

# Reologija kot orodje za obvladovanje lastnosti betonov v svežem stanju

Dr. **Andraž Hočevar**

*IGMAT d.d.*

Izr.prof.dr. **Violeta Bokan Bosiljkov**

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo*

---

## **Povzetek**

*V članku analiziramo vpliv spreminjanja izbranih sestavin mešanice betona na njegove reološke lastnosti v svežem stanju. Za analizo smo uporabili rezultate meritev, opravljenih z reometrom ConTec Viscometrom 5. V analizo smo vključili tudi rezultate preiskave s posedom, s katero ocenimo obdelavnost svežega betona. Rezultati so prikazani na dva načina. Prvič v obliki reografa, ki prikazuje relacijo med strižno napetostjo na meji tečenja in plastično viskoznostjo v primeru spreminjanja določene sestavine. Tako lahko na enem diagramu prikažemo spreminjanje obeh reoloških parametrov zaradi izbranih sprememb v sestavi betonske mešanice. Drugič v obliki sovisnosti med strižno napetostjo na meji tečenja in obdelavnostjo pri spreminjanju izbrane sestavine.*

## **Abstract**

*The paper analyses the influence of concrete mixtures constituents' change on rheological properties of concrete in fresh state. For the analysis we used the results of measurements, obtained by a rheometer ConTec Viscometer 5. The analysis included results from slump tests with which we estimated the workability of fresh concrete. These results are shown in two different ways. The first is in the form of a rheograph, which shows the relation between yield shear stress and plastic viscosity in case of constituent's variation. In this way we can demonstrate the variation of both rheological parameters due to selected changes of concrete mixture on a single diagram. The second is then in the form of the dependence between yield shear stress and workability in case of constituent variation.*

## 1 Uvod

Reološke lastnosti svežega betona vplivajo na njegovo vgradljivost in sposobnost zgoščevanja [1]. Že običajni beton, sestavljen le iz cementa, vode in agregata, je kompleksna suspenzija delcev: delci grobega agregata so razpršeni v malti, malta ima delce drobnega agregata razpršene v pasti, pasta pa cementne in ostale praškaste delce razpršene v vodi. Zadnja leta se srečujemo z vključevanjem večjih količin mineralnih dodatkov, sekundarnih surovin in/ali različnih kemijskih dodatkov v betone, kar sestavo betona še dodatno zaplete. Pri tovrstnih sestavah smo pogosto soočeni z omejitvami standardnih metod preiskav za oceno reoloških lastnosti betona v svežem stanju. Rešitev problema je praviloma izbira kombinacije različnih metod preiskav obdelavnosti svežega betona, kar pa bistveno poveča tako količino betona kot potreben čas za preiskave. Zato vidimo pri obvladovanju sestav tovrstnih mešanic velik potencial v preiskavah z reometrom, s katerim izmerimo reološke lastnosti sveže mešanice.

Merimo lahko:

- ▶ statično strižno napetost na meji tečenja svežega betona, ki si jo lahko predstavljamo kot minimalno potrebno napetost, da sprožimo tečenje mirujočega betona,
- ▶ dinamično strižno napetost na meji tečenja svežega betona si lahko predstavljamo kot napetost, ki je potrebna, da beton teče. Dinamična strižna napetost na meji tečenja je manjša od statične strižne napetosti na meji tečenja svežega betona,
- ▶ plastično viskoznost betona, ki predstavlja upor spremembi hitrosti striženja. Iz meritev upora, ki ga nudi svež beton pri različnih hitrostih vrtenja lopatic dobimo premico, katere naklon je plastična viskoznost betona.

Na podlagi meritev analiziramo posamezne parametre, ki lahko vplivajo na lastnosti svežega betona, kot so vnesene zračne pore, vrsta in količina finih delcev (cementa in

mineralnih dodatkov), vrsta, količina in/ali kombinacija različnih kemijskih dodatkov, zrnastostna sestava ter vrsta agregata, temperatura in podobno. Pri posamezni betonski mešanici se dobljeni reološki parametri lahko povežejo z rezultati standardiziranih preskusov obdelavnosti svežega betona in tako omogočajo učinkovito preverjanje doseganja zahtevanih lastnosti svežega betona na terenu tudi v primerih, ko reometra na terenu ni možno uporabiti.

