

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/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

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

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 a publisher's version PDF file.

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

Bregar, R. 2015. Uporaba ultrazvočne metode za določitev značilnih parametrov v procesu vezanja cementne paste. Diplomski naloga. = Application of ultrasound method to determine characteristic parameters of the cement setting process. Graduation Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 61 str. (mentorica: Bokan-Bosiljkov, V., somentor: Trtnik, G.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6180/>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

ROK BREGAR

**UPORABA ULTRAZVOČNE METODE ZA DOLOČITEV
ZNAČILNIH PARAMETROV V PROCESU VEZANJA
CEMENTNE PASTE**

Diplomska naloga št.: 240/B-GR

**APPLICATION OF ULTRASOUND METHOD TO
DETERMINE CHARACTERISTIC PARAMETERS OF
THE CEMENT SETTING PROCESS**

Graduation thesis No.:

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

dr. Gregor Trtnik

Član komisije:

Doc. Dr. Drago Saje

Ljubljana, 18. 12. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Rok Bregar izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Uporaba UZ metode za določitev značilnih parametrov v procesu vezanja CP«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, december 2015

Rok Bregar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 691.54(043.2)
- Avtor:** Rok Bregar
- Mentor:** prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
- Somentor:** dr. Gregor Trtnik
- Naslov:** Uporaba ultrazvočne metode za določitev značilnih parametrov v procesu vezanja cementne paste
- Tip dokumenta:** diplomsko delo
- Obseg in oprema:** 39 str., 21 sl., 9 pregl.
- Ključne besede:** začetek vezanja, konec vezanja, cementna pasta, ultrazvočna metoda, frekvenca, amplituda, Vicatov preizkus

Izvleček

Ta diplomska naloga analizira možnost uporabe novo razvite ultrazvočne metode v procesu vezanja cementne paste z analizo frekvenčnih spektrov. Obravnavano ultrazvočno metodo je razvil dr. Gregor Trtnik v sklopu doktorske disertacije. Cilj naloge je bil preveriti, ali je metoda primerna in dovolj natančna za preučevanje učinka različnih kemijskih in mineralnih dodatkov v cementni pasti na proces vezanja materiala pri različnih temperaturah okolice. V prvem delu naloge so opisani osnovni principi delovanja metode in način ovrednotenja podatkov, pridobljenih s posebno programsko opremo. V drugem delu naloge je predstavljena analiza medsebojno primerljivih cementnih mešanic, kjer analizirane morebitne razlike med posameznimi lastnostmi cementnih past različnih sestav. V zadnjem delu je predstavljena primerjava ultrazvočne metode z uveljavljenim, standardnim Vicatovim preizkusom, s katerim določamo začetek in konec vezanja cementne paste. Pokaže se primernost ultrazvočne metode za določanje začetka in konca vezanja cementne paste, hkrati pa tudi možnost nadaljnega razvoja metode za celostno analizo lastnosti cementnih materialov v svežem stanju.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.54(043.2)
Author: Rok Bregar
Supervisor: asocc. prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor: Gregor Trtnik, Ph.D.
Title: Application of ultrasound method to determine characteristic parameters of the cement setting process
Document type: B. Sc. Thesis
Notes: 39 p., 21 fig., 9 tab.
Key words: setting time, ultrasound method, Vicat test, frequency spectrum, amplitude, cementitious material

Abstract

The graduation thesis shows the possibility of using ultrasound method for evaluation of the cement setting process with frequency spectrum analysis. This particular ultrasound method was developed by dr. Gregor Trtnik in scope of his doctoral dissertation. The main goal is to determine, if ultrasound method is suitable and accurate enough to study effects, that different chemical and mineral admixtures have on the setting process of cementitious materials. First part of the thesis describes basic principles of ultrasound method, equipment needed to perform the experiment, and presents solution to evaluate obtained data. Specially designed software was used to analyse key parameters of the cement setting process. This is followed by main part of the thesis, where are presented differences between key properties of different cement mixtures, detected with ultrasound method. Finally, we compare standardised Vicat test for determination of the cement setting process with newly developed ultrasound method. It is shown, that ultrasound method is better suited for evaluation of setting and hardening process of cementitious material. Additionally, ultrasound method has the potential to be expanded and used for determination of elastic dynamic properties of the cementitious material in real time.

ZAHVALA

Na tem mestu bi se zahvalil mojima mentorjema pri diplomski nalogi, dr. Violeti Bokan-Bosiljkov in dr. Gregorju Trtniku. Z našim sodelovanjem sem zelo zadovoljen, tako z izborom tematike diplomske naloge kot s samo strokovnostjo, s katero sta mi predstavila tematiko. Namenila sta mi veliko časa in vsakič z veseljem priskočila na pomoč. Za njun trud se jima iskreno zahvaljujem.

Zahvalil bi se tudi podjetju IGMAT d.o.o., da so mi posodili potrebne materiale, brez katerih preiskave ne bi bile mogoče in pa Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani (UL FGG), da so mi omogočili izvajanje dela preiskav v njihovem laboratoriju.

Na koncu pa bi se zahvalil tudi moji družini, ki me je podpirala pri študiju in delu.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PREGLEDNIC	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	X
1 UVOD	1
1.1 Opredelitev problema	1
1.2 Namen in cilji diplomskega dela	1
1.3 Raziskovalna hipoteza	2
2 MEŠANICE IN MATERIALI	2
2.1 Načrt preiskav	2
2.2 Materiali	3
2.2.1 Cement	3
2.2.2 Voda	3
2.2.3 Kemijski dodatki	3
3 ULTRAZVOČNA METODA	5
3.1 Zgodovina UZ meritev	5
3.2 Opis metode	6
3.3 Definicija značilnih parametrov	7
3.4 Definicija karakterističnih točk v procesu vezanja cementne paste	8
3.5 Definicija karakterističnih faz v procesu vezanja CP	9
4 ANALIZA	11
4.1 Analiza referenčnih mešanic brez dodatkov pri različnih temperaturah	11
4.1.1 Analiza začetka in konca vezanja CP	11

4.1.2	Analiza hitrosti vezanja CP	12
4.1.3	Analiza pospeška in pojemka vezanja CP	12
4.1.4	Analiza karakterističnih faz v procesu vezanja CP	13
4.1.5	Komentar	15
4.2	Primerjava mešanic CP z različnim tipom cementa pri temperaturi 20°C	16
4.2.1	Analiza začetka in konca vezanja CP	16
4.2.2	Analiza hitrosti vezanja CP	16
4.2.3	Analiza pospeška in pojemka vezanja CP	16
4.2.4	Analiza karakterističnih faz v procesu vezanja CP	17
4.2.5	Komentar	18
4.3	Ne-alkalna pospešila vezanja za brizgani beton pri temperaturi 20°C	19
4.3.1	Komentar	21
4.4	Ne-alkalna pospešila vezanja za brizgani beton pri temperaturi 30 °C	22
4.4.1	Komentar	24
4.5	Aeranti	25
4.5.1	Komentar	27
4.6	Plastifikatorji in superplastifikatorji	28
4.6.1	Komentar	31
4.7	Pospešilo vezanja pri temperaturi 5°C	32
4.7.1	Komentar	34
5	VICATOV PREIZKUS : DOLOČANJE ZAČETKA IN KONCA VEZANJA	35
5.1	Sestavni deli Vicatovega aparata:	35
5.2	Potek preiskave	36
5.2.1	Začetek vezanja	36
5.2.2	Konec vezanja	36
6	PRIMERJAVA METOD ZA DOLOČITEV ZAČETKA IN KONCA VEZANJA	37
6.1.1	Komentar	37
7	ZAKLJUČEK	38

KAZALO SLIK

Slika 1: Ultrazvočna naprava.....	6
Slika 2: Frekvenčni spekter z označenimi frekvenčnimi območji.....	7
Slika 3: Diagram razvoja TG parametra s časom.....	8
(c) Slika 4: Diagrami razvoja TG parametra (a), hitrosti (b) in pospeška (c) s časom.....	11
Slika 5: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.....	18
Slika 6: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.....	18
Slika 7: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanic CEM I pri temperaturah 5, 10, 20 in 30°C.	15
Slika 8: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanico CEM I pri temperaturah 5, 10, 20 in 30°C.	15
Slika 9: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanici CEM I/20 in 1_2 pri T=20°C.....	20
Slika 10: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanici CEM I/20 in 1_2 pri T=20°C.....	21
Slika 11: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanici CEM I/30 in 1_2 pri T=30°C.....	24
Slika 12: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanici CEM I/30 in 1_2 pri T=30°C.....	24
Slika 13: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanice CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri T=20°C.....	26
Slika 14: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanici CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri T=20°C.....	27
Slika 15: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri T=20°C.	30
Slika 16: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri T=20°C.	30
Slika 17: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas za mešanici CEM I5 in 4_3 pri T=5°C.....	33
Slika 18: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas za mešanici CEM I/5 in 4_5 pri T=5°C.....	34
Slika 19: Sestavni deli Vicatovega aparata.....	35
Slika 20: Standardni mešalec	
Slika 21: Vicatov aparat.....	35

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Uporabljene mešanice.	2
Preglednica 2: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.	17
Preglednica 3: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanico CEM I pri 5, 10, 20 in 30 °C.	14
Preglednica 4: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanico CEM I/20 in 1_2 pri T=20°C.	20
Preglednica 5: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanico CEM I/30 in 1_2 pri T=30°C.	23
Preglednica 6: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanice CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri T=20°C.	26
Preglednica 7: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri T=20°C.	29
Preglednica: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanici CEM I/5 in 4_3 pri T=5°C.	33
Preglednica 9: Primerjava metod	37

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

UZ Ultrazvok

CP Cementna pasta

1 UVOD

1.1 Opredelitev problema

Zaradi razvoja novih tehnologij in materialov na področju gradnje ter novih računalniških orodij na področju projektiranja gradbenih konstrukcij dosega danes gradbeništvo relativno visok nivo avtomatizacije. Kljub temu pa so določena področja še vedno premalo raziskana, istočasno pa se pojavljajo zahteve po drugačnem pristopu in novih preiskavah, ki bi omogočile uporabo realnih podatkov o betonu, ki bo uporabljen v praksi, že v fazi projektiranja armiranobetonske konstrukcije.

Pri raziskavi cementnih past, malt in betonov (v nadaljevanju cementnih kompozitov) je bil doslej fokus usmerjen predvsem v porušne metode preiskav in analizo lastnosti materiala v trdnem agregatnem stanju, predvsem trdnostnih karakteristik kot ključnega parametra njegove kakovosti. V zadnjih letih pa se raziskave vse bolj usmerjajo v analizo cementnih kompozitov v svežem stanju in v zgodnji starosti. Uveljavljena praksa na področju neporušnih metod preiskav v gradbeništvu je, da raziskovalci in strokovnjaki prevzemajo pristope, ki so že uveljavljeni na drugih znanstvenih področjih, kot so fizika, medicina, elektrotehnika, itd. Tako na primer različni avtorji uporabljajo metodo prehoda ultrazvočnih valov za spremljanje različnih lastnosti cementnih kompozitov. Kljub dokazani korelaciji med hitrostjo ultrazvočnih valov in razvoju strjevanja, pa tovrstne preiskave izvedene s standardno opremo niso pripeljale do zadovoljivih rezultatov. Šele napredek v razvoju UZ opreme je omogočil razvoj novih metod in raziskavo drugih parametrov, ki so dali boljše rezultate.

1.2 Namen in cilji diplomskega dela

Ta diplomska naloga analizira možnost uporabe novo razvite UZ metode za določanje karakterističnih parametrov v procesu vezanja CP z analizo frekvenčnih spektrov [1]. UZ metodo je razvil dr. Gregor Trtnik v sklopu doktorske disertacije. Cilj naloge je preveriti, ali je UZ metoda primerna in dovolj natančna za preučevanje učinka različnih kemijskih in mineralnih dodatkov v sestavi CP na proces vezanja materiala pri različnih temperaturah okolice. Motivacija za razvoj nove metode izhaja iz potrebe po boljšem razumevanju procesa vezanja cementa, kar lahko omogoči učinkovitejši pristop pri zagotavljanju ustrezne obdelavnosti svežih betonskih mešanic. Z razumevanjem procesov, ki se odvijajo tekom vezanja in strjevanja cementnih kompozitov, lahko namreč optimiziramo konsistenco, viskoznost, napetost na meji tečenja in druge fizikalne parametre, ki so postali ključnega pomena v sodobni tehnologiji betona in izvajanju betonskih del.

1.3 Raziskovalna hipoteza

Novo razvita ultrazvočna metoda je sposobna zaznati vpliv različnih kemijskih in mineralnih dodatkov v sestavi CP na proces vezanja materiala. Sposobna je zaznati tudi vpliv temperature okolice na proces vezanja in strjevanja CP. Ultrazvočna metoda izboljša natančnost določanja začetka in konca vezanja CP.

2 MEŠANICE IN MATERIALI

2.1 Načrt preiskav

Preiskave sem izvajal na CP z vodo-cementnim razmerjem $v/c = 0,32$. Vsaka mešanica je vsebovala 600 g cementa in 195 g vode ter vnaprej določeno količino kemijskega dodatka na maso cementa.

V preglednici 1 so podane vrste mešanic, ki sem jih uporabil pri preiskavah.

Preglednica 1: Uporabljene mešanice.

SKLOP	VRSTA DODATKA	OZNAKA MEŠANICE	OZNAKA DODATKA	TIP CEMENTA	TEMPERATURA
1	Ne-alkalna pospešila vezanja za brizgani beton	CEM I/20	/	CEM I	10,20,30
		1_2	pospešilo brizgani beton	CEM I	10,20,30
2	Aeranti	CEM I/20	/	CEM I	20
		2_2	aerant 1	CEM I	20
		2_3	aerant 2	CEM I	20
3	plastifikatorji superplastifika-torji	CEM III/20	/	CEM III/B 32,5 N LH/SR	20
		3_2	SP 1	CEM III/B 32,5 N LH/SR	20
		3_3	SP 2	CEM III/B 32,5 N LH/SR	20
		3_4	SP 3	CEM III/B 32,5 N LH/SR	20
4	Pospešila vezanja	CEM I/5	/	CEM I	5
		4_3	pospešilo vezanja	CEM I	5

2.2 **Materiali**

2.2.1 **Cement**

Cement je hidravlično vezivo, tj. fino zmlat neorganski material, ki zmešan z vodo tvori pasto, ta pa na podlagi reakcij in procesov hidratacije veže in strjuje ter po strditvi ohrani trdnost in stabilnost tudi v vodi. Pri delu sta bila uporabljena naslednja cementa :

- Portlandski cement CEM I 42,5 R

S to oznako označujemo portlandski cement, ki je skladen s standardom EN 197-1, je trdnostnega razreda 42,5 in z visoko zgodnjo trdnostjo.

