

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2, p.p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat

MAŠA KUŠAR

**MEHANSKE LASTNOSTI
LAHKOVGRADLJIVEGA IN
SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV**

Diplomska naloga št.: **451\SOG**

**MECHANICAL PROPERTIES OF HIGHLY
FLOWABLE AND SELF-COMPACTING
CONCRETE MIXTURES**

Graduation thesis No.: **451\SOG**

Mentor:
izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Predsednik komisije:
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Maša Kušar izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »MEHANSKE LASTNOSTI LAHKOVGRADLJIVEGA IN SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV«.

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

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

Ljubljana, 5.2.2012

Maša Kušar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 69:625.821.5(043.2)

Avtor: Maša Kušar

Mentor: izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Naslov: Mehanske lastnosti lahkogradljivega in samozgoščevalnih betonov

Obseg in oprema: 66 str., 15 pregl., 37 sl., 6 en.

Ključne besede: samozgoščevalni beton, lahkogradljivi beton, sovisnosti med napetostmi in deformacijami, tlačna trdnost betona, natezna trdnost betona, elastični modul betona

Izvleček:

Namen opravljenih raziskav v okviru diplomske naloge je bil določiti karakteristike svežega betona in mehanske lastnosti strjenega betona ene lahkogradljive in dveh samozgoščevalnih betonskih mešanic. Samozgoščevalni mešanici sta bili pripravljene iz dveh vrst agregatov, z drobljenim agregatom in z naravnim separiranim prodom, ter z dodanim deležem apnenčeve moke. Lahkovgradljiva mešanica je bila pripravljena z drobljenim agregatom in je vsebovala elektrofilitrski pepel, ki je zamenjal del cementa v vezivu. Vse tri mešanice so bile pripravljene z dodanim istim superplastifikatorjem. Karakteristike sveže lahkogradljive mešanice smo preverili z metodo razleza s posedom, Samozgoščevalne lastnosti svežih betonov pa smo ocenili s preiskavami razleza s posedom in z L-zabojem. V strjenem stanju smo na betonskih preskušancih starosti 7 in 28 dni opravili preiskave tlačne, upogibne in cepilne natezne trdnosti, sovisnosti med napetostmi in deformacijami pri enoosni tlačni obremenitvi ter določili statični modul elastičnosti. Iz dobljenih rezultatov preiskav smo ocenjevali vpliv vključitve različnih vrst agregata in različnih vrst dodanih praškastih delcev na karakteristike svežih in strjenih betonov.

BIBLIOGRAPHY AND DOCUMENTARY PAGE WITH EXTRACT

UDC: 69:625.821.5(043.2)

Author: Maša Kušar

Mentor: Violeta Bokan Bosiljkov, PhD, Associate Professor

Title: Mechanical properties of highly flowable concrete and self-compacting concretes

Volume and equipment: 66 p., 15 tab., 37 fig., 6 eq.

Key words: self-compacting concrete, highly flowable concrete, interaction between stress and strain, compressive strenght of concrete, tensile strenght of concrete, modulus of elasticity of concrete

Abstract:

The purpose of the research in the diploma work was to determine the characteristics of fresh concrete and mechanical properties of hardened concrete for one highly flowable and two self-compacting concrete mixtures. Self-compacting concrete mixtures were prepared from two types of aggregates, chruused aggregate and natural river gravel, both with added limestone powder. Highly flowable mixture was prepared with chruused aggregate and with fly ash, which replaced part of the cement in binder. All three mixtures were prepared by adding same type of superplasticizer. Characteristics of fresh highly flowable mixture were tested by slump-flow test. Properties of fresh self-compacting mixtures were evaluated by slump-flow test and L-box test. Compressive and tensile tests were carried out on hardened concrete specimens of age 7 and 28 days. We also evaluated the stress-strain relationship at uniaxial compression and modulus of elasticity. From the tests results we evaluated the influence of different types of aggregates and different types of added powder particles on the properties of fresh and hardened concrete.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentoriciizr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov. Zahvala velja tudi somentorju g. Franciju Čeponu.

Izredna zahvala gre moji družini in fantu za vso podporo, pomoč in razumevanje skozi vsa leta študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	SAMOZGOŠČEVALNI IN LAHKOVGRADLJIVI BETONI	3
2.1	RAZLOGI ZA NJIHOV RAZVOJ	3
2.1.1	Izboljšano delovno okolje in varnost pri delu	4
2.1.2	Izboljšana produktivnost	4
2.1.3	Izboljšane reološke lastnosti	4
3	MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZGOŠČEVALNEGA IN LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA	6
3.1	AGREGAT	7
3.2	VODA	9
3.3	CEMENT	10
3.4	PRAŠKASTI MATERIALI	15
3.5	KEMIJSKI DODATKI	17
4	LASTNOSTI SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA IN LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA	23
4.1	LASTNOSTI SVEŽE MEŠANICE	23
4.1.1	Obdelavnost samozgoščevalnega betona	23
4.1.2	Sposobnost samoodzračevanja	26
4.2	METODE PREVERJANJ SVEŽE BETONSKE MEŠANICE	27
4.2.1	Posed z razlezom	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Preiskava z V-lijakom	29
4.2.3	Preiskava z L-zabojem	29
4.2.4	Določanje vsebnosti zraka v svežem beton	30
4.2.5	Kontrola kvalitete samozgoščevalnega betona na terenu	31
4.3	LASTNOSTI OTRDELEGA SAMOZGOŠČEVALNEGA IN LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA	32
4.3.1	Trdnost	32
4.3.2	Trajnost in obstojnost	33
4.3.3	Krčenje in lezenje	33
4.4	METODE PREVERJANJ OTRDELEGA BETONA	34
4.4.1	Tlačna trdnost	35
4.4.2	Natezna trdnost	36
4.4.3	Statični modul elastičnosti	39
5	LASTNE PREISKAVE	42

5.1	UPORABLJENI MATERIALI	42
5.1.1	Agregat	42
5.1.2	Cement	43
5.1.3	Praškasti materiali.....	44
5.1.4	Voda	44
5.1.5	Kemijski dodatki.....	44
5.2	SESTAVA BETONSKIH MEŠANIC.....	44
5.2.1	Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S1	44
5.2.2	Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S2.....	45
5.2.3	Sestava lahkovgradljive betonske mešanice L.....	46
5.3	NEGA BETONSKIH PREIZKUŠANCEV	46
5.4	PREISKAVE NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH.....	47
5.4.1	Metoda razleza s posedom	47
5.5	PREISKAVE NA OTRDELEM BETONU	49
5.5.1	Tlačna trdnost	49
5.5.2	Natezna trdnost.....	51
5.5.3	Statični elastični modul.....	54
6	SKLEP	62

KAZALO SLIK:

Slika 1:	Polnjenje samozgoščevalnega betona v opaž od spodaj (levo) in od zgoraj (desno)	5
Slika 2:	Shematski prikaz v količinah materialov pri običajnem-zgoraj in samozgoščevalnem-spodaj betonu (Vir: Mehta, Monteiro, 2006).....	6
Slika 3:	Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008.....	8
Slika 4:	Diagram razvoja trdnosti posameznega minerala cementnega klinkerja (Vir: Muravljov, 1991)	11
Slika 5:	Faze hidratacije cementnega kamna (Vir: Žarnić, 2005)	12
Slika 6:	Uporaba kemijskih dodatkov glede na vrsto (Vir: Kodelja, 2009).....	18
Slika 7:	Mehanizem uvedbe zračnih mehurčkov v cementno pasto z aerantom; to je anionska površinsko aktivna snov z nepolarno ogljikovodikovo verigo (Vir: Mehta, Monteiro, 2006).....	19
Slika 8:	Hidrofilen cementni delec (Vir: Mehta, Monteiro 2006).....	19
Slika 9:	Shematični prikaz nastanka kosmičev cementnih delcev pred dodatkom vodozmanjševalne mešanice ter po dodatku (Vir: Mehta, Monteiro, 2006).....	19
Slika 10:	Delovanje polikarboksilne strukture (Vir: Sika Slovenija).....	20
Slika 11:	Delovanje naftalenskih in melaminskih molekul (Vir: Sika Slovenija).....	21
Slika 12:	Shematični prikaz delovanja SP nove generacije: a) molekule SP nove generacije; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Petan, 2002)	21
Slika 13:	Mehanizem blokiranja sveže betonske mešanice (Vir: Duh, 2008)	25
Slika 14:	Primer razslojevanja betonske mešanice (Vir: Muravljov, 1991)	26
Slika 15:	Posed z razlezom (Vir: Bokan-Bosiljkov, 2012).....	28
Slika 16:	Na levi strani so prikazane dimenzije V-lijaka za preiskavo; na desni strani vidimo dejansko izvajanje metode z V-lijakom (Vir: http://theconstructor.org).....	29
Slika 17:	Dimenzije L-zaboja (vir: http://www.cege.ucl.ac.uk)	30
Slika 18:	Manometer (Vir: SIST EN 12350-7:2001)	31
Slika 19:	Kontinuirna metoda (Vir: http://www.fhwa.dot.gov/bridge/scc.htm).....	32
Slika 20:	Primer modificirane metode tlačne trdnosti za prizmo (Vir: Nevil, 1976).....	35
Slika 21:	Tlačna preša z ralunalniškim zajemanjem podatkov (Vir: Duh, 2008)	36
Slika 22:	Shematski prikaz cepljenja kocke oz. prizme (Vir: Žarnić, Bosiljkov, Bokan Bosiljkov, 2010/2011).....	38
Slika 23:	Položaj podpor in valja za vnos sile pri upogibnem preskusu (vir: SIST EN 12390-5:2009)	39

Slika 24:	Grafični prikaz stabiliziranja preskušanca s cikličnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem (Vir: Muravljov, 1991).....	40
Slika 25:	Določanje statičnega modula elastičnosti (Vir: Žarnić, idr., 2010/2011).....	41
Slika 26:	Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona (Vir: Žarnić, 2005)	47
Slika 27:	Iz leve proti desni si sledijo slike, ki prikazujejo potek razleza betonske mešanice med preiskavo razleza s posedom	48
Slika 28:	Časovno razvijanje tlačne trdnosti na betonskih preskušancih starosti 7 in 28 dni	50
Slika 29:	Povprečna upogibna natezna trdnost betonov starih 7 in 28 dni	51
Slika 30:	Povprečna razcepna natezna trdnost betonov starih 7 in 28 dni	53
Slika 31:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami dobljene na 7 dni starih betonskih preskušancih.....	55
Slika 32:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami dobljene na 28 dni starih betonskih preskušancih.....	55
Slika 33:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 7 dni dobljene na valjih	56
Slika 34:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 7 dni dobljene na prizmah	57
Slika 35:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 28 dni dobljene na valjih za različne betonske mešanice	58
Slika 36:	Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 28 dni dobljene na prizmah za različne betonske mešanice.....	58
Slika 37:	Elastični modul betona na vzorcih prizem in valjev; a) starosti 7, b) 28 dni	60

KAZALO PREGLEDNIC:

Preglednica 1:	Mejne vrednosti kemijskih lastnosti.....	9
Preglednica 2:	Klinker minerali v portland cementu in njihove lastnosti (Cerovšek, 2003)	10
Preglednica 3:	Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 (Birk, 2010)	13
Preglednica 4:	Trdnostni razredi cementov po standardu SIST EN 197-1 (Birk, 2010).....	15
Preglednica 5:	Zrnavostna sestava naravnega separiranega proda za beton S1	42
Preglednica 6:	Zrnavostna sestava drobljenega apnenčevega agregata (Laže) za betona S2 in L	43
Preglednica 7:	Lastnosti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R po standardu SIST EN 197-1 in primerjava z doseženimi povprečnimi vrednostmi (internetna stran Salonita Anhovo)	43
Preglednica 8:	Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S1.....	45
Preglednica 9:	Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S2.....	45
Preglednica 10:	Sestava betonske mešanice L	46
Preglednica 11:	Rezultati betonskih mešanic S1 in S2 pri metodi razleza s posedom.....	48
Preglednica 12:	Rezultati preiskave razleza s posedom za mešanico L	49
Preglednica 13:	Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti valjev in prizem doseženih pri starosti 7 in 28 dni	49
Preglednica 14:	Vrednosti nateznih trdnosti posameznih mešanic pri betonskih preskušancih starosti 28 dni.....	53
Preglednica 15:	Statični elastični modul 28 dni starega betona	59

1 UVOD

V gradbeništvu se pojavlja vedno večja potreba po grajenju bolj nosilnih in obstojnih AB konstrukcij z gostejšim armiranjem. Rešitev gradbeniki vidijo v uporabi visokotrdnega betona, ki bo v svežem stanju dovolj tekoč in obdelaven za vgradnjo v močno armirane betonske elemente, hkrati pa bo v strjenem stanju dosegal dobre mehanske lastnosti. Vendar pa se nam tu pojavi problem, saj imajo praviloma bolj tekoče mešanice slabše mehanske karakteristike strjenega betona. Z začetkom uporabe superplastifikatorjev nove generacije in povečanim deležem praškastih delcev sta se betonskim mešanicam zagotovila potrebna sposobnost tečenja in kasnejše dobre mehanske lastnosti strjenega betona. Lahko rečemo, da je prihod superplastifikatorja omogočil razvoj samozgoščevalnega in lahkovgradljivega betona.

Reološke lastnosti sveže mešanice so odvisne od mnogih parametrov: od vhodnih materialov, ki jih uporabimo za pripravo betona, njihove kvalitete, količine, načina in časa mešanja betonske mešanice, temperature betonske mešanice, temperature zraka ipd. Če so naštetih elementi čim bolj optimalni, bomo pripravili kvalitetno betonsko mešanico, ki bo homogena, njena notranja struktura stabilna in bo v strjenem stanju izkazovala dobre mehanske ter fizikalne karakteristike.

Lastnosti svežih betonskih mešanic samozgoščevalnega betona preverjamo z različnimi preskusnimi metodami, ki jih najdemo na primer v navodilih evropskega združenja EFNARC, v RILEM-ovih navodilih, od leta 2010 pa tudi kot slovenske standarde, ki so del skupine SIST EN 12350 (deli od 8 do 12). Ti postopki so namenjeni predvsem preverjanju ključnih lastnosti samozgoščevalnih mešanic (sposobnost tečenja, sposobnost prehajanja, sposobnost zapolnjevanja), saj le z zagotovitvijo ustreznih lastnosti sveže mešanice strjen beton dosega mehanske in trajnostne karakteristike, ki bodo enake ali boljše od tistih, ki jih doseže primerljiv vibriran beton z istim v/c razmerjem.

Pomemben vpliv na mehanske lastnosti strjenega betona imajo tudi dodani praškasti delci. Betoni, ki imajo v svoji sestavi apnenčevo moko ali druge fine delce (elektrofiltrski pepel), lahko dosegajo višje zgodnje trdnosti, saj fini delci pospešijo hidratacijo cementnega klinkerja oz. klinkerskih mineralov. Poleg tega pa izboljšajo tudi spakiranost praškastih delcev v betonski mešanici, katere rezultat je večja stabilnost sveže betonske mešanice, izboljšana obdelavnost in povečana gostota hidratizirane paste ter izboljšana stična območja med hidratizirano pasto in večjimi zrnji agregata. Betoni z vključenim večjim deležem praškastih materialov imajo v primerjavi z betoni brez večje količine finih delcev (z enakim vodo-cementnim razmerjem in enako vrsto portland cementa) izboljšane trdnostne karakteristike.

V Sloveniji so preiskave mehanskih lastnosti strjenega betona tako pri samozgoščevalnih kot pri vibriranih betonih z večjim deležem apnenčeve moke šele na začetku. Razloga za to sta dva. Mladost in premajhna raziskanost samozgoščevalnega betona na eni strani ter uveljavitev standarda SIST EN 206-1, s katerim je dovoljeno vključevanje apnenčeve moke (dodatkov tipa I) v beton, leta 2003.

2 SAMOZGOŠČEVALNI IN LAHKOVGRADLJIVI BETONI

Samozgoščevalne in lahkovgradljive betone uvrščamo med t.i. specialne betone. Zaradi njihovih posebnih reoloških lastnosti v svežem stanju se razlikujejo od običajnih betonov. Po vrsti sestavin se sicer ne razlikujejo od običajnih betonov. Vsi imajo enake vhodne materiale (agregat, cement, drugi praškasti delci/mineralni dodatki, voda, kemijski dodatki), vendar s to razliko, da je za doseganje posebnih lastnosti specialnih betonov v njihovi sestavi večja količina praškastih delcev in dodatkov (superplastifikatorjev, dodatkov za kontrolo viskoznosti, ipd.).

Med samozgoščevalnim in lahkovgradljivim betonom obstaja bistvena razlika. Kljub podobnim reološkim lastnostim je lahkovgradljivi beton po vgradnji v opaž potrebno minimalno vibrirati. Nekatere reološke in mehanske lastnosti so sicer primerljive z lastnostmi samozgoščevalnih betonov, vendar lahkovgradljivi beton ni zmožen popolnoma zapolniti opaža ter doseči homogeno in zgoščeno strukturo samo zaradi delovanja lastne teže

2.1 RAZLOGI ZA NJIHOV RAZVOJ

Današnji trendi v gradbeništvu stremijo k uporabi vedno bolj nosilnih armiranih betonov. Vendar pa je v praksi temu trendu težko zadostiti. Izdelava gosto armiranega betona zahteva čim bolj tekočo svežo betonsko mešanico z dobrimi mehanskimi lastnostmi v strjenem stanju. Tekoče mešanice pa imajo v strjenem stanju po pravilu slabše mehanske karakteristike, zaradi večjega vodocementnega razmerja. Razvoj in prihod novih superplastifikatorjev je omogočil tehnologijo izdelave betonskih mešanic, ki so zadostile potrebam gradbeništva (Duh, 2008).

V 80-ih letih prejšnjega stoletja se je Japonska soočila s pomanjkanjem ustrezno kvalificirane delovne sile, ki bi bila sposobna graditi trajne betonske konstrukcije. Rešitev so videli v uporabi nove tehnologije samozgoščevalnega betona. Na Japonskem je za doseganje dobre sposobnosti tečenja betona tehnologija temeljila na uporabi superplastifikatorjev, z uporabo dodatkov za kontrolo viskoznosti pa so mešanici povečali plastično viskoznost, ki preprečuje segregacijo.

Po letu 1990 so samozgoščevalni beton začeli razvijati tudi v Evropi. Tu so znanstveniki k reševanju problema glede doseganja plastične viskoznosti pristopili nekoliko drugače. V mešanico so vključili večji delež finih praškastih delcev. Prednost nove generacije

superplastifikatorjev in nadaljnje razvijanje ter optimiranje zrnatih materialov so samozgoščevalnemu betonu izboljšali kvaliteto.

Prednosti samozgoščevalnega betona so vidne skozi celoten gradbeni proces od izdelave, vgrajevanja do kvalitete strjenega betona.

2.1.1 Izboljšano delovno okolje in varnost pri delu

Z izključitvijo mehanskega zgoščevanja betonske mešanice (z vibriranjem) se zmanjšajo vibracije in izpostavljenost hrupu. Rokovanje z mehansko opremo za vibriranje delavcu predstavlja veliko fizično obremenitev in povzroča motnje krvnega obtoka. Ne smemo pa zanemariti tudi hrupa, ki ga med delovanjem oddaja. Prav tako se zmanjša možnost poškodb v obliki padcev in spotikanj ob opremo oz. kable. Neuporaba vibratorjev pa pripomore tudi k večji produktivnosti, saj poveča hitrost betoniranja in nekoliko zmanjša stroške.

Uporaba kemijskih dodatkov, ki so vključeni v betonsko mešanico ima na okolje negativen učinek, vendar je ta zelo nizek. Nova generacija dodatkov, ki so bili razviti za uporabo v samozgoščevalnih mešanicah pa ima v primerjavi z drugimi vrstami dodatkov še nižji vpliv na okolje in zdravje delavcev. Vedno strožji okoljevarstveni predpisi lahko zaradi zgoraj naštetega samo pripomorejo k večji razširjenosti in uporabi specialnih betonov.

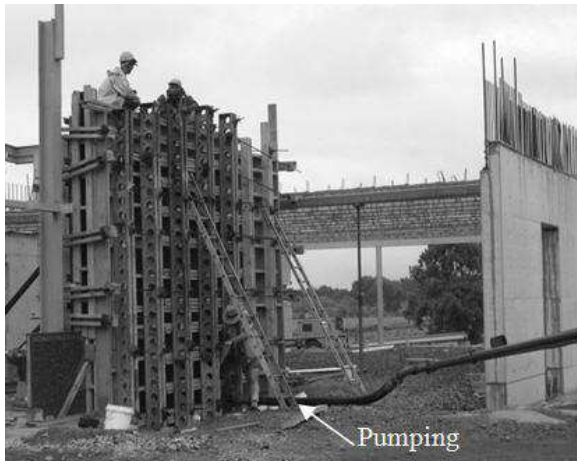
2.1.2 Izboljšana produktivnost

Že v prejšnjem odstavku je omenjeno, da z izključitvijo vibriranja pripomoremo k večji produktivnosti, saj se poveča hitrost gradnje. Hkrati se zmanjšajo tudi stroški celotne gradnje (mednje uvrščamo tudi tiste, ki bi nastali zaradi popravil opreme). Z izboljšano kvaliteto površine strjenega betona pa se zmanjšajo stroški vzdrževanja. Z zmanjšanjem stroškov gradnje in zaradi izboljšanja mehanskih karakteristik je lahko samozgoščevalni beton konkurenčen običajnemu betonu.

2.1.3 Izboljšane reološke lastnosti

Visoka obdelavnost, sposobnost zapolnjevanja in prehajanja so lastnosti zaradi katerih je vgradnja samozgoščevalnih mešanic v opaže enostavnejša. Omogočeno je npr. vgrajevanje betona ob dnu opaža s črpalko. Ta način je uporaben tudi pri sanaciji spodnje strani AB plošč in nosilcev, ki pogosto predstavljajo težko dostopna območja (Duh, 2008). Široko območje uporabe so si samozgoščevalni betoni pridobili v primerih težavnega dostopa do

elementov, ki se izdelujejo in kjer je onemogočena uporaba vibratorjev. Zaradi dobre stabilnosti je njego uporaba mogoča tudi pri vlivanju v visoke oz. globoke jaške brez segregacije, in izcejanja vode.