Najpreprostejše obnašanje tekočine je Newtonska tekočina, ki jo lahko opišemo z razmerjem med strižno napetostjo ( $\tau$ ) in strižno hitrostjo ( $\dot{\gamma}$ ) [3]. Strižna hitrost je pravzaprav hitrost oz. stopnja deformiranja materiala [1]. Glavna lastnost take tekočine je, da se pojavi tok tekočine tudi pri napetostih skoraj enakih nič. Razmerje med omenjenima parametroma imenujemo plastična viskoznost ( $\mu$ ) materiala [3]. Že površno opazovanje betona nam pove, da beton ni Newtonska tekočina (beton stoji na kupu in ne odteče), saj potrebuje vsaj minimalno napetost, da steče. Tej napetosti pravimo napetost na meji tečenja ( $\tau_0$ ). Beton je torej ne-newtonska tekočina. Za njegov opis tečenja upoštevamo praviloma Binghamov model tekočine, ki dovolj dobro opiše tečenje večine svežih betonov. Binghamov model torej upošteva napetost na meji tečenja ( $\tau_0$ ) in ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega betona ( $\tau$ ) in strižno hitrostjo ( $\dot{\gamma}$ ), ki sta povezani s koeficientom viskoznosti  $\mu$ . Model opišemo z enačbo [3]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Obnašanje materiala opisujeta torej dve konstanti,  $\tau_0$  in  $\mu$ , ki ju določimo s pomočjo reometra. V okviru preiskav predstavljenih v članku, smo reološka parametra betonov določali z reometrom ConTec Viscometer 5.

## 2 Sestave betonov

Sestave betonov, katerih reološke lastnosti smo določali v okviru preiskav, so prikazane v Preglednici 1.

Preglednica 1: Sestava mešanic običajnega betona.

SESTAVINE**	MEŠANICE OBIČAJNIH BETONOV								
	CR1	CR1A	CR1B	CR1C	CL1	CL1A	CL1B	CL1C	
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	-	400	400	400	400	
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	400	400	400	400	-	-	-	-	
V/C <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
Voda (kg)	212	212	212	212	212	212	212	212	
SP1 (%)	-	0,10	0,20	0,30	-	0,10	0,20	0,30	
	CRA1A*	CRA1B*	CRA1C*	CG1A*	CG1B*	CG1C*	CV1A*	CV1B*	CV1C*
CEM I 42,5 R (kg)	-	-	-	400	400	400	400	400	400
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg)	400	400	400	-	-	-	-	-	-
V/C <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,62	0,62	0,62	0,53	0,56	0,59
Voda (kg)	212	212	212	259	259	259	224	236	247
SP1 (%)	0,10	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-
AE (%)	0,04	0,06	0,05	-	-	-	-	-	-
ST1 (%)	-	-	-	0,10	0,15	0,20	-	-	-
	CZ1A	CZ1B	CZ1C	CM1A	CM1B	CM1C	CT1A	CT1B	CT1C
Zamenjava cementa (%)	20	40	60	5	10	2,5	10	20	5
CEM I 42,5 R (kg)	320	240	160	380	360	390	360	320	380
V/V <sub>ef</sub>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Voda (kg)	212	212	212	212	212	212	212	212	212
SP1 (%)	0,20	0,20	0,20	0,30	0,30	0,30	0,50	0,50	0,50
Tuf (kg)	-	-	-	-	-	-	32	64	16
Mikro silika (kg)	-	-	-	14,50	29,00	7,25	-	-	-
Žlindra (kg)	76	152	228	-	-	-	-	-	-

\* prostornina betonske mešanice je večja od 1 m<sup>3</sup>.

