

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:

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

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Legat, N. 2012. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 31 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVA

Kandidat:

NEJC LEGAT

**VPLIV NOTRANJIH REZERVOARJEV VODE NA
TLAČNO TRDNOST BETONA VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 5/B-GR

**IMPACT OF INTERNAL WATER RESERVOIRS ON
THE COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH
CONCRETE**

Graduation thesis No.: 5/B-GR

Mentor:
doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:
izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 21. 09. 2012

IZJAVE

Podpisani Nejc Legat izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti«.

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

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

Ljubljana, 25.8.2012

Nejc Legat

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	620.17:691.3(043.2)
Avtor:	Nejc Legat
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	31 str., 14 pregl., 10 sl., 14 en.
Ključne besede:	beton visoke trdnosti, notranja nega, lahki agregat, tlačna trdnost

Izvleček

Diplomsko delo obravnava vpliv notranje nege na tlačno trdnost betona visoke trdnosti. Betoni visoke trdnosti se uporabljajo pri zahtevnejših konstrukcijah, saj imajo zelo dobre mehanske lastnosti. Vendar pa so zaradi nizkega vodovezivnega razmerja bolj dovzetni za krčenje. Krčenje betonov visoke trdnosti lahko omejimo ali izničimo z notranjo nego – notranjimi rezervoarji vode, vendar pa to lahko vpliva na zmanjšanje tlačne trdnosti.

V eksperimentalni raziskavi smo ugotavljali, ali vnos notranjih rezervoarjev vode v betonsko mešanico s pomočjo lahkega agregata vpliva na zmanjšanje tlačne trdnosti betona, ali pa se tlačna trdnost betona zaradi izboljšane hidratacije cementa poveča. Ugotovili smo, da se je tlačna trdnost betona z uporabo notranjih rezervoarjev vode, pri starosti betona 28 dni, povečala.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	620.17:691.3(043.2)
Author:	Nejc Legat
Supervisor:	Asist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title:	Impact of internal water reservoirs on the compressive strength of high strength concrete
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Notes:	31 p., 14 tab., 10 fig., 14 eq.
Key words:	High strength concrete, internal curing, lightweight aggregate, compressive strength

Abstract

The present work examines the impact of internal curing on the compressive strength of high strength concrete. High strength concrete is used in more complex structures as it have very good mechanical properties. However, due to low water-binder ratio is more susceptible to shrinkage. Shrinkage of high strength concrete can limited or eliminated with internal curing – internal water reservoirs, but this may affect on the reduction of the compressive strength.

In experimental studies we were finding out if the introduction of internal water reservoirs in concrete mixture using lightweight aggregate effect on reducing of compressive strength or compressive strength due to better cement hydration increases. We found out that the compressive strength of concrete using internal water reservoirs at the age of 28 days increased.

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu za prijaznost, razlago in potrpežljivost pri nastajanju diplomskega dela. Hvala tudi sošolcem, s katerimi smo sodelovali pri izdelavi eksperimentalnih raziskav.

Zahvaljujem se tudi vsem bližnjim, ki so me podpirali pri študiju.

KAZALO VSEBINE

Izjave	I
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček.....	II
Bibliographic-documentalistic information and abstract	III
Zahvala	IV
1 UVOD	1
2 UVOD V BETON.....	2
2.1 POSEBNOSTI BETONOV VISOKE TLAČNE TRDNOSTI	2
2.2 LASTNOSTI UPORABLJENIH SESTAVIN BETONOV VISOKE TRDNOSTI.....	3
2.2.1 <i>Cement</i>	3
2.2.2 <i>Agregat</i>	5
2.2.3 <i>Voda</i>	5
2.2.4 <i>Mineralni dodatki</i>	5
2.2.5 <i>Kemijski dodatki</i>	6
3 ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONOV VISOKE TRDNOSTI	7
4 NOTRANJA NEGA BETONA	10
4.1 UPORABA LAHKEGA AGREGATA PRI NOTRANJI NEGI BETONA	10
4.2 LAHKI AGREGAT	12
4.3 EKONOMIČNOST NOTRANJE NEGE Z LAHKIM AGREGATOM	14
5 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE VPLIVA NOTRANJE NEGE NA TLAČNO TRDNOST BETONA VISOKE TRDNOSTI	15
5.1 ZASNOVA EKSPERIMENTALNIH RAZISKAV.....	15
5.2 UPORABLJENI MATERIALI IN RECEPTURA BETONA	15
5.2.1 <i>Agregat</i>	15
5.2.2 <i>Cement</i>	17
5.2.3 <i>Mineralni dodatki</i>	18
5.2.4 <i>Sestava preiskovanega betona</i>	19
5.3 MERJENJE TLAČNE TRDNOSTI BETONOV VISOKE TRDNOSTI.....	21
5.4 REZULTATI IN ANALIZA TLAČNE TRDNOSTI NOTRANJE NEGOVANEGA BETONA VISOKE TRDNOSTI.....	21
5.5 PRIMERJAVA TLAČNIH TRDNOSTI Z BETONOM BREZ NOTRANJIH REZERVOARJEV VODE	24
6 ZAKLJUČKI	27
VIRI.....	29

KAZALO PREGLEDNIC

<i>PREGLEDNICA 1: GLAVNI SESTAVNI MINERALI KLINKERJA</i>	<i>4</i>
<i>PREGLEDNICA 2: POMEN KRATIC V MODEL CODE 1990.....</i>	<i>7</i>
<i>PREGLEDNICA 3: POMEN KRATIC PRI MODELU DILGER ET AL.</i>	<i>9</i>
<i>PREGLEDNICA 4: LASTNOSTI MIVKE TERMIT IZ MORAVČ</i>	<i>16</i>
<i>PREGLEDNICA 5: LASTNOSTI AGREGATA IZ SEPARACIJE KRESNICE</i>	<i>16</i>
<i>PREGLEDNICA 6: LASTNOSTI AGREGATA IZ KAMNOLOMA JEZERSKO.....</i>	<i>17</i>
<i>PREGLEDNICA 7: MINERALNA SESTAVA CEMENTNEGA KLINKERJA</i>	<i>17</i>
<i>PREGLEDNICA 8: KEMIJSKA SESTAVA TER FIZIKALNO-KEMIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CEMENTA CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R</i>	<i>18</i>
<i>PREGLEDNICA 9: OSNOVNE LASTNOSTI UPORABLJENEGA ANTIKORODINA</i>	<i>18</i>
<i>PREGLEDNICA 10: KEMIJSKA SESTAVA IN FIZIKALNO-KEMIJSKE LASTNOSTI MIKROSILIKE</i>	<i>19</i>
<i>PREGLEDNICA 11: SESTAVA PREISKOVANIH BETONSKIH MEŠANIC.....</i>	<i>20</i>
<i>PREGLEDNICA 12: TLAČNE TRDNOSTI POSAMEZNIH PRESKUŠANCEV PRI RAZLIČNIH STAROSTIH..</i>	<i>22</i>
<i>PREGLEDNICA 13: POVPREČNE TLAČNE TRDNOSTI BETONOV V MPA PRI RAZLIČNI STAROSTI, VKLJUČNO S PODANIM ŠTEVILOM PRESKUŠANCEV IN PRIPADAJOČO STANDARDNO DEVIACIJO</i>	<i>24</i>
<i>PREGLEDNICA 14: RAZLIKA TLAČNIH TRDNOSTI MED HSC-1600-LWA-12% IN HSC-1600</i>	<i>25</i>

KAZALO SLIK

<i>SLIKA 1: ODVISNOSTI MED NAPETOSTMI IN DEFORMACIJAMI PRI ENOOSNEM TLAČNEM PREIZKUSU ZA (A) AGREGAT, (B) CEMENTNI KAMEN IN (C) BETON (CEB, 1990)</i>	<i>3</i>
<i>SLIKA 2: VPLIV LAHKEGA AGREGATA PRI PROCESU NOTRANJE NEGE(ESCSI, 2006).....</i>	<i>11</i>
<i>SLIKA 3: PRIKAZ ZAŠČITE CEMENTNE PASTE V PODOBNIH MEŠANICAH, VENDAR JE PRI (A) UPORABLJEN GROBI LAHKI AGREGAT, PRI (B) PA FINI LAHKI AGREGAT (HENKENSIEFKEN, 2008)</i>	<i>13</i>
<i>SLIKA 4: IZGLED BETONSKE MEŠANICE HSC-1600-LWA-12%.....</i>	<i>20</i>
<i>SLIKA 5: SVEŽI PRESKUŠANCI HSC-1600-LWA-12%, VGRAJENI V KALUPE.....</i>	<i>21</i>
<i>SLIKA 6: PORUŠEN PRESKUŠANEC HSC-1600-LWA-12% PRI STAROSTI 1 DAN</i>	<i>22</i>
<i>SLIKA 7: VREDNOSTI TLAČNE TRDNOSTI VSEH PRESKUŠANCEV OB RAZLIČNIH DNEVIH</i>	<i>23</i>
<i>SLIKA 8: ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONA HSC-1600-LWA-12%</i>	<i>23</i>
<i>SLIKA 9: ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONA HSC-1600-LWA-12% IN HSC-1600.....</i>	<i>25</i>
<i>SLIKA 10: ČASOVNI POTEK RAZLIKE TLAČNIH TRDNOSTI MED HSC-1600-LWA-12% IN HSC-1600</i>	<i>26</i>

1 UVOD

V gradbeništvu je beton zaradi mnogih dobrih lastnosti eden izmed najpogosteje uporabljenih materialov. Beton je najbolj prepoznaven po svoji veliki tlačni trdnosti, možnosti oblikovanja v poljubne oblike ter razmeroma nizki ceni. Vendar pa je razvoj tehnologije v gradbeništvu vzpodbudil uporabo betonov visoke trdnosti. Ti betoni imajo boljše mehanske lastnosti, vendar pa imajo tudi večje avtogeno krčenje, kar je posledica nizkega vodovezivnega razmerja.

Z razvojem tehnologije se je meja med betoni običajne trdnosti in betoni visoke trdnosti postopoma spreminjala. V petdesetih letih se je obravnavala tlačna trdnost 35 MPa že kot visoka trdnost. Dandanes pa je beton visoke trdnosti tisti, ki ima tlačno trdnost vsaj 55 MPa. (SIST EN 206-1:2003). Odlikujejo ga tudi druge pozitivne lastnosti, saj konstrukcijam zagotavlja večjo trajnost in življenjsko dobo.

