

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:

Žnidaršič, Š. 2012. Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 33 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:

Žnidaršič, Š. 2012. Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 33 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidatka:

ŠPELA ŽNIDARŠIČ

**VPLIV VSEBNOSTI JEKLENIH VLAKEN IN
PREHODNO NAMOČENEGA LAHKEGA AGREGATA
NA KRČENJE BETONA VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 6/B-GR

**THE INFLUENCE OF STEEL FIBRES CONTENT AND
PRE-SOAKED LIGHTWEIGHT AGGREGATE ON
SHRINKAGE OF HIGH STRENGTH CONCRETE**

Graduation thesis No.: 6/B-GR

Mentor:
doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:
izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 21. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Špela Žnidaršič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na 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, 16.8.2012

Špela Žnidaršič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.4:691.3(043.2)
Avtor:	Špela Žnidaršič
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti
Tip dokumenta:	diplomska naloga
Obseg in oprema:	33 str., 18 pregl., 26 sl., 2 en.
Ključne besede:	avtogeno krčenje, jeklena vlakna, beton visoke trdnosti, lahek agregat, notranja nega betona

Izvleček

V diplomski nalogi obravnavam betone visokih trdnosti, ki so vsebovali jeklena vlakna in predhodno namočen lahek agregat. V betonski mešanici je bilo 0,5% prostornine jeklenih vlaken. 12% agregata smo zamenjali s predhodno namočenim lahkim agregatom. Poudarek študije je na analizi avtogenega krčenja, ki je pri betonih visokih trdnosti izrazitejše v primerjavi z betoni običajnih trdnosti. Avtogeno krčenje smo v prvem dnevu merili elektronsko, saj je takrat dogajanje najbolj burno, v naslednjih dneh pa smo merili s pomočjo nasadnega deformetra. Poleg avtogenega krčenja smo analizirali še krčenje zaradi sušenja in celotno krčenje vzorcev. Eksperimentalno smo določili tlačne trdnosti izdelanih betonov. V svoji diplomski nalogi navajam ugotovitev preiskav, da dodatek jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona bistveno ne vpliva, precej pa se izboljša tlačna trdnost betonov.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.4:691.3(043.2)
Author: Špela Žnidaršič
Supervisor: Asist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title: The Influence of Steel Fibres Content and Pre-Soaked Lightweight Aggregate on Shrinkage of High Strength Concrete
Document type: graduation thesis
Scope and tools: 35 p., 18 tab., 26 fig., 2 eq.
Keywords: autogenous shrinkage, steel fibres, high strength concrete, lightweight aggregate

Abstract

This thesis studies high strength concrete reinforced with steel fibers and pre-soaked lightweight aggregate. Steel fibers added to the steel mixture represented 0.5% of the total volume. 12% of the aggregate was replaced with pre-soaked lightweight aggregate. The focus of the analysis was on the autogenous shrinkage, which is very distinct at high strength concrete. The shrinkage was measured electronically during the first day. Later we measured it with a mobile displacement transducer. Beside the autogenous shrinkage the drying and the total shrinkage of concrete were also analysed. Using experiments the compressive strengths of the concrete were measured. It can be concluded that by adding steel fibers and pre soaked aggregate shrinkage is little affected, but the compressive strength of concrete improves.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu. Zahvaljujem pa se tudi družini in vsem bližnjim, ki so mi v času študija in v času nastajanja diplomske naloge stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 SPLOŠNO O BETONIH VISOKE TRDNOSTI	2
2.1 Zakaj uporabljamo betone visokih trdnosti?	2
2.2 Tehnološki ukrepi za doseganje visokih trdnosti	2
3 SESTAVINE BETONOV VISOKIH TRDNOSTI	3
3.1 Cement	4
3.1.1 Proizvodnja cementa	4
3.1.2 Hidratacija cementa	4
3.2 Voda	5
3.3 Agregat	6
3.4 Dodatki	6
3.4.1 Mineralni dodatki	6
3.4.2 Kemijski dodatki	7
4 KRČENJE	8
4.1 Krčenje zaradi sušenja	9
4.2 Plastično krčenje	9
4.3 Kemično krčenje	9
4.4 Avtogeno krčenje	10
4.5 Temperaturno krčenje	10
5 LAHKI AGREGATI IN NOTRANJA NEGA BETONA	12
6 VLAKNA	14
6.1 Vpliv vlaken na lastnosti betona	15
6.2 Jeklena vlakna	15
7 EKSPERIMENTALNI DEL	17
7.1 Uporabljeni materiali	17
7.2 Sestava betonskih mešanic	20
7.3 Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice	20
7.3.1 Postopek s posedom po standardu SIST EN 12350-2	20

7.3.2	Postopek z razlezom po standardu SIST EN 12350-5	22
7.3.3	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po SIST EN 12350-7.....	23
7.4	Merjenje tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti.....	24
7.5	Merjenje krčenja betona.....	25
7.5.1	Avtogeno krčenje visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata.....	28
7.5.2	Krčenje zaradi sušenja visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata.....	29
7.5.3	Celotno krčenje visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata.....	30
7.6	Primerjava krčenj visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata ter visokotrdnega betona brez izboljšav	31
8	ZAKLJUČKI.....	33
	LITERATURA.....	34

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Prostorninski deleži sestavin v svežem (a) in otrdelem (b) betonu [17]</i>	3
<i>Slika 2: Prikaz hidratacije cementne paste s časom [8]</i>	5
<i>Slika 3: Shematični prikaz različnih vrednosti v/c razmerja [1]</i>	5
<i>Slika 4: Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem in konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa [1]</i>	8
<i>Slika 5: Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja</i>	9
<i>Slika 6: Shematični prikaz kemičnega in avtogenega krčenja</i>	10
<i>Slika 7: Tipična krivulja notranje temperature strjujočega betona</i>	11
<i>Slika 8: Vpliv premera zrna agregata na razpored vlaken [12]</i>	14
<i>Slika 9: Diagrami σ-ϵ betonov</i>	15
<i>Slika 10: Različni tipi jeklenih vlaken [2]</i>	15
<i>Slika 11: Uporabljena jeklena vlakna</i>	17
<i>Slika 12: Prikaz poseba sveže betonske mešanice [25]</i>	21
<i>Slika 13: Postopek s posedom</i>	22
<i>Slika 14: Shematični prikaz preskusa z razlezom</i>	23
<i>Slika 15: Merjenje razleza betonske mešanice</i>	23
<i>Slika 16: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu</i>	24
<i>Slika 17: Preskušanje tlačne trdnosti betonov</i>	25
<i>Slika 18: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev</i>	26
<i>Slika 19: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona [15]</i>	26
<i>Slika 20: Prikaz elektronskega merjenja avtogenega in temperaturnega krčenja betona</i>	27
<i>Slika 21: Shematični prikaz merjenja celotnega krčenja betonskega preskušanca</i>	27
<i>Slika 22: Prikaz deformacij betona HSC_1600_LWA_JV v prvih 48 urah</i>	28
<i>Slika 23: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV</i>	28
<i>Slika 24: Krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV</i>	29
<i>Slika 25: Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV</i>	30
<i>Slika 26: Primerjava krčenja betonov HSC_1600_LWA_JV in HSC_1600</i>	31

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Komponente klinkerja</i>	4
<i>Preglednica 2: Opis hidratacije cementa.....</i>	5
<i>Preglednica 3: Lastnosti uporabljene mivke</i>	18
<i>Preglednica 4: Lastnosti uporabljenega agregata</i>	18
<i>Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata</i>	18
<i>Preglednica 7: Lastnosti uporabljenega cementa</i>	18
<i>Preglednica 8: Uporabljeni dodatki</i>	19
<i>Preglednica 9: Sestava betonskih mešanic.....</i>	20
<i>Preglednica 10: Razredi poseda po SIST EN 206-1</i>	21
<i>Preglednica 11: Razredi razleza po SIST EN 206-1</i>	23
<i>Preglednica 12: Tlačna trdnost betona HSC_1600_LWA_JV pri starosti 7 dni in pripadajoča standardna deviacija.....</i>	24
<i>Preglednica 13: Tlačna trdnost betona HSC_1600_LWA_JV pri starosti 28 dni</i>	24
<i>Preglednica 14: Primerjava tlačnih trdnosti betonov HSC_1600_LWA_JV, HSC_1600_LWA in HSC_1600</i>	24
<i>Preglednica 15: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV</i>	29
<i>Preglednica 16: Krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV.....</i>	30
<i>Preglednica 17: Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV.....</i>	30
<i>Preglednica 18: Povprečen skrček betonov zaradi avtogenega krčenja [%].....</i>	31
<i>Preglednica 19: : Povprečen skrček vzorcev zaradi celotnega krčenja [%].....</i>	31

1 UVOD

Beton je v današnjem času eden izmed najpogosteje uporabljenih gradbenih materialov. Odlikujejo ga predvsem visoka tlačna trdnost, nizka cena in lahka vgradljivost. Ima pa tudi nekaj slabih lastnosti. To so krčenje in lezenje betona ter majhna natezna trdnost. Zaradi teh lastnosti se betonska tehnologija kar naprej nadgrajuje in širi, saj želimo z različnimi dodatki čim bolj izboljšati lastnosti betona.

Betoni visoke trdnosti imajo nizko vodovozivno razmerje. Zaradi tega tovrstni betoni hitreje razpokajo, kar je lahko posledica avtogenega krčenja. Avtogenega krčenja ne moremo preprečiti z uporabo klasičnih metod negovanja svežega betona, ki temeljijo na površinskem negovanju. Za zmanjševanje avtogenega krčenja uporabljamo predhodno namočen lahek agregat, s katerim poskrbimo za notranje negovanje betona.

V svojem diplomskem delu sem se ukvarjala z zmanjševanjem avtogenega krčenja betona s pomočjo dodanih jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata. S pomočjo predhodno namočenega lahkega agregata smo svež beton notranje negovali, z jeklenimi vlakni pa smo želeli doseči čim boljše povezanost sveže betonske mešanice.

Avtogeno krčenje betona smo merili na prizmah do starosti 28 dni. Največji del avtogenega krčenja se izvrši v prvem dnevu starosti betona, zato smo prvi dan krčenje merili elektronsko, nato pa smo merili z nasadnim deformetrom. Merili smo tudi celotno krčenje betona, tako smo dobili tudi vrednosti krčenja zaradi sušenja.

Diplomska naloga vsebuje poleg uvoda še sedem poglavij. V poglavju *Splošno o betonih visokih trdnosti* so predstavljene glavne lastnosti betonov visokih trdnosti, razlogi zakaj jih je smiselno uporabljati in tehnološki ukrepi za izdelavo betonov visokih trdnosti. V naslednjem poglavju *Sestavine betonov visokih trdnosti* je opisano, kako doseči tovrstne betone, kaj vsebujejo, da postanejo tako trdni in s čim ohranimo njihovo vgradljivost. Ko se sveži beton strjuje, se krči. V poglavju *Krčenje* so opisane različne vrste krčenja in njihovo delovanje. Da bi čim bolj zmanjšali krčenje betona je potrebno beton pravilno negovati. Za zmanjšanje avtogenega krčenja je potrebna notranja nega. Notranjo nego betona najlažje izvajamo z vgradnjo predhodno namočenega lahkega agregata, kar je opisano v poglavju *Lahki agregati in notranja nega betona*. V naslednjem poglavju *Vlakna* so opisana vlakna, ki jih dodajamo betonom za izboljšanje njihovih lastnosti. V zadnjem poglavju Eksperimentalni del se nahajajo opisi mojih raziskav, njihovi rezultati in analize.

2 SPLOŠNO O BETONIH VISOKE TRDNOSTI

V današnjem času zahteva gradnja in obnova vseh vrst objektov uporabo cenovno primernih, obstojnih in okolju prijaznih gradbenih materialov. Med take materiale lahko prištevamo tudi betone. Beton je danes najpogosteje uporabljan gradbeni material, saj ima zelo ugodne lastnosti, kot so visoka tlačna trdnost, lahka obdelovalnost in nizka cena. Ob tem pa ima tudi nekaj slabih lastnosti, kot na primer nizka natezna trdnost, krhkost in neobstojnost.