- Žlindrin cement CEM III/B 32,5 -LH/SR

S to oznako označujemo žlindrin cement, skladen s standardom EN 197-1, ki vsebuje masni delež plavžne žindre (S) med 66 % in 80 %, je trdnostnega razreda 32,5, z običajno zgodnjo trdnostjo, ter z nizko toploto hidratacije in je sulfatno odporen [2] [11].

2.2.2 **Voda**

Uporabljal sem vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja [10].

2.2.3 **Kemijski dodatki**

Uporabil sem 4 skupine dodatkov, ki so navedene v preglednici 1. V nadaljevanju bom predstavil bistvene lastnosti vsake skupine kemijskih dodatkov.

- NE-ALKALNA POSPEŠILA VEZANJA ZA BRIZGANI BETON

Ne-alkalno pospešilo za brizgani beton je tekoče pospešilo vezanja, ki pospeši zgotitev, vezanje in strjevanje cementa. Uporabljamo ga predvsem za izdelavo malt in betonov po mokrem in suhem postopku v rudnikih, predorih, za utrjevanje brežin ipd. [3].

- AERANTI :

Aeranti so kemijski dodatki, namenjeni za uvajanje zračnih mikro-mehurčkov v svež beton. Na ta način izboljšamo obdelavnost svežega betona, dosežemo pa tudi visoko odpornost strjenega betona proti zmrzali. Zaradi prekinjenega kapilarnega sistema por dosežemo tudi večjo vodoneprepustnost betona [3].

- PLASTIFIKATORJI, SUPERPLASTIFIKATORJI:

Plastifikatorji in superplastifikatorji delujejo tako, da se adsorbirajo na cementne delce in preprečijo njihovo združevanje v času po zamešanju cementnega kompozita. Posledica je občutno izboljšana obdelavnost betona ob enakem v/c razmerju, ali pa precej manjša potreba po zamesni vodi ob enaki obdelavnosti svežega betona, to pa privede do povečanja trdnosti betonov. Superplastifikatorji so pri tem bolj učinkoviti, kot plastifikatorji, istočasno pa lahko omogočajo tudi daljši čas zahtevane obdelavnosti betona [3].

- POSPEŠILO VEZANJA :

Pospešilo vezanja v prašnati obliki uporabljamo za betoniranje pri nizkih temperaturah. Dodatek pospešuje hidratacijo cementnih mineralov in s tem skrajša čas vezanja cementnih kompozitov. Hkrati s tem dodatkom izboljšamo obdelavnost svežega betona [3].

3 ULTRAZVOČNA METODA

3.1 Zgodovina UZ meritev

V zadnjem desetletju je zaznati vse več študij hidratacije in procesa strjevanja cementnih kompozitov z različnimi ultrazvočnimi (UZ) meritvami [1]. V znanstveni sferi je bilo predstavljenih kar nekaj postopkov za določitev karakterističnih točk med vezanjem in strjevanjem materiala na podlagi določenih UZ parametrov. Hitrost longitudinalnih UZ valov so avtorji uspešno povezali s spremembami osnovnih mikrostrukturnih parametrov [1, 5, 6, 8]. Zaradi tehničnih omejitev UZ naprav so se raziskovalci sprva omejili le na študije hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov skozi CP med procesom strjevanja. Spoznanje, da je količina povezane trdne faze najbolj pomemben parameter, ki vpliva na razvoj hitrosti longitudinalnih P-valov skozi cementne mešanice, so različni avtorji uporabili za preučevanje odvisnosti med hitrostjo UZ valov in časom začetka vezanja [5]. Rezultati preiskav so pokazali, da določene korelacije obstajajo, vendar pa imajo predlagane vrednosti karakterističnih točk različnih avtorjev velik raztros. Take metode ne dajejo zadovoljive natančnosti in ponovljivosti rezultatov [1]. Napredek v razvoju tehnične opreme je omogočil raziskavo novih UZ parametrov za spremljanje hidratacijskega procesa, s katerimi se da bolje in natančneje opisati celoten proces. Grosse in Reinhardt sta tako predlagala možnost analize celotnega valovanja na podlagi spremljanja frekvenc in pripadajočih amplitud teh frekvenc [7]. Nadaljevanje raziskovanja je vodilo do razvoja metode, ki sem jo uporabil v diplomskem delu in je opisana v nadaljevanju. Namen te metode je spremljanje poteka hidratacije ter natančna definicija karakterističnih točk v razvoju staranja CP, kot sta na primer začetek in konec vezanja.

3.2 Opis metode

Meritve UZ valovanja na strjujočih CP smo izvedli z UZ napravo na sliki 1, ki deluje s frekvenco 150 kHz. Delovanje poteka na podlagi principa sprejemne in oddajne sonde, ki ju namestimo na vzporedni stranici kalupa tako, da ju rahlo vtisnemo v CP. Namen vtiskanja je zagotovitev dobrega kontakta med sondo in CP ter preprečitev nepravilne postavitve sond zaradi krčenja vzorca. Kalup, dimenzij 50 x 50 x 50 cm³, pripravljen iz ekstrudiranega polistirena, smo napolnili s CP, na kateri smo izvajali UZ meritve kontinuirno približno 20 ur od trenutka, ko smo pasto vgradili v kalup. Meritve smo izvajali v temperaturni komori z različnimi temperaturami okolice in z natančnostjo $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

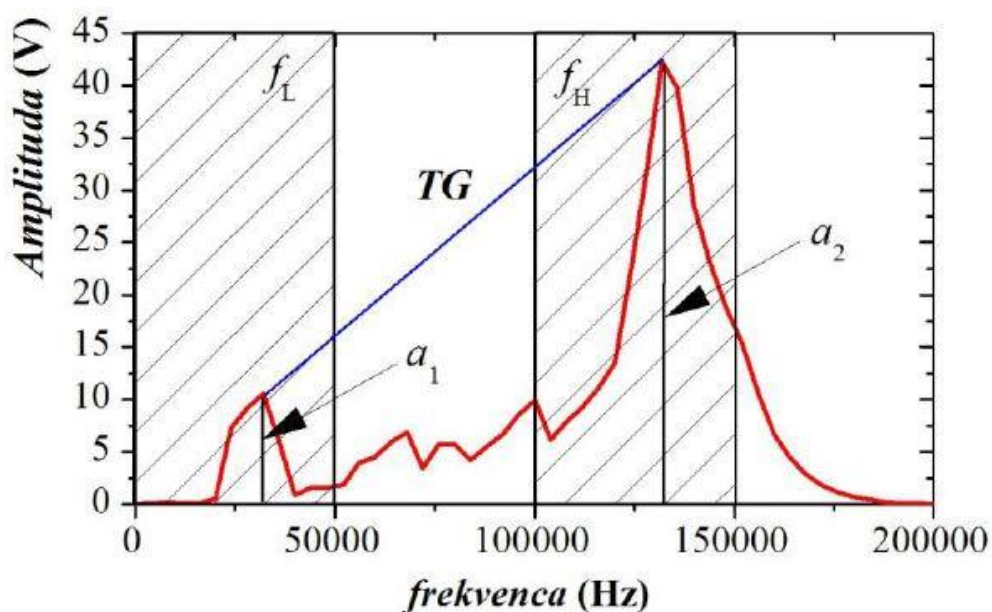
Merilni inštrument je povezan z računalnikom, ki sistematično beleži meritve vsakih 90 sekund in jih samodejno shranjuje. Programska oprema, razvita posebej v ta namen, omogoča spremljanje različnih UZ parametrov neposredno na ekranu v realnem času. Ti parametri so hitrost UZ valovanja, frekvenca in amplituda nihanja UZ longitudinalnih valov (P-valovi) itd [1]. Z uporabo Fourierove transformacije (FFT analiza) programska oprema pretvori UZ signal v frekvenčni spekter, iz katerega sta jasno razvidni 2 prevladujoči frekvenčni območji.



Slika 1: UZ naprava.

3.3 Definicija značilnih parametrov

V zgodnjem obdobju hidratacije, takoj po pripravi CP, v frekvenčnem spektru ni zaznati prevladujočih frekvenčnih struktur. Po določenem času, ki je odvisen predvsem od sestave mešanice, pa se začne formiranje prepoznavnih frekvenčnih območij [1]. V začetni fazi hidratacije so prisotne le nizke frekvence z majhnimi amplitudami, visoke frekvence niso prisotne. Kasneje pride zaradi hidratacijskega procesa do pomembnih sprememb v frekvenčnem spektru z razvojem visokih frekvenc, ki se ustalijo okoli frekvence 120 kHz. V določenem trenutku se amplitude nizkih in visokih frekvenc izenačijo, kasneje pa ostanejo samo še visoke frekvence, nizke pa se zadušijo [1, 7]. V frekvenčnem spektru je možno opaziti dve dominantni frekvenčni območji (slika 2). Ločimo med nizkim frekvenčnim območjem (f_L), ki sega od 0-50 kHz in pa visokim frekvenčnim območjem (f_H), ki ima razpon med 100 in 150 kHz [1, 7]. To spoznanje je bilo glavno vodilo za uvedbo brezdimenzionalnega UZ parametra, imenovanega TG parameter. Ta parameter izraža razmerje med maksimalnimi amplitudami v dveh prevladujočih frekvenčnih območjih. Tako posplošena razlaga značilnega razvoja dveh frekvenčnih območij sicer velja za različne cementne mešanice [1, 7].



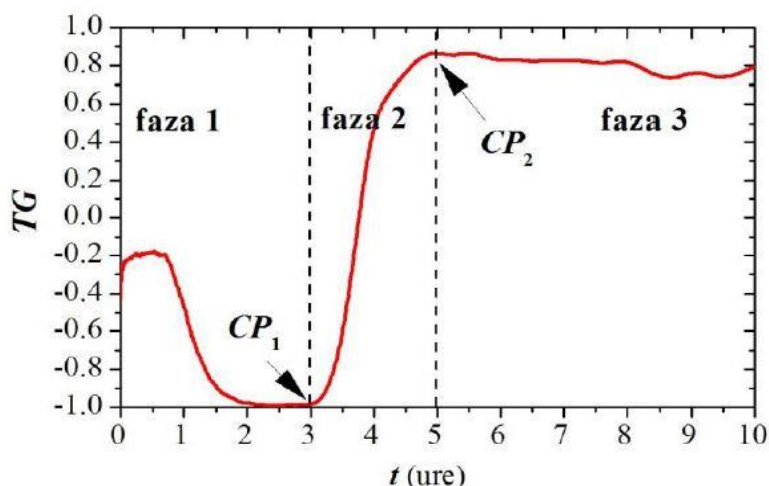
Slika 2: Frekvenčni spekter z označenimi frekvenčnimi območji [11].

Formula za izračun parametra TG :

$$TG = \frac{a_2 - a_1}{a_2 + a_1}$$

- a_1 predstavlja največjo amplitudo v nizkem frekvenčnem območju f_L , a_2 pa največjo amplitudo v visokem frekvenčnem območju f_H . Parameter lahko zavzame vrednosti v rangu $\{-1 ; 1\}$. Parameter TG zavzema vrednosti okoli -1 pri nizkih frekvencah in vrednosti okoli 1 pri visokih frekvencah v frekvenčnem spektru. Računalnik ga izračunava avtomatično v 90 sekundnih intervalih, rezultat obdelave pa je diagram razvoja TG parametra v odvisnosti od časa [1].

3.4 Definicija karakterističnih točk v procesu vezanja cementne paste



Slika 3: Diagram razvoja TG parametra s časom [11].

Na sliki 3 je prikazan diagram tipičnega razvoja TG parametra s časom. Območje diagrama razdelimo v tri karakteristična območja. V prvi fazi TG parameter pade na vrednosti blizu -1, kjer se za nekaj časa stabilizira. Prvo fazo definirajo zelo nizke frekvence, le okoli 10 kHz in manj [1]. Začetek druge faze na diagramu definiramo s točko CP_1 , ki ji pripada čas t_{CP1} . V tej fazi se začnejo razvijati visoke frekvence do 120 kHz, to pa privede do občutnega naraščanja TG parametra. Kot dodatno karakteristično točko bi lahko definirali trenutek, ko TG parameter v drugi fazi doseže vrednost 0. Amplitudi f_L in f_H sta takrat enaki [1]. Tretjo fazo na diagramu definiramo s točko CP_2 , ki ji pripada čas t_{CP2} . V tej fazi se TG parameter ustali, vrednosti nihajo okoli 1. Iz tega lahko ugotovimo, da v tej fazi prevladujejo visoke frekvence [1].

Oba faktorja sta definirana v območju, kjer pride do drastične spremembe TG parametra, kar pomeni, da je določanje mejnih vrednosti zelo natančno in enolično. Sledi ugotovitev, da sta karakteristični točki jasno povezani z začetkom in koncem vezanja, in sicer:

- CP_1 označuje začetek vezanja [1].
- CP_2 označuje konec vezanja [1].

3.5 Definicija karakterističnih faz v procesu vezanja CP

Prvi diagram na sliki 4 predstavlja tipičen razvoj TG parametra s časom. Na drugem diagramu je prikazana odvisnost hitrosti vezanja od časa, na tretjem pa odvisnost pospeška procesa vezanja od časa [1]. Za diagram tipičnega razvoja TG parametra s časom je značilna sigmoidna oblika krivulje TG – t v obdobju vezanja. S podrobnejšo analizo razdelimo krivulje na tri karakteristične faze, ki se med seboj delno prekrivajo, to so faza S1, faza S2 in faza S3 [1]. Faza S1 predstavlja obdobje pospešenega vezanja. Na sliki (4b) se v tem območju jasno vidi naraščanje hitrosti, na sliki (4c) pa naraščanje pospeška [1].

