

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:

Vogrič, N., 2014. Avtogeno krčenje, posebnost betona visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 32 str.

Datum arhiviranja: 20-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Vogrič, N., 2014. Avtogeno krčenje, posebnost betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 32 pp.

Archiving Date: 20-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidatka:

NINA VOGRIČ

**AVTOGENO KRČENJE, POSEBNOST BETONA
VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 108/B-GR

**AUTOGENOUS SHRINKAGE, SPECIALITY OF HIGH
PERFORMANCE CONCRETES**

Graduation thesis No.: 108/B-GR

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:

doc. dr. Franc Sinur

doc. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 10. 07. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Nina Vogrič izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Avtogeno krčenje, posebnost betonov visoke trdnosti«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 31. 6. 2014

Nina Vogrič

BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691.32(043.2)
Avtor: Nina Vogrič
Mentor: doc. dr. Drago Saje
Naslov: Avtogeno krčenje, posebnost betonov visoke trdnosti
Tip dokumenta: Diplomski naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 32 str., 7 pregl., 4 graf., 21 sl.
Ključne besede: avtogeno krčenje, betoni visoke trdnosti, notanja nega betona, ekspandirana glina, hidrationska reakcija

Izvleček

Avtogeno krčenje je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna in je pri betonih visoke trdnosti znatno večje kot pri betonih običajne trdnosti, predvsem zaradi nizkega vodo-cementnega razmerja betonov visoke trdnosti. V diplomski nalogi smo preučili glavne mehanizme, ki povzročajo avtogeno krčenje. Le to lahko zmanjšamo z ustrezno notranjo nego – notranjimi rezervoarji vode. Kot notranje rezervoarje vode smo uporabili predhodno namočeno ekspandirano glino Liapor. Na preizkušancih iz betona, pri katerem smo 12 % običajnega agregata nadomestili s predhodno namočeno ekspandirano glino, smo merili krčenje in tlačno trdnost. Rezultate smo primerjali s predhodno opravljenimi preizkusi na primerljivih betonih visoke trdnosti brez in s predhodno namočenim lahkim agregatom Lehnjak. Ugotovili smo, da predhodno namočena ekspandirana glina frakcije 2 - 4 mm, v betonih visoke trdnosti, ugodno vpliva na velikost avtogenega krčenja betona in neugodno na velikost njegove tlačne trdnosti.

BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.32(043.2)
Author: Nina Vogrič
Supervisor: Assist. Prof. Drago Saje, PhD.
Title: Autogenous shrinkage, speciality of high performance concrete
Document type: Graduation Thesis - University studies
Notes: 32 p., 7 tab., 4 gr., 21 fig.
Key words: autogenous shrinkage, high performance concretes, internal curing of concretes, expanded clay, hydration reaction

Abstract

Autogenous shrinkage is a consequence of self desiccation in pores of hardened cement paste and is, at high performance concrete significantly greater than that of the ordinary concretes, mainly due to low water to cement ratio. In the graduation thesis we examined the main mechanisms that cause autogenous shrinkage. It can be reduced by internal curing-internal water reservoirs. As internal water reservoirs we used pre-soaked expanded clay Liapor. On specimens, in which we replaced 12 % of aggregate with pre-soaked expanded clay, we measured shrinkage and compressive strength. The results were compared with previously performed tests on high performance concrete without additives and on high performance concrete with addition of pre-soaked lightweight aggregate Lehnjak. We concluded that content of pre-soaked expanded clay has positive effect on shrinkage, but negative effect on the compressive strength.

ZAHVALA

Za pomoč in strokovno podporo pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu.

Zahvaljujem se svojim bližnjim za podporo skozi celotno študijsko obdobje.

KAZALO

Izjave	II
Bibliografsko–dokumentacijska stran in izvleček	III
Bibliographic–documentalistic information and abstract	IV
Zahvala	V
1 UVOD	1
2 BETONI VISOKE TRDNOSTI	2
2.1 Splošno o betonih visoke trdnosti	2
2.2 Sestavine betonov visoke trdnosti	3
2.2.1 Portland cement	3
2.2.2 Agregat	3
2.3 Glavni dejavniki pri betonih visoke trdnosti	4
2.3.1 Poroznost	4
2.3.1 Vodo cementno razmerje	5
3 KRČENJE BETONOV VISOKE TRDNOSTI	7
3.1 Splošno o krčenju betonov visoke trdnosti	7
3.2 Avtogeno krčenje	8
3.2.1 Površinska napetost	9
3.2.2 Samoizsuševanje	10
3.2.3 Gibanje medstojne vode	11
3.3 Notranja nega	12
4 HIDRATACIJA CEMENTA	13
4.1 Splošno o procesu hidratacije	13
4.2 C-S-H gel kot glavni produkt hidratacije	15
5 EKSPERIMENTALNI DEL	18
5.1 Uporabljeni material	18
5.1.1 Liapor	18
5.1.2 Agregat	19
5.1.3 Mivka	19
5.1.4 Cement	19
5.2 Sestava betonskih mešanic	19
5.3 Preizkušanje konsistence sveže betonske mešanice	20
5.3.1 Metoda z razlezom	20
5.3.2 Metoda s posedom	21
5.4 Določanje vsebnosti zraka v sveži betonski mešanici po SIST-EN 12350-7	23
5.5 Merjenje tlačne trdnosti	23
5.6 Merjenje krčenja betona	25
5.7 Rezultati in analiza rezultatov	25
5.7.1 Nabrekanje betona	28
6 ZAKLJUČEK	29
VIRI	30

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Glavne sestavine Portland cementa [5].	13
Preglednica 2:	Pomen oznak v poimenovanju cementa.	19
Preglednica 3:	Sestava betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1.	19
Preglednica 4:	Razredi konsistence po SIST EN 206-1, razredi razleza [40].	21
Preglednica 5:	Razredi konsistence po SIST EN 206-1, razredi poseda [40].	22
Preglednica 6:	Vrednosti tlačne trdnosti različnih betonskih mešanic.	24
Preglednica 7:	Krčenje betonskih mešanic.	27

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1:	Krčenje mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 prvih 24 ur.	26
Grafikon 2:	Krčenje mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 prvih 28 dni.	26
Grafikon 3:	Primerjava krčenja betonskih mešanic v prvem dnevu.	27
Grafikon 4:	Primerjava krčenja betonskih mešanic v prvih 28ih dneh.	27

KAZALO SLIK

Slika 1:	Razdelitev por in njihova velikost [9].	4
Slika 2:	Odvisnost kapilarne poroznosti od vodo cementnega razmerja pri popolni hidrataciji [11].	5
Slika 3:	Diagram različnih vrst krčenja.	7
Slika 4:	Primerjava relativnega krčenja in stopnje hidratacije [18].	8
Slika 5:	Razmerje med relativno vlažnostjo in površinsko napetostjo.	10
Slika 6:	Velikost radija meniska v odvisnosti od relativne vlažnosti. Leva stran prikazuje stanje, ko je $p=p_0$, desna pa $p<p_0$ [25].	10
Slika 7:	Gibanje medslotne vode pri različni vlažnosti [27].	12
Slika 8:	Stopnja sproščene toplote tekom hidratacije v Portland cementu [30].	14
Slika 9:	Shema poteka hidratacije pri $v/c=0,3$ [13].	15
Slika 10:	Zaporedje hidratacije cementa. a) Cementni delci v vodi b) Začetek formacije C-S-H gela c) Nastajanje C-S-H gela ob delcih cementa d) C-S-H gel in kalcijev hidroksid ob koncu hidratacije [33].	16
Slika 11:	Različna modela C-S-H gela: a) Powers-Brunauer model b) Feldman-Serada model [35].	16
Slika 12:	Model strukture C-S-H gela, kjer lahko natančneje vidimo adsorbirano vodo ter vodo znotraj plasti gela [36].	17
Slika 13:	Gel visoke gostote na levi in nizke gostote na desni strani [32].	17
Slika 15:	Kroglice ekspandirane gline Liapor [38].	18
Slika 16:	Betonska mešanica HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1.	20
Slika 17:	Metoda z razlezom.	21
Slika 18:	Metoda s posedom.	22
Slika 19:	Posoda z manometrom za merjenje vsebnosti por v svežem betonu.	23
Slika 20:	Vzorec porušen z elektromehaničnim preizkuševalnim strojem.	24
Slika 21:	Pripravljeni vzorci za merjenje krčenja.	25

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Beton je zelo zaželen material pri gradnji. Ne le zato, ker je cenovno zelo ugoden, ampak tudi zato, ker ima visoko tlačno trdnost in ga je mogoče poljubno oblikovati, saj lahko zavzame tako rekoč kakršnokoli obliko. Z željo izgradnje višjih, večjih in trajnejših konstrukcij so razvili betone visokih trdnosti, ki v primerjavi z običajnimi betoni nimajo le dobrih lastnosti, kot so višja trdnost in trajnost, pač pa tudi slabe: višje avtogeno krčenje. Avtogeno krčenje lahko privede do nastanka razpok, katere znižujejo trajnost betona. Da bi jih v čim večji meri preprečili, so razvili novo vrsto nege betona, notranjo nego. Eden izmed načinov notranje nege betona je vgrajevanje materialov, ki delujejo kot notranji rezervoarji vode. Ti rezervoarji med procesom hidratacije sproščajo vodo, ko začne le-te v porah betonske mešanice zmanjkovati. To privede do nižjega samoizsuševanja por cementnega kamna ter posledično do nižjega avtogenega krčenja.

V teoretičnem delu diplomske naloge smo preučevali razloge za pojav avtogenega krčenja, v eksperimentalnem delu pa smo preučevali vpliv ekspandirane glinice kot notranjih rezervoarjev vode na avtogeno krčenje. Rezultate smo primerjali s predhodno opravljenimi preiskavami na betonih z dodatkom lahkega agregata ter betonih brez dodatkov.

Diplomska naloga obsega 5 poglavij. V poglavju *Betoni visoke trdnosti* smo opisali glavne značilnosti betonov, njihove lastnosti in tehnološke ukrepe za izdelavo betonov visoke trdnosti. V tem poglavju smo opisali tudi dve glavni sestavini betona, cement in agregat. Opredeljena sta tudi glavna dejavnika, ki sta pomembna pri krčenju betonov, poroznost in vodo cementno razmerje. V poglavju *Krčenje betonov visoke trdnosti* smo našteali različne vrste krčenja in opisali glavne razloge za njihov pojav. Osredotočili smo se na avtogeno krčenje in opisali glavne mehanizme, ki ga povzročajo. Svoje poglavje smo namenil tudi *Hidrataciji*, saj je za razumevanje krčenja potrebno poznati potek hidratacijskih reakcij in njihove produkte. V poglavju *Eksperimentalni del* smo opisali sestavine betonske mešanice, ki smo jo uporabili in metode, s katerimi smo mešanico preizkušali. V preglednicah in diagramih smo prikazali rezultate, ki smo jih primerjali s predhodno opravljenimi preizkusi. Na koncu smo podali ugotovitve, do katerih smo prišli z analizo eksperimentalnih rezultatov.

2 BETONI VISOKE TRDNOSTI

2.1 Splošno o betonih visoke trdnosti

Beton je kompozitni material sestavljen iz cementa, agregata, vode in raznih dodatkov, s katerimi dosežemo želene kvalitete betona. Ko pride cement v stik z vodo, se sproži kemijska reakcija, imenovana hidratacija. Nastane gosta tekoča zmes imenovana cementna pasta, ki zapolni praznine med agregatnimi zrni in jih poveže med sabo [1].

