

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:

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

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Maleš, D., 2013. Vpliv zrnave strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 27 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

PRVOSTOPENJSKI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
GRADBENIŠTVO (UN)

GRADBENIŠTVO /
KONSTRUKCIJE

Kandidatka:

DIJANA MALEŠ

**VPLIV ZRNAVOSTNE STRUKTURE LAHKEGA
AGREGATA NA ZGODNJE AVTOGENO KRČENJE
BETONA VISOKE TRDNOSTI**

Diolomska naloga št.: 64/B-GR

**THE INFLUENCE OF STRUCTURE OF LIGHTWEIGHT
AGGREGATE ON EARLY AUTOGENOUS SHRINKAGE OF
HIGH STRENGTH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 64/BGR

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 25. 09. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Dijana Maleš, izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Vpliv zrnavostne strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti«.

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

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

Ljubljana, 28.08.2013

Dijana Maleš

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.4:691.3(043.2)
Avtor:	Dijana Maleš
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv zrnastostne strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti
Tip dokumenta:	diplomska naloga, univerzitetni študij-B
Obseg in oprema:	27 str., 12 pregl., 20 sl.
Ključne besede:	zgodnje avtogeno krčenje, betoni visoke trdnosti, lahki agregat, notranja nega betona

Izvleček

Zgodnje avtogeno krčenje betonov visoke trdnosti je razmeroma veliko. Zmanjšamo ga lahko z uporabo notranjih rezervoarjev vode. Za notranji rezervoar vode smo uporabili lahki agregat. V betonski mešanici smo 12% agregata nadomestili s predhodno namočenim lahkim agregatom. Na podlagi eksperimentalnih rezultatov smo v okviru diplomske naloge raziskovali vpliv različnih frakcij lahkega agregata na velikost zgodnjega avtogenega krčenja. Avtogeno krčenje v prvem dnevu smo merili elektronsko. V naslednjih dneh smo meritve izvajali s pomočjo nasadnega deformetra. Poleg avtogenega krčenja, smo merili tudi tlačne trdnosti preiskovanih betonov. Ugotovili smo, da vsebnost predhodno namočenega lahkega agregata znatno vpliva na velikost zgodnjega avtogenega krčenja, na velikost tlačne trdnosti pa razmeroma malo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.4:691.3(043.2)
Author: Dijana Maleš
Supervisor: Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title: The influence of granulation of lightweight aggregate on early autogenous shrinkage of high strength concrete
Document type: graduation thesis, university studies-B
Scope and tools: 27 p., 12 tab., 20 fig.
Keywords: autogenous shrinkage, high strength concrete, lightweight aggregate, internal curing of concrete

Abstract

Early autogenous shrinkage of high strength concretes is relatively large. It can be reduced by using internal water reservoirs. Lightweight aggregate was used for internal water reservoir. 12% of aggregate was replaced with pre-soaked lightweight aggregate in the concrete mixture. On the basis of experiments in the graduation thesis we studied the influence of granulation of lightweight aggregate on early autogenous shrinkage. The shrinkage was measured electronically during the first day. In the next few days it was measured with a mobile displacement transducer. Beside autogenous shrinkage we measured the compressive strength of concrete. We concluded that content of pre-soaked lightweight aggregate have significant impact on autogenous shrinkage but relatively little impact on compressive strength.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu. Zahvaljujem se sošolcem za pomoč pri delu v laboratoriju.

Zahvaljujem se tudi svoji družini in vsem bližnjim, ki so mi skozi študij in v času nastajanja diplomske naloge stali ob strani in me spodbujali.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 SPLOŠNO O BETONIH VISOKE TRDNOSTI	2
2.1 Tehnološki ukrepi za doseganje betonov visokih trdnosti	2
3 SESTAVINE BETONOV VISOKE TRDNOSTI	3
3.1 Agregat	3
3.2 Cement	3
3.2.1 Hidratacija cementa v betonu	4
3.3 Dodatki	5
3.3.1 Mineralni dodatki	5
3.3.1.1 Mikrosilika	5
3.4 Kemijski dodatki	6
3.5 Voda	6
4 KRČENJE	7
4.1 Plastično krčenje.....	8
4.2 Kemično krčenje	8
4.3 Avtogeno krčenje.....	9
4.4 Temperaturno krčenje	11
4.5 Krčenje zaradi sušenja.....	11
5 NOTRANJA NEGA BETONA IN LAHKI AGREGATI	12

6	EKSPERIMENTALNI DEL.....	13
6.1	Uporabljeni materiali.....	13
6.2	Sestava preiskovanih betonskih mešanic	15
6.3	Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice	16
6.3.1	Metoda s posedom po standardu SIST EN 12350-2.....	16
6.3.2	Metoda z razlezom po standardu SIST EN 12350-5	17
6.3.3	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po standardu SIST EN 12350-7	18
6.4	Merjenje krčenja betona.....	19
6.5	Rezultati in analize meritev avtogenega krčenja.....	20
6.5.1	Primerjava avtogenega krčenja betonov ki vsebujejo predhodno namočeni lahki agregat ter visokotrdnega betona brez izboljšav.....	24
7	ZAKLJUČKI	25
	LITERATURA.....	26

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz mikrostrukture stične površine med strjeno cementno pasto in zrnim agregata [12]	3
Slika 2: Zgostitev strukture cementnega kamna z mikrosiliko [7]	5
Slika 3: Shematski prikaz delovanja molekule superplastifikatorja v suspenziji cementa, vode in superplastifikatorja [5]	6
Slika 4: Potek spremembe temperature v betonskem elementu in shematski prikaz potrebnega negovanja elementa [8]	8
Slika 5: Shematski prikaz kemičnega krčenja [10]	9
Slika 6: Shematski prikaz prečnega prereza hidratizirajoče cementnetne paste [8]	10
Slika 7: Razmerje med avtogenim in kemičnim krčenjem: C- nehidratiziran cement, W- nehidratizirana voda, Hy- produkt hidratacije, V- pore nastale v procesu hidratacije [10]	10
Slika 8: Levo: krčenje v betonu običajne trdnosti, desno: krčenje v betonu visoke trdnosti [10]	11
Slika 9: Primerjava zunanje in notranje nege betona, ki se izvaja z uporabo nasičenega lahkega agregata [14]	12
Slika 10: Prikaz poseda svežega betonskega preiskovanca [23]	17
Slika 11: Postopek s posedom	17
Slika 12: Shematski prikaz metode z razlezom [23]	18
Slika 13: Merjenje razleza svežega betona	18
Slika 14: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v svežem betonu	19
Slika 15: Shematski prikaz merjenja zgodnjega avtogenega krčenja betona [9]	20
Slika 16: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev	20
Slika 17: Časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona [9]	21
Slika 18: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R v prvih 24 urah	21
Slika 19: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_CEM_I_52,5R	22
Slika 20: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R	23

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mineraloška sestava cementna [9]	4
Preglednica 2: Lastnosti uporabljenega agregata [9]	13
Preglednica 3: Lastnosti uporabljene mivke [9]	13
Preglednica 4: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata [4]	14
Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega cementa CEM I 52,5R [9].....	14
Preglednica 6: Lastnosti uporabljenih dodatkov [9]	15
Preglednica 7: Sestava primerjalne betonske mešanice, privzeta iz doktorske disertacije [9]	15
Preglednica 8: Sestava betonskih mešanic, ki vsebujejo lahki agregat.....	16
Preglednica 9: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R	22
Preglednica 10: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_CEM_I_52,5R	23
Preglednica 11: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R	23
Preglednica 12: Primerjava avtogenega krčenja za različne mešanice	24

X Maleš, D. 2013. Vpliv zrnavostne strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti.
Dipl. nal. - UNI-B. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

V svetu sta se razvoj in uporaba betonov visoke trdnosti v zadnjih dvajsetih letih močno povečala. Betoni visoke trdnosti se vgrajujejo v konstrukcije premostitvenih objektov, visokih stavb, vrtalnih ploščadih v morju, prefabricirane betonske elemente, betonske vozne površine in drugod. Ti betoni zaradi goste in kvalitetne strukture dosegajo visoke zgodnje tlačne trdnosti, krčenje zaradi sušenja in lezenje je majhno, večja pa je njihova odpornost na kemijsko korozijo, zmrzovanje in obrus [19].

Betoni visoke trdnosti imajo tudi neželjene lastnosti, kot je na primer v primerjavi z betoni običajnih trdnosti večje avtogeno krčenje, ki je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna. Avtogeno krčenje lahko povzroči nastanek razpok. Za zmanjšanje le-tega smo uporabili nov pristop, ki temelji na uporabi predhodno namočenega lahkega agregata v betonski mešanici. Ta agregat deluje kot notranji rezervoar vode. To metodo imenujemo notranja nega betona [20].

V diplomskem delu smo proučevali vpliv zrnastostne sestave lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betonov visoke trdnosti. Primerjali smo tri različne mešanice visokotrdnega betona, mešanico, ki ne vsebuje predhodno namočenega lahkega agregata, mešanico, ki vsebuje lahki agregat frakcije od 0 do 2 mm in mešanico, ki vsebuje frakcije od 2 do 4 mm. Opazovali smo, v katerem betonu se razvije najmanjše avtogeno krčenje. Ker se največji del avtogenega krčenja izvrši v prvem dnevu, smo se osredotočili na zgodnje avtogeno krčenje. Krčenje betonskih vzorcev v obliki prizem smo merili elektronsko do starosti 24 ur. V naslednjih dneh smo meritve izvajali s pomočjo nasadnega deformetra. Sočasno smo merili tudi tlačne trdnosti betona.

Diplomska naloga poleg uvoda vsebuje 6 poglavij. V poglavju *Splošno o betonih visoke trdnosti* smo predstavili lastnosti betonov visoke trdnosti in tehnološke ukrepe za izdelavo teh betonov. Sledi poglavlje *Sestavine betonov visoke trdnosti*, kjer smo kratko opisali osnovne sestavine in dodatke, ki jih uporabljamo, da bi dosegli betone želenih visokih trdnosti in primerne vgradljivosti ter trajnosti. V poglavlju *Krčenje* smo opisali vrste krčenja in njihov vpliv na betonske elemente. Poudarek je na razvoju avtogenega krčenja, ki ga zmanjšujemo tako, da beton notranje negujemo. Notranjo nego betona izvajamo s predhodno namočenim lahkim agregatom, kar smo opisali v poglavlju *Notranja nega betona in lahki agregati*. Na začetku poglavlja *Eksperimentalni del* smo opisali potek eksperimentalnih raziskav in pregledno predstavili v betonskih mešanicah uporabljene materiale. Nato smo opisali preiskave svežega betona in postopek merjenja avtogenega krčenja. V preglednicah in na diagramih smo prikazali rezultate lastnih meritev, na podlagi katerih smo podali svoje ugotovitve.

