

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidatka:

Katja Mešiček

Ocena stabilnosti svežih malt z metodo električne prevodnosti

Diplomska naloga št.: 416

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

izr. prof. dr. Zvonko Jagličić

Ljubljana, 22. 4. 2011

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **KATJA MEŠIČEK** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»OCENA STABILNOSTI SVEŽIH MALT Z METODO ELEKTRIČNE
PREVODNOSTI«.**

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali drugi univerzi oz. izobraževalni inštituciji.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Litija, 11.04.2011

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.3(043.2)
Avtor:	Katja Mešiček
Mentor:	izr.prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Somentor:	izr. prof. dr. Zvonko Jagličič
Naslov:	Ocena stabilnosti svežih malt z metodo električne prevodnosti
Obseg in oprema:	85 str., 15 pregl., 14 graf., 52 sl.
Ključne besede:	električna prevodnost, segregacija, vezanje malt, homogenost, ocena stabilnosti

Izveček:

V diplomski nalogi smo preverjali možnost ocene stabilnosti svežih malt v kalupu s pomočjo neporušne metode merjenja električne prevodnosti. S posebej zasnovanim merilnim sistemom z večjim številom parov medeninastih elektrod, smo spremljali časovno odvisnost električne prevodnostim, med paroma elektrod vgrajenima v malto na štirih različnih višinah kalupa. Metodo smo najprej validirali s pomočjo različnih maltnih mešanic, tudi z maltami z različnim vodo-cementnim razmerjem. Na koncu smo opravili meritev na namerno segregirani malti z visoko sposobnostjo tečenja. Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati vezanja svežih malt in vizualne ocene homogenosti strjenih malt na rezani površini malt vzdolž višine kalupa.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 691.3(043.2)
Author: Katja Mešiček
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.
Co-supervisor: Assoc. Prof. Zvonko Jagličić, Ph.D.
Title: Assessment of stability of fresh mortar with electrical conductivity method
Volume and equipment: 85 p., 15 tab., 14 gr., 52 fig.
Key words: electrical conductivity, segregation, setting of mortar, homogeneity, estimation of stability

Abstract:

Diploma work deals with the possibility of estimating stability of fresh mortars in mould with non-destructive electrical conductivity method. Specially designed measuring system with considerable number of brass electrodes was used to monitor time changes in electrical conductivity of mortar between each pair of electrodes inserted in mould at four different heights. The method was evaluated with the help of different mortar mixtures, also with different water-to-cement ratios. Finally, measurements of electrical conductivity were carried out on deliberately segregated mortar with high fluidity. Obtained results were compared with the results of measurements of fresh mortar settings and visual estimation of homogeneity of hardened mortars on cut surfaces along the mould height.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici izr.prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorju izr. prof. dr. Zvonku Jagličiću za strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge. Prav tako se zahvaljujem tehničnemu sodelavcu Franciju Čeponu in dr. Vojku Jazbinšku ter vsem, ki so mi s svojim izkušnjami pomagali in mi stali ob strani.

Posebna zahvala gre moji družini in prijateljem za vso pomoč, podporo in razumevanje skozi vsa študijska leta.

KAZALO:

1	UVOD	1
2	OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV.....	3
2.1	Splošno o materialih	3
2.2	Agregat	3
2.3	Voda	5
2.4	Cement.....	6
2.4.1	Vrste cementa	8
2.4.2	Vezanje in strjevanje cementa	10
2.5	Praškasti materiali	13
2.6	Kemijski dodatki betonu.....	13
2.6.1	Plastifikatorji	14
2.6.2	Superplastifikatorji	15
2.6.3	Hiperplastifikatorji ali superplastifikatorji nove generacije	15
2.6.4	Aeranti	16
2.6.5	Sredstva za kontrolo viskoznosti	16
3	BETON	17
3.1	Opis betona	17
3.2	Lastnosti svežega betona	18
3.2.1	Priprava betona	18
3.2.2	Konsistenca.....	19
3.2.3	Vgradljivost	20
3.2.4	Segregacija (stabilnost).....	21
3.2.5	Homogenost.....	22
3.2.6	Zgoščevanje betona ali konsolidacija.....	22
3.2.7	Izcejanje vode	23
3.2.8	Vezanje in temperatura strjevanje betona.....	23
3.3	Strjen beton.....	24
3.3.1	Nega betona	24
3.3.2	Sušenje betona	24
3.3.3	Procesi propadanja betona	25
3.4	Tehnološke lastnosti betona.....	26

3.4.1	Obrabnost	26
3.4.2	Vodotesnost.....	26
3.4.3	Zmrzljinska odpornost	27
3.4.4	Prostorninska stabilnost	27
4	METODE PREISKAV SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE	
	STANDARDA SIST EN 206-1	28
4.1	Metoda s posedom	28
4.2	Metoda z razlezom	29
4.3	VE-BE metoda	31
4.4	Metoda z zgoščevanjem pri vibriranju	31
4.5	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu.....	33
4.6	Določanje časa vezanja betona	34
4.6.1	Postopek vezanja po standardu ASTM C 403	35
4.6.2	Izračun in poročilo	37
5	METODE PREISKAV Z ELEKTRIČNO PREVODNOSTJO (povzetek članka	
	Mesbah, H.A., et al. 2011).....	38
5.1	Ocena stabilnosti	38
5.1.1	Predstavitev metode	38
5.1.2	Meritve električne prevodnosti	40
5.1.3	Občutljivost meritev električne prevodnosti	41
6	LASTNE PREISKAVE	43
6.1	Uvod.....	43
6.2	Osnovne sestavine malte	44
6.2.1	Agregat.....	44
6.2.2	Voda	45
6.2.3	Cement	45
6.2.4	Kemijski dodatek - superplastifikator	46
6.3	Sestava maltne mešanice.....	47
6.4	Preiskave na maltah	51
6.4.1	Preizkus z metodo električne prevodnosti	51
6.4.2	Preizkus določanja začetka in konca vezanja malte.....	75
7	ZAKLJUČEK.....	81

VIRI	83
-------------------	-----------

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti.	8
Preglednica 2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1.	9
Preglednica 3: Faze hidratacije cementnega kamna [R. Žarnić, 2005].....	12
Preglednica 4: Klasifikacija konsistence po DIN standardih, z opisom konsistence [R. Žarnić, V. 2010].	19
Preglednica 5: Stopnje konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1.....	30
Preglednica 6: Stopnje konsistence v odvisnosti od mere zgoščenosti po standardu SIST EN 206-1.	32
Preglednica 7: Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R v primerjavi z zahtevami SIST EN 197-1.....	46
Preglednica 8: Sestava mešanic za preiskavo stabilnosti malte.	48
Preglednica 9: Sestava mešanic za preiskavo vezanja malte.	50
Preglednica 10: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 1. vzorcu.	55
Preglednica 11: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 2. vzorcu.	59
Preglednica 12: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 3. vzorcu.	62
Preglednica 13: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 4. vzorcu.	64
Preglednica 14: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 5. vzorcu.	69
Preglednica 15: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 6. vzorcu.	71

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Spreminjanje el. prevodnosti skozi malto z v/c 0,5 v 400 min.	56
Grafikon 2: Spreminjanje el. prevodnosti skozi homogeno malto z v/c 0,5.	56
Grafikon 3: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 2. vzorcu v 400 min.	60
Grafikon 4: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 2. vzorcu.	60
Grafikon 5: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 3. vzorcu v 400 min.	62
Grafikon 6: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 3. vzorcu.	63
Grafikon 7: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 4. vzorcu v 400 min.	64
Grafikon 8: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 4. vzorcu.	65
Grafikon 9: Spreminjanje el. prevodnosti na 5. vzorcu malte s superplast. v 400 min.	70
Grafikon 10: Spreminjanje el. prevodnosti na 5. vzorcu malte s superplast.	70
Grafikon 11: Spreminjanje el. prevodnosti na 6. vzorcu malte s superplast. v 400 min.	72
Grafikon 12: Spreminjanje el. prevodnosti na 6. vzorcu malte s superplast.	72
Grafikon 13: Časovni potek vezanja malt različnih v/c razmerij.	79
Grafikon 14: Začetek in konec vezanja malt različnih v/c razmerij.	79

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov [R.. Žarnić, 2005].	4
Slika 2: Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008.	5
Slika 3: Shema proizvodnje cementa.	7
Slika 4: Prikaz razvoja hidratacije.	11
Slika 5: Shematičen prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja.	15
Slika 6: Vgrajevanje betona.	20
Slika 7: Vizualen prikaz segregacije.	21
Slika 8: Vibrator za beton.	22
Slika 9: Agresivni vplivi na beton, njihovi povzročitelji in posledice.	25
Slika 10: Posed betona.	28
Slika 11: Pravilen in nepravilen posed stožca.	29
Slika 12: Metoda z razlezom.	30
Slika 13: Postopek določanja konsistence betona z metodo z razlezom.	30
Slika 14: Ve-be metoda po SIST EN 12350-3.	31
Slika 15: Kalup za zgoščevanje po SIST EN 12350-4 in vibracijska igla.	32
Slika 16: Porozimeter za beton.	33
Slika 17: Fizikalna razlaga stopnje razvoja hidratacije.	34
Slika 18: Penetrometer	35
Slika 19: Kalupi z malto po vtiskanju igel.	36
Slika 20: Testni vzorec z nameščenimi 4 pari elektrod.	40
Slika 21: Spreminjanje el. prevodnosti pri betonu z v/c 0,4 brez segregacije.	41
Slika 22: Spreminjanje el. prevodnosti pri betonu z v/c 0,4 pri visoki segregaciji.	41
Slika 23: Tehtanje agregata.	44
Slika 24: Tehtanje vode.	45
Slika 25: Priprava cementa.	45
Slika 26: a.) mešalec in priprava sestavin, b.) vsipanje cementa v posodo z vodo.	49
Slika 27: a.) mešanje, b.) dodajanje agregata.	49
Slika 28: a.) zbiranje malte na sredini posode, b.) kalupi 15/15/15 cm.	49
Slika 29: a.) vgrajevanje, b.) vibriranje z iglo in na mizici.	50
Slika 30: Funkcijski generator.	52
Slika 31: Vzorec merjen z metodo električne prevodnosti.	52

Slika 32: a.) konektor, b.) medeninast vijak, kot elektroda	53
Slika 33: 1. vzorec homogene malte z v/c 0,5	54
Slika 34: Vizualna ocena homogenosti strjenega 1. vzorca malt	57
Slika 35: 2., 3., 4. vzorec malt z različnim v/c po plasteh	59
Slika 36: Vizualna ocena homogenosti strjenega 2. vzorca	61
Slika 37: Vizualna ocena homogenosti strjenega 3. vzorca	63
Slika 38: Vizualna ocena homogenosti strjenega 4. vzorca	65
Slika 39: Vsi vzorci malt z različnim v/c po plasteh	67
Slika 40: Vizualna ocena homogenosti vseh vzorcev malt po plasteh	68
Slika 41: 5. in 6. vzorec malte s superplastifikatorjem	69
Slika 42: Vizualna ocena homogenosti strjenega 5. vzorca malte	71
Slika 43: Vizualna ocena homogenosti strjenega 6. vzorca malte	73
Slika 44: Vizualna ocena homogenosti dveh vzorcev s superplastifikatorjem	74
Slika 45: Standardni kalupi 15/15/15 cm.	75
Slika 46: a.) vgrajevanje malte z v/c 0,7 b.) in malte z v/c 0,6	76
Slika 47: a.) vgrajevanje malte z v/c 0,5 b.) malte z v/c 0,4	76
Slika 48: Zgoščevanje z vibracijsko iglo in na vibracijski mizici	76
Slika 49: Penetrometer z iglami in postopek vtiskanja	77
Slika 50: Vzorci z malto različnih v/c razmerji	77
Slika 51: 1. in 2. vzorec malte z v/c razmerjem 0,7 in 0,6	78
Slika 52: 3. in 4. vzorec malte z v/c razmerjem 0,5 in 0,4	78

1 UVOD

Rimljani so bili prvi, ki so iznašli gradbeni material, ki je imel lastnosti, podobne današnjemu betonu. Vseboval je vodo, pesek, apno, pucolan in zdrobljeno opeko. Dobro so poznali škodljive primesi in lastnosti različnih vrst peska. Vendar pa je široka uporaba betona kot gradbenega materiala močno povezana z možnostjo doseganja predvidljivih in ponovljivih lastnosti materiala, kar je seveda možno le z ustreznim vezivom – cementom. Prva komercialna uporaba imena 'Portland cement' je znana iz leta 1824. Patentiral ga je Joseph Aspdin in začel proizvajati pod imenom 'Aspdin's Portland Cement' v Gatesheadu in Wakefieldu v severni Angliji. Vendar pa po današnjih standardih njegov produkt ni pravi Portland cement, saj sestava uporabljenih surovin ni bila kontrolirana, poleg tega pa je bila nižja tudi temperatura žganja. Zato za iznajditelja pravega Portland cementa velja I. C. Johnson (Swanscombe, Kent), ki je leta 1845 mešanico krede (5 delov) in gline (2 dela) žgal pri mnogo višji temperaturi (1400-1500°C). Prve cementarne za proizvodnjo Portland cementa so bile odprte leta 1850 v Franciji ter pet let kasneje v Nemčiji. Kmalu zatem, konec 19. stoletja, smo v Evropi dobili prve standarde za preskušanje gradbenih materialov, tudi cementa in betona.

