vodovезivno razmerje, zato je njihovo zgodnje avtogeno krčenje večje. V diplomski nalogi smo opisali zmanjševanje le-tega s pomočjo predhodno namočenega lahkega agregata, različnih frakcij in jeklenih vlaken. V okviru laboratorijskih raziskav smo merili avtogeno in celotno krčenje betonov visoke trdnosti. Iz dobljenih vrednosti smo izračunali prispevek krčenja zaradi sušenja. Obravnavali smo tudi tlačne trdnosti strjenega betona posameznih betonskih mešanic in opazovali vpliv vsebnosti lahkega agregata in jeklenih vlaken na njeno velikost.

Največji doprinos k zmanjšanju krčenja je imela notranja nega s predhodno namočenim lahkim agregatom.

Ugotovili smo, da se je beton, ki je vseboval jeklena vlakna in notranje rezervoarje vode v obliki predhodno z vodo namočenega lehnjaka, frakcije 2–4 mm, krčil najmanj in dosegal največje tlačne trdnosti glede na primerjalne betone.

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

<b>UDK:</b>	<b>624.012.4(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Rok Udir</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. prof. Drago Saje, Ph. D.</b>
<b>Title:</b>	<b>The influence of internal water reservoirs and steel fibres content on shrinkage of high strength concrete</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis</b>
<b>Notes:</b>	<b>52 p., 21 tab., 20 fig.</b>
<b>Key words:</b>	<b>High strength concrete, fibre reinforced concrete, internal curing, lightweight aggregate, compressive strength, concrete shrinkage</b>

### **Abstract**

Due to its low water/cement ratio, high-strength concrete has a more pronounced early-age autogenous shrinkage. This thesis studies how to mitigate that by means of pre-soaked lightweight aggregate, various fractions and steel fibers. In the experimental part of the study, we measured the autogenous and total shrinkage of high-strength concrete, and used the results to calculate the contribution of drying shrinkage. We also measured the compressive strength of hardened concrete mixtures, and studied the influence of lightweight aggregate and steel fiber content on the compressive strength.

Internal curing with pre-soaked lightweight aggregate proved to be the best shrinkage mitigator.

We found out that the concrete which was reinforced with steel fibers and included internal water reservoirs in the form of pre-soaked tuff of 2 to 4 mm had the lowest shrinkage and the highest compressive strength of all the compared concrete mixtures.

## **ZAHVALA**

Najlepše se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu za vodenje, razlago, pomoč in potrpežljivost pri nastajanju diplomskega dela. Hvala Dijani Maleš, Damjanu Liscu in Leonu Mačku za pomoč pri izvedbi eksperimentov.

Prav tako se zahvaljujem svoji družini in bližnjim, ki so me spodbujali med študijem.

## KAZALO VSEBINE

IZJAVE .....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....	IV
ZAHVALA .....	V
1 UVOD .....	1
2 BETONI VISOKE TRDNOSTI .....	2
2.1 ZNAČILNOSTI.....	2
2.2 SESTAVINE BETONA.....	3
2.2.1 Agregat .....	3
2.2.2 Cement .....	4
2.2.2.1 Hidratacija cementa .....	4
2.2.3 Voda .....	6
2.2.4 Mineralni dodatki .....	7
2.2.4.1 Mikrosilika.....	7
2.2.5 Kemijski dodatki .....	8
2.2.5.1 Superplastifikatorji .....	9
3 VLAKNASTI BETON .....	10
3.1 LASTNOSTI STRJENEGA KOMPOZITA .....	13
3.2 UPORABA VLAKNASTIH BETONOV.....	14
4 KRČENJE BETONA .....	16
4.1 Krčenje vlaknastega betona .....	16
4.2 Plastično krčenje .....	17
4.3 Kemično krčenje.....	17
4.4 Avtogeno krčenje.....	18
4.5 Temperaturno krčenje .....	19
4.6 Krčenje zaradi sušenja .....	19
4.7 Krčenje zaradi karbonatizacije .....	20
5 NEGA BETONA.....	21



5.1 Lahki agregat (LWA– lightweight aggregate) .....	22
6 EKSPERTIMENTALNI DEL .....	25
6.1 UPORABLJENI MATERIALI .....	25
6.1.1 Agregat .....	25
6.1.2 Cement .....	27
6.1.3 Dodatki .....	28
6.1.4 Voda .....	28
6.1.5 Vlakna.....	28
6.2 PRIPRAVA IN SESTAVA BETONSKIH MEŠANIC.....	29
6.3 PRESKUŠANJE KONSISTENCE SVEŽE BETONSKE MEŠANICE.....	31
6.3.1 Metoda s posedom .....	31
6.3.2 Metoda z razlezom.....	32
6.3.3 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu.....	33
6.4 MEHANSKE LASTNOSTI STRJENEGA BETONA.....	34
6.4.1 Tlačna trdnost .....	34
6.5 MERJENJE AVTOGENEGA KRČENJA IN CELOTNEGA KRČENJA BETONOV VISOKE TRDNOSTI .....	37
6.5.1 METODA MERJENJA AVTOGENEGA KRČENJA.....	37
6.5.1.1 REZULTATI IN ANALIZE MERITEV AVTOGENEGA KRČENJA.....	40
6.5.1.1.1 Zgodnje avtogeno krčenje .....	41
6.5.1.1.2 Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev .....	45
6.5.2 METODA MERJENJA CELOTNEGA KRČENJA SUŠENJU IZPOSTAVLJENEGA BETONA.....	47
6.5.2.1 Rezultati celotnega krčenja sušenju izpostavljenega betona .....	48
6.6 KRČENJE ZARADI SUŠENJA .....	50
7 ZAKLJUČKI .....	52
VIRI .....	53

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Glavni sestavni minerali klinkerja (Žarnić, 2005, 86).....	4
Preglednica 2: Značilnosti mivke Termit iz Moravč (IGMAT, 1997) .....	25
Preglednica 3: Značilnosti lahkega agregata (Marmor Hotavlje).....	26
Preglednica 4: Značilnosti agregata iz separacije Kresnice (IGMAT, 1997).....	26
Preglednica 5: Kemijska sestava, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementa CEM I 52,5 R (Salonit Anhovo, 1997) .....	27
Preglednica 6: Sestava betonskih mešanic.....	30
Preglednica 7: Razredi poseda po SIST EN 206-1.....	31
Preglednica 8: Rezultati poseda sveže betonske mešanice .....	31
Preglednica 9: Razredi razleza po SIST EN 206-1.....	32
Preglednica 10: Rezultati razleza sveže betonske mešanice .....	32
Preglednica 11: Delež zraka glede na celotno prostornino svežega betona.....	33
Preglednica 12: Tlačne trdnosti preizkušancev pri starosti 1 in 28 dni.....	35
Preglednica 13: Celotne in ocenjene avtogene deformacije pri starosti enega dneva .....	43
Preglednica 14: Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev pri starosti 1, 3, 7 in 28 dni .....	45
Preglednica 15: Sprememba celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev na primerjalni beton HSC-1600- -CEM I 52,5 R .....	46
Preglednica 16: Sprememba celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev na primerjalni beton HSC-JV- -1600-CEM I 52,5 R.....	46
Preglednica 17: Celotno krčenje sušenju izpostavljenih vzorcev pri starosti 1, 3, 7 in 28 dni.....	48
Preglednica 18: Sprememba celotnega krčenja sušenju izpostavljenih vzorcev na primerjalni beton HSC-1600-CEM I 52,5 R.....	49
Preglednica 19: Sprememba celotnega krčenja sušenju izpostavljenih vzorcev na primerjalni beton HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R .....	49
Preglednica 20: Krčenje vzorcev zaradi sušenja pri starosti 3, 7 in 28 dni.....	50
Preglednica 21: Sprememba krčenja vzorcev zaradi sušenja na primerjalni beton HSC-JV- 1600-CEM I 52,5 R .....	51

## KAZALO SLIK

Slika 1: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste (Žarnić, 2005, 95)	6
Slika 2: Zgostitev strukture cementne paste s superplastifikatorjem in z mikrosilikom (Saje D, 1997).....	8
Slika 3: Shematični prikaz prenosa obremenitev preko razpok pri običajnem armiranju in mikroarmiranju .....	11
Slika 4: Delovni diagrami za zelo trdno vlakno in za krhko matrico (a) ter za kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994, 11).....	12
Slika 5: Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja .....	17
Slika 6: Shematični prikaz kapilarne pore (Saje D. s sodelavci, 2008) .....	18
Slika 7: Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa (Saje D. s sodelavci, 2008).....	22
Slika 8: Vpliv lahkega agregata pri procesu notranje nege v stičnem območju.....	23
Slika 9: Porušena betonska kocka po enosnem tlačnem preizkusu .....	34
Slika 10: Shematski prikaz elektronskega merjenja zgodnjega avtogenega krčenja (Saje, 2001).....	37
Slika 11: Elektronsko merjenje zgodnjega avtogenega krčenja betona .....	38
Slika 12: Časovni potek krčenja zatesnjenega betona in časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona (Saje, 2001, 63) .....	40
Slika 13: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC_1600_CEM_I_52,2R (Maleš, 2013).....	41
Slika 14: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R .....	42
Slika 15: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona.....	42
Slika 16: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona.....	43
Slika 17: Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev .....	45
Slika 18: Betonske prizme z merilnimi reperji na vrtljivih valjčkih.....	47
Slika 19: Celotno krčenje sušenju izpostavljenih vzorcev .....	48
Slika 20: Krčenje zaradi sušenja .....	50

**X** Udir, R. 2014. Vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti.  
Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Visokošolski strokovni študijski program Operativno gradbeništvo.

---

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

Zaradi visoke tlačne trdnosti, relativno velike trajnosti, možnosti poljubnega oblikovanja konstrukcij, sorazmerno majhnih vzdrževalnih stroškov in konkurenčne cene je beton eden izmed najpogosteje uporabljenih gradbenih materialov. Slabosti betona so zlasti velika lastna teža, majhna natezna, upogibna, strižna in udarna trdnost, krčenje ter lezenje. S posebno tehnologijo proizvodnje in z različnimi dodatki lahko te slabosti zmanjšamo (Bandelj, Saje D., Lopatič, Saje F., 2008).

Poznamo tudi betone visokih zmogljivosti, ki predstavljajo novo razvojno fazo betona in izkazujejo zelo visoke kakovosti za eno ali več lastnosti (Zajc, 2004, 1). V diplomski nalogi smo obravnavali betone visokih trdnosti. Ti imajo zelo majhno vodovezivno razmerje, kar povzroča večje krčenje betona. To krčenje smo hoteli čim bolj zmanjšati s pomočjo notranje nege betona in dodanih jeklenih vlaken.

S pomočjo predhodno namočenega lahkega agregata, ki predstavlja rezervoarje vode, smo beton notranje negovali. Uporabili smo dve različni frakciji lahkega agregata, in sicer 0–2 mm in 2–4 mm. Lahek agregat je predstavljal 12% celotne prostornine agregata. Ti rezervoarji zagotavljajo dodatno vodo za proces hidratacije veziva in tako poskrbijo, da se voda iz finih kapilarnih por porablja kasneje. V vse betonske mešanice smo dodali tudi jeklena vlakna, ki so povečala povezanost in natezno trdnost betona ter zmanjšala krčenje.

Diplomska naloga poleg uvoda vsebuje še pet poglavij. V drugem poglavju *Betoni visoke trdnosti* smo opisali splošne značilnosti in sestavine teh betonov. V poglavju *Vlaknasti betoni* smo prav tako opisali njihove splošne značilnosti, lastnosti strjenega kompozita in njihovo praktično uporabo. V naslednjem poglavju z naslovom *Krčenje betona* smo opisali pomembno slabost betonov visoke trdnosti, to je krčenje. V petem poglavju z naslovom *Nega betona* smo kot odgovor na prejšnje poglavje opisali postopke za zmanjšanje krčenja betona. Dodatno smo opisali notranjo nego s predhodno namočenim lahkim agregatom. V zadnjem poglavju z naslovom *Ekperimentalni del* smo podrobno opisali uporabljene materiale, pripravo in sestavo betonskih mešanic. Ukvarjali smo se tudi s preizkušanjem konsistence sveže betonske mešanice in z merjenjem tlačne trdnosti strjenega betona. Velik del laboratorijskih preiskav so obsegale meritve avtogenega in celotnega krčenja betonov visokih trdnosti. Na koncu smo vse te rezultate meritev posameznih mešanic predstavili in primerjali med seboj.

## 2 BETONI VISOKE TRDNOSTI

### 2.1 ZNAČILNOSTI

Beton visoke trdnosti je material s finejšo, gostejšo mikrostrukturo in posebnimi mehanskimi lastnostmi. Meja med betoni običajne trdnosti in betoni visoke trdnosti se je spreminjala s časom. Pred uvedbo superplastifikatorjev je veljalo, da se beton, ki presega tlačno trdnost 40 MPa, šteje med visokovredne (Saje, 2001, 1). Danes velja, da je beton visoke trdnosti tisti, ki pri starosti 28 dni po betoniranju izkazuje tlačno trdnost, večjo od 55 MPa, ali je najmanj trdnostnega razreda C55/67 (SIST EN 206-1: 2003).

Za povečanje tlačne trdnosti betona je potrebno zmanjšati vodocementno razmerje in dodati mineralni dodatek mikrosiliko. Zmožnost obdelave svežega betona z vodocementnim razmerjem od 0,22 do 0,35 se doseže z dodajanjem superplastifikatorjev. Zaradi nizkega vodocementnega razmerja, pazljivo izbrane zrnastne sestave agregata visoke kvalitete, mikrosilike in kemičnih dodatkov ima beton majhno poroznost. S tem se zmanjša prepustnost in poveča kemijska odpornost betona (Završki, 2004, 18).

Prednosti betonov visokih trdnosti so:

- visoka trdnost,
- visoke zgodnje trdnosti dovoljujejo hitrejšo gradnjo in razopaževanje,
- večja odpornost na abrazijo (obrus),
- večja odpornost na zmrzovanje/taljenje v prisotnosti soli,
- manjša vodoprepustnost (boljša zaščita armature),
- boljše reološke lastnosti.

Pomanjkljivosti betonov visokih trdnosti:

- višja cena,
- strožja kontrola sestavnih materialov in izvedbe betona,
- nevarnost krhke porušitve konstrukcijskih elementov zaradi manjše žilavosti,
- manjša ognjeodpornost betona zaradi gostejše strukture materiala,
- porast togosti ni sorazmeren s povečanjem trdnosti.

Betoni visoke trdnosti imajo večje avtogeno krčenje, kar je posledica burnega procesa hidratacije in razmeroma majhne vsebnosti vode. Avtogeno krčenje predstavlja približno polovico celotnega krčenja betona visoke trdnosti. Z njegovim zmanjševanjem smo se ukvarjali v diplomski nalogi.

## **2.2 SESTAVINE BETONA**

Osnovne sestavine betonov visoke trdnosti, kot so kamni agregat, cement, voda in različne vrste dodatkov, so enake kot pri betonih običajne trdnosti. Razlikujejo se v kakovosti, obliki, velikosti in količini. Cilj je, da bi dosegli gost in visokokvalitetni cementni kamen. Pri agregatu se spremenita zrnastostna sestava in velikost največjega zrna. Za doseganje višjih trdnosti del cementa nadomestimo z mineralnimi dodatki. Zaradi nizkega vodocementnega razmerja nastane problem vgradljivosti, ki ga rešimo z dodajanjem superplastifikatorjev. Betoni visokih trdnosti vsebujejo večje količine veziva (od 400 do 550 kg/m<sup>3</sup>) kot betoni običajnih trdnosti (od 300 do 400 kg/m<sup>3</sup>) (Saje, 2001, 4).

### **2.2.1 Agregat**

V betonu je agregat količinsko največja komponenta. Lastnosti naravnega agregata so definirani z geološkimi danostmi v ležišču – torej gre za mineraloške, strukturne in teksturne lastnosti kamnine. Te vplivajo na njihove mehansko-fizikalne parametre in obstojnost. Kakršen koli agregat uporabimo, vedno bo vplival na lastnosti svežega in strjenega betona – s svojimi lastnostmi in posredno z mejno površino med strjeno cementno pasto in posameznim zrnom. Zaradi tega imajo lomljeni agregati nekatere prednosti pred oblimi. Granulacijska sestava in največje zrno agregata vplivata na obdelovalnost svežega betona. Na podlagi maksimalnega zrna agregata se lahko določi minimalna količina cementa (Žarnić, 2005, 122).