\*\* količina agregata je podana v odstavku pred preglednico in je v vsaki mešanici enaka, in sicer 1735 kg.

### 3 Vpliv sestavin na reološke lastnosti betona

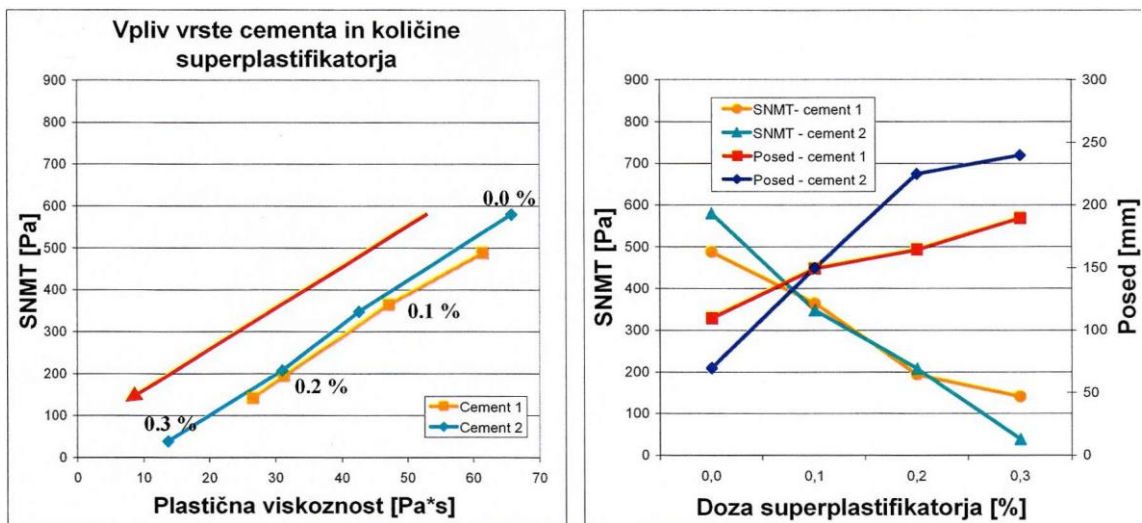
#### 3.1 Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja

Analizo smo opravili na dveh skupinah betonskih mešanic, CR1, CR1A, CR1B, CR1C in CL1, CL1A, CL1B, CL1C (Slika 1; SNMT – okrajšava za strižna napetost na meji tečenja). Sestava betonskih mešanic v obeh skupinah je bila povsem enaka, razlika je bila le v vrsti cementa. V skupini CR smo upora

bili cement CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R (CEM 2), v skupini CL pa cement CEM I 42,5 R (CEM 1). Opazimo lahko, da je imel beton s cementom 1 boljšo obdelavnost in nižjo strižno napetost na meji tečenja, ko v mešanici ni bilo prisotnega superplastifikatorja. Tovrstno obnašanje je v skladu s pričakovanji, saj je bila specifična površina cementa 1 manjša od specifične površine cementa 2. Pri bolj grobo mletih cementih namreč pričakujemo nižjo strižno napetost na meji tečenja in večji posed. Z dodajanjem superplastifikatorja in večanjem njegove količine pa postane bolj obdelaven beton s cementom 2, ker je učinek superplastifikatorja večji na cementu 2. Pri

največjem deležu superplastifikatorja (0,3%) doseže beton s cementom 2 tudi bistveno

nižjo strižno napetost na meji tečenja in plastično viskoznost kot beton s cementom 1.