Danes je beton osrednje gradivo, ki se uporablja pri gradnji vseh vrst objektov, od nizkih do visokih zgradb, za najrazličnejše namene uporabe. Pri njem je potrebno paziti na vse tehnološke lastnosti, kamor vključujemo tudi stabilnost sveže betonske mešanice in obstojnost betona v strjenem stanju. V praksi želimo zagotoviti, da so gradbeni proizvodi in konstrukcijski elementi iz betona nosilni in obstojni ter da dosegajo predpisano življensko dobo. Stabilnost sveže betonske mešanice bistveno vpliva na lastnosti AB elementov. Beton je stabilen, če je bil homogeno vgrajen v opaž in če med njegovim vezanjem v opažu ni prišlo do segregacije. Pri novejših betonskih mešanicah, ki dosegajo visoko sposobnost tečenja (lahkovgradljivi in samozgoščevalni betoni) je segregacija svežega betona v opažu pogostejša. Posledica segregacije so nehomogene lastnosti strjenega betona in s tem nižja nosilnost in varnost objekta, predvsem pa nižja obstojnost in s tem hitrejše propadanje AB elementov. Bistven vpliv na obstojnost betonskih elementov ima zato odpornost svežega betona proti segregaciji, to je sposobnost suspenzije delcev, da obdrži svojo homogenost med mešanjem,

transportom in vgrajevanjem. Na stabilnost svežega betona vplivajo zrnastostna sestava agregata, vrsta in količina veziva ter viskoznost betonske mešanice. S pomočjo določenih kemijskih ali mineralnih dodatkov lahko stabilnost svežega betona povečamo. Primer je kemijski dodatek za povečanje viskoznosti.

Za oceno dejanske stabilnosti materialov s cementnim vezivom v svežem stanju je bistvena in-situ ocena homogenosti s pomočjo metod, ki omogočajo spremljanje (monitoring) gibanja vode in segregacije v plastičnem materialu do začetka vezanja cementa. Primerna neporušna metoda za tovrstno oceno se zdi kontaktna metoda merjenja električne prevodnosti. Zato smo v diplomski nalogi to metodo uporabili za oceno stabilnosti različnih malt vgrajenih v visok valjast kalup.

2 OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV

2.1 Splošno o materialih

Beton je kompozitni material sestavljen iz cementa, agregata, vode in dodatkov. Po zamešanju vseh sestavin se med cementom in vodo začne reakcija imenovana hidratacija, ki je kemijsko fizikalen proces. To je proces vezanja, gostitve ter strjevanja cementne paste. Po končanem procesu dobimo cementni kamen, ki povezuje zrna agregata v monolitno celoto.

2.2 Agregat

Agregat je v splošnem sipek material, relativno homogen, torej sestavljen iz med seboj nevezanih zrn določene velikosti. Predstavlja največji delež prostornine betona. Običajno agregat v betonu zavzame okoli 75% njegove prostornine, pri betonih nizke trdnosti pa tudi do 85% prostornine. Po načinu pridobivanja delimo agregate na drobljence (lomljen agregat) in gramoze aluvialnega izvora (prod). Drobljenec pridobivamo v kamnolomih z drobljenjem kamnitih blokov. Značilno zanj je, da ima ostre robove in bolj homogeno mineralno sestavo. Njegova zrna so običajno nepravilnih oblik in se pri vgrajevanju medsebojno zaklinijo, zato imajo tovrstni betoni povečano natezno trdnost. Gramoz pa pridobivamo iz rečnih nanosov, je raznolike mineralne sestave in ima lepo zaobljena zrna, kar nam omogoča boljše oziroma lažjo vgradljivost in obdelovalnost sveže betonske mešanice.

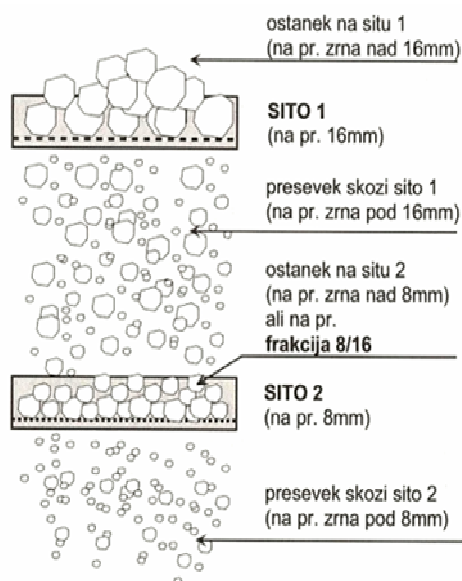
Agregat delimo na droben in grob. Grob agregat ima premer zrn večji od 4 mm, droben pa do 4 mm in se uporablja predvsem za izdelavo različnih vrst malt. Kombinacija drobnega in grobega agregata pa se uporablja za izdelavo betonov.

Na karakteristike svežega in strjenega betona bistveno vpliva zrnavostna sestava agregata. V praksi se je pokazalo, da s kombiniranjem večjega števila frakcij agregata izboljšamo lastnosti betona, zagotovimo boljše zbitost zrn in zmanjšamo trenje v masi. Votline med posameznimi

večjimi zrni se optimalno zapolnijo z manjšimi zrni. Pri izbiri zrnovostne sestave smo omejeni tudi z velikostjo maksimalnega zrna oziroma z največjim premerom zrna. Z večjim deležem grobih zrn zmanjšamo količino potrebnega veziva, s tem pa poslabšamo obdelovalnost in vgradljivost ter povečamo nevarnost segregacije. Tak problem rešimo z vključitvijo ustreznega deleža drobnozrnatega agregata. Zrna drobnozrnatega agregata velikosti 0,25 mm imajo pomembno vlogo, saj zadržujejo vodo in preprečujejo njeno izcejanje ter povečajo odpornost na segregacijo.

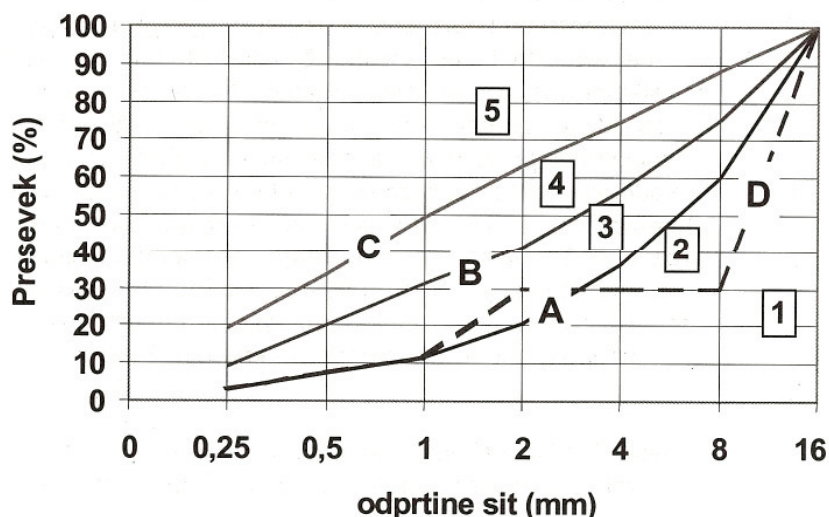
V agregatu imamo prisotne tudi praškaste delce, to so drobni mineralni delci, ki padejo skozi sito odprtine 0,075 mm. Pri betonu, ki ne vsebuje kemijskega dodatka tipa superplastifikator, njihova količina ne sme biti prevelika, saj lahko vpliva na kvaliteto betona. To se kaže v zmanjšanju zmrzljinske odpornosti in trdnosti, povečanju vpivanja vode ter krčenju in lezenju betona.

S kombinacijo različnih frakcij separiranega agregata dobimo ustrezno zrnovostno sestavo agregata, ki jo kasneje uporabimo za pripravo sveže betonske mešanice. Posamezne frakcije agregata dobimo s sejanjem na sitih kvadratnih odprtin (sito z največjo odprtino na vrhu ter z najmanjšo odprtino na dnu sistema sit). Zrnovostno sestavo agregata preverjamo s sejanjem na laboratorijskih sitih v skladu z zahtevami standarda SIST EN 933-1.



Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov [R.. Žarnić, 2005].

Ustrezno vgradljivost in obdelovalnost svežega betona in primerne lastnosti strjenega betona dosežemo, če se zrnastostna sestava agregata nahaja znotraj določenih razmerij ali mejnih zrnastostnih krivulj. Mejne krivulje zrnastosti agregata podaja SIST 1026:2008. Najprimernejša zrnastostna sestava agregata je v območju 3, to je med mejnima zrnastostnima krivuljama A in B.



Slika 2: Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008.

2.3 Voda

Pitno vodo lahko vedno uporabimo za pripravo mešanic z mineralnimi vezivi. V primeru uporabe vode iz ostalih nahajališč (površinske vode, industrijske vode, itd), moramo opraviti dodatne analize ustreznosti vode za izdelavo betona, po SIST EN 1008. Voda ne sme vsebovati škodljivih snovi, kot so:

- organske primesi (zemlja, humus, masti, itd),
- kloridi (soli, ki povzročijo korozijo armature),
- sulfati (soli, ki med kristalizacijo povečajo volumen),
- mulj.

Voda predstavlja pomembno komponento vsake mešanice s cementnim vezivom, saj povzroči, da se cement spremeni v vezivo in pri tem hidratacijo (vezavo) cementa.

V svežem betonu deluje kot komponenta za doseganje potrebne obdelavnosti betonske mešanice. V betonu moramo zagotoviti vsaj toliko vode, kolikor jo je potrebno za hidracijo cementa. V primeru, da je vode premalo, bo del cementa ostal nehidratiziran. Če pa je vode preveč, bo začela odvečna voda izhlapevati in se bodo v betonu začele izoblikovati kapilarne pore.

Potrebno količino vode v kubičnem metru sveže betonske mešanice prikazuje naslednja enačba:

$$V = V_a + (V_p + \Delta V_p) + (V_k + \Delta V_k) \quad (2.1)$$

kjer je :

V_a – voda, ki jo vpije agregat

V_p – voda, ki omoči površino agregata

ΔV_p – dodatna voda odvisna od oblike teksture in mineraloško petrografske sestave agregata

V_k – voda potrebna za standardno konsistenco cementne paste

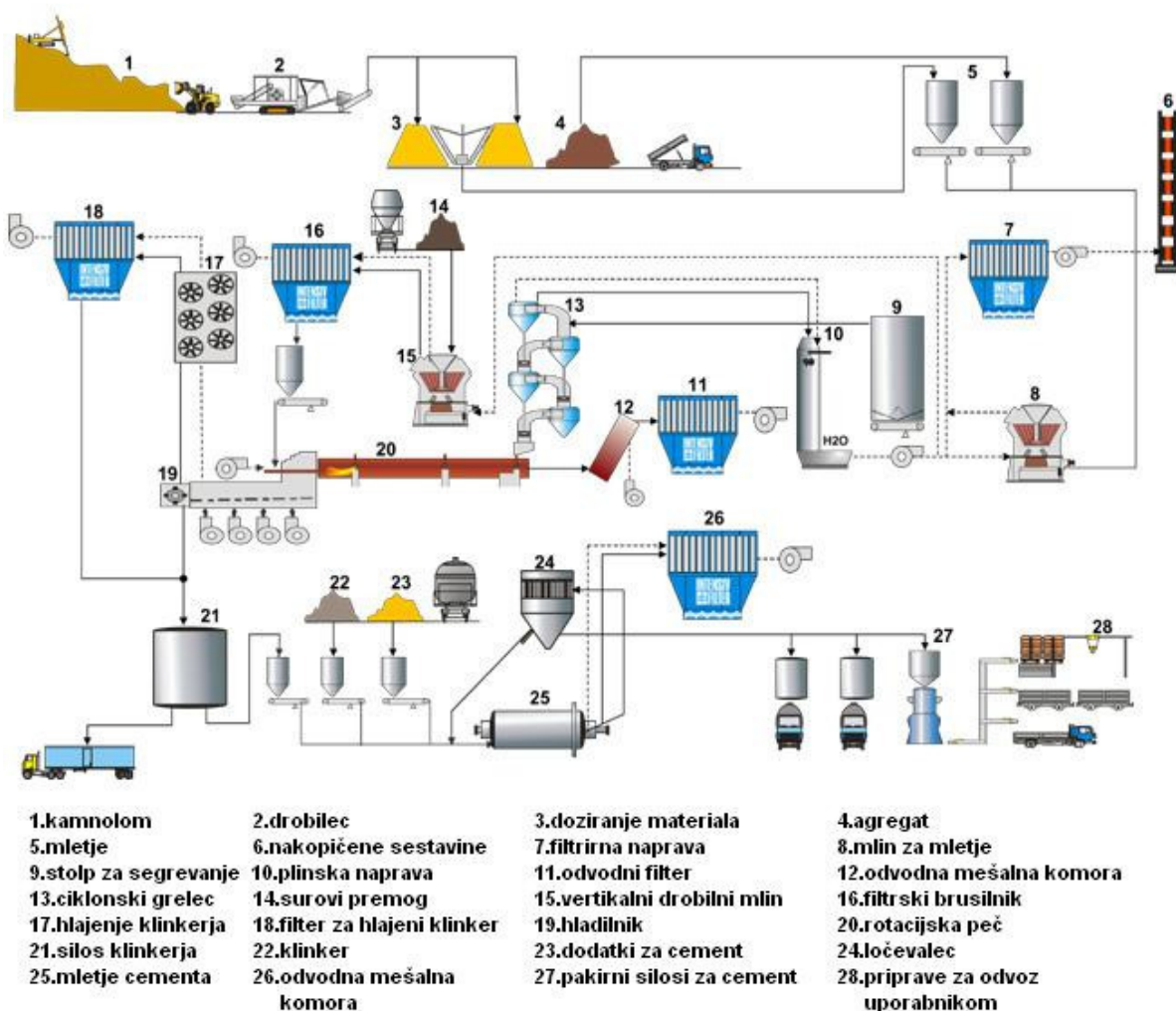
ΔV_k – dodatna voda potrebna za doseganje zahtevane konsistence betonske mešanice

2.4 Cement

Cement je eden najosnovnejših gradbenih materialov in druga najpogosteje uporabljena snov, takoj za vodo. Cement je silikatno hidravlično vezivo in ko mu dodamo vodo, se začne kemični proces vezanja in strjevanja cementa. Osnovna sestavina cementnega kamna je C-S-H gel, ki je vir trdnosti in obstojnosti betona. Hidravlična veziva so veziva, ki vežejo in strjujejo na zraku in v vodi.