Pri betonih visokih trdnosti se uporabljajo agregati, katerih premer največjih zrn ne sme biti večji od 16 mm. Relativno droben agregat omogoča homogenejšo in kompaktnjšo strukturo betona z manjšo vsebnostjo por, kar omogoča enakomernjšo razporeditev napetosti zaradi zunanje obtežbe (Saje, 2001, 4).

## 2.2.2 Cement

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo veže in se strdi. Pri tem iz židke cementne paste nastane trd in trden cementni kamen, sestavljen pretežno iz kalcijevih silikat hidratov, ki tudi v vodi ohranja stabilnost in trdnost. Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebujejo naravni lapor, apnenec in glina. Te surovine zmeljemo in nato žgemo v rotacijski peči. Dobljeno zmes imenujemo cementni klinker, ki ga ohladimo in zmeljemo v fini prah. Med mletjem dodajamo različne snovi (sadra, žindra, naravni in umetni pucolani, apnenec, elektrofiltrski pepel), ki dajejo končne lastnosti različnim vrstam cementov (Žarnić, 2005, 84).

Najpogosteje uporabljen je portland cement. Za betone visokih trdnosti uporabljamo fino mleti portland cement z veliko specifično površino, posledica tega pa je burna reakcija z vodo.

Preglednica 1: Glavni sestavni minerali klinkerja (Žarnić, 2005, 86).

MINERALI	KEMIJSKA FORMULA	DELEŽ MINERALA V CEMENTNEM KLINKERJU
Trikalcijev silikat (alit)	$C_3S (3CaO \cdot SiO_2)$	40–70 %
Dikalcijev silikat (belit)	$C_2S (2CaO \cdot SiO_2)$	5–30 %
Trikalcijev aluminat	$C_3A (3CaO \cdot Al_2O_3)$	7–15 %
Tetrakalcijev aluminat	$C_4AF (4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3)$	10–20 %

### 2.2.2.1 Hidratacija cementa

Hidratacija je proces vezanja vode in cementa. To je kemična reakcija med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo, pri kateri se sprošča toplota (Žarnić, 2005, 90).

Posledici hidratacije cementa sta mehanski in termodinamični učinek. Mehanski učinek predstavlja razvoj trdnosti, termodinamični pa sproščanje toplote. Termodinamični učinek povzroči povišanje temperature in temperaturno deformiranje betona.



Na proces hidratacije in na količino sproščene toplote ter posledično na časovni razvoj krčenja in trdnosti cementnega kamna oziroma betona vplivajo zlasti naslednji parametri (Saje, 2001, 6):

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

*Opis hidratacije cementa (Žarnić, 2005, 91):*

- Predindukcijsko obdobje (traja nekaj minut)

Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10 %  $C_3S$ . Mineral  $C_3A$  se v deležu med 5 in 25 % raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral  $C_4AF$  reagira podobno kot  $C_3A$ , delež reagiranega  $C_2S$  pa je zelo majhen.

- Indukcijsko obdobje – relativno mirovanje (traja nekaj ur)

Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zniža. To znižanje se razlaga na dva načina:

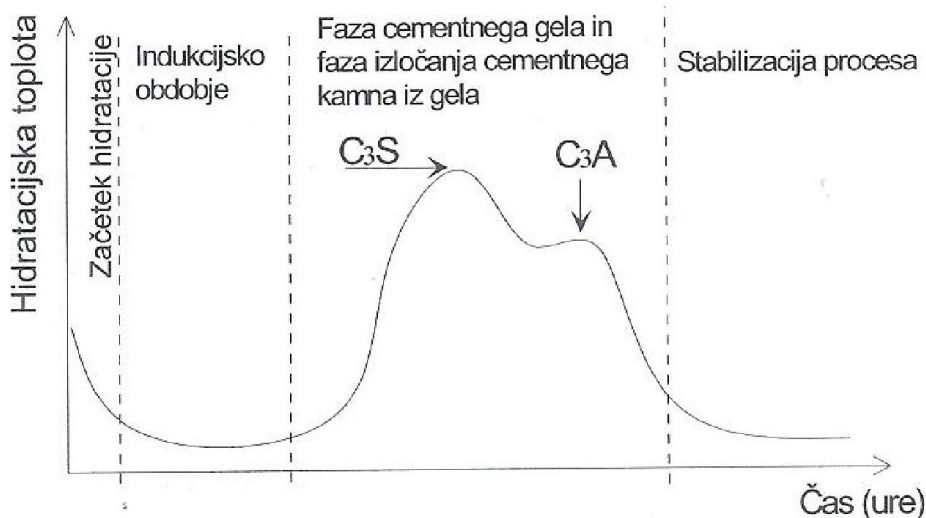
1. Po *teoriji zaščitne plasti* se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v predindukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije.
2. Po *teoriji kristalizacijskih jeder* nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.

- Obdobje pospešene hidratacije (poteka od tretje do dvanajste ure procesa)

Nasičena raztopina z novo nastalimi kristali preide iz faze soli v fazo cementnega gela, ki je gosta tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. Hitrost hidratacije  $C_3S$  in  $C_2S$  narašča in doseže maksimalne vrednosti.

- Obdobje pojemajoče hidratacije (do konca hidratacije)

Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H-gel kot posledica hidratacije  $C_3S$  in  $C_2S$ . Na začetku nastali etringit reagira z nehidratiziranimi  $C_3A$  in  $C_4AF$  in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti pa rastejo in tvorijo mrežo.



Slika 1: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste (Žarnić, 2005, 95)

### 2.2.3 Voda

Splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo betonske mešanice. Paziti moramo na prisotnost soli v vodi za pripravo armiranega betona, saj ta povzroči korozijo cementnega kamna in/ali vgrajene armature. Zgornja meja je 5 g/l, morska voda pa jo vsebuje okoli 7-krat več. Zato je ta pogojno uporabna za nearmirane betone nižjih trdnosti. Drobni delci (glina, organske primesi), ki so razpršeni v vodi, ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnici cementa ter s tem vplivajo na proces hidratacije in sprijemanje cementne paste z agregatom. Zgornja meja raztopljenih trdnih snovi je običajno 2 ‰. Veliko pozornost je potrebno posvetiti uporabi prečiščenih odpadnih industrijskih voda, ki lahko vsebujejo škodljive raztopljene snovi (Žarnić, 2005, 99).

## **2.2.4 Mineralni dodatki**

Mineralni dodatki so naravni ali industrijski odpadni materiali, ki imajo pucolanske lastnosti in so zaradi tega nadomestilo za del količine cementa. V sveži betonski mešanici reagirajo s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ki se sprošča ob topljenju trikalcijevega in dilikalcijevega silikata v cementni pasti. Nastala CSH-faza zapolnjuje prazna mesta v cementni pasti in s tem gosti strukturo betona in izboljšuje njene lastnosti.

Uporaba mineralnih dodatkov spreminja naslednje lastnosti svežega betona (Zajc, 2007, 5):

- poveča obdelovalnost,
- zmanjšuje nagnjenost h krvavenju,
- izboljšuje črpnost betona,
- podaljša čas začetka vezanja,
- izboljšuje površinsko obdelavo betona.

Uporaba mineralnih dodatkov spreminja tudi lastnosti strjenega betona (Zajc, 2007, 5):

- znižuje zgodnje trdnosti in povečuje končne trdnosti,
- izboljšuje vez med armaturo ali mikroarmaturo in betonom,
- znižuje toploto hidratacije v procesu vezanja,
- znižuje prepustnost betona,
- zniža ekspanzijo, ki jo povzroči alkalna reaktivnost,
- povečuje odpornost proti sulfatni reakciji,
- zmanjšuje izcvetanje,
- zavira korozijo armature v betonu.

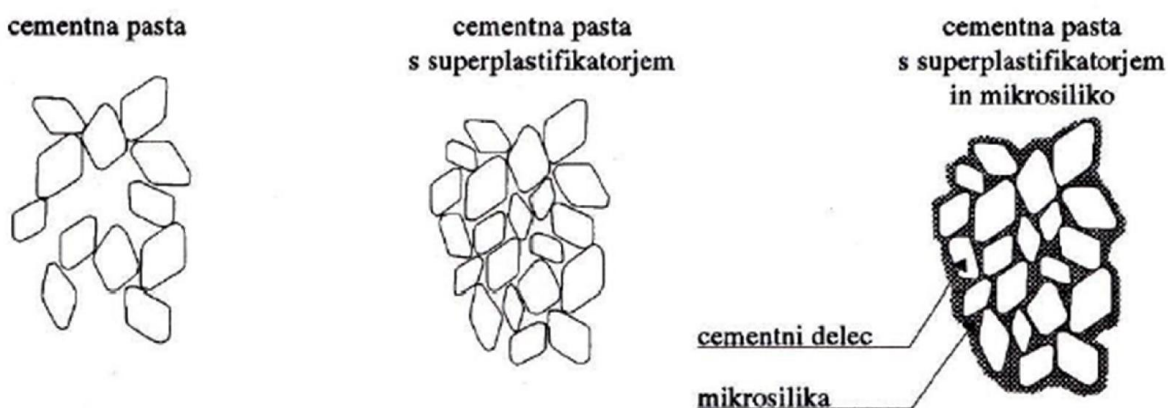
Pri betonih visokih trdnosti običajno uporabljamo mikrosiliko in/ali elektrofiltrski pepel.

### **2.2.4.1 Mikrosilika**

Mikrosilika je fino zrnat amorfen  $\text{SiO}_2$ , ki nastane v metalurgiji pri proizvodnji ferosilicija. Zrna mikrosilike so okoli 50-krat manjša od zrn cementa. Z dodajanjem mikrosilike v betonsko mešanico se potreba po vodi poveča, zato se vedno uporablja v kombinaciji s superplastifikatorji.

Ob strjevanju betona deluje na dva načina (Zajc, 2007, 6):

- s fizikalnim načinom zgoščevanja strukture betona, v katerem se v sveži betonski mešanici zrnca mikrosilike razporejajo v prazna mesta med zrnca cementa in kasneje med delci ob strjevanju nastajajoče tranzitne cone (območje med zrni agregata in bolj oddaljeno gostejšo cementno pasto). Iz teh tranzitnih mest zrnca mikrosilike izrinjajo vodo in tako fizično zgostijo strukturo betona;
- s pucolansko reakcijo, pri kateri mikrosilika zaradi svoje reaktivnosti hitro reagira s  $\text{Ca(OH)}_2$  v CSH-fazo in ti hidratacijski produkti zapolnjujejo prazna mesta v strukturi hidratizirane cementne paste. Ta učinek najbolj utrdi tranzitno cono, ki je sicer najšibkejši del betona.



Slika 2: Zgostitev strukture cementne paste s superplastifikatorjem in z mikrosilikom (Saje D, 1997)

### 2.2.5 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki so se v tehnologiji betona pojavili okoli leta 1945. Omogočajo projektiranje in izdelavo betonov z želenimi lastnostmi v svežem in strjenem stanju. Dodajajo se v promilih ali odstotkih na maso cementa. Poznamo več vrst kemijskih dodatkov: aerante, pospeševalce, plastifikatorje, superplastifikatorje, zavlačevalce, pigmente, gostilce, dodatke za betoniranje pri nizkih temperaturah ... Velikokrat se med seboj kombinirajo, vendar morajo biti kompatibilni (Zajc, 2007, 1).

### **2.2.5.1 Superplastifikatorji**

Superplastifikatorji zmanjšajo potrebno količino vode za pripravo betona z določeno vgradljivostjo tudi do 30 % brez stranskih učinkov, s čimer privarčujemo pri porabi cementa (enako  $v/c$ -razmerje). To znižanje količine cementa v betonski mešanici privede do znižanja toplote hidratacije. Superplastifikatorji izboljšajo obdelovalnost betona in delujejo kot zavlačevalci. Zaradi manjše vsebnosti vode v betonu s superplastifikatorjem se posredno izboljšajo tudi druge lastnosti betona, kot sta trdnost in trajnost (Zajc, 2007, 3).

Običajni superplastifikatorji, ki so naftalenskega tipa, zmanjšajo površinsko napetost vode in s tem notranje trenje med molekulami vode in zrni cementa. Sestavljeni so iz organskih polimernih molekul, ki imajo en konec izredno hidrofoben, drugi pa hidrofilen. Hidrofobni del se usmeri proti cementu, hidrofilni pa proti vodi. Na ta način superplastifikator dá cementnemu delcu negativni naboj, zato se po principu elektrostatskega odboja ti delci med seboj odbijajo. To pa pomeni večjo razpršenost cementnih zrn v betonski mešanici (Saje, 2001).

### 3 VLAKNASTI BETON

Mikroarmirani beton je zmes cementa, agregata, vode, mineralnih in kemijskih dodatkov ter nekontinuirnih in nepovezanih vlaken.

Vlaknasti betoni imajo za okoli 10 % večjo potrebo po cementu, saj z vlakni v svežo betonsko mešanico vnesemo veliko površino, ki mora biti ovita s cementno pasto. Pri izbiri agregata moramo paziti na velikost maksimalnega zrna (8 ali največ 16 mm). Vzrok za to je dejstvo, da večja agregatna zrna povzročajo neenakomerno porazdelitev vlaken. Običajno dodajamo mineralne in kemijske dodatke, ki izboljšajo lastnosti matrice in njeno sprejemljivost z vlakni.

Izbira vlaken za mikroarmiranje je odvisna od želenih lastnosti kompozita v strjenem stanju. Tu je zelo pomemben faktor oblike, ki je razmerje med dolžino in premerom vlaken. Ta vpliva še na pripravo, vgrajevanje in na reološke lastnosti. Manjši kot je faktor, tem lažje se jeklena vlakna vmešajo in razporejajo v sveži betonski mešanici; če je faktor večji, pa dosežemo boljše lastnosti strjenega betona. To pomeni, da uporaba tanjših jeklenih vlaken daje boljše lastnosti kompozita (Zajc, 1994, 10).

Danes se za mikroarmiranje uporablja vlakna, obstojna v alkalni matrici, ki bistveno izboljšajo lastnosti tako nastalega kompozitnega materiala in ki imajo primerno ceno.

Uporabljajo se:

- kovinska vlakna, ki so iz jekla ali nerjavečega jekla,
- sintetična vlakna, ki so iz polipropilena, akrila, aramida, ogljika, najlona, poliestra ali polietilena,
- mineralna vlakna, ki so predvsem iz alkalno odpornega stekla,
- naravna vlakna, ki so predvsem iz celuloze.

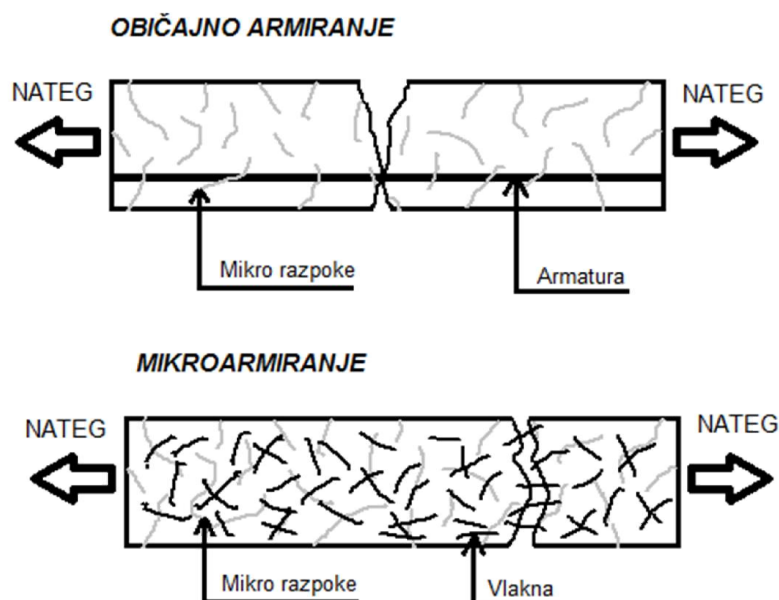
Tip vlaken, ki se jih uporabi za mikroarmiranje, bistveno vpliva na lastnosti kompozita.

*Primer:*

Če se za mikroarmiranje uporabi jeklena vlakna, ki imajo visoko trdnost in visok modul elastičnosti, je nastali kompozit zelo duktilen. Z uporabo vlaken iz alkalno odpornega stekla, ki imajo precej nižjo trdnost in so tudi precej krhka, je duktilost kompozita bistveno nižja.