2 SPLOŠNO O BETONIH VISOKE TRDNOSTI

Beton visoke trdnosti je razmeroma nov material, narejen na podlagi pospešenga razvoja na področju teorije in tehnologije betona. Te betone izdelujemo z nizkim vodocementnim ali vodovezivnim razmerjem, z uporabo različnih dodatkov za doseganje primerne vgradljivosti in sredstev za zgoščevanje betona med postopkom vgrajevanja [7]. Vodovezivno razmerje se pri betonih visoke trdnosti giblje med 0.20 in 0.43 [9].

Zaradi drobnejše in gostejše mikrostrukture imajo betoni visoke trdnosti v svežem in strjenem stanju nekatere lastnosti zelo dobre [19]:

- visoka tlačna trdnost,
- odpornost proti zmrzovanju in tajanju brez in v prisotnosti soli,
- večja odpornost na obrus,
- reološke lastnosti,
- hitrejša gradnja in razopaževanje,
- boljša zaščita armature pred korozijo.

Poleg ugodnih lastnosti imajo betoni visoke trdnosti nekatere pomanjkljivosti [19]:

- višja cena na enoto prostornine,
- nevarnost krhke porušitve konstrukcijskih elementov zaradi manjše žilavosti,
- manjša ognjeodpornost betona zaradi gostejše strukture materiala,
- porast togosti ni sorazmeren povečanju trdnosti.

Betoni visoke trdnosti imajo večje avtogeno krčenje, kar je posledica burnega procesa hidratacije in razmeroma majhne vsebnosti vode [9]. Avtogeno krčenje predstavlja približno polovico celotnega krčenja betona visoke trdnosti [19].

2.1 Tehnološki ukrepi za doseganje betonov visokih trdnosti

Betoni visoke trdnosti imajo gost in visoko zmogljiv cementni kamen. Betone visokih mehanskih in reoloških lastnosti izdelujemo s tehnološkimi ukrepi, ki načrtovano ustvarjajo ustrezno strukturo betona. Zelo pomembno je, da uporabljamo kvalitetne osnovne materiale.

Prvi možen tehnološki ukrep je znižanje vodocementnega faktorja. Da lahko zagotovimo primerno vgradljivost, uporabljamo plastifikatorje in superplastifikatorje. Na ta način dobimo gostejše betone, ki vsebujejo večjo količino cementa. Tlačna trdnost betonov se giblje med 60 in 100 MPa.

Drugi tehnološki ukrep je izdelava betona z vsebnostjo mineralnih dodatkov, ki imajo pucolanske lastnosti. Dodatki so elektrofilterski pepeli, pucolani, tufi, mikrosilika, kamena moka in podobni. Mineralni dodatki se dodajajo v betonsko mešanico v obliki drobnih delcev, ki v sveži betonski mešanici zapolnjujejo medzrnske pore in reagirajo s kalcijevim hidroksidom. V počasni reakciji se tvori želatinasta snov CSH gel, ki zapolnjuje pore. Beton je gostejši.

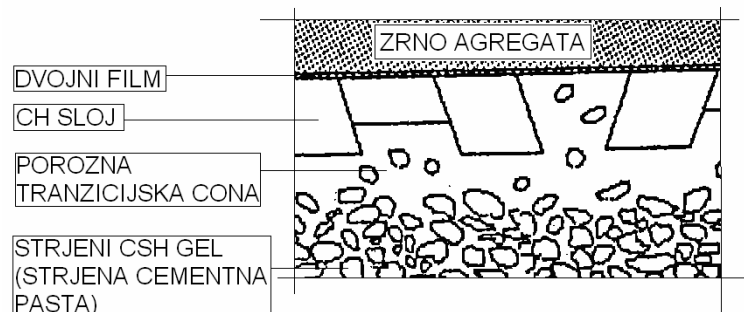
Tretji tehnološki ukrep pri izdelavi betona je uporaba veziva, ki poleg cementa sestoji iz polimerov. Polimeri, primerni za uporabo so lateksi, redisperzibilni praškasti polimeri, vodotopni polimeri, tekoče smole in monomeri. V procesu hidratacije cementa, se na površino raztapljajočih se cementnih delcev, usedajo in vežejo polimerni delci. Mešanica produktov hidratacije in polimernih delcev zapolni prostor med agregatnimi zrnji in zaradi goste strukture preprečuje transport vode, plinov in raztopin. Taki betoni imajo visoko trdnost, nizek modul elastičnosti in so nepropustni [17].

3 SESTAVINE BETONOV VISOKE TRDNOSTI

Betoni visoke trdnosti v primerjavi z betoni običajne trdnosti sestojijo iz večjega števila sestavin. Poleg osnovnih sestavin, cementa, agregata in vode, betoni visoke trdnosti vsebujejo še mineralne dodatke – mikrosiliko in kemijske dodatke [12]. Agregat zapolnjuje večji del prostornine betona. V primerjavi z betoni običajne trdnosti so zahteve glede zrnovostne sestave in velikosti največjega zrna agregata drugačne. Za doseganje visokih trdnosti v betonu del cementa nadomestimo z mineralnimi dodatki [9]. Betone visoke trdnosti dosegamo pri majhnih vodocementnih razmerjih. Primerno konsistenco sveže betonske mešanice zagotovimo z dodajanjem plastifikatorja ali superplastifikatorja. V primerjavi z betoni običajne trdnosti, vsebujejo betoni visoke trdnosti večjo količino cementa, ki se giblje okrog 400 kg/m^3 ali več. Uporabljamo cemente višjih trdnostnih razredov [7].

3.1 Agregat

Agregat je ena izmed naj pomembnejših sestavin betonske mešanice. S svojimi lastnostmi in posredno preko mejnih površin med posameznimi zrn in strjeno cementno pasto vpliva na lastnosti svežega in strjenega betona [11]. Agregat mora biti čist, ne sme vsebovati glinenih primesi in slabih zrn, prav tako ne sme vsebovati primesi, ki bi lahko vplivale na vezanje cementa [16]. Pri betonih visoke trdnosti se priporoča uporaba agregata z največjo velikostjo zrna 16 mm [9]. Za razliko od betonov običajne trdnosti, vsebuje beton visoke trdnosti bolj fine delce, kar omogoča da se celotna masa betona obnaša kot homogeno in razmeroma trdno telo z manjšo vsebnostjo prostorninskih por [11]. Pri uporabi drobnega agregata dobimo gostejšo strukturo in okrog zrn se pojavljajo manjše koncentracije napetosti, kar privede do višje tlačne trdnosti [7].



Slika 1: Shematski prikaz mikrostrukture stične površine med strjeno cementno pasto in zrnom agregata [12]

3.2 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki med procesom hidratacije veže z vodo in se strjuje. Nastalo snov imenujemo cementni kamen.

Osnovne surovine za pridobivanje cementa vsebujejo kalcijev oksid, silicijev dioksid, komponento z aluminijevim oksidom in železov oksid [5]. S toplotno obdelavo surovin v rotacijskih pečeh, pri temperaturi med 1300°C in 1500°C nastane cementni klinker, ki ga sestavljajo štirje glavni minerali.

Preglednica 1: Mineraloška sestava cementna [9]

Naziv	Mineral	Oznaka
Trikalcijev silikat (alit)	$3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalcijev silikat (belit)	$2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalcijev aluminat (aluminatna faza)	$3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalcijev aluminat (feritna faza)	$4 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Cementni klinker, ki se po končanem hlajenju melje skupaj s 3 do 5 % sadre ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) predstavlja končni proizvod, ki ga imenujemo portland cement [9].

3.2.1 Hidratacija cementa v betonu

Hidratacija cementa je kemična reakcija med cementnim klinkerjem, kalcijevim sulfatom in vodo, pri kateri se sprošča toplota [5].

Napredovanje hidratacije vpliva na razvoj kemičnih, fizikalnih in mehanskih lastnosti cementne paste ali betona. Največji vpliv imajo [9]:

- razmerje vsebnosti štirih glavnih mineralov portland-cementnega klinkerja,
- specifična površina cementa,
- vrsta in količina mineralnih in kemičnih dodatkov,
- začetna temperatura betona,
- vrsta kamenega agregata,
- temperatura in vlaga okolja med procesom hidratacije,
- vodocementno razmerje v sveži betonski mešanici.

V odvisnosti od nastajanja hidratacijskih produktov, lahko proces hidratacije razdelimo na tri faze.

Prva faza se začne takoj, ko cementu dodamo vodo in traja približno eno uro. V tem času začnejo nastajati heksagonalni prizmatični kristali kalcijevega hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Istočasno zaradi visoke vrednosti začetne hidratacijske toplote, ki je posledica kemične reakcije med sadro in minerali kalcijevega aluminata ter kalcijevega aluminat ferita nastanejo dolgi igličasti kristali entrigita.

Druga faza hidratacije cementa traja od ene ure do enega dneva in predstavlja začetek strjevanja cementne paste. V tej fazi se začnejo kemične reakcije trikalcijevega silikata oziroma alita in vode ter dikalcijevega silikata oziroma belita in vode. Poleg kalcijevega hidroksida in entrigita, se v tem procesu formirajo nitasti kristali kalcijevega silikat hidrata, ki ga imenujemo C-S-H gel. Ti kristali rastejo s površine cementnih zrn navzven. Njihov učinek je, da v grobem razdelijo prostore, ki so zapolnjeni z vodo. Na ta način nastane prva struktura povezanih zrn.

Tretja faza se začne od prvega dneva betoniranja naprej in med tem časom otrdi cementni kamen. V medprostorih, ki niso zapolnjeni, rastejo krajši kristali C-S-H gela in tako formirajo gosto strukturo cementnega kamna [9]. Zaradi strukturnih karakteristik in velike specifične površine, ki mu pripada, je C-S-H gel glavni nosilec razvoja mehanske trdnosti cementnega kamna. Tretja faza traja tako dolgo, dokler sta na razpolago ali reaktanti, ali nezapolnjen prostor za formiranje hidratacijskih produktov [5].

Posledica hidratacije cementa je nastanek kohezivne in adhezivne hidratizirane cementne paste, ki je značilen element trdnosti betona. Trdni del cementnega kamna je sestavljen iz bolj ali manj hidratiziranih zrn cementa, ki so med seboj zlepljena [9].