Fazo pospešenega vezanja S1 definirajo 3 točke [1] :

- začetna točka CP_1 označuje čas, pri katerem pride do začetka vezanja
- vmesna točka S_{12} označuje čas, pri katerem pride do maksimalnega pospeška vezanja
- končna S_{13} označuje čas, pri katerem pride do maksimalne hitrosti vezanja

Druga faza (S2) je najpomembnejša faza, saj definira obdobje najbolj intenzivnega vezanja. V točki S_{13} je hitrost vezanja največja. Faza se začne z maksimalnim pospeškom vezanja S_{12} , konča pa z maksimalnim pojemkom vezanja S_{23} [1].

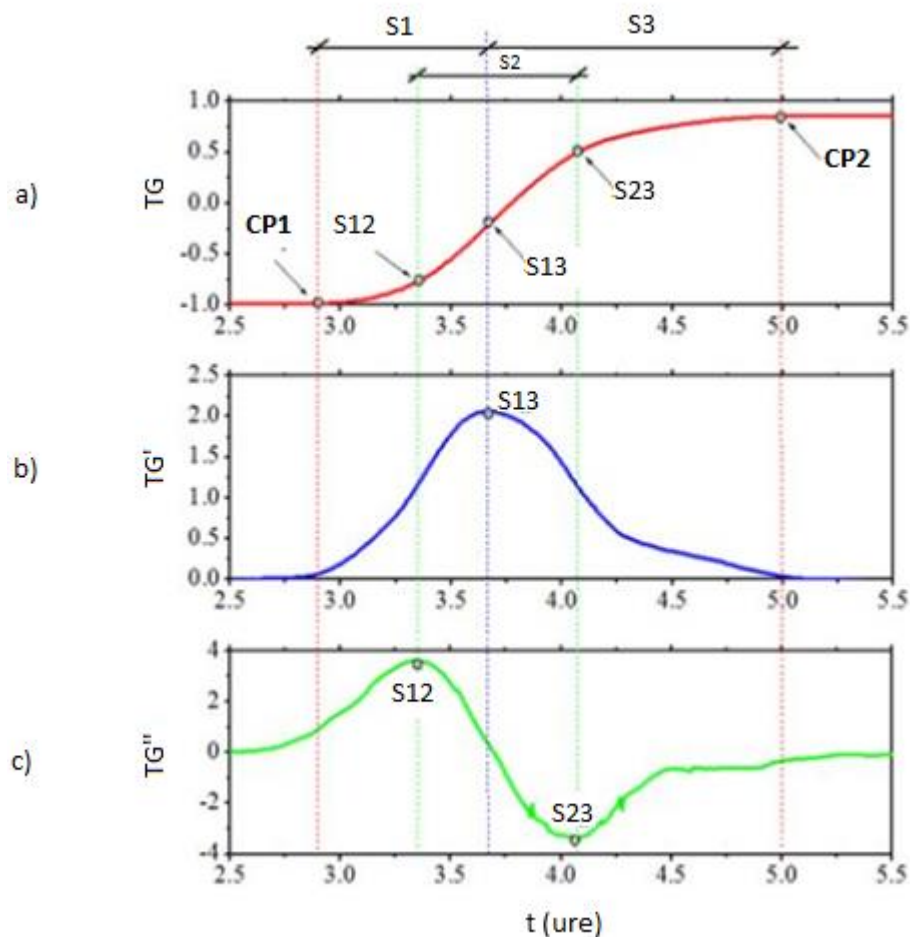
Fazo S2 definirajo 3 točke [1] :

- točka S_{12} označuje čas, pri katerem pride do maksimalnega pospeška vezanja
- točka S_{13} označuje čas, pri katerem pride do maksimalne hitrosti vezanja
- točka S_{23} označuje čas, pri katerem pride do maksimalnega pojemka procesa vezanja

Tretjo fazo S3 lahko opišemo kot fazo umirjanja. Hitrost vezanja pada proti 0, pospešek pa je negativen.

Fazo S3 definirajo tri značilne točke [1] :

- začetna točka S_{13} označuje čas, pri katerem pride do maksimalne hitrosti vezanja
- vmesna točka S_{23} označuje čas, pri katerem pride maksimalnega pojemka procesa vezanja
- končna točka CP_2 pa označuje čas, pri katerem pride do konca vezanja CP



Slika 4: Diagrami razvoja TG parametra (a), hitrosti (b) in pospeška (c) s časom [11].

4 ANALIZA

To poglavje je posvečeno medsebojni primerjavi lastnosti različnih cementnih mešanic pri prehodu UZ valovanja skozi CP. Namen poglavja je z natančno analizo in ovrednotenjem rezultatov potrditi ali ovreči raziskovalno hipotezo. Vsako podpoglavje, opisano v nadaljevanju je bilo skrbno izbrano v sklopu načrta preiskav za pridobitev čimbolj kvalitetnih podatkov. Posebej podrobno je analiziran drugi sklop, iz katerega lahko povlečemo pomembne zaključke. V drugem sklopu je analiziran vpliv temperaturnih sprememb na značilne lastnosti CP na cementnih mešanicah z enako sestavo.

4.1 Analiza referenčnih mešanic brez dodatkov pri različnih temperaturah

- CEM I predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM I brez kemijskega dodatka
- V tem primeru smo rezultate referenčnih mešanic primerjali z mešanico CEM I pri $T = 20^{\circ}\text{C}$. Taka primerjava je smiselna glede na pristop v tehnologiji betona, kjer je 20 stopinj Celzija referenčna temperatura.

Sliki 7 in 8 v nadaljevanju prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja $v_p - t$), razvoj TG parametra s časom (krivulja $TG - t$) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG' - t$) in drugega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG'' - t$) za referenčno mešanico (CEM I) brez dodatka pri različnih temperaturah. Preglednica 3 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za vsako izmed referenčnih mešanic. Iz preglednice 3 je jasno razvidno, da se je čas, ki je potekel do začetka vezanja CP z večanjem temperature krajšal.

4.1.1 Analiza začetka in konca vezanja CP

Analiza mešanice CEM I/20 s temperaturo 20°C , ki jo kasneje privzamemo kot primerjalno mešanico, pokaže, da je prišlo do začetka vezanja CP po 2,05 urah, do konca vezanja CP pa je prišlo po 3,5 urah. Pri mešanici CEM I/5 s temperaturo 5°C je do začetka vezanja CP prišlo 95,1 % (1,95 ure) kasneje kot pri primerjalni mešanici CEM I/20, do konca vezanja CP pa je prišlo 214,3 % (7,5 ure) kasneje. Pri mešanici CEM I/10 s temperaturo 10°C je do začetka vezanja CP prišlo 55,1 % (1,13 ure) kasneje kot pri primerjalni mešanici CEM I/20, do konca vezanja CP pa je prišlo 112,3 % (3,93 ure) kasneje. Pri temperaturi 30°C je do začetka vezanja CP prišlo 34,1 % (0,70 ure) prej kot pri primerjalni mešanici CEM I/20, do konca vezanja CP pa pride 11,4 % (0,4 ure) kasneje. Trajanje obdobja vezanja dv se je v primeru mešanice CEM I/5 glede na primerjalno mešanico CEM I/20 podaljšalo za 382,8 %, v primeru

mešanice CEM I/10 se je trajanje obdobja vezanja podaljšalo za 193,1 %, v primeru mešanice CEM I/30 pa se je trajanje obdobja vezanja podaljšalo za 75,9 % (1,1 ure).

4.1.2 Analiza hitrosti vezanja CP

Podrobnejša analiza obdobja vezanja CP pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru primerjalne mešanice CEM I/20 dosežena po 2,85 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 2,1 /h. Pri mešanici CEM I/5 je bila najvišja hitrost dosežena po 107 % kasneje glede na primerjalno mešanico CEM I/20, pri mešanici CEM I/10 je bila najvišja hitrost vezanja dosežena 51,9 % prej glede na primerjalno mešanico CEM I/20, pri mešanici CEM I/30 pa je bila najvišja hitrost vezanja dosežena po 22,8 % prej glede na primerjalno mešanico CEM I/20. Intenzitete hitrosti vezanja CP glede na primerjalno mešanico CEM I/20 padajo tako pri višjih kot nižjih temperaturah. Pri mešanici CEM I/5 smo zabeležili 60,5 % manjšo intenziteto, pri mešanici CEM I/10 smo zabeležili 51,7 % manjšo intenziteto, pri mešanici CEM I/30 18,6 % manjšo intenziteto hitrosti vezanja CP glede na primerjalno mešanico CEM I/20.

4.1.3 Analiza pospeška in pojemka vezanja CP

Podrobnejša analiza obdobja vezanja CP pokaže, da je bila največji pospešek vezanja CP (označimo ga s točko S_{12}) v primeru primerjalne mešanice CEM I/20 dosežen po 2,5 urah in je (merjen s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašal 3,27 /h². Največji pojemek vezanja CP je bil dosežen po 3,25 urah in je (merjen s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašal -3,5 /h². Pri mešanici CEM I/5 je bil največji pospešek vezanja CP dosežen 108 % kasneje glede na CEM I/20, pri mešanici CEM I/10 je bil dosežen 47,6 % kasneje glede na CEM I/20, pri mešanici CEM I/30 pa 30,8 % prej glede na primerjalno mešanico CEM I/20. Velikosti pospeškov so glede na primerjalno mešanico CEM I/20 padale tako pri višjih kot nižjih temperaturah. Pri mešanici CEM I/5 smo zabeležili 78,6% manjši pospešek, pri mešanici CEM I/10 smo zabeležili 67,6 % manjši pospešek, pri mešanici CEM I/30 pa 36,7 % manjši pospešek vezanja CP glede na velikost pospeška vezanja CP primerjalne mešanice CEM I/20.

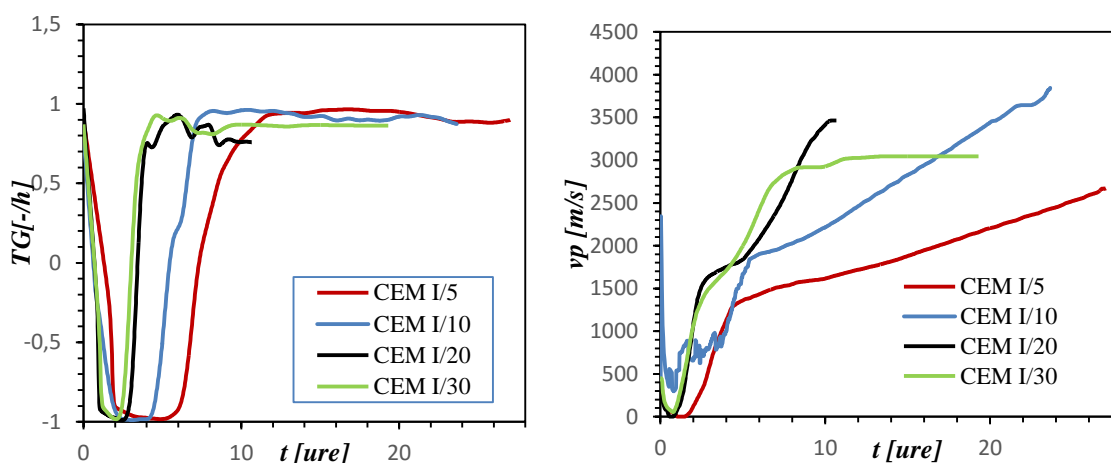
Na drugi strani smo beležili pojemke vezanja CP. Največji pojemek vezanja CP (označimo ga s točko S_{23}) je bil pri mešanici CEM I/5 dosežen 96,9 % kasneje glede na CEM I/20, pri mešanici CEM I/10 je bil dosežen 44,9 % kasneje glede na CEM I/20, pri mešanici CEM I/30 pa je bil dosežen 19,5 % prej glede na primerjalno mešanico CEM I/20. Podobno kot pri intenzitetah pospeškov, so tudi velikosti pojemkov vezanja CP (S_{23}) glede na primerjalno mešanico CEM I/20 padale tako pri višjih kot nižjih temperaturah. Pri mešanici CEM I/5 smo zabeležili 87,4 % manjši pojemek, pri mešanici CEM I/10 smo zabeležili 73,1 % manjši pojemek, pri mešanici CEM I/30 pa 49,1 % manjši pojemek glede na velikost pojemka vezanja CP primerjalne mešanice CEM I/20.

4.1.4 Analiza karakterističnih faz v procesu vezanja CP

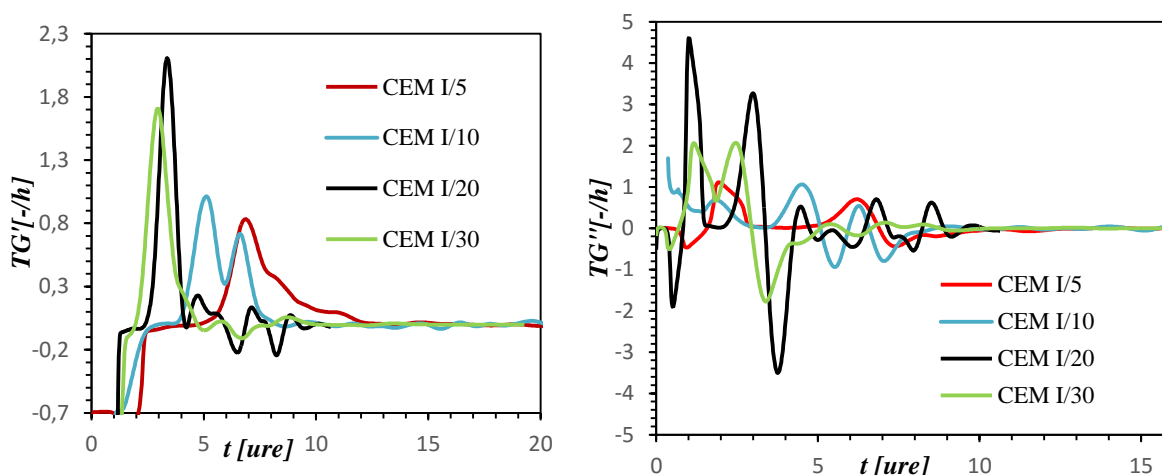
Trajanje značilnih faz S1, S2 in S3 se glede na mešanico CEM I/20 najbolj poveča pri mešanici z najnižjo temperaturo CEM I/5, do najmanjše spremembe (povečanje) trajanja značilnih faz S1, S2 in S3 pa zabeležimo pri mešanici z najvišjo temperaturo CEM I/30. Z drugimi besedami, znižanje temperature privede do počasnejših reakcij v postopku hidratacije CP, zato mine več časa od začetka do konca vezanja CP. V primeru mešanice CEM I/5 se je trajanje faze pospešenega vezanja (faza S1) povečalo za 137,5 %, trajanje faze najbolj intenzivnega vezanja (faza S2) se je povečalo za 60 %, trajanje faze pojemanja (faza S3) pa se je podaljšalo kar za 684,6 % v primerjavi z mešanico CEM I/20. V primeru mešanice CEM I/10 se je faza pospešenega vezanja (faza S1) skrajšala za 39,5%, obdobje najbolj intenzivnega vezanja (faza S2) se je skrajšalo za 15,0 %, trajanje faze pojemanja (faza S3) pa se je skrajšalo za 39,2 % v primerjavi z mešanico CEM I/20. Pri analizi mešanice CEM I/30 smo ugotovili, da se je faza pospešenega vezanja (faza S1) skrajšala za 55,3 %, obdobje najbolj intenzivnega vezanja (faza S2) se je skrajšalo za 23,3 %, trajanje faze pojemanja (faza S3) pa se je skrajšalo za 66,7 % v primerjavi z mešanico CEM I/20.