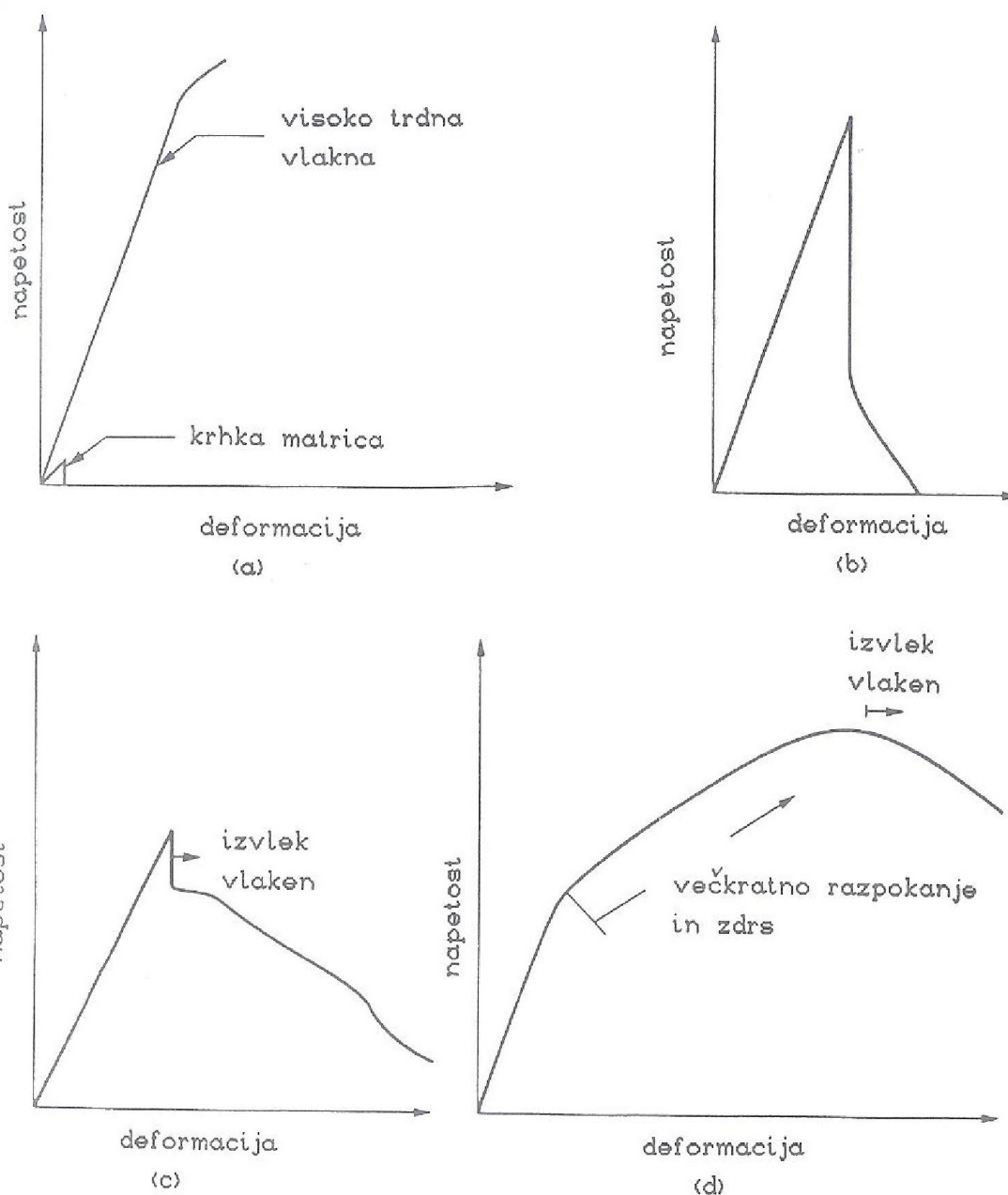
Lastnosti mikroarmiranega betona, ki je kompozitni material, temeljijo na interakciji med vlakni in krhko maltno matrico. Parametri, ki vplivajo na to interakcijo, so:

- stanje matrice, ki je lahko brez razpok ali pa je razpokana,
- sestava matrice,
- oblika (geometrija) vlaken,
- tip vlaken,
- lastnosti površine vlaken, togost vlaken v primerjavi s togostjo matrice,
- orientacija vlaken,
- volumenski delež vlaken v kompozitu,
- velikost obremenitve,
- obstojnost vlaken v kompozitu in spreminjanje lastnosti vlaken v času.



Slika 3: Shematični prikaz prenosa obremenitev preko razpok pri običajnem armiranju in mikroarmiranju

Izhodiščno stanje gradbenega elementa iz mikroarmiranega betona je neobremenjeno stanje, v katerem matrica ni razpokana in se vse napetosti, ki so prisotne v kompozitnem materialu, porazdelijo med vlakna in matrico. Zaradi razlike v togosti vlaken in matrice se ob obremenitvi razvijejo strižne napetosti vzdolž površine vlaken in preko teh se obremenitev prenese iz matrice na vlakna. V realnem stanju je matrica vedno razpokana –v tem primeru vlakna premoščajo razpoke in prenašajo obremenitve preko razpok. Tu je zelo pomembna sprijemljivost med vlakni in matrico. Ta je odvisna od sestave matrice, oblike in tipa vlaken. Sprijemljivost se meri kot sila, ki je potrebna za izvlečenje posameznega vlakna. Da bi bila ta sila čim večja, so vlakna po dolžini različno oblikovana (sidranje v matrico); včasih so razmaščena, ohrapavljena ...



Slika 4: Delovni diagrami za zelo trdno vlakno in za krhko matrico (a) ter za kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994,11)

Kompozit z zelo nizko vsebnostjo vlaken se obnaša podobno kot krhka matrica. Takoj po porušitvi se poruši tudi kompozit. Kompozit s srednjo vsebnostjo vlaken se obnaša drugače. Po porušitvi matrice se kompozitu sicer nekoliko zniža nosilnost, vendar še vedno nosi obremenitev, ki se prenaša preko razpok po vlaknih. Pri povečanju napetosti prihaja do izpultitve posameznih vlaken, kar povzroči zmanjšanje nosilnosti kompozita.



Pri kompozitu z visoko vsebnostjo vlaken prevzamejo vlakna po zlomu matrice naraščanje obremenitve, in ker je teh dovolj, kompozit izkazuje večjo nosilnost, kot je obremenitev v trenutku zloma matrice. Naklon krivulje napetost-deformacija se po porušitvi matrice spremeni zaradi izpada matrice same, strmina naklona pa je odvisna od količine vlaken in njihove povezanosti z matrico. Ko obremenitev še narašča, prihaja do tvorbe novih razpok vzdolž dolžine vzorca. Pri dovolj velikih napetostih se pojavijo izpultitve posameznih vlaken in tedaj krivulja napetosti doseže svoj maksimum. Pri še višjih napetostih začne nosilnost kompozita padati (Zajc, 1994, 11).

### **3.1 LASTNOSTI STRJENEGA KOMPOZITA**

Vlakna spremenijo mehanske lastnosti betona – in to v odvisnosti od tipa in količine uporabljenih vlaken. Med vsemi sta najbolj pomembni žilavost in duktilnost.

#### ***Žilavost***

Obseg sposobnosti absorpcije energije do neke stopnje deformacije ali do porušitve je žilavost tega kompozita. Z vlakni povečamo sposobnost matrice, da absorbira več energije.

#### ***Udarna trdnost***

Udarna trdnost betona, mikroarmiranega z jeklenimi vlakni, je med 5- in 10-krat večja, kot je ta pri identičnem betonu brez vlaken.

#### ***Trdnost***

Trdnosti se povečajo le, če so za mikroarmiranje uporabljene precejšnje količine visokotrdnih vlaken. Pri uporabi jeklenih vlaken se tlačne trdnosti v najboljšem primeru povečajo za manj kot 25 % in upogibne oziroma natezne do največ 200 %.

#### ***Odpornost na utrujanje***

Mikroarmiranje z jeklenimi vlakni znatno povečuje odpornost betonskih elementov proti utrujanju in s tem podaljšuje njihovo življenjsko dobo.

#### ***Odpornost na obrus in abrazijo***

Betoni, mikroarmirani z jeklenimi vlakni, so zelo odporni na obrus in abrazijo. Odpornost je odvisna od volumenskega deleža vlaken v betonu.

### ***Korozija jeklenih vlaken***

Do korozije jeklenih vlaken pride po dolgi izpostavljenosti v agresivnem okolju, in sicer samo v zelo tenki plasti na površini vzorcev. To pomeni, da beton zelo dobro zaščiti jeklena vlakna pred korozijo.

## **3.2 UPORABA VLAKNASTIH BETONOV**

Vlaknasti betoni se uporabljajo za talne plošče, cevi, fasadne plošče, brizgane betone in za konstrukcije, za katere je zahtevana velika žilavost in odpornost na obrus (Bandelj s sodelavci, 2008, 253). Zaradi njihovih tehničnih značilnosti in mehansko-fizikalnih lastnosti omogočajo uporabo betona tudi pri ekstremnih zahtevah kakovosti konstrukcij ali posameznih elementov. Ravno zaradi svojih dobrih lastnosti je mikroarmirani beton ekonomsko upravičen in zelo uporaben (Dobnikar, Leskovar, Korla; 1994, 27).

Pogosto se uporabljajo za izvedbo ali sanacijo tlakov, ki so podvrženi obrabnim, temperaturnim in drugim obremenitvam. To so na primer cestišča, letališke steze, postajališča, bencinski servisi, voziščne plošče mostov in predorov, industrijski tlaki ... Pri izvedbi tlakov se z dodajanjem mikroarmature izloči potreba po klasičnem armiranju, kar predstavlja časovni prihranek. Zaradi povečane natezne in upogibne trdnosti betona lahko zmanjšamo debeline tlakov. Enakomerna razporeditev jeklenih vlaken po celotni betonski vezni matrici zagotavlja enakomerno razporeditev napetosti v betonu in s tem bistveno zmanjšuje možnost nastanka razpok zaradi krčenja betona. To zmanjšanje krčenja omogoča večjo medsebojno oddaljenost dilatacijskih reg (Dobnikar, Leskovar, Korla; 1994, 28). Z vlakni povečamo zgoraj opisane lastnosti (lastnosti strjenega kompozita, glej poglavje 3.1), s čimer zmanjšamo vzdrževalne stroške na objektu.

Mikroarmirani beton se uporablja pri gradnjah predorov, in sicer kot mikroarmirani brizgani beton. Ta je skoraj v celoti zamenjal klasično izvedbo zaščite izkopa z brizganim betonom, armiranim z jeklenimi mrežami. Pri klasični izvedbi so se armaturne mreže postavljale na določeni oddaljenosti od površine izkopa, ki se jih je prekrilo z betonom. Mikroarmirani brizgani beton omogoča manjšo porabo brizganega betona, saj niso več potrebne mreže in tako lahko boljše sledimo konfiguraciji površine izkopa. Z njim zagotovimo varnejše delovne pogoje in hitrejše napredovanje del (Ukrainczyk, 1994, 15).

Mikroarmirani brizgani beton uporabljamo tudi za izvedbo vodotesnih oblog akumulacijskih bazenov. Beton brizgamo neposredno na skalnato brežino brez geometrijske izravnave v minimalnih debelinah in brez armaturnih mrež. Taka obloga se lepo vklaplja v okolje in opravlja svojo funkcijo (Leskovar, Komel; 1994, 22).

Iz mikroarmiranega betona izdelujemo še jamske panele, prednapete železniške pragove, erozijsko obremenjene cevovode ...

Vlaknasti beton s polipropilenskimi vlakni omogoča zelo visoko stopnjo požarne odpornosti nosilnih armiranobetonskih konstrukcij. Pri povišani temperaturi se polimerna vlakna stalijo. Tako se ob površini ustvari paroprepustna porozna struktura betona, ki omogoča izhod vodne pare oziroma preprečuje pojav visokih parnih tlakov ob površini betonskih elementov. S tem preprečimo odpad krovnege sloja.

## 4 KRČENJE BETONA

Krčenje betona predstavlja zmanjšanje prostornine betona, ne da bi pri tem nanj delovale zunanje sile. Poznamo več vrst krčenj, pri katerih – z izjemo krčenja zaradi karbonatizacije– pride do krčenja betona zaradi izgube vode. Ta se lahko izloča iz betona v okolico ali pa se porabi pri hidrataciji cementa. Krčenje betona je posledica krčenja cementne paste oziroma cementnega kamna (Šahinagić , Markovski, Čerček, 2012).

Na velikost in časovni potek krčenja vplivajo:

- vlažnost in temperatura okolice,
- zrnavost in mineraloška sestava agregata,
- vodocementno razmerje,
- vrsta in količina cementa,
- oblika in dimenzije elementa,
- način vgradnje in nega betona.

Betoni visoke trdnosti vsebujejo veliko količino cementa, kar vodi k večjemu krčenju betona. Po drugi strani pa imajo nizko vodocementno razmerje, kar pomeni nižjo stopnjo hidratacije, manjši delež prostornine hidratizirane paste in s tem zmanjšanje krčenja.

### 4.1 Krčenje vlaknastega betona

Na velikost krčenja vlaknastega betona poleg zgoraj naštetih faktorjev vplivata še vsebnost in vrsta vlaken. Mikroarmatura predstavlja oviro krčenju okolnega betona. Pri krčenju betona se v vlaknih pojavijo tlačne, v okolnem betonu pa natezne napetosti. Te napetosti so v primeru dobre sprijemnosti v ravnotežju. V primeru večje natezne napetosti, kot jo je beton sposoben prenesti, nastanejo razpoke. V vlaknih, ki prečkajo táko razpoko, prihaja do nateznih napetosti, ki zmanjšujejo širino razpok. Tako zmanjšamo celotno krčenje betona (Bandelj s sodelavci, 2008, 255).

Celotno krčenje betona je sestavljeno iz več vrst krčenj, ki so opisana v nadaljevanju.

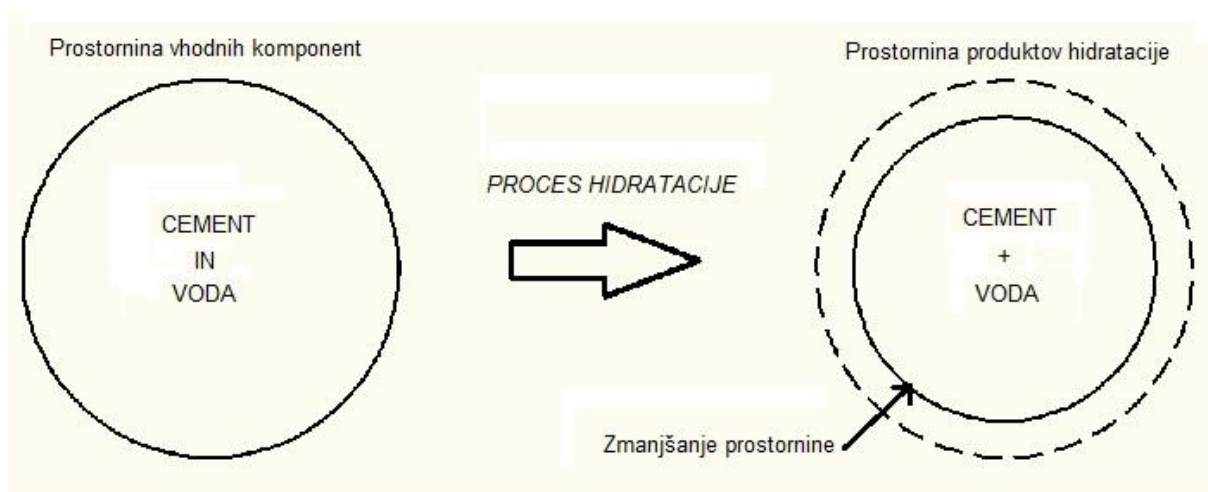
## 4.2 Plastično krčenje

Plastično krčenje je posledica izhlapevanja vode s površine svežega betona in prehajanja vode v opaž, v podlago oziroma v spodnji suhi element. Pojavi se zelo hitro, ko je beton še svež ali v plastičnem stanju. Navedeno običajno ni pomembno za konstrukcije, saj se dogaja v okviru nestrjenega betona. Med izhlapevanjem vode s površine svežega betona prihaja do krčenja površinskega sloja, ki je ovirano z notranjim delovanjem betona, ki se ne krči. Tako se v površinski plasti pojavijo natezne napetosti, ki so lahko večje od natezne trdnosti svežega betona, kar povzroči plitve in široke plastične razpoke.

