

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



**VISOKOŠOLSKI  
STROKOVNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
SMER OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**GORAN ŠNEPERGER**

**Ocena stabilnosti svežega samozgoščevalnega betona z  
metodo električne prevodnosti**

Diplomska naloga št.: **444**

**Assessment of stability of fresh self-compacting concrete  
with electrical conductivity method**

Graduation thesis No.: **444**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednik komisije:**

doc.dr. Tomo Cerovšek

**Somentor:**

izr. prof. dr. Zvonko Jagličić

Ljubljana, 2011

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani Goran Šneperger izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: Ocena stabilnosti svežega samozgoščevalnega betona z metodo električne prevodnosti.

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

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

Ljubljana, 15.11.2011

Goran Šneperger

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>691.32(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Goran Šneperger</b>
<b>Mentorica:</b>	<b>izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov</b>
<b>Somentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Zvonko Jagličič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Ocena stabilnosti svežega samozgoščevalnega betona z metodo električne prevodnosti</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Dipl. nal. - VSŠ</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>67 str., 8 pregl., 23 graf., 28 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>električna prevodnost, samozgoščevalni beton, segregacija, vezanje betona, ocena stabilnosti, homogenost, tlačna trdnost</b>

### **Izvleček**

V diplomski nalogi smo poskušali ugotoviti obnašanje samozgoščevalnih betonov med pripravo, vgradnjo v kalupe in med vezanjem v kalupih. Samozgoščevalni betoni so betoni, pri katerih je treba biti še posebej pozoren pri njihovi pripravi in vgradnji, saj lahko hitro pride do nestabilnosti, ki se kaže v segregaciji. Zato smo spremljali njihovo obnašanje v posebej pripravljenih kalupih, na katerih so bili pritrjeni štiri pari elektrod v štirih različnih višinah kalupa. Z metodo električne prevodnosti smo preverjali stabilnost dveh različnih samozgoščevalnih betonskih mešanic z enakim vodocementnim razmerjem. Prva mešanica je vsebovala cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, drobljen apnenčev agregat in apnenčevo moko, druga mešanica pa cement CEM II/A-S 42,5R, rečni prod in apnenčevo moko. Pri vsaki izmed mešanic smo pripravili po šest preskušancev. Tri preskušance vsake izmed mešanic smo v kalupe vgradili homogeno, tri preskušance pa smo namerno z vibrirali z vibracijsko iglo, kar naj bi povzročilo segregacijo in s tem različno prevodnost na različnih višinah vzorcev v kalupu. Na koncu smo strjene vzorce prerezali po višini kalupa tako, da smo lahko opravili še vizualno oceno prerezanih vzorcev in jih primerjali z rezultati, ki smo jih dobili pri oceni stabilnosti z metodo električne prevodnosti. Dodatno smo opravili še preiskave razleza s posedom na svežih betonskih mešanicah, določili začetek in konec vezanja med vezanjem betonskih mešanic ter preskusili tlačno trdnost strjenega betona.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 691.32(043.2)  
**Author:** Goran Šneperger  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.  
**Co-supervisor:** Assoc. Prof. Zvonko Jagličić, Ph. D.  
**Title:** Assessment of stability of fresh self-compacting concrete with electrical conductivity method  
**Document type:** Graduation Thesis – Higher professional studies  
**Scope and tools:** 67 p., 8 tab., 23 graph., 28 fig.  
**Keywords:** electrical conductivity, self-compacting concrete, segregation, concrete mixtures setting, estimation of stability, homogeneity, compressive strength

**Abstract**

In diploma work we were trying to establish the behaviour of self-compacting concrete during mixing, casting and during setting of the concrete in moulds. Self-compacting concrete mixtures must be handled extra carefully during mixing and casting otherwise instabilities might easily occur, which is reflected in segregation. Therefore, in framework of experimental work we put four pairs of electrodes at four different levels of specially prepared moulds to monitor the behaviour of samples. Stability of two different mixtures with the same water-to-cement ratio was being monitored with electrical conductivity method. First mixture was composed from cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, limestone filler and crushed limestone assembled from four different fractions, while the second mixture was composed of cement CEM II/A-S 42,5R, limestone filler and natural river gravel assembled from three fractions. For each concrete mixture six specimens were prepared. Three of them were cast in the moulds homogenously and three where consolidated with a help of internal vibrator in order to assure segregation and different electrical conductivity at different levels of the mould. At the end we cut the concrete samples to check them visually and make the comparison to the results, gained by electrical conductivity method. Additionally to this test, we carried out also slump-flow test on fresh concrete mixtures, we determined initial and final setting times during concrete mixtures' setting, as well as we tested compressive strength of hardened concrete mixtures.

## **ZAHVALA**

Iskreno se zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorju izr. prof. dr. Zvonku Jagličiču za vodenje in strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi tehničnemu sodelavcu Francitu Čeponu za pomoč pri preiskavah v laboratoriju. Prav tako, pa se še posebej zahvaljujem svoji družini za spodbudne besede in podporo skozi celotni študij.

**KAZALO:**

1 UVOD .....	1
2 MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV .....	3
2.1 Cement .....	3
2.1.1 Proizvodnja cementa .....	3
2.1.2 Vrste cementov .....	5
2.1.3 Mehanske zahteve .....	7
2.1.4 Vežanje in strjevanje cementa .....	7
2.2 Voda .....	8
2.3 Agregat .....	9
2.4 Praškasti materiali .....	10
2.5 Kemijski dodatki betonu .....	11
2.6 Plastifikatorji in superplastifikatorji .....	12
2.7 Aeranti .....	13
2.8 Pospeševalci vežanja in strjevanja .....	14
3 LASTNOSTI BETONA .....	15
3.1 LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA .....	15
3.1.1 Struktura betona .....	15
3.1.2 Reologija samozgoščevalnega betona .....	15
3.1.3 Sposobnost zapolnjevanja .....	17
3.1.4 Segregacija (stabilnost) .....	17
3.1.5. Sposobnost prehajanja .....	18
3.1.6 Priprava betona .....	19
3.1.7 Konsistenca .....	19
3.1.8 Izcejanje vode .....	20
3.1.9 Zgoščevanje ali konsolidacija .....	21
3.2 LASTNOSTI STRJENEGA BETONA .....	22
3.2.1 Trdnost betona .....	22
3.2.2 Tehnološke lastnosti .....	22

4. METODE PREVERJANJA BETONA.....	24
4.1 METODE PREVERJANJA SVEŽE BETONSKE MEŠANICE .....	24
4.1.1 Metoda z razlezom.....	24
4.1.3 VE-BE metoda .....	27
4.1.4 Določanje časa vezanja betona .....	27
4.2 METODE PREVREJANJA STRJENEGA BETONA.....	28
4.2.1 Priprava in nega vzorcev.....	29
4.2.2 Tlačna trdnost strjenega betona .....	29
6. LASTNE PREISKAVE.....	33
6.1 UVOD .....	33
6.2 MATERIALI UPORABLJENI PRI PREISKAVI.....	34
6.2.1 Agregat .....	34
6.2.2 Voda .....	34
6.2.3 Cement.....	34
6.2.4 Superplastifikator .....	35
6.2.5 Polnilo – apnenčeva moka .....	35
6.3 PREISKAVE NA BETONIH.....	35
6.3.1 Priprava mešanice samozgoščevalnega betona .....	36
6.3.2 Metoda električne prevodnosti .....	38
6.3.3 Priprave potrebne opreme.....	39
6.3.4 Meritev električne prevodnosti.....	40
6.3.5 Meritve prevodnosti posameznih vzorcev.....	42
6.3.6 Tlačna trdnost strjenega betona .....	59

**KAZALO PREGLEDNIC:**

Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 .....	6
Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov [ MPa ] .....	7
Preglednica 3: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov .....	8
Preglednice 4: Razredi konsistence po SIST EN 206-1.....	20
Preglednica 5: Vzorci od 1-6, drobljeni apnenčev agregat.....	37
Preglednica 6: Vzorci od 7-12, naravni rečni prod .....	37
Preglednica 7: Razlez s posedom.....	37
Preglednica 8: Tlačna trdnost kock .....	60



## KAZALO GRAFIKONOV:

Grafikon 1: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	42
Grafikon 2: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	43
Grafikon 3: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	44
Grafikon 4: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	45
Grafikon 5: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	46
Grafikon 6: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	46
Grafikon 7: Električna prevodnost skozi beto v časovnem obdobju 500 min.....	47
Grafikon 8: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	48
Grafikon 9: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	50
Grafikon 10: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	50
Grafikon 11: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	51
Grafikon 12: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	52
Grafikon 13: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	52
Grafikon 14: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	53
Grafikon 15: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	54
Grafikon 16: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	55
Grafikon 17: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	55
Grafikon 18: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	56
Grafikon 19: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	57
Grafikon 20: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min.....	57
Grafikon 21: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min.....	58
Grafikon 22: Začetek in konec vezanja SCC1 samozgoščevalnega betona .....	63
Grafikon 23: Začetek in konec vezanja SCC7 samozgoščevalnega betona .....	63

**KAZALO SLIK:**

Slika 1: Izmenjevalec toplote.....	4
Slika 2: Mletje klinkerja.....	5
Slika 3: Rotacijska peč.....	5
Slika 4: Cementna pasta brez SP (levo).....	13
Slika 5: Cementna paste s SP (desno).....	13
Slika 6: Mešalec betona .....	19
Slika 7: Dve različni izvedbi vibratorja za beton.....	21
Slika 8: Prisekan stožec na razlezni mizi.....	24
Slika 9: Merjenje poseda betona .....	26
Slika 10: Določanje tlačne trdnosti betona v preši do porušitve .....	30
Slika 11: Opaž z vgrajenimi elektrodam .....	32
Slika 12: Priprava mešanice v mešalcu.....	36
Slika 13: Preverjanje razleza.....	38
Slika 14: Funkcijski generator .....	40
Slika 15: Meritve električne prevodnosti v laboratoriju .....	41
Slika 16: Vizualna ocena stabilnosti 1. vzorca.....	44
Slika 17: Vizualna ocena stabilnosti 2. vzorca.....	45
Slika 18: Vizualna ocena stabilnosti 3. vzorca.....	47
Slika 19: Vizualna ocena stabilnosti 4. vzorca.....	49
Slika 20: Vizualna ocena stabilnosti 5. vzorca.....	49
Slika 21: Vizualna ocena stabilnosti 6. vzorca.....	51
Slika 22: Vizualna ocena stabilnosti 7. vzorca.....	53
Slika 23: Vizualna ocena stabilnosti 8. vzorca.....	54
Slika 24: Vizualna ocena stabilnosti 9. vzorca.....	56
Slika 25: Vizualna ocena stabilnosti 10. vzorca.....	58
Slika 26: Vizualna ocena stabilnosti 11. vzorca.....	59
Slika 27: Preiskovanje tlačne trdnosti betona v preši - porušitev .....	61
Slika 29: Penetrometer z iglami.....	62

Slika 28: Merjenje vezanja z vtiskanjem.....	62
--	----

## 1 UVOD

Beton je najpomembnejši gradbeni material našega časa, saj ga na svetu v enem letu proizvedemo v povprečju en kubični meter na prebivalca na zemlji. Že v času rimskega imperija so iznašli material, ki je imel lastnosti, podobne današnjemu betonu. Rimski beton je bil izdelan iz vode, apna, peska, pucolana in/ali zdrobljene opeke. Dobro so poznali tudi škodljive primesi in posebne lastnosti različnih vrst peska. Med drugim so razvili tehnologijo vlivanja enovite mase v lesen opaž. Sodobni testi kažejo, da je imel takratni beton tolikšno tlačno trdnost kot določene sestave sodobnega betona, izdelanega iz portland cementa. Danes je osnovno vezivo v betonu cement. Najpogostejša vrsta cementa je portland cement. Prvi ga je patentiral angleški zidar Joseph Aspdin leta 1824 in ga začel tudi sam proizvajati. Vendar je moralo preteči še nekaj časa, da so v proizvodnji dosegli dovolj visoke temperature za proizvodnjo portland cementa, kot ga poznamo danes. Tega je šele leta 1845 odkril I.C. Janson, ki je pravi portland cement proizvedel iz mešanice krede (pet delov) in gline (dva dela), ki jo je žgal pri temperaturi 1400-1500 °C. Prve cementarne za proizvodnjo tovrstnega cementa so nastale leta 1850 v Franciji in nekaj let pozneje še v Nemčiji.

Beton v sodobni gradnji predstavlja osnovno in najbolj zastopano gradivo, ki ga je možno relativno preprosto proizvesti in vgraditi, je pa tudi poceni. Uporablja se pri vseh vrstah gradnje objektov, od nizkih do visokih zgradb in inženirskih objektov, ter tudi na območjih, kjer poleg statične obtežbe nastopajo še druge, izredne obtežbe (potres, veter ...).

V diplomski nalogi se bom osredotočil na preiskave samozgoščevalnega betona. Samozgoščevalni beton (SCC) je beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja sposoben popolnoma zapolniti opaž poljubne oblike, pri tem pa tesno oblitni nameščeno armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi pri tem segregiral. Torej je inovativen beton, ki pri vgrajevanju ne potrebuje vibracij za zapolnitev opaža in zgoščevanje strukture. Takšne posebne lastnosti svežega samozgoščevalnega betona omogoča uporaba ustreznih materialov, povečan delež praškastih delcev v mešanici in dodatek superplastifikatorjev nove generacije, praviloma na bazi polikarboksilatov (hiperplastifikatorjev). Izločitev zgoščevanja betona z vibriranjem bistveno poveča hitrost betoniranja, zmanjša ceno in s tem poveča produktivnost. Samozgoščevalni beton ima tako veliko sposobnost tečenja in deformiranja, da lahko teče skozi odprtine, zapolni poljuben opaž in se zgosti samo zaradi delovanja lastne teže. Takšne lastnosti betona so dosežene, če so izpolnjene zahteve glede obdelavnosti: odlična sposobnost zapolnjevanja, odpornost na segregacijo in odlična sposobnost prehajanja.

Za samozgoščevalni beton je značilno, da je bistveno bolj občutljiv na spremembe v sestavi mešanice in na nihanja lastnosti izhodiščnih materialov kot vibriran beton. Tako lahko že majhna odstopanja pri doziranju superplastifikatorja ali sestavi peska od zahtevanih vrednosti ter nenatančnosti pri preverjanju dejanske vlažnosti agregata povzročijo, da projektirane lastnosti sveže mešanice niso dosežene.

V praksi želimo zagotoviti, da gradbeni proizvodi in konstrukcijski elementi zagotavljajo zahtevano nosilnost in obstojnost ter s tem zahtevano življenjsko dobo. Zato je pomembno, da se sveža betonska mešanica, ki jo vgradimo, obnaša stabilno. Beton je stabilen, če je homogeno vgrajen v opaž in če med njegovim vezanjem v opažu ni prišlo do segregacije. Posledica segregacije so namreč nehomogene lastnosti strjenega betona in s tem nižja nosilnost ter hitrejše propadanje betona.

Naša naloga v laboratoriju je bila opazovati in spremljati, ali se je sveža betonska mešanica samozgoščevalnega betona obnašala stabilno ali ne in ali je med vezanjem in strjevanjem betona, ki smo ga predhodno vgradili v manjše opaže, prišlo do segregacije ali ne. Pri teh preizkusih smo si pomagali z metodo električne prevodnosti. To je metoda, pri kateri na podlagi izmeničnega električnega toka, ki ga spustimo skozi merjenec, in napetosti na merjencu določamo električno prevodnost betona. Metoda zaznava spremembe v koncentraciji ionov, ki so posledica vezanja cementa in prerazporejanja vode ter agregatnih zrn v svežem betonu.

## **2 MATERIALI ZA IZDELAVO SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV**

### **2.1 Cement**

Cement je poleg vode in peska najosnovnejša sestavina za izdelavo betonov. Je hidravlično vezivo, v katerem se, potem ko mu dodamo vodo, začne kemijski proces hidratacije. Med procesom hidratacije prehajajo klinkerski minerali v različne produkte hidratacije. Pri tem preide cementna pasta iz plastičnega v trdno agregatno stanje (konec vezanja cementa). Tako nastali cementni kamen še naprej pridobiva trdnost zaradi zgoščevanja strukture, ki je posledica napredujoče hidratacije cementa. Cementni kamen kot matrica povezuje drobna in groba zrna agregata v čvrsto visokoelastično snov, beton. Tako dobimo po želji oblikovan betonski element, ki ima potrebne tehnične karakteristike.

#### **2.1.1 Proizvodnja cementa**

Cement se proizvaja v štirih fazah: 1. proizvodnja surovin, 2. mletje surovinske moke, 3. žganje klinkerja, 4. mletje cementa.

Najosnovnejša sestavina so minerali, ki jih najdemo v laporju, apnencu in glini. Tem sestavinam se po mletju in opravljeni kemijski analizi doda še manjkajoče minerale. Najpogosteje se dodaja kremenčev pesek, žgano apno in piritni ogorki. Surovine se meljejo po mokrem ali suhem postopku. Produkt mletja je surovinska moka, ki se pri prehodu skozi izmenjevalce toplote (ciklone) segreva, nato pa žge v rotacijski peči, in sicer v treh intervalih. Prvi interval je do 1300 °C, drugi interval med 1300 °C in 1500 °C ter tretji interval, ko se produkt žganja ohlajuje. Končni produkt je zmes, ki jo imenujemo cementni klinker. To so okoli tri centimetre velike porozne sive granule, podobne pepelu (barva). Te ohladimo na sobno temperaturo in zmeljemo v fin prah s premerom 0,001 do 0,1 mm, ki ga imenujemo portland cement. Poleg portland cementnega klinkerja se med mletjem dodajo še različni dodatki, najpogosteje sadra, ki služi za reguliranje vezanja, žlindra, pucolan, apnenec in elektrofiltrski pepel.



Slika 1: Izmenjevalec toplote (Vir: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Cement>)

Lastnosti portland cementa so v največji meri odvisne od njegove sestave, to se pravi od prisotnosti posameznih mineralov, ki jih vsebuje cement:

- $C_3S$  (alolit) v deležu 45 – 60 % - najpomembnejši mineral, hidratizira hitro, pomembno prispeva k razvoju hidratacijske toplote, v veliki meri je odgovoren za začetek vezanja in zgodnjo trdnost.
- $C_2S$  (belit) 10 – 30 % - hidratizira počasi, njegov prispevek k trdnosti je pomemben pri starostih betona več kot sedem dni.
- $C_3A$  (celit) 4 – 12 % - je najbolj reaktiven mineral – najhitreje hidratizira in močno prispeva k toploti hidratacije; njegov prispevek k trdnosti je majhen; občutljiv je na sulfatno korozijo.
- $C_4AF$  (zelit) 10 – 20 % - hidratizira hitro, je odporen na sulfatno korozijo, neznatno prispeva k trdnosti.

Naj omenimo, da je sulfatna korozija ena najpogostejših in najmočnejših korozij na betonu. Vpliv sulfatov se kaže v nabrekanju in pokanju betona.



Slika 2: Mletje klinkerja (Vir: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Cement>)



Slika 3: Rotacijska peč (Vir: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Cement>)

### 2.1.2 Vrste cementov

V skladu z zakonom o gradbenih proizvodih in evropsko smernico o gradbenih proizvodih imamo v Sloveniji za proizvodnjo cementa harmoniziran standard EN 197-1, v Sloveniji prevzet kot SIST, ki obravnava običajne cemente. V skladu s tem standardom je cement silikatni material, ki ga uvrščamo med hidravlična veziva, ki imajo to lastnost, da se pri reakciji z vodo vežejo in strjujejo v končni produkt cementni kamen. Zaradi visoke stabilnosti,



trdnosti in odpornosti je najbolj razširjeno vezivo v gradbeništvu. Po standardu SIST EN 197-1 razvrstimo običajne cemente v pet različnih vrst, kot je to prikazano v preglednici 1.

Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1

Glavne vrste	Vrsta glavne sestavine	Oznaka proizvoda		Delež klinkerja / mineralnega dodatka (odstotek mase) <sup>1</sup>
CEM I	klinker	Portlandski cement	CEM I	95-100 / 0
CEM II	Klinker in mineralni dodatki: granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), EF pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L, LL), mešani mineralni dodatek (M)	Portlandski cement z dodatkom - - žindre - pucolana - EF pepela - žganega skrilavca - apnenca	CEM II/A-m <sub>i</sub> <sup>4</sup>	80-94 / 6-20
			CEM II/B-m <sub>i</sub> <sup>4</sup>	65-79 / 21-35
		Portlandski mešani cement <sup>3</sup>	- mikrosilike	CEM II/A-D
CEM III	klinker, granulirana plavžna žindra (S)	Žlindrin cement	CEM III/A	35-64 / 36-65
			CEM III/B	20-34 / 66-80
			CEM III/C	5-19 / 81-95
CEM IV	klinker, mikrosilika (D) <sup>2</sup> , pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Pucolanski cement <sup>3</sup>	CEM IV/A	65-89 / 11-35
			CEM IV/B	45-64 / 36-55
CEM V	klinker, granulirana plavžna žindra (S), mikrosilika (D) <sup>2</sup> , pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Mešani cement <sup>3</sup>	CEM V/A	40-64 / 36-60 <sup>5</sup>
			CEM V/B	20-38 / 62-80 <sup>5</sup>

Manj pomembnih sestavin je za vse proizvode od 0 do 5%.