Osnovne surovine za proizvodnjo cementa so apnenec, lapor in glina in se po izkopu in drobljenju transportirajo v silose. Mineralna mešanica se dopolnjuje z manjkajočimi minerali na osnovi kemijske analize. Dodajajo se na primer apno in kremenčev pesek. Surovinska moka se žge v rotacijski peči. Pri 100°C se izloči prosta voda, pri 600°C pa kristalno vezana voda. Pri 900°C se kalcijev karbonat pretvori v kalcijev oksid (CaO). Med 1200°C in 1300°C

nastane talina, v kateri se tvori mineral belit (C_2S) in pri temperaturi $1450^{\circ}C$ (temperatura sintriranja) še mineral alit (C_3S). Med ohlajanjem se iz taline izločita še trikalcijev aluminat (C_3A) in tetrakalcijev aluminoforit (C_3AF). Dobljen produkt je cementni klinker, ki je podobna pepelu in ima granule, ki v premer merijo nekaj centimetrov. Je močno porozen. Klinker nato hitro ohladimo in po dodajanju sadre v krogelnih mlinih zmeljemo v fini prah – portland cement, ki je po sestavi polimineralni material.



Slika 3: Shema proizvodnje cementa.

Preglednica 1: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti.

OZNAKA	Ime	Delež	Lastnosti
C₃S	Trikalcijev silikat – alit	45 – 60 %	Najpomembnejši, pospešuje proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C₂S	Dikalcijski silikat – belit	20 – 30 %	Zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja
C₃A	Trikalcijev aluminat	4 – 12 %	Pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske toplote
C₄AF	Tetrakalcijev aluminoforit	10 – 20 %	Zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo

2.4.1 Vrste cementa

V skupino običajnih cementov spada 27 vrst proizvodov. Cement izberemo med tistimi, ki veljajo za primerne za določeno uporabo. Pri izbiri cementa upoštevamo način izvajanja del, končno rabo betona, pogoje negovanja, dimenzije konstrukcijskih elementov, pogoje okolja, Običajne cemente v pet glavnih vrst cementov razvršča standard SIST EN 197-1:

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

Cementu se med procesom proizvodnje portland cementa, ki je značilni predstavnik silikatnih cementov, pri mletju dodajajo razni mineralni dodatki. To so neorganski materiali z določenimi hidravličnimi lastnosti, ki nadomestijo del portland cementnega klinkerja. Dodatki sami ne morejo vezati z vodo, to sposobnost dobijo, ko se pomešajo s cementom. Cement, ki vsebuje večjo količino pucolana (nad 30%) se imenuje pucolanski cement, če pa vsebuje večjo količino žlindre (od 30 do 85%) pa metalurški cement.

Preglednica 2: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1.

VRSTA CEMENTA	Opis	Glavne sestavine in njihove oznake	Delež mineralnih dodatkov
CEM I	čisti portlandski cement	klinker	0 %
CEM II	portlandski cement z mineralnimi dodatki	klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), elektrofiltrski pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A (S,P,Q,V,W,T,L) 6-20%
			II/B (S,P,Q,V,W,T,L) 21-35 %
CEM III	žlindrin cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S)	III/A (S) 36-65 %
			III/B (S) 66-80 %
			III/B (S) 66-80 %
			III/C (S) 81-95 %
CEM IV	pucolanski cement	klinker, mikrosilika (D), ko je mineralni dodatek mikrosilika (D) je lahko njen delež v cementu največ 10%, pucolan (P, Q)	IV/A (D,P,Q,V) 11-35 %
			IV/B (D,P,Q,V) 36-55 %
CEM V	mešani cement	klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), elektrofiltrski pepel (V)	V/A (S, P,Q,V) 36-60 %
			V/B (S, P,Q,V) 61-80 %

Najpogostejši dodatki portland cementu so:

- Portland cementni klinker, je osnovna surovina za cement. Osnovne spojine, ki ga tvorijo so CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, alkalije in druge primesi. Masno razmerje CaO/SiO₂ ne sme biti manjše od 2,0.
- Granulirana plavžna žindra, sestavljena je iz silikatov in aluminosilikatov kalcija, zmanjša hitrost hidratacije, znižuje začetno trdnost, nima pa vpliva na končno trdnost betona.

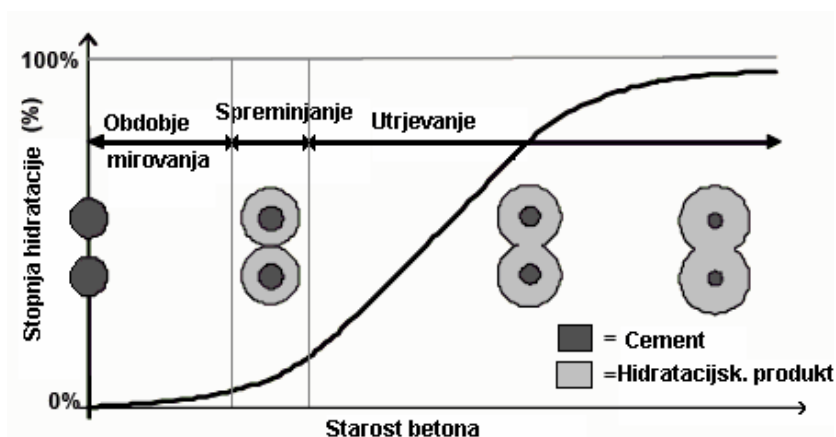
- Naravni pucolani, so vulkanskega izvora ali pa sedimentne kamnine, silikatne ali silikatno-aluminatne sestave. Opredeljuje jih standard SIST EN 197. Izboljšujejo kohezijo betonske mešanice in njeno vodoneprepustnost. Zmleti so bolj fino, zato za standardno konsistenco potrebujejo večjo količino vode, posledično pa zmanjšujejo trdnost cementnega kamna.
- Industrijski pucolani, se od naravnih pucolanov razlikujejo le po termični obdelavi gline in skrilavcev ter zračno hlajene žlindre, nastale pri proizvodnji svinca, bakra, cinka in fero zlitin.
- Elektrofitrski pepel, se pridobiva iz dimnih delcev nastalih pri gorenju uprašenega premoga. Delujejo podobno kot pucolani.
- Mikrosilika, nastane v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremena s premogom v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin. Je najkvalitetnejši pucolan, njena učinkovitost pa se povečuje z vsebnostjo SiO_2 .
- Sadra, se dodaja drugim sestavinam cementa za kontrolo vezanja. Je kalcijev sulfat - dihidrat, lahko pa se uporabljajo tudi njegove druge oblike.
- Apnenec, ki se uporablja, kot mineralni dodatek v cementih mora izpolnjevati zahteve podane v SIST EN 197-1 in deluje kot polnilo.
- Polnila so materiali, katerih lastnosti so lahko latentna hidravličnost, inertnost ali pucolanskost, dodajamo pa jih v mejah do 5%. So naravni ali umetni anorganski materiali.

2.4.2 Vežanje in strjevanje cementa

Hidratacija je kemijsko-fizikalen proces vezanja cementa in vode. Začne se takoj po zamešanju cementne suspenzije: cementna zrna, ki so v stiku z vodo, začnejo na površini hidratizirati. S časom se agregatno stanje začne spreminjati s plastičnega (začetek vezanja) proti trdnemu. Prehod v trdno agregatno stanje imenujemo konec vezanja cementa. Sam proces imenujemo vežanje cementa in poteka razmeroma hitro. Naraščanje trdnosti cementnega kamna pa imenujemo strjevanje in predstavlja dolgotrajen proces, ki traja tudi več let.

Če opazujemo proces hidratacije glede na razvoj trdnosti cementnega kamna, ga lahko razdelimo na tri faze:

- faza vezanja cementa (začetna faza po 1 uri),
- faza intenzivnega strjevanja (po 6 urah),
- faza stabilizacije silikatne strukture (po 24 urah).

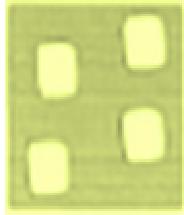
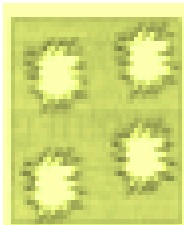
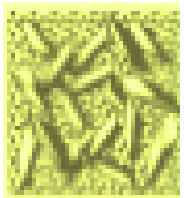
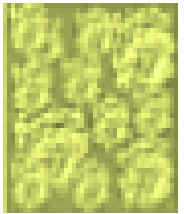


Slika 4: Prikaz razvoja hidratacije.

Hitrost in stopnja hidratacije je v veliki meri odvisna od finosti mletja portland cementa. Fino mleti cementi zmanjšujejo izločanje cementnega mleka iz svežega betona in s tem omogočajo večjo stabilnost svežega betona. Istočasno pa povečujejo možnost nastanka razpok in povzročajo večje krčenje cementne paste in pozneje cementnega kamna. Hitrost hidratacije je v splošnem odvisna tudi od sestave klinkerja in količine mineralnih primesi ter prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.

Bistven vpliv na stopnjo hidratacije ima masno razmerje med vodo in cementom (t.i. vodo-cementno razmerje v/c). Hidratacija poteka optimalno pri vrednostih vodo-cementnega razmerja od 0,38 do 0,42. V tem območju naj bi teoretično hidratizirala celotna količina cementa, vendar pa so raziskave pokazale, da v praksi hidratizira od 80 do 90% cementa, kar pa nima bistvenega vpliva na lastnosti cementnega kamna. Če pa je vodo-cementno razmerje preveliko, se oblikujejo pore večjega premera, ki znižujejo trdnost betona in zmanjšujejo njegovo vodoneprepustnost in s tem obstojnost.

Preglednica 3: Faze hidratacije cementnega kamna [R. Žarnić, 2005].

Faza	Shema	Opis dogajanja
1.		Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut) Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% C ₃ S. Mineral C ₃ A se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C ₄ AF reagira podobno kot C ₃ A, delež reagiranega C ₃ S pa je zelo majhen.
2.		Indukcijsko obdobje-relativno mirovanje (traja nekaj ur) Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina: po <u>teoriji zaščitne plasti</u> se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane prepustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije po <u>teoriji kristalizacijskih jeder</u> , nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.
3.		Obdobje pospešene hidratacije (tretja do dvanajsta ura procesa) Nasičena raztopina z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosta tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrni. Hitrost hidratacije C ₃ S in C ₂ S narašča in doseže maksimalne vrednosti.
4.		Obdobje pojemajoče hidratacije (do konca hidratacije) Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel kot posledica hidratacije C ₃ S in C ₂ S. Na začetku nastali etringit reagira s nehidratiziranim C ₃ A in C ₄ AF in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.

2.5 Praškasti materiali

Praškasti materiali so običajno v mineralni obliki in med njih poleg cementa štejejo še reaktivne in inertne fine delce zrn, ki so manjši od 0,125 mm. Pomembnost praškastih delcev v betonu se kaže v prostorninskem razmerju med vodo in praškastimi delci, ki je pogosto uporabljen kot parameter. Dodani delci povečajo stabilnost betona in malt s tem, da zapolnijo prostor med relativno večjimi zrnji cementa, imajo pa tudi mazivni učinek. Zaradi svoje finosti imajo veliko specifično površino, zato moramo pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode.

Reaktivni praškasti materiali so elektrofilitrski pepel, mikrosilika in mleta granulirana plavžna žindra. Inertni pa so zmleti polnilni materiali iz dolomita, apnenca, kremenca, odpadnega stekla in drugi. Kamene moke se tudi uvrščajo v skupino internih polnil, pridobljene pa so z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata.

2.6 Kemijski dodatki betonu

Kemijski dodatki omogočajo pripravo posebnih betonov. S svojim fizikalnim ali kemijskim delovanjem vplivajo na določene lastnosti svežega in strjenega betona. Dodajo se betonski mešanici pred ali med mešanjem v majhnih količinah, običajno odstotkih na maso cementa. Lahko so v tekočem ali praškastem stanju. Za optimalen učinek je potrebno vrsto dodatka uskladiti z vrsto cementa. Na vsakem dodatku nam proizvajalec navade vrsto kemijskega dodatka, njegovo uporabo, doziranje in njegov namen. Uporabo kemijskih dodatkov določa SIST EN 206-1.

Kemijske dodatke betonu uporabljamo, kadar želimo:

- izboljšati lastnosti svežega betona (manjše izločanje vode na površini betona, manjša segregacija, izboljšana obdelovalnost pri manjšem v/c ,...),

- pripraviti beton, ki ustreza specifičnim zahtevam (predpisana min in max tlačna trdnost, predpisano v/c razmerje in čas obdelavnosti),
- izboljšati lastnosti strjenega betona (povečati obstojnost, vodotesnost in kemijsko odpornost, zmanjšati vpojnost s kapilarnim srkom),
- možnost betoniranja v neugodnih vremenskih razmerah (agresivno okolje, neustrezne temperature),
- znižati stroške betonskih del.

Mnogi kemijski dodatki imajo več različnih vplivov na lastnosti betona, glede na njihovo osnovno funkcijo pa jih delimo na:

- plastifikatorji,
- superplastifikatorji (povečajo plastičnost sveže betonske mešanice in s tem zmanjšajo potrebo po vodi),
- hiperplastifikatorji (povečajo vgradljivost ob nespremenjenem v/c razmerju)
- aeranti (izboljšajo odpornost strjenega betona na zmrzovanje oziroma tajanje brez ali v prisotnosti soli),
- pospeševalci vezanja (pospešijo hidratacijo cementa),
- zaviralci vezanja (zavirajo hidratacijo cementa),
- gostilci (povečajo vodotesnost betona),
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah,
- sredstva za kontrolo viskoznosti (povečajo viskoznost betona).

2.6.1 Plastifikatorji

Plastifikatorji so površinsko aktivne snovi, ki se adsorbirajo na površino zrn cementa, kjer ustvarjajo negativen naboj, zato se zrna med seboj odbijajo. Dodajamo jih z namenom, da povečamo konsistenco betonu pri enakem v/c razmerju ali povečamo njegovo trdnost z zmanjšanjem v/c razmerja. Prosta voda v plastificirani cementni pasti deluje kot mazivo, s tem pa poveča obdelovalnost svežega betona. S plastifikatorji lahko zmanjšamo potrebno količino vode za 5 do 15%, odvisno od količine in vrste cementa, količine vode in vrste agregata.