Na izhlapevanje vode najbolj vplivajo hitrost vetra, relativna vlažnost ter temperatura okolice in betona. Krčenje preprečimo z zunanjim vlaženjem betona, s prekrivanjem z neprepustnimi folijami, z betoniranjem pri primerni temperaturi in s postavitvijo vetrnih zapor ...

## 4.3 Kemično krčenje

Kemično krčenje je posledica kemičnega vezanja vode v procesu hidratacije. Prostornina produktov hidratacije je manjša od prostornine vhodnih komponent, cementa in vode. Razlog je večja gostota kemično vezane vode v primerjavi s prosto vodo mešanice pred začetkom vezanja (Saje, 2001, 10). Pri kemičnem krčenju cementne paste nastajajo nove prazne pore, ki pomembno vplivajo na avtogeno krčenje.

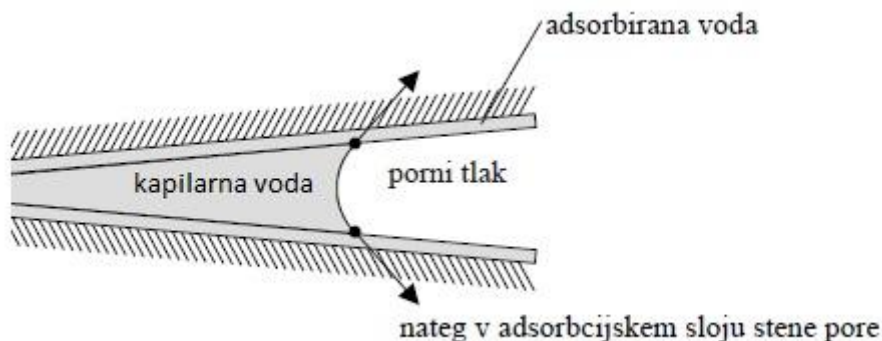


Slika 5: Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja

#### 4.4 Avtogeno krčenje

Avtogeno krčenje betona, ki ga nekateri imenujejo tudi hidratacijsko krčenje, je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna – to je poraba vode pri procesu hidratacije cementa. Vemo, da se z zmanjševanjem vodocementnega razmerja velikost avtogenega krčenja povečuje. Prav tako se avtogeno krčenje povečuje tudi s povečanjem vsebnosti mikrosilike, kar je verjetno posledica finejše mikrostrukture hidratizirane cementne paste. Táko krčenje poteka v notranjosti betona, kjer je popolnoma neodvisno od okolja. Avtogeno krčenje merimo na vzorcih, ki so zatesnjeni z neprepustno folijo ali s površinskim premazom. Tako simuliramo pogoje krčenja betona v notranjosti debelih betonskih elementov oziroma zelo masivnih konstrukcij, kot so dolinske pregrade, kjer praktično ni izmenjave vlage med betonom in okolico.

Pri določeni stopnji procesa strjevanja prične nosilna mikrostruktura cementne paste preprečevati, da bi se krčila enako kot v primeru prostega kemičnega krčenja. To oviranje krčenja povzroči dodatne prazne pore in povečanje prostornine zaprtih por, ki so posledica kemičnega krčenja cementne paste. Vse to prispeva k povečanju skupne prostornine por v strjujoči se cementni pasti. Po Boylovem zakonu je povečanje prostornine zaprtih por povezano z zmanjševanjem tlaka zraka v porah. Zmanjševanja tlaka posredno vpliva na relativno vlažnost v porah. Ob vzpostavljanju termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste najprej izhaja prosta kapilarna voda, nato pa voda iz adsorpcijske ploskve stene pore. Tanjšanje adsorpcijske plasti vode na stenah por povzroča natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi. Te 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.



Slika 6: Shematični prikaz kapilarne pore (Saje D. s sodelavci, 2008)

#### **4.5 Temperaturno krčenje**

Temperaturno krčenje betona se pojavi zaradi povišanja temperature betona med kemijsko reakcijo cementa in vode (proces hidratacije cementa).

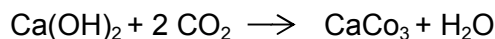
Velikost deformiranja betona zaradi spremembe temperature betona je odvisna od koeficienta temperaturnega raztezka. Sveži beton ima zaradi večje vsebnosti vode večji koeficient kot otrdeli beton. V svežem betonu hkrati poteka temperaturno krčenje in avtogeno krčenje, zato je določitev koeficienta temperaturnega raztezka težja. Privzamemo lahko vrednost koeficienta temperaturnega raztezka otrdelega betona  $\alpha_T = 10^{-5}/^\circ\text{C}$  (Saje, 2001, 19).

#### **4.6 Krčenje zaradi sušenja**

Krčenje betona zaradi sušenja je definirano z zmanjšanjem prostornine betona zaradi izhlapevanja vode v okolico. Proces se začne na površini betona in se nadaljuje v notranjost. Ko prosta voda izhlapeva iz kapilar, se tvorijo napetosti, te pa povzročajo zmanjšanje prostornine elementa in s tem krčenje betona zaradi sušenja. To krčenje je pri betonih visoke trdnosti manjše kot pri običajnih betonih – to pa zaradi nizkega vodocementnega razmerja, pri katerem se skoraj vsa voda porabi pri hidrataciji cementa. Z dodajanjem mikrosilike znatno zmanjšamo poroznost hidratizirane cementne paste, posebno v stičnem območju med cementno pasto in agregatom. Dobimo manj prepusten beton, iz katerega nevezana voda težko pride na površje, s tem pa se krčenje betona zaradi sušenja zmanjšuje.

#### 4.7 Krčenje zaradi karbonatizacije

Krčenje zaradi karbonatizacije je edino krčenje, ki ni posledica porabe vode v betonu. Pri procesu karbonatizacije se tvorijo karbonati znotraj cementnega kamna in ob njegovem stiku z agregatom. Ogljikov dioksid iz zraka reagira s kalcijevim hidroksidom iz betona.



Tvorita se kalcijev karbonat in voda. S tem se znižuje alkalnost betona in zaradi tega tudi zaščita armature pred korozijo. Pojav spremlja nastanek razpok. Pojav je bolj prisoten pri betonih z visokim vodocementnim količnikom, nizko količino cementa, s kratkotrajno nego betona, z nizko trdnostjo, visoko poroznostjo in vodoprepustnostjo cementnega kamna. Pri betonih visokih trdnosti je globina karbonatizacije razmeroma majhna (Žarnić, 2005, 129).



## 5 NEGA BETONA

Pri betonih visokih trdnosti v vezivo poleg običajnega cementa dodajamo razne dodatke, da dobimo trajnejši in vzdržljivejši beton. V ta namen znižujemo vodovezivno razmerje. Betoni z nizkim vodovezivnim razmerjem so izpostavljeni precejšnjim silam zaradi premikov vode iz finih praznin in slojev vode ob stenah praznin za potrebe hidratacije veziva z dodatki. Prihaja do velikih sil lepenja ob stenah praznin, ki povzročajo znatne deformacije betonskega elementa s še razmeroma nizko togostjo in pogosto njegove poškodbe. Da bi v čim večji meri preprečili nastanek tovrstnih razpok, je potrebno zmanjšati avtogeno krčenje. To zagotovimo, tako da cementu z dodatki čim daljši čas zagotavljamo dovolj vode v procesu hidratacije, da bi dosegel vezivno funkcijo. Nehidratizirani delci veziva delujejo kot polnilo, ki z vidika trajnosti in vzdržljivosti ni izkoriščeno v polni meri (Saje D. s sodelavci, 2008).

Za zagotavljanje zadostne količine vode v procesu hidratacije moramo betonski element ustrezno negovati. Ločimo zunanjo in notranjo nego betona.

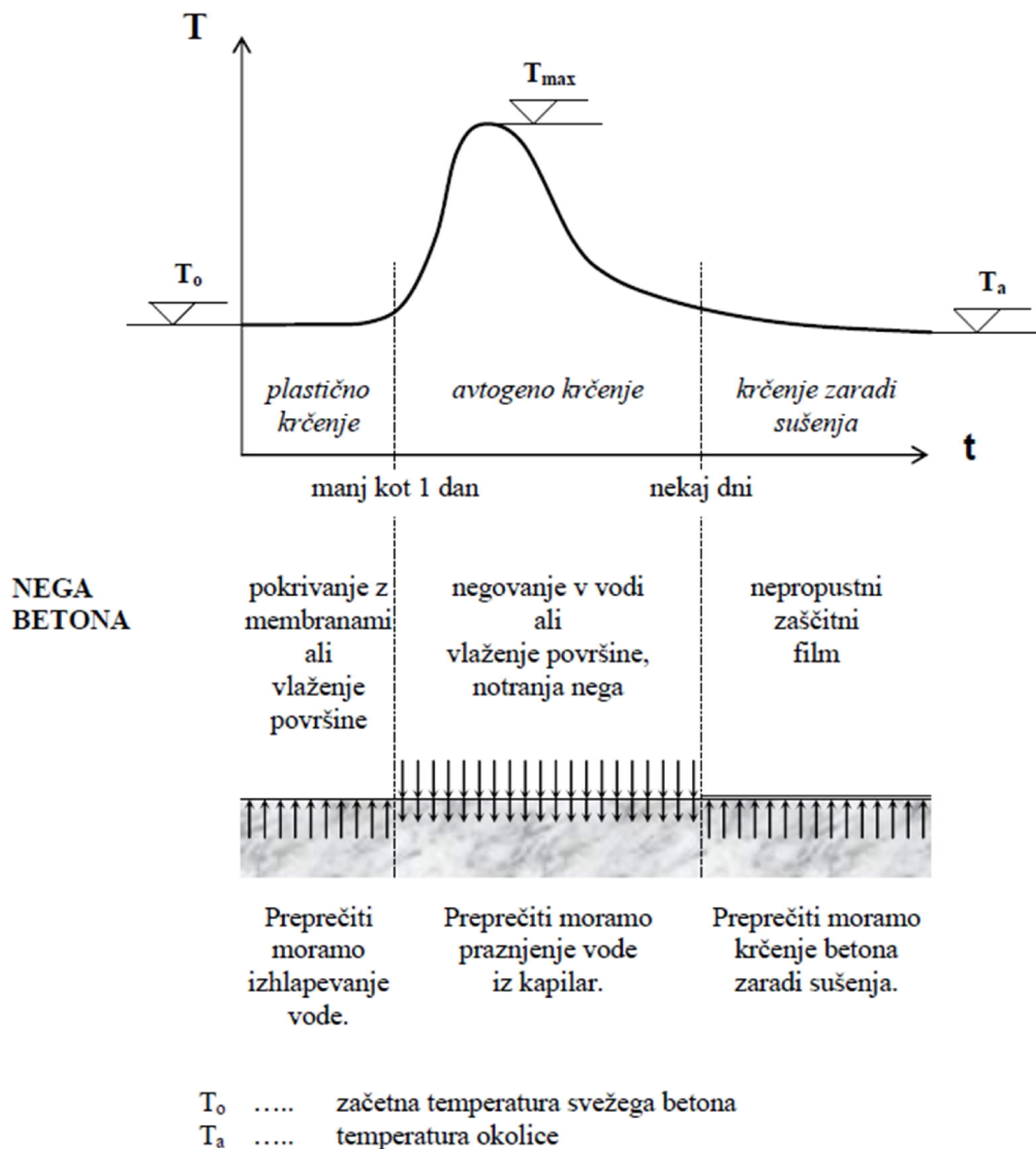
Zunanjo nego predstavlja vlaženje površine betona in preprečevanje izhajanje vode iz betona preko površine betonskega elementa. To lahko izvedemo:

- s prekritjem betonskega elementa z membranami,
- z vlaženjem površine betonskega elementa,
- z nanosom zaščitnega filma.

Pri betonih visokih trdnosti zunanja nega ni dovolj učinkovita, saj je globina prodora vode v notranjost betona omejena.

Druga oblika nege je notranja nega betona. Predstavljajo jo rezervoarji vode v betonu, ki omogočajo, da se voda iz finih kapilarnih por porablja kasneje. Tako bistveno zmanjšamo avtogeno deformacijo in ugodno vplivamo na trajnost betona. Poznamo več notranjih rezervoarjev, in sicer:

- lahki agregat,
- polipropilenska vlakna,
- nasičeni normalni agregat,
- lesena vlakna,
- reciklirani agregat.



Slika 7: Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa (Saje D. s sodelavci, 2008)

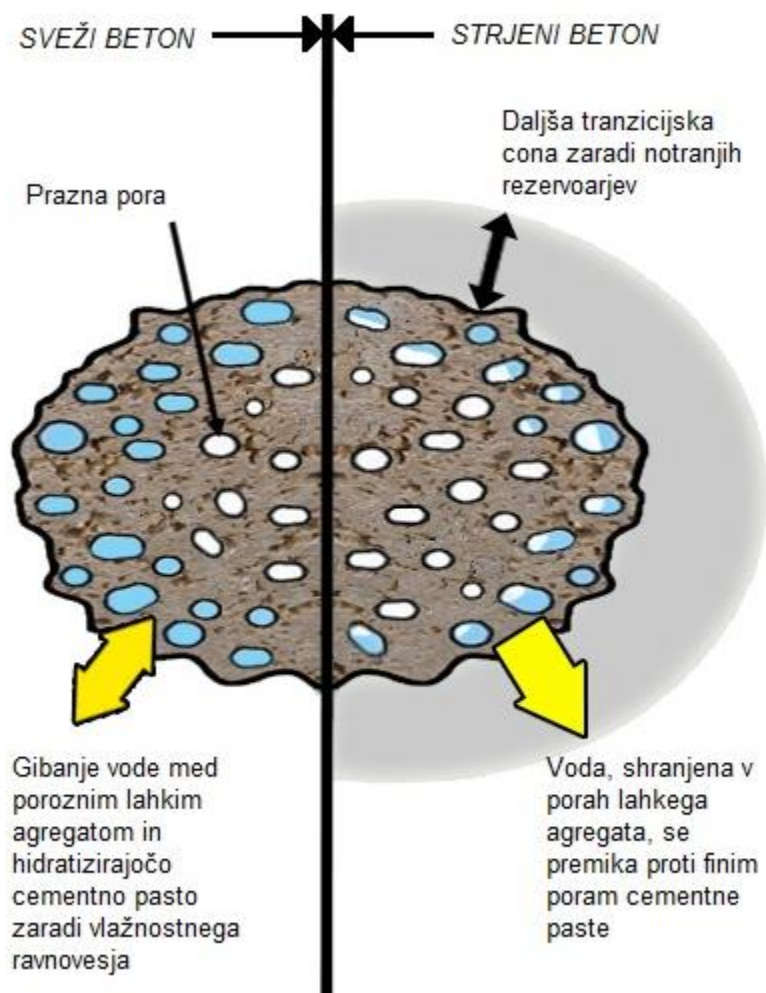
### 5.1 Lahki agregat (LWA– lightweight aggregate)

Lahki agregat uporabljamo za notranjo nego betona, saj s svojo strukturo nudi prostor za skladiščenje vode. Slaba stran lahkega agregata je nizka trdnost, ki pa zaradi izboljšane strukture cementnega kamna običajno ni moteča. Lahki agregat ima absorpcijo vode med 5 in 25 % v časovnem obdobju 24 ur.

Paziti moramo, da so notranji rezervoarji vode enakomerno razporejeni po betonu. S tem zagotovimo boljšo preskrbo vode pri hidrataciji veziva.

Zato se v primeru uporabe predhodno namočenega lahkega agregata v betonu raje zamenja del drobnega kot del večjih zrn agregata. Drobna zrna imajo večjo absorpcijo vode glede na svojo maso. Manjša zrna lahkega agregata manj vplivajo na tlačno trdnost betona. S tako frakcijo dosežemo celovito notranjo nego betonske mešanice (Legat, 2012).

Pri lahkem agregatu je zaradi notranjih rezervoarjev transport vode daljši kot pri običajnem agregatu. Na običajnem agregatu se na površini izpostavi vodni zid, ki se hitro porabi in ne omogoča daljše transportne cone (glej sliko 8).