Pri betonih visoke tlačne trdnosti znižujemo vodovezivno razmerje za večjo trajnost in vzdržljivost betona. Vendar pa je zaradi tega potrebno v vezivo dodajati razne dodatke (npr. superplastifikatorje). Ti dodatki in cement v betonu dosežejo vezivno funkcijo le, če je na razpolago dovolj vode v procesu hidratacije. Če je vode premalo, ostanejo v betonu nehidratizirani delci veziva, ki delujejo kot polnilo, kar je iz vidika odpornosti in trajnosti neizkoriščen potencial. Torej je potrebno pri procesu hidratacije zagotavljati zadostno količino vode, kar nam omogoča nega betona.

V tem diplomskem delu obravnavamo vpliv notranje nege betona z dodajanjem lahkega, predhodno namočenega agregata na tlačno trdnost betona visoke trdnosti, ki nam služi kot notranji rezervoar vode, katera se porablja pri procesu hidratacije. S temi notranjimi rezervoarji vode dosežemo, da je v betonu med procesom hidratacije na voljo še dodatna voda, kar na koncu pomeni več hidratiziranih delcev in manjše krčenje ob nezmanjšani tlačni trdnosti betona.

2 UVOD V BETON

Beton je kompozitni material, sestavljen iz:

- cementa,
- mineralnega agregata,
- vode,
- dodatkov.

Osnovni materiali v betonu so cement – vezivo, mineralni agregat in voda. Po zamešanju (homegeniziranju) teh sestavin se v betonu pričnejo kemični procesi med le-temi. Voda in cement tvorita cementno pasto, ki se med hidratacijo s sproščanjem toplote pretvori v cementni kamen, ki je osnovni del otrdelega betona. S pomočjo dodatkov pa dobimo zelo prilagodljiv in najbolj pogosto uporabljen material v gradbeništvo.

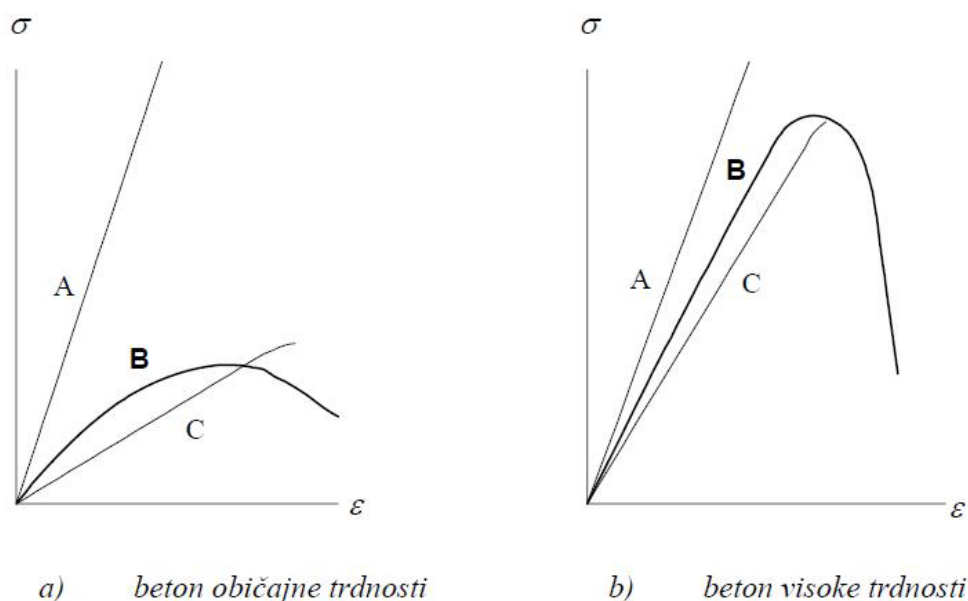
2.1 Posebnosti betonov visoke tlačne trdnosti

V primerjavi z betoni običajne trdnosti ima beton visoke trdnosti drugačno sestavo in zaradi tega tudi drugačno strukturo. Znani so po nizki poroznosti ter diskontinuitetni strukturi kapilarnih por v cementi pasti. To je posledica nizkega vodovezivnega razmerja, ki se običajno spreminja v mejah med 0.20 in 0.43, in dodajanja superplastifikatorjev z mikrosiliko. Delci cementa so zaradi nizkega vodovezivnega razmerja zelo blizu drug drugemu, zato za tvorbo nosilne strukturne mreže zadostuje že nizka stopnja hidratacije.

Zaradi drugačne strukture betona visoke trdnosti je drugačen tudi časovni razvoj mehanskih in reoloških lastnosti. Zaradi večje količine veziva in relativno majhne vsebnosti vode, je hidratacija zelo buren proces, betoni pa izkazujejo veliko avtogeno krčenje in hitro naraščanje tlačne trdnosti.

Betoni visoke trdnosti imajo bolj enakomerno strukturo v primerjavi z betonom običajne trdnosti. Kadar so cementu, skupaj z nizkim vodovezivnim razmerjem, dodani tudi drobni delci mikrosilike, se izboljša mikrostruktura stičnega območja. Okoli zrn so orientirani veliki ploščati kristali kalcijevega hidroksida. Z uporabo mikrosilike pride do precejšnih sprememb mikrostrukture. Več raziskovalcev je ugotovilo, da imajo betoni, ki vsebujejo mikrosiliko, manj kristalno strukturo in tudi manjšo poroznost kot betoni običajne trdnosti. Matrica v okolici agregatnih zrn je zapolnjena z gostim kalcijevim silikat hidratom in se med kalcijevim silikat hidratom in agregatom raje ustvari neposredna povezava kot med kalcijevim hidroksidom, kateri neugodno vpliva na trdnost cementnega kamna, in agregatom.

Na sliki 1 so prikazane odvisnosti med napetostmi in deformacijami pri enoosnem tlačnem preizkusu betona, agregata in cementnega kamna za beton običajne trdnosti in za beton visoke trdnosti. Vidimo, da ima beton običajne trdnosti manjši modul elastičnosti kot beton visoke trdnosti, odvisnost med deformacijami in napetostmi betona visoke trdnosti je linearna skoraj do dosežene največje tlačne trdnosti. Vzrok za razliko med odvisnostjo napetosti in deformacije obeh betonov je v kvaliteti cementnega kamna in stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom.



Slika 1: Odvisnosti med napetostmi in deformacijami pri enoosnem tlačnem preizkusu za (A) agregat, (B) cementni kamen in (C) beton (CEB, 1990)

2.2 Lastnosti uporabljenih sestavin betonov visoke trdnosti

Sestavine betonov visoke trdnosti, kot so cement, kamni agregat, voda in dodatki, so enake kot pri betonih običajne trdnosti. Vendar pa sta kvaliteta in obnašanje sestavin z uporabo betona visoke trdnosti vse pomembnejša. Večji del prostornine betona zavzema kamni agregat, so pa zahteve glede zrnastostne sestave in največjega zrna agregata drugačne kot pri betonih običajne trdnosti. Da dosežemo višje tlačne trdnosti, del cementa nadomestimo z mineralnimi dodatki, ki jih redko uporabljamo pri betonih običajne trdnosti. Nizko vodovozivno razmerje, ki je pogoj za visoke tlačne trdnosti, povzroči uporabo superplastifikatorjev, s katerimi omogočimo primerno vgradljivost. Količina veziva je pri betonih visoke trdnosti višja in se giblje med 400 in 550 kg/m³, pri betonih običajne trdnosti pa je običajno med 300 in 400 kg/m³ (Neville, Aitcin, 1998).

2.2.1 Cement

Cement je osnovno hidravlično vezivo v betonu. V gradbeništvu se najpogosteje uporablja portland cement. Osnovne surovine za pridobivanje portland cementa vsebujejo okside

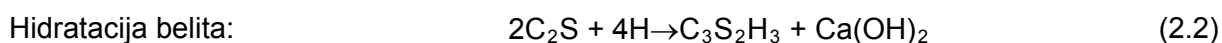
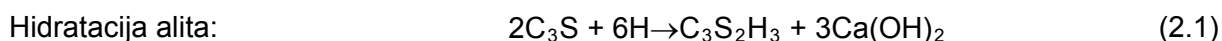
silicija (SiO_2), aluminija (Al_2O_3), železa (Fe_2O_3) in kalcija (CaO). Ob reakciji cementa z vodo nastane cementna pasta in postopoma tudi cementni kamen. Pri tem se kohezijske in adhezijske lastnosti postopoma razvijajo in omogočajo, da se vse sestavine povežejo v kompaktno maso betona.

Glavna sestavina portland cementa je cementni klinker, proizvaja pa se z žganjem surovinske moke iz laporja, apnenca in ostalih materialov. Več kot dve tretjini mase cementnega klinkerja predstavljata minerala alit in belit. Razmerje mas v cementnem klinkerju med CaO in SiO_2 mora biti večje od 2, omejiti pa je potrebno prisotnost prostih MgO in CaO , saj v večjih količinah negativno vplivata na lastnosti cementa. V cementu so prisotne tudi alkalije, kot sta Na_2O in K_2O . Preglednica 1 prikazuje glavne sestavne minerale klinkerja, njihovo kemijsko formulo in deleže v cementnem klinkerju.

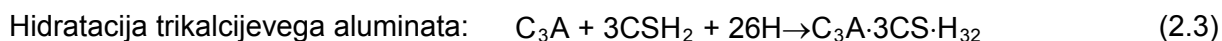
Preglednica 1: Glavni sestavni minerali klinkerja

MINERAL	KEMIJSKA FORMULA	DELEŽI MINERALA V CEMENTNEM KLINKERJU
alit ali trikalcijev silikat	C_3S ali $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	45-60%
belit ali dikalcijev silikat	C_2S ali $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	20-30%
trikalcijev aluminat ali aluminatna faza	$\text{C}_3\text{A} - 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	4-12%
tetrakalcijev aluminat ferit ali feritna faza	$\text{C}_3\text{AF} - 4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	10-20%

Portland cement je po definiciji hidravlično vezivo, proizvedeno z mletjem klinkerja, ki mu dodamo 3% do 5% sadre ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Iz zgornjih dveh reakcij vidimo, da pri hidrataciji belita z enako količino vode kot pri hidrataciji alita nastane dvakrat manj kalcijevega hidroksida. Ta reakcija traja od ene ure do enega dneva in predstavlja začetek strjevanja betona. Aluminatna faza ni zaželena, saj lahko kasneje povzroči korozijsko razpadanje betona, vendar pa na začetku pripomore k zgodnji trdnosti. Reakcija aluminatne faze potrebuje največjo količino vode:



Posledica hidratacije veziva v betonu je določen mehanski in termodinamični učinek. Kot mehanski učinek smatramo razvoj tlačne trdnosti, kot termodinamični učinek pa sproščanje hidratacijske toplote.