Beton visoke trdnosti se obnaša drugače kot običajen beton. Ima višjo tlačno trdnost, nekatere druge lastnosti pa so slabše. Visoko trdne betone je mogoče doseči s posebnimi tehnološkimi ukrepi, s katerimi se spremeni struktura betona (zmanjšanje poroznosti, nehomogenosti, mikrorazpok). Taki betoni imajo gosto strukturo in visoko stopnjo homogenosti. Struktura in poroznost betona sta pomembni lastnosti betona, ki sta odvisni od hidratacije cementa. Poroznost določa mehanske lastnosti betona in njegovo obstojnost. Vsak beton je porozen. Praznine se pojavijo v strukturi zaradi hidratacije, saj je prostornina produktov hidratacije manjša kot je prostornina vhodnih materialov (vode in cementa), pa tudi zaradi dejstva, da se za doseganje primerne obdelovalnosti betona sveža betonska mešanica pripravlja z večjo količino vode [20]. V vsakem betonu je prisotna tudi poroznost zaradi napak pri vgrajevanju. Pore v betonu so različnih oblik. V kapilarnih porah je voda šibko vezana, zato je izmenjava vode z okolico enostavna. Po kapilarnih porah lahko v notranjost prodrejo soli in kisline, ki povzročajo korozijo betona.

2.1 Zakaj uporabljamo betone visokih trdnosti?

- za zagotavljanje visokih trdnosti v zgodnji starosti betona,
- če želimo pridobiti na prostoru z zmanjšanjem dimenzij konstrukcijskih elementov,
- gradnja mostov z dolgo življenjsko dobo,
- izboljšanje trajnosti krovnih slojev na mostovih,
- zagotavljanje specifičnih zahtev, kot na primer trajnost konstrukcije, elastični modul, upogibna trdnost pri jezovih, temeljih v pristaniščih in parkirnih hišah).

2.2 Tehnološki ukrepi za doseganje visokih trdnosti

Če želimo doseči betone visokih zmogljivosti, je potrebno spremeniti strukturo betona. Beton visoke trdnosti ima precej dobrih lastnosti, vendar pa lahko s tem, ko izboljšamo eno lastnost, poslabšamo drugo. Taki betoni imajo gosto strukturo in visoko stopnjo homogenosti.

1. Mineralni dodatek mikrosilika

Mineralni dodatki so drobni delci, ki zapolnjujejo medzrnske prostore in reagirajo s kalcijevim hidroksidom.

2. Nizko vodocementno razmerje

Nizko v/c razmerje, ki se pri betonih visokih trdnosti giblje praviloma med 0,22 in 0,35, lahko dosežemo z uporabo superplastifikatorjev. V primerjavi z običajnimi betoni vsebujejo večje količine cementa, zaradi česar imajo večjo tlačno trdnost in so bolj krhki.

3. Dobre lastnosti agregata

Na kakovostno sestavo betona vplivajo trdnost, velikost, oblika, površinska tekstura agregata, mineraloška sestava, čistost agregata in ustrezna granulometrijska sestava.

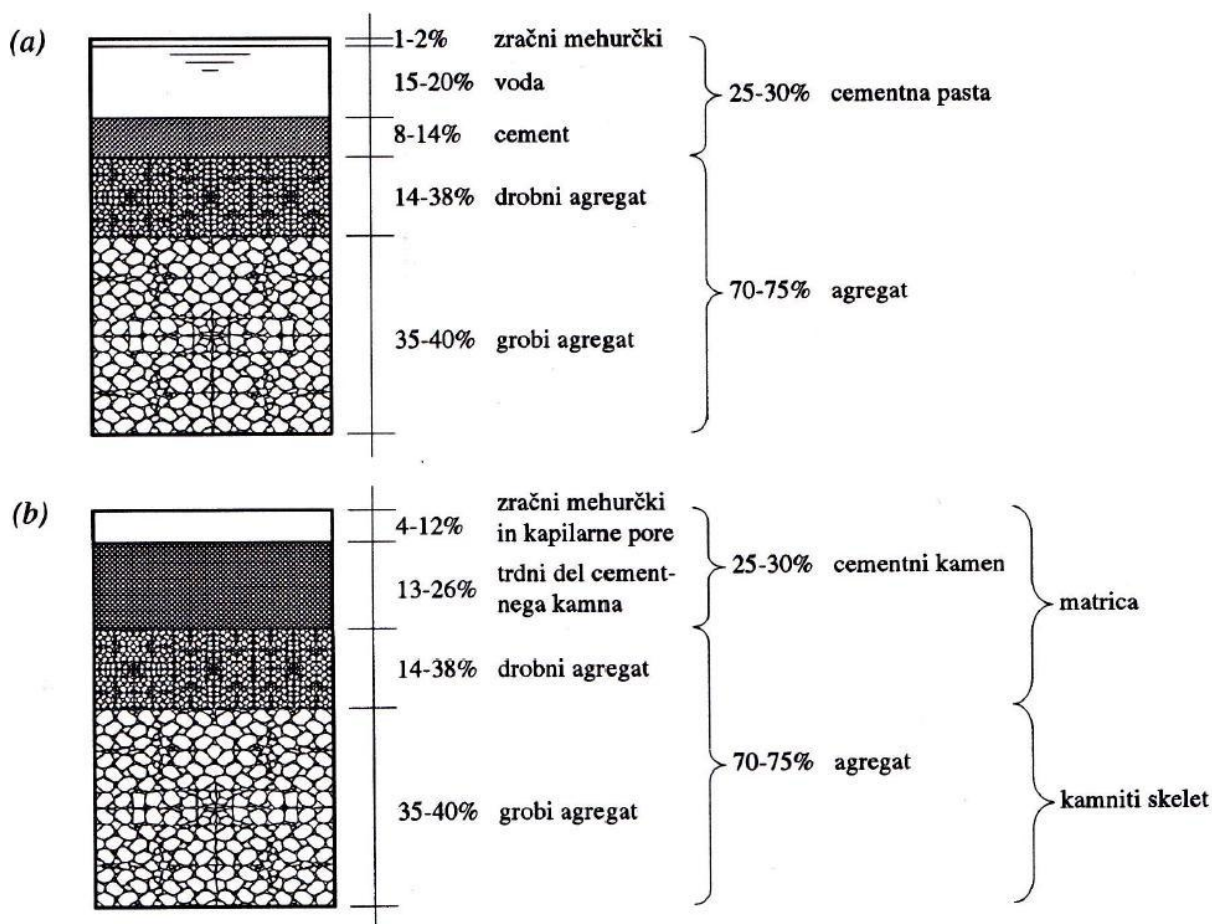
4. Več drobnih delcev

Maksimalno zrno agregata je lahko veliko 16 mm.

3 SESTAVINE BETONOV VISOKIH TRDNOSTI

Sestavine betona visoke trdnosti so podobne kot pri betonu normalne trdnosti. Glavne sestavine so enake. Največjo prostornino v betonu zavzame agregat. Pri betonih visokih trdnosti je premer največjega zrna manjši kot pri betonih običajne trdnosti. Ta praviloma ne sme biti večji kot 16mm. Z omejitvijo velikosti največjega zrna dosežemo bolj homogeno strukturo betona in manjšo poroznost. Potrebna je visoka trdnost stika med cementnim kamnom in zrnem agregata, zato imajo prednost lomljeni agregati. Pomembni sestavini v betonih sta še cement in voda. Pri izdelavi betonov visoke trdnosti se mešanici doda mineralne ali kemične dodatke. Prostorninski deleži sestavin se po hidrataciji spremenijo (Slika 1).

Mineralni dodatek mikrosilika v betonu izboljša mehanske lastnosti in njegovo trajnost. Hidratacija cementa, katere izvor je kemijska reakcija portland cementa z vodo, ima za posledico formiranje hidratizirane cementne paste, ki je bistven element trdnosti betona. Pri procesu strjevanja betona poleg cementa sodelujejo tudi mineralni dodatki. Kot mineralne dodatke betonom visoke trdnosti najpogosteje uporabljamo mikrosiliko in elektrofiltrski pepel. Mineralni dodatek mikrosilika v betonu izboljša mehanske lastnosti in njegovo trajnost. Mikrosilika je pucolan, kar pomeni, da se med pucolansko reakcijo v prisotnosti kalcijevega hidroksida tvorijo kalcijevi silikat hidrati, ki so nosilci trdnosti cementnega kamna. [16]



Slika 1: Prostorninski deleži sestavin v svežem (a) in otrdelem (b) betonu [17]

3.1 Cement

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo veže in se strdi. Iz cementne paste v procesu hidratacije nastaja cementni kamen.

3.1.1 Proizvodnja cementa

Cement pridobivajo iz mineralov, ki so prisotni v naravnem laporju, apnencu in glini. Ker v Sloveniji ni dovolj čistega apnenca, se uporablja tudi dolomit. Te surovine meljejo po mokrem in suhem postopku, nato pa surovino žgejo. Dobljena surovina se imenuje cementni klinker, ki ga nato zmeljejo v fin prah, imenovan portland cement. Portland cement je silikatni cement. Njegova glavna sestavina so silikati kalcija C_3S .

Preglednica 1: Komponente klinkerja

spojina	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
komponenta	C	S	A	F

Minerali cementnega klinkerja:

- trikalcijev silikat (alit) C_3S
- dikalcijev silikat (belit) C_2S
- trikalcijev aluminat (celit) C_3A
- tetrakalcijev aluminat (zelit) C_4AF

3.1.2 Hidratacija cementa

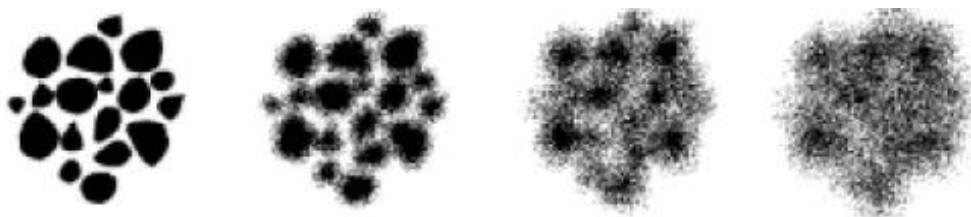
Hidratacija je proces vezanja vode in cementa (*Slika 2*). Sestavlja ga zapleten niz reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na drugo. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov. Hitrost hidratacije je odvisna tudi od vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice in prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.

Na proces hidratacije in na količino sproščene toplote ter posledično na časovni razvoj krčenja in trdnosti cementnega kamna oz. betona vplivajo zlasti naslednji parametri [15]:

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

Preglednica 2: Opis hidratacije cementa

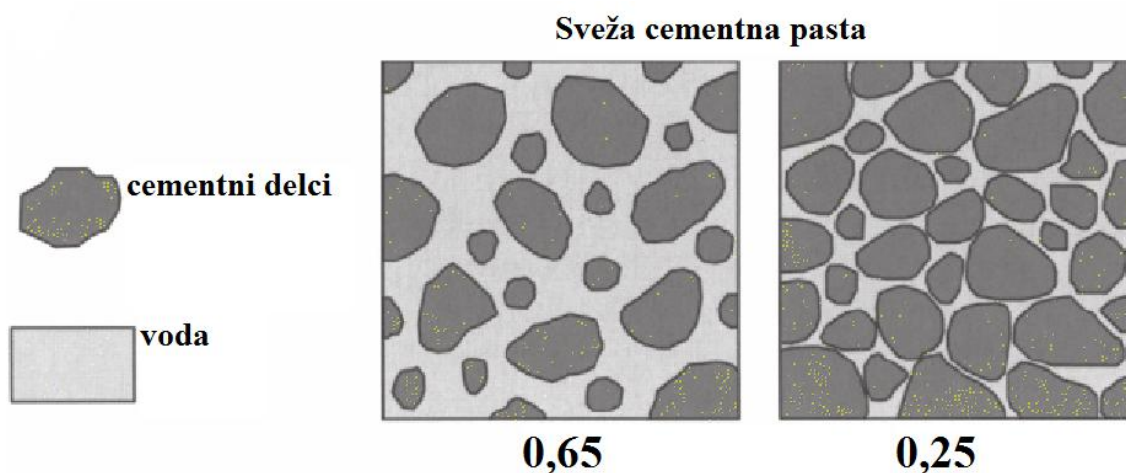
Faza	Opis dogajanja
1.	Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Nastajati začnejo heksagonalni prizmatični kristali kalcijevega hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Zaradi kemijske reakcije med sadro in minerali kalcijevega aluminata pa nastaja tudi etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih.
2.	V tej fazi nastajajo nitasti kristali kalcijevega silikat hidrata imenovanega C-S-H gel. Kristali rastejo s površine cementnih zrn navzven, v nekaj urah pa v grobem razdelijo z vodo zapolnjene prostore in tako nastane prva struktura povezanih trdnih delcev.
3.	V tej fazi cementni kamen otrdi. Kristali C-S-H gela rastejo in tako zgostijo strukturno mrežo trdnih delcev cementnega kamna. Ti kristali so nosilci trdnosti cementnega kamna.