Pri gradnji in obnovi objektov je zaželena uporaba obstojnih gradbenih materialov. Mednje sodijo tudi betoni visokih trdnosti, ki so bili prvič uporabljeni v 30-ih letih prejšnjega stoletja [2]. Betone visokih trdnosti se lahko uporablja pri gradnji vseh gradbenih konstrukcij: stavb, mostov in tunelov. Razlogi za uporabo niso le visoka tlačna trdnost, ampak tudi trajnost, saj so bolj odporni na negativne zunanje vplive. Konstrukcija ima daljšo življenjsko dobo. V standardu SIST EN 206-1 je določeno, da so betoni visoke trdnosti tisti, katerih tlačna trdnost višja od 55 MPa. Takšne betone dobimo z ustrezno strukturo betona, ki jo dosežemo z ustreznimi tehnološkimi ukrepi in z uporabo visoko kvalitetnih osnovnih materialov [3,4].

Poznamo več tehnoloških ukrepov. Prvi in najbolj osnoven tehnološki ukrep je znižanje vodo cementnega razmerja. Ustrezno vgradnjo pa omogočimo z dodajanjem superplastifikatorjev ali hiperplastifikatorjev. Kot produkt dobimo zelo goste betone, ki so bolj krhki. Ker je krhkost betona nezaželena, se večkrat poslužujemo drugih tehnoloških ukrepov. Betonom lahko dodajamo mineralne dodatke, ki imajo pucolanske lastnosti. Ti delci zapolnjujejo medzrnske praznine in zmanjšujejo krhkost. Naslednji tehnološki ukrep je polimerno modificiranje betona. Pri tem ukrepu del cementnega veziva nadomestimo z ustreznimi polimeri, kot so na primer polimerni lateksi, redisperzibilni praškasti polimeri, vodotopni polimeri, tekoče smole in monomeri. Prostor med agregatnimi zrni se zapolni z mešanico hidratacijskih produktov in polimernih delcev. Dobimo zelo gosto mešanico, ki preprečuje prenos vode, plinov in raztopin. Zato je beton, dobljen s tem tehnološkim ukrepom zelo primeren za uporabo v agresivnem okolju. Z zgoraj opisanimi tehnološkimi ukrepi dobimo gost in visokokvaliteten cementni kamen, seveda pa je potrebno uporabiti tudi primeren agregat in po potrebi tudi vlakna za mikroarmiranje [3].

2.2 Sestavine betonov visoke trdnosti

2.2.1 Portland cement

Cement deluje v betonu kot vezivo, med seboj lepi zrna agregata in zapolnjuje prostore med njimi. Količina cementsa v betonu je med 7 in 14% prostorninske mase betona. Pri hidravličnih cementih se začne strjevanje, ko pridejo v stik z vodo. Najpogosteje uporabljan hidravlični cement je Portland cement, ki je silikatni cement. Leta 1824 ga je prvi uporabil angleški zidar Joseph Aspdin [5]. Sestavljajo ga pretežno kalcijevi silikati. Materiale, ki so potrebni za izdelavo cementsa, najdemo povsod po svetu: apnenec, ki vsebuje kalcijev oksid (CaO), glina, skrilavci, materiali, ki vsebujejo silicijev dioksid (SiO₂) in aluminijev trioksid (Al₂O₃). Ko te materiale zmešamo v ustreznem razmerju in jih segrevamo na zelo visoki temperaturi, dobimo klinker. Pri segrevanju pride med materiali do kemijskih reakcij. Tvorijo se štiri najpomembnejše sestavine cementnega klinkerja [1,5]:

- alit - trikalcijev silikat,
- belit - dikalcijev silikat,
- trikalcijev aluminat,
- tetrakalcijev aluminoforit.

Nato se klinker zmelje v zelo droben prah. Nehidriran portland cement je siv prah, sestavljen iz oglatih delcev velikosti med 1 in 50 µm. Surovine za izdelavo cementsa so razmeroma poceni, proces izdelave pa je drag, ker potrebuje velike količine energije. Zato pogosto del cementsa nadomestimo z drugimi materiali, kot je na primer žindra. Žindra v sveži betonski mešanici zmanjšuje potrebno količino vode za doseganje želene konsistence, izboljša obdelavnost, zmanjša segregacijo agregata, hidratacijsko toploto in izboljša odpornost betona na agresivne vplive [6,7,8].

2.2.2 Agregat

Lastnosti vgrajenega agregata, njegova kvaliteta, trdnost in odpornost na zunanje vplive, vplivajo na življenjsko dobo betona. Agregati ne smejo vsebovati snovi, ki bi povzročile porušitev notranje strukture betona. Agregat zapolnjuje približno 65-75 % mase betona. Za zagotavljanje goste in povezane strukture, vgrajujemo v mešanico agregate različnih frakcij. Dobro granuliran beton je tisti, v katerem zrna majhnih frakcij zapolnijo praznine med zrni večjih frakcij [8]. Agregat ima velik vpliv na krčenje betona, in sicer več kot ga je, manjše je krčenje. Pickett je odvisnost krčenja od prisotnosti agregata opisal z enačbo, ki določa koeficient krčenja [5].

$$\frac{S_c}{S_p} = (1 - a)^n,$$

kjer predstavlja

S_c ... krčenje betona,

S_p ... krčenje gladke paste,

a ... prostorninski delež agregata v betonu,

n ... potenco, določeno na podlagi raziskav, običajno se giblje med 1,2 in 1,7.

2.3 Glavni dejavniki pri betonih visoke trdnosti

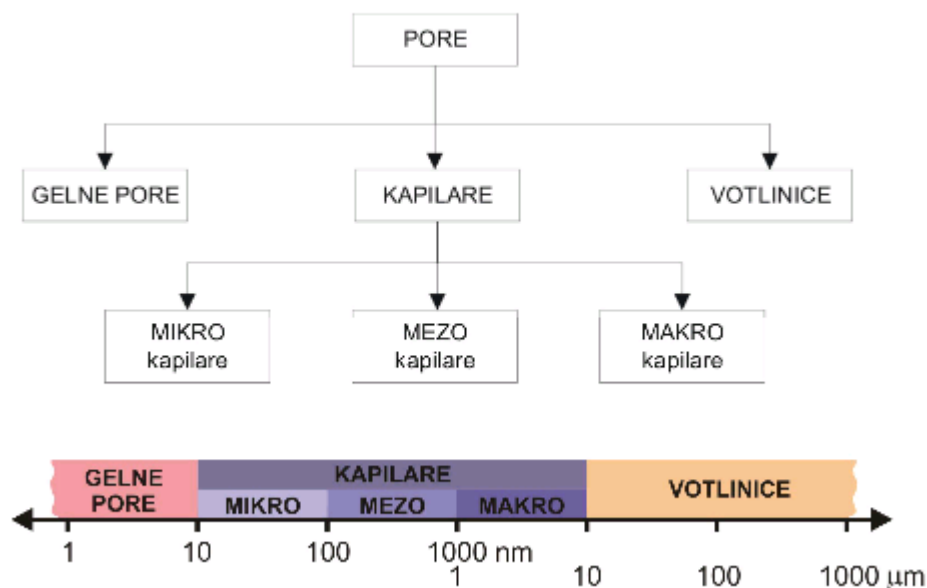
2.3.1 Poroznost

Beton je sestavljen iz trdih delcev agregata, ki so nestisljivi, in nemogoče je zapolniti vse prazne prostore med njimi. V betonu so prisotne pore različnih velikosti, od nekaj do več sto μm . Lahko so zapolnjene z vodo ali z zrakom [7].

Stopnja poroznosti P je določena kot razmerje prostornine por, V_p in celotne prostornine betona, V :

$$P = \frac{V_p}{V} \cdot 100\%$$

Poroznost je pomemben dejavnik, ki vpliva na mehanske in fizikalne lastnosti betona [9]. Obstajajo tri različne vrste por, ki jih delimo glede na njihovo velikost in nastanek. V betonu imamo gelne pore, kapilarne pore in votlinice [10,2]. Na sliki 1 je prikazana razdelitev por v cementu in njihova velikost.

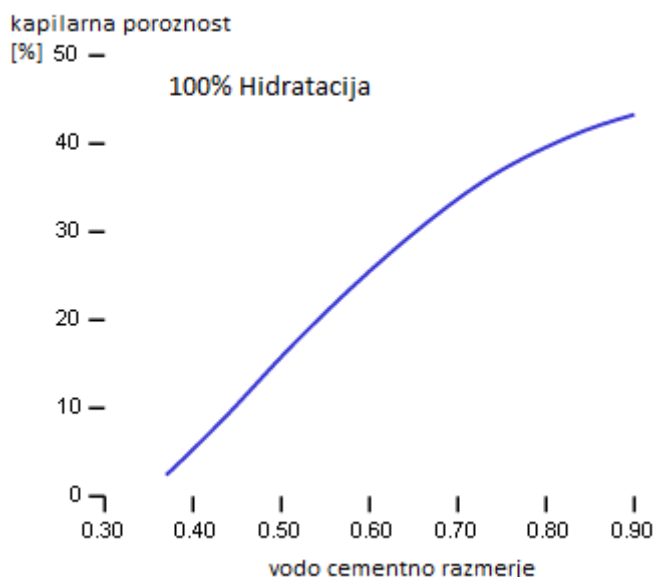


Slika 1: Razdelitev por in njihova velikost [9].

Gelne pore so praznine, ki nastanejo pri hidratacijskem procesu, saj je prostornina hidratacijskih produktov manjša kot je prostornina posameznih osnovnih materialov, cementa in vode. Prostornina gelnih por se med procesom hidratacije povečuje [5,10].

Kapilarne pore so v hidratizirani cementni pasti prisotne, kadar je vodo cementno razmerje le-te večje od 0,32. Določene so kot prostori, ki niso zapolnjeni s trdnimi hidratacijskimi produkti. V njih je voda šibko vezana in lahko sistem zapušča, kadar je vlaga v zraku nižja od vlage v betonu in v beton vstopa, kadar je razmerje obratno. S tem lahko v beton skupaj z vodo vstopajo tudi razne kemikalije, raztopine soli in druge snovi, ki v betonu povzročajo in

sodelujejo pri korozijskih procesih fizikalne in kemijske narave. Kapilarna poroznost je odvisna od vodo cementnega razmerja in od stopnje hidratacije. Kapilarne pore so nepravilnih oblik. Delimo jih na velike in majhne kapilarne pore. Pri nizkem vodo cementnem razmerju po končani hidrataciji ni proste vode, zato kapilarna poroznost ne igra večje vloge. Na sliki 2 vidimo, da pri nizkem vodo cementnem razmerju in 100% hidrataciji kapilarne poroznosti skoraj ni [10].



Slika 2: Odvisnost kapilarne poroznosti od vodo cementnega razmerja pri popolni hidrataciji [11].

V betonu so prisotne tudi votlinice, ki nastanejo zaradi nezadostne stopnje zgostitve pri vgrajevanju, in poroznost zaradi vsebnosti aerantov, ki jih vgrajujemo v beton, kadar želimo, da je le-ta odporen na zmrzovanje in tajanje.

Poroznost znižuje mehanske lastnosti betona. Gosti betoni vsebujejo malo kapilarnih por in so manjše. Torej je pri betonih visokih trdnosti, ki imajo praviloma gosto strukturo, manjša možnost prodora agresivnih snovi in so zato obstojnejši [5].

2.3.1 Vodo cementno razmerje

Vodo cementno razmerje ima velik vpliv na kvaliteto cementne paste in posledično na kvaliteto betona. Določeno je kot delež teže vode, kjer upoštevamo tudi vlago v agregatu, glede na celotno težo cementa. Najmanjši vodo cementni količnik, ki omogoča, da se izvrši celoten proces hidratacije je 0,25. S tolikšnim razmerjem naredimo beton, ki je zelo suh in izredno težko vgradljiv [12]. Za betone, ki jih uporabljamo v konstrukcijah, je najmanjše vodo cementno razmerje med 0,35 in 0,40 [13]. Povečevanje količine vode v betonski mešanici omogoča lažjo vgradljivost, vendar pa slabo vpliva na več drugih lastnosti betona. Na skoraj vse dobre in želene lastnosti betona, kot sta na primer trdnost in trajnost, povišanje vodo cementnega razmerja vpliva slabo. V betonski mešanici z veliko količino vode agregat segregira. V tekoči sveži betonski mešanici, se težji delci posedejo na dno, otrdela zgornja plast segregiranega betona je krhka - beton ni homogen. V poznejših fazah strjevanja betona začne voda, ki v procesu hidratacije ni bila porabljena, izhlapevati skozi majhne kapilare, kar povzroči praznine, ki ne prispevajo k trdnosti betona. Vodo cementno razmerje vpliva tudi na

krčenje. V laboratorijskih raziskavah je bilo opaženo, da je krčenje cementne paste pri vodo cementnih razmerij med 0,6 in 0,3 enako, pri vodocementnih razmerjih pod 0,3 pa je krčenje znatno večje [14].