Slika 1: Polnjenje samozgoščevalnega betona v opaž od spodaj (levo) in od zgoraj (desno)

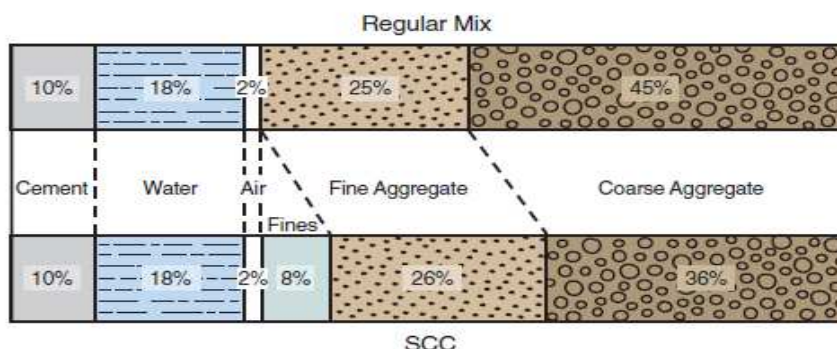
3 MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZGOŠČEVALNEGA IN LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA

Beton je keramični kompozitni material. Z mešanjem cementa, praškastih delcev, vode in različnih dodatkov, s katerimi se regulirajo lastnosti betona, nastane cementna pasta, ki se v procesu hidratacije in strjevanja spremeni v cementni kamen strjenega betona. Betonska struktura pa vsebuje tudi določeno število odprtih in zaprtih zračnih por, ki nastanejo med mešanjem in vgrajevanjem (Žarnić, 1999).

Za izdelavo samozgoščevalnega in lahkovgradljivega betona se uporabljajo enaki materiali, kot za izdelavo običajnega vibriranega betona. Bistvene razlike, ki se kasneje odražajo v karakteristikah sveže betonske mešanice in strjenega betona, so v potrebni količini posameznih materialov:

- Večja dodana količina finih praškastih delcev (cement in mineralni dodatki) velikosti manjše od 150 μm ,
- manjši delež grobozrnatega agregata, ki ima velikost maksimalnega zrna pod 20 mm; delež grobozrnatega nadomestimo z deležem drobozrnatega agregata,
- nujna vključitev kemijskih dodatkov v betonsko mešanico.

Samozgoščevalni beton je torej beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in lastne sposobnosti tečenja sposoben popolnoma zapolniti opaž poljubne oblike, tesno obliči armaturo in se odzračiti ter znivelirati, ne da bi prišlo do segregacije. Takšne lastnosti pa mu omogoča povečan delež paste zaradi vključitve večje količine finih delcev kot je prikazano na spodnji sliki in dodatek superplastifikatorja nove generacije (Duh, 2008).



Iz leve proti desni si sledijo: cement, voda, zrak, pri SCC praškasti delci, drobozrnati agregat in grobozrnati agregat.

Slika 2: Shematski prikaz v količinah materialov pri običajnem-zgoraj in samozgoščevalnem-spodaj betonu (Vir: Mehta, Monteiro, 2006)

3.1 AGREGAT

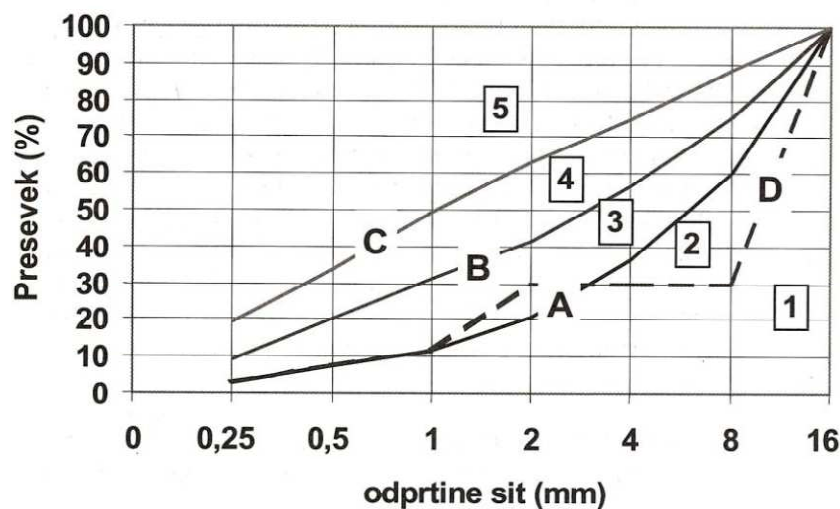
Mineralni agregat, ki predstavlja praviloma 75% delež prostornine betona, v največji meri vpliva na mehanske in tehnološke lastnosti sveže betonske mešanice ter tudi strjenega betona, zato sta njegov izbor in ustrezna zrnavostna sestava zelo pomembni. Agregat ima v betonu pomembno vlogo:

- znižuje ceno betona; v primerjavi z ostalimi vhodnimi materiali betona je razmeroma poceni,
- ustrezna zrnavostna sestava iz več frakcij ustvarja koheziven, homogen, obdelovalen beton,
- zmanjšuje krčenje betona; omejuje lahko krčenje cementne paste med hidratacijo, ker na večino agregatov voda ne deluje,
- znižujejo hidratacijsko temperaturo betona; običajno so kemično inertni in delujejo kot odvajalci toplote nastale s hidratacijo cementa,
- služijo za kontrolo gostote,
- zvišujejo požarno odpornost betona,
- ustvarjajo barvito betonsko površino s sposobnostjo odboja svetlobe,
- uravnavajo površinsko trdoto betona, zaradi večje odpornosti na obrus kot cementni kamen.

Poznamo dva načina pridobivanja mineralnega agregata. Lomljenec oziroma drobljenec, katerega pridobivamo z drobljenjem večjih kosov kamna, ima ostre robove ter pogosto zaradi notranjih razpok manj trdna zrna in gramoz oziroma prod, ki je aluvialnega izvora. Slednji ima oble robove in je raznolike sestave v odvisnosti od izvora rečnih nanosov. Na splošno pa lahko agregate definiramo kot inerten, trd in čist material. Mineralna sestava agregata določa njegove mehanske lastnosti, ki pa v veliki meri vplivajo tudi na mehanske lastnosti betona. Granitne in bazaltne agregate odlikuje visoka trdnost in obrabna odpornost, apnenčeve pa velika razširjenost in nizka cena. Na podlagi mineralne sestave lahko tako ekonomično izberemo in uporabimo najbolj ustrezen agregat potrebnih mehanskih lastnosti (Žarnić, 1999).

Za izdelavo samozgoščevalnega betona lahko uporabimo tako drobljenec kot gramoz ali kombinacijo obeh. Zaobljena oblika zrn proda omogočajo boljšo in lažjo vgradljivost in obdelavnost sveže betonske mešanice. Zrna drobljenega agregata so običajno nepravilnih oblik in se med vgrajevanjem medsebojno zaklinijo, kar rezultira v izboljšanju mehanskih karakteristik, še posebej v večji tlačni trdnosti tovrstnega betona (Cerovšek, 2003).

Agregat delimo na grobozrnat (zrna premera nad 4 mm) in drobnozrnat (zrna premera pod 4mm). Velikost maksimalnega zrna v vibriranem betonu (D_{max}) je odvisna od vrste in geometrije konstrukcije. V splošnem velja, da velikost maksimalnega zrna ne sme presežati 25% minimalne dimenzije prereza elementa in najmanjše horizontalne svetle razdalje med armaturnimi palicami zmanjšane za 5mm (Žarnić, 1999). Pri projektiranju samozgoščevalnega in lahkovgradljivega betona pa je priporočena velikost največjega zrna agregata 10 do 20mm (Cerovšek, 2003). Specifična lastnost, ki opredeljuje samozgoščevalni beton je sposobnost prehajanja skozi ozke predele med armaturnimi palicami ali med armaturo in opažem. Iz tega izhaja omejitev pri velikosti največjega zrna agregata, saj s tem onemogočimo blokiranje agregata na ovirah, ki jih predstavljajo gosto postavljene armaturne palice ali ozki predeli v opažih. Zaradi navedenih razlogov smo se v naših preiskavah omejili na agregat z največjim zrnem 16mm.



Slika 3: Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008

V procesu projektiranja sveže mešanice betona je ena najbolj občutljivih in pomembnih faz dela sestavljanje frakcij agregata. V skladu z zahtevami standarda SIST 1026:2008 preverjamo zrnastost sestavo agregata s sejanjem na laboratorijskih sitih. Standard podaja zrnastostno sestavo agregata v obliki mejnih krivulj, med katerimi naj potekajo krivulje obravnavanega agregata (Žarnić, 1999). Rezultat sejalne analize nam zagotavlja primernost materiala in ustrezno izbiro le-tega, če imamo na razpolago več različnih frakcij. Zrnastostna krivulja B_{16} (SIST 1026:2008) predstavlja optimalno izhodišče zrnastostne sestave agregata za samozgoščevalne betone, vendar z dodanim večjim deležem delcev pod 0,25 mm na račun grobozrnatega agregata (Cerovšek, 2003). S sestavljanjem zrnastostne sestave na bazi kombinacije večjega števila frakcij dobimo ustrezno in kvalitetno zrnastostno sestavo, ki nam zagotavlja doseganje določenih lastnosti strjenega betona (trdnost, trajnost, izgled

površine) in istočasno dobro vgradljivost, kohezivnost, odpornost na izločanje vode in obdelavnost sveže betonske mešanice (Muravljov, 1991).

Pri uporabi agregata v betonski mešanici je potrebno ugotoviti stopnjo količine vlage v agregatu, saj ta vpliva na spremembo vodocementnega razmerja (masnega razmerja med vodo in cementom) in prispeva k spremembi vgradljivosti betona. Povsem suh agregat najdemo na vrhu kupov v deponijah, skoraj nemogoče pa ga je najti drugje v naravi. Pri pripravi samozgoščevalnega in lahkovgradljivega betona moramo v obeh primerih upoštevati potrebo po dodatni vodi, če je agregat suh, ali zmanjšati količino dodane vode, če je agregat moker (Žarnić, 1999). Za samozgoščevalni beton je značilno, da je bistveno bolj občutljiv na spremembe v sestavi mešanice in na nihanja lastnosti izhodiščnih materialov kot vibriran beton. Že najmanjša odstopanja pri sestavi peska od zahtevanih vrednosti ter natančnosti pri preverjanju dejanske vlažnosti agregata povzročijo, da lastnosti sveže mešanice niso ustrezne.

3.2 VODA

Voda je obvezna komponenta vsake betonske mešanice, ker je hidratacija cementa mogoča samo zaradi njene prisotnosti. Zaradi dodajanja vode betonski mešanici je dosežena viskoznost, ki omogoča učinkovito vgrajevanje in obdelavnost betona.

Za pripravo betona je brez posebnega dokazovanja uporabna pitna voda iz vodovoda. Za ostale vire vode pa je potrebno dokazati ustrezno kvaliteto. Voda ne sme vsebovati sestavin, ki neugodno vplivajo na proces hidratacije, povzročajo korozijo armature v armiranem betonu ali ogrozijo kakovost in obstojnost strjenega betona. Pri uporabi vode drugih virov (površinske, industrijske, odpadne vode,...) moramo po standardu SIST EN 1008 z dodatnimi analizami kemijske sestave vode dokazati njeno primernost.

Preglednica 1: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti

LASTNOSTI VODE	ZAHTEVANE VREDNOSTI	
	ARMIRAN BETON	PREDNAPET BETON
pH vrednost	4,5 – 9,5	4,5 – 9,5
Vsebnost kloridov (Cl^-)	≤ 300 mg/l	≤ 100 mg/l
Vsebnost sulfatov (SO_4^{2-})	≤ 2700 mg/l	≤ 100 mg/l
Vsebnost sulfidov (S^{2-})	-	≤ 100 mg/l
Vsebnost nitratov (NO_3^-)	≤ 500 mg/l	≤ 500 mg/l
Vsebnost fosfatov (P_2O_5)	≤ 100 mg/l	≤ 100 mg/l

Pri proizvodnji samozgoščevalnega in lahkogradljivega betona je potrebna natančnost pri doziranju vode. Že manjša odstopanja pri doziranju pomenijo lahko izgubo lastnosti, ki odlikujejo samozgoščevalni beton (sposobnost tečenja, viskoznost, stabilnost strukture,...). Prevelika količina vode lahko povzroči segregacijo sveže betonske mešanice, ki je ne bo več moč črpati ali izliti iz betonske hruške. Zaradi premajhne količine zamesne vode pa se zmanjšuje sposobnost tečenja samozgoščevalnega betona (Duh, 2008).

3.3 CEMENT

Cement je hidravlično mineralno vezivo, ki se pridobiva z mletjem portland cementnega klinkerja. Cementnemu klinkerju se med mletjem dodaja tudi manjša količina sadre (do 5%), ki služi reguliranju časa vezenja cementa (Muravljov, 1991). Lahko se dodaja tudi druge materiale/mineralne dodatke (apnenec, pucolan, elektrofiltrski pepel, žindro, itd.), ki dajejo končne lastnosti različnim vrstam (Birk, 2010). Cementni klinker se melje na zrnca debeline 0,001 do 0,1mm. V odvisnosti od finosti mletja se njegova specifična površina po Blainu giblje med 2000–5000cm²/g.

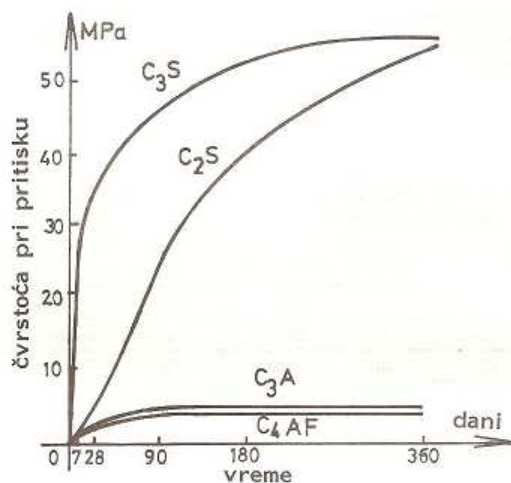
Osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja so:

- CaO – komponenta C (62 do 67%),
- SiO₂ – komponenta S (19 do 25%),
- Al₂O₃ – komponenta A (2 do 8%),
- Fe₂O₃ – komponenta F (1 do 5%),
- SO₃ – komponenta S' (3,5 do 4,5%),
- primesi (nevezan CaO do 2%, MgO do 5%) in
- alkalije (K₂O, Na₂O).

Minerali cementnega klinkerja so sestavljeni iz zgornjih komponent in njihove lastnosti v glavnem opredeljujejo tehnične karakteristike portland cementa. V preglednici so podani sestavni minerali portland cementa in njihove lastnosti:

Preglednica 2: Klinker minerali v portland cementu in njihove lastnosti (Vir: Cerovšek, 2003)

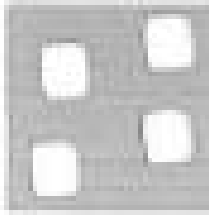
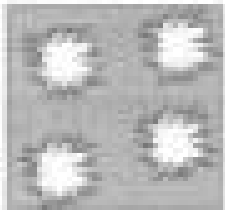
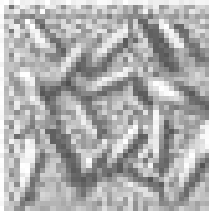
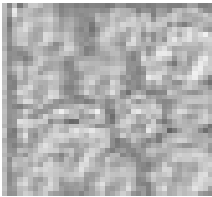
OZNAKA	IME	DELEŽ	LASTNOSTI
C ₃ S	Trikalcijev silikat – al it	45–60%	Najpomembnejši, pospešuje proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C ₂ S	Dikalcijski silikat – bel it	20–30%	Zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja
C ₃ A	Trikalcijev silikat – cel it	4–12%	Pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske toplote
C ₄ AF	Tetrakalcijev aluminat – zel it	10–20%	Zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo



Slika 4: Diagram razvoja trdnosti posameznega minerala cementnega klinkerja (Vir: Muravljov, 1991)

Proces hidratacije cementa

Pri mešanju portland cementa in vode nastane cementna pasta, ki tekom časa začne spreminjati svoje agregatno stanje in preide v trdo substanco imenovano cementni kamen. Vzrok spremembe agregatnega stanja je kompleksen fizikalno-kemijski proces, ki ga imenujemo hidratacija cementa. Med procesom hidratacije se cementna pasta veže in strjuje ter tako prehaja v novo obliko, ki ji pravimo cementni kamen. Cementna pasta mora obdati vsa zrna agregata in zapolniti tudi prostore med posameznimi zrnji. To bi se vedno moralo zgoditi, saj sta kakovost sveže betonske mešanice in strjenega betona v veliki meri odvisna od kakovosti cementne paste. Čas vezanja merimo od začetka mešanja cementa z vodo in do trenutka ko cementna pasta izgubi lastnost plastičnosti. Ta proces poteka razmeroma hitro, od 5 do 10 ur. Času vezanja sledi strjevanje oz. spreminjanje cementne paste v cementni kamen. To je dolgotrajen proces, ki lahko traja tudi nekaj let.

FAZA	HEMA	OPIS DOGAJANJA
1.		<p>Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut)</p> <p>Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% minerala C_3S, mineral C_3A pa se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C_4AF reagira podobno kot C_3A, delež reagiranega C_3S pa je zelo majhen.</p>
2.		<p>Indukcijsko obdobje-relativno mirovanje (traja nekaj ur)</p> <p>Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina:</p> <ul style="list-style-type: none"> • po teoriji zaščitne plasti se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju, zaradi česar se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane prepustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije, • po teoriji kristalizacijskih jeder, nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.
3.		<p>Obdobje pospešene hidratacije (tretja do dvanajste ure procesa)</p> <p>Nasičena raztopina z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrni. Hitrost hidratacije C_3S in C_2S narašča in doseže maksimalne vrednosti.</p>
4.		<p>Obdobje pojemajoče hidratacije (do konca hidratacije)</p> <p>Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel kot posledica hidratacije C_3S in C_2S. Na začetku nastali etringit reagira z nehidratiziranim C_3A in C_4AF in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.</p>

Slika 5: Faze hidratacije cementnega kamna (Vir: Žarnić, 2005)

Pomembno vlogo pri stopnji hidratacije ima masno razmerje med vodo in cementom (vodocementno razmerje v/c), saj ta določa doseženo stopnjo trdnosti betona. Dodati moramo toliko vode kot je potrebno, da je betonska mešanica plastična in obdelovalna, kar predstavlja približno 0,4g vode na 1g cementa (Mehta, Monteiro, 2006). V območju pri vrednosti vodocementnega razmerja med 0,38 in 0,42, t.i. optimalnem območju, naj bi hidratizirala celotna količina cementa, vendar se proces hidratizacije nikoli ne odvije 100%. Merjenja so pokazala, da hidratizira le od 80 do 90% cementa, kar pa bistveno ne vpliva na lastnosti cementnega kamna.

Na doseženo stopnjo hidratacije vplivajo tudi kemijski dodatki, fini delci cementa, praškasti delci ter temperatura materialov med samim mešanjem (Muravljov, 1991). Finejša zrna cementa popolneje in hitreje hidratizirajo in s tem omogočajo večjo stabilnost svežega betona. Istočasno pa povečujejo nevarnost nastanka razpok kar privede do krčenja cementne paste in hkrati se zaradi fino mletih zrn cementa poveča potrebna količina zamesne vode. Praškasti delci, ki so v večji meri kot pri običajnem betonu dodani samozgoščevalnemu betonu, pa lahko vplivajo na časovni razvoj mehanskih in fizikalnih lastnosti betona (Duh, 2003).

Vrste cementa

Tržišče nam ponuja različne vrste cementov, ki se razlikujejo po deležu in vrsti mineralnih dodatkov. To so mineralni, neorganski materiali, ki nadomestijo del portland cementnega klinkerja v procesu proizvodnje cementa. Standard SIST EN 197-1 razvršča cemente v pet glavnih vrst:

- CEM I portlandski cement,
- CEM II mešani portlandski cement,
- CEM III žlindrin cement,
- CEM IV pucolanski cement
- CEM V mešani cement.

Preglednica 3: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 (Birk, 2010)

VRSTA CEMENTA	OPIS	GLAVNE SESTAVINE IN NJIHOVE OZNAKE	DELEŽ MINERALNIH DODATKOV
CEM I	Čisti portlandski cement	klinker	0%

CEM II	Portlandski cement z mineralnimi dodatki	Klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V,W), žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A (S,P,Q,V,W,T,L) 6–20%
			II/B (S,P,Q,V,W,T,L) 21–35%
CEM III	Žlindrin cement	Klinker, granulirana plavžna žindra (S)	III/A (S) 36–65%
			III/B (S) 66–80%
			III/B 66–80%
			III/C (S) 81–95%
CEM IV	Pucolanski cement	Klinker, mikrosilika (D)- njen delež je lahko v cementu največ 10%, pucolan (P,Q)	IV/A (D,P,Q,V) 11–35%
		Elektrofiltrski pepel (V)	IV/B (D,P,Q,V) 36–55%
CEM V	Mešani cement	Klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofiltrski pepel (V)	V/A (S,P,Q,V) 36–60%
			V/B (S,P,Q,V) 61–80%

Mehanske zahteve

Izbor cementa je zelo pomemben pri projektiranju betonske mešanice za določeno konstrukcijo. Izbor se tako največkrat vrši na osnovi sledečih lastnosti:

- Trdnost (razred cementa); časovna sprememba trdnosti
- Hidratacijska toplota
- Kemijska odpornost

V običajni betonski gradnji se ne zahteva velikokrat posebno nizka hidratacijska toplota ali odpornost na kemikalije, zato se v večini primerov izbere najbolj pogosto uporabljan cement - portland cement ali portland cement z dodatki. V primeru, kjer se zahteva večja trdnost betona ($C \geq 35/45$) pa je potrebno betonski mešanici dodati cement večje trdnosti t.j. cement višjega razreda. Za gradnjo masivnih objektov in konstrukcij pa moramo uporabiti cement, ki razvije nižjo hidratacijsko toploto, zaradi velike akumulacije in razvijanja toplote znotraj konstrukcije. Torej, karakteristike in mehanske ter fizikalne lastnosti cementa in ostalih materialov zelo vplivajo na končno trdnost in trajnost betona.

