

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:

Šubic, N., 2014. Vpliv vrste lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 32 str.

Datum arhiviranja: 15-10-2014

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:

Šubic, N., 2014. Vpliv vrste lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 32 pp.

Archiving Date: 15-10-2014

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:

Diplomska naloga št.: 124/B-GR

Graduation thesis No.: 124/B-GR

Mentor:

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 11. 09. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Nika Šubic izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »Vpliv lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 4. 9. 2014

Nika Šubic

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.4(497.4)(043.2)
Avtor:	Nika Šubic
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv vrste lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	32 str., 20 pregl., 4 graf., 10 sl.
Ključne besede:	lahek agregat, notranja nega betona, betoni visoke trdnosti, avtogeno krčenje, krčenje zaradi sušenja

Izvleček

Beton visoke trdnosti se ponaša z mnogimi dobrimi lastnostmi a ima tudi negativne, kot je na primer veliko avtogeno krčenje. Le to lahko zmanjšamo z dodajanjem predhodno namočenega lahkega agregata v betonsko mešanico. V diplomski nalogi obravnavamo vpliv različnih lahkih agregatov na tlačne trdnosti in krčenje betona. Opisani so faktorji, od katerih je odvisna učinkovitost lahkega agregata kot notranjega rezervoarja vode. V eksperimentalnem delu diplomske naloge smo primerjali betonske mešanice, ki so vsebovale različni vrsti predhodno namočenega lahkega agregata. Uporabljen je bil naraven lahek agregat Lehnjak frakcij 0-2mm in 2-4mm ter ekspandirana glina Liapor enakih frakcij. Vse štiri betonske mešanice so vsebovale 12% lahkega agregata. Primerjali smo jih s kontrolno mešanico, ki je vsebovala le običajen agregat. Dodajanje predhodno namočenega lahkega agregata v betonsko mešanico se izkaže za ugodno, saj izboljša lastnosti betona. Opazna je tudi razlika med betonskimi mešanicami z dodano različno vrsto in različno zrnastostno strukturo lahkega agregata. Uporaba predhodno namočene ekspandirane gline frakcije 0-2mm, glede na primerljiv beton brez predhodno namočenega lahkega agregata, poveča tlačno trdnost betona in zmanjša njegovo krčenje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.4(497.4)(043.2)
Author: Nika Šubic
Supervisor: Assist. Prof. Drago Saje Ph.D.
Title: The impact of different lightweight aggregates on properties of high strength concrete
Document type: Graduation Thesis - University studies
Notes: 32 p., 20 tab., 4 gr., 10 fig.
Key words: lightweight aggregate, internal curing of concrete, high performance concretes, autogenous shrinkage, drying shrinkage

Abstract

High strength concrete is known for its many favorable qualities. However it also has some negative characteristics like autogenous shrinkage which can be reduced by adding saturated lightweight aggregate to the concrete mix. The effect of using different types of lightweight aggregate on compressive strength and shrinkage of concrete is discussed in this graduation thesis. Factors influencing the success of internal curing with prewetted lightweight aggregate are described in theoretical part of the thesis and experiments using different kinds of lightweight aggregate were conducted in experimental part. Materials used were natural lightweight aggregate of fractions 0-2 and 2-4 and expanded clay of the same fractions. Four concrete mixes containing 12% of different lightweight aggregates were compared to a comparable concrete mix without lightweight aggregate. It appears that the use of prewetted lightweight aggregate improves the performance of high strength concrete; however the variation of results is noticeable. The type and grading of lightweight aggregate we add to the cement mix has an influence on the effectiveness of internal curing. In comparison with a similar concrete without prewetted lightweight aggregate, adding prewetted expanded clay of fraction 0-2mm increases compressive strength and decreases autogenous shrinkage of high strength concrete.

ZAHVALA

Za pomoč in vodstvo pri izdelavi diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu. Najlepša hvala tudi vsem, ki so mi pomagali in stali ob strani med nastajanjem zaključnega dela, ter v času celotnega študija.

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 Sestavine betonov visoke trdnosti	3
2.1.1 Agregat.....	3
2.1.2 Cement.....	3
2.1.3 Kemijski in mineralni dodatki	4
2.1.4 Voda	5
2.2 Vodovezivno razmerje	5
3 MEHANSKE IN REOLOŠKE LASTNOSTI BETONOV VISOKE TRDNOSTI.....	6
3.1 Tlačna trdnost.....	6
3.1.1 Homogenost betonske mešanice	6
3.1.2 Mikrorazpoke v stičnem območju med agregatom in cementnim kamnom.....	7
3.1.3 Poroznost in propustnost betona.....	8
3.2 Krčenje betonov visoke trdnosti.....	9
3.2.1 Avtogeno krčenje.....	10
3.2.2 Krčenje zaradi sušenja	10
3.2.3 Nega betonov visoke trdnosti	11
4 LAHEK AGREGAT KOT NOTRANJI REZERVOAR VODE	12
4.1 Naravni in umetni lahki agregati	12
4.2 Mehanizem notranje nege	13
4.2.1 Količina potrebne vode	13
4.2.2 Sposobnost oddajanja vode iz agregata	13
4.2.3 Homogenost razporeditve	14
4.3 Vpliv lahkega agregata na lastnosti betona	15
5 EKSPERIMENTALNI DEL.....	16
5.1 Uporabljeni materiali.....	16
5.1.1 Lahek agregat	16
5.1.2 Agregat.....	17
5.1.3 Cement.....	18
5.1.4 Mineralni in kemični dodatki	18

5.2	Sestava betonske mešanice	18
5.3	Preizkušanje konsistence sveže betonske mešanice	19
5.3.1	Metoda s posedom.....	19
5.3.2	Metoda z razlezom.....	20
5.4	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu (SIST EN 12350-7).....	20
5.5	Merjenje tlačne trdnosti	21
5.6	Merjenje avtogenega in celotnega krčenja.....	22
5.6.1	Merjenje avtogenega krčenja	22
5.6.2	Merjenje celotnega krčenja	23
5.7	Analiza in primerjava rezultatov	24
5.7.1	Tlačna trdnost betonov visoke trdnosti.....	24
5.7.2	Krčenje zatesnjenih preizkušancev	25
5.7.3	Celotno krčenje preizkušancev	27
5.7.4	Krčenje zaradi sušenja.....	28
6	ZAKLJUČEK	29
VIRI		30

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava portland cementa [1]	3
Preglednica 2: Praznine v betonskem kamnu [1, 4, 5].....	8
Preglednica 3: Vrste agregatov glede na gostoto [28]	12
Preglednica 4: Lahek agregat iz kamnoloma Jezersko [37]	17
Preglednica 5: Mivka iz Moravč [2]	17
Preglednica 6: Agregat iz kamnoloma Ušenišče [2]	18
Preglednica 7: Sestava betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1	19
Preglednica 8: Razredi poseda svežega betona [26]	20
Preglednica 9: Razredi razleza svežega betona [26].....	20
Preglednica 10: Enosne tlačne trdnosti treh preizkušancev betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1	21
Preglednica 11: Povprečne vrednosti krčenja preizkušancev betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1	23
Preglednica 12: Lastnosti primerjanih betonskih mešanic	24
Preglednica 13: Tlačne trdnosti primerjanih betonov	24
Preglednica 14: Odstopanje mešanic z dodanim lahkim agregatom, v primerjavi s kontrolno mešanico	25
Preglednica 15: Primerjava skrčkov zatesnjenih betonskih preizkušancev	25
Preglednica 16: Odstopanje skrčkov zatesnjenih preizkušancev glede na kontrolno mešanico	26
Preglednica 17: Primerjava celotnega krčenja betonskih preizkušancev	27
Preglednica 18: Odstopanje celotnega krčenja betonskih preizkušancev glede na kontrolno mešanico	27
Preglednica 19: Primerjava krčenja zaradi sušenja betonskih preizkušancev	28
Preglednica 20: Odstopanje krčenja zaradi sušenja betonskih preizkušancev v primerjavi s kontrolno mešanico.....	28

KAZALO SLIK

Slika 1: Razmerje med tlačno trdnostjo in vodovezivnim količnikom [4].....	5
Slika 2: Razmerje med napetostmi in deformacijami: A - agregat; B - beton; C – cementni kamen [2].....	7
Slika 3: Vpliv vodovezivnega količnika in stopnje hidratacije na tlačno trdnost in propustnost [1].....	9
Slika 4: Vpliv vodovezivnega razmerja in deleža agregata (po volumnu) na krčenje [4].....	10
Slika 5: Izbira količine lahkega agregata: a) za enako količino vode potrebujemo različne količine lahkega agregata, glede na stopnjo nasičenosti; b) enaka količina lahkega agregata bo vsebovala različno količino vode, glede na stopnjo nasičenosti. [36].....	14
Slika 6: Območje notranje nege [11].....	15
Slika 7: Liapor kroglice [22].....	17
Slika 8: Porušitev betonskega preizkušanca ob preizkušanju enosne tlačne trdnosti.....	21
Slika 9: Merjenje Krčenja zatesnjenih preizkušancev.....	22
Slika 10: Merjenje celotnega krčenja.....	23

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Avtogeno in celotno krčenje betonskega preizkušanca	23
Grafikon 2: Krčenje zatesnjenih betonskih preizkušancev.....	26
Grafikon 3: Celotno krčenje betonskih preizkušancev	27
Grafikon 4: Krčenje zaradi sušenja betonskih preizkušancev.....	28

1 UVOD

Beton v takšni ali drugačni obliki obstaja že več sto let. V času njegovega razvoja je nastalo mnogo različnih vrst betona, med drugim tudi beton visoke trdnosti. Glavna lastnost betona visoke trdnosti je nizek vodovozivni količnik, ki ugodno vpliva na tlačno trdnost ter obstojnost betona, vendar pa ima hkrati tudi negativne posledice. Najpoglavitejša je večje avtogeno krčenje, ki lahko, v primeru da je nenadzorovano, povzroči veliko škode. Avtogeno krčenje lahko zmanjšamo z notranjo nego betona. V betonsko mešanico zamešamo notranje rezervoarje vode v obliki predhodno namočenega lahkega agregata, ki dovajajo dodatno vodo v sistem med procesom hidratacije in tako preprečujejo samoizsuševanje ter s tem avtogeno krčenje betona. Za uspešnost notranje nege je pomembna izbira lahkega agregata, saj njegova velikost, oblika in struktura por vplivajo na oddajanje vode v beton. V okviru diplomske naloge sem preučila vpliv lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti.

Diplomska naloga obsega poleg uvoda še pet poglavij. Poglavje *Betoni visokih trdnosti* opisuje glavne lastnosti betonov visokih trdnosti, njihove prednosti in slabosti. Opisane so glavne sestavine betona in njihov vpliv na tlačno trdnost, ter vodovozivno razmerje in njegov pomen. Poglavje *Mehanske in reološke lastnosti betonov visokih trdnosti* je razdeljeno na dve podpoglavji. Tematika prvega podpoglavja je tlačna trdnost in glavni faktorji, ki vplivajo nanjo. V drugem podpoglavju je opisano krčenje, predvsem avtogeno krčenje in krčenje zaradi sušenja, ter ustrezna nega betona, ki krčenje zmanjšuje. Posebno poglavje sem posvetili *Lahkemu agregatu kot notranjem rezervoarju vode*, ter njegovim vplivom na proces notranje nege in na lastnosti betona visokih trdnosti. V poglavju *Eksperimentalni del* je opisana betonska mešanica, njene sestavine ter preizkusi, ki smo jih opravili. Predstavljeni so rezultati meritev, katere sem primerjali s predhodno opravljenimi meritvami. Na koncu sem v poglavju Zaključek na podlagi eksperimentalnega dela opisali končne ugotovitve preizkusov.