2.2.2 Agregat

Pri izboru agregata moramo biti pozorni, saj z naraščanjem tlačne trdnosti betona lahko agregat postane šibek člen in povzroči porušitev. Po navadi ima agregat, uporabljen za izdelavo betona visoke trdnosti, granulacijsko sestavo znotraj priporočenih vrednosti za beton običajne trdnosti. Zaradi zmanjšanja količine vode v mešanici je potrebno povečati razmerje grobega proti drobnemu agregatu. Ob tem moramo biti pozorni na to, da je predpisan maksimalen premer zrna pri betonih visoke trdnosti 16 mm, saj relativno droben agregat omogoča bolj homogeno in kompaktno strukturo betona z manjšo vrednostjo por. To omogoča bolj enakomerno razporeditev napetosti zaradi zunanje obtežbe, saj so konice napetosti v medsebojnih kontaktih med posameznimi zrnji agregata manj izrazite. Zaradi velike vsebnosti drobnih delcev postane uporaba peska za boljše obdelovalnost in manjšo segregacijo nepotrebna. Znano je tudi, da so manjši delci agregata trdnjši, saj obstaja manjša verjetnost nepravilnosti v njihovi strukturi.

Agregat ima tudi to lastnost, da je cenejši od cementa, torej je bolj ekonomično upravičen. Betonu daje tudi boljše lastnosti zaradi volumenske stabilizacije in trajnosti, vendar pa na tlačno trdnost betona vpliva tudi vez med agregatom in cementno pasto. Gostejši in trši material razvije večji modul elastičnosti v začetni fazi kot manj gost material. Pomembna je tudi oblika grobega agregata. Ta naj bi bila čim bolj zaobljena in okrogla, ker se s tem izognemo šibkim delcem, ki so dolgi in ploski, saj zahtevajo več vode ali več superplastifikatorja za doseganje ustrezne plastičnosti.

2.2.3 Voda

Pri betonih visoke tlačne trdnosti je količina zamesne vode, ki jo uporabimo za izdelavo betonske mešanice, zelo pomembna, saj vpliva na trdnost in trajnost betona. Pri uporabi manjše količine vode (nizko vodovezivno razmerje) se v betonski mešanici tvori gosta matrika, ki je bolj odporna.

Pomembna je tudi kvaliteta vode, saj ne sme vsebovati snovi, ki bi vplivale na vgradnjo betona, trdnost betona ali celo vodile do korozije armature. Primernost vode za mešanico betona določa standard SIST EN 1008:2003. Velja pa, če je voda pitna, potem je primerna za beton, saj takšna voda ne vsebuje veliko anorganskih delcev.

2.2.4 Mineralni dodatki

Pri betonih visoke trdnosti se kot mineralni dodatek najpogosteje uporablja mikrosilika in elektrofiltrski pepel.

Mikrosilika ima veliko specifično površino s premerom med 0.1 in 0.2 μm , kar je 1% premera zrna portland cementa. Pri reakciji mikrosilike s kalcijevim hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nastane kalcijev silikat hidrat. Rezultat tega je trden in neprepusten beton. Pridobivamo jo kot stranski produkt pri proizvodnji ferosilicija v elektroobločnih pečeh, vsebuje pa več kot 90% SiO_2 .

Elektrofiltrski pepel pridobivamo z elektrostatičnim ali mehaničnim kondenziranjem iz izpušnih plinov premogovnih elektrarn. Uporaba elektrofiltrskega pepela zmanjša porabo superplastifikatorja in je veliko cenejša od mikrosilike, vendar je z mikrosiliko lažje dosegati večje končne tlačne trdnosti betona.

2.2.5 Kemijski dodatki

Kemijski dodatki so se uporabljali že pred mineralnimi dodatki. Pri betonih visoke trdnosti uporabljamo plastifikatorje, superplastifikatorje, aerante, zavlačevalce, pospeševalce, zgoščevalce in druge.

Superplastifikator je nepogrešljiv dodatek pri betonih visoke trdnosti, saj zmanjšujejo površinsko napetost vode in s tem tudi trenje med molekulami vode in zrni cementa, zaradi česar dosežemo dovolj veliko plastičnost za vgradnjo kljub nizkemu vodovezivnemu razmerju.

Poznamo štiri glavne družine superplastifikatorjev (Aitcin, 1998):

- sulfonirani melamin-formaldehid kondenzati (melaminski superplastifikatorji),
- sulfonirani naftalen-formaldehid kondenzati (naftalenski superplastifikatorji),
- modificirani lignosulfonati z malo sladkorja,
- poliakrili.

Naftalenski superplastifikatorji, ki so najbolj običajni, so iz organskih polimernih molekul. Konec molekule, ki se usmeri proti cementu, je izjemno hidrofoben, drugi konec, ki je hidrofilen, pa se usmeri proti molekuli vode. Na ta način dobijo cementni delci negativen naboj, rezultat tega pa je, da se odbijajo drug od drugega po principu elektrostatičnega odboja. S tem pa se prepreči njihovo kopičenje.

Melaminski superplastifikatorji so sestavljeni iz dolgih razvejanih polimernih molekul, ki imajo različno dolge stranske verige. Te molekule se primejo za cementne delce in na začetku učinkujejo enako kot običajni superplastifikatorji. Stranske verige, ki so daljše, pa določen čas ne dovolijo stika med hidratiziranimi cementnimi zrni. S tem se omogoči primerna vgradljivost betonske mešanice kljub manjši porabi vode skupaj z daljšim časom obdelave. Ker nam superplastifikatorji omogočajo manjše vodovezivno razmerje, se izboljšuje tudi trdnost in trajnost betona.

3 ČASOVNI RAZVOJ TLAČNE TRDNOSTI BETONOV VISOKE TRDNOSTI

Časovno naraščanje tlačne trdnosti betona visoke trdnosti poteka drugače kot pri običajnih betonih. V začetnem obdobju trdnost narašča hitreje, v končnem obdobju pa razlika med hitrostjo naraščanja med betonom običajne in visoke trdnosti ni tako izrazita. Predvidevamo, da je velika hitrost začetnega naraščanja tlačne trdnosti posledica visoke hidrationske toplote na enoto betona in manjše razdalje med delci, ki sodelujejo v hidrationski (Parrot, 1988). Delci so si bližje zaradi nizkega vodovezivnega razmerja, kar vodi h gostejši strukturi betona.

Za napredovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti betonov poznamo dosti računskih modelov. Le-ti po navadi opisujejo betone običajne trdnosti, saj pri njih vpliva manj parametrov na trdnost kot pri betonih visoke trdnosti. Zaradi drugačne strukture betonov visoke trdnosti je potrebno za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti uporabiti drugačne računske modele, ki temeljijo na eksperimentalnih rezultatih.

Model CEB-FIP Model Code 1990, FIB 1999

Tlačna trdnost betona pri starosti t je po izrazih v Model Code 1990 odvisna od cementa, temperature in nege (Saje, 2001). Tlačna trdnost betona v okolici, ki dosega povprečno temperaturo 20°C in relativno vlažnost zraka 95%, je podana z izrazoma

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}, \quad (3.1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right]. \quad (3.2)$$

Preglednica 2: Pomen kratic v Model Code 1990

KRATICA	RAZLAGA
$f_{cm}(t)$	Povprečna tlačna trdnost betona pri starosti t v MPa
$\beta_{cc}(t)$	Funkcija, ki opisuje razvoj tlačne trdnosti v odvisnosti od starosti t
f_{cm}	Povprečna tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni v MPa
t	Starost betona v dnevih
t_1	1 dan
s	Koeficient v odvisnosti od vrste cementa: <ul style="list-style-type: none"> • $s = 0.2$ pri hitrovezočih cementih visoke trdnosti • $s = 0.25$ pri običajnih in hitrovezočih cementih • $s = 0.38$ pri počasivezočih cementih

Ta računski model za betone visoke trdnosti ne ustreza najbolje, saj bi moral biti koeficient s odvisen od vodovezivnega razmerja ali tlačne trdnosti betona.

Modificiran model CEB-FIB Model Code 1990/ Han

Omenjen model je v svoji doktorski disertaciji razvil Han (1996).

Naraščanje trdnosti betona je razdelil na dve obdobji. V začetnem obdobju trdnost narašča zelo hitro, v končnem obdobju pa počasneje. Predpostavljena točka, ki se imenuje kritična točka t_{cr} , deli ti dve območji, kar se zgodi pri razmerju $f_{cm}(t)/f_{cm} = 0.55$. Osnovni izraz za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti je

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}[t_c(t)] \cdot f_{cm}, \quad (3.3)$$

pri čemer je $\beta_{cc}[t_c(t)]$ razdeljen na dva dela

$$\beta_{cc}[t_c(t)] = \alpha_{st} \cdot [t_c(t)]^4 \quad \text{za } t \leq t_{cr}, \quad (3.4)$$

$$\beta_{cc}[t_c(t)] = \exp \left[s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_c(t)/t_1}} \right) \right] \quad \text{za } t \geq t_{cr}. \quad (3.5)$$

Za vrednost koeficienta α_{st} se priporoča:

- $\alpha_{st} = 0.0069$ za hitrovezoče cemente visoke trdnosti,
- $\alpha_{st} = 0.0155$ za normalnovezoče cemente,
- $\alpha_{st} = 0.0017$ za počasivezoče cemente.

$t_c(t)$ je korigiran čas, ki je odvisen od dejanskega časa t in vrste cementa. Izrazi za $t_c(t)$ so naslednji

$$t_c(t) = (t) \cdot \left[\frac{9}{2 + \left(\frac{t}{t_{1,t}} \right)^{1.2}} + 1 \right]^\alpha \quad \text{za } t \leq t_{cr}, \quad (3.6)$$

$$t_c(t) = (t - t_{ad}) \cdot \left[\frac{9}{2 + \left(\frac{t - t_{ad}}{t_{1,t}} \right)^{1.2}} + 1 \right]^\alpha \quad \text{za } t \geq t_{cr}. \quad (3.7)$$

Čas $t_{1,t}$ je enak 1 dan, koeficient α pa je odvisen od vrste cementa:

- $\alpha = 1$ za hitrovezoče cemente visoke trdnosti,
- $\alpha = 0$ za normalnovezoče cemente,
- $\alpha = -1$ za počasivezoče cemente.

Vpliv vrste cementa se upošteva tudi v času t_{ad} :

- $t_{ad} = 0.4$ za hitrovezoče cemente visoke trdnosti,
- $t_{ad} = 0$ za normalnovezoče in počasivezoče cemente.

Model Dilger et al.

Dilger in njegovi sodelavci (1997) so preiskovali betone visoke tlačne trdnosti ter na podlagi raziskav za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti predlagali naslednji model

$$f_{cm}(t) = \frac{t}{\gamma_f + \alpha_f \cdot t} f_{cm}, \quad (3.8)$$

$$\alpha_f = 1.03 - \frac{1}{3} \cdot \frac{W}{B}, \quad (3.9)$$

$$\gamma_f = 28 \cdot (1 - \alpha_f). \quad (3.10)$$

Preglednica 3: Pomen kratic pri modelu Dilger et al.