SIST EN 197-1 je standard, ki cemente razvršča v tri razrede standardne trdnosti na podlagi dobljene tlačne trdnosti standardne cementne malte po 28-ih dneh. Zgodnja trdnost pa je tlačna trdnost po 2-eh ali 7-ih dneh. Vsak razred standardne trdnosti pa delimo na razred z običajno zgodnjo trdnostjo, ki je označen z N (normal) in razred z visoko zgodnjo trdnostjo, ki je označen z R (rapid).

V preglednici so podani trdnostni razredi cementov in pripadajoče zahteve.

Preglednica 4: Trdnostni razredi cementov po standardu SIST EN 197-1 (Birk, 2010)

TLAČNA TRDNOST (MPa)				
Oznaka trdnosti	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost	
	2 dni	7 dni	28 dni	
32,5N	–	≥16	≥32,5	≤52,5
32,5R	≥10			
42,5N	≥10		≥42,5	≤62,5
42,5R	≥20			
52,5N	≥20		≥52,5	–
52,5R	≥30			

3.4 PRAŠKASTI MATERIALI

Praškasti materiali so fini delci, po velikosti bodisi manjši ali malo večji od cementnih zrn. Delimo jih na inertne in reaktivne materiale. Inertni praškasti delci so zmleti polnilni materiali iz apnenca, dolomita, kremenca, odpadnega stekla ipd. Med reaktivne delce pa spadajo elektrofiltirski pepel, mikrosilika in mleta granulirana žindra. V Evropi se kot največje zrno za praškaste delce uporablja 0,075mm ali 0,125mm. Vendar se velikosti največjega zrna po državah razlikujejo zaradi različnih odprtih standardnih sit. Praškasti materiali se cementu dodajajo posebej ali pa so že sestavni del le-tega.

Ti delci imajo zaradi svoje majhnosti oz. finosti veliko specifično površino. Pri pripravi samozgoščevalne betonske mešanice moramo biti zato še posebej previdni pri dodajanju večje količine vode, saj moramo zagotoviti primerno vgradljivost betona. Dodana večja količina vode in praškasti delci skupaj s cementom povečujejo prostornino cementne paste. Pri tem obstaja nevarnost, da mešanica ne bo dovolj dobro obdelavna, vgradljiva in hkrati odporna na segregacijo. Mešanica mora imeti takšno viskoznost, da zadosti prej naštetim kriterijem. Pomembna je tudi oblika praškastih delcev. Okrogla oblika delcev je najbolj ugodna, saj je njihova skupna površina pri dani prostornini najmanjša in taka oblika zmanjšuje notranje trenje v pasti. Poleg že naštetega je za izdelavo samozgoščevalne mešanice potrebno zagotoviti dobro razpršenost praškastih delcev, ki je odvisna tudi od načina mešanja (vrstnega reda dodajanja sestavin) (Duh, 2008).

Fini delci v betonu povečajo obdelavnost, trdnost in trajnost. Delna zamenjava cementa s praškastimi delci pa se izkaže tudi za ekonomično, saj znižuje ceno betona.

Apnenčasta moka

Apnenčasto moko uvrščamo med inertna polnila. Pridobivamo jo z mletjem apnenca ali z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata, ki je dejansko odpadni material. Zato je interes za vključevanje apnenčaste moke v cement toliko večji. Vendar so preiskave karakteristik tovrstnih betonov v Sloveniji še relativno na začetku. Šele s sprejetjem standarda EN 206-1 (kot slovenskega standarda) leta 2003 je bila dovoljena uporaba cementov z večjo količino apnenčeve moke (Duh, 2008).

Apnenčeva moka zaradi večje vsebnosti kalcita pospešuje hidratacijo cementa. Kalcitni agregati ustvarijo močnejšo vez v primerjavi z drugimi vrstami kamenih agregatov in s tem vplivajo na porast mikrotrdote in gostote strjene cementne paste. Fini delci apnenčeve moke zapolnijo prostor med relativno večjimi zrnji cementa s čimer zmanjšajo prostor, ki bi ga sicer zapolnila zamesna voda. Tako zmanjšajo potrebo po vodi in povečajo stabilnost sveže mešanice. Dodani fini delci pa imajo vpliv tudi na trdnost in modul elastičnosti betona. Pri 5-ih odstotkih zamenjave cementa z apnenčevo moko se tlačna trdnost ni spremenila. Opažen pa je bil padec tlačnih trdnosti pri vezivu, ki je vsebovalo 25 odstotkov apnenčeve moke. Po drugi strani zamenjava ugodno vpliva na elastični modul, saj ga je, pri enaki trdnosti betona, dodatna količina finih delcev povečala (Kodelja, 2009).

Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel je možna sestavina cementa, ki se pridobiva z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjene z uprašenim premogom. V skladu z določili standarda SIST EN 197-1 v cementih ne smemo uporabljati pepela, ki je bil pridobljen na drug način kot sta navedena zgoraj. Po njegovi naravi ločimo elektrofiltrski pepel na kalcijski in silicijski (Cimperman, 2008).

Z zamenjavo dela cementa z elektrofiltrskim pepelom zmanjšujemo vpliv betona na okolje, saj je v betonu od vseh materialov ravno cement največji onesnaževalec (5% vseh emisij CO₂, ki jih povzroči človek, so posledica proizvodnje cementa). Pepel na več načinov izboljšuje lastnosti betona, tako strjenega kot sveže mešanice. Izboljša viskoznost (poveča pretočnost) med mešanjem in vgrajevanjem, poveča stabilnost sveži mešanici in poveča trdnost strjenega betona na dolgi rok. Ta skupek lastnosti betonskim konstrukcijam podaljšuje trajnost. Zaradi svojih pucolanskih lastnosti v betonski mešanici reagira s kalcijevim hidroksidom in tvori kalcijev silikat hidrat, ki je zaželen produkt pri hidrataciji cementa. Ta proces poveča trdnost betonu, zmanjšuje hidratacijsko toploto in krčenje

betona. Ugotovljeno je bilo, da pepel zmanjša delež por v betonu in njegovo prepustnost, posledično je beton bolj trajen in ima večjo trdnost.

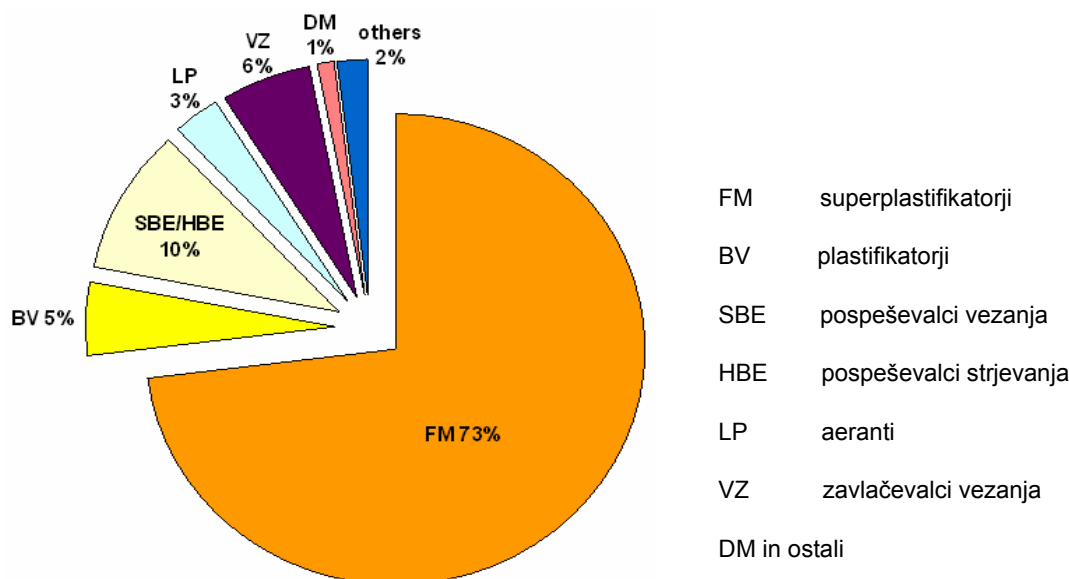
Samozgoščevalni beton dosega odlične lastnosti s pomočjo visoke vsebnosti cementa. Posledica tega so visoki stroški materiala, visok energetski odtis, vključno s povečanim lezenjem in krčenjem. Zamenjava znatne količine cementa s pepelom bi v prihodnosti rešila te težave.

3.5 KEMIJSKI DODATKI

Kemijski dodatki so materiali, ki s svojim delovanjem, bodisi fizikalnim, kemijskim ali kombinacijo obeh, vplivajo na določene lastnosti svežega ali strjenega betona. Delijo se na osnovne skupine:

- Plastifikatorji, ki povečajo plastičnost sveži betonski mešanici,
- superplastifikatorji; prav tako povečajo plastičnost sveži mešanici, vendar v večji meri kot plastifikatorji,
- pospeševalci vezanja; njihova naloga je pospeševanje hidratacije cementa,
- zaviralci vezanja, ki zavirajo hidratacijo cementa,
- aeranti; izboljšajo odpornost na zmrzovanje oz. tajanje,
- gostilci povečujejo vodotesnost betona,
- sredstva za kontrolo viskoznosti,
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah.

Deklariranje kemijskih dodatkov oz. njihovo razvrščanje po skupinah se vedno izvaja na osnovi glavne lastnosti dodatka. Nekateri dodatki lahko na beton vplivajo na dva ali več načinov. Vplivajo lahko na časovni potek vezanja in strjevanja cementne paste, zmanjšujejo potrebo po vodi, izboljšajo obdelavnost betona, pripomorejo k povečanju števila zračnih mehurčkov in s tem ustvarjajo zaprto poroznost, regulirajo pa tudi ostale lastnosti betona. Optimalni učinek tako dosežemo s pravim dodatkom, ki je najbolj kompatibilen z izbrano vrsto cementa in agregata. Dodatki so lahko v tekočem ali praškastem agregatnem stanju. Kemijske dodatke dodajamo betonu pred ali med mešanjem, njihovo doziranje se izvaja v majhnih količinah izraženo v odstotkih, ki se nanašajo na maso cementa v mešanici.



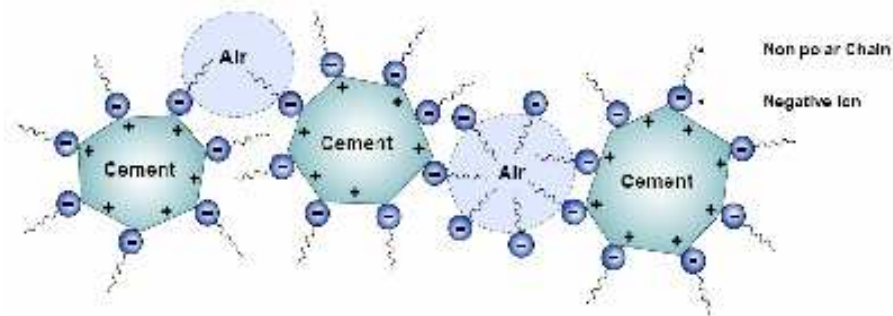
Slika 6: Uporaba kemijskih dodatkov glede na vrsto (Vir: Kodelja, 2009)

Aeranti

S pomočjo aerantov vnašamo v betonsko mešanico kontrolirano količino stabilnih zračnih mehurčkov velikosti od 25 do 250 μm . Zračni mehurčki pripomorejo k izboljšanju obdelavnosti betonske mešanice, ki jo lahko pripravimo z manjšo količino cementa/vode in agregata. Zato je pristop z uporabo aerantov še posebej primeren za pripravo velikih količin betona ter betona iz lahkih agregatov.

Zračni mehurčki zmanjšajo segregacijo in izcejanje vode ter povečajo obdelavnost in kohezivnost sveži mešanici, saj v mešanici delujejo kot mazivo. Vendar moramo pri doziranju ravnati previdno. Prevelika količina aeranta povzroči zamude pri hidrataciji cementa in zmanjšuje trdnost betona. Z uporabo ustreznega plastifikatorja ali superplastifikatorja zmanjšamo vodocementno razmerje in se tako izognemo izgubi trdnosti.

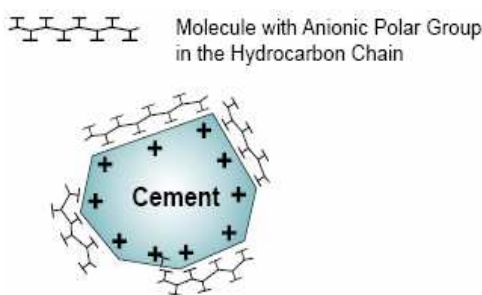
Mehanizem delovanja dodatka je predstavljen na sliki 6. " Med mešanjem aeranta in vode se polarne skupine aeranta orientirajo proti vodni fazi in s tem znižajo površinsko napetost, kar spodbuja nastajanje mehurčkov ter prepreči tendenco združevanja razpršenih mehurčkov. Na površini cement-voda se polarne skupine vežejo na cement, ob tem pa se nepolarne skupine orientirajo proti vodi. Tako postane površina cementa hidrofobna in omogoči zraku, da izpodrine vodo in ostane vezan na cement v obliki mehurčkov." (Kodelja, 2009)



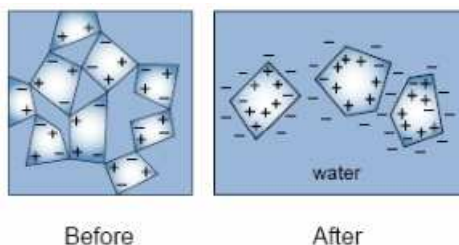
Slika 7: Mehanizem uvedbe zračnih mehurčkov v cementno pasto z aerantom; to je anionska površinsko aktivna snov z nepolarno ogljikovodikovo verigo (Vir: Mehta, Monteiro, 2006)

Plastifikatorji

Plastifikatorji, zaradi svoje kemijske strukture, povečujejo konsistenco sveži betonski mešanici. Z njihovo uporabo lahko znižamo v/c razmerje in s tem povečamo trdnost betona. Zaradi te vrste dodatka postanejo cementni delci hidrofobni (slika 7) in s tem je njihovo kosmičenje preprečeno. S kosmičenjem cementnih zrn pa ne bi dobili tako homogene mešanice, ki ima dobro dispergirani sistem, kot je razvidno s slike 8.



Slika 8: Hidrofilen cementni delec (Vir: Mehta, Monteiro 2006)

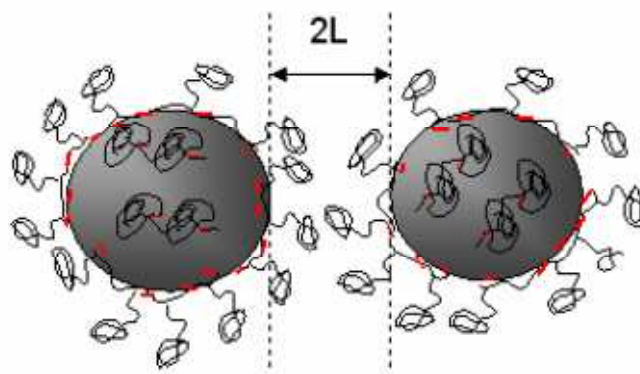


Slika 9: Shematični prikaz nastanka kosmičev cementnih delcev pred dodatkom vodozmanjševalne mešanice ter po dodatku (Vir: Mehta, Monteiro, 2006)

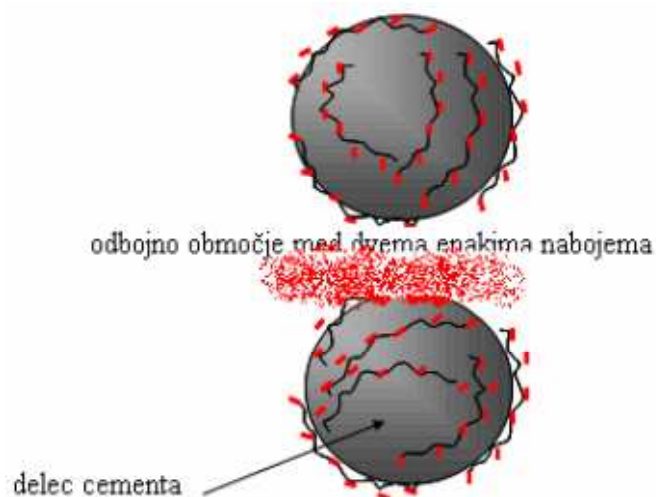
Superplastifikatorji (SP)

SP imajo v principu enake karakteristike kot plastifikatorji, le da so njihovi vplivi na lastnosti betona boljši. Betonski mešanici lahko, v primerjavi s plastifikatorji, dodamo veliko količino SP, brez da bi ta pomembno vplival na segregacijo, izcejanje vode, kohezivnost ipd. Verjetno je to posledica v razliki velikosti verig sestavin, ki so pri SP daljše in zaradi tega zamašijo pretočne kanale za vodo in preprečijo segregacijo. Hidrofilni delci cementa se v vodi dobro dispergirajo in pospešijo hidratacijo. To privede do pospešenega vezanja cementne paste in s tem naraščanja trdnosti betona. S superplastifikatorji je možno doseči od 20 do 30 odstotno zmanjšanje količine zamesne vode, kar je od 3 do 4 krat boljše kot pri navadnih plastifikatorjih, pri tem pa vseeno ohranjamo visoko konsistenco in obdelavnost betona. Z znižanjem vodo/cementnega razmerja pa se, kot že rečeno, izboljšajo mehanske lastnosti betona, predvsem tlačna trdnost.

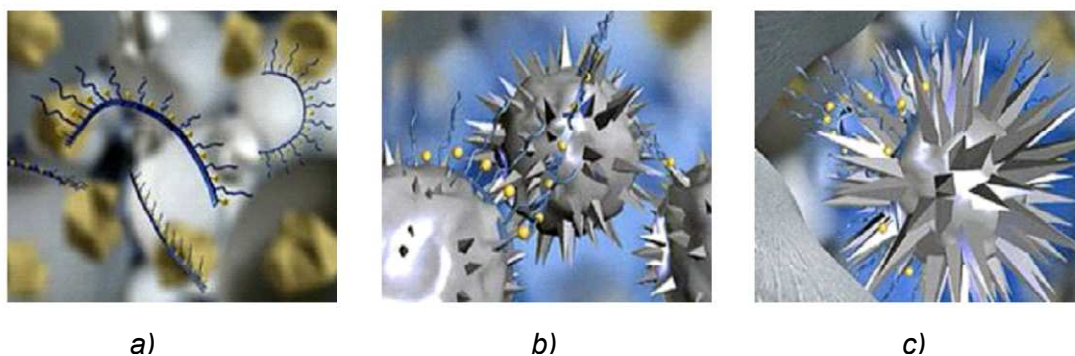
Poznamo več vrst SP, ki so jih razvijali skozi čas. SP na osnovi naftalenskih in melaminskih molekul dobro razpršenost cementnih delcev dosežejo s pomočjo elektrostatičnega odboja med delci. Novejši SP pa preprečujejo povezovanje cementnih zrn s pomočjo prostorske stabilizacije. Razviti so bili po letu 1990 in so grajeni na osnovi poliaktilatov, polikarboksilatov in polietilenov. Novejši SP se adsorbirajo na površino cementnih zrn in z električnim ter steričnim oz. prostorskim odbojem povzročajo disperzijo cementnih delcev. Negativno električno nabita cementna zrna se med seboj odbijajo in tvorijo stabilizirano strukturo. Pri sterični stabilizaciji pa dolge polimerne verige prostorsko preprečujejo združevanje cementnih delcev. Sterični odboj ima, v primerjavi z električnim nabojem, večji in dalj časa trajajoč učinek (Kodelja, 2009).



Slika 10: Delovanje polikarboksilne strukture (Vir: Sika Slovenija)



Slika 11: Delovanje naftalenskih in melaminskih molekul (Vir: Sika Slovenija)



Slika 12: Shematični prikaz delovanja SP nove generacije: a) molekule SP nove generacije; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Petan, 2002)

Zavlačevalci vezanja

So dodatki, ki s svojim delovanjem zavirajo hitrost vezanja cementa. Tako je podaljšana faza prehoda iz plastičnega v trdno stanje. Uporabljamo jih za betoniranje pri visokih temperaturah in pri gradnji masivnih betonskih objektov. Zelo pomemben je čas vnosa kemijskega dodatka v betonsko mešanico, saj ta zelo vpliva na odložitev časa vezanja (Kodelja, 2009).

Pospeševalci vezanja

Ti dodatki pospešujejo hidratacijo cementa in s tem vezanje ter strjevanje betona (Kodelja, 2009).

Sredstva za kontrolo viskoznosti

Njihova glavna naloga je povečevanje stabilnosti cementnih materialov. Med transportom, vgrajevanjem in zgoščevanjem zmanjšajo nevarnost ločitve heterogenih sestavin betona. Pri ustreznem kombiniranju SP in sredstva za kontrolo viskoznosti dobimo betonsko mešanico, ki ima dobro stabilnost in visoko sposobnost tečenja. Te karakteristike pa so zaželene pri samozgoščevalnem, podvodnem, lahkovgradljivem betonu ipd. (Kodelja, 2009).

Uporaba teh dodatkov v samozgoščevalnem betonu je zelo pogosta, saj njihova uporaba služi za zmanjševanje potrebne količine praškastih delcev v mešanici kot tudi za zagotovitev ustreznih samozgoščevalnih lastnosti v primeru večjega nihanja lastnosti sestavin. Brez uporabe sredstva za kontrolo viskoznosti v samozgoščevalnih mešanicah bi hitro prišlo do problemov, ki izhajajo iz velikega nihanja vlažnosti drobnozrnatega agregata (Duh, 2008). Med najbolj uporabljenimi sredstvi za kontrolo viskoznosti je biopolimer "welan gum". To je aditiv, ki s svojimi lastnostmi preprečuje izcejanje vode. Njegove dolgoverižne polimerne molekule se adhezijsko povežejo z molekulami vode in na ta način adsorbirajo del zamesne vode.