2 BETONI VISOKE TRDNOSTI

Beton je eden izmed najbolj razširjenih gradbenih materialov, saj je lahko dostopen in cenovno ugoden, dosega visoke tlačne trdnosti in betonski elementi so lahko raznih oblik in velikosti. Vendar pa zaradi tehnološkega razvoja in zahteve po bolj kompleksnih ter trajnih konstrukcijah običajen beton ne zadostuje vseh zahtev. V želji po izboljšanju betona kot konstrukcijskega materiala so se razvile nove vrste betonov, med njimi beton visoke trdnosti. [1,2]

Glavna značilnost betonov visokih trdnosti je višja tlačna trdnost, ki mora presegati 55 MPa. Za izdelavo betona visokih trdnosti je potrebna izbira kvalitetnih osnovnih sestavin in dodatkov ter pravilno razmerje le-teh v betonski mešanici. Največji vpliv na trdnost betona ima vodovezivni količnik. Manjši vodovezivni količnik poveča trdnost betona, hkrati pa poslabša njegovo vgradljivost. Le-to izboljšamo z dodajanjem raznih kemičnih dodatkov, kot je superplastifikator. Na trdnost betona vplivajo tudi mineralni dodatki s pucolanskimi lastnostmi, ki zmanjšajo poroznost cementnega kamna in tako povečajo tlačno trdnost betona. [1, 3]

Betoni visokih trdnosti so široko uporabni, predvsem so primerni za gradnjo zahtevnih konstrukcij, kot so mostovi, tuneli, visoke stavbe, hale in podobno. Zaradi višje tlačne trdnosti so konstrukcijski elementi lahko vitkejši, zmanjšana je teža konstrukcije, kar ugodno vpliva na potresno obtežbo. Poleg tega se poveča neto površina ter fleksibilnost prostorov in tudi zaradi manjše porabe konstrukcijskih materialov se poveča ekonomičnost konstrukcije. Gostejša mikrostruktura betonov visokih trdnosti ugodno vpliva tudi na trajnost in življenjsko dobo betona. [3]

Vendar pa ima beton visoke trdnosti tudi nekatere slabosti, kot je na primer večje avtogeno krčenje. Zato je pri izdelavi betonskih elementov potrebno posvetiti posebno pozornost tudi pravilni vgradnji ter negi betona. [3]

2.1 Sestavine betonov visoke trdnosti

Sestavine betonov visoke trdnosti so načeloma enake kot pri navadnih betonih, le da moramo biti še bolj pozorni na kvaliteto izbranih sestavin in razmerja le-teh.

2.1.1 Agregat

Agregat predvsem vpliva na specifično težo, elastični modul in dimenzijsko stabilnost betona, pri čem so bolj pomembne fizične lastnosti agregata kot kemične. Zato se primeren agregat ponavadi izbira le na podlagi karakteristik kot so volumen, velikost zrna, prostorninska teža in razporeditev por. [1]

Oblika in velikost agregata lahko posredno vplivata na trdnost betona. Pri uporabi bolj podolgovatih zrn se poveča možnost, da se pojavi vodni film na površini agregata in se tako oslabi povezava med agregatom in cementno pasto. Za doseganje tlačnih trdnosti nad 125MPa je priporočljivo uporabiti maksimalno velikost zrna $D_{max}=10-14\text{mm}$. Uporaba agregata z velikim deležem praškastih delcev ni primerna, saj potrebujejo večjo količino vode za doseganje enake vgradljivosti. [1] Pri običajnih betonih trdnost agregata ne predstavlja problemov, saj je šibka točka sistema hidratirana cementna pasta. Pri betonih visoke trdnosti pa je izbira agregata bolj pomembna, saj cementni kamen dosega višje trdnosti in je lahko kvaliteta agregata ključna pri poružitvi elementa. [1, 3]

Načeloma agregat v betonski mešanici predstavlja polnilo, ki s svojimi karakteristikami močno vpliva na končne lastnosti betona. V zadnjih desetletjih pa se je začelo agregat uporabljati tudi za notranjo nego betona. Za ta namen so primerni razni lahki agregati, ki so visoko porozni in imajo sposobnost vpijanja velikih količin vode, katero kasneje med procesom hidracije cementne paste oddajo. S tem ugodno vplivajo na krčenje, poroznost in razvoj trdnosti betona. [3]

2.1.2 Cement

Cement je hidravlično vezivo, ki se ob mešanju z vodo strdi. Pridobivamo ga iz naravnih surovin, osnovni sta apnenec in glina, iz katerih s postopkom žganja pri temperaturah do 1500°C nastane cementni klinker. Z mletjem cementnega klinkerja v prah (velikosti 1-50 μm), kateremu lahko dodamo do 5% drugih zmesi, dobimo portland cement. [1, 4, 5]

Preglednica 1: Sestava portland cementa [1]

mineral	kemijska formula	okrajšava	delež
trikalcijev silikat (alit)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	45-60%
dikalcijev silikat (belit)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	15-30%
trikalcijev aluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-12%
tetrakalcijev aluminat	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6-8%

Kemijsko sestavo cementa predstavljajo 4 glavne komponente: kalcijev (CaO), silicijev (SiO_2), aluminijev (Al_2O_3) in železov (Fe_2O_3) oksid, ki sestavljajo cementni klinker. [1,2,5]

Da cement postane vezivo, je potrebna eksotermna kemijska reakcija med minerali cementa in vodo – hidratacija cementa. Med procesom hidratacije beton razvija svojo trdnost, istočasno pa prihaja do spremembe temperature in prostornine betona. [1,2]

Poleg lastnosti cementa kot je razmerje glavnih mineralov cementnega klinkerja in finost mletja portland cementa, na proces hidratacije vpliva tudi vrsta agregata, temperatura in vlaga okolja, vodovezivno razmerje ter količine in vrste dodatkov betonski mešanici. [2]

2.1.3 Kemijski in mineralni dodatki

Z vmešanjem raznih mineralnih in kemičnih dodatkov v betonsko mešanico, lahko vplivamo na mnoge lastnosti betona v svežem in trdnem stanju. Izdelava betonov visoke trdnosti brez ustreznih dodatkov je praktično nemogoča. Betonske mešanice z zelo velikim deležem cementa so nagnjene k visoki stopnji krčenja in posledično večjemu številu razpok, medtem ko se pri mešanicah z višjo vsebnostjo vode pojavi segregacija in izcejanje vode. Ustrezna rešitev je uporaba mineralnih dodatkov kot sta mikrosilika ali elektrofilterski pepel ter kemijskih preparatov z lastnostmi superplastifikatorjev. [1]

Mikrosilika je fin prah, ki nastane kot stranski produkt pri proizvodnji silicija in zlitin ferosilicija. Dimenzije posameznih delcev so velikostnega reda 0.1 μm , kar je do 100-krat manjše od delcev cementa. Zaradi velike reaktivnosti s kalcijevim hidroksidom (pucolanska reakcija), ugodno vpliva na trdnost betona, kot tudi na propustnost. Poleg visoke reaktivnosti, ima mikrosilika ugoden vpliv tudi zaradi velikost svojih delcev, saj se razporedijo v bližini agregata in tako izboljšajo stično območje med cementnim kamnom in agregatom. Zaradi velike specifične površine ima mikrosilika višjo zahtevo po vodi, zato je v mešanicah z nizkim vodocementnim količnikom primerno uporabiti superplastifikator. [2, 4] Zaradi nižje propustnosti imajo betoni z dodano mikrosiliko boljšo korozijsko odpornost, ter odpornost na učinke kemikalij. Izboljša se tudi njihova abrazijska odpornost, medtem ko se krčenje nekoliko poveča. [1]

Da lahko pri betonih z nizkim vodovezivnim količnikom dosegamo zadovoljivo stopnjo vgradljivosti in obdelovalnosti uporabljamo **superplastifikatorje**. Z uporabo superplastifikatorja lahko zmanjšamo količino potrebne vode v cementni mešanici za 25% do 35%. [7] Poznamo več vrst superplastifikatorjev, ki delujejo na različne načine, vedno pa je njihov cilj povečati razpršenost cementnih delcev. Posledica tega je manjša površinska napetost vode in s tem bistveno večja sposobnost tečenja betonske mešanice. Zaradi boljše razporeditve delcev cementa se poveča tudi stopnja hidratacije. Z dodajanjem superplastifikatorja dosegamo višjo trdnost, boljšo obstojnost in večjo sposobnost tečenja betona. [1, 3, 4, 8]

Dodatki zagotovo prispevajo k izboljšanju lastnosti betona, vendar pa nikakor ne smemo pričakovati, da bodo uravnotežili slab vpliv nekvalitetnih sestavin betona ali slabega razmerja le-teh. [1]

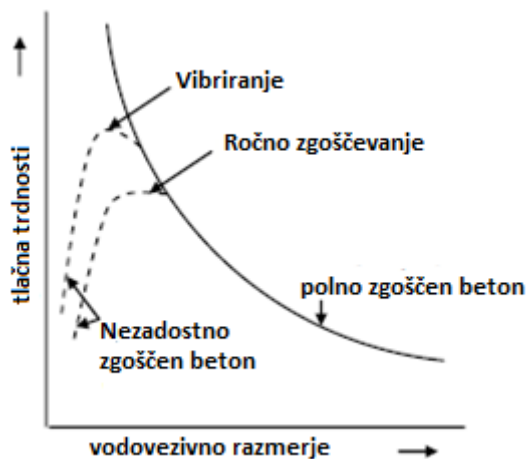
2.1.4 Voda

Kvaliteta vmešane vode je zelo pomembna, saj vpliva na lastnosti svežega in trdnega betona. Nečistoče v vodi lahko vplivajo na tlačno trdnost betona, povzročijo madeže na površini, korozijo armature in druge nevšečnosti. Načeloma velja, da mora biti voda uporabljena v betonski mešanici primerna za pitje. [7]

2.2 Vodovezivno razmerje

Razmerje med maso proste vode in maso veziva v cementni mešanici je izraženo z vodovezivnim faktorjem. Vodovezivno razmerje vpliva na potek hidratacije cementne paste in vpliva na lastnosti svežega in trdnega betona. [3, 4]

Pri betonih z visokim vodovezivnim razmerjem je vgradljivost in obdelovalnost izrazito boljša, vendar pa se poveča poroznost, kar negativno vpliva na tlačno trdnost in odpornost betona. Pri manjšem vodovezivnem razmerju delci cementa tvorijo gostejšo mikrostrukturo tudi pri nižjih stopnjah hidratacije. [2] Zmanjšanje vodovezivnega razmerja zmanjša poroznost betona, vendar pa se pojavi večje krčenje betona, ki lahko ob nepravilni negi privede do razpok. Vodovezivno razmerje, ki je nujno potrebno za proces hidratacije, je približno 0.22, pri vodovezivnih razmerjih nad 0.42 pa se začnejo množiti kapilarne pore. Primerni vodovezivni količnik betona visoke trdnosti se praviloma giblje nekje med tema vrednostma. [1, 3]



Slika 1: Razmerje med tlačno trdnostjo in vodovezivnim količnikom [4]

Razmerje med tlačno trdnostjo in vodovezivnim faktorjem je prikazano na zgornjem grafu. Krivulja se pri zelo majhnih vodovezivnih faktorjih konča, saj je zaradi visoke stopnje krčenja cementnega kamna razpokanost že tako velika, da tlačna trdnost betona upada. [4, 10]

3 MEHANSKE IN REOLOŠKE LASTNOSTI BETONOV VISOKE TRDNOSTI

Sestava mešanice betonov visoke trdnosti se razlikuje od sestave mešanice pri običajnih betonih in je zaradi tega drugačna tudi njihova struktura. Betoni visoke trdnosti imajo gostejšo in bolj homogeno mikrostrukturo, kar vpliva na njihove mehanske in reološke lastnosti. [2]

3.1 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost je najbolj zaželena lastnost betonov. Izkazalo se je, da je za doseganje visoke trdnosti pri betonih najbolj pomembno zmanjšati poroznost, nehomogenost in mikrorazpoke v cementnem kamnu in v stičnem območju med agregatom in cementnim kamnom. [1]

3.1.1 Homogenost betonske mešanice

Beton je nehomogen material, sestavljen iz treh delov: [10]

- Hidratirane cementne paste oz. cementnega kamna,
- Stičnega območja med cementnim kamnom in agregatom in
- Agregata.