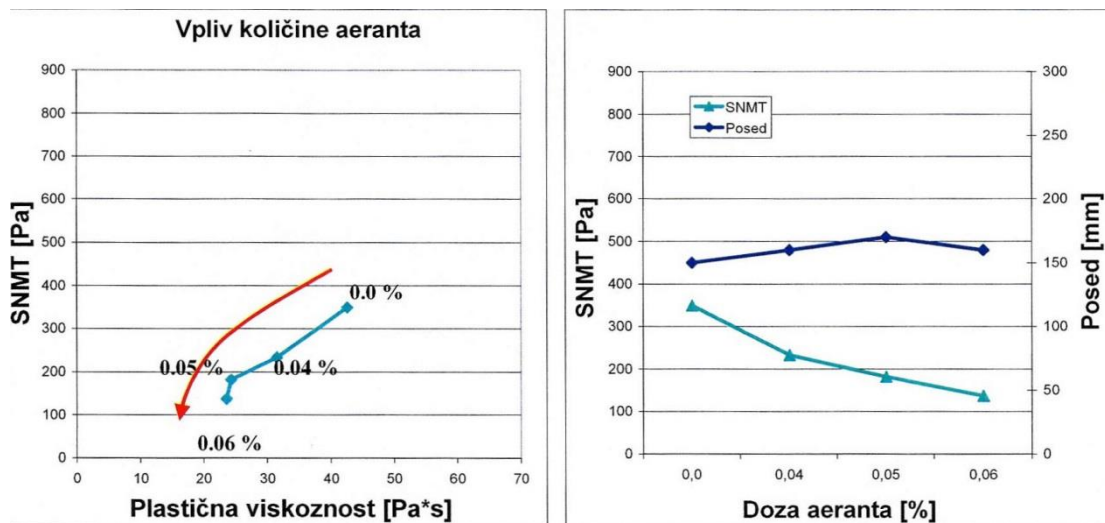


Slika 1: Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti betona.

Dodatek superplastifikatorja in večanje njegovega deleža bistveno vpliva na oba reološka parametra – bistveno se znižata tako strižna napetost na meji tečenja kot plastična viskoznost. To ni v skladu z rezultati analiz

drugih raziskovalcev [1], iz katerih sledi, da superplastifikator bistveno vpliva na strižno napetost na meji tečenja, plastična viskoznost pa se pomembno ne spremeni.

### 3.2 Vpliv količine aeranta



Slika 2: Vpliv količine aeranta na reološke lastnosti betona.

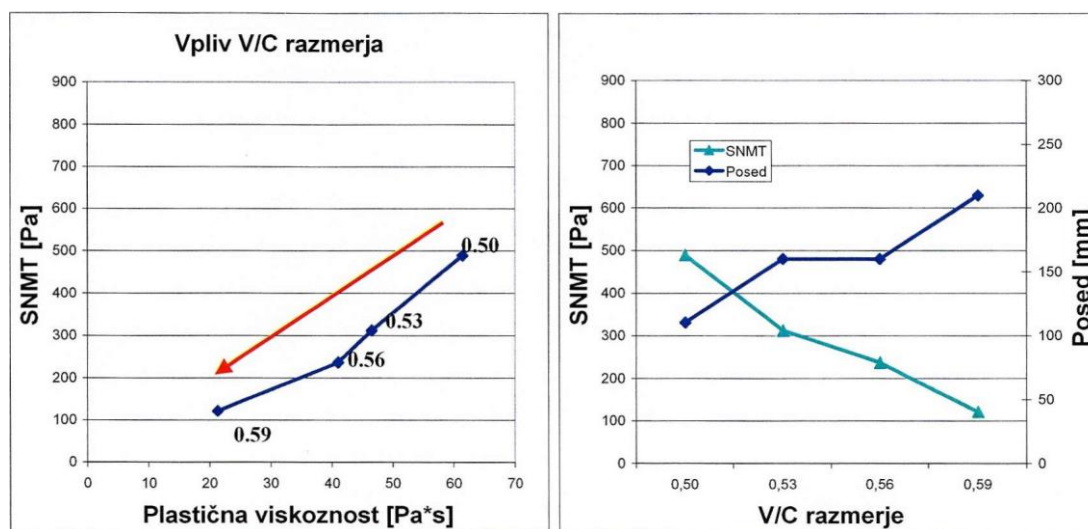
Vpliv količine aeranta smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CRA1A, CRA1B in CRA1C (Slika 2). Izhodiščna mešanica brez aeranta je bila mešanica z oznako CR1A. Dodatek aeranta in posledično oblikovanje zračnih mehurčkov je imelo vpliv tako na strižno napetost na meji tečenja kot na plastično viskoznost, vendar je učinek do deleža