Glede na vodo cementno razmerje delimo betone v tri skupine [15]:

- vodo cementno razmerje je okoli 0,38: idealne razmere pri katerih se vsa voda porabi za hidratacijo cementa, beton je brez por in kapilar,
- vodo cementno razmerje je manjše od 0,38: ugoden vpliv na trdnost in odpornost, za vgradnjo je potrebna uporaba superplastifikatorjev in drugih dodatkov,
- vodo cementno razmerje je večje od 0,4: beton je bolj porozen, kar neugodno vpliva na trdnost in trajnost betona. Odvečna vode, ki ne porabi za hidratizacijo veziva, se namesti v kapilarnih porah.

3 KRČENJE BETONOV VISOKE TRDNOSTI

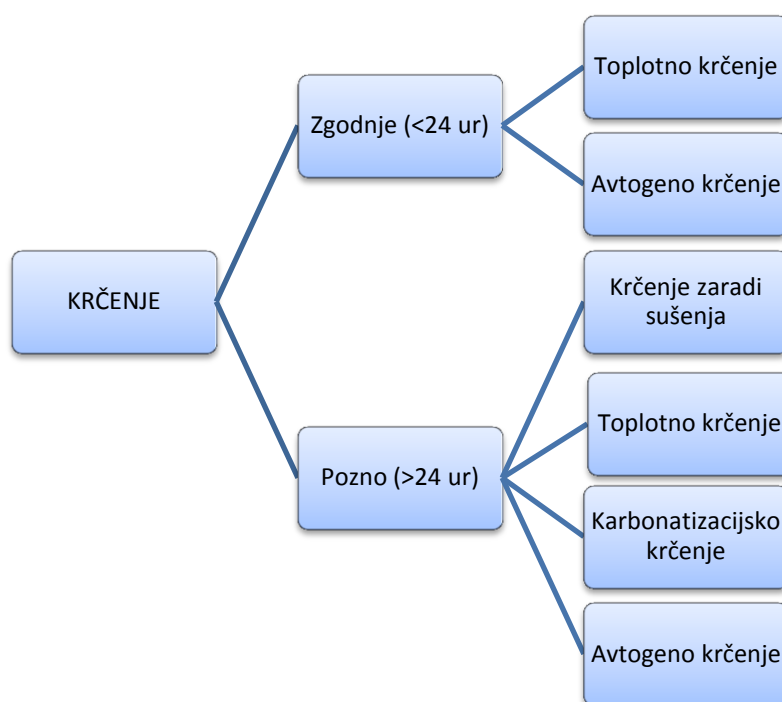
3.1 Splošno o krčenju betonov visoke trdnosti

Pomembna lastnost betona pri gradnji konstrukcij je njegova trajnost, ki je odvisna predvsem od razpokanosti betona. Razpokanost pa ni le posledica obremenitve konstrukcije, ampak tudi krčenja betona [16]. Volumske spremembe se začnejo takoj, ko pride cement v stik z vodo. Nastale razpoke predstavljajo resene težave, katerih reševanju je bilo namenjenih veliko študij. Beton se krči prihaja predvsem zaradi:

- spremembe vlažnosti, ki povzroča površinske napetosti,
- kemijskih reakcij in spremembe temperature.

Krčenje je časovno odvisna deformacija, ki jo merimo pri konstantni temperaturi in vlažnosti na neobremenjenem vzorcu. Zaradi gibanja vlage v betonu se ustvarijo natezne napetosti, ki vlečejo delce cementne paste skupaj in povzročajo volumske spremembe.

V grobem lahko krčenje delimo na zgodnje in pozno krčenje, v vsakem obdobju imamo več različnih vrst krčenja, katere lahko vidimo na sliki 3. Zgodnje krčenje je bolj kritično, ker beton ni še pridobil zadostne trdnosti, da bi se upiral spremembi volumna [2,17].

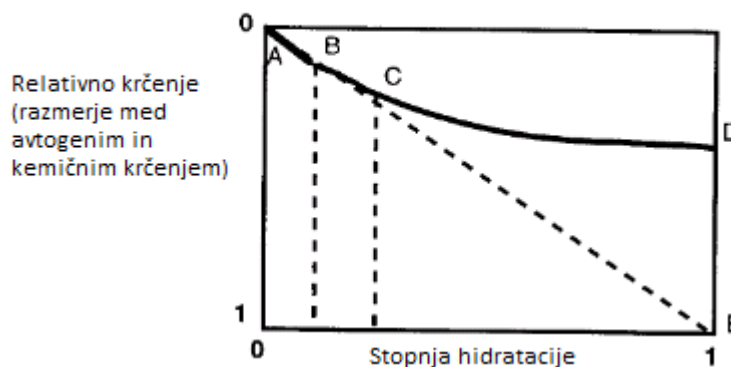


Slika 3: Diagram različnih vrst krčenja.

V diplomski nalogi sem se osredotočila na avtogeno krčenje. Avtogene deformacije se v betonu razlikujejo po velikosti in smeri delovanja. Poznamo avtogeno krčenje in avtogeno nabrekanje. Avtogene deformacije so časovno odvisne spremembe, ki so postale pomemben predmet raziskov s pojavom betonov visoke trdnosti.

3.2 Avtogeno krčenje

Avtogeno krčenje je definirano kot makroskopsko zmanjšanje volumna sveže betonske mešanice zaradi pritiskov v porah. Ti pritiski nastanejo zaradi porabe vode pri procesu hidratacije ter posledično zmanjšane notranje relativne vlažnosti, do katere pride brez izgube vlage v okolje. Zaradi avtogenega krčenja je pri betonih visoke trdnosti večja verjetnost, da pride do razpok v zgodnjih fazah strjevanja. Ta vrsta volumske spremembe je bila prvič opisana in natančneje izmerjena šele okrog leta 1930, ko se je uporaba betonov visoke trdnosti razširila. Šele z začetkom uporabe betonov visoke trdnosti je postalo avtogeno krčenje razlog za skrb, saj je razlog za pojav le-tega nizko vodo cementno razmerje. Je izotropen proces, tako je neodvisno od oblike in velikosti vzorca. Časovni potek avtogenega krčenja je podoben poteku hidratacijske krivulje cementa v betonu, kar lahko vidimo na sliki 4. Je pomemben dejavnik v zgodnjih fazah strjevanja betona in se razvija skozi tri faze: ko je mešanica še v tekočem stanju, ob začetku formiranja skeleta ter ob strjevanju. Takoj po mešanju je avtogeno krčenje proporcionalno stopnji hidratacije (odsek AB na diagramu), ob formiranju skeleta pa se krčenje nekoliko zaustavi (odsek BC). Ob strjevanju pa je zaradi višjega modula elastičnosti krčenje že zelo ovirano, zato je vidno manjše [18].



Slika 4: Primerjava relativnega krčenja in stopnje hidratacije [18].

V standardu Evrocode je podana metoda za napovedovanje deformacij zaradi avtogenega krčenja. To prikazuje spodnja enačba. Deformacija je odvisna od vrste uporabljenega cementa in tlačne trdnosti betona.

$$\varepsilon_{cs} = \beta_{cc}(t) \cdot \varepsilon_{cs, \infty},$$

kjer predstavlja

ε_{cs} ... deformacijo zaradi avtogenega krčenja,

$\beta_{cc}(t)$... faktor trdnosti betona, opisan v spodnji enačbi,

$\varepsilon_{cs, \infty}$... $2,5 \cdot (f_c - 10) \cdot 10^{-3}$

f_c ... karakteristična trdnost betona, starega 28 dni,

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

kjer predstavlja

s ... koeficient, odvisen od vrste cementa,
 t ... starost betona v dnevih,
 t_1 ... 1 dan.

Zaradi razmeroma velikega avtogenega krčenja je v betonih visoke trdnosti nevarnost za nastanek razpok velika. Posledica razpok pa je manjša odpornost konstrukcije na zunanje agresivne vplive in manjša trajnost konstrukcije. Avtogeno krčenje zmanjšamo z ustrežno nego.

Poznamo dva glavna mehanizma, ki povzročata avtogeno krčenje betona [19]:

- samoizsuševanje betona zaradi spremembe relativne vlažnosti,
- gibanje medstojne vode.

Poleg teh mehanizmov pa je pri krčenju pomemben pojem še površinska napetost, ki je posledica samoizsuševanja v porah cementnega kamna.

3.2.1 Površinska napetost

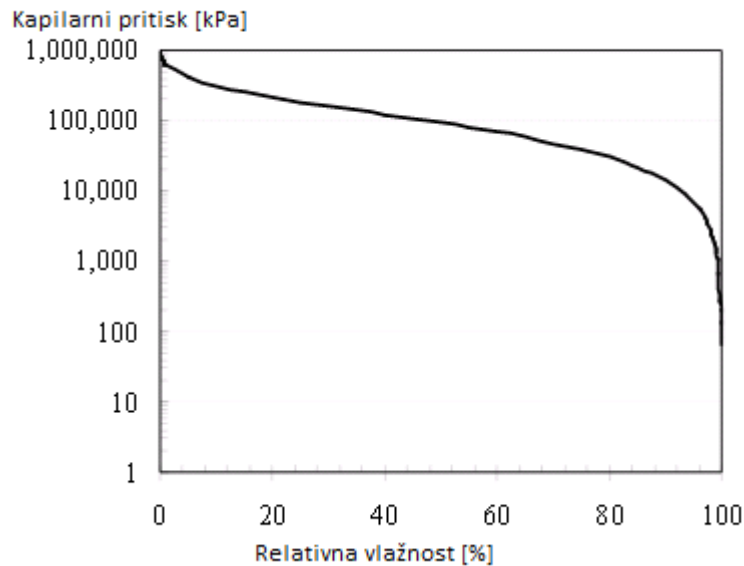
Za razumevanje pojma površinska napetost, moramo poznati razliko med kohezijskimi in adhezijskimi silami. Kohezijske sile so privlačne sile med delci iste snovi. To so Van Der Waalsove sile. Kjer delujejo na molekulo tekočine kohezijske sile v vseh smereh, je rezultanta sil na molekulo enaka nič. Če je molekula tekočine na površini, z adhezijskimi silami nanjo delujejo tudi drugi delci iz okolice. Razliko med adhezijskimi in kohezijskimi silami imenujemo površinska napetost, ki jo opišemo kot koeficient med delom A in povečanjem površine ΔS [20].

$$A = \sigma \cdot \Delta S.$$

Sila površinske napetosti je enaka produktu površinske napetosti in dolžine roba, na katerem deluje

$$F = \sigma \cdot l.$$

Adsorpcija vode znižuje površinsko napetost, odstranitev adsorbirane vode površinsko napetost poveča, kar povzroča krčenje. Sprememba površinske napetosti je najpomembnejša pri prvih plasteh adsorbirane vode, ker so molekule vezane na trdne delce z močnejšimi vezmi [22]. Pri nižji relativni vlažnosti je sprememba površinske napetosti pomembnejša in povzroča večje krčenje, kar je prikazano na sliki 5.



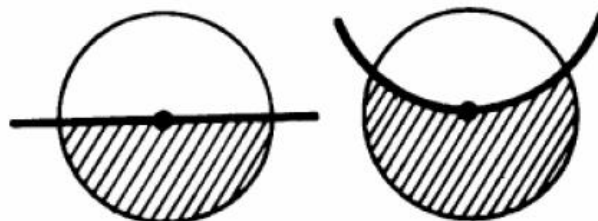
Slika 5: Razmerje med relativno vlažnostjo in površinsko napetostjo.