S tem mehanizmom povečajo viskoznost mešanici in njeno napetost na meji tečenja. Vse dokler se adsorbirana voda ponovno ne sprostí, je mešanica navidezno strjena. Voda pa se lahko sprostí s črpanjem, agitiranjem ali vibriranjem mešanice (Mehta, Monteiro, 2006).

4 LASTNOSTI SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA IN LAHKOVGRADLJIVEGA BETONA

4.1 LASTNOSTI SVEŽE MEŠANICE

Samozgoščevalni beton je sposoben zapolniti opaž poljubne oblike, tesno oblitati armaturo, se odzračiti in znivelirati samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja. Vse to pa je možno samo zaradi posebnih reoloških lastnosti, ki jih premore sveža mešanica. Lastnosti, ki določajo karakteristike samozgoščevalnih betonov so: viskoznost, sposobnost tečenja, sposobnost prehajanja med ovirami, sposobnost samoniveliranja in samoodzračevanja ter stabilnost strukture. Te lastnosti zahtevajo tako sestavo sveže samozgoščevalne mešanice, ki se v določenih točkah razlikuje od tehnologije običajnega betona.

SCC mešanici moramo zagotoviti v svežem stanju predvsem dve ključni lastnosti: visoko sposobnost tečenja in ustrezno viskoznost. Ker pa sta si ta dva parametra nasprotujoča ju je potrebno uravnotežiti in optimirati. Namreč, z večanjem sposobnosti tečenja narašča nagnjenost k segregaciji sveže mešanice. Da bi preprečili segregacijo mora biti mešanica dovolj lepljiva, vendar mora še vedno dopuščati, da se zračne pore brez zaustavljanja dvigujejo proti površju (predpostavka za samoodzračevanje). S tem uspemo dobiti dovolj gosto, homogeno strukturo betona, ki jo potrebujemo. Glede na dosedanja spoznanja je možno doseči tako strukturo betona z dodajanjem povečane količine praškastih delcev mešanici, z uporabo ustreznih (dovolj kakovostnih) vhodnih materialov in z vključevanjem kemijskih dodatkov (plastifikatorjev, superplastifikatorjev,...) z dovolj dolgim časom delovanja. Ključnega pomena je namreč ravno optimalna obdelavnost v času vgrajevanja v opaž. Trajanje učinkovitosti kemijskih dodatkov pa je časovno omejeno.

4.1.1 Obdelavnost samozgoščevalnega betona

Sposobnost tečenja in viskoznost

Pri samozgoščevalnem betonu težimo k doseganju čim večjega tečenja mešanice, ki ima tudi zadostno viskoznost. Sposobnost tečenja je definirana kot sposobnost, da se samo zaradi delovanja lastne teže betonska mešanica horizontalno razprostere. S preiskavo, kot je metoda razleza s posedom, lahko ovrednotimo, kako daleč in kako hitro se betonska mešanica deformira. Drugi pogoj, kateremu mora mešanica zadostiti je ustrezna viskoznost

oziroma notranje trenje v tekočini, ki nastane zaradi medsebojnega delovanja sosednjih tekočinskih plasti. Med tečenjem se namreč te plasti različno hitro gibljejo.

Samozgoščevalni betoni spadajo med tekoče betone, ki začnejo teči šele, ko strižne napetosti v materialu dosežejo minimalno vrednost t.i. napetost na meji tečenja. Reološke lastnosti tekočih betonov lahko dobro opiše Binghamov model tekočine:

$$\tau = \tau_0 + \beta_p \times \gamma \quad (1)$$

kjer je:

γ strižna hitrost,

β_p plastična viskoznost,

τ_0 napetost na meji tečenja,

τ strižna napetost.

Pri samozgoščevalnih betonih težimo k čim nižjim napetostim na meji tečenja, da dosežemo dobro sposobnost tečenja. To pa je mogoče le z dodajanjem superplastifikatorja betonski mešanici, katerega količina mora biti ravno pravšnja. Pri predoziranju lahko pride do odmešanja oz. segregacije, če pa je dodatka v mešanici premalo, ta ne bo dovolj tekoča in obdelavna. Pri nizki napetosti na meji tečenja obstaja nevarnost pojava segregacije, zato moramo povečati viskoznost paste v betonu. Dosežemo jo z dodajanjem večjega deleža praškastih delcev v mešanico kot pri običajnem vibriranem betonu.

V nadaljevanju sledi podrobnejša razlaga treh ključnih karakteristik SCC mešanic.

Sposobnost zapolnjevanja

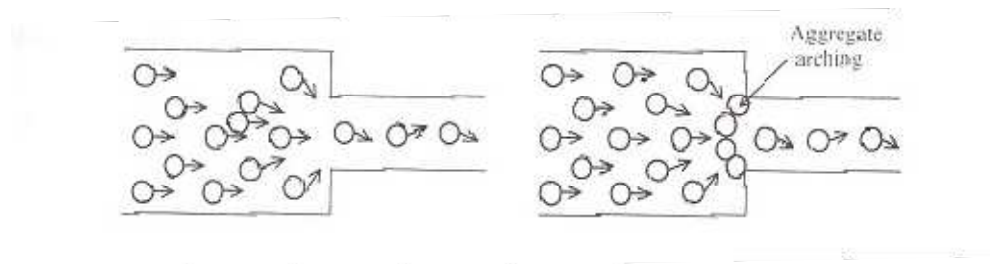
Sposobnost zapolnjevanja je odvisna od sposobnosti deformiranja in hitrosti deformiranja sveže SCC mešanice, zaradi delovanja lastne teže. Sposobnost deformiranja določa, kako daleč od mesta praznjenja lahko beton steče, hitrost deformiranja pa, kako hitro se to zgodi. Dobra sposobnost zapolnjevanja je dosežena le takrat, ko sta sposobnost deformiranja in hitrost deformiranja v ravnotežju. Za dosego ravnotežja pa mora mešanica izpolnjevati dva pogoja. Cementna pasta mora imeti dobro sposobnost deformiranja in med trdimi delci mora biti majhno trenje.

Lastnosti cementne paste se odražajo tudi na sveži mešanici. Dobro sposobnost deformiranja pasti zagotavlja superplastifikator, katerega učinek se pozna v zmanjšanju

napetosti na meji tečenja, brez da bi bistveno vplival na viskoznost mešanice. S tem se ohranja dobra kohezivnost. Za dobro deformiranje cementne paste pa je potrebno tudi uravnotežiti razmerje med vodo in praškastimi delci (Duh, 2008).

Sposobnost prehajanja

SCC mešanica mora biti projektirana na tak način, da mešanica lahko prehaja med ovirami, ki se pojavijo med vgrajevanjem v opaž. Mešanica mora brez blokiranja prehajati med predeli z gosto armaturo, ozkimi predeli v opažu, ipd. Blokiranje se lahko pojavi zaradi nakopičenja agregatnih zrn pred oviro. Agregatna zrna morajo namreč v bližini ovire spremeniti svojo pot tečenja in lahko pride do blokade pred oviro. Zato se pri projektiranju SCC mešanice uporablja agregat z velikostjo največjega zrna, ki je bistveno manjši od najmanjše dimenzije odprtine med ovirami.



Slika 13: *Mehanizem blokiranja sveže betonske mešanice* (Vir: Duh, 2008)

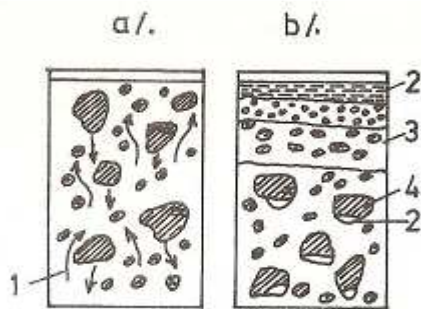
Ukrepi, ki zagotavljajo dobro sposobnost prehajanja so:

- majhno največje zrno agregata,
- manjša količina grobozrnatega agregata v primerjavi s celotno maso vhodnih materialov,
- nizko v/c razmerje, ki preprečuje segregacijo in izboljša kohezivnost mešanice,
- dodajanje sredstva za kontrolo viskoznosti (Duh, 2003).

Odpornost na segregacijo

Za dobro odpornost na segregacijo moramo pripraviti mešanico, ki bo imela stabilno notranjo strukturo in bo ohranjala svojo homogenost med mešanjem, transportom in vgrajevanjem v opaž. Le na tak način se lahko izognemo segregaciji. Njene negativne posledice se odražajo tako na sveži mešanici kot tudi na strjenem betonu, kateremu drastično znižajo njegove fizikalne in mehanske lastnosti in tudi obstojnost (Muravljov, 1991).

Segregacija predstavlja nagnjenost k oddvojitvi grobih in finih zrn pod delovanjem različnih mehanskih vplivov, predvsem pod silo teže. Do segregacije lahko pride zaradi premajhne kohezivnosti mešanice, njene posledice pa so nehomogenost betonske mešanice, ki kasneje vodi tudi v nehomogenost strjenega betona.



Slika 14: Primer razslojevanja betonske mešanice (Vir: Muravljov, 1991)

Poznamo več vrst segregacij:

- oddvojitev paste in agregata,
- oddvojitev grobozrnatega agregata,
- izcejanje vode; povzroča ga sedimentacija trdih delcev in hkrati selitev vode na površje,
- neenakomerna porazdelitev zračnih por.

Pri SCC betonih odpornost na segregacijo dosežemo na naslednje načine:

- nižji delež grobozrnatega agregata,
- nizka vsebnost zamesne vode,
- nizko v/c razmerje
- uporaba sredstva za kontrolo viskoznosti.

4.1.2 Sposobnost samoodzračevanja

Samozgoščevalni beton mora biti sposoben oddati delež zraka, ki se je med mešanjem in vgrajevanjem vključil v mešanico. Zrak je zajet v zračnih porah znotraj mešanice, ki se s pomočjo sile vzgona dvigajo na površje. Kako hitro in v kakšni meri se to zgodi pa je odvisno, v prvi vrsti, od velikosti zračnih por, od gostote in kvalitete paste. Torej je za dobro samoodzračevanje potrebna nizka napetost na meji tečenja in nizka viskoznost.

Pri vgrajevanju v opaž pa se zahteva tudi dovolj dolga in neprekinjena pot tečenja betonske mešanice v konstrukcijski element. Na ta način lahko omogočimo mešanici, da se odzrača.

Zajeti zračni mehurčki imajo tako dovolj časa, da pridejo na površje. S tem preprečimo tudi, da bi agregatna zrna ovirala njihovo dvigovanje k površju.

Že v uvodnem poglavju smo poudarili, da je SCC mešanica zelo specifična in da so njene lastnosti zelo odvisne od vhodnih materialov in njihove kvalitete. Ti materiali pa se od države do države razlikujejo. Tako lahko tudi za dopustno količino zraka v SCC betonu povemo, da je zelo različna glede na posamezne države. Njene vrednosti se gibljejo v nekaterih državah od 4-6%, spet drugje skušajo doseči vsebnost zraka 2,5% ali manj.

4.2 METODE PREVERJANJ SVEŽE BETONSKE MEŠANICE

S tradicionalnimi metodami preverjanj se lastnosti samozgoščevalnih betonov ne da ovrednotiti. Zato so se z razvijanjem SCC betonov vzporedno razvijale tudi preskusne metode. Usmerjene so predvsem v kontrolo ključnih karakteristik SCC v svežem stanju: sposobnost zapolnjevanja, sposobnost prehajanja med ovirami in odpornost na segregacijo. Različna evropska združenja (ENFARC, BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA) že od leta 2000 dalje izdajajo navodila za samozgoščevalne betone. Leta 2010 pa je bil izdan evropski standard za samozgoščevalni beton EN 206-9: Beton – 9. Del: Dodatna pravila za samozgoščevalni beton ter standardi za preskušanje SCC v svežem stanju:

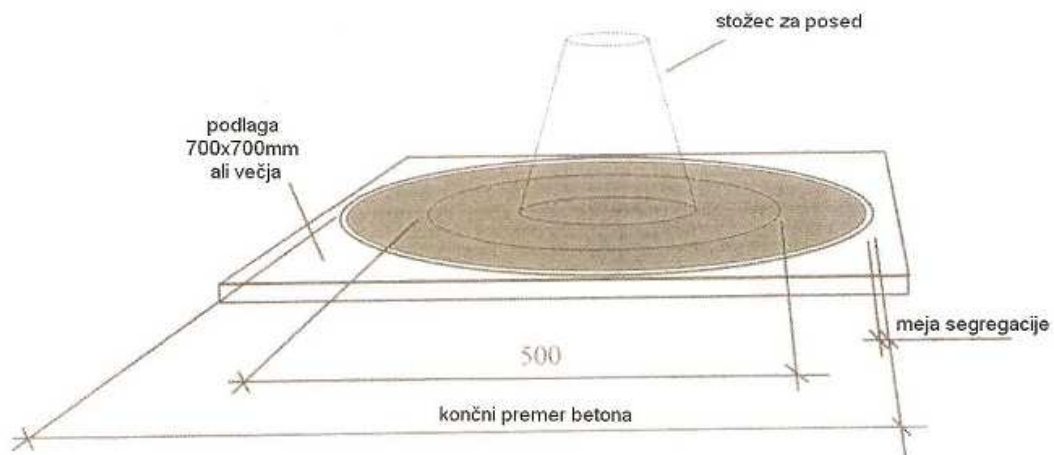
- prEN 12350-8: Preskušanje svežega betona - 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus razleza s posedom
- EN 12350-9: Preskušanje svežega betona - 9. del: Samozgoščevalni beton - Preskus z V-lijakom
- EN 12350-10: Preskušanje svežega betona - 10. del: Samozgoščevalni beton - Preskus z L-zabojem
- EN 12350-11: Preskušanje svežega betona - 11. del: Samozgoščevalni beton - Preskus segregacije s sitom
- EN 12350-12: Preskušanje svežega betona - 12. del: Samozgoščevalni beton - Preskus z J-obročem

Pri lastnih preiskavah smo se omejili samo na prvo predlagano metodo, t.j. na preiskavo razleza s posedom, saj smo menili, da je zadostila našim pogojem glede SCC. Ključnega pomena so bile preiskave na strjenem betonu, ki so bistven del diplomske naloge.

4.2.1 Razlez s posedom

To je učinkovita in enostavna metoda, s katero lahko hitro izvemo ali je naša sveža mešanica stabilna in ima ustrezno sposobnost zapolnjevanja. Zaradi lastne teže se samozgoščevalna mešanica betona deformira in razleze po podlagi. Pri tej metodi torej merimo hitrost deformiranja sveže mešanice in premer njene razširitve.

Pri tej metodi uporabimo vodotesno horizontalno podlago z dimenzijami večjimi od 800×800 mm, ki ima na sredini narisan krog premera 500mm in Abramsov stožec (prisekan stožec za določitev poseda običajnega betona). Pred preiskavo navlažimo podlago in stožec tako, da ne ostane proste vode. Nato položimo stožec na sredino podlage in ga do vrha napolnimo s svežo mešanico betona. Zaradi lastnosti SCC ni potrebno mešanico po napolnitvi stožca vibrirati ali prebadati z jekleno palico, saj mešanica zaradi lastne teže sama prevzame obliko stožca in se samonivelira. Nato jeklen stožec dvignemo v vertikalni smeri. Od trenutka ko dvignemo stožec in do doseženega premera 500 mm merimo čas T_{50} . Ko se mešanica na podlagi umiri, izmerimo še končni premer razleza in sicer najmanjšega in največjega. Povprečje obeh meritev je mera razleza s posedom in je ocena napetosti na meji tečenja. Meritvi časa T_{50} in razleza s posedom sta medsebojno odvisni. Pri mešanici z večjim razlezom bomo izmerili krajši čas T_{50} in obratno. Čas T_{50} torej predstavlja oceno plastične viskoznosti betona.



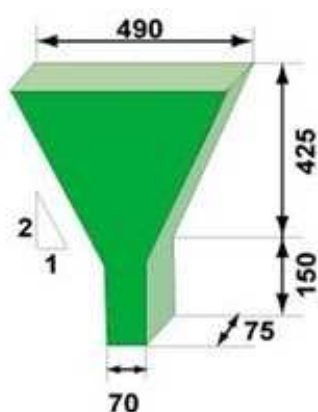
Slika 15: Posed z razlezom (Vir: Bokan-Bosiljkov, 2012)

Standard (EN 206-9) omejuje razlez mešanice samozgoščevalnega betona med 550 in 850mm. Na gradbiščih pogosto izvajajo to metodo, saj lahko na hiter in enostaven način, iz dneva v dan ali iz ure v uro spremljajo spremembe v vhodnih materialih. Hitro lahko preverimo sposobnost tečenja, homogenost/stabilnost mešanice, segregacijo. Edina lastnost, ki jo s to preiskavo ne moremo izmeriti je sposobnost prehajanja med ovirami.

4.2.2 Preiskava z V-lijakom

Preiskava je namenjena ocenjevanju sposobnosti prehajanja sveže betonske mešanice skozi ozke predele. Pri preiskavi merimo čas iztekanja mešanice skozi V-lijak. Poleg tega lahko z opazovanjem tečenja mešanice skozi lijak ocenimo tudi odpornost na segregacijo.

Notranjost V-lijaka pred preiskavo navlažimo in pod njim postavimo posodo za prestrezanje. Nato betonsko mešanico vlijemo v lijak tako, da se vzorec poravnava z vrhom lijaka. Odstranimo zaporo na dnu lijaka in merimo čas T_i od odstranitve zapore do trenutka, ko zagledamo svetlobo na izpustu. Če je čas iztekanja T_i med 6 in 12 sekund potem je betonska mešanica ustrezna. Kar pomeni, da je ustrezno viskozna. Mešanica, ki ima daljši čas iztekanja kot 12 sekund je lahko neustrezna za rokovanje in vgrajevanje ali pa so se zrna agregata oblikovala v oviro in preprečevala tečenje, kar predstavlja nestabilno mešanico. Premalo viskozna mešanica, ki steče skozi lijak v času krajšem od 6 sekund pa velikokrat ne zadosti kriteriju odpornosti na segregacijo.



Slika 16: Na levi strani so prikazane dimenzije V-lijaka za preiskavo; na desni strani vidimo dejansko izvajanje metode z V-lijakom (Vir: <http://theconstructor.org>)

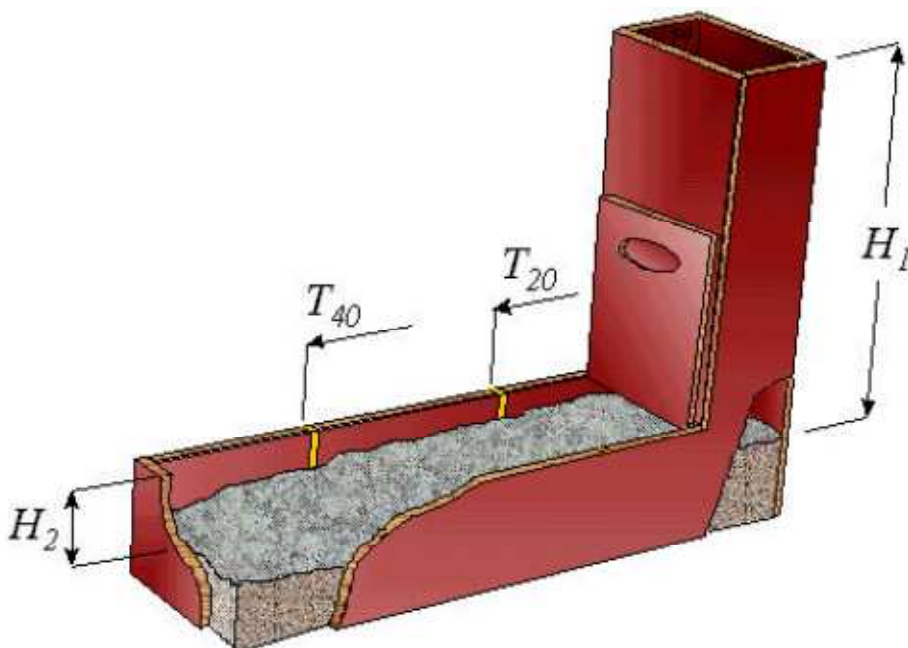
4.2.3 Preiskava z L-zabojem

S to preiskavo lahko ovrednotimo kar štiri lastnosti samozgoščevalnih mešanic. V prvi vrsti prehajanje sveže mešanice med ovirami, zapolnjevanje, odpornosti na segregacijo in sposobnosti mešanice, da se samonivelira.

Za preiskavo potrebujemo L-zaboj ustreznih dimenzij, ki ima vsaj eno stranico prosojno. Na horizontalnem delu te prosojne stranice sta označeni razdalji, ki sta od drsne zapore oddaljeni za 20 in 40cm. V horizontalnem delu L-zaboja so nameščene armaturne palice, ki

ovirajo tečenje mešanice. Med vertikalnim in horizontalnim delom zaboja pa je postavljena drsna zapora.

Najprej navlažimo L-zaboj in spustimo drsno zaporo. Potem vlijemo svežo mešanico v vertikalni del zaboja. Ko se beton umiri, dvignemo zaporo da lahko beton steče v horizontalni del zaboja. Med tem pa merimo časa T_{20} in T_{40} . To sta časa, ko mešanica doseže razdaljo 20cm in 40cm. V horizontalnem delu zaboja izmerimo še višini H_1 in H_2 , ki nam podata blokirno razmerje H_2/H_1 . Najmanjša sprejemljiva vrednost blokirnega razmerja je 0,8.



Slika 17: Dimenzije L-zaboja (vir: <http://www.cege.ucl.ac.uk>)

Prosojna stranica nam služi za vizualno oceno stabilnosti mešanice. Če je grobozrnati agregat na površini betona enakomerno razporejen vse do konca horizontalnega dela zaboja, je mešanica stabilna. Pri preskusu pa lahko pride do blokiranja, ko se grobozrnati agregat nakopiči med armaturo (ovirom), kar pomeni da mešanica ni ustrezna (Duh, 2008).