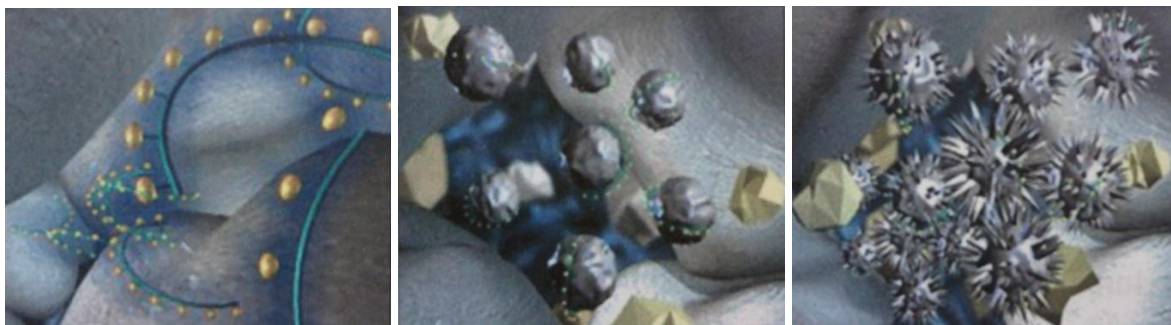
2.6.2 Superplastifikatorji

Superplastifikatorji so kemijski dodatki betonu, ki so nekajkrat učinkovitejši od plastifikatorjev. Uravnajo reološke lastnosti sveže betonske mešanice s tem, da omogočajo, zmanjšanje količine zamesne vode, izboljšanje obdelavnosti mešanice, zmrzlinke odpornosti in vodotesnosti, upočasnijo padec obdelavnosti mešanice.

Superplastifikatorji so sintetične snovi z visoko molekulsko maso in vsebujejo vodotopne polimere. Glede na aktivne substance jih razvrščamo v eno od naslednjih glavnih skupin:

- sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati
- sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati
- modificirani lignin-sulfonati
- nove vrste superplastifikatorjev na osnovi polikarboksilatov

Običajni superplastifikatorji lahko utekočinijo beton za 15-30 min in pri tem zmanjšajo potrebo po vodi za 5-25 %. Superplastifikatorji so v primerjavi s plastifikatorji veliko bolj učinkoviti pri zmanjšanju količine vode, vendar potrebujemo večjo količino dodatka.



Slika 5: Shematičen prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja.

2.6.3 Hiperplastifikatorji ali superplastifikatorji nove generacije

Hiperplastifikatorji so sestavljeni iz glavne polimerne verige, krajših polimernih verig, ki omogočajo elektrostatično stabilizacijo ter relativno zelo dolgih stranskih verig polietilen oksidov, ki omogočajo prostorsko stabilizacijo. Od običajnih superplastifikatorjev se

razlikujejo po tem, da je potrebno za doseganje enakega učinka dodati bistveno manj dodatka. Superplastifikatorji nove generacije na bazi polikarboksilatov lahko vzdržujejo tekoče stanje betonske mešanice od 120-180 min, količina potrebne vode pa se zmanjša za 25-40 %. Uporabljajo se pri izdelavi visokozmogljivih in samozgoščevalnih betonov, pri neugodnih pogojih betoniranja (npr. podvodno betoniranje) in transportnih poteh pri višjih temperaturah ali daljših transportih.

2.6.4 Aeranti

Aerante uporabljamo za vnos kontrolirane količine stabilnih zračnih mehurčkov v betonsko mešanico, ki se enakomerno porazdelijo po cementnemu kamnu, pri čemer njihova medsebojna razdalja ni večja od 0,25 mm. Mehurčki nam pomagajo zmanjšati segregacijo in izcejanje vode ter povečati obdelavnost svežega betona in kohezivnost. Vsak vnesen odstotek zraka zmanjša tlačno trdnost. Da se temu izognemo zmanjšamo v/c razmerje, tako da uporabimo ustrezen plastifikator. Osnovni namen uporabe aerantov je torej priprava betonov odpornih na zmrzovanje / tajanje (ang. »*freeze-thaw*«) v prisotnosti ali brez talilnih soli, ki se uporabljajo za preprečevanje poledice.

2.6.5 Sredstva za kontrolo viskoznosti

Sredstva za kontrolo viskoznosti ali dodatki proti izpiranju (ang. »*antiwashout admixtures*«), so dodatki, ki povečajo stabilnost materialov na bazi cementa. Zmanjšujejo nevarnost ločitve heterogene mešanice betona med transportom, zgoščevanjem in vgrajevanjem ter zagotavljajo dodatno stabilnost do začetka strjevanja. Skrbijo za zagotovitev ustreznih samozgoščevalnih lastnosti pri povečani vlažnosti agregata ali za zmanjšanje potrebne količine praškastih delcev. Najbolj znan biopolimer, ki se proizvaja z aerobno fermentacijo je »*Welan gum*«. Učinkovito vzdržuje visoko viskoznost v alkalni raztopini z visoko koncentracijo kalcijevih ionov.

3 BETON

3.1 Opis betona

Beton je eden od temeljnih materialov v gradbeništvu. V osnovi je umetna mešanica mineralnega veziva (cement), grobega in drobnega agregata (drobljen ali prod) ter vode. Poleg teh osnovnih sestavin lahko vsebuje tudi kemijske in/ali mineralne dodatke. V sodobni tehnologiji se v sestavo betona dodajajo tudi materiali, kot so polimeri, vlakna, itd., ki bistveno spremenijo osnovne lastnosti betona (krhkost, krčenje, trdnost). Posebno pozornost je potrebno posvetiti tudi sami proizvodnji in tehnološkim operacijam, ki jim je beton izpostavljen pri zgodnji starosti. Zgodnja starost je definirana kot obdobje prvih treh dni po proizvodnji betona, saj se beton v teh dneh meša, transportira na gradbišče, vgrajuje v opaže, zaključno obdeluje in neguje.

Najpomembnejši parameter, ki vpliva na lastnosti betona je vodo-cementno razmerje (v/c). Zniževanje vodo-cementnega razmerja zmanjšuje vgradljivost betona, zato se pri nizkih v/c poslužujemo posebnih dodatkov, ki prispevanju k zvišanju vgradljivosti.

Zmanjšanje količine vode vpliva na:

- zvišanje mehanskih lastnosti in vodo-neprepustnosti,
- zvišanje odpornosti na agresivne vplive okolja,
- znižanje absorptivnosti betona in števila ter velikosti razpok zaradi krčenja,
- boljšo sprijemnost med plastmi betona in med betonom in armaturo,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju.

Sestavo betona in osnovne materiale za projektirani ali predpisani beton je potrebno izbrati tako, da so izpolnjene predpisane zahteve za svež in strjen beton.

Osnovne zahteve specifikacije projektiranega normalnega betona:

- zahteva po skladnosti s standardom EN 206-1,

- odpornost na pogoje okolja,
- nazivna velikost največjega zrna agregata,
- projektiran razred tlačne trdnosti > C20/25
- stopnje izpostavljenosti X0, XC1, XC2, ...
- razred vsebnosti kloridov.

Osnovne zahteve specifikacije predpisanega normalnega betona:

- zahteva po skladnosti s standardom EN 206-1,
- vsebnost, vrsta in trdnostni razred cementa,
- v/c razmerje in konsistenca, izraženo s stopnjo konsistence ali v posebnih primerih s ciljno vrednostjo
- vrsta in kategorija agregata ter največja vsebnost kloridov,
- nazivna velikost največjega zrna agregata in vse omejitve glede zrnivosti,
- vrsta in količina kemijskega in mineralnega dodatka, če ju beton vsebuje, ter njihovo poreklo.

Mejne vrednosti za sestavo betona:

- največje vodo-cementno razmerje (v/c_{\max}),
- dovoljena vrsta in razred osnovnih materialov,
- vsebnost cementa,
- dodatne zahteve za agregat, če se zahteva, da je beton odporen tudi proti zmrzovanju/tajanju in proti obrabi.

3.2 Lastnosti svežega betona

3.2.1 Priprava betona

V homogeno celoto zmešamo vse osnovne sestavine betona (agregat, voda, cement in dodatki). Pazimo na zaporedje dodajanja sestavin, najprej dodamo v mešalec potrebno

količino suhega agregata ter cementa in šele čez čas, ko se agregat in cement dobro premešata dodamo vodo. Vse ob pravem času in ob primerni hitrosti obračanja bobna mešalca. Dodatki betonu se v večini primerov dodajajo v obliki vodne raztopine (npr. superplastifikator).

3.2.2 Konsistenca

Parameter, ki določa plastičnost betona, imenujemo konsistenca betona. Standardi, ki predpisujejo metode določevanja konsistence sveže betonske mešanice, so:

- SIST EN 12350-2 (s postopkom poseda),
- SIST EN 12350-3 (z aparatom Vebe),
- SIST EN 12350-4 (s postopkom zgoščevanja pri vibriranju),
- SIST EN 12350-5 (s postopkom razleza).

Preglednica 4: Klasifikacija konsistence po DIN standardih, z opisom konsistence [R. Žarnić, V. 2010].

OPIS (MEJE) KONSISTENCE	Posed [mm]	Razlez [mm]	Posed pri vibriranju [mm]
Zemeljsko vlažna	-	-	$\geq 1,46$
Trdoplastična	10 – 40	≤ 340	1,45 – 1,26
Srednjeplastična	50 – 90	350 – 410	1,25 – 1,11
Mehkoplastična	100 - 150	420 – 480	1,10 – 1,04
Zelo mehkoplastična	-	490 – 550	-
Tekoča	160 - 210	560 – 620	-
Zelo tekoča	≥ 220	≥ 630	-

Konsistenca je skupek lastnosti sveže betonske mešanice, ki vplivajo na njeno vgradljivost, zgotitev in zaključno obdelavo. V splošnem pa velja, da naj bo mešanica betona takšna, da se jo lahko obdeluje z rokami. Glede na posamezne kriterije opredeljujemo štiri opisne stopnje konsistence, ki so trdoplastična, srednjeplastična, mehkoplastična in tekoča. Izbrana konsistenca betona se ne sme spreminjati od betonarne do gradbišča.

3.2.3 Vgradljivost

Vgradljivost betona je lastnost, ki je odvisna od reoloških karakteristik svežega betona. Največkrat se v praksi povezuje s konsistenco mešanice in njeno kohezivnostjo. Pred vgrajevanjem mora imeti sveža betonska mešanica ustrezno konsistenco in odpornost proti segregaciji, in vgrajevanje se mora končati pred začetkom vezanja cementa. Stopnjo vgradljivosti betona določajo enostavnost vgrajevanja, zgoščevanja sveže betonske mešanice in njena zaključna obdelava. Pri zgoščevanju svežega betona, na primer s pervibratorji, izločamo iz betona zajet in načrtno vnesen zrak. Kljub temu ostane v mešanici 1-3% zračnih por. Z izločanjem zraka se poveča tudi prostorninska masa svežega betona, ki se giblje okrog 2400 kg/m^3 . Za beton z velikim deležem grobih agregatnih zrn je potrebna mala frekvenca in visoka amplituda vibriranja, ko pa prevladujejo srednje velika zrna agregata pa srednja frekvenca in amplituda. Pri transportu in vgradnji morajo biti zrna v plastični mešanici enakomerno razporejena, tako da ne pride do pojava segregacije in prekomernega izcejanja vode. Zrak, ki je vnešen v beton z aeranti, zmanjšuje pojav segregacije in zmanjša izcejanje vode.



Slika 6: Vgrajevanje betona.

3.2.4 Segregacija (stabilnost)

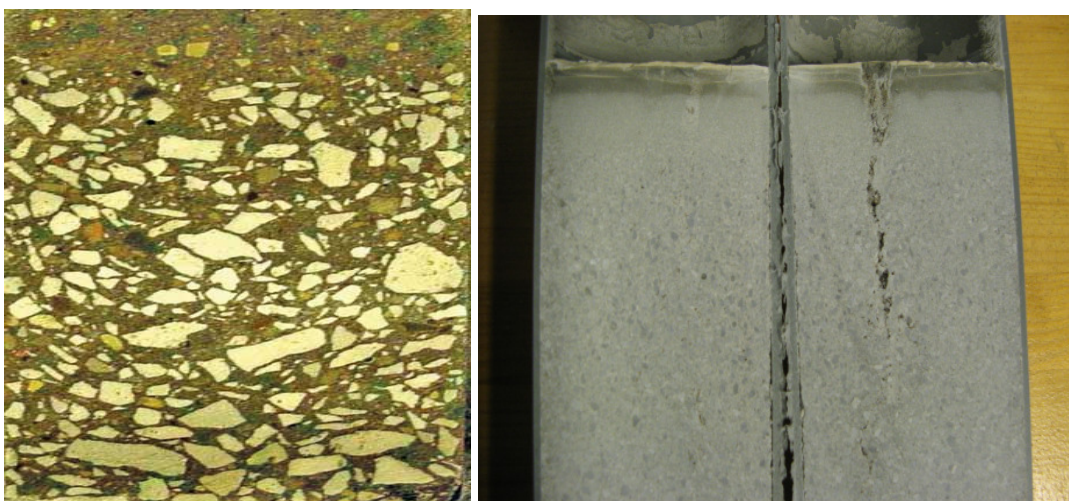
Segregacija predstavlja ločevanje grobih delcev (predvsem delcev agregata) od drobnih in posedanje grobih zrn. Nehomogena porazdelitev grobozrnatega agregata v svežem betonu kaže na segregacijo. Ta pojav je praviloma posledica premajhne kohezivnosti svežega betona (premajhne viskoznosti). Posledica je nehomogenost sveže betonske mešanice in s tem nehomogenost strjenega betona, kar povzroči poslabšanje njegovih fizikalno-mehanskih lastnosti.

Pri betonu se ne smejo pojaviti naslednje vrste segregacije:

- izcejanje vode,
- odvojitev grobozrnatega agregata, ki lahko vodi do blokiranja,
- odvojitev paste in agregata,
- neenakomerna porazdelitev zračnih por.

Segregacijo preprečujemo z naslednjimi ukrepi:

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



Slika 7: Vizualen prikaz segregacije.

3.2.5 Homogenost

Homogenost je odvisna od pravilnega projektiranja sestave betona, kvalitete in časa mešanja mase. Po pravilu betoni togih konsistenc zahtevajo daljše mešanje do homogenizacije od betona plastičnih konsistenc. Beton mora ohraniti homogenost ves čas od zamešanja, preko transporta in vgrajevanja do strjevanja, saj le tako doseže zahtevane karakteristike (tlačna trdnost, natezna trdnost, vodoneprepustnost, itd). Homogenost vgrajenega betona je odvisna tudi od načina vgrajevanja.