3.2.2 Samoizsuševanje

Glavna razlika med sušenjem običajnega betona in betona visoke trdnosti je samoizsuševanje [23]. V betonih visoke trdnosti je vode znatno manj kot v običajnih betonih. Pri kemijski reakciji vode in cementnih mineralov v hidratacijske produkte začne zmanjkovati proste vode za popolno hidratacijo, kar povzroči padec relativne vlažnosti v porah betona. V porah se formirajo vodo zračni meniski. Ko je relativna vlažnost enaka 100 % in je parni tlak v tekočini P enak parnemu tlaku nasičene pare P_0 , je število molekul, ki zapustijo tekočino enako številu molekul, ki se vrnejo v tekočino. Ko relativna vlažnost pade in ni več 100%, se začne izhlapevanje. Razmerje med relativno vlažnostjo RH in parnima tlakoma lahko prikažemo z Kelvin-Laplaceovo enačbo [21].

$$\ln(RH) = \ln\left(\frac{P}{P_0}\right).$$

Slika 6 prikazuje vpliv parnega tlaka na ukrivljenost površine. Krog predstavlja območje privlačnosti ene molekule na površini tekočine. Ko relativna vlažnost pade, se začne radij meniska manjšati. Ko vlažnost pade in se radij meniska zmanjša za toliko, da postane enak radiju pore, se začne izhlapevanje [24,25].

Slika 6: Velikost radija meniska v odvisnosti od relativne vlažnosti. Leva stran prikazuje stanje, ko je $p=p_0$, desna pa $p<p_0$ [25].

Hidrostatske natezne napetosti v tekočini, ki povzročajo meniske, opišemo s Laplac-ovim zakonom

$$p = \frac{2\sigma}{r},$$

kjer p predstavlja tlak v porah. Pri manjših radijih je površinska napetost večja, posledično pa se večja tudi krčenje. Ko pri sušenju betona ni več proste vode, se začne voda za hidratacijo črpati iz manjših por, pri čemer se v njih tvorijo natezne napetosti, ki povzročajo avtogeno krčenje. Povezavo med relativno vlažnostjo RH in radijem meniskov r opišemo z enačbo:

$$\ln(RH) = \frac{2\sigma Vm}{RT r},$$

kjer predstavlja

σ ... površinsko napetost vode,

r ... radij meniskov,

R ... plinsko konstanto,

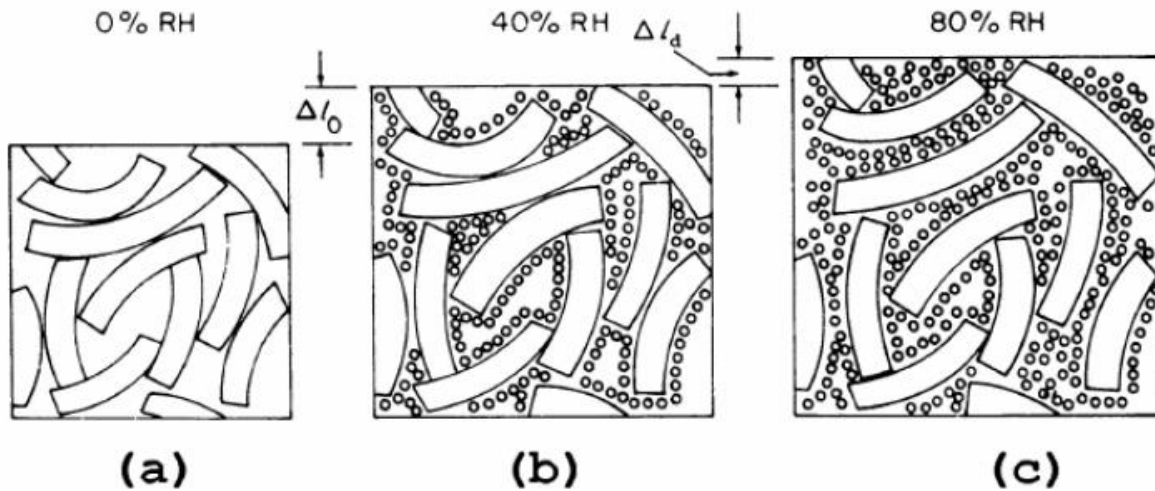
T ... temperaturo,

V ... prostornino vode.

Voda za hidratacijo se črpa iz por in plast adsorbirane vode na površini trdnih delcev se tanjša. Odlepljanje te vode povzroča napetosti v strukturi. Ker se proces odvija v zgodnjih starostih betona, ko je togost betonske mešanice še majhna, napetosti povzročajo velike deformacije [19,26].

3.2.3 Gibanje medslojne vode

Med procesom hidratacije se tvori slojevita struktura imenovana C-S-H gel. Delci veziva imajo negativen električni naboj, kar privlači polarizirane molekule vode. Premikanje vode v in izven plasti C-S-H gela povzroča volumske spremembe - premik med plasti povzroča nabrekanje, iz plasti pa krčenje. Največje krčenje se izvede pri relativnih vlažnostih med 35 in 40 %. Na sliki 7 vidimo shematski prikaz gibanja medslojne vode. Δl_0 in Δl_p sta spremembi, ki nastaneta zaradi gibanja medslojne vode [25,27].



Slika 7: Gibanje medslajne vode pri različni vlažnosti [27].

3.3 Notranja nega

Da bi zagotovili želeno trdnost in trajnost betonov skozi celotno življenjsko dobo, moramo s primernimi tehnikami vzdrževati primerne pogoje pri strjevanju betona. Ta proces imenujemo nega betona. Ločimo zunanjo in notranjo nego betona. Zunanja nega betonov je pogosteje uporabljane pri betonih običajnih trdnosti. Pri strjevanju betonov visokih trdnosti se poslužujemo notranje nege, ker omogoča zadrževanje zadostne količine vlage v betonu med procesom vezanja veziva in strjevanja betona. Med mešanjem betonu dodajamo predhodno namočene materiale kot na primer ekspandirano glino, polipropilenska vlakna in lahek agregat drobnih frakcij, ki imajo med sušenjem funkcijo notranjih rezervoarjev vode. Notranji rezervoarji so porozni materiali, ki med predhodnim močenjem vase absorbirajo vodo. Ko med hidratacijo vlažnost v sveži betonski mešanici pade, se začne voda črpati iz notranjih rezervoarjev, kar znatno zmanjša krčenje betona [13,28].

4 HIDRATACIJA CEMENTA

4.1 Splošno o procesu hidratacije

Hidratacija cementa je kompleksen kemijsko fizikalen proces, ki ga lahko opišemo s serijo reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Reakcije so posledica šibkih vezi zaradi dipolnega značaja molekul vode in potekajo tako istočasno kot zaporedno, z različnimi hitrostmi ter vplivajo ena na drugo [29].

Kot lahko opazimo v Preglednici 1 je Portland cement sestavljen iz petih glavnih spojin [5].

Preglednica 1: Glavne sestavine Portland cementa [5].

Ime spojine	Kemijska formula	Oznaka	Prisotnost
Trikalcijev silikat	Ca_3SiO_5	C_3S	50 %
Dikalcijski silikat	Ca_2SiO_4	C_2S	25 %
Trikalcijev aluminat	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3S	10 %
Trikalcijev aluminoforit	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF	10 %
Mavec	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	/	5 %

Silikati so najpomembnejši cementni minerali, saj prispevajo k trdnosti betona. C_3S reagira hitro in vpliva na zgodnjo trdnost, C_2S pa prispeva predvsem k trdnosti po sedmih dneh sušenja [1]. Čeprav lahko reakcije potekajo tudi istočasno, lahko spojine glede na stopnjo hidratacije razdelimo od najbolj do najmanj reaktivne:

trikalcijski aluminat > trikalcijski silikat > tetra-kalcijev aluminoforit > dikalcijev silikat.

Te spojine so v cementu prisotne v različnih deležih, vse pa so izraziti topljenci. Ko torej cementu dodamo topilo, kot je voda, se hidratacija prične. Tekom hidratacije lahko njeno napredovanje spremljamo s stopnjo hidratacije, to je tisti delež začetnega cementa, ki je po določenem času že prešel v hidrationske produkte. Iz vidika sproščene toplote so razvidni trije vrhovi, ki nakazujejo na več različnih obdobjih v poteku hidratacije. Tako hidratacijo v splošnem razdelimo na štiri obdobja [30,5].

1. Pred - indukcijsko obdobje

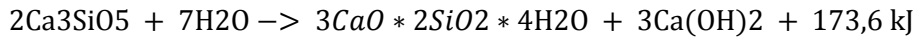
V tej fazi se cement raztopi v polarnem topilu - vodi in skupaj tvorita suspenzijo, ki vsebuje kalcijeve in hidroksidne ione. Raztapljanje je eksotermen proces, pri katerem se vodikove vezi vode razrahljajo in vežejo z elektronegativnim mineralom - kisikom. Že v prvem obdobju doseže količina sproščene toplote svoj maksimum, vendar je to daleč najkrajša faza, saj traja le nekaj minut po začetnem mešanju vode in cementa. Raztapljanje se ustavi, ko je vodna mešanica nasičena.

2. Indukcijsko obdobje

Je eno do dve uri trajajoče obdobje mirovanja, ki ločuje začetno kratkotrajno reakcijo takoj po mešanju in glavno obdobje hidratacije. Hidratacija se ustavi zaradi zaščitne plasti, ki se formira okrog cementnih zrn. Ta faza je zelo pomembna za vsestransko uporabnost betona, saj omogoča prenos sveže betonske mešanice na mesto vgradnje in vlivanje v opaž dokler je le-ta še v tekočem stanju.

3. Obdobje pospešene hidratacije

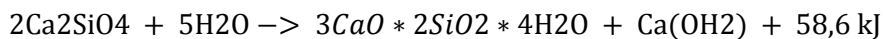
V tej fazi stopnja reakcije hitro naraste, kar je posledica hidratacije trikalcijevega silikata C_3S , kateri je tudi najbolj pomemben za zgodnjo trdnost betona. Spodnja reakcija prikazuje tvorbo tako imenovanega C-S-H gela (kalcijev silikat hidrat), ki je s svojimi različnimi morfološki oblikami odgovoren za prve povezave med zrni cementa.



Poleg C-S-H gela je produkt reakcije tudi kalcijev hidroksid. To so zelo močni kristali, ki pa se sami po sebi ne morajo vezati z agregatnimi zrni. Tu je C-S-H gel ključnega pomena, saj deluje kot vezavno sredstvo, ki med seboj poveže kristale kalcijevega hidroksida in agregatna zrna. S tem cementna pasta pridobiva na trdnosti. Produkti, ki nastanejo v tej fazi hidratacije so večinoma v obliki dolgih vlaken. Le-te nastajajo v porah mešanice in premoščajo praznine med cementnimi zrni.