aeranta enakega 0,05% nekoliko večji v primeru plastične viskoznosti (Slika 2). Tako obnašanje je značilno za betone z veliko količino finih delcev [1]. V našem primeru gre za betone z veliko količino finih delcev, saj je že delež fine frakcije velik (22% frakcije 0/2 in 33% frakcije 0/4), poleg tega pa fina frakcija vsebuje velik delež praškastih delcev (14%

frakcija 0/2 in 13% frakcija 0/4). S povečanjem količine aeranta z 0,05% na 0,06% pa se plastična viskoznost le zanemarljivo zmanjša (vsebnost zraka je pri teh dveh dozacijah enaka 5,6 % in 5,9 %, pri mešanici z 0,04 % aeranta pa je količina zraka enaka 4,1 %), enako kot pri predhodnem povečanju količine aeranta (z 0,04 % na 0,05 %) pa se zmanjša strižna napetost na meji tečenja. Tudi ta pojav je povsem pričakovan, saj se pri vsebnostih zraka v betonu, večjih od 5 %, spreminja le še  $\tau_0$  [3]. Z večanjem deleža aeranta do 0,05 % se večja tudi posed betona (Slika 2), kar je v skladu s pričakovanji. Povečanje deleža

aeranta z 0,05 % na 0,06 % pa na obdelavnost betona, izmerjeno s posedom, ne vpliva več, saj ostane posed skoraj nespremenjen. V tem primeru je torej obnašanje pri posedu podobno tistemu, ki smo ga opazili pri plastični viskoznosti. Pričakovali bi, da se pri pomanjšanju vrednosti parametra  $\tau_0$  poveča vrednost poseda. Temu v primeru betona z aerantom ni tako, saj zračni mehurčki, povzročeni s strani aeranta, nudijo dodatno notranjo oporo betonu. Posledično se ta ne posede toliko, kot bi lahko sklepali na podlagi reoloških parametrov.

### 3.3 Vpliv vodocementnega razmerja

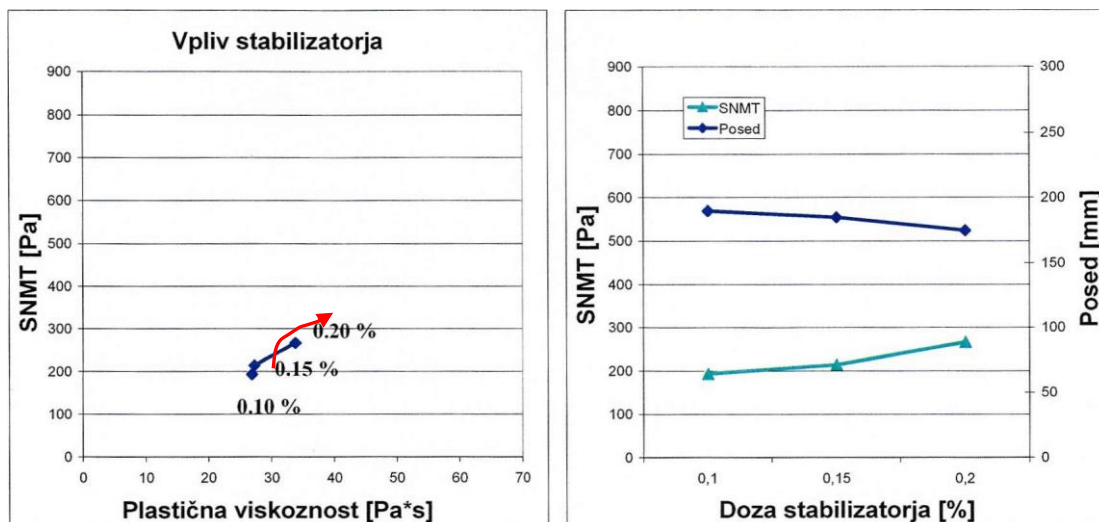


Slika 3: Vpliv vodocementnega razmerja na reološke lastnosti betona.