Za homogene materiale velja, da lahko na podlagi njihove mikrostrukture napovemo njihovo obnašanje. Predvidevanje lastnosti kompozitnih materialov pa je težje, saj je njihovo obnašanje odvisno od lastnosti vseh uporabljenih materialov in razmerij med njimi. Tako lahko z uporabo enakih materialov dobimo betone z zelo različnimi mehanskimi lastnosti. S povečanjem homogenosti kompozitnega sistema se stalnost lastnosti le-tega poveča. [1]

Za čim bolj homogeno betonsko mešanico morajo biti vsi trije deli enako kvalitetni ter enakomerno razporejeni po prostornini betonskega elementa. Agregatni del je odvisen le od lastnosti agregata, ki so bile opisane v 2. poglavju. Na razporeditev agregata po betonski mešanici vpliva granulometrijska sestava in največja velikost zrna. [4]

Homogenost cementnega kamna je predvsem odvisna od vodovezivnega razmerja. Betoni z nižjim vodovezivnim količnikom so zaradi manjše kapilarne poroznosti bolj homogeni, vendar pa je zelo pomembna tudi prerazporeditev sestavin, saj vpliva na stopnjo hidratacije. Zaradi medsebojne privlačnosti cementnih delcev lahko nastanejo cementni skupki. Znotraj njih se ujamejo večje količine vode, ki zato ne reagira s cementom. Boljšo porazdelitev cementnih delcev in s tem višjo stopnjo hidratacije lahko dosežemo z uporabo superplastifikatorjev. [1]

Med agregatom in cementnim kamnom se pojavi prehodno območje z oslabljenimi lastnostmi v primerjavi z glavnino hidrirane cementne paste. Na površini večjih zrn agregata se zaradi njihove velikosti, oblike in površinske teksture nabere dodatna plast vode, ki poveča vodovezivno razmerje v stičnem območju, razlika v velikosti med zrnji agregata in cementa pa povzroči, da je na stiku z agregatom količina cementa manjša. Stično območje je posledično bolj porozno, manj trdno in vzdržljivo kot preostali del hidrirane cementne paste. [1, 4, 10]

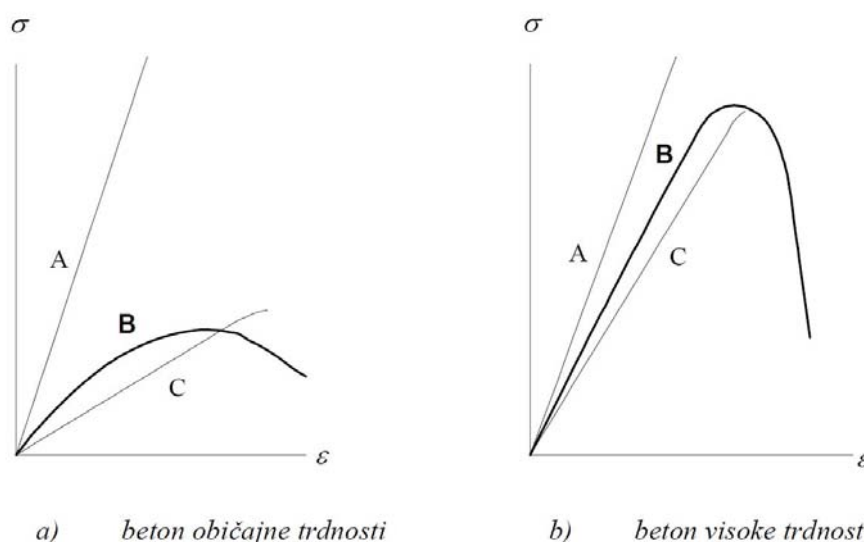
Uporaba mikrosilike v betonih visoke trdnosti izboljša mikrostrukturo stičnega območja, saj so njena zrna manjša od zrn cementa, zato se lažje razporedijo v bližini agregata in tako zgostijo stično območje med cementnim kamnom in agregatom. [4]

3.1.2 Mikrorazpoke v stičnem območju med agregatom in cementnim kamnom

Mikrorazpoke so majhne razpoke v stičnem območju med agregatom in cementnim kamnom in so po vsej verjetnosti posledica razlik v mehanskih lastnostih agregata in hidrirane cementne paste. [4] Pri agregatih in cementnem kamnu je povezava med napetostjo in deformacijo linearna, pri betonu pa izrazito nelinearna, kar je posledica šibkega stičnega območja in pojava mikrorazpok. [30]

Mikrorazpoke se lahko pojavijo preden beton obtežimo, saj zaradi temperaturnih sprememb in sušenja betona pride do majhnih premikov agregata in hidratirane cementne paste. Velikosti premikov niso enake pri agregatu in cementnem kamnu, kar povzroči lokalne napetosti v stičnem območju. Kratkotrajna ali dolgotrajna obtežba in dodatno krčenje zaradi sušenja pa še dodatno povečata število in velikost mikrorazpok. [1]

Slika 2 prikazuje razmerje med napetostmi in deformacijami običajnih betonov, ter betonov visoke trdnosti. Opazimo lahko, da naklona grafov oziroma modula elastičnosti agregata in cementnega kamna pri betonih visoke trdnosti ne odstopata toliko kot pri običajnem betonu. Zato se majhni premiki agregata ob temperaturnih spremembah ali nanosu obtežbe manj razlikujejo od majhnih premikov cementnega kamna in so posledično lokalne napetosti v stičnem območju manjše. [30]



Slika 2: Razmerje med napetostmi in deformacijami: A - agregat; B - beton; C – cementni kamen [2]

Stično območje med agregatom in cementnim kamnom je pri betonih visoke trdnosti gostejše in bolj homogeno, lokalne napetosti pa manjše, zato je pojav mikrorazpok manj problematičen, razmerje med napetostno in deformacijo pa dalj časa linearno. [2]

3.1.3 Poroznost in propustnost betona

Na splošno za vse trdne snovi velja, da z manjšo poroznostjo dosegajo višje trdnosti, poleg tega pa ima poroznost betona velik vpliv tudi na obstojnost in krčenje betonske mešanice. Ker je beton heterogen material, lahko na poroznost vplivajo vsi njegovi sestavni deli. Poroznost običajnih agregatov je zelo majhna, zato je poroznost betona predvsem odvisna od poroznosti cementnega kamna in stičnega območja. [1] Izražena je v procentih in predstavlja delež praznin v hidratirani cementni pasti. V betonu se nahajajo tri različne vrste praznin, ki so opisane v preglednici 2. [1, 4, 5]

Preglednica 2: Praznine v betonskem kamnu [1, 4, 5]

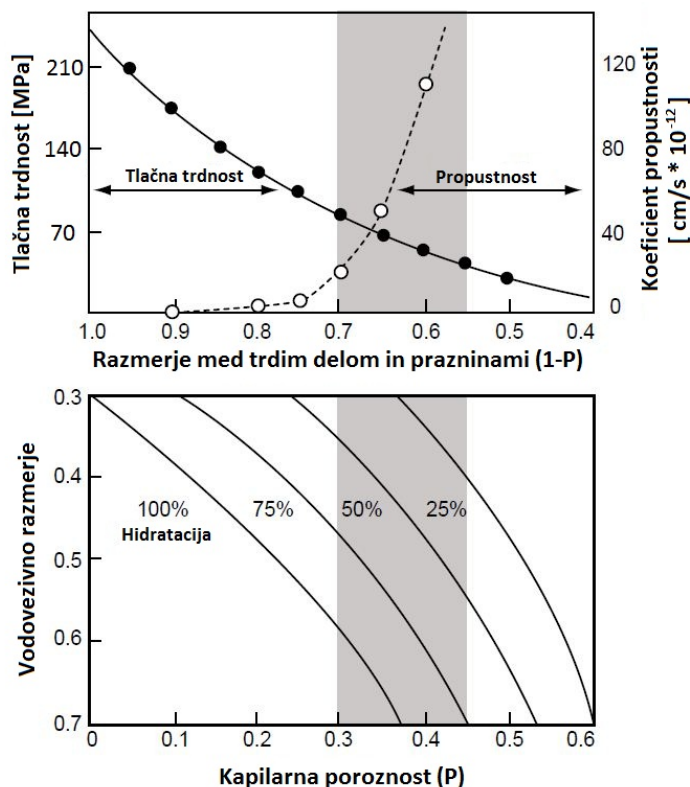
Vrsta praznine	Velikost	Opis
<i>Gelske pore</i>	1 - 3 nm	Gelske pore so del strukture produktov hidratacije. So zelo majhne in ne vplivajo na poroznost in tlačno trdnost betona. Voda, ki se v njih nahaja je močno vezana in jo je možno odstraniti le v primeru zelo nizke relativne vlage. V tem primeru nastopi veliko krčenje zaradi sušenja.
<i>Kapilarne pore</i>		Kapilarne pore predstavljajo prostor, ki ni zapolnjen s trdnimi komponentami hidratirane cementne paste. Njihov skupen volumen ostaja nespremenjen med procesom hidratacije. Večje kapilarne pore imajo velik vpliv na poroznost in trdnost betona. V njih se lahko nahaja tudi voda, ki se prosto giblje in njena odstranitev ne povzroči krčenja betona. V manjših kapilarnih porah pa je voda pod hidrostatskim pritiskom in lahko njeno gibanje povzroči volumske spremembe.
- <i>mikropore</i>	5 - 50 nm	
- <i>makropore</i>	> 50 nm	
<i>Zračni mehurčki</i>	lahko tudi 3 mm	Zračni mehurčki so majhne količine zraka, ki se ujamejo v cementno pasto med mešanjem. Vplivajo na trdnost betona.

Poroznost betona je odvisna od količine kapilarnih por in zračnih mehurčkov v mešanici. Velika količina praznin v betonu negativno vpliva na njegovo tlačno trdnost, medsebojna povezanost kapilarnih por pa ima slab vpliv tudi na obstojnost betona, saj povečuje njegovo propustnost - sposobnost prepuščanja tekočin in plinov skozi porozen material. Manjše pore imajo relativno majhno medsebojno povezanost in niso pretirano problematične. Pri večjih porah pa se pojavi medsebojno povezan sistem kapilarnih por, ki vodi do manjše odpornosti in lahko negativno vpliva tudi na tlačno trdnost betona, saj povečuje možnost porušitve. [1, 4, 7, 12]

Velika poroznost se predvsem pojavi pri betonih z visokim vodovezivnim količnikom. Ker je končni volumen trdnih produktov hidratacije pri vseh vodovezivnih količnikih enak, dodatna voda le poveča skupni volumen cementnega kamna in posledično količino kapilarnih por. Do medsebojno povezanega sistema kapilarnih por pa lahko pride tudi če je cementna pasta le delno hidrirana. Z naknadno hidratacijo novo nastali cementni gel razčleni ta medsebojno povezan sistem por in tako izboljša propustnost in trdnost betona. Iz Slike 3 je razvidno, da ko ob hidrataciji cementne paste delež kapilarnih por pade iz 40% na 30% se propustnost cementnega kamna izrazito zmanjša. V tem času očitno nastane toliko novega cementnega gela, da kapilarne pore niso več medsebojno povezane. [1]

Manjši vodovezivni količnik in visoka stopnja hidratacije količino kapilarnih por zelo reducirata, hkrati pa se lahko s primerno vgradnjo in dobro zbitostjo betona zmanjša tudi

število zračnih mehurčkov. Tako dobimo gost beton, ki lahko dosega visoke trdnosti in ima zaradi majhne propustnosti večjo zmrzlinsko odpornost, manjšo možnost korozije armature, bolje deluje v slanem okolju in na splošno bolje prenaša razne kemijske vplive okolja. [1, 13]



Slika 3: Vpliv vodovezivnega količnika in stopnje hidratacije na tlačno trdnost in propustnost [1]

3.2 Krčenje betonov visoke trdnosti

Gibanje vode in izguba vlage v notranjosti betonske mešanice sta glavna razloga za prostorninske spremembe betona. V večini primerov se prostornina betona zmanjša in takrat govorimo o krčenju betona. V primeru ko beton negujemo v vodi, pa lahko pride do nabrekanja betona, kar pa je v praksi bolj redek pojav. [15, 16]

Krčenje delimo na šest različnih tipov, glede na mehanizem delovanja: Kemično krčenje, avtogeno krčenje, plastično krčenje, krčenje zaradi sušenja, karbonatizacijsko krčenje in temperaturno krčenje. V primeru kemičnega in avtogenega krčenja krčenje nastane zaradi gibanja vode znotraj betonske mešanice, medtem ko se pri plastičnem krčenju in krčenju zaradi sušenja voda izmenjuje z okolico. [3]

Krčenje ima pomemben vpliv na obstojnost betona, saj privede do nastanka razpok, s tem omogoči penetracijo agresivnih snovi in v primeru armiranega betona pospeši korozijo jekla. Zato je pomembno da razumemo vzroke ki krčenje povzročajo, da ga lahko preprečimo oz. omilimo. [4]

V diplomski nalogi se bom posvetila avtogenemu krčenju in krčenju zaradi sušenja, saj sta pri betonih visoke trdnosti najizrazitejša.