Slika 8: Vpliv lahkega agregat pri procesu notranje nege v stičnem območju

Med hidratacijo se v cementni pasti formira sistem por, ki so manjše od por v lahkem agregatu. Ko se vlažnost zaradi hidratacije in sušenja zmanjša, nastane vlažnostni gradient. Ker se v cementni pasti lahki agregat obnaša kot vodni rezervoar, cementne pore absorbirajo vodo iz lahkega agregata s pomočjo kapilarnega srka. Tako ima nehidratizirani cement na voljo prosto vodo za hidratacijo. Hidratacijski produkti zaraščajo pore, ki postajajo vse ožje. Zaradi zmanjšanja radija kapilar se poveča kapilarni vlek, kar povzroči, da cementne pore ponovno absorbirajo vodo iz lahkega agregata. Na površini se pojavi dodatni vlažnostni gradient zaradi površinskega izhlapevanja. Ta je večji, kar pomeni, da se voda iz lahkega agregata blizu površine porablja hitreje. Tako dobimo kompaktnjši sloj betona, ki zavira izhlapevanje vode v okolico, s čimer obdržimo večjo količino vode v notranjosti betona. To pripomore k zmanjšanju ali izničenju napetosti zaradi sušenja ter s tem manj površinskih in mikro razpok (Weber, Reinhardt; 1997, 68).

## 6 EKSPERTIMENTALNI DEL

V okviru diplomske naloge smo raziskovali vpliv notranjih rezervoarjev vode in vsebnosti jeklenih vlaken na krčenje betonov visoke trdnosti. Dobljene vrednosti smo primerjali z rezultati iz diplomskih nalog (Males 2013, Liseč 2013). Preverili smo tudi vpliv lahkega agregata na tlačno trdnost betona visoke trdnosti.

Zamešali smo tri mešanice visokovrednega betona. Vsem trem smo dodali jeklena vlakna. Dve mešanici smo notranje negovali, in sicer tako, da smo del običajnega agregata zamenjali z lehnjakom. V prvo mešanico smo dodali lahki agregat frakcije 0–2 mm, v drugo pa 2–4 mm. Vsem mešanicom smo izmerili tlačno trdnost strjenega betona pri različnih starosti. Merili smo tudi avtogeno in celotno krčenje betonov. Na koncu smo izračunali še prispevek krčenja zaradi sušenja.

### 6.1 UPORABLJENI MATERIALI

#### 6.1.1 Agregat

Betonsko mešanico smo izdelali iz treh vrst agregata, pridobljenega v Sloveniji. Prvi agregat je mivka Termit iz Moravč (frakcije 0,09/0,4), drugi je drobljeni apnenec iz separacije Kresnice (frakcije 0/2, 2/4, 4/8 in 8/16), tretji pa lahki agregat iz kamnoloma Jezersko (frakcije 0/2, 2/4). Več podrobnosti v spodnjih preglednicah.

*Preglednica 2: Značilnosti mivke Termit iz Moravč (IGMAT, 1997)*

<b>Material</b>	mivka
<b>Nahajališče</b>	Moravče
<b>Opis</b>	Mivka je značilne rjavkasto-sive barve s posameznimi temnejšimi zrnici. Mineraloško pregledan vzorec pod mikroskopom kaže kremenovo sestavo (> 99 %). Oblika zrn je večinoma zaobljena do zaobljeno/ostroroba, v podrejeni količini pa nastopajo samo ostroroba zrna. Primerjava osi a, b in c (ocenjena dimenzija pod mikroskopom glede na relief) v zrnih kaže, da imajo zrna visok volumenski 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 0,40 mm.

Preglednica 3: Značilnosti lahkega agregata (Marmor Hotavlje)

<b>Material</b>	lahek agregat
<b>Nahajališče</b>	Jezersko
<b>Opis</b>	Lehnjak ali lahek kamen je močno porozna in luknjičava karbonatna kamnina, ki nastaja ob vodi. Njegov nastanek sega v kvartar. Barva kamnine je svetlo rumeno-rjava in ima lepo ohranjeno strukturo okamenelih organskih delcev, ki jo primesi železovih spojin obarvajo rjavkasto. Poroznost je neenakomerna in znaša 10–15 %. Glavni mineral je kalcit (približno 96–98 %), v sledovih se nahajata tudi dolomit in limonit.

Preglednica 4: Značilnosti agregata iz separacije Kresnice (IGMAT, 1997)

<b>Material</b>	apnenec		
<b>Nahajališče</b>	kamnolom Ušenišče		
<b>Mineraloško-petrografska analiza</b>	makroskopski opis	Vzorec je svetlo siv apnenec. Kamnina je trdna in gosta. Razpoke v obliki stilolitnih šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom– glineni materiali. Del razpok je zapolnjen s prekrizaliziranim kalcitom.	
	mikroskopski opis	Osnova kamnine je mikrit, v katerem opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom– glineni materiali. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekriztaljen v mikrosparit ali sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.	
<b>Tlačna trdnost kamnine</b>	v suhem stanju	min	151 MPa
		srednja	178 MPa
		max	211 MPa
	v mokrem stanju	min	139 MPa
		srednja	174 MPa
		max	210 MPa

### 6.1.2 Cement

Uporabili smo cement iz cementarne v Anhovem, in sicer čisti portlandski cement CEM I 52,5 R. Oznaka R (rapid) pove, da gre za cement, ki veže pospešeno. Tako v zgodnji fazi dosežemo visoko tlačno trdnost (hitrejše razopaženje ...). Več podatkov se nahaja v spodnji preglednici.

*Preglednica 5: Kemijska sestava, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementa CEM I 52,5 R (Salonit Anhovo, 1997)*

<b>KEMIJSKA SESTAVA CEMENTA</b>		
A) Hidravlično vezivo	SiO <sub>2</sub>	20,22 %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,10 %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,17 %
	CaO	63,92 %
B) Primesi	netopni ostanek v HCl	0,22 %
	žaroizguba	0,82 %
	prosti Cao	0,76 %
	MgO	2,15 %
	SO <sub>3</sub>	2,81 %
<b>FIZIKALNO-KEMIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CEMENTA</b>		
finost mletja	ostanek na situ odprtine 90 µm	0,90 %
	specifična površina	4400cm <sup>2</sup> /g
vezanje	poraba vode za standardno konsistenco	28,30 %
	pričetek	155 min
	konec	220 min
prostorninska obstojnost	(metoda s kolačem)	obstojen
upogibna trdnost	pri starosti 2 dni	5,5 MPa
	pri starosti 28 dni	7,5 MPa
tlačna trdnost	pri starosti 2 dni	32,6 MPa
	pri starosti 28 dni	53,2 MPa

### **6.1.3 Dodatki**

Betonski mešanici smo za doseganje višjih trdnosti dodali mineralni dodatek mikrosiliko in superplastifikator za boljšo vgradljivost. Z mikrosiliko smo nadomestili del cementa.

Betonu smo dodali Cementol Antikorodin (TKK Srpenica), ki je praškasti superplastifikator z dodatkom mikrosilike. Tako smo znatno povečali odpornost betona proti učinkom različnih kemikalij (zaščitimo skozi vso maso), mehansko trdnost, vodoneprepustnost in zmanjšali kapilarno vpojnost.

### **6.1.4 Voda**

Uporabili smo vodo iz vodovodnega sistema Ljubljana.

### **6.1.5 Vlakna**

Uporabili smo jeklena vlakna IRI 50/30 proizvajalca IRMA iz Ljubljane. So dolžine 30 mm, premera 0,5 mm, ravna in na obeh koncih zakrivljena zaradi boljšega sidranja v cementno matrico. V vse tri betonske mešanice smo jih dodali v 0,5-odstotnem prostorninskem deležu mešanice.



## 6.2 PRIPRAVA IN SESTAVA BETONSKIH MEŠANIC

Vse tri betonske mešanice smo pripravili, negovali in preizkušali v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Pri vseh smo uporabili enako vrsto in količino cementa, dodatkov, jeklenih vlaken in vode. Prva mešanica z oznako HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R je beton visoke trdnosti z dodatkom jeklenih vlaken. Druga mešanica z oznako HSC-JV-1600-LWA-12 %(0/2) CEM I 52,5 R je prav tako mikroarmirani beton visoke trdnosti z dodatkom 12-odstotnega prostorninskega deleža mešanice lahkega agregata frakcije od 0 do 2 mm. Tretja mešanica z oznako HSC-JV-1600-LWA-12 %(2/4) CEM I 52,5 R je enako mikroarmiran in z enakim prostorninskim deležem notranje negovan kot drugi beton. Razlika je le v uporabljeni frakciji lahkega agregata in sicer v tem betonu je lahki agregat frakcije od 2 do 4 mm. Pri drugi in tretji mešanici smo glede na frakcijo notranjih rezervoarjev priredili količine posameznih frakcij ostalega agregata.

Najprej smo ves agregatni material površinsko osušili in s tem preprečili vnos dodatne vode v betonsko mešanico. Nato smo lahki agregat stehali in namočili v znano količino vode za 24 ur. Za vsako mešanico smo očistili in z opaznim oljem premazali 6 kalupov- kock in 6 kalupov - prizem. Pred zamešanjem smo pripravili točno določeno količino vseh sestavin. V vodoraven mešalec smo najprej vstavili vse frakcije agregata in jih premešali. Dodali smo še cement, Antikorodin in jeklena vlakna. Vlakna smo skrbno porazdelili po celotnem mešalcu (preprečili nastanek gnezd) in vse skupaj ponovno suho premešali. Na koncu smo med mešanjem počasi dolivali vodo v mešalec. Pri notranje negovanih mešanicah smo na koncu dodali namočeni lahki agregat, in sicer skupaj s še potrebno količino vode. Mešali smo 5 minut, da smo dobili enakomerno betonsko mešanico. Po mešanju smo izmerili temperaturo mešanice in izvedli spodaj opisane preizkuse konsistence sveže betonske mešanice. Med vsakim preizkusom smo beton ponovno premešali. Po preizkušanju smo napolnili vnaprej pripravljene kalupe in jih zgostili na vibracijski mizi. Betonske kocke in prizme smo nato pokrili s polietilensko folijo, da smo preprečili izhlapevanje vode.

Preglednica 6: Sestava betonskih mešanic

<i>Ime mešanice</i>	<b>HSC-JV-1600- CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600- LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600- LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>
<b>Uporabljeni materiali</b>			
<i>Agregat</i>			
apnenec 0/2 mm	847 kg/m <sup>3</sup>	113 kg/m <sup>3</sup>	339 kg/m <sup>3</sup>
apnenec 2/4 mm		508 kg/m <sup>3</sup>	282 kg/m <sup>3</sup>
apnenec 4/8 mm	282 kg/m <sup>3</sup>	282 kg/m <sup>3</sup>	282 kg/m <sup>3</sup>
apnenec 8/16 mm	470 kg/m <sup>3</sup>	470 kg/m <sup>3</sup>	470 kg/m <sup>3</sup>
lehnjak 0/2 mm	X	120 kg/m <sup>3</sup>	X
lehnjak 2/4 mm	X	X	120 kg/m <sup>3</sup>
mivka	283 kg/m <sup>3</sup>	283 kg/m <sup>3</sup>	283 kg/m <sup>3</sup>
<i>Cement</i>			
CEM I 52,5 R	360 kg/m <sup>3</sup>	360 kg/m <sup>3</sup>	360 kg/m <sup>3</sup>
<i>Dodatki</i>			
Cementol Antikorodin	48 kg/m <sup>3</sup>	48 kg/m <sup>3</sup>	48 kg/m <sup>3</sup>
<i>Jeklena vlakna</i>			
JV IRI30/50	39 kg/m <sup>3</sup>	39 kg/m <sup>3</sup>	39 kg/m <sup>3</sup>
<i>Količina vode</i>			
	144 kg/m <sup>3</sup>	144 kg/m <sup>3</sup>	144 kg/m <sup>3</sup>
<i>Vodovezivno razmerje</i>	0,36	0,36	0,36
<i>Odstotek por</i>	1,60 %	1,60 %	1,60 %

### 6.3 PRESKUŠANJE KONSISTENCE SVEŽE BETONSKE MEŠANICE

Glede na veljavne standarde določamo konsistenco betona na štiri načine:

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

#### 6.3.1 Metoda s posedom

Metoda s posedom je najbolj preprosta metoda za kvantitativno določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic. Za preiskavo potrebujemo konus, ki ga polnimo v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast nabijemo s standardno kovinsko palico ( $\phi 16$ , z zaobljenim vrhom dolžine 60 cm) s 25 udarci. Ta moravedno prodreti do spodnje plasti. Ko nabijemo zgornjo plast, odstranimo presežek betona in površino izravnamo z zidarsko žlico. Trideset sekund po napolnitvi počasi dvigujemo konus (5–10 s) in ga prestavimo ob betonski stožec. Standardno palico za nabijanje položimo na zgornji rob konusa, tako da seže nad betonski stožec, in izmerimo razliko višin. Razlika višin je mera za konsistenco po tej metodi. Celoten preizkus ne sme trajati več kot 150 s (Žarnić, Bosiljkov V., Bokan B. V., 2010, 60).

Preglednica 7: Razredi poseda po SIST EN 206-1

<b>Razred</b>	<b>Posed [mm]</b>
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	$\geq 220$

Preglednica 8: Rezultati poseda sveže betonske mešanice

<i>Ime mešanice</i>	<b>HSC-JV- -1600-CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>
<i>Posed [mm] in razred</i>	30 (S1)	60 (S2)	30 (S1)

### 6.3.2 Metoda z razlezom

Metoda, ki se uporablja za plastične in tekoče mešanice, se imenuje metoda z razlezom. Na razlezno mizo postavimo skrajšan kovinski konus (dimenzije so razvidne s spodnje slike) in ga napolnimo v dveh približno enakih plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci z lesenim količkom prečnega prereza 4 cm x 4 cm. Po nabijanju druge plasti odstranimo presežek betona. Počakamo trideset sekund, odstranimo konus in nato stopimo na stopalko na sprednji strani okvirja razlezne mize. Zatem 15-krat dvignemo zgornjo ploščo za 4 cm in jo spustimo. Betonska masa se razleze porazlezni mizi. Mera konsistence je povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene betonske mase vzporedno s stranicama mize (Žarnić, Bosiljkov V., Bokan B. V., 2010, 61).

Preglednica 9: Razredi razleza po SIST EN 206-1

<b>Razred</b>	<b>Razlez [mm]</b>
F1	≤340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	≥630

Preglednica 10: Rezultati razleza sveže betonske mešanice

<i>Ime mešanice</i>	<b>HSC-JV- -1600-CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>
<i>Razlez [mm] in razred</i>	280 (F1)	300 (F1)	290 (F1)

### 6.3.3 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu

Posodo napolnimo s svežim betonom. Vgradimo ga v treh slojih z vmesnim vibriranjem na mizici z minimalno frekvenco 40 Hz. Višek betona odstranimo in zgornjo površino zgladimo. Na posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtino z ventilom vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med posodo in pokrovom. Z ročno zračno črpalko vnesemo toliko zraka v prekomoro, da kazalec na manometru pokaže nič. Nekaj sekund po izravnavanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Če je porozimeter pravilno umerjen, predstavlja porozimetrijski indeks hkrati tudi delež zraka v odstotkih glede na celotno prostornino svežega betona v posodi. Za naše mešanice je bilo predvideno 1,6 % deleža por na celotno površino (Žarnić, Bosiljkov V., Bokan B. V., 2010, 66).

Preglednica 11: Delež zraka glede na celotno prostornino svežega betona

<i>Ime mešanice</i>	<b>HSC-JV- -1600-CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	<b>HSC-JV-1600-LWA- -12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>
<i>Vsebnost zraka v betonu [%]</i>	2,2	2,2	1,3

## 6.4 MEHANSKE LASTNOSTI STRJENEGA BETONA

### 6.4.1 Tlačna trdnost

Tlačno trdnost določamo na standardiziranih preizkušancih v obliki valjev ali kock. Pred enoosnim tlačnim preizkusom moramo natančno izmeriti dimenzije preizkušanca in njegovo maso. Preizkus smo izvajali s pomočjo elektromehaničnega stroja za statične tlačne preiskave kapacitete 5000 kN. Tlačno trdnost betona smo merili na betonskih kockah (15 cm x 15 cm x 15 cm), in sicer pri starosti betona 1 dan in 28 dni. Za obe starosti smo imeli po tri kocke vsake mešanice. Vzorci so bili pri starosti enega dne razkalupljeni in do preizkusa hranjeni v vodi pri sobni temperaturi. Vrednosti tlačnih trdnosti naših treh betonov smo primerjali z betonoma visoke trdnosti oznake HSC-1600-CEM I 52,5 R (vrednosti pridobljene z osebno komunikacijo s Leonom Mačkom, katerega diploma je še v nastajanju) in HSC-1600- LWA-12 %(0/2) CEM I 52,5 R (Legat, 2012). Prvi ne vsebuje jeklenih vlaken in lahkega agregata, drugi pa je »samo« notranje negovan z lehnjakom frakcije 0–2 mm. S primerjavo smo preverili vpliv jeklenih vlaken in različnih frakcij na tlačno trdnost betonov visoke trdnosti.