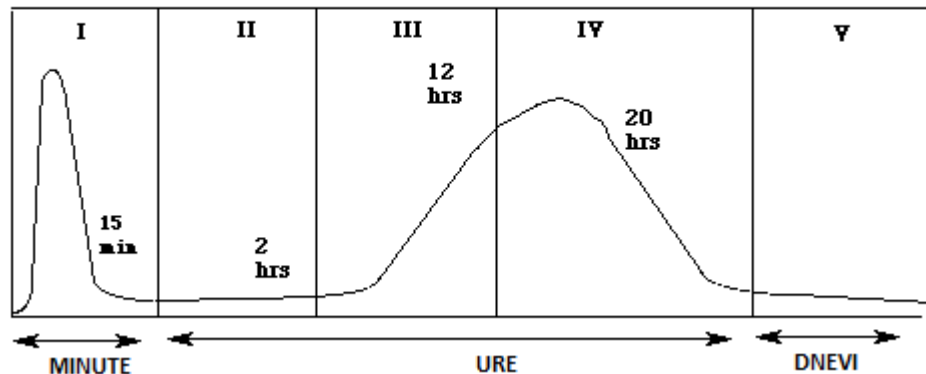
4. Obdobje pojemajoče hidratacije

Še naprej nastaja C-S-H gel vendar tokrat zaradi hidratacije dikalcijevega silikata (C_2S):



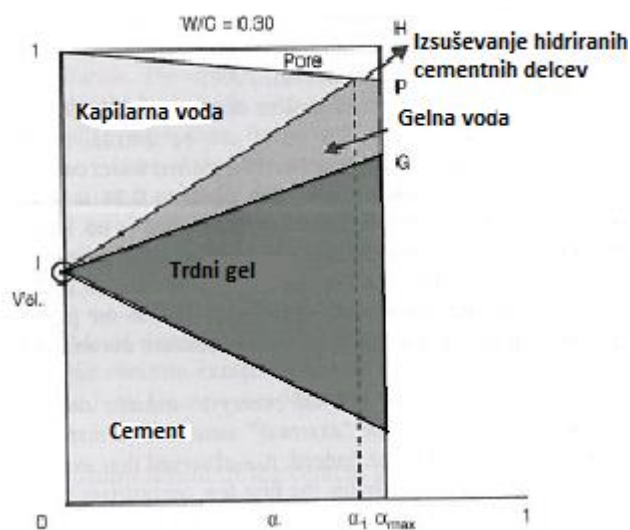
Hidratacija je nekoliko počasnejša predvsem zaradi goste plasti, ki se v prejšnji fazi ustvari okrog hidratacijskih produktov, zato voda težje pride v stik s silikati. Umiri se tudi sproščanje toplote. Na sliki 8 vidimo sproščanje toplote tekom hidratacije. Na grafu sta opazna dva izrazita vrha, prvi v pred indukcijskim obdobjem, drugi pa v obdobju pospešene hidratacije.

SPROŠČANJE TOPLOTE



Slika 8: Stopnja sproščene toplote tekom hidratacije v Portland cementu [30].

Leta 2001 sta danska znanstvenika Jansen in Hansen predstavila preprosto shemo hidratacijske reakcije, kjer sta v obliki grafa predstavila odvisnost stopnje reakcije od deleža mase delcev, ki so reagirali. To sta storila za različna vodo cementna razmerja ter za različne sisteme. Slika 9 prikazuje shemo za vodo cementno razmerje 0.3 v zaprtem sistemu brez zunanje zaloge vode [13].

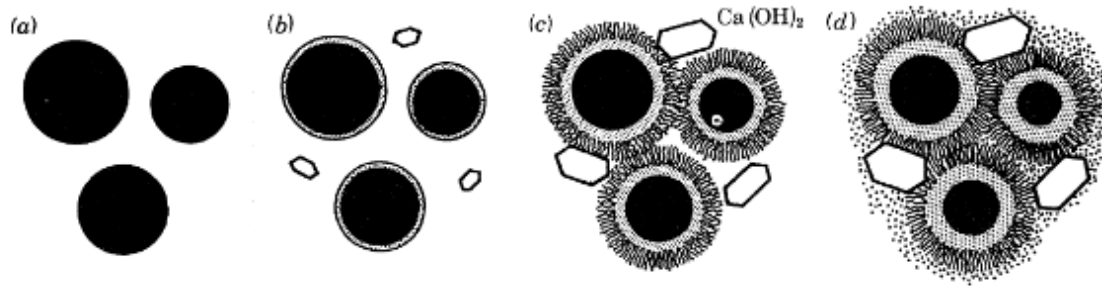


Slika 9: Shema poteka hidratacije pri $w/c=0,3$ [13].

V primerih s tako nizkim vodo cementnim razmerjem se hidratacija ustavi, ko vsa voda reagira. Polna hidratacija poteče pri vodo cementnem razmerju vsaj 0.42, pri nižjem pa reagira le del celotnega cementa. Kljub temu, da so nekateri delci še vedno nehidratizirani, tlačna trdnost betona še vedno narašča. To je zato, ker ni odvisna le od stopnje hidratacijske reakcije ampak tudi od tega, kako skupaj so nehidratizirani delci z cementni pasti. Da bi dosegli polno stopnjo hidratacije, moramo mešanici dovajati dodatno vodo, kar je mogoče s pomočjo zunanje ali notranje nege betona [16].

4.2 C-S-H gel kot glavni produkt hidratacije

Kot glavni produkt hidratacije spojina $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ ali na kratko C-S-H gel zavzema okrog 60% volumna celotne cementne paste [31]. Pomišljaji v imenu nakazujejo na to, da stohiometrija reakcije ni natančno določena, saj je odvisna od razmerja kalcija in silicija, ki variira med 1,2 in 2,1. Njegova prisotnost je glavni razlog za inženirske lastnosti cementa, saj je v mešanici glavno vezno sredstvo, ki poveže cementna zrna v kohezivno celoto. Majhni kristali C-S-H gela imajo veliko specifično površino in zmožnost adhezivne povezave ne le z ostalimi kristali C-S-H gela, ampak tudi s trdnimi snovmi kot so kristali kalcijeva hidroksida, nehidriranimi cementnimi zrn ter zrn agregata. Ker rastejo nitasti kristali C-S-H gela iz površine cementnih zrn navzven, ne tvorijo monolitne trdnine ampak tvorijo sistem notranjih gelnih por, v katerih je ujeta voda [32,33]. Slika 10 prikazuje nastajanje C-S-H gela in ostalih produktov hidratacije.



Slika 10: Zaporedje hidratacije cementa. a) Cementni delci v vodi b) Začetek formacije C-S-H gela c) Nastajanje C-S-H gela ob delcih cementa d) C-S-H gel in kalcijev hidroksid ob koncu hidratacije [33].

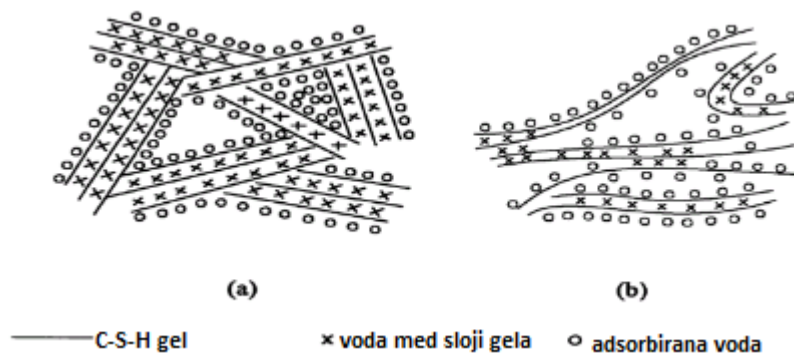
Kljub številnim raziskavam pa njeno struktura še ni popolnoma jasna. Zanimive pa so različne lastnosti vode v gelu. Seveda tako C-S-H kot tudi vsi ostali produkti hidratacije vsebujejo kemijsko vezano vodo, vendar vsebuje gel še dve drugi vrsti vode, ki zelo vplivata na krčenje. To sta voda znotraj gelnih por ter voda med sloji gela v svoji strukturi [32,34].

- Voda znotraj gelnih por

Gelne pore v C-S-H gelu so zelo majhne in sicer manjše od 50nm, zato ne prispevajo k nižanju trdnosti in trajnosti betona. Pomembna pa je voda v porah. Prvi sloj molekul vode ob steni por je fizikalno adsorbiran na površino, naslednji sloji pa so zaradi polarnosti vode razporejeni po določenih pravilih. Molekule vode so v porah povezane s hidrogenimi vezmi, zato lahko odstranitev vode prispeva h krčenju in lezenju.

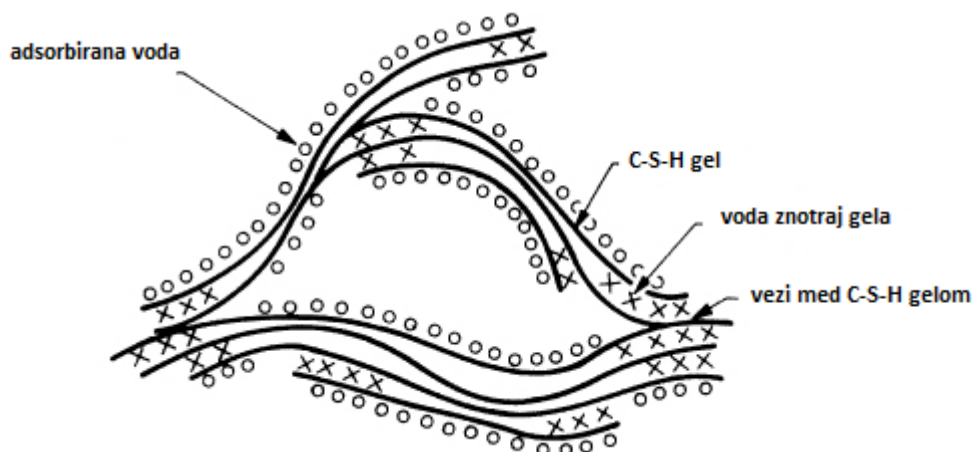
- Voda med sloji gela

Poleg vode v gelnih porah C-S-H gel vsebuje tudi vodo, ki je močnejše vezana kot adsorbirana voda v porah, vendar je še vedno v obliki H₂O molekul. Ta vrsta vode se imenuje tudi fizikalno vezana voda, saj so povezave šibkejše kot pri kemijsko vezani vodi. Ko je voda zaradi sušenja izčrpana iz slojev, se le-tej začnejo sesedati in voda med njih ne mora več priti. Tako je za večji del krčenja in lezenja kriva ravno izguba prostora med plastmi C-S-H gela. Model C-S-H gela sta predstavila dva različna avtorja, kot lahko to vidimo na sliki 11. Ta modela lahko simulirata gel vsaj kar se zadeva trdnosti, deformabilnosti, prepustnosti in trajnosti strjene cementne paste [35,36].



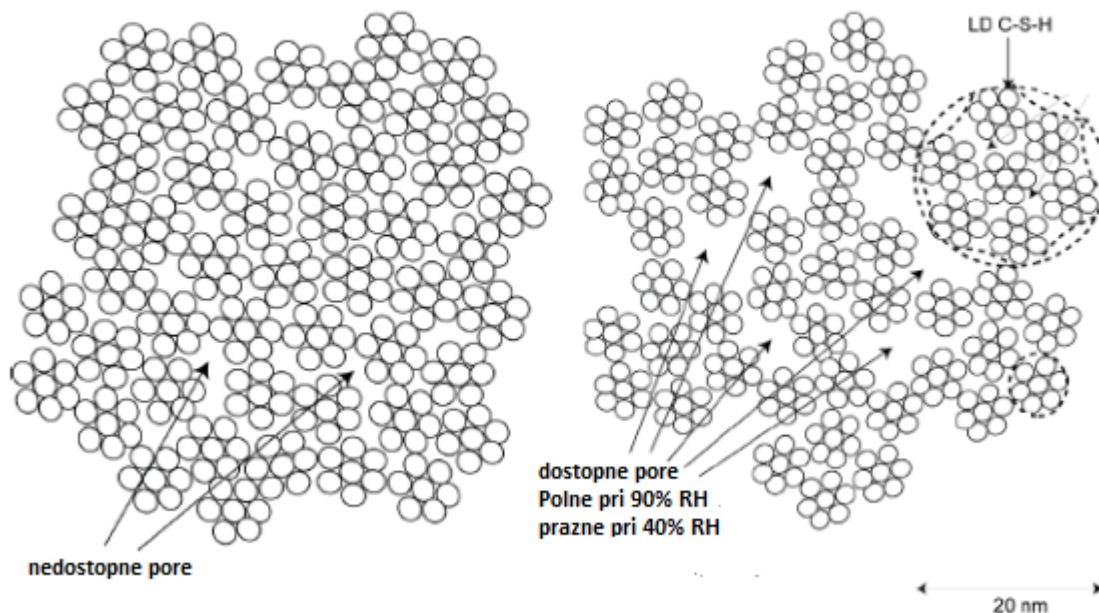
Slika 11: Različna modela C-S-H gela: a) Powers-Brunauer model b) Feldman-Serada model [35].