Slika 2: Prikaz hidratacije cementne paste s časom [8]

3.2 Voda

Voda je osnovna sestavina betona. S pomočjo nje je omogočen proces hidratacije cementa in strjevanja betona. Potrebna je za obdelovalnost betonske mešanice, kar omogoča vgradnjo in izdelavo betona. Vsebnost vode glede na količino porabljenega cementa v betonu imenujemo vodovezivno razmerje (*Slika 3*). Manjše ko je vodovezivno razmerje, trdnější in trajnejši je beton.



Slika 3: Shematični prikaz različnih vrednost v/c razmerja [1]

Voda, ki jo vgrajujemo v betonsko mešanico, ne sme vsebovati snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo cementa ali povzročile korozijo jeklene armature. Običajna pitna voda ustreza zahtevam, zato se brez posebnih predhodnih preiskav uporablja za izdelavo betona. V vseh ostalih primerih pa je potrebno dokazati kvaliteto vode pred vgradnjo. Za grobo oceno primernosti vode lahko opazujemo njeno motnost, barvo in vonj. Morska voda se za beton ne sme uporabljati, saj lahko pride do korozije jeklene armature.

3.3 Agregat

Najbolj zastopana sestavina v betonski mešanici je agregat. Njegove lastnosti pogojujejo lastnosti betonske mešanice in otrdelega betona. Agregat za beton mora biti trden in primerno trajen, saj se drugače od betona ne more pričakovati teh lastnosti.

V svežem betonu so zrna agregata povezana v celoto s pomočjo cementne paste. Cementna pasta mora biti v mešanici enakomerno porazdeljena, zapolnjen mora biti vsak prostor med zrna agregata. V betonski mešanici so zastopane različne frakcije agregata. Zrnastostno strukturo agregata nam določa granulometrijska krivulja.

3.4 Dodatki

Dodatki v betonu so kemijski ali mineralni proizvodi, ki se dodajajo betonski mešanici. Uporabljamo jih, da izboljšamo lastnosti sveže betonske mešanice ali lastnosti strjenega betona.

3.4.1 Mineralni dodatki

Betonom visoke trdnosti najpogosteje dodajamo mikrosiliko in elektrofilterski pepel iz razreda mineralnih dodatkov:

- mineralni dodatki tipa I:
 - mineralna polnila
 - pigmenti
- mineralni dodatki tipa II:
 - elektrofilterski pepel
 - mikrosilika

3.4.1.1 Mikrosilika

Mikrosilika so kondenzirani hlapi, ki nastanejo kot stranski produkt pri proizvodnji zmesi ferosilicija v elektroobločnih pečeh. Mikrosilika je pucolan. Med pucolansko reakcijo, ko mikrosilika reagira s kalcijevim hidroksidom, ki predstavlja stranski produkt pri hidrataciji cementa, se tvorijo kalcijevi silikat hidrati. Trdnost betona se poveča. Kalcijeve silikat hidrate na kratko imenujemo C-S-H gel. Trdnost betona z vsebnostjo mikrosilike pa se poveča tudi zaradi učinka drobnih delcev, ki zgostijo strukturo cementnega kamna, saj je povprečni premer zrna mikrosilike med 0.1 in 0.2 μm , kar je približno 0.1% premera zrna cementa. Zaradi gostejše in kompaktnejše strukture ima beton večjo trajnost. Izboljša se stik med cementno pasto in zrna agregata. Mikrosilika zmanjša število in velikost kapilar v betonu, zaradi česar je prodiranje tekočin in plinov v notranjost betona težje. Beton je odpornejši na agresivno zunanje okolje. Zaradi drobnejših por je avtogeno krčenje betona večje, saj mikrosilika zaradi svoje finosti zgosti strukturo betona, pri čemer se zmanjša premer kapilarnih por. Ker pa je v betonu z mikrosiliko veliko število majhnih por, je skupna površina por velika, kar pomeni

veliko stopnjo samoizsuševanja. Posledica samoizsuševanja so velike natezne sile na stene por, ki povzročijo avtogeno krčenje betona [16].

3.4.2 Kemijski dodatki

Kemijske dodatke razvrščamo glede na vpliv na lastnosti betona (SIST EN 934-2) [5].

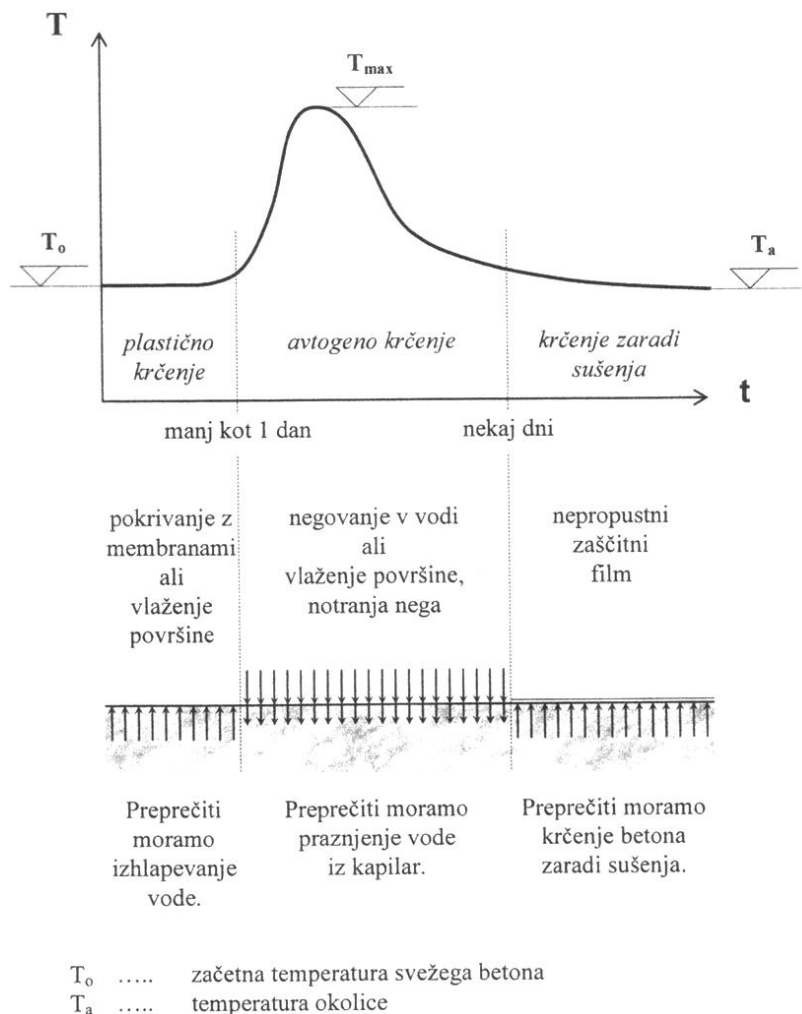
- Plastifikatorji omogočajo znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali povečajo posed oziroma razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkujejo na oba načina.
- Superplastifikatorji omogočajo visoko zmanjšanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali znatno povečajo posed oziroma razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkujejo na oba načina. Superplastifikatorji so dodatki za beton, ki izboljšajo vgradljivost in obdelovalnost betonskih mešanic. Ti materiali so sferične oblike in imajo nalogo, da zmanjšujejo trenje znotraj betonske mešanice s pomočjo svoje oblike, kar poveča vgradljivost in obdelovalnost betonske mešanice. Superplastifikatorji omogočajo nižje vodovozivno razmerje, kar omogoča izdelavo betonov visokih trdnosti.
- Aeranti med mešanjem betona vnesejo kontrolirano količino majhnih, enakomerno porazdeljenih zračnih mehurčkov, ki po strditvi ostanejo v betonu.
- Pospešila vezanja skrajšujejo čas do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdo stanje.
- Pospešila strjevanja povečujejo hitrost razvoja začetnih trdnosti brez ali z vplivom na čas vezanja.
- Zavlačila vezanja podaljšujejo čas do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdo stanje.
- Gostila zmanjšujejo kapilarno vpijanje strjenega betona oziroma malte.

4 KRČENJE

Krčenje je sprememba prostornine betona, ne da bi pri tem nanj delovala kakšna zunanja sila (Slika 4). Sprememba prostornine betonskega elementa je ena najbolj nezaželenih sprememb v konstrukciji, saj povzroči zmanjšanje trdnosti in trajnosti konstrukcije. Zaradi krčenja betona lahko pride do razpok v konstrukciji. Do krčenja pride, ko voda prehaja iz betona v okolico ali pa ko se porablja za hidratacijo cementa. Krčenje betona je posledica krčenja cementne paste. Na velikost krčenja betona vplivajo uporabljeni agregat, količina cementa, vodovezivno razmerje idr. Celotno krčenje je sestavljeno iz krčenja zaradi sušenja, avtogenega krčenja, kemičnega krčenja in plastičnega krčenja.

Krčenje betona je odvisno od:

- vlage in temperature okolja,
- konsistence in trdnostnega razreda okolja,
- dimenzij betonskega prereza,
- deleža cementnega kamna v betonu,
- vodovezivnega razmerja,
- vrste agregata, ki krčenje cementnega kamna ovira.



Slika 4: Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem in konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa [1]

4.1 Krčenje zaradi sušenja

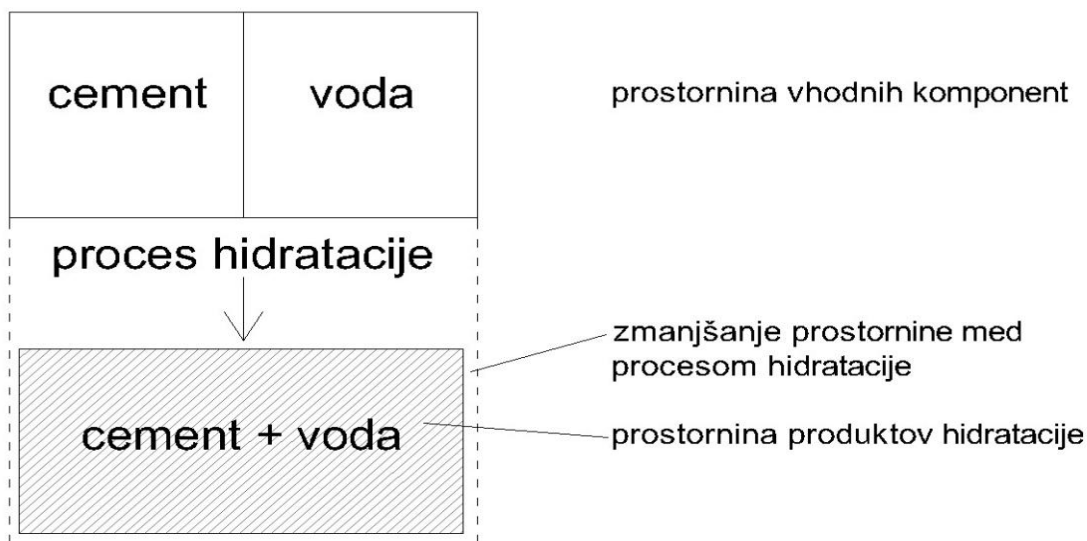
Krčenje zaradi sušenja se pojavi zaradi zmanjšanja prostornine strjenega betona, ko voda izhlapeva iz betona v okolico. Prosta voda gre iz notranjosti proti zunanjemu delu elementa in naprej v okolico. Pri betonih visokih trdnosti je tovrstno krčenje precej manjše kot pri betonih običajne trdnosti, saj je pri visokotrdnih betonih vodovезivno razmerje majhno, zaradi česar se pri hidrataciji cementa porabi skoraj vsa voda. Tovrstni betoni so tudi malo prepustni, zaradi dodajanja mikrosilike. Ker je poroznost manjša, se voda težje premika, zato je krčenje zaradi sušenja izredno majhno.