<sup>1</sup> Vrednosti v preglednici se nanašajo na vsoto glavnih in manj pomembnih sestavin.

<sup>2</sup> Delež mikrosilike je omejen na 10%.

<sup>3</sup> Pri portlandskih mešanih cementih CEM II/A-M in CEM II/B-M, pucolanskih cementih ter mešanih cementih morajo biti glavne sestavine, razen klinkerja, navedene v oznaki cementa (glej točko 7)

<sup>4</sup> Oznaka m<sub>i</sub> je oznaka uporabljenega mineralnega dodatka (S, P, Q, V, W, T, L, LL ali D) ali M (v primeru mešanega mineralnega dodatka)

<sup>5</sup> Pri mešanem cementu je en del mineralnega dodatka granulirana plavžna žindra (18-30% za A in 31-50% za B) en del pa so pucolanski materiali (18-30% za A in 31-50% za B).

### 2.1.3 Mehanske zahteve

Poleg zahtev o sestavinah standard SIST EN 197-1 določa tudi zahteve glede kemijske sestave in fizikalno mehanske lastnosti. Ločimo tri trdnostne razrede, ki določajo tlačno trdnost 28 dni starega cementa. To so trdnostni razredi 32,5, 42,5, in 52,5. Dodatno pa znotraj posameznega trdnostnega razreda ločimo cemente še glede na to, ali vežejo s pospešeno začetno hitrostjo, oznaka R (rapid), ali z normalno začetno hitrostjo, oznaka N (normal).

Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov [ MPa ]

Oznaka trdnosti	Zgodnja trdnost		Trdnost po 28 dneh	
	2 dni	7 dni	28 dni	
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10			
42,5 N	≥ 10		≥ 42,5	≥ 62,5
42,5 R	≥ 20			
52,5 N	≥ 20		≥ 52,5	-
52,5R	≥ 30			

### 2.1.4 Vežanje in strjevanje cementa

Kemijski proces, ki se začne takoj po tem, ko zmešamo cement in vodo in se nadaljuje še po vgradnji betona v opaže, imenujemo hidratacija. Mešanica vode in cementa kemijsko reagira in pri tem cementna pasta prehaja v cementni kamen. Gre za več vzporednih in zaporednih kemijskih reakcij cementnih mineralov z vodo. Kamni agregat je inertni material, polnilo, ki je pomemben za trdnost betona, ki pa v sami reakciji ne sodeluje. Spreminjanje agregatnega stanja cementne paste poteka dokaj hitro in traja nekaj ur. Ta proces se imenuje vežanje. Pridobivanje cementnega kamna na trdnosti pa traja dosti dlje, tudi več let. Proces imenujemo strjevanje cementa. Hidratacija cementa poteka v treh fazah: začetna faza (vežanje cementa), faza intenzivnega strjevanja cementa in faza stabilizacije silikatne strukture (trdnost cementa se s časom bistveno ne spremeni več). Hitrost hidratacije pa je odvisna od sestave in strukture klinkerja, količine in oblike kalcijevega sulfata, nege, prisotnosti kemijskih dodatkov in vodocementnega razmerja mešanice, ki naj bi bilo med 0,38 in 0,42 (v tem območju v/c razmerij hidratizira 80-90 % cementa). Če pa je to razmerje

večje, povzroči znižanje trdnosti betona, ker se v cementnem kamnu oblikujejo večje kapilarne pore. Na stopnjo hidratizacije vpliva tudi zrnavostna sestava oziroma finost mletja cementa. Cementi z drobnejšim zrnji popolneje hidratizirajo, omogočajo večjo stabilnost svežega betona in imajo višje trdnosti, po drugi strani pa razvijejo več hidratacijske toplote in se bolj krčijo, kar pomeni možnost nastanka razpok.

## 2.2 Voda

Čeprav zavzema praviloma samo okrog 17 odstotkov prostornine betonske mešanice, ima voda pomembno funkcijo v betonu. Voda se dodaja kot obvezna komponenta pri pripravi betonske mešanice, da zagotovi potrebno vgradljivost in obdelavnost. Takoj ko jo dodamo, se začne tudi kemijska reakcija s cementom (hidratacija), ki se nadaljuje v vezanju in strjevanju ter vpliva na končno trdnost betona. Poleg tega služi še za polivanje in nego betona. Vse vode praviloma vsebujejo minerale, ki bi lahko v večji količini onemogočali pravilno hidratacijo cementa. Pitna voda je primerna za pripravo betonske mešanice, vendar je treba preveriti, če ne vsebuje prevelike količine klora, ki bi lahko deloval agresivno na armaturo v betonu. Vse vode, ki so drugačnega izvora (vodotoki, podtalnica) in pa stoječe vode (jezera, vodnjaki) je treba pred uporabo preveriti, ali so primerne za pripravo betona, saj bi v nasprotnem primeru lahko negativno delovale na vezanje, strjevanje, njegovo obstojnost in korozijo armature. Analizo vode za izdelavo betona nam predpisuje standard SIST EN 1008, ki predpisuje mejne vrednosti škodljivih primesi, kot je prikazano v preglednici 3.

Paziti moramo, da vode ni premalo, saj potem ne hidratizira ves cement. Če pa je vode preveč, lahko pride do segregacije sveže betonske mešanice.

Preglednica 3: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov

LASTNOSTI VODE	ZAHTEVANE VREDNOSTI	
	ARMIRAN BETON	PREDNAPETI BETON
pH vrednost	4,5 – 9,5	4,5 – 9,5
Vsebnost kloridov	≤ 300 mg/l	≤ 100 mg/l
Vsebnost sulfatov	≤ 2700 mg/l	≤ 1000 mg/l
Vsebnost sulfidov	–	≤ 100 mg/l
Vsebnost nitratov	≤ 500 mg/l	≤ 500 mg/l
Vsebnost fosfatov	≤ 100 mg/l	≤ 100 mg/l

Potrebno količino vode v betonski mešanici izračunamo po formuli:

$$V = V_a + (V_p + \Delta V_p) + (V_k + \Delta V_k)$$

Kjer je:

$V_a$  – voda, ki jo vpije agregat

$V_p$  – voda, ki omoči površino agregata

$\Delta V_p$  – dodatna voda odvisna od oblike teksture in mineraloško petrografske sestave agregata

$V_k$  – voda potrebna za standardno konsistenco cementne paste

$\Delta V_k$  – dodatna voda za doseganje zahtevane konsistence betonske mešanice

### 2.3 Agregat

Agregat zavzema okoli 70 odstotkov prostornine v betonski mešanici in je tako po deležu najbolj zastopan sestavni del. Agregat ima v betonu več funkcij, ki se nanašajo na tehnične lastnosti, kot je trdnost, in tehnološke lastnosti, kot sta vgradljivost in kohezija. Agregat je manj podvržen vplivom okolice v primerjavi s cementnim kamnom, zato z njegovim pravilnim izborom prispevamo k znatnem izboljšanju obstojnosti betona, ki je izpostavljen atmosferskim, kemijskim, erozijskim in drugim vplivom. Agregat je tudi cenejši od drugih sestavin v betonu, zato ga je z ekonomičnega vidika smiselno dati čim več v mešanico. Za izdelavo samozgoščevalnih betonov uporabljamo tako naravno oblikovan agregat (prod) kot tudi umetno oblikovan agregat (drobljenec). Tako eden kot drugi pa imata prednosti in slabosti. Prednost proda so zaobljena zrna, kar omogoča boljše vgradljivost in obdelavnost betona. Je pa danes prod v Sloveniji dražji od drobljenega agregata. Prednost drobljenega agregata je torej nižja cena. Ker pa so njegova zrna nepravilnih oblik, je treba za doseganje ustrezne vgradljivosti dodati več vode kot pri produ. Ko ga vgradimo, se njegova zrna medsebojno bolje zaklinijo, kar ima za posledico večjo natezno trdnost. To pa je spet prednost drobljenega agregata.

Granulometrijska sestava je najpomembnejša lastnost agregata. S tem izrazom opišemo razmerje med različnimi velikosti zrn, razmerje med maksimalnim zrnom in najdrobnejšimi delci v mešanici. Ločimo drobnozrnat (zrna premera pod 4 mm) in grobozrnat (zrna premera nad 4 mm) agregat. Od velikosti zrn in njihove količine je odvisna kohezija, vgradljivost in kompaktnost sveže betonske mešanice, kot tudi vse ostale lastnosti strjenega betona:

trdnost, modul elastičnosti, segregacija, vodoneprepustnost, trajnost. Velikost največjega zrna agregata v mešanici ne sme presegati 25 odstotkov najmanjše dimenzije prereza betona. Pri samozgoščevalnih betonih je priporočena vrednost največjega zrna grobozrnatega agregata od 10 do 20 mm. Razlog, da se omejuje največje zrno, je v tem, da ne pride do blokiranja grobozrnatega agregata pri vgrajevanju betonske mešanice. Ustrezno granuliran agregat zapolni celoten prostor v betonski mešanici in preprečuje segregacijo. Votline med večjimi zrni pa zapolnijo manjša zrna. V betonih, ki vsebujejo superplastifikatorje, je dovoljena tudi večja količina praškastih delcev.

Posamezne frakcije agregata dobimo s sejanjem skozi sistem sit, kjer imamo sita z različno velikimi odprtinami. Med sejanjem se delci vzorca razvrstijo po različnih sitih glede na velikost zrna. Sita so razvrščena tako, da je sito z največjo odprtino na vrhu, proti dnu pa se premer odprtin na situ manjša. Tako dobimo različne frakcije agregata, ki jih pozneje kombiniramo in dobimo tako zrnovostno sestavo agregata, kot jo želimo imeti v betonski mešanici oziroma tako, kot jo zahtevajo predpisi. Standard SIST 1026:2008 določa, da mora biti granulometrijska sestava agregata za beton znotraj mejnih krivulj 1 in 5. Če ni, potem tak agregat ni ustrezen in ga je treba popraviti z dodajanjem manjkajočih frakcij agregata. Če pa se nahajamo v območju 3, pomeni, da ima agregat praviloma najbolj ugodno zrnovostno sestavo.

## 2.4 Praškasti materiali

Praškasti materiali so mineralni delci, ki imajo največje zrno manjše od 0,075 mm ali od 0,125 mm. Poleg cementa so to še mikrosilika, elektrofiltrski pepel in mleta granulirana plavžna žindra, ki spadajo med reaktivne praškaste materiale, ter inertni praškasti materiali, ki jih dobimo z mletjem apnenca, dolomita, kremenca, stekla. Med praškaste delce uvrščamo torej tudi kameno moko, ki jo dobimo z mletjem kamna ali z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata. Vsi ti drobni delci imajo nalogo, da dopolnjujejo pomanjkanje finih delcev, se pravi, da zapolnijo prostor med večjimi delci, s tem pa povečajo stabilnost sveže betonske mešanice in imajo vlogo maziva. Imajo veliko specifično površino, zato moramo dodati večjo količino vode zaradi lažje vgradljivosti, paziti pa moramo, da zaradi tega ne pride do segregacije. Poleg prostorninskega deleža praškastih delcev sta pomembna tudi njihova oblika in prostorninsko razmerje z vodo.

Metoda, s katero preverjamo vpliv različnih mineralnih polnil in njihovega deleža, je metoda s posedom.

## 2.5 Kemijski dodatki betonu

Kemijski dodatki betonu so kemijski proizvodi, ki se v majhnih količinah (praviloma do 5 odstotkov mase cementa) dodajo betonski mešanici pred ali med samim mešanjem z namenom izboljšati glavne lastnosti sveže betonske mešanice ali že strjenega betona. Kemijske dodatke, kakršne poznamo in uporabljamo danes, so začeli razvijati okoli leta 1930, z začetkom masovne uporabe betonov. Proizvajalci kemijskih dodatkov morajo navesti, za kateri tip dodatka gre in kako se dozira v odnosu na maso. Poznamo veliko materialov, ki vplivajo na lastnosti svežega in strjenega betona, ko pa uporabljamo kemijske dodatke, moramo poleg učinkovitosti upoštevati še negativne lastnosti tega dodatka, kot so korozija armature, škodljivost za zdravje, poleg tega še cenovna sprejemljivost in upoštevanje standardov. Obstajajo tudi kemijski dodatki, ki jih standardi ne obravnavajo, zato mora njihovo ustreznost dokazati proizvajalec s preizkusi.

Osnovne skupine kemijskih dodatkov so:

- **plastifikatorji in superplastifikatorji** (znižajo količino vode v mešanici brez vpliva na konsistenco ali zvečajo posed oz. razlez brez vpliva na delež vode)
- **kemijski dodatki za zadrževanje vode** (zmanjšajo izcejanje vode)
- **aeranti** (med mešanjem vnesejo v svež beton majhne enakomerno porazdeljene zračne mehurčke, ki po strditvi betona ostanejo v betonu in s tem povečajo zmrzlinško odpornost strjenega betona)
- **pospeševalci vezanja** (skrajšajo čas prehoda mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje - se pravi, da pospešijo hidratacijo cementa)
- **pospeševalci strjevanja** (povečajo hitrost razvoja začetnih trdnosti)
- **zavlačevalci vezanja** (zavirajo hidratacijo cementa)
- **gostila** (zmanjšujejo kapilarno vpijanje v strjeni beton se pravi da povečajo vodotesnost betona)
- **sredstva za kontrolo viskoznosti** (povečajo viskoznost betona)
- **dodatki za zimsko betoniranje** (za betoniranje ob nizkih temperaturah)

## 2.6 Plastifikatorji in superplastifikatorji

Za te dodatke lahko rečemo, da so najpomembnejša skupina kemijskih dodatkov za beton. Lahko jih uporabimo kot samostojne dodatke ali pa v kombinaciji z drugimi kemijskimi ali mineralnimi dodatki, uporabljamo jih lahko skozi celo leto. Po standardu SIST EN 934-2 (1) so kemijski dodatki snovi, ki jih dodajamo betonu med samim mešanjem in ne v večjih količinah kot 5 odstotkov mase cementa v mešanici. Z njimi dosežemo v svežem ali strjenem betonu lastnosti, ki jih sicer ne bi dosegli. Zgodovina plastifikatorjev se je začela 1930 v Ameriki. Naprej so uporabljali plastifikatorje na osnovi modificiranih lignin - sulfonatov. Superplastifikatorje so razvili okoli leta 1970 v Nemčiji in na Japonskem, in sicer na osnovi naftalen-formaldehidnih kondenzatov. Pozneje so razvili še superplastifikatorje na osnovi sulfoniranih melamin-formaldehidnih kondenzatov. Z letom 1990 pa se začne obdobje superplastifikatorjev nove generacije na osnovi modificiranih polikarboksilatov.

Vsi trije omenjeni dodatki (plastifikatorji, superplastifikatorji, superplastifikatorji nove generacije) so površinsko aktivne snovi, ki omogočajo zmanjševanje v/c razmerja. Vse tri skupine, ne glede na kemijsko sestavo, imajo podoben učinek na beton. To pomeni, da je njihova naloga zmanjševanje vodocementnega razmerja, omogočajo povečanje obdelavnosti pri določenem vodocementnem razmerju in omogočajo zmanjševanje količine cementa v betonu. Z zmanjševanjem vodocementnega razmerja povečamo tako trdnost betona in kot njegovo trajnost. Betoni, ki so brez dodatkov tipa plastifikator ali superplastifikator, imajo večje v/c razmerje, kar pomeni, da so bolj porozni in zato manj odporni na zunanje vplive. Razlika v učinkovitosti med plastifikatorji, superplastifikatorji in superplastifikatorji nove generacije je samo v tem, da se učinkovitost zmanjševanja zamesne vode povečuje od plastifikatorja preko superplastifikatorja do superplastifikatorja nove generacije. Plastifikatorji zmanjšajo potrebo po vodi za 5 – 10 odstotkov, superplastifikatorji za 5 – 25 odstotkov in plastifikatorji nove generacije za 5 – 40 odstotkov. Vsi ti dodatki pa imajo tudi slabosti. V zadnjem času se vse bolj uporabljajo lahko vgradljivi betoni, samozgoščevalni betoni in visokotrdni betoni, pri pripravi katerih se praviloma uporabljajo superplastifikatorji nove generacije, ker so najbolj zmogljivi in omogočajo daljši čas ustrezno obdelavnost betona. Učinkovitost kemijskega dodatka v betonu je odvisna od številnih parametrov: od količine in vrste cementa, sestave agregata, v/c razmerja, pomembno pa je tudi, kako pripravimo in vgradimo sam beton. Na vse to je treba biti pozoren, posebej še pri samozgoščevalnih betonih, kjer lahko že majhna sprememba v količinah materialov ali vlažnosti agregata pripelje do segregacije.



Slika 4: Cementna pasta brez SP (levo)

(Vir: [http://www.tkk.si/filelib/prakticni\\_nasveti/clanki/gr\\_12\\_2010\\_tkk.pdf](http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf))



Slika 5: Cementna paste s SP (desno)

(Vir: [http://www.tkk.si/filelib/prakticni\\_nasveti/clanki/gr\\_12\\_2010\\_tkk.pdf](http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf))

## 2.7 Aeranti

Aeranti so dodatki betonu, ki jih dodajamo z namenom, da v beton vnašamo zračne mehurčke velikosti okrog 0,3 mm, ki se enakomerno razporedijo po betonski mešanici. Njihova vloga v betonu je, da prekinejo mrežo finih kapilar in s tem ovirajo kapilarni dvig, hkrati pa delujejo kot rezervoarji, kamor med zmrzovanjem in s tem naraščajočimi pritiski »pobegne« voda, in kjer ta voda zmrzne, ne da bi izvajala pritiske v strukturi betona zaradi povečanja prostornine (voda-led). Tako se poveča zmrzljinska odpornost betona. Aeranti pa po drugi strani povečujejo poroznost betona, kar pa negativno vpliva na tlačno trdnost betona, zato je treba zmanjšati v/c razmerje. Aeranti se dozirajo v zelo majhnih količinah od 0,05 – 0,3 odstotke na maso cementa. Uporabljamo jih tako pri armiranih in nearmiranih



betonih, pri konstrukcijah iz lahkega betona, uporabljajo se tudi za betoniranje pod vodo. V nekaterih državah, kot je Francija, pa je celo predpisana njihova uporaba za nekatere vrste objektov, ki so izpostavljeni atmosferskim vplivom. Treba je imeti v mislih tudi, da je efekt aeranta v mešanicah, v katerih je prisotnih več različnih praškastih delcev (na primer pucolan, kamena moka ..) praviloma slabši, zato je treba dozirati večjo količino tega dodatka.

## **2.8 Pospeševalci vezanja in strjevanja**

Gre za kemijske dodatke, ki jih uporabljamo predvsem pri nizkih temperaturah. Pospeševalci pospešujejo hidratacijo cementa. Z njimi beton hitreje preide iz plastičnega v trdno agregatno stanje ter doseže določeno tlačno trdnost, kar pomeni da se lahko beton hitreje razopaži in nadalje obdeluje. Poleg betoniranja pri nizkih temperaturah se pospeševalec vezanja uporablja še na področjih, kjer je prisotna talna voda, zaradi hitrega tesnjenja in pa tudi pri delu v morski vodi. Obstaja več vrst različnih pospeševalcev, ki se med seboj razlikujejo po tem, ali betoniramo v zimskih razmerah ali želimo samo na hitro doseči trdno agregatno stanje in določeno trdnost. Dodaja se jih tudi pri izdelavi prefabrikatov (betonskih montažnih proizvodov). Uporabljamo jih lahko v kombinaciji z ostalimi dodatki, paziti pa moramo, da se držimo omejitev pri doziranju, še posebej, če dodatki vsebujejo kloride, ki lahko povzročijo korozijo armature. Pri prednapetih konstrukcijah pa uporaba pospeševalcev vezanja in strjevanja, ki vsebujejo kloride, ni dovoljena.

### **3 LASTNOSTI BETONA**

#### **3.1 LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA**

##### **3.1.1 Struktura betona**

Beton je kompozitni material. Njegovi osnovni sestavni deli so cement, kameni agregat in voda, poleg osnovnih sestavin se dodajajo še dodatki, ki uravnavajo proces vgradnje, strjevanja in lastnosti strjenega betona. Ko zmešamo sestavine, dobimo svežo betonsko mešanico. Delci, ki sestavljajo betonsko mešanico, se med seboj privlačijo, drobni delci močnejše, medtem ko se grobi delci manj. Ko zmešamo sestavine betona, se začnejo v betonu fizikalni in kemijski procesi, ki s časom spreminjajo lastnosti betona. Ko se ti procesi končajo dobimo »končno« strukturo strjenega betona. Strukturo betonske mešanice lahko pojmuje kot sistem, ki ga sestavljajo cementna pasta ali cementni kamen in agregat. Seveda pa osnovno komponento (matrico) predstavlja cementna pasta, ki jo dobimo z mešanjem cementa in vode, v mnogih primerih so sestavni del te paste še fino zmleti mineralni dodatki. Lastnosti cementne paste so odvisne od razmerja med vodo in cementom. S povečevanjem vode oziroma večanjem v/c razmerja se znižuje viskoznost cementne paste in povečuje njena sposobnost tečenja, zato je tako mešanico lažje vgrajevati. Vendar pa večje v/c razmerje pomeni večjo poroznost cementnega kamna in njegovo nižjo trdnost ter obstojnost. Zato se v betone mešajo dodatki (superplastifikatorji), ki znižujejo v/c razmerje in hkrati pripomorejo k boljši vgradljivosti, boljšim mehanskim lastnostim, večajo odpornost na agresivne snovi in prispevajo k manjšim prostorninskim spremembam v betonu.