Preglednica 2: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanico CEM I pri 5, 10, 20 in 30 °C.

POMEN	OZNAKA	ENOTA	CEM I/20	CEM I/5		CEM I/10		CEM I/30	
				abs	rel (%)	abs	rel (%)	abs	rel (%)
začetek vezanja CP	CP ₁	h	2,05	4,00	95,1	3,18	55,1	1,35	-34,1
konec vezanja CP	CP ₂	h	3,5	11,00	214,3	7,43	112,3	3,9	11,4
obdobje vezanja CP	dv	h	1,45	7,00	382,8	4,25	193,1	2,55	75,9
čas pri hitrosti UZ valov $v_p = 1500$ m/s	$v_{p,1500}$	h	2	5,90	195,0	3,88	94,0	2,2	10,0
zadnja zaznana hitrost UZ valov	$v_{p,end}$	h	10,13	26,00	156,7	22,88	125,9	18,6	83,6
največja hitrost UZ valov	$v_{p,max}$	m/s	3466	2672,00	-22,9	3846,20	11,0	3043,5	-12,2
čas pri največji hitrosti vezanja CP	S ₁₃	h	2,85	5,90	107,0	4,33	51,9	2,2	-22,8
največja hitrost vezanja CP	S _{13,max}	-/h	2,1	0,83	-60,5	1,01	-51,7	1,71	-18,6
največji pospešek vezanja CP	S ₁₂	h	2,5	5,20	108,0	3,69	47,6	1,73	-30,8
	S _{12,max}	-/h ²	3,27	0,70	-78,6	1,06	-67,6	2,07	-36,7
največji pojemek vezanja CP	S ₂₃	h	3,25	6,40	96,9	4,71	44,9	2,65	-18,5
	S _{23,min}	-/h ²	-3,5	-0,44	-87,4	-0,94	-73,1	-1,78	-49,1
trajanje faze S1	S1	h	0,8	1,90	137,5	1,15	43,7	0,85	6,2
trajanje faze S2	S2	h	0,75	1,20	60,0	1,02	36,0	0,92	22,7
trajanje faze S3	S3	h	0,65	5,10	684,6	3,10	376,9	1,7	161,5



Slika 5: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanico CEM I pri temperaturah 5, 10, 20 in 30°C.



Slika 6: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas (desno) za mešanico CEM I pri temperaturah 5, 10, 20 in 30°C.

4.1.5 Komentar

Pri referenčni mešanici brez dodatkov pri temperaturi $T = 30^{\circ}\text{C}$ je poteklo najmanj časa do začetka vezanja CP, prav tako pa je mešanica CEM I/30 potrebovala najmanj časa za doseg karakterističnih točk, kot so točka S_{12} (najvišji pospešek vezanja CP), točka S_{13} (najvišjo hitrost vezanja CP) in točka S_{23} (najvišji pojemek vezanja CP). Z nižanjem temperature potekajo kemijske reakcije v CP počasneje, vse do temperature 5°C . Tam je čas začetka vezanja najdaljši, značilne faze S1, S2 in S3 so najdaljše, značilne točke S_{12} , S_{13} in S_{23} pa dosežemo najpozneje izmed vseh mešanic. Analiza je v skladu s pričakovanji, kar potrjuje kvaliteto metode in iz nje pridobljenih rezultatov.

4.2 Primerjava mešanic CP z različnim tipom cementa pri temperaturi 20°C

- CEM I/20 predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM I brez kemijskega dodatka
- CEM III/20 predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM III brez kemijskega dodatka
- v tem primeru smo analizirali mešanici z različnima vrstama cementa pri konstantni temperaturi $T = 20^{\circ}\text{C}$

Sliki 5 in 6 prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja $v_p - t$), razvoj TG parametra s časom (krivulja $TG - t$) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG' - t$) in drugega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG'' - t$) za mešanici z različnima vrstama cementov pri enaki temperaturi $T = 20^{\circ}\text{C}$. Preglednica 2 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za obe mešanici.

4.2.1 Analiza začetka in konca vezanja CP

Iz preglednice 2 je jasno razvidno, da se je čas začetka vezanja s spremembo tipa cementa iz CEM I/20 v CEM III/20 podaljšal. Pri CEM III/20 je prišlo do začetka vezanja CP 22,0 % (0,45 ure) pozneje kot pri CEM I/20, do konca vezanja CP pa pride 31,4 % (1,10 ure) pozneje. Dolžina obdobja vezanja dv se je v primeru mešanice CEM III/20 glede na CEM I/20 podaljšala za približno 44,8 % (0,65 ure).

4.2.2 Analiza hitrosti vezanja CP

Podrobnejša analiza poteka obdobja vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja CP (točka S_{13}) v primeru referenčne mešanice CEM I/20 dosežena po 2,85 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 2,1 /h. V primeru mešanice CEM III/20 je bila dosežena po 3,8 urah (33,3 % počasneje glede na referenčno mešanico CEM I/20) z intenziteto 1,1 /h (47,6 % nižje od intenzitete referenčnega materiala CEM I/20).

4.2.3 Analiza pospeška in pojemka vezanja CP

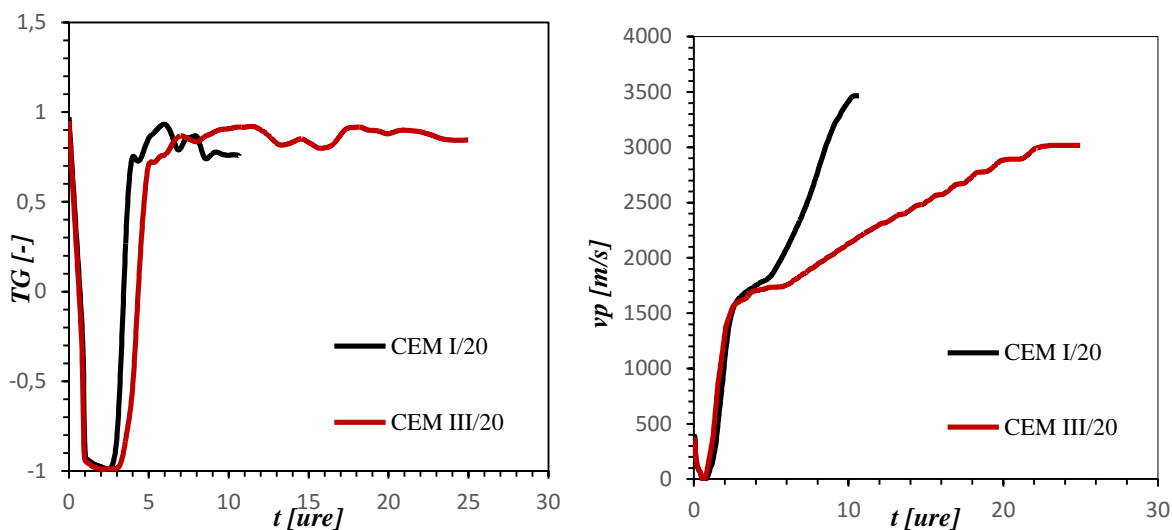
Pri analizi karakterističnih točk S_{12} , S_{13} in S_{23} se pokaže jasen vzorec. V primeru mešanice CEM III/20 dosežemo te točke prej, intenziteta pa je občutno manjša. Največji pospešek vezanja CP v primeru CEM III/20 dosežemo 36% (0,9 ure) prej z intenziteto 1,3 /h (kar 60,2 % nižje od intenzitete CEM I/20). Največji pojemek vezanja CP v primeru CEM III/20 dosežemo 32,3% (1,05 ure) prej z intenziteto -2,1 /h (kar 40,0 % nižje od intenzitete CEM I/20).

4.2.4 Analiza karakterističnih faz v procesu vezanja CP

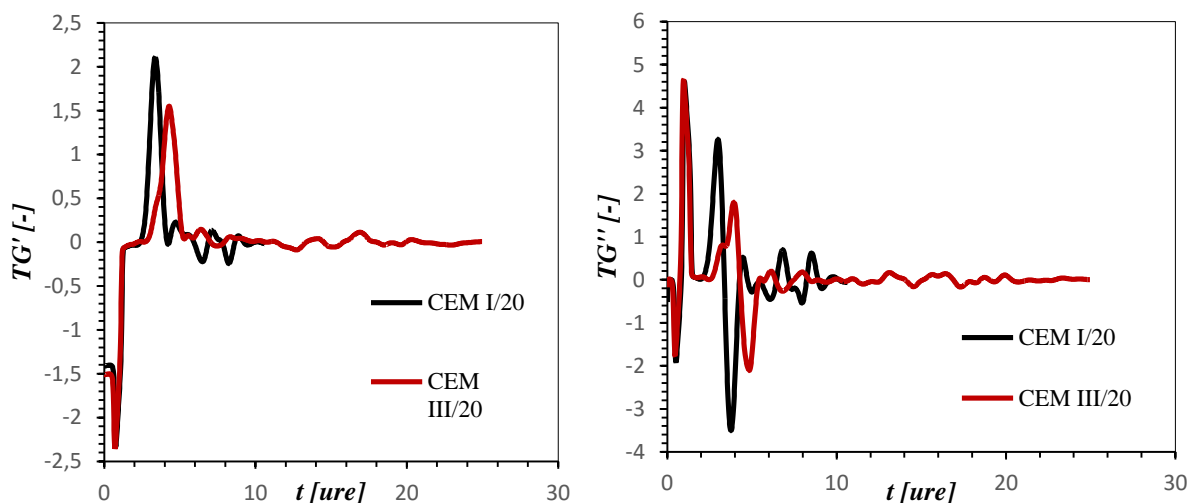
Obdobje pospešenega vezanja CP (faza S1) se je v primeru mešanice CEM III/20 podaljšalo za 62,5 % (0,5 ure), obdobje najbolj intenzivnega vezanja (faza S2) se je podaljšalo za 20,0 % (0,15 ure), obdobje pojemanja (faza S3) pa se je podaljšalo za 23,1 % (0,15 ure), v primerjavi z referenčno mešanico CEM I/20. Ugotovimo, da se faze S1, S2 in S3 pri mešanici CEM III/20 v primerjavi z referenčno mešanico CEM I/20 podaljšajo, in to za vsaj 20%.

Preglednica 3: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.

POMEN	OZNAKA	ENOTA	CEM I/20	CEM III/20	
				abs	Rel (%)
začetek vezanja CP	CP ₁	h	2,05	2,5	22,0
konec vezanja CP	CP ₂	h	3,5	4,6	31,4
trajanje vezanja CP	dv	h	1,45	2,1	44,8
hitrost UZ valov pri $v_p = 1500$ m/s	$V_{p,1500}$	h	2	1,9	-5,0
zadnja zaznana hitrost	$V_{p,end}$	h	10,13	21	107,3
največja hitrost vezanja CP	$V_{p,max}$	m/s	3466	3100	-10,6
čas pri največji hitrosti vezanja CP	S ₁₃	h	2,85	3,8	33,3
največja hitrost vezanja CP	S _{13,max}	-/h	2,1	1,1	-47,6
največji pospešek vezanja CP	S ₁₂	h	2,5	3,4	36,0
	S _{12,max}	-/h ²	3,27	1,3	-60,2
največji pojemek vezanja CP	S ₂₃	h	3,25	4,3	32,3
	S _{23,min}	-/h ²	-3,5	-2,1	-40,0
trajanje faze S1	S1	h	0,8	1,3	62,5
trajanje faze S2	S2	h	0,75	0,9	20,0
trajanje faze S3	S3	h	0,65	0,80	23,1



Slika 7: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.



Slika 8: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas (desno) za mešanici CEM I/20 in CEM III/20.

4.2.5 Komentar

S primerjavo mešanic CEM I/20 in CEM III/20 se pri analizi karakterističnih točk S_{12} , S_{13} in S_{23} se pokaže jasen vzorec. V primeru mešanice CEM III/20 dosežemo te točke prej, intenziteta pa je občutno manjša kot pri cementni mešanici CEM I/20. Ugotovimo tudi, da se faze S1, S2 in S3 pri mešanici CEM III/20 v primerjavi z referenčno mešanico CEM I/20 podaljšajo, in to za vsaj 20%.