3.2.1 Avtogeno krčenje

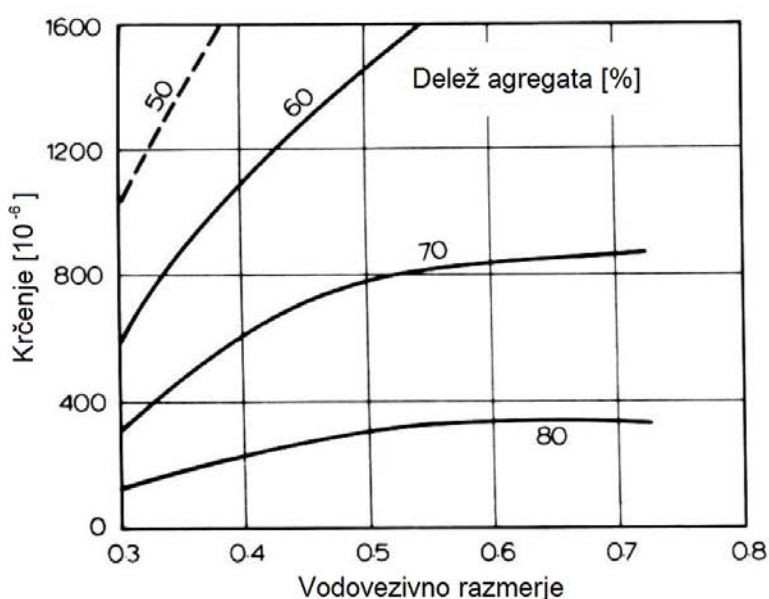
Avtogeno krčenje je zmanjšanje volumna betonske mešanice v procesu hidratacije brez izmenjave vlage z okoljem. Je izotropen pojav, ki je odvisen le od lastnosti betonske mešanice. [4] Pri betonih z visokim vodovezivnim faktorjem je avtogeno krčenje zanemarljivo, saj se znotraj betona nahaja dovolj proste vode in hidratacija cementne paste lahko poteka neovirano. Pri betonih z nizkim vodovezivnim količnikom pa lahko pride do samoizsuševanja: Cement začne zaradi pomanjkanja proste vode, reagirati najprej z vodo iz kapilarnih por in nato še z vodo iz gelskih por, kar privede do padca relativne vlažnosti v porah. Pojavijo se hidrostatske napetosti, ki privedejo do krčenja betona. [15] Avtogeno krčenje se je lahko pri običajnih betonih zanemarilo, saj je predstavljalo le majhen del celotnega krčenja, pri betonih visoke trdnosti pa je lahko, zaradi zahtev po čim nižjem vodovezivnem količniku, tudi večje od krčenja zaradi sušenja, zato ga ne smemo ignorirati. Avtogeno krčenje se začne s pričetkom hidratacije, preden cementni kamen pridobi na trdnosti in v tej fazi pomembno vpliva na nastanek razpok. [3]

3.2.2 Krčenje zaradi sušenja

Krčenje zaradi sušenja je podoben pojav kot avtogeno krčenje, le da izguba vode ni posledica hidratacije, temveč izhlapevanja vode v nenasičeno okolje. Krčenje zaradi sušenja je bolj intenzivno v primeru nižje količine vlage v zraku. [4, 7, 17]

Glavni dejavniki ki vplivajo na krčenje zaradi sušenja so velikost in oblika betonskega elementa, vlažnost okolja ter nega betona. Običajno so to tudi glavni razlogi za pojav krčenja in posledično razpok, katere pa lahko močno oslabijo betonske elemente. [15, 17, 18, 19]

Na krčenje zaradi sušenja pa imajo vpliv tudi nekateri notranji dejavniki, med katerimi imata največji vpliv vodovezivno razmerje in količina agregata. Betonske mešanice z višjo vsebnostjo agregata izkazujejo manjšo stopnjo krčenja, prav tako pa lahko dosežemo manjše krčenje z nižjim vodovezivnim faktorjem. [4, 15, 17]



Slika 4: Vpliv vodovezivnega razmerja in deleža agregata (po volumnu) na krčenje [4]

3.2.3 Nega betonov visoke trdnosti

Cilj nege betona je, da ostane beton nasičen z vlago do najvišje možne stopnje, dokler se proces hidratacije ne konča. Powers je ugotovil, da se hidratacija zelo upočasni, ko pade stopnja nasičenosti betonske mešanice pod 80%, zato v betonu v začetnem obdobju vzdržujemo primerno vlažnost. [4]

Z razvojem betonskih mešanic za betone visoke trdnosti postaja nega betona vse bolj pomembna. Nižja vodovezivna razmerja in razni dodatki, kot je mikrosilika, lahko povzročijo razpoke zaradi krčenja v primeru da beton ni pravilno negovan. Popolnega recepta za nego betona ni, saj je le ta odvisna od betonske mešanice, pogojev okolja in konstrukcije same. [3, 4]

Zunanjo nego betona lahko izvajamo na več načinov. Najbolj razširjeno je negovanje betona z vodo, kjer površini betona dodajamo vodo in tako ohranjamo stopnjo nasičenosti betona, lahko pa tudi prekrijemo površino betona z nepropustnim slojem in s tem preprečimo izhlapevanje vode. Da bo zunanja nega betona učinkovita, mora biti preudarno izbran način in čas nege. [3, 4] Kadar je zunanja nega betona pravilna, beton razvije zadostno trdnost, da ob krčenju zaradi sušenja ne nastanejo razpoke. Poleg tega, pri negi z vodo zmanjšamo tudi avtogeno krčenje ob površini betonskega elementa – do globine kamor pronica voda. Zaradi neomejene zaloge vode na površini je na tem območju tudi višja stopnja hidratacije. Produkti hidratacije zapolnijo odprte kapilarne pore, zmanjšajo poroznost in naredijo »kožo« betona bolj neprepustno ter s tem obstojnejšo. [3]

Zunanja nega vpliva le na omejeno območje ob površini betonskega elementa ter na izhlapevanje vode iz le-teh. Za obvladovanje kakovosti betona visoke trdnosti pa je potrebno beton negovati po celotnem volumnu – tu nastopi notranja nega betona.

Z notranjo nego betonov visoke trdnosti zagotovimo betonu dodatno zalogo vode za potrebe hidratacije. To lahko dosežemo tako, da v beton umešamo majhne rezervoarje vode, iz katerih lahko voda za potrebe hidratacije cementne paste prehaja v betonsko mešanico. Pomembno je, da so notranji rezervoarji vode večji od kapilarnih por, da se ob morebitnem pričetku samoizsuševanja za hidratacijo najprej porabi voda iz notranjih rezervoarjev, pri čemer manjše pore v cementnem kamnu ostanejo nasičene. Čeprav se ta dodatna voda nahaja znotraj betona, notranji rezervoarji pravzaprav predstavljajo zunanji vir vode za cementno pasto. [3, 17] Notranja nega je pri betonih z nizkim vodovezivnim količnikom ključnega pomena, saj močno zmanjša oziroma celo izniči avtogeno krčenje. Poleg tega se zaradi boljše hidratirane cementne paste poveča tudi trdnost in zmanjša propustnost betona, kar odločno vpliva na trajnost betonskih elementov. [3, 21]

Notranjo nego izvajamo tako, da predhodno namočimo razne materiale, kot lahek agregat ali polipropilenska vlakna in jih dodamo v betonsko mešanico. [3]

4 LAHEK AGREGAT KOT NOTRANJI REZERVOAR VODE

Lahki agregati so lahko naravnega ali umetnega izvora, njihova glavna značilnost pa je velika poroznost in s tem majhna specifična teža. [4, 27]

Preglednica 3: Vrste agregatov glede na gostoto [28]

vrsta agregata	prostorninska masa [kg/m^3]	običajna uporaba
ultra lahek	<500	nekonstrukcijska uporaba
lahek	500 - 800	izolacijski material
konstrukcijsko lahek	650 - 1100	konstrukcijska uporaba
normalen	1100 - 1750	
težek	>2100	zaščita pred radiacijo

Ultra lahki in lahki agregati so visoko porozni, njihova tlačna trdnost pa je majhna, zato se predvsem uporabljajo v izolativne namene ter kot polnilo. Iz konstrukcijskega lahkega agregata pa lahko izdelamo nosilne betone z zelo majhno prostorninsko maso, katerih tlačne trdnosti so podobne kot pri običajnih betonih, načeloma od 20 MPa do 35 MPa. Lahek beton uporabimo ko želimo zmanjšati težo konstrukcije oziroma dela konstrukcije. [1, 4, 27] Uporaba lahkega agregata pa ni omejena le na izdelavo lahkih betonov. Njegova visoka poroznost in zmožnost vpijanja vode se izkorišča tudi za notranjo nego betonov visoke trdnosti. Zaradi svoje poraste strukture lahko vpije velike količine vode in jo kasneje odda v betonsko mešanico, ko proces hidratacije zmanjša relativno vlažnost v betonu. [3, 4]

4.1 Naravni in umetni lahki agregati

Lahki agregati se glede na pridelavo delijo v naravne in umetne. Naravni so pridobljeni le z mehanično obdelavo kot je drobljenje, umetni pa potrebujejo toplotno predelavo.

Najbolj razširjeni naravni lahki agregati so plovec, lehnjak, vulkanski pepel, tuf in žindra. Vsi razen lehnjaka so vulkanskega izvora, lehnjak pa sodi med sedimentne kamnine. V svetu je malo najdišč lahkih agregatov, ki so skoncentrirana na določena območja, zato je njihova uporaba predvsem lokalna. Prostorninske mase naravnih lahkih agregatov se gibljejo med 500 kg/m^3 in 900 kg/m^3 . [4] V Sloveniji imamo nahajališča lehnjaka, ki se nahaja v manjših količinah ob nekaterih posebnih kraških izviroh. Edini delujoči kamnolom lehnjaka pri nas je med Spodnjim Jezerskim in Komatevno. [31]

Umetni lahki agregati nastanejo s toplotno obdelavo gline, skrilavca, vermikulita, perlita, žindre ali elektrofiltrskega pepela. Materiali se na temperaturah do 1200°C napihnejo in tako dobimo zelo porozne agregate z majhno specifično težo. Za konstrukcijske namene sta najbolj razširjena ekspanzirana glina in ekspanziran skrilavec, s prostorninskimi masami od 300 kg/m^3 do 900 kg/m^3 , medtem ko se vermikulit (60 kg/m^3 do 130 kg/m^3) in perlit (30 kg/m^3 do 240 kg/m^3) uporablja predvsem za izolacijo. [4] V primerjavi z naravnimi lahkimi agregati je njihova uporaba bolj razširjena, saj so osnovni materiali za izdelavo umetnih lahkih agregatov lažje dostopni. [27]

4.2 Mehanizem notranje nege

Če notranjo nego pravilno izvedemo, ima ugoden vpliv v vseh pogledih, saj poveča stopnjo hidratacije in razvoj tlačne trdnosti, zmanjša avtogeno krčenje in pojav razpok, reducira propustnost in izboljša obstojnost betonov visoke trdnosti. [34]

Na uspešnost notranje nege vpliva več faktorjev: [32]

1. količina vode, ki je potrebna za notranjo nego betona,
2. sposobnost lahkega agregata, da to vodo vpije in odda in
3. razporeditev predhodno namočenega lahkega agregata po betonski mešanici.

4.2.1 Količina potrebne vode

Prekomerno avtogeno krčenje betonov z nizkim vodovezivnim količnikom je posledica samoizsuševanja cementnega kamna. [33] Avtogeno krčenje zmanjšamo tako, da v času hidratacije dodajamo vodo v sistem in s tem dvigujemo relativno vlažnost betona. pravilno doziranje vode je zelo pomembno, saj v primeru da je dodamo premalo, želen učinek ne bo dosežen, če pa jo dodamo preveč, lahko nenamerno povečamo poroznost in s tem zmanjšamo trdnost. [35] Za izračun potrebne količine vode moramo najprej razumeti, zakaj se samoizsuševanje pojavi. [32] Kemijske reakcije, ki se odvijajo v cementni pasti, povzročijo, da ima končen produkt hidratacije manjšo prostornino kot je bila skupna prostornina cementa in vode pred hidratacijo cementne paste. To spremembo prostorne, ki se pojavi med hidratacijo, imenujemo kemično krčenje. [2] Kemično krčenje povzroči nastanek praznih por v cementnem kamnu in zmanjša relativno vlažnost betona. Naloga predhodno namočenega lahkega agregata je, da priskrbi dodatne zaloge vode v betonski mešanici, s tem da dvigne relativno vlažnost betona in prepreči samoizsuševanje. [32] Koliko dodatne vode potrebujemo za notranjo nego betona izračunamo po spodnji enačbi: [33]

$$W_{cur} = C_f \times CS \times \alpha_{max} \quad (1)$$

kjer velja:

W_{cur} količina potrebne vode na m^3 betona [kg/m^3]

C_f Vsebnost cementa v betonski mešanici [kg/m^3]

CS kemično krčenje cementa [g vode/g cementa]

α_{max} maksimalna predvidena stopnja hidratacije (0-1)

4.2.2 Sposobnost oddajanja vode iz agregata

Z enačbo (1) izračunamo potrebno količino vode, za določitev količine lahkega agregata pa moramo poznati tudi njegovo sposobnost vpivanja in oddajanja vode. [34] Lahki agregati imajo različne sposobnosti vpivanja vode, večina jih vpije med 5% in 20% mase suhega lahkega agregata, kar je znatno več kot navaden agregat, kjer se ta vrednost giblje okoli 2%. [4] Na podlagi poznavanja sposobnosti vpivanja lahkega agregata, lahko ocenimo količino lahkega agregata, ki ga potrebujemo za notranjo nego betona: [34]

$$M_{LWA} = \frac{C_f \times CS \times \alpha_{max}}{S \times \phi_{LWA}} \quad (2)$$

kjer velja:

M_{LWA} masa suhega lahkega agregata finih frakcij, ki je potrebna na m^3 betona [kg/m^3]

C_f Vsebnost cementa v betonski mešanici [kg/m^3]

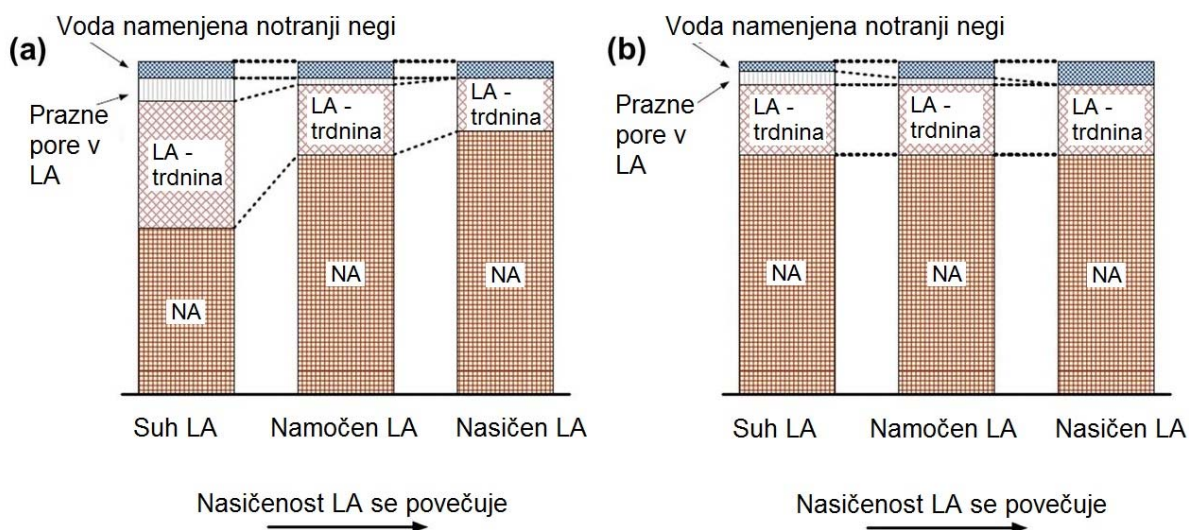
CS kemično krčenje cementa [g vode/g cementa]

α_{max} maksimalna predvidena stopnja hidratacije

S stopnja nasičenosti agregata (0-1) (opomba: zgornja enačba velja samo za ne ničelne vrednosti)

ϕ_{LWA} vpojnost lahkega agregata [kg vode/ kg suhega lahkega agregata]

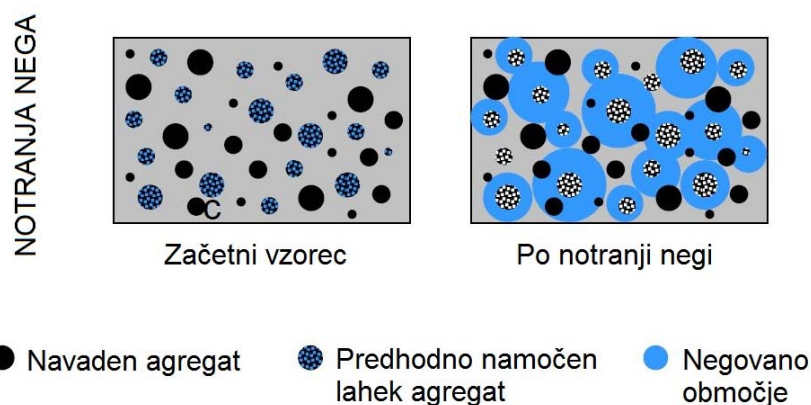
Zelo pomembno je poznati tudi zmožnost lahkega agregata da absorbirano vodo odda, saj bo le oddana voda preprečevala samoizsuševanje. Lahek agregat, ki odda več vode, je bolj učinkovit in ga je potrebno manj dodati v betonsko mešanico. Najbolj učinkoviti lahki agregati lahko oddajo tudi več kot 95% absorbirane vode. V primeru, da je razlika med absorbirano in oddano vodo velika, pa je potrebno to tudi upoštevati v enačbi (2). [34, 35] Poleg količine vode, ki jo lahek agregat odda, je pomembno tudi, kdaj se ta voda sprosti v sistem. Da lahko voda znotraj lahkega agregata aktivno sodeluje v procesu hidratacije, mora biti izločena preden relativna vlaga betonske mešanice pade pod 85%. [34] Praviloma velja, da lahki agregati z večjimi porami oddajo večino absorbirane vode že pri zelo visoki relativni vlažnosti 95%. [32, 34]



Slika 5: Izbira količine lahkega agregata: a) za enako količino vode potrebujemo različne količine lahkega agregata, glede na stopnjo nasičenosti; b) enaka količina lahkega agregata bo vsebovala različno količino vode, glede na stopnjo nasičenosti. [36]

4.2.3 Homogenost razporeditve

Vpliv na uspešnost notranje nege ima poleg vrste ter količine lahkega agregata tudi njegova razporeditev. Med procesom hidratacije se propustnost cementnega kamna manjša, kar ovira migracijo vode po betonski mešanici. Raziskave so pokazale, da je maksimalna razdalja, ki jo lahko voda prepotuje od 2mm do 3mm. [35, 36] Da voda iz lahkega agregata doseže čim večji del cementne paste, morajo biti notranji rezervoarji vode kar se da enakomerno razporejeni po betonski mešanici. To dosežemo z uporabo lahkega agregata manjših frakcij. [36]



Slika 6: Območje notranje nege [11]

Sposobnost oddajanja absorbirane vode je v veliki meri odvisna od velikosti por, enakomerna razporeditev delcev lahkega agregata pa od njegove velikosti. Na podlagi tega lahko sklepamo, da je za notranjo nego najučinkovitejši lahek agregat majhnih frakcij z grobo strukturo por. [33]

4.3 Vpliv lahkega agregata na lastnosti betona

Z dodajanjem predhodno namočenega lahkega agregata v betone visoke trdnosti želimo zmanjšati avtogeno krčenje, ne da bi s tem negativno vplivali na ostale mehanske lastnosti betona. Lahek agregat ima sicer mnogo dobrih lastnosti, kot so toplotna in zvočna izolativnost, odpornost na požar in zmrzljinska odpornost, vendar pa dosega tudi nižje tlačne trdnosti in njegova velika poroznost ima lahko negativen vpliv na obstojnost betona. [4]

Izkaže se, da dodajanje majhnih količin lahkega agregata v betone visoke trdnosti tlačno trdnost betona celo poveča, saj se zaradi vpliva lahkega agregata na notranjo nego, poveča stopnja hidratacije in se s tem dodatno otrdi cementni kamen. Poleg tega je v stičnem območju med lahkim agregatom in cementnim kamnom manjša možnost nastajanja mikrorazpok, saj je elastični modul lahkega agregata nekoliko manjši in tako bolj podoben elastičnemu modulu cementne paste. [4, 21] Zanimivo je tudi, da čeprav je lahek agregat sam izredno porozen, ne poveča propustnosti betona, v primeru da zamenja le manjši del celotnega agregata. Cementni kamen, ki je notranje negovan s predhodno namočenim lahkim agregatom ima gostejšo strukturo, stično območje med lahkim agregatom in cementno pasto pa je zelo kvalitetno zaradi višje stopnje hidratacije. Posledica tega je, da se kljub večji poroznosti propustnost betona ne poveča, saj pore niso povezane med seboj. [32]

Ob pravilni uporabi ima notranja nega z lahkim agregatom ugoden vpliv v vseh pogledih, saj poveča stopnjo hidratacije in razvoj tlačne trdnosti, zmanjša avtogeno krčenje in pojav razpok, reducira propustnost in izboljša obstojnost betonov visoke trdnosti. [34]

5 EKSPERIMENTALNI DEL

Cilj eksperimentalnega dela je, ugotoviti vpliv vrste lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti. V ta namen sem poleg lastnih raziskav uporabila tudi rezultate predhodnih preiskav na mešanicah betonov visoke trdnosti, ki so bile opravljene v sklopu diplomskih del. [6, 9, 23]

Preizkuse smo opravili v laboratoriju, kjer smo analizirali časovni potek krčenja betona in spremljali razvoj njegove tlačne trdnosti. V betonski mešanici smo uporabili predhodno namočeno ekspandirano glino frakcij 0-2 mm, ter dobljene rezultate primerjali z rezultati podobnih mešanic, ki so se razlikovale le v vrsti oziroma frakciji lahkega agregata.

Poskus je bil izveden v 28 dneh. Pri dan smo zamešali betonsko mešanico, opravili preiskave na svežem betonu ter vgradili beton v kalupe za nadaljnja testiranja. Naredili smo 6 kock in 6 prizem, katere smo nato primerno negovali glede na vrsto preizkusa, za katerega so bile namenjene.

5.1 Uporabljeni materiali

Betonska mešanica HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 ima vodovezivni količnik 0.36 in vodocementni količnik 0.40. Projektirana je bila tako, da bi bilo zgodnje krčenje betona čim manjše, trdnost pa čim višja. Zato smo uporabili kakovostne materiale ter dodatke. Uporabljen je zelo trden agregat iz separacije Kresnice frakcij 0-16mm in mivka Termit, 12% celotne prostornine agregata pa predstavlja predhodno namočena ekspanidirana glina Liapor, frakcij 0-2mm. Cement cementarne Anhovo CEM I 52.5 R spada v višji trdnosti razred, mešanici pa smo dodali tudi kombinacijo mikrosilike in superplastifikatorja - Antikorodin.

5.1.1 Lahek agregat

V laboratorijskih preiskavah smo za lahek agregat uporabili ekspandirano glino **Liapor** frakcije 0-2mm katero smo 24ur pred zamešanjem predhodno namočili v vodo, namenjeno za mešanje.

Ekspanidirana glina Liapor je pridelana iz visokokvalitetne gline, ki je nastala v geološkem obdobju Lias in je stara tudi do 180 milijonov let. Izdelava kroglic ekspanidrane gline poteka v rotacijskih pečeh pri temperaturah okoli 1200°C. Liapor kroglice imajo grobo površino in zelo fino porozno strukturo. Odporne so na visoke temperature, (tudi nad 1100°C,) razne kemične spojine, njihova oblika pa je stabilna. [22]

Liapor kroglice imajo velik spekter uporabe, tako v gradbeništvu, kot tudi v drugih panogah. Zaradi velike poroznosti Liapor lahko vpije veliko količino vode in jo ob potrebi tudi sprosti, zato je primeren kot notranji rezervoar vode v betonski mešanici. V ta namen je bil tudi uporabljen v eksperimentalnem delu diplomske naloge. Prostorninska masa Liaporja je $450 \pm 65 \text{ kg/m}^3$, 24 urna sposobnost vpivanja pa znaša $11 \pm 4 \%$ njegove mase. [22]



Slika 7: Liapor kroglice [22]

V preglednici 4 je podan opis naravnega lahkega agregata, katerega sicer nisem uporabila v sklopu eksperimentalnega dela, vendar pa je vsebovan v predhodnih preizkušancih in je ključen za preučevanje vpliva vrste lahkega agregata na lastnosti betona visoke trdnosti.

Preglednica 4: Lahek agregat iz kamnoloma Jezersko [37]

Lehnjak	
Material	<i>lahek agregat</i>
Nahajališče	<i>Jezersko</i>
Opis	<i>Vzorec je luknjičava in močno porozna karbonatna kamnina, ki nastaja ob vodi. Barva kamnine je svetlo rumeno-rjava, tekstura pa votlinasta in nehomogena. Poroznost je neenakomerna in znaša od 10 % do 15%. Glavni mineral je kalcit (od 96 % do 98 %), v sledovih se nahajata tudi dolomit in limonit. Ima zrnat strukturo.</i>

5.1.2 Agregat

Agregat je sestavljen iz pranelega drobljenega apnenčevega agregata iz separacije Kresnice in iz mivke Termit iz Moravč. [2]

Preglednica 5: Mivka iz Moravč [2]

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

Preglednica 6: Agregat iz kamnoloma Ušenišče [2]

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

12% volumna agregata je nadomeščenega z Liapor kroglicami frakcij 0-2mm.

5.1.3 Cement

Uporabili smo čisti portlandski cement CEM I 52.5 R iz cementarne Anhovo. Cement pri starosti 28 dni dosega tlačno trdnost vsaj 52.5 MPa, oznaka R pa pomeni da pospešeno veže in mu zato tlačna trdnost hitreje narašča. [2, 5]

5.1.4 Mineralni in kemični dodatki

Kot dodatek smo uporabili Antikorodin (TKK Srpenica). To je praškasta mešanica mikrosilike in superplastifikatorja, ki ugodno vpliva na trdnost, vgradljivost in odpornost betona proti učinkom raznih kemikalij. [2, 24]

5.2 Sestava betonske mešanice

Za potrebe eksperimentalnega dela diplomske naloge smo zamešali 0.049 m³ betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1, z vodovezivnim faktorjem 0.36 in vodocementnim faktorjem 0.40. V preglednici 7 je podana sestava betonske mešanice. Vrednosti veljajo za kubični meter betona.

