

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Hribar, M., 2014. Uporaba ultrazvoka za analizo vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Turk, G., somentor Trtnik, G.): 56 str.

Datum arhiviranja: 02-07-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Hribar, M., 2014. Uporaba ultrazvoka za analizo vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Turk, G., co-supervisor Trtnik, G.): 56 pp.

Archiving Date: 02-07-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
PROMETNA SMER

Kandidat:

MATEVŽ HRIBAR

**UPORABA ULTRAZVOKA ZA ANALIZO VPLIVA
NAKNADNEGA MEHANSKEGA POSEGANJA V
STRUKTURO BETONA**

Diplomska naloga št.: 3394/PS

**THE USE OF ULTRASONIC MEASUREMENTS FOR
ANALYSIS OF THE IMPACT ON THE SUBSEQUENT
MECHANICAL INTERVENTION INTO THE
STRUCTURE OF CONCRETE**

Graduation thesis No.: 3394/PS

Mentor:

prof. dr. Goran Turk

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

doc. dr. Gregor Trtnik

Član komisije:

izr. prof. dr. Matjaž Dolšek

doc. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 18. 06. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Matevž Hribar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

»Uporaba ultrazvoka za analizo vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo betona«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 11.06.2014

Matevž Hribar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	UDK: 534:691(497.4)(043.2)
Avtor:	Matevž Hribar
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	doc. dr. Gregor Trtnik
Naslov:	Uporaba ultrazvoka za analizo vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo betona
Tip dokumenta:	diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	56 str., 5 pregl., 44 sl., 20 en.
Ključne besede:	cementni materiali, hidratacija, formiranje strukture, ultrazvočne meritve, vezanje, tlačna trdnost, elastični modul, konsistenca.

Izveček

Glavni namen diplomske naloge je na podlagi ultrazvočnih meritev formiranja strukture materialov s cementnim vezivom ugotoviti vpliv mehanskega poseganja v strukturo v smislu občutnega vplivanja na vezanje in zgodnji razvoj trdnostnih karakteristik materiala. Proučevali smo predvsem spremembe mehanskih lastnosti: elastični modul, tlačno trdnost, konsistenco in čas vezanja.

Tematike vpliva mehanskih posegov v strukturo materialov s cementnim vezivom (t.j. cementnih past, malt, betonov) na kakovost in mehanske lastnosti v odvisnosti od časa smo se lotili z vidika potreb po kvalitetni vgradnji in zagotavljanju ustreznih mehanskih lastnosti. Zanimal nas je vpliv v primerih kadar materiala ne vgradimo takoj po pripravi (dolgi transport ali morebitne druge okoliščine, ki ne omogočajo takojšnje vgradnje) in vpliv mehanskih posegov v strukturo pri določenih časih (ponovno mešanje, revibriranje). Čase v obdobju vezanja, pri katerih smo mehansko posegli v strukturo materialov s cementnim vezivom in čas vezanja posamezne mešanice smo določili z novo ultrazvočno metodo, ki temelji na razmerju največjih amplitud dveh prevladujočih frekvenc, ki se pojavita v frekvenčnem spektru vzdolžnega valovanja.

Za potrebe dosega cilja diplomskega dela smo poleg ultrazvočne metode uporabili klasične preskusne metode za določitev tlačnih trdnosti in statičnega elastičnega modula. Za analizo razvoja dinamičnega elastičnega modula smo uporabili napravo GrindoSonic, ki temelji na principu indukcije valovanja v vzorcu. Konsistenco pa smo določevali vizualno.

Na podlagi lastnih eksperimentalnih preiskav smo ugotovili, da naknadni mehanski poseg (ne glede na obdobje v fazi vezanja) v strukturo mešanic ne vpliva bistveno na končne mehanske lastnosti. Časi vezanja se v relativnem smislu ponekod celo skrajšajo. Vendar pa nam konsistenca v praksi ne omogoča kvalitetne vgradnje brez uporabe dodatkov (plastifikatorjev).

BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND SUMMARY

UDC:	UDK: 534:691(497.4)(043.2)
Author:	Matevž Hribar
Supervisor:	Prof. Goran Turk, Ph. D.
Co-advisor:	Assist. Prof. Gregor Trtnik, Ph. D.
Title:	The use of ultrasonic measurements for analysis of the impact on the subsequent mechanical intervention into the structure of concrete
Document type:	Graduation Thesis – University studies
Notes:	56 p., 5 tab., 44 fig., 20 eq.
Key words:	cement based materials, hydration, formation of structure, ultrasonic measurements, setting, compressive strength, elastic modulus, consistency.

Abstract

The main purpose of the thesis, based on the ultrasonic measurements of the formation of the materials with cement binders, is to determine the impact of the mechanical intervention into the structure, in terms of the significant influence on the setting and early development of characteristic strength of material. During our research we mostly pursued changes in mechanical properties: elastic modulus, compressive strength, consistency and setting time.

The issue of the impact (of the mechanical intervention into the structure of the cement paste, mortars and concrete) on the quality and on mechanical properties in relation to time was dealt with from the perspective of the demand for a better built quality as well as with the aim to provide adequate mechanical properties. As far as the impacts were concerned, we were particularly interested in cases, when material is not built in immediately after its preparation (long transport or any other circumstances which do not allow for immediate placing operation) as well as in the impact of the mechanical intervention into the structure at certain times (revibration, remixing). Setting times, when mechanical intervention into the structure of the material with binding agent took place, as well as setting time of a particular mixture, were determined by a new ultrasonic method, which is based on the highest ratio of the amplitudes of the two dominant frequencies, which appear in the frequency spectrum of longitudinal waves.

In addition to the ultrasonic method, classical test methods were carried out as well in order to determine compressive strength and static elastic modulus and reach the objective of the thesis.

For the purpose of analysis of the dynamic elastic modulus development we used GrindoSonic device, which is based on the principle of induction of the wave in the sample. Consistency was determined visually.

On the basis of our experimental research, we found out that subsequent mechanical intervention (irrespective of the period at the stage of setting) into the structure of the mixtures, does not affect substantially the final mechanical properties. In some cases setting times are even shortened in relative terms. However, consistency in practice does not allow us to ensure high quality of placing operation without the use of additives (plastifiers).

Spodbujala sta me, mi vedno stala ob strani in se veselila mojih uspehov. Zato to delo posvečam očetu Stanku, ki me je že v otroštvu navdušil nad gradbeništvom, in mi vedno bil vzor ter mami Andreji, ki s svojim smehom polepša še tako naporen dan.

ZAHVALA

Za vso pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju prof. dr. Goranu Turku in somentorju doc. dr. Gregi Trtniku.

Iskrena hvala g. Janezu Proseni in vsem zaposlenim na Inštitutu za gradbene materiale IGMAT d.d., ki so mi omogočili izvedbo eksperimentalnega dela naloge in mi kakor-koli pomagali.

Za prijetno vzdušje v laboratoriju in praktične nasvete se zahvaljujem laborantu Elvirju Dediću.

Posebna zahvala gre očetu in mami, ki sta mi omogočila brezskrben študij, vsa ta leta verjela vame in me spodbujala.

Zahvaljujem se tudi vsem svojim prijateljem in sošolcem, zaradi katerih so bila študentska leta zanimiva in nepozabna.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND SUMMARY.....	V
ZAHVALA	VIII
1 UVOD.....	1
1.1 Splošno.....	1
1.2 Namen in cilji.....	1
1.3 Struktura diplomske naloge	2
2 BETON.....	3
2.1 Splošno.....	3
2.2 Sestava	4
2.3 Hidratacija in formiranje strukture.....	5
2.3.1 Parametri vpliva na proces hidratacije cementa v betonu	9
2.3.2 Razvoj strukture cementne paste tekom hidratacije	11
2.4 Osnovne lastnosti	12
2.4.1 Modul elastičnosti	12
2.4.2 Konsistenca	13
2.4.3 Tlačna trdnost.....	15
2.5 Proizvodnja, transport in vgrajevanje	17
2.6 Kontrola in nadzor	20
3 KARAKTERISTIKE UPORABLJENIH MATERIALOV	21
3.1 Osnovni materiali.....	21
3.1.1 Cement	21
3.1.2 Mineralni agregat	22
3.1.3 Zamesna voda.....	22
3.2 Cementna pasta	23
3.3 Malta	23
3.4 Betonska mešanica.....	24
4 EKSPERIMENTALNE METODE	25
4.1 Določanje statičnega in dinamičnega elastičnega modula.....	25
4.2 Določanje tlačne trdnosti	29

4.3 Določanje konsistence sveže mešanice	30
4.4 Določanje časa vezanja z metodo Vicatovega aparata	31
4.5 Določanje zgodnjih tlačnih trdnosti z metodo penetrometra	31
4.6 Določanje časa vezanja z uporabo ultrazvočnega valovanja	32
4.7 Metodologija dela	37
5 REZULTATI	38
5.1 Cementne paste	38
5.2 Malte	43
5.3 Betoni	48
5.4 Komentar rezultatov	53
6 ZAKLJUČEK IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO	55
6.1 Zaključek	55
6.2 Priporočila za nadaljnje delo	56
VIRI	57

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Karakteristike cementa CEM I 42,5 R (www.lafarge.si)	21
Preglednica 2: Karakteristike uporabljene cementne paste	23
Preglednica 3: Karakteristične lastnosti malte	23
Preglednica 4: Karakteristike betonske mešanice	24
Preglednica 5: Konsistenčni razredi	31

KAZALO SLIK

Slika 1: Faze hidratacijskega procesa (Schindler 2002).....	7
Slika 2: Razvoj trdne faze v strukturi cementne paste tekom hidratacijskega procesa (Ye 2003).....	11
Slika 3: Skica betonske prizme v stiskalnici z nameščenimi merilci deformacij in diagram napetost - deformacija.....	12
Slika 4: Zgoščanje mešanice v treh plasteh (www.brmca.org.uk)	14
Slika 5: Izravnavna površine konusa (www.brmca.org.uk)	14
Slika 6: Odstranitev Abramsovega konusa (www.brmca.org.uk)	14
Slika 7: Izmerimo razliko višin (www.brmca.org.uk).....	14
Slika 8: Dimenzije kocke v skladu s standardom (SIST EN 12390-1:2013)	15
Slika 9: Dimenzije valja v skladu s standardom (SIST EN 12390-1:2013)	15
Slika 10: Uporabljeni cement CEM I 42,5 R	21
Slika 11: Drobljeni dolomitni agregat a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4 – 8 mm, c) frakcija 8 – 11 mm	22
Slika 12: Skladiščenje mineralnega agregata po nazivnih velikostih.....	22
Slika 13: Določanje statičnega elastičnega modula E_s	25
Slika 14: Meritev prehoda vibracij (www.grindosonic.com)	26
Slika 15: Meritev prehoda vibracij skozi betonsko prizmo z napravo GrindoSonic	28
Slika 16: Preiskava tlačne trdnosti z destruktivno metodo.....	29
Slika 17: Preskuševalni stroj Zwick 400	30
Slika 18: Določitev časa vezanja z uporabo ultrazvočnega valovanja	32
Slika 19: Definicija TG parametra.....	33
Slika 20: Tipična oblika krivulje $TG - t$	34
Slika 21: Definicija karakterističnih točk in faz v procesu vezanja materialov s cementnim vezivom; a) tipična oblika krivulje $TG - t$, b) tipična oblika krivulje $TG' - t$, c) tipična oblika krivulje $TG'' - t$	35
Slika 22: Shematski prikaz priprave cementnih past.....	38
Slika 23: Začetek in konec vezanja cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	39
Slika 24: Dolžina obdobja vezanja cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave	40
Slika 25: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja cementnih past; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	40
Slika 26: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja cementnih past; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	41

Slika 27: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja cementnih past; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti.....	41
Slika 28: Časovni razvoj tlačnih trdnosti cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost.....	42
Slika 29: Shematski prikaz priprave malt	43
Slika 30: Začetek in konec vezanja malt, uporabljenih v okviru preiskave; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	44
Slika 31: Dolžina obdobja vezanja malt, uporabljenih v okviru preiskave.....	44
Slika 32: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja malt; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti.....	45
Slika 33: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja malt; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	45
Slika 34: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja malt; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	46
Slika 35: Časovni razvoj tlačnih trdnosti malt, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost.....	46
Slika 36: Časovni razvoj elastičnih modulov in Poissonovega koeficienta malt, uporabljenih v okviru preiskave; a) statični modul, b) upogibni modul, c) vzdolžni modul, d) Poissonov koeficient.....	47
Slika 37: Shematski prikaz priprave betonov.....	48
Slika 38: Začetek in konec vezanja betonov, uporabljenih v okviru preiskave; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti	49
Slika 39: Dolžina obdobja vezanja betonov, uporabljenih v okviru preiskave	49
Slika 40: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja betonov; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti.....	50
Slika 41: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja betonov; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti.....	50
Slika 42: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja <i>TG</i> parametra med obdobjem vezanja betonov; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti.....	51
Slika 43: Časovni razvoj tlačnih trdnosti betonov, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost.....	51
Slika 44: Časovni razvoj elastičnih modulov in Poissonovega koeficienta betonov, uporabljenih v okviru preiskave; a) statični modul, b) upogibni modul, c) vzdolžni modul, d) Poissonov koeficient.....	52

1 UVOD

1.1 Splošno

Beton kot gradbeni material poznamo že vrsto let. Rimljani so zmes, podobno današnjemu betonu uporabljali že pred našim štetjem. Poznali so lastnosti različnih vrst agregatov, škodljivih primesi in ga s pridom uporabljali za gradnjo akveduktov, kopališč, pristaniških del in drugih objektov. Leta 1414 v švicarskem samostanu odkrijejo podrobni opis rimskega betona in ga postopno izboljšujejo. Z iznajdbo armiranega betona v 19. stoletju pa se prične njegova širša uporaba pri gradnji objektov, ki traja vse do danes. Beton je kompozitni gradbeni material, ki v sodobnem graditeljstvu najpogosteje zagotavlja zanesljivost, varnost in trajnost konstrukcij in objektov.

Glavne mehanske lastnosti betona so njegove trdnosti in deformabilnost. Na razvoj le teh vpliva mnogo dejavnikov. Pomemben vpliv imata zagotovo način priprave in vgradnja betona. Vgradnja betonskih mešanic obsega: dovoz, razgrinjanje in zgostitev ter nego in zaščito. Pri dovozu je bistveno, da izberemo način transporta, ki zagotovi in ohrani določeno konsistenco in homogenost mešanice. Svežo mešanico betona je treba vgraditi čim prej po zamešanju, in sicer pred nastopom spremembe konsistence. Proizvedeno betonsko zmes lahko samo krajši čas uskladiščimo v ustreznih silosih.

Prav tako je pomembno neprekinjeno in enakomerno vgrajevanje, ki omogoči ustrezno homogenost.

Poleg homogenosti na razvoj trdnosti, deformabilnosti in trajnosti vpliva tudi zgoščenost, le to najpogosteje dosegamo z vibratorji. Z vibriranjem zmanjšujemo vsebnost in velikost vsebovanih por ter votlin, ki nedvomno vplivajo na trdnost in trajnost betona. Na koncu pa z ustrezno nego in zaščito zagotovimo primerne pogoje za hidratacijo veziva (vlažnost, temperaturo) ter potrebno zaščito pred neugodnimi zunanjimi vplivi (padavinami, soncem, vetrom, mrazom).

1.2 Namen in cilji

Glavni namen diplomske naloge je na podlagi ultrazvočnih meritev formiranja strukture materialov s cementnim vezivom (t.j. cementnih past, malt, betonov) ugotoviti vpliv mehanskega poseganja v strukturo v smislu občutnega vplivanja na vezanje in zgodnji razvoj trdnostnih karakteristik materiala na mehanske lastnosti in čas vezanja.

Cilj dela je na podlagi lastnih eksperimentalnih preiskav z uporabo ultrazvoka ugotoviti čas, do katerega lahko mehansko posegamo v strukturo sveže mešanice, ter s tem ne povzročimo bistvenih sprememb končnih mehanskih lastnosti. Želeli smo preveriti vpliv mehanskih posegov v določenih obdobjih vezanja na razvoj karakteristik in potek vezanja materialov s cementnim vezivom.

Tematike vpliva mehanskih posegov v strukturo materialov s cementnim vezivom na kakovost in mehanske lastnosti v odvisnosti od časa smo se lotili z vidika potreb po kvalitetni vgradnji in zagotavljanju ustreznih mehanskih lastnosti.

Mnoge poškodbe na objektih namreč nastanejo zaradi napak in nepazljivosti pri betoniranju. Mesta napak so slaba mesta na objektu, ki lahko močno znižajo trajnost konstrukcije in s tem tudi njeno življenjsko dobo (Littman, 2000).

Število možnih napak pri vgrajevanju betona je veliko, omenimo nekaj značilnih (Wesche, 1993):

- nezadostna zgostitev, kar ima za posledico nastanek slabih mest v betonu, mest s preveliko poroznostjo ali agregiranih mest,
- napačno zgoščevanje, zaradi česar pride na primer pri zelo plastičnih betonih do segregiranja,
- stresanje betona s prevelike višine, zaradi česar pride do segregiranja betona.

Zanimal nas je vpliv v primerih, kadar materiala ne vgradimo takoj po pripravi (dolg transport ali morebitne druge okoliščine, ki ne omogočajo takojšnje vgradnje) in vpliv mehanskih posegov v strukturo pri določenih časih (ponovno mešanje, pozno vibriranje). Proučevali smo predvsem spremembe mehanskih lastnosti: elastični modul, tlačno trdnost, konsistenco in čas vezanja.

V okviru preiskav smo v laboratoriju sprojektirali tri osnovne recepture, in sicer za: cementno pasto, malto in beton. Čase v obdobju vezanja, pri katerih smo mehansko posegli v strukturo materialov, smo določili z novo ultrazvočno metodo. Uporaba le te nam je omogočila natančno določiti čas začetka in konca vezanja, dolžino obdobja vezanja in hitrost procesa hidratacije posamezne mešanice. Metoda temelji na razmerju največjih amplitud dveh prevladujočih frekvenc, ki se pojavita v frekvenčnem spektru vzdolžnega valovanja (Trtnik, Gams, 2013b).

Za potrebe dosega cilja diplomskega dela smo poleg nove ultrazvočne metode uporabili klasične preskusne metode za določitev tlačnih trdnosti in statičnega elastičnega modula. Za analizo razvoja dinamičnega elastičnega modula smo uporabili napravo GrindoSonic, ki temelji na principu indukcije valovanja v vzorcu. Konsistenco pa smo določevali vizualno.

1.3 Struktura diplomske naloge

Naloga je vsebinsko razdeljena na tri dele. Prvo poglavje opisuje namen in cilje naloge. Beton kot najbolj razširjen in uporaben material s cementnim vezivom je opisan v 2. poglavju. Predstavljene so glavne mehanske lastnosti, proces hidratacije in formiranje strukture, sestava, proizvodnja in kontrola. V 2. delu naloge, ki zajema poglavji 3 in 4 so opisane eksperimentalne metode, ki smo jih za potrebe dosega cilja diplomskega dela v laboratoriju uporabili, pri čemer je poudarek na opisu nove ultrazvočne metode. Navedeni in na kratko opisani so vsi uporabljeni materiali in sestave uporabljenih cementnih past, malt in betonskih mešanic. Na kratko je predstavljena metodologija dela.

V zaključku dela, poglavju 5 so predstavljeni rezultati in ugotovitve, ki so posledica preiskav vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo cementne paste, malte in betona v posameznih obdobjih vezanja.

2 BETON

2.1 Splošno

Beton je keramični kompozitni material, sestavljen iz mineralnega agregata, ki je polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen nastane v procesu hidratacije in posledično vezanja in strjevanja cementne paste. Ta nastane z mešanjem cementa, vode in različnih dodatkov, s katerimi reguliramo lastnosti betona. Betonska mešanica vsebuje odprte in zaprte pore, ki jih zapolnjuje zrak. Pomembno je, da osnovne sestavine betona to je: agregat, cement, vodo, zrak in dodatke pazljivo in v pravilnem zaporedju zmešamo v homogeno celoto. Cementna pasta, ki s strjevanjem postopno preide v cementni kamen, predstavlja 25-40 % celotne prostornine betona, pri tem 7-15 % tvori cement in 14-21 % voda (Žarnić, 2005). Mineralni agregat tvori večino betonske mase, zato so njegov izbor, predvsem zrnastostna sestava, oblika in čistost ključnega pomena za kakovost in lastnosti betonske mešanice. Drugi odločilni faktor je kakovost cementne paste. Ta je odvisna od cementa, vode in posebnih dodatkov. V idealno projektiranem in izdelanem betonu, kjer je vodocementno razmerje 0,38 so vsa zrna agregata oblepljena s cementno pasto, prostori med zrnji so zapolnjeni, cementna pasta pa vsebuje le drobno zaprto poroznost. Pore so zaželjene le do velikosti 300 μm (Žmavc, 2007). Izboljšajo obdelovalnost svežega betona in trajnost otrdelega betona, še posebno v primerih, ko je izpostavljen mrazu in soli. Vodocementno razmerje je parameter, ki najbolj vpliva na lastnosti betona. Je razmerje med količino vode in cementa za pripravo cementne paste. V splošnem velja, da je velikost vodocementnega razmerja (v/c) obratno sorazmerna kakovosti betona ob pogoju enake vgradljivosti. Zniževanje vodocementnega razmerja zmanjšuje vgradljivost betona, zato se pri mešanicah z nizkim količnikom v/c poslužujemo dodatkov, ki prispevajo k izboljšanju vgradljivosti. Toge mešanice (nizek v/c) vgrajujemo z vibratorji, kjer vnesena energija povzroči mobilnost zrn agregata in cementne paste. S tem dosežemo večjo kompaktnost betona ter boljše mehanske in tehnološke lastnosti (Žarnić, 2005). Količino vode v betonski mešanici znižujemo zaradi vpliva na sledeče lastnosti (Žarnić, 2005):

- izboljšava mehanskih lastnosti,
- večja vodonepropustnost in nižja absorptivnost,
- zvišana odpornost na vremenske vplive in agresivnost okolja,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri namakanju in sušenju,
- boljša sprijemnost med plastmi betona ter betonom in armaturo,
- manjše število in velikost razpok zaradi krčenja.

Za pripravo betonskih mešanic najpogosteje uporabljamo dodatke, ki vplivajo na (Žarnić, 2005):

- zmanjšanje potreb po vodi,
- izboljšanje obdelovalnosti betona,

- časovni potek vezanja in strjevanja cementne paste,
- vgradnjo zračnih mehurčkov in ustvarjanje zaprte poroznosti betona,
- reguliranje ostalih lastnosti betona.

Osnovna vrsta betona je sestavljena iz standardno granuliranega mineralnega agregata in portland cementa z manjšo količino dodatkov. Prostorninska gostota običajnih betonov je 2400 kg/m^3 in tlačna trdnost v razponu od 15 do 40 MPa (Žarnić, 2005). Različne zahteve narekujejo tudi uporabo na različne načine sestavljenih in modificiranih betonov. Iz naziva betona lahko sklepamo katere lastnosti so poudarjene v primerjavi z običajnimi. Danes poznamo mnogo vrst betonov: konstrukcijski betoni nizke gostote in običajne trdnosti, konstrukcijski betoni visoke gostote, konstrukcijski betoni zgodnje visoke trdnosti, masivni betoni, prepakirani betoni, valjani betoni, brizgani betoni (torkretni betoni), beli in barvani betoni, betoni s kompenziranim krčenjem, zemljo-cementni betoni in vlaknasto armirani betoni so le nekateri izmed njih.

2.2 Sestava

Cementni beton je po sestavi heterogen material, zato je ustrezna sestava in proizvodnja mešanice zelo zahtevna. Z majhnimi spremembami sestave lahko povzročimo bistvene spremembe otrdelega betona, tako v njegovo korist kot škodo. Za sestavo svežih cementnobetonских mešanic se uporabljata predvsem dva osnovna postopka: lahko so predpisane (normirane) ali pa načrtovane (projektirane). Pri predpisani sestavi mešanice je proizvajalcu predpisana sestava in osnovni materiali, medtem ko so pri načrtovani predpisane zahtevane lastnosti in morebitne značilnosti. Količina sestavin v mešanici se običajno izračuna v masnih in prostorninskih deležih, končna sestava pa samo v masnih deležih.

Predhodna sestava mešanice cementnega betona se določi na osnovi rezultatov ustreznih predhodnih laboratorijskih preskusov mešanic svežega betona in preskušancev otrdelega betona, pripravljenih iz predvidenih materialov za predvidene pogoje uporabe. Sestavo mešanice svežega betona je treba preskusiti s pripravo vzorcev v obratu za proizvodnjo – betonarni. Kriteriji za izbiro sestave cementnega betona so podani z zgornjo in spodnjo mejno vrednostjo značilnih lastnosti svežega in otrdelega betona.

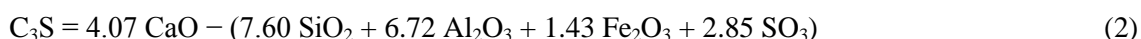
Pri načrtovanju sestave betonske mešanice določimo: sestavo zmesi kamnitih zrn, konsistenco, razredčitveno krivuljo, soodvisnost med vrednostmi vodocementnih razmerij (v/c) in tlačnimi trdnostmi cementnega betona ter vrednost količnika v/c na osnovi zahtevane tlačne trdnosti in zahtevane obstojnosti betona. Zmes kamnitih zrn mora zagotoviti potrebne lastnosti otrdelega betona ob upoštevanju tehničnih, tehnoloških in gospodarskih pogojev pri proizvodnji, transportu in vgrajevanju betonske mešanice. Praviloma izbiramo čim bolj enakomerno sestavo zmesi kamnitih zrn z ustreznimi največjimi zrn. Izbiro konsistence prilagodimo načinu prevoza in obdelovalnosti svežega cementnega betona ves čas vgrajevanja. Torej je potrebno upoštevati mogoče spremembe konsistence

v odvisnosti od trajanja transporta na gradbišče in vgrajevanja, temperatur svežega cementnega betona in okolja, v katerem ga vgrajujemo. V primeru, da navedenih pogojev dela ne upoštevamo, moramo pričakovati spremembe načrtovanih lastnosti otrdelega betona. Razredčitvena krivulja pa nam predstavlja soodvisnost med vrednostmi količnikov v/c in količinami cementa, ki so potrebne za zagotovitev izbrane konsistence svežega cementnega betona, pripravljenege z izbrano sestavo zmesi kamnitih zrn. Pri predhodnih preiskavah cementnih betonov običajno določimo razredčitvene krivulje za območje vrednosti razmerij v/c od 0,35 do 0,80.

2.3 Hidratacija in formiranje strukture

Hidratacija je proces vezanja vode in cementa. To je kompleksna serija eksotermnih reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Za lažje razumevanje poteka hidratacije in razvoja strukture cementne paste spodaj navajam osnovne kemijske reakcije.

Portland cement (PC) je značilni predstavnik silikatnih cementov. Sestavljajo ga minerali PC klinkerja in različni dodatki (sadra, apnenec, elektrofiltrski pepel itd.). Večinski delež PC klinkerja je sestavljen iz silicija (Si), kalcija (Ca) in kisika (O₂). Njegova sestava se najpogosteje izraža z masnimi procenti posameznega oksida. Osnovne spojine, ki tvorijo komponente PC klinkerja so: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ in SO₃. Minerali PC klinkerja so sestavljeni iz zgornjih komponent: dikalcijev silikat (belit) C₂S(2CaOSiO₂), trikalcijev silikat (alit) C₃S(3CaOSiO₂), trikalcijev aluminat C₃A(3CaOAl₂O₃) in tetrakalcijev aluminoforit C₄AF(4CaOAl₂O₃Fe₂O₃). C₃S je najpomembnejši mineral običajnih PC klinkerjev, močno reagira in pri strjevanju prispeva k visokim trdnostim. C₂S počasi in postopno strjuje ter pri tem sprošča bistveno manj hidrationske toplote kot C₃S. V začetnem delu hidratacije C₃A reagira hitro, sprošča veliko toplote in je občutljiv na sulfatno korozijo. C₄AF pa strjuje počasi in je bolj odporen na sulfatno korozijo kot C₃A. Za določitev količine posameznega minerala v PC klinkerju se uporablja ocena na podlagi kemijske sestave PC cementa z enačbami Boguea (Bogue, 1929):



Stik cementa in vode povzroči nastanek številnih zapletenih kemijskih reakcij. Produkt dikalcijevega silikata oziroma trikalcijevega silikata ob stiku z vodo je kalcijev silikat hidrat C-S-H enačbi (5 in 6). Delež C-S-H gela predstavlja približno 50-70 % mase hidratizirane cementne paste in pomembno vpliva na trdnost in obstojnost strjene cementne paste in betona (Schindler, 2002).



Poleg C-S-H gela se ob hidrataciji C_2S in C_3S tvori tudi kalcijev hidroksid ali portlandit Ca(OH)_2 . Ta je v primerjavi s C-S-H gelom krhkejši in ob stiku z oksidi lahko postane nestabilen. Kadar sestava materiala vsebuje tudi elektrofiltrski pepel (EFP), se ob nadaljnji reakciji kalcijevega hidroksida z vodo in elektrofiltrskim pepelom tvori dodatni C-S-H gel, kar prikazuje enačba (7). Dodatni gel pomembno prispeva k nastanku manj prepustne in gostejše strukture strjene cementne paste.



Produkt reakcij minerala C_3A , sadre in vode je tvorba etringita AFt. Sčasoma nastali etringit preide v nestabilno stanje, reagira s preostalim deležem C_3A in vodo, kar povzroči tvorbo stabilnega produkta kalcij monosulfoaluminat hidrata AFm.



Še vedno je lahko prisoten delež C_3A , ki je nevezan. Nadaljnja reakcija C_3A in vode povzroči nastanek kalcijevega aluminathidrata C-A-H.



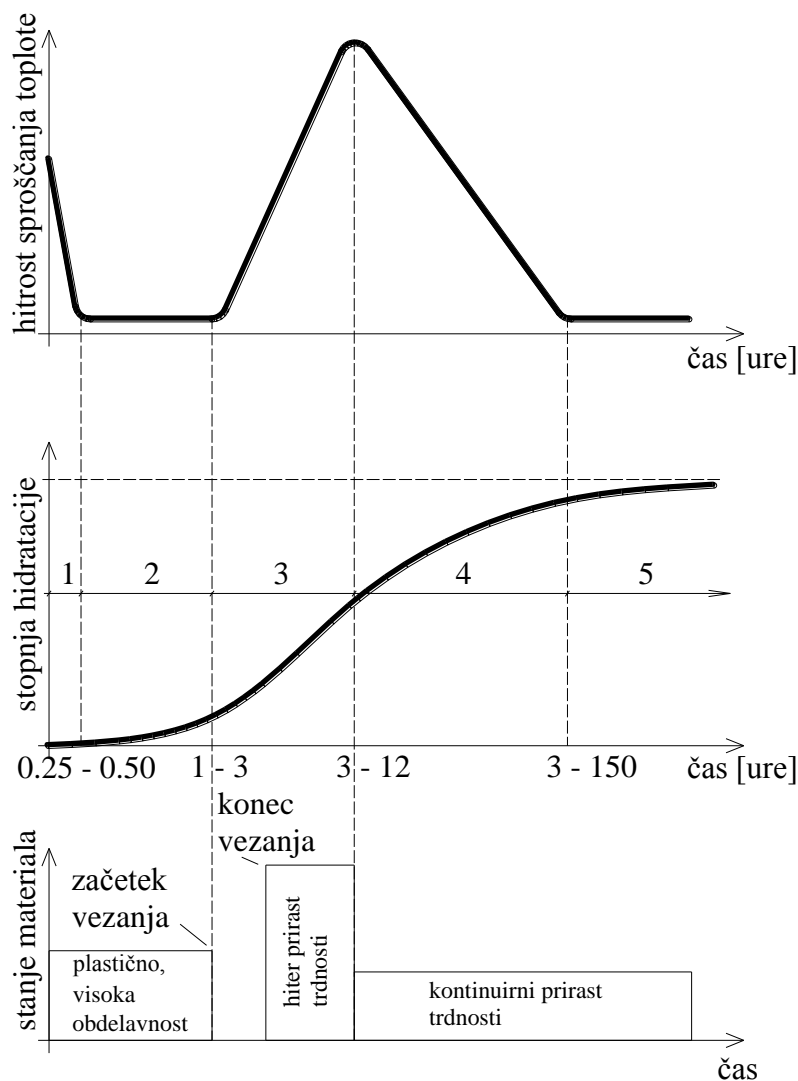
Reakcija tetrakalcijevega aluminoferita C_4AF z vodo je podobna reakciji (10).



Hitrost hidratacijskega procesa se spreminja v odvisnosti od številnih parametrov (poglavje 2.3.2).

Gre za kompleksno serijo reakcij, nekatere potekajo istočasno nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na druge. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov (Žarnić, 2005).

Hidratacijski proces portlandskega cementa v betonu v osnovi delimo na pet obdobij kakor je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Faze hidratacijskega procesa (Schindler 2002)

Predindukcijsko obdobje (slika 1, območje 1) poteka prvih nekaj minut po mešanju cementa in vode. V tem času se spojine hitro raztapljajo v vodi in prične se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Trikalcijev aluminat C_3A je najaktivnejši mineral v predindukcijski fazi. Poleg kalcijevih ionov v tem obdobju nastajajo tudi drugi ioni: K^+ , OH^- , SO_4^{2-} in Na^+ . Raztaplja se mineral C_3A in reagira z gipsom, produkt tega je nastanek etringita enačba (8), ki se na posameznih delcih obarja. Alkalnost cementne paste se v tem obdobju bistveno poveča in doseže vrednost pH 12 ali več.

Po začetnem obdobju pospešene hidratacije se reakcijska hitrost močno zmanjša, sledi *indukcijsko obdobje* oziroma obdobje relativnega mirovanja (slika 1, območje 2), ki traja nekaj ur. Vzrok pojasnjujeta dve teoriji:

1. *Teorija zaščitnega sloja* pravi, da se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v predindukcijskem obdobju, oblikuje se zaščita, ki upočasni hidratacijo. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije.
2. *Teorija kristalizacijskih jeder* pravi, da hidratacijo ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom kristalizacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, zaradi česar pade koncentracija kalcijevih ionov, kar omogoči nadaljevanje hidratacijskega procesa.

Teoriji sta podrobneje predstavljeni v literaturi (van Breugel, 1991 in van Breugel, 2001). Cementna pasta v indukcijskem obdobju ostane v plastičnem stanju z visoko stopnjo obdelavnosti. Največkrat konec indukcijskega obdobja definiramo kot začetek vezanja cementne paste, ki se določi v skladu s standardno Vicatovo metodo (SIST EN 196-3:2005).

Po indukcijskemu obdobju sledi *obdobje pospešene hidratacije* (slika 1, območje 3), ki traja od tretje do dvanajste ure procesa. V tem obdobju je hidratacijski proces najintenzivnejši. Obdobje je pogojeno z rastjo hidratacijskih produktov in hitrostjo nukleacije. Nasičena otopina z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. V tem času hitrost hidratacije C_2S in C_3S narašča in doseže svoj maksimum. Končni čas vezanja običajno nastopi pred časom maksimalne hitrosti sproščanja hidratacijske toplote, torej pred koncem obdobja pospešene hidratacije.

Obdobju pospešene hidratacije sledi *obdobje pojemajoče hidratacije* (slika 1, območje 4), ki poteka približno od tretje do stopetdesete ure. Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki predstavljajo plast okoli nehidratiziranih jeder cementnih zrn. Posledica hidratacije C_3S in C_2S je nastanek C-S-H gela, pri čemer se prispevek C_2S k skupni količini C-S-H gela s časom povečuje. Etringit v tej fazi prične reagirati z nehidratiziranim C_3A , kar je posledica pomanjkanja sulfata v raztopini. Produkt Etringita in C_3A je kalcijev monosulfoaluminat hidrat AFm enačba (9). V nadaljnem poteku hidratacije nastopi zorenje hidratiziranega materiala, ki je povezano s polikondenzacijo SiO_4 in podaljševanjem verig SiO_4 v nastalem C-S-H gelu.

V *obdobju mirne oziroma nespremenljive hidratacije* (slika 1, območje 5) se proces hidratacije skoraj popolnoma umiri.

2.3.1 Parametri vpliva na proces hidratacije cementa v betonu

Na sproščeno hidrationsko toploto in proces hidratacije vplivajo številni parametri, naprimer:

- vrsta cementa,
- količina cementa,
- finost mletja cementa,
- temperatura okolice tekom procesa hidratacije,
- vodocementno razmerje
- prisotnost kemijskih dodatkov v mešanici in
- razmere pri zorenju mešanice.

2.3.1.1 Vrste cementa v betonu

Po standardu SIST EN 197-1:2011 delimo pet glavnih vrst PC cementov, in sicer:

- 1.CEM I, portlandski cement,
- 2.CEM II, portlandski mešani cement,
- 3.CEM III, žlindrin cement,
- 4.CEM IV, pucolanski cement,
- 5.CEM V, mešani cement.

Znotraj glavnih vrst obstajajo še posamezne podvrste cementov (skupno 27 proizvodov). Vrsta cementa ima značajan vpliv na proces hidratacije, nanj vpliva njegova kemijska sestava in finost mletja.

2.3.1.2 Količina cementa v betonu

Beton slabo prevaja toploto in je zato potrebno z deležem cementa uravnavati njen razvoj in količino. Pri betoniranju v hladnem okolju uporabljamo večje količine cementa kot pri normalnih temperaturah. Z večanjem količine cementa namreč povečujemo hitrost hidrationskega procesa cementa v betonu in zvišujemo končno temperaturo. Nemaokrat ustrezna količina cementa omogoči izvedbo gradbenih del, predvsem v pogojih ko tehnološko svežega betona ne moremo dovolj segreti glede na dane temperaturne razmere. S količino cementa v betonski mešanici vplivamo tudi na čas, pri katerem bo hitrost hidrationskega procesa dosegla največjo vrednost. Večja kot je vsebnost cementa krajši bo čas, ko bo največja hitrost hidrationskega procesa dosežena.

2.3.1.3 Finost mletja cementa

Specifična površina oziroma finost mletja cementa pomembno vpliva na proces hidratacije.

Finejši cementi razvijejo med hidratacijo več toplote in se bolj krčijo. Hidratacija se razvija na površini zrn, zato se fina zrna popolneje hidratizirajo. Večja specifična površina pospeši hidratacijski proces in obratno. Ta fenomen je izrazitejši v prvih dneh hidratacije cementa. V praksi uporabljamo dva postopka za določitev finosti cementa: sedimentacijsko metodo in metodo z zračnim tokom.

2.3.1.4 Temperatura okolice tekom procesa hidratacije

Temperatura okolice pri kateri se hidratacija odvija ima pomemben vpliv na hitrost hidratacijskega procesa in sproščanje hidratacijske toplote. Višja temperatura okolice pospeši hidratacijo in obratno (van Breugel, 1991). Nizke temperature upočasnijo oz. lahko prekinajo postopek hidratacije.

2.3.1.5 Vodocementno razmerje

Idealne razmere pri katerih hidratizira ves cement so pri vodocementnem razmerju 0,38. Pri dejanskih razmerah v praksi takšen v/c ponavadi ne zadošča za pripravo betona brez dodatkov. Del vode izhlapi, hidratacija pa lahko poteka tudi več let. Popolna hidratacija je v praksi izjemno redka, dosežena pa je v 80 do 90 % hidratacije cementnih zrn. Običajno višje vodocementno razmerje dosega višjo stopnjo končne hidratacije in obratno.

2.3.1.6 Prisotnost kemijskih dodatkov v mešanici

Uporaba kemijskih dodatkov v betonu se je pričela okoli leta 1945. Z njihovo pomočjo dosegamo željene lastnosti svežega in strjenega betona. Uporabljeni kemijski dodatki morajo ustrezati produktnemu standardu SIST EN 934-2:2009 + A1:2012. Na potek in hitrost hidratacije najbolj vplivamo s pospeševalci vezanja in strjevanja ter zaviralci vezanja.

2.3.1.7 Razmere pri zorenju mešanice

Ustrezna nega med zorenjem betona, kar pomeni zagotavljanje ustrezne vlažnosti in primerne temperature okolja. V primeru da relativna vlažnost pade pod 80 % in temperatura pod mejo zmrzovanja se proces hidratacije praktično ustavi.

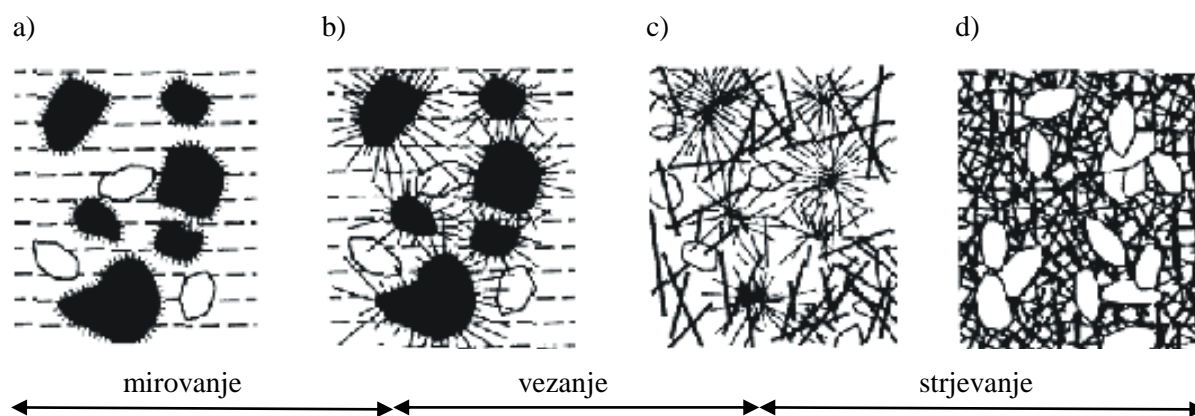
2.3.2 Razvoj strukture cementne paste tekom hidratacije

S procesom hidratacije cementna pasta preide iz tekočega agregatnega stanja v cementni kamen, material z visoko trdnostjo. Proces vezanja in strjevanja je odvisen od vodocementnega razmerja cementne paste, pri čemer nastajajo hidrationski produkti (trdna faza) in pore. Med glavne hidrationske produkte trdne faze spadajo: kalcijev hidroksid (CH), kalcijev silikat hidrat (C-S-H) in etringit (AFt). Poleg vodocementnega razmerja na morfologijo hidrationskih produktov vpliva tudi temperatura okolice med procesom hidratacije. Vpliv temperature na morfologijo hidrationskih produktov različni avtorji različno razlagajo. Za vodocementno razmerje v splošnem velja, višje kot je večji so hidrationski produkti in obratno. Večji delež vode namreč zagotavlja večje razdalje med posameznimi zrnji cementa in posledično več prostora za razvoj hidrationskih produktov.

Pri prehodu koloidnega sistema v cementni gel nastaja porozna struktura. Nastajajo strukture por v cementni pasti, ki jih v splošnem delimo v tri skupine: gelske pore, kapilarne pore in zračni mehurčki.

Gelske pore so pore velikosti od 0,2 do 5 μm , ki so vedno zastopane v enakem deležu ne glede na stopnjo hidratacije cementa in zapolnjene z vodo. Kapilarne pore so velikosti od 10 do 20 μm .

Njihov nastanek je odvisen od vodocementnega razmerja in stopnje hidratacije. Najmanj jih je pri popolni hidrataciji cementa, takrat se ves cement transformira v gel. Največje pore so zračni mehurčki velikosti 10 do 1000 μm in so zaprte za vdor vode.



Slika 2: Razvoj trdne faze v strukturi cementne paste tekom hidratacijskega procesa (Ye 2003)

Razvoj trdne faze v strukturi cementne paste tekom hidratacijskega procesa je simbolično prikazan na slikah 2. Slika 2a prikazuje delce cementa ko pridejo v stik z vodo, vendar ostanejo nepovezani. V nadaljnjem procesu hidratacije se prične na cementnih zrnih tvoriti C-S-H gel v obliki iglic, kar je lepo prikazano na sliki b. Nastajajoče iglice kristalov C-S-H in CH na posameznih cementnih delcih se medsebojno povezujejo. Povečuje se delež trdne faze v strukturi cementne paste, po določenem obdobju pa so hidrationski produkti v celoti povezani kar vidimo na slikah 2c in 2d.

2.4 Osnovne lastnosti

2.4.1 Modul elastičnosti

Modul elastičnosti oz. Youngov modul betona se določa s preiskavami prizem ali valjev standardnih velikosti v laboratoriju (slika 3, levo). Zelo približna ocena je, da so vrednosti modulov 1000 krat večje od tlačnih trdnosti. V standardu JUS U.M1.025 (1982) je opisan postopek določanja in so podani izrazi za izračun modulov na osnovi tlačne trdnosti betona.

Po preiskavi se statični elastični modul izračuna z naslednjo enačbo:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (12)$$

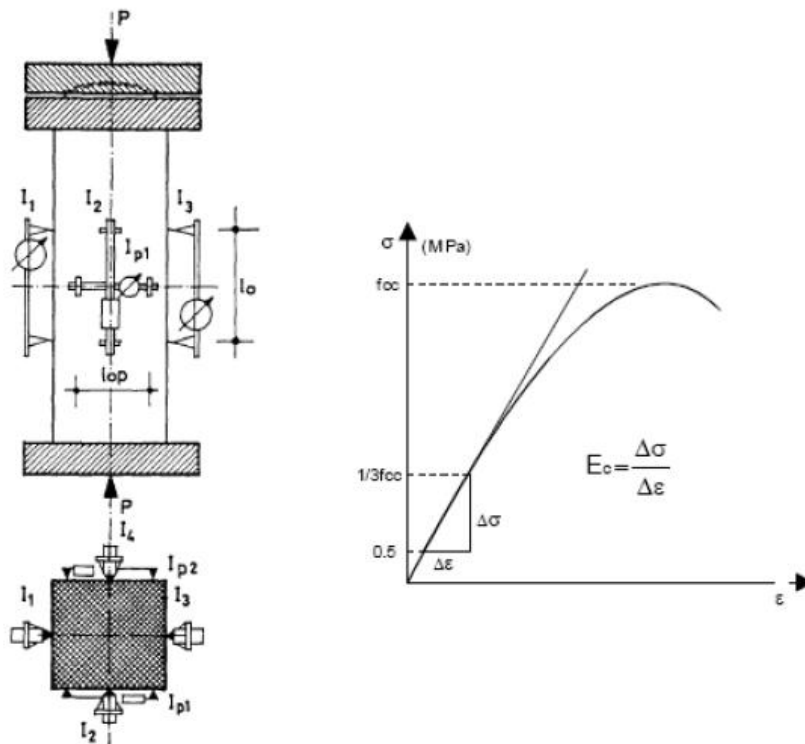
kjer je:

E_s statični elastični modul;

$\Delta\sigma$ razlika napetosti $\sigma_a - \sigma_b$ [MPa];

σ_a napetost pri 1/3 predvidene tlačne trdnosti betona, σ_b pa začetna napetost 0.5 MPa, kakor je prikazano na sliki 3 desno;

$\Delta\varepsilon$ razlika pripadajočih deformacij pri σ_a in σ_b v [%].



Slika 3: Skica betonske prizme v stiskalnici z nameščenimi merilci deformacij in diagram napetost - deformacija

Youngov modul poimenovan po Thomasu Youngu, angleškemu fiziku in zdravniku (1773-1829) je fizikalna količina. Določimo jo lahko z enoosnim tlačnim preizkusom obremenjevanja in razbremenjevanja materiala kot razmerje med mehansko napetostjo in relativnim raztežkom (Hookeov zakon). Običajno ga označujemo s črko E in uporabljamo enote $[\text{N}/\text{mm}^2]$ oz. $[\text{MPa}]$.

Velikost elastičnega modula je odvisna od granulacije agregata, količine cementa, v/c količnika, vgradnje, nege in starosti betona (Herak Marović, 2007). Največji vpliv na vrednost elastičnega modula imata vrsta in količina agregata (Bokan Bosiljkov, 2007).

Da je velikost elastičnega modula betona odvisna tudi od temperature, sta ugotovila Abrams in Cruz (1961), le-ta se z višanjem temperature zmanjšuje glede na vrednost pri sobni temperaturi. Obratno se pri zelo nizkih temperaturah modul poveča, kar pripisujemo zamrznjeni vodi v sistemu por hidratizirane cementne paste, ki nosi del obremenitev (Zaletel, 2007).

2.4.2 Konsistenca

Konsistenca sveže betonske mešanice je mera za njeno obdelovalnost. Izberemo takšno, da je z razpoložljivimi sredstvi za zgoščanje mogoče zagotoviti primerno zgostitev, čim enostavnejše vgrajevanje brez razmešanja in ustrezno končno obdelavo površine vgrajenega betona (Žmavc, 2007). Odvisna je od količine vode in vrste agregata. V splošnem velja, da je primerna takšna mešanica, ki jo lahko oblikujemo z rokami.

Izbira konsistence je odvisna predvsem od pogojev transporta, načina in hitrosti vgrajevanja, temperatur okolja, oblike elementa, gostote armature in drugih dejavnikov.

V primeru betoniranja tankih profilov ali izjemno gosto armiranih elementov izberemo tekočo konsistenco betona, ki pa mora vsebovati vse lastnosti homogene betonske mešanice.

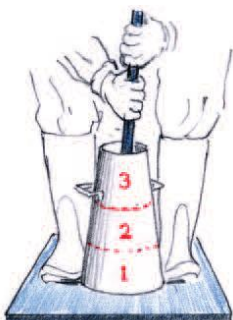
Pregostemu betonu pa dodamo superplastifikatorje, s katerimi povečamo vgradljivost, zagotovimo počasnejši padec obdelovalnosti, skrajšamo potrebni čas vibriranja in omogočimo morebitno potrebno črpanje betona.

Konsistenco je potrebno določevati in s tem preverjati deklarirano vrednost v okviru proizvodnih postopkov in lastnosti betona ter v okviru kontrole istovetnosti ob dostavi transportnega betona na mesto vgrajevanja. Izmerimo jo na enega od sledečih načinov (SIST EN 206:2013):

- s posedom po EN 12350-2,
- z Vebe preskusom po EN 12350-3,
- s preskusom stopnje zgoščenosti po EN 12350-4,
- z razlezom po EN 12350-5,
- s posebnimi metodami, o katerih se morata sporazumeti izdajatelj specifikacije in proizvajalec, pri betonu za posebne namene (npr. zemeljsko vlažen beton).

Preskus se opravi na naključnem vzorcu, vzetem tudi za preskušanje tlačne trdnosti in vsebnosti zraka. Kadar je beton transportiran z avtomešalnikom¹ vzorec odvezamo na začetku praznjenja mešalnika po izpraznitvi približno $0,3 \text{ m}^3$.

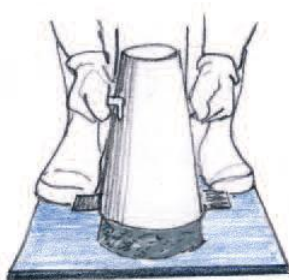
Metoda s posedom (SIST EN 12350-2:2009) je najbolj preprosta metoda za določitev konsistence betonske mešanice z uporabo Abramsovega konusa in je primerna za mešanice do $D_{\text{max}}40$. Konus napolnimo z zidarsko žlico v treh plasteh. Vsako izmed plasti je potrebno zgostiti s standardno kovinsko palico premera $(16 \pm 1) \text{ mm}$, dolžine $(600 \pm 5) \text{ mm}$ s petindvajsetimi enakomernimi udarci, tako da prebadamo samo trenutno dodano plast betona v stožcu (slika 4). Presežek tretjega sloja odstranimo in poravnamo površino (slika 5). Konus po zapolnitvi pazljivo odstranimo v času 2-5 s kakor prikazuje slika 6 in položimo ob stožec. Na Abramsov konus postavimo kovinsko palico ter izmerimo razliko višin (slika 7). Razlika višin zaokrožena na 5 mm je mera za konsistenco po tej metodi. V preglednici odberemo za katero stopnjo poseda gre oz. kontroliramo istovetnost betonske mešanice. Celoten postopek ne sme trajati več kot 150 s.



Slika 4: Zgoščanje mešanice v treh plasteh
(www.brmca.org.uk)



Slika 5: Izravnava površine konusa
(www.brmca.org.uk)



Slika 6: Odstranitev Abramsovega konusa
(www.brmca.org.uk)



Slika 7: Izmerimo razliko višin
(www.brmca.org.uk)

¹Avtomešalnik: Mešalnik betona nameščen na samohodni šasiji, ki je sposoben zamešati in dostaviti homogen beton.

2.4.3 Tlačna trdnost

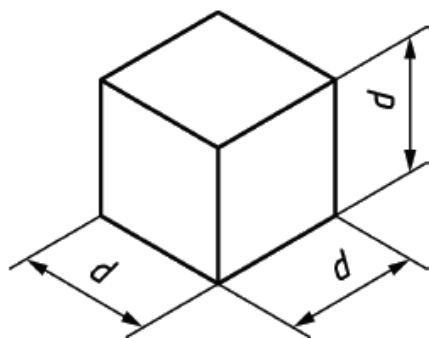
Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna odpornost betona na osno tlačno obremenitev dobljeno na standardnih preskušancih. Te morajo biti oblike kocke (slika 8), valja (slika 9) ali pa so izvrtine. Izpolnjevati moramo zahteve standardov SIST EN 12350-1:2009, SIST EN 12390-1:2013, SIST EN 12390-2:2009 ali SIST EN 12504-1:2009.

Pri čemer navedeni standardi obravnavajo:

EN 12350-1, Preskušanje svežega betona - 1.del: Vzorčenje,

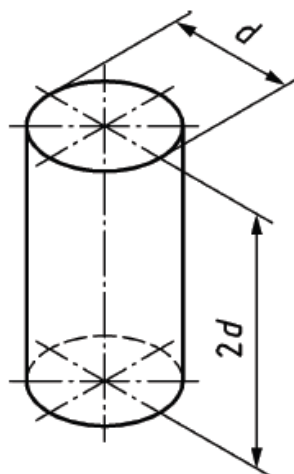
EN 12390-1, Preskušanje strjenega betona - 1.del: Oblika, dimenzije in druge zahteve za preskušance in kalupe,

EN 12390-2, Preskušanje strjenega betona - 2.del: Izdelava in nega preskušancev za preskuse trdnosti in EN 12504-1, Preskušanje betona v konstrukcijah – 1.del: Izvrtani preskušanci – odvzemanje, pregledovanje in preskušanje na tlak.



d, mm	100	150	200	250	300

Slika 8: Dimenzije kocke v skladu s standardom (SIST EN 12390-1:2013)



d, mm	100	113 ^a	150	200	250	300

Slika 9: Dimenzije valja v skladu s standardom (SIST EN 12390-1:2013)

Tlačna trdnost je osnovno merilo pri ocenjevanju kakovosti strjenega betona. Neposredno na trdnost otrdelega betona vplivata vodocementno razmerje in dosežena stopnja hidratacije cementnega kamna (Žarnić, 2005). Nedvomno imajo vpliv tudi osnovne značilnosti zmesi kamnitih zrn, to je sestava, oblika, velikost, njihove mehanske lastnosti in lastnosti površine zrn. Delno pa vplivajo tudi vgrajevanje in nega v času strjevanja ter njegova starost (Žmavc, 2007).

Normalni beton praviloma strjuje počasi in več let, odvisno od poteka hidratacije. Potek hidratacije pa lahko usmerjamo z določenimi postopki in/ali kemičnimi dodatki. Po 28. dneh doseže nekje med 70 in 90 % svoje končne trdnosti (Žmavc, 2007). Pri starosti 90. dni normalnega betona pa se njegove trdnosti običajno le malenkost razlikujejo od končnih.

Tlačno trdnost betona TT [N/mm^2] določamo v skladu s standardom SIST EN 12390-3:2009 v stiskalnici, ki mora ustrezati zahtevam SIST EN 12390-4:2001. Standard podaja specifikacije stiskalnic, ki so ustrezne za opravljanje preskusov. Preskušane obrišemo, da z njegove površine odstranimo odvečno vlago in ga vstavimo v stiskalnico. Vse površine za prenos obtežbe na preskusni napravi morajo biti očiščene. Preskušane vstavimo na sredino spodnje plošče s točnostjo ± 1 % in sicer tako, da je smer uvajanja sile pravokotna na smer vgrajevanja. Obremenitev nanašamo s konstantno hitrostjo $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, dokler ne dosežemo stopnje obremenitve, ki ne presega približno 30 % končne trdnosti. To uvajamo brez sunkov in jo enakomerno povečujemo z izbrano konstantno hitrostjo ± 10 %, do maksimalne obremenitve.

Vzorci betona odvezamo pri prevzemu svežega betona na mestu proizvodnje (betonarni) ali neposredno pred vgraditvijo betona na gradbišču.

Kadar ni odvzetih dovolj vzorcev za osnovne preiskave tlačne trdnosti oz. če beton pri preiskavah ni dosegel pričakovanih trdnosti, je treba preiskati trdnost v konstrukciji, s porušnimi ali neporušnimi metodami. Prav tako je treba zabeležiti vsako nezadovoljivo porušitev vzorca, ki jo lahko povzročita napaka na stiskalnici ali nezadostna pazljivost pri preskuševalnih postopkih, predvsem postavitvi preskušanca.

Tlačna trdnost je dana z enačbo:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (13)$$

kjer so:

f_c tlačna trdnost, v MPa [N/mm^2];

F največja obremenitev ob porušitvi, v N;

A_c ploščina preseka preskušanca na katerega deluje tlačna sila, izračunana iz označene velikosti preskušanca, v mm^2 .

Tlačno trdnost izrazimo na najbližjih $0,1$ MPa [N/mm^2] točno.

Karakteristična trdnost – vrednost trdnosti, pod katero je pričakovati 5 % rezultatov vseh možnih meritev trdnosti na obravnavani količini betona.

Trdnostni razred betona - je tlačna trdnost betona izražena v N/mm^2 . Ugotovljena s preskusom valjev in kock standardnih velikosti po 28 dneh, negovanih pri relativni vlažnosti zraka najmanj 95 % oz. v vodi in temperaturi 20 ± 3 °C.

2.5 Proizvodnja, transport in vgrajevanje

Poznamo več vrst postopkov proizvodnje betonskih mešanic, vendar sta se v gradbeništvu uveljavila predvsem postopek celotne proizvodnje, kjer se odmerjanje osnovnih surovin (cementa, zmesi zrn, vode in tekočih kemijskih dodatkov) in mešanje v stabilnem mešalniku vrši v stalnem ali mobilnem obratu za pripravo betona (betonarni), ki je lahko zgrajena na gradbišču ali izven njega. Proizveden beton se nato z ustreznimi transportnimi sredstvi dostavi na mesto vgradnje. Drugi način pa je sestava ustrezne suhe mešanice osnovnih surovin v stalnem obratu za odmerjanje. Le to vsujemo v prevozniki mešalnik, potrebno količino vode lahko doziramo že v stalnem obratu ali pozneje. Glede na čas trajanja prevoza lahko zamešamo beton med samim transportom oz. kasneje na gradbišču.

Po načinu mešanja betonskih mešanic lahko uporabimo šaržni² (diskontinuirani) ali neprekinjeni (kontinuirani) postopek. Običajno za pripravo kakovostnih mešanic uporabljamo šaržni postopek.

Z mešalniki za postopno (šaržno) proizvodnjo lahko proizvajamo do 200 m³ betona na uro, medtem ko z mešalniki za neprekinjeno proizvodnjo na uro proizvedemo do 400 m³ betona.

Standardna strojna oprema za proizvodnjo betonskih mešanic po SIST EN 206:2013 zajema sledečo opremo in naprave:

1. Oprema za skladiščenje materialov

Osnovne materiale je treba skladiščiti in z njimi ravnati tako, da se njihove lastnosti bistveno ne spremenijo, na primer zaradi medsebojnega mešanja ali onesnaženja, podnebnih vplivov in da se ohrani skladnost z ustreznim standardom. Skladiščni prekati morajo biti jasno označeni, tako da pri uporabi osnovnih materialov ne pride do napak ter potrebno je dosledno upoštevati posebna navodila dobaviteljev osnovnih materialov. Ločimo odprto uskladiščenje v obliki zvezde, uskladiščenje v vrstnem vodoravnem silosu ali uskladiščenje v pokončnem silosu s prekati.

2. Oprema za odmerjanje

Zmogljivost opreme za odmerjanje mora biti takšna, da je v praktičnih pogojih dela mogoče dosežati in ohranjati dovoljena odstopanja. Odmerjanje deležev sestavin je lahko po masi in/ali po prostornini. Tekoče materiale odmerjamo po prostornini z uporabo merilnih valjev, merilnih črpalk ali t.i. vodnih ur.

²Šarža: Količina svežega betona, proizvedena v enem delovnem ciklu mešalnika, ali količina izpraznjena v eni minuti iz kontinuirnega mešalnika.

3. Mešalniki

Mešalniki morajo biti sposobni v mešalnem času in s svojo mešalno zmogljivostjo doseči enakomerno porazdelitev osnovnih materialov in enakomerno konsistenco betona. Za postopno šaržno mešanje uporabljamo bobnaste (težnostne), krožnične (prisilne) in koritaste (prisilne) mešalnike. Za neprekinjeno mešanje pa uporabljamo bobnaste pretočne in koritaste pretočne mešalnike. Osnovne materiale je treba mešati v strojnem mešalniku toliko časa, da dobi mešanica enakomeren videz. Mešalniki ne smejo biti napolnjeni preko svoje nazivne mešalne zmogljivosti. V primeru uporabe kemijskih dodatkov se te dodajajo med glavnim procesom mešanja, razen superplastifikatorjev ali plastifikatorjev, ki se smejo dodati po glavnem procesu mešanja. V tem primeru je treba beton ponovno mešati, dokler se kemijski dodatek popolnoma ne porazdeli po celotni šarži ali prepeljani količini betona in postane polno učinkovit.

Avtomešalniki in agitatorji morajo biti opremljeni tako, da je stanje dostavljenega betona homogeno. Poleg tega morajo biti avtomešalniki opremljeni s primerno napravo za merjenje in doziranje, v primeru da je na gradbišču na odgovornost proizvajalca potrebno dodati vodo ali kemijske dodatke.

4. Oprema za preskušanje

Za kontrolo betona, opreme in osnovnih materialov morajo biti na razpolago vsi potrebni pripomočki, oprema in navodila za pravilno uporabo.

Transport betona ločimo na gradbiščni in zunanji. Pri obeh načinih mora biti preprečena vsakršna škodljiva sprememba, ki lahko vpliva na lastnosti betona. Preprečeno mora biti razmešanje, sušenje, prekomerno segrevanje ali ohlajanje mešanice.

Svež beton je potrebno transportirati z avtomešalniki ali na vozilih z agitatorjem³. Neposredno pred vgraditvijo ga moramo ponovno premešati. Z običajnimi prekucniki smemo prevažati le beton s čvrsto konsistenco (S1, V0, C0, F1). Praviloma je potrebno avtomešalnik popolnoma izprazniti najkasneje 90 minut po prvem stiku cementa in vode v betonarni, prevozna sredstva brez agitatorja za prevoz betona s čvrsto konsistenco pa najkasneje po 45 minutah. Izjemoma se, kadar je v tehnični dokumentaciji kontrole proizvodnje predvideno drugače, časi lahko podaljšajo/skrajšajo na račun vremenskih vplivov, zaradi uporabe dodatkov za pospeševanje ali zavlačevanje vezanja. V primerih, kadar sta temperaturi zraka in betona pod 15 °C, se potrebni čas izpraznitve avtomešalnika podaljša na 120 minut, prevoznega sredstva brez agitatorja pa na 90 minut.

³Agitator: Oprema, ki je običajno nameščena na samohodni šasiji in je sposobna med transportom ohranjati svež beton v homogenem stanju.

Svežo betonsko mešanico je treba vgraditi čim hitreje po zamešanju, preden pride do spremembe konsistence. Ravno tako je pomembno enakomerno in neprekinjeno vgrajevanje, ki je ključno za zagotovitev homogene sestave betona. Običajno so mejne temperature, ki omogočajo vgrajevanje betonskih mešanic brez dodatnih ukrepov med 3 in največ 30 °C. Višina prostega pada pa ne sme presežati 1,5 m. Bistveno je doseči primerno gostoto betona tekom vgrajevanja, saj tako zmanjšamo količino nepotrebnih votlin in por. To lahko dosežemo na več načinov, običajno z vibriranjem, lahko pa tudi vakumiranjem, stiskanjem, ročnim nabijanjem, centrifugiranjem ali kakšno drugo metodo. Le to je treba prilagoditi in skrbno izvesti glede na konsistenco betona.

Najpogosteje se za vibriranje uporabljajo vibratorji z iglo (pervibratorji) ali vibratorji, ki so pritrjeni na kovinske opaže. Dinamične oscilacijske sile premagujejo strižno trdnost, ki je posledica trenja med posameznimi zrni agregata tako da začne mešanica v določenem trenutku teči.

S pravočasnim ponovnim vibriranjem oz. revibriranjem lahko kakovost otrdelega betona še izboljšamo. Dosežemo zaprtje finih por in povečanje gostote. Največji učinek dosežemo 1 do 2 uri po prvotni zgostitvi. V praksi revibriranje izvajamo s tem, ko pri zgoščevanju naslednjih plasti svežega betona vibrator delno vtisnemo v prejšnjo plast, da bi sloja povezali.

2.6 Kontrola in nadzor

V načrtu kontrole je potrebno, v skladu z vodenjem kakovosti (izvajanje betonskih konstrukcij - nacionalni dodatek), določiti zahteve za:

- samokontrolo,
- notranjo kontrolo in
- neodvisno kontrolo.

Samokontrola zajema obseg vizualne kontrole, naključnih meritev in preskusov. To je kontrola delovnega opravila, ki jo opravlja njen neposredni izvrševalec, v skladu s predpisanimi pravili. Za njeno izvajanje pa je odgovoren vodja delovnega opravila.

V sklopu notranje kontrole se določijo zahteve za kontrolo betona na mestu vgrajevanja in elemente konstrukcije oziroma dela, ki jih mora zajeti sistematična notranja kontrola. Določijo se količine betona za ocenjevanje skladnosti ali preskušanje istovetnosti pri vgrajevanju. Zajema kontrolo drugih materialov (in sicer zahtevane vizualne kontrole, meritve in preskuse ter njihove pogostosti) ter zahteve za kontrolo izvajanja del, v skladu s SIST EN 13670:2010.

Notranja kontrola je sistematična in redna kontrola, ki jo za svoj račun opravlja izvajalec s svojim osebjem in lastno opremo ter po predpisanih postopkih sistema kakovosti, vpeljanega v okviru družbe, ki je izvajalec del. Izvajati se mora v skladu z zahtevami izvedbene specifikacije in z načrtom kontrole.

Za izvajanje je odgovorna oseba, imenovana od vodstva družbe, ki je izvajalec del.

V sklop neodvisne kontrole pa sodijo zahteve za področja izvajanja neodvisne kontrole, vrsto in pogostost kontrolnih preskusov ter pogostost rednih pregledov.

Neodvisna kontrola se zahteva v primeru gradnje konstrukcij tretjega izvedbenega razreda ali v primeru kadar je zahtevana v izvedbeni specifikaciji in projektu betoniranja. Opravljati jo sme pravna ali fizična oseba, ki kot gospodarsko dejavnost opravlja storitve kontrole kakovosti pri gradnji objektov in ni v nobeni poslovni odvisnosti ali finančni povezavi z družbo, ki je izvajalec del, in tudi ni njen konkurent na trgu.

Namen kontrole je predvsem (Reflak, 1993):

- pravočasno in dovolj zanesljivo odkriti in preprečiti napake, zaradi katerih bi lahko bila ogrožena končna kakovost konstrukcije,
- zagotoviti in dokazati pričakovano oz. zahtevano kakovost projekta, materialov, proizvodov in izvedbe del.

3 KARAKTERISTIKE UPORABLJENIH MATERIALOV

3.1 Osnovni materiali

3.1.1 Cement

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili cement CEM I 42,5 R (slika 10), osnovnih karakteristik podanih v preglednici 1, proizveden v cementarni Lafarge Cement iz Trbovelj. Je Portlandski cement, trdnostnega razreda 42,5 in visoko zgodnjo trdnostjo (R), v skladu z zahtevami SIST EN 197-1:2011. Sestavlja ga minimalno 95 % Portland cementa in sadra kot regulator vezanja. Glavne lastnosti so krajši čas vezanja in visoke začetne ter končne trdnosti.

Preglednica 1: Karakteristike cementa CEM I 42,5 R (www.lafarge.si)

Fizikalno kemijske lastnosti			
Parameter	Enota	Zahteve standrada	Dosežene vrednosti
Fizikalne zahteve			
Prostorninska obstojnost	mm	≤ 10	< 1
Čas začetka vezanja	min	≥ 60	≥ 140
Mehanske zahteve			
Začetne trdnosti (2 dni)	N/mm ²	$\geq 20,0$	≥ 31
Končne trdnosti (28 dni)	N/mm ²	$\geq 42,5 \leq 62,5$	≥ 57
Kemijske zahteve			
Vsebnost sulfata (SO ₃)	%	$\leq 4,0$	$\leq 3,5$
Vsebnost klorida	%	$\leq 0,1$	$\leq 0,02$

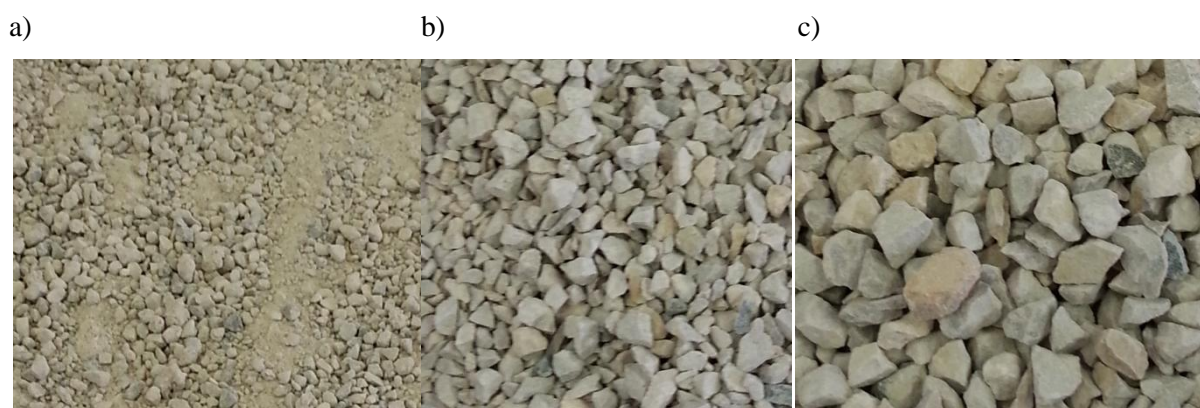
Opomba: Dosežene vrednosti vsakega posamičnega parametra so podane kot povprečne vrednosti, ovrednotene na osnovi notranjega kontrolnega preizkušanja cementarne Lafarge.



Slika 10: Uporabljeni cement CEM I 42,5 R

3.1.2 Mineralni agregat

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili drobljeni agregat dolomitnega izvora, pridobljen v kamnolomu Kamna Gorica, ki ustreza standardu SIST EN 12620:2002 + A1:2008. Dolomit je podobna kamnina kot apnenec, katere bistveni mineral je dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. V naravi ne nastaja primarno, ampak je produkt diageneze apnencev. V recepturah smo uporabili frakcije 0/4, 4/8 in 8/11 prikazane na slikah 11, katere smo skladiščili po nazivnih velikostih (slika 12).



Slika 11: Drobljeni dolomitni agregat a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4 – 8 mm, c) frakcija 8 – 11 mm



Slika 12: Skladiščenje mineralnega agregata po nazivnih velikostih

3.1.3 Zamesna voda

Za potrebe eksperimentalnega dela smo uporabili pitno vodo iz vodovoda, ki velja za primerno za uporabo v betonu in je v skladu s standardom SIST EN 1008:2003 ni potrebno dodatno preskušati.

3.2 Cementna pasta

Uporabili smo cementno pasto (preglednica 2) z vodocementnim količnikom (v/c) 0,3, pri čemer smo zamešali cement CEM I 42,5 R in pitno vodo iz vodovoda. Temperatura okolice (T_o), kateri je bila cementna pasta izpostavljena tekom hidratacijskega procesa je bila 20 ± 2 °C.

Preglednica 2: Karakteristike uporabljene cementne paste

Naziv	cementna pasta
Cement	CEM I 42,5 R
v/c	0,3
<i>To</i>	20 ± 2 °C

3.3 Malta

V sklopu eksperimentalnega dela smo sprojektirali malto s karakteristikami, prikazanimi v preglednici 3. Uporabili smo drobljeni mineralni agregat dolomitnega izvora frakcije do 4 mm, cement vrste CEM I 42,5 R in pitno vodo iz vodovoda. Vodocementno razmerje je znašalo 0,64, malta pa je bila v času hidratacijskega procesa izpostavljena temperaturi okolice (T_o) 20 ± 2 °C.

Preglednica 3: Karakteristične lastnosti malte

Naziv	malta
Agregat:	
Material	dolomit
Oblika	drobljenec
Frakcije:	
0 - 4 mm	83,84 kg
Cement:	
CEM I 42,5 R	17,02 kg
Voda	10,87 kg
v/c	0,64
<i>To</i>	20 ± 2 °C

3.4 Betonska mešanica

Uporabljena sprojektirana betonska mešanica, prikazana v preglednici 4, je bila vodocementnega razmerja 0,52. Vhodne sestavine so predstavljale frakcije nazivnih dimenzij 0/4, 4/8 in 8/11 dolomitnega izvora, cement vrste CEM I 42,5 R in pitna voda iz vodovodnega omrežja. Začetna temperatura okolice in temperatura, pri kateri se je odvijal hidratacijski proces je znašala 20 ± 2 °C.

Preglednica 4: Karakteristike betonske mešanice

Naziv	beton
Agregat:	
Material	dolomit
Oblika	drobljenec
Frakcije:	
0 - 4 mm	41,81 kg
4 - 8 mm	16,85 kg
8 - 11 mm	25,18 kg
Cement:	
CEM I 42,5 R	17,02 kg
Voda	8,85 kg
v/c	0,52
To	20 ± 2 °C

4 EKSPERIMENTALNE METODE

4.1 Določanje statičnega in dinamičnega elastičnega modula

Statični elastični modul betona E_s [N/mm^2] posamezne šarže smo določili v skladu s standardi ISO 1920-10:2010 in JUS U.M1.025 (1982). V kalupe, ki zavzemajo obliko prizme standardnih dimenzij $100 \times 100 \times 400$ mm smo vgradili beton. Nato smo v univerzalnem preskuševalnem stroju tipa ZWICK 400 vzorec petkrat predobremenili (slika 13), tako da smo v vsakem ciklu povečali napetost do vrednosti σ_a , to je napetost pri 1/3 predvidene tlačne trdnosti betona in razbremenili do σ_b , vrednosti ki je enaka začetni napetosti 0.5 MPa. Statični elastični modul betona E_s smo izračunali v zadnjem ciklu v skladu z enačbo (12).

Pred preiskavo samega modula smo morali določiti tlačno trdnost istega betona z upoštevanjem standarda SIST EN 12390-3:2009 na vzorcih treh kock s stranicami 150 mm. Za tlačno trdnost smo upoštevali povprečno vrednost vseh treh dobljenih vrednosti.



Slika 13: Določanje statičnega elastičnega modula E_s

Dinamični elastični modul E_d smo določili z neporušno metodo resonančne frekvence. Metoda je primerna za določitev dinamičnega elastičnega modula E_d , strižnega modula G in Poissonovega koeficienta μ , in sicer izotropnih, homogenih ter elastičnih materialov pri sobni temperaturi. Uporabna je za vzorce v obliki prizme okroglega ali pravokotnega prereza, pa tudi za kompozitne oziroma nehomogene in neizotropne materiale, pri čemer je potrebno dosledno upoštevati učinke nehomogenosti, ki imajo neposreden vpliv na elastične lastnosti preskušanca. Metoda je podrobno opisana v standardu ASTM E 1876-99.

Metoda resonančne frekvence je neporušna, zasnovana na principu indukcije valovanja, ki ga mehansko vzbujamo kakor prikazujeta sliki 14 in 15. Je enostavna, kar nam omogoča izvedbo številnih meritev v relativno kratkem času. Potrebno je malo energije, da s kladivcem vzbudimo mehanski impulz, ki ga potrebujemo za merjenje resonančne frekvence vzorca. Udarec mora biti lahкотen in elastičen. Mehanske vibracije nato zazna sprejemnik, ki jih spremeni v električne signale. Točke vzbujanja vibracij in točke zaznavanja vibracij ter podpore vzorca določimo tako, da omogočajo meritev željenega načina prehodnih vibracij.

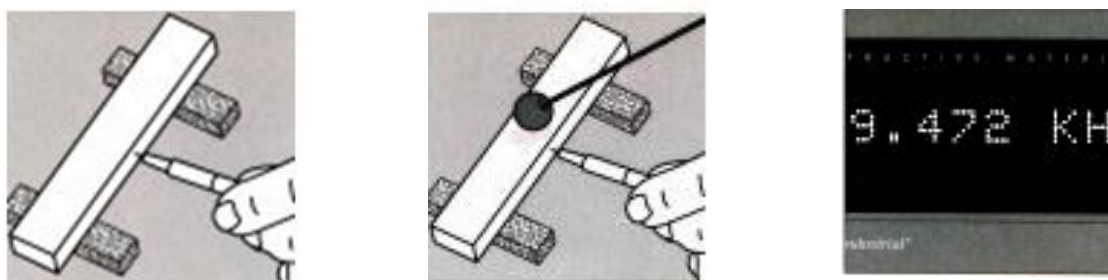
Inštrument sestavljajo sledeči elementi: impulzer, detektor signala, elektronski sistem in sistem podpor.

Impulzer - je namenjen generiranju impulza. Velikost je odvisna od vzorca in potrebne sile za ustvarjanje impulzov. Pri preskušancih običajnih dimenzij je dolžine 10 mm z jekleno kroglico premera 5 mm, ki je pritrjena na koncu in služi kot utež.

Detektor signala - z njim izmerimo valovanje v vzorcu, običajno so v obliki PZE merilcev pospeškov. Po dotiku s preskušancem izmerijo signal valovanja v njem. Frekvenčno območje detektorja mora biti v rangi pričakovanih frekvenc.

Elektronski sistem - sestavljajo ga ojačevalnik signala, detektor in sistem za določanje frekvence valovanja ter prikaz rezultata. Za obdelavo signala je primeren sistem analize frekvence z možnostjo shranjevanja podatkov v spomin.

Sistem podpor - podpore preprečujejo vpliv zunanjih vibracij na vzorec, vendar ne omejujejo zahtevanega načina vibriranja preskušanca. Za vsako obliko valovanja uporabimo zahtevani podporni sistem.



Slika 14: Meritev prehoda vibracij (www.grindosonic.com)

Dinamični elastični modul E_d [Pa] za vzorec pravokotnega prereza izračunamo z enačbo avtorjev Spinner et al. (1960):

$$E_d = 0.9465 \frac{m f_f^2}{b} \frac{L^3}{t^3} T_1 \quad (14)$$

kjer so:

m masa vzorca [g];

b širina vzorca [mm];

L dolžina vzorca [mm];

t debelina vzorca [mm] in

f_f osnovna resonančna frekvenca vzorca pri upogibu [Hz].

V enačbi (14) T_1 predstavlja korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco, ki upošteva geometrijo vzorca, Poissonovo število itd. Določimo ga z empirično enačbo avtorjev Spinner et al. (1960):

$$T_1 = 1 + 6.585 \left(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2\right) \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2 - \quad (15)$$
$$- 0.868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \frac{8.34 \cdot (1 + 0.20\mu + 2.173\mu^2) \cdot (t/L)^4}{1 + 6.34 \cdot (1 + 0.14\mu + 1.536\mu^2) \cdot (t/L)^2}$$

V primeru kadar je razmerje $L/t \leq 20$ in Poissonovo število ni znano, privzamemo začetno Poissonovo število. Dejansko Poissonovo število, osnovano na osnovi eksperimentalnega elastičnega in strižnega modula pa določimo iterativno:

1. izmerimo resonančno in torzijsko frekvenco vzorca pravokotnega prereza, pri čemer dinamični strižni modul določimo po enačbah (16), (17) in (18).
2. Izračunamo dinamični elastični modul po enačbah (14) in (15).
3. Določimo novo vrednost Poissonovega števila, enačba (19).
4. Postopek iz točk 2 in 3 ponavljamo, dokler se vrednost Poissonovega števila zadnje in predzadnje iteracije ne razlikuje bistveno.
5. Z dobljeno vrednostjo Poissonovega števila nato določimo še ostale količine.

Dinamični strižni modul G [Pa] za vzorec pravokotnega prečnega prereza izračunamo z enačbo:

$$G = \frac{4 L m f_t^2}{b t} \left(\frac{B}{1 + A} \right) \quad (16)$$

kjer nastopajo:

f_t osnovna torzijska resonančna frekvenca [Hz];

A in B sta empirična korekcijska faktorja, odvisna od razmerja med debelino in širino vzorca;

V primerih kadar je zahtevana napaka izračuna manjša od 2 %, faktor A lahko izpustimo.

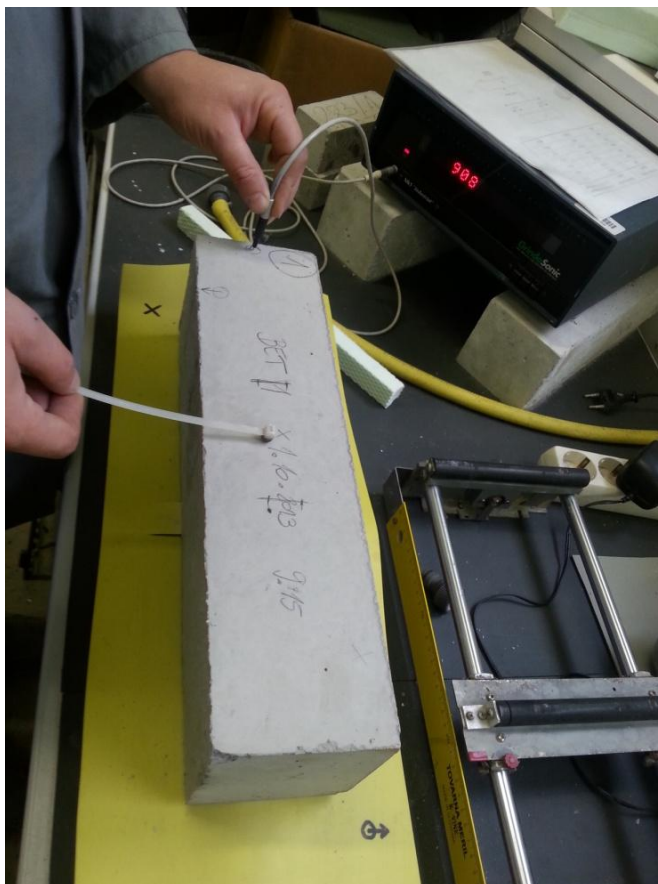
Koeficienta A in B določimo s spodnjima enačbama:

$$A = \frac{0.5062 - 0.8776(b/t) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078}{12.03(b/t) + 0.9892(b/t)^2} \quad (17)$$

$$B = \frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \quad (18)$$

Poissonovo število μ pa se določi:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (19)$$



Slika 15: Meritev prehoda vibracij skozi betonsko prizmo z napravo GrindoSonic

4.2 Določanje tlačne trdnosti

Tlačno trdnost betona TT [N/mm^2] smo določali skladno s standardom SIST EN 12390-3:2009. Uporabili smo hidravlično stiskalnico proizvajalca Toni Technik (slika 16), katera ustreza vsem zahtevam standarda SIST EN 12390-4:2001, ki določa specifikacije za stiskalnice, s katerimi se določa tlačna trdnost vzorcev. Vzorci so bili kocke velikosti $150 \times 150 \times 150$ mm v skladu s standardom SIST EN 12390-1:2013 ter ustrezno negovani.



Slika 16: Preiskava tlačne trdnosti z destruktivno metodo

Poleg stiskalnice Toni Technik, smo tlačno trdnost določali tudi na univerzalnem preskuševalnem stroju Zwick 400, ki je prikazan na sliki 17. Prednost naprave je v natančnosti pri nizkih preskusnih obremenitvah in večjem razponu hitrosti obremenjevanja. Z uporabo Zwicka 400 smo določili zgodnje tlačne trdnosti na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm in prizmah velikosti $40 \times 40 \times 160$ mm, skladno s standardom SIST EN 12390-3:2009.



Slika 17: Preskuševalni stroj Zwick 400

Preskušanec vstavimo na sredino spodnje plošče s točnostjo $\pm 1 \%$ in sicer tako, da je smer uvajanja sile pravokotna na smer vgrajevanja. Na dobljene vrednosti trdnostnih karakteristik otrdelega betona vpliva hitrost obremenjevanja, zato obremenitev nanašamo s konstantno hitrostjo $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, dokler ne dosežemo stopnje obremenitve, ki ne presega približno 30 % končne trdnosti. Le to uvajamo brez sunkov in jo enakomerno povečujemo z izbrano konstantno hitrostjo $\pm 10 \%$, do maksimalne obremenitve, kakor narekuje standard.

4.3 Določanje konsistence sveže mešanice

Konsistenco sveže mešanice smo določevali vizualno. Za tak način določevanja smo se odločili, ker klasične metode, opisane v poglavju 2.4.2, za zemeljsko vlažne mešanice odpovedo. Za klasifikacijo posameznih svežih mešanic smo uporabili preglednico 5. Konsistenčne razrede smo določili na osnovi obdelovalnosti, videza mešanice in odpora, ki ga je ta prožila ponovnemu zamešanju.

Preglednica 5: Konsistenčni razredi

Konsistenčni razred	Opis
Konsistenca 1	Plastično, lahko obdelovalno in vgradljivo.
Konsistenca 2	Srednje do težko obdelovalno in vgradljivo.
Konsistenca 3	Oteženo ponovno zamešanje, zemeljsko vlažno, težko obdelovalno in vgradljivo, potrebno več energije za vgradnjo.
Konsistenca 4	Potrebna velika mehanska sila za ponovno zamešanje, neobdelovalno, zelo težko vgradljivo.

4.4 Določanje časa vezanja z metodo Vicatovega aparata

Vicatov postopek za določanje časa vezanja cementne paste je opisan v standardu SIST EN 196-3:2005. Postopek temelji na globini penetracije standardizirane jeklene igle v cementno pasto. Cementna pasta standardne konsistence se neposredno po zamešanju namesti v gumijaste kalupe, ki zavzemajo obliko cilindra višine 40 ± 0.2 mm, notranjega premera 75 ± 10 mm. Globina prodora igle v cementno pasto se meri v enakomernih časovnih intervalih. Začetek vezanja cementne paste je definiran kot čas, pri katerem znaša razdalja med spodnjo površino vzorca in testno iglo 6 ± 3 mm. Končni čas vezanja se določi tako da se preskušanelec obrne in s posebno iglo meri globina penetracije konice igle v cementno pasto. Končni čas vezanja je definiran kot čas, pri katerem igla v preskušanelec prodre manj kot 1 mm.

4.5 Določanje zgodnjih tlačnih trdnosti z metodo penetrometra

Metoda za določanje zgodnjih tlačnih trdnosti betonskih mešanic z metodo penetrometra temelji na ugotavljanju odpora materiala glede na penetracijo igle. Primerna je za določitev tlačnih trdnosti betonskih mešanic z največjim zrnom agregata 8 mm. Vrednosti se določijo iz sile, ki je potrebna za prodor igle 15 mm v površino vzorca. Konica igle, ki je pod kotom 60° , je velikosti 3 mm. Z metodo je mogoče določiti trdnosti do velikosti približno $1,5 \text{ N/mm}^2$. Rezultati metode so odvisni od sestave zmesi, to je od uporabljenih agregatov, in ne odražajo nujno absolutnih vrednosti tlačne trdnosti.

4.6 Določanje časa vezanja z uporabo ultrazvočnega valovanja

Za določitev časa vezanja cementnih past z uporabo ultrazvočnih valov smo uporabili ultrazvočni aparat s sprejemno in oddajno sondo premera 25 mm (slika 18). Inštrument deluje s frekvenco 150 kHz in je povezan z računalnikom, kamor se podatki avtomatsko shranjujejo in beležijo. Poleg tega smo merili in beležili tudi temperaturo v središču vzorca, za kar smo uporabili predhodno kalibrirane termočlene. Vzorec se vgradi v kalup iz ekstrudiranega polistirena dimenzij $50 \times 50 \times 50$ mm, tako da sondi vgradimo na vzporedni stranici in 5 mm vtisnemo v cementno pasto zaradi zagotovitve kontakta. Z uporabo v ta namen razvite programske opreme računalnik signal vzdolžnega valovanja s Fourierjevo transformacijo pretvori v frekvenčni spekter. V frekvenčnem spektru cementnih past prevladujeta dve frekvenci (Grosse, Reinhardt, 2000), in sicer nizka, vrednosti med 0 in 50 kHz in jo označujemo f_L ter visoka f_H , ki zavzema vrednosti med 100 in 150 kHz.



Slika 18: Določitev časa vezanja z uporabo ultrazvočnega valovanja

V prvih urah se visoke frekvence ne pojavljajo, z napredkom hidratacije pa nastajajo pomembne spremembe v frekvenčnem spektru (Trtnik, Gams, 2013a). Postopoma se razvijajo visoke frekvence, ki se skoncentrirajo okoli frekvence 120 kHz. Po določenem času se amplitude visokih frekvenc izenačijo z amplitudami nizkih frekvenc, v nadaljevanju procesa pa nizke frekvence postopoma izginejo in ostanejo samo visoke (Trtnik, Gams, 2013a).

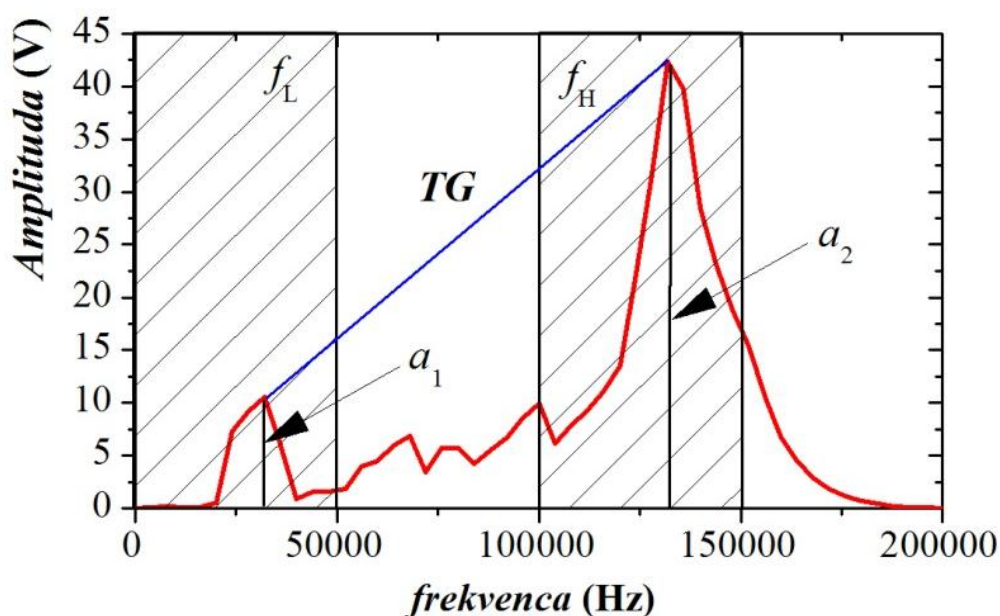
Opisani fenomeni spreminjanja amplitud dveh prevladujočih frekvenc so bili motiv za definiranje novega brezdimenzijskega parametra TG , ki je definiran z enačbo (Trtnik, Gams, 2013a):

$$TG = \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1} \quad (20)$$

kjer nastopata:

a_1 maksimalna amplituda pri f_L [V];

a_2 maksimalna amplituda pri f_H [V].



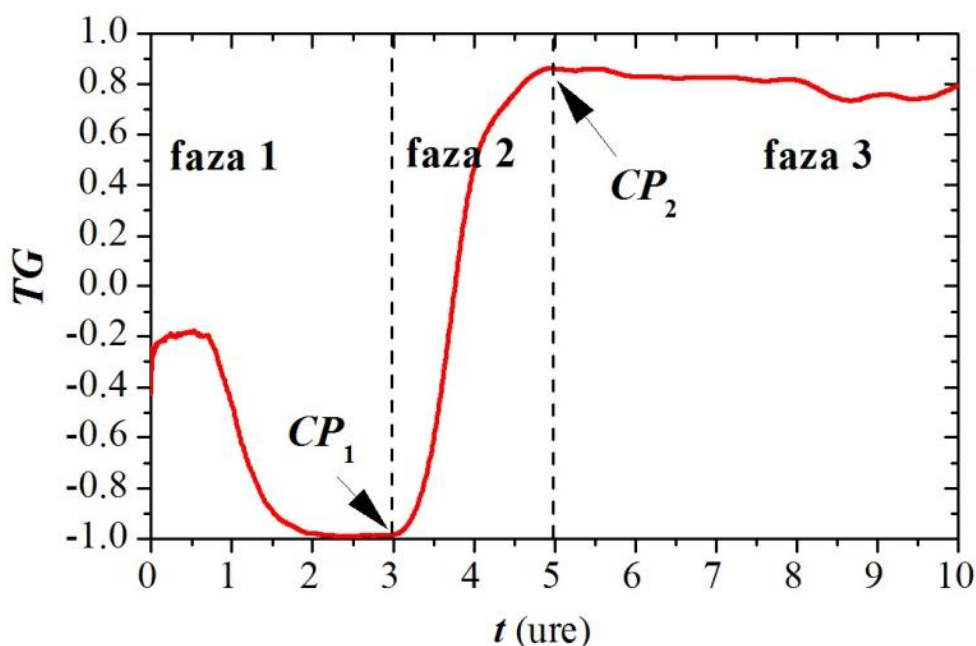
Slika 19: Definicija TG parametra

Definicija TG parametra je shematsko prikazana na sliki 19. Parameter TG zavzema interval med vrednostima -1 in 1. Parameter je enak -1 kadar visokih frekvenc ni in 1, ko prevladujejo visoke frekvence in so nizke zanemarljivo majhne. TG parameter se samodejno izračunava v določenem časovnem intervalu in beleži kot diagram odvisnosti od časa.

Časovni diagram lahko razdelimo na tri karakteristične faze prikazane na sliki 20. V prvi se vrednost TG parametra manjša od 0 do -1. TG parameter se stabilizira okoli vrednosti -1, kar odraža da visokih frekvenc v tem obdobju hidratacije ni. Na koncu faze se pojavljajo samo nizke frekvence velikosti manjše od 10 kHz. Pri času t_{CP1} , ki je definiran kot prva karakteristična točka CP_1 krivulje $TG-t$ se prične druga najpomembnejša faza. V tem obdobju se prične frekvenčni spekter bistveno spreminjati. Postopno se razvijajo visoke frekvence okoli vrednosti 120 kHz in TG parameter bistveno narašča. Po določenem času TG parameter seka absciso pri vrednosti 0, kar pomeni da sta v tem času amplitudi visoke in nizke frekvence izenačeni. Parameter TG pridobiva na vrednosti do časa t_{CP2} , ki je definiran

kot druga karakteristična točka CP_2 in je začetek tretje faze. V tem obdobju se TG parameter giblje okoli vrednosti 1, kar pomeni da v zadnji fazi prevladujejo visoke frekvence.

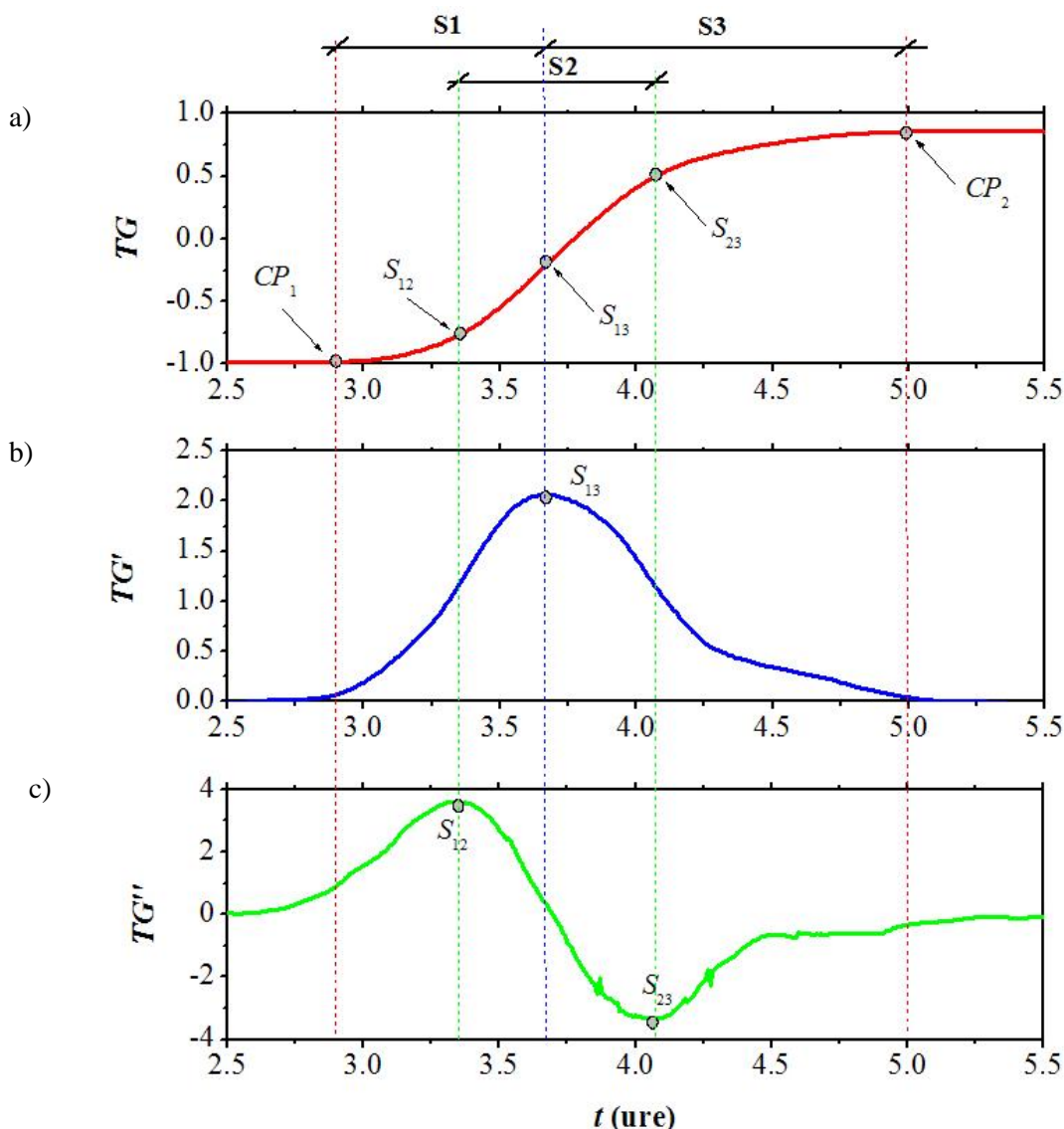
Sprememba parametra TG v drugi fazi je jasna, kar pomeni da je določitev karakterističnih točk natančna in nedvoumna. Vrednosti TG parametra so neodvisne od sestave materiala (Trtnik, Gams, 2013b).



Slika 20: Tipična oblika krivulje $TG - t$

Karakteristični točki CP_1 in CP_2 sovpadata z začetkom in koncem vezanja (Trtnik, Gams, 2013b). Meritve in preskusi so pokazali, da zgoraj opisane faze in karakteristični točki krivulje $TG - t$ veljajo tudi v primeru malt in betonskih mešanic, kar nakazuje da se frekvenčni spekter pretvorjen iz longitudinalnega vzdolžnega valovanja razvija podobno kot pri cementnih pastah (Trtnik, Gams, 2013b). Metoda jasno in nedvoumno pokaže začetek in konec intenzivnega vezanja, deluje neodvisno od sestave materiala, vrste, količine in velikosti agregata ter je popolnoma avtomatizirana (Trtnik, Gams, 2013b).

Karakteristične točke in faze krivulje $TG - t$ so prikazane na slikah 21. Slike podrobno prikazujejo drugo fazo, kjer poteka vezanje materialov s cementnim vezivom. Krivulja med karakterističnima točkama CP_1 in CP_2 je sigmoidne oblike. Sestavlja jo pozitivno in negativno pospešena krivulja. Intenziteta hidratacije sprva narašča počasi, nato hitro naraste, na koncu pa se ustali na mejni ravni.



Slika 21: Definicija karakterističnih točk in faz v procesu vezanja materialov s cementnim vezivom; a) tipična oblika krivulje $TG - t$, b) tipična oblika krivulje $TG' - t$, c) tipična oblika krivulje $TG'' - t$

Slika 21a prikazuje tipično obliko krivulje $TG - t$ v obdobju vezanja, slika 21b fizikalno prikazuje hitrost procesa vezanja v odvisnosti od časa, slika 21c pa ponazarja pospešek vezanja v odvisnosti od časa. Vse tri slike veljajo za materiale s cementnim vezivom. Karakteristična točka CP_1 je začetek obdobja vezanja in določa čas t_{CP_1} , pri katerem se proces vezanja začne.

Faze ena (S1), dva (S2) in tri (S3) se v obdobju vezanja medsebojno prekrivajo pri čemer so:

- S1 – obdobje pospešenega vezanja, hitrost se povečuje in pospešek je pozitiven;
- S2 – obdobje najbolj intenzivnega vezanja, hitrost doseže maksimalno vrednost, pospešek preide iz maksimalne vrednosti na začetku obdobja v maksimalni pojemek na koncu obdobja;
- S3 – obdobje pojemanja, hitrost se manjša in negativni pospešek.

Točka S_{12} pomeni začetek druge faze, fizikalno je to čas maksimalnega pospeška, kar vidimo iz slike 21c. S_{13} določa začetek tretje faze in konec prve, fizikalno točka predstavlja čas, pri katerem je hitrost vezanja največja (slika 21b). Zadnja karakteristična točka poimenovana S_{23} določa konec druge faze in fizikalno predstavlja vrednost maksimalnega pojemka. V točki CP_2 pri času t_{CP2} se proces vezanja konča.

Prednosti nove ultrazvočne metode so predvsem (Trtnik, Gams 2013b):

- metoda jasno in nedvoumno pokaže obdobje intenzivnega vezanja materiala, t.j. transformacijo materiala iz tekočega v trdno stanje,
- jasno in nedvoumno pokaže začetek in konec obdobja intenzivnega vezanja,
- deluje neodvisno od sestave materiala, vrste, količine in velikosti agregata,
- je uporabna za vse vrste cementnih mešanic in
- je popolnoma avtomatizirana.

Primeri uporabnosti nove UZ metode (Trtnik, Gams 2013c):

- *industrija cementne proizvodnje*: nova metoda za spremljanje fenomenov formiranja strukture in vezanja različnih vrst cementov,
- *industrija proizvodnje dodatkov*: nova metoda za spremljanje vpliva prisotnosti dodatkov na proces formiranja strukture in vezanja,
- *raziskovalni laboratoriji in univerze*: nova metoda za spremljanje vpliva različnih parametrov sestave na fenomene formiranja strukture in vezanja različnih materialov s cementnim vezivom,
- *testna metoda na terenu*.

4.7 Metodologija dela

Za potrebe doseganja cilja diplomskega dela (poglavje 1.2) smo v laboratoriju sprojektirali tri osnovne recepture, in sicer za: cementno pasto, malto in beton. Zamešali smo 6 mešanic enake recepture cementne paste, 4 šarže malte in 5 šarž betona. Sestav prikazanih v poglavjih 3.2, 3.3 in 3.4.

Prvo mešanico smo vgradili takoj po zamešanju skladno s standardom SIST EN 12390-1:2013, ostale pa pustili mirovati za predhodno izbrani časovni interval. Le ta je bil določen na podlagi poteka vezanja osnovnega materiala (t.j. materiala vgrajenega neposredno po zamešanju), določenega z obliko krivulje $TG - t$, kot je prikazano v poglavju 4.6. Po pretečenem času smo jih ponovno zamešali, s čimer smo mehansko posegli v njihovo strukturo in jih nato vgradili.

Vzorec mešanice smo vgradili v kalup iz ekstrudiranega polistirena, ki ne prevaja valovanja in tako preprečili prehod valov preko sten kalupa. Namestili smo sonde in predhodno kalibriran termočlen, vse skupaj pa je bilo povezano z računalnikom. Tako smo z metodo ultrazvočnega valovanja opisano v prejšnjem poglavju spremljali proces hidratacije.

Mešanice smo v kalupe vgrajevali na vibracijski mizi. Kalup smo predhodno namazali z biološko razgradljivim opažnim oljem in ga do polovice napolnili z mešanico. Vibrirali smo toliko časa, dokler so se na površini pojavljali zračni mehurčki. Nato smo z mešanico zapolnili še drugo polovico kalupa ter postopek ponovili. Po končani vgradnji smo skladno s standardom SIST EN 12390-2:2009 poskrbeli za ustrezno nego vzorcev.

Od vsake posamezne šarže malte in betona smo vgradili 18 kock dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm za določanje zgodnjih tlačnih trdnosti, ki smo jih določili z univerzalnim preskuševalnim strojem ZWICK 400 in 12 kock velikosti $150 \times 150 \times 150$ mm, na katerih smo s strojem Toni Technik določili 1, 2, 3 in 7 dnevne tlačne trdnosti. Poleg tega smo od vsake šarže betona in malte izdelali tri preskušance v obliki prizme velikosti $100 \times 100 \times 400$ mm, na katerih smo določevali statični (univerzalni preskuševalni stroj ZWICK 400) in dinamični elastični modul (GrindoSonic). Meritve smo ravno tako kot za tlačne trdnosti izvajali 1, 2, 3 in 7 dan.

Vzorci cementne paste smo vgrajevali v kalupe v obliki prizem dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm. Za vsako mešanico smo izdelali 6 prizem za določevanje zgodnjih tlačnih trdnosti z univerzalno preskuševalno napravo ZWICK 400 in 3 prizme za določitev 1, 2 in 3 dnevnih tlačnih trdnosti z isto napravo. Na vsaki prizmi dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm smo določili tri vrednosti tlačne trdnosti.

V okviru eksperimentalnega dela smo tako izdelali:

- 54 prizem dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm
- 162 kock dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm
- 108 kock dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm in
- 27 prizem dimenzij $100 \times 100 \times 400$ mm.

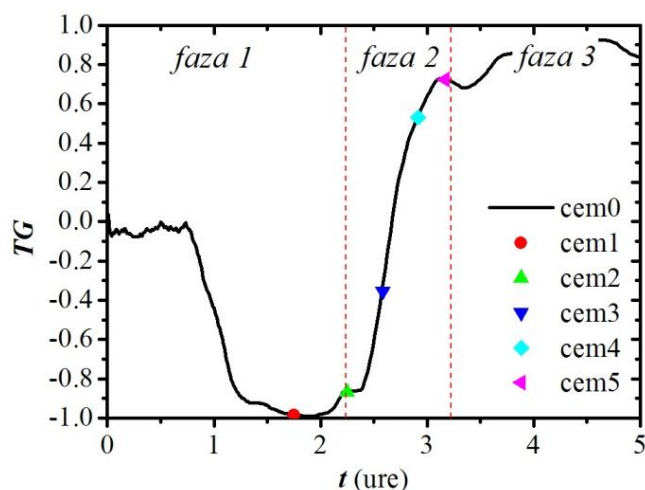
Vsaka upoštevana vrednost je reprezentativna, in sicer povprečje treh izmerjenih vrednosti.

5 REZULTATI

V tem poglavju so prikazani rezultati, ki smo jih pridobili tekom laboratorijskih preiskav na cementni pasti, malti in betonu. Namen je pokazati vpliv mehanskega posega v strukturo (naknadno ponovno mešanje, pozno vibriranje) oz. poznejše vgradnje (kadar ne moremo zagotoviti vgradnje mešanice takoj po pripravi) na:

- tlačno trdnost,
- čas vezanja,
- elastični modul in
- konsistenco.

5.1 Cementne paste

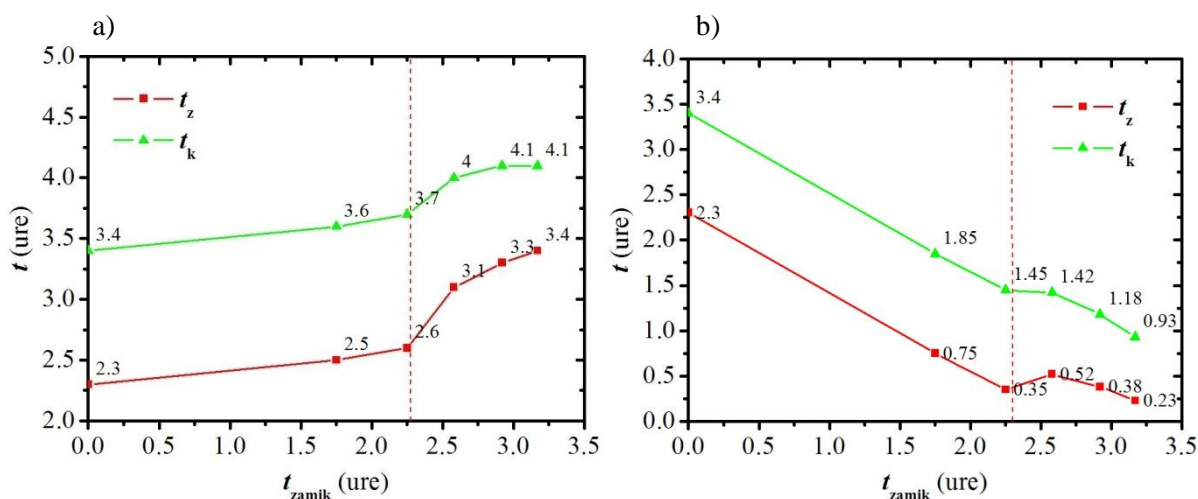


Slika 22: Shematski prikaz priprave cementnih past

Na sliki 22 so shematsko prikazani časi, pri katerih smo ponovno zamešali cementno pasto. Za vse mešanice so bili zagotovljeni enaki pogoji in vodocementni količnik (preglednica 2). Osnovna krivulja je TG parameter v odvisnosti od časa t osnovne mešanice (oznaka cem0), ki smo jo vgradili takoj po pripravi. Krivulja je bila osnova za določitev časov, pri katerih smo znova zamešali, to je mehansko posegli v strukturo cementne paste, saj nova UZ metoda jasno in nedvoumno pokaže obdobje intenzivnega vezanja materiala. Tako smo mešanico cem1, ki je na sliki 22 označena z rdečo piko znova zamešali eno uro in petinštirideset minut pozneje, in sicer v prvi fazi, približno pol ure pred karakteristično točko CP_1 , ki določa začetek vezanja. Mešanica je bila konsistenčnega razreda 1 (glej preglednico 5). Cementno pasto oznake cem2 na sliki 22 označeno z zelenim trikotnikom smo ponovno zamešali čez dve uri in petnajst minut po prvem stiku cementa in vode. Čas je bil izbran na podlagi sovpadanja s karakteristično točko CP_1 , t.j. začetkom vezanja. Tudi ta mešanica je bila

konsistenčnega razreda 1 (preglednica 5). Naslednjo mešanico cementne paste cem3 smo zamešali dve uri in petintrideset minut pozneje, kar je približno na tretjini druge faze, v kateri poteka proces vezanja. V tem obdobju se je že pojavila sprememba konsistence, mešanica je bila konsistenčnega razreda 2 (preglednica 5). Cem4 smo znova zamešali čez dve uri in petdeset minut oz. na drugi tretjini druge faze, kjer že prevladujejo visoke frekvence, kar je znak, da se približujemo koncu obdobja vezanja. Mešanica je postala bolj toga, zato smo jo uvrstili v konsistenčni razred 3. Zanimal nas je vpliv mehanskega posega tik pred koncem vezanja, zato smo zadnjo mešanico cementne paste cem5 pustili mirovati tri ure in deset minut (slika 22). V tem obdobju je mešanica že dosegla četrti konsistenčni razred. Vsako mešanico cementne paste smo nato vgradili v kalupe za preiskave tlačnih trdnosti ter spremljanje procesa hidratacije.

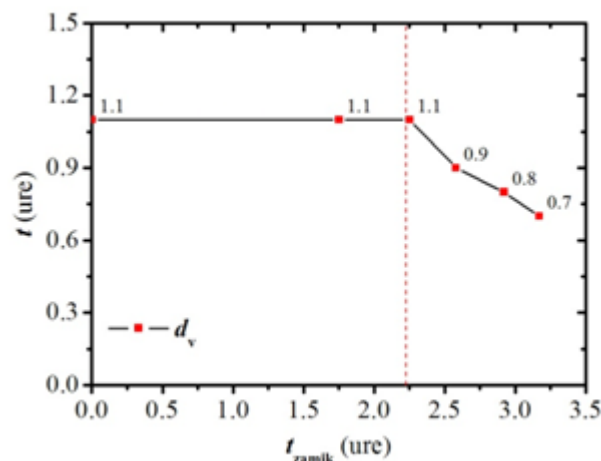
Treba je poudariti, da sta bili mešanici cem4 in cem5 konsistenčnih stopenj, pri katerih smo morali uporabiti veliko mehansko silo, da nam je uspelo porušiti strukturo mešanice in jo ponovno zamešati. Prav tako je bilo potrebno veliko energije za zagotovitev ustrezne vgradnje v kalupe, predvsem mešanice cem5, ki smo jo ponovno zamešali tik pred koncem vezanja.



Slika 23: Začetek in konec vezanja cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave;
 a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

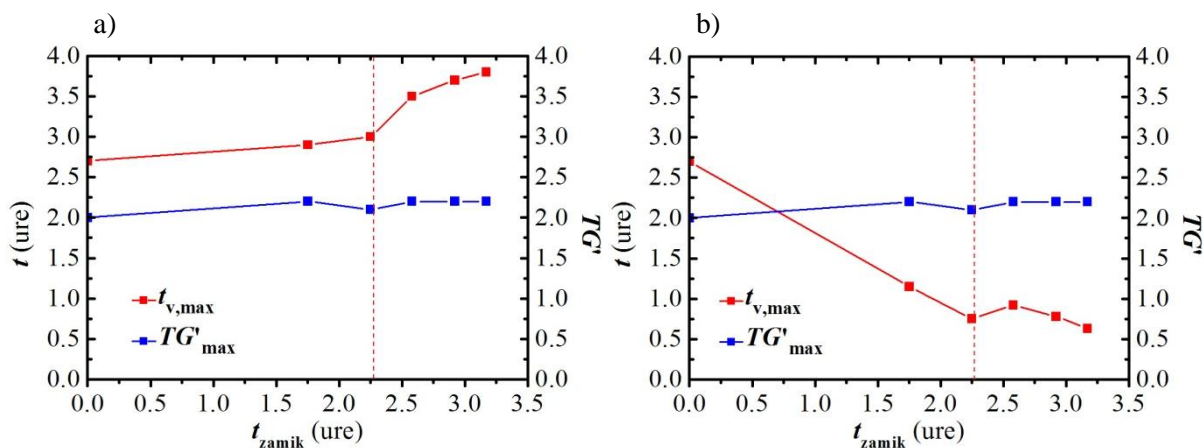
Slika 23a prikazuje absolutne vrednosti časov (čas merjen od prvotnega zamešanja, to je prvega stika cementa in vode) mešanic cementne paste oznak cem0 do cem5 pri katerih se je proces vezanja začel, kar je na grafu predstavljeno z rdečo barvo oz. časov pri katerih se je proces vezanja končal, kar ponazarja zelena barva. Na sliki 23b so prikazane relativne vrednosti časov (čas merjen od trenutka vgradnje v kalupe oz. ponovnega zamešanja) začetka in konca vezanja cementnih past. Iz grafa na sliki 23b je razvidno, da se relativni čas začetka in konca vezanja s podaljševanjem intervala mirovanja mešanice pred ponovnim zamešanjem krajša. Osnovna mešanica cem0 začne vezati dve uri in osemnajst minut po vgradnji in proces vezanja konča šestinsšestdeset minut kasneje ali tri ure in

štiriindvajset minut po vgradnji v kalup. Cem5, ki smo jo pustili mirovati najdlje, pa v relativnem smislu začne vezati štirinajst minut po vgradnji in proces vezanja zaključi najhitreje, v dvainštiridesetih minutah, kar je 36 % hitreje (slika 24).



Slika 24: Dolžina obdobja vezanja cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave

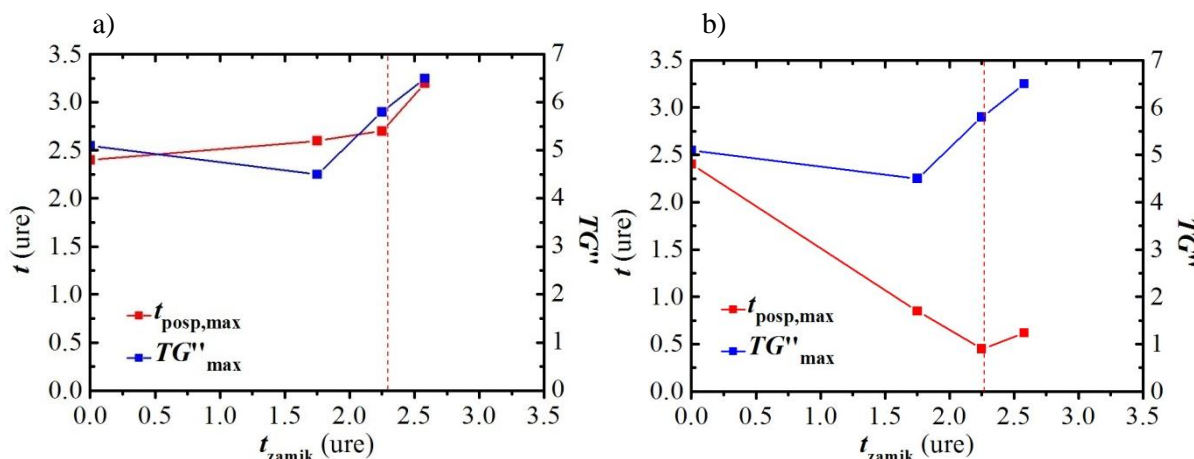
Opazimo, da pri mešaninah cementne paste, ki smo ju ponovno zamešali v obdobju prve faze (slika 22), naknadno mešanje ne vpliva na dolžino trajanja obdobja vezanja, medtem ko ponovno mešanje v obdobju procesa vezanja – drugi fazi, skrajša čas vezanja cementnih past. Z večanjem zamika ponovnega mešanja v drugi fazi smo pospeševali proces hidratacije, kar se odraža v krajšem obdobju vezanja.



Slika 25: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja cementnih past;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

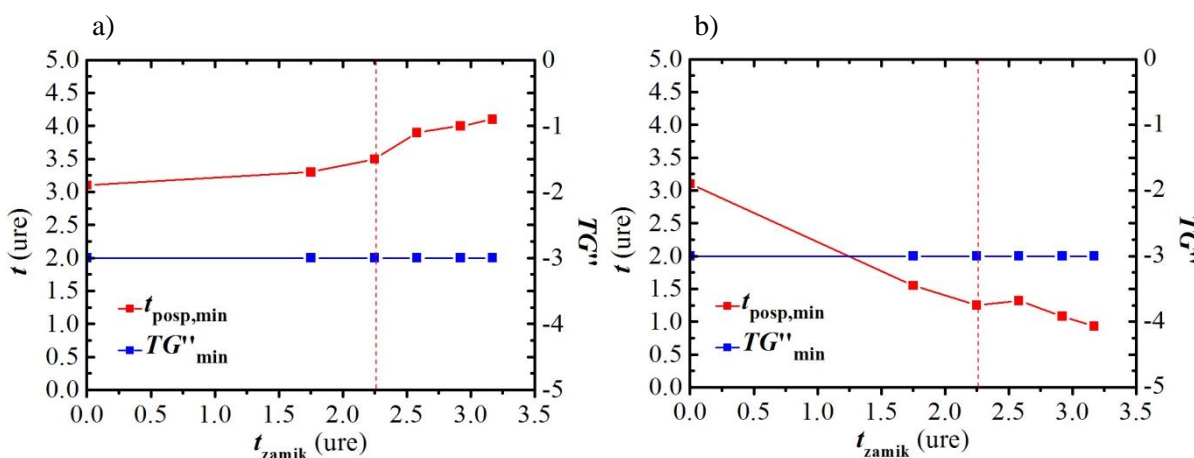
Hitrost spreminjanja TG parametra opisuje odvod krivulje $TG - t$ in fizikalno predstavlja hitrost procesa vezanja v odvisnosti od časa. Vrednosti največjih hitrosti spreminjanja TG parametra in časi, pri katerih so te vrednosti dosežene, so prikazani na sliki 25.

Absolutne vrednosti so prikazane na sliki 25a, relativne pa na sliki 25b. Iz grafov je razvidno, da se vrednosti največje hitrosti spreminjanja TG parametra z zamikom ponovnega mešanja ne razlikujejo bistveno. Zavzemajo vrednosti med 2 in 2,25. Kasneje smo mešanico ponovno zamešali, hitreje so bile v relativnem smislu dosežene največje hitrosti procesa vezanja.



Slika 26: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja cementnih past; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

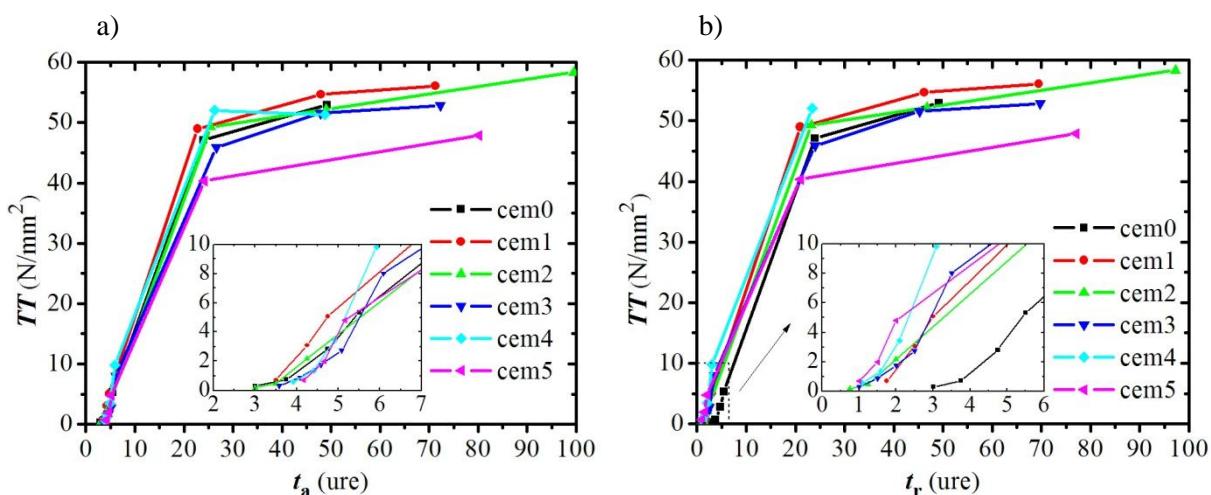
Slika 26 prikazuje maksimalno vrednost pospeška⁴ spreminjanja TG parametra posamezne mešanice cementne paste in čas, pri katerem je dosežen. Največjo vrednost pospeška je dosegla mešanica cem3, ki znaša 6,5, medtem ko je najnižjo vrednost dosegla mešanica cem1, in sicer 4,5. V relativnem smislu je največji pospešek najhitreje nastopil pri cementni pasti cem2. Pospešek velikosti 5,9 je bil dosežen pol ure po vgradnji. Iz grafa na sliki 26b opazimo, da največji pospeški v relativnem smislu nastopijo hitreje pri mešanicah, ki smo jih zamešali ponovno.



Slika 27: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja cementnih past; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

⁴ Drugega odvoda (TG'') za cementni pasti z oznakama cem4 in cem5 matematično ni bilo mogoče določiti.

Na sliki 27a in sliki 27b sta prikazana čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja posamezne mešanice cementne paste v absolutnem oz. relativnem smislu. Vidimo, da na vrednost največjega pojemka kasnejše ponovno mešanje ter interval zamika nimata vpliva. Vrednost pojemka je v vseh primerih zavzemala vrednost -3. Največji pojemek v relativnem smislu je nastopil hitreje z večanjem zamika ponovnega mešanja (slika 27b).



Slika 28: Časovni razvoj tlačnih trdnosti cementnih past, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost

Na sliki 28 je prikazan časovni potek razvoja tlačnih trdnosti cementnih past, in sicer v smislu absolutne starosti kar prikazuje graf na sliki 28a oz. relativne starosti prikazane na sliki 28b.

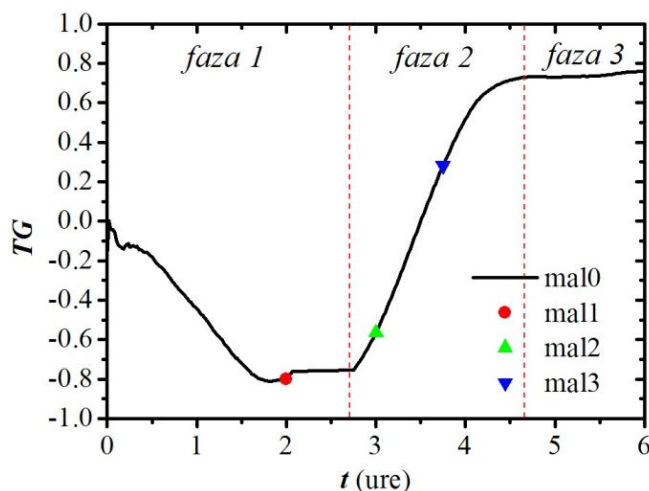
V manjšem grafu je prikazan razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti. Te so bile tako kot 1, 2 in 3 dnevne trdnosti dobljene na prizmah dimenzij $40 \times 40 \times 160$ mm. Vsaka prikazana vrednost na grafu je reprezentativna, in sicer povprečje treh izmerjenih vrednosti.

Na grafu zgodnjih tlačnih trdnosti (slika 28b) vidimo, da mešanice, ki smo jih pustili mirovati daljši čas, v prvih urah hitreje pridobivajo tlačno trdnost (čas merjen od trenutka vgradnje v kalupe oz. ponovnega zamešanja). Razlog je v hitrejšem začetku vezanja cementnih past v relativnem smislu, kar prikazuje graf na sliki 23b. Dobljene končne tlačne trdnosti se ne razlikujejo bistveno, z izjemo mešanice cem5, ki pri starosti 3 dni doseže približno 21 % nižjo tlačno trdnost.

Mehanski poseg v strukturo cementne paste praktično ni imel večjih posledic na vrednost končnih tlačnih trdnosti, z izjemo mešanice cem5, ki smo jo ponovno zamešali povsem na koncu obdobja vezanja oz. II. faze. Čas vezanja se je v primerih, kadar smo mehansko posegli v strukturo cementne paste v obdobju, ko je material že začel z vezanjem, skrajšal.

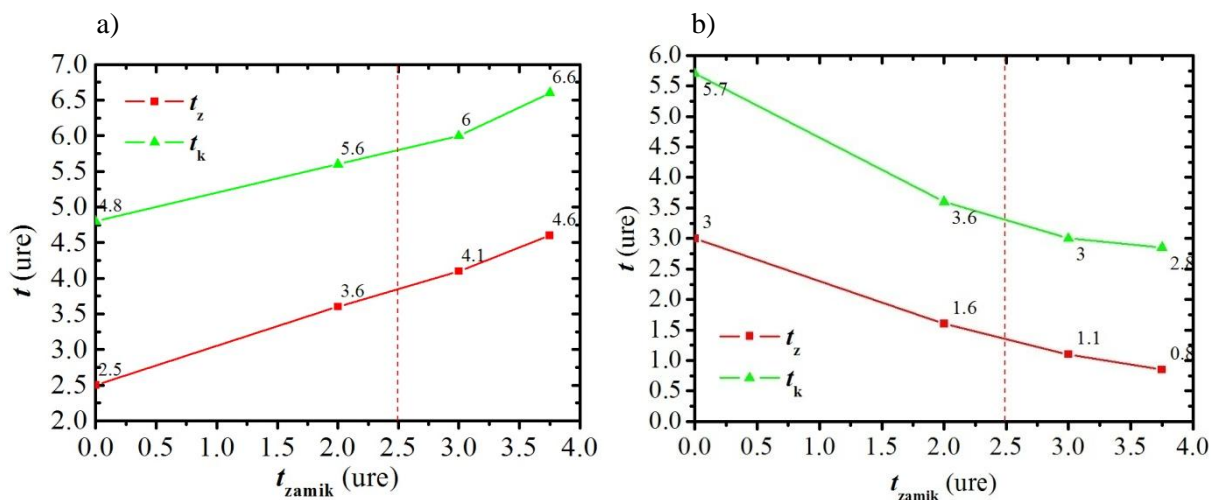
5.2 Malte

Vse mešanice malte, zajete v okviru laboratorijskih preiskav, so bile izpostavljene enakim pogojem ter so bile enakega vodocementnega razmerja (preglednica 3). Osnovna krivulja parametra TG v odvisnosti od časa in časi, pri katerih smo ponovno zamešali posamezno šaržo malte, so označeni na sliki 29.



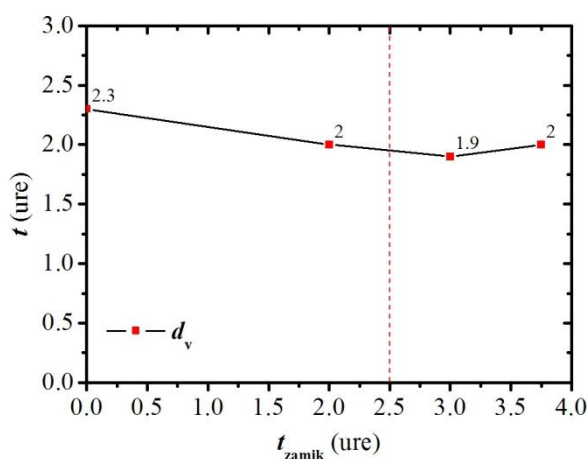
Slika 29: Shematski prikaz priprave malt

Za namen preiskav smo zamešali in vgradili štiri mešanice malte oznak mal0 do mal3. Mal0 ali osnovno mešanico malte smo vgradili takoj po zamešanju in je spadala v prvi konsistenčni razred (preglednica 5). Z uporabo nove UZ metode, predstavljene v poglavju 4.6, smo določili krivuljo $TG - t$, ki je bila osnova za kasnejšo določitev časov, pri katerih smo znova zamešali, to je mehansko posegli v strukturo malte. Prvo mešanico z oznako mal1 smo ponovno zamešali čez dve uri, in sicer petinštirideset minut pred obdobjem vezanja (slika29). Mešanica je spadala v konsistenčni razred 1 (preglednica 5). Malto mal2 smo zamešali tri ure po prvotnem zamešanju oz. petnajst minut po začetku vezanja. Zaznati je bilo določene spremembe konsistence, zato smo mal2 uvrstili v drug konsistenčni razred (preglednica 5). Zadnjo mešanico malte na grafu označeno mal3 smo ponovno zamešali tri ure in petinštirideset minut kasneje, kar ustreza približno polovici časa druge faze. Malto mal3 smo uvrstili v konsistenčni razred 3 (preglednica 5). Vse mešanice smo po ponovnem zamešanju skladno s standardom vgradili. Vzorec vsake mešanice smo vgradili tudi v kalup iz ekstrudiranega polistirena in z uporabo ultrazvoka (poglavje 4.6) spremljali proces hidratacije. Rezultati, dobljeni z opisanim postopkom, so predstavljeni v nadaljevanju.



Slika 30: Začetek in konec vezanja malt, uporabljenih v okviru preiskave;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

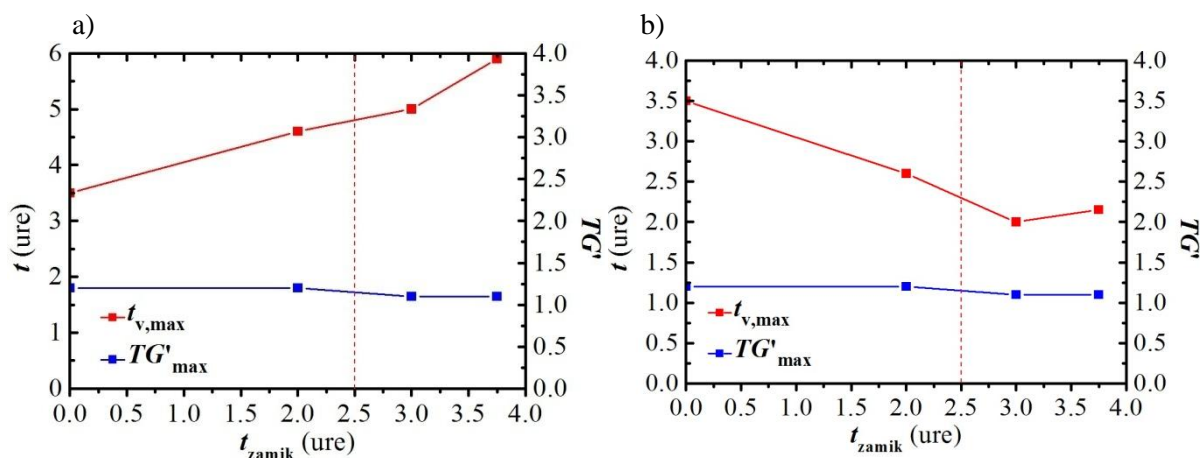
Iz slike 30b, kjer sta na grafu prikazana začetek in konec vezanja posamezne mešanice v odvisnosti od intervala časovnega zamika, je razvidno, da se proces vezanja v relativnem smislu začne hitreje pri maltah, ki smo jih ponovno zamešali kasneje. Mešanica mal0 vgrajena takoj po pripravi, do začetka procesa vezanja potrebuje tri ure, medtem ko mešanica mal3, ki smo jo ponovno zamešali tri ure in petinštirideset minut pozneje, proces vezanja v relativnem smislu začne osemštirideset minut po vgradnji. Podobno se tudi čas, ki v relativnem smislu določa konec vezanja, krajša v odvisnosti od zamika ponovnega mešanja.



Slika 31: Dolžina obdobja vezanja malt, uporabljenih v okviru preiskave

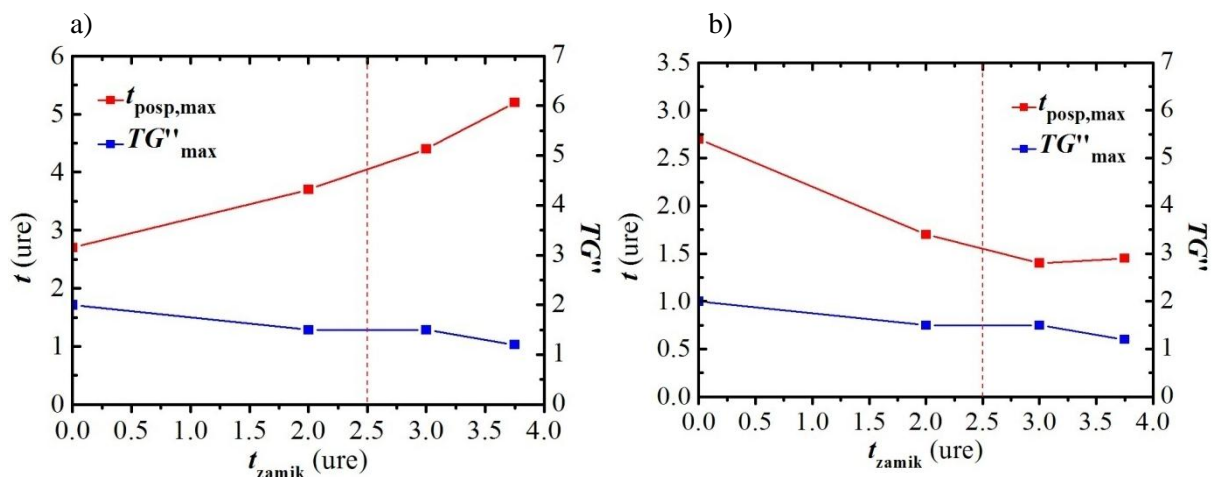
Dolžina trajanja obdobja vezanja malt je prikazana na sliki 31. Vidimo, da se obdobje vezanja z zamikom minimalno skrajša. Najhitreje se je proces vezanja zaključil pri mešanici mal2, po eni uri in štiriinpetdeset minut, medtem ko je proces osnovne mešanice malte trajal približno 21 % dlje, in sicer

dve uri in osemnajst minut. Razlog za to lahko pripišemo hitrejšemu nastopu največjih sprememb hitrosti in največjega pospeška spreminjanja TG parametra v obdobju vezanja (sliki 32b in 33b).



Slika 32: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja malt;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

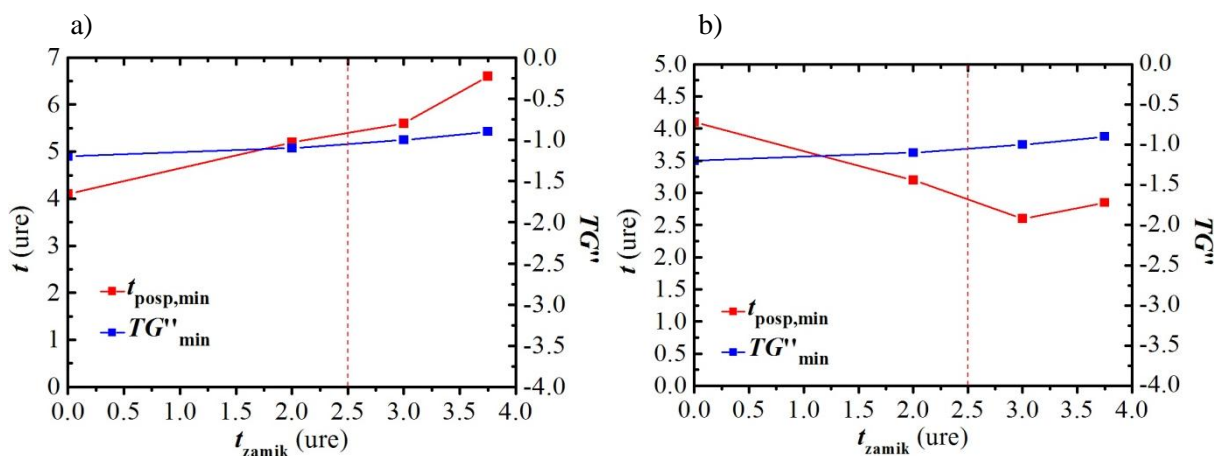
Iz slike 32 opazimo, da se vrednosti največje hitrosti spreminjanja TG parametra tekom procesa vezanja ne razlikujejo bistveno. Največje hitrosti v relativnem smislu so bile najhitreje dosežene pri mešanici z oznako mal2 (slika 32b).



Slika 33: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja malt;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

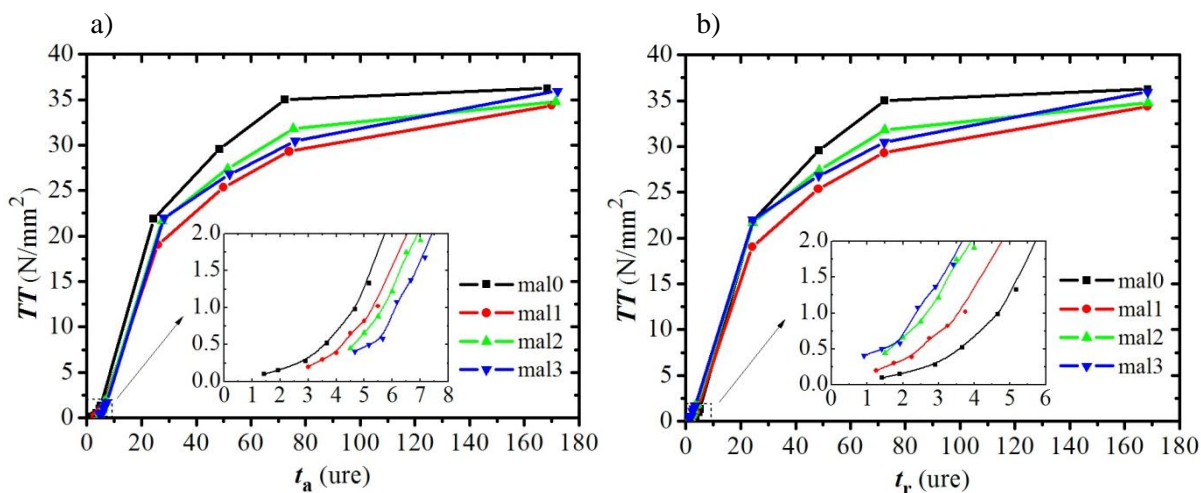
Tudi pri vrednostih največjega pospeška spreminjanja TG parametra posamezne mešanice med obdobjem vezanja malt ni bistvenih odstopanj (slika 33). Največji pospeški zavzemajo vrednosti med 1,2 in 1,5. Relativni čas, pri katerem je maksimalna vrednost pospeška dosežena, je ponovno najkrajši pri malti mal2 (slika 33b). Čas osnovne mešanice malte, ko je bil dosežen največji pospešek spreminjanja TG parametra, je v relativnem smislu znašal dve uri in dvainštirideset minut, medtem ko

je bil pri malti mal2 dosežen že po devetdesetih minutah. Pri mešanici mal2 v primerjavi z osnovno je torej največji pospešek v relativnem smislu nastopil 44 % hitreje.



Slika 34: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja malt; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

Vrednosti največjega pojemka spreminjanja TG parametra se s povečevanjem zamika ponovnega zamešanja minimalno linearno zmanjšujejo (slika 34). Malta z oznako mal2 tudi v tem primeru v relativnem smislu najhitreje razvije maksimalni pojemek. Čas, pri katerem je dosežen, je dve uri in štirideset minut po vgradnji, kar je 37 % hitreje v primerjavi z osnovno mešanico.

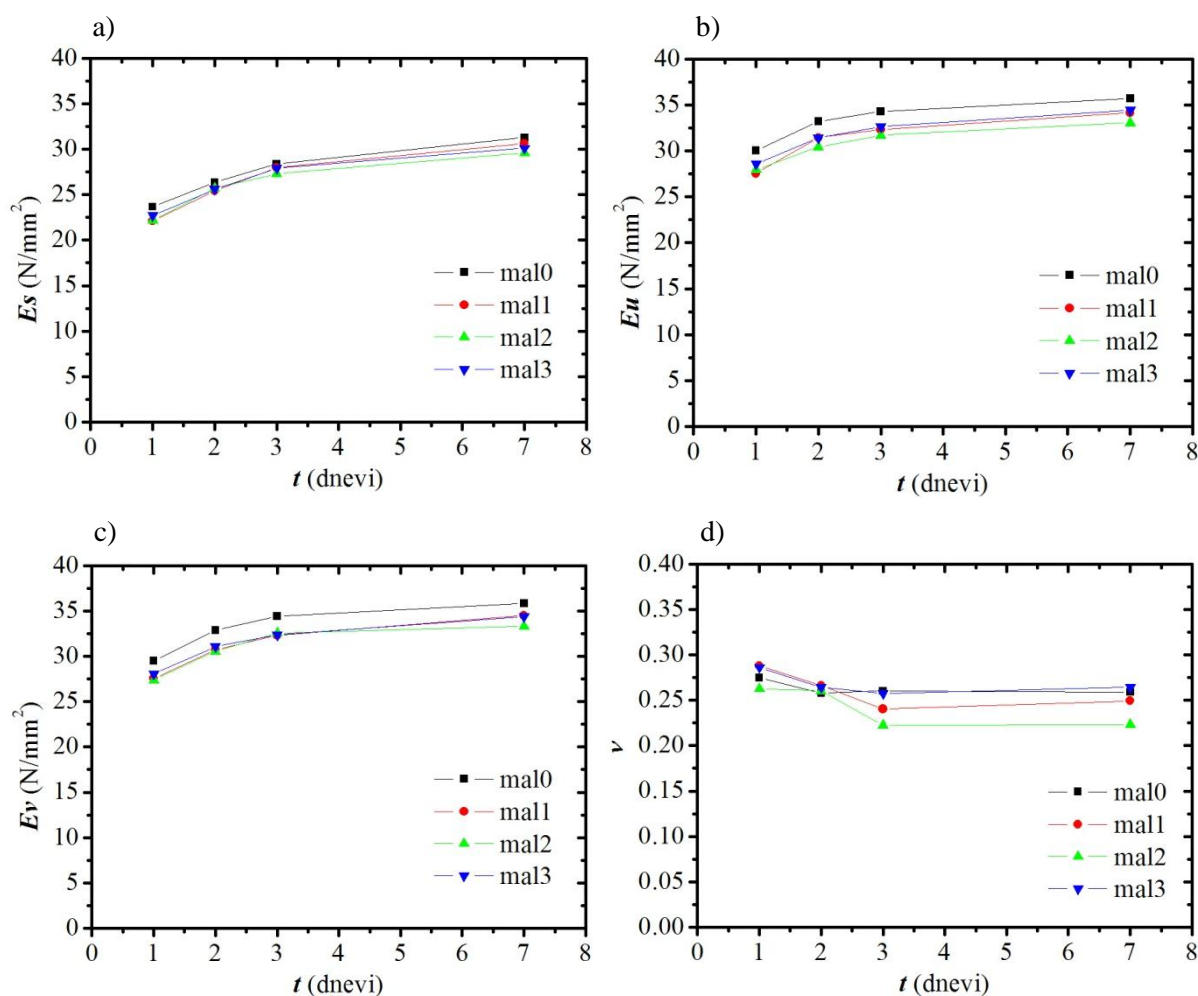


Slika 35: Časovni razvoj tlačnih trdnosti malt, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost

Vrednosti zgodnjih tlačnih trdnosti prikazanih na sliki 35 (majhna grafa) so bile določene na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm, medtem ko smo 1, 2, 3 in 7 dnevne tlačne trdnosti določili na preskušancih velikosti $150 \times 150 \times 150$ mm. Vsaka vrednost na grafu je povprečje treh dobljenih meritev.

Na sliki 35b, kjer so prikazane zgodnje tlačne trdnosti in relativne vrednosti časov opazimo, da malte, ki smo jih ponovno zamešali pozneje in s tem mehansko posegli v njihovo strukturo hitreje pridobivajo na zgodnjih tlačnih trdnostih.

Pri relativni starosti treh ur ima osnovna malta tlačno trdnost $0,3 \text{ N/mm}^2$, malta, ki je mirovala najdlje (mal3) pa $1,5 \text{ N/mm}^2$. S staranjem se razlike posameznih mešanic skoraj izničijo, tako je po 7 dneh razlika med najvišjo in najnižjo tlačno trdnostjo 5 %. Vrednosti tlačnih trdnosti osnovne mešanice in mešanice, ki smo jo pred naknadnim mehanskim posegom pustili mirovati najdlje, praktično sovpadata.



Slika 36: Časovni razvoj elastičnih modulov in Poissonovega koeficienta malt, uporabljenih v okviru preiskave; a) statični modul, b) upogibni modul, c) vzdolžni modul, d) Poissonov koeficient

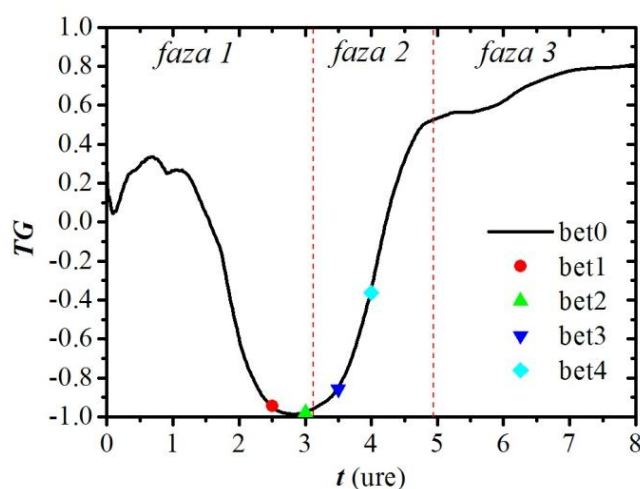
Vsi elastični moduli in Poissonovi koeficienti (slike 36) so bili določeni na vzorcih v obliki prizem velikosti $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$. Vsaka vrednost na grafu pa je povprečje treh izmerjenih vrednosti.

Na sliki 36 opazimo, da se vrednosti elastičnih modulov ne razlikujejo bistveno. Razlika v vrednosti največjega in najmanjšega elastičnega modula malt, uporabljenih v okviru preiskave znaša največ 7 %. Vrednosti Poissonovih koeficientov po 7 dneh so si zelo podobne, odstopa le vrednost koeficienta

mešanice malte mal2, in sicer je ta za 18 % nižja. Naknadni mehanski poseg v strukturo malt ni povzročil bistvenih sprememb mehanskih karakteristik. Končne tlačne trdnosti in elastični moduli se med seboj niso bistveno razlikovali. Čas vezanja pa se je pri obravnavanih primerih celo malo skrajšal.

5.3 Betoni

Vse šarže betona, uporabljene v raziskavah, so bile izpostavljene enakim pogojem ter so bile enakega vodocementnega razmerja (preglednica 4). Osnovna krivulja TG parametra v odvisnosti od časa in zaporedje časov, pri katerih smo mehansko posegli v strukturo betona, so prikazani na sliki 37.

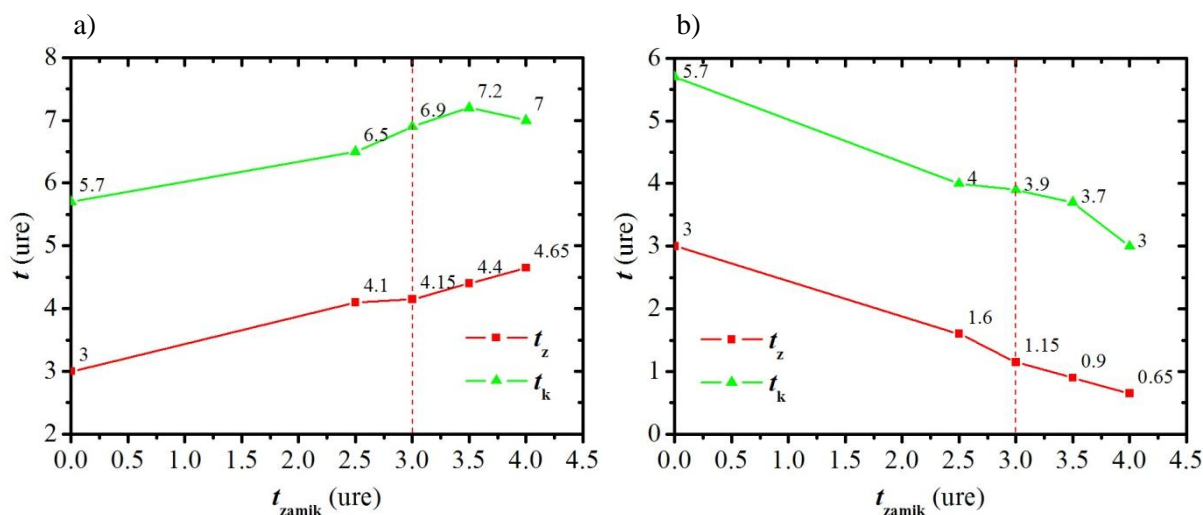


Slika 37: Shematski prikaz priprave betonov

V laboratoriju smo pripravili pet šarž betona, kakor prikazuje graf na sliki 37. Prvo šaržo (bet0) smo vgradili takoj po pripravi, ostale pa za določen čas pustili v mešalniku. Čase smo predhodno določili glede na stopnjo hidratacije, ki smo jo spremljali na osnovni mešanici z uporabo ultrazvočnega valovanja (poglavje 4.6).

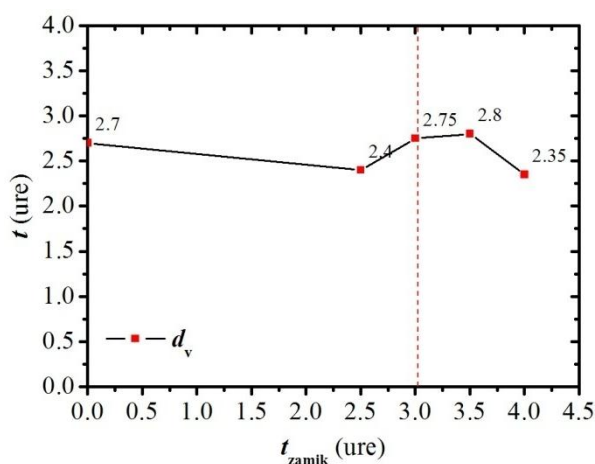
Mešanico betona označeno bet1 smo ponovno zamešali v prvi fazi, in sicer čez dve uri in trideset minut, kar je približno petnajst minut pred začetkom vezanja. Ker ni bilo vidnejših sprememb konsistence, smo mešanico uvrstili v prvi konsistenčni razred (preglednica 5). Bet2 smo znova zamešali natanko tri ure po prvotnem stiku cementa z vodo, ker je ta čas sovpadal s prvo karakteristično točko CP_1 oz. začetkom druge faze (t.j. začetkom obdobja vezanja). Zaznati je bilo rahle spremembe konsistence, zato smo mešanico uvrstili v drugi konsistenčni razred (preglednica 5). Betonsko mešanico, označeno z bet3, smo znova zamešali približno petnajst minut po začetku obdobja vezanja oz. tri ure in trideset minut po prvotnem zamešanju. Uvrstili smo jo v tretji konsistenčni razred. Zadnjo šaržo betona označeno bet4 smo pred ponovnim zamešanjem pustili stati štiri ure. Čas je približno sovpadal s polovico obdobja vezanja. Ker smo pri tej mešanici uporabili veliko mehansko silo za porušitev strukture in ponovno zamešanje, smo jo uvrstili v četrti konsistenčni razred

(preglednica 5). Prav tako je bilo potrebno veliko energije za vgradnjo. Potek hidratacije vsake šarže betona smo opazovali z uporabo ultrazvočnega valovanja, opisanega v poglavju 4.6. Ugotovitve so predstavljene na naslednjih straneh.



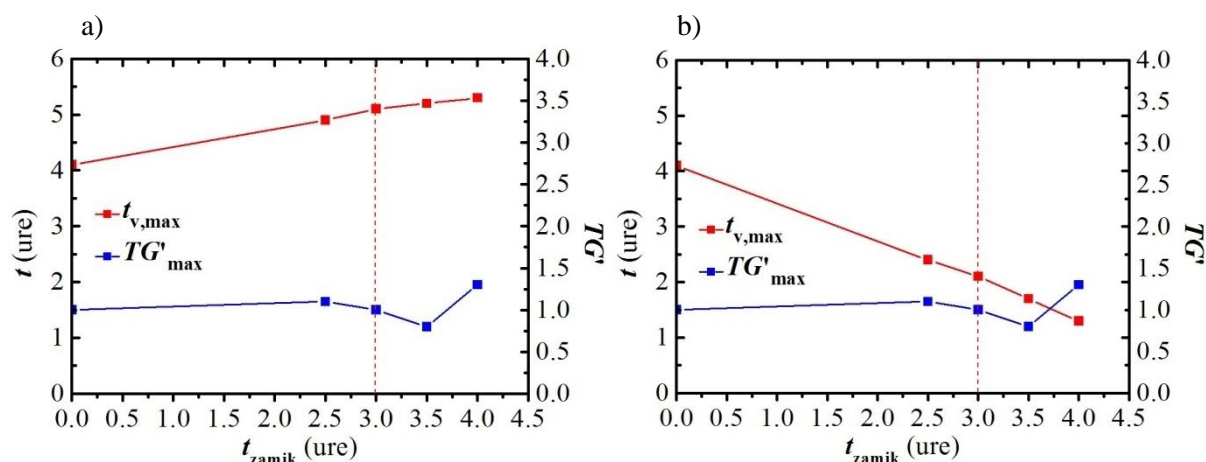
Slika 38: Začetek in konec vezanja betonov, uporabljenih v okviru preiskave;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

Začetek in konec vezanja posamezne mešanice betona sta prikazana na sliki 38. Iz diagramov opazimo, da se tudi relativne vrednosti časov betonskih mešanic, ko so te začele in končale proces vezanja, s podaljševanjem zamika ponovnega mešanja manjšajo. V relativnem smislu (merjeno od ponovnega zamešanja) je najhitreje začel vezati beton, ki smo ga znova zamešali najkasneje (bet4), za začetek procesa vezanja je potreboval devetintrideset minut po vgradnji oz. je s procesom začel 4,6 krat hitreje kot osnovna mešanica (slika 38b).



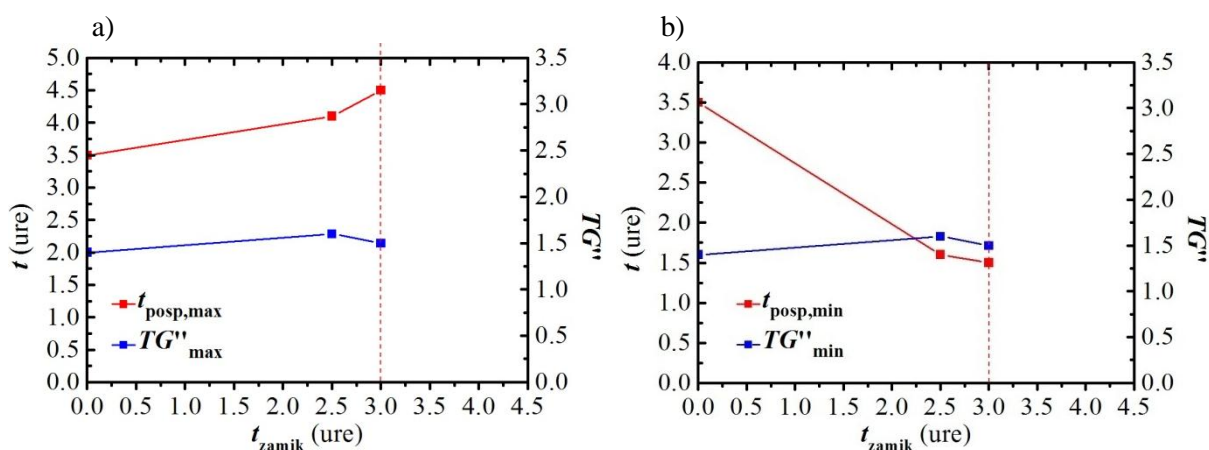
Slika 39: Dolžina obdobja vezanja betonov, uporabljenih v okviru preiskave

Čas vezanja se je minimalno podaljšal v primerih (mešanici bet2 in bet3), ko smo beton ponovno zamešali, takoj ko je nastopilo obdobje vezanja (slika 39). V primerih, ko smo betonu mehansko posegli v strukturo pred začetkom vezanja (bet1) in približno na polovici procesa vezanja (bet4), pa se je dolžina obdobja skrajšala. Najhitreje je obdobje vezanja končala šarža bet4, in sicer v dveh urah in enainvajsetih minutah, osnovna mešanica pa je potrebovala dve uri in dvainštirideset minut.



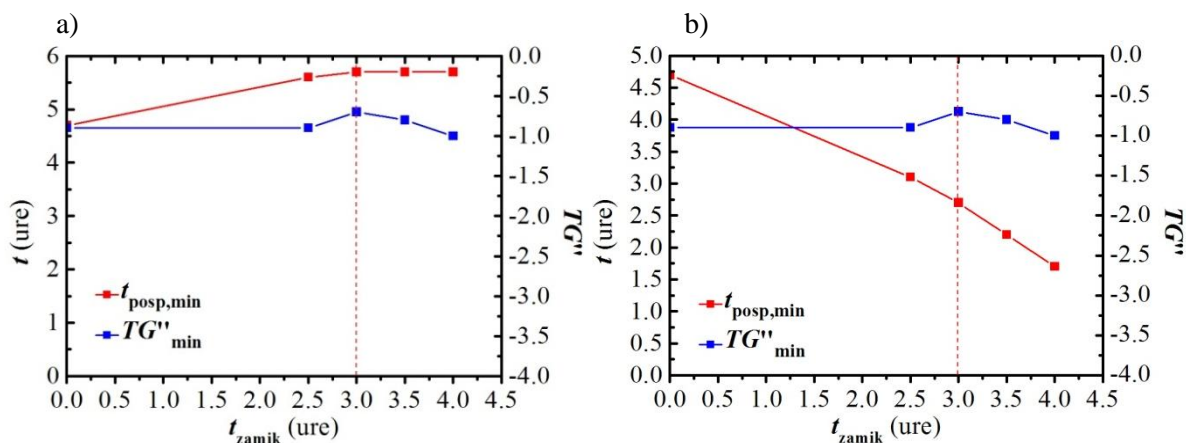
Slika 40: Čas in vrednost največje hitrosti spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja betonov;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

Relativni čas, pri katerem betonske mešanice dosežejo vrednost največje hitrosti spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja se z zamikom ponovnega mešanja linearno krajša (slika 40b). Vrednost v relativnem smislu je najhitreje dosežena pri betonu bet4 in je tudi največja.



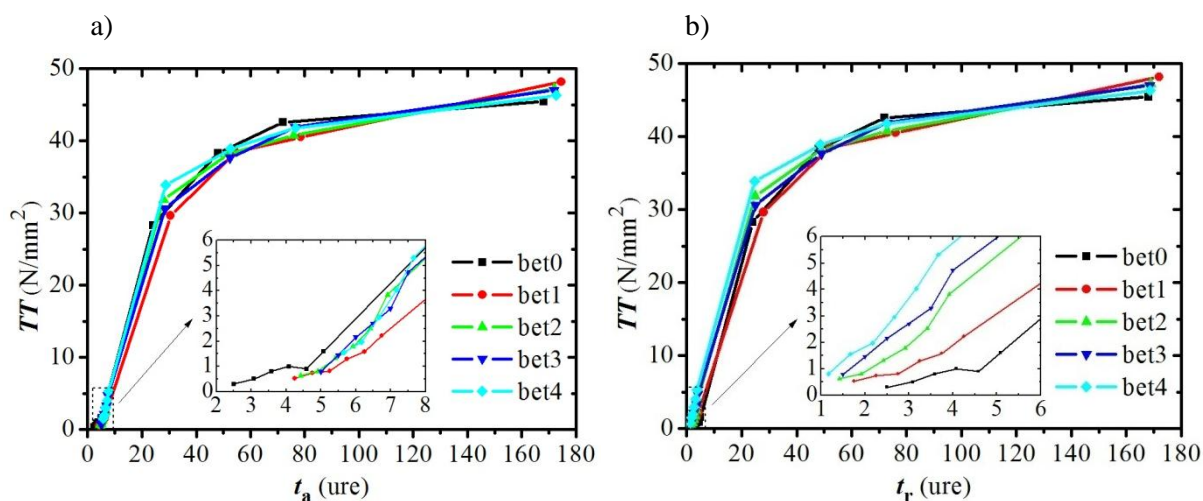
Slika 41: Čas in vrednost največjega pospeška spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja betonov;
a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

Čas in vrednost največjega pospeška⁵ spreminjanja TG parametra posamezne mešanice betona prikazuje slika 41. Vrednosti se gibljejo med 1,3 in 1,6. Časi, pri katerih so vrednosti največjega pospeška dosežene, se v relativnem smislu z večanjem zamika ponovnega zamešanja skrajšujejo. Največji pospešek v relativnem smislu najhitreje nastopi pri mešanici bet2, po devetdesetih minutah.



Slika 42: Čas in vrednost največjega pojemka spreminjanja TG parametra med obdobjem vezanja betonov; a) absolutne vrednosti, b) relativne vrednosti

Najmanjši vrednosti največjega pojemka spreminjanja TG parametra (slika 42) sta bili doseženi pri betonskih mešanicih, pri katerih je obdobje vezanja trajalo najdlje (bet2 in bet3). Relativni časi, pri katerih so vrednosti največjih pojemkov dosežene, se linearno zmanjšujejo s povečevanjem zamika ponovnega mešanja.

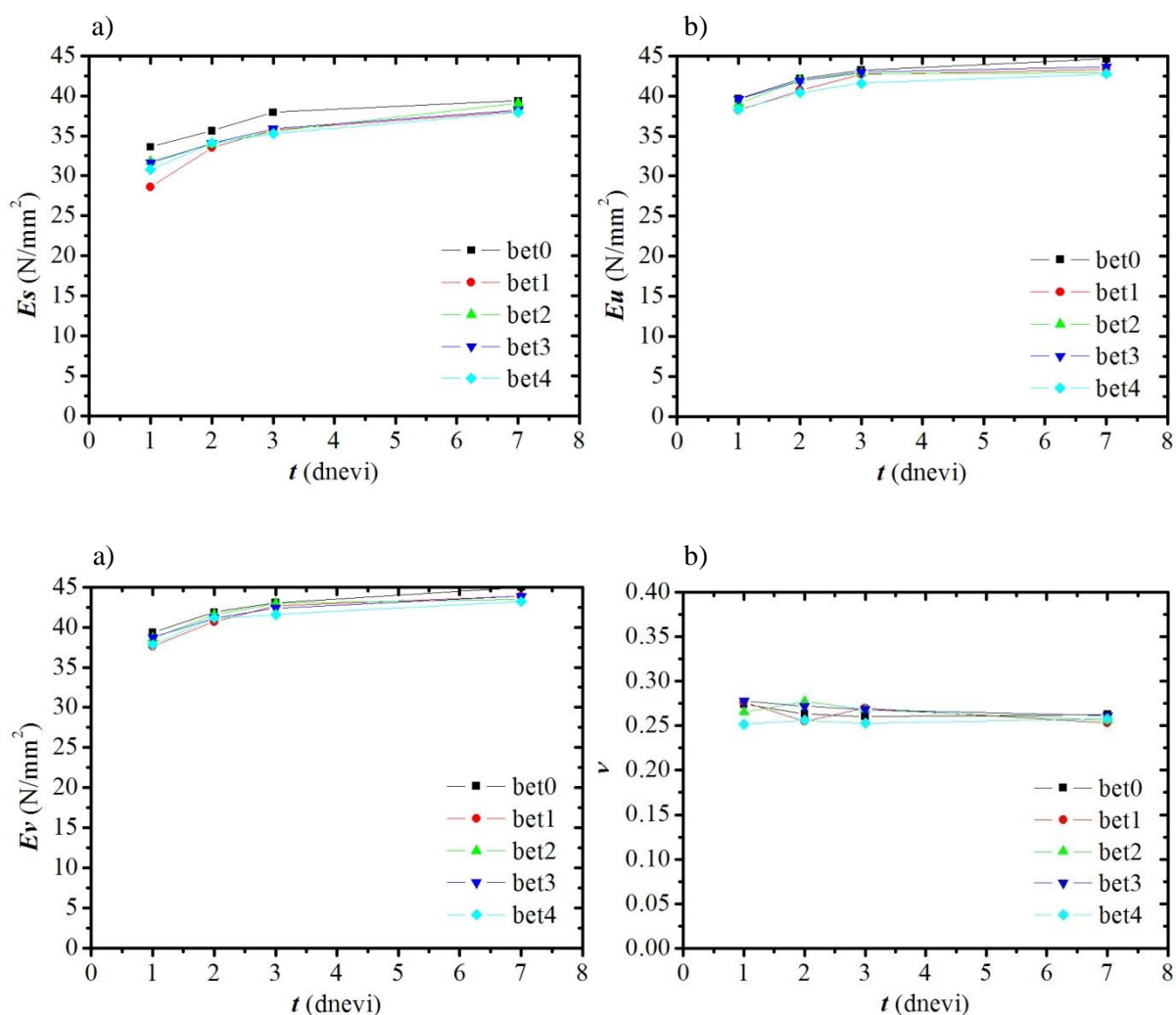


Slika 43: Časovni razvoj tlačnih trdnosti betonov, uporabljenih v okviru preiskave (manjši graf prikazuje razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti); a) absolutna starost, b) relativna starost

⁵ Drugega odvoda (TG'') za betonski mešanici z oznakama bet3 in bet4 matematično ni bilo mogoče določiti.

Vrednosti zgodnjih tlačnih trdnosti prikazanih na sliki 43 (majhna grafa) so bile ugotovljene na kockah dimenzij $70 \times 70 \times 70$ mm, medtem ko smo vrednosti 1, 2, 3 in 7 dnevnih tlačnih trdnosti dobili s preskušanci velikosti $150 \times 150 \times 150$ mm. Vsaka vrednost na grafu je povprečje treh dobljenih meritev. Na grafu (slika 43b) opazimo, da tudi v primeru betonskih mešanic zgodnja tlačna trdnost narašča hitreje betonom, v strukturo katerih smo posegli. Pozneje smo mešanico ponovno zamešali, hitreje je v obdobju prvih ur pridobivala tlačno trdnost.

Za primerjavo vzemimo tlačne trdnosti po začetnih štirih urah. Osnovni beton ima tlačno trdnost 1 N/mm^2 , medtem ko je vrednost pri betonu bet4 6 N/mm^2 . Pri končnih (7 dnevnih) tlačnih trdnostih ni opaznejših razlik, vrednost najvišje in najnižje se razlikuje za 5 %.



Slika 44: Časovni razvoj elastičnih modulov in Poissonovega koeficienta betonov, uporabljenih v okviru preiskave; a) statični modul, b) upogibni modul, c) vzdolžni modul, d) Poissonov koeficient

Elastični moduli in Poissonovi količniki so bili dobljeni s preiskavami na prizmah dimenzij $100 \times 100 \times 400$ mm. Ugotovljene vrednosti po sedmih dnevih skoraj sovpadajo (slike 44). Naknadni mehanski poseg v strukturo betonskih mešanic na elastične module in Poissonove količnike skoraj ni vplival.

Tudi pri betonih mehanski poseg v njihovo strukturo oz. ponovno mešanje ni imelo negativnih vplivov. Končne tlačne trdnosti in elastični moduli zaradi posega ne dosežajo slabših vrednosti. V nekaterih primerih se je čas vezanja s ponovnim mešanjem celo skrajšal.

5.4 Komentar rezultatov

Mešanice smo v laboratoriju izpostavili grobim mehanskim posegom, v smislu občutnega vplivanja na vezanje in zgodnji razvoj trdnostnih karakteristik materiala. Projektiranim mešanicam cementne paste, malte in betona smo posegli v njihovo strukturo pri izbranih časih. S tem smo analizirali ponovno mešanje, v primerih, kadar materiala zaradi nepredvidenih dogodkov ne moremo pravočasno vgraditi oz. vpliv prepoznega vibriranja. Zanimalo nas je, ali je takšna mešanica še sprejemljiva z vidika mehanskih karakteristik, kaj se zgodi s časom vezanja, kako sam čas posega vpliva na končne lastnosti in razvoj strukture ter ali je možno natančno opredeliti čas, do katerega je naknadno mehansko poseganje še sprejemljivo. Nemalokrat se v praksi namreč zgodi, da mešanice zaradi takšnih ali drugačnih razlogov ne moremo vgraditi v predpisanem času.

Pri preiskavah cementne paste se izkaže, da mehanski poseg v strukturo paste praktično ni pustil večjih posledic na vrednost končnih tlačnih trdnosti. Izjema je bila mešanica cem5, ki smo jo ponovno zamešali popolnoma na koncu obdobja vezanja oz. druge faze. Opazimo, da so mešanice, ki smo jih ponovno zamešali kasneje, v relativnem smislu (čas merjen od trenutka vgradnje v kalupe oz. ponovnega zamešanja) hitreje pridobivale tlačne trdnosti v zgodnjem obdobju. Dolžina vezanja se je v primerih, kadar smo mehansko posegli v strukturo cementne paste v obdobju, ko je material že začel z vezanjem celo malenkost skrajšala. Vrednosti največje hitrosti spreminjanja TG parametra posameznih mešanic se niso bistveno razlikovale, medtem ko so pospeški, kadar smo ponovno zamešali v obdobju vezanja narasli. Sklepamo lahko, da nastalih hidratacijskih produktov in njihovih začetnih povezav z naknadnim mehanskim poseganjem nismo porušili oz. poslabšali.

Torej z vidika zagotovitve bistvenih mehanskih lastnosti tak material ni sporen, kar smo dokazali s preiskavami tlačnih trdnosti in elastičnih modulov. Poseg prav tako ni imel negativnih vplivov na proces vezanja, saj se je hidratacija po ponovnem zamešanju celo pospešila. Konsistenca pa je bila tista, ki nam ni omogočala kakovostne vgradnje. Celo v idealiziranih laboratorijskih pogojih je bilo namreč potrebno ogromno energije za vgradnjo, ki pa kljub trudu ni zagotovila ustrezne kakovosti z vidika homogenosti in zagotavljanja ustrezne zgostitve mešanice.

Pri maltah smo pričakovali večje spremembe mehanskih lastnosti, saj gre za manj homogeno zmes v primerjavi s cementnimi pastami. A se tudi v tem primeru izkaže podobno, material skuša čim hitreje nadoknaditi porušeno strukturo, kar se izraža v hitrejšem prirastku zgodnjih tlačnih trdnosti v relativnem smislu. Sčasoma se razlike tlačnih trdnosti skoraj izničijo. Po sedmih dneh pa ni zaznati

bistvenih odstopanj mehanskih karakteristik. Dolžina obdobja vezanja se zaradi mehanskega posega v strukturo prav tako ne podaljša, temveč malenkost skrajša. Vrednosti največje hitrosti spreminjanja TG parametra se med seboj le malo razlikujejo, enako velja za pospeške. Na maltah smo določevali tudi elastične module, vendar celo v primeru mehanskega posega na polovici druge faze (obdobja vezanja) ni bilo pomembnejših odstopanj.

Pri presoji uporabnosti so bile ponovno merodajne neustrezna konsistenčna stopnja, nezmožnost vgradnje, slaba obdelovalnost mešanice in ne bistveno odstopanje mehanskih lastnosti.

Tudi pri betonskih mešanicah opazimo podobne značilnosti. Začetek vezanja v relativnem smislu nastopi hitreje v primeru kasnejšega posega v strukturo mešanice. Mešanice, ki smo jih kasneje znova zamešali, so hitreje pridobile zgodnje tlačne trdnosti, kar nakazuje na to, da pred tem ustvarjenih povezav in hidratacijskih produktov nismo porušili ali poslabšali. Na končnih tlačnih trdnostnih (7 dan) ni opaznejših odstopanj, prav tako elastični moduli in Poissonovi koeficienti praktično sovpadajo neodvisno od časa naknadnega mehanskega posega v strukturo. Znova se v smislu zagotavljanja ustrezne kakovosti za merodajno izkaže konsistenca betonske mešanice in ne pričakovana padec mehanskih karakteristik in/ali negativni vpliv na proces vezanja.

Pri nobeni mešanici ne moremo definirati časa občutnega padca kakovosti mehanskih karakteristik, saj prej nastopi konsistenčno stanje, ki ne omogoča ponovnega zamešanja in vgradnje materiala.

Z UZ metodo smo ugotovili, da naknadno mehansko poseganje v strukturo cementno vezanih materialov pri poljubnih časih nima negativnih posledic na proces vezanja. Neškodljiv vpliv takšnih posegov na mehanske karakteristike pa so pokazali rezultati preiskav tlačnih trdnosti in elastičnih modulov.

Morda gre razlog nepričakovanega pospeška hidratacije in pridobivanja zgodnjih tlačnih trdnosti v relativnem smislu (čas merjen od ponovnega zamešanja) ob mehanskih posegih v strukturo mešanic iskati v teoriji zaščitnega sloja, ki jo predstavi Van Breugel (1991, 2001). Teorija pravi, da se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v predindukcijskem obdobju, oblikuje se zaščita, ki upočasni hidratacijo. Zaščitna plast se počasi spreminja in postaja prepustna, s ponovnim mešanjem pa uničimo ta zaščitni sloj, ki postane prepusten in hidratacija lahko nemoteno steče.

6 ZAKLJUČEK IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO

6.1 Zaključek

Beton je najbolj trden, trajen in vsestransko uporaben gradbeni proizvod, poznan človeku. Njegove glavne mehanske lastnosti so trdnosti in deformabilnost. A brez dobre vgradnje, primerne konsolidacije in pravilne nege ne moremo dosežati želene kakovosti. Prav pomembna vloga pravilne vgradnje, predvsem transporta in zgostitve na kakovost in trajnost, je bila povod, da smo se odločili preiskati vpliv zapoznele vgradnje in mehanskih posegov v različnih časovnih obdobjih. V praksi bi to pomenilo, kaj se zgodi z betonsko mešanico, proizvedeno po kontinuiranem postopku, ki stoji v silosu na betonarni zaradi težav s transportom oz. kakšnih drugih nepredvidljivih okoliščin ob ponovnem zamešanju. Ali na primer kako prepozno vibriranje vpliva na karakteristične lastnosti mešanice. Mnoge poškodbe na objektih namreč nastanejo ravno zaradi napak in nepazljivosti pri vgradnji. Poškodbe pa so šibka mesta, ki lahko objektu močno znižajo njegovo trajnost in življenjsko dobo.

V nalogi smo zato želeli preveriti vpliv naknadnega mehanskega poseganja v strukturo materialov s cementnim vezivom. V okviru eksperimentalnega dela smo tako pripravili recepture za cementno pasto, malto in beton. Uporaba nove ultrazvočne metode nam je omogočila natančno in nedvoumno določitev časa začetka in konca obdobja vezanja. Z njeno uporabo smo lahko natančno določili kolikšna je stopnja hidratacije in izbrali čas, pri katerem bomo ponovno zamešali, to je porušili strukturo.

S klasičnimi metodami smo določevali in spremljali razvoj tlačnih trdnosti, elastičnih modulov, z novo UZ metodo pa spremljali potek in hitrost hidratacije.

V nalogi so prikazani rezultati vpliva posegov na mehanske karakteristike in lastnosti hidratacije (dolžina obdobja vezanja, hitrost spreminjanja procesa hidratacije, pospešek spreminjanja procesa hidratacije idr.) za posamezne mešanice, pri določenih časih, ki so bili izbrani v odvisnosti od stopnje hidratacije.

Preiskave so pokazale, da mehansko poseganje v smislu ponovnega mešanja in/ali poznega vibriranja ni problematično, saj nima bistvenega vpliva na mehanske karakteristike in/ali proces hidratacije. Stopnja konsistence je namreč tista, ki pogojuje uporabo takšnih mešanic. Standard jasno določa, da v primeru, ko ugotovljena konsistenca ne ustreza s projektom predpisani oziroma naročeni konsistenci, takšnega betona ni dovoljeno vgraditi. Kontrolo na gradbišču pa mora opravljati odgovorni vodja del, ali od njega pooblaščen oseba.

Nova UZ metoda, se je izkazala za natančno in zanesljivo pri spremljanju poteka hidratacije, uporabno za določanje začetka in konca procesa vezanja ter določanju pomembnih parametrov (hitrost in pospešek spreminjanja procesa hidratacije idr.) cementno vezanih materialov.

Uporaba mešanic, v strukturo katerih smo naknadno posegli v smislu občutnega vplivanja na vezanje in zgodnji razvoj trdnostnih karakteristik materiala, je dovoljena le do tedaj, ko je konsistenca v skladu s predpisano. Betonske mešanice, pripravljene z ustrežno konsistenco po recepturi za posamezno vrsto betona, torej dovoljujejo naknadno mehansko poseganje v njihovo strukturo. Zaradi tega niso deležne bistvenih negativnih vplivov v smislu vezanja in mehanskih karakteristik za čas, ko je konsistenca še v mejah predpisane oz. naročene recepture betona.

6.2 Priporočila za nadaljnje delo

Na osnovi spoznanj, pridobljenih v okviru naloge, sta se pojavili novi ideji oz. izziva, ki bi jima bilo pri nadaljnjem delu na področju obravnavane tematike zanimivo posvetiti pozornost.

- Analizirati vplive naknadnega mehanskega poseganja v strukturo s kemijskimi dodatki (t.j. plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji idr.) izboljšane betona.
- Z mikroskopsko analizo podrobneje proučiti, kakšen vpliv na hidratacijske produkte in ustvarjene vezi ima naknadno mehansko poseganje v strukturo betona.

VIRI

Abrams, M.S., Cruz, C.R. 1961. The Behaviour at High Temperature of Steel Strand for Prestressed Concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 3: 8-19.

ASTM E 1876-99. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration.

Bogue, R.H. 1929. Calculation of the Components in Portland Cement. Industry Engineering Chemistry 1: 192-197.

Bokan Bosiljkov, V. 2007. Samozgoščevalni betoni. V: Zajc, A. (ur.), Ukrainczyk, V. (ur.), Šušteršič, J. (ur.), Leskovar, I. (ur.), Bernik, M. (ur.), Dobnikar, V. (ur.). 14. slovenski kolokvij o betonih. Posebne lastnosti betonov z dodatki. Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, 29. maj 2007. Ljubljana, IRMA: str. 47-59.

Grindosonic. 2014. Technology.

<http://www.grindosonic.com/en/technology/index.htm> (Pridobljeno 10. 3. 2014.)

Grosse, C.U., Reinhardt, H.W. 2000. Ultrasound Technique for Quality Control of Cementitious Materials. V: Proceedings of the 15th Conference on Nondestructive Testing. Rome, s.n.: loč. pag.

Herak Marović, V. 2007. Fizikalno mehanička svojstva betona. Modul elastičnosti.

<http://www.gradst.hr/Portals/9/PropertyAgent/1167/Files/2024/01-BK1-fizikalna%20svojstva%20betona.pdf> (Pridobljeno 18. 2. 2014.)

ISO 1920-10:2010. Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression.

Izvajanje betonskih konstrukcij – nacionalni dodatek SIST xxx. 2014.

[http://www.tbvtvn.org/VBLienQuanTBT/QCKT%20nuoc%20ngoai/SVN8512\(slovene\).pdf](http://www.tbvtvn.org/VBLienQuanTBT/QCKT%20nuoc%20ngoai/SVN8512(slovene).pdf) (Pridobljeno 28. 3. 2014.)

JUS U.M1.025:1982. Beton - Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom.

Lafarge. 2014. Profi cement.

<http://www.lafarge.si/uploads/www.lafarge.si/Dokumentacija/Certifikati/profi.pdf>

(Pridobljeno 3. 3. 2014.)

Littman, K. 2000. Napake pri grajenju z betonom in možnost njihovih sanacij. V: Zajc, A. (ur.), Ukrainczyk, V. (ur.), Šušteršič, J. (ur.), Leskovar, I. (ur.), Bernik, M. (ur.), Dobnikar, V. (ur.), Šajna, A. (ur.). 7. slovenski kolokvij o betonih. Optimizacija kakovosti betona. Zbornik gradiv in referatov, Ljubljana, 18. maj 2000. Ljubljana, IRMA: str. 63-65.

Reflak, J. (ur.). 1993. Zagotavljanje kakovosti v gradbeništvu. Zbornik posvetovanja na 7. mednarodnem sejmu gradbeništva in gradbenih materialov v Gornji Radgoni. Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 133 str.

Schindler, A. K., Dossey, T., McCullough, B. F. 2002. Temperature control during construction to improve the long term performance of portland cement concrete pavements. Texas Department of Transportation. Research project No. 0-1700-2. Austin, University of Texas: loč.pag.

SIST EN 196-3:2005. Metode preskušanja cementa – 3.del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti.

SIST EN 197-1:2011. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

SIST EN 206:2013. Beton: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

SIST EN 934-2:2009+A1:2012. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – 2. del: Kemijski dodatki za beton - Definicije, zahteve, skladnost, označevanje in etiketiranje.

SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona - Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.

SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom stožca.

SIST EN 12390-1:2013. Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe.

SIST EN 12390-2:2009. Preskušanje strjenega betona – 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti.

SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3.del: Tlačna trdnost preskušancev.

SIST EN 12390-4:2001. Preskušanje strjenega betona – 4.del: Tlačna trdnost – Specifikacija za stiskalnice.

SIST EN 12620:2002 + A1:2008. Agregati za beton.

SIST EN 13670:2010. Izvajanje betonskih konstrukcij.

Site sampling and testing of concrete. 2014. The slump test.

http://www.brmca.org.uk/documents/BRMCA_TCC_Site_sampling_and_testing_of_concrete_May_2008.pdf (Pridobljeno 21. 3. 2014.)

Spinner, S., Reichard, T. W., Tefft, W. E. 1960. A Comparison of Experimental and Theoretical Relations Between Young's Modulus and the Flexural and Longitudinal Resonance Frequencies of Uniform Bars. Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry 64A, 2: loč. pag.

Trtnik, G., Gams, M. 2013a. The use of frequency spectrum of ultrasonic P-waves to monitor the setting process of cement pastes. Cement and Concrete Research 43, 1: 1-11.

Trtnik, G., Gams, M. 2013b. A new US procedure to determine setting period of cement pastes, mortars, and concretes. Cement and Concrete Research 53: 9-17.

Trtnik, G., Gams, M. 2013c. Nova UZ metoda za določanje karakteristik svežih cementnih past, malt in betonov.

<http://www.zabeton.si/pdf/4.pdf> (Pridobljeno 3. 5. 2014.)

Van Breugel, K. 1991. Simulation of hydration and formation of structure of hardening cement-based materials. Doktorska disertacija. Delft, Tehnična univerza (samozaložba K. Van Breugel): loč.pag.

Van Breugel, K. 2001. Hydration of cement-based systems: Aspects of hydration of cement-based systems and possibilities to quantify the evolution of hydration process. IPACS Report 2.1-T1. S.l., s. n.: loč.pag.

Wesche, K. 1993. Baustoffe für tragende Bauteile. Teil 2: Beton, Mauerwerk. Bauverlag, Wiesbaden: loč. pag.

Ye, G. 2003. Experimental study and numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials. Doktorska disertacija. Delft, University of Technology (samozaložba G. Ye): loč. pag.

Zaletel, Š. 2007. Smotrnost uporabe betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Zaletel): 100 str.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest. Voziščne konstrukcije. 2. Izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.