KRATICA	RAZLAGA
$f_{cm}(t)$	Povprečna tlačna trdnost betona pri starosti t v MPa
f_{cm}	Povprečna tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni v MPa
$\frac{W}{B}$	Vodovezivno razmerje
t	Starost betona v dnevih

Ta model velja za betone visoke trdnosti z vodovezivnim razmerjem med 0.15 in 0.40.

4 NOTRANJA NEGA BETONA

Betoni z nizkim vodovezivnim razmerjem se v gradbeništvo uporabljajo z namenom izboljševanja trdnosti in trajnosti. Navkljub nizki prepustnosti in povišani trdnosti pa so zelo občutljivi na razpoke, ki se pojavljajo v začetnem obdobju razvoja tlačne trdnosti, nastale zaradi avtogenega krčenja. Betoni zaradi nizkega vodovezivnega razmerja začnejo porabljati vodo iz kapilarnih por, torej so že v začetnem obdobju, ko imajo še razmeroma nizko nosilnost, izpostavljeni velikim silam. Poškodbe lahko preprečimo tako, da beton negujemo oziroma ga navlažujemo. Tradicionalno uporabljena metoda je zunanja nega, ki se uporablja tako za betone običajne trdnosti kot tudi za betone visoke trdnosti. V glavnem lahko zunanjo nego razdelimo na dve skupini:

- vodna nega (dodajamo dodatno vlago in s tem preprečujemo izhajanje vlage iz betona),
- nega z neprepustno membrano (samo preprečujemo izhajanje vlage).

Vendar pa tradicionalna metoda nege betona ni dovolj učinkovita pri betonih visoke trdnosti, še posebej pri velikih prerezih, saj je globina prodora vode proti notranjosti omejena.

Zaradi problematike avtogenega krčenja betonov visoke trdnosti je bilo potrebno razviti nekakšno novo vrsto nege – notranjo nego. Izraz notranja nega povezujemo z vnosom dobro razporejenih majhnih vodnih rezervoarjev v mešanico betona, ki se pri hidrataciji betona porabijo in omogočajo, da se voda iz finih por pri procesu hidratacije porablja kasneje. S tem bistveno zmanjšamo avtogene deformacije in ugodno vplivamo na trajnost betona. Kot notranji rezervoar vode lahko uporabimo

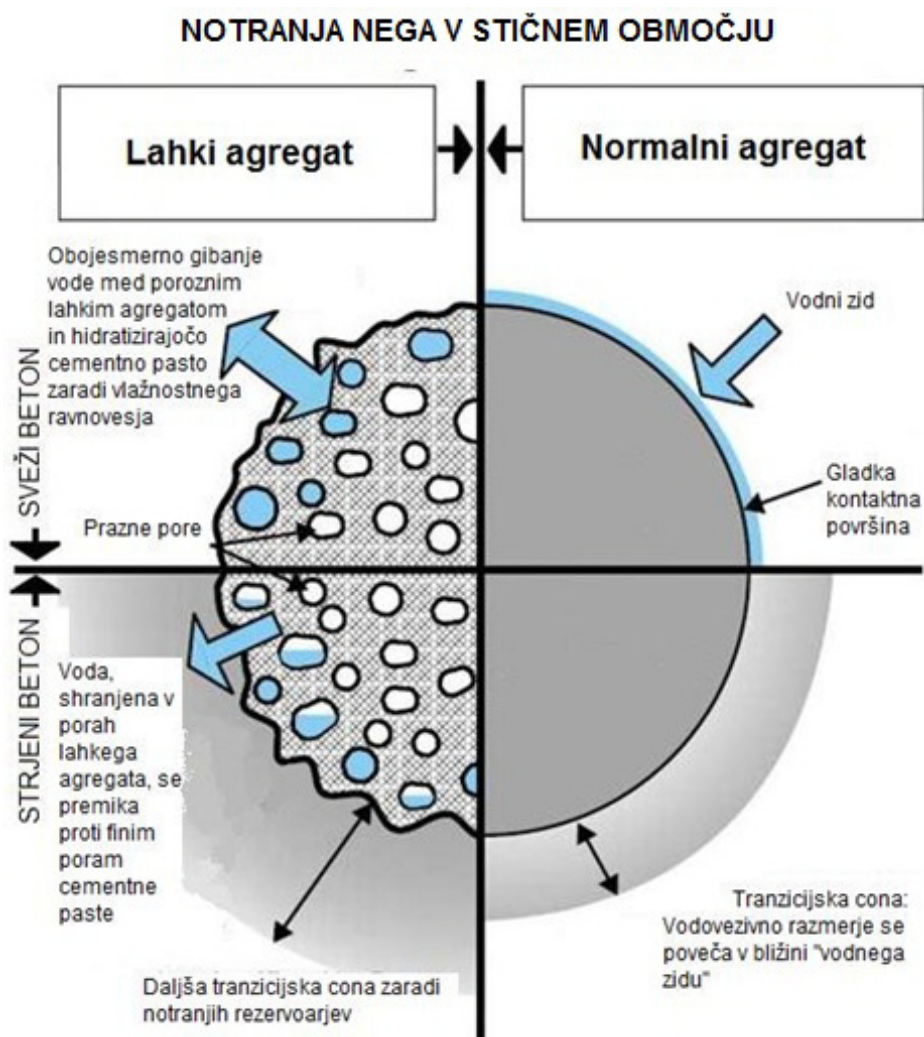
- lahki agregat (LWA),
- polimerne super absorbente (SAP),
- nasičeni normalni agregat (NWA),
- lesena vlakna,
- recikliran agregat.

Zaradi lahke pridelave in nizke cene se najbolj pogosto uporablja lahki agregat. Že v šestdesetih letih sta raziskovalca Aroni in Polivka (1967) izjavila: « ...notranjo nego lahko dosežemo z uporabo poroznega agregata, kot so naprimer določene vrste lahkega agregata. Pore lahkega agregata lahko predstavljajo rezervoar vode, dosegljiv za notranjo nego betona. Takšna notranja nega lahko občutno vpliva na stopnjo in obseg širitve vode.» Dandanes je notranja nega betona v praksi široko zastopana, saj se je izkazala kot zelo učinkovita.

4.1 Uporaba lahkega agregata pri notranji negi betona

Lahki agregat ima absorpcijo vode med 5% in 25% v časovnem obdobju 24 ur. Namočen lahki agregat zmešamo skupaj z ostalimi sestavinami betona visoke trdnosti. V procesu hidratacije se voda iz por lahkega agregata porablja in s tem zmanjšuje avtogeno krčenje, vendar naj bi to imelo minimalni vpliv na tlačno trdnost.

Razumno razlago, kako lahki agregat zmanjša ali izključi avtogeno krčenje, sta podala Weber in Reinhardt (1997). Med hidratacijo se v cementni pasti formira sistem por, ki so manjše od por v lahkem agregatu. Ko se vlažnost zmanjša zaradi hidratacije in sušenja, nastane vlažnostni gradient. Ker se v cementni pasti lahki agregat obnaša kot vodni rezervoar, cementne pore absorbirajo vodo iz lahkega agregata s pomočjo kapilarnega srka. Cement, ki še ni reagiral z vodo, ima sedaj na voljo več proste vode za hidratacijo. Na površini se pojavi dodatni vlažnostni gradient zaradi površinskega izhlapevanja. Torej se voda iz lahkega agregata blizu površine porablja hitreje in ustvarja sloj blizu površine, beton se tam zgosti v krajšem času. To zmanjšuje količino vode, ki bi normalno izparela, in izboljšuje notranjo nego betona. Kot rezultat dobimo zmanjšane ali izničene napetosti zaradi sušenja ter manj površinskih razpok. Slika 2 nam prikazuje delovanje lahkega agregata in notranje nege v stičnem območju med cementno pasto in agregatom. Opazimo, da je transport vode pri lahkem agregatu zaradi notranjih rezervoarjev vode daljši kot pri običajnem agregatu. Na običajnem agregatu se v primeru navlaževanja na površini izpostavi t. i. »vodni zid«, ki se hitro porabi in ne omogoča daljše transportne cone. V primeru lahkega agregata pa se voda srka iz por agregata, torej je na voljo večja količina vode, kot rezultat pa je transportna cona vode daljša in ima zato večji vplivni radij.



Slika 2: Vpliv lahkega agregata pri procesu notranje nege (ESCSI, 2006)

Uporaba lahkega agregata vpliva na reologijo in tudi možnost drobljenja lahkega agregata pri svežem betonu. Pri mehanični obdelavi sestavin se lahko lahki agregat zdrobi in predhodno izpusti vodo, ki je namenjena za notranjo nego, kar seveda pomeni lažjo obdelavo svežega betona, vendar se s tem izniči vpliv notranje nege. Priporočeno je, da se lahki agregat namoči vsaj 24 ur pred uporabo, saj to preprečuje segregacijo delcev agregata med uporabo. V mešanico pa ni priporočljivo dodajanje suhega lahkega agregata, saj lahko ti delci absorbirajo vodo iz mešanice in povzročijo gostejšo mešanico že pred končno obdelavo (RILEM TC 196-ICC, 2007).

Del cementne paste pa lahko prodre v lahki agregat in povzroči močno vez med lahkim agregatom in matrico cementne paste, lahko pa tudi zapre pore lahkega agregata z porabo vode, ki je bila namenjena za notranjo nego. To lahko povzroči manjšo učinkovitost notranje nege.

Ko se beton strdi, pa se pokažejo razlike med navadnim betonom ter notranje negovanim betonom na več področjih, kot so mikrostruktura, trdnost, modul elastičnosti, lezenje, prepustnost, požarna odpornost, odpornost na zmrzal... Eksperimentalno (Shattaf, Alshamasi, Swamy, 2001) je dokazano, da je poroznost notranje negovanega betona 30% do 50% poroznosti zunanje negovanega betona. Voda v lahkem agregatu omogoča kontinuirano hidratacijo, kar pomeni nastanek gostejše porne strukture. Hidratiziran del zavzame več prostornine kot nehidratiziran cement in posledica tega je manjša totalna poroznost betona.

Na tlačno trdnost betona vpliva lahki agregat, ki je šibek člen v matrici betona, in učinek notranje nege. Do sedaj je bilo v eksperimentih dokazano, da se z konstantno količino vode v betonu in povečano količino vode notranje nege povečuje tlačna trdnost tudi do 14%. V betonu so ostale prazne samo pore lahkega agregata, kar pomeni, da se je voda za notranjo nego popolnoma izkoristila. Torej je kljub dodajanju lahkega agregata v beton, ki z mehanskega vidika predstavlja šibki člen v betonu in negativno vpliva na tlačno trdnost betona, vpliv notranje nege in povečane hidratacije tako velik, da zasenči šibkost lahkega agregata in poveča tlačno trdnost betona.