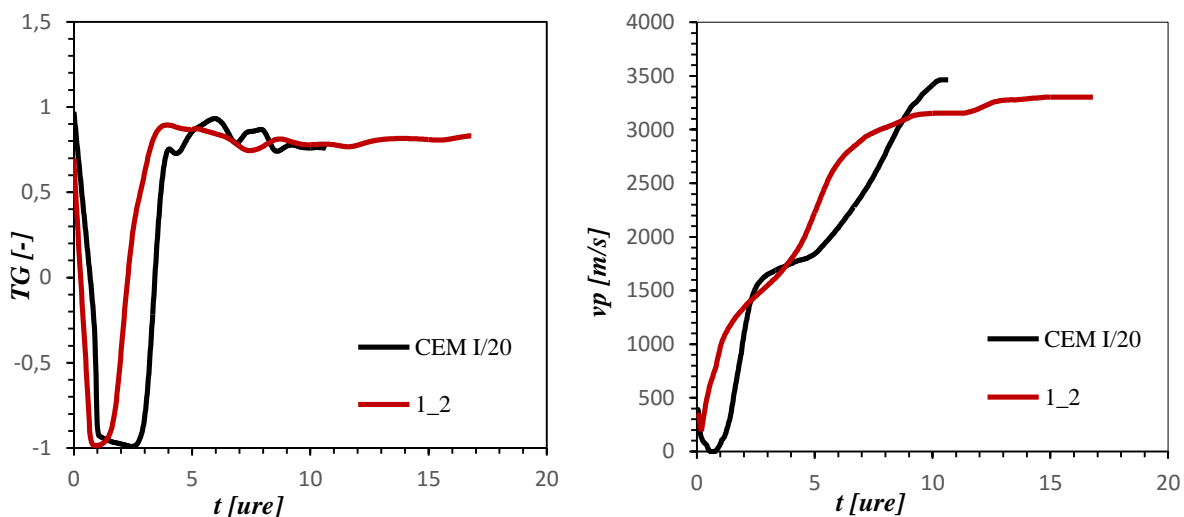
4.3 Ne-alkalna pospešila vezanja za brizgani beton pri temperaturi 20°C

- CEM I/20 predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM I brez kemijskega dodatka
- 1_2 predstavlja mešanico s CEM I in kemijskim dodatkom ne-alkalnega pospešila vezanja z oznako »pospešilo brizgani beton«
- $T = 20^{\circ}\text{C}$

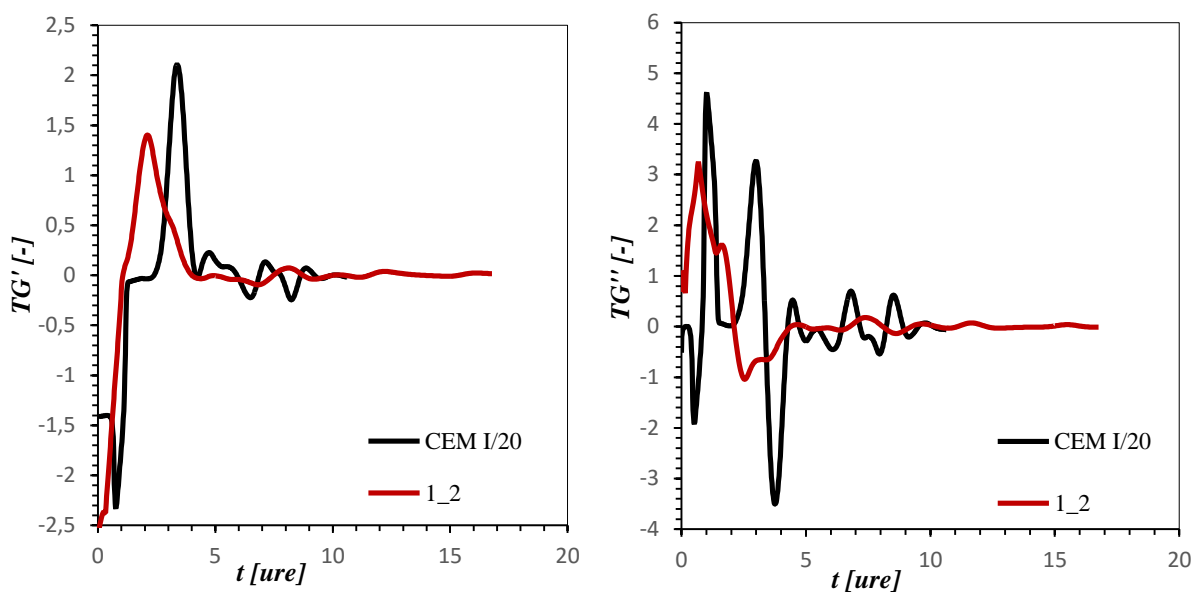
Sliki 9 in 10 prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja $v_p - t$), razvoj TG parametra s časom (krivulja $TG - t$) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG' - t$) za obe mešanici iz sklopa 1 pri temperaturi $T = 20^{\circ}\text{C}$. Preglednica 4 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za obe mešanici iz sklopa 1. Iz preglednice 4 je v primeru dodatka »pospešilo brizgani beton« razvidno, da pride do začetka vezanja za približno 61 % (1,25 ure) prej glede na začetek vezanja CP brez dodatka, medtem ko je bil konec vezanja približno 8,6% (0,3 ure) pozneje. V skladu s tem je možno opaziti občutne razlike v dolžini obdobja vezanja med obravnavanima CP. Dolžina obdobja vezanja se je v primeru uporabe dodatka »pospešilo brizgani beton« podaljšala za približno 106,9% (1,55 ure) glede na dolžino obdobja vezanja pri referenčni pasti. Podrobnejša analiza poteka vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru referenčne paste dosežena po 2,85 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 2,1 /h. Najvišja hitrost vezanja ob uporabi dodatka »pospešilo brizgani beton« je bila dosežena po 1,9 urah (33,3 % hitreje glede na referenčni material) z intenziteto 1,4 /h (33,3 % nižja v primerjavi z intenziteto referenčnega materiala). To pomeni, da je pri uporabi dodatka hitreje dosežena najvišja hitrost vezanja, intenziteta pa se je zmanjšala, glede na referenčno pasto. Podobno velja tudi za pospeške in pojemke vezanja. Z uporabo dodatka hitreje dosežemo maksimalni pospešek vezanja (točka S_{12}) in maksimalni pojemek vezanja (točka S_{23}), vendar pa so vrednosti pospeška in pojemka precej manjše kot pri referenčni pasti. Hitrost $v_{p,1500}$ je bila pri uporabi dodatka dosežena 30% prej kot pri referenčni pasti. Faza pospešenega vezanja (faza S1) se je v primeru dodatka »pospešilo brizgan beton« podaljšala za 37,5 %, v primerjavi s trajanjem faze pri referenčni pasti. Prisotnost dodatka je vplivala tudi na 20 % podaljšanje faze najintenzivnejšega obdobja vezanja (faza S2), največji vpliv dodatka pa se je pokazal v obdobju pojemanja intenzitete vezanja (faza S3), ki se je zavleklo kar za 192,3% glede na trajanje faze pri referenčni pasti.

Preglednica 4: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanici CEM I/20 in 1_2 pri T=20 °C.

POMEN	OZNAKA	ENOTA	CEM I/20	1_2	
				abs	Rel (%)
začetek vezanja CP	CP ₁	h	2,05	0,8	-61,0
konec vezanja CP	CP ₂	h	3,5	3,8	8,6
trajanje vezanja CP	dv	h	1,45	3	106,9
hitrost UZ valov pri v _p = 1500 m/s	V _{p,1500}	h	2	2,6	30,0
zadnja zaznana hitrost	V _{p,end}	h	10,13	20	97,4
največja hitrost vezanja CP	V _{p,max}	m/s	3466	3302	-4,7
čas pri največji hitrosti vezanja CP	S ₁₃	h	2,85	1,9	-33,3
največja hitrost vezanja CP	S _{13,max}	-/h	2,1	1,4	-33,3
največji pospešek vezanja CP	S ₁₂	h	2,5	1,4	-44,0
	S _{12,max}	-/h ²	3,27	1,62	-50,5
največji pojemek vezanja CP	S ₂₃	h	3,25	2,3	-29,2
	S _{23,min}	-/h ²	-3,5	-1,05	-70,0
trajanje faze S1	S1	h	0,8	1,1	37,5
trajanje faze S2	S2	h	0,75	0,9	20,0
trajanje faze S3	S3	h	0,65	1,9	192,3



Slika 9: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanici CEM I/20 in 1_2 pri T=20°C.



Slika 10: Diagrama TG' -čas (levo) in TG'' -čas (desno) za mešanici CEM I/20 in 1_2 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.

4.3.1 Komentar

Pri temperaturi $T = 20^{\circ}\text{C}$ dodatek »pospešilo brizgani beton« omogoči znatno hitrejši začetek vezanja, na konec vezanja pa ne vpliva pomembno. Posledično se dolžina obdobja vezanja se dvakrat podaljša. Najvišja hitrost vezanja, maksimalni pospešek ter maksimalni pojemek se z uporabo dodatka občutno zmanjšajo (30-50%) glede na referenčno pasto brez dodatka, po drugi strani pa te značilne točke dosežemo veliko hitreje. Uporaba dodatka občutno podaljša trajanje značilnih faz S1, S2, in S3. Izpostaviti je treba fazo S3 (obdobje pojemanja intenzitete vezanja), ki se podaljša za skoraj 200 % glede na referenčno pasto brez dodatka. Zaključimo lahko, da kemijski dodatek »pospešilo brizgani beton« uspešno pospeši začetek vezanja.

4.4 Ne-alkalna pospešila vezanja za brizgani beton pri temperaturi 30 °C

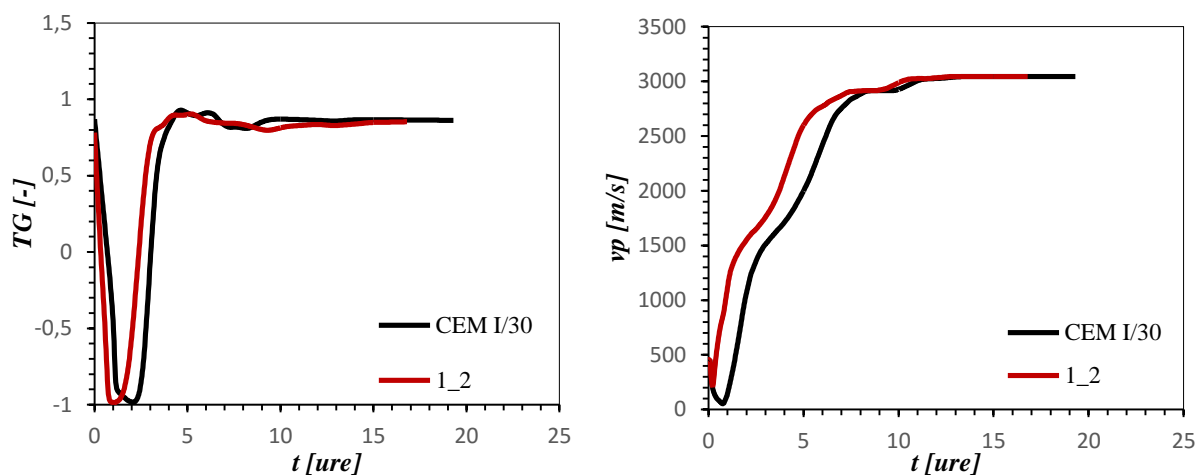
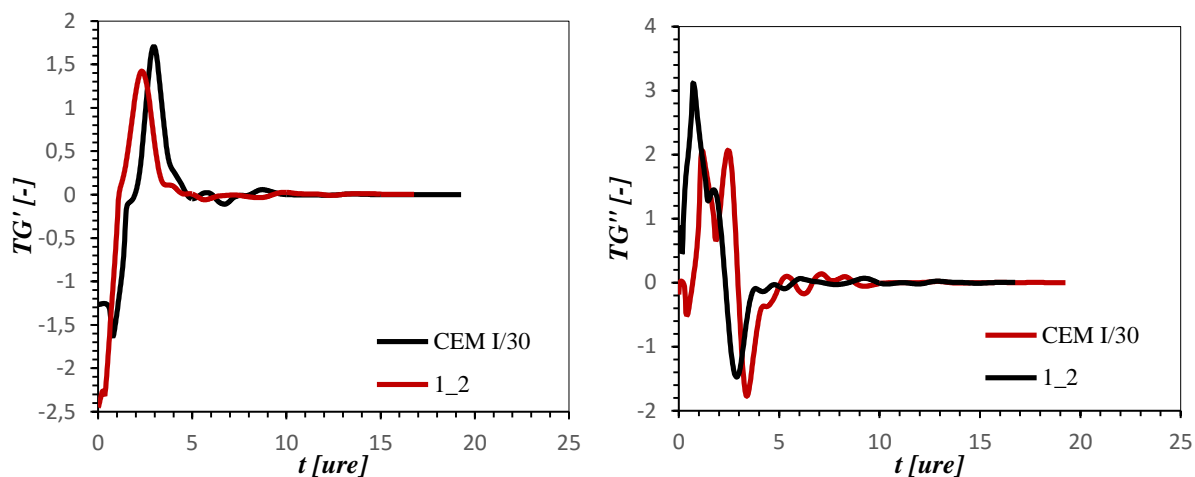
- CEM I/30 predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM I brez kemijskega dodatka
- 1_2 predstavlja mešanico s cementom CEM I in kemijskim dodatkom «pospešilo brizgani beton»
- $T = 30^{\circ}\text{C}$