3.3 Dodatki

Dodatki so določeni kot material, ki ga dodajamo v betonsko mešanico tik pred ali med samim mešanjem, z namenom spremembe lastnosti betona, kot tudi povečevanja učinkovitosti cementa ter ekonomičnosti betonske mešanice. Delimo jih na mineralne in kemijske dodatke [18].

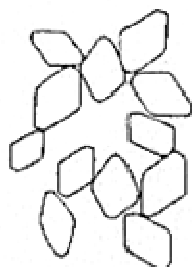
3.3.1 Mineralni dodatki

Mineralni dodatki imajo pucolanske lastnosti in jih zato uporabljamo kot delno nadomestilo cementa. V sveži betonski mešanici reagirajo s Ca(OH)_2 , ki se sprošča ob topljenju trikalcijevega in dikalcijevega silikata v cementni pasti. Nastane C-S-H gel, ki zapolni pore v cementni pasti in s tem zgosti strukturo betona in izboljša njegove lastnosti. V tehnologiji betonov visoke trdnosti se navadno uporabljajo mikrosilika in elektrofiltrski pepel [18].

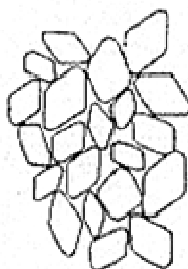
3.3.1.1 Mikrosilika

Mikrosilika je fino zrnati amorfen silicijev oksid, ki nastane pri proizvodnji ferosilicija kot fini prah. Zrna mikrosilike so približno 50 krat manjša kot zrna cementa. Pri pripravi sveže betonske mešanice se mikrosilika enakomerno razporedi po mešanici in ob strjevanju betona deluje na dva načina. Pri zamešanju sveže betonske mešanice zrna mikrosilike zapolnijo prazna mesta med zrni cementa in kasneje pri procesu strjevanja zapolnijo območje med agregatom ter bolj oddaljeno gostejšo cementno pasto. Na ta način iz por izrinejo vodo ter tako zgostijo strukturo betona [18]. Pri drugem načinu mikrosilika zaradi svoje reaktivnosti hitro reagira s kalcijevim hidroksidom Ca(OH)_2 . Pri reakciji pucolanizacije oziroma vezanja med SiO_2 in Ca(OH)_2 nastane produkt podoben cementnem gelu, ki zapolnjuje prazna mesta v cementni pasti. Zmanjšuje se količina Ca(OH)_2 , kar vpliva na zmanjšanje poroznosti cementnega kamna in s tem se povečujeta trajnost in trdnost betona [7]. Mikrosiliko vedno uporabljamo v kombinaciji s superplastifikatorji, saj se z dodajanjem mikrosilike poveča potreba po vodi. Dodajamo jo okoli 10% na maso cementa [18].

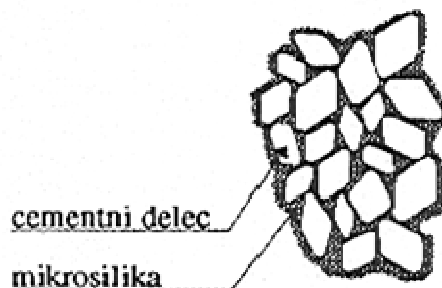
cementna pasta



cementna pasta
s superplastifikatorjem



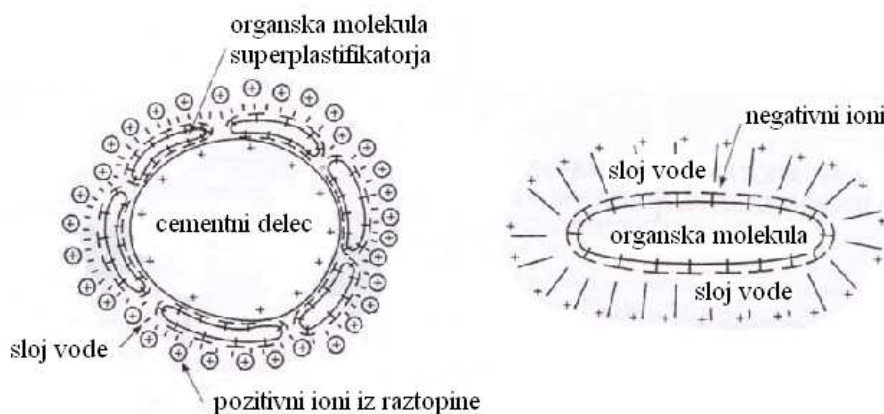
cementna pasta
s superplastifikatorjem
in mikrosiliko



Slika 2: Zgostitev strukture cementnega kamna z mikrosiliko [7]

3.4 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki, ki jih uporabljamo pri betonih visoke trdnosti so aeranti, pospeševalci in zavlačevalci vezanja, zgoščevalci, dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah, plastifikatorji, superplastifikatorji in drugi [9]. Superplastifikatorji omogočajo znižanje potrebne količine vode za pripravo sveže betonske mešanice [5]. Običajni superplastifikatorji so navadno naftalenskega tipa in so sestavljeni iz organskih polimernih molekul [9]. Delci cementa se pod vplivom električnega polja v suspenziji cementa in vode ne premikajo. V raztopini superplastifikatorja se delci cementa gibljejo proti pozitivnemu polu – cement ima negativni naboj. Negativni naboj na površini delcev cementa pogojuje, da se molekule vode zaradi svojega dipolnega karakterja ovijejo okrog delcev cementa ter tako preprečijo njihovo kopičenje [5]. Dobimo boljšo razpršenost cementnih zrn v betonski mešanici. Superplastifikatorji nove generacije so sestavljeni iz dolgih razvejanih polimernih molekul z različno dolgimi stranskimi verigami. Te molekule se adsorbirajo na cementne delce in učinkujejo na enak način kot običajni superplastifikatorji. Dolge stranske verige ovirajo stikovanje produktov hidratacije različnih cementnih zrn. Tako superplastifikatorji učinkujejo na izboljšanje vgradljivosti svežega betona pri manjši porabi vode. Superplastifikatorji nove vrste tudi podaljšajo čas obdelanosti svežega betona [9].



Slika 3: Shematski prikaz delovanja molekule superplastifikatorja v suspenziji cementa, vode in superplastifikatorja [5]

3.5 Voda

Za pripravo betona uporabljamo kemijsko čisto vodo. Na splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo mešanic in jo zato uporabljamo brez posebnih preiskav. Vode, ki vsebuje drobne delce, kot so glina in organske snovi ter soli, ki so razpršene v vodi, ne uporabljamo, saj ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitve stika z zrnji cementa. Tako slabo vplivajo na potek hidratacije in sprijemnost cementne paste. Nekatere spojine, ki so raztopljene v vodi, povzročajo tudi korozijo cementnega kamna [22].

4 KRČENJE

Lastnost betona, da časovno spreminja svojo prostornino v obliki zmanjšanja dimenzij elementa brez delovanja zunanje sile, imenujemo krčenje [10]. Do krčenja betona pride zaradi izgube vode, ki se lahko izloča iz betona v okolico ali se porabi pri hidrataciji cementa [9]. Krčenje betona je posledica krčenja cementne paste.

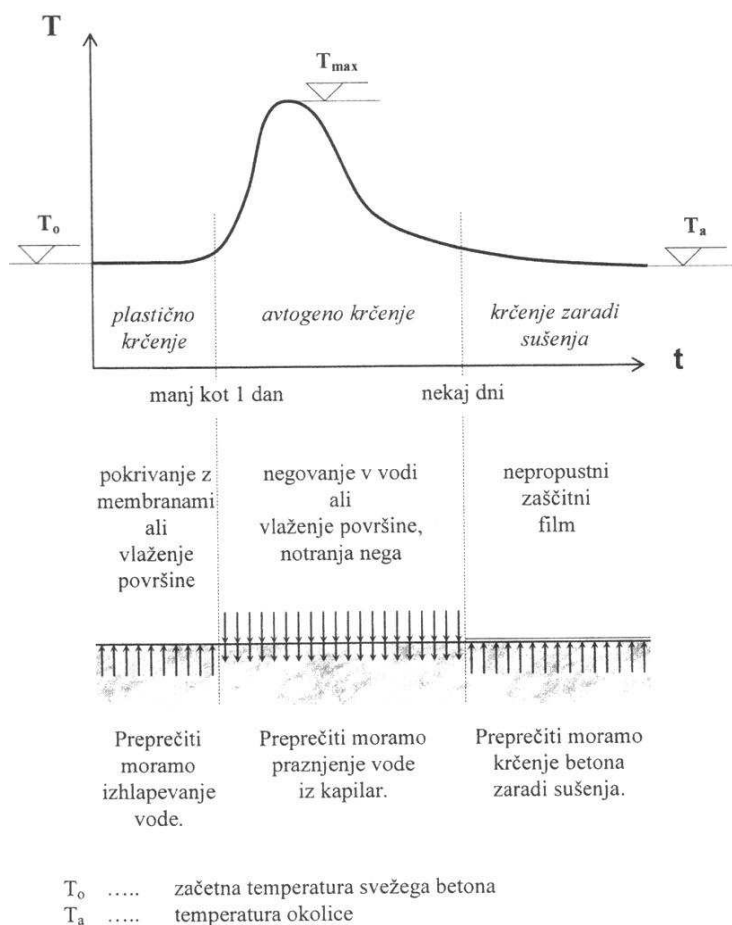
Na časovni potek in končno vrednost krčenja vpliva veliko faktorjev [10]:

- temperatura in vlažnost okolja,
- dimenzije elementa,
- vrsta in količina cementa,
- vodovezivno razmerje,
- zrnavostna in mineraloška sestava agregata,
- trdnost betona,
- način vgradnje in nege betona.

Agregat ovira deformiranje cementne paste oziroma cementnega kamna. Betoni visoke trdnosti vsebujejo veliko količino cementa, kar vodi k večjemu krčenju betona. Betoni visoke trdnosti so narejeni z nizkim vodocementnim razmerjem, kar ugodno vpliva na velikost krčenja, ker se razvije nižja stopnja hidratacije in je delež prostornine cementne paste manjši [9].

Celotno krčenje je sestavljeno iz različnih oblik krčenja [10]:

- plastičnega krčenja, ki se razvije na sušenju izpostavljeni površini svežega betona,
- kemičnega krčenja, ki je posledica porabe vode v betonu pri procesu hidratacije,
- avtogenega krčenja, ki je posledica samoizsuševanja v porah cementne paste pri procesu hidratacije,
- krčenja zaradi sušenja, ki je posledica izhlapevanja vode iz por izpostavljenega betonskega elementa,
- temperaturnega krčenja, ki nastane zaradi spremembe temperature pri procesu hidratacije,
- krčenje zaradi karbonatizacije, ki ga v cementnemu kamnu povzroči kemijska reakcija z ogljikovim dioksidom iz okolice.