3.2.6 Zgoščevanje betona ali konsolidacija

Beton zgostimo s pomočjo dovedene energije v obliki vibracij (vibratorji, nabijala, vibracijske mize). Tako se delci svežega betona spravijo v gibanje, s čimer se zmanjša trenje med delci, mešanica pa pri tem prehaja v stanje gostega fluida. Vibriranje nam omogoča uporabo mešanice, ki vsebuje večja zrna, pri kateri je potrebna manjša količina cementne paste ter posledično tudi manjša količina vode. Vibriramo tiste betone, ki jih ne moremo kvalitetno ročno vgraditi. Pri ročno vgradljivem betonu lahko vibriranje povzroči segregacijo - pazimo na čas vibriranja. Za zgoščevanje betona navadno uporabljamo vibratorje, ki so pritrjeni na opaž in pa vibracijske igle (pervibratorji). Premeri vibracijskih igel so odvisni od frekvence vzbujanja vibracij.



Slika 8: Vibrator za beton.

3.2.7 Izcejanje vode

Izcejanje vode je pojav, pri katerem na vrhu sveže betonske mešanice nastane plast vode. Ta plast ima visoko vodo-cementno razmerje, zato ima slabe mehanske lastnosti, je neobstojna in ima nizko odpornost na zunanje vplive. Vpliv in obseg izcejanja vode je možno zmanjšati z različnimi kemijskimi dodatki, aeriranjem, ustrezno zrnastostno sestavo agregata in z izbiro bolj fino mletih cementov.

3.2.8 Vezanje in temperatura strjevanje betona

Posledica prehoda cementne paste v trd cementni kamen je proces spreminjanja sveže betonske mešanice v strjen beton. Na mehanske in tehnološke lastnosti ima poroznost sveže betonske mešanice velik vpliv. Posebno pozornost moramo posvetiti hidratacijski toploti. Trdnější betoni imajo manj odprtih in zaprtih por. Če betoniramo, kadar so temperature bistveno pod ničlo, lahko voda v betonu zmrzne. Zaradi povečanja prostornine za cca 9% lahko pride do zrahljanja notranje strukture. Če beton ujame mraz v kratkem intervalu, ko cement še ni vezal, ni škode. Če pa ga dobi med vezanjem ali strjevanjem, se zrahljane strukture ne da več popraviti. Temperatura sveže betonske mase ob vgrajevanju naj bo od 5°C do 30°C in vsaj še +5°C naslednjih 3-4 dni po vgradnji, če je temperatura zraka nad -3°C. Zvišanje prenizke zunanje temperature dosežemo z uporabo cementa, ki ima višjo hidratacijsko toploto, s posebnimi dodatki, z ogrevanjem betona ali pa z zaščito pred mrazom. Nizke temperature zavirajo in upočasnijo hidratacijo in strjevanje betona, visoke pa jo pospešujejo in tudi trdnost hitreje naraščajo. Začetek vezanja cementa se pri 15°C začne po 190 min, pri 100°C pa po 10 min. Pri visokih temperaturah nastopi sušenje betona, ki mu odteguje vodo, zato je potrebno vodo dodajati. Tako dosežemo višjo trdnost v krajšem času.

3.3 Strjen beton

Da zagotovimo dolgo življenjsko dobo konstrukcij, moramo zagotoviti dobre lastnosti strjenega betona. Upoštevamo predpostavke, da je konstrukcija izpostavljena dejanskim pogojem okolja, da je obremenjena in uporabljena, kot je določeno s projektom in da je redno vzdrževana, v skladu s projektom vzdrževanja. Dosežene končne lastnosti strjenega betona so odvisne od kakovosti betonske mešanice, nege betona, sušenja betona.

3.3.1 Nega betona

Nega betona se po vgradnji na gradbišču večinoma nanaša na ohranjanje ugodnih toplotnih razmer in vlage (preprečevanje izsušitve, zmrzovanja in razpokanja). Ustrezna nega betona v času vezanja in strjevanja pripomore k večji odpornosti betona na vremenske in kemične vplive ter k večji odpornosti na obrabo. Končna trdnost betona je seveda odvisna od nege betona v času vezanja in strjevanja in od vlažnosti okolja, v katerem se beton nahaja. Trdnost betona narašča, dokler so v cementni pasti še nehidratizirana zrnca cementa. Proces strjevanja poteka nemoteno, če je relativna vlažnost okolja nad 80% in če je temperatura okolja dovolj visoka. Zato je nujna nega betona v prvih mesecih starosti betona, z zagotavljanjem ustrezne vlažnosti okolja. Beton negujemo na več različnih načinov, kot so polivanje z vodo, pokrivanje z mokrimi tkaninami, prekrivanje s plastično folijo, vlaženje z razprševanjem vode in razpršenje kemijskega sredstva za nego, na površino.

3.3.2 Sušenje betona

Sušenje betona ne prispeva k njegovemu strjevanju, saj proces hidratacije potrebuje vlago. Zato osušeni beton nima vedno ustrezne in predvidene stopnje trdnosti, saj je zaradi pomanjkanja vlage del cementa lahko ostal nehidratiziran. Prehitro sušenje betona povzroča razlike med deformacijami zunanjega betona in betona v notranjosti in lahko povzroči njegovo krčenje in pokanje. Število in širina razpok sta odvisna od hitrosti sušenja in stopnje izsušitve. Ne glede na hiter proces površinskega sušenja, se razmere v notranjosti spreminjajo

počasneje. Betoni, ki imajo razmeroma veliko odprto površino, kot so npr. plošče in stene, se sušijo veliko hitreje kot na primer grede in stebri.

3.3.3 Procesi propadanja betona

Še do pred nedavnim je beton veljal za trajno gradivo. Razlog je verjetno tudi ta, da se je kot konstrukcijski material izpostavljen zunanjemu okolju začel masovno uporabljati šele relativno pozno. Danes se zavedamo problemov povezanih s trajnostjo AB konstrukcij do te mere, da pri projektiranju betonske mešanice izhajamo iz okolja, ki mu bo beton dejansko izpostavljen med življenjsko dobo. Poškodbe betona in AB elementov so posledica različnih procesov, ki povzročajo njegovo propadanje. Najpogostejše so razne oblike izločanja soli, propadanje in/ali luščenje betona zaradi delovanja mraza in poškodbe betonskega prekritja nad armaturo, zaradi njene korozije v obliki vzdolžnih razpok in odpadanja prekritja. Glavni vzroki za nastanek poškodb so karbonatizacija, kloridi, temperaturne spremembe in delovanje mraza, delovanje mehke vode, delovanje nekaterih kislin na cementni kamen, krčenje in lezenje betona, slaba zasnova in izvedba konstrukcije in njenih detajlov ter napake pri gradnji. Propadanje betona je večinoma kombinacija več omenjenih vplivov.



Slika 9: Agresivni vplivi na beton, njihovi povzročitelji in posledice.

3.4 Tehnološke lastnosti betona

Pomembne tehnološke lastnosti betona so:

- obrabnost,
- vodotesnost,
- zmrzljinska odpornost,
- prostorninska stabilnost betona.

3.4.1 Obrabnost

Obrabnost betona je pomembna predvsem za površine, ki so izpostavljene mehanskim vplivom in tekoči vodi. Obrabnost je sorazmerna s trdnostjo betona. Visoko odporni betoni so narejeni z nizkim vodo-cementnim razmerjem iz trdnega in trdega agregata ter so površinsko ustrezno obdelani.

3.4.2 Vodotesnost

Vodotesnost je lastnost, ki jo morajo imeti betoni, ki so izpostavljeni atmosferskim vplivom. Vodotesni betoni morajo zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Prepuščanje vode je odvisno od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter od razmerja med njima. Manj prepustni betoni so bolj odporni na vpliv kemikalij, ki se transportirajo kot vodne raztopine in s tem je povezana tudi zmrzljinska odpornost betona. Cementni kamen je manj prepusten, če je cementna pasta pripravljena z manjšo količino vode, če je stopnja hidratacije betona visoka in če je bil le ta med vezanjem in strjevanjem ustrezno negovan. Največji vpliv na vodotesnost pa imata razpokanost in odprta poroznost betona.

3.4.3 Zmrzljinska odpornost

Zmrzljinska odpornost betona je lastnost, ki prispeva k trajnosti betona. Proces zmrzovanja znižuje življenjsko dobo betona, dodatno pa jo znižujejo še prisotnost in vpliv raznih kemikalij. Zmrzljinska odpornost betona se lahko poveča z načrtnim vnosom zračnih mehurčkov ustrezne velikosti (premer okrog 0,3 mm) in v ustreznem deležu v betonsko mešanico ter z ustrezno izbiro agregata (manj porozen, zmrzljinsko odporen).

3.4.4 Prostorninska stabilnost

Prostorninska stabilnost betona vpliva na njegovo delovanje znotraj konstrukcije, v katero je vgrajen. Strjen beton lahko svojo prostornino spreminja zaradi temperaturnih sprememb, sprememb vlage okolja in obremenitev. Beton, ki je izpostavljen stalni vlagi, rahlo nabreka, ko pa se osuši se skrči. Na prostorninsko stabilnost vplivajo še delež, vrsta in zrnastostna sestava agregata, način nege betona med strjevanjem in stopnja hidratizacije.

4 METODE PREISKAV SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE STANDARDA SIST EN 206-1

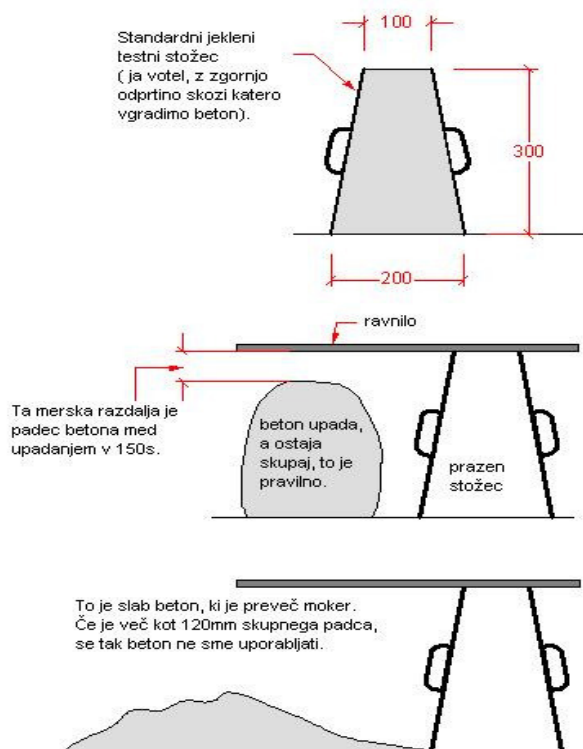
4.1 Metoda s posedom

Metoda s posedom (SIST EN 12350-2) je ena od metod za preskušanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic in je relativno preprosta. Zasnovana je na merjenju deformacije zgoščenega betonskega prisekanega stožca, ki se posede zaradi lastne teže. Pred preiskavo navlažimo notranjost prisekanega stožca in površino podlage tako, da ni proste vode na plošči. Prisekan stožec postavimo na sredino podlage ter ga držimo trdo na podlago. Kovinski kalup v obliki prisekanega stožca višine 300 mm ter zgornjega premera $\varnothing 100$ mm in spodnjega premera $\varnothing 200$ mm polnimo z zidarsko žlico. Po vsaki napolnjeni tretjini kalupa vgrajeno plast zgostimo s 25 prebodi s standardno kovinsko palico. Prvo plast prebadamo po celoti, medtem ko vsako nadaljnjo plast prebadamo samo do spodaj ležeče plasti. Ko zgostimo zgornjo plast, odstranimo presežek betona in izravnamo površino. Kalup počasi dvigujemo in ga postavimo ob vzorec posednega betona. Standardno palico postavimo na vrh stožca tako, da seže nad betonski stožec in nato izmerimo razliko v višinah.



Slika 10: Posed betona.

Razlika višin, zaokrožena na 10 mm, je mera za konsistenco po tej metodi. Rezultat preiskave je razlika med prvotno višino betona v kalupu in višino betona po posedu. Celotna meritev ne sme trajati več kot 150 sekund in je primerna za betone s konsistenco $210 \text{ mm} < \Delta h < 10 \text{ mm}$. Če pride do nepravilnega poseda, preiskavo ponovimo.



Slika 11: Pravilen in nepravilen posed stožca.

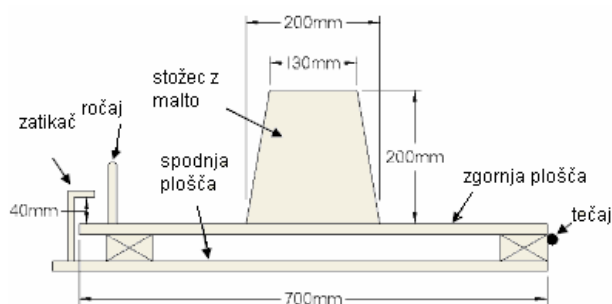
4.2 Metoda z razlezom

Metoda z razlezom (SIST EN 12350-5) je zasnovana na merjenju deformacij zbitega betonskega preskušanca v obliki prisekanega stožca. Je enostavna metoda, ki se uporablja za plastične in tekoče mešanice. Na stresalno mizo postavimo skrajšan kovinski prisekan stožec višine 200 mm, ki ga napolnimo v dveh plasteh. Vsako plast posebej nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem prereza 40 x 40 mm in po nabijanju odstranimo presežek betona z vrha. Po 30 sekundah odstranimo kovinski kalup. Zgornjo ploščo stresalne mize, dimenzij 70 x 70 cm dvignemo za 4 cm in jo spustimo, da prosto pade 15-krat. Betonska mešanica se razleze po stresalni mizi. Izmerimo dva medsebojno pravokotna premera razlezene betonske

mešanice. Metoda je primerna v območju razlezov $620 \text{ mm} > D > 340 \text{ mm}$. Mera konsistence je povprečje dveh pravokotnih premerov razlezene betonske mešanice zaokroženo na 10 mm.