Ko se beton strdi, se njegova struktura bistveno ne spreminja več, če ni podvržen procesom propadanja. Odločilno vlogo na lastnosti strjenega betona ima njegova zgoščenost oziroma poroznost. Poroznost je tista lastnost, ki kontrolira trajnost in odpornost strjenega betona na mehanske ter druge vplive. Vpliv na lastnosti betona imajo tudi zrna agregata. Ker agregat predstavlja večino v celotni masi betona, je njegova izbira pomemben dejavnik.

##### **3.1.2 Reologija samozgoščevalnega betona**

Reologija je veda ki preučuje deformiranje snovi. V zadnjem času se vse več časa posveča lastnostim sveže betonske mešanice, ker konsistenca, vgradljivost, obdelavnost, homogenost vplivajo na lastnosti strjenega betona. Samozgoščevalni beton vrednotimo glede na:

- sposobnost tečenja – (sposobnost, da zaradi delovanja lastne teže popolnoma zapolni opaž poljubne oblike, pri tem pa tesno obliči nameščeno armaturo)
- viskoznost betona – (notranje trenje med sestavnimi delci, ki se med tečenjem gibljejo z različno hitrostjo)

Za določitev reoloških parametrov se uporabljajo reometri (z njimi določamo napetost na meji tečenja in plastično viskoznost) ali pa enostavni testi za posredno oceno teh lastnosti. Tako na primer za oceno viskoznosti merimo čas, ki ga porabi določena količina betona, da izteče skozi lijak. Svež samozgoščevalni beton začne teči takrat, ko dosežejo napetosti v materialu kritično minimalno vrednost ki ji pravimo napetost na meji tečenja. Če se zgodi, da med tečenjem betona pade strižna napetost pod napetost na meji tečenja, se proces tečenja ustavi. Pri samozgoščevalnem betonu je zato pomembno, da imamo čim nižjo napetost na meji tečenja in s tem imamo večjo sposobnost tečenja. Lahko pa pride zaradi nizke napetosti na meji tečenja do segregacije. V tekočih in plastičnih mešanicah betona so po navadi nizke napetosti na meji tečenja, zato so za začetek tečenja dovolj že strižne napetosti, ki jih prispeva lastna teža betonske mešanice. V mešanicah, v katerih je prisotna večja količina finih delcev, rastejo sile notranjega trenja, zmanjšuje se količina vode v slojih, posledica pa je povečana viskoznost. Na reološke lastnosti vplivajo različni dejavniki:

- fino mleti portland cement (povečuje napetost na meji tečenja)
- naravni pucolan in elektrofiltrski pepel (povečujejo napetost na meji tečenja, ne spreminjajo pa njegove plastičnosti)
- zmanjšanje vodocementnega razmerja (povečata se napetost na meji tečenja in plastična viskoznost)
- kemijski dodatki (zavlačevalec vezanja, superplastifikator nove generacije)

Količina finih delcev v mešanici samozgoščevalnega betona je ponavadi od 380 do 600 kg/m<sup>3</sup> betona. Zato dodajamo samozgoščevalnim betonom mineralne dodatke, kot so kamena moka, elektrofiltrski pepel ali mikrosilika.

Kot smo že omenili, ima samozgoščevalni beton tako veliko sposobnost tečenja in deformiranja, da zapolni opaž in se v njem zgosti samo zaradi delovanja lastne teže. Te lastnosti pa lahko dosežemo samo, če so izpolnjene zahteve glede obdelavnosti, odpornosti na segregacijo in sposobnost prehajanja. Za te zahteve uporabljamo posebne metode preiskav. To je posed z razlezom, preiskava z V - lijakom in druge. S temi preprostimi in

hitrimi metodami lahko preverimo ustreznost betona tudi na gradbišču, preden ga vgradimo v opaž.

### 3.1.3 Sposobnost zapolnjevanja

Sposobnost zapolnjevanja je določena s sposobnostjo deformiranja in hitrostjo deformiranja sveže betonske mešanice zaradi delovanja lastne teže. Sposobnost deformiranja določa, kakšen je lahko končni razlez. Hitrost deformiranja pa je določen čas, v katerem se lahko ta razlez zgodi (metoda razlez s posedom). Če sta pri tej metodi sposobnost deformiranja in hitrost deformiranja v ravnotežju, potem je sposobnost zapolnjevanja dosežena. Lastnosti, ki jih imajo samozgoščevalni betoni z dobro sposobnostjo zapolnjevanja so:

- **majhno trenje med delci** (manjše je trenje med delci, bolj se beton deformira) in
- **pasta z dobro sposobnostjo deformiranja** (omogoča ga superplastifikator z zmanjšanjem napetosti na meji tečenja). Za sposobnost deformiranja je pomembno tudi razmerje med vodo in praškastimi materiali.

### 3.1.4 Segregacija (stabilnost)

Odpornost na segregacijo je sposobnost, da med mešanjem, transportom in vgradnjo suspenzija delcev obdrži svojo homogenost. Segregacija se kaže v nehomogeni porazdelitvi grobih zrn agregata v sveži betonski mešanici oziroma v ločevanju grobih delcev od drobnih in posedanju grobih zrn. To pa se zgodi zaradi premajhne kohezivnosti (viskoznosti). Segregacijo lahko opišemo kot ločevanje dela delcev iz heterogene mešanice, tako da prostorska razporeditev teh delcev (agregata) ni več enakomerna. To pomeni, da se v strjenem stanju betonu poslabšata nosilnost in obstojnost. V primeru betona so osnovni vzrok za segregacijo razlika v velikosti zrn agregata kot tudi v različni specifični teži sestavnih delov mešanice. Vendar lahko z natančnim delom preprečimo segregacijo ali pa vsaj omilimo njen škodljivi vpliv. Pri betonu ločimo več vrsti segregacije:

- izcejanje vode
- oddvojitvev paste in agregata
- oddvojitvev grobega agregata, ki vodi do blokiranja

- neenakomerna porazdelitev zračnih por

Poudariti je treba, da je obseg segregacije v veliki meri odvisen od tega, kako ravnamo z betonom in kako ga vgrajujemo. Že v primeru, če nam ni treba betona n transportirati v oddaljen kraj, je možnost za segregacijo veliko manjša. Če ga mečemo z večje višine ali če med vgradnjo naleti na nekakšno prepreko, je možnost, da segregira, dosti večja, tako da moramo v takih primerih imeti zelo kohezivno mešanico. Če si pri vgradnji betona pomagamo z vibriranjem, kar pomeni, da bomo dobili zelo zgoščen beton, moramo biti zelo pozorni, kajti pretirano vibriranje ali napačna uporaba vibratorja skoraj zagotovo vodi v segregacijo, ker grob agregat pri tem potone na dno, v cementni pasti na vrhu pa ostane malo takega agregata. Možnost segregacije zmanjšamo z naslednjimi ukrepi:

- zmanjšanje največjega zrna agregata
- omejena vsebnost agregata
- uporaba paste z nizkim razmerjem med vodo in praškastimi delci, s čimer povečamo kohezivne sile med različnimi fazami v betonu

### **3.1.5. Sposobnost prehajanja**

Sposobnost prehajanja pomeni, kako se bo beton sposoben vgraditi, če pride med vgradnjo do neke ovire, kot so zoženje in področje, kjer imamo na gosto položeno armaturo, kjer pride do tega, da se agregatna zrna nakopičijo in blokirajo vgradnjo. Ko pride do ovir pri vgradnji, agregatna zrna spremenijo pot. Do blokiranja običajno pride na mestih, kjer so agregatna zrna prevelika glede na odprtino, skozi katero mešanica teče, zato se temu izognemo z izbiro manjših zrn agregata.

Pri samozgoščevalnih betonih, ki imajo dobro sposobnost vgrajevanja in zapolnitve, se blokiranje pojavi zaradi prevelikih zrn ali prevelikega deleža velikih zrn. Zato omejimo velikost in količino največjega zrna. Ustrezno sposobnost prehajanja pa dosežemo tudi s povečanjem kohezivnosti (nizko razmerje med vodo in praškastimi delci, sredstva za povečanje viskoznosti).

### 3.1.6 Priprava betona

Sestavine betona (agregat, voda, cement, dodatki) zmešamo v homogeno celoto. Pri tem moramo upoštevati pravilno zaporedje mešanja. Najprej zmešamo agregat in cement, pozneje dodamo vodo in potrebne dodatke. Problemi pri dodajanju vode nastajajo, če je agregat površinsko vlažen in je treba upoštevati količino vode, ki je prisotna v agregatu. Pomembno je tudi, na kakšen način se beton meša in koliko časa mešanje traja. V manjših betonskih mešalcih se čas mešanja giblje okoli 60 - 120 sekund, cel cikel, ki vključuje polnjenje in mešanje, pa okoli 180 sekund. V večjih mešalcih pa je ta čas daljši, saj je težje doseči potrebno homogenost mešanice. Na homogenost vpliva tudi količina, ki jo mešamo, ki ne sme biti prevelika, in je okoli 2/3 celotne kapacitete mešalca. Pomemben vpliv na čas mešanja imajo tudi kemijski dodatki, ki zahtevajo tako dolgo mešanje, da je dosežena celotna zmogljivost kemijskega dodatka. Zato je treba na primer pri superplastifikatorjih polikarboksilatnega tipa čas mešanja ustrezno podaljšati glede na mešanico brez dodatka.



Slika 6: Mešalec betona (Vir: [www.bolha.si](http://www.bolha.si))

### 3.1.7 Konsistenca

Konsistenca je parameter, s katerim določamo plastičnost betona. Poznamo več metod, ki jih predpisujejo standardi za določanje konsistence svežih vibriranih in lahkogradljivih betonov. To so Ve - Be metoda (standard SIST EN 12350-3), metoda s posedom (SIST EN 12350-2), metoda z razlezom (SIST EN 12350-5) in metoda zgoščevanja pri vibriranju (SIST EN 12350-4). Metoda Ve - Be in metoda z zgoščevanjem sta bolj primerni za suhe mešanice, ostali dve metodi pa za bolj plastične mešanice. Beton vgrajujemo v tanke profile in profile z

gosto položeno armaturo, zato dodajamo dodatke, kot so superplastifikatorji, ki povečajo vgradljivost.

Preglednice 4: Razredi konsistence po SIST EN 206-1 (Vir: R. Žarnić in sodelavci, vaje (2010))

Vebe razredi:

Razred	Ve - Be, sekunde
V0	$\geq 31$
V1	30-21
V2	20-11
V3	10-6
V4	5-3

Razredi poseda:

Razred	Posed
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	$\geq 220$

Razredi razleza:

Razredi zgostitve:

Razred	Razredi gostitve
C1	$\geq 1,46$
C2	1,45-1,26
C3	1,25-1,11
C4	1,10-1,04

Razred	Razlez v (mm)
F1	$\leq 340$
F2	350-410
F3	420-480
F4	490-550
F5	560-620
F6	$\geq 630$

### 3.1.8 Izcejanje vode

Izcejanje je pojav, pri katerem se na vrhu sveže mešanice nabere plast vode. Je posledica hkratne sedimentacije trdnih delcev in potovanja vode, ki je znotraj mešanice proti vrhu. Tako nastane na vrhu plast mešanice z visokim vodocementnim razmerjem, ki pa je slabo odporna

na zunanje vplive, ima slabe mehanske lastnosti in je neobstojna. Izcejanje narašča z naraščanjem vodocementnega razmerja, z višino plasti betoniranja in z večanjem zunanjega tlaka. Pojav izcejanja lahko zmanjšamo z ustrezno zrnatostno sestavo agregata, dodatki, aeriranjem, dodajanjem finejših delcev.

### 3.1.9 Zgoščevanje ali konsolidacija

Pri betonu, ki ga ni mogoče ročno dovolj kvalitetno vgraditi, si pomagamo na različne načine, da ga zgostimo. Pri zgoščevanju betona s pomočjo nabijanja z nabijali ali vibriranja z vibratorji delce svežega betona poženemo v gibanje, pri čemer se zmanjša trenje med delci, mešanica pa preide v gosto fluidno stanje. Uporaba vibratorja omogoča, da lahko uporabimo v mešanici večja zrna agregata, s čimer dosežemo zmanjšanje količine cementne paste in potrebe po vodi. Pri vibriranju se uporabljajo različni tipi vibratorjev, najpogosteje pa je v uporabi vibrator z iglo, s katerim se vibrira neposredno po vgradnji betona v opaž. Pri visokofrekvenčnih vibratorjih je premer igel 20 – 40 mm, pri nizkofrekvenčnih pa od 130 – 180 mm.



Slika 7: Dve različni izvedbi vibratorja za beton (Vir: <http://svetoglasov.si/>)



## 3.2 LASTNOSTI STRJENEGA BETONA

### 3.2.1 Trdnost betona

Trdnost betona je najpomembnejša lastnost strjenega betona. Beton ima zaradi svoje strukture in kohezijskih sil visoko tlačno trdnost, veliko manjša pa je njegova odpornost na nateg in torzijo. Pod pojmom trdnost betona imamo v mislih njegovo odpornost med samim obremenjevanjem, ki mu je podvržen. Kvaliteto betona določa tlačna trdnost betona, ki jo dobimo, ko preizkušanec star 28 dni tlačno obremenimo do njegove porušitve. Poleg trdnosti betona so za kvaliteto betonske konstrukcije pomembni še drugi kriteriji, kot so zmrzljinska odpornost, vodoneprepustnost, temperaturna odpornost, odpornost na agresivne snovi, abrazijo in drugo. Za samozgoščevane betone je značilno, da imajo višjo tlačno trdnost kot vibrirani betoni z enakim vodocementnim razmerjem. Poleg tlačne trdnosti je pomembna še upogibna natezna trdnost, ki je v sorazmerju s tlačno trdnostjo. Preizkuša se z upogibnim preizkusom, njena velikost pa je okoli 15 odstotkov tlačne trdnosti. Razmerje med tlačno in natezno trdnostjo samozgoščevalnega betona pa je enako kot pri običajnih vibriranih betonih enakega trdnostnega razreda, ki se določijo pri preizkusih na standardnih kockah. Na trdnost samozgoščevalnih betonov bistveno vplivajo vrsta in količina cementa, količina vode, zrnastostna sestava agregata, dodatki, nega betona in pa sam način priprave mešanice ter njena vgradnja.

### 3.2.2 Tehnološke lastnosti

Med tehnološke lastnosti betona štejemo zmrzljinsko odpornost, vodotesnost, prostorninsko stabilnost betona in obrabnost.

#### ZMRZLINSKA ODPORNOST

Mnoge hidrotehnične betonske konstrukcije, betonska vozišča, letališke piste in druge podobne konstrukcije so izpostavljene mrazu. Če so cikli zmrzovanja/tajanja pogosti, lahko to ogrozi trajnost in kvaliteto betona, seveda če nismo betona pravilno izdelali in pripravili na pogoje mraza. Zato moramo že v fazi projektiranja misliti na ta dejavnik. Tako lahko beton že samo s kapilarnim dvigom doseže visoko zasičenost z vodo in začne zmrzovati. Ker se prostornina vode, ki preide v led, poveča (za 9 odstotkov), lahko nastane v strukturi betona zelo veliki pritisk, tudi do 200 MPa. To pa vodi do postopnega razpadanja strukture betona.

Najprej se posledice kažejo na površini betona, pozneje pa poškodbe napredujejo tudi v notranjost betona.

Zmrzlinško odporni betoni so betoni z nizkim vodocementnim razmerjem in od 4 – 8-odstotno stopnjo aeracije (vnos zračnih mehurčkov), ki povečajo odpornost betona na zmrzovanje/tajanje. Tovrstni (aerirani) betoni zdržijo veliko ciklov zmrzovanja/tajanja brez večjih poškodb. Zmrzlinško odpornost povečamo tudi z izbiro ustreznega agregata.

#### VODOTESNOST

V hidrotehnik in drugih sorodnih uporabah betonskih konstrukcij je vodotesnost osnovno merilo kvalitete betona. Beton je porozen material s sistemom kapilarnih por. Drobne pore in kapilare, ki so manjše od  $10 \cdot 10^{-6}$  cm, so praktično neprepustne. Večje pore in kapilare pa omogočajo difuzijo vode skozi beton, ne glede ali gre za vlago ali vodo pod pritiskom. Prepustnost vode skozi beton je odvisna od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter razmerja med njima. Če zmanjšamo količino vode v mešanici, to pomeni, da je beton manj porozen. Manj porozen beton pa je zato bolj zmrzlinško odporen in tudi manj občutljiv na vpliv kemikalij. K boljšemu tesnjenju pripomore tudi aeriranje. Vodotesnost betonov bi lahko izboljšali tudi z dodajanjem večje količine praškastih materialov.

#### PROSTORNINSKA STABILNOST

Prostorninska stabilnost vpliva na delovanje betona znotraj konstrukcije, v katero je vgrajen. Strjen beton se zaradi temperaturnih sprememb in vlage krči ter nabreka. To krčenje in nabrekanje pa je odvisno predvsem od vodocementnega razmerja, granulacije in vrste agregata.

## 4. METODE PREVERJANJA BETONA

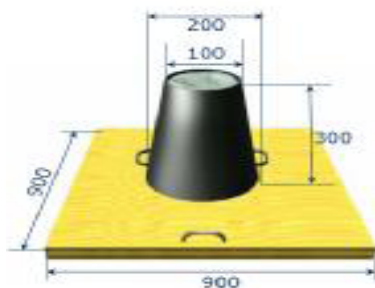
### 4.1 METODE PREVERJANJA SVEŽE BETONSKE MEŠANICE

Za preizkušanje kvalitete sveže betonske mešanice so bile razvite številne metode preiskav, s pomočjo katerih ovrednotimo kvaliteto pripravljenega betona pred njegovo vgradnjo. Svež beton je mešanica agregata, cementa, vode in dodatkov. Njegovo obdelavnost, vgradljivost in ostale lastnosti preverjamo z metodami, kot so:

- metoda s posedom
- metoda z razlezom in metoda razleza s posedom za samozgoščevalne betone
- VE-BE metoda

#### 4.1.1 Metoda z razlezom

To je dokaj preprosta metoda, določena s standardom SIST EN 12350-5, ki jo uporabljamo za preizkušanje konsistence svežih plastičnih in tekočih betonskih mešanic. Ocenimo konsistenco kot tudi, ali je mešanica nagnjena k segregaciji (stabilnost). Preiskava poteka tako, da na ravno in gladko razlezno mizo, ki ima dimenzije 80 x 80 centimetrov ali več, položimo prisekan stožec dimenzij 130 mm – zgoraj in 200 mm –spodaj. Sam postopek poteka tako, da navlažimo razlezno mizo in na njo postavimo navlažen prisekan stožec. Stožec napolnimo z betonom v dveh približno enakih plasteh. Vsako plast pa nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem. Po 30 sekundah odstranimo konus, dvignemo zgornjo ploščo stresalne mizice in jo spustimo. To ponovimo 15krat. Beton se razleze po mizici, mera konsistence pa je povprečje dveh pravokotno zmerjenih razlezov.



Slika 8: Prisekan stožec na razlezni mizi (Vir: <http://www.primorje.si>)

## **Razlez s posedom – metoda za samozgoščevalne betone**

Preiskava razleza s posedom je preprosta, vendar učinkovita metoda ovrednotenja sposobnosti tečenja in stabilnosti sveže mešanice samozgoščevalnega betona na podlagi opazovanja hitrosti deformiranja in premera razširitve preizkušanca, ki se deformira zaradi lastne teže. Predpisana je s standardom SIST EN 12350-8

Pri izvedbi preiskave uporabimo standardni prisekan stožec za določitev poseda običajnega betona (Abramsov stožec predpisan v ISO 4109) in dovolj gladko, vodotesno ter togo horizontalno podlago z dimenzijami večjimi od 800x800 mm. Na plošči mora biti narisana kroga premera 500 mm, ki je potreben za določitev časa  $T_{50}$ . To je čas, ki ga beton potrebuje, da doseže razlez 500 mm.

Pred preiskavo navlažimo notranjost prisekanega stožca in površino podlage, tako da na plošči ni proste vode. Prisekan stožec postavimo točno na sredino podlage in ga do vrha napolnimo z betonom. Zgostitev vzorca je izključno posledica delovanja lastne teže betona, zato odpade zgoščevanje s prebadanjem z jekleno palico ali z vibriranjem. Jeklen stožec dvignemo v vertikalni smeri. V trenutku, ko dvignemo stožec, začnemo meriti čas  $T_{50}$ . Ko se beton razleze in umiri, izmerimo s pomočjo merila in dveh vodil navidezno največji premer razlitega preizkušanca ter premer pravokotno nanj. Po potrebi lahko določimo tudi mejo segregacije na obodu (Slika 2.12).