Sliki 11 in 12 prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja $v_p - t$), razvoj TG parametra s časom (krivulja $TG - t$) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG' - t$) za obe mešanici iz sklopa 1 pri temperaturi $T = 30^{\circ}\text{C}$. Preglednica 5 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za obe mešanici iz sklopa 1. Iz preglednice 5 je v primeru dodatka «pospešilo brizgan beton» razvidno, da pride do začetka vezanja za približno 40,7 % (0,55 ure) prej, glede na začetek vezanja CP brez dodatka, medtem ko je bil konec vezanja približno 5,1% pozneje (0,2 ure). Posledica tega so občutne razlike v dolžini obdobja vezanja med omenjenima pastama. Dolžina obdobja vezanja pri temperaturi 30 °C se je v primeru uporabe dodatka «pospešilo brizgani beton» podaljšala za približno 29,4 % (0,75 ure) glede na dolžino obdobja vezanja pri referenčni pasti. Podrobnejša analiza poteka obdobja vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru referenčne paste dosežena po 2,2 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 1,71 /h. Najvišja hitrost vezanja ob uporabi dodatka «pospešilo brizgan beton» je bila dosežena po 2,05 urah (6,8 % hitreje glede na referenčni material) z intenziteto 1,43 /h (16,4 % nižja v primerjavi z intenziteto referenčnega materiala). To pomeni, da je pri uporabi dodatka hitreje dosežena najvišja hitrost vezanja, intenziteta pa se je zmanjšala, v primerjavi z referenčno pasto. Kljub temu so spremembe manjše, kot pri temperaturi $T = 20^{\circ}\text{C}$. Podobno velja tudi za pospeške in pojemke vezanja. Z uporabo dodatka hitreje dosežemo maksimalni pospešek vezanja (točka S_{12}) in maksimalni pojemek vezanja (točka S_{23}), vendar pa so vrednosti teh parametrov precej manjše, kot vrednosti pri referenčni pasti. Hitrost $v_{p,1500}$ je bila pri uporabi dodatka dosežena 29,5% prej kot pri referenčni pasti, kar se ujema z učinkom pri $T = 20^{\circ}\text{C}$. Faza pospešenega vezanja (faza S_1) se je v primeru dodatka «pospešilo brizgani beton» podaljšala za 47,1 %, v primerjavi z enakim obdobjem referenčne paste. Prisotnost dodatka je vplivala na 22,8 % podaljšanje faze najintenzivnejšega obdobja vezanja (faza S_2) glede na referenčno pasto, vpliv dodatka na obdobje pojemanja intenzitete vezanja (faza S_3) pa se je pokazal v 20,6% podaljšanju faze glede na trajanje faze pri referenčni pasti. Pri temperaturi $T=30^{\circ}\text{C}$ dodatek «pospešilo brizgani beton» povzroči hitrejši začetek vezanja (40,7%), na konec vezanja pa ne vpliva bistveno, saj je zakasnitev konca vezanja le 5 %. Posledično

se dolžina obdobja vezanja podaljša za 29,4 %. Najvišja hitrost vezanja, maksimalni pospešek ter maksimalni pojemek se z uporabo dodatka zmanjšajo (15-30%), po drugi strani pa se značilne točke doseže hitreje (1-15%). Razlike pri značilnih vrednostih S_{12} , S_{13} in S_{23} med pasto z dodatkom in referenčno CP pri $T=30^{\circ}\text{C}$, v primerjavi z razlikami glede istih TG parametrov pri temperaturi $T=20^{\circ}\text{C}$, so okoli polovico manjše. Uporaba dodatka pri temperaturi $T=30^{\circ}\text{C}$ občutno podaljša trajanje značilnih faz S1, S2, in S3. Izpostaviti je treba fazo S1 (obdobje pospešenega vezanja), ki se podaljša za 47,1 % glede na trajanje S1 pri referenčni pasti brez dodatka.

Preglednica 5: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanico CEM I/30 in 1_2 pri $T=30^{\circ}\text{C}$.

POMEN	OZNAKA	ENOTA	CEM 1/30	1_2	
				abs	rel (%)
začetek vezanja CP	CP_1	h	1,35	0,8	-40,7
konec vezanja CP	CP_2	h	3,9	4,1	5,1
obdobje vezanja CP	dv	h	2,55	3,3	29,4
čas pri hitrosti UZ valov $v_p = 1500$ m/s	$v_{p,1500}$	h	2,2	1,55	-29,5
zadnja zaznana hitrost UZ valov	$v_{p,end}$	h	18,6	19,7	5,9
največja hitrost UZ valov	$v_{p,max}$	m/s	3043,5	3182	4,6
čas pri največji hitrosti vezanja CP	S_{13}	h	2,2	2,05	-6,8
največja hitrost vezanja CP	$S_{13,max}$	-/H	1,71	1,43	-16,4
največji pospešek vezanja CP	S_{12}	h	1,73	1,5	-13,3
	$S_{12,max}$	-/h ²	2,07	1,45	-30,0
največji pojemek vezanja CP	S_{23}	h	2,65	2,63	-0,8
	$S_{23,min}$	-/h ²	-1,78	-1,48	-16,9
trajanje faze S1	S1	h	0,85	1,25	47,1
trajanje faze S2	S2	h	0,92	1,13	22,8
trajanje faze S3	S3	h	1,70	2,05	20,6

Slika 11: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanici CEM I/30 in 1_2 pri $T=30^{\circ}C$.Slika 12: Diagrama TG' -čas (levo) in TG'' -čas (desno) za mešanici CEM I/30 in 1_2 pri $T=30^{\circ}C$.

4.4.1 Komentar

Pri temperaturi $T = 30^{\circ}C$ dodatek »pospešilo brizgani beton« omogoči bistveno hitrejši začetek vezanja (40 % hitreje se začne vezanje CP), na konec vezanja pa ne vpliva bistveno. Posledično se dolžina obdobja vezanja za tretjino podaljša. Zaključimo lahko, da »pospešilo brizgani beton« pri $T=30^{\circ}C$ uspešno pospeši začetek vezanja CP.

4.5 Aeranti

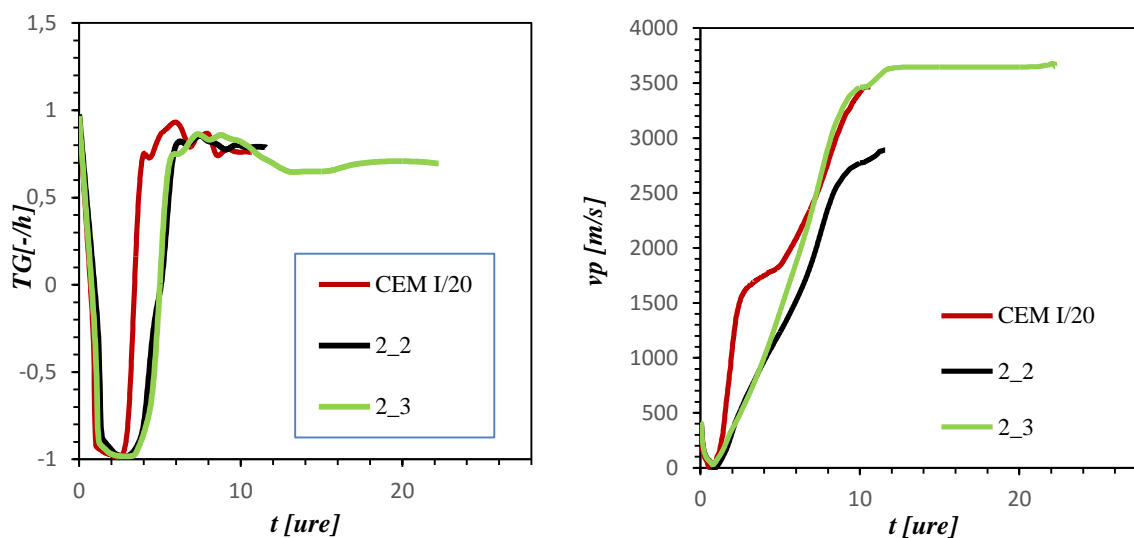
- CEM I/20 predstavlja referenčno pasto s cementom CEM I brez kemijskega dodatka
- 2_2 predstavlja pasto s cementom CEM I in kemijskim dodatkom aerant 1
- 2_3 predstavlja pasto s cementom CEM I in kemijskim dodatkom aerant 2
- $T = 20^{\circ}\text{C}$

Sliki 13 in 14 prikazujeta razvoj TG parametra s časom (krivulja TG - t), razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja vP - t) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja TG' - t) in drugega odvoda TG parametra s časom (krivulja TG'' - t) za vse mešanice iz sklopa 2. Preglednica 6 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za vse paste iz sklopa 2. Iz slik 13 in 14 je razvidno, da oba tipa aerantov upočasnita hidratacijski proces in proces formiranja trdne strukture past, tako v fazi pred pričetkom vezanja, kot tudi v sami fazi vezanja materiala.

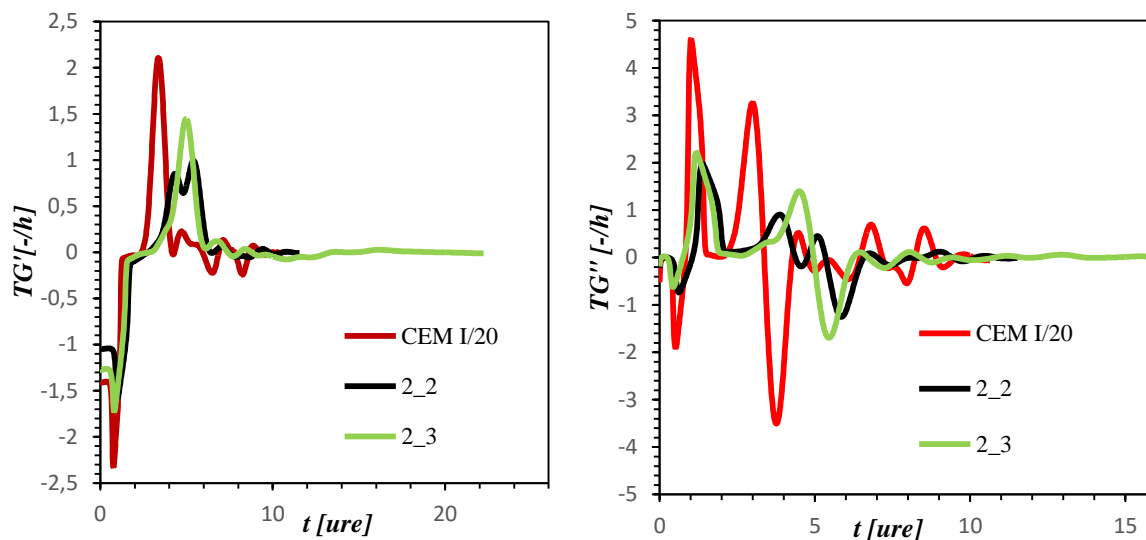
Iz preglednice 6 je razvidno, da je v primeru dodatka aerant 1 opazen zamik začetka vezanja za približno 7,3 % (0,15 ure) glede na začetek vezanja CP brez dodatka (CEM I/20), medtem ko je bil konec vezanja približno 54,3 % pozneje (1,9 ure). V primeru uporabe dodatka aerant 2 se je vezanje začelo približno 22 % (0,45 ure) pozneje kot pri referenčni pasti, konec vezanja pa 45,7 % (1,6 ure) pozneje. Posledica tega so občutne razlike v dolžini obdobja vezanja med tremi pastami. Dolžina obdobja vezanja je bila v primeru uporabe dodatka aerant 1 za približno 65,5 % (1 uro), v primeru uporabe dodatka aerant 2 pa 79,3 % (1,15 ure) daljša. Podrobnejša analiza poteka obdobja vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru referenčnega materiala CEM I/20 dosežena po 2,85 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 2,1 /h. Najvišja hitrost vezanja ob uporabi dodatka aerant 1 je bila dosežena po 4,5 urah (57,9 % pozneje glede na referenčno pasto) z intenziteto 1 /h (52,4 % nižjo od intenzitete referenčne paste), najvišja hitrost vezanja ob uporabi dodatka aerant 2 pa po 4,2 urah (47,4 % pozneje) z intenziteto 1,45 /h (-31,0 %). Oba aeranta sta imela največji zavlačevalni učinek v obdobju pospešenega vezanja (faza S1), pri čemer se je ta faza v obdobju vezanja v primeru aeranta 1 podaljšala za 187,5 %, v primeru aeranta 2 pa za 112,5 %, v primerjavi s trajanjem faze S1 pri referenčni pasti. Prisotnost aerantov na fazo najintenzivnejšega obdobja vezanja (faza S2) ni imela bistvenega vpliva, medtem ko je bil vpliv obeh dodatkov na obdobje pojemanja intenzitete vezanja (faza S3) popolnoma enak – oba sta omenjeno fazo podaljšala za 38,5 % glede na trajanje faze pri referenčni pasti.

Preglednica 6: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanice CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.

OZNAKA	ENOTA	CEM I/20	2_2		2_3	
			abs	rel (%)	abs	rel (%)
CP ₁	h	2,05	2,20	7,3	2,5	22,0
CP ₂	h	3,5	5,40	54,3	5,1	45,7
dv	h	1,45	2,40	65,5	2,6	79,3
V _{p,1500}	h	2	5,10	155,0	4,4	120,0
V _{p,end}	h	10,13	8,20	-19,1	11	8,6
V _{p,max}	m/s	3466	2950,00	-14,9	3630	4,7
S ₁₃	h	2,85	4,50	57,9	4,2	47,4
S _{13,max}	-/H	2,1	1,00	-52,4	1,45	-31,0
S ₁₂	h	2,5	4,30	72,0	3,7	48,0
S _{12,max}	-/h ²	3,27	0,45	-86,2	1,4	-57,2
S ₂₃	h	3,25	5,10	56,9	4,7	44,6
S _{23,min}	-/h ²	-3,5	-1,25	-64,3	-1,8	-48,6
S ₁	h	0,8	2,30	187,5	1,7	112,5
S ₂	h	0,75	0,80	6,7	1	33,3
S ₃	h	0,65	0,90	38,5	0,9	38,5



Slika 13: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanice CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.



Slika 14: Diagrama TG' -čas (levo) in TG'' -čas (desno) za mešanici CEM I/20, 2_2 in 2_3 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.

4.5.1 Komentar

Oba uporabljena tipa aerantov upočasnita hidratacijski proces in proces formiranja trdne strukture CP v zgodnjem obdobju. Temu primerno je jasno viden vpliv obeh aerantov na zavlačevanje vezanja, tako začetka in konca vezanja kot tudi same dolžine obdobja vezanja.