4.2 Lahki agregat

Pri izbiri lahkega agregata moramo biti pozorni na njegovo poroznost, velikost zrn in tudi odpornost na obrabo.

Poroznost in količina lahkega agregata sta si obratno sorazmerna – večja poroznost, manj potrebne lahkega agregata. Uporablja se agregat z absorpcijo vode med 5% in 25%. Ko izberemo določeno vrsto lahkega agregata, moramo določiti potrebno količino le-tega, ki je odvisna od vode, ki jo agregat sprejme. Obstajata dva načina za izračun potrebne količine vode za notranjo nego:

- a) totalno vodovezivno razmerje se poveča, kar pomeni, da je na koncu v betonu več vode, kot predpisuje vodovezivno razmerje,
- b) totalno vodovezivno razmerje je konstantno, vendar se efektivno razmerje zmanjša, kar pomeni, da je na koncu v betonu enaka količina vode, kot jo predpisuje vodovezivno razmerje.

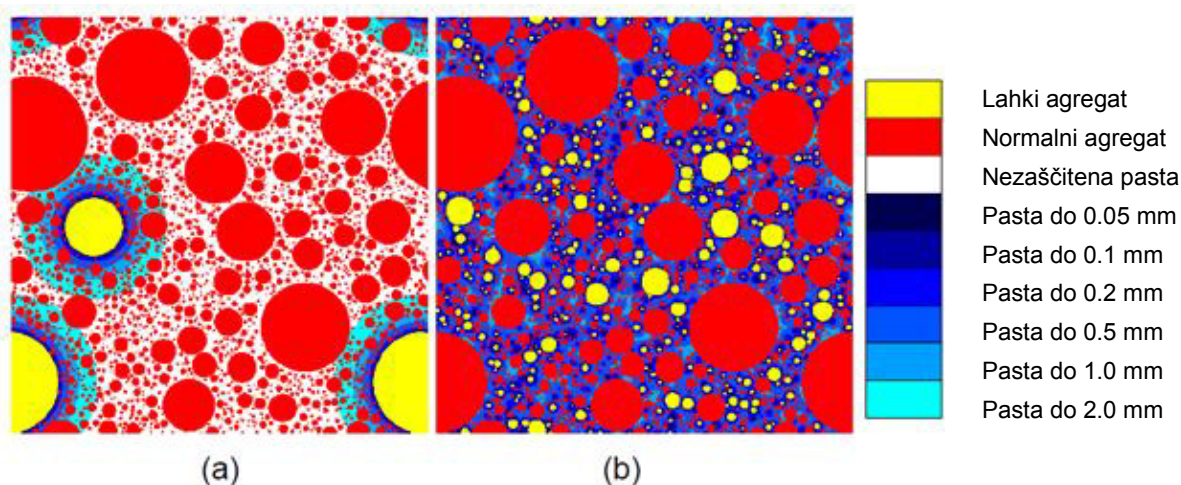
V primeru, da je totalno vodovezivno razmerje konstantno, Cusson in Hoogeveen (2008) za izračun potrebne količine vode za notranjo nego priporočata naslednji izraz

$$\left(\frac{w}{c}\right)_{ic} = 0.18 \cdot \left(\frac{w}{c}\right) \quad \text{za } w/c \leq 0.36, \quad (4.1)$$

pri čemer je $\left(\frac{w}{c}\right)_{ic}$ masno razmerje vode za notranjo nego in cementa, $\left(\frac{w}{c}\right)$ pa je masno razmerje med totalno vodo in cementom. Uporaba slednjega načina za izračun vode za notranjo nego in izdelava betonske mešanice je enostavnejša, saj potrebujemo le podatek o absorpciji vode lahkega agregata in lahko lahki agregat kar namočimo v količino vode, potrebno za betonsko mešanico, za 24 ur. Pri prvem načinu pa moramo v betonsko mešanico dodati zasičeno vlažen, zunanje suh lahki agregat, kar je v večjih količinah težko doseči.

Potrebno je določiti tudi velikost zrn lahkega agregata. Večja zrna lahko v sebi zadržijo večjo količino vode, vendar imajo manjša zrna več prednosti. Imajo večjo absorpcijo vode glede na svojo maso, so tudi bolj odporna na obrabo, torej se v mešalcu ne zdrobijo. Pri betonu visoke trdnosti je z uporabo manjših zrn manj možnosti, da bodo ta zrna na območju odpovedi prereza, če pa imamo v betonu večja šibkejša zrna, pa se lahko zmanjša tlačna trdnost sistema. Torej z zamenjavo manjših zrn normalnega agregata z manjšimi zrn lahkega agregata zmanjšamo efekt šibkega člena, saj manjša zrna lahkega agregata manj vplivajo na tlačno trdnost betona kot večja zrna.

Prednost pri finih zrnih lahkega agregata je tudi razporejenost delcev v betonu. Kot vidimo na sliki 3, je fini lahki agregat bolje razporejen okoli cementne paste kot grobi agregat. Posledično ima notranja nega z uporabo finega lahkega agregata večji učinek, saj je bolj enakomerno razdeljen in omogoča boljše razporeditev vode za notranjo nego, ker so zrna bolj skupaj in se vplivni radiji notranje nege bolj prekrivajo. Proste »nezaščiten« paste je torej malo oziroma skoraj nič.



Slika 3: Prikaz zaščite cementne paste v podobnih mešanicah, vendar je pri (a) uporabljen grobi lahki agregat, pri (b) pa fini lahki agregat (Henkensiefken, 2008)

4.3 Ekonomičnost notranje nege z lahkim agregatom

Notranja nega betona z lahkim agregatom podraži beton, vendar pa so kratkoročne in dolgoročne prednosti tako izrazite, da se zlahka kompenzirajo z začetno investicijo.

Confederation Bridge v Kanadi je eden izmed največjih prefabriciranih naknadno napetih mostov na svetu, v dolžino meri 13km. Z odpravo avtogenega krčenja (1/300 000 000), bi privarčevali za 3.9m mostu. Tekoči meter mostu je stal okoli 40 000 dolarjev, torej bi z uporabo notranje nege za odpravo avtogenega krčenja privarčevali okoli 150 000 dolarjev. To pa je že cena, vredna premisleka uporabe notranje nege z lahkim agregatom, saj s tem tudi pridobimo na odpornosti (Aitcin, 2008).

Uporaba betonov, ki so notranje negovani, se pokaže kot najbolj smotrna pri linijskih objektih. Z zadosti velikim deležem lahkega agregata pa lahko vplivamo tudi na manjšo gostoto betona, posledično je cela konstrukcija lažja in pri tem njena trdnost in odpornost ne trpita. V svetu so znani primeri uporabe notranje nege, kot na primer Wellington stadion na Novi Zelandiji, FIFA World Cup Pavilion v Nemčiji, Iroise Bridge v Franciji... V Sloveniji še ni znan primer uporabe notranje nege pri betonu visoke trdnosti.

5 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE VPLIVA NOTRANJE NEGE NA TLAČNO TRDNOST BETONA VISOKE TRDNOSTI

Za izdelavo gradbenih konstrukcij se betoni visoke trdnosti uporabljajo že nekaj desetletij, vendar pa so višek dosegli šele pred nekaj leti. Če primerjamo betone običajne trdnosti z betoni visoke trdnosti, opazimo, da pri slednjih njihove lastnosti še niso tako dobro raziskane, čeprav se je v zadnjih letih na tem področju zgodil obsežen premik. Vpliv notranjih rezervoarjev na tlačno trdnost betona visoke trdnosti je bolj malo raziskan, zato smo se odločili, da bomo v okviru diplomske naloge izvedli eksperimentalne raziskave v tej smeri in s tem malce zapolnili to vrzel na tem področju.

5.1 Zasnova eksperimentalnih raziskav

Za izvedbo eksperimentalnih raziskav je bilo potrebno določiti sestavo betona visoke trdnosti. Uporabili smo mešanico HSC-1600 (Saje, 2001) in jo modificirali (dodali smo lahki agregat, predhodno namočen za 24 ur). Betonsko mešanico smo poimenovali HSC-1600-LWA-12%. Zaradi lažje priprave betonske mešanice smo se odločili za notranjo nego s konstantnim totalnim vodovezivnim razmerjem. Potrebno količino vode za notranjo nego smo izračunali po enačbi 4.1. Po opravljenih preiskavah lahkega agregata za količino absorbirane vode in ob znani količini potrebne vode za notranjo nego smo določili maso ter prostornino lahkega agregata, ki je potrebna. Nato smo lahki agregat namočili v znano količino vode sobne temperature za 24 ur. Pri mešanju betona smo lahki agregat v vodi dodali na koncu, skupaj še s potrebno količino vode, da zadostimo vodovezivnemu razmerju. Po zamešanju betona smo naredili nekaj osnovnih preiskav, kot je razlez, posed ter izmerili količino por. Beton smo vgradili v posebne jeklene kalupe kockaste oblike (mere 15/15/15cm), predhodno namazane z oljem. Po končani vgradnji in vibriranju smo kalupe pokrili s PE folijo, da preprečimo izhlapevanje. Naslednji dan smo kocke razkalupili ter jih potopili v vodo (zagotovili 100% vlažnost). Kocke smo nato porušili na elektromehaničnem preizkuševalnem stroju za statične tlačne preiskave, in sicer prvi, tretji, sedmi in osemindvajseti dan po zamešanju. Rezultate tlačne trdnosti smo primerjali z rezultati dr. Draga Sajeta (2001), ki je uporabil enako mešanico, samo brez dodanega lahkega agregata.

5.2 Uporabljeni materiali in receptura betona

Pri raziskavi smo uporabili sestavine betona, ki so napisane v nadaljevanju. Vse te sestavine smo dobili na slovenskem tržišču.

5.2.1 Agregat

Za izdelavo betonske mešanice smo uporabili tri različne agregate. Prvi agregat je iz separacije Kresnice, prane frakcije 0/2, 2/4, 4/8, 8/16 iz drobljenega apnenca. Drugi agregat je Mivka Termit iz Moravč. Tretji agregat pa je drobljeni lehnjak frakcije 0/2, pridobljen iz kamnoloma Jezersko. V naslednjih preglednicah podajamo lastnosti uporabljenih agregatov.