Preglednica 7: Sestava betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1

HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1			
agregat	1728	kg/m ³	
- mivka - Termit	285	kg/m ³	
- apnenec	0 / 2	114	kg/m ³
	2 / 4	512	kg/m ³
	4 / 8	284	kg/m ³
	8 / 16	474	kg/m ³
- Liapor	0 / 2	59	kg/m ³
cement CEM I 52.5 R	360	kg/m ³	
Antikorodin	48	kg/m ³	
voda	144	kg/m ³	
skupaj	2280	kg/m ³	

5.3 Preizkušanje konsistence sveže betonske mešanice

Konsistenca svežega betona je parameter, ki določa obdelovalnost in vgradljivost betona. Zahtevana konsistenca betona je odvisna od temperature mešanice in okolja, razdalje prevoza, načina in hitrosti vgrajevanja, oblike elementa in armature. [5, 25]

Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice:

- metoda z razlezom,
- metoda s posedom,
- metoda z aparatom Vebe,
- metoda z zgoščevanjem pri vibriranju.

Na podlagi različnih metod lahko konsistenco betona tudi opredelimo v razrede, ki so prav tako podani v standardih.

Konsistenco betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 smo preizkusili s postopkom razleza in postopkom poseda.

5.3.1 Metoda s posedom

Metoda s posedom je najbolj preprosta metoda in se zato pogosto uporablja na gradbiščih. Za poizkus potrebujemo kovinski konus z dimenzijami h_0 300mm, φ_1 =200mm in φ_2 =100mm, katerega postavimo na gladko površino in napolnimo s tremi približno enakimi plastmi betonske mešanice. Vsako plast nabijemo s standardno kovinsko palico premera 16mm s 25 udarci. Medtem pritiskamo kovinski konus ob podlago, da se ne premakne oziroma dvigne. Ko je konus napolnjen, površino zravnamo in ga po tridesetih sekundah dvignemo. Postavimo ga zraven betonskega stožca ter izmerimo razliko višin, načeloma na 10mm natančno. S pomočjo spodnje preglednice lahko nato betonsko mešanico uvrstimo v ustrezen razred konsistence po metodi poseda. [4, 26]

Preglednica 8: Razredi poseda svežega betona [26]

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

Posed betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 je znašal 14.5 cm, kar naš beton uvršča v razred S3 – mehkoplastična konsistenca. Beton smo projektirali na posed 15 – 18cm.

5.3.2 Metoda z razlezom

Metoda z razlezom se predvsem uporablja za plastične in tekoče mešanice. Za izvedbo meritev potrebujemo razlezno mizo, dimenzij 700x700mm ter kovinski konus dimenzij $h=200\text{mm}$, $\varphi_1=200\text{mm}$, $\varphi_2=130\text{mm}$. Razlezna miza je sestavljena iz dveh plošč in lahko zgornjo dvignemo za 40mm. Kovinski konus napolnimo v dveh plasteh in vsako plast nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem dimenzij 40x40mm. Potem površino izravnamo ter po tridesetih sekundah previdno odstranimo konus. Zgornjo ploščo razlezne mize dvignemo za 40mm in jo spustimo. Postopek ponovimo 15 krat. Izmerimo dva med seboj pravokotna prereza razlezene betonske mase ter njihovo povprečje zaokrožimo na 10mm natančno. Razrede konsistence po metodi z razlezom prikazuje razpredelnici 9. [26]

Preglednica 9: Razredi razleza svežega betona [26]

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

Povprečen razlez betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 je znašal 43cm in beton uvrščal v razred F3 – mehkoplastična konsistenca.

5.4 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu (SIST EN 12350-7)

Za določanje vsebnosti zraka v svežem betonu uporabljamo porozimeter. Posodo porozimetra napolnimo s svežo betonsko mešanico v treh slojih in ga kompaktiramo na enega od predpisanih načinov, na primer z vibracijsko mizo. Višek betona odstranimo, tako da je končna površina gladka, prav tako očistimo nalegajoče površine posode in pokrova. Pokrov pritrdimo na posodo in skozi odprtini z ventilom nalijemo vodo, dokler se ne zapolni ves prostor med betonom in pokrovom. Nato ventila zapremo in z ročno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nič. (Odvečni zrak lahko spustimo skozi izpustni ventil, v primeru da je pritisk v predkomori previsok.) Nekaj minut po

izravnanju tlaka ventil odpremo in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks, ki v primeru da je pravilno umerjen predstavlja delež zraka v procentih glede na celotno prostornino sveže betonske mešanice v posodi. [26]

Delež zraka v sveži betonski mešanici HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 je znašal 1.45%. Beton smo projektirali na vsebnost zraka 1.6%.

5.5 Merjenje tlačne trdnosti

Tlačno trdnosti betona določamo na standardnih preizkušancih v obliki valja ali kocke (mi smo se odločili za slednje). Betonsko mešanico HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 smo vgradili v kalupe za izdelavo standardnih kock s stranico 15cm. Naredili smo 6 kock, katere smo po enem dnevu razkalupili ter jih negovali v vodi, pri sobni temperaturi, do časa preizkušanja. Pri starosti treh dni smo s pomočjo elektromehaničnega preizkuševalnega stroja za statične tlačne preiskave kapacitete 5000kN, opravili merjenje tlačne trdnosti na treh kockah, po osemindvajsetih dneh pa še na preostalih treh kockah. Povprečne vrednosti opravljenih meritev predstavljajo enoosno tlačno trdnost betona pri starosti 3 oziroma 28 dni.

Preglednica 10: Enoosne tlačne trdnosti treh preizkušancev betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1

vzorec	Enoosna tlačna trdnost [MPa]	
	3 dan	28 dan
preizkušanec 1	74,3	87,84
preizkušanec 2	73,4	89,71
preizkušanec 3	73,9	89,57
povprečna vrednost	73,9	89,04

Iz tabele je razvidno, da so bili rezultati meritev konstantni, med preizkušanci ni prišlo do večjih odstopanj.



Slika 8: Porušitev betonskega preizkušanca ob preizkušanju enoosne tlačne trdnosti

Na sliki 8 vidimo porušitev betonskih preizkušancev. Na desni sliki lahko opazimo razpoko, ki poteka skozi cementni kamen in skozi agregat. Sklepamo lahko, da je tlačna trdnost agregata in cementnega kamna približno enaka, kar pomeni, da so vse sestavine betona dobro izkoriščene.

5.6 Merjenje avtogenega in celotnega krčenja

Betonsko mešanico HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 smo vgradili v 6 kalupov v obliki prizem dimenzij 100x100x400mm in do starosti 28 dni merili avtogeno in celotno krčenje na preizkušancih.

5.6.1 Merjenje avtogenega krčenja

Avtogeno krčenje betona smo merili na treh prizmah. Betonsko mešanico smo že ob vgradnji zatesnili v polietilenski folijo, da bi preprečili izmenjavo vlage med betonom in okolico. Kalupe smo pripravili tako, da bi bilo avtogeno krčenje čim manj ovirano in nastavili merska reperja na nasprotna konca prizem, na njih nastavili merske urice in jih povezali z računalnikom. Temperaturo preizkušancev smo nadzorovali s pomočjo termo člena, ki smo ga vstavili v sredino vsakega betonskega preizkušanca. Spreminjanje volumna in temperature preizkušancev je računalnik s pomočjo temu prilagojenega programa meril 28 dni v kontroliranem okolju s temperaturo 22°C in relativno vlažnostjo 70%. Meritve skrčkov so se izpisovale vsako minuto, natančnost merilnih uric pa je znašala 0.001mm.

Poleg avtogenega krčenja, se pri zatesnjenih preizkušancih pojavi tudi temperaturno krčenje, ki pa poteka le dokler se temperatura preizkušanca ne ustali. Za potrebe diplomske naloge smo se osredotočili na avtogeno krčenje, ki predstavlja večji problem pri betonih z nizkim vodovozivnim količnikom.



Slika 9: Merjenje Krčenja zatesnjenih preizkušancev

5.6.2 Merjenje celotnega krčenja

Celotno krčenje betona predstavlja avtogeno krčenje in krčenje zaradi sušenja. Meritve krčenja smo izvajali na preostalih treh prizmah velikosti 100x100x400mm, katere smo po enem dnevu razkalupili in izpostavili sušenju v okolju s $70 \pm 5\%$ relativno vlažnostjo in temperaturo 22°C . Nanje smo namestili merilne reperje in skrček preizkušancev merili ročno z nasadnim deformetrom. Meritve so bile opravljene z natančnostjo 0.001mm.

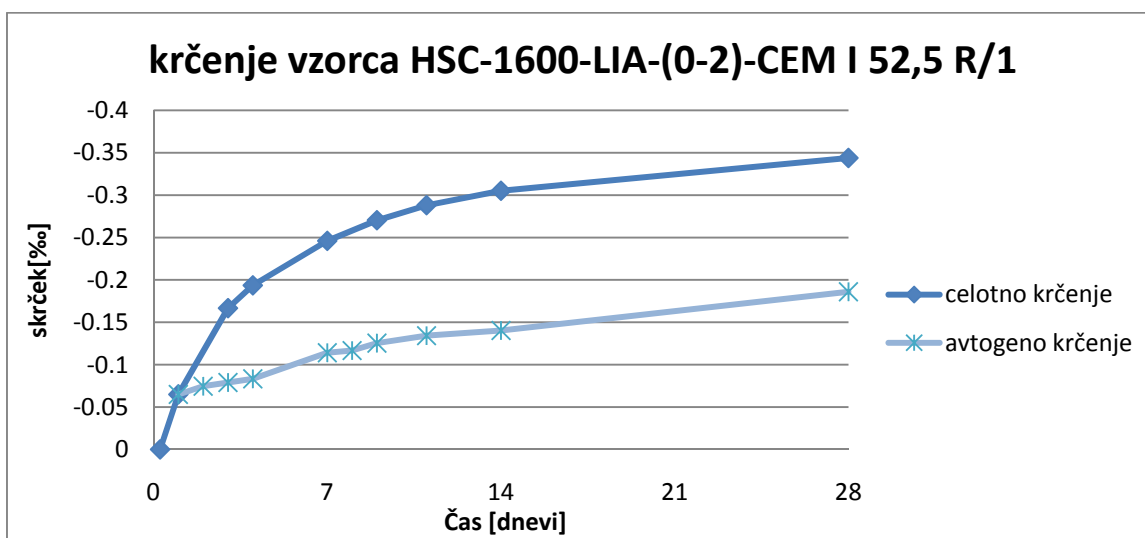
Če od meritev celotnega krčenja odštejemo krčenje zatesnjenih preizkušancev dobimo krčenje zaradi sušenja.



Slika 10: Merjenje celotnega krčenja

Preglednica 11: Povprečne vrednosti krčenja preizkušancev betonske mešanice HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1

	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
krčenje zatesnjenih preizkušancev [‰]	-0,065	-0,079	-0,114	-0,186
krčenje preizkušancev izpostavljenih sušenju [‰]	-0,065	-0,167	-0,246	-0,344



Grafikon 1: Avtogeno in celotno krčenje betonskega preizkušanca

5.7 Analiza in primerjava rezultatov

Rezultate smo primerjali z rezultati meritev izvedenih na podobnih mešanicah betona, katere so v sklopu svojih diplomskih nalog obravnavali D. Maleš, D. Lisec, in N. Vogrič.[6, 9, 23] Pri vseh betonih so bili uporabljeni enaki materiali in imajo enake vodovezivne količnike, razlikujejo se le pri vsebnosti lahkega agregata in njegovih frakcijah.