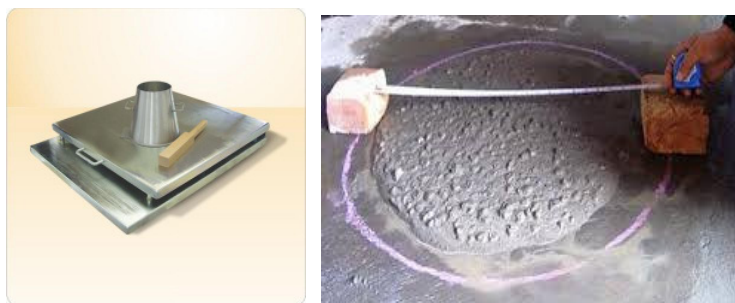
Preglednica 5: Stopnje konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1.

STOPNJA	PREMER v (mm)
F1	≤ 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	≥ 630



Slika 12: Metoda z razlezom.

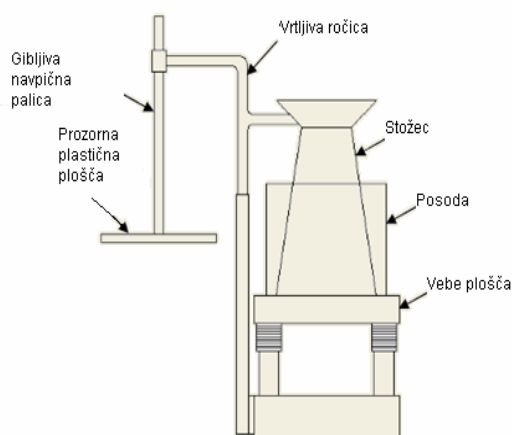
Ta metoda nam poleg ocene vgradljivosti betonske mešanice omogoča tudi oceno segregacije betona. Segregacija se kaže z izločanjem debelejših zrn iz betonske mase, kar je znak majhne kohezivnosti betona, pri židkih betonih pa tudi z izločanjem cementnega mleka na robu razlezene betonske mase.



Slika 13: Postopek določanja konsistence betona z metodo z razlezom.

4.3 VE-BE metoda

Preiskavo VE-BE opravimo v skladu z določili standarda SIST EN 12350-3. Postopek je primeren za betone s konsistenco v časovnem intervalu $30 > t > 5$ sekund. Stopnja konsistence je določena s časom v sekundah, v katerem se betonski vzorec oblike prisekanega stožca preoblikuje tako, da prevzame obliko jeklenega lonca. Najprej na vibracijski mizici napolnimo kalup v obliki prisekanega stožca v treh plasteh, vsako plast zgostimo s 25 prebodi. Odstranimo presežek sveže betonske mešanice in izravnamo zgornjo plast. Postopek priprave preskušanca je enak kot pri preiskavi poseda. Na zgornjo plast položimo disk iz pleksistekla, vključimo vibracijsko mizico in štoparico. Ker se beton med vibriranjem preoblikuje, se disk spušča. Vibriramo toliko časa, dokler spodnja površina diska ni v celoti prekrita s svežim betonom. Takrat izključimo vibracijsko mizico in ustavimo štoparico. Rezultat meritve je čas preoblikovanja betonske mase v sekundah.



Slika 14: Ve-be metoda po SIST EN 12350-3.

4.4 Metoda z zgoščevanjem pri vibriranju

Metoda z zgoščevanjem (SIST EN 12350-4) daje dobre kvantitativne rezultate pri definiranju konsistence trdih in srednjeplastičnih mešanic. Standardni kalup napolnimo s svežo betonsko mešanico do vrha in odstranimo presežek betona ter poravnamo z zgornjo površino. Betonsko

mešanico vibriramo ravno tako, kot pri vgrajevanju betona na gradbišču. Za vibriranje uporabimo vibracijsko iglo ali vibracijsko mizo. Po končanem vibriranju izmerimo višino od površine zgoščenega betona do vrha kalupa v vseh štirih vogalih kalupa in izračunamo merodajno višino. Stopnjo zgoščenosti določimo z razmerjem višin pred in po vibriranju v kovinskem kalupu standardnih dimenzij (20 x 20 x 40 cm).

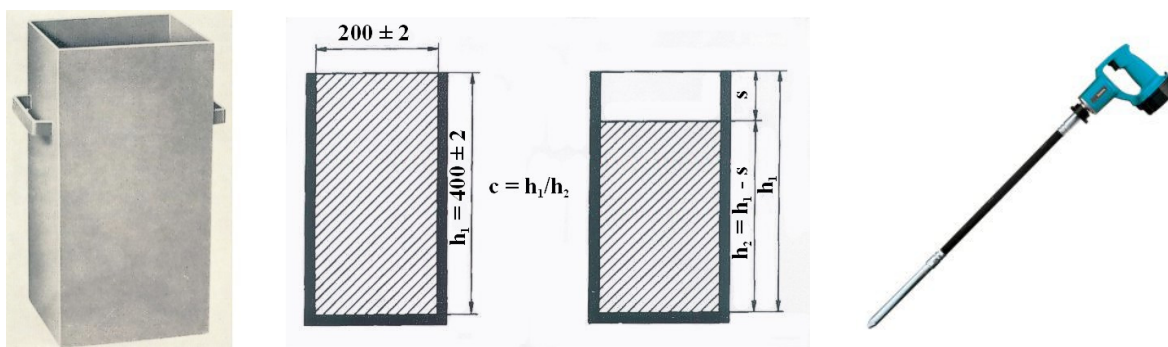
Indeks ali mera zgoščenosti C:

(4.1)

$$C = \frac{h_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_1 - s}$$

Preglednica 6: Stopnje konsistence v odvisnosti od mere zgoščenosti po standardu SIST EN 206-1.

STOPNJA	MERA ZGOŠČENOSTI
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 do 1,26
C2	1,25 do 1,11
C3	1,10 do 1,04



Slika 15: Kalup za zgoščevanje po SIST EN 12350-4 in vibracijska igla.

4.5 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu

Vsebnost zraka v svežih betonskih mešanicah določimo po standardu SIST EN 12350-7. Naprava, s katero določimo vsebnost zraka v svežem betonu, se imenuje porozimeter, ki ima kapaciteto vsaj 5 litrov in mora zdržati pritisk 0,2 MPa. Porozimeter mora omogočati določitev deleža zraka v betonu v območju od 0-10%. Skala prikazovanja pa mora biti natančna minimalno na 0,1% v intervalu od 0-3%, 0,2% v intervalu od 3-6% ter 0,5% v intervalu od 6-10%.

Osnovno posodo napolnimo s svežo betonsko mešanico v treh slojih in vsak sloj zgostimo v skladu z zahtevami. Višek materiala odstranimo z zidarsko žlico in s čisto vlažno krpo očistimo rob posode. Na osnovno posodo pritrdimo predkomoro - pokrov in na njem odpremo ventil, skozi katerega vlivamo vodo toliko časa, da se zapolni ves prostor med površino betona in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurči, ventil zapremo in z ročno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nič. V primeru, da je pritisk v predkomori previsok, izpustimo odvečni zrak skozi izpustni ventil. Nekaj sekund po izravnavi pritiska odpremo ventil in na manometru odčitamo delež zraka v % glede na celotni volumen svežega betona v posodi.



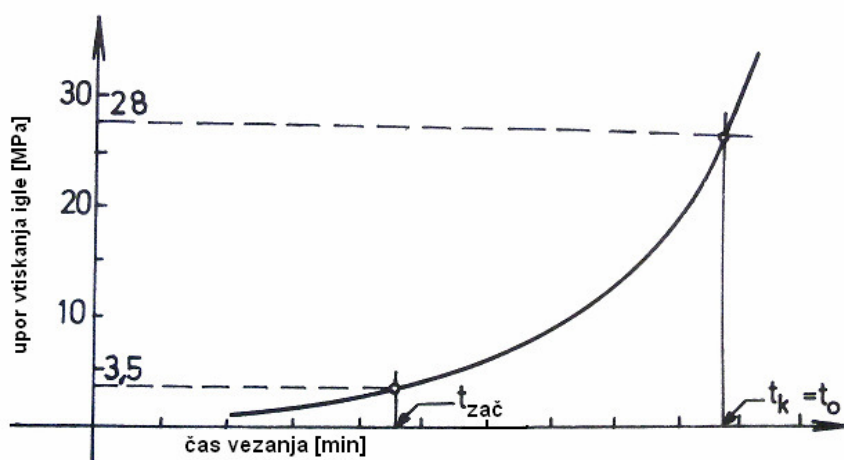
Slika 16: Porozimeter za beton.

4.6 Določanje časa vezanja betona

Tako kot pri cementu lahko tudi pri betonu določimo čas začetka in konca vezanja materiala. Postopek poteka v skladu z določili standarda ASTM C 403. Oba časa vezanja predstavljata empirične vrednosti, s pomočjo katerih lahko ocenimo čas, ki ga imamo na razpolago za proizvodnjo, transport in vgrajevanje svežega betona. V tem smislu je posebnega pomena začetek vezanja, ker ta karakteristika določa čas, do katerega se mora končati vgrajevanje sveže betonske mešanice. Čas vezanja ocenimo s pomočjo posebne naprave, penetrometra. S pomočjo penetrometra merimo upor v MPa, ki ga betonska mešanica nudi prodiranju igel/sond predpisanega premera. Preiskava poteka na sveži malti vzeti iz betonske mešanice (sejanje svežega betona čez sito 5 mm).

Postopek preiskave poteka z vtiskanjem igel različnih premerov v svežo malto do globine 25 mm in odčitavanjem pripadajočih sil dinamometru. Ustrezne premere igel izberemo glede na silo vtiskanja, ki ne sme preseči maksimalne vrednosti. Tekom preiskave se rezultati vnašajo v diagram, iz katerega odčitamo začetek in konec vezanja:

- Čas začetka vezanja je pri 3,5 MPa. To je čas, ki preteče od prvega stika vode in cementa (začetka hidratacije) in vse dokler malta pri vtiskanju igle ne pokaže upor 3,5 MPa.
- Čas konca vezanja, je čas ki preteče od začetka stika vode in cementa ter vse dokler upor ne doseže 28 MPa.



Slika 17: Fizikalna razlaga stopnje razvoja hidratacije.

4.6.1 Postopek vezanja po standardu ASTM C 403

Oprema ki jo uporabljamo:

- Kalupe za vzorce malte, ki morajo biti trdne, vodonepropustne, ne vpijajoče in naoljene. So krožnega ali pravokotnega prečnega preseka, ki ne sme biti manjši od 150 mm, po višini pa tudi ne manjši od 150 mm.
- Penetrometer, aparat za merjenje upora pri vtiskanje igle. Merimo s penetrometrom - vzmetjo (dinamometrom) na inštrumentu, z merskim obsegom merjenja od 45 do 600 N (z razdelki po 10 N) ali s hidravlično napravo z obsegom merjenja od 650 do 900 N. Igle so premera 645, 323, 161, 65, 32 in 16 mm². Vsaka igla ima zarezo označeno na 25 mm od konice. Igla preseka 16 mm² ne sme biti daljša od 90 mm, saj lahko pride do njenega upogibanja.
- Vibracijska igla za zgoščevanje pri vgrajevanju in termometer.



Slika 18: Penetrometer

Priprava:

Vzorce pripravimo tako, da svež beton presejemo čez sito 5 mm in tako pridobimo malto za preskušanje. Posode (kalupe) očistimo, jih namažemo z oljem in napolnimo z malto ter malto zgostimo z vibracijsko iglo. Posode so napolnjene do višine najmanj 140 mm. Vibracijsko iglo vtiskamo enkrat na vsakih 6,5 cm² enakomerno po prerezu vzorca. Potem vzorec zgostimo še na vibracijski mizici, da se zapolnijo votline v malti. Po koncu priprave vzorca mora biti malta najmanj 10 mm pod vrhom posode. S tem omogočimo zbiranje vode iz malte na površini malte in se izognemo stiku med površino malte in zaščitnim pokritjem.

Nega in število vzorcev:

Za vzorce je priporočljivo, da se nahajajo v prostoru s temperaturo $20 \pm 2^\circ\text{C}$ in relativno vlago $65 \pm 5\%$. Lahko pa jih negujemo tudi v pogojih, ki jih zahteva naročnik.

Pripraviti moramo vsaj tri paralelke (3 vzorce) za vsako spremenljivo količino, ki jo merimo.

Merjenje:

Zbrano vodo, ki se nabere na površini vzorca, moramo pred začetkom vtiskanja igle odstraniti s pomočjo kapalke, lahko pa tudi nagnemo posodo, da voda odteče. Na začetku izberemo iglo z največjim premerom oz. odvisno od stanja sveže malte in jo vstavimo v napravo za merjenje upora proti prodiranju igle pri vtiskovanju. Iglo vtiskamo navpično navzdol, približno 10 sekund, dokler ne prodre do globine 25 mm, ki je na njej označena. Zapisujemo izmerjeno silo vtiskanja in čas od trenutka stika cementa in vode. Pri vsakem naslednjem vtiskanju se izogibamo mest preblizu prejšnjih vtiskovanj. Razdalja med dvema mestoma vtiskanja igle ne sme biti manjši od dveh premerov igle, ki se uporablja, in ne manjša od 15 mm. Razdalja od mesta vtiskanja do roba posode pa ne sme biti manjša od 25 mm, v skrajnem primeru 20 mm.



Slika 19: Kalupi z malto po vtiskanju igel.

Meritve vtiskanja za običajne mešanice in običajne temperature izvajamo v časovnih intervalih dolgih med 30 in 60 min, pri čemer se začetno merjenje začne od 3 do 4 ure po pripravi mešanice. Za mešanice z dodatki za pospešitev vezanja in pri povišanih temperaturah začnemo prvo merjenje po 1 do 2 urah z intervali merjenja 30 min. Pri nizkih temperaturah ali za betonske mešanice z zaviralci vezanja se prva meritev opravi po 4 do 6 urah. Vtiskanje igle izvajamo v intervalih dolgih 60 minut, pozneje pa so potrebni krajši intervali. Na vsakem preskušancu opravimo vsaj 6 meritev. Intervale med meritvami prilagodimo tako, da

omogočajo pridobitev poteka krivulje vezanja s točkami na enakih razdaljah. Preiskava traja, dokler ne dosežemo vrednosti 28 MN/m² oz. MPa. Dnevna intervalna natančnost več mešanic, ki jih lahko meri en operator, je ± 25 min. Povprečen čas vezanja dveh serij meritev na enaki sestavi betona, pri čemer se v vsaki seriji preskušajo trije vzorci, ne sme odstopati za več kot 20 min od povprečne vrednosti dveh merjenj.