Slika 12 prikazuje različno vezano vodo v C-S-H gelu.



Slika 12: Model strukture C-S-H gela, kjer lahko natančneje vidimo adsorbirano vodo ter vodo znotraj plasti gela [36].

Med potekom hidratacije lahko pod mikroskopom opazimo dva različna tip C-S-H gela. Glavna razlika je njuna gostota, tako ločimo C-S-H gel visoke in nizke gostote. Gel nizke gostote, torej bolj porozen gel, nastaja hitro že v prvih obdobjih hidratacije, medtem ko gostejši gel nastaja počasneje. Gostejši gel najdemo na mestih, kjer so bili prvotno cementni delci, porozen gel pa tam, kjer je prostor prvotno zavzemala voda. Na sliki 13 lahko vidimo razliko v gostoti gelov.



Slika 13: Gel visoke gostote na levi in nizke gostote na desni strani [32].

Število kontaktov med delci je pri gostem gelu veliko večje, zato bo imel gost gel veliko večjo togost in trdoto kot bolj porozen gel. Veliko številno kontaktnih točk torej povzroči zelo stabilizirano strukturo [32,37].

5 EKSPERIMENTALNI DEL

V eksperimentalnem delu diplomske naloge smo zasledovali časovni potek in merili velikost krčenja betonov visoke trdnosti v desetih dneh po betoniranju. Beton je med različnimi frakcijami apnenčevega agregata vseboval tudi predhodno namočeno ekspanzirano glino Liapor, frakcije 2-4 mm. Rezultate meritev smo primerjali z betonom, ki je vseboval le apnenčev agregat, primerljivih frakcij.

5.1 Uporabljeni material

Pri izdelavi betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 smo uporabili kvaliteten cement CEM I 52,5R iz cementarne Anhovo, agregat iz separacije Kresnice, frakcij 0 do 16 mm in mivko Termit. Dodali smo praškasto mešanico mikrosilike in superplastifikatorja, Antikorodin. Vodovezivni faktor je 0,36, vodocementni pa 0,40. 12 % celotne prostornine agregata je predstavljala predhodno namočeno ekspanzirano glino Liapor, frakcije 2-4 mm.

5.1.1 Liapor

Liapor je poimenovan po geološkem odbobju Lias, v katerem je glina nastala. Lias je podobdobje geološkega obdobja Jura, ki se je začelo pred približno 195 milijoni let in je trajalo 55 milijonov let. Na območju Nemčije, Francije in Švice so nastajale črne in temne gline, ki jih sedaj s pridom izkoriščajo za izdelavo glinenih kroglic iz ekspandirane gline. Po izdelavi kroglic se surovo glino žge pri temperaturi okrog 1200 °C v rotacijskih pečeh. Zaradi visoke temperature se kroglice napihnejo, kar privede do drobne poroznosti. Površina kroglic je rahlo hrapava, notranjost pa ima fino strukturo por. Ekspanzirana glina ima zaradi svoje poroznosti široko področje uporabnosti. V gradbeništvu je najpogosteje uporabljena kot izolacijski material, uporabna pa je tudi v vrtnarstvu za drenažo in zračenje tal. Liapor lahko zaradi poroznosti zadrži vlago in jo sprosti, ko je potrebno. Tak material primeren za notranje rezervoarje vode v betonski mešanici. Liapor, uporabljen v eksperimentalni nalogi je pridobljen iz obrata v Avstriji. Slika 14 prikazuje ekspanzirano glino Liapor [38].



Slika 14: Kroglice ekspandirane gline Liapor [38].

5.1.2 Agregat

Uporabljen agregat iz separacije Kresnice, ki se nahaja v osrednji Sloveniji, je drobljeni svetlo siv apnenec. Pri večjih frakcijah so v vzorcu opazne razpoke, ki so zapolnjene z netopnimi glinenimi materiali. Osnova kamnine je mikrit, kar pomeni, da so v apnencu prisotna zrna kalcita manjša od 0,004 mm. To prikazuje na mirno sedimentacijsko okolje, zaradi katerega je agregat zelo trden. Zaradi tektonskih faz v kasnejših obdobjih so nastali v kamnini na mikroskopskem nivoju šivi in tektonske žile, ki so zapolnjene z glinenimi materiali. V vzorcu je prisoten tudi dolomit v skupkih v obliki kristalčkov [8].

5.1.3 Mivka

Mivka Termit iz Moravč je na makroskopskem nivoju rjavo sive barve, s posameznimi temnejšimi zrni. Vzorci, opazovani pod mikroskopom, so večinoma zaobljeni do zaobljeno-ostrorobi, vse dimenzije pa so približno enako velike, kar pomeni, da imajo zrna visok volumski koeficient. Srednja velikost zrn je 0,23 mm, frakcije 0,09-0,50 mm. Kemijska sestava obsega 98 % silicijevega dioksida (SiO_2). Uporabljena mivka je kremenčev pesek [8,39].

5.1.4 Cement

Uporabljen cement CEM I 52,5R iz cementarne Salanit Anhovo je visokokvaliteten cement [8]. Pomen oznak v imenu prikazuje preglednica 2 [1].

Preglednica 2: Pomen oznak v poimenovanju cementa.

Oznaka	Pomen
CEM I	Portlandski cement
52,5	Trdnostni razred; zgodnja trdnost po dveh dneh je večja od 30,0MPa, minimalna trdnost po 28 dneh pa 52,5MPa
R	Cementi, ki pospešeno vežejo

5.2 Sestava betonskih mešanic

Preglednica 3 prikazuje sestavo betonske mešanice za kubični meter betona. Zamešali smo 0,035m³ betona (35 litrov). Slika 15 prikazuje betonsko mešanico HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1.

Preglednica 3: Sestava betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1.

Agregat Kresnice	1728 kg/m ³
- 0-2 mm	341 kg/m ³
- 2-4 mm	284 kg/m ³
- 4-8 mm	284 kg/m ³
- 8-16 mm	474 kg/m ³
Liapor (2-4 mm)	59 kg/m ³
Mivka Termit	285 kg/m ³
Cement CEM I 52,5 R	360 kg/m ³
Antikorodin	48 kg/m ³ (12,05% veziva)
Voda	144 kg/m ³
Seštevek	2280 kg/m³
Vodovezivni faktor	0,36
Vodocementni faktor	0,40



Slika 15: Betonska mešanica HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1.

5.3 Preizkušanje konsistence sveže betonske mešanice

Konsistenca je parameter, ki določa vgradljivost betona. Je lastnost betona, ki je odvisna količine vode, cementa in agregata v mešanici. Določamo jo pri svežem betonu in je merilo za njegovo obdelavnost. Izbira konsistence je odvisna od razdalje prevoza mešanice na gradbišče, temperature mešanice, temperature okolja, oblike elementa in uporabljene armature ter hitrosti vgrajevanja.

Konsistenco sveže betonske mešanice lahko, glede na veljavne standarde, določimo na štiri načine:

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

V standardu so določeni kriteriji za posamezne stopnje konsistence. V eksperimentalnem delu diplomske naloge smo konsistenco sveže betonske mešanice določili s postopkom razleza in postopkom poseda.

5.3.1 Metoda z razlezom

Postopek razleza po standardu SIST EN 12350-5 se opravlja na razlezni mizi dimenzij 700 x 700 mm. Na mizo postavimo kovinski konus in ga z zidarsko žlico napolnimo do polovice.

Nato z lesenim nabijačem prečnega prereza dimenzij 40 x 40 mm plast nabijemo z desetimi udarci. Postopek nato ponovimo še z drugo plastjo. Z vrha nato odstranimo presežek betona. Ko je konus poln, počakamo 30 sekund in počasi, v treh sekundah, konus pazljivo odstranimo. Nato stopimo na stopalko ob mizi in zgornji del mize dvignemo za 4 cm ter jo hipno spustimo. Postopek ponovimo 15 krat, da se vzorec betonske mase razleze po mizi. Dva med seboj pravokotna radija razleza izmerimo, mera konsistence pa je povprečna vrednost le-teh. V preglednici 4 so prikazani razredi konsistence, določeni po metodi razleza. Metoda z razlezom je enostavna metoda, najbolj primerna za mešanice plastične in tekoče konsistence [40].

Preglednica 4: Razredi konsistence po SIST EN 206-1, razredi razleza [40].

Razred	Razlez [mm]
F1	< 340
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	> 630



Slika 16: Metoda z razlezom.

Povprečna vrednost razleza dveh pravokotnih dimenzij sveže betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 je 300 mm, kar jo uvršča v razred F1: trdoplastična konsistenca.

5.3.2 Metoda s posedom

Postopek testiranja poseda je najbolj enostavna metoda, ki se pogosto uporablja na gradbiščih. Uporablja kvantitativno določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko

plastičnih svežih betonskih mešanic. Za postopek poseda uporabimo kovinski konus, ki je višji in ožji od uporabljenega v postopku merjenja razleza. Napolnimo ga s tremi plastmi približno enake višine. Plasti prebadamo 25-krat s standardno kovinsko palico premera 16 mm z zaobljenim vrhom. Prvo plast prebadamo po celotni višini, ostali dve pa le do predhodne plasti. Ko je konus napolnjen, zgornjo površino zravnamo in ga počasi, previdno odstranimo. Konus postavimo ob betonski stožec in izmerimo razliko višin, ki je merilo za konsistenco po metodi s posedom. V preglednici 5 so prikazani razredi konsistence po metodi poseda [40].

Preglednica 5: Razredi konsistence po SIST EN 206-1, razredi poseda [40].

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



Slika 17: Metoda s posedom.

Posed sveže betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 je znašal 25 mm, kar jo uvršča v razred S1: trdoplastična konsistenca.

5.4 Določanje vsebnosti zraka v sveži betonski mešanici po SIST-EN 12350-7

Standard opisuje dve metodi za določanje vsebnosti zraka sveže betonske mešanice: metoda s tlakom, metoda vodnega stolpca. V obravnavanem primeru smo izvedli metodo s tlakom, ki se izvaja s pomočjo posode s pokrovom, na katerem je porozimeter. Pred preizkušanjem vzorec dobro premešamo, da dobimo homogeno betonsko mešanico. Posodo napolnimo z betonom v treh plasteh. Zgornja površina mora biti gladka, da lahko posodo zapremo s pokrovom. Da zapolnimo prostor med posodo in pokrovom skozi ventil vlijemo vodo. Nato z ročno črpalko na vrhu pokrova vnesemo v predkomoro toliko zraka, da kazalec na manometru pokaže nič. Po izravnavanju tlaka počakamo nekaj sekund ter nato ventil odpremo in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Porozimetrijski indeks predstavlja odstotek zraka celotne prostornine betona v posodi [40].



Slika 18: Posoda z manometrom za merjenje vsebnosti por v svežem betonu.

Vsebnost por v sveži betonski mešanici HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 je znašala 3,8 %.

5.5 Merjenje tlačne trdnosti

Po izdelavi betonske mešanice smo del le-te vgradili v šest jeklenih kalupov v obliki kock z robom 15 cm. Vse kocke smo razkalupili po enem dnevu in jih do preizkušanja hranili v vodi pri sobni temperaturi. Na preizkušanjih smo merili enoosno tlačno trdnost s pomočjo elektromehaničnega preizkuševalnega stroja za statične tlačne preiskave s silo do 5000 kN. S pomočjo stroja smo izmerili silo, ki je bila nanešena na betonsko kocko tik pred poružitvijo. Izmerjena sila na površino ploskve predstavlja tlačno trdnost.



Slika 19: Vzorec porušen z elektromehaničnim preizkuševalnim strojem.