Mera razleza s posedom je povprečje dveh meritev in je ocena napetosti na meji tečenja. Čas  $T_{50}$  pa predstavlja oceno plastične viskoznosti betona. Čas  $T_{50}$ , ki predstavlja oceno plastične viskoznosti sveže betonske mešanice, ni neodvisen od sposobnosti deformiranja betonske mešanice. Na primer, pri enaki viskoznosti betonskih mešanic bomo pri mešanici z večjim razlezom izmerili krajši čas  $T_{50}$  kot pri mešanici z manjšim razlezom. To pomeni, da ta metoda preiskave ne omogoča ovrednotenja viskoznosti mešanice neodvisno od potencialne sposobnosti deformiranja. Čas  $T_{50}$  torej predstavlja relativno oceno plastične viskoznosti le v primeru enake sposobnosti deformiranja betonskih mešanic, to je pri mešanicah z enakim razlezom.

#### 4.1.2 Metoda s posedom

Metoda s posedom je preprosta metoda, ki jo določa standard SIST EN 12350-2 in da dokaj zanesljive podatke za določanje konsistence tekočih in plastičnih svežih betonskih mešanic. S to metodo hitro pridemo do želenih podatkov, zato jo lahko hitro opravimo tudi na gradbiščih. Princip metode je določitev poseda zgoščenega betona v obliki prisekanega stožca zaradi delovanja lastne teže. Stožec (Abramsov stožec) in podlago, na kateri stožec stoji, je treba pred polnjenjem betona navlažiti. Stožec postavimo na podlago, napolnimo z betonsko mešanico v treh plasteh, ki jih vsako posebej nabijemo s kovinsko palico s 25 udarci. Po 30 sekundah, ko je mešanica zbita, počasi dvigujemo konus. Stožec postavimo poleg mešanice in na vrh stožca postavimo ravnilo, tako da lahko izmerimo razliko v višinah. Razlika med višino stožca in mešanico betona, ki se je posedla in jo zaokrožimo na 10 mm, je mera za konsistenco. Celotna meritev se izvaja do 150 sekund. Če se vzorec med preiskavo poruši, je treba cel postopek ponoviti. Ta metoda je primerna za betone s posedom  $210 \text{ mm} \geq \Delta h \geq 10 \text{ mm}$ .



Slika 9: Merjenje poseda betona (Vir: [www.lafarge.si](http://www.lafarge.si))

### 4.1.3 VE-BE metoda

VE-BE metoda je določena s standardom SIST EN 12350-3. Z njo določamo konsistenco manj plastičnih in zemeljsko suhih betonov. Ta postopek opravimo s pomočjo aparata VEBE, ki je sestavljen iz vibracijske mizice, vodotesnega jeklenega lonca višine 20 centimetrov, 30 centimetrov visokega konusa ki ima zgornji premer 10 in spodnji premer 20 centimetrov, krožne plošče, držaja plošče in palice, na katero je pritrjen lijak za vlivanje betona v konus. Konus vstavimo v lonec, ki stoji na vibracijski mizici, in ga napolnimo v treh plasteh, ki jih s kovinsko palico nabijemo vsako posebej s 25 udarci. Odvečen material na vrhu konusa odstranimo in zravnamo z zidarsko žlico. Odstranimo konus in na vrh betona položimo krožno ploščo iz pleksi stekla. Istočasno vključimo štoparico in vibracijsko mizico. Beton se začne posedati. Ko zgornja površina betona pokrije celotno površino plošče, izključimo štoparico in vibracijsko mizico. Dobili smo čas v sekundah, ki je bil potreben za preoblikovanje betonske mešanice

### 4.1.4 Določanje časa vezanja betona

Čas začetka in konca vezanja ugotavljamo z merjenjem pritiska igle v betonski mešanici.

- **čas začetka vezanja** – je čas ,ki je pretekel od prvega dotika vode in cementa do takrat, ko odpor igle, ki jo vtiskamo, ne pokaže 3,5 MN/m<sup>2</sup>.
- **čas konca vezanja** - je čas, ki je pretekel od prvega dotika vode in cementa do takrat, ko odpor igle, ki jo vtiskamo, ne pokaže 28 MN/m<sup>2</sup>.

#### POTREBNA OPREMA:

- posode, v katerih imamo vzorce betona, lahko so okrogle ali pravokotne oblike, njihov presek pa ne sme biti manjši od 150 mm;
- aparat za merjenje odpora pri vtiskanju igle (penetrometer), s katerim izmerimo odpor od 45 do 600 N; v penetrometer vstavimo igle z različnim prečnim prerezom, katero iglo bomo vstavili, je odvisno od stopnje vezanja. Igle imajo premer 645, 323, 161, 65, 32, in 16 mm.

#### PRIPRAVA:

Iz betonske mešanice, ki jo želimo preveriti, izberemo reprezentativni vzorec, ki je vgrajen v posodi za preizkušanje, ki pa je ne napolnimo do vrha. Posoda ima višino 150 mm. Napolnimo jo do višine 140 mm. Samozgoščevalnega betona pri tem ni treba predhodno vibrirati ali stresati na stresalni mizi, saj ima sposobnost samozgostitve. Ves postopek priprave in preizkusa naj se vrši pri temperaturi okoli 20 °C in zračni vlagi okoli 65 odstotkov.

Za sam postopek meritev moramo imeti pripravljene tri vzorce mešanice, ki jih merimo ločeno.

#### MERITEV:

Pred samim začetkom meritev odstranimo vodo, ki se je nabrala na površini vzorca. Meritev začnemo z iglo, ki ima največji premer, ta premer je odvisen od stanja betona. Potiskanje igle vršimo v vertikalni smeri, vse dokler igla ni prodrla do globine 25 mm, to globino pa moramo doseči v 10 sekundah. Odmerimo silo, ki smo jo potrebovali, in pa čas, ki je pretekel od stika vode in cementa pri pripravi mešanice. Vse te podatke si moramo sproti zapisovati. Pri vsakem naslednjem vtisku igle v mešanico moramo paziti, da ne vtiskamo v površino, ki je bila poškodovana ob prejšnjem vtisku igle. Razdalja med dvema vtiskoma mora biti večja od dveh premerov igle, ki smo jo uporabili, oziroma ne sme biti manjša od 25 mm. Sam preizkus začnemo po 3 - 4 urah, med posameznimi intervali pa ne sme biti več kot eno uro razlike. Pri mešanicah, ki jim dodajamo sredstvo za pospešitev vezanja, se začne preizkus že po eni uri in z intervali okoli 30 minut. Pri vsakem vzorcu moramo izvesti vsaj šest ponovitev. S preizkusom nadaljujemo, vse dokler odpor igle ne doseže vrednosti 28 MN/m<sup>2</sup>. Takrat se proces vezanja zaključi.

#### IZRAČUN:

Vrednost odpora igle se meri v sili, ki jo uporabimo pri vtiskanju igle. Vrednost odpora v MN/m<sup>2</sup> dobimo, ko delimo vrednost sile, ki smo jo izmerili, s prečnim prerezom igle, s katero smo vtiskali.

Poročilo o opravljenem preizkusu mora vsebovati podatke o betonski mešanici, vrsti in količini sestavnih delov (agregat, cement, voda, dodatki), negi vzorca, vsebnosti zraka, konsistenci betona, temperaturi vzorca, datumu preskušanja, uri meritve ter času vezanja.

## 4.2 METODE PREVREJANJA STRJENEGA BETONA

Obnašanje strjenega betona lahko razvrstimo glede na njegove kratkoročne in dolgoročne lastnosti, kot so modul elastičnosti, lezenje, krčenje, odpornost proti obrabi, mrazu. Visokozmogljivi betoni imajo po navadi nizko vodocementno razmerje.

Za dolgo življenjsko dobo konstrukcij je pomembno, da izdelamo kvaliteten beton. Ali bomo to dosegli, pa je odvisno tudi od kakovosti mešanice, nege in sušenja betona. Ali smo dosegli pričakovano kvaliteto betona, lahko ugotovimo na različne načine. Za ugotavljanje mehanskih lastnosti poznamo različne porušne metode, to so določanje tlačne trdnosti, cepilna natezna trdnost, statični modul elastičnosti in pa neporušno metodo, ultrazvočno metodo za oceno trdnosti in določanje dinamičnega modula elastičnosti.

#### **4.2.1 Priprava in nega vzorcev**

Priprava in nega betonskih vzorcev sta opisana v standardu SIST EN 12390-2.

Pri pripravi vzorcev je pomembno, kako zmešamo mešanico, kar vpliva na trdnost betona. Če komponente mešanice niso dovolj zmešane, pride do občutnega znižanja trdnosti strjenega betona. Nehomogen beton povzroči odstopanje pri mehanski odpornosti. Zato je že priprava mešanice zelo pomemben dejavnik pri končnih lastnostih strjenega betona.

Nega betona je drugi dejavnik, ki pomembno vpliva na lastnosti betona. Pri sami negi je pomembno, da betonu zagotovimo zadostno vlažnost, še posebej v začetnem stanju, saj proces hidratacije ni mogoč, če v porah in kapilarah ni zadosti vode. Če med nego ni prisotno dovolj vlage, v betonu, pride do izsušenosti betona. Pomemben vpliv ima tudi temperatura med samo nego. Normalna temperatura naj bi bila okoli 20 °C. Pri višjih temperaturah se procesi kemijskih reakcij v betonu pospešeno odvijajo, vendar pa se beton tudi hitreje izsušuje, kar pa spet ni dobro, saj prehitro sušenje povzroči, da bo ostal del cementa nehidratiziran, zaradi pospešenega krčenja cementne paste se oblikujejo tudi razpoke.

Sami kalupi, v katere vgradimo vzorce, morajo biti vodotesni in ne smejo vpijati vode. Preden beton vgradimo v kalup, kalup namažemo z opažnim ločilnim sredstvom, da preprečimo sprijetje betona in kalupa. Po vgradnji lahko beton še zgostimo z vibriranjem ali drugače. Pri samozgoščevalnem betonu dodatno zgoščevanje ni potrebno. Preizkušance pustimo v kalupu najmanj 16 ur in ne več kot tri dni. Po razkalupljenju vzorce označimo in jih damo v vodo s predpisano temperaturo, kjer jih hranimo 3, 7, 28 ali 90 dni. Pred preiskavami z eno od metod je treba vzorce še površinsko obrisati (odstraniti površinsko vodo) in stehtati.

#### **4.2.2 Tlačna trdnost strjenega betona**

Tlačna trdnost betona je odvisna od mnogih dejavnikov, zlasti od vrste in razmerja uporabljenih materialov ter stopnje hidratacije. Lastnosti materialov, ki vplivajo na trdnost, so kakovost finega in grobega agregata, cementne paste. Na izmerjeno trdnost vplivajo tudi starost vzorca, metoda testiranja, geometrija vzorca.

Določitev tlačne trdnosti obravnava SIST EN 12390-3. Tlačna trdnost betona je definirana kot povprečna tlačna osna napetost, ki v obravnavanem vzorcu betona po določenem času hidratacije, 3, 7, 28 ali 90 dni pripelje do porušitve v njegovi strukturi. Uporabljamo vzorce v obliki kocke, prizme ali valja. Kocke so dimenzije 15/15/15 cm. Ko kocko osušimo, zmerimo njene dimenzije in jo stehtamo, jo vstavimo v prešo, kjer jo obremenimo do porušitve, in kot rezultat dobimo porušno silo. Vrednost tlačne trdnosti se izračuna po izrazu:



$$f_{cc} = \frac{F}{A_c}$$

kjer je:

$f_{cc}$  – tlačna trdnost betona (kN/mm<sup>2</sup>) ali (MPa)

F – porušna tlačna sila (kN)

$A_c$  – površina preizkušanca na katerega deluje sila (mm<sup>2</sup>)



Slika 10: Določanje tlačne trdnosti betona v preši do porušitve

## 5. PREISKAVE SVEŽEGA BETONA Z METODO ELEKTRIČNE PREVODNOSTI

Beton je eden najpogosteje uporabljenih materialov na svetu. Ker je zelo težko oceniti kvaliteto betona glede na njegov videz, obstaja veliko metod, s katerimi lahko ocenimo stanje strjenega in pa tudi svežega betona. Metode, s katerimi preizkušamo, morajo biti hitre, poceni in zanesljive. Ena od teh metod je tudi ocenitev stabilnosti betona v svežem stanju s pomočjo električne prevodnosti, ki je odvisna od prisotnosti vlage in različnih ionov v betonu. To pomeni, da nas zanima, kako se sveža betonska mešanica obnaša takoj po vgraditvi v opaž, predvsem v času vezanja. Če pride do segregacije, to pomeni, da tak beton ni tako odporen na mehanske in druge vplive.

Samozgoščevalni beton je zaradi visoke sposobnosti tečenja in nizke napetosti na meji tečenja ter plastične viskoznosti dosti bolj podvržen segregaciji kot ostali betoni. Zato moramo, če želimo doseči homogenost v samozgoščevalnem betonu, tak beton neprestano kontrolirati in spremljati v njegovi zgodnji fazi. Na stabilnost svežega SCC betona vpliva tudi način priprave mešanice in njena sestava ter kinetika hidratacije cementa v njegovi zgodnji starosti.

Če ne pride do izrazitega izcejanja vode na površini, statične segregacije na površini, ki ni v stiku z opažem, ne moremo zaznati. Po drugi strani pa statična segregacija lahko še vedno poteka pri betonih, ki vsebujejo mikrosiliko in so visoko kohezivni, zato je izločanje vode ovirano. Zato pravilna ocena o migraciji vode v zgodnji starosti betona pomaga pri razvoju samozgoščevalnih betonov. Težava pa je, ker nimamo na voljo zadosti orodij, ki bi nam omogočila pridobitev podatkov o izcejanju vode in s tem boljše spremljanje stabilnosti SCC betonov, ki vse bolj prihajajo v uporabo v gradnji in obnovi.

Zato je bila predlagana nova preizkusna metoda, metoda, s katero lahko na podlagi električne prevodnosti ocenimo migracijo vode in s tem stabilnost sveže betonske mešanice. Na električno prevodnost plastične betonske mešanice vpliva več parametrov, kot so prostorninski delež cementa, velikost in razporeditev por, ionska sestava tekoče faze, kemične primesi. Glavni cilj razvoja te metode je, da bi lahko z njeno uporabnostjo prišli do podatkov za oceno stabilnosti sveže betonske mešanice v opažu, na podlagi katere bi lahko ocenili kvaliteto betona še pred odstranitvijo opaža. Metoda temelji na merjenju prevodnosti skozi svežo betonsko mešanico v odvisnosti od časa v kalupu, na katerem je pritrjenih večje število elektrod. Spreminjanje koncentracije ionov s časom je tisti parameter prevodnosti, ki določa stabilnost oziroma homogenost betonske mešanice. Preiskave, kot jih predlaga Khayat, potekajo v opažu višine 1005 mm in prečnem prerezu 250 x 250 mm. V opaž vstavimo medeninaste elektrode, in sicer štiri pare, na različne višine opaža. Prevodnost izmerimo tako, da med posameznim parom elektrod merimo tok in napetost vsakih nekaj minut. Ta metoda nam omogoča določiti vpliv migracije vode, konsolidacije in segregacije

sveže betonske mešanice med hidratacijo cementa. Na podlagi meritev izrišemo graf, ki je dober pokazatelj, ali je prišlo do segregacije ali ne.



Slika 11: Opaž z vgrajenimi elektrodam (Vir: Khayat)

## 6. LASTNE PREISKAVE

### 6.1 UVOD

V eksperimentalnem delu naloge smo se lotili laboratorijskih preiskav stabilnosti svežih samozgoščevalnih betonov. Preiskave smo izvedli z metodo električne prevodnosti. Preiskali smo dve različni mešanici samozgoščevalnega betona, ki smo ju vgradili v opaž. Z vsako od mešanic smo naredili šest vzorcev, po tri vzorce vsake od mešanic smo vgradili homogeno, po tri pa smo načrtno segregirali z uporabo vibratorja. Vzoredno s temi preiskavami smo opravljali še druge preiskave. Na svežem betonu smo preverjali razlez s posedom, opravili preiskavo procesa vezanja betona. Na strjenem betonu pa smo določili tlačno trdnost betonov in pregled homogenosti preiskušancev vzdolž višine elementov. Ta pregled smo opravili na preizkušancih, ki smo jih predhodno že uporabili pri preizkusu z metodo električne prevodnosti v svežem stanju.

Beton, ki smo ga izdelali za potrebe preskusa, je bil narejen po dveh različnih recepturah. Prvih šest preskušancev je bilo izdelanih iz cementa, vode in apnenčevega drobljenega agregata, za preostalih šest mešanic pa smo uporabili naravni separirani rečni prod. Vsaki mešanici smo dodali še kameno moko, s katero smo povečali količino finih delcev in superplastifikator nove generacije. Med obema mešanicama je bila, poleg vrste agregata, razlika še v količini dodatka in pa vodocementnem razmerju. Namen preiskav je bil ugotoviti, ali prihaja do razlik v stabilnosti svežega SCC betona zaradi uporabe različnih vrst agregata in ali je pri isti vrsti agregata opazna razlika med preskušanci, ki smo jih načrtno segregirali, in tistimi, ki jih nismo. Po koncu preiskav smo rezultate meritev primerjali še z vizualno oceno segregacije na teh istih strjenih vzorcih, ki smo jih prerezali na polovico po njihovi dolžini. Pri vizualnem pregledu smo videli napake, ki smo jih primerjali z dobljenimi rezultati.

Poleg meritev z električno prevodnostjo smo opravljali še preiskave razlez z posedom. To je metoda, s katero se določi konsistenco sveže samozgoščevalne betonske mešanice in pa oceni, ali je mešanica homogena. Preskus smo opravili vsakič, ko smo zamešali svež beton. Hkrati pa smo svež beton napolnili še v kocke, na katerih smo pozneje določili tlačno trdnost strjenega betona. Določili pa smo tudi čas vezanja sveže betonske mešanice. To smo opravili s pomočjo penetrometra, mešanico smo pripravili z istimi sestavinami kot pri metodi električne prevodnosti. V tri kalupe smo vgradili mešanico iz drobljenega agregata, v preostale tri pa beton iz rečnega proda. Določili smo začetek in konec vezanja pri standardni temperaturi okolja in pri tem upoštevali standard ASTM C 403, v katerem je opisan tudi potek preiskave. Sam potek vezanja se preskuša s penetrometrom, s katerim s pomočjo različno velikih igel merimo silo pri vtiskanju v preskušanec, in glede na velikost sile penetriranja ter premera igle po izračunu določimo začetek in konec vezanja.

## 6.2 MATERIALI UPORABLJENI PRI PREISKAVI

### 6.2.1 Agregat

Za izdelavo betonske mešanice smo uporabili dve vrsti agregata. Najprej smo uporabili drobljen apnenčev agregat z dobro zrnavostno sestavo. Za izdelavo samozgoščevalnega betona smo uporabili naslednje frakcije: drobnozrnat agregat 22% 0/2, 33% 0/4 in grobozrnat agregat 18% 4/8 in 27% 8/16. V drugem delu smo uporabili dravski rečni prod frakcij: 50% 0/4, 15% 4/8 in 35% 8/16.

### 6.2.2 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja, s katero se pripravlja večino mešanic in ne vsebuje veliko klora, kar bi lahko vplivalo na agresivnost v betonu z armaturo. Pri tehtanju vode smo uporabljali tehtnico z merilnim območjem do 12 kg in z natančnostjo 2 g.

### 6.2.3 Cement

Kot vezivo smo uporabili dve različni vrsti portland cementa:

- CEM II/A- M (LL-S) 42,5 R
- CEM II/A- S 42,5 R

Cement CEM II/M (LL\_S) 42,5 R je portlandski cement, ki ga proizvaja slovenska cementarna. Vsebuje dva dodatka, apnenec (LL) in žlindro (S) in je v trdnostnem razredu 42,5, in ima visoko zgodnjo trdnost (R). Sestavljen je iz portland cementnega klinkerja (najmanj 80 odstotkov), mešanega dodatka apnenca in žlindre (6 – 20 odstotkov), polnila ter regulatorja vezanja – sadre (do 5 odstotkov). Uporabljamo ga za gradnje, kjer se zahtevajo visoke začetne trdnosti, za aerirane zmrzlinso odporne betone, brizgane betone, prednapete betone in prefabricirane betonske izdelke. V naši preiskavi smo ga uporabili za izdelavo samozgoščevalnega betona v kombinaciji z drobljenim apnenčevim agregatom in dodatkom apnenčeve moke.

CEM II/A- S 42,5 R je portland cement z dodatkom žlindre (S). Spada v trdnostni razred 42,5 in je cement z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Vsebuje minimalno 80 odstotkov portland cementa in 6 – 20 odstotkov granulirane plavžne žlindre. Uporabili smo ga v kombinaciji z dravskim prodom.

#### **6.2.4 Superplastifikator**

Uporabili smo superplastifikator nove generacije. Gre za superplastifikator druge generacije polikarboksilatnega tipa. Superplastifikator pospešuje hidratacijo cementa in pospešeno razvija hidratacijsko toploto, kar se kaže v hitrejšem razvoju začetnih trdnosti betonske mešanice. Njegova uporaba pripomore k odličnim lastnostim plastificiranja, znatno poveča začetne trdnosti betonskih mešanic, omogoča lažje in hitrejše vgrajevanje ter prihranek energije. Omogoča izdelavo homogenih betonskih mešanic in zmanjšuje segregacijo. Dodaja se med samim mešanjem razredčen z vodo ali pa ga dodamo v že zamešano mešanico. Minimalni čas mešanja je 1 minuta, priporočeno doziranje pa je od 0,3 – 1,0 odstotkov glede na skupno maso cementa.