4.2 Plastično krčenje

Plastično krčenje se pojavi že v času, ko je kompozit še plastičen. Betonski element se krči najprej po svoji površini, zato se pojavljajo napetosti med površino elementa in notranjostjo, kar privede do plastičnega krčenja.

4.3 Kemično krčenje

Kemično krčenje se pojavi pri hidrataciji cementne paste. Zaradi kemičnega vezanja vode in cementa se zmanjša prostornina betonske mešanice (Slika 5). Prostornina produktov hidratacije cementa je manjša, kot je prostornina vhodnih materialov.



Slika 5: Shematični prikaz mehanizma kemičnega krčenja

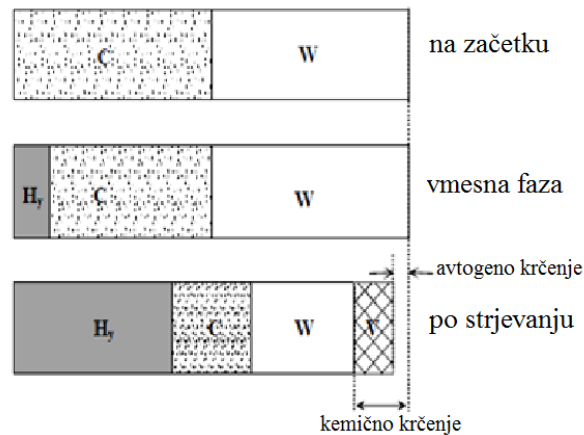
$$CS = \frac{(V_c + V_w) - V_{hid}}{V_{ci} + V_{wi}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Kjer:

- CS ... kemično krčenje
- V_{ci} ... volumen cementa pred zamešanjem
- V_c ... volumen cementa po zamešanju
- V_{wi} ... volumen vode pred zamešanjem
- V_w ... volumen vode po zamešanju
- V_{hid} ... volumen hidratacijskih produktov

4.4 Avtogeno krčenje

Avtogeno krčenje se začne ob začetku vezanja cementa in je posledica samoizsuševanja v porah cementne matrice – porabe vode pri procesu hidratacije (Slika 6). Takšno krčenje merimo tako, da vzorec zatesnimo z vodoneprepustno folijo ali premažemo z vodoneprepustnim premazom in s tem preprečimo izmenjavo vode z okolico. Pri kemičnem krčenju se ustvarjajo dodatne prazne pore, zaradi česar je večja skupna prostornina por v cementni pasti.



Slika 6: Shematični prikaz kemičnega in avtogenega krčenja

C=nehidratiziran cement, W=nehidratizirana voda, H_y=produkti hidratacije, V=pore ustvarjene med hidratacijo

Po Boylevem zakonu je v zaprtih porah produkt prostornine in tlaka konstante, kar pomeni zmanjšanje tlaka pri povečanju prostornine.

$$p \cdot V = \text{konst. (Boylev zakon)} \quad (4.2)$$

Zmanjševanje tlaka posredno vpliva na relativno vlažnost v porah. Ob vzpostavljanju termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste izhlapeva najprej prosta kapilarna voda, nato pa voda iz adsorpcijske ploskve stene pore. Tanjšanje adsorpcijske plasti vode na stenah por povzroča natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi. Natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi povzročajo znatne deformacije, ki se jim struktura upira s svojo trenutno togostjo. V začetnem obdobju procesa strjevanja, ko je modul elastičnosti cementne paste še razmeroma nizek, lahko omenjene natezne napetosti povzročijo velike zunanje deformacije, ki jih imenujemo avtogeno krčenje.

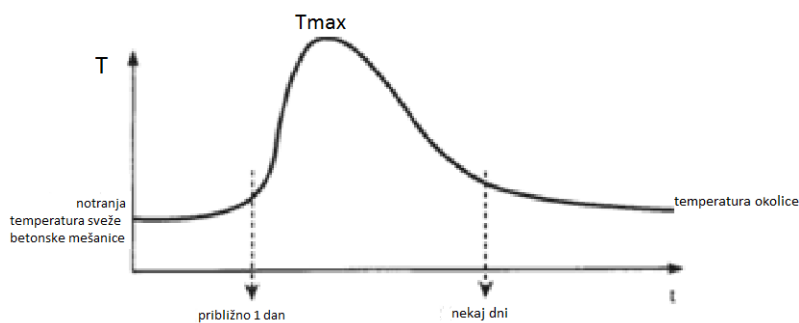
Mikrosilika zaradi svoje finosti zgosti strukturo betona, pri čemer se zmanjša premer kapilarnih por. Ker pa je v betonu z mikrosiliko veliko število majhnih por, je skupna površina por velika, kar pomeni veliko samoizsuševanje. Posledica samoizsuševanja v porah strjujoče se cementne paste so velike natezne sile, ki povzročijo avtogeno krčenje betona. Zato je pri betonih z mikrosiliko v prvem dnevu običajno avtogeno krčenje večje kot pri betonih brez mikrosilike [15].

4.5 Temperaturno krčenje

Pri hidrataciji cementa se sprošča toplota, saj gre za eksotermno reakcijo. Poviša se temperatura betona. Ker prihaja do razlik temperatur v notranosti in zunanosti betonske mešanice, prihaja do napetosti v betonu. Zaradi tega lahko beton razpoka. Ta problem se še bolj izraža pri debelih in masivnih betonskih elementih, saj je potrebno več časa za doseganje izenačenja temperatur.

Temperaturno krčenje je odvisno od koeficienta temperaturnega raztezka, ki se spreminja v času strjevanja betona in je odvisen od sestavin betonske mešanice (agregat, vodovezivno razmerje, ...). Sveži beton ima višji koeficient temperaturne razteznosti, kot otrdeli beton.

Mešanica, ki vsebuje več cementa, bo bolj izpostavljena temperaturnemu raztezanju v začetni fazi vezanja cementa. Po približno dvanajstih urah se mešanica začne ohlajati, pride do temperaturnega krčenja. Ko je beton že starejši, se temperaturne deformacije pojavijo zaradi sprememb temperatur v okolici, kar lahko spet privede do razpokanja betona (*Slika 7*). Težave se pojavijo pri zmrzovanju betona, saj se v porah nahaja prosta voda, ki se razširi, ko zamrzne. Takrat beton razpoka. Do razpok lahko pride tudi pri statično nedoločenih konstrukcijah, ko se element zaradi temperaturnih sprememb ne more prosto razširiti.



Slika 7: Tipična krivulja notranje temperature strjujočega betona

5 LAHKI AGREGATI IN NOTRANJA NEGA BETONA

Po vgraditvi betona je potrebno vzdrževati zadostno vlažnost in primerno temperaturo okolice. tak proces imenujemo nega betona. Pravilna nega zelo pripomore h kvaliteti betona. Poveča se trajnost, trdnost, vodoneprepustnost, odpornost na obrabo, odpornost proti zmrzovanju in tajanju.

Pri procesu hidratacije vezivo veže nase vodo, ki jo potrebuje za proces hidratacije, nekaj vode pa začne iz mešanice prehajati v okolico, saj je relativna vlažnost okolice ponavadi manjša od relativne vlažnosti mešanice. Zaradi premika vode iz praznin se v strukturi strjujočega betona pojavijo napetosti, posledica katerih so deformacije. Z ustrezno nego betona zmanjšamo tovrstne deformacije. Notranja nega se izvaja s pomočjo notranjih rezervoarjev vode, iz katerih se porablja voda kasneje.

Visokotrdni betoni, ki imajo nizko vodocementno razmerje, ne vsebujejo dovolj vode za zasičenje kapilar med zrnji agregata v času strjevanja med procesom hidratacije. Delci cementa, ki ne hidratizirajo neugodno vplivajo na trajnost in vzdržljivost betonskih elementov. Zaradi tega so se sčasoma razvile metode z notranjim dodajanjem vode betonu v času strjevanja, ker so boljše kot metode brez dodajanja notranje vode.

Pomemben vidik nege betona, ki je velikokrat pozabljen, je, da je nega pomembna ne le za pospeševanje hidratacije, ampak tudi za zmanjšanje krčenja betona. Sredstva in metode, ki jih uporabljamo za omejevanje krčenja in razpokanja betona, so:

- mineralni dodatki,
- kemični dodatki,
- vlakna,
- ustrezna nega betona.

Ker imajo betoni visokih trdnosti nizko vodovezivno razmerje, se lahko v zgodnji starosti betona razpoke hitreje pojavijo, zato so potrebni posebni ukrepi. Mešanice za tovrstne betone imajo nizko vsebnost vode, torej je krčenje zaradi sušenja zmanjšano, razlog za večje krčenje je v avtogenem krčenju.

Avtogeno krčenje se ne pojavi zaradi pogojev v okolici, kot na primer zmanjšanje relativne vlage ali spremembe temperature, ampak kot rezultat kemičnega krčenja, ki ne more biti preprečeno. Kemično krčenje se pojavi, ker je prostornina cementne paste po hidrataciji manjša, kot prostornina pred hidratacijo. Glavni razlog zmanjšanja prostornine cementne paste je večja gostota vezane vode v primerjavi z nevezano vodo pred hidratacijo. Kemično krčenje cementne paste je vzrok za avtogeno krčenje betona.

Nega betona se izvaja z namenom hidratacije čim večje količine cementa in za zmanjšanje krčenja betona. Razmeroma velike površinske napetosti v meniskih finih kapilar in velike sile zaradi odlepljanja površinskih slojev vode v prazninah moramo zmanjšati ob tem, da z vnosom dodatne vode v beton ne oslabimo njene strukture – zmanjšamo nosilnosti betonskega elementa.

Notranjo nego betona lahko izvajamo s pomočjo predhodno namočenih lahkih agregatov. Lahke agregate odlikuje visoka vodovpojnost. S tovrstnim agregatom ustvarimo notranje rezervoarje vode, iz katerih v procesu hidratacije cementna pasta srka vodo, kar zavira samoizsuševanje in s tem avtogeno krčenje betonske mešanice. Voda je na ta način enakomerno porazdeljena po cementni pasti in jo je, za proces hidratacije veziva, na razpolago več kot v primeru običajnega betona.

Med hidratacijo se v cementni pasti formira sistem por. Te pore so manjše od por v lahkem agregatu. Ko se vlažnost zmanjša zaradi hidratacije in sušenja, nastane vlažnostni gradient. Ker se v cementi pasti lahki agregat obnaša kot vodni rezervoar, cementne pore absorbirajo vodo iz lahkega agregata s pomočjo kapilarnega srka. Cement, ki še ni reagiral z vodo, ima sedaj na voljo več proste vode za hidratacijo. Na površini se pojavi dodatni vlažnostni gradient zaradi površinskega izhlapevanja. Torej se voda iz lahkega agregata blizu površine porablja hitreje in ustvarja sloj blizu površine, beton se tam zgosti v krajšem času. To zmanjšuje količino vode, ki bi normalno izparela, in izboljšuje notranjo nego betona. Kot rezultat dobimo zmanjšane ali izničene napetosti zaradi sušenja ter manj površinskih razpok. Priporočeno je, da se lahki agregat namoči vsaj 24 ur pred uporabo, saj to preprečuje segregacijo delcev agregata med uporabo. Ni pa priporočljivo dati v mešanico suhega lahkega agregata, saj lahko ti delci vežejo nase vodo iz mešanice, kar zgosti cementno pasto. Vgradljivost svežega betona je slabša.