4.2.4 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu

Standard SIST EN 12350-7 predpisuje metodo za določanje vsebnosti zraka v sveži betonski mešanici. Preiskavo izvedemo z napravo - porozimetrom, s katero določimo vsebnost zraka v svežem betonu. Porozimeter napolnimo s svežo mešanico, ki jo ne vibriramo niti ne prebadamo. Na osnovno posodo namestimo očiščen pokrov z manometrom, tlačilko in ventili. Nato skozi odprtino v pokrovu vlijemo vodo, da zapolnimo prostor med betonom in pokrovom ter zapremo ventile. S tlačilko ustvarimo nadtlak v predprostoru in odpremo ventil

med predprostorom in prostorom, ki je zapolnjen z vodo. Manometer nam tako pokaže padec tlaka izražen v odstotkih deleža zračnih por.



Slika 18: Manometer (Vir: SIST EN 12350-7:2001)

4.2.5 Kontrola kvalitete samozgoščevalnega betona na terenu

Na terenu pogosto ni dovolj časa, prostora, pripomočkov in pogojev kot so v laboratoriju. Zato se na gradbišču, tik pred vgradnjo, običajno preverja kvaliteto betona z najbolj enostavno preiskavo, tj. preiskava razleza s posedom. Japonci pa priporočajo še metodo kontinuirnega preverjanja betonske mešanice.

Pri zagotavljanju kvalitete je bistvenega pomena ravno preverjanje vsake pošiljke betona na čim lažji in hitrejši način. Še posebno, če vzamemo v obzir, da je samozgoščevalna mešanica zelo občutljive narave. Pri kontinuirni metodi preverjanja mešanice se med izpustno drčo avtomobilskega mešalnika in črpalko namesti naprava v obliki kontejnerja. Nanj so pritrjene armaturne palice, ki ovirajo tečenje mešanice. Stabilen beton bo stekel neovirano v črpalko. Neustrezen beton, ki segregira ali pa pride do blokiranja na oviri, lahko zavrremo in ga ne vgradimo v konstrukcijo.

Ta metoda je enostavna in hitra. Prednost pa je tudi v tem, da izključimo človeški vpliv, saj ni potrebno odvzeti vzorcev iz mešanice. Hkrati se zmanjša tudi število potrebnih delavcev (Duh, 2003).



Slika 19: Kontinuirna metoda (Vir: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/scc.htm>)

4.3 LASTNOSTI STRJENEGA SAMOZGOŠČEVALNEGA IN LAHKOVRADLJIVEGA BETONA

Lastnosti strjenega betona so odvisne od izjemno velikega števila različnih vplivov. Odvisne so od karakteristik vgrajenih komponent: agregata, cementa, praškastih delcev, vode, dodatkov, od niza tehnoloških faktorjev, postopka priprave konkretnega betonskega elementa, pogojev izkoriščanja,... Največ lastnosti betona pa je direktno odvisnih od strukture betona (Muravljov, 1991).

V strjenem stanju ima lahko samozgoščevalni beton enake mehanske in trajnostne karakteristike kot tradicionalni in lahkogradljivi beton, lahko pa tudi karakteristike visokozmogljivih betonov. Posebne lastnosti samozgoščevalnih betonov zahtevajo bolj homogeno mešanico in ker se pri njegovi vgradnji ni potrebno posluževati mehanskih načinov zgoščevanja (npr. vibriranje) se njegova notranja struktura ohrani intaktna. Posledica le tega je bolj neprepusten beton z izboljšanimi karakteristikami strjenega betona v primerjavi z tradicionalnimi betoni.

4.3.1 Trdnost

Trdnost je pomembna karakteristika betona. Daje nam tudi sliko o kvaliteti betona, saj je trdnost neposredno povezana s strukturo strjenega cementnega kamna (Nevil, 1976).

Samozgoščevalni betoni praviloma izkazujejo večje tlačne trdnosti od običajnih betonov pri istem v/c razmerju. To je posledica izločitve vibriranja pri vgrajevanju, saj vibriranje oslabi stično območje med večjimi agregatnimi zrni in cementnim kamnom. Razmerje med natezno in tlačno trdnostjo pa naj bi bilo enako kot pri običajnih betonih, saj naj povečanje deleža

cementne paste (cement, voda, praškasti delci) ne bi vplivalo na natezno trdnost betona (Duh, 2008).

4.3.2 Trajnost in obstojnost

Betonske konstrukcije so podvržene delovanju različnih škodljivih vplivov, ki tekom uporabe uničujejo objekte. Lahko se poškodujejo zaradi zunanjih vplivov (potres, voda, veter, zrak) ali pa zaradi notranjih vplivov. Med glavne notranje vzroke spada alkalno-agregatna reakcija, neenako spreminjaje prostornine osnovnih sestavin zaradi različnih toplotnih koeficientov agregata in cementnega kamna, najbolj pa vpliva prepustnost betona. Od tega je odvisna njegova ranljivost ter podvrženost agresivnim vplivom okolja. Iz tega sledi, da je trajen beton predvsem neprepusten (Nevil, 1976).

Tu je samozgoščevalni beton v prednosti, saj njegova gostejša struktura in izločitev vibriranja omogočata majhno vodoprepustnost. Z ustvarjanjem vodonepropustnosti (preprečevanje vdiranja vode v beton) je omogočena dobra zmrzljinska obstojnost, večja pa je tudi odpornost na vse vrste agresivnih materialov, ki lahko prodrejo v beton z vodo.

Na dobro obstojnost pa ugodno vpliva tudi kvaliteta površine, ki je pri samozgoščevalnih betonih bolj gladka, manj porozna. Zaradi spodaj naštetih razlogov naj bi samozgoščevalni betoni imeli daljšo življensko dobo v primerjavi z običajnimi betoni:

- nižje v/c razmerje in zaradi večje natančnosti pri doziranju vode v mešanico tudi manjše variiranje le tega,
- izboljšana mikrostruktura in odprava gnezd v SCC betonu,
- z izključitvijo vibriranja odpravimo oslabljenost stična območja med cementnim kamnom in agregatom; struktura se ne poruši (Duh, 2003).

4.3.3 Krčenje in lezenje

Krčenje betona je definirano kot vsota avtogenega krčenja (posledica notranje porabe vode med hidratacijo) in krčenja zaradi sušenja betona. Slednje pa je posledica izhlapevanja vode iz betona in je močno odvisno od v/c razmerja. Pri manjšem v/c razmerju bo tudi krčenje manjše. Pomemben vpliv na krčenje pa naj bi imel tudi vpliv vrste cementa in praškastih delcev.

Glede na to, da je krčenje betona odvisno od mnogih faktorjev so si izsledki v znanstvenih poročilih in člankih, glede primerjave krčenja med običajnimi vibriranimi in samozgoščevalnimi betoni, zelo nasprotujoči. EFNARC v svojih navodilih za SCC (The

European Guidelines..., 2005) poroča, da lahko pri SCC betonih pričakujemo manjše krčenje zaradi sušenja in večje avtogeno krčenje kot pri običajnem betonu (Duh, 2008).

Lezenje betona pa je definirano kot postopno večanje deformacije pri konstantni obremenitvi. Zajema pa tudi ostale deformacije, ki nastajajo zaradi krčenja ali nabrekanja in temperaturne deformacije. Do lezenja prihaja v cementnem kamnu betona in sicer se med procesom hidratacije poroznost cementne paste zmanjšuje in s tem tudi lezenje, nasproti temu pa narašča trdnost betona. Tako da sta trdnost in lezenje obratno sorazmerna, kar je bilo eksperimentalno dokazano (Duh, 2008).

4.4 METODE PREVERJANJ STRJENEGA BETONA

Te metode izvajamo v skladu s predpisanimi standardi in sledijo metodam preverjanj na sveži betonski mešanici. Z njimi preverjamo mehanske lastnosti betona (tlačna in natezna trdnost, statični modul elastičnosti, sovisnost med napetostmi in deformacijami, ipd.). Te metode so t.i. porušne metode, saj se vzorec med postopkom uniči oz. poruši. Obstajajo pa tudi neporušne metode preverjanj kot je npr. ultrazvočna metoda za oceno dinamičnega modula elastičnosti in druge, vendar jih v sklopu naših preiskav nismo izvajali.

Standard zahteva, da so preskušanci ustrezno pripravljene, označeni in negovani. Morajo biti ustreznih dimenzij, ki so podane v standardu (SIST EN 12390-1:2001). Pri naših preiskavah smo uporabili preskušance v obliki prizem dimenzij (prerez prizme 100×100mm, dolžina 400mm) in valjaste preskušance (premer 100mm, dolžina 200mm), ki izpolnjujejo zahteve standarda.

Pred polnjenjem kalupov smo notranjo površino kalupa premazali s tanko plastjo nereaktivnega sredstva za lažje odstranjevanje kalupa, da smo preprečili prijemanje betona na kalup. Beton smo takoj po vgraditvi v kalup zgostili na tak način, da ni prišlo do segregacije ali izločanja cementnega mleka. Popolno zgostitev dosežemo z mehanskim vibriranjem, z vibracijsko mizico ali z ročnim zgoščanjem. V našem primeru smo uporabili mehansko vibriranje. To metodo smo uporabili pri lahkovgradljivi mešanici. Pri samozgoščevalnih mešanicah pa se nam ni bilo treba posluževati takih metod, saj mešanica sama zaradi lastne teže zapolni kalup, se odzrača in znivelira. Vsak preskušanec smo nato označili in poskrbeli za primerno nego. Najprej smo kalupe, ob katerih so bile posode z vodo, pokrili s polivinilom, da smo dosegli čim višjo relativno vlažnost prvih 24 ur po vgraditvi betona. Naslednji dan pa smo preskušance razkalupili in jih dali v vodo s kontrolirano temperaturo ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$) v posebno komoro. Pred vsakimi preiskavami smo preskušance površinsko osušili in s kljunastim merilom preverili njihove dimenzije.

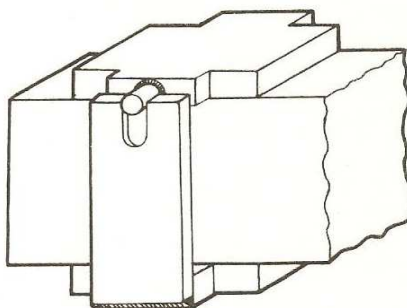
Po končanih preiskavah smo lahko rezultate medsebojno primerjali. Obravnavane mešanice so bile različnih sestav, kar je vplivalo na rezultate.

Tuji raziskovalci primerljivost betonskih mešanic pojmujejo različno. Nekateri se odločajo za enak v/c razmerje pri mešanicah, drugi ohranjajo enak delež paste, tretji enako razmerje med vodo in praškastimi delci, itd. Zaključki se tako močno razlikujejo (Duh, 2008).

Samozgoščevalni mešanici, ki smo ju obravnavali v naših raziskavah, sta imeli enako količino cementa in podobno v/c razmerje. Lahkovgradljiva mešanica pa je imela v primerjavi s samozgoščevalnima mešanicama večjo količino cementa in tudi večje v/c razmerje. Vendar moramo vedeti, da lahkovgradljiva mešanica nima lastnosti, ki odlikujejo samozgoščevalne betone, zato se tudi po količinah dodanih materialov ne moreta primerjati. Bistvena razlika je bila tudi v dodanem agregatu in praškastih delcih. SCC mešanici vsebujeta različna agregata. Mešanica S2 vsebuje drobljeni agregat, mešanica S1 pa rečni prod. Za razliko od samozgoščevalnih mešanic (apnenčeva moka) vsebuje lahkovgradljiva mešanica kot mineralni dodatek elektrofiltrski pepel.

4.4.1 Tlačna trdnost

Tlačna trdnost (f_{cc}) je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Postopek določitve tlačne trdnosti je podan v standardu SIST EN 12390-3:2009. Tlačno trdnost določamo na standardiziranih preskušancih v obliki kocke ali valja. Pri lastnih preiskavah smo imeli preskušance v obliki prizem in valjev. Tako smo za preskus tlačne trdnosti na prizmah uporabili modificirano metodo, ki jo predpisuje JUS U.M1.012. Metoda po JUS-u dovoljuje uporabo prizemskih vzorcev (polovičk) dobljenih pri upogibnem preskusu. Način poteka preiskave pa je identičen tistemu iz standarda SIST EN 12390-3:2009.



Slika 20: Primer modificirane metode tlačne trdnosti za prizmo (Vir: Nevil, 1976)

Pred preiskavo smo s kljunastim merilom izmerili dejanske dimenzije preskušanca, kot sem omenila že v prejšnjem poglavju, in določili njegovo maso. S pomočjo tlačne preše (slika 20) smo določali porušno silo. Rezultate pa smo zajemali tudi z računalnikom.



Slika 21: Tlačna preša z računalniškim zajemanjem podatkov (Vir: Duh, 2008)

Tlačna trdnost je podana z enačbo:

$$f_{cc} = F/A_c \quad (2)$$

kjer so:

- f_{cc} tlačna trdnost, v MPa (N/mm²);
- F največja obremenitev ob poružitvi, v N;
- A_c ploščina preseka preskušanca na katerega deluje tlačna sila.

Tlačna trdnost, ki jo doseže beton, je odvisna od v/c razmerja, stopnje hidratacije, nege in okoljskih pogojev ter starosti betona. S padanjem v/c razmerja trdnost narašča in obratno. Tlačna trdnost je ena najpomembnejših lastnosti betona. Najbolj uporabljan beton ima trdnost med 20–40 MPa. Betoni z višjimi trdnostmi kot 70 MPa pa so specialni betoni za uporabo pri gradnji mostov ipd. (Mehta, Monteiro, 2006).

4.4.2 Natezna trdnost

Postopki preverjanja natezne trdnosti so bolj zapleteni kot postopki določanja tlačne trdnosti. Razlogi so predvsem v tem, da se med preskusom v betonu težko zagotavlja homogeno stanje nateznih napetosti v vzorcu. Ta mehanska lastnost betona je najbolj odvisna od kvalitete površine agregata. Pri drobljenem agregatu je adhezija med zrnji agregata in

cementnim kamnom večja od tiste pri produ, zato imajo po pravilu betoni iz drobljenega agregata večje natezne trdnosti. Tako kot na tlačno trdnost tudi na natezno trdnost vplivajo še ostali že naštetih faktorji. Natezno trdnost preverjamo z več metodami:

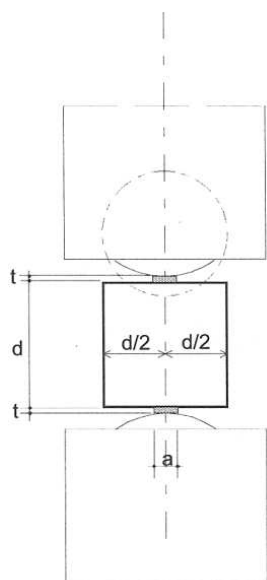
- Preskus z direktnim osnim nategom, t.j. direktna metoda
- Preskus upogibne trdnosti
- Preskus natezne razcepne trdnosti

V naših preiskavah smo natezno trdnost določali po zadnjih dveh naštetih metodah. Pri obeh preiskavah smo uporabili vzorce v obliki prizem (Muravljov, 1991).

Natezna razcepna trdnost

Natezno trdnost betona smo določali s preiskavo natezne razcepne trdnosti (f_{ct}) v skladu s standardom SIST EN 12390-6 (2010). Preiskava je pomembna za oceno obremenitve pri kateri nastanejo razpoke v betonu (Žarnić, 2005).

Uporabili smo vzorce v obliki prizem. Pred preiskavo smo preverili njihove dejanske dimenzije. Nato smo jih postavili v tlačno prešo in pričeli obremenjevati. Vzorci so bili izpostavljeni tlačni sili, ki je zvezno linearno potekala 5 cm od roba prizme po zgornji in spodnji ploskvi preskušanca, vse do porušitve. Pri takih preskusih se ne doseže homogenega napetostnega stanja in zato se tudi vrednosti razlikujejo od tistih, ki so dobljene pri enoosnem nateznem preskusu. Te trdnosti so za okoli 15-20% večje kot tiste pri enoosnem nateznem preskusu (Muravljov, 1991).



Slika 22: Shematski prikaz cepljenja kocke oz. prizme (Vir: Žarnić, Bosiljkov, Bokan Bosiljkov, 2010/2011)

Cepilna natezna trdnost je dana z enačbo:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times l \times d} \quad (3)$$

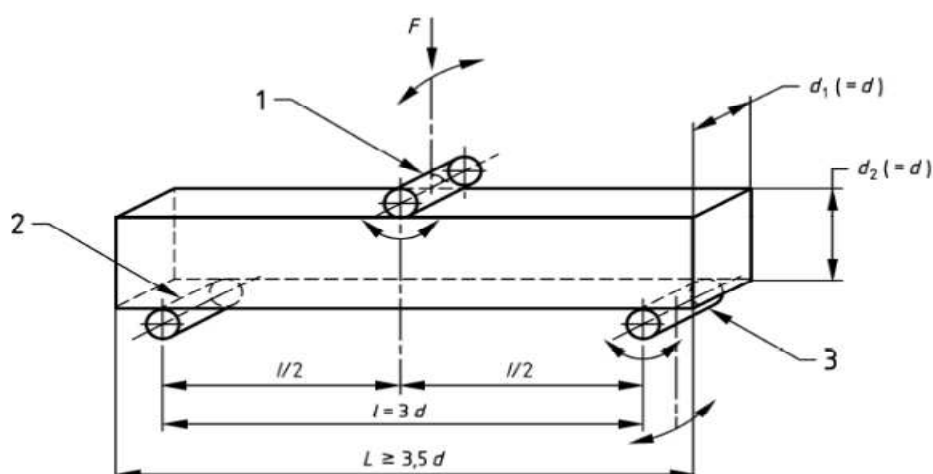
kjer je:

- f_{ct} cepilna natezna trdnost, v MPa;
- F največja sila, v N;
- l dolžina raznosa sile, v mm;
- d nazivna dimenzija prečnega prereza, v mm.

Upogibni preskus

Upogibna natezna trdnost se določa z upogibnih preskusom prizem. Pomembna je pri dimenzioniranju plošč položenih na razmeroma podajno podlago in pri hodnikih. Upogibna natezna trdnost je v sorazmerju s tlačno trdnostjo prizem. Njena velikost predstavlja približno 15% tlačne trdnosti (Žarnić, 2005).

Pri upogibnem preizkusu smo testirali vzorce prizem po standardu SIST EN 12390-5 (2009). Vzorce smo predhodno ustrezno pripravili po enakem postopku kot pri drugih že opisanih preskusih in izmerili njihove dejanske dimenzije.



Slika 23: Položaj podpor in valja za vnos sile pri upogibnem preskusu (vir: SIST EN 12390-5:2009)

Po pravilni namestitvi vzorca v napravo za preskušanje pričnemo z enakomernim obremenjevanjem vzorca vse dokler se preskušanec ne poruši oziroma zlomi. Nato s pomočjo zabeležene največje sile izračunamo upogibno natezno trdnost po izrazu:

$$f_{cf} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2} \quad (4)$$

kjer so:

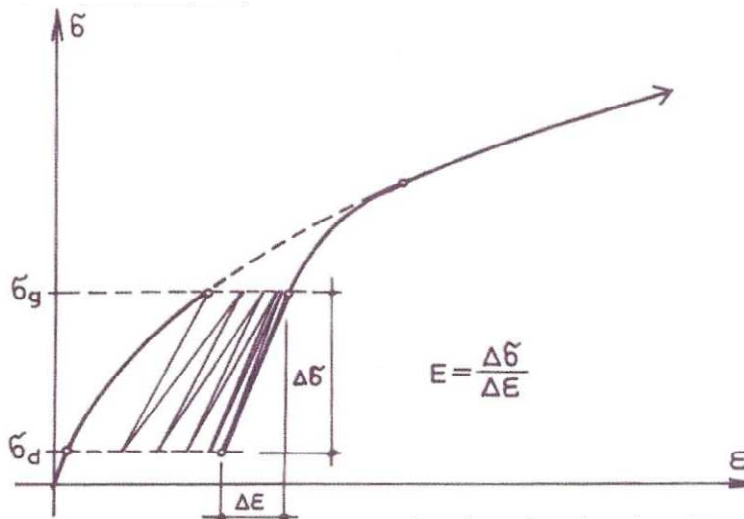
- f_{cf} upogibna natezna trdnost; v MPa,
- F največja obremenitev; v N,
- l razdalja med spodnjima podporama; v mm,
- d_1 in d_2 dimenziji prereza prizme; v mm.

4.4.3 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti smo določali s preiskavo prizem dimenzij 100×100×400mm in valjev dimenzij 100×200mm. V predpisu DIN 1048 Teil 5 (1991) so podani izrazi za izračun elastičnega modula na osnovi sovisnosti med napetostjo in deformacijo pri enosni tlačni obremenitvi. Med preskusom merimo delujočo obtežbo (tlačne napetosti) in pripadajoče deformacije. Na osnovi teh podatkov izrišemo delovni diagram, ki prikazuje sovisnost med napetostmi in deformacijami t.i. σ - ϵ diagram, na podlagi katerega izračunamo statični modul elastičnosti E_c .

Pri preskusih določevanj statičnega modula elastičnosti hočemo izločiti vse ostale deformacije (plastične, viskozne), razen elastičnih, zato se največkrat uporabljajo ravno metode obremenjevanja-razbremenjevanja. Izkazalo se je, da pri cikličnem preskusu funkcija

σ - ε odgovarja premici katere naklon definira elastični modul. Poleg tega se s ponavljanjem ciklusa obremenitev-razbremenitev manjša vpliv tečenja.