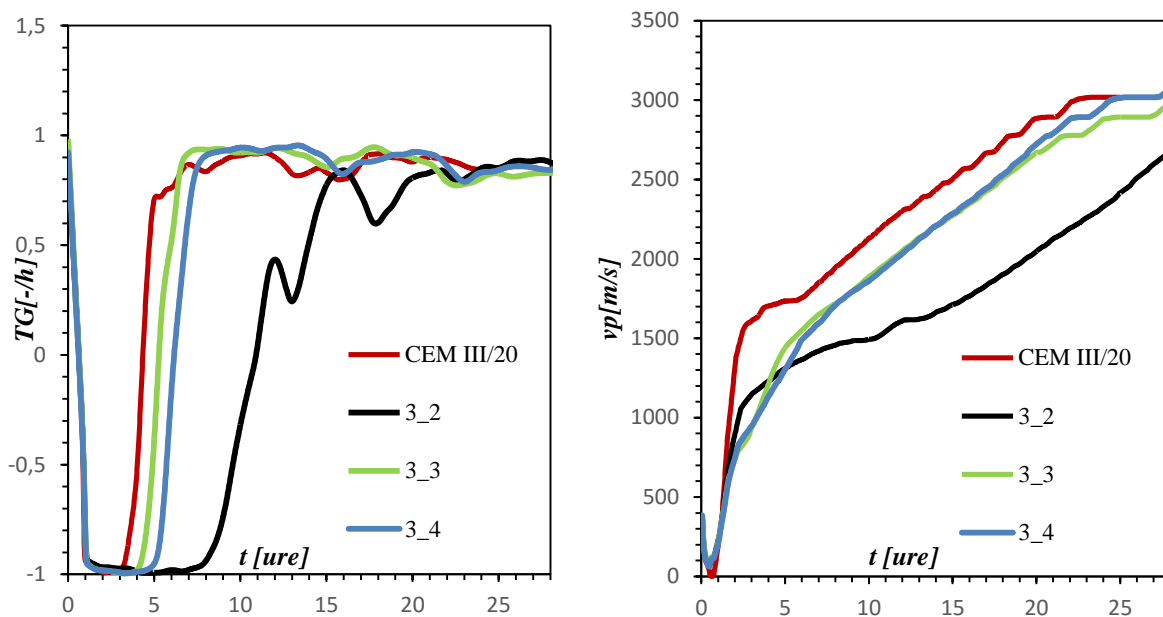
4.6 Plastifikatorji in superplastifikatorji

- CEM III/20 predstavlja referenčno mešanico s cementom CEM III brez kemijskega dodatka
- 3_2 predstavlja mešanico s cementom CEM III in kemijskim dodatkom SP1
- 3_3 predstavlja mešanico s cementom CEM III in kemijskim dodatkom SP2
- 3_4 predstavlja mešanico s cementom CEM III in kemijskim dodatkom SP3
- $T = 20^{\circ}\text{C}$

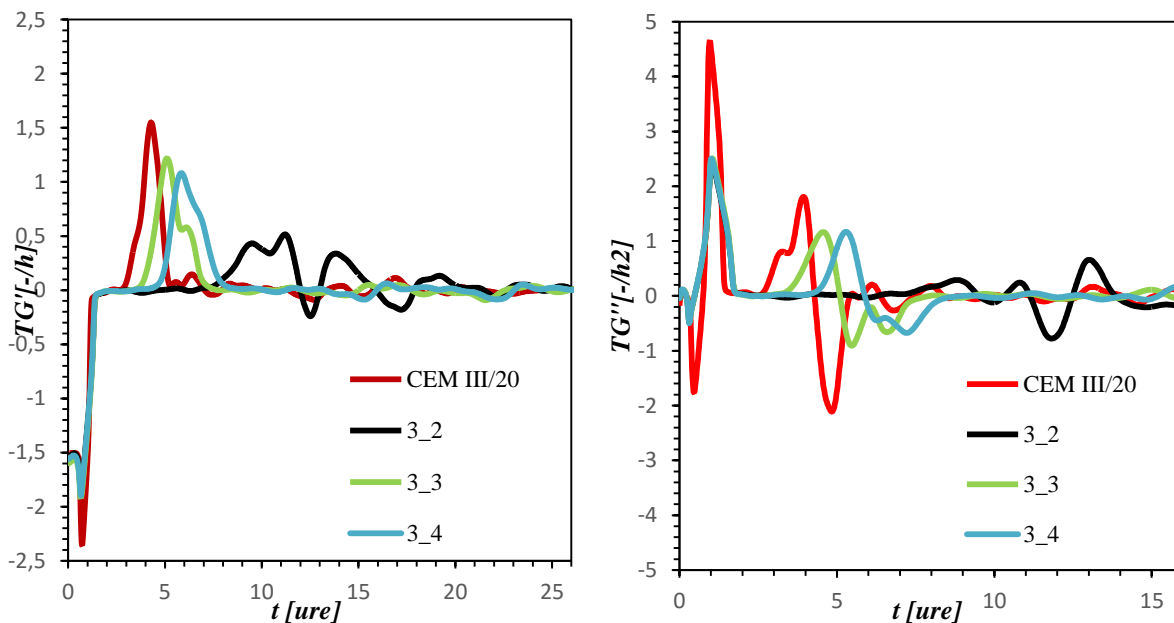
Sliki 15 in 16 spodaj prikazujeta razvoj TG parametra s časom (krivulja TG - t), razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja v_p - t) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja TG' - t) in drugega odvoda TG parametra s časom (krivulja TG'' - t) za vse mešanice iz sklopa 3. Iz preglednice 7 je razvidno, da je v primeru dodatka SP1 opazen zamik začetka vezanja za 168% (4,2 ure) glede na začetek vezanja CP brez dodatka, medtem ko je bil konec vezanja približno 219,6 % kasneje (10,1 ure). V primeru uporabe dodatka SP2 se vezanje začelo približno 36 % (0,90 ure) pozneje kot pri referenčni pasti, končalo pa 45,7 % (2,1 ure) pozneje. Pri uporabi dodatka SP 3 je opazen zamik začetka vezanja za 68 % (1,7 ure) glede na referenčno pasto, konec vezanja pa za 67,4 % (3,1 ure). Posledica tega so razlike v dolžini obdobja vezanja med omenjenimi pastami. Trajanje obdobja vezanja je bilo v primeru uporabe dodatka SP1 za približno 281 % (5,9 ure) daljše kot pri referenčni pasti, v primeru uporabe dodatka SP2 za približno 57,1 % (1,2 ure) in pri uporabi dodatka SP3 za 66,7 % (1,4 ure) daljše. Podrobnejša analiza poteka obdobja vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru referenčne paste dosežena po 3,8 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 1,1 /h. Najvišja hitrost vezanja ob uporabi dodatka SP1 je bila dosežena po 10,5 urah (176,3 % pozneje kot pri referenčni pasti) z intenziteto 0,52 /h (52,7 % nižja od intenzitete referenčne paste), ob uporabi dodatka SP2 po 4,6 urah (21,1 %) z intenziteto 1,2 /h (9,1 % višja kot pri referenčni pasti), ob uporabi dodatka SP3 pa po 5,3 urah (39,5 %) z maksimalno intenziteto 1,1 /h (enako kot pri referenčni pasti). Vsi kemijski dodatki tipa plastifikator ali superplastifikator so imeli največji zavlačevalni učinek v obdobju pojevanja vezanja (faza S3), pri čemer se je ta faza pri dodatku SP1 podaljšala za 425 % (3,4 ure), pri dodatku SP2 za 162,5 % (1,3 ure) in pri dodatku SP3 za 200 % (1,6 ure). Dodatek SP1 je vplival tudi na podaljšanje faze pospeševanja vezanja (faza S1), medtem ko sta SP2 in SP3 to fazo celo nekoliko skrajšala. Dodatek SP3 je vplival tudi na podaljšanje faze najintenzivnejšega vezanja, medtem ko ostala dva dodatka na to fazo bistvenega vpliva nista imela.

Preglednica 7: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.

OZNAKA	ENOTA	CEM III/20	3_2		3_3		3_4	
			abs	rel (%)	abs	rel (%)	abs	rel (%)
CP ₁	h	2,5	6,7	168	3,4	36	4,2	68
CP ₂	h	4,6	14,7	219,6	6,7	45,7	7,7	67,4
dv	h	2,1	8	281	3,3	57,1	3,5	66,7
v _{p,1500}	h	1,9	9,7	410,5	5	163,2	5,6	194,7
v _{p,end}	h	21	37	76,2	35	66,7	25	19
v _{p,max}	m/s	3100	2750	-11,3	3150	1,6	3150	1,6
S ₁₃	h	3,8	10,5	176,3	4,6	21,1	5,3	39,5
S _{13,max}	-/h	1,1	0,52	-52,7	1,2	9,1	1,1	0
S ₁₂	h	3,4	10	194,1	4,1	20,6	4,8	41,2
S _{12,max}	-/h ²	1,3	0,3	-76,9	1,2	-7,7	1,2	-7,7
S ₂₃	h	4,3	11,1	158,1	5	16,3	6,5	51,2
S _{23,min}	-/h ²	-2,1	-0,8	-61,9	0,9	-142,9	-0,7	-66,7
S1	h	1,3	3,8	192,3	1,2	-7,7	1,1	-15,4
S2	h	0,9	1,1	22,2	0,9	0	1,7	88,9
S3	h	0,8	4,2	425	2,1	162,5	2,4	200



Slika 15: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.



Slika 16: Diagrama TG'-čas (levo) in TG''-čas (desno) za mešanice CEM III/20, 3_2, 3_3 in 3_4 pri $T=20^{\circ}\text{C}$.

4.6.1 **Komentar**

Iz slik 15 in 16 je razvidno, da vsi obravnavani plastifikatorji/superplastifikatorji upočasnijo hidrationski proces predvsem v obdobju vezanja materiala. Delujejo tako, da se adsorbirajo na cementne delce in preprečijo njihovo združevanje.

Posledica je občutno izboljšana obdelavnost betona ob enakem v/c razmerju.

4.7 Pospešilo vezanja pri temperaturi 5°C

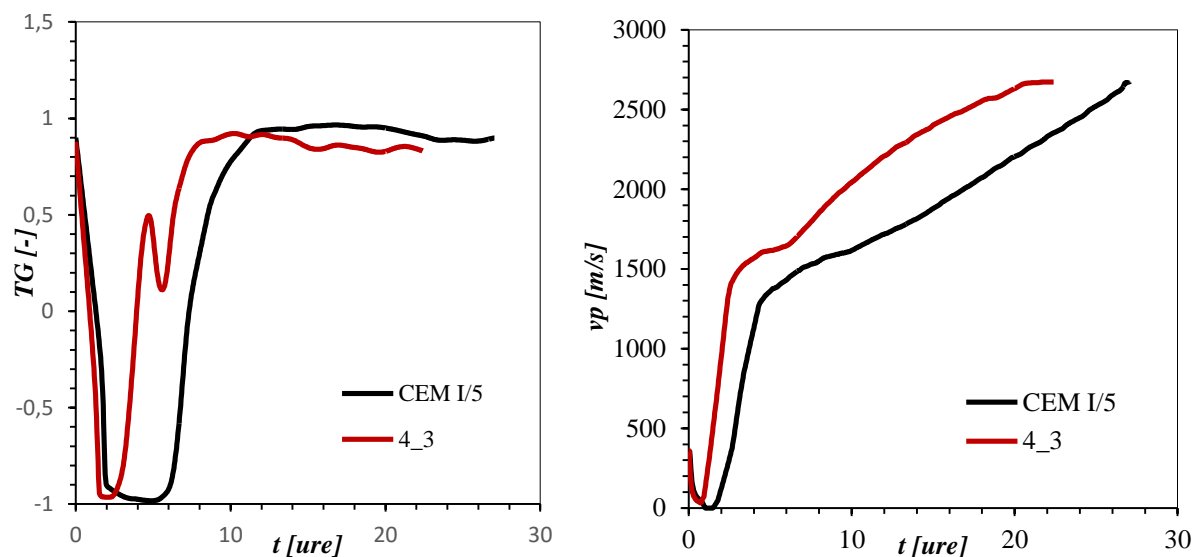
- kot CEM I/5 je označena referenčna pasta s CEM I in brez dodatka
- kot 4_3 je označen pasta s pospešilom vezanja na kloridni osnovi
- $T = 5^{\circ}\text{C}$

Sliki 17 in 18 prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih UZ valov s časom (krivulja $vP - t$), razvoj TG parametra s časom (krivulja $TG - t$) ter prvega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG' - t$) in drugega odvoda TG parametra s časom (krivulja $TG'' - t$) za obe mešanici iz sklopa 4 pri temperaturi $T=5^{\circ}\text{C}$. Preglednica 8 prikazuje vrednosti posameznih karakterističnih točk v procesu vezanja za obe mešanici iz sklopa 4. Iz preglednice 8 je v primeru kloridnega dodatka jasno razviden hitrejši začetek vezanja, za kar 62,5 % (0,55 ure) glede na začetek vezanja CP brez dodatka, medtem ko je 30,0 % prej (3,3 ure) prišlo tudi do konca vezanja. Temu primerno so opazne občutne razlike v dolžini obdobja vezanja med obravnavanima pastama.

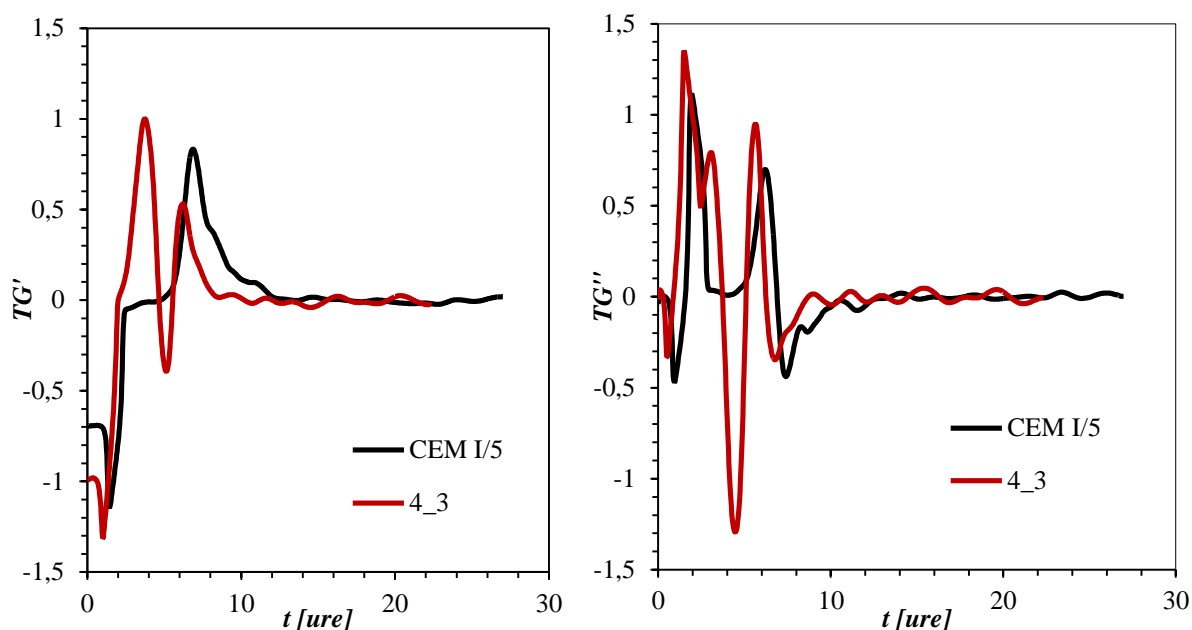
Dolžina obdobja vezanja pri temperaturi 5°C se je v primeru uporabe kloridnega dodatka skrajšala za približno 11,4 % (0,8 ure), glede na referenčno pasto brez dodatka. Podrobnejša analiza poteka obdobja vezanja pokaže, da je bila najvišja intenziteta oziroma hitrost vezanja (točka S_{13}) v primeru referenčne paste dosežena po 5,90 urah in je (merjena s spremembo TG faktorja v časovni enoti) znašala 0,83 /h. Najvišja hitrost vezanja ob uporabi kloridnega dodatka je bila dosežena po 3,0 urah (49,2 % hitreje kot pri referenčni pasti) z intenziteto 1,0 /h (20,5 % višja intenziteta, kot pri referenčni pasti). Faza pospešenega vezanja (faza S1) se je v primeru kloridnega dodatka skrajšala za 21,1 %, v primerjavi s trajanjem faze pri referenčni pasti. Prisotnost dodatka je vplivala na fazo najintenzivnejšega obdobja vezanja (faza S2), ki je bila za 4,2% krajša, kot pri referenčni pasti. Vpliv dodatka na obdobje pojemanja intenzitete vezanja (faza S3) se je odrazil s 7,8% skrajšanjem faze S3, glede na trajanje faze pri referenčni pasti.