Preglednica 12: Lastnosti primerjanih betonskih mešanic

Betonska mešanica	vrsta lahkega agregata	frakcija	okrajšava	vir
<i>HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1</i>	ekspandirana glina - Liapor	0-2mm	LIA (0-2)	lasten preizkus
<i>HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1</i>		2-4mm	LIA (2-4)	N. Vogrič [23]
<i>HSC-1600-LWA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1</i>	naraven lahek agregat - lehnjak	0-2mm	LWA (0-2)	D. Maleš, D. Lisec [6, 9]
<i>HSC-1600-LWA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1</i>		2-4mm	LWA(2-4)	
<i>HSC-1600-CEM I 52.5 R</i>	/	/	HSC	

5.7.1 Tlačna trdnost betonov visoke trdnosti

Primerjali smo tlačne trdnosti petih različnih betonov:

Preglednica 13: Tlačne trdnosti primerjanih betonov

Betonska mešanica	Enoosna tlačna trdnost [MPa]	
	3 dan	28 dan
<i>HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1</i>	73,9	89
<i>HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1</i>	57,1	71,1
<i>HSC-1600-LWA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1</i>	60,6	94,6
<i>HSC-1600-LWA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1</i>	59,1	84,4
<i>HSC-1600-CEM I 52.5 R</i>	60,4	83

Iz primerjave meritev opazimo, da betonu HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1 tlačna trdnost hitreje narašča kot ostalim, saj je njena enoosna tlačna trdnost pri starosti 3 dni za od 18% do 22.73% večja od primerjalnih betonov. Po osemindvajsetih dneh so razlike nekoliko manjše, beton z naravnim lahkim agregatom ter beton brez lahkega agregata dosegajo podobne enoosne tlačne trdnosti, oziroma je njihovo odstopanje manjše od $\pm 7\%$. Pri betonu z večjo frakcijo ekspandirane gline Liapor je odstopanje nekoliko večje, njegova enoosna tlačna trdnost pri 28 dneh je v primerjavi z mešanico LIA (0-2) manjša za 20.11%.

Vsi betoni, z izjemo LIA (2-4) dosegajo višje enoosne tlačne trdnosti pri starosti 28 dni v primerjavi s kontrolnim betonom brez lahkega agregata.

Preglednica 14: odstopanje mešanic z dodanim lahkim agregatom, v primerjavi s kontrolno mešanico

Betonska mešanica	odstopanje [%]	
	3 dan	28 dan
HSC-1600-LIA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1	22,4	7,2
HSC-1600-LIA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1	-5,5	-14,3
HSC-1600-LWA-12 % (0-2) CEM I 52.5 R/1	0,3	14,0
HSC-1600-LWA-12 % (2-4) CEM I 52.5 R/1	-2,2	1,7

Na podlagi dobljenih rezultatov opazimo naslednje:

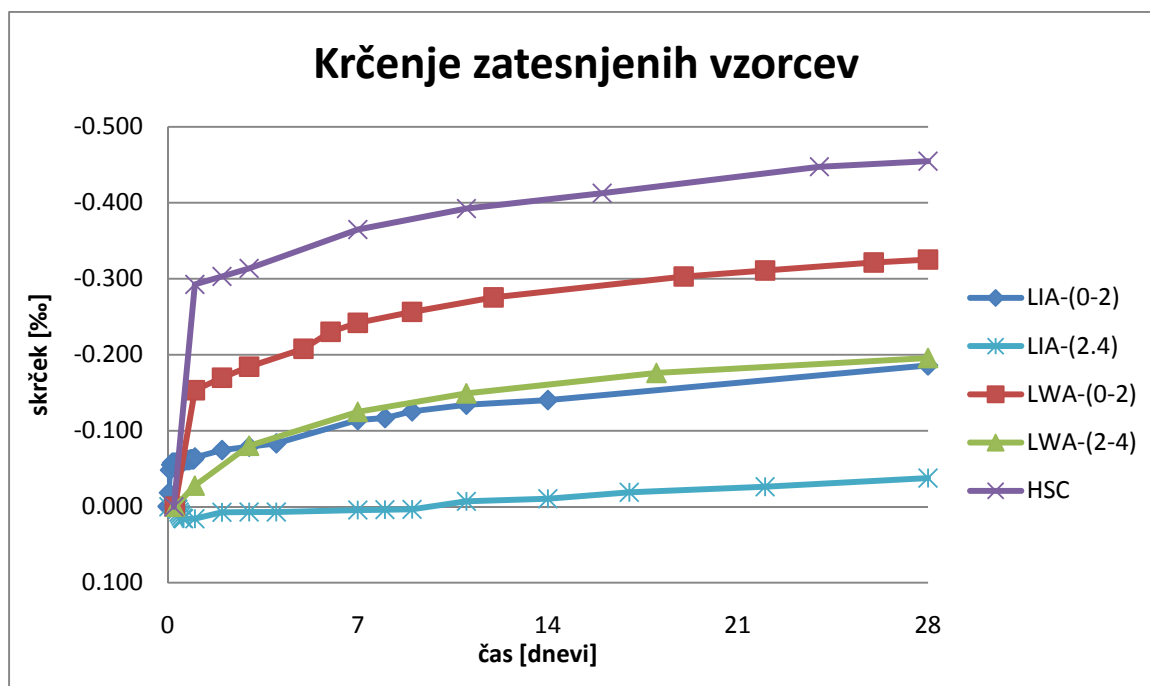
- Vrsta dodanega lahkega agregata vpliva na tlačno trdnost betona visoke trdnosti, ki pri preizkušancih variira za $\pm 14\%$.
- Preizkušanca z dodanim naravnim lahkim agregatom dosežeta višje trdnosti kot preizkušanca z dodano ekspandirano glino. To lahko pripišemo višji trdnosti samega agregata.
- Preizkušanca z dodanim lahkim agregatom frakcije 0-2mm dosežeta višje trdnosti kot preizkušanca z dodanim lahkim agregatom frakcije 2-4mm. Predvidevam, da je to posledica boljše razporeditve lahkega agregata po volumnu betona. Posledično je stopnja hidratacije višja, kar poveča tlačno trdnost betona, sami delci lahkega agregata pa so dovolj majhni, da ne oslabijo betona.
- Pri preizkušancih z dodano ekspandirano glino tlačna trdnost v prvih treh dneh hitreje narašča v primerjavi z preizkušanci z dodanim naravnim lahkim agregatom. Skleпам, da ekspandirana glina hitreje odda absorbirano vodo in je zato zgodnja trdnost mešanic večja, naknadno pa se proces hidratizacije umiri. Možno je tudi, da so visoke tlačne trdnosti po treh dneh le posledica nekoliko višjih temperatur negovanja.

5.7.2 Krčenje zatesnjenih preizkušancev

Krčenje zatesnjenih preizkušancev lahko razdelimo na avtogeno krčenje in temperaturno krčenje. Dokler se temperatura betona ne izenači z okolico sta prisotne obe vrsti krčenja, po ustalitvi temperature preizkušancev pa z merjenjem zatesnjenih preizkušancev merimo le avtogeno krčenje. Do izenačenja temperature pride po približno enem dnevu.

Preglednica 15: Primerjava skrčkov zatesnjenih betonskih preizkušancev

betonska mešanica	skrček betona pri različnih starostih [‰]			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,065	-0,079	-0,114	-0,186
HSC-1600-LIA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	0,016	0,007	0,004	-0,038
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,153	-0,184	-0,242	-0,325
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-0,028	-0,08	-0,125	-0,196
HSC-1600-CEM I 52,5 R	-0,293	-0,314	-0,365	-0,455



Grafikon 2: Krčenje zatesnjenih betonskih preizkušancev

Iz grafikona 2 je razvidno, da je krčenje pri vseh mešanicah z dodanim predhodno namočenim lahkim agregatom manjše v primerjavi s kontrolno betonsko mešanico. Mešanici LIA (0-2) in LWA (2-4) sta dosegli skoraj pol manjše vrednosti avtogenega krčenja po 28 dneh, mešanica LIA (2-4) pa je krčenje zmanjšala na manj kot desetino. Pri slednji lahko v prvih dneh opazimo celo nabrekanje betona.

Preglednica 16: Odstopanje skrčkov zatesnjenih preizkušancev glede na kontrolno mešanico

betonska mešanica	odstopanje glede HSC-1600-CEM I 52,5 R [%]			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-78	-75	-69	-59
HSC-1600-LIA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-105	-102	-101	-92
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-48	-41	-34	-29
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-90	-75	-66	-57

Iz rezultatov meritev je razvidno:

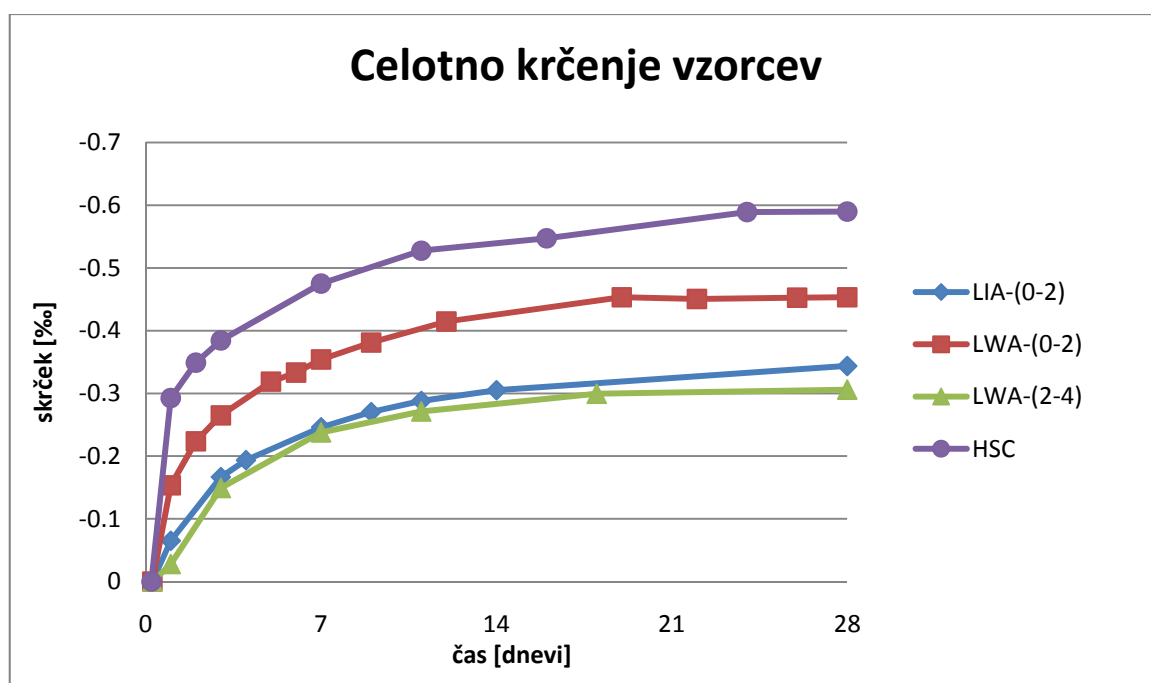
- Preizkušanci z dodano predhodno namočeno ekspandirano glino bolj učinkovito zmanjšajo avtogeno krčenje, v primerjavi z preizkušanci, ki vsebujejo predhodno namočen naraven lahek agregat. Predvidevamo, da je poroznost ekspandirane gline večja in lahko zato vpije več vode.
- Preizkušanci z dodanim lahkim agregatom frakcije 2-4mm izkazujejo manjše avtogeno krčenje od preizkušancev z dodanim lahkim agregatom frakcije 0-2mm. Vse mešanice so vsebovale 12% lahkega agregata, količina vode, namenjene za notranjo nego pa ni bila povsod enaka. Večji agregat lahko vpije večjo količino vode in je več tudi postopoma odda, zato bolj učinkovito nasprotuje krčenju.
- Rezultati meritev so dokaj raznoliki, dodajanje lahkega agregata lahko zmanjša avtogeno krčenje za od 29% do 92%.

5.7.3 Celotno krčenje preizkušancev

Merjenje celotnega krčenja je bilo izvedeno na štirih preizkušancih: LIA (0-2), LWA (0-2), LWA (2-4) in HSC. Dobljene vrednosti so predstavljene v spodnji preglednici ter prikazane na grafu 3.

Preglednica 17: Primerjava celotnega krčenja betonskih preizkušancev

betonska mešanica	skrček betona pri različnih starostih [‰]			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,065	-0,167	-0,246	-0,344
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,153	-0,265	-0,354	-0,453
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-0,028	-0,149	-0,238	-0,306
HSC-1600-CEM I 52,5 R	-0,293	-0,384	-0,475	-0,590



Grafikon 3: Celotno krčenje betonskih preizkušancev

Iz grafa je razvidno, da dodajanje lahkega agregata v betonsko mešanico zmanjša celotno krčenje betona, v primeru mešanice LWA (2-4) skoraj za polovico. Razliko v celotnem krčenju preizkušancev lahko pripišemo razlikam v krčenju zatesnjenih preizkušancev.