Vpliv vodocementnega razmerja smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CR1, CV1A, CV1B in CV1C. Količina cementa v mešanicah je bila konstantna, povečevali pa smo vsebnost vode. V skladu s pričakovanji sta se z večanjem količine vode in s tem vodocementnega razmerja manjšala oba reološka parametra,  $\tau_0$  in  $\mu$  (Slika 3), in to bistveno. Sovisnost med  $\tau_0$  in  $\mu$  na reografu se približuje izhodišču koordinatnega sistema reografa, ko se vodocementno razmerje postopoma večja z 0,5 na 0,59. Tudi posed se z

večanjem deleža vode v splošnem večja, kar je vsekakor v skladu s pričakovanji [1]. Bolj zanimiva je ugotovitev, da se s povečanjem vodocementnega razmerja z 0,53 na 0,56 posed ni spremenil, čeprav se je strižna napetost na meji tečenja zmanjšala s 310 na 240 Pa. Tovrstno obnašanje bi lahko bilo povezano z majhno spremembo plastične viskoznosti (zmanjšanje s 45 Pa·s na 40 Pa·s), ki je bistveno odstopala od zmanjšanja te karakteristike med vodocementnima razmerjema 0,50 in 0,53 (20 Pa·s) ali 0,56 in 0,59 (20 Pa·s).

### 3.4 Vpliv stabilizatorja

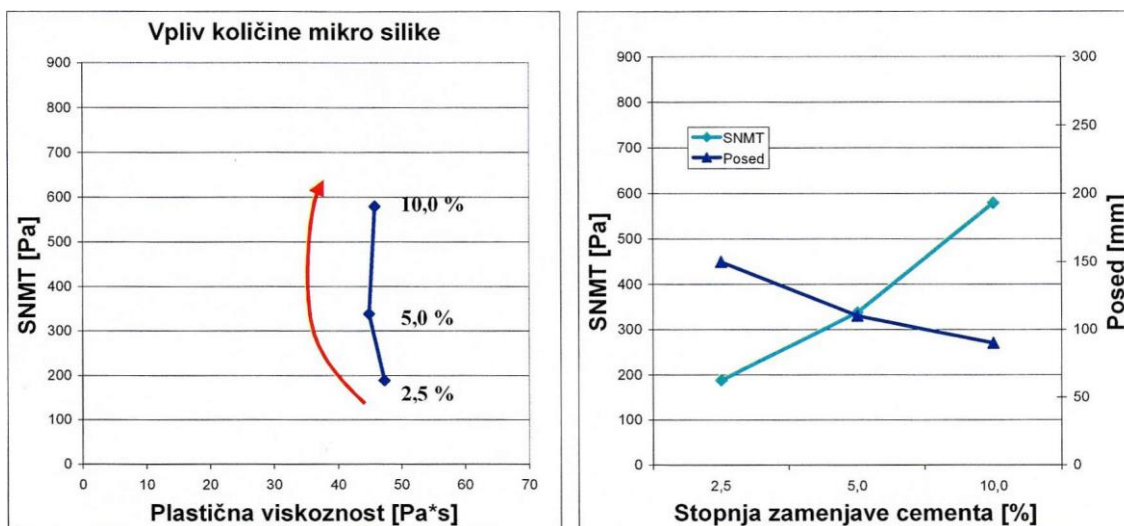


Slika 4: Vpliv količine stabilizatorja na reološke lastnosti betona.