4.6.2 Izračun in poročilo

Vrednost upora vtiskanja igle, v MN/m², dobimo ko vrednost sile, pri kateri se igla vtisne do globine 25 mm, delimo s prečnim prerezom igle.

Poročilo vsebuje naslednje podatke:

- sestava betonske mešanice, vrsta in količina cementa, zrnastost agregata in vodo-cementno razmerje,
- vrsta in odstotek dodatka betonu, ki se uporablja,
- vsebina zraka v svežem betonu in način določevanja,
- konsistenca betona in metoda s katero je določena,
- temperatura malte po sejanju svežega betona,
- spremembe temperature v času meritev,
- nega vzorca, datum meritve in čas vezanja,
- krivulje za vsako spremenljivo količino ali stanje betona. Vsaka mešanica ima svoj graf meritev, pri čemer rišemo upor vtiskanja igle v MN/m² na ordinatni y-osi in čas od stika cementa in vode v minutah na abscisni-x osi.

5 METODE PREISKAV Z ELEKTRIČNO PREVODNOSTJO (povzetek članka Mesbah, H.A., et al. 2011)

5.1 Ocena stabilnosti

Cilj te študije je bil oceniti stabilnost betona v opažu v zgodnji fazi, to je predvsem v času vezanja cementa, z uporabo metode električne prevodnosti. Ocenjene so bile različne samozgoščevalne (SCC) mešanice betona s točno določenim vodo-cementnim razmerjem 0,42, različnimi zrnastimi sestavami agregata in razlezom s posedom enakim 650 ± 10 mm ali 700 ± 10 mm. Analiza časovnega spreminjanja koncentracije ionov vzdolž višine preskušanca, vgrajenega v opaž v obliki manjšega stebra, omogoča ustrezno oceno stabilnosti SCC. Na primer, povečanje deleža sredstva za povečanje viskoznosti (VMA) z 1 na 2% je povzročilo zmanjšanje indeksa homogenosti z 0,36 na 0,27, kar kaže na večjo stabilnost SCC mešanice z večjim deležem VMA. Ocena učinkovitosti metode električne prevodnosti za oceno stabilnosti SCC betona v svežem stanju je bila opravljena s pomočjo korelacije indeksov stabilnosti, ki izhajajo iz meritev električne prevodnosti, in fizikalnih sprememb v koncentraciji grobega agregata, določenih na vzorcu plastičnega betona odvzetega iz opažev za izdelavo majhnih stebrov ob koncu opazovanega časa električne prevodnosti. Dosežena je bila dobra korelacija med indeksi stabilnosti in koncentracijami grobega agregata.

5.1.1 Predstavitev metode

Segregacija grobega agregata v betonu lahko vodi do heterogenih lastnosti strjenega materiala, z neposrednim vplivom na mehanske in transportne lastnosti ter obstojnost betona. Zaradi visoke sposobnosti tečenja in nizke napetosti na meji tečenja so samozgoščevalni betoni (SCC) bolj podvrženi segregaciji kot običajni betoni. Kontrola segregacije je torej pri SCC bistvena, če želimo doseči ustrezne mehanske lastnosti in konstrukcijsko obnašanje AB elementov. Stabilnost svežega betona je v veliki meri odvisna od sestave mešanice in kinetike

hidratacije cementa pri zgodnji starosti betona. Na kinetiko v veliki meri vplivajo kemijski dodatki tipa superplastifikator in dodatek za povečanje viskoznosti ter dodatni cementni materiali.

Statične segregacije ne moremo enostavno zaznati na izpostavljeni površini betona (površina, ki ni v stiku z opazem), razen če se kaže z izrazitim izcejanjem vode na površino (ang. »bleeding«). Po drugi strani pa je možen pojav statične segregacije tudi pri visoko kohezivnih betonskih mešanicah, ki vsebujejo mikrosiliko ali VMA, kjer ne prihaja do izcejanja vode na izpostavljeno površino betona. To je posledica oviranja transporta izločene vode proti zgornji površini betona v viskoznih sistemih. Ustrezno ovrednotenje potovanja/gibanja vodne raztopine znotraj betonske mešanice pri zgodnji starosti, lahko zato pomaga pri ustreznem razumevanju procesa segregacije v SCC mešanicah. Na primer, ovrednotenje migracije notranje proste vode v sistemu lahko priskrbi uporabne informacije o heterogenosti betona.

Zato je bila pred kratkim predlagana nova preizkusna metoda za oceno skupnih vplivov migracije vode, zgoščevanja in segregacije cementnih kompozitov, ki temelji na merjenju električne prevodnosti svežega materiala. Električna prevodnost plastičnega betona je funkcija različnih parametrov, kot so prostorninski delež cementne paste, porazdelitev sistema por po velikosti, ionska sestava tekoče faze, prisotnost kemijskih dodatkov in povezanost sistema por. Glavni namen opravljene študije je bil ovrednotiti praktično uporabnost metode električne prevodnosti za oceno segregacije SCC s pomočjo relativno velikih vzorcev in s korelacijo rezultatov neporušne metode s fizikalno segregacijo in vrednostmi izcejanja vode na površino betona. Preizkusna metoda temelji na časovnih meritvah (monitoringu) električne prevodnosti skozi betonsko mešanico s pomočjo večjega števila parov elektrod. Spreminjanje koncentracije ionov s časom, ki se odraža v rezultatih meritev električne prevodnosti, je bila uporabljena za določitev indeksov stabilnosti, ki odražajo stabilnost SCC mešanic. Ocena stabilnosti dobljena z meritvami električne prevodnosti, je bila primerjana z indeksi stabilnosti določenimi s pranjem svežega betona na 5 mm situ in določanjem porazdelitve agregata vzdolž betonskega stebra. Ugotovljene so bile dobre povezave med stabilnostnim indeksom, ocenjenim iz električne prevodnosti in stabilnostnim indeksom, ocenjenim iz porazdelitve grobih agregatnih zrn vzdolž višine stebra. To kaže na uporabnost meritev električne prevodnosti za oceno stabilnostne obravnavanih SCC betonov.

5.1.2 Meritve električne prevodnosti

V okviru preiskav so bile betonske mešanice vgrajene v opaž manjšega stebra višine 1005 mm in prečnega prereza 250 x 250 mm. V opaž so bili vstavljeni 4 pari elektrod vzdolž višine stebra. Opaž se je polnil z vlivanjem betona s konstantno hitrostjo 30 m/h. Pri meritvah električne prevodnosti je bil uporabljen pravokotni signal frekvence 1 kHz, napetost vira je bila 5 V (volt). Pari elektrod so bili iz medeninastih vijakov, ki imajo premer 45 mm in dolžino 25 mm in so fiksirani v plastičnih (PVC) palicah. Električne sonde so bile pred uporabo v betonu kalibrirane. S kalibracijo je bila določena efektivna konstanta posamezne celice. Postopek je potekal v standardni raztopini NaCl znane prevodnosti, v katero so bili potopljeni pari elektrod in nato izmerjena prevodnost.

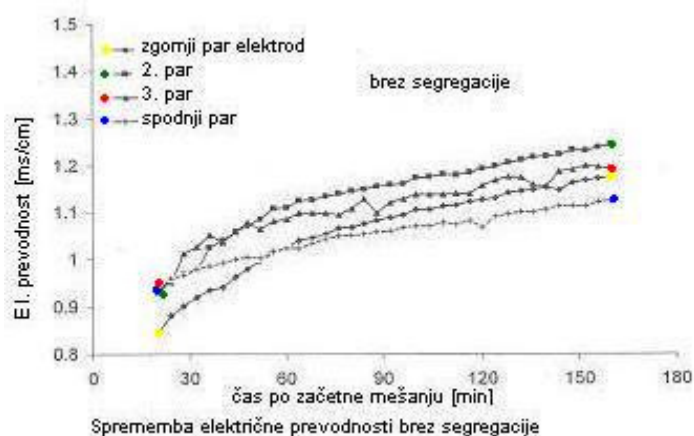
Preiskava določa razlike v izmerjeni električni prevodnosti na različnih višinah betonskega stebra, tekom 150 minutnega časovnega intervala. Za interpretacijo homogenosti materiala je uporabljena variacija v električni prevodnosti vzdolž višine vzorca, kot funkcija časa. Metoda omogoča ovrednotenje skupnega vpliva migracije vode, konsolidacije in segregacije cementnih kompozitov v plastičnem stanju med hidratacijo cementa. Stabilnostni indeksi, ki jih je predstavil Khayat in ostali, vključno z indeksom izločanja, indeksom segregacije in indeksom homogenosti, so uporabljeni za oceno stabilnosti SCC betona.



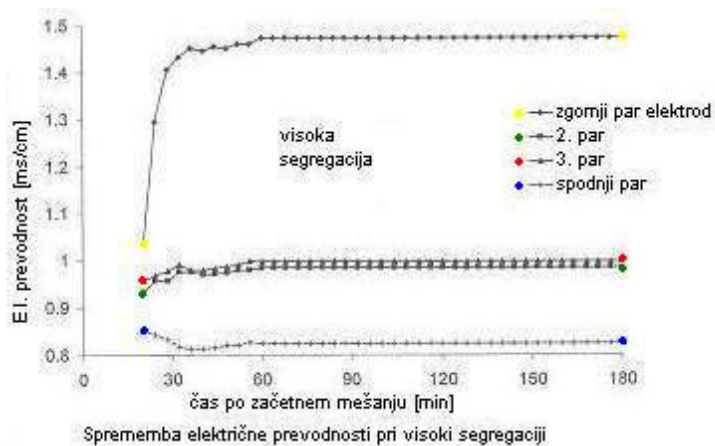
Slika 20: Testni vzorec z nameščenimi 4 pari elektrod.

5.1.3 Občutljivost meritev električne prevodnosti

Obravnane SCC mešanice so različno stabilne in variirajo glede višje ali nižje stopnje segregacije. Mešanice so bolj ali manj podvržene separaciji faz med vgrajevanjem betona v opaž, kar se kaže v začetnem heterogenem odzivu – prevodnosti. Segregacijski proces (posedanje grobih zrn agregata), ki je ravno nasproten izločanju vodne raztopine proti zgornjemu delu stebra, povzroči zmanjšanje prevodnosti v spodnjem območju stebra. To se lepo vidi, če primerjamo električne prevodnosti med spodnjim parom elektrod na slikah 21 in 22. Električna prevodnost je pri betonu z visoko stopnjo segregacije (Slika 22) znatno manjša.



Slika 21: Spreminjanje el. prevodnosti pri betonu z v/c 0,4 brez segregacije.



Slika 22: Spreminjanje el. prevodnosti pri betonu z v/c 0,4 pri visoki segregaciji.

Pri izrazito nestabilnem betonu (Slika 22) je opazna velika razlika v električni prevodnosti med zgornjim in spodnjim parom elektrod, kar kaže na obsežen transport vode proti vrhu stebra. V primeru stabilnega betona (Slika 21) je ta razlika zelo omejena, v primerjavi z opaženo razliko pri mešanicah s srednjo ali nizko odpornostjo proti segregaciji.

6 LASTNE PREISKAVE

6.1 Uvod

V eksperimentalnem delu naloge smo ocenjevali stabilnost svežih malt z metodo električne prevodnosti, vizualno ugotavljali homogenost malte na strjenih preizkušancih ter vzporedno izvajali preiskavo vezanja malte s penetrometrom.

Malto smo izdelali iz drobljenega apnenčevega agregata in cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R. Osnovni namen preiskav je bil oceniti učinkovitost metode električne prevodnosti za oceno stabilnosti svežih malt v kalupu. Predvsem smo želeli preveriti, ali metoda zazna razlike, ki so posledica različne vsebnosti vode v različnih slojih preizkušanca (sloji z različnim v/c razmerjem) in razlike v količini vode zaradi segregacije agregatnih zrn v malti. Pripravili smo več maltnih mešanic z različnimi v/c razmerji. Referenčno v/c razmerje je bilo 0,5. Pri prvem preizkušancu je bila maltna mešanica z v/c razmerjem 0,5 vgrajena v kalup v obliki plastične cevi po celotni višini kalupa. Pri naslednjih treh preizkušancih smo malto vgradili po slojih in vsak sloj je imel drugačno v/c razmerje: 0,4, 0,5, 0,6 in 0,7. Zadnja preizkušanca sta bila iz malte z v/c razmerjem 0,5. Pri nji smo načrtno povzročili segregacijo. Rezultate meritev električne prevodnosti smo na koncu primerjali še z vizualno oceno segregacije strjenih prerezanih vzorcev. S pomočjo vizualnega pregleda smo ugotovili napake v strukturi strjenih malt in razložili neskladanja med rezultati meritev električne prevodnosti. Eksperimentalne preiskave so potekale v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.

Vzporedne preiskave smo opravili s penetrometrom in sicer smo določali čase vezanja malt. Uporabili smo isti agregat in cement, kot pri metodi električne prevodnosti. V 4 različne kalupe smo vgradili malto z različnimi v/c razmerji, enakimi 0,4, 0,5, 0,6 in 0,7 ter določali začetek in konec vezanja pri standardni temperaturi okolja. Upoštevali smo določila standarda ASTM C 403, ki opisuje potek preiskave. V predpisanih časovnih intervalih smo v svežo

maltno mešanico vtiskali različne velikosti igel penetrometra in hkrati merili za to potrebno silo. Po preračunu dobljenih rezultatov meritev, smo določili časovni potek vezanj, iz katerega smo odčitali časa začetka in konca vezanja.