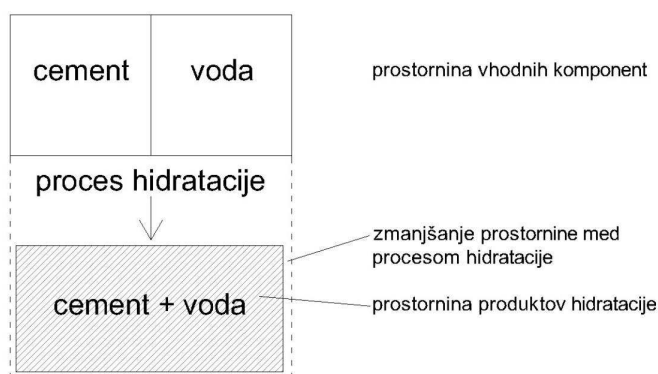
Slika 4: Potek spremembe temperature v betonskem elementu in shematski prikaz potrebnega negovanja elementa [8]

4.1 Plastično krčenje

Plastično krčenje poteka na površini svežega betona in je posledica izhlapevanja vode s površine svežega betona ali vpijanja vode v opaž ali v podlago betona. Nastopi zelo hitro, v prvih urah po zamešanju betona in ga ne vpoštevamo v meritvah. Običajno ni pomembno za konstrukcije, saj se dogaja v okviru nestrjenega betona. Med izhlapevanjem vode pride do zgoščevanja mešanice, ker se delci v svežem betonu med seboj zblížujejo. Krčenje površinskega sloja je ovirano z notranjim delovanjem betona, ki se ne krči. Rezultat tega so natezne napetosti, ki se pojavijo v površinski plasti. Te napetosti so lahko večje od natezne trdnosti mladega betona in pojavijo se plastične razpoke, ki so plitve in široke. S ustreznego lahko to krčenje zmanjšamo. Ukrepi, ki jih izvajamo za negovanje betona po vgraditvi betona, so močenje površine elementa, prekrivanje površine s folijami in drugo [10].

4.2 Kemično krčenje

Kemično krčenje je posledica kemičnega vezanja vode v procesu hidratacije. V procesu strjevanja betona se v cementni pasti odvija več kemijskih reakcij, ki neposredno vplivajo na zmanjšanje njene prostornine. Pojav je shematsko prikazan na sliki 5 [10].



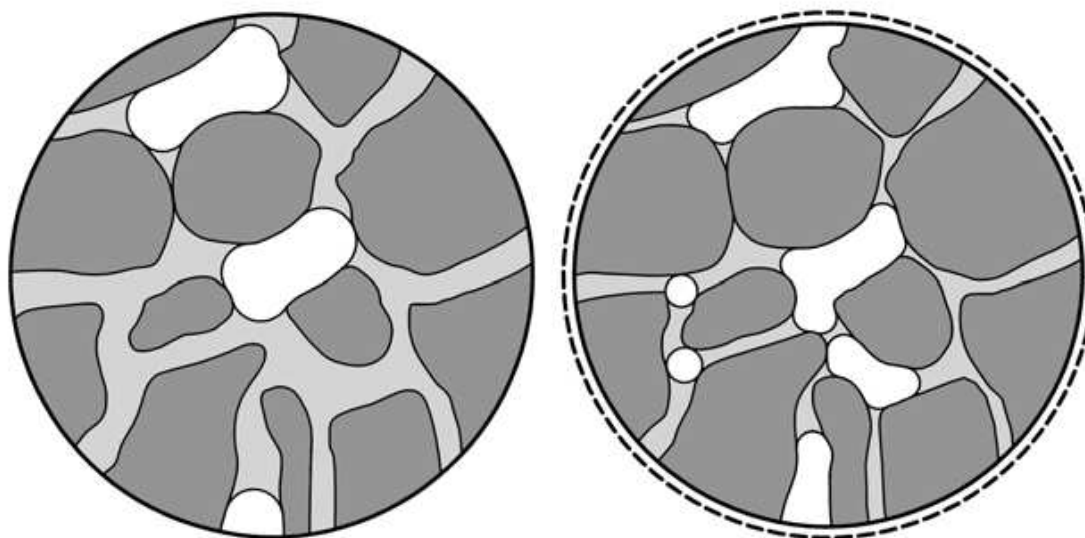
Slika 5: Shematski prikaz kemičnega krčenja [10]

Rezultirajoča prostornina produktov, ki se formirajo pri procesu hidratacije, je manjša od prostornine vhodnih komponent, cementsa in vode. Glavni razlog za zmanjšanje prostornine cementne paste v primerjavi s prostornino cementsa in vode je večja gostota kemično vezane vode v primerjavi s prosto vodo mešanice pred začetkom vezanja [10]. Pri procesu strjevanja cementne paste se pojavijo notranje sile, ki povzročijo deformacije cementne paste in betona [9]. Prihaja do krčenja cementne paste, kar povzroči nastanek novih praznih por. Dodatne pore vplivajo na povečanje skupne prostornine por v cementni pasti, ki je v procesu strjevanja [10]. Pore, nastale pri kemičnem krčenju pomembno vplivajo na avtogeno krčenje [9].

4.3 Avtogeno krčenje

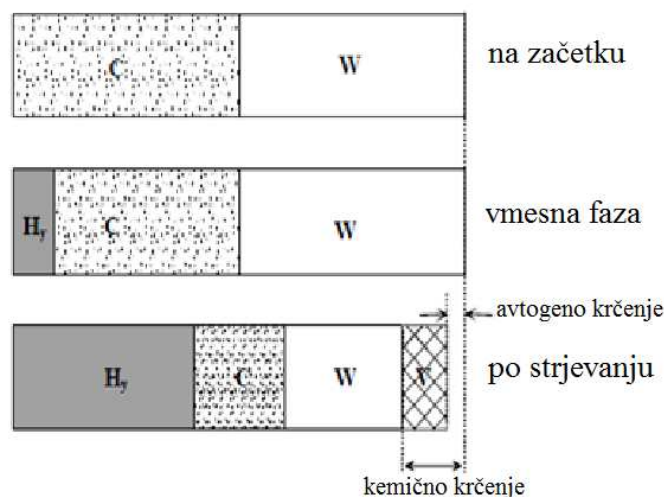
Avtogeno krčenje, ki ga nekateri imenujejo tudi hidratacijsko krčenje, nastopi med procesom hidratacije cementsa in je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna [9]. Zaprti izotermalni sistem je pogoj za merjenje tega krčenja [6]. To pomeni, da je temperatura konstantna in ne pride do izmenjave vlage med vzorcem in zunanjim okoljem. Takšne pogoje zagotovimo tako, da vzorec zatesnimo z nepropustno folijo ali s površinskim premazom [9].

Avtogeno krčenje nastopi v kratkem času po zamešanju betona in je definirano z razvojem hidratacije cementsa [10]. Z napredovanjem hidratacije cementsa se povečuje prostornina por, ki so posledica kemičnega krčenja. Povečanje prostornine zaprtih por je po Boylovem zakonu povezano z zmanjšanjem tlaka v porah. Zmanjševanje tlaka vpliva na spremembo relativne vlage v porah. Po vzpostavitvi termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste izhlapeva naprej prosta kapilarna voda, nato voda iz adsorpcijske ploskve stene pore. Adsorpcijska plast vode na stenah por se tanjša in povzroča natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi. V procesu strjevanja cementne paste je elastični modul razmeroma nizek. Struktura, zaradi izrazitega viskoznega obnašanja, nima zadostne togosti. Natezne napetosti povzročijo velike zunanje deformacije, ki jih imenujemo avtogeno krčenje. [9].



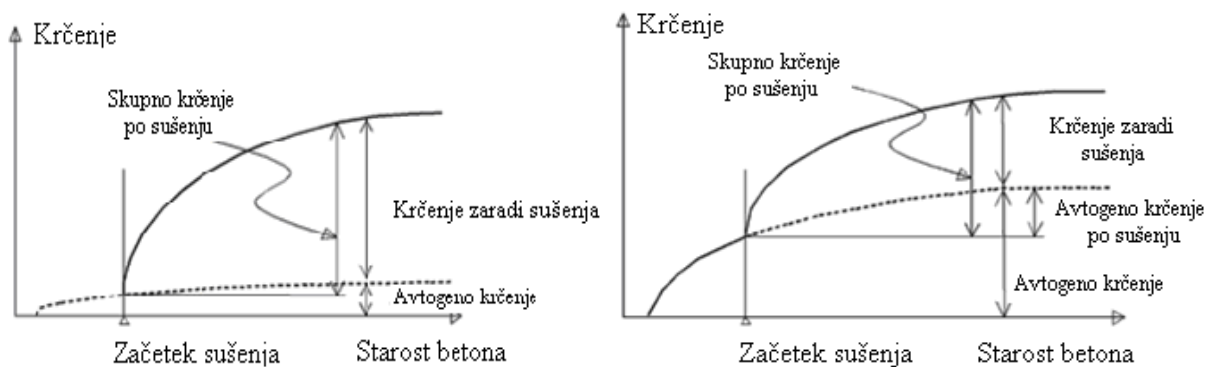
Slika 6: Shematski prikaz prečnega prereza hidratizirajoče cementnetne paste [8]

Slika 6 prikazuje dogajanje med procesom hidratacije. Temno siva barva predstavlja trdno snov sestavljeno iz nehidratiziranega cementa, mikrosilike, produktov hidratacije in drugih snovi. Svetlo siva barva predstavlja poro vodo, bela barva pa pore, ki so zapolnjene z zrakom. Na levem delu slike je prikazan prečni prerez z nizko stopnjo hidratacije, desni del slike predstavlja višjo stopnjo hidratacije. Pri nastajanju hidratacijskih produktov se porablja poro vodo. Povečuje se trdni del cementne paste, zmanjšujejo se pore in nastajajo nove pore, ki so posledica kemičnega krčenja. Pri vezanju porne vode v hidratacijske produkte, se povečujejo ukrivljenosti meniskov v kapilarnih porah, saj se pore zmanjšujejo. Pri tem pride do povečanja natezних sil na stene por. Rezultanta natezних sil na stene por je obratno sorazmerna radiju ukrivljenosti površine vode v pori. Natezna obremenitev sten por povzroči volumsko krčenje cementne paste. To imenujemo krčenje zaradi samoizsuševanja ali avtogeno krčenje [8].