Slika 9: Porušena betonska kocka po enoosnem tlačnem preizkusu

Preglednica 12: Tlačne trdnosti preizkušancev pri starosti 1 in 28 dni.

Ime mešanice	Star. [dni]	Preizk.	Masa [kg]	Dim. ploskve kocke [cm x cm]	Mejna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]	Pov. tlačna trdnost [MPa]	Stand. deviacija
<b>HSC- -1600- -CEM I 52,5 R</b>	1	TT1	8,04	14,95x15	975	43,487	<b>42,94</b>	0,39
		TT2	7,98	14,65x15	937,5	42,662		
		TT3	8,20	15x15	960	42,667		
	28	TT4	8,10	15x14,8	1875	84,459	<b>82,96</b>	1,73
		TT5	8,16	15x14,9	1875	83,893		
		TT6	8,14	15x14,9	1800	80,537		
<b>HSC- -1600- -LWA- -12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	1	TT1	8,24	15x15	700	31,111	<b>35,70</b>	3,25
		TT2	8,14	15x15	860	38,222		
		TT3	8,22	15x15	850	37,778		
	28	TT4	8,19	15x15	1990	88,444	<b>89,11</b>	0,79
		TT5	8,15	15x15	2030	90,222		
		TT6	8,10	15x15	1995	88,667		
<b>HSC-JV- -1600- -CEM I 52,5 R</b>	1	TT1	8,14	15x14,8	1125	50,676	<b>52,37</b>	1,56
		TT2	8,28	15x15	1225	54,444		
		TT3	8,13	15x14,9	1162	51,991		
	28	TT4	8,18	15x14,85	1960	87,991	<b>86,21</b>	2,43
		TT5	8,14	15x14,9	1850	82,774		
		TT6	8,37	15x15,1	1990	87,859		
<b>HSC-JV- -1600- -LWA- -12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	1	TT1	8,10	15x14,8	1125	50,676	<b>49,967</b>	0,77
		TT2	8,11	15x15	1100	48,889		
		TT3	8,18	15x14,9	1125	50,336		
	28	TT4	8,08	15x14,8	1750	78,829	<b>85,95</b>	5,50
		TT5	8,25	15x14,9	1940	86,801		
		TT6	8,26	15x15	2075	92,222		
<b>HSC-JV- -1600- -LWA- -12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	1	TT1	8,08	15x15	1245	55,333	<b>53,75</b>	3,07
		TT2	8,32	15x15,3	1135	49,455		
		TT3	8,01	15x14,7	1245	56,463		
	28	TT4	8,14	15x14,9	1962	87,785	<b>90,29</b>	4,29
		TT5	8,22	15x14,95	2160	96,321		
		TT6	8,10	15x14,6	1900	86,758		

Iz preglednice 12 lahko razberemo značilno hitrost razvoja tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti. Ta je zelo visoka, kar priča o burnem procesu hidratacije. Betoni so v povprečju v prvem dnevu dosegli skoraj 60-odstotno tlačno trdnost.

Kljub vnosu šibkega lahkega agregata ne pride do občutne spremembe tlačne trdnosti. Beton z vsebnostjo lahkega agregata frakcije 2–4 mm ima pri 28. dnevu starosti največjo tlačno trdnost. Zahvala gre dovolj velikim notranjim rezervoarjem vode, ki so poskrbeli za boljšo hidratacijo veziva.

Prispevek jeklenih vlaken na tlačno trdnost betona je viden pri 1 dnevu starosti, kar znaša 18 %. Ta prirast je posledica razlike v togosti vlaken in matrice, kar povzroči prenašanje sil iz matrice na vlakna.

Opazimo veliko standardno deviacijo pri mikroarmiranih betonih. Razlog je v razporeditvi in usmeritvi vlaken. S prekomernim vibriranjem betonske mešanice lahko dosežemo, da se vlakna zaradi delovanja gravitacije postavijo v horizontalno stabilno lego. Betonske kocke vedno vstavljamo v stroj za statične tlačne preiskave s krajno opaženo stranico navzgor. Tako dobimo navpično usmeritev vlaken, ki nemore ustrezno prenašati obremenitev preko razpok.

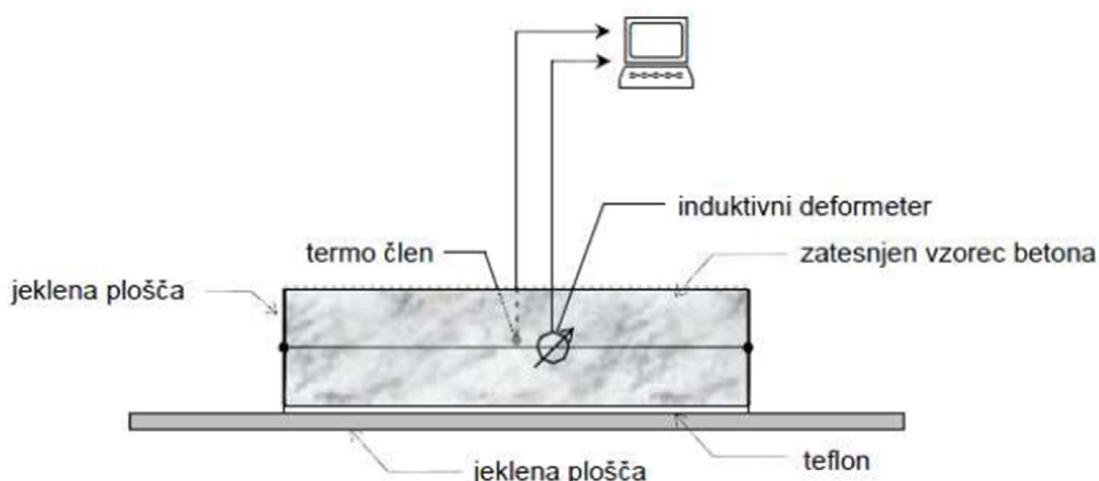


## 6.5 MERJENJE AVTOGENEGA KRČENJA IN CELOTNEGA KRČENJA BETONOV VISOKE TRDNOSTI

V okviru eksperimentalnih raziskav krčenja smo merili avtogeno in celotno krčenje betona na betonskih prizmah dimenzije 100 mm x 100 mm x 400 mm. Meritve smo izvajali v komori s konstantno vlago 70 %  $\pm$ 5% in temperaturo 22° C  $\pm$ 2° C. Avtogeno krčenje smo merili na zatesnjenih prizmah, celotno krčenje pa na izpostavljenih prizmah. Za vsako mešanico smo imeli 6 prizem (3 za avtogeno krčenje in 3 za celotno krčenje).

### 6.5.1 METODA MERJENJA AVTOGENEGA KRČENJA

Beton visoke trdnosti smo vgradili v predhodno zatesnjene jeklene kalupe dimenzij 100 mm x 100 mm x 400 mm. Najprej smo na dno jeklenega kalupa položili teflonsko ploščo debeline 1 mm, ki je minimalizirala trenje med vzorcem in podlago. V sredino prizme smo vgradili termo člen za merjenje temperature. Za neovirano krčenje in raztezanje betona smo na oba konca kalupa vstavili stiropor debeline 3 mm. V kalupe smo še namestili merske reperje za elektronsko merjenje krčenja. Te smo pritrdili na kalup in vanj vlili svežo betonsko mešanico. Nato smo beton zgostili na vibracijski mizi. Zatesnitev prizme smo izvedli s polietilensko folijo debeline 0,5 mm. Folijo smo zalepili po robovih in tako preprečili krčenje zaradi sušenja. Vzorce smo nato odnesli v sobo s konstantno vlago in temperaturo. Tam smo na merske reperje priklopili merilne urice in jih povezali z računalnikom. Posebna programska oprema je vsako minuto zajemala podatke izmerjenih skrčkov in temperature v notranjosti vzorcev.



Slika 10: Shematski prikaz elektronskega merjenja zgodnjega avtogena krčenja (Saje, 2001)

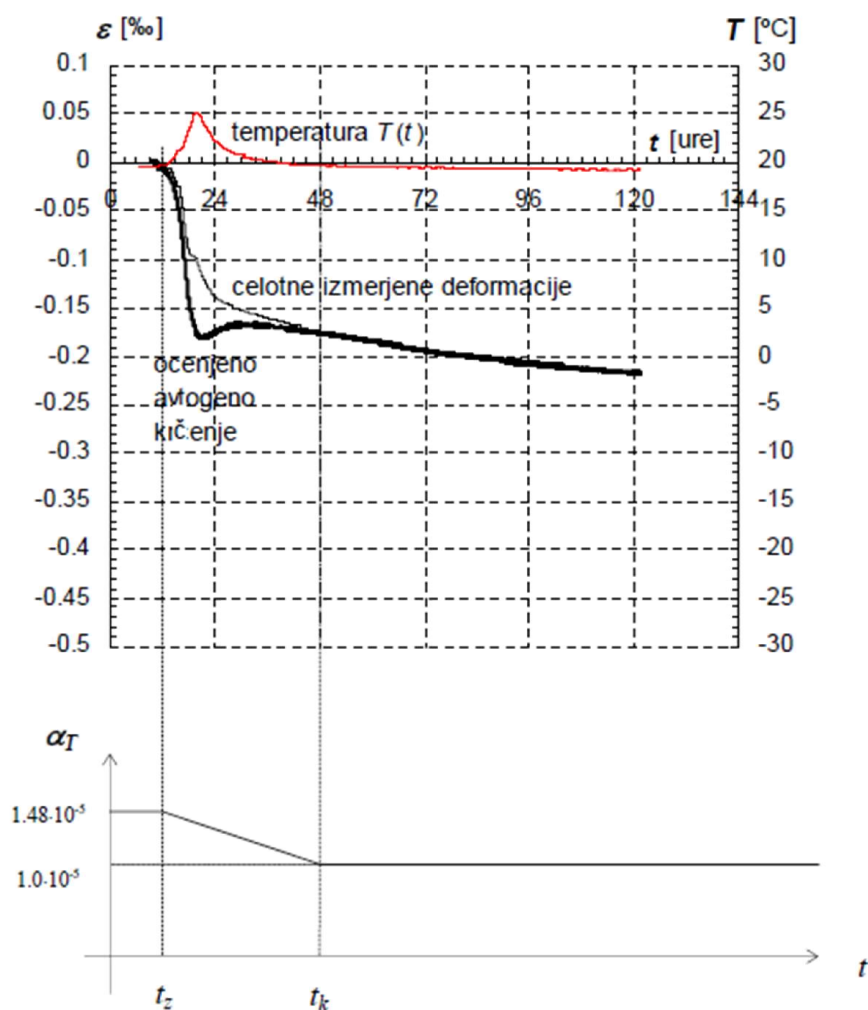


Slika 11: Elektronsko merjenje zgodnjega avtogenega krčenja betona

Po 24 urah, ko krčenje ni bilo več tako izrazito, smo prizmo razkalupili. Na dveh stranicah prizme smo na razdalji 25,4 cm naredili luknjici skozi polietilensko folijo in namestili merilne reperje. Reperje smo pritrdili s sekundnim lepilom. Spoj smo dodatno utrdili in prizmo ponovo zatesnili z dvokomponentnim lepilom za sveži beton proizvajalca Sika. Nato smo z mehanskim nasadnim deformatrom izmerili začetno vrednost razmaka med točkama. Razmake smo v začetku merili enkrat dnevno, postopoma, ko je bil prirastek deformacij manjši, pa redkeje.

### 6.5.1.1 REZULTATI IN ANALIZE MERITEV AVTOGENEGA KRČENJA

Elektronsko izmerjene deformacije predstavljajo celotne deformacije betona. Za začetek avtogenega krčenja betona smo privzeli začetek naraščanja temperature v betonu. Avtogeno krčenje dobimo kot razliko celotnih deformacij in temperaturnih deformacij. Temperaturne deformacije izračunamo s pomočjo izmerjene temperature vzorca in koeficienta linearnega temperaturnega raztezka svežega ter otrdelega betona. Koeficient linearnega temperaturnega raztezka svežega betona znaša  $\alpha_{T1} = 1,48 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$ , koeficient linearnega temperaturnega raztezka otrdelega betona pa je  $\alpha_{T2} = 1,00 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$  (Saje, 2001, 64).



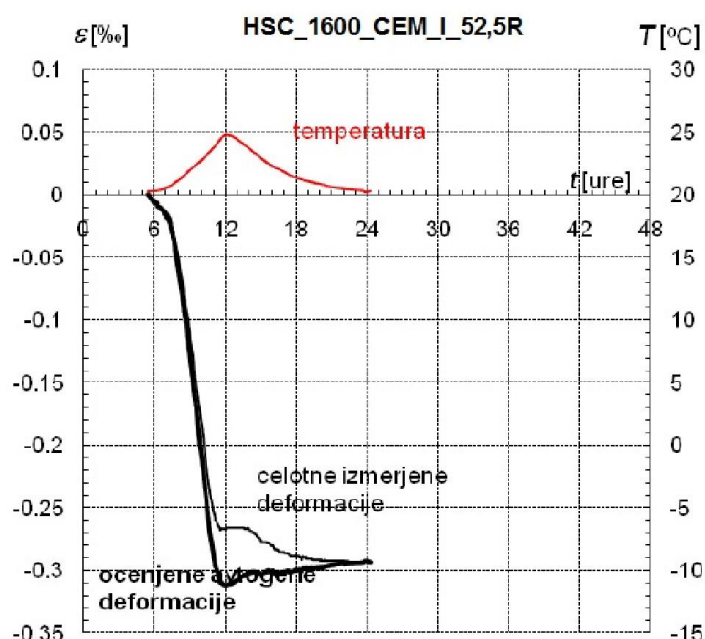
Slika 12: Časovni potek krčenja zatesnjenega betona in časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona (Saje, 2001, 63)

Na sliki 12 lahko vidimo, da smo od trenutka, ko je temperatura vzorca začela naraščati ( $t_z$ ) in do izenačitve temperature s temperaturo okolice ( $t_k$ ), upoštevali linearni potek temperaturnega koeficienta raztezka betona. V začetku smo upoštevali koeficient za sveži beton, nato pa vrednost koeficienta za otrdeli beton.

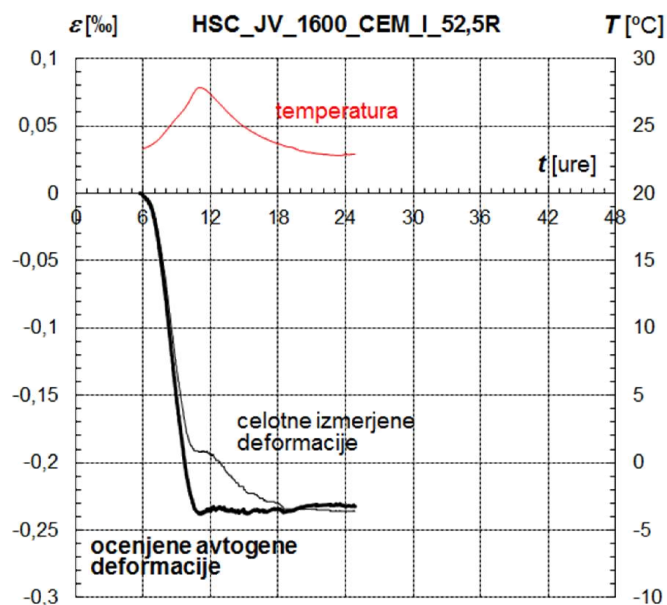
S slike je lepo razvidno, da se avtogeno krčenje nekoliko zmanjša ob največji temperaturi vzorca in ob času sovpada temperature vzorca s temperaturo okolice. Ko začne temperatura v betonu padati, se beton zaradi linearnega temperaturnega raztezka krči. To je posledica zmanjšanja prostornine zaprtih por, v katerih se poveča relativna vlažnost, kar zmanjša natezne sile, ki delujejo na stene pore. Povečanje temperature vzorca ugodno vpliva na celotno krčenje, saj se beton začne raztezati.