V preglednici 6 so podane vrednosti enoosnih tlačnih trdnosti betonov HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1, HSC-1600-LWA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1 in HSC-1600-CEM I 52,5R po treh in osemindvajsetih dneh. Tlačne trdnosti preiskovanih betonov so bile merjene na treh preizkušancih, v preglednici so podane povprečne vrednosti.

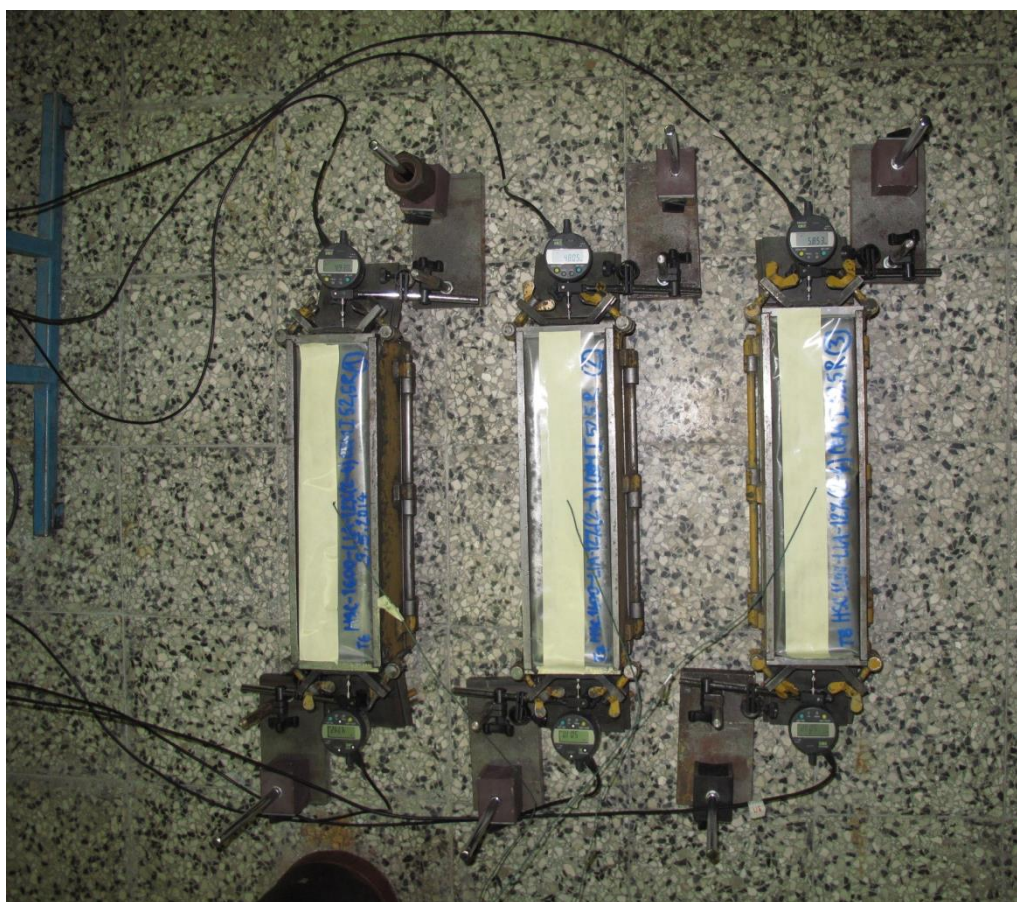
Preglednica 6: Vrednosti tlačne trdnosti različnih betonskih mešanic.

Betonske mešanice	Enoosna tlačna trdnost [MPa]	
	3 dan	28 dan
HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1	57,1	71,1
HSC-1600-LWA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1	60,6	94,6
HSC-1600-CEM I 52,5R	60,4	83,0

Beton HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1 ima po osemindvajsetih dneh za 14,3% nižjo tlačno trdnost kot primerjalna mešanica HSC-1600-CEM I 52,5R, ter kar 24,8 % nižjo tlačno trdnost od betonske mešanice z dodatkom lahkega agregata. Nižja tlačna trdnost uporabljene ekspandirane gline v primerjavi z apnenčevim agregatom se je odrazila na velikosti celotne tlačne trdnosti betonskega vzorca in je bila nižja kot pri primerljivem betonu, ki je vseboval le apnenčev agregat.

5.6 Merjenje krčenja betona

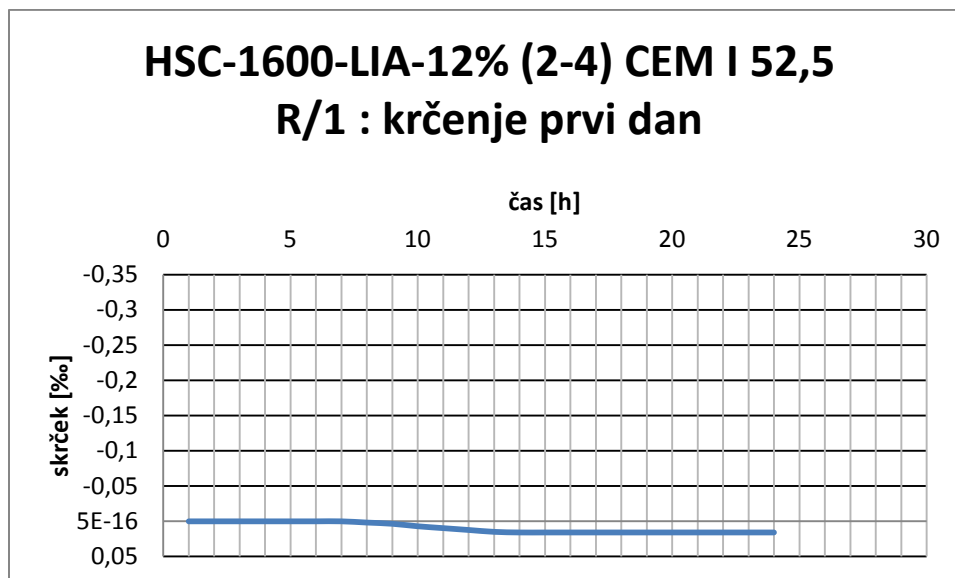
Svežo betonsko mešanico smo vgradili v kalupe prizmatske oblike, dimenzij 40x40x10 cm, ki jih prikazuje slika 20. V kalupe smo na dno in stene predhodno položili polipropilensko folijo, da bi zmanjšali trenje med kalupom in betonom. Folija preprečuje izmenjavo vlage med betonom in okolico. Na oba konca kalupa smo vstavili jekleni plošči, ki sta bili odmaknjeni od roba, da se je lahko beton prosto krčil ali nabrekal. Ko je bila betonska mešanica vgrajena in merske urice nameščene na reperje, smo jih povezali z računalnikom. Poleg reperjev za merjenje skrčkov smo v kalupe ustavili termo člen za merjenje temperature, ki se je med strjevanjem betona spreminjala in je bilo zato v njem prisotno temperaturno deformiranje. Vzorce smo hranili v zaprtem prostoru z relativno vlažnostjo 70% in temperaturo 20°C.



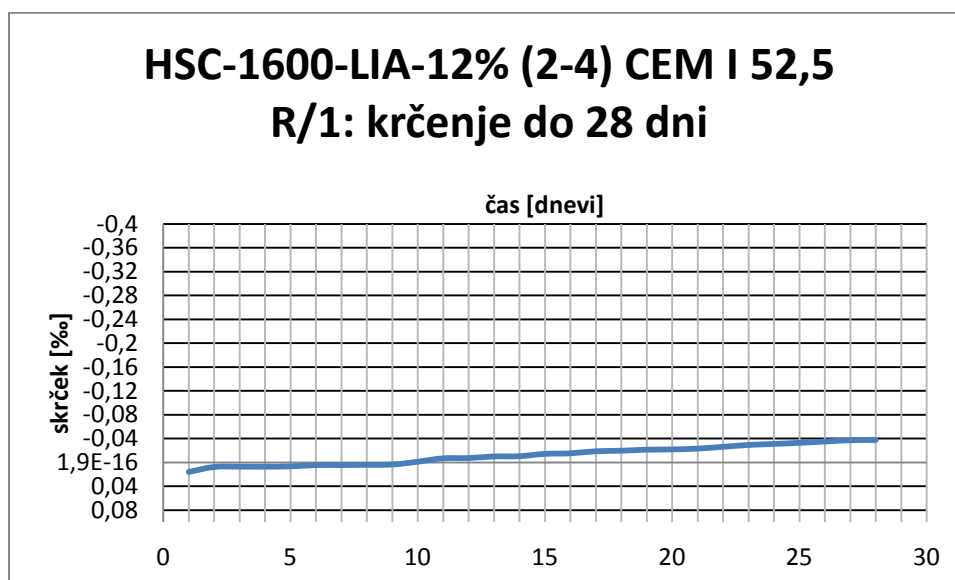
Slika 20: Pripravljene vzorce za merjenje krčenja.

5.7 Rezultati in analiza rezultatov

Velikost avtogenega krčenja se je s pomočjo elektronske opreme priklopljene na merilne urice izpisovalo vsako minuto. Poleg avtogenega krčenja se med strjevanjem beton tudi temperaturno deformira, kar smo pri analizi rezultatov zanemarili. Na grafih 1 in 2 je prikazano povprečno avtogeno krčenje, merjeno na treh preizkušancih iz betonske mešanice HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1. Graf 1 prikazuje krčenje v prvih 24 urah, drugi pa v prvih 28 dneh.

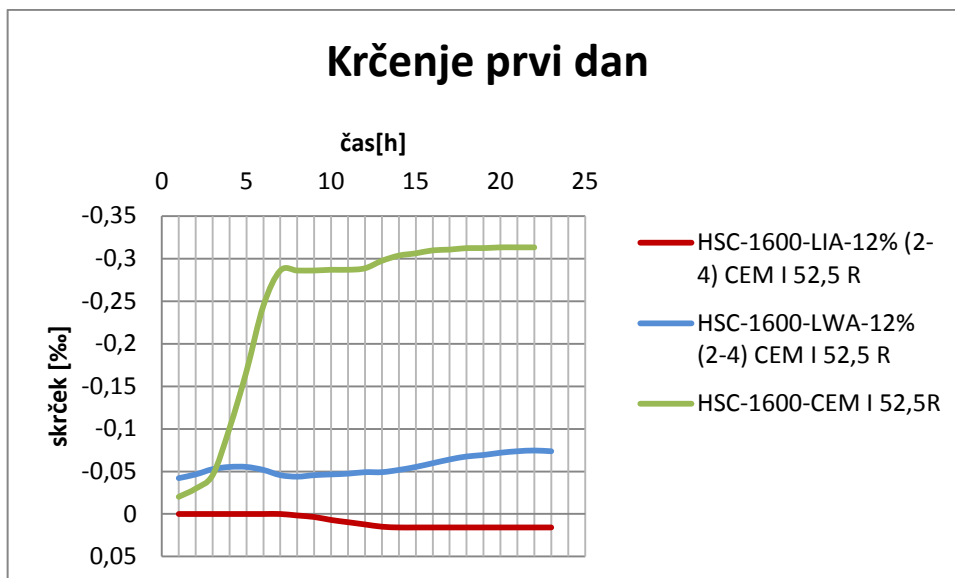


Grafikon 1: Krčenje mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 prvih 24 ur.