6 VLAKNA

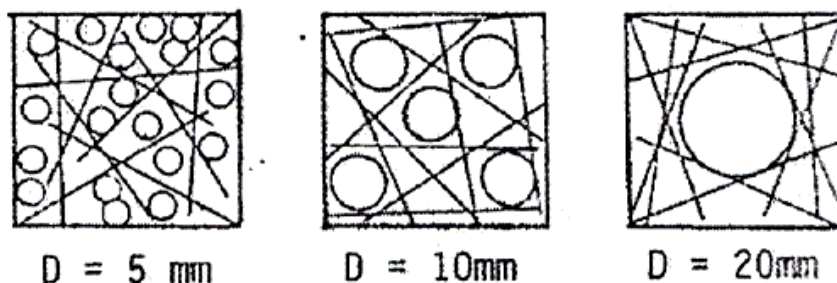
Beton odlikujeta visoka tlačna trdnost in nizka cena. Ostale lastnosti so v primerjavi s tlačno trdnostjo mnogo slabše, vendar se jih da z ustreznimi ukrepi precej izboljšati. Ena izmed izboljšav je dodajanje vlaken v svežo betonsko mešanico. Tako dobimo vlaknaste betone. Vlaknasti beton je beton, ki poleg drugih sestavnih materialov vsebuje vlakna, katerih delež znaša najmanj 0,1%. Z dodajanjem vlaken lahko izboljšamo upogibno trdnost, udarno trdnost, žilavost in odpornost na utrujanje betona. Vlakna so lahko organskega ali anorganskega izvora. Uporabljajo se:

- jeklena vlakna,
- karbonska vlakna,
- polipropilenska vlakna,
- steklena vlakna,
- naravna vlakna.

Najpogosteje se uporabljajo jeklena vlakna.

Uporaba vlaken je namenjena izboljšanju natezne trdnosti (*Slika 9*) in povečanju duktilnosti. Vlaknaste betone uporabljamo predvsem pri podzemnih gradnjah, sanacijah predorov, zavarovanjih gradbenih jam, proizvodnji betonskih izdelkov, za cevi, panele, talne plošče. Pomembna lastnost vlaken je faktor oblike, ki predstavlja razmerje med dolžino in premerom vlakna ter se giblje med 30 in 100.

Maksimalno zrno agregata vlaknastega betona je praviloma manjše kot maksimalno zrno betona brez vlaken. Potrebno je zagotoviti enakomerno razporeditev vlaken v betonski mešanici (*Slika 8*).



Slika 8: Vpliv premera zrna agregata na razpored vlaken [12]

Preprečiti je potrebno oblikovanje gnezd. Gnezda se lahko pojavijo zaradi različnih vzrokov.

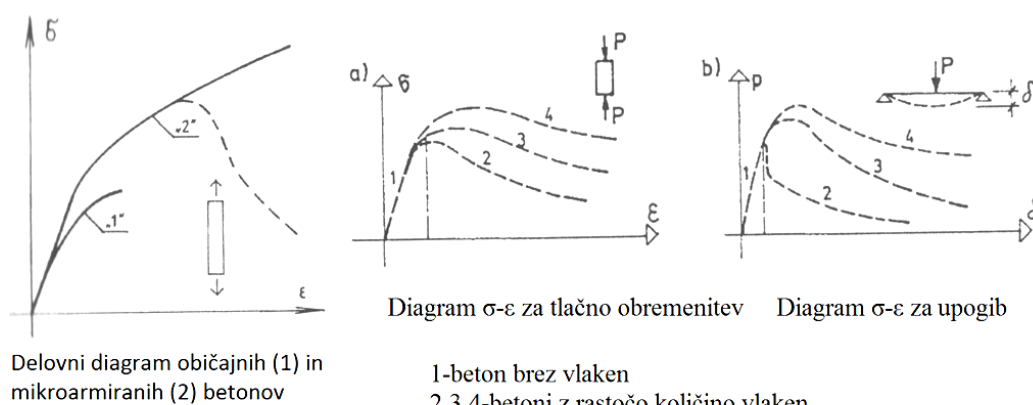
- Vlakna so lahko zlepljena med seboj že pred dodajanjem mešanici. Normalno mešanje teh gnezd ne more odpraviti.
- Vlakna se dodajo prehitro, zato se ne morejo enakomerno razporediti po betonski mešanici.
- Dodana je prevelika količina vlaken.
- Mešalec je preveč obrabljen ali neučinkovit za enakomerno vmešanje vlaken v betonsko mešanico.
- Dodajanje vlaken v mešalec pred dodajanjem ostalih glavnih sestavin povzroči gnezdenje vlaken.

V betonskih elementih se pogosto pojavljajo notranje napetosti, ki nastanejo zaradi krčenja betona. To lahko pripelje do razpok, ko napetosti prekoračijo natezno trdnost betona. Dodana vlakna ugodno vplivajo na pojav razpok, saj delujejo kot natezne vezi.

Za obnašanje kompozita je zelo pomembna sprijemnost med vlakni in matrico in količina vlaken. Od sprijemnosti vlaken in matrice je odvisna sila, ki je potrebna za izvlečenje vlakna. Za večjo sprijemnost so vlakna različno oblikovana. Vlakna so zavita, različno deformirana, konice pa imajo oblikovane tako, da se v kompozitu zasidrajo (*Slika 10*). Lahko so tudi razmaščene, ohrapavljene itd.

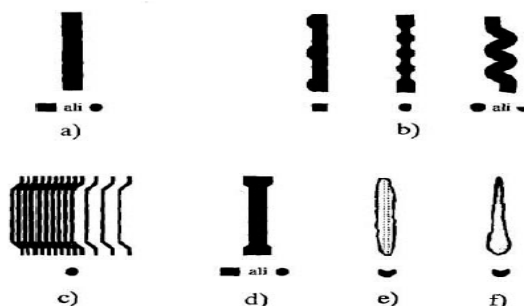
6.1 Vpliv vlaken na lastnosti betona

- **ŽILAVOST**
 Sposobnost absorpcije energije do neke stopnje deformacije ali pa do porušitve je primarni razlog za dodajanje vlaken betonu.
- **UDARNA TRDNOST**
 Udarna trdnost betona, mikroarmiranega z jeklenimi vlakni, je od 5 do 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 povečajo do največ 25%.
- **ODPORNOST NA UTRUJANJE**
 Mikroarmiranje z jeklenimi vlakni znatno povečuje odpornost betonskih elementov proti utrujanju in se zato takim elementom podaljšuje življenjska doba.
- **ODPORNOST NA OBRUS IN ABRAZIJO**
 Betoni, mikroarmirani z jeklenimi vlakni so zelo odporni na obrus in abrazijo. Čim večji je volumski delež vlaken, tem večja je odpornost betonov.



Slika 9: Diagrami σ - ϵ betonov

6.2 Jeklena vlakna



Slika 10: Različni tipi jeklenih vlaken [2]

Jeklena vlakna so izdelana iz jeklene žice tako, da so na obeh koncih posebno oblikovana, kar jim omogoča, da se trdno zasidrajo v beton.

7 EKSPERIMENTALNI DEL

Da bi dopolnili naše vedenje o betonih visokih trdnosti z dodatkom jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata, smo opravili eksperimentalne raziskave časovnega poteka krčenja betonov. Izdelali smo beton visokih trdnosti in mu dodali jeklena vlakna ter predhodno namočen lahek agregat. Zaradi možnosti medsebojne primerjave smo sestavo primerjalnega betona preskušancev brez vlaknaste armature in predhodno namočenega lahkega agregata povzeli po doktorski disertaciji [15], sestavo preskušancev s predhodno namočenim lahkim agregatom pa po diplomskem delu [10]. Vodovozivno razmerje uporabljenih betonov je znašalo 0,36. Vgradljivost betona smo dosegli z dodatkom superplastifikatorja, ki smo ga primešali dodani mikrosiliki.

7.1 Uporabljeni materiali

Preskušanci vlaknastega betona visoke trdnosti so bili izdelani iz pranege drobljenega apnenčevega agregata z nazivnim največjim premerom zrn 16 mm z dodatkom kremenčeve mivke. Uporabljen je bil cement CEM II / A-M (LL-S) 42.5 R in superplastifikator, ki je po kemijski sestavi sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzat. Mešanice vseh preizkušancev so vsebovale skupaj 400 kg/m^3 veziva, od tega 90% oz. 360 kg/m^3 cementa in 10% oz. 40 kg/m^3 mikrosilike. Delež predhodno namočenega lahkega agregata v betonski mešanici je znašal 12% celotne prostornine agregata. Uporabili smo lahek agregat lehnjak frakcije 0/2mm. Z njim smo nadomestili del klasičnega agregata frakcije 0/2mm. Vodovozivno razmerje svežega kompozita je znašalo 0.36, količina dodanega superplastifikatorja pa znaša 2.05% veziva. Ostale značilnosti sestave in lastnosti svežega in otrdelega kompozita so razvidne iz preglednice 2. Preizkušanci so bili mikroarmirani z jeklenimi vlakni (*Slika 11*), njihove lastnosti pa so podane v preglednici 6.



Slika 11: Uporabljena jeklena vlakna

Preglednica 3: Lastnosti uporabljene mivke

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

Preglednica 4: Lastnosti uporabljenega agregata

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

Preglednica 5: Lastnosti uporabljenega lahkega agregata

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

Preglednica 6: Lastnosti uporabljenega cementa

CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R			
KEMIJSKA SESTAVA CEMENTA			
A. hidravlično vezivo			
	SiO ₂		22.05%
	Al ₂ O ₃		5.47%
	Fe ₂ O ₃		2.63%
	CaO		60.59%

B. primesi		
	Netopni ostanek v HCl	0.31%
	žaroizguba	1.72%
	prosti CaO	0.91%
	MgO	2.72%
	SO ₃	2.43%
	Cl ⁻	0.02%
FIZIKALNO-KEMIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CEMENTA		
finost mletja	ostanek na situ odprtine 90µm	0.65%
	specifična površina	3550 cm ² /g
prostorninska masa		3.08 g/cm ³
vezanje	poraba vode za standardno konsistenco	27.1%
	pričetek	120 min
	konec	150 min
prostorninska obstojnost	(metoda s kolačem)	obstojen
upogibna trdnost	pri starosti 3 dni	5.9 MPa
	pri starosti 28 dni	7.8 MPa
Tlačna trdnost	pri starosti 3 dni	5.9 MPa
	pri starosti 28 dni	51.8 MPa

Preglednica 7: Uporabljeni dodatki

Jeklena vlakna		
Vrsta vlaken		IRI 50/30 (VJ2)
Dolžina vlaken		30 mm
Premer vlaken		0.5 mm
Natezna trdnost vlaken		900 MPa
Klasifikacija vlaken (ASTM A 820)		Tip 1
Mikrosilika		
KEMIJSKA SESTAVA MIKROSILIKE		
	SiO ₂	95.50-95.90%
	Al ₂ O ₃	0.13 - 0.17%
	Fe ₂ O ₃	0.09 - 0.12%
	CaO	0.35 - 0.55%
	C prosti	1.10 - 1.30%
	C iz SiC	0.30 - 0.50%
	C celotni	1.50 - 1.80%
	SiC	1.10 - 1.60%
	MgO	0.25 - 0.30%
	SO ₃	0.20 - 0.30%
	N ₂ O	0.10 - 0.15%
	K ₂	0.45 - 0.60%
	žaroizguba	0.80 - 1.40%
FIZIKALNO-KEMIJSKE LASTNOSTI MIKROSILIKE		
	nasipna gostota	400 - 550 kg/m ³
	prostorninska masa	2200 kg/m ³
	specifična površina	21 - 23 m ² /g
	velikost delcev	0.1 - 0.3 µm
	vлага	0.25 - 0.30%
Antikorodin		

7.2 Sestava betonskih mešanic

Preglednica 8: Sestava betonskih mešanic

Mešanica	HSC_1600_LWA_JV	HSC_1600	HSC_1600_LWA
Agregat			
Agregat Kresnice 0-2mm	113 kg/m ³	853 kg/m ³	114 kg/m ³
Agregat Kresnice 2-4mm	508 kg/m ³		512 kg/m ³
Agregat Kresnice 4-8mm	282 kg/m ³	284 kg/m ³	284 kg/m ³
Agregat Kresnice 8-16mm	470 kg/m ³	474 kg/m ³	474 kg/m ³
Lahki agregat lehnjak 0-2mm	120 kg/m ³	/	121 kg/m ³
Mivka	283 kg/m ³	285 kg/m ³	285 kg/m ³
Količina veziva	400 kg/m ³	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Količina mikrosilike	10 % veziva	10 % veziva	10 % veziva
Jeklena vlakna	39 kg/m ³	/	/
Vodovezivno razmerje	0.36	0.36	0.36
Vsebnost zraka	1.6 %	1.6 %	1.6 %
Posed	12 cm	15 cm	15 cm
f _{cm,28dni}	98.4 MPa	81.4 MPa	89.1 MPa

HSC_1600_LWA_JV ... visokotrdni beton, z dodatkom predhodno namočenega lahkega agregata in jeklenimi vlakni

HSC_1600 ... primerjalni visokotrdni beton

Podatki primerjalnega betona HSC_1600 so povzeti iz doktorske disertacije [15].