Slika 7: Razmerje med avtogenim in kemičnim krčenjem: C- nehidratiziran cement, W- nehidratizirana voda, Hy- produkt hidratacije, V- pore nastale v procesu hidratacije [10]

V betonih običajnih trdnosti je avtogeno krčenje zanemarljivo majhno v primerjavi s krčenjem zaradi sušenja [9], kar je razvidno iz slike 8, levo [10]. Nasprotno, pri betonih visoke trdnosti predstavlja avtogeno krčenje znaten del prostorninske spremembe, ki poleg temperaturnih deformacij in krčenja betona zaradi sušenja vpliva na nastanek mikro razpok [15]. Mikro razpoke se lahko povežejo v neprekinjen vzorec in tvorijo makro razpoke [6]. Potek krčenja je prikazan na sliki 8, desno [10]. Na splošno velja, da se avtogeno krčenje povečuje z zmanjšanjem vodocementnega faktorja in z dodatkom mikrosilike, kar je verjetno posledica finejše mikrostrukture hidratizirane cementne paste [9]. Dodatek superplastifikatorjev nekoliko zmanjša avtogeno krčenje, kar je lahko razlog rahlega učinka superplastifikatorjev na stopnjo hidratizacije [15].



Slika 8: Levo: krčenje v betonu običajne trdnosti, desno: krčenje v betonu visoke trdnosti [10]

4.4 Temperaturno krčenje

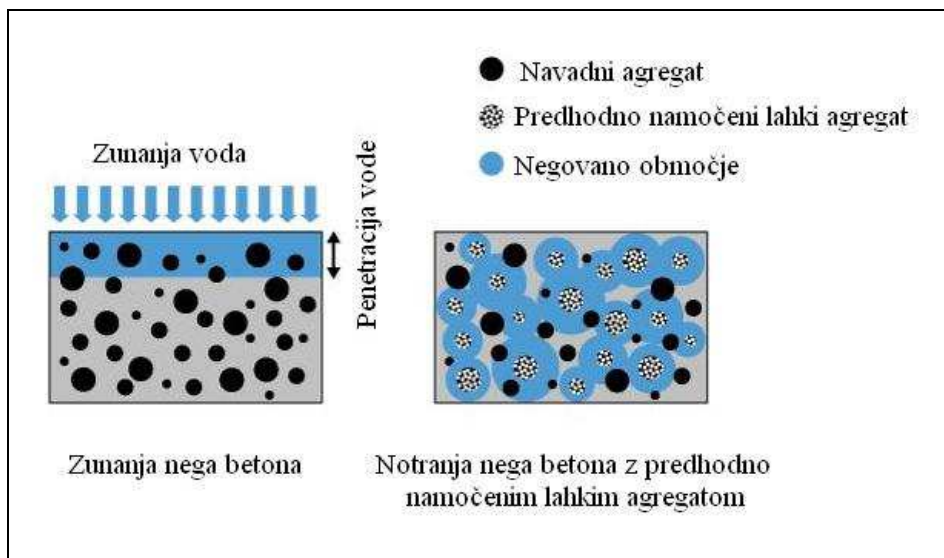
Temperaturno deformiranje se pojavi v zgodnji starosti betona zaradi spremembe temperature pri procesu hidratacije. Pri kemični reakciji cementa in vode se v betonu sprošča toplota, kar povzroči temperaturno širjenje betona. Z nadaljevanjem procesa, se mešanica ohlaja in tako se pojavljajo deformacije krčenja [10]. Od razmer v okolici in od sestave betona je odvisna velikost spremembe temperature betona [9]. Do razpokanja betona lahko pride zaradi diferencialnih napetosti, ki so posledica razlike med temperaturo v notranjosti in na površini betona. Velikost temperaturnega deformiranja je odvisna od koeficienta temperaturnega raztezka. Sveži beton ima večji koeficient linearnega temperaturnega raztezka, kot otrdeli beton. Ker se beton istočasno deformira zaradi spremembe temperature in avtogenega krčenja, je ocena koeficienta temperaturnega raztezka zahtevna. Privzamemo lahko vrednost koeficienta temperaturnega raztezka otrdelega betona $\alpha_T = 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ [9].

4.5 Krčenje zaradi sušenja

Krčenje betona zaradi sušenja je definirano z zmanjšanjem prostornine betona zaradi izhlapevanja vode v okolico [10]. Pri betonih visoke trdnosti je krčenje zaradi sušenja veliko manjše kot pri betonih običajne trdnosti, ker imajo nizko vodocementno razmerje in majhno prepustnost. Zaradi nizkega vodocementnega razmerja, se pri hidrataciji cementa porabi skoraj vsa voda tako, da praktično ni izmenjave vlage med betonom in zunanjo okolico. Betoni visoke trdnosti vsebujejo mikrosiliko, kar vpliva na zmanjšanje poroznosti hidratizirane cementne paste. Cementna pasta je bolj gosta in stično območje med cementnim kamnom in agregatom je kvalitetnejše, kar ovira krčenje zaradi sušenja [9].

5 NOTRANJA NEGA BETONA IN LAHKI AGREGATI

Da bi preprečili nastanek razpok, ki so posledica avtogenega krčenja, in zagotovili predvidene lastnosti ter trajnost betonskih konstrukcij, je zelo pomembna pravilna nega betona [3]. Pri betonih visoke trdnosti zunanja nega betona ni učinkovita, saj zaradi zelo fine strukture por voda ne more prodrati v element. Notranja nega omogoča, da se voda bolj enakomerno razporedi po mešanici [14].



Slika 9: Primerjava zunanje in notranje nege betona, ki se izvaja z uporabo nasičenega lahkega agregata [14]

V procesu hidratacije se del vode kemijsko veže na hidratacijske produkte, nekaj vode pa začne prehajati iz mešanice v okolico, katere relativna vlažnost je običajno nižja od relativne vlažnosti betona. Za premik vode iz praznin in slojev vode ob stenah praznin, na katere delujejo velike sile lepljenja, so potrebne precejšnje sile. Čim tanjše so kapilare in s čim večjimi silami se voda odleplja s stene praznine, tem večje so sile v hidratizirani cementni pasti, ki se strjuje. Te sile povzročijo velike deformacije betonskega elementa, ki jih imenujemo avtogene deformacije ali avtogeno krčenje. Njihovo intenzivnost zmanjšujemo z ustreznim nego [8].

Zaradi kemičnega krčenja v cementni pasti nastanejo prazne pore, kar vodi do zmanjšanja relativne vlage v elementu. Krčenje lahko povzroči predčasne razpoke [2]. Notranjo nego betona izvajamo z notranjimi rezervoarji vode, ki so zrna predhodno namočenega lahkega agregata. Lahki agregati so praviloma zelo porozni in imajo slabe mehanske lastnosti [21]. Priporoča se, da se lahki agregat namoči vsaj 24 ur pred uporabo, da ne pride do ločevanja delcev med uporabo.

Z lahkimi agregati ustvarimo notranje rezervoarje vode, iz katerih agregat oddaja potrebno vodo za bolj učinkovito hidratacijo ali za nadomeščanje izgubljene vlage v procesu samoizsuševanja [14]. Mehanizem tega transporta je povezan s kapilarnim efektom, saj so pore v cementni pasti precej manjše od tistih v lahkem agregatu in od tod je kapilarni srk lažji [1]. S popolno odstranitvijo avtogenega krčenja s pomočjo notranje nege bi se zmanjšala tlačna trdnost in povečali bi se stroški betona [20].

6 EKSPERIMENTALNI DEL

V okvirju eksperimentalnega dela smo raziskovali časovni potek krčenja betonov visoke trdnosti. Izdelali smo beton visoke trdnosti s predhodno namočenim lahkim agregatom. Pri tem smo primerjali avtogeno krčenje betonov, ki ne vsebujejo lahkega agregata in betone, ki vsebujejo lahki agregat frakcij 0/2 mm in frakcije 2/4 mm. Vodovezivno razmerje preizkušenih betonov je 0.36. Za izboljšanje mehanskih in reoloških lastnosti smo betonom dodajali mikrosiliko, saj bistveno spremeni mikrostrukturo betona. Vgradljivost betona smo izboljšali z dodatkom superplastifikatorja, ki smo ga zamešali z mikrosiliko [9].

6.1 Uporabljeni materiali

Pri izdelavi betonskih mešanic smo uporabili drobljeni apnenčev agregat iz separacije Kresnice, z največjim premerom zrn 16 mm, in mivko Termit. Uporabljen je bil cement CEM I 52,5R iz cementarne v Anhovem. Da bi dosegli višje trdnosti betona smo del cementa nadomestili z mineralnim dodatkom mikrosiliko. Primerno vgradljivost smo dosegli z dodajanjem superplastifikatorja Antikorodin. To je praškasta mešanica superplastifikatorja in mikrosilike, ki je po kemični sestavi sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzat [9]. Mešanice vseh preiskušancev so vsebovale 400 kg/m³ veziva, cementa in mikrosilike. Delež predhodno namočenega lahkega agregata je znašal 12 % celotne prostornine agregata v betonski mešanici. Del drobljenega kamenega agregata frakcije 0/4 mm smo nadomestili s predhodno namočenih agregatom frakcije 0/4 mm. Vodocementno razmerje preizkušancev je 0,40. V preglednicah od 2 do 5 so podane lastnosti uporabljenih materialov.

Preglednica 2: Lastnosti uporabljenega agregata [9]

Nahajališče	Separacija Kresnice	
Vrsta kamnine	apnenec	
Mineraloško-petrografska analiza	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 prekristaliziranim 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 prekristaljen v mikrosparit oz. sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.

Preglednica 3: Lastnosti uporabljene mivke [9]

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

Preglednica 4: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata [4]

Nahajališče	Kamnolom Jezersko
Vrsta kamnine	lehnjak
Opis	Lehnjak je luknjičavo-karbonatna kamnina svetlo rumenorjave barve, ki nastaja ob vodi. Za lehnjake je značilna velika poroznost in slabe mehanske lastnosti. Bistveni mineral, iz katerega je sestavljen lehnjak je kalcit. Odporen je proti zmrzali. Zaradi poroznosti je uporaben za vertikalne površine.

Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega cementa CEM I 52,5R [9]

KEMIJSKA SESTAVA CEMENTA		
A. hidravlično vezivo		
	SiO ₂	20.22%
	Al ₂ O ₃	5.10%
	Fe ₂ O ₃	3.17%
	CaO	63.92%

B. primesi		
	netopni ostanek v HCl	0.22%
	žaroizguba	0.82%
	prosti CaO	0.76%
	MgO	2.15%
	SO ₃	2.81%

FIZIKALNO-KEMIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CEMENTA		
finost mletja		
	ostanek na situ odprtine 90 µm	0.90%
	specifična površina	4400 cm ² /g

vezanje		
	poraba vode za standardno konsistenco	28.3%
	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

Preglednica 6: Lastnosti uporabljenih dodatkov [9]

MIKROSILIKA	
KEMIJSKA SESTAVA MIKROSILIKE	
SiO ₂	95.50 - 95.90%
Al ₂ O ₃	0.13 - 0.17%
Fe ₂ O ₃	0.09 - 0.12%
CaO	0.35 - 0.55%
C prosti	1.10 - 1.30%
C iz SiC	0.30 - 0.50%
C celotni	1.50 - 1.80%
SiC	1.10 - 1.60%
MgO	0.25 - 0.30%
SO ₃	0.20 - 0.30%
N ₂ O	0.10 - 0.15%
K ₂	0.45 - 0.60%
žaroizguba	0.80 - 1.40%
FIZIKALNO-KEMIJSKE LASTNOSTI MIKROSILIKE	
nasipna gostota	400 - 550 kg/m ³
prostorninska masa	2200 kg/m ³
specifična površina (BET)	21 - 23 m ² /g
velikost delcev (80%)	0.1 - 0.3 μm
vlaga	0.25 - 0.30%
ANTI KORODIN	
gostota pri 20°C (g/cm ³)	2.40
delež suhe snovi pri 105°C (%)	100.00

6.2 Sestava preiskovanih betonskih mešanic

Preglednica 7: Sestava primerjalne betonske mešanice, privzeta iz doktorske disertacije [9]

Mešanica	HSC-1600-CEM I 52,5R
Agregat (kg/m ³)	
Mivka	285
Agregat Kresnice 0/2 mm	853
Agregat Kresnice 2/4 mm	
Agregat Kresnice 4/8 mm	284
Agregat Kresnice 8/16 mm	474
Količina veziva (kg/m ³)	400
Količina mikrosilike (% veziva)	10
Vodovezivno razmerje	0.36
Vsebnost zraka (%)	2.8
Posed (cm)	7.5
f _{cm,28dni} (MPa)	82.96

Preglednica 8: Sestava betonskih mešanic, ki vsebujejo lahki agregat

Mešanica	HSC-1600-LWA(0-2mm)- -12% CEM I 52,5R	HSC-1600-LWA(2-4mm)- -12% CEM I 52,5R
Agregat (kg/m ³)		
Mivka	285	285
Agregat Kresnice 0/2 mm	114	341
Agregat Kresnice 2/4 mm	512	284
Lahki agregat lehnjak 0/2 mm	121	0
Lahki agregat lehnjak 2/4 mm	0	121
Agregat Kresnice 4/8 mm	284	284
Agregat Kresnice 8/16 mm	474	474
Količina veziva (kg/m ³)	400	400
Količina mikrosilike (% veziva)	10	10
Vodovezivno razmerje	0.36	0.36
Vsebnost zraka (%)	2	1.6
Posed (cm)	4	18
$f_{cm,28dni}$ (MPa)	94.56	84.40

6.3 Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice

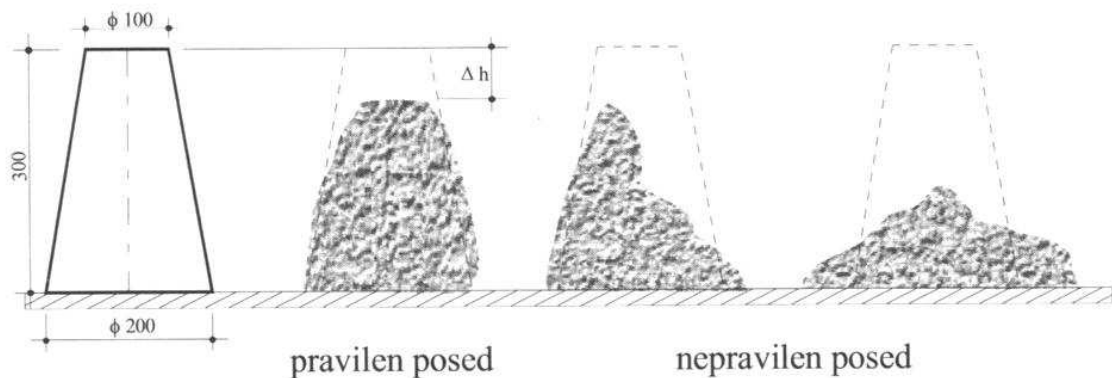
Glede na veljavne standarde določamo konsistenco betona na štiri različne načine [23]:

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

Pri preskušanju konsistence sveže betonske mešanice smo uporabili metode s postopkom poseda in s postopkom razleza.

6.3.1 Metoda s posedom po standardu SIST EN 12350-2

Metoda s posedom je najbolj preprosta in dovolj zanesljiva metoda za kvantitativno določanje konsistence tekočih, srednje in mehko plastičnih svežih betonskih mešanic. Za preiskavo potrebujemo konus, ki je postavljen na vibracijsko mizo. Konus polnimo z zidarsko žlico v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast nabijemo s 25 udarci s standardno kovinsko palico, premera 16 mm, z zaobljenim vrhom, dolžine 60 cm. Prvo plast prebadamo po celi višini. Pri nabijanju naslednjih plasti palica prodira do spodnje plasti. Ko nabijemo zgornjo plast, odstranimo odvečni beton in zravnamo površino z zidarsko žlico. Po tridesetih sekundah dvignemo konus in ga postavimo zraven betonskega stožca. Konus dvigujemo počasi, 5 do 10 s. Izmerimo razliko višin tako, da položimo ravnilo ali standardno palico za nabijanje na zgornji rob konusa. Razlika višin je mera konsistence po metodi s posedom [23].



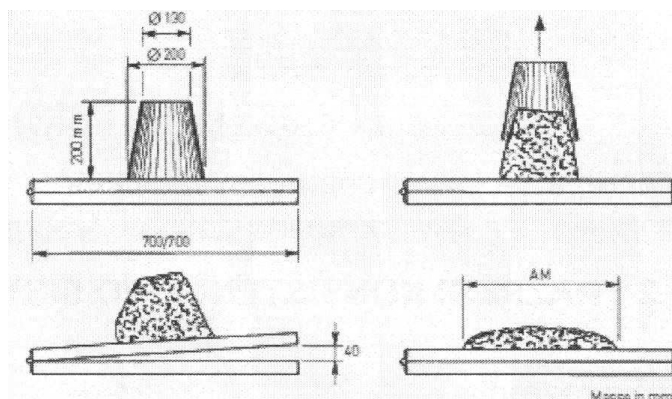
Slika 10: Prikaz poseda svežega betonskega preiskovanja [23]



Slika 11: Postopek s posedom

6.3.2 Metoda z razlezom po standardu SIST EN 12350-5

Metoda z razlezom je enostavna metoda, ki se uporablja za plastične in tekoče betonske mešanice. Na razlezno mizo postavimo skrajšani konus in ga napolnimo v dveh približno enakih plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci z lesnim nabijačem, prečnega prereza 4x4 cm. Ko nabijemo zgornjo plast, odstranimo presežek betona. Po tridesetih sekundah odstranimo konus. Stopimo na stopalko na sprednji strani osnovnega okvirja razlezne mize, dvignemo zgornjo ploščo do distančnika in jo spustimo. Postopek ponovimo petnajstkrat. Betonska mešanica se razleže po mizi. Povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene betonske mešanice, vzporednih s stranicama mize predstavlja mero konsistence po metodi z razlezom [23].



Slika 12: Shematski prikaz metode z razlezom [23]



Slika 13: Merjenje razleza svežega betona

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

Posodo napolnimo s svežim betonom v treh slojih. Presežek betona odstranimo s kovinskim ravnilom. Po odstranitvi svežega betona mora ostati zgornja površina betona v posodi gladka. Pazljivo očistimo nalegajoče površine posode in pokrova. Nato pritrdimo pokrov na osnovno posodo. Skozi odprtini z ventiloma vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki, zapremo ventila. Z ročno zračno črpalko vnesemo v pokrov toliko zraka, da kazalec na manometru kaže nič. V primeru, da je pritisk v komori previsok, ga lahko izpustimo skozi izpustni ventil. Nekaj sekund po izravnavanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Porozimetrijski indeks predstavlja delež zraka v odstotku glede na celotno prostornino svežega betona v mešanici [23].

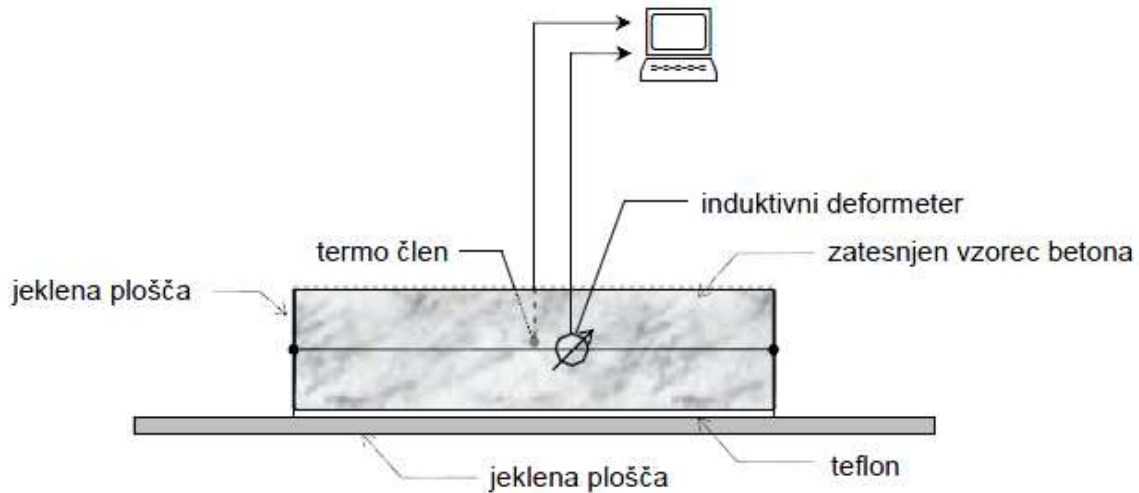


Slika 14: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v svežem betonu

6.4 Merjenje krčenja betona

Deformiranje betonskega vzorca v času intenzivnega strjevanja je sestavljeno iz avtogenega krčenja in temperaturnih deformacij. Izmerjene vrednosti pomikov predstavljajo skupni seštevek spremembe temperature in avtogenega krčenja. Velikost avtogenega krčenja zaradi spremembe temperature določimo na podlagi ocenjenega linearnega temperaturnega koeficienta raztezka strjujočega betona. Avtogeno krčenje pa predstavlja razliko celotnega in temperaturnega deformiranja.