Preglednica 18: Odstopanje celotnega krčenja betonskih preizkušancev glede na kontrolno mešanico

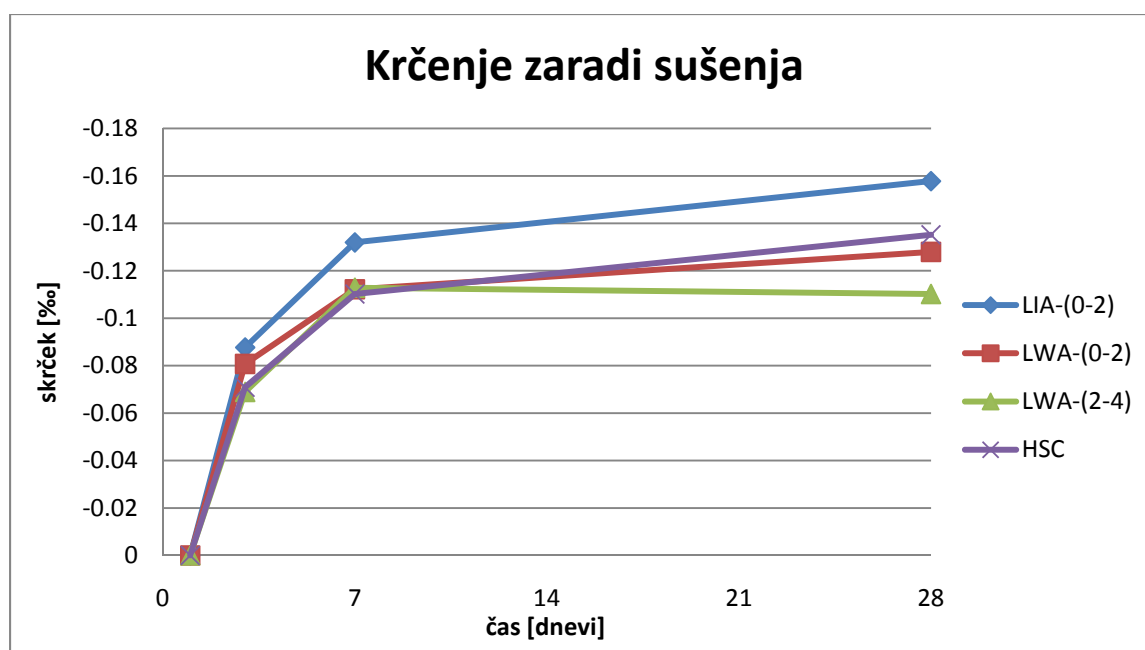
betonska mešanica	odstopanje glede HSC-1600-CEM I 52,5 R [%]			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-78	-57	-48	-42
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-48	-31	-25	-23
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-90	-61	-50	-48

5.7.4 Krčenje zaradi sušenja

krčenje zaradi sušenja smo izračunali tako da smo od celotnega krčenja odšteli krčenje zatesnjenih preizkušancev. Pri tem smo upoštevali, da se krčenje zaradi sušenja pojavi šele po enem dnevu, saj so bili preizkušanci pred tem prekriti s polietilensko folijo.

Preglednica 19: Primerjava krčenja zaradi sušenja betonskih preizkušancev

betonska mešanica	skrček betona pri različnih starostih [‰]		
	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,088	-0,132	-0,158
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	-0,081	-0,112	-0,128
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-0,069	-0,113	-0,110
HSC-1600-CEM I 52,5 R	-0,071	-0,110	-0,135



Grafikon 4: Krčenje zaradi sušenja betonskih preizkušancev

Vsi preizkušanci so dosegli približno enako stopnjo krčenja zaradi sušenja po 28 dneh. Sklepamo, da notranja nega ne vpliva bistveno na krčenje zaradi sušenja.

Preglednica 20: Odstopanje krčenja zaradi sušenja betonskih preizkušancev v primerjavi s kontrolno mešanico

betonska mešanica	odstopanje glede HSC-1600-CEM I 52,5 R [%]		
	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LIA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	24	20	17
HSC-1600-LWA-(0-2)-CEM I 52,5 R/1	14	2	-5
HSC-1600-LWA-(2-4)-CEM I 52,5 R/1	-3	3	-19

6 ZAKLJUČEK

V okviru diplomske naloge smo raziskovali vpliv vrste predhodno namočenega lahkega agregata na tlačno trdnost ter krčenje betona visoke trdnosti. Uporaba lahkega agregata za notranjo nego betona visoke tlačne trdnosti se je izkazala za učinkovito, saj lahko lahek agregat vpije veliko količino vode, ki jo naknadno odda v cementno pasto med procesom hidratacije. Zaradi postopnega oddajanja vode iz lahkega agregata v sistemu se reducira avtogeno krčenje, ki je velik problem pri betonih z majhnim vodovezivnim količnikom. Da je lahek agregat uspešen kot notranji rezervoar vode, mora vsebovati zadostno količino vode ter biti tem bolj enakomerno razporejen po prostornini betona, da lahko z vodo oskrbi vso cementno pasto.

Izsledki raziskav te naloge in še treh drugih diplomskih nalog, nas vodijo do naslednjih zaključkov:

Vsi preizkušanci, ki so vsebovali predhodno namočen lahek agregat (ekspandirano glino Liapor ali naraven lahek agregat), so ugodno vplivali na avtogeno krčenje, vendar so opazne razlike med rezultati mešanic, ki vsebujejo različne vrste lahkega agregata. Betonske mešanice z dodanim lahkim agregatom frakcije 2-4mm so bolj učinkovito zmanjšale avtogeno krčenje po osemindvajsetih dneh, predvsem mešanica narejena z ekspandirano glino, ki ga je skoraj izničila. Celotno krčenje preizkušancev se je reduciralo le toliko, kolikor se je zmanjšalo avtogeno krčenje betonskih mešanic, zato lahko sklepamo, da dodajanje predhodno namočenega lahkega agregata nima pretiranega učinka na krčenje zaradi sušenja.

Pri analizi enosnih tlačnih trdnosti smo ugotovili, da lahko notranja nega z lahkim agregatom poveča tlačno trdnost betona. Najboljši vpliv na tlačno trdnosti imajo preizkušanci z dodanim lahkim agregatom frakcije 0-2mm, kjer se lahko enosna tlačna trdnost poveča za do 14%. Manj ugoden vpliv ima lahek agregat Liapor frakcije 2-4mm, ki tlačno trdnost betona celo zmanjša.

Na podlagi vseh izvedenih meritev lahko zaključimo, da dodajanje primerne deleža lahkega agregata v betone visoke trdnosti ugodno vpliva na lastnosti betona. Vendar pa je iz rezultatov meritev razvidno, da je vpliv vrste in frakcije lahkega agregata velik. Beton, ki je dosegel najvišjo tlačno trdnost je imel manjše avtogeno krčenje, medtem ko je beton z najmanjšim avtogenim krčenjem dosegal nižjo tlačno trdnosti od primerljivega betona brez lahkega agregata. Najbolj celostno izboljšanje predstavlja mešanica z dodano expandirano glino frakcije 0-2mm, ki za dobrih 7% izboljša trdnost ter zmanjša avtogeno krčenje za skoraj 60%. V prihodnje bi bilo smiselno opraviti še meritve na betonskih preizkušancih z drugačno količino lahkega agregata.

VIRI

- [1] Kumar Mehta, P; Monteiro J.M.P. 2006. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Third edition. University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering: str. 3-10, 21-65, 203-219, 253-302, 449-475.
- [2] 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. 4-101.
- [3] Aitcin, P.C., Mindess. S. 2011. Sustainability of concrete. Modern concrete technology 17. Oxon, New York, Spon Press: str. 1-10, 16-43, 110-156, 176-224.
- [4] Neville, A.M. 2011. Properties of Concrete, 5th edition. Harlow [etc.], Pearson: str. 1-19, 86-88, 108-131, 257-264, 271-290, 426-438, 483-496.
- [5] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preiskovanje materialov. str. 84-100, 103-134.
- [6] Maleš, D. 2013. Vpliv zrnastostne strukture lahkega agregata na zgodnje avtogeno krčenje betona visokih trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba D. Maleš): str. 13-25.
- [7] Neville, A.M., Brooks, J.J. 2010. Concrete Technology, second edition. Harlow [etc.], Pearson: str. 73-76, 154-156, 233-236, 257-262.
- [8] Kodelja, M. 2009. Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpanih betonov. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba M. Kodelja): str. 24.
- [9] Lisec, D. 2013. Vpliv notranjih rezervoarjev vode v betonih visoke trdnosti na krčenje zaradi sušenja. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba D. Lisec): str. 16-28.
- [10] Zaletel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba Š. Zaletel): str. 7, 13-17, 22-23.
- [11] Bentz, D. P., Weiss, W. J. 2011. Internal Curing A 2010 State-of-the-Art Review. National Institute Of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce. str. 3
- [12] Chen, X., Wu, S., Zhou, J. 2012. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. Construction and Building Materials, 40: 869-874.
- [13] Burman Roy, J. 2012 Permeability of Concrete - A "silent killer". <http://www.nbmccw.com/articles/roads/28482-permeability-of-concrete-a-silent-killerq.html> (Pridobljeno 15.8.2014.)
- [14] Henkensiefken, R., et.al. 2009. Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions. Cement & Concrete Composites, 31: 427-437.

- [15] Khairallah, R. S. 2009. Analysis of Autogenous and Drying Shrinkage of Concrete. Master thesis. Ontario, McMaster University (samozaložba R. S. Khairallah): str. 7, 11-22.
- [16] Gupta, S.M., Aggarwal, P., Aggarwal, Y. 2006. Shrinkage of high strength concrete. Asian journal of civil engineering, 7, 2. 183-194.
- [17] Lopez, M. 2005. Creep and shrinkage of high performance lightweight concrete: a multi-scale investigation. Doctoral Thesis Dissertation. Georgia. Georgia Institute of Technology. (samozaložba M. Lopez): str. 15-17, 85-88, 100.
- [18] Yang, Z., Weiss, W. J., Olek, J. 2005. Interaction between Micro-Cracking, Cracking, and Reduced Durability of Concrete. Final Report. West Lafayette. Purdue University. str. 18-19.
- [19] Drying Shrinkage of Cement and Concrete. Cement, Concrete & Aggregates Australia, 2002: 2-6.
- [20] Dayalan, J., Buellah, M. 2014. Internal Curing of Concrete Using Prewetted Light Weight Aggregates. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 3, 3: 554-560.
- [21] Zhutovsky, S., Kovler, K. 2011. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete. Cement and Concrete Research, 42, 1: 20-26.
- [22] Basic Material of Liapor. Fabrication and Properties. <http://www.liapor.com/en/basic.php?n=0101> (Pridobljeno 17.8.2014.)
- [23] Vogrič, N. 2014. Avtogeno krčenje, posebnost betonov visoke trdnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba N. Vogrič): str. 18-29.
- [24] TKK. Cementol Antikorodin – Lastnosti. <http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol/dodatki-za-izboljšanje-odpornosti-na-agresivne-medije/cementol-antikorodin> (Pridobljeno.17.8.2014.)
- [25] Božič, M. Tehnološka navodila za betonska dela. Seinarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo(samozaložba M. Božič): str. 5.
- [26] 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 preizkušanje materialov: str. 58-66.
- [27] Bush, A. L., Bryan, D. P., Hack, D. R. 2006. Lightweight Aggregates. Industrial Minerals and Rocks: 181-194.
- [28] Classification of Aggregates <http://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/materials/Aggregate/Classification%20of%20aggregates.htm> (Pridobljeno 20.8.2014.)
- [29] Illstone, J. M., Domone, P. 2002. Construction Materials: Their Nature and Behaviour, Third Edition. London, New York. Spon Press. str. 122-130.

- [30] Suits, L. D. et.al. 2006. Control of Cracking in Concrete: State of the Art. Transportation research Circular, E-C107: 4-5
- [31] Herlec, U., Vidrih, R. 2006. Lehnjak. Ljubljana. Prirodoslovni muzej Slovenije. str. 223-228.
- [32] Schlitter, J. et.al. 2010. Development of Internally Cured Concrete for Increased Service Life. Final Report. West Lafayette. Purdue University. str. 28-41, 113-134, 170-174.
- [33] Zhutovsky, S., Kovler, K., Bentur, A. 2002. Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 35: 97-101.
- [34] Bentz, D. P., Lura, P., Roberts, J.W. 2005. Mixture Proportioning of Internal Curing. Concrete International, 27, 2: 35-40.
- [35] Golias, M., Castro, L., Weiss, J. 2012. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing. Construction and Building Materials, 35: 52-62.
- [36] Henkensiefken, R., Nantung, T., Weiss, J. 2011. Saturated Lightweight Aggregate for Internal Curing in Low w/c Mixtures: Monitoring Water Movement Using X-ray Absorption. Strain – An International Journal for Experimental Mechanics, 47: 432-441.
[doi:10.1111/j.1475-1305.2009.00626.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00626.x)
- [37] Marmor Hotavlje Group. Lehnjak <http://www.marmor-hotavlje.si/sl/vrste-kamna/lastni-materiali/lehnjak> (Pridobljeno 26.8.2014.)