#### 6.5.1.1.1 Zgodnje avtogeno krčenje

Rezultate zgodnjega avtogenega krčenja naših treh mešanic smo primerjali z mešanico HSC\_1600\_CEM\_I\_52,2R (Maleš, 2013), ki ne vsebuje jeklenih vlaken in lahkega agregata (slika 16). Tako smo dobili dober vpogled vpliva jeklenih vlaken in različnih frakcij lehnjaka na zgodnje avtogeno krčenje.

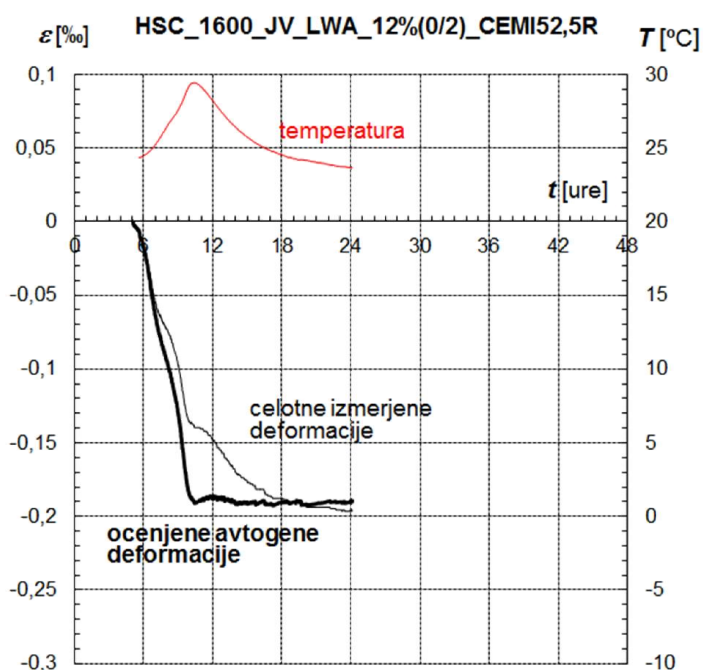


Slika 13: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC\_1600\_CEM\_I\_52,2R (Maleš, 2013)



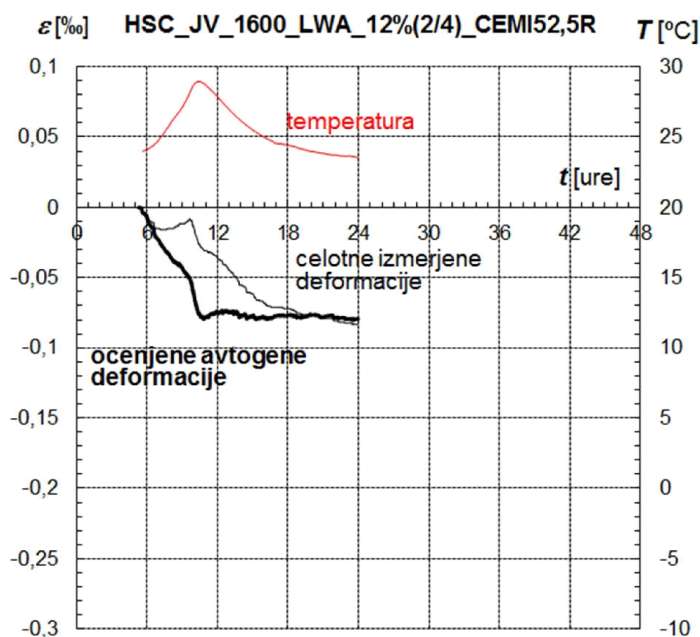
Slika 14: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R

Na sliki 14 vidimo zmanjšanje zgodnjega avtogenega krčenja betona visoke trdnosti zaradi vsebnosti jeklenih vlaken glede na primerjalni beton (slika 13).



Slika 15: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R

Na zgornji sliki (slika 15) je prikazano zmanjšanje zgodnjega avtogenega krčenja zaradi vpliva vsebnosti jeklenih vlaken in lahkega agregata frakcije 0 do 2 mm.



Slika 16: Časovni potek krčenja in temperature zatesnjenega betona HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R

S slike 16 ter s slik 13, 14 in 15 je razvidno, da je najmanjše zgodnje avtogeno krčenje, v primerjavi z ostalimi betoni, pri betonu, ki je vseboval oboje, lahek agregat frakcije 2 do 4 mm in jeklena vlakna.

Preglednica 13: Celotne in ocenjene avtogene deformacije pri starosti betona en dan

Ime mešanice	Celotno izmerjene deformacije po 24 urah [‰]	Ocenjene avtogene deformacije po 24 urah [‰]	Odstotek zmanjšanja zgodnjega avtogenega krčenja [%]	Odstotek zmanjšanja zgodnjega avtogenega krčenja [%]
HSC-1600-CEM I 52,5 R	-0,293	-0,293	Primerjalni vzorec	
HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R	-0,236	-0,232	20,6	Primerjalni vzorec
HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R	-0,196	-0,190	35,0	18,1
HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R	-0,083	-0,079	72,9	65,9

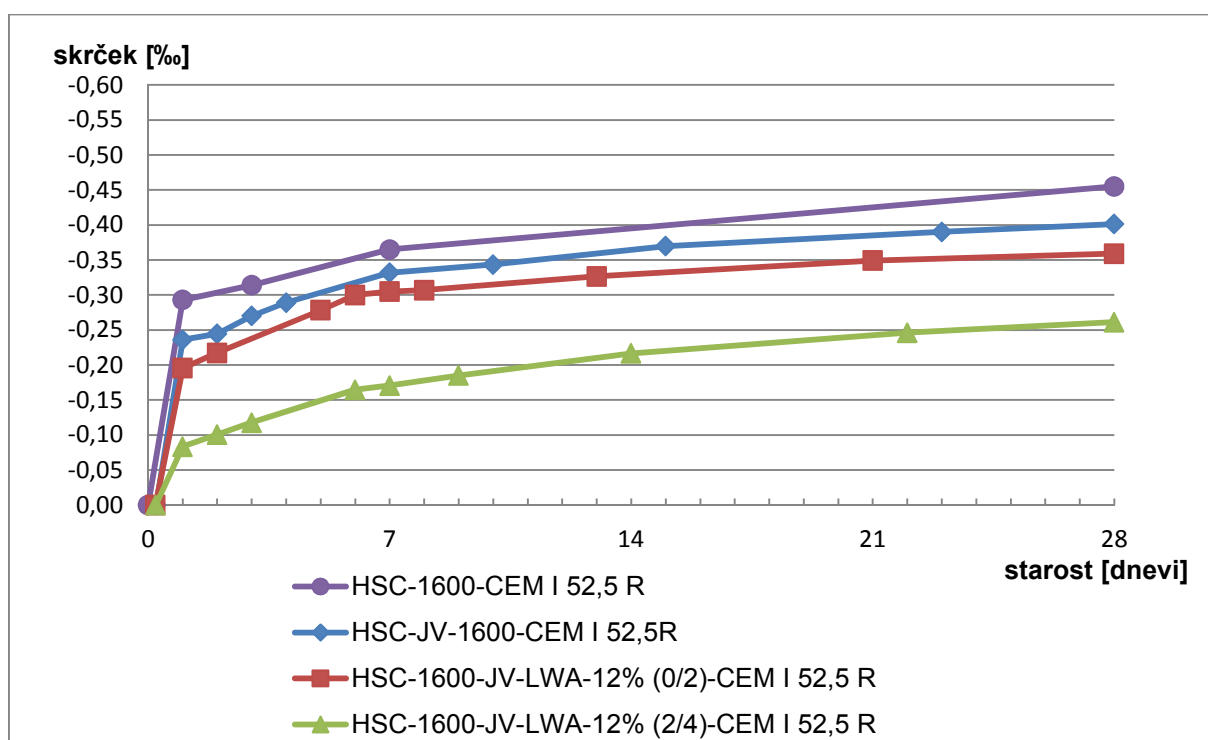
V gornji preglednici 13 je razvidno, da je zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti ob dodatkih jeklenih vlaken in različnih frakcij lahkega agregata manjše od primerjalnega betona visoke trdnosti, ki ni notranje negovan in mikroarmiran. Z dodatkom jeklenih vlaken (0,5 % prostorninskega deleža mešanice) je bilo zgodnje avtogeno krčenje za 20,6 % manjše od primerjalnega betona. Dokazali smo tudi, da je avtogeno krčenje betona z dodanimi jeklenimi vlakni in lahkim agregatom frakcije 0 do 2 mm za 18,1 % manjše od le mikroarmiranega betona visoke trdnosti. Prav tako se je mikroarmirana in notranje negovana (lehnjak frakcije 2 do 4 mm) betonska prizma za 65,9 % manj avtogeno skrčila od le mikroarmiranega primerjalnega betona visoke trdnosti.

Zgodnje avtogeno krčenje betona, ki je vseboval jeklena vlakna in lahki agregat frakcije 2–4 mm, je bilo najmanjše zaradi ustrezne velikosti por v notranjih rezervoarjih. Te vpijejo večjo količino vode, potrebne za hidratacijo cementa, kot v primeru lehnjaka frakcije 0–2 mm, a je frakcija še vedno dovolj drobna, da se enakomerno porazdeli po betonski mešanici.



### 6.5.1.1.2 Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev

Po 24-urnem zgodnjem krčenju, ki je bilo sestavljeno iz avtogenega in temperaturnega deformiranja, smo z nasadnim deformetrom na zatesnjenih vzorcih merili avtogeno krčenje. Rezultate krčenj naših treh mešanic smo primerjali z mešanico HSC-1600-CEM I 52,2R (Lisec, 2013), ki ne vsebuje jeklenih vlaken in lahkega agregata. S tem smo dobili vpogled vpliva jeklenih vlaken na avtogeno krčenje. Nato pa smo kot izhodiščno betonsko mešanico vzeli mešanico z oznako HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R in jo primerjali z ostalima dvema. Tako smo dobili rezultate vpliva različnih frakcij predhodno namočenega lahkega agregata na avtogeno krčenje.



Slika 17: Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev

Preglednica 14: Celotno krčenje zatesnjenih vzorcev pri starosti 1, 3, 7 in 28 dni

Starost betona	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>Ime mešanice</b>				
<b>HSC-1600-CEM I 52,5 R</b>	-0,293 ‰	-0,314 ‰	-0,365 ‰	-0,455 ‰
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	-0,236 ‰	-0,270 ‰	-0,332 ‰	-0,401 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	-0,196 ‰	-0,251 ‰	-0,305 ‰	-0,359 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	-0,083 ‰	-0,117 ‰	-0,171 ‰	-0,261 ‰

Z grafa (slika 17) in iz preglednice 14 opazimo, da se velik del celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev izvede s prvim dnevom. Kasneje je časovni potek velikosti krčenja posameznih betonskih mešanic skoraj vzporeden. Lepo je vidno, da je z dodajanjem vlaken in notranjih rezervoarjev vode uspelo zmanjšati velikost krčenja v prvem dnevu starosti in s tem zmanjšati celotno krčenje betona. Najboljše rezultate smo dosegli pri betonu, ki je mikroarmiran in notranje negovan s prehodno namočenim lehnjakom frakcije 2 do 4 mm.

Preglednica 15: Sprememba celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev na primerjalni beton HSC-1600-CEM I 52,5 R

Starost betona Ime mešanice	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-1600-CEM I 52,5 R</b>	Primerjalni beton			
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	-19,5 %	-14,0 %	-9,0 %	-11,9 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	-33,1 %	-20,1 %	-16,4 %	-21,1 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	-71,7 %	-62,7 %	-53,2 %	-42,6 %

Preglednica 16: Sprememba celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev na primerjalni beton HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R

Starost betona Ime mešanice	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	Primerjalni beton			
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	-16,9 %	-7,0 %	-8,1 %	-10,5 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	-64,8 %	-56,7 %	-48,5 %	-34,9 %

V zgornjih preglednicah (preglednica 15, 16) vidimo, da smo pri 28 dni starem betonu z dodatkom jeklenih vlaken zmanjšali celotno krčenje zatesnjenih vzorcev za 11,9 %. Pri enaki starosti se je, zatesnjena, mikroarmirana in notranje negovana (lehnjak frakcije 0 do 2 mm) betonska prizma skrčila za 10,5 % manj kot prizma, ki je samo mikroarmirana. Zadnji beton, ki je najmanj dovzeten za krčenje, vsebuje jeklena vlakna in lahki agregat frakcije 2 do 4 mm. Le-ta se je v 28 dneh skrčil za 34,9 % manj od samó mikroarmiranega betona.

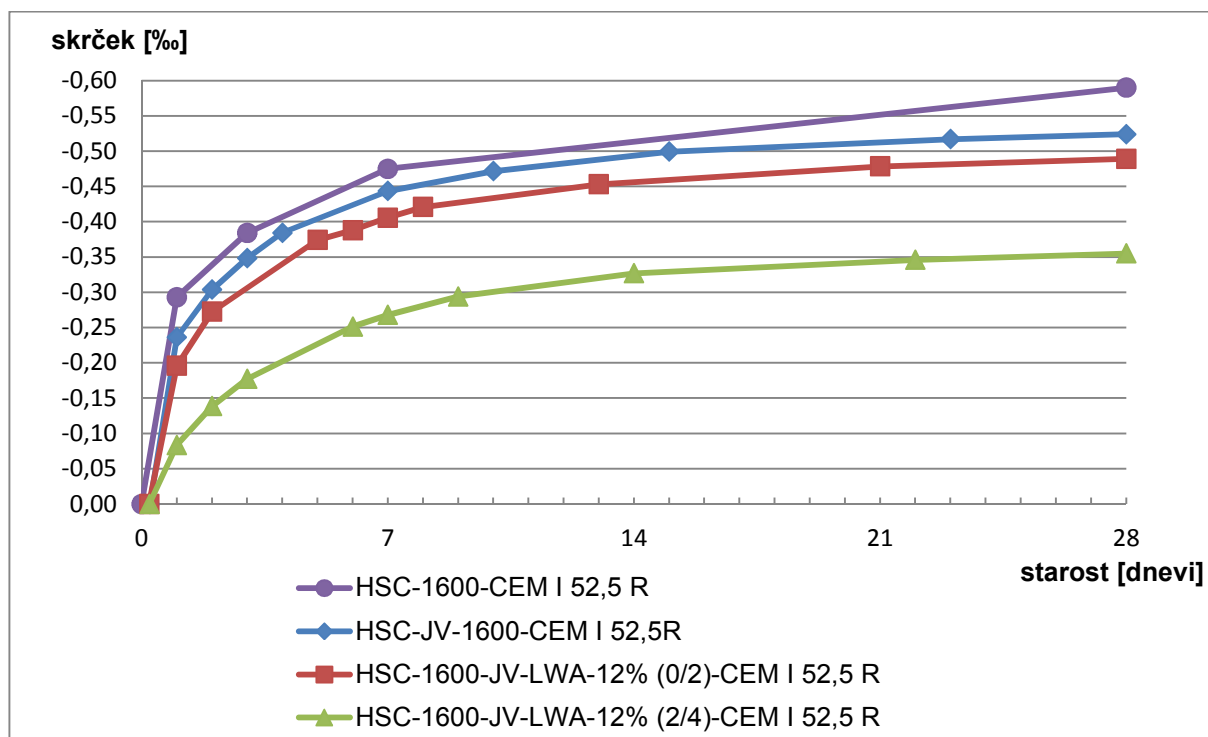
## 6.5.2 METODA MERJENJA CELOTNEGA KRČENJA SUŠENJU IZPOSTAVLJENEGA BETONA

Celotno krčenje betona je seštevek avtogenega krčenja in krčenja betona zaradi sušenja. Merili smo ga enako na prizmah, ki smo jih po 24 urah starosti razkalupili in izpostavili sušenju v sobi s konstantno vlago in temperaturo. Na vzorce smo na dveh stranicah z lepilom namestili merilne reperje na razdalji 25,4 cm (10 inč). Prizme smo hranili na mizi z vrtljivimi valjčki, ki so omogočali neovirano krčenje (slika 21). Nato smo z mehanskim nasadnim deformatrom izmerili začetno vrednost razmaka med reperji. Skrčke smo odčitavali vse do 28. dneva starosti in jih ponovno primerjali z betonom HSC-1600-CEM I 52,2R (Lisec, 2013).