6.2 Osnovne sestavine malte

6.2.1 Agregat

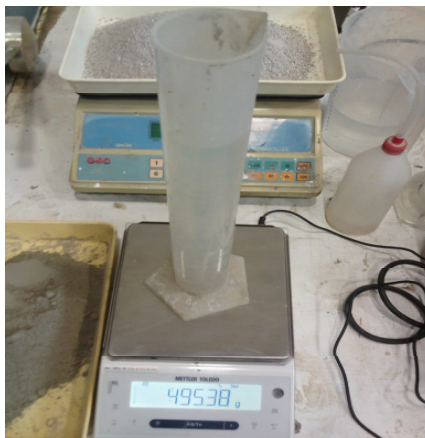
Za izdelavo maltnih mešanic smo uporabili drobljen apnenčev agregat frakcije 0/4, s prostorninsko maso zrn $2,7 \text{ g/cm}^3$. Za pripravo malte pridejo v poštev zrna agregata manjša od 4 mm (droben agregat), medtem ko v beton vključujemo poleg drobnega še grobi agregat.



Slika 23: Tehtanje agregata.

6.2.2 Voda

Za mešanice malt smo uporabili pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja. Vodo smo stehtali s tehtnico na 0,01 g natančno.



Slika 24: Tehtanje vode.

6.2.3 Cement

Uporabili smo cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, domačega proizvajalca Salonit Anhovo. To je specialni portlandski mešani cement z dvema mineralnima dodatkomoma, apnencem (LL) in žlindro (S). Je trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Namenjen je za najzahtevnejše gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti, predvsem pa za zmrzlinško odporne aerirane betone, brizgane, armirane, nearmirane in prednapete ter za prefabricirane betonske izdelke. Prostorninska masa cementa brez por in votlin je $\gamma_c = 3,01 \text{ g/cm}^3$, specifična površina cementa po Blainu pa je $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Cement izpolnjuje zahteve standarda SIST EN 197-1.



Slika 25: Priprava cementa.

Cement je sestavljen iz najmanj 80% portland cementnega klinkerja, 6-20% mešanega dodatka (apnenec, granulirana plavžna žindra) in do 5% manj pomembnih sestavin, kamor spada tudi regulator vezenja (sadra).

Preglednica 7: Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R v primerjavi z zahtevami SIST EN 197-1

Kemijske zahteve	Dosežene vrednosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	Zahteve standarda	Metoda preizkušanja
Vsebina sulfata, kot SO ₃	2,70%	≤ 4,0%	SIST EN 196-2.t.8
Vsebnost klorida	0,02%	≤ 0,1%	SIST EN 196-2.t.14
Mehanske in fizikalne zahteve			
Ostanek na situ 0,09mm	0,20%	/	SIST EN 196-6
Prostorninska masa	3,01 g/cm ³	/	SIST EN 196-6
Specifična površina	4000 cm ² /g	/	SIST EN 196-6
Voda za standardno konsistenco	28,10%	/	SIST EN 196-3
Začetek vezanja	200 min	≥ 60 min	SIST EN 196-3
Konec vezanja	240 min	/	SIST EN 196-3
Prostorninska obstojnost	0,4 mm	≤ 10 mm	SIST EN 196-3
Upogibna trdnost, 2dni	5,1 Mpa	/	SIST EN 196-1
28 dni	8,0 Mpa	/	
Tlačna trdnost, 2 dni	27,5 MPa	≥ 20,0 MPa	SIST EN 196-1
28 dni	52 MPa	42,5 – 62,5 MPa	

6.2.4 Kemijski dodatek - superplastifikator

Uporabili smo superplastifikator nove generacije z elektrostatičnim in steričnim delovanjem. Adsorpcija superplastifikatorja poteka postopno in dalj časa, zato je tudi učinkovitost večja.

Gre za tekočino rumeno-rjave barve, gostota znaša 1,09 g/cm³, pH vrednost je 5,5 ± 0,5, doziramo pa ga 0,2-1,5% na maso cementa. Za našo pripravo smo vzeli 0,5% dodatka na maso cementa, torej 5,50 g superplastifikatorja, pri v/c razmerju 0,5. Superplastifikator lahko

dodajamo maltni mešanici razredčenega z zamesno vodo ali še boljše, koncentriranega v že pripravljeno svežo maltno mešanico manjše obdelovalnosti. V našem primeru smo superplastifikator malo razredčili z vodo in ga dodali maltni mešanici v točno določenem trenutku mešanja. Končni učinek plastificiranja se doseže po 2 min mešanja, zato ni priporočljivo naknadno dodajanje vode, ker lahko povzroči močno segregacijo betona.

Uporabljen superplastifikator pripomore k:

- daljšemu času obdelavnosti malte – tudi pri višjih temperaturah,
- lažjemu in hitrejšemu vgrajevanju in črpanju malte,
- visokim zgodnjim in visokim končnim trdnostim,
- počasnejši karbonatizaciji,
- prihranku energije.

6.3 Sestava maltne mešanice

Mešanica je bila sestavljena iz drobljenega apnenčevega agregata, cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R in vode iz ljubljanskega vodovodnega omrežja. Preizkušali pa smo tudi malto v isti sestavi z dodatkom superplastifikatorja nove generacije.

Sestavine maltnih mešanic za vzorce, ki smo jih preizkušali z metodo električne prevodnosti, s katero smo ocenjevali stabilnost malte, so podane v preglednici 8. Z malto je bilo potrebno zapolniti kalup v obliki plastične cevi s prostornino približno 2,1 litra. Gostota vode je 1 g/cm^3 , prostorninska masa cementa brez por in votlin 3 g/cm^3 in prostorninska masa agregatnih zrn $2,7 \text{ g/cm}^3$. Podano imamo tudi v/c razmerje. S pomočjo teh podatkov smo izračunali potrebne mase sestavin. Malte smo mešali s standardnim laboratorijskim mešalcem RILEM-CEN, ki omogoča zamešanje malte s prostornino okrog 2 litra z enim mešanjem.

Preglednica 8: Sestava mešanic za preiskavo stabilnosti malte.

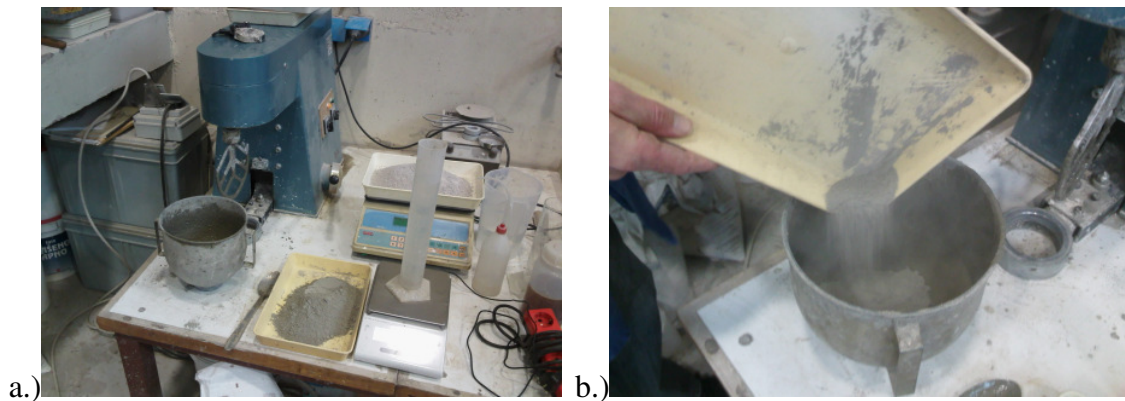
Vzorci v plastični cevi (metoda el.prevod.)	1 VZOREC	2,3,4 VZOREC				5,6 VZOREC
		sp.plast	2.plast	3.plast	zg.plast	
m-vode [g]	675	106,85	157,25	131,04	186,98	550,37
m-cementa [g]	1350	267,12	262,08	262,08	267,12	1100,74
m-agregat [g]	2700	873,48	715,48	786,24	657,12	3302,21
v/c razmerje	0,5	0,4	0,6	0,5	0,7	0,5
volumen [cm ³]	2100	530	520	520	530	2100
m-superplast. [g]	/	/	/	/	/	5,5

Mešanice, ki so imele po celem vzorcu (vzorec 1,5,6) enako v/c razmerje, smo pri prvem vzorcu vgradili v dveh slojih, pri 5. in 6. vzorcu pa v enem sloju. Mase komponent malte so v razmerju v:c:a = 1:2:4 pri 1. vzorcu in v:c:a = 1:2:6 pri 5. in 6. vzorcu. Pri 5. in 6. vzorcu smo med mešanjem dodali še superplastifikator in sicer po prvem premoru mešanja, ter nadaljevali mešanje z višjo hitrostjo še 90 sekund.

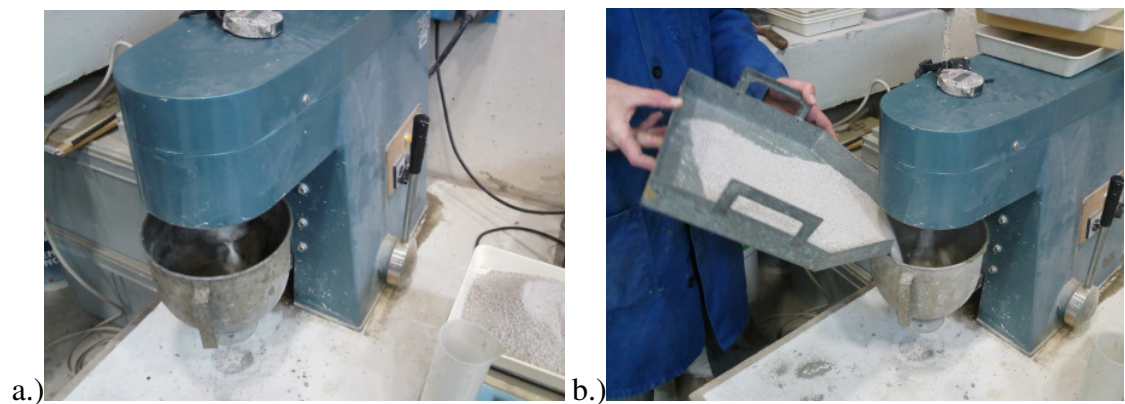
Pri 2.,3. in 4. vzorcu se v/c razmerje spreminja po vgrajenih plasteh. Manjše kot je v/c razmerje, večji je delež agregata, saj je pri vseh maltnih mešanicah količina cementa enaka. Malto smo zamešali za vsako plast posebej in jo vgradili v razmiku 5 min v plastično cev kalupa.

Standardni potek mešanja za malte je:

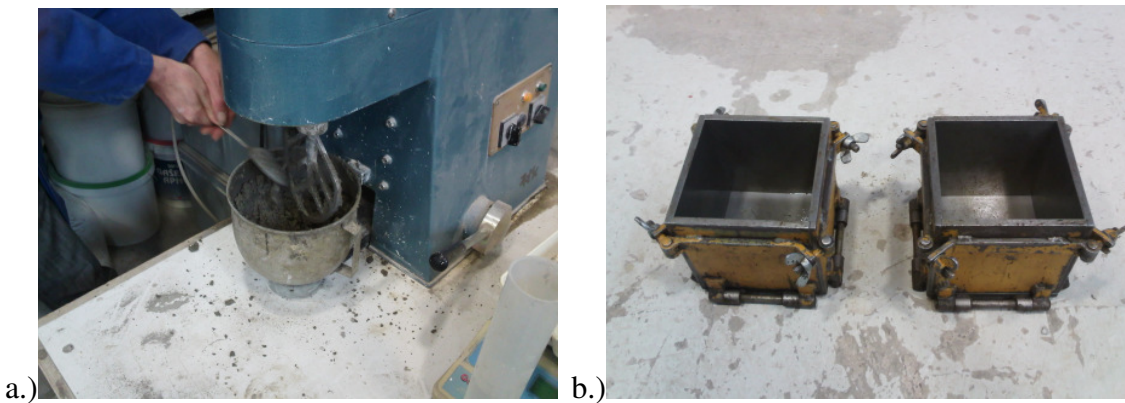
- Najprej stehamo vse sestavine in jih pripravimo,
- v mešalno posodo nalijemo vodo in dodamo cement,
- vključimo mešalec na nižjo hitrost ter pasto mešamo 30 sekund,
- v naslednjih 30 s dodajamo agregat, ter nato mešamo še 30 s v višji hitrosti,
- po prvem mešanju naredimo pavzo 90 s in zberemo vso malto na sredini posode,
- nadaljujemo mešanje v višji hitrosti še 90 s, nato malto vgradimo v kalup.



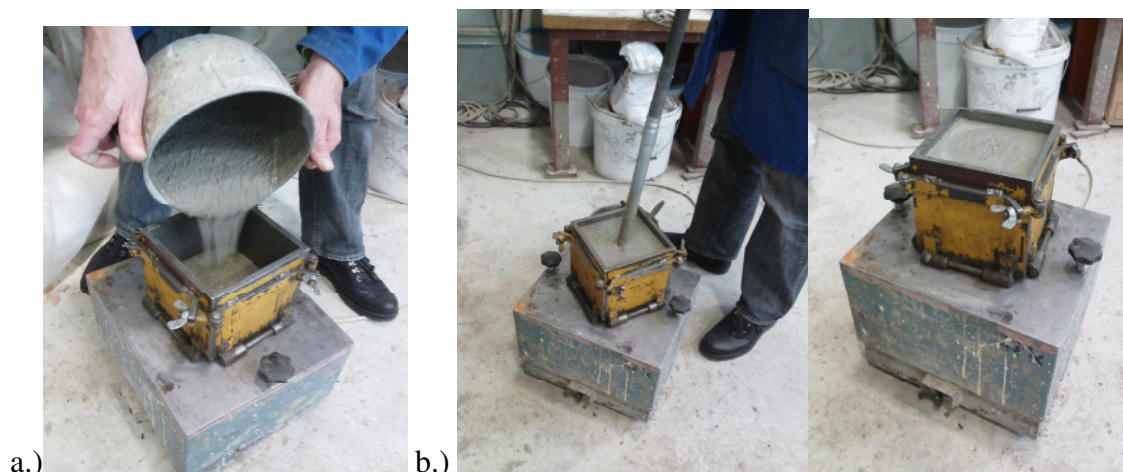
a.) b.)
Slika 26: a.) mešalec in priprava sestavin, b.) vsipanje cementa v posodo z vodo.



a.) b.)
Slika 27: a.) mešanje, b.) dodajanje agregata.



a.) b.)
Slika 28: a.) zbiranje malte na sredini posode, b.) kalupi 15/15/