#### **6.2.5 Polnilo – apnenčeva moka**

Kot polnilo smo uporabili dve vrsti apnenčeve kamene moka. Prva je apnenčeva moka, pridobljena z odpraševanjem apnenčevega drobljenega kamenega agregata, druga pa je pridobljena z mletjem. Obe moki smo dodali z istim namenom, to je zapolnitev prostora med večjimi delci, kar je povečalo stabilnost sveže betonske mešanice.

### **6.3 PREISKAVE NA BETONIH**

Preiskave smo izvajali na dveh različnih mešanicah:

- drobljen apnenčev agregat, cement, voda, kamena moka, superplastifikator
- rečni prod, cement, voda, kamena moka, superplastifikator

Opravili smo preiskave po naslednjem vrstnem redu:

- razlez s posedom
- električna prevodnost svežega samozgoščevalnega betona
- potek vezanja svežega samozgoščevalnega betona
- tlačna trdnost strjenega betona starega 28 dni
- vizualna ocena homogenosti strjenih vzorcev

Vse preiskave so potekale v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani.

### 6.3.1 Priprava mešanice samozgoščevalnega betona

Priprava mešanice samozgoščevalnega betona se začne s pripravo sestavin, ki jih vgradimo v beton: tehtanje agregata, cementa, vode dodatkov, moko. Sestavine mešanic so podane v preglednici. Ko smo imeli pripravljene sestavne dele, smo jih stresali v mešalec po vrstnem redu za pripravo samozgoščevalnih betonov. Mešanico smo pripravili v protitočnem laboratorijskem mešalcu s prostornino 50 litrov. Najprej smo v mešalcu zmešali grobi agregat, drobni agregat, cement in kameno moko. Vse skupaj smo na suho mešali eno minuto. Nato smo med mešanjem dodali polovico stehtane vode in spet mešali eno minuto. Sledilo je dodajanje superplastifikatorja, ki smo ga počasi dodajali mešanici skupaj s preostalo polovico vode. Ko so bile vse sestavine v mešalcu, smo jih mešali še štiri minute. Medtem ko se je mešanica mešala, smo pripravili potrebno mizico, na kateri smo opravili preizkus razleza s posedom, in pa kalupe, v katere smo dali beton za poznejše preskušanje trdnosti betona. Po mešanju smo opravili preiskavo razleza s posedom. Če je bil razlez tak, kot ga določajo standardi, smo lahko nadaljevali z delom, če ne, je bilo treba mešanico zavrniti in cel postopek priprave še enkrat ponoviti. V našem primeru je bil razlez vedno v okvirih zahtev, kar pomeni, da smo pripravili zadovoljivo mešanico. Na koncu priprave smo mešanico vgradili v pripravljene kalupe, v katerih smo izvajali preiskavo z metodo električne prevodnosti, ter v kalupe (kocke) za določanje tlačne trdnosti strjenega betona. Te preizkušance smo po enem dnevu dali v vodo. Po tri vzorce vsake od mešanic smo pred preiskavo z metodo električne prevodnosti še zvirirali, tako da smo pozneje lahko med seboj primerjali rezultate preiskav na homogeni in načrtno segregirani mešanici samozgoščevalnega betona.



Slika 12: Priprava mešanice v mešalcu

Preglednica 5: Vzorci od 1-6, drobljeni apnenčev agregat

<b>SCC1 20 L</b>	<b>Vzorci 1 - 6</b>
m – cementa	7,8 kg
m – moke	5,14 kg
m – vode	3,4 kg
M – agregat 0/2	6,97 kg
M – agregat 0/4	10,46 kg
M – agregat 4/8	5,71 kg
M – agregat 8/16	8,56 kg
m - superplastifikatorja	68,58 g (0,53%)
v/c razmerje	0,43

Preglednica 6: Vzorci od 7-12, naravni rečni prod

<b>SCC7 20 L</b>	<b>Vzorci 7 - 12</b>
m – cementa	7,8 kg
m – moke	3 kg
m – vode	3,4 kg
M – agregat 0/4	17 kg
M – agregat 4/8	5,1 kg
M – agregat 8/16	11,94 kg
m - superplastifikatorja	75,6 g (0,70%)
v/c razmerje	0,43

Preglednica 7: Razlez s posedom

<b>Vzorec</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Razlez</b>											
<b>v mm</b>	720	760	720	710	720	750	750	740	690	690	720





Slika 13: Preverjanje razleza

Vzporedno smo opravili še preizkus začetka in konca vezanja svežega samozgoščevalnega betona. Spet smo opravili meritve na dveh različnih vrstah mešanice, za vsako mešanico pa smo pripravili tri različne vzorce. Posamezna vrsta mešanice je bila pripravljena po istem razmerju kot za preiskave z metodo električne prevodnosti in tlačne trdnosti.

### 6.3.2 Metoda električne prevodnosti

Najprej razložimo, kaj je električna prevodnost. Električna prevodnost je sposobnost kovine ali raztopine, da prevaja električni tok. V našem primeru nas zanimajo raztopine, kar pomeni, da so ioni v raztopini tisti, ki so nosilci naboja. Električni tok v raztopini je dejansko gibanje ionov v njej. Večja kot je koncentracija teh ionov, bolj je material prevoden. Prevodnost merimo z dvema elektrodama, ki ju damo v raztopino vzorca. Prevodnost je sorazmerna s površino elektrode in obratnosorazmerna z razdaljo med elektrodama. Iz znane napetosti in toka lahko določimo prevodnost s pomočjo Ohmovega zakona. Ohmov zakon pravi, da je električni tok, ki teče skozi vodnik ali raztopino, sorazmeren z napetostjo. Upor električnega kroga pa je razmerje med napetostjo in električnim tokom. Z matematičnim izrazom Ohmov zakon opišemo kot razmerje med napetostjo in uporom. Napetost ( $U$ ) med elektrodama merimo v voltih, električni tok ( $I$ ) med elektrodama pa v amperih. Tako dobimo upornost ( $R$ ).

Skozi merjenec spustimo izmenični tok ( $I$ ) pravokotne oblike in merimo padec napetosti ( $U$ ). Iz izmerjenega toka  $I$  na ampermetru (AM) in napetosti ( $U$ ) na merjencu izračunamo upornost merjenca:

$$R = \frac{U}{I}$$

Prevodnost merjenca ( $G$ ) je recipročna vrednost upornosti:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

### 6.3.3 Priprave potrebne opreme

Preden smo začeli s samimi meritvami na svežem betonu, je bilo treba pripraviti in preizkusiti opremo.

#### PLASTIČNI KALUPI Z ELEKTRODAMI

Najprej smo pripravili plastične kalupe s premerom 70 mm, ki smo jih narezali na višine 75 cm. Na teh kalupih smo izvrtali po štiri pare lukenj, tako da so bile luknje enakomerno porazdeljene po višini. Štiri pare pa zato, da smo lahko primerjali, kako se obnaša svež beton na različnih višinah v vgrajenem kalupu. V te luknje smo privili medeninaste vijake, tako da smo na notranji in zunanji strani zaradi dobrega tesnjenja podložili gumijaste podložke. Medeninasti vijaki dobro prevajajo električni tok in so nam služili kot elektrode. Ko so bili kalupi z nameščenimi elektrodami pripravljene, smo elektrode povezali s funkcijskim generatorjem. To smo storili tako, da smo na vsak par elektrod pritrdili prevodne objemke in jih privili z maticami. Te prevodne objemke pa so bile povezane s funkcijskim generatorjem.

#### FUNKCIJSKI GENERATOR

Za merjenje električne prevodnosti smo potrebovali funkcijski generator. Funkcijski generator ima tri različne oblike napetostnega izhodnega signala: sinusno, žagasto in pravokotno obliko. Za spremljanje prehodnih pojavov se uporablja pravokotna oblika izhodnega signala, ki smo jo uporabili tudi v naših preizkusih. Uporabili smo pravokotno napetost s frekvenco 1 kHz. Napetost med elektrodami smo merili z voltmetrom (VM) z obsegom 2 V, električni tok med elektrodama pa z ampermetrom (AM) z obsegom do 20 mA (miliamper). Najprej smo nastavili območje ampermetra na 20 mA, pozneje, ko se je prevodnost zmanjšala in je tok padel pod 1,8 mA, smo prestavili območje AM na 2 mA, s tem pa smo povečali občutljivost meritve.



Slika 14: Funkcijski generator

#### 6.3.4 Meritev električne prevodnosti

Naša osnovna naloga je bila oceniti, ali se je betonska mešanica med vezanjem obnašala stabilno ali pa je prišlo med tem v različnih slojih oziroma višinah kalupa do segregacije. Vse te spremembe bi se v meritvah pokazale kot skok ali padec prevodnosti v različnih višinah preskušanca. Ko smo namenoma segregirali betonsko mešanico, naj bi se v zgornji polovici oziroma proti vrhu kalupa zadrževala večja količina vode in veziva kot pa v spodnjem delu. To pomeni, da bi morala biti v zgornjem delu preskušanca električna prevodnost večja kot v spodnjem. Preden smo začeli z merjenjem upornosti v betonski mešanici, smo opravili preskus z vodo. Destilirana voda naj ne bi bila prevodna, ko pa ji dodamo sol, to postane. Mi smo v kalup nalili navadno pitno vodo in merili prevodnost, ki je bila enaka na vseh štirih elektrodah. Pozneje smo v to vodo dodali sol in viden je bil očiten skok prevodnosti v območju, kjer se je zadrževala višja koncentracija soli. Ta se je zviševala od vrha proti dnu, vzporedno s tem, ko se je sol počasi spuščala proti dnu kalupa.

Ko smo preskusili vso opremo, smo lahko začeli z glavnim delom. To je bilo merjenje električne prevodnosti skozi svežo mešanico samozgoščevalnega betona.

Najprej smo mešanico zmešali, preskusili, ali ima pravi razlez s posedom, da smo jo lahko vgradili v kalupe. Prve tri mešanice smo vgradili brez vibriranja, naslednje tri pa smo vibrirali z vibratorjem. Po vgraditvi smo priklopili preko medeninastih vijakov funkcijski generator in začeli z meritvami. Tok in napetost skozi posamezni par elektrod smo merili tako, da smo

preklapljali med posameznimi elektrodami. Med meritvami smo počakali 15 sekund. Pri samem preklapljanju si pomagamo s konektorjem (vtikačem), ki ga izmenično vtikamo v vtičnice, ki so povezane med posameznim parom elektrod. Te smo si predhodno označili s črkami A, B, C in D. Meritve smo najprej izvajali na vsaki dve minuti, pozneje pa na vsakih pet in deset minut. Med posameznimi sklopi meritve smo izključili elektrode iz konektorja, da medtem ne bi prihajalo do morebitnih vplivov toka na kemijske reakcije v mešanici.

Sama meritev je trajala okoli 400 minut, da pa smo lahko zaključili obliko grafa, s katerim smo ponazorili potek meritev, smo opravili še meritev po nekoliko daljšem času, običajno po 14 - 18 urah po končanem prvem delu meritev (400 min). Ko smo opravili z meritvami in smo imeli na voljo podatke za nadaljnjo obdelavo, smo morali izračunati še prevodnost.

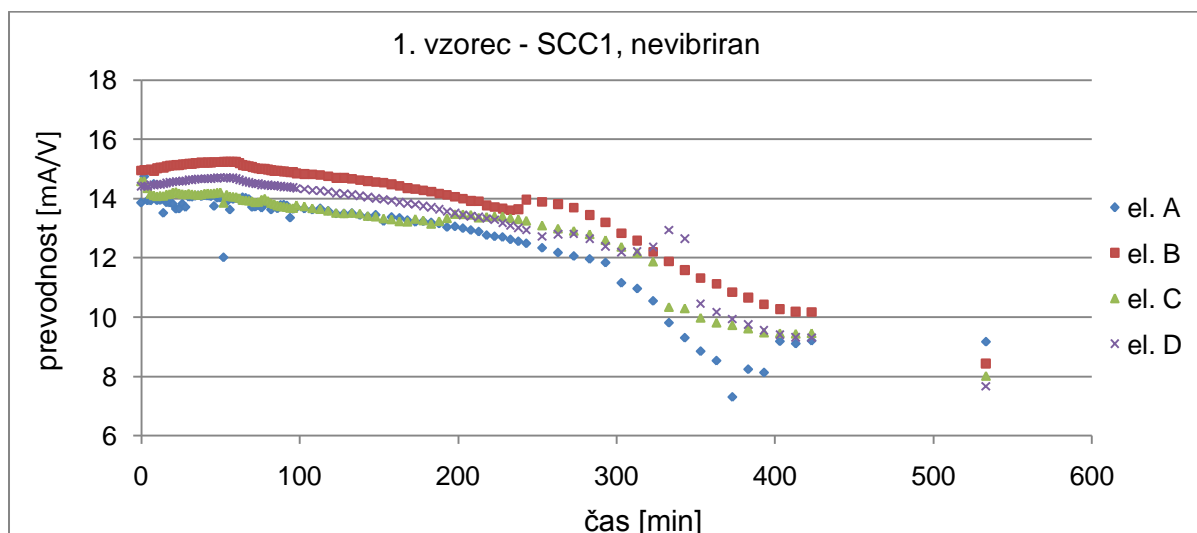
Imeli smo podatke o napetosti (U), enota [V] in toku (I), enota [mA], izračunali smo prevodnost [mA/V]. Upornost (R) je  $R=U/I$ , prevodnost pa je obratno sorazmerna upornosti ( $1/R=I/U$ ), enota [mA/V] in zato je prevodnost napetost (U)/ tok (I). Po opravljenem preračunavanju smo izrisali še graf električne prevodnosti v odvisnosti od časa.



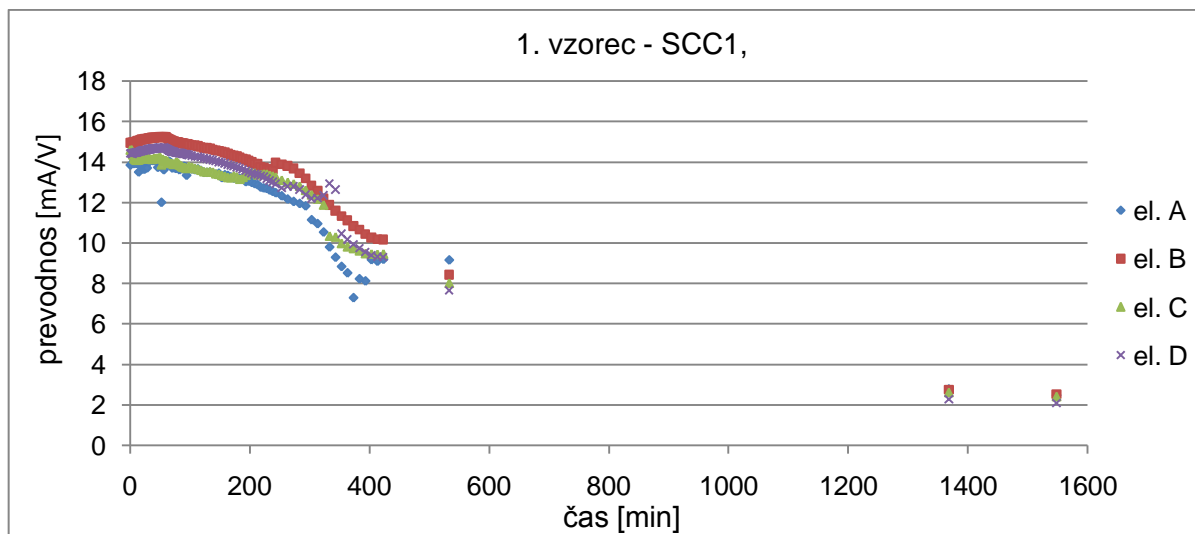
Slika 15: Meritve električne prevodnosti v laboratoriju

### 6.3.5 Meritve prevodnosti posameznih vzorcev

Po opisanem postopku za mešanje samozgoščevalnih betonov smo zamešali mešanico in jo vgradili v kalup. To je bila mešanica z drobljenim apnenčevim agregatom in v/c razmerjem 0,43. Ko smo spojili funkcijski generator in elektrode ter dobro privili vijake, smo začeli z merjenjem. Po višini smo imeli štiri elektrode z oznakami od spodaj navzgor A, B, C in D. Med posameznimi elektrodami smo preklapljali v razmaku 15 sekund in potem naredili premor do naslednje meritve. Na začetku smo merili v razmaku dveh minut, to je trajalo okoli 100 minut, potem smo naslednjih 140 minut merili v presledkih pet 5 minut in potem do konca meritve v razmakh deset minut. Vse podatke smo zapisali, pozneje pa jih uporabili za izračun končne prevodnosti. Po obdelavi vseh podatkov smo izrisali graf.



Grafikon 1: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



Grafikon 2: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

Kot je razvidno iz grafikona, je prevodnost nekaj časa po vgraditvi betonske mešanice rahlo naraščala, potem pa je začela enakomerno padati. Ko je betonska mešanica v svežem stanju, je koncentracija ionov večja zaradi tega, ker prihaja do raztapljanja klinkerskih mineralov, pri tem pa se je upor skozi mešanico manjšal, kar pomeni, da je električna prevodnost naraščala. Vendar se to dogaja samo do neke točke, kjer pride do obrata. V neki točki pride do začetka vezanja cementa, kar pomeni, da se začne v mešanici večati hidratizirano območje. Pri tem pa prihaja do zmanjševanja deleža votlin in s tem tudi gibljivost ionov skozi raztopino v teh votlinah. Iz tega sledi, da se znižuje tudi električna prevodnost. Ta se s časom niža, vendar zaradi tega, ker del cementa nikoli ne hidratizira in je v strjenem betonu še vedno neka količina por z vodo, je tudi neka prevodnost v manjši količini vedno prisotna.

Pri prvem vzorcu vidimo, da je prevodnost približno enaka na vseh štirih višinah, na katerih smo jo spremljali. To pomeni, da smo vgradili homogeno mešanico, ki je ostala stabilna tudi med samim vezanjem in ni segregirala. Med meritvijo je sicer prišlo do manjših odstopanj, to je opazno predvsem pri elektrodi A na dnu vzorca, vendar je to lahko posledica slabega stika med elektrodo in betonom, ki nastane med vezanjem in strjevanjem betona, na primer zaradi prisotnosti zračnega žepa. V splošnem pa je pokazala prva mešanica samozgoščevalnega betona visoko stopnjo stabilnosti.

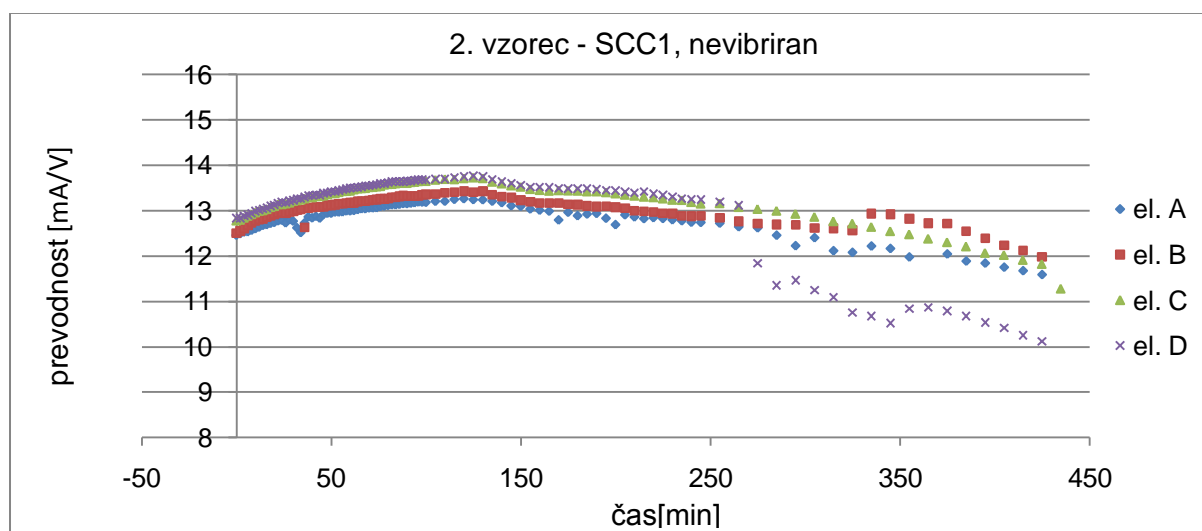
Po opravljenih preizkusih električne prevodnosti na vzorcih smo počakali 28 dni in vzorce nato prerežali na polovico po višini, zato da smo lahko opravili še vizualno oceno in to primerjali z rezultati, ki smo jih dobili pri meritvah. Pri vsakem preizkušanju vzorcev, ki ga opravimo v laboratoriju, moramo opraviti praviloma vsaj tri vzporedne preiskave, da lahko

potem med seboj primerjamo dobljene rezultate. Tako smo tudi mi opravili po tri preizkuse za vsako mešanico.