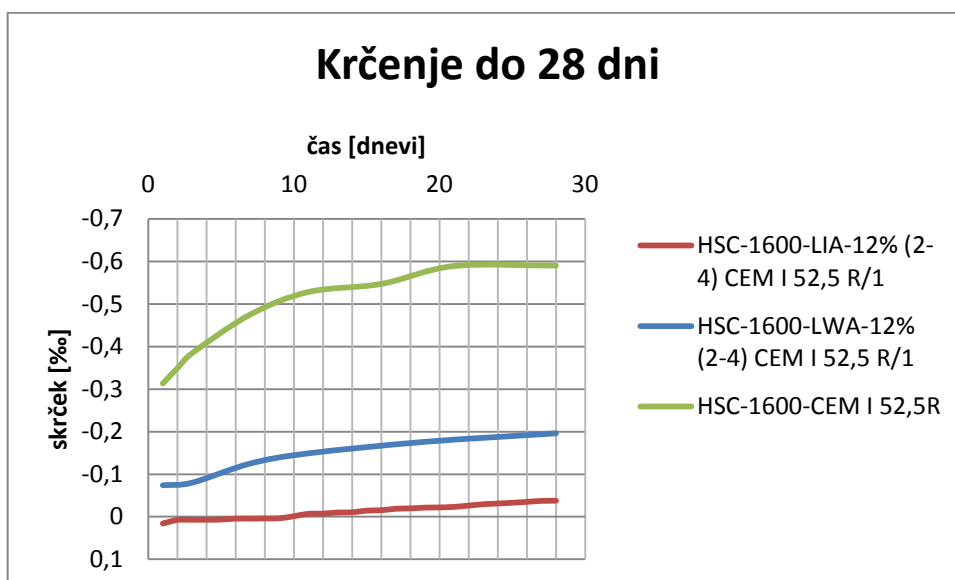


Grafikon 2: Krčenje mešanice HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52,5 R/1 prvih 28 dni.

Na grafikonih 3 in 4 so prikazani časovni poteki krčenja betonov HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1 (dodatek liaporja), HSC-1600-LWA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1 (dodatek lahkega agregata), in primerjalnega betona brez dodatkov HSC-1600-CEM I 52,5R.



Grafikon 3: Primerjava krčenja betonskih mešanic v prvem dnevu.



Grafikon 4: Primerjava krčenja betonskih mešanic v prvih 28ih dneh.

Kot vidimo v preglednici 7, je vzorec z dodatkom Liapora prvi dan nabrekal, medtem ko sta se začela primerjalna vzorca takoj krčiti.

Preglednica 7: Krčenje betonskih mešanic.

Betonska mešanica	Skrčček [‰]	
	1 dan	28 dan
HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1	0,05789	-0,0378
HSC-1600-LWA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1	-0,07368	-0,1960
HSC-1600-CEM I 52,5R	-0,31316	-0,5900

Krčenje betona HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1 je po osemindvajsetih dneh približno 5,2 krat manjše od primerljivega betona z dodatkom lahkega agregata in kar 15,6 krat manjše od primerljivega betona brez dodatkov.

5.7.1 Nabrekanje betona

Nabrekanje betona je najpogosteje prisotno pri betonih, ki so med celotnim procesom hidratacije negovani v vodi. Do nabrekanja pride, ker cementni gel absorbira vodo. Molekule vode delujejo proti kohezivnim silam med molekulami cementa, zato se le-te med seboj oddaljijo, kar povzroči povečanje volumna. To se zgodi v prvih nekaj urah po začetku strjevanja, nato se začne beton krčiti. Ta pojav je značilen za betone običajnih trdnosti, kjer je v betonu zadostna količina vlage. Prisotnost le-tega v obravnavanem betonu kaže, da je betonski mešanici veliko vode v notranjih rezervoarjih ekspandirane gline [5].

6 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu je opisan fenomen avtogenega krčenja, ki je pomemben dejavnik v strjevanju betonov visoke trdnosti. V laboratorijskih raziskavah smo opazovali vpliv predhodno namočene ekspandirane glin na velikost avtogenega krčenja in tlačne trdnosti betona. Rezultate lastnega eksperimentalnega dela smo primerjali s predhodno opravljenimi preizkusi.

Nizko vodo cementno razmerje v betonih visoke trdnosti je razlog za velike avtogene deformacije, ki se pojavijo na začetku strjevanja betona. Ker deformacije povzročajo razpokanost in posledično nižjo trajnost betonov, je zaželeno avtogeno krčenje zmanjšati. Eden izmed načinov za izdelavo betonov z majhnim avtogenim krčenjem je dodajanje materialov, ki delujejo kot notranji rezervoarji vode. Notranji rezervoarji zagotavljajo dodatno vodo, ko začne v porah cementnega kamna zaradi procesa hidratacije zmanjkovati proste vode.

V laboratorijskem delu smo velikost avtogenega krčenja betonske mešanice z dodatkom ekspandirane glin Liapor frakcije 2-4mm (HSC-1600-LIA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1) primerjali z rezultati predhodno opravljenih raziskav betonske mešanice z dodatkom lahkega agregata frakcije 2-4mm (HSC-1600-LWA-12% (2-4) CEM I 52,5 R/1) in z rezultati betonske mešanice brez dodatkov (HSC-1600-CEM I 52,5R). Ugotovili smo, da ekspandirana glina ugodno vpliva na velikost avtogenega krčenja. Po osemindvajsetih dneh je avtogeno krčenje 5,2 krat manjše kot krčenje betona z dodatkom lahkega agregata Lehnjaka in 15,6 krat manjše kot krčenje betona, ki ni bil notranje negovan.

Poleg avtogenega krčenja smo na preizkušancih merili tudi enoosno tlačno trdnost. Po primerjavi s predhodno opravljenimi preizkusi smo ugotovili, da je tlačna trdnost betonov z dodatkom ekspandirane glin, merjena na osemindvajset dneh starih preizkušancih, manjša za 15% . Sklepamo, da je tlačna trdnost manjša zaradi manjše trdnosti ekspandirane glin v primerjavi z običajnim agregatom Lehnjakom.

V diplomskem delu smo prišli do zaključka, da dodatek ekspandirane glin ugodno vpliva na velikost avtogenega krčenja in neugodno na tlačno trdnost. Domnevamo, da je avtogeno krčenje betona z ekspandirano glino nekoliko manjše kot pri betonu z lahkim agregatom Lehnjakom zaradi velike poroznosti ekspandirane glin, ki lahko tako vpije večjo količino vode kot lahek agregat Lehnjak. Beton z lahkim agregatom pa v primerjavi z betonom z ekspandirano glino ohrani ali celo izboljša tlačno trdnost. Smiselno bi bilo opraviti še laboratorijske preiskave betonov z drobnejšimi frakcijami ekspandirane glin (0-2mm).

VIRI

- [1] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preiskovanje materialov: 91 str.
- [2] Caijun, S., Mo, Y.L. 2008. High - Performance Construction Materials, Science and Applications. Engineernig Materials for Technological Needs. 1: 19, 35-39.
- [3] 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.
- [4] SIST EN 206-1, Beton. Del 1, Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost : (istoveten z EN 206-1:2000), Ljubljana 2003, Slovenski inštitut za standardizacijo.
- [5] Neville, A.M. 2011. Properties of Concrete, 5th edition. Harlow [etc.], Pearson: str. 2, 13-19, 31-34, 83-86, 108, 279-286, 423-430.
- [6] Kumar Mehta, P; Monteiro J.M.P. 2006. Concrete: Microstructure, Propertes, and Materials. University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering: str. 205-209.
- [7] Mineral and oxide composition of portland cement. 2014.
http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_6.html (Pridobljeno 13. 2. 2014.)
- [8] Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): str. 1-99.
- [9] Hanžič, L. 2005. Kapilarnost v betonih. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška Fakulteta (samozaložba L. Hanžič): str. 12-15.
- [10] Mikulić, D., Gabrijel, I., Hranilović Trubić, A., Uzelac, S. 2007. Analiza pora u betonu- međulaboratorijska ispitivanja, Građevinar 59: 387-393.
- [11] Development of microstructure. 2014.
<http://people.ce.gatech.edu/~kk92/hcp.pdf> (Pridobljeno 3. 3. 2014)
- [12] Sahamaran, M., Lachemi, M., Khandker, M.A.H, Victor, C.Li. 2009. Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. Cement and concrete research, 39, 10: 893-901.
- [13] Aitcin, P.C., Mindess. S. 2011. Sustainability of concrete. Modern concrete technology 17: str. 176-199, 212-223.
- [14] Tazawa, E., Miyazawa, S. 1997. Study on the predicion of autogenous shrinkage. Proceedings of JSCE: str. 211-219.

- [15] Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov: str. 86-91.
- [16] Zajc, A. 2004. Mikrorazpoke, duktilnost in obstojnost. V: Shah, P. S. (ur.) , Lawler, S. J. (ur.) , Rapoport, J.(ur.). IV: Slovenski kolokvij o betonih –Razpoke v betonu ,Ljubljana, Slovenija, 31. maj 2004. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 7-15.
- [17] Wenjung, H. 2013. Creep and Shrinkage of High Performance Concrete, and Prediction of Long-Term Camber of Prestressed Bridge Girders. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University: str. 23-28.
- [18] Holt, E.E. 2001. Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete. Technical Research Centre of Finland: str. 35.
- [19] Lura, P., Jensen, O.M., VanBreugel K. 2003. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. Cement and concrete research, 33, 2: 223-232.
- [20] Božič, B., Derganc, J., Podgornik, R., Svetina, S. 2011. Biofizika za medicino, skripta: str. 45-48.
- [21] Bentz, P.D., Snyder, A.K., Stutzman P.E. 2014. Hydration of Portland cement: the effects of curing conditions.
<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97002.pdf> (Pridobljeno 15. 2. 2014)
- [22] Hagymassy,J.,Brunauer, J.R., Mikhail, R.S. 1969. Pore structure analysis by water vapor adsorption. Journal of Colloid Interface Science, 29, 3: 485– 491.
- [23] Zhengwu, J., Zheuping, S., Peiming, W. 2005. Autogenous relative humidity change and autogenous shrinkage of high-performance cement pastes. Cement and concrete research, 35, 8: 1539-1545.
- [24] Wittmann, F.H. 1968. Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste. Materials & Structures, 1, 6: 547-552.
- [25] Sorakan, I. 1979. Portland Cement Paste and Concrete. London. Macmillan: str. 15-330.
- [26] Jensen, O.M., Hansen. P.F. 2001. Autogenous deformation and RH-change in perspective, Cement and Concrete Research, 31, 12: 1859– 1865
- [27] Katz, A., Li, V.C., Kazmer A. 1995. Bond properties of carbon fibres in cementitious matrix. J Mater Civil Eng, 7:125-128.
- [28] Cusson, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked lightweight aggregate sand for prevention of autogenous shrinkage cracking. Cement and Concrete Research, 38, 6: 757-765.

- [29] Hewlett, C.P. Lea's chemistry of cement and concrete. London, Sydney Auckland: Arnold, New York, Toronto. J. Wiley & Sons, cop.: str. 241-297.
- [30] Overview of the hydration proces. 2014.
http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_1.html (Pridobljeno 5. 3. 2014.)
- [31] Dolado, J.S., Griebel, M., Hamaekers J. 2007. A Molecular Dynamics Study of Cementitious Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) Gels: str. 1-11.
- [32] Jennings, H.M. 2000. A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. Cement and Concrete esearch,30, 1: 101-116.
- [33] Selvam, R.P., Subramani, V.J., Murray, S., Hall, K. 2009. Potential Application of Nanotechnology on Cement Based Materials.
http://ww2.mackblackwell.org/web/research/ALL_RESEARCH_PROJECTS/2000s/2095/MBTC%202095-3004.pdf (Pridobljeno 15. 3. 2014)
- [34] Overview. 2014.
http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph7_3_1.html (Pridobljeno 5. 3. 2014)
- [35] Aligizaki, K.A. 2006. Pore structure of cement-based materials. Testing, interpretation and requierments. Modern concrete tochnology, 12: str. 1-30.
- [36] Hearn, N., Hooton, R.D., Mills, R.H. 1994. Pore structure and permeability. Concrete and concrete making materials: str. 240-251.
- [37] Tennis, P.D., Jennings, H.M. 2000. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes, Cement and Concrete Research, 30, 6: 855-863.
- [38] Basic materials of liapor- propreties. 2014.
<http://www.liapor.com/en/start.php> (Pridobljeno 25. 5. 2014.)
- [39] Termit. Kremenov pesek MAP-1. 2014.
<http://www.termit.si/wp-content/uploads/2013/11/MAP-1.pdf> (Pridobljeno 25. 5. 2014)
- [40] 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: str. 58-66.