Podatki primerjalnega betona HSC_1600_LWA so povzeti iz diplomskega dela [10].

7.3 Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice

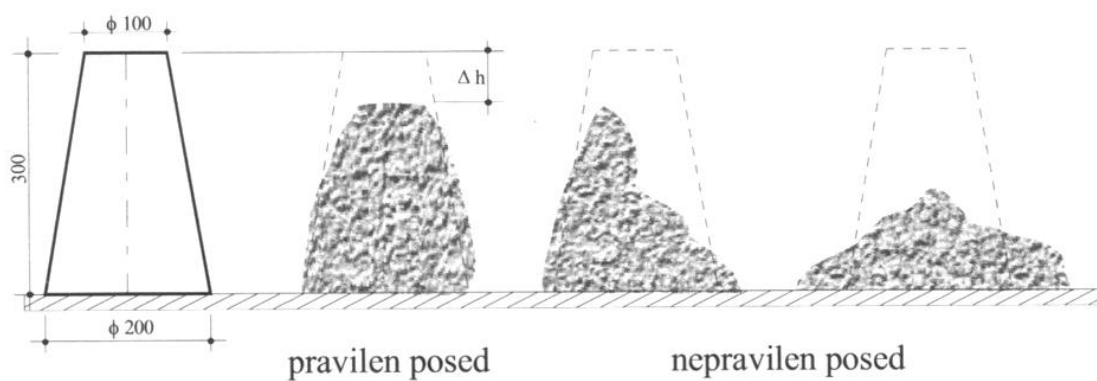
Glede na veljavne standarde lahko določamo konsistenco betona na štiri načine:

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

Pri našem preskušanju vzorcev sveže betonske mešanice smo uporabili metodo s postopkom razleza (7.3.2) in metodo s postopkom poseda (7.3.1).

7.3.1 Postopek s posedom po standardu SIST EN 12350-2

Ta metoda je najbolj preprosta metoda, ki je dovolj zanesljiva za kvantitativno določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic. Za preiskavo potrebujemo konus, ki ga napolnimo z zidarsko žlico v treh plasteh enake višine. Vsako plast nabijemo s standardno kovinsko palico ($\phi 16$, z zaobljenim vrhom dolžine 60 cm) s 25 udarci. Palica mora pri prebadanju prodreti do spodnje plasti. Ko napolnimo konus, odstranimo presežek betona in zravnamo površino. Trideset sekund po napolnitvi počasi dvignemo konus (5-10s) in ga postavimo ob betonski stožec (Slika 13). Ravnilo položimo na zgornji rob konusa in zmerimo razliko višin. Razlika višin je meja za konsistenco po tej metodi. Preskus je veljaven le, če se posede s pravilnim posedom (Slika 12).



Slika 12: Prikaz poseda sveže betonske mešanice [25]

Preglednica 9: Razredi poseda po SIST EN 206-1

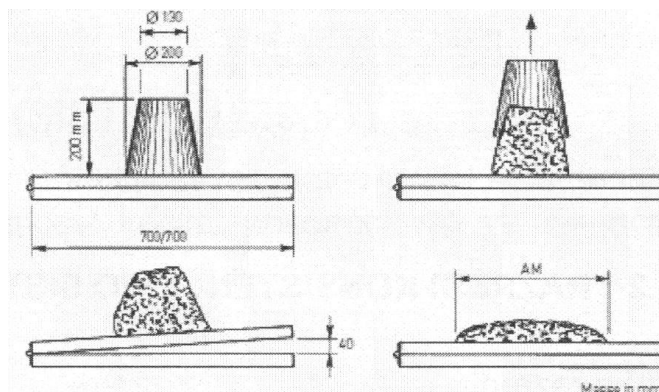
Razred	Posed
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220



Slika 13: Postopek s posedom

7.3.2 Postopek z razlezom po standardu SIST EN 12350-5

Ta metoda se uporablja za plastične in tekoče mešanice. Na razlezno mizo postavimo skrajšan kovinski konus in ga napolnimo v dveh plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem prečnega prereza 4x4 cm. Na vrhu odstranimo presežek betona. Po tridesetih sekundah odstranimo konus. Stopimo na stopalko na sprednji strani razlezne mize, dvigujemo ploščo za 4 cm in jo spustimo (*Slika 14*). To naredimo 15 krat. Betonska masa se razleze po mizi (*Slika 15*). Mera konsistence je povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene betonske mase.



Slika 14: Shematični prikaz preskusa z razlezom
Preglednica 10: Razredi razleza po SIST EN 206-1

Razred	Razlez v mm
F1	≤ 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	≥ 630



Slika 15: Merjenje razleza betonske mešanice

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

Posodo napolnimo s svežim betonom. Vgradimo ga v treh slojih. Višek betona odstranimo, da ostane zgornja površina betona gladka. Na posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtino z ventilom vlijemo vodo, s katero napolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Z ročno zračno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nulo (Slika 16). Če je pritisk previsok, odvečen zrak spustimo skozi izpuštilni ventil. Nekaj sekund po izravnanju tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Če je porozimeter pravilno umerjen predstavlja porozimetrijski indeks hkrati tudi delež zraka v % glede na celotno prostornino svežega betona v posodi.



Slika 16: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu

7.4 Merjenje tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti

Poleg krčenja betonskih elementov smo merili tudi tlačne trdnosti betonov po sedmih in osemindvajsetih dneh (Slika 17). Tlačno trdnost betona smo izmerili na petih preskušancih standardnih dimenzij $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ s pomočjo elektromehaničnega preskuševalnega stroja za statične tlačne preiskave kapacitete 5000 kN. Vzorci so bili prvi dan v kalupu, nato pa smo jih razkalupili in jih hranili potopljene v vodi in pri sobni temperaturi.

Preglednica 11: Tlačna trdnost betona HSC_1600_LWA_JV pri starosti 7 dni in pripadajoča standardna deviacija

preskušavec	f_c [MPa]	ρ [kg/m ³]
VZ1	75.06	2600
VZ2	75.68	2460
	\bar{f}_c 75.37	
	σ ± 0.31	

Preglednica 12: Tlačna trdnost betona HSC_1600_LWA_JV pri starosti 28 dni

preskušavec	f_c [MPa]	ρ [kg/m ³]
VZ3	100.91	2491
VZ4	95.86	2495
VZ5	98.41	2497
	\bar{f}_c 98.39	
	σ ± 2.06	

Preglednica 13: Primerjava tlačnih trdnosti betonov HSC_1600_LWA_JV, HSC_1600_LWA in HSC_1600

Oznaka betona	Tlačna trdnost po 7 dneh [MPa]	Tlačna trdnost po 28 dneh [MPa]
HSC_1600_LWA_JV	75,37	98,39
HSC_1600_LWA	71,26	89,11
HSC_1600	69,1	81,4

Primerjava betonov visokih trdnosti nam pokaže, da ima beton HSC_1600_LWA za 9% boljšo trdnost kot beton HSC_1600, kar pomeni, da dodatek predhodno namočenega lahkega agregata ugodno vpliva na tlačno trdnost betona. Beton z dodanimi jeklenimi vlakni in predhodno namočenim agregatom pa ima 20% višjo trdnost kot beton HSC_1600.



Slika 17: Preskušanje tlačne trdnosti betonov

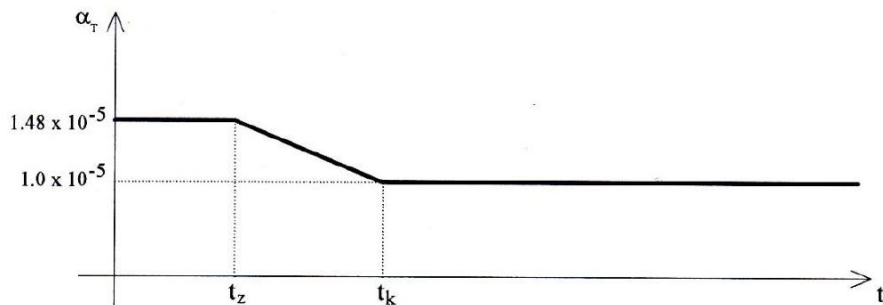
7.5 Merjenje krčenja betona

Na treh prizmah dimenzij 40 x 10 x 10 cm smo merili avtogeno krčenje, na preostalih treh pa celotno krčenje betona. Zgodnje avtogeno krčenje smo merili elektronsko. Po zamešanju betonske mešanice smo beton vgradili v jeklene kalupe, ki so prilagojeni za merjenje krčenja betona. Obloženi so bili z polipropilensko folijo in dobro zatesnjeni, da smo preprečili izmenjavo vlage z okolico. Na oba konca kalupa smo vstavili stiropor debeline 3 mm, da je bilo krčenje in raztezanje betonske mešanice čimbolj neovirano (Slika 20). Jekleni kalupi dimenzij 40 x 10 x 10 cm imajo na vsakem koncu izvrtano luknjico, skozi katero smo namestili posebne merske reperje za merjenje krčenja s pomočjo merskih uric, ki smo jih povezali z računalnikom (Slika 18). V prostoru, kjer smo shranjevali vzorce v času preiskave, smo poskušali vzdrževati konstantno vlažnost in temperaturo. Odčitki krčenja so se zapisovali v računalnik. Merili pa smo tudi temperaturo preskušancev v procesu strjevanja s pomočjo termo-člena, saj je bilo v vzorcu prisotno poleg avtogenega krčenja tudi temperaturno krčenje. Krčenje se je po prvih 24 urah umirilo, zato smo meritve krčenja nadaljevali z nasadnim deformetrom (Slika 21).