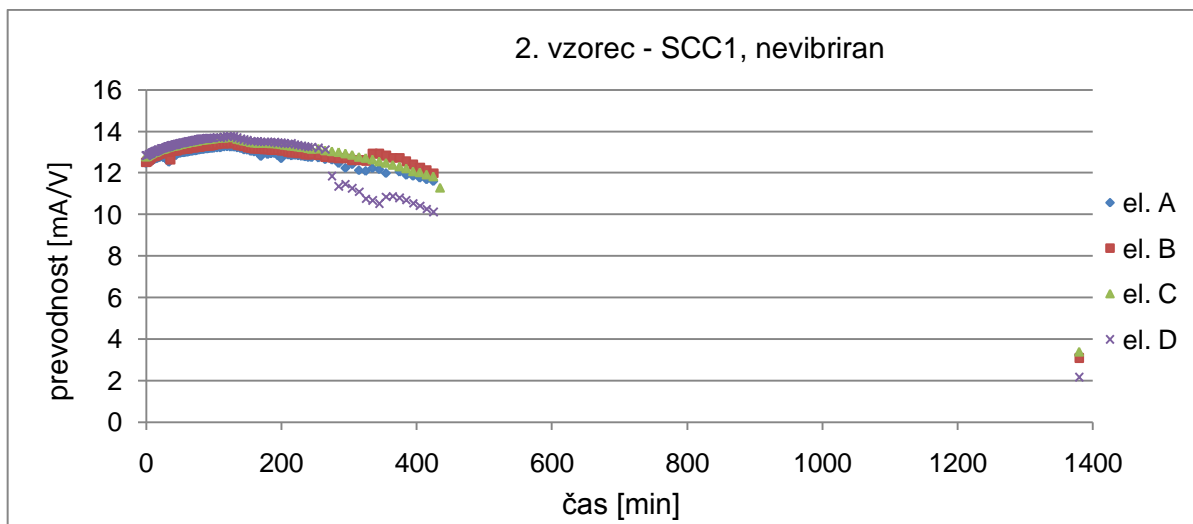


Slika 16: Vizualna ocena stabilnosti 1. vzorca

Ko smo prerezali vzorce, smo lahko opravili vizualno oceno. Kot vidimo pri prvem vzorcu, je prisotnih večje število zračnih žepkov, kar pomeni, da se mešanica med samo vgradnjo ni povsem zgostila, razporeditev delcev agregata pa je zelo enakomerna in zato lahko rečemo, da je mešanica stabilna.



Grafikon 3: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



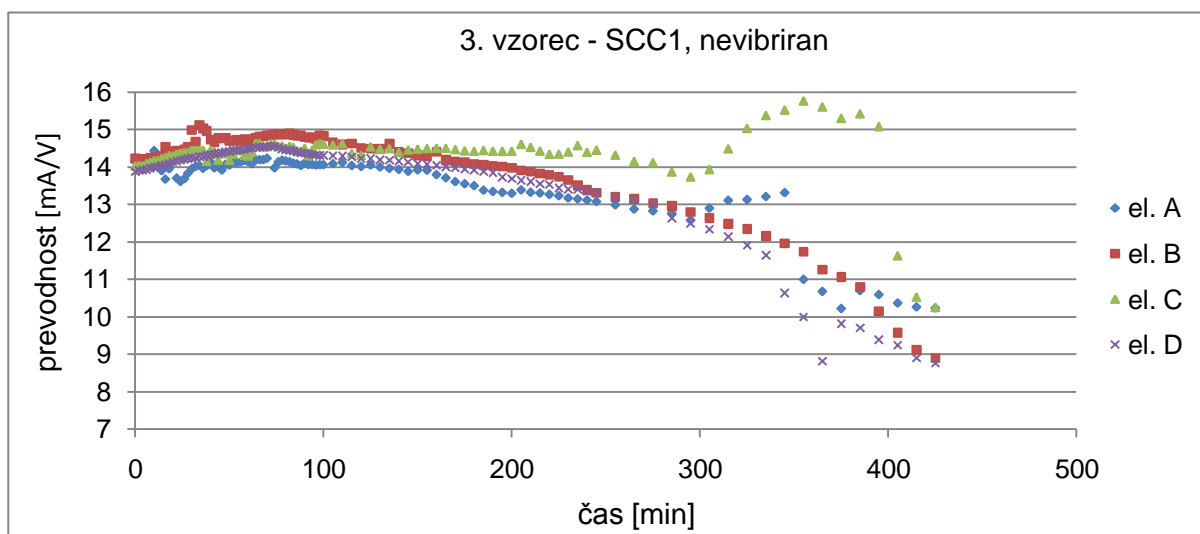
Grafikon 4: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min



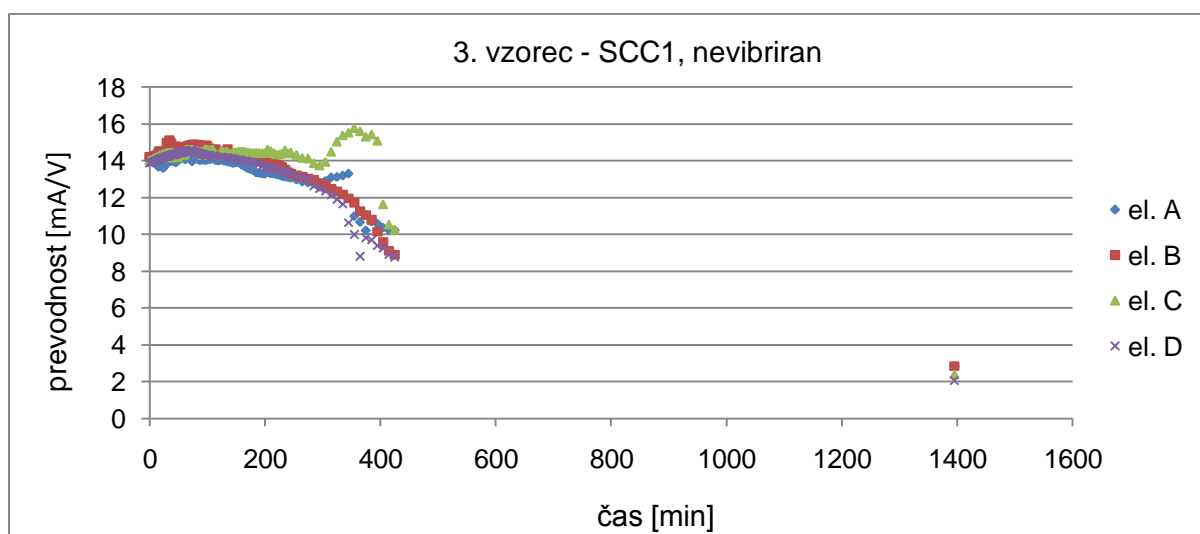
Slika 17: Vizualna ocena stabilnosti 2. vzorca

Pri drugem vzorcu nam grafikon kaže dokaj stabilno obnašanje, tudi pri vizualni oceni je videti, da ni ostalo prisotnih dosti zračnih žepkov, kar pomeni, da je zgostitev potekala normalno. Delci večjega agregata so malo več prisotni v spodnjem delu vzorca.





Grafikon 5: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min

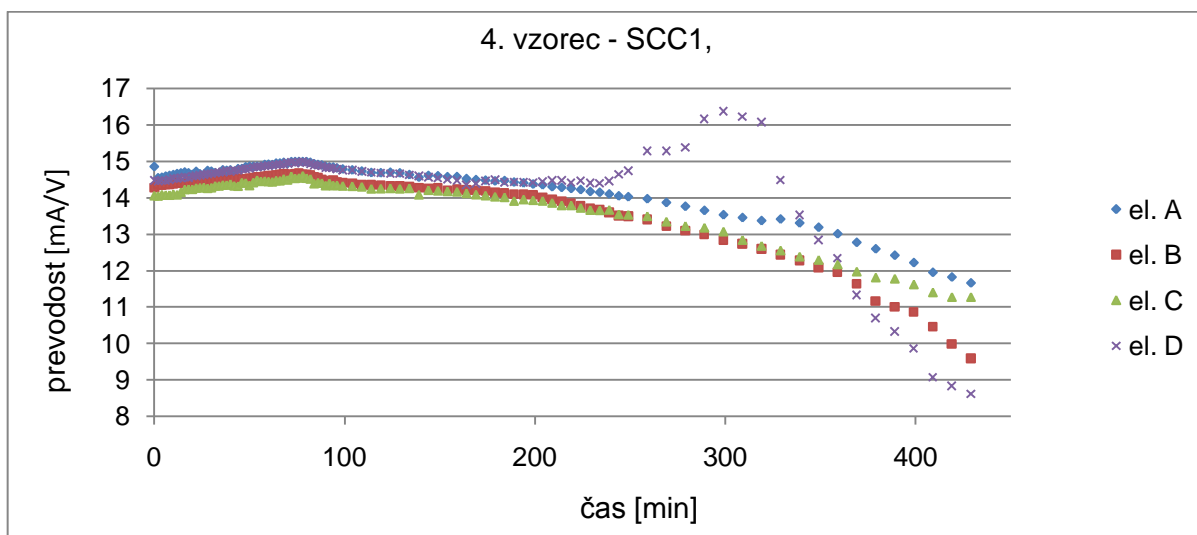


Grafikon 6: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

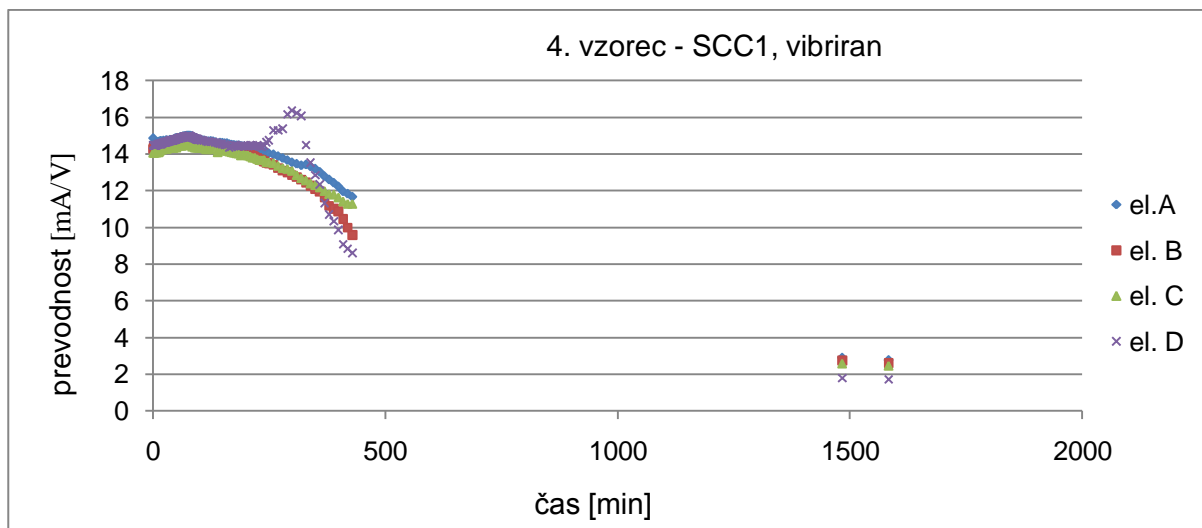


Slika 18: Vizualna ocena stabilnosti 3. Vzorca

Pri tretjem vzorcu je spet prisotnih nekoliko več zračnih žepkov, vendar je mešanica dokaj homogena. Med samo meritvijo je prišlo do nekoliko večjega skoka pri elektrodi C. Pri vizualni oceni v področju elektrode C ni zaznati večjega odstopanja od homogenosti preostalega vzorca. Zaznali smo sicer območje, kjer se je lokalno izcejala voda. Ker pa se je skok v električni prevodnosti zgodil po koncu vezanja betona, izcejanje vode ne more biti razlog za tak rezultat meritev na elektrodi C.



Grafikon 7: Električna prevodnost skozi beto v časovnem obdobju 500 min

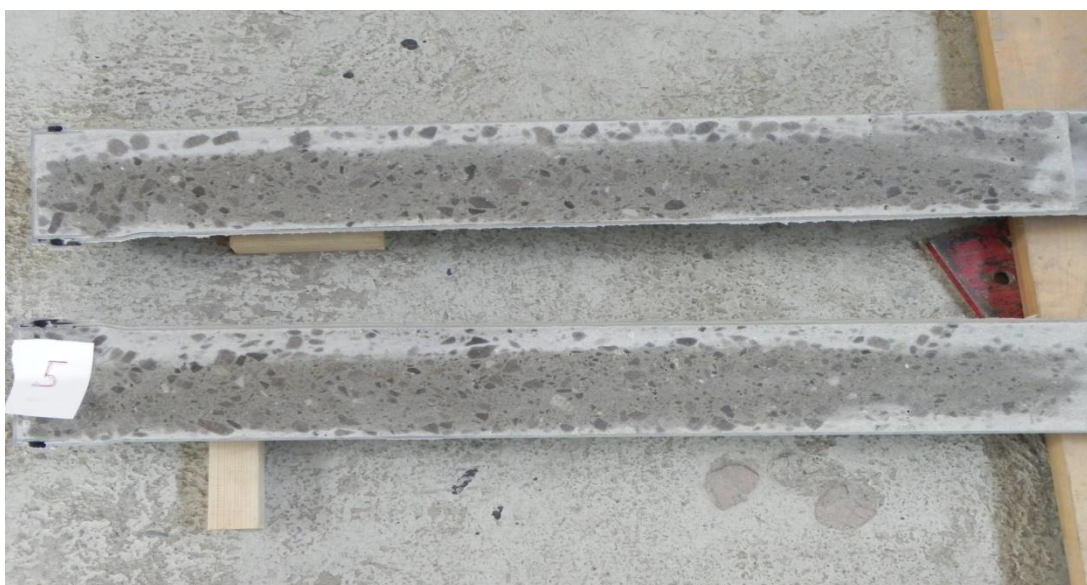


Grafikon 8: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

Tudi pri četrtem vzorcu je prišlo do večjega skoka pri elektrodi D, kar si ne znamo pojasniti. Prišlo je tudi do nekaterih težav med samim merjenjem, saj naj bi se vrednosti napetosti in toka, ki smo jih spremljali na funkcijskem generatorju, umirile po 10 - 15 sekundah, vendar se to ni zgodilo. Predvsem odčitavanje napetosti je bilo nekaj minut skoraj nemogoče, saj se je vrednost te nenehno spreminjala in skakala. Zato je morda kot posledica tega dogajanja viden na grafikonu kot večji skok v prevodnosti. Vzorec 4 smo pred samo meritvijo tudi z vibrirali z vibracijsko iglo. Pri vizualni oceni vzorca je vidno po celotni višini vzorca, da je prišlo v sredinskem delu zaradi vibracijske igle, ki smo jo potisnili med vibriranjem v vzorec, do ločevanja grobih in drobnih delcev. Je pa zaradi vibriranja prisotnih manj zračnih žepkov, ki smo jih izločili s samim vibriranjem. Opazili smo tudi rahlo izcejanje vode, ki pa spet ni vzrok skoka, saj se je ta zgodil po samem koncu vezanja betona.

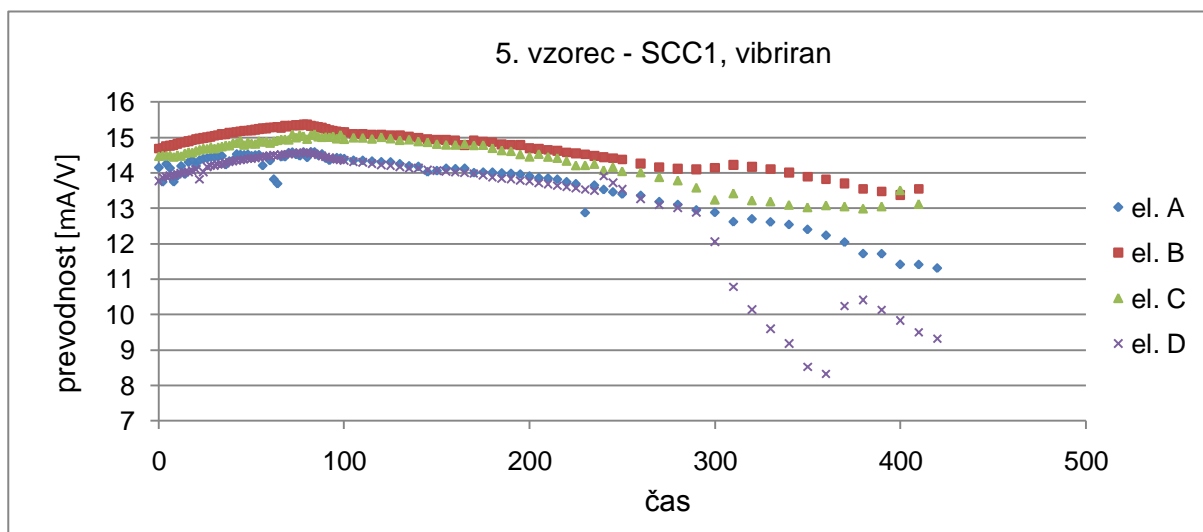


Slika 19: Vizualna ocena stabilnosti 4. vzorca

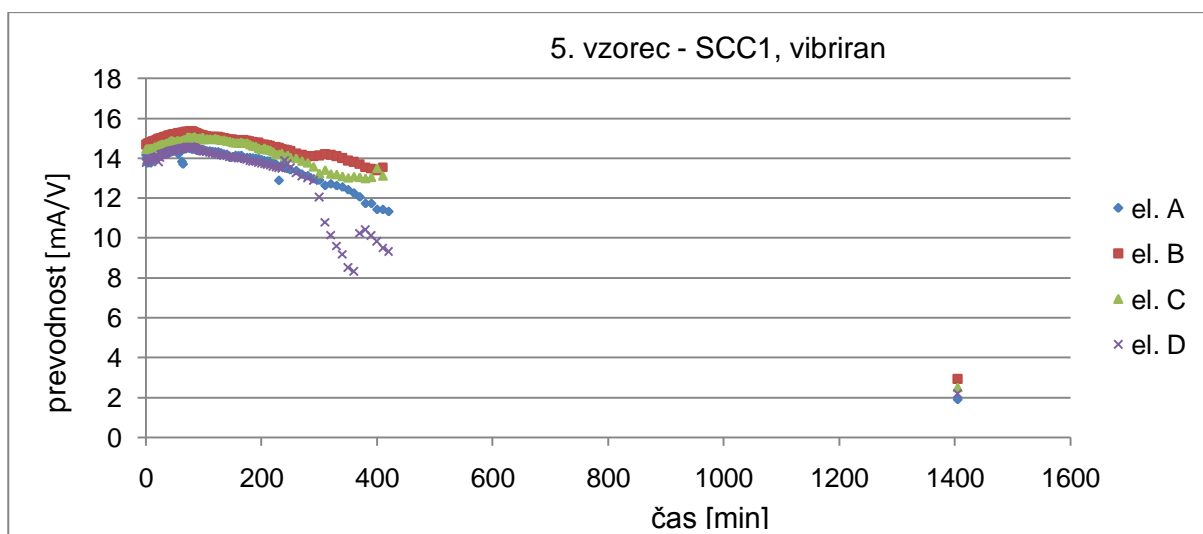


Slika 20: Vizualna ocena stabilnosti 5. vzorca

Vzorec pet smo spet vibrirali z vibracijsko iglo pred samo meritvijo prevodnosti. Meritev prevodnosti je pokazala dokaj stabilno obnašanje, je pa tudi pri tem vzorcu videti nehomogenost pri vizualni oceni. Pri vseh vzorcih, ki smo jih vibrirali, je vidno, da smo z vibriranjem odstranili večji del zračnih žepkov, vendar pa s tem povzročili segregacijo in nestabilno mešanico.