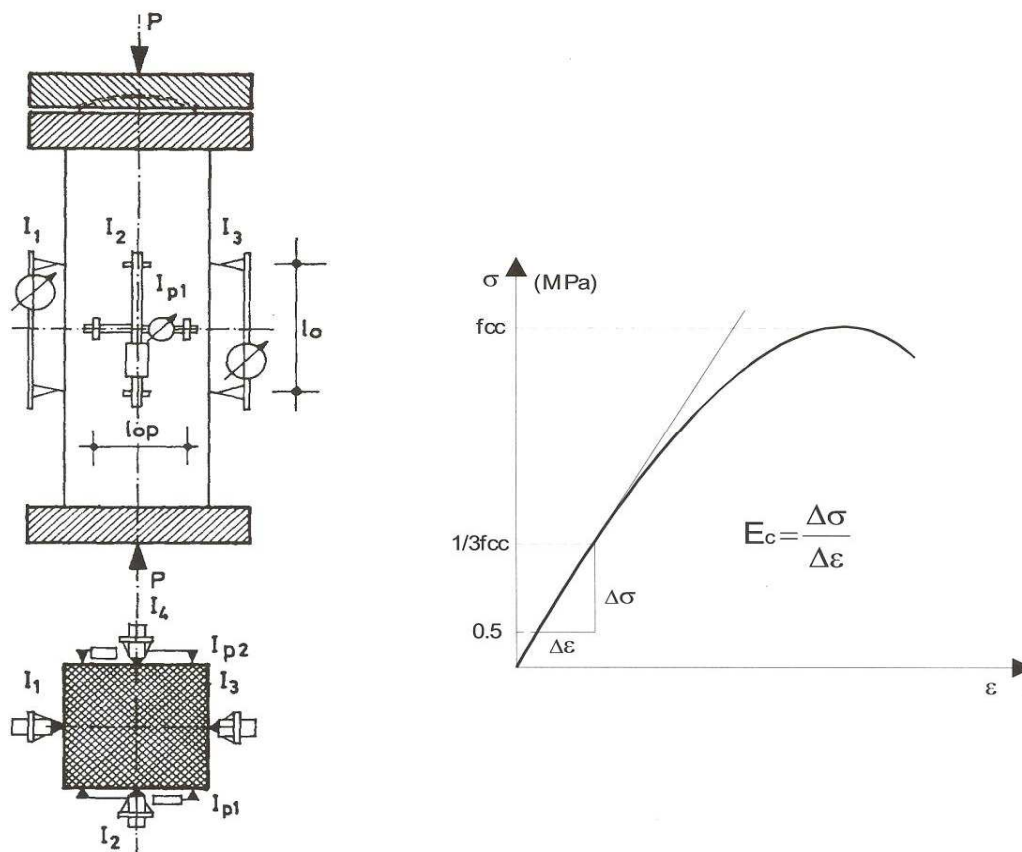
Slika 24: Grafični prikaz stabiliziranja preskušanca s cikličnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem (Vir: Muravljov, 1991)

Preskušancem smo pred preiskavo izmerili dejanske dimenzije in določili njihovo maso. Nato smo nanje nalepili merilne lističe, ki so med preiskavo beleži deformacije preko povezanega računalnika. Preskušance smo v tlačni preši ciklično obremenjevali in razbremenjevali od 0,5 MPa do ocenjene 1/3 njegove tlačne trdnosti s hitrostjo $0,6 \pm 0,4$ MPa. Po petih ciklih obremenjevanja in razbremenjevanja pa smo obtežbo povečevali do tlačne porušitve preskušanca. Na podlagi dobljenih diagramov σ - ε smo po enačbi za sekantni modul elastičnosti (spodaj) izračunali statični modul elastičnosti:

$$E_c = \frac{1/3 f_{cm} - 0,5 \text{ MPa}}{\varepsilon_v(\sigma_c - 1/3 f_{cm}) - \varepsilon_v(\sigma_c = 0,5 \text{ MPa})} \quad (5)$$

Kjer so:

- E_c modul elastičnosti [MPa],
- $\Delta\sigma$ razlika napetosti σ_g - σ_d [MPa],
- $\Delta\varepsilon$ razlika pripadajočih deformacij [%].



Slika 25: Določanje statičnega modula elastičnosti (Vir: Žarnić, idr., 2010/2011)

Na elastični modul betona vpliva veliko parametrov. Moker vzorec ima večji elastični modul kot suh vzorec. Agregat z večjim elastičnim modulom bo prav tako povečal to isto karakteristiko betonu. Tudi oblika zrn agregata in njihova površina vplivata na el. modul betona. Poleg vsega je modul elastičnosti tudi funkcija časa, saj narašča s starostjo betona. Preizkusi so pokazali, da imajo betoni večjih trdnosti tudi večje vrednosti E_c (Muravljov, 1991).

5 LASTNE PREISKAVE

5.1 UPORABLJENI MATERIALI

Vsi materiali, ki smo jih uporabili za namene naših preiskav so slovenskega izvora. Sicer tuji viri navajajo različne recepte za pripravo samozgoščevalnih in lahkovgradljivih betonskih mešanic, vendar pa jih ne moremo kar tako prevzeti in uporabiti, saj obstajajo velike razlike v karakteristikah materialov. Tako moramo te recepte prilagoditi našim uporabljenim materialom (agregat, cement, praškasti delci, kemijski dodatki).

5.1.1 Agregat

Pri naših preiskavah smo uporabili dve vrsti agregata iz domačih nahajališč. To sta drobljen apnenčev agregat in naravni separiran prod odvzet iz reke Drave.

Naravni separiran prod

Za beton S1 smo uporabili t.i. dravski prod. Izbrana zrnavostna sestava in delež frakcij je predstavljen v spodnji preglednici:

Preglednica 5: Zrnavostna sestava naravnega separiranega proda za beton S1

FRAKCIJA	DELEŽ (%)
0/4	50
4/8	15
8/16	35

Verjetno je posledica doseženih slabših mehanskih lastnosti betona S1 (naravni separiran prod) v primerjavi z betonom S2 (drobljenec) tudi v pomanjkanju drobnih frakcij. Namreč, beton S1 ne vsebuje frakcije 0/2 kot jo vsebuje beton S2.

Drobljen agregat

Drobljenec smo uporabili za izdelavo betona S2 in lahkovgradljivega betona (v nadaljevanju L). Tu sta bila sestava in deleži frakcij malo drugačna, vendar pri obeh mešanicah enaka:

Preglednica 6: Zrnavostna sestava drobljenega apnenčevega agregata za betona S2 in L

FRAKCIJA	DELEŽ (%)
0/2	22
0/4	33
4/8	18
8/16	27

5.1.2 Cement

Uporabili smo dve vrsti cementa. Za pripravo samozgoščevalnega betona z drobljenim agregatom (S2) in za pripravo lahkogradljivega betona (L) smo uporabili cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. To je portlandski mešani cement z dvema dodatkoma, apnencem (LL) in žlindro (S) ter trdnostnega razreda 42,5. Namenjen je za najzahtevnejše gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti. Sestavljen je iz vsaj 80% portlandskega klinkerja ostalih največ 20% pa predstavljata mineralna dodatka apnencem in žlindra. V standardu: SIST EN 197-1 so predpisane naslednje njegove lastnosti:

Preglednica 7: Lastnosti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R po standardu SIST EN 197-1 in primerjava z doseženimi povprečnimi vrednostmi (Vir: Internetna stran Salonita Anhovo)

	ZAHTEVE STANDARDA	DOSEŽENE POVPREČNE VREDNOSTI
Kemijske zahteve:		
Vsebnost sulfata	≤4,0%	3,0%
Vsebnost klorida	≤0,1%	0,03%
Mehanske in fizikalne zahteve:		
Zgodnja trdnost (2-dnevna)	≥20,0 MPa	27 MPa
Standardna trdnost (28-dnevna)	42,5 – 62,5 MPa	50 MPa
Čas začetka vezanja	≥60 min	160 min
Prostorninska obstojnost	≤10 min	≤1 min

Dosežene povprečne vrednosti posameznih lastnosti tega cementa so podane na osnovi povprečnih letnih rezultatov, ovrednotenih na osnovi notranjega kontrolnega preskušanja v Salonitu Anhovo. Cement dosega nadstandardne kakovostne lastnosti in se lahko uporablja za najzahtevnejše gradnje, kjer se zahtevajo visoke začetne tlačne trdnosti (za prefabricirane

betonske izdelke, armirane in nearmirane ter prednapete betone, za brizgane betone in za zmrzlinško odporne aerirane betone).

Za pripravo samozgoščevalnega betona s prodnatim agregatom (S1) pa smo uporabili cement CEM II/A-S 42,5R. Sestavljen je iz portlandskega cementa (vsaj 80%) in žindre (največ 20%). Njegove dosežene karakteristike po standardu SIST EN 197-1 so podobne tistim, ki jih dosega prej opisani cement. Tudi ta cement se lahko uporablja za pripravo visokotrdnih betonov namenjenim zahtevnejši gradnji.

5.1.3 Praškasti materiali

Pri samozgoščevalnih mešanicah smo kot dodatni praškasti material uporabili apnenčevo (kamen) moko pridobljeno z odpraševanjem apnenčevega drobljenega kamenega agregata. Za lahkovgradljivo mešanico pa smo delež cementa zamenjali z elektrofitrskim pepelom.

Tako apnenčevo moko kot elektrofitrski pepel smo mešanicam dodali, da bi zmanjšali potrebno količino cementa in hkrati zagotovili ustrezen delež finih delcev, ki jih mešanice za doseganje svojih lastnosti potrebujejo. Istočasno pa se z uporabo takšnih dodatkov, katerih pridobivanje je cenejše od cementa, betonu zniža cena.

5.1.4 Voda

Za betonske mešanice smo uporabili pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

5.1.5 Kemijski dodatki

Uporabili smo superplastifikator nove generacije ter sredstvo za kontrolo viskoznosti, ki sta medsebojno kompatibilna. Sredstvo za kontrolo viskoznosti smo uporabili le izjemoma, če betonska mešanica ni dosegla ustrezne stabilnosti. Oba produkta sta slovenskega porekla.

5.2 SESTAVA BETONSKIH MEŠANIC

5.2.1 Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S1

Mešanica S1 je sestavljena iz naravnega separiranega proda, cementa CEM II/A-S 42,5R, apnenčeve moke, vode iz ljubljanskega omrežja in superplastifikatorja nove generacije slovenskega proizvajalca. Pri preiskavah se nismo lotili projektiranja lastnih betonskih mešanic ampak smo recepte povzeli po že sprojektiranih betonih v laboratoriju FGG.

Sestava betonske mešanice je podana v preglednici:

Preglednica 8: Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S1

SCC-rečni prod:	S1
MATERIALI:	
agregat [kg/m ³]	1700
cement [kg/m ³]	390
apnenčeva moka [kg/m ³]	150
V/C	0,4
superplastifikator [% _{praš.}]	0,70
delež zraka [%]	1,9%

5.2.2 Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S2

Za pripravo mešanice S2 smo uporabili drobljen apnenčev agregat, cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, apnenčevo moko kot dodatni praškasti material, pitno vodo in enak superplastifikator nove generacije slovenskega proizvajalca kot pri mešanici S1. Tudi za sestavo te mešanice smo uporabili že preverjeni recept iz laboratorija FGG.

Sestava samozgoščevalne betonske mešanice je podana v spodnji preglednici:

Preglednica 9: Sestava samozgoščevalne betonske mešanice S2

SCC-drobljen apnenčev agregat:	S2
MATERIALI:	
agregat [kg/m ³]	1590
cement [kg/m ³]	390
apnenčeva moka [kg/m ³]	257
V/C	0,42
superplastifikator [% _{praš.}]	0,53
delež zraka [%]	1,7 do 2,6%

5.2.3 Sestava lahkovgradljive betonske mešanice L

Ta mešanica pa je sestavljena iz drobljenega apnenčevega agregata, cementa CEM II/A-S 42,5R, elektrofiltrskega pepela, vode iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in enakega superplastifikatorja kot pri prejšnjih dveh mešanicah. Pri tej mešanici smo del cementa zamenjali z elektrofiltrskim pepelom.

Sestava mešanice L je predstavljena v preglednici 10:

Preglednica 10: Sestava betonske mešanice L

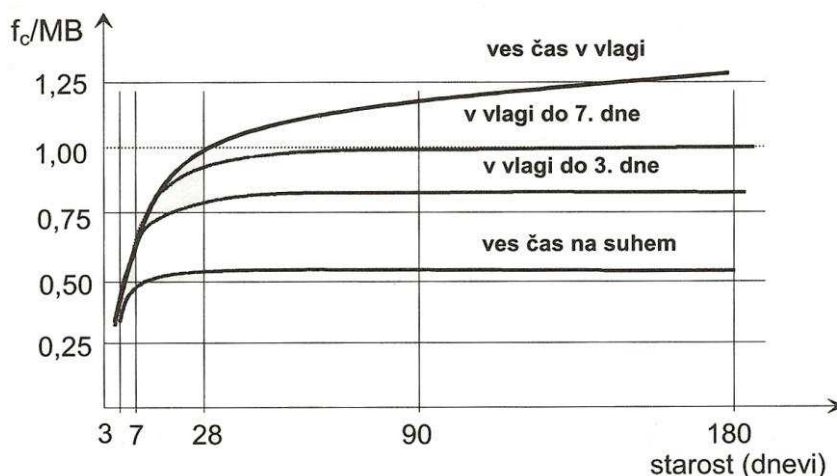
HFC-drobljen apnenčev agregat:	L
MATERIALI:	
agregat [kg/m ³]	1780
cement [kg/m ³]	360
elektrofiltrski pepel [kg/m ³]	70
V/C	0,49
V/V	0,45
superplastifikator [% _{praš.}]	0,70
delež zraka [%]	1,3%

Betonske mešanice smo mešali v protitočnem laboratorijskem mešalniku kapacitete 50 l. Za pripravo ene serije betonskih vzorcev smo potrebovali 30 l betonske mešanice. Najprej smo v mešalniku na suho zmešali agregat, cement in praškasti material, nato smo dodali polovico izračunane vode in pričeli z mešanjem. Po 20 sekundah mehanskega mešanja smo dodali še preostalo vodo zmešano skupaj s superplastifikatorjem in mešali še dve minuti. Po končanem mešanju smo na sveži betonski mešanici naredili preskuse, ki so opisani v poglavju metode preverjanj sveže mešanice. Nato pa smo v pripravljene jeklene kalupe prizem in valjev vlili betonsko mešanico. Pri lahkovgradljivi mešanici smo morali beton zgostiti s paličnim vibratorjem pri samozgoščevalnih mešanicah pa to ni bilo potrebno. Preden pa smo vzorce preskušali po metodah za strjen beton je bilo potrebno veliko pozornosti posvetiti pravilni negi, saj pravilna nega preskušancev znatno pripomore k doseganju boljših mehanskih lastnosti betona.

5.3 NEGA BETONSKIH PREIZKUŠANCEV

Hidracija cementa, ki igra ključno vlogo pri doseganju višjih trdnosti in na splošno zagotavlja boljšo kvaliteto betona, se odvija najhitreje in najbolje, če je vzorec med nego

izpostavljen konstantnemu pritisku vode pri temperaturi 20°C. Take pogoje pa lahko zagotavljamo v laboratoriju. Zato smo vzorce takoj po vgradnji v kalupe pokrili oziroma zaščitili s plastično folijo. Naslednji dan pa smo vzorce razkalupili in jih postavili v posebne kadi napolnjene z vodo. Tako ohranjamo potrebno vlažnost vzorca, da lahko hidratacija cementa poteka v največji meri (Nevil, 1976).



Slika 26: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona (Vir: Žarnić, 2005)

5.4 PREISKAVE NA SVEŽIH BETONSKIH MEŠANICAH

5.4.1 Metoda razleza s posedom

Po veljavnih slovenskih standardih smo sveže betonske mešanice preizkušali po metodi razlez s posedom. Primerjave dobljenih rezultatov posameznih mešanic lahko razdelimo na dva dela, saj sta bili samozgoščevalni mešanici veliko bolj tekoči od lahkovgradljive in njihove rezultate ne moremo direktno primerjati med seboj.

V spodnji preglednici so predstavljeni rezultati preiskave razleza s posedom za samozgoščevalni mešanici. Mešanici sta se po sestavi razlikovali v dodanem agregatu (mešanici S2 je bil dodan drobljen agregat, mešanici S1 pa rečni prod), v količini apnenčeve moke in superplastifikatorja. Iz rezultatov je razvidno, da je takoj po zamešanju, po 10 minutah in tudi po 1 uri mešanica S2 dosegla večji razlez. Verjetno je to posledica dodane večje količine finih delcev, ki pripomorejo k sposobnosti tečenja mešanice, kljub temu, da je imela mešanica S1 v sestavi večjo količino superplastifikatorja. Obe mešanici lahko na podlagi doseženih rezultatov pri razlezu s posedom uvrstimo v razred SF2.

Pri času T_{50} , ko mešanica doseže premer 50 cm pa so vidne večje razlike. Še posebno pri izvedbi preiskave po 60-ih minutah. Mešanica S1 je potrebovala znatno več časa (12 s), da

je dosegla mejo 50 cm. Lahko rečemo, da je njena hitrost deformiranja drastično upadla v primerjavi z mešanico S2. Po časih T_{50} lahko mešanici uvrstimo v VS2 razred viskoznosti. Torej lahko zaključimo, da sta samozgoščevalni mešanici po njihovi konsistenci primerljivi med seboj.

Preglednica 11: Rezultati betonskih mešanic S1 in S2 pri metodi razleza s posedom

LASTNOSTI MEŠANICE S2				
Izvedba preiskav po [min] po zamešanju	0	10	30	60
Razlez s posedom:				
Razlez [mm]	750	735	638	553
Razred razleza s posedom	SF2	SF2	SF1	SF1
T_{50} [sek]	5,0	4,0	5,4	8,3
Razred viskoznosti t_{500}	VS2	VS2	VS2	VS2
T_{ult} [sek]	43,6	48,0	36,25	30,72
Delež zraka [%]:	2,6	-	-	-
LASTNOSTI MEŠANICE S1				
Izvedba preiskav po [min] po zamešanju	0	10	30	60
Razlez s posedom:				
Razlez [mm]	735	750	720	545
Razred razleza s posedom	SF2	SF2	SF2	SF1
T_{50} [sek]	4,5	4,5	5,0	12,0
Razred viskoznosti t_{500}	VS2	VS2	VS2	VS2
T_{ult} [sek]	50	57	52	39
Delež zraka [%]:	1,9	-	-	-



Slika 27: Iz leve proti desni si sledijo slike, ki prikazujejo potek razleza betonske mešanice med preiskavo razleza s posedom

Razultati preiskave razleza s posedom za lahkovgradljivo mešanico so predstavljene v preglednici 12. Mešanica je takoj po zamešanju dosegla razlez 625 mm. Po standardu SIST EN 206-9:2010 jo dosežena vrednost uvršča v razred konsistence SF1 za samozgoščevalne betone. Po 60-ih minutah je njena konsistenca ohranila 70% prvotne vrednosti, kar je zelo dobro, če upoštevamo, da se mora zamešani beton pred vgradnjo običajno transportirati in je ohranjanje dobre sposobnosti tečenja zaželeno. Pri dobljenem razlezu pa je dosegla posed 210 mm, ki se med izvedbami preiskave skoraj ni spreminjal.

Preglednica 12: Rezultati preiskave razleza s posedom za mešanico L

LASTNOSTI MEŠANICE L				
Izvedba preiskav po [min] po zamešanju	0	10	30	60
Posed in razlez s posedom:				
Posed [mm]	210	210	230	210
Razlez s posedom [mm]	625	580	580	445
T _{uit} [sek]	34,8	31,3	36,5	16,5
Delež zraka [%]:	1,3	-	-	-

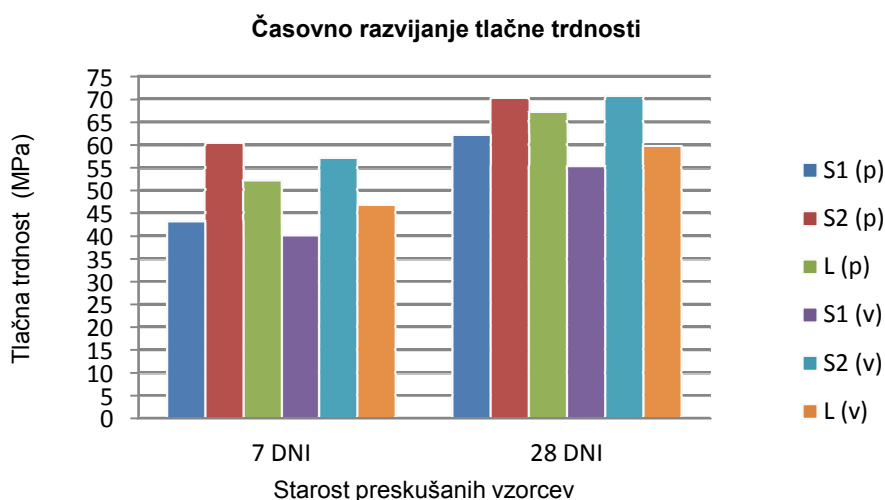
5.5 PREISKAVE NA STRJENEM BETONU

5.5.1 Tlačna trdnost

Tlačno trdnost betona (f_{cc}) smo preverjali na vzorcih valjev (dimenzij 10×10×20cm) in prizem (dimenzij 10×10×40cm) po postopku predpisanem v standardu SIST EN 12390-3 (2002). Rezultati so predstavljeni v spodnji preglednici in nazorno prikazani na diagramu časovnega razvijanja tlačne trdnosti.