Preglednica 4: Lastnosti mivke Termit iz Moravč

Nahajališče	Moravče
Opis	<p>Mivka je značilne rjavkasto sive barve s posameznimi temnejšimi zrci. Mineraloško pregledan vzorec pod mikroskopom kaže kremenovo sestavo (> 99%). Oblika zrn je večinoma zaobljena do zaobljeno/ostroroba, v podrejeni količini nastopajo samo ostroroba zrna. Primerjava osi a, b in c (ocenjena dimenzija pod mikroskopom, glede na relief) v zrnih kaže, da imajo zrna visok volumski koeficient - dimenzije a, b in c so približno enako velike.</p> <p>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.</p>

Preglednica 5: Lastnosti agregata iz separacije Kresnice

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

Preglednica 6: Lastnosti agregata iz kamnoloma Jezersko

Nahajališče	Jezersko
Opis	Lehnjak je močno porozna in luknjičava kamnina svetlo rumenorjave barve. Tekstura je votličasta, nehomogena, spreminja se po barvi, razpokanosti, mehanskih lastnosti ter vsebnosti odlomkov drugih kamnin. Poroznost zrna je od 10% do 15%. Lehnjak je sestavljen iz mineralov kalcita (od 96% do 98%), dolomita in limonita. V primerjavi z drugimi kamninami ima slabše mehanske lastnosti, večinoma se uporablja za okrasne predmete.

5.2.2 Cement

Uporabili smo samo eno vrsto cementa in sicer iz cementarne v Anhovem. Cementu z oznako CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R (Blaine = 355 m²/kg) je dodana granulirana plavžna žindra z vsebnostjo do 15%. Ta cement veže pospešeno (tlačne trdnosti hitreje naraščajo), saj ima oznako R (rapid). V naslednjih dveh preglednicah je podana kemijska sestava in fizikalno-kemijske ter mehanske lastnosti cementa.

Preglednica 7: Mineralna sestava cementnega klinkerja

Vrsta cementa	Vrsta cementnega klinkerja	Minerali klinkerja			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R	Običajni klinker	64%	15%	9%	9%

Preglednica 8: Kemijska sestava ter fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementa
CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R

KEMIJSKA SESTAVA CEMENTA		
<i>hidravlično vezivo</i>		
	SiO ₂	20.36%
	Al ₂ O ₃	4.47%
	Fe ₂ O ₃	2.79%
	CaO	60.81%
<i>primesi</i>		
	netopni ostanek	0.63%
	žaroizguba	4.35%
	Na ₂ O	0.37%
	MgO	2.26%
	K ₂ O	0.70%
	SO ₃	2.72%
	Cl ⁻	0.04%
FIZIKALNO-KEMIJSKE IN MEHANSKE LASTNOSTI CEMENTA		
<i>finost mletja</i>	ostanek na situ odprtine 90 µm	0.15%
	specifična površina	4300 cm ² /g
<i>prostorninska masa</i>		3.08 g/cm
<i>vezanje</i>	poraba vode za standardno konsistenco	28.20%
	pričetek	200 min
	konec	230 min
<i>prostorninska obstojnost</i>	(Le Chatelier)	0.1 mm
<i>upogibna trdnost</i>	pri starosti 2 dni	5.1 MPa
	pri starosti 28 dni	8.2 MPa
<i>tlačna trdnost</i>	pri starosti 2 dni	28.2 MPa
	pri starosti 28 dni	54.1 MPa

5.2.3 Mineralni dodatki

Za potrebe doseganja višje tlačne trdnosti smo cementni mešanici dodajali mineralni dodatek mikrosilika, ki je bila v suhem stanju (preglednica 9 in 10). Za doseganje primerne vgradljivosti zaradi nizkega vodovezivnega razmerja smo dodajali tudi superplastifikator. Antikorodin je suha mešanica superplastifikatorja (sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzat) in mikrosilike. Ta dodatek je produkt kemične tovarne TKK Srpenica v Sloveniji.

Preglednica 9: Osnovne lastnosti uporabljenega Antikorodina

Vrsta dodatka	Gostota pri 20°C (g/cm ³)	Delež suhe snovi pri 105°C
<i>Antikorodin</i>	2.40	100.0

Preglednica 10: Kemijska sestava in fizikalno-kemijske lastnosti mikrosilike

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

5.2.4 Sestava preiskovanega betona

Betonska mešanica je bila načrtovana za posed z oznako S4, kar pomeni posed v mejah med 160 in 200 mm (z odstopanjem ± 30 mm). Pričakovali smo, da uporaba lahkega agregata za notranjo nego ne bo imela vpliva na vgradljivost. V preglednici 11 je prikazana sestava preiskovanih betonov, katere smo uporabljali za potrebe raziskav, slika 4 prikazuje izgled betonske mešanice v laboratoriju, slika 5 pa beton, vgrajen v kalupe.

Preglednica 11: Sestava preiskovanih betonskih mešanic

Oznaka mešanice	HSC-1600	HSC-1600-LWA-12%
Vrsta agregata	Kresnice	Kresnice, Jezersko
Fini agregat 0/4 [kg/m ³]	1138	911
Fini LWA 0/2 [kg/m ³]	0	121
Grobi agregat 4/16 [kg/m ³]	758	758
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400	400
Količina mikrosilike [% veziva]	10	10
Vodovezivno razmerje	0,36	0,36
Superplastifikator	sulfonirani naftalen - formaldehid kondenzat	sulfonirani naftalen - formaldehid kondenzat
Količina superplastifikatorja [% veziva]	2,05	2,05
Vsebnost por	1,6	1,6
Prostorninska masa betona [kg/m ³]	2450	2342
Posed [mm]	150	150
f _{cm, 28 dni} [MPa]	81,4	89,1



Slika 4: Izgled betonske mešanice HSC-1600-LWA-12%



Slika 5: Sveži preskušanci HSC-1600-LWA-12%, vgrajeni v kalupe

5.3 Merjenje tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti

Enoosno tlačno trdnost različno starih betonov smo merili na betonskih kockah z robom 15 cm s pomočjo elektromehaničnega preizkuševalnega stroja za statične tlačne preiskave s silo do 5000 kN. Tlačno trdnost betona smo merili pri starosti betona 1, 3, 7 in 28 dni. Vse preskušance smo razkalupili po 24 urah in smo jih do preizkusa hranili v vodi pri sobni temperaturi.

5.4 Rezultati in analiza tlačne trdnosti notranje negovanega betona visoke trdnosti

Potrebno je bilo analizirati časovni potek enoosne tlačne trdnosti 12 preskušancev pri različni starosti betona. Kocke z robom 15 cm so bile stare od 1 pa do 28 dni. Vrednosti tlačne trdnosti betona z uporabo notranjih rezervoarjev vode smo primerjali z vrednostmi tlačnih trdnosti izvirne mešanice betona. V nadaljevanju smo za tlačno trdnost betona v diagramih uporabili povprečne vrednosti tlačne trdnosti. V naslednji preglednici 12 so zapisani rezultati tlačnih trdnosti vseh preskušancev, njihovo povprečje ter pripadajoče standardne deviacije.

Preglednica 12: Tlačne trdnosti posameznih preskušancev pri različnih starostih

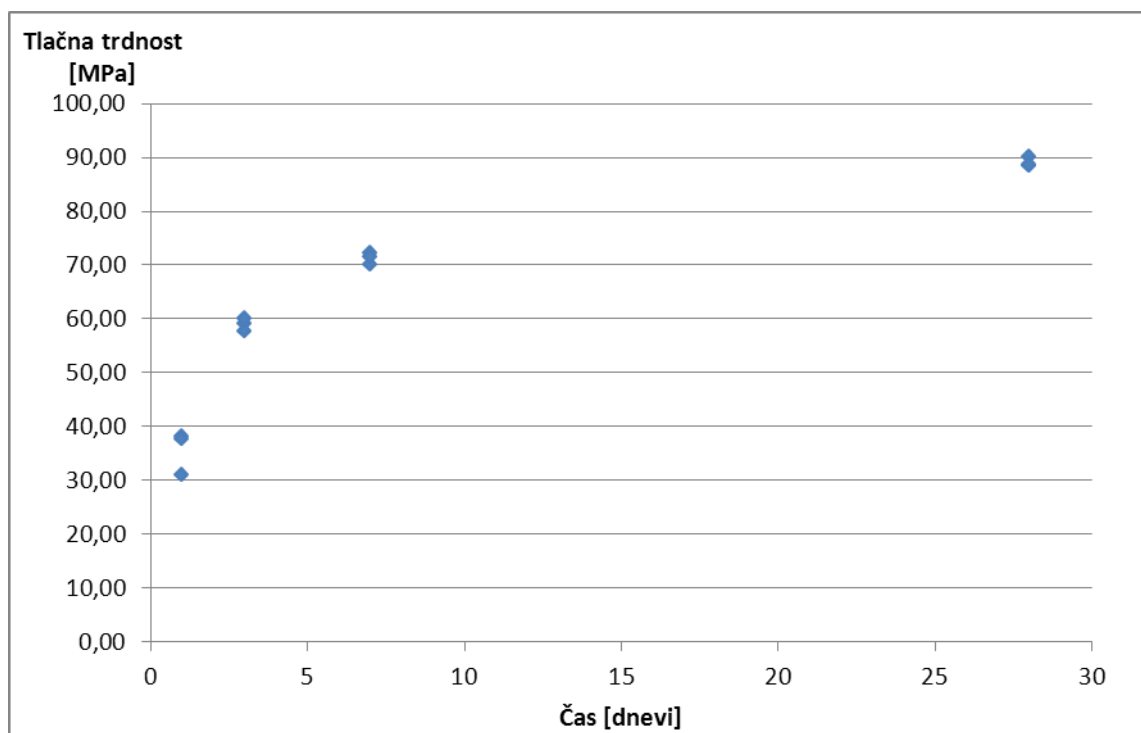
HSC-1600-LWA-12%							
Starost [dni]	Preskušavec	Masa [kg]	Mejna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]	Povp. tlačna trdnost [MPa]	Standard. deviacija	
1	TT1	8.24	700	31.11	35.7	3.25	
	TT2	8.14	860	38.22			
	TT3	8.22	850	37.78			
3	TT4	8.20	1330	59.11	59.0	0.91	
	TT5	8.19	1300	57.78			
	TT6	8.12	1350	60.00			
7	TT7	8.27	1625	72.22	71.3	0.93	
	TT8	8.16	1575	70.00			
	TT9	8.26	1610	71.56			
28	TT10	8.19	1990	88.44	89.1	0.79	
	TT11	8.15	2030	90.22			
	TT12	8.10	1995	88.67			

Opazimo, da se vrednosti tlačnih trdnosti betonov pri starosti 1 dan med seboj najbolj razlikujejo. Takrat je pridobivanje betona na tlačni trdnosti najintenzivnejše in se pozna vsakršni zamik preiskave tlačne trdnosti. V tem primeru je bilo zamika za 1 uro. Opazimo pa tudi, da so rezultati tlačnih trdnosti pri ostalih dnevih zelo podobni (imajo majhno standardno deviacijo). To nam tudi pove, da so bili vsi preskušanci reprezentativni, da ni bilo nobenih večjih odstopanj pri vgradnji, negi ali ostalih delih. Slika 6 prikazuje porušen preskušavec.