Grafikon 9: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min

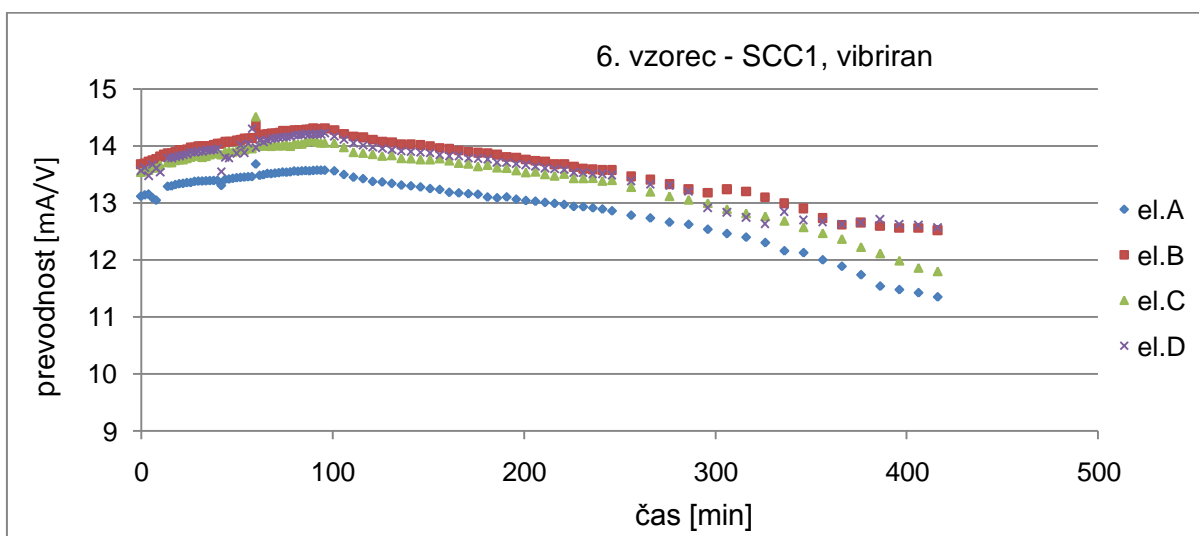


Grafikon 10: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

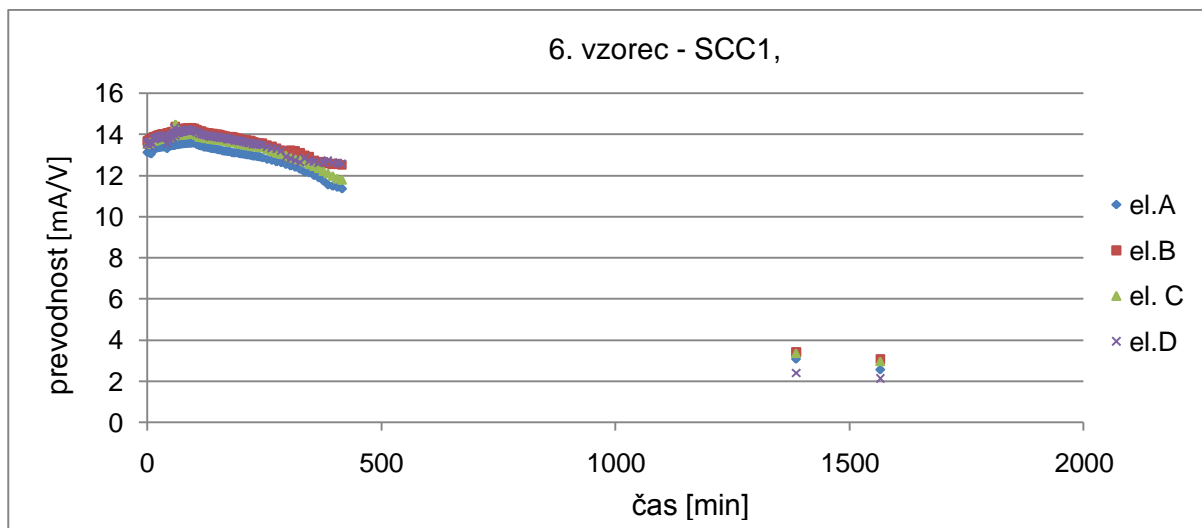
Tudi pri 6 vzorcu je vidna nehomogenost zaradi vibriranja z iglo. Večji delci agregata se nahajajo ob robu, na sredini pa so bolj prisotna drobna zrna agregata.



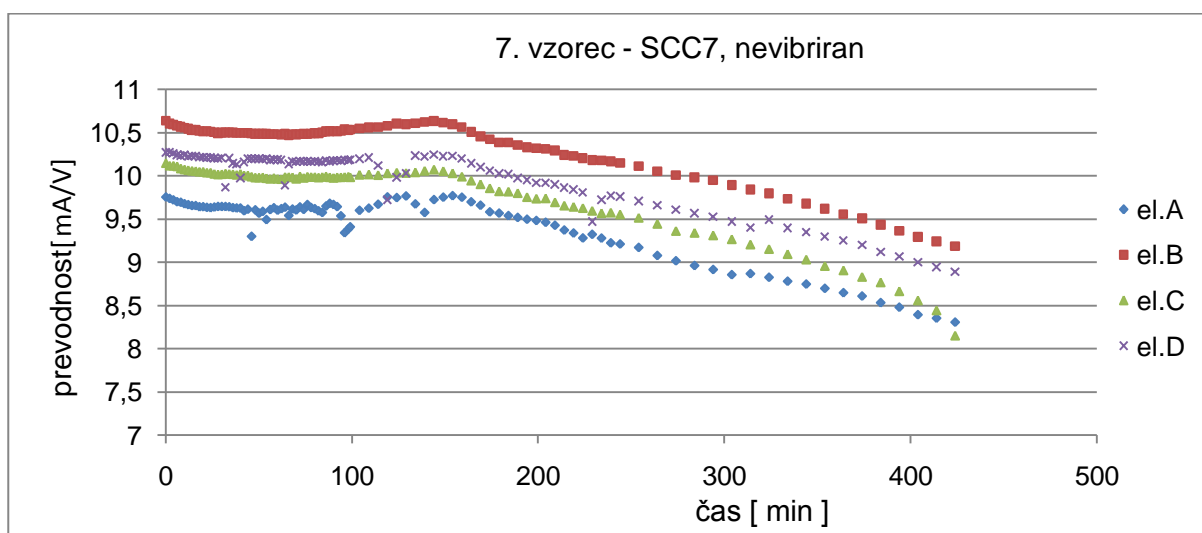
Slika 21: Vizualna ocena stabilnosti 6. vzorca



Grafikon 11: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



Grafikon 12: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

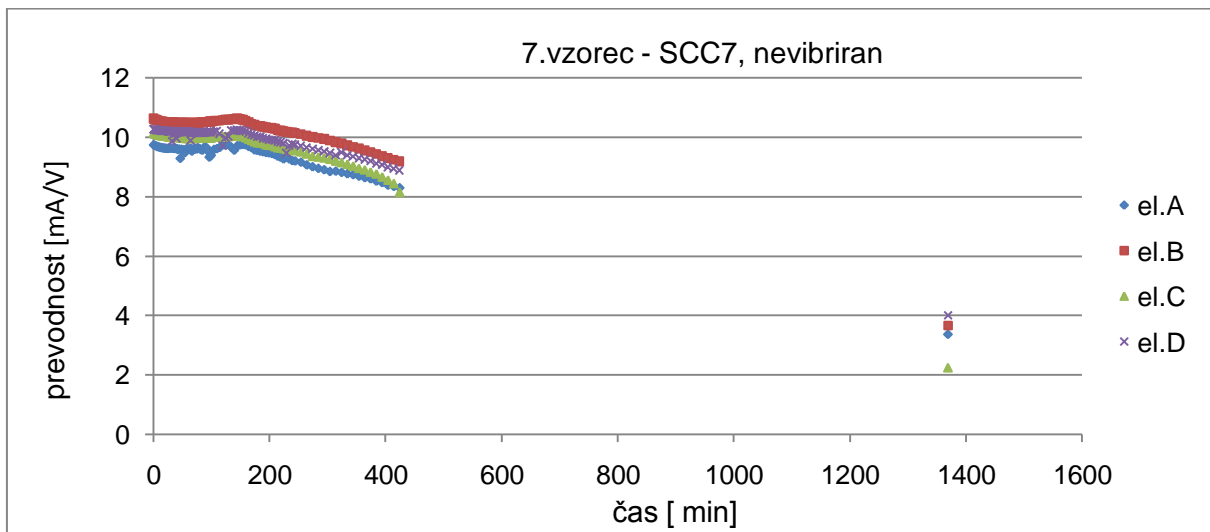


Grafikon 13: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min

Naslednji vzorci od 7 do 12 so izdelani iz rečnega proda. Vzorca 7 in 8 sta nevibrirana. Pri sedmem in tudi osmem vzorcu, je pri sami meritvi električne prevodnosti videti dokaj stabilno obnašanje sveže mešanice. Pri vizualni oceni je sicer opaziti nekaj zračnih žepkov, vendar je sama homogenost dobra. Zato lahko rečemo, da sta ta dva vzorca dosegla visoko stopnjo stabilnosti.



Slika 22: Vizualna ocena stabilnosti 7. vzorca

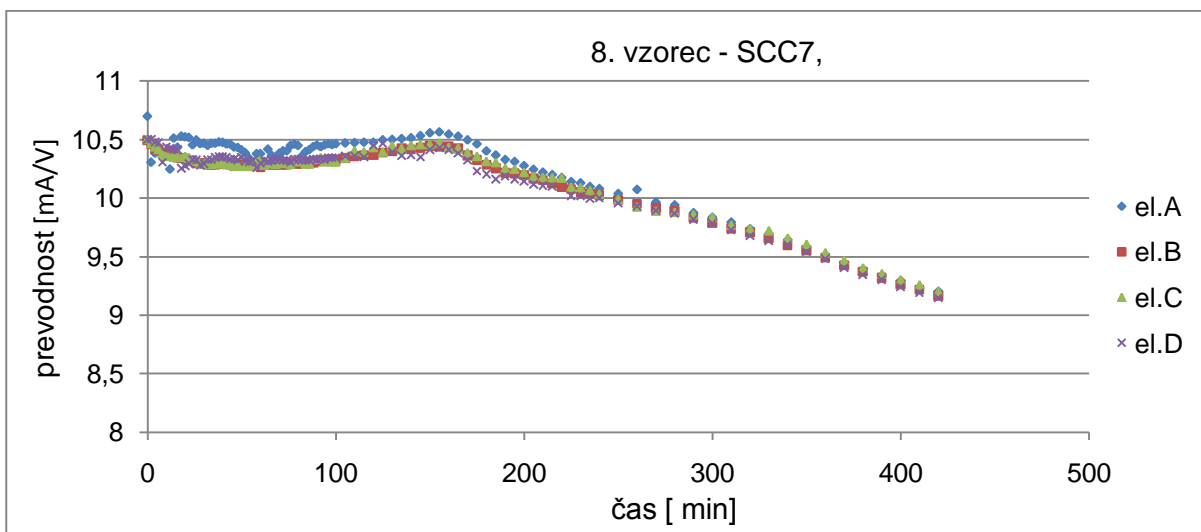


Grafikon 14: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

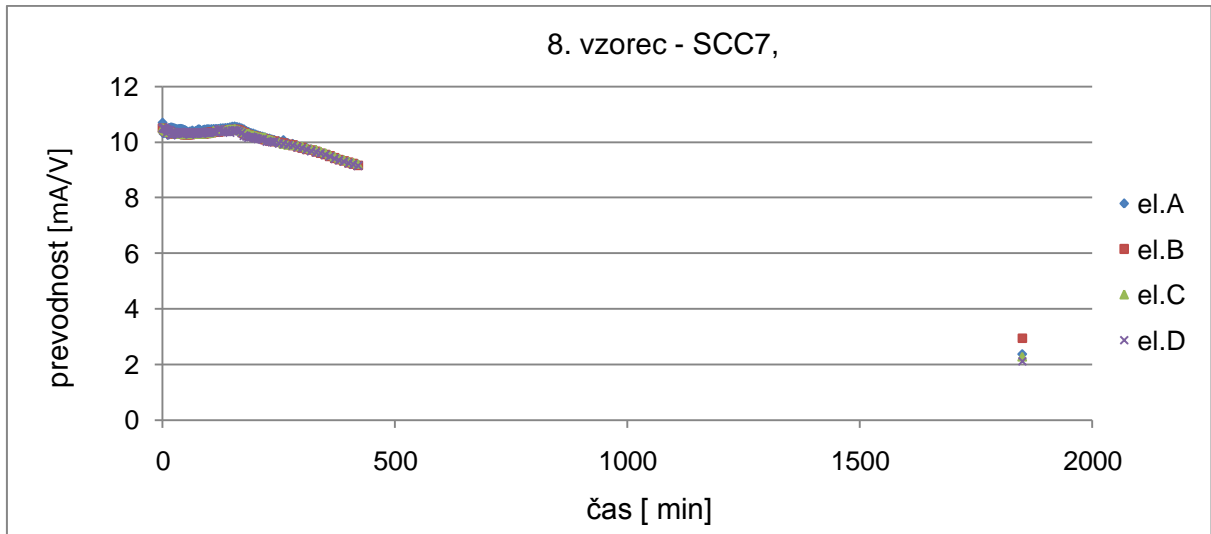




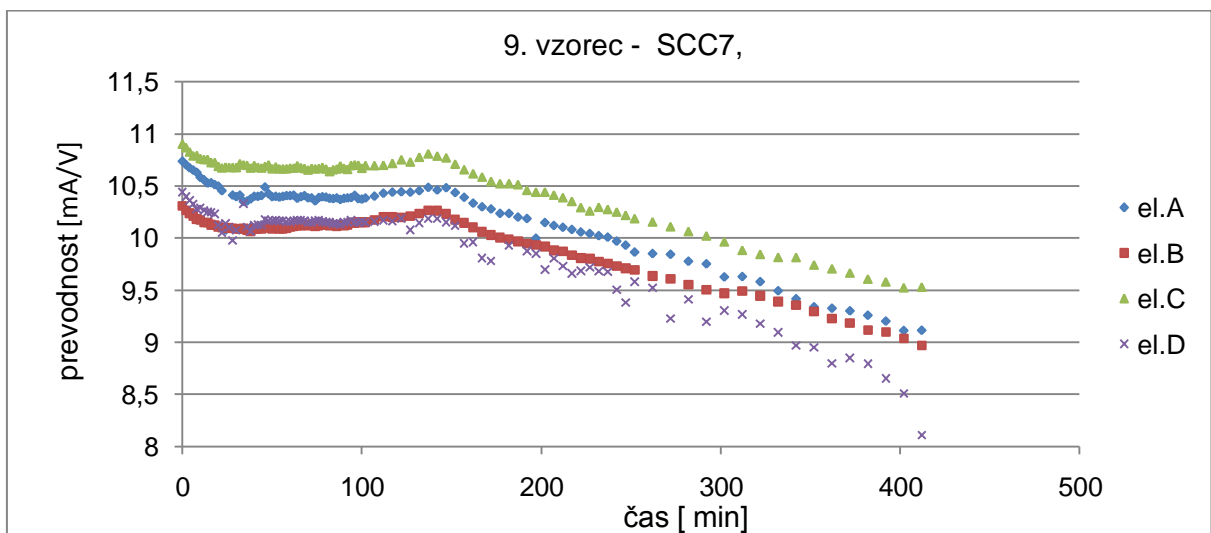
Slika 23: Vizualna ocena stabilnosti 8. vzorca



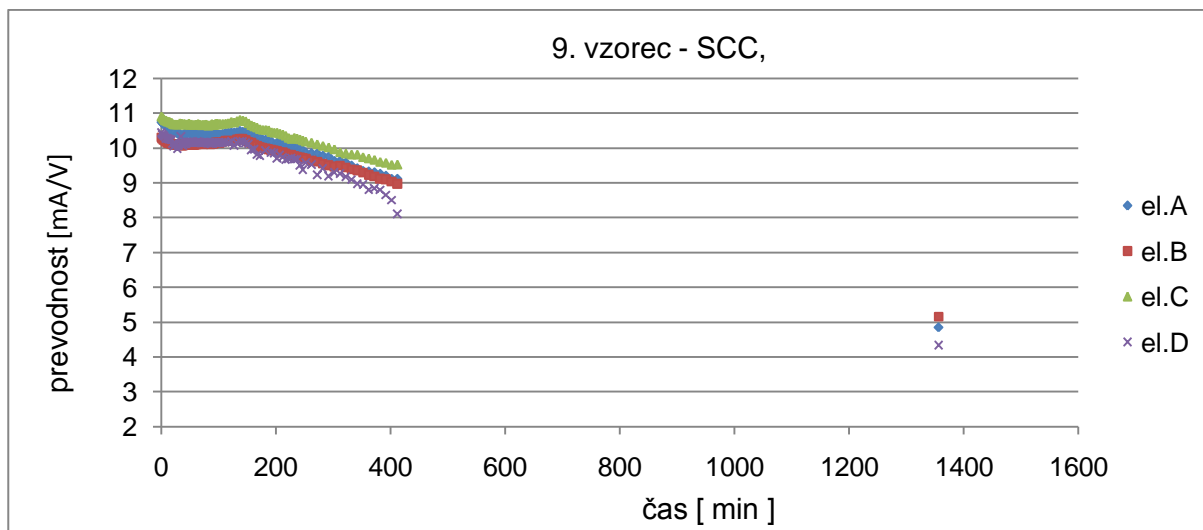
Grafikon 15: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



Grafikon 16: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min



Grafikon 17: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min

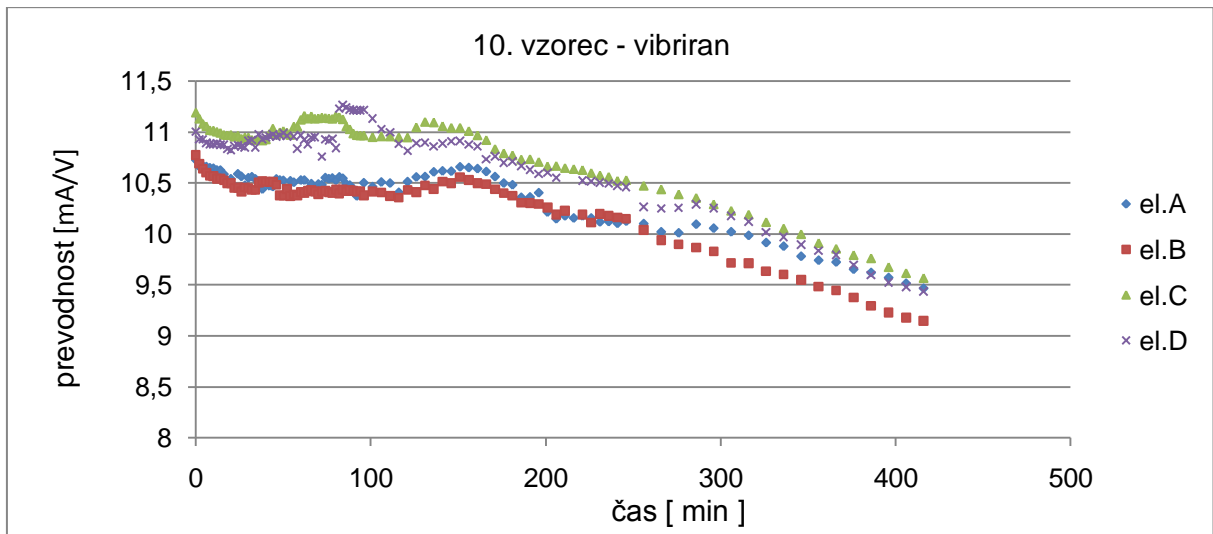


Grafikon 18: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min

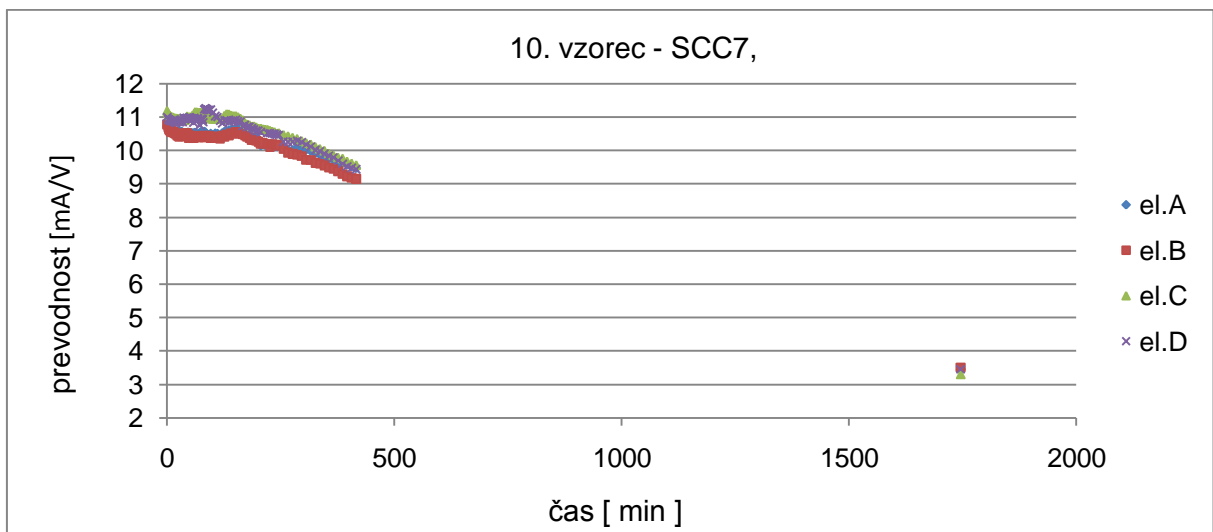


Slika 24: Vizualna ocena stabilnosti 9. vzorca

Vzorci 9, 10 in 11 smo pred meritvijo z vibrirali. Spet so meritve električne prevodnosti pri vseh treh pokazale stabilno obnašanje, vendar je vizualna ocena pokazala, da je zaradi vibriranja prišlo do segregacije vzdolž celotnih vzorcev. Ob strani so znova grobi delci, na sredini pa so bolj drobni delci agregata. Tudi pri teh treh vzorcih ni opaziti večjih zračnih žepkov, ki smo jih izločili s samim vibriranjem. Pri vzorcu 9 vidimo, da je prišlo do preloma v zgornjem delu, vendar se je to zgodilo med samim rezanjem vzorca.