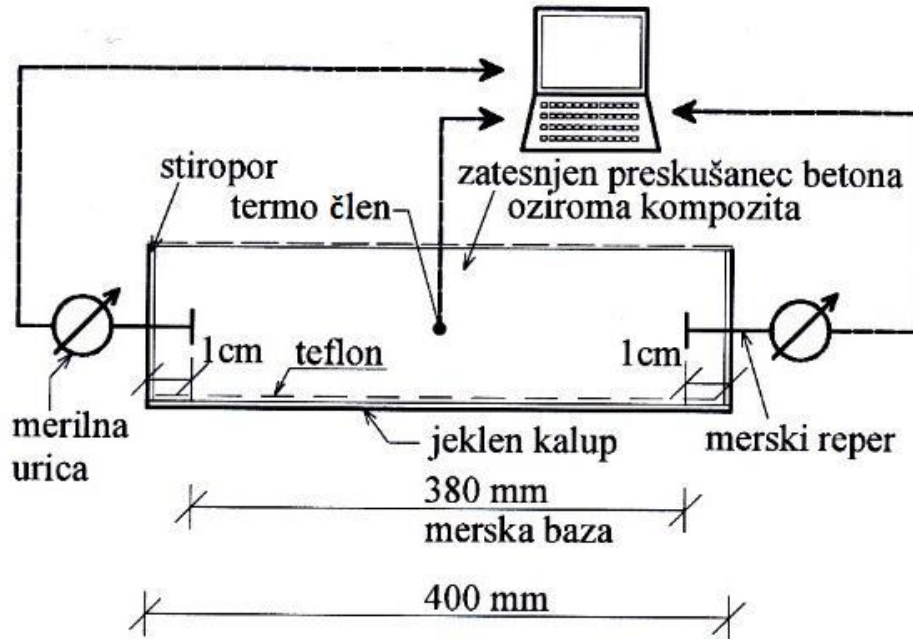


Slika 18: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev

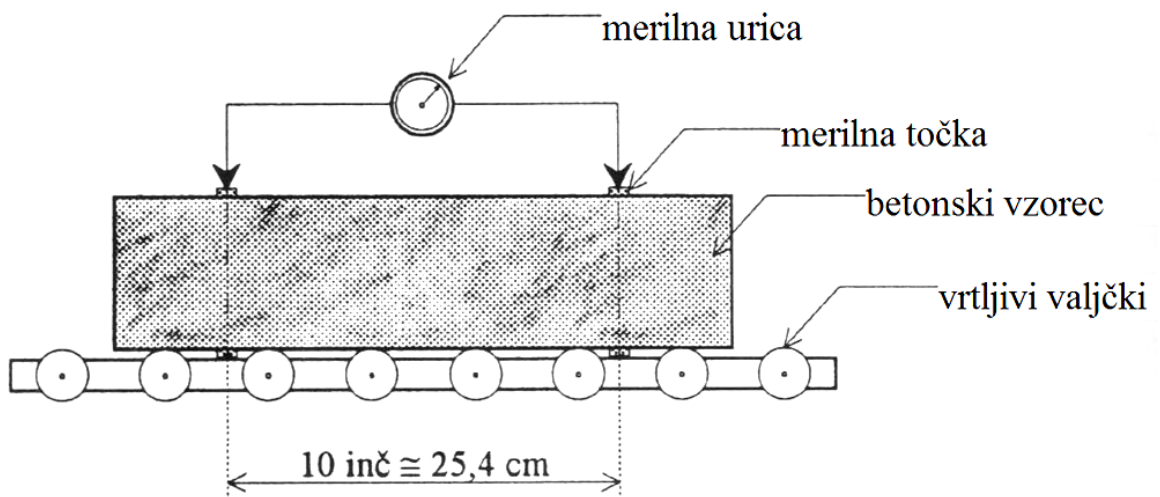
Velikost avtogenega krčenja vzorca smo dobili tako, da smo od celotno izmerjenega krčenja odšteli temperaturno krčenje betona. Temperaturno krčenje betona smo dobili s pomočjo izmerjenih temperatur v času strjevanja in razteznostnega koeficienta betona. Razteznostni koeficient betona se v procesu strjevanja spreminja, saj beton v svežem stanju vsebuje več vode. Upoštevali smo razteznostni koeficient svežega betona $\alpha_{T1}=1,48 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, koeficient razteznosti otrdelega betona pa $\alpha_{T2}=1,00 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (Slika 19). Od časa, ko je temperatura betona začela naraščati, pa do časa, ko se je temperatura vzorca izenačila s temperaturo okolice, smo upoštevali linearen potek temperaturnega koeficienta raztezka betona.



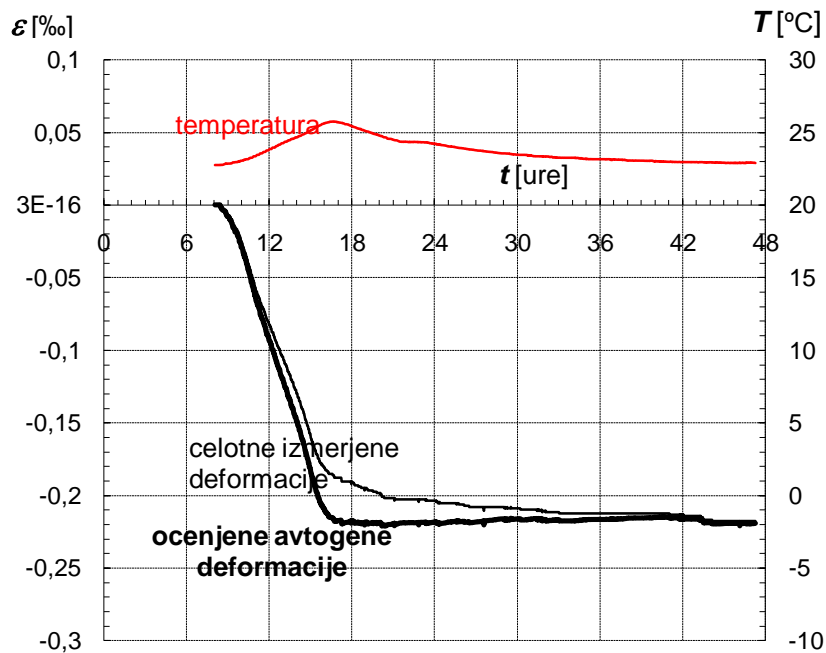
Slika 19: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona [15]



Slika 20: Prikaz elektronskega merjenja avtogenega in temperaturnega krčenja betona



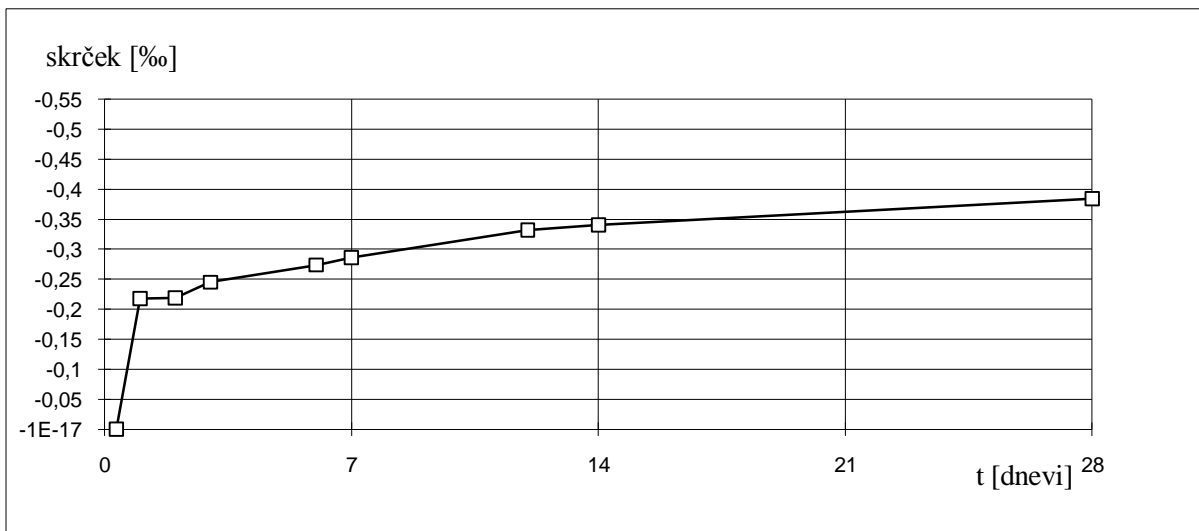
Slika 21: Shematični prikaz merjenja celotnega krčenja betonskega preskušanca



Slika 22: Prikaz deformacij betona HSC_1600_LWA_JV v prvih 48 urah

Na sliki sta prikazana temperatura in krčenje vzorca HSC_1600_LWA_JV v odvisnosti od časa v prvih 48 urah po zamešanju (Slika 22). Prikazana je temperatura od časa, ko se je začel proces hidratacije, to pomeni da je temperatura po začetnem ohlajanju betonske mešanice kasneje pričela naraščati. Podatke o temperaturi v vzorcu tekom časa sem potrebovala, da sem lahko ocenila krčenje vzorca zaradi temperature. Vzorec je bil prvih 48 ur zapečaten s folijo, s tem je bila izmenjava vlage z okolico preprečena, zato krčenje zaradi sušenja ni bilo prisotno. Od celotno izmerjenih deformacij sem odštela deformacije zaradi temperature in tako dobila vrednosti avtogenega krčenja.

7.5.1 Avtogeno krčenje visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata



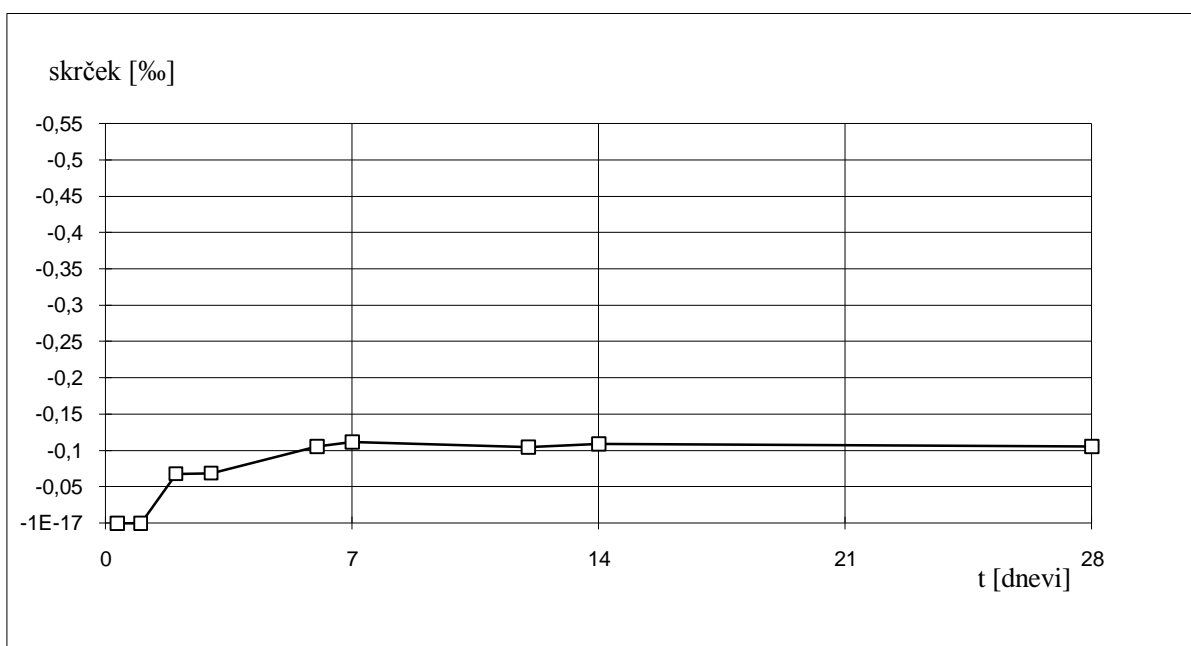
Slika 23: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV

Na sliki je prikazano avtogeno krčenje vzorca HSC_1600_LWA_JV (Slika 23). Skrček vzorca je po prvem dnevu znašal -0,218‰, po 28 dnevih pa -0,384‰, kar pomeni, da se je več kot polovica avtogenega krčenja izvršila že v prvem dnevu po zamešanju.

Preglednica 14: Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV

Avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV [‰]				
preskušanelec	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	-0,206	-0,213	-0,282	-0,384
2	-0,222	-0,229	-0,286	-0,381
3	-0,227	-0,295	-0,290	-0,387
povprečje skrčkov	-0,218	-0,245	-0,286	-0,384
standardni odklon	±0,009	±0,035	±0,003	±0,002

7.5.2 Krčenje zaradi sušenja visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata



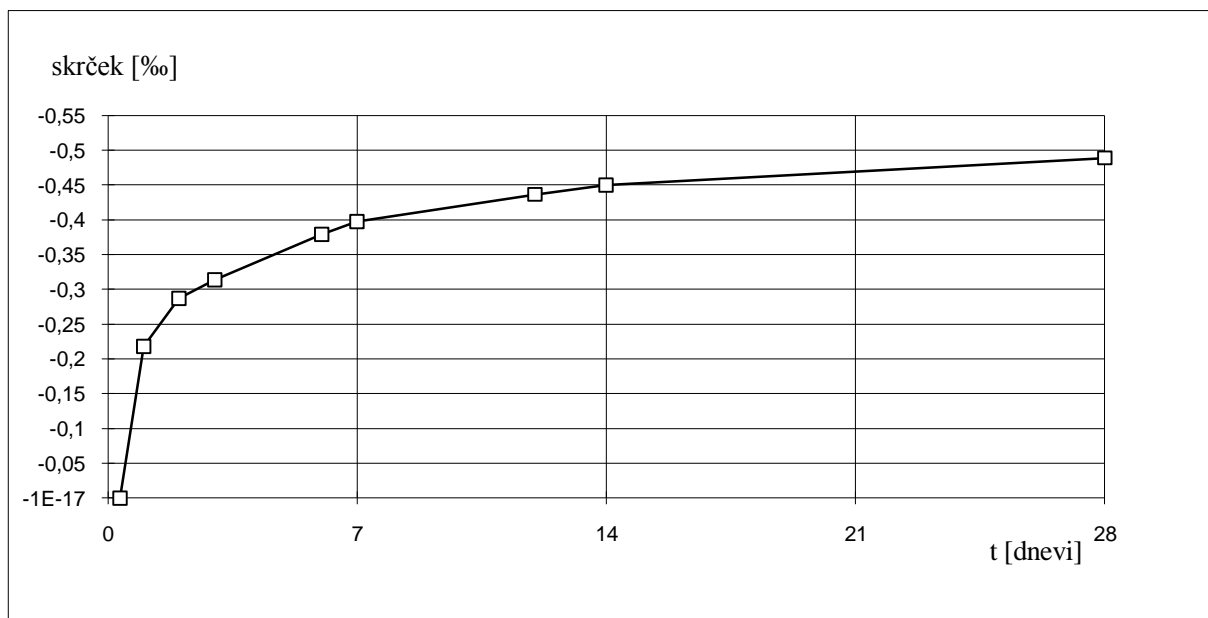
Slika 24: Krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV

Na sliki je prikazano krčenje zaradi sušenja vzorca HSC_1600_LWA_JV prvih 28 dni po zamešanju, ki smo ga dobili tako, da smo od celotnega krčenja odšteli avtogeno krčenje (Slika 24). V prvem dnevu smo upoštevali, da se sušenje na izvrši, saj je bil vzorec v kalupu in pokrit s folijo. Tako so prve deformacije zaradi sušenja opazne šele po dveh dneh. Po prvih dveh dneh je deformacija zaradi sušenja znašala -0,068‰, po 28 dnevih pa -0,105‰, kar je 1,544-krat več, kot po dveh dneh.