Avtogeno krčenje smo merili na treh betonskih prizmah dimenzij 40x40x10 cm. Po zamešanju sveže betonske mešanice smo beton vgradili v jeklene kalupe, ki smo jih predhodno pripravili za merjenje avtogenega krčenja. Na dno jeklenega kalupa smo položili teflonsko ploščo, debeline 1 mm, da bi zmanjšali trenje med betonom in podlago. Vzdolžne stranice smo zatesnili s polipropilensko folijo, saj smo tako preprečili izmenjavo vlage med betonom in okolico. Da ni bilo preprečeno nabrekanja betona, smo na oba konca kalupa vstavili stiropor, debeline 2 mm. Prav tako smo na oba konca kalupa vstavili jeklene pločevine, z izvrtano majhno luknjo, skozi katero smo z zunanje strani vstavili vijak. Z notranje strani smo postavili ploščice z iglo, ovito z izolirnim trakom. Ploščica je približno 1 cm oddaljena od notranje strani kalupa. Potem smo jo pritrdili z matico in vlili svežo betonsko mešanico v kalupe. Pripravljene kalupe, z nastavljenimi merskimi reperji, smo s pomočjo merskih uric povezali z računalnikom. Vzorce smo shranjevali v zaprtem prostoru pri konstantni vlagi 70% in temperaturi 20°C. V sredino betonskega vzorca smo vstavili termo člen za merjenje temperature, saj je v procesu strjevanja betona, poleg avtogenega krčenja, prisotno tudi temperaturno deformiranje. Ko je temperatura v betonskem vzorcu začela naraščati, smo začeli elektronsko meriti krčenje. Po 24 urah smo vzorce odstranili iz kalupov in meritve krčenja nadaljevali z mehanskim nasadnim deformetrom [9].



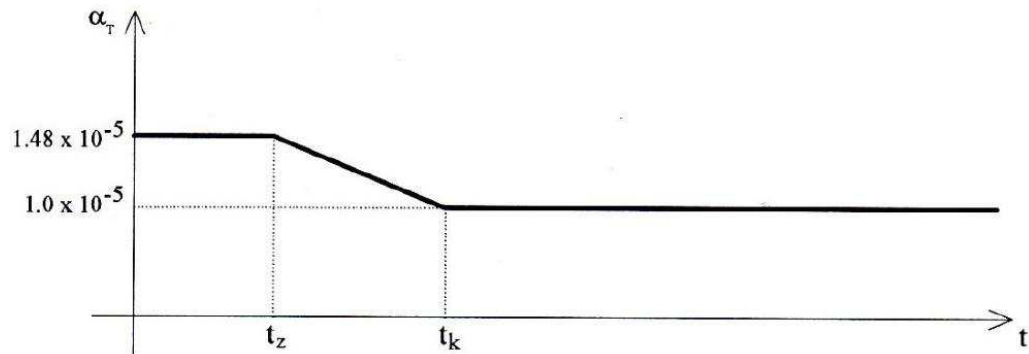
Slika 15: Shematski prikaz merjenja zgodnjega avtogenega krčenja betona [9]



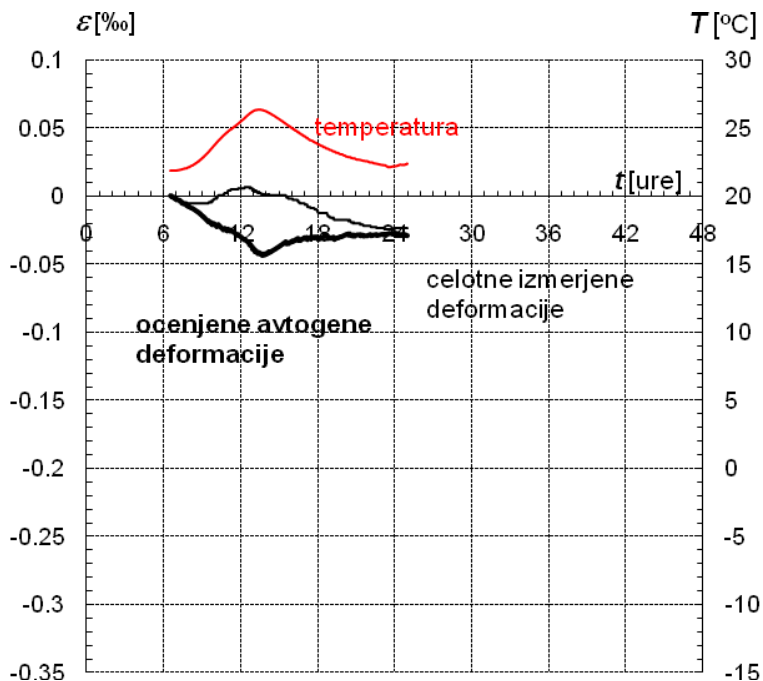
Slika 16: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev

6.5 Rezultati in analize meritev avtogenega krčenja

Velikost avtogenega krčenja smo določili kot razliko celotnega izmerjenega krčenja in temperaturnega krčenja betona. Velikost temperaturnih deformacij smo ocenili s koeficientom linearnega raztezka svežega betona, na spremembi temperature, ki smo jo izmerili v vzorcu. Koeficient linearnega toplotnega raztezka svežega betona znaša $\alpha_{T1}=1,48 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, koeficient linearnega toplotnega raztezka otrdelega betona pa $\alpha_{T2}=1,00 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Od časa, ko je temperatura betona začela naraščati, do časa, ko se je temperatura vzorca izenačila s temperaturo okolja, smo upoštevali linearen potek temperaturnega koeficienta raztezka betona [9].



Slika 17: Časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona [9]



Slika 18: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R v prvih 24 urah

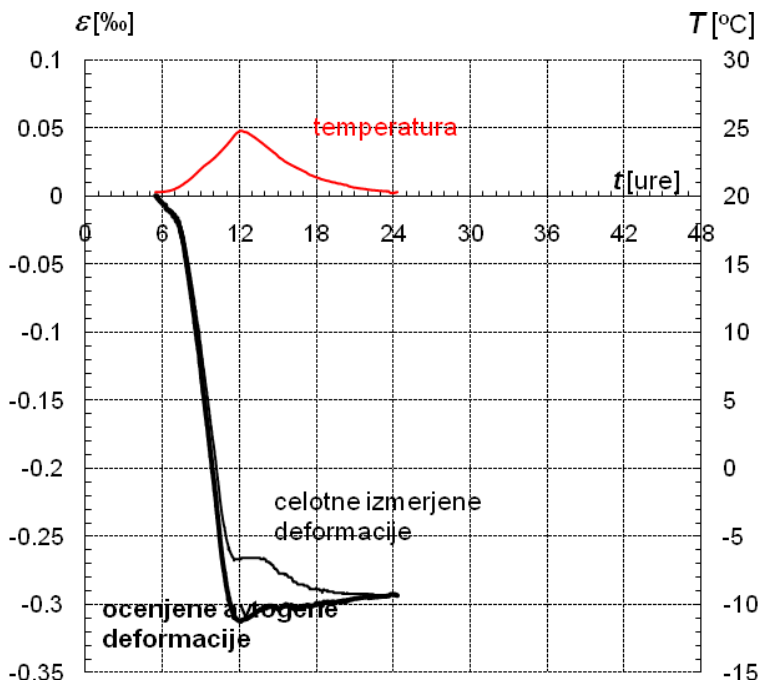
Na sliki 18 sta prikazana časovni potek temperature v betonu, celotne izmerjene deformacije in potek ocenjenega avtogenega krčenja betona do 24 ur po zamešanju. Vzorec je bil 24 ur zapečaten s folijo, s čemer smo preprečili izhlapevanje vode. Trdimo lahko, da se beton ni krčil zaradi sušenja. Deformiranje betonskega vzorca v začetnem obdobju je bilo sestavljeno le iz avtogenega krčenja in temperaturnih deformacij betona [9].

Povečanje temperature betona med procesom hidratacije ugodno vpliva na celotno krčenje mladega betona, saj je beton začel nabrekati. Na sliki opazimo rahlo zmanjšanje avtogenega krčenja med časom, ko je v betonu dosežena največja temperatura, in časom, ko se temperatura betona izenači s temperaturo okolice. Ko začne temperatura v betonu padati, se beton krči zaradi spremembe temperature. Prostornina zaprtih por v cementnemu kamnu se zmanjša, poveča se relativna vlažnost v porah. Zmanjšajo se natezne sile, ki delujejo na stene por in posledično se zmanjša avtogeno krčenje [9].

Celotno krčenje vzorca HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R po prvem dnevu je -0,02456‰. Ocenjeno avtogeno krčenje istega vzorca je -0,02776‰. Skrček vzorca po 28 dnevih je -0,196‰. V prvem dnevu se je izvršilo le 14,2% osemindvajsetdnevnega avtogenega krčenja. Trdnost betona po 28 dneh je 84,37 MPa.