Vpliv stabilizatorja z oznako ST1 smo ugotavljali na skupini betonov z oznakami CG1A, CG1B in CG1C. Rezultati preiskav so prikazani na Sliki 4. Kot je razvidno z rezultatom na Sliki 4, je uporabljen stabilizator najbolj vplival na plastično viskoznost, ki pa jo je povečal za okrog 10 Pa\*s šele pri povečanju deleža z 0,15 na 0,20%. Ponavadi je razlog,

zakaj betonski mešanici dodamo stabilizator, zmanjšanje mobilnosti vode in s tem povečanje odpornosti betona proti segregaciji. Z zmanjšanjem mobilnosti vode pa se seveda poveča viskoznost. Parameter  $\tau_0$  se ni bistveno povečal, vrednost poseda pa je malenkostno padla, kar je pričakovano, saj sta  $\tau_0$  in posed povezana na tak način.

### 3.5 Vpliv zamenjave cementa z mikro siliko



Slika 5: Vpliv stopnje zamenjave cementa z mikro siliko na reološke lastnosti betona.

Vpliv zamenjave dela cementa CEM I 42.5 R z mikro siliko smo ugotavljali na skupini betonov CM1A, CM1B in CM1C. Referenčna mešanica brez mikro silike je CL1C. Mikro silika v našem primeru ni zmanjšala viskoznosti betona pri manjših stopnjah

zamenjave, kot to poroča [1], ampak jo je povečala s 25 Pa\*s pri CL1C na 45 Pa\*s pri CM1C (2,5% zamenjava). To lahko razložimo tudi s časovnim zamikom med meritvami na referenčni mešanici in ostalimi mešanici. V tem času so se lahko zamenjale nekate-

re karakteristike sestavin betona, npr. finega agregata, cementa itd., ki bi lahko vplivale na lastnosti sveže mešanice. Z nadaljnjim večanjem deleža zamenjave cementa z mikro siliko, v območju zamenjave med 2,5% in 10%, ki smo ga analizirali, ni bilo spremembe v plastični viskoznosti betona. Z večanjem deleža zamenjave cementa z mikro siliko pa se je večala strižna napetost na meji tečenja, pri 2,5% zamenjavi le za spoznanje (s 140 na 190 Pa), z večanjem deleža zamenjave pa izrazito (340 Pa pri 5% in 580 Pa pri 10% zamenjavi). Ker je mikro silika velik porabnik vode v mešanici, je naraščanje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja z naraščanjem deleža mikro silike logično. Po drugi strani pa kroglasta oblika delcev mikro silike očitno kompenzira povečanje viskoznosti zaradi porabe vode, a le do neke stopnje zamenjave cementa z mikro siliko, ko poraba vode zaradi dodajanja mikro silike postane prevelika.

## 4 Sklep

V prispevku smo prikazali, kako lahko z reografii natančno spremljamo vpliv spreminjanja vrste ali količine posamezne sestavine

betona na reološke lastnosti mešanice v svežem stanju. To pomeni, da lahko s pomočjo reografov izberemo sestavo mešanice z zahtevanimi reološkimi lastnostmi. V prikazanih primerih smo praviloma spreminjali le en parameter sestave. Vendar bi tudi v primeru bolj zapletenih sestav betona s pomočjo reoloških meritev prišli do reografov, s pomočjo katerih bi izbrali sestavo, ki zagotovo izpolnjuje postavljene zahteve v svežem stanju.

## Literatura

- [1] Wallevik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.
- [2] Bartos, P.J.M., Sonebi, M., Tamimi, A.K. 2002. Workability and rheology of fresh concrete: Compendium of tests. Report of RILEM technical committee 145-WSM Workability of special concrete mixes, Cachan, RILEM publications S.A.R.L.: 152 str.
- [3] Tattersall, G. H., Banfill, P. 1983. The rheology of fresh concrete. Boston, London, Melbourne, Pitman Advanced Publishing Program: 368 str.
- [4] ICAR Rheometer manual. 2007. Evanston, IL, Germann instruments, Inc.: 23 str.