Slika 7 nam prikazuje časovni potek tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12%, in sicer rezultate tlačne trdnosti vsakega preskušanca ob različni starosti.

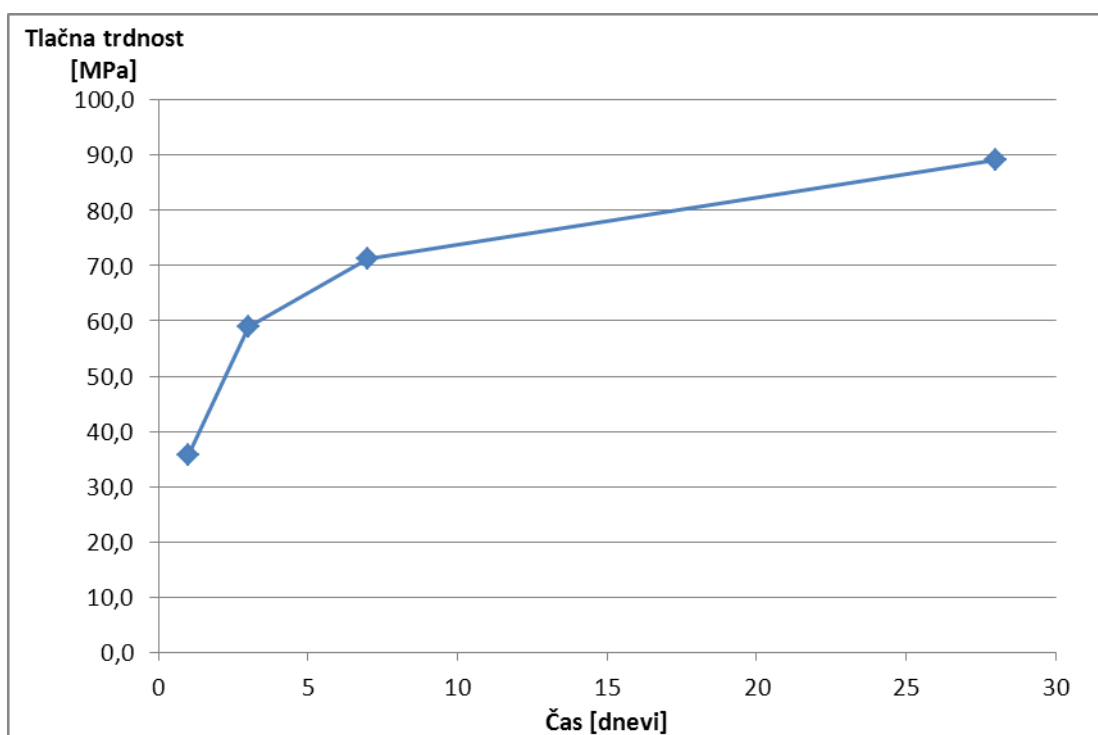


Slika 6: Porušen preskušavec HSC-1600-LWA-12% pri starosti 1 dan



Slika 7: Vrednosti tlačne trdnosti vseh preskušancev ob različnih dnevih

Če vzamemo povprečne vrednosti tlačne trdnosti za vsak dan, dobimo časovni razvoj tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12%, kot je prikazan na naslednji sliki.



Slika 8: Časovni razvoj tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12%

Opazimo značilen časovni razvoj tlačne trdnosti betonov visoke trdnosti. Na začetku deluje zelo buren proces hidratacije, kar se izkazuje s hitrim začetnim naraščanjem tlačne trdnosti. Z večjo starostjo betona se hitrost pridobivanja tlačne trdnosti zmanjšuje. Če bi opazovali preskušance na daljši časovni rok, bi opazili, da tlačna trdnost počasi, vendar vztrajno narašča.

5.5 Primerjava tlačnih trdnosti z betonom brez notranjih rezervoarjev vode

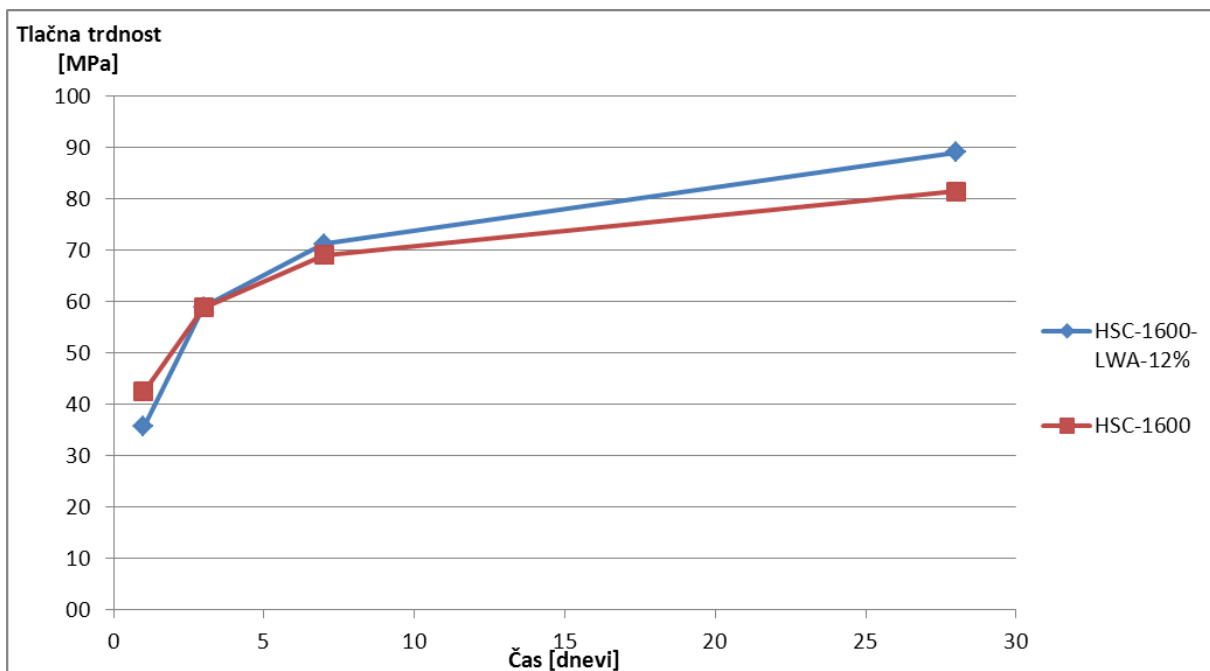
Rezultate tlačne trdnosti preiskovanega betona HSC-1600-LWA-12% smo primerjali z rezultati tlačnih trdnosti betona HSC-1600. Razlika med tema dvema mešanicama je dejansko samo v dodanem lahkem agregatu, saj smo del agregata iz Kresnic zamenjali z lehnjakom iz Jezerskega. Ta agregat smo predhodno namočili v znano količino vode sobne temperature za 24 ur. Pri zamešanju betona pa smo na koncu v mešalec dodali lahki agregat v vodi in še potrebno količino vode, da zadostimo vodovezivnemu razmerju. V preglednici 13 so za dve različni mešanici in za štiri različne starosti podane povprečne vrednosti tlačnih trdnosti, ki so bile izmerjene na določenem številu preskušancev in njihove pripadajoče standardne deviacije.

Preglednica 13: Povprečne tlačne trdnosti betonov v MPa pri različni starosti, vključno s podanim številom preskušancev in pripadajočo standardno deviacijo

Mešanica	Starost betona			
	Povprečna tlačna trdnost betona v MPa			
	Število preskušancev			
	Standardna deviacija v MPa			
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
HSC-1600-LWA-12%	35.7	59.0	71.3	89.1
	3	3	3	3
	3.25	0.91	0.93	0.79
HSC-1600	42.5	58.8	69.1	81.4
	9	9	7	13
	2.92	2.03	2.85	3.09

Slika 9 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600. Opazimo, da ima beton z lahkim agregatom na začetku manjšo trdnost, ki po 28 dneh doseže večjo trdnost. Torej je pri betonu z notranjo nego pridobivanje tlačne trdnosti od prvega dne počasnejše, nato vidimo, da je naklon pri HSC-1600-LWA-12% strmejši (hitreje pridobiva na tlačni trdnosti). HSC-1600-LWA-12% doseže isto tlačno trdnost kot HSC-1600

že tretji dan. Hitrost pridobivanja na tlačni trdnosti ostaja višja in pri 7 ter 28 dnevu je tlačna trdnost betona z notranjimi rezervoarji vode že znatno povišana.

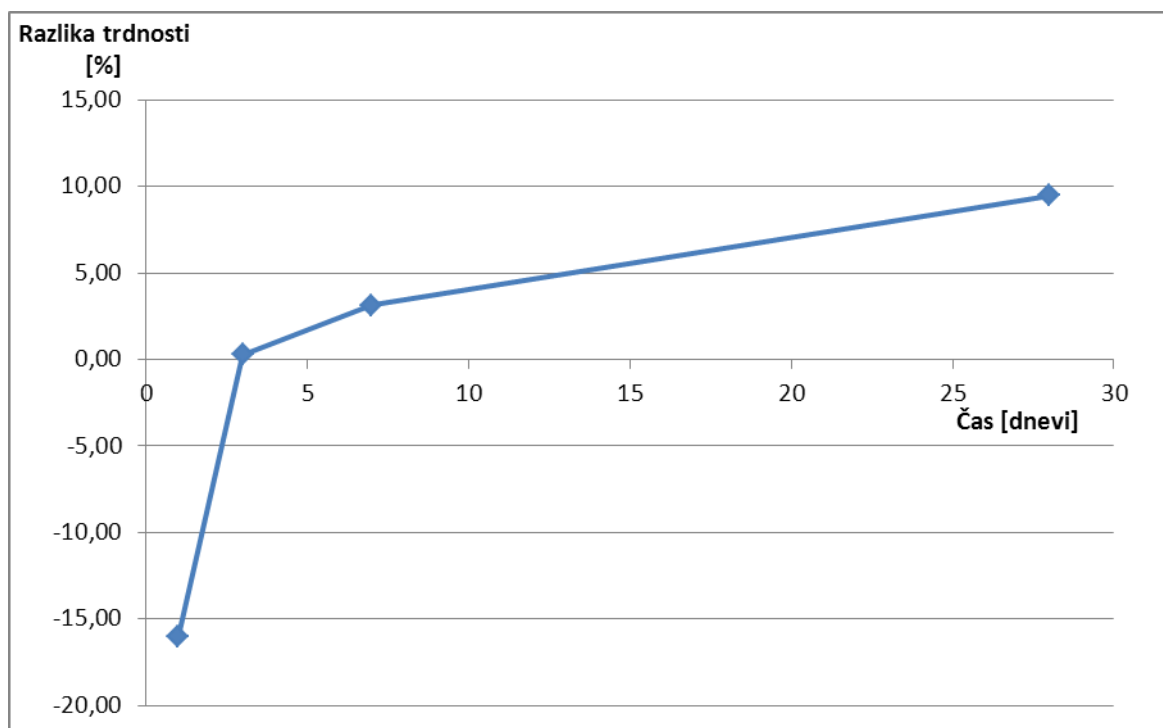


Slika 9: Časovni razvoj tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Tlačne trdnosti HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600 in njuno razliko prikazuje preglednica 14. Rezultati so za lažjo predstavbo grafično prikazani na sliki 10, ki prikazuje časovni razvoj razlike tlačne trdnosti betona HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600.