Preglednica 9: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R

Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R (‰)	
preskušane	po 24 urah
1	-0,019
2	-0,045
3	-0,019
povprečje skrčkov	-0,028
standardni odklon	±0,012

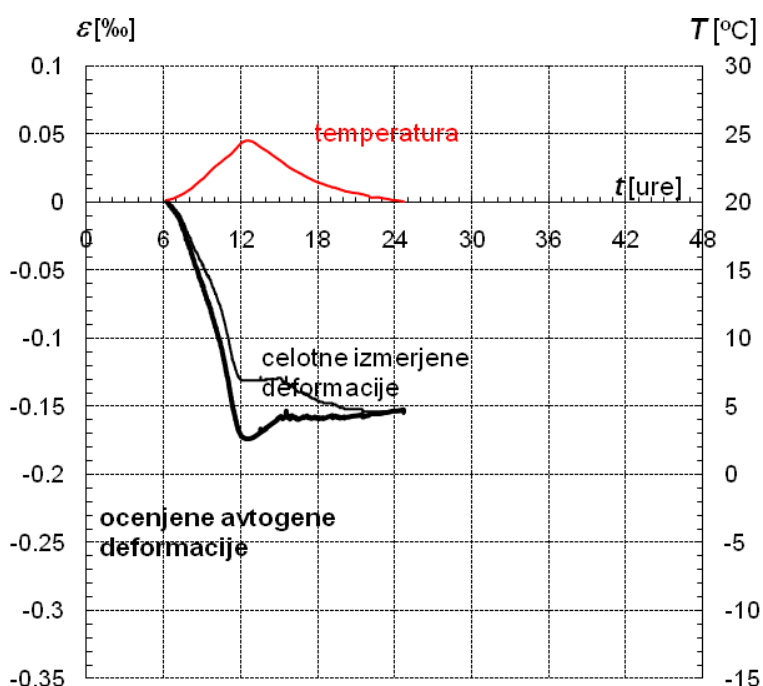


Slika 19: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_CEM_I_52,5R

Celotno krčenje vzorca HSC_1600_CEM_I_52,5R po prvem dnevu je -0,29298‰. Ocenjeno avtogeno krčenje istega vzorca je -0,29262‰. Skrček vzorca po 28 dneh je -0,455‰. V prvem dnevu se je razvilo že več kot 60% osemindvajsetdnevnega avtogenega krčenja. Trdnost betona po 28 dneh je 82,96 MPa.

Preglednica 10: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_CEM_I_52,5R

Avtogeno krčenje betona HSC_1600_CEM_I_52,5R (‰)	
preskušane	po 24 urah
1	-0,309
2	-0,335
3	-0,235
povprečje skrčkov	-0,293
standardni odklon	±0,042



Slika 20: Časovni potek krčenja in temperature betona HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R

Celotno krčenje vzorca HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R po prvem dnevu je -0,15351%. Ocenjeno avtogeno krčenje istega vzorca je -0,15338%. Skrček vzorca po 28 dneh je -0,325%. V prvem dnevu se je razvila polovica osemindvajsetdnevnega avtogenega krčenja. Trdnost betona po 28 dneh je 94,56 MPa.

Preglednica 11: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R

Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R (‰)	
preskušane	po 24 urah
1	0,127
2	0,204
3	0,127
povprečje skrčkov	0,153
standardni odklon	±0,036

6.5.1 Primerjava avtogenega krčenja betonov ki vsebujejo predhodno namočeni lahki agregat ter visokotrdnega betona brez izboljšav

Preglednica 12: Primerjava avtogenega krčenja za različne mešanice

Mešanica	Ocenjeno avtogeno krčenje
HSC_1600_CEM_I_52,5R	-0,29262‰
HSC_1600_LWA_12%(0-2)_CEM_I_52,5R	-0,15338‰
HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R	-0,02776‰

Opazili smo, da je avtogeno krčenje betona visoke trdnosti, ki vsebuje lahki agregat frakcije 0-2 mm, v primerjavi z betonom visoke trdnosti, ki ni bil notranje negovan za 90,8% manjše. Z lahkimi agregati ustvarimo notranje rezervoarje vode, iz katerih agregat oddaja potrebno vodo za hidratacijo cementa ali pa nadomešča izgubljeno vlago v procesu samoizsuševanja, in je krčenje takega betona manjše.

Avtogeno krčenje betona, ki vsebuje lahki agregat frakcije 2-4mm, v primerjavi z betonom, ki vsebuje lahki agregat frakcije 0-2mm, je manjše za 81,9% - približno pet krat. Pri mešanici HSC_1600_LWA_12%(2-4)_CEM_I_52,5R je avtogeno krčenje zanemarljivo majhno. Predvidevamo, da so pore v agregatu frakcije 2-4 mm tolikšne, da vpijejo več vode kot agregat frakcije 0-2 mm in da se voda, ki se shrani v teh porah porabi v večji meri, kar vpliva na počasnejši razvoj in nižje vrednosti avtogenega krčenja.

Zanimivo je, da trdnost betona z lahkim agregatom večjih frakcij (2-4mm) ni manjša v primerjavi s tlačno trdnostjo betona, ki ni bil notranje negovan. Po 28 dneh je tlačna trdnost betona z lahkim agregatom večjih frakcij 84,4 MPa. Tlačna trdnost betona z lahkim agregatom manjših frakcij (0-2mm) je večja za 10,8% v primerjavi s tlačno trdnostjo betona, ki vsebuje frakcije 2-4 mm. Po 28 dneh je tlačna trdnost betona z lahkim agregatom manjših frakcij 94,6 MPa. Predvidevamo, da beton ki vsebuje lahki agregat frakcije 0-2 mm ima gostejšo strukturo in se okrog zrn pojavijo manjše koncentracije napetosti, kar vpliva na povečanje tlačne trdnosti.

7 ZAKLJUČKI

V diplomskem delu smo raziskovali vpliv zrnavostne strukture lahkega agregata na potek zgodnjega avtogenega krčenja, ki je izrazitejše pri betonih visoke trdnosti. Rezultati in analize meritev temeljijo na lastnem eksperimentalnem delu.

Avtogeno krčenje je posledica samoizsuševanja v porah cementega kamna, saj se zaradi nizkega vodocementnega razmerja pri hidrationskem procesu porabi skoraj vsa voda. Da bi preprečili nastanek razpok smo beton notranje negovali s predhodno namočenim agregatom.

Velikost avtogenega krčenja betona HSC 1600 LWA 12%(2-4) CEM I 52,5R smo primerjali z velikostjo avtogenega krčenja betona HSC 1600 LWA 12%(0-2) CEM I 52,5R in primerjalnega betona HSC 1600 CEM I 52,5R, ki ni dodatno notranje negovan. Ugotovili smo, da je pri uporabi lahkega agregata frakcije 2-4 mm avtogeno krčenje betona približno 5 krat manjše v primerjavi s krčenjem betona, ki vsebuje lahki agregat frakcije 0-2 mm. V primerjavi s krčenjem betona, ki ni dodatno notranje negovan, je krčenje približno deset krat manjše.

Uporaba agregata frakcije 2-4 mm je doprinesla k manjšemu avtogenemu krčenju, ki je praktično zanemarljivo majhno. Predvidevamo, da je manjše krčenje posledica velike poroznosti lahkega agregata, ki vpije več vode.

Sočasno smo merili tudi tlačne trdnosti betonov. Iz rezultatov preiskav je razvidno, da je tlačna trdnost betona, ki vsebuje lahki agregat frakcije 2-4 mm malo večja kot tlačna trdnost betona, ki ni dodatno notranje negovan. Vrednost tlačne trdnosti betona HSC 1600 LWA 12%(2-4) CEM I 52,5R je 101,7% vrednosti tlačne trdnosti primerjalnega betona HSC 1600 CEM I 52,5R.

V diplomskem delu podajamo zaključek, da dodajanje predhodno namočenega lahkega agregata ugodno vpliva na avtogeno krčenje, medtem ko na velikost tlačne trdnosti betona vpliva razmeroma malo.

Rezultati so bili pridobljeni na majhnem vzorcu. Da bi naše trditve veljale kot verodostojne, bi bilo potrebno opraviti preiskave na večjem številu preizkušancev.

LITERATURA

- [1] Bentur, A., Igarashi S., Kovler K. 2001. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*: 1587-1591.
- [2] Bentz, D.P., Snyder, K.A. 1999. Protected paste volume in concrete Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and Concrete Research*: 1863-1867.
- [3] Cusson, D., Hooeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked lightweight aggregate sand for prevention of autogenous shrinkage cracking. *Cement and Concrete Research*: 757-765.
- [4] Dodatki za beton. 2013. Kamnolom Jezersko, <http://www.marmor-hotavlje.si/sl/kamnolomi/kamnolom-jezersko> (pridobljeno 15.08.2013)
- [5] Đureković, A. 1996. Cement, cementni kompozit i dodaci za beton. Zagreb, Institut građevinarstva Hrvatske: 1-185.
- [6] Mejlhede Jensen, O., Freiesleben Hansen P. 2001. Autogenous deformation and RH-change in perspective. *Cement and Concrete Research*: 1859-1865.
- [7] Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materijali 2. Beograd, Akademska misao: 58-62.
- [8] Saje, D. , Bandelj, B., Lopatič, J., Saje, F. 2008. Notranja nega betona. Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 9. – 10. oktober 2008. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: 245-252.
- [9] Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D.Saje): 1-99.
- [10] Šahinagić-Isović, M., Markovski, G., Čerček, M. 2012. Deformacije skupljanja betona-uzroci i vrste. *Gradjevinar*, 9/2012: 727-734.
- [11] Šušteršič, J., Ukrainczyk V. 2006. Vpliv lastnosti agregatov na lastnosti betonov. Slovenski kolokvij o betonih – Agregati v betonu, Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 1-8.
- [12] Šušteršič, J. 2007. Doseganje posebnih lastnosti betona z dodatki. Slovenski kolokvij o betonih – Posebne lastnosti betona z dodatki, Ljubljana, Slovenija, 29. maj 2007. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 9-18.
- [13] Tazawa, E., Miyazawa, S. 1995. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste. *Cement and Concrete Research*: 281-287.
- [14] Weiss, J., Bentz, D., Schindler, A., Lura, P. 2012. Internal Curing. *Construction Issues*.
- [15] Yang, Y., Sato, R., Kawai, K. 2005. Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages. *Cement and Concrete Research*: 449-456.
- [16] Zajc, A. 2000. Materiali za kakovosten beton. Slovenski kolokvij o betonih - Optimizacija kakovosti betona, Ljubljana, Slovenija, 18. maj 2000. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 21-26.
- [17] Zajc, A. 2004. Kaj so betoni visokih zmogljivosti. Slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, Slovenija, 18. maj 2006. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 1-3.
- [18] Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. Slovenski kolokvij o betonih - Posebne lastnosti betonov z dodatki, Ljubljana, Slovenija, 29. maj 2007. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 1-7.
- [19] Završki, M. 2004. Možnosti in pogoji uporabe visokovrednih betonov pri gradnji premostitvenih objektov. Slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 17-25.
- [20] Zhutovsky, S., Kovler K., Bentur, A. 2004. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*: 499-507.

- [21] Zhutovsky, S., Kovler K. 2012. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*: 20-26.
- [22] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preiskovanje materialov: 91 str.
- [23] Žarnić, R., Bosiljkov, B., Bosiljkov Bokan, V., Dujič B. 2008. Gradiva vaje 2008/2009. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preiskovanje materialov: 54-62.