Preglednica 15: Krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV

Krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV [‰]				
preskušaneec	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	0	-0,058	-0,105	-0,088
2	0	-0,077	-0,121	-0,117
3	0	-0,071	-0,109	-0,111
povprečje skrčkov	0	-0,069	-0,112	-0,105
standardni odklon	±0	±0,008	±0,007	±0,012

7.5.3 Celotno krčenje visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata



Slika 25: Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV

Na zgornji sliki je prikazano celotno krčenje vzorca HSC_1600_LWA_JV prvih 28 dni po zamešanju (Slika 25). To so izmerjene vrednosti sušenju izpostavljenega preskušaneca. Po prvem dnevu je deformacija znašala -0,218‰, po 28 dneh pa -0,384‰, kar je 1,544-krat več kot po prvem dnevu.

Preglednica 16: Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV

Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV [‰]				
preskušaneec	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
1	-0,206	-0,303	-0,387	-0,472
2	-0,222	-0,322	-0,407	-0,498
3	-0,227	-0,316	-0,399	-0,498
povprečje skrčkov	-0,218	-0,314	-0,398	-0,489
standardni odklon	±0,009	±0,008	±0,008	±0,012

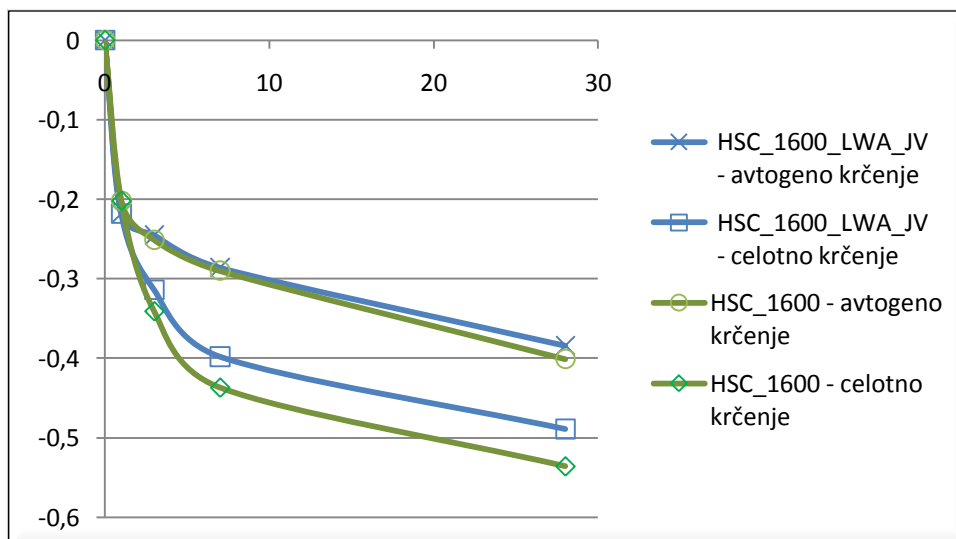
7.6 Primerjava krčenj visokotrdnega betona z vsebnostjo jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata ter visokotrdnega betona brez izboljšav

Preglednica 17: Povprečen skrček betonov zaradi avtogenega krčenja [%o]

Mešanica	Starost betona			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC_1600_LWA_JV	-0,218	-0,245	-0,286	-0,384
HSC_1600	-0,202	-0,251	-0,290	-0,401

Preglednica 18: : Povprečen skrček vzorcev zaradi celotnega krčenja [%o]

Mešanica	Starost betona			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC_1600_LWA_JV	-0,218	-0,314	-0,398	-0,489
HSC_1600	-0,202	-0,341	-0,437	-0,536



Slika 26: Primerjava krčenja betonov HSC_1600_LWA_JV in HSC_1600

Opazimo lahko, da se avtogeno krčenje visokotrdnega betona HSC_1600 in visokotrdnega betona z dodanimi vlakni in predhodno namočenim agregatom HSC_1600_LWA_JV ne razlikuje pretirano (Slika 26). Predvidevam, da je do tega lahko prišlo zaradi več različnih vzrokov:

- preveč enostranska usmeritev jeklenih vlaken,
- neoptimalna dolžina jeklenih vlaken,
- relativno visoka temperatura betonske mešanice ob vgradnji,
- morebitno gnezdenje jeklenih vlaken,
- ne najbolj optimalna izbira frakcije in količine lahkega agregata.

Avtogeno krčenje preskušancev HSC_1600_LWA_JV starih en dan je bilo celo večje kot avtogeno krčenje betona HSC_1600. Po 28 dneh je avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV znašalo -0,384%, betona HSC_1600 pa -0,401%. Beton, ki smo mu dodali predhodno namočen lahek agregat se je torej skrčil le za 4,2% manj kot beton brez izboljšav.

Celotno krčenje po 28 dneh za beton HSC_1600_LWA_JV znaša -0,489‰, za beton HSC_1600 pa -0,536‰. Beton z dodanim predhodno namočenim lahkim agregatom in jeklenimi vlakni se je sicer skrčil manj kot beton brez teh dodatkov, vendar pa je ta razlika majhna, saj je skrček manjši le za 8,8%.

8 ZAKLJUČKI

V diplomskem delu sem preučevala vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata v betonih visokih trdnosti. Moje ugotovitve in predvidevanja temeljijo na lastnem eksperimentalnem delu. Najbolj sem se osredotočila na avtogeno krčenje vzorcev.

Avtogeno krčenje predstavlja večinski del krčenja pri betonih visokih trdnosti. Iz preizkusov sem ugotovila, da po prvem dnevu avtogeno krčenje predstavlja 100% celotnega krčenja, po treh dneh 78%, po sedmih dneh 72% in po 28 dneh 79% celotnega krčenja betona, ki smo mu dodali jeklena vlakna in predhodno namočen lahek agregat. S primerjavo vrednosti avtogenega krčenja z vrednostmi primerjalnega betona, ki jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata ni vseboval, sem ugotovila, da je razlika majhna. V prvem dnevu je bilo avtogeno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV celo večje kot primerjalnega betona HSC_1600. Po treh dneh je avtogeno krčenje našega betona znašalo 97,6% avtogenega krčenja primerjalnega betona, po sedmih dneh 98,6%, po 28 dneh pa 95,8%.

V diplomskem delu sem spremljala tudi krčenje zaradi sušenja betona HSC_1600_LWA_JV. Do teh rezultatov sem prišla s pomočjo dveh vrst vzorcev. Na zatesnjenih vzorcih sem merila avtogeno krčenje betona, na nezatesnjenih pa celotno krčenje. Razlika teh dveh krčenj predstavlja krčenje zaradi sušenja. Izmerjeno krčenje zaradi sušenja po prvem dnevu predstavlja 0% celotnega krčenja, po treh dneh 22%, po sedmih dneh 28% in po 28 dneh 21% celotnega krčenja.

Celotno krčenje betona HSC_1600_LWA_JV po prvem dnevu predstavlja 107,9%, po treh dneh 92,1%, po sedmih dneh 91,1% in po 28 dneh 91,2% celotnega krčenja betona HSC_1600. Celotno krčenje vlaknastega betona z dodanim predhodno namočenim agregatom je manjše kot pri betonih brez vlaken, vendar pa je razlika še vedno relativno majhna.

Predvidevam, da je lahko vzrok za tako majhno zmanjšanje krčenja preveč enostranska usmeritev vlaken, morebitno gnezdenje vlaken ali neoptimalna dolžina vlaken. Dolžina vlaken vpliva na enakomernost razporeditve vlaken.

Merila sem tudi tlačno trdnost betonov. Dodatek jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata ima največji vpliv na velikost tlačne trdnosti, saj se je izboljšala glede na primerjalni beton. Tlačna trdnost betona HSC_1600_LWA_JV starega 7 dni predstavlja 109,1% tlačne trdnosti primerjalnega betona HSC_1600, po 28 dneh pa 120,9%.

V diplomskem delu sem prišla do zaključkov, da dodajanje jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata najbolj ugodno vpliva na izboljšanje tlačne trdnosti betonov, medtem ko na krčenje vpliva relativno malo.

Pridobljeni rezultati niso zanesljivi, saj je bilo število preskušancev, s pomočjo katerih smo problem analizirali, relativno majhno. Zanesljivost trditve je odvisna od raztrosa in števila preskušancev, zato bi bilo potrebno preskuse opraviti na večjem številu preskušancev.

LITERATURA

- [1] Aïtcin, P. - C. 1998. High – performance concrete. London, E&FN Spon: 591 str.
- [2] Balaguru, N., Shah, P. 1992. Fiber-reinforced cement composites. Michigan, Univerza v Michiganu: 530 str.
- [3] Bandelj, B. 2010. Reološke lastnosti vlaknastih betonov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Bandelj): 194 str.
- [4] Cusson, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Research 38, 757-765.
- [5] Dodatki za beton in malte. 2012. TKK Srpenica d.d.
<http://www.tkk.si/default.asp?id=2594> (Pridobljeno 01.08.2012.)
- [6] Đureković, A. 1996. Cement, cementni kompozit i dodaci za beton. Zagreb, Institut građevinarstva Hrvatske: 358 str.
- [7] Kovler, K. 2007. Internal Curing of Concrete. RILEM TC 196-ICC, State-of-the-Art Report, str. 140
- [8] Kronlöf, A. 1999. Filler Effect of Inert Mineral Powder in Concrete. Technical Research Centre of Finland: 32 str.
- [9] Kvitsel, V. 2005. Creep and Shrinkage of High Performance Lightweight Aggregate Concrete. V: Hermes Science Publishing (ur.). Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures. London, Hermes Science Publishing: str. 585-590.
- [10] Legat, N. 2012. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Legat): 31 str.
- [11] Muravljov, M. 2007. Građevinski materijali. Beograd, Građevinska knjiga: 587 str.
- [12] Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materijali 2. Beograd, Akademski misao: 209 str.
- [13] Saje, D., Bandelj, B., Lopatič, J. 2008. Notranja nega betona. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 9. – 10. oktober 2008. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 245-252.
- [14] Saje, D., Saje, F., Kavčič, F. 1999. Krčenje betonov visoke trdnosti. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 21. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 14. – 15. oktober 1999. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207-214.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Saje, D. 1997. Posebnosti betonov visokih trdnosti. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): 90 str.
- [18] Šušteršič, J. 2004. Betoni visokih zmogljivosti v praksi. V: Slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 5–10.

- [19] Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, Slovenija, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 9–13.
- [20] Zajc, A. 2004. Kaj so betoni visokih zmogljivosti. V: Slovenski kolokvij o betonih – Gradnja z betoni visokih zmogljivosti, Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-3.
- [21] Zajec, M. 2012. Krčenje s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 77 str.
- [22] Zaletel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zaletel): 100 str.
- [23] Zhutovsky, S., Kovler, K. 2001. Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage. *Materials and Structures* 35, 97-101.
- [24] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.
- [25] Žarnić, R. 2009. Gradiva vaje 2009/2010. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.