Preglednica 14: Razlika tlačnih trdnosti med HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Starost [dnevi]	Mešanica		Razlika [%]
	Povprečna tlačna trdnost betona		
	HSC-1600-LWA-12%	HSC-1600	
1	35.70	42.5	-16.0
3	58.96	58.8	0.3
7	71.26	69.1	3.1
28	89.11	81.4	9.5



Slika 10: Časovni potek razlike tlačnih trdnosti med HSC-1600-LWA-12% in HSC-1600

Opazimo, da je na začetku tlačna trdnost notranje negovanega betona kar za 16% manjša od HSC-1600. Predvidevamo, da je vzrok začetne manjše tlačne trdnosti v šibkem lahkem agregatu. Na začetku, ko notranja nega še ne pride do izraza, saj se še porablja voda iz betonske mešanice, je lahki agregat šibki člen. Z vnosom lahkega agregata v mešanico smo prerez oslabili, saj so zrna lahkega agregata dosti manj odporna. Oslabitev tlačne trdnosti na začetku bi bila še večja pri vnosu večjih frakcij lahkega agregata. Vendar se kasneje, ko pride do vpliva notranje nege pri procesu hidratacije, tlačna trdnost skokovito poviša. Pri starosti 3 dni imata beton približno enako tlačno trdnost. Pri 28 dneh pa ima beton z notranjo nego kar za 9.5% tlačne trdnosti več. Torej je uporaba notranjih rezervoarjev vode pozitivno vplivala na tlačno trdnost betona, kljub vnosu šibkejšega lahkega agregata.

6 ZAKLJUČKI

Želja po tehnološkem napredku in prikazovanju moči gradbeno stroko žene k vedno bolj impozantnim projektom, ki zahtevajo vedno bolj tehnološko zahtevne materiale. Eden izmed glavnih materialov v gradbeništvu je beton. Zaradi razvoja novih materialov, načinov priprave in receptur se je zgornja meja tlačne trdnosti betona močno povišala. V preteklosti je 35 MPa tlačne trdnosti betona veljala že za visoko trden beton, dandanes pa smo zaradi konstrukcijskih potreb primorani graditi z betonom visoke trdnosti, višje od 55 MPa.

Beton visoke trdnosti se, v primerjavi z betonom običajne trdnosti, poleg tlačne trdnosti razlikuje tudi v drugih lastnostih. Beton visoke trdnosti ima nižje vodovezivno razmerje, manjšo vodoprepustnost, povečano zmrzlinško odpornost, drugačno zrnastostno sestavo agregata... Zaradi višje tlačne trdnosti je možna uporaba manjših prečnih prereзов konstrukcije, kar ima za posledico lažjo in lahko tudi cenejšo konstrukcijo.

Začetno naraščanje tlačne trdnosti betona visoke trdnosti je bolj intenzivno kot pri običajnem betonu. To lahko pomeni tudi hitrejše razopaževanje in posledično hitrejšo gradnjo.

Zaradi nižjega vodovezivnega razmerja ima beton tudi negativne lastnosti, kot sta težje vgrajevanje in večje avtogeno krčenje. Težje vgrajevanje rešujemo z dodajanjem raznih superplastifikatorjev, ki nam omogočajo lažjo vgradnjo. Avtogeno krčenje pa lahko delno omilimo z zunanjo nego. Zaradi večje vodoneprepustnosti pa je potrebno beton negovati tudi v notranjosti.

Primer notranje nege je dodajanje lahkega agregata, predhodno namočenega v vodi. Ta lahek agregat je v betonu nekakšen rezervoar vode, iz katerega se med procesom hidratacije le-ta črpa. Zaradi tega se v betonu zmanjšajo notranje sile ter posledično avtogeno krčenje, saj je pri procesu hidratacije lažje črpati vodo iz večjih por v lahkem agregatu. Druga dobra lastnost notranje nege je večji delež hidratiziranih delcev. Predhodno namočeno zrno lahkega agregata zaradi velike absorpcije nosi veliko količino vode. Ker so ti delci v betonu dobro razporejeni, s svojo nasičenostjo omogočajo transport vode nehidratiziranim delcem, saj imajo velik vplivni radij. V beton je ugodneje dodati manjša zrna lahkega agregata zaradi boljše razporeditve zrn v matrici, večje relativne absorpcije vode in zaradi mehanizma šibkega člana. Če v beton dodamo večja zrna lahkega agregata, potem obstaja večja možnost poružitve zaradi šibkosti teh zrn.

Določili smo mešanico betona z dodanim namočenim lahkim agregatom in primerjali časovni razvoj tlačne trdnosti z betonsko mešanico brez lahkega agregata. Opazili smo, da je na začetku tlačna trdnost notranje negovanega betona nižja od tlačne trdnosti betona brez notranje nege. To smo pripisali lahkemu agregatu - šibkemu členu v betonu. Pri 28 dni starem notranje negovanem betonu pa je tlačna trdnost naraščala in bila višja od notranje negovanega primerjalnega betona za kar 9.5%. Torej notranja nega ne le zmanjša ali izniči avtogeno krčenje, kar je njen osnovni namen, temveč se lahko, zaradi večjega deleža hidratiziranega cementa, tlačna trdnost betona celo poveča.

Potrebno pa je opozoriti, da notranja nega betona ne nadomešča tradicionalne zunanje nege. Notranja nega le izboljšuje negovanje, še posebej pri betonih visoke trdnosti, ki so bolj vodoneprepustni, saj voda od zunaj ne prodre globoko v notranjost betonskega elementa.

Notranja nega lahko omili ekstremne zunanje razmere, vendar je beton še vedno potrebno zunanje negovati.

V nadaljnjih raziskavah bo potrebno še ugotoviti, kateri lahki agregat, katera frakcija oziroma kolikšen delež lahkega agregata je potrebno uporabiti, da se krčenje betona čim bolj zmanjša, pri tem pa se njegove mehanske lastnosti ne poslabšajo.

VIRI

Aïtcin, P.-C. 1989. From gigapascals to nanometers. V: Proceedings. Engineering Foundation Conference on Advances in Cement Manufacture and Use. s.l., The Engineering Foundation: p. 105-130.

Aïtcin, P.-C. 1998. High-performance concrete. London: 591 str.

Aïtcin, P.-C. 2008. Internal Curing, 3rd International Symposium Non-traditional Cement & Concrete, Brno: p. 1-7.

American Society of Testing Materials. 2006. Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. West Conshohocken: loč. pag.

Aroni, S., Polivka, M. 1967. Effect of expanded shale aggregate on properties of expansive-cement concrete. V: Proceedings. RILEM Symposium On Testing and Design Methods of Lightweight Aggregate Concretes, Budimpešta: loč. pag.

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

Comité Euro-International du Béton. 1993. CEB-FIP MODEL CODE 1990. Design Code. Thomas Telford: loč. pag.

Cusson, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked lightweight aggregate sand for prevention of autogenous shrinkage cracking. Ottawa, National Research Council Canada: 32 p.

Dilger, W.H., Niitani, K., Wang, C. 1997. A creep and shrinkage prediction model for high performance concrete. V: Proceedings of International Conference on Engineering Materials. Ottawa: p. 615-630.

Expanded Shale, Clay & Slate Institute. 2006. Internal Curing Using Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate. Publication 4362, Salt Lake City: 3 p.

Han, N. 1996. Time dependent behaviour of high strength concrete. Delft, Delft University Press: 317 p.

Henkensiefken, R., 2008. Internal curing in cementitious systems made using saturated lightweight aggregate. Master of Science Thesis. Purdue University: 170 p.

Hočevar, A. 2007. Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Hočevar): 75 p.

Hoff, G. C. 2006. Internal Curing of Concrete Using Lightweight Aggregates. SP234-39, 234: p. 621-640.

Poročilo o preiskavi kamnine iz kamnoloma Ušenišče. 17.04.1997. Ljubljana, izdajatelj: IGMAT: loč. pag.

- Jelušič, M. 2009. Tlačna trdnost vlaknastih betonov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Jelušič): 77 str.
- Lura, P. 2003. Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete. Ph.D. thesis. Delft, Technical University of Delft, Faculty of Civil Engineering and Earth Sciences: 180 p.
- Karakteristike lehnjak. 2011. Hotavlje, izdajatelj: Marmor Hotavlje: str. 1.
- Neville, A., Aitcin, P.-C. 1998. High performance concrete - an overview. *Materials and Structures* 31: p. 111-117.
- Parrott, L. J. 1988. A literature review of high strength concrete properties. British Cement Association: loč. pag.
- Regourd, M. 1985. Microstructure of high strength cement paste systems. *Very High-Strength Cement-Based Materials*, Materials Research Society. V: Proceedings 42: p. 3-17.
- Regourd, M., Mortureux, B., Aitcin, P.-C., Pintsonneault, P. 1983. Microstructure of field concretes containing silica fume. V: Proceedings, 4th International Symposium on Cement Microscopy, Nevada, USA: p. 249-260.
- RILEM TC 196-ICC. 2007. Internal Curing of Concrete. State of the Art Report: loč. pag.
- Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 157 str.
- Saje, D., Bandelj, B., Lopatič, J., Saje, F. 2008. Notranja nega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev, Bled, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 245-252.
- Sarkar, S.L., Aitcin, P.-C. 1987. Comparative study of the microstructures of normal and very high-strength concretes. *Cement, Concrete and Aggregates* 9, 2: p. 57-64.
- Shattaf, N. R., Alshamasi, A.H., Swamy, R. N. 2001. Curing/environment effect on pore structures of blended cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 13, 5: p. 380-388.
- SIST EN 206-1:2003. Beton - 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 72 str.
- Tehnične karakteristike mikrokremenica/mikrosilika TKK. 1997. Srpenica, izdajatelj: TKK Srpenica: loč. pag.
- Weber, S., Reinhardt, H.W. 1997. A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing. *Advanced cement based materials* 6, 2: p. 59-68.
- Zajec, M. 2012. Krčenje s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Zajec): 77 str.
- Zaletel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zaletel): 100 str.

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