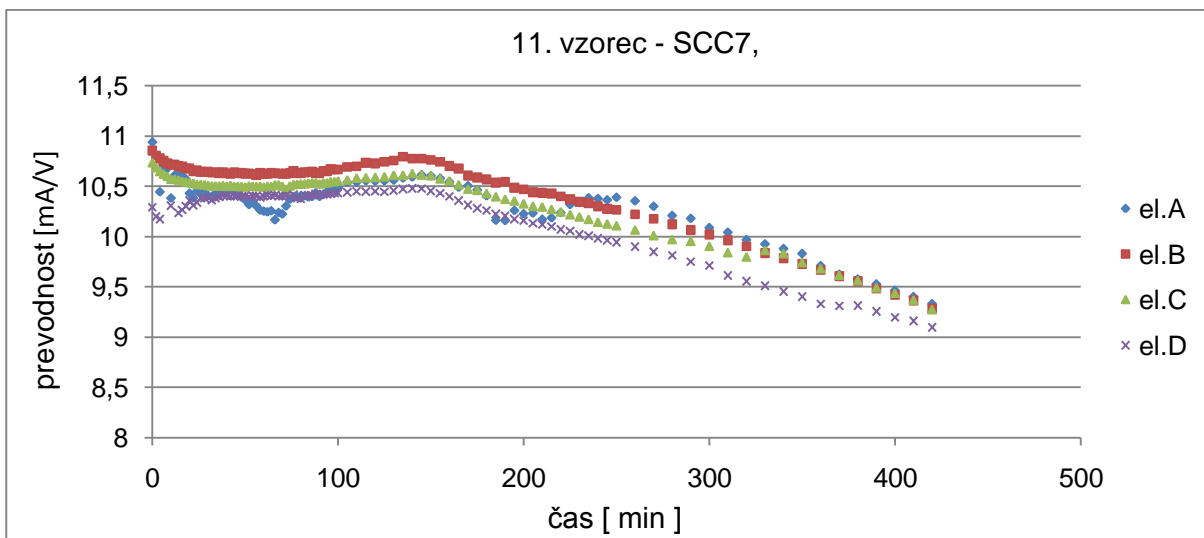
Grafikon 19: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



Grafikon 20: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 1600 min



Slika 25: Vizualna ocena stabilnosti 10. vzorca



Grafikon 21: Električna prevodnost skozi beton v časovnem obdobju 500 min



Slika 26: Vizualna ocena stabilnosti 11. vzorca

### 6.3.6 Tlačna trdnost strjenega betona

Tlačno trdnost strjenega betona smo preverjali na standardnih kockah dimenzije 15x15x15 cm. Same mešanice posameznih vzorcev so enake kot pri preizkusu z metodo električne prevodnosti, saj smo kocke za preizkus tlačne trdnosti napolnili z isto mešanico kot kalupe za izvajanje preizkusov električne prevodnosti. Preden smo svež beton vgradili v kocke, smo preverili razlez. Če je bilo vse v redu, smo beton vgradili v pripravljene kocke, ki pa smo jih prej dobro očiščene namazali z oljem, s čimer smo preprečili, da se beton sprime s steno kalupa. Za vsako mešanico smo naredili tri vzorce, vse skupaj pa smo naredili 11 mešanic, vsak dan po eno. Po vgraditvi vzorcev v kocke, smo te pustili 24 ur vezati in strjevati, potem pa smo jih razkalupili, označili in jih dali v vodo. V vodi pri 20 °C smo jih pustili 28 dni. Po 28 dneh smo jih vzeli iz vode, površinsko obrisali, izmerili točne dimenzije in stehali. Sledil je tlačni preizkus. Preizkus smo izvajali na preši, na kateri smo obremenjevali preizkušane do porušitve. Pri tem smo dobili potrebno porušno silo, to je silo, ki je potrebna za porušitev preizkušanca. Tlačno trdnost betona smo izračunali po izrazu:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \text{ enota [MN/m}^2\text{], ali [MPa], pri čemer je:}$$

$f_c$  – tlačna trdnost betona

$F$  – izmerjena največja tlačna sila

$A_c$  – površina vodoravnega prereza preizkušanca

Preglednica 8: Tlačna trdnost kock

VZOREC SCC1	K1	K2	K3	K4	K5	K6				
TL. TRDNOST (MPa)	65,6	69,4	71,2	69,8	65,6	63,1				
VZOREC SCC1	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13			
TL. TRDNOST (MPa)	65,9	63,9	70,2	65,4	67,9	63,6	67,6			
VZOREC SCC7	K14	K15	K16	K17	K18	K19				
TL. TRDNOST (MPa)	58,8	60,4	56,9	53,2	55,7	55,7				
VZOREC SCC7	K20	K21	K22	K23	K24	K25	K26	K27	K28	
TL. TRDNOST (MPa)	55,9	58,4	52,1	54,9	53,6	51,1	52,6	55,9	58,8	

Ko primerjamo rezultate v preglednici 8, vidimo, da znotraj posamezne mešanice ni velikih razlik. Tlačna trdnost 28 dni starega betona SCC1 se giblje od 65 do 70 MPa. Razlika pa se pojavi, če primerjamo SCC1 in SCC7, kjer pa se tlačna trdnost 28 dni starega betona giblje od 53 do 58 MPa. Primerjava nam pokaže, da beton, ki je izdelan iz drobljenega apnenčevega agregata, dosega veliko večjo tlačno trdnost kot beton, ki vsebuje naravni rečni prod.

Če primerjamo lastne preiskave tlačne trdnosti na samozgoščevalnih betonih, ki smo jih opravili, s preiskavami tlačne trdnosti na navadnih betonih, vidimo, da je zaradi specifičnih lastnosti, ki jih imajo samozgoščevalni betoni, ta primerjava težka. Zaradi zmožnosti zapolnjevanja, ki jo imajo samozgoščevalni betoni, so dobljene tlačne trdnosti v splošnem višje kot pri ostalih običajnih betonih.



Slika 27: Preiskovanje tlačne trdnosti betona v preši - porušitev

### 6.3.7 Čas začetka in konca vezanja

Namen preiskave je bil določiti začetek in konec vezanja, to je čas, v katerem se začne in konča sprememba agregatnega stanja cementne paste. Ta proces poteka nekaj ur, medtem ko je proces strjevanja cementnega kamna dolgotrajen postopek in traja tudi več let.

Preden smo začeli sam preizkus, smo pripravili vso opremo, ki jo bomo potrebovali. To so standardne kocke dimenzij 15x15x15 cm, ki smo jih pred tem namazali z oljem, da ne bi pozneje prišlo do sprijema med samozgoščevalnim betonom in stranicami kalupa v obliki kocke, v katero vgradimo beton. Kot opremo za samo preizkušanje vezanja smo imeli penetrometer, s katerim merimo silo pri vtiskanju v beton. Penetrometer meri silo vtiska v Newton-ih [N], in sicer od 0 – 600 N. Ko smo imeli vse pripravljeno, smo zamešali mešanico. Po mešanju smo napolnili pripravljene kocke z betonom. Zamešali smo dve različni mešanici, in sicer samozgoščevalni beton z drobljenim apnencem in pa še mešanico samozgoščevalnega betona z naravnim rečnim prodrom, obe mešanici z v/c razmerjem 0,43. Pri tem smo napolnili po tri kocke za vsako od mešanic. Sam čas vezanja se začne takoj po tem, ko zamešamo cement in vodo. S samim postopkom meritev smo počakali še okoli dve uri, saj je pri teh betonih pričakovati začetek vezanja okoli dve do tri ure po sami pripravi



mešanice. Zgoščevanja z vibriranjem pri tem nismo uporabili, saj pri samozgoščevalnih betonih ni potrebno. Potem ko je pretekel ta začetni čas, smo začeli s penetrometrom vtiskati v beton. Vtiskali smo do globine označene na sami igli, to je 25 mm in v času deset sekund. Začeli smo z iglo premera 14 mm, kjer smo izmerili odpor 570 N (Newton). Ko dosežemo odpor igle 500-600 N, pomeni, da zamenjamo iglo z manjšim premerom. Igle smo vtiskali tako, da smo pazili na razdaljo med posameznimi vtiski. Ta ne sme biti manjša kot 25 mm od roba kalupa do mesta vtiskanja, med posameznimi mesti vtiskanja smo pazili na razdaljo, ki je dva premera igle oziroma ne manj kot 15 mm.



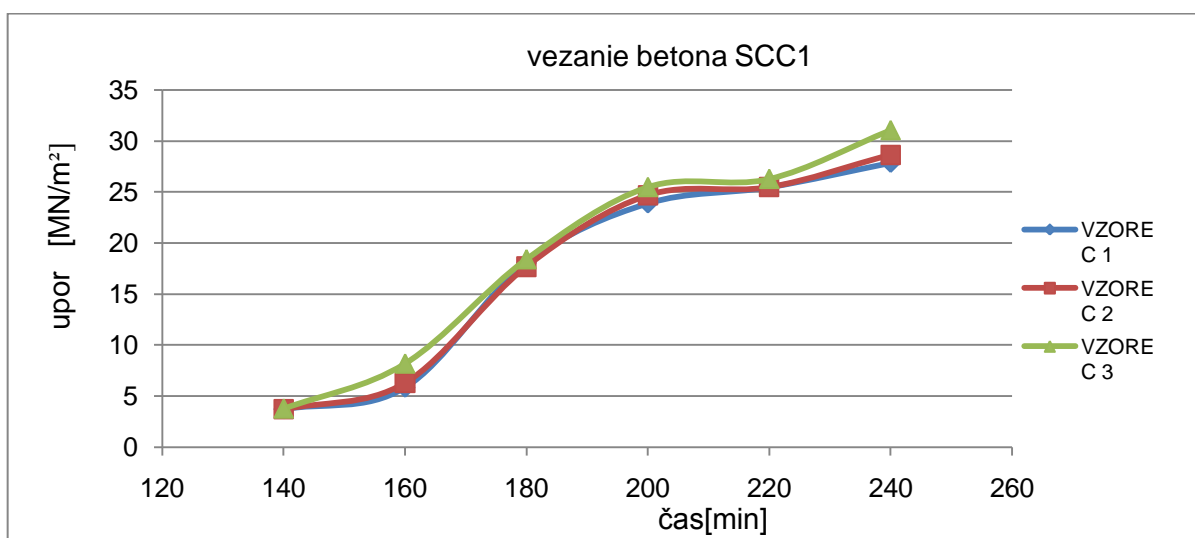
Slika 28: Merjenje vezanja z vtiskanjem



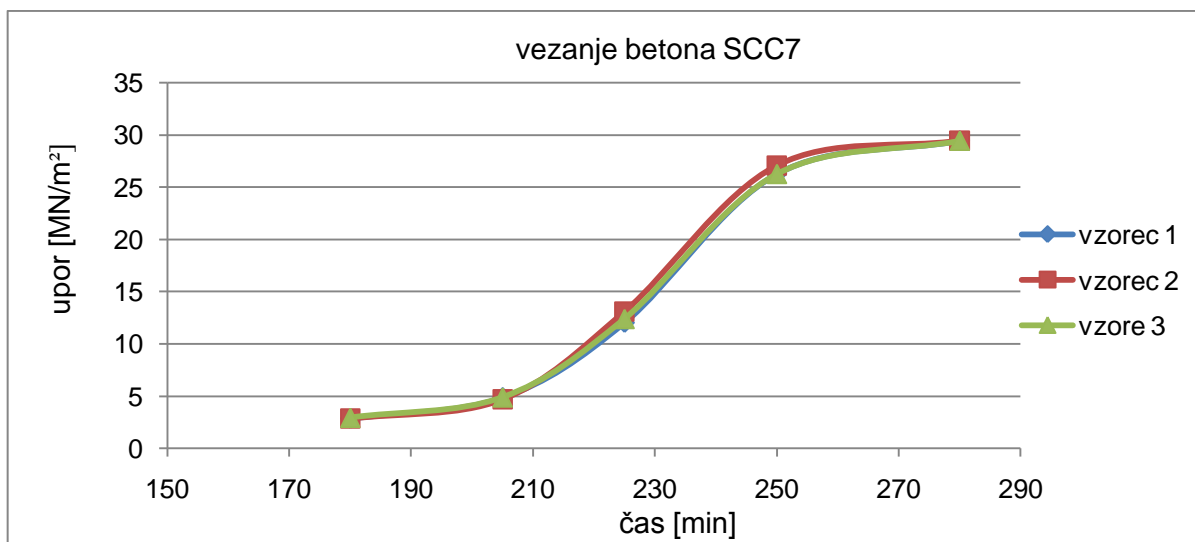
Slika 29: Penetrometer z iglami

Med posameznimi meritvami smo počakali 20 min, na koncu pa lahko ta čas še zmanjšujemo, da dobimo točen čas konca vezanja. Same meritve smo vzporedno izvajali pri obeh vrstah mešanice in vseh šestih pripravljenih vzorcih. Začetek vezanja je, ko dosežemo  $3,5 \text{ MN/m}^2$ , konec vezanja pa je pri  $28 \text{ MN/m}^2$ . Te rezultate smo dobili tako, da smo silo, ki smo jo izmerili s penetrometrom, delili s presekom igle, s katero smo vtiskali v beton. Rezultat vezanja je prikazan v grafikonu. Kot lahko vidimo na grafikonu, se je vezanje začelo pri mešanici, v kateri je drobljeni agregat (SCC1) dosti prej, kot pri mešanici z rečnim prodrom (SCC7). V mešanici SCC1 se je vezanje začelo pri 140 minutah in je trajalo do okoli 240.

minute, v mešanici SCC7 pa se je vezanje začelo malo pozneje, to je okoli 180. minute, in je trajalo do približno 280. minute. To pomeni, da je vezanje v eni in drugi mešanici trajalo okoli 100 minut, razlika med njima pa je, da se je vezanje pri mešanici SCC1 začelo nekoliko prej kot pa pri mešanici SCC7. Znotraj posameznih vzorcev iste mešanice se rezultati niso bistveno razlikovali. Tako lahko pridemo do zaključka, da je pri enakem v/c razmerju, vendar drugačnem agregatu čas vezanja enak, ampak z različnim začetkom in koncem vezanja.



Grafikon 22: Začetek in konec vezanja SCC1 samozgoščevalnega betona



Grafikon 23: Začetek in konec vezanja SCC7 samozgoščevalnega betona

## ZAKLJUČEK:

Na podlagi raziskav z metodo električne prevodnosti smo prišli do rezultatov, ki smo jih lahko primerjali med seboj. Pri uporabi drobljenega apnenčevega agregata vidimo, da je prevodnost začela naraščati takoj po vgraditvi mešanice v kalupe, medtem ko je pri mešanici, v kateri je bil naravni prod, prevodnost od začetka nekoliko padala in šele pozneje začela naraščati. To se je dogajalo tako pri homogeno vgrajeni kot tudi pri vibrirani mešanici.

Stabilnost vgrajenih vzorcev je bila odvisna od tega, ali smo vzorce pred začetkom vibrirali ali ne. Z vizualno oceno na strjenih vzorcih, ki smo jih prerezali na polovico po dolžini, je bilo videti, da je pri vseh teh vzorcih prišlo do ločevanja grobih in drobnih delcev. Grobi delci so bili ob robu sten, medtem ko so bili drobnejši delci na sredini, kjer je potekalo vibriranje. Skokov prevodnosti, ki so nastajali med meritvijo, predvsem pri elektrodi C pri vzorcu 3 in elektrodi D pri vzorcu 4, si zaenkrat ne znamo razložiti. Pri vizualni oceni teh vzorcev je videti, da je prišlo do rahlega izcejanja vode. Vendar so se skoki prevodnosti zgodili v času, ko se je samo vezanje betona že končalo. Ko pa je beton že v trdnem agregatnem stanju, do skokov zaradi izcejanja vode ne prihaja več, saj se je voda izcejala prej. Po koncu vezanja je v betonu še prisotna voda, vendar ne v tako velikem obsegu, da bi lahko povzročala tako nenadne skoke. Zato ne moremo trditi, da so se skoki zgodili zaradi izcejanja vode. Med samimi meritvami je prihajalo tudi do nepojasnjenih nihanj, ker je bilo težko odčitati napetost na funkcijskem generatorju, saj se skoki nikakor niso hoteli umiriti. Vzrok teh skokov bi lahko bil tehnične narave. Prav tako se pri 5. vzorcu zgodil skok navzdol, in sicer po koncu vezanja betona, tako da je tudi ta skok težko pojasniti. Razloge za skoke med meritvami bi bilo mogoče lažje razložiti, če bi poleg merjenja električne prevodnosti vzporedno opravljali še meritve z ultrazvokom, kjer bi v višini elektrod naredili dodatne odprtine, preko katerih bi izvajali meritve z ultrazvokom, s katerimi bi lahko določili tudi začetek in konec vezanja betona. Tako bi imeli na voljo še en podatek več, s katerim bi bilo lažje ugotoviti razloge za same skoke pri prevodnosti vzorcev.

Pri določanju začetka in konca vezanja betonskih mešanic vidimo, da se pri drobljenem apnenčevem agregatu vezanje začne pri 140. minuti in traja okoli 100 minut, pri mešanici z naravnim rečnim prodom pa se vezanje začne nekoliko pozneje, pri 180. minuti in traja enako, 100 minut. Če želimo povezati začetek vezanja, ki smo ga določili s penetrometrom, z rezultati, ki smo jih dobili z meritvami električne prevodnosti, je to malo težje. Pri meritvah električne prevodnosti se je izkazalo, da smo dobili največje vrednosti električne prevodnosti v času, ki je bil pri prvem vzorcu z drobljenim agregatom pri 40 minutah, pri drugem okoli 120 minutah in pri tretjem pri 70. minutah. Pri mešanici z naravnim prodom so bile največje

vrednosti prevodnosti dosežene pri prvem vzorcu pri 130 minutah in pri drugem vzorcu pri 160.minutah.

Pri preiskavah tlačne trdnosti na strjenih vzorcih smo ugotovili, da je tlačna trdnost vzorcev narejenih z drobljenim agregatom večja in znaša od 65 do 70 MPa, tlačna trdnost pri kockah iz naravnega proda pa je znašala od 53 do 58 MPa. Pri obeh vrstah betona dosežajo tlačne trdnosti visoke vrednosti, tako da lahko vzorce z drobljenim agregatom in vzorce z naravnim rečnim prodom uvrstimo med betone visoke trdnosti. To so betoni, ki dosežajo trdnost od 50 do 140 MPa. Tako visoke trdnosti je možno doseči z uporabo ustreznih mineralnih dodatkov in nizkim vodocementnim razmerjem (manj kot 0,38). Mi pa smo visoke trdnosti dosegli pri v/c 0,43 z ustrezno zasnovo samozgoščevalnih betonov, ki smo jim dodali apnenčevo moko. Večjo tlačno trdnost smo dosegli z drobljenim agregatom, ki ima nekaj prednosti pred rečnim prodom, predvsem zaradi trdnosti stika med cementnim kamnom in zrnem agregata.

**VIRI:**

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

Hribar, A. 2003. Vpliv zamenjave čistega portland cementa s kameno moko na mehanske karakteristike betona iz drobljenega apnenčevega agregata. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 89 str.

Turk, F. 2005. Zasnova in lastnosti samozgoščevalnih betonov izdelanih z drobljenim agregatom iz kamnoloma sveta Ana in z naravnim savskim prodom iz peskokopa in separacije stari grad. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 82 str.

Mešiček, K. 2011. Ocena stabilnosti svežih malt z metodo električne prevodnosti. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 85 str.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan, Bosiljkov V. 2010/2011. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

Miladinović, Ž. 1986. Beton osobine i tehnologija. Beograd – Novi Sad, izgradnja: 420 str.

Nevil, A. M. 1976. Svojstva betona. Beograd, Građvinska knjiga: 530 str.

Mesbah, H. A. a, Yahia, A. b, Khayat, K. H. b. Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete, Cement and Concrete Research 41 (2011) 451–458

Dodatki za beton in malte v prehodnem in zimskem času. 2011.

[http://www.tkk.si/filelib/prakticni\\_nasveti/clanki/gr\\_12-06\\_30-32.pdf](http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12-06_30-32.pdf) (pridobljeno 20. 10. 2011)

proizvodnja cementa. 2011.

[http://www.lafarge.si/?stran=show\\_text&id=153](http://www.lafarge.si/?stran=show_text&id=153) (pridobljeno 20. 10. 2011)

vrste cementa. 2011.

[http://www.salonit.si/proizvodi\\_in\\_storitve/cementi/splosne\\_info/](http://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/splosne_info/) (pridobljeno 22. 10. 1011)

beton. 2011.

[http://www.pazu.si/sl/informacija.asp?id\\_informacija=190&id\\_meta\\_type=25](http://www.pazu.si/sl/informacija.asp?id_informacija=190&id_meta_type=25) (pridobljeno 20. 10. 1011)

<http://www.ibn.si/articles/detail/526> (pridobljeno 25. 10. 1011)

<http://www.slonep.net/gradnja/gradbeni-materiali/beton-2565> (pridobljeno 20. 10. 1011)

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/97030/chap4.cfm>  
(pridobljeno 20. 10. 1011)

samozgoščevalni beton. 2011.

<http://www.lespatex.si/dodatki-betonom/samozgoscevalni-betoni> (pridobljeno 27. 10. 1011)

prevodnost. 2011.

[http://www.ehow.com/about\\_5506182\\_conductivity-method.html](http://www.ehow.com/about_5506182_conductivity-method.html) (pridobljeno 21. 10. 1011)