Preglednica 13: Primerjava povprečnih tlačnih trdnosti valjev in prizem doseženih pri starosti 7 in 28 dni

Betonska mešanica	VALJI		PRIZME	
	7 dni (MPa)	28 dni (MPa)	7 dni (MPa)	28 dni (MPa)
S1	40,1	55,2	43,1	62,1
S2	57,1	70,6	60,3	70,1
L	46,7	59,7	52,1	67,1



Slika 28: Časovno razvijanje tlačne trdnosti na betonskih preskušancih starosti 7 in 28 dni

V povprečju so tlačne trdnosti pri obeh oblikah vzorcev pri starosti 7 dni dosegale od 70-85% 28-dnevne tlačne trdnosti. Največjo doseženo trdnost je imela mešanica S2 tako pri starosti 7 dni kot 28 dni. S2 in S1 sta imeli približno enako v/c razmerje (0,4). Razmerje med tlačno trdnostjo in v/c razmerjem je v mnogih literaturah opisano kot: manjše v/c razmerje – večja tlačna trdnost. Vendar pa je S2 vsebovala večjo količino apnenčeve moka, ki je verjetno pripomogla k večji trdnosti v primerjavi z S1. Na večjo tlačno trdnost vplivata tudi izbira agregata in dodani fini delci. Namreč v mešanici S2 in L smo uporabili drobljen agregat, ki z zaklinjenjem zrn med seboj povzroča večjo odpornost na obremenitev. Apnenčeva moka, ki smo jo dodali mešanici S1 in S2 poveča gostoto hidratizirani pasti in s tem omogoči doseganje višjih trdnosti betona. Višje tlačne trdnosti mešanice L pa lahko kljub velikemu v/c razmerju (0,49) pripisujemo dodatku elektrofiltrskega pepela, ki zaradi svoje kemijske sestave (pucolanska reakcija) betonu poveča trdnost.

Pri istih mešanicah je bila na valjastih vzorcih dosežena manjša tlačna trdnost (90-95%) od tistih na prizmah. Oblika preskušanca očitno vpliva na dosežene trdnosti. Bolj vitki vzorci imajo po pravilu manjšo trdnost. Pri naših preiskavah so bili vzorci valjev bolj vitki, saj smo prizemske vzorce preskušali po modificirani metodi po JUS-u, kjer se uporablja polovica prizme dobljena iz preskusa upogibne natezne trdnosti. Lahko rečemo da smo preskušali vzorce kock z robom 10 cm in valjev premera 10 cm.

Glede na to, da je mešanica L vsebovala bistveno manjši delež dodatnega praškastega materiala (elektrofiltrski pepel) in imela visoko v/c razmerje (0,49) ter tudi višje vodo-vezivno razmerje (0,45) v primerjavi s S1 in S2, je dosegala visoke tlačne trdnosti. In to kljub temu, da smo morali mešanico L med vgrajevanjem v kalupe tudi vibrirati, za razliko od samozgoščevalnih mešanic S1 in S2. Vibracije pa neugodno vplivajo na beton, ker se med

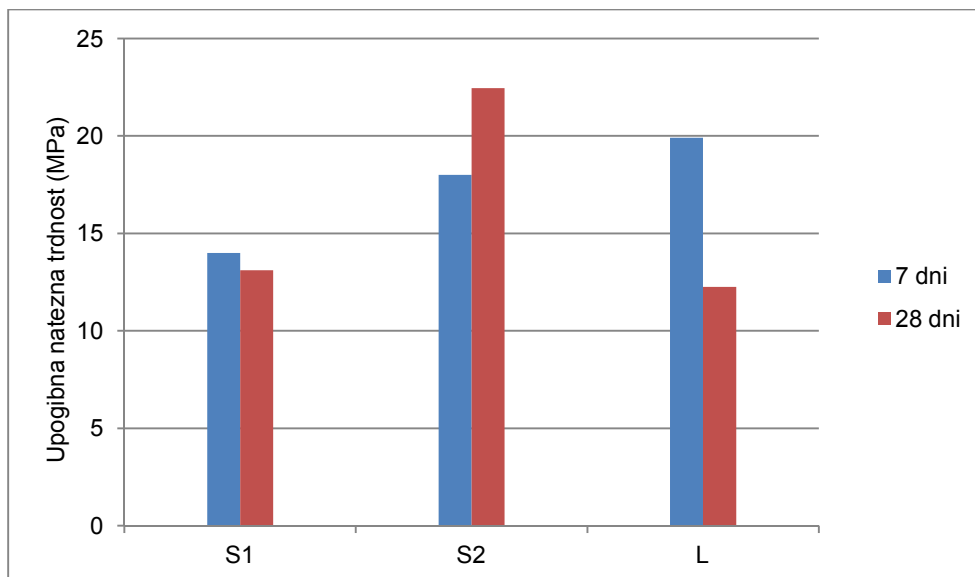
vibriranjem ruši notranja struktura betona. Ta pa ima za posledice zmanjšanje mehanskih lastnosti betona.

5.5.2 Natezna trdnost

Natezno trdnost smo določali na preskušancih prizem in sicer po dveh postopkih, ki sta predpisana v standardu (SIST EN 12390-6:2010 in SIST EN 12390-5:2009). Natezna trdnost betona je sicer znatno manjša, saj predstavlja le okoli 10% tlačne trdnosti, vendar pa je zaradi tega ne moremo kar zanemariti. Pomembna je pri ugotavljanju oblikovanja in širjenja razpok v betonu, ki nastanejo kot posledica prevelike lokalne natezne obremenitve.

Upogibna natezna trdnost

Vzorci prizem smo po namestitvi v napravo za preskušanje začeli izpostavljati konstantni obtežbi do zloma oz. preloma preskušanca. Rezultati preskusa so podani v spodnjem diagramu:



Slika 29: Povprečna upogibna natezna trdnost betonov starih 7 in 28 dni

V diagramu so predstavljene vrednosti upogibne natezne trdnosti prizem pri starosti 7 in 28 dni. Lahko vidimo, da ima pri starosti 7 dni največjo upogibno natezno trdnost (20MPa) ravno vibrirana lahkogradljiva mešanica L, ki je imela v svoji sestavi drobljen agregat in namesto deleža cementa elektrofitrski pepel. Drobljen agregat pa je imela v svoji sestavi tudi mešanica S2. Glede na to, da sta obe samozgoščevalni mešanici vsebovali apnenčevo

moko kot dodatni praškasti material in so se njuni rezultati zelo razlikovali, lahko sklepamo, da je drobljen agregat bistveno pripomogel k doseganju visokih natezних trdnosti.

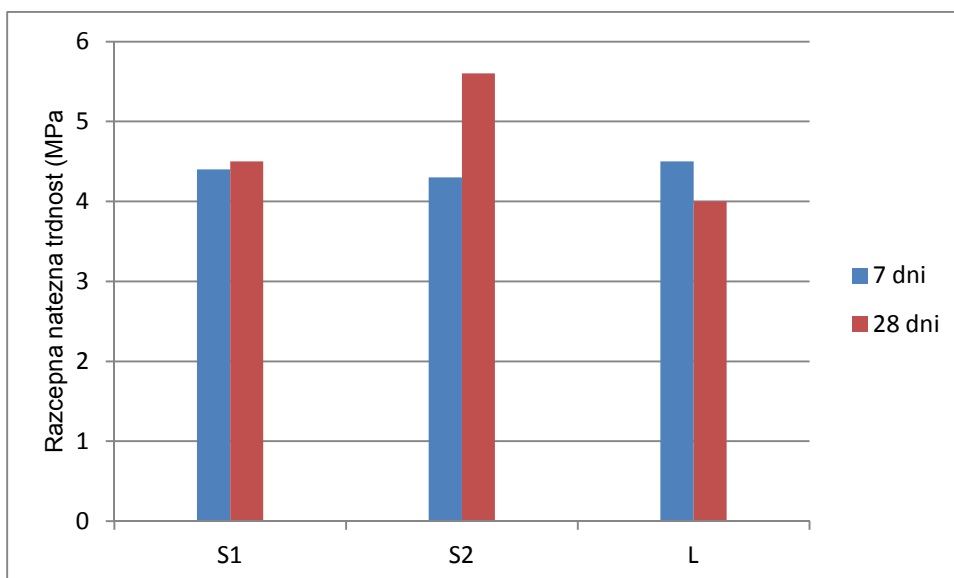
Moramo pa izpostaviti rezultate 28 dnevni vzorcev mešanice L. Vrednosti so bile manjše kot pri 7 dnevni vzorcih, kar je nenavadno, saj praviloma trdnost s starostjo narašča. Do padca natezne trdnosti lahkogradljivega betona je lahko prišlo zaradi nedoslednega dodajanja sestavin v mešalec. Med mešanjem smo ugotovili, da smo v mešanico zamešali premajhno količino cementa, ki smo ga nato naknadno dodali. Manjšo doseženo vrednost natezne trdnosti pri vzorcih starih 28 dni v primerjavi s 7 dnevnimi vzorci je imela tudi mešanica S1. Tu pa bi padec natezne trdnosti lahko pripisali nepravilni namestitvi vzorca v napravo za preskušanje.

Edino mešanici S2 se je natezna trdnost s starostjo povečala (to je mešanica, ki ima vključen največji delež dodatnih praškastih delcev). Vendar pa prave primerjave med mešanicami pri 28 dnevni vzorcih ne moremo narediti, saj mešanici S1 in L nista bili ustrezno pripravljene ali preskušane. Torej, če bi hoteli primerjati vse tri mešanice pri 28 dnevni vzorcih, bi morali ponovno zamešati obe mešanici.

Drži tudi teza, da sta tlačna trdnost in natezna trdnost v sorazmerju, saj je pri obeh preizkusih ravno mešanica S2 dosegla najvišje vrednosti. Vrednosti dobljene po tej metodi predstavljajo okoli 15% tlačne trdnosti pri starosti betona 7 dni in okoli 10% tlačne trdnosti betona starega 28 dni. Se pravi, da je preskušancem s starostjo malo bolj naraščala tlačna trdnost kot natezna trdnost.

Razcepna natezna trdnost

Prizme, ki smo jih predhodno preizkušali po metodi upogibne natezne trdnosti smo nato preskusili še po metodi razcepne natezne trdnosti. Po tej metodi smo dobili manjše vrednosti kot smo jih pri prejšnji metodi, saj naj bi te vrednosti predstavljale okoli 7% tlačne trdnosti. To se je pri preskusih tudi pokazalo.



Slika 30: Povprečna razcepna natezna trdnost betonov starih 7 in 28 dni

Tudi tu je razvidno, da je edino mešanici S2 s starostjo natezna trdnost naraščala. Tako kot pri upogibni natezni trdnosti se je tudi tukaj pokazalo, da je mešanica L neprimerna, saj ji vrednosti razcepne natezne trdnosti s starostjo padajo. Pri mešanici S1 pa je bilo s starostjo komaj zaznati porast natezne trdnosti. Vzroki so verjetno enaki kot že opisani pri upogibni natezni trdnosti.

Pri starosti 7 dni so dosegale vse tri mešanice podobne vrednosti. Najvišje vrednosti je dosegala mešanica L.

V spodnji preglednici so podane vrednosti nateznih trdnosti pri 28 dni starem betonu, dobljenih po obeh metodah, faktor kot razmerje med upogibno in razcepno natezno trdnostjo in preračunana natezna trdnost betona po izrazu za oceno osne natezne trdnosti betona f_{ct} iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005):

$$F_{ct} = 0,9 \times f_{ct, sp} \quad (6)$$

Preglednica 14: Vrednosti nateznih trdnosti posameznih mešanic pri betonskih preskušancih starosti 28 dni

Mešanica	Upogibna natezna trdnost (MPa)	Razcepna natezna trdnost (MPa)	Faktor	Natezna trdnost (MPa)
S1	5,9	4,5	1,31	4,05
S2	10,1	5,6	1,8	5,04
L	5,5	4	1,38	3,6

Zaradi različnega načina delovanja obtežbe na preskušanece tekom preskusa upogibne in razcepne natezne trdnosti se pojavijo razlike v doseženih nateznih trdnosti. Lahko pa vidimo, da se največja razlika pojavi pri mešanici S2, kjer dosežena razcepna natezna trdnost predstavlja le približno 50% dosežene natezne trdnosti pri upogibu.

Sklepamo lahko, da ima izbira vrste agregata velik vpliv na natezno trdnost, saj sta mešanici L in S2, ki sta vsebovali drobljen agregat, dosegali višje natezne trdnosti po obeh metodah. Še posebno je ta razlika vidna pri 28 dni starih vzorcih.

5.5.3 Statični elastični modul

Lastne preiskave so zajemale tudi eksperimentalne preiskave določanja σ - ϵ diagramov pri enoosni tlačni napetosti in izračun statičnega modula elastičnosti. Preskus smo izvajali na prizmah dimenzij 10×10×40 cm ter na valjih s premerom 10 cm in višino 20 cm.

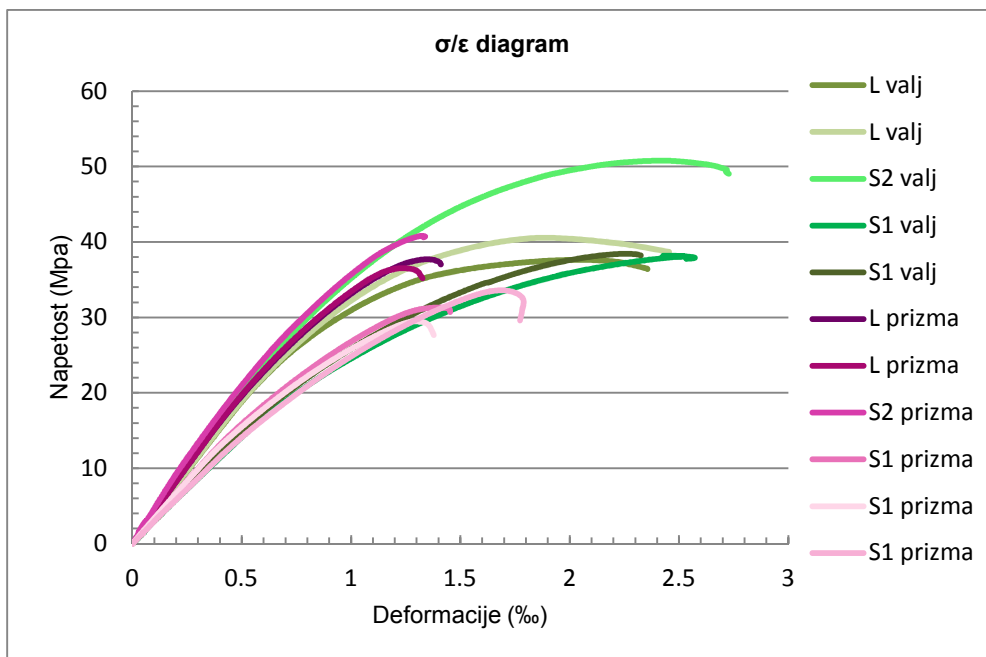
Številne preiskave tujih raziskovalcev so pokazale, da ima oblika (geometrija) vzorca velik vpliv na obliko σ - ϵ diagrama.

Bolj vitki vzorci bodo izkazovali manjšo doseženo tlačno trdnost in deformacijo doseženo pri tem, t.i. duktilnost. Verjetno zaradi uklona preskušanca ali pa zaradi prepoznega ali prepočasnega nižanja tlačne sile s preizkuševalnim strojem (Duh, 2008).

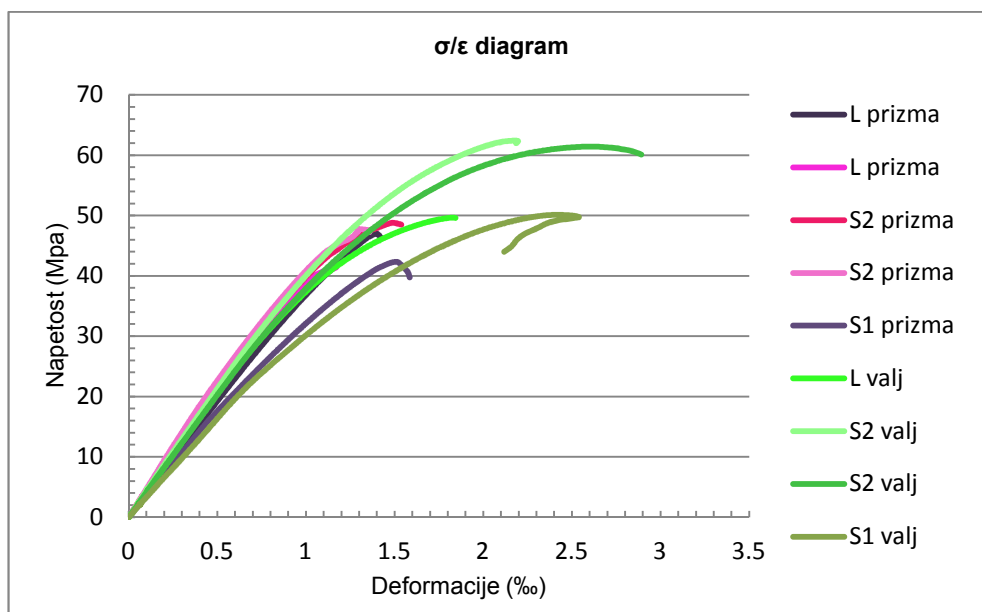
Na elastični modul pa ima velik vpliv tudi agregat. Betoni pripravljene z drobljenim agregatom dosegajo višje vrednosti elastičnega modula od betonov pripravljenih z naravnim separiranim prodrom. Pričakujemo lahko, da bodo rezultati mešanic L in S2 boljši.

Poudariti je treba, da je samo rokovanje z vzorci pred izvedbo preiskave zelo pomembno. Merilne lističe smo na vzorce lepili ročno, kjer je prihajalo do napak, ki pa so se prepoznale šele med samim preskusom, ko nepravilno pripravljene vzorci niso dosegali rezultatov katere bi lahko uporabili za nadaljnjo analizo. Torej lahko rečemo, da ima pomembno vlogo tudi človeški faktor. Zato se v prikazanih rezultatih v nadaljevanju ponekod pojavlja manj vzorcev (rezultatov).

Zgornja dejstva nakazujejo tudi rezultati naših preiskav. Na naslednjih slikah so podani diagrami betonov starosti 7 in 28 dni, ki podajajo sovisnosti med napetostmi in deformacijami.



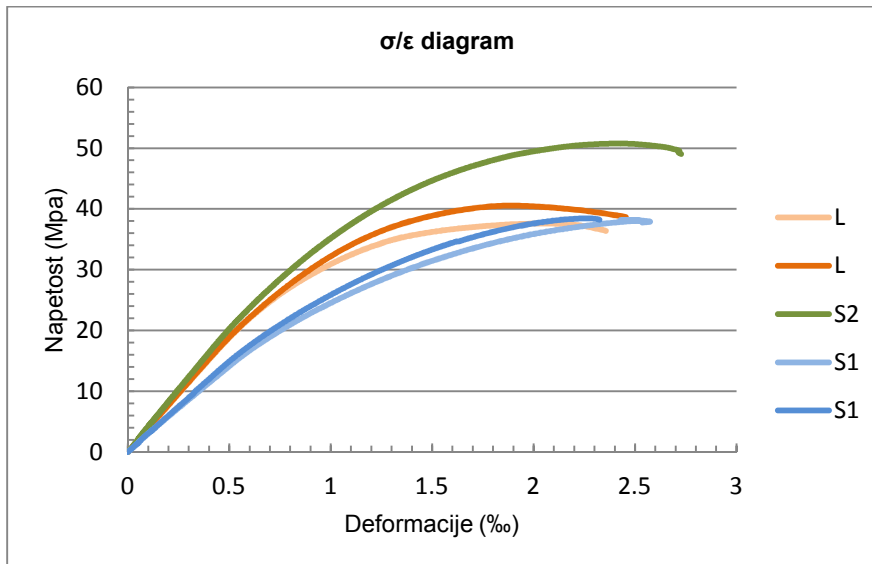
Slika 31: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami dobljene na 7 dni starih betonskih preskušancih



Slika 32: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami dobljene na 28 dni starih betonskih preskušancih

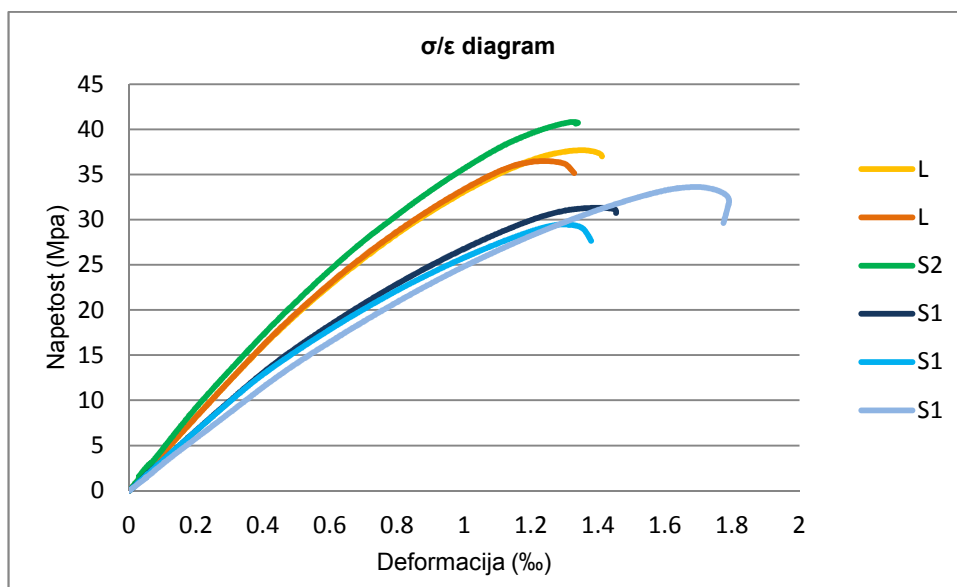
Na obeh diagramih so vzorci prizem v vijoličnih odtenkih, vzorci valjev pa v zelenih odtenkih barve. Združeni so vsi reprezentativni vzorci vseh treh mešanic. Iz dobljenih diagramov lahko vidimo, da imajo prizemski preskušanci manjšo duktilnost. Na splošno so se, tako pri mlajšem kot starejšem betonu, valjasti vzorci izkazali za bolj duktilne. To je posledica bolj vitke geometrijske oblike prizemskih preskušancev, katerih razmerje med višino in širino je bilo enako 4 ($h_{pr}/b_{pr}=4$). Valjasti vzorci so se izkazali za bolj deformabilne od prizemskih. Pri

7 dni starih vzorcih so dosegali deformacije velike od 0,23 do 0,27% pri betonih starosti 28 dni pa je bil razpon deformacij večji, od 0,16 do 0,3%. Prizemski vzorci pa niso presegli meje 0,19%.



Slika 33: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 7 dni dobljene na valjih

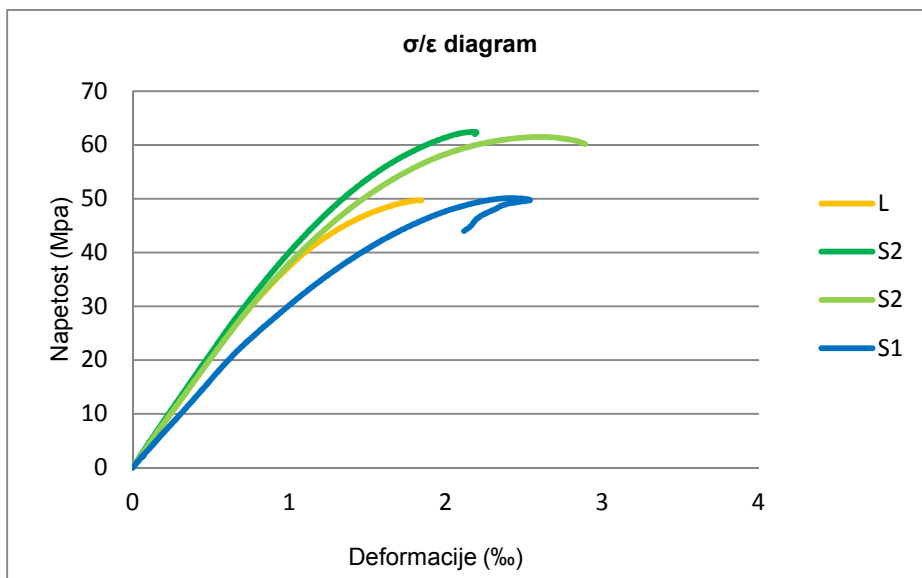
Največje deformacije (2,7‰) in tudi najvišje dosežene tlačne napetosti pri dani deformaciji (50,7MPa) je dosegla mešanica S2. Deformacije mešanic L in S1 pa so bile približno enake, razlikovale so se samo največje vrednosti tlačne napetosti dosežene pri teh deformacijah. Na splošno so bili valji starosti 7 dni podobno deformabilni. Deformacije so se gibale med 2,4 do 2,7‰. Večje razlike so bile le pri doseženih tlačnih trdnostih, kjer izstopajo rezultati mešanice S2, ki je dosegla za najmanj 10 MPa večjo tlačno trdnost kot ostali dve mešanici.



Slika 34: Sovisnosti med napetostmi in deformacijami za betone starosti 7 dni dobljene na prizmah

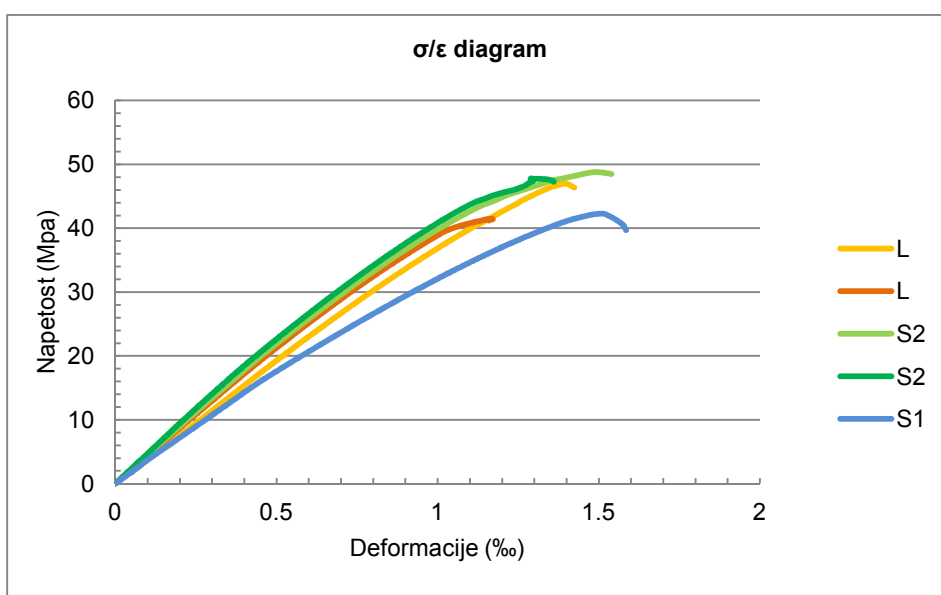
Pri prizmah ni bilo večjih razlik pri doseženih deformacijah, saj so se deformacije, z izjemo enega preskušanca, pri vseh treh mešanicah gibale v intervalu 1,3 -1,4‰. Na splošno so bile prizme mešanice S1 najbolj deformabilne, vendar so tudi tukaj, tako kot pri valjih, razlike majhne. Lahko izpostavimo en vzorec mešanice S1, ki je izstopal v primerjavi z drugimi vzorci enake in druge mešanice. To anomalijo bi lahko pripisali vitkosti vzorca, ki močno vpliva na dosežene rezultate. Vpliv agregata lahko izključimo, ker je bila ravno mešanica S1 pripravljena z naravnim separiranim prodom. Po pravilu naj bi imel najbolj ugoden vpliv na duktilnost drobljeni agregat. Največje tlačne trdnosti pa je dosegala mešanica S2, vendar se tukaj ne opazi tolikšna razlika med tlačnimi trdnostmi, kot se je pokazala pri valjih.

Iz slik 32 in 33 je razvidno, da je mešanica S2 (zelene barve) dosegala višje tlačne trdnosti, na valjih pa tudi pripadajoče deformacije, kot preostali dve mešanici, verjetno zaradi vključitve večjega deleža apnenčeve moke in bolj homogenih lastnosti samozgoščevalne mešanice. Čeprav je tudi mešanica S1 (modre barve) samozgoščevalna je v njeni sestavi bistveno manj apnenčeve moke, ki očitno doprinese velik delež k duktilnosti betona. Mešanici L (oranžne barve) in S1 (modre barve) sta imeli podobne končne deformacije, vendar je mešanica L dosegla višjo tlačno trdnost. Tlačne trdnosti in deformacije so bile na splošno večje pri valjih kot pri prizmah. Pričakovano so bile dosežene maksimalne tlačne trdnosti prizem in pripadajoče deformacije v povprečju za 20% manjše od vrednosti dobljenih na valjih.



Slika 35: Sovisnosti med napetostni in deformacijami za betone starosti 28 dni dobljene na valjih za različne betonske mešanice

Mešanica S2 se je tudi pri betonskih valjih starosti 28 dni izkazala za najboljšo, tako po deformabilnosti kot po doseženih tlačnih trdnostih. V primerjavi z ostalima mešanicama S1 in L je dosegala 10MPa višje tlačne trdnosti, v primerjavi z mešanico L pa tudi skoraj dvakrat večje deformacije. Mešanica S1 pa je v primerjavi z mešanico L dosegla večje deformacije pri podobni doseženi največji tlačni trdnosti. Razlog je nižji modul elastičnosti, kot posledica vključitve zaobljenega prodnatega agregata.



Slika 36: Sovisnosti med napetostni in deformacijami za betone starosti 28 dni dobljene na prizmah za različne betonske mešanice

Med rezultati dobljenimi na prizmah pa ni bilo opaziti posebno velikih razlik, tako pri deformacijah kot pri tlačnih trdnostih. Tudi tukaj se je mešanica S2 izkazala za najboljšo.

Vendar, v primerjavi z vrednostmi dobljenimi na valjih, so te vrednosti dosti nižje. Največja tlačna trdnost dobljena na prizmah je bila za več kot 10MPa manjša od tiste pri valjih, deformacije pa skoraj za polovico manjše.

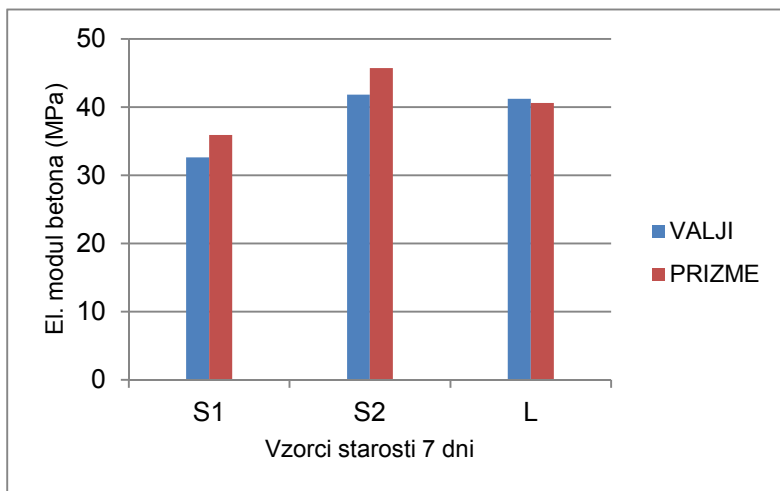
Tudi na 28-dnevnih betonih je mešanica S2 dosegla najboljše rezultate. Pri vzorcih valjev se dobro vidi razlika v deformacijah med samozgoščevalnimi S1, S2 ter lahkogradljivo mešanico L. V primerjavi z rezultati doseženimi pri vzorcih starosti 7 dni se največje razlike opazijo pri deformabilnosti mešanice L. Pri starosti 7 dni je dosegala podobne rezultate kot mešanica S1, pri starosti 28 dni pa je imela najmanjše dosežene deformacije. Mogoče se tudi tukaj, tako kot pri vrednostih natezne trdnosti, pozna vpliv nedoslednega dodajanja sestavin v mešalec (naknadno dodana količina cementa), ki je neugodno vplival na razvoj duktilnosti lahkogradljivega betona. Na splošno lahko trdimo, da so vzorci valjev bolj reprezentativni.

V spodnji preglednici so predstavljene vrednosti statičnega elastičnega modula 7 in 28 dni starih betonov. Mešanica S2 je tako na vzorcih valjev kot prizem dosegla največje vrednosti statičnega elastičnega modula. Kar pomeni, da tudi ti rezultati potrjujejo že izrečeno ugotovitev, da je imela samozgoščevalna mešanica S2 dobre sposobnosti deformiranja in dobro homogenost, stabilnost strukture, ki določa tudi mehanske lastnosti strjenega betona. Porast statičnega elastičnega modula s starostjo pa se je najmanj poznal pri mešanici L, ki ni samozgoščevalna. Izgleda, da je bilo pri tem betonu naraščanje elastičnega modula najhitrejše ravno v prvih 7-ih dneh nato pa se je umirilo. Vendar je kljub temu dosegla višji elastični statični modul kot druga samozgoščevalna mešanica S1.

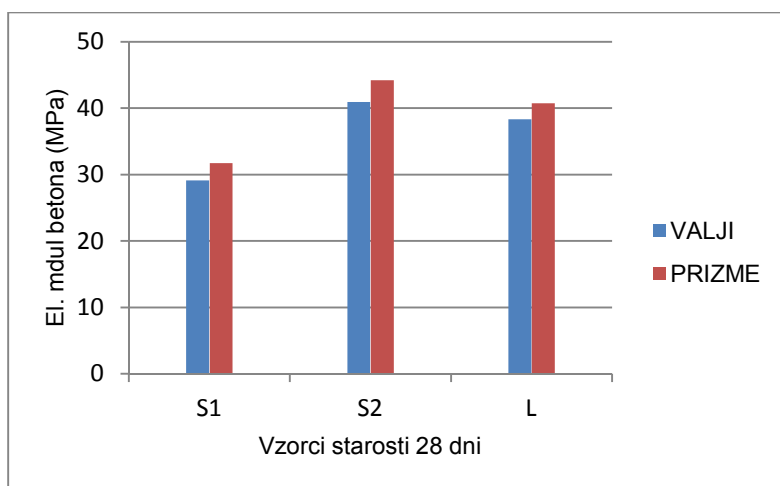
Preglednica 15: Statični elastični modul 7 in 28 dni starega betona

	VZORCI PRIZEM						VZORCI VALJEV					
	7 DNI			28 DNI			7 DNI			28 DNI		
Betonske mešanice	L	S1	S2	L	S1	S2	L	S1	S2	L	S1	S2
$\sigma_{c,max}$ (MPa)	36,5	31,5	40,8	44,1	42,3	48,3	38,5	38,2	50,7	49,6	50,1	61,9
Ecc (MPa)	40,7	31,7	44,2	40,6	35,9	45,7	38,3	29,1	40,9	41,2	32,6	41,8

V stolpčnih grafikonih (slika 36) so predstavljene vrednosti elastičnega modula betona dobljene na vzorcih prizem in valjev pri starosti betona 7 in 28 dni.



a)



b)

Slika 37: Elastični modul betona na vzorcih prizem in valjev; a) starosti 7, b) 28 dni

Iz rezultatov je razvidno, da ima velik vpliv na doseganje elastičnega modula betona izbran agregat. Namreč, mešanici S2 in L sta imeli v svoji sestavi drobljen agregat in sta tako pri zgodnji starosti kot pri 28 dni starih betonih dosegali višje module elastičnosti. Dodana apnenčeva moka, ki sta jo vsebovali samozgoščevalni mešanici pa očitno nima tako velikega vpliva, saj je med njunimi vrednostmi kar velika razlika.

Tudi tukaj lahko vidimo, da je oblika preskušanca vplivala na dobljene vrednosti. Tako pri betonih starosti 7 kot 28 dni so prizme dosegale višje vrednosti (večje razmerje med višino in širino preskušanca). Prizme so pri obeh starostih dosegale od 5 do 15% višje elastične module od valjev. Kot vidimo, ima oblika preskušanca pri elastičnem modulu ravno obratni učinek kot pri duktilnosti. Za bolj duktilne betone veljajo geometrijsko manj vitki vzorci, v našem primeru so bili to valji.

Lahko zaključimo, da se je za najbolj duktilno mešanico izkazala mešanica S2. Na splošno je skozi vse preiskave dosegala najboljše mehanske lastnosti v primerjavi z drugima dvema. Izgleda, da je sestava mešanice S2 najbolj optimalna. Dodan velik delež apnenčeve moke in drobljen agregat (ne najmanjše v/c razmerje) mešanico S2 naredita bolj stabilno in homogeno, ter s svojimi dobrimi reološkimi lastnostmi v svežem stanju privedeta do boljših mehanskih lastnosti betona v primerjavi z drugo samozgoščevalno in lahkovgradljivo mešanico.

6 SKLEP

Z zamenjavo deleža cementa s praškastimi delci (apnenčeva moka, elektrofiltrski pepel) so se izboljšale mehanske karakteristike betona. Samozgoščevalna mešanica, ki je vključevala večjo količino praškastih delcev je dosegala večje trdnosti. Poleg tega je cena apnenčeve moke, ko gre za moko pridobljeno z odpraševanjem drobljenega agregata, razmeroma enostavno in poceni. Tako apnenčeva moka kot elektrofiltrski pepel sta, z vidika izpustov CO₂ v okolje, tudi manj oporečna kot cement.

Obe samozgoščevalni mešanici sta pri preiskavi razleza s posedom takoj po zamešanju dosegli razlez večji od 700 mm, kar nam pove, da sta imeli obe mešanici dobro sposobnost deformiranja, saj so imeli po "razkalupljanju" vzorci popolnoma gladko površino in zelo ostre robove (prevzeli so obliko kovinskega opaža). Površina vzorcev lahkogradljive mešanice pa ni bila tako gladka, kljub temu, da smo jo med vgrajevanjem v kalupe ročno vibrirali.

Dobra konsistenca sveže samozgoščevalne mešanice se je odražala tudi pri vrednostih tlačne trdnosti. Namreč, samozgoščevalna mešanica z večjim deležem apnenčeve moke in drobljenim agregatom je imela najvišje tlačne trdnosti. Tako pri starosti 7 dni kot 28 dni. Pri lahkogradljivi mešanici pa so dosežene visoke tlačne trdnosti, kljub relativno visokemu v/c razmerju, verjetno posledica vključitve elektrofiltrskega pepela. Na splošno so preskušanci prizemskih oblik dosegali večje tlačne trdnosti. Vendar je treba poudariti, da smo te vzorce preskušali po modificirani metodi, kjer so imeli vzorci dimenzije kock (10×10 cm), saj smo jih predhodno porušili že pri preskusu upogibne natezne trdnosti. Dimenzije preskušance oz. njihova vitkost vidno zmanjša tlačno trdnost betonu. V našem primeru so vzorci valjev, katerih razmerje med višino in širino je bilo enako 2, dosegali v povprečju manjše tlačne trdnosti. Pri vzorcih starih 7 dni je bila ta razlika 3MPa pri starosti 28 dni pa 5MPa.

Natezno trdnost na vzorcih prizem smo preverjali po dveh metodah. Ocenjevali smo natezno razcepno trdnost in natezno upogibno trdnost. Natezne upogibne trdnosti so bile višje od razcepnih nateznih trdnosti. Ker gre za dva različna mehanizma obremenjevanja vzorca so tudi rezultati pričakovano različni. Pri obeh preskusih je samozgoščevalna mešanica z večjim deležem apnenčeve moke in drobljenim agregatom dosegala najvišje natezne trdnosti. Izkazalo se je tudi, da je bila to edina mešanica kateri je natezna trdnost s starostjo naraščala. Pri obeh drugih mešanicah je natezna trdnost s starostjo upadala ali pa je ostala približno enaka. Kot sem že v poglavju natezne trdnosti pri lastnih preiskavah omenila, smo mešanici L med mešanjem naknadno dodali večjo količino cementa, saj smo se v začetku zmotili pri določevanju skupne mase cementa, kar je rezultiralo v slabših doseženih rezultatih pri nateznih trdnostih, elastičnem modulu in pri sovisnostih med napetostmi in deformacijami. Lahko sklepamo, da je zaradi kombinacije vključene večje količine apnenčeve moke,

drobljenega agregata in nizkega vodo-cementnega razmerja samozgoščevalna mešanica S2 dosegala najboljše rezultate.

Modul elastičnosti je po navedbah v literaturi močno odvisen od uporabljenega agregata. V našem primeru je največje vrednosti elastičnega modula dosegla mešanica S2, ki je bila narejena z drobljenim agregatom. Tudi mešanica L je dosegla dobre rezultate in je prav tako vsebovala drobljen agregat. Najnižje vrednosti pa so dosegli vzorci mešanice S1, ki je imela vključen naravni separiran prod. Vendar pa je ravno slednja mešanica beležila največji porast elastičnega modula s starostjo. Razlike so se pokazale tudi med rezultati, ki so bili dobljeni na prizemski in valjastih preskušancih. Prizemski vzorci so dosegali v povprečju večje elastične module. Za bolj duktilne pa so se izkazali vzorci valjev.

RILEM v svojih zadnjih poročilih navaja, kot največje razmerje med višino in širino preskušanca $h/b=2$ oziroma še natančneje priporoča prizme dimenzij $10 \times 10 \times 20$ cm in valje s premerom 10 cm in višino 20 cm (Duh, 2008). Naši vzorci prizem pa so bili dimenzij $10 \times 10 \times 40$ cm, valjasti vzorci pa takšnih dimenzij kot jih navaja RILEM. Tu so dimenzije vzorcev močno vplivale na rezultate. Pri prizemskih vzorcih je prihajalo do predčasne porušitve zaradi uklona. Tako je bila njihova deformabilnost bistveno manjša.

VIRI

Beton - tehnično poročilo,

http://www.na.graceconstruction.com/custom/concrete/downloads/tb_1500b.pdf (Pridobljeno 20.1.2012).

Birk, I. 2010. Odpornost proti podoru vode za lahkovgradljiv beton iz drobljenega apnenčevega agregata. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 65 str.

Bridge technology,

<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/scc.htm> (Pridobljeno 20.1.2012).

Cerovšek, I. 2003. Samozgoščevalni betoni – sovisnosti med napetostmi in deformacijami od zgodnjih do karakteristične starosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 65 str.

Cimprerman, L. 2008. Vpliv konsistence in deleža zraka v svežem betonu na značilnosti zračnih por v strjenem betonu. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 103 str.

Duh, D. 2003. Obdelavnost in mehanske karakteristike aeriranih samozgoščevalnih betonov iz domačih materialov. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 100 str.

Duh, D. 2008. Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko. Doktorska disertacija. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 200 str.

JUS.U.M1.025:1982. Beton – Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom. Zbirka jugoslovenskih standarda za primenu pravilnika BAB 87 o tehničkim normativima za beton i armirani beton. Simpozijum SDGKJ. Dubrovnik, 25.-27. April 1989. Beograd, JUDIMK, SDGKJ: str. 266-268.

Kodelja, M. 2009 Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpnih betonov. Diplomski naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 108 str.

Laferge cement d.o.o., Gradbeni materiali – Cementi,

www.lafarge.si (Pridobljeno 20.1.2012).

Lastnosti strjenega betona,

http://www.cege.ucl.ac.uk/_data/assets/pdf_file/0005/3596/task4.pdf (Pridobljeno 20.1.2012).

Muravljev, M. 1991. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Gradževinska knjiga: 451 str.

Nevil, A. M. 1976. Svojstva betona. Beograd. Gradževinska knjiga: 526 str.

Salonit Anhovo d.d. Gradbeni materiali – Cementi,

www.salonit.si (Pridobljeno 20.1.2012).

SIST EN 12350-5:2001. Preskušanje svežega betona – 5. del: Razlez.

SIST EN 12350-7:2001. Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Porozimetske metode.

SIST EN 12390-3:2002. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.

SIST EN 12390-6:2001. Preskušanje strjenega betona – 6. del: Natezna trdnost preskušancev.

SIST EN 12390-5:2008. Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogina natezna trdnost preskušancev.

Transportation research board,

<http://trid.trb.org/view/2011/P/1119177> (Pridobljeno 20.1.2012).

Žarnić, R. 1999. Osnovne lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 319 str.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan bosiljkov, V. 2010/2011. Gradiva vaje. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 146 str.

Watancon,

http://www.watancon.com/documentation/technical/Workability_of_SCC.pdf (Pridobljeno 20.1.2012).