Slika 18: Betonske prizme z merilnimi reperji na vrtljivih valjčkih

### 6.5.2.1 Rezultati celotnega krčenja sušenju izpostavljenega betona



Slika 19: Celotno krčenje sušenju izpostavljenih vzorcev

Preglednica 17: Celotno krčenje sušenju izpostavljenih vzorcev pri starosti 1, 3, 7 in 28 dni

Starost betona	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-1600-CEM I 52,5 R</b>	-0,293 ‰	-0,384 ‰	-0,475 ‰	-0,590 ‰
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	-0,236 ‰	-0,348 ‰	-0,443 ‰	-0,524 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12% (0/2) CEM I 52,5 R</b>	- 0,196 ‰	- 0,321 ‰	- 0,406 ‰	- 0,489 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	- 0,083 ‰	- 0,177 ‰	- 0,268 ‰	- 0,355 ‰

Z grafa (slika 19) in iz preglednice 17 vidimo, da so časovni poteki velikosti krčenja betonov v prvem dnevu starosti zelo burni, nato približno, do 8. dneva starosti, postopoma naraščajo, kasneje pa se počasi umirjajo. Tako do razlik v velikosti krčenja med posameznimi betoni pride v prvih dneh starosti, kajti kasneje pride do vzporednosti časovnega poteka. Vrednosti celotnega krčenja betona v enem dnevu po zamešanju smo povzeli iz elektronsko izmerjenih celotnih deformacij (glej poglavje 6.5.1.1.1 Zgodnje avtogeno krčenje).

*Preglednica 18: Sprememba celotnega krčenja sušenju izpostavljenih vzorcev na primerjalni beton HSC-1600-CEM I 52,5 R*

<i>Starost betona</i> <i>Ime mešanice</i>	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-1600-CEM I 52,5 R</b>	Primerjalni beton			
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	– 19,5 %	– 9,4 %	– 6,7 %	– 11,2 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	– 33,1 %	– 16,4 %	– 14,5 %	– 17,1 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	– 71,7 %	– 53,9 %	– 43,6 %	– 39,8 %

*Preglednica 19: Sprememba celotnega krčenja sušenju izpostavljenih vzorcev na primerjalni beton HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R*

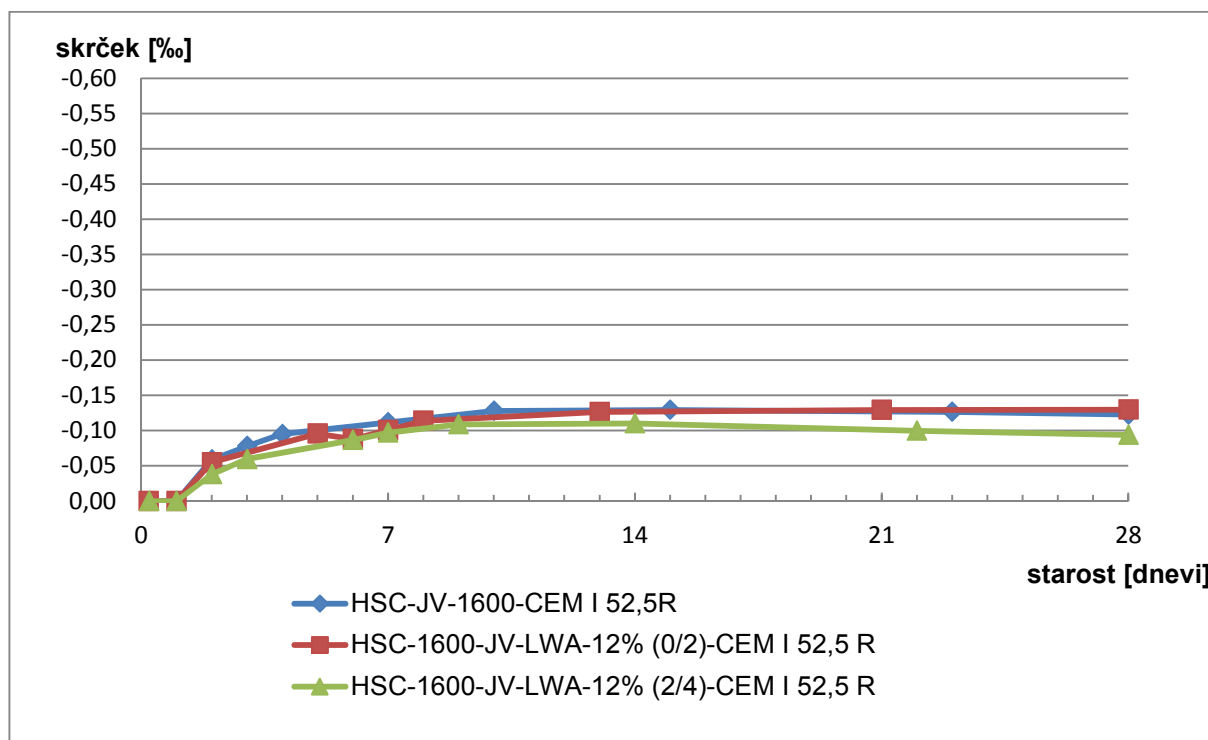
<i>Starost betona</i> <i>Ime mešanice</i>	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	Primerjalni beton			
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	– 16,9 %	– 7,8 %	– 8,4 %	– 6,7 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	– 64,8 %	– 49,1 %	– 39,5 %	– 32,3 %

V zgornjih preglednicah (preglednica 18, 19) vidimo, da so pri enem dnevu starosti spremembe celotnega krčenja sušenju izpostavljenega betona največje.

Spremembe celotnega krčenja sušenju izpostavljenih vzorcev so zelo podobne spremembam celotnega krčenja zatesnjenih vzorcev. Tudi tu se je izkazal beton, ki vsebuje vlakna in lehnjak frakcije 2 do 4 mm, saj se je v prvem dnevu skrčil za 64,8 % manj ter v tretjem dnevu starosti za 49,1 % manj kot primerjalni beton, ki je samo mikroarmiran. S starostjo betona se ta odstotek zmanjšuje.

## 6.6 KRČENJE ZARADI SUŠENJA

Beton se krči zaradi izhlapevanja vode v okolico. Zato smo vrednosti krčenja betona izračunali kot razliko celotnega krčenja in krčenja zatesnjenih betonskih prizem. Prvi dan po zamešanju so bili vzorci pokriti s polietilensko folijo; zaradi tega je vrednost krčenja zaradi sušenja enaka nič.



Slika 20: Krčenje zaradi sušenja

Preglednica 20: Krčenje vzorcev zaradi sušenja pri starosti 3, 7 in 28 dni

Starost betona	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
<i>Ime mešanice</i>				
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	/	-0,078 ‰	-0,112 ‰	-0,123 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	/	-0,080 ‰	-0,101 ‰	-0,130 ‰
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	/	-0,060 ‰	-0,097 ‰	-0,094 ‰

Z grafa (slika 20) in iz preglednice 20 vidimo, da so vrednosti krčenja zaradi sušenja majhne. To je posledica »zelo« malo proste vode, ki izhlapeva iz kapilar in tvori napetosti, te pa povzročajo zmanjšanje prostornine elementa. Razlog za majhne vsebnosti proste vode je nizko vodovezivno razmerje, pri katerem se skoraj vsa voda porabi pri procesu hidratacije cementa.

Preglednica 21: Sprememba krčenja vzorcev zaradi sušenja na primerjalni beton HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R

Starost betona <i>Ime mešanice</i>	3 dni	7 dni	28 dni
<b>HSC-JV-1600-CEM I 52,5 R</b>	Primerjalni beton		
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (0/2) CEM I 52,5 R</b>	+ 2,6 %	-9,7 %	+ 5,9 %
<b>HSC-JV-1600-LWA-12 % (2/4) CEM I 52,5 R</b>	-23,5 %	-12,9 %	-23,5 %

Iz preglednice 21 je razvidno, da je pri mikroarmiranem betonu z dodatkom lahkega agregata frakcije 0 do 2 mm pri starosti 28 dni krčenje zaradi sušenja večje. Pri betonu, ki poleg jeklenih vlaken vsebuje še notranje rezervoarje frakcije 2 do 4 mm, se je 28-dnevno krčenje zaradi sušenja zmanjšalo za 23,5 %.

## 7 ZAKLJUČKI

V okviru diplomske naloge smo raziskovali krčenje betonov visoke trdnosti z vsebnostjo jeklenih vlaken in notranjih rezervoarjev vode v obliki predhodno namočenega lehnjaka, različnih frakcij. Rezultate krčenj posameznih betonskih mešanic smo primerjali med seboj in z že prej opravljenimi preiskavami s področja krčenja betona (Lisec, 2013; Maleš, 2013).

Ugotovili smo, da večinski del celotnega krčenja betonov visoke trdnosti predstavlja avtogeno krčenje, ki se v velikem delu izvede že v prvem dnevu starosti. Dodatek jeklenih vlaken in lehnjaka ima velik vpliv na zgodnje avtogeno krčenje. Najmanj se je krčil beton, ki je vseboval jeklena vlakna in lahki agregat, frakcije 2–4 mm, zaradi primernih por v lahkem agregatu. V lahek agregat, frakcije 2-4 mm se shrani večja količina vode kot v agregat, frakcije 0–2 mm. Agregat, frakcije 2-4 mm se še dovolj enakomerno porazdeli po betonski mešanici. Večja količina vode v bolj grobi frakciji lahkega agregata zagotovi boljše dovajanje vode med procesom hidratacije veziva in s tem manjše avtogeno krčenje. Vlakna in notranji rezervoarji vplivajo na velikost celotnega krčenja betona. Na krčenje zaradi sušenja sta imela, tako lahek agregat kot jeklena vlakna, majhen vpliv.

Merili smo tlačne trdnosti preiskovanih betonov visoke trdnosti pri starosti 1 dan in 28 dni. Betoni visoke trdnosti so v prvem dnevu dosegli skoraj 60-odstotno 28-dnevno tlačno trdnost. Vnos šibkega lahkega agregata ni bistveno vplival na tlačno trdnost. Zaradi dodatka, predhodno z vodo namočenega lehnjaka, frakcije 2 do 4 mm mikroarmiranem betonu, smo v 28 dni starem betonu dosegli največjo tlačno trdnost. Omenjeni notranji rezervoar nam je omogočil dodatno zalogo vode za boljšo hidratacijo veziva. Prispevek dodatka jeklenih vlaken na tlačno trdnost betona je majhen pri starosti betona en dan, kasneje pa ni opazen.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo zanimivo uporabiti notranje rezervoarje iz drugačnega materiala, na primer: lesna vlakna, recikliran agregat, ekspandirana glina ..., Določili bi njihove optimalne deleže in ustrezne frakcije za največje zmanjšanje krčenja betona ob nespremenjenih tlačnih trdnostih.



## VIRI

Aitcin, P. C., Neville, A. M., Acker P. 1997. Integrated View of Shrinkage Deformation. Concrete International. Vol. 19, No. 9: p. 35–41.

Bandelj, B., Saje, D., Lopatič, J., Saje, F. 2008. Krčenje vlaknastih betonov. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev, Bled, hotel Golf 9.-10. oktober 2008. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 253–260.

Bandelj, B. 2010. Reološke lastnosti vlaknastih betonov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Bandelj): 192 str.

Bandelj B., Saje D., Saje F., 2010. Vpliv polipropilenskih vlaken na krčenje betona visoke trdnosti. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, Slovenija

Comite Euro-International du Beton. 1990. High-strength concrete. State of the Art Report. FIB/CEB, SR 90/1. Bulletin d' Information No. 197: loč pag.

Cussfon, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with presoaked lightweight aggregate sand for prevention of autogenous shrinkage cracking. Ottawa, National Research Council Canada: 32 p. De Larrard, F., Acker, P., Le Roy, R. 1994. Shrinkage, creep and thermal properties. V: Shah, S. P. (ur.), Ahmad, S. H., (ur.). High Performance Concretes and Applications. London: Edward Arnold: str. 65–114.

Dobnikar, V., Leskovar, I., Korla, J. 1994. Uporaba mikroarmiranih betonov za izvedbo in sanacije horizontalnih betonskih konstrukcij. V: Zajc, A. (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 27–30.

Dodatki za betone in malte, 2014. TKK Srpenica d.d.

[http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni\\_listi/cementol/antikorodin\\_slo.pdf](http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/antikorodin_slo.pdf) (Pridobljeno dne 20.8.2014)

Drčar, G. 2012. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Drčar): 31 str.

Jelušič, M. 2009. Tlačna trdnost vlaknastih betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Jelušič): 73 str.

Karakteristike lehnjaka. 2011. Hotavlje, Marmor Hotavlje: str. 1.

Khairallah, R. S. 2009. Analysis of Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete. Graduation thesis. Hamilton, McMaster University, McMaster University Press: 154 p.

Le Roy, R., De Larrard, F. 1993. Creep and Shrinkage of High-Performance Concrete, The LCPC Experience. V: Bažant, Z. P. (ur.), Carol, I. (ur.). Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete. London, E & FN Spon: p. 499–504.

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

Leskovar, I., Komel, M. 1994. Mikroarmirani brizgani betoni za protierozijske in vodotesne obloge brežin. V: Zajc, A. (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 21–25.

Lisec, D. 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode v betonih visoke trdnosti na krčenje zaradi sušenja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Lisec): 31 str.

Maleš, D. 2013. Vpliv zrnastne strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Maleš): 27 str.

Mehta, P. K, Monteiro, P. J. M. 2006. Concrete. Microstructure, Properties, and Materials. New York, McGraw - Hill: 695 str.

Neville, A. M., Brooks, J. J. 2010. Concrete Technology. Second Edition. Harlow, Pearson Education Limited: 442 p.

Poročilo o kakovostnih karakteristikah cementa CEM I 52,5 R. 3. 11.1997. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Poročilo o praktični uporabnosti mivke Calcit Stahovica s podano korekcijo zrnastosti, 1997. Ljubljana, IGMAT: loč. pag.

Poročilo o preiskavi cementa CEM II/A-S 42,5 R. 24. 2. 2000. Anhovo, Salanit Anhovo: loč pag.

Poročilo o preiskavi kamnine iz kamnoloma Ušenišče, 1997. Ljubljana, izdajatelj: IGMAT: loč. pag.

Saje, D. 1997. Posebnosti betonov visoke trdnosti. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): 90 str.

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., Bandelj, B., Lopatič, J., Saje, F. 2008. Notranja nega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev, Bled, hotel Golf 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. (ur.), Lopatič, J. (ur.). Zbornik 21. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, Slovenija 14.–15. oktober 1999. Bled, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207–214.

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.

SIST EN 206-1: 2003. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

Šahinagić-Isović, M., Markovski, G., Čerček, M. 2012. Deformacije skupljanja betona-uzroci i vrste. Gardjevinar, 9: 727-734

Šušteršič, J., Ukrainczyk, V. 2006. Vpliv lastnosti agregatov na lastnosti betonov. V: Zajc, A. (ur.). Zbornik 13. Slovenskega kolokvija o betonih – Agregati v betonu, Ljubljana, 18. maj 2006. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-8.

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

Ukrainczyk, V. 1994. Obloga predorov iz mikroarmiranega betona. V: Zajc, A. (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 15–19.

Weber, S., Reinhardt, H. W. 1997. A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing. Advanced cement based materials 6, 2: str. 59-68.

Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Zajc, A. (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 9–13.

Zajc, A. 2004. Kaj so betoni visokih zmogljivosti. V: Zajc, A. (ur.). Zbornik 11. Slovenskega kolokvija o betonih - Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-3.

Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A. (ur.). Zbornik 14. Slovenskega kolokvija o betonih – Posebne lastnosti betonov z dodatki, Ljubljana, 29. maj 2007. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-7.

Zajec, M. 2012. Krčenje s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zajec): 77 str.

Zaletel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zaletel): 100 str.

Završki, M. 2004. Možnosti in pogoji uporabe visokovrednih betonov pri gradnji premostitvenih objektov. V: Zajc, A. (ur.). Zbornik 11. Slovenskega kolokvija o betonih - Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 17-26.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

Žarnić, R., Bosiljkov V., Bosiljkov B. V. 2009. Gradiva vaje 2010/2011. 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. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Žnidaršič): 33 str.