Preglednica 8: Vrednosti karakterističnih točk v procesu vezanja za mešanici CEM I/5 in 4_3 pri T=5°C.

OZNAKA	ENOTA	CEM I/5	4_3	
			abs	Rel (%)
CP ₁	h	4,0	1,50	-62,5
CP ₂	h	11,0	7,70	-30,0
dv	h	7,0	6,20	-11,4
V _{p,1500}	h	5,9	2,40	-59,3
V _{p,end}	h	26,0	21,60	-16,9
V _{p,max}	m/s	2672,0	2672,0	0,0
S ₁₃	h	5,9	3,00	-49,2
S _{13,max}	-/H	0,83	1,00	20,5
S ₁₂	h	5,20	4,90	-5,8
S _{12,max}	-/h ²	0,7	0,95	35,9
S ₂₃	h	6,4	3,70	-42,2
S _{23,min}	-/h ²	-0,44	-1,30	195,5
S1	h	1,9	1,50	-21,1
S2	h	1,2	1,150	-4,2
S3	h	5,10	4,70	-7,8



Slika 17: Diagrama TG-čas (levo) in hitrost-čas (desno) za mešanici CEM I/5 in 4_3 pri T=5°C.



Slika 18: Diagrama TG' -čas (levo) in TG'' -čas (desno) za mešanici CEM I/5 in 4_3 pri $T=5^{\circ}\text{C}$.

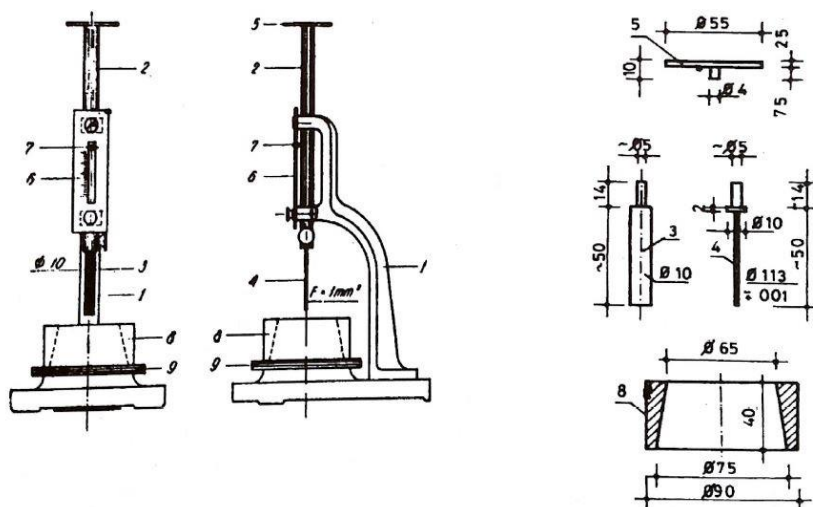
4.7.1 Komentar

Če uporabimo pospešilo vezanja na kloridni osnovi, poteče precej manj časa do začetka vezanja CP (62,5% prej), prav tako pa v krajšem času nastopi konec vezanja (30% prej). Obdobje vezanja se tako skrajša za 11,4 % (0,8 ure), torej ni velike razlike glede na referenčno pasto. Čas, pri katerem pride do najvišje hitrosti vezanja se občutno skrajša, za 50%, največja hitrost oziroma intenziteta vezanja S_{13} pa se poveča za 20,5%. Trajanje vseh treh značilnih obdobj, S_1 , S_2 , in S_3 , se, glede na referenčno pasto, skrajša. Najbolj izrazito se skrajša faza pospešenega vezanja S_1 , kar za 20%. Med značilnimi točkami S_{13} , S_{12} in S_{23} pride do največje spremembe pri največjem pojemku vezanja, ki naraste kar za 195,5 %. Zaključimo lahko, da kloridni dodatek, ki spada v skupino pospešil vezanja, bistveno pospeši začetek vezanja.

5 VICATOV PREIZKUS : Določanje začetka in konca vezanja

5.1 Sestavni deli Vicatovega aparata:

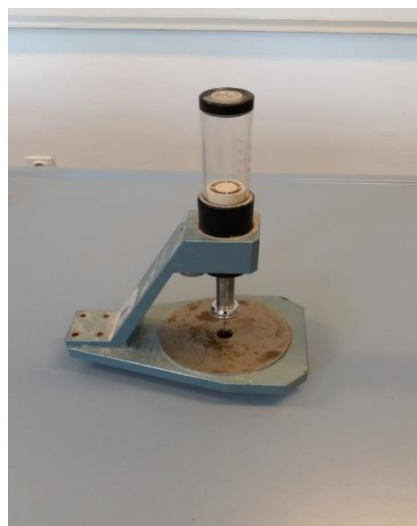
Sestavni deli Vicatovega aparata so (slika 19): stojalo (1), pomična sonda (2), valj premera 10 mm (3), jeklena igla prereza 1 mm² (4), utež (5), skala (6), kazalec (7), konusni prstan (8) in kvadratna steklena plošča (9).



Slika 19: Sestavni deli Vicatovega aparata



Slika 20: Standardni mešalec



Slika 21: Vicatov aparat

Določila standarda SIST EN 196-3 zahtevajo, da je temperatura prostora, kjer potekajo preiskave, 20 ± 1 °C, relativna vlažnost pa najmanj 90 %. V našem primeru se je temperatura gibala med 22-24°C, saj ni bilo možno kontrolirati pogojev okolja [9].

5.2 Potek preiskave

Najprej sem stehal cement, vodo in dodatke ter jih shranil v ločene posode. Nato sem z mineralnim oljem premazal površino steklene plošče Vicatovega aparata. Nato sem v standardni mešalec, ki je v skladu s standardom SIST EN 196-1, stresel cement in ga premešal. Nato sem mu počasi dodajal vodo in dodatke. Po točno določenem postopku mešanja sem tako zamešal CP, ki sem jo nato vлил v konusni prstan tako, da je segala čez rob konusnega prstana. Odvečno količino sem s kovinskim ravnilom odstranil tako, da je ostala gladka in z robom konusnega prstana poravnana površina. Za to preiskavo sem uporabil brušeno in polirano iglo, ki sem jo vstavil v Vicatov aparat.

Po standardu SIST EN 196-3 preizkus poteka, kot je navedeno spodaj [9].

5.2.1 Začetek vezanja

Iglo postavimo v položaj, da nalega na površino paste. Iglo nato spustimo, da prosto prodira skozi pasto. Po 30 sekundah odčitamo višino nad stekleno ploščo, na kateri se igla ustavi. V primeru, da se je ustavila na višini 3-9 mm nad stekleno ploščo, vrednost zabeležimo. Ta postopek ponovimo na treh poljubnih mestih. V primeru, da vrednosti ustrezajo kriteriju, zabeležimo čas. Čas, ki mine od dodajanja vode v cement, sem označil kot čas začetka vezanja [9].

5.2.2 Konec vezanja

Prstan s pasto vzamemo s plošče in ga obrnemo. Konec igle postavimo na površino paste, in pustimo, da prosto prodira skozi pasto. Čas odčitamo, ko igla ne prode več kot pol milimetra v globino paste.

Čas, ki mine od dodajanja vode v cement, sem označil kot čas konca vezanja [9].

6 Primerjava metod za določitev začetka in konca vezanja

Pri izbranih mešanicah sem opravil standardni Vicatov preizkus za določanje začetka vezanja in konca vezanja, nato pa sem opravil še UZ meritve na enakih mešanicah. Temperatura pri UZ meritvah teh mešanic je bila konstantna, $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, razlog pa je v kontrolirani komori, v kateri se je preizkus izvajal. Pri testiranju po Vicatovem postopku pa temperature v prostoru nisem mogel kontrolirati, zato se je gibala med 22°C in $24,5^{\circ}\text{C}$. Kljub temperaturni razliki se jasno vidijo razlike v določanju časa začetka vezanja, meritve z Vicatovim aparatom glede na UZ meritve zamujajo od 30% do 60%. Pri določanju časa konca vezanja meritve odstopajo največ 20%, vendar tokrat zamujajo meritve ultrazvoka. Preiskava začetka in konca vezanja z Vicatovim aparatom je empirična metoda, ki temelji na dogovorjenih mejah. Le te nimajo enoznačne povezave s strukturo in teksturo CP med vezanjem, kot kaže primerjava z rezultati UZ metode.

Preglednica 9: Primerjava metod

SESTAVA MEŠANICE	ZAČETEK VEZANJA [h]			KONEC VEZANJA [h]		
	VICAT	ULTRAZVOK	rel (%)	VICAT	ULTRAZVOK	rel (%)
CEM I	3,20	2,05	-35,9	3,83	3,5	-8,6
CEM III	3,83	2,50	-34,7	4,75	4,6	-3,2
CEM III_SP2	5,50	3,40	-38,2	6,70	6,7	0,0
CEM I_pospešilo brizgani beton	2,42	0,80	-66,9	3,10	3,8	22,6
CEM I_aerant1	3,70	2,20	-40,5	4,25	5,4	27,1
CEM I_aerant2	3,50	2,50	-28,6	4,33	5,1	17,8

6.1.1 Komentar

UZ metoda bistveno izboljša natančnost določanja začetka in konca vezanja, poleg tega pa omogoča tudi analizo vrste drugih značilnih parametrov, s katerimi lahko uravnavamo lastnosti svežih betonskih mešanic.

7 ZAKLJUČEK

Zadostna zanesljivost dobljenih rezultatov pri večkratni ponovitvi preizkusov z UZ metodo je že bila dokazana [1].

Pri preiskavah različnih sklopov CP (v vsakem sklopu smo analizirali vpliv druge vrste kemijskega dodatka) smo dobili logične rezultate, ki so v skladu z rezultati vpliva posameznega kemijskega dodatka na potek vezanja cementa standardnih metod preiskav. Poleg zanimivih primerjav med časi začetkov in koncev vezanja smo z analizo pridobili množico drugih parametrov, s katerimi lahko natančneje analiziramo vpliv posameznega kemijskega dodatka, vedenje pa učinkovito uporabimo v praksi.

Pri primerjavi UZ metode s standardno Vicatovo metodo smo ugotovili, da je UZ metoda precej bolj zanesljiva. Časi koncev vezanja so bili podobni, časi začetkov vezanja pa so bistveno odstopali, tudi do 60%. To je posledica dejstva, da je Vicatova metoda empirična metoda, ki temelji na dogovorjenih mejah za začetek in konec vezanja, povezanih z uporom, ki jo CP nudi prodiranju standardne igle. Velik vpliv ima tudi izključitev človeškega faktorja, saj pri UZ metodi programska oprema na povezanem računalniku avtomatično beleži rezultate.

UZ metoda torej bistveno izboljša natančnost določanja začetka in konca vezanja CP. Poleg tega pa omogoča zanesljivo in natančno analizo značilnih parametrov v procesu vezanja in strjevanja CP.

VIRI

- [1] 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.
- [2] SIST EN 197-1:2011. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente
- [3] TKK. 2015. <http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol>. (Pridobljeno 22. 9. 2015.)
- [4] Krauss, M., Hairiri, K. 2006. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation, *Cem. Concr. Compos.* 28, 4: 299–306.
- [5] Ye, G. 2003. Experimental study and numerical simulation of the development of microstructure and permeability of cementitious materials. PhD Thesis. Delft, Technische Universiteit Delft. (Delft University Press): 206 str.
- [6] Ye, G., Lura, P., Van Breugel, K., Fraaij, A.L.A. 2004. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cem. Concr. Compos.* 26, 5: 491–497.
- [7] Grosse, C.U., Reinhardt, H.W. 2000. Ultrasound Technique for Quality Control of Cementitious Materials : proceedings of the 15th Conference on Nondestructive Testing in Rome, Italy, 15-21 October 2000.
- [8] Robeyst, N., Grosse, C.U., De Belie, N. 2001. Relating ultrasonic measurements on fresh concrete with mineral additions to the microstructure development simulated by CemHyd3D, *Cem. Concr. Compos.* 33, 6: 680–693.
- [9] SIST EN 196-3:2005. Metode preskušanja cementa – 3.del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti.
- [10] 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.

- [11] Hribar, M. 2014. Uporaba ultrazvoka za analizo vpliva naknadnega mehanskega poseganja v strukturo betona. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (samozaložba M. Hribar): 56 str.

Bregar, R. 2015. Uporaba UZ metode ... v procesu vezanja cementne paste.
Dipl. nal. Ljubljana, UL FGG, Univerzitetni študijski program I. stopnje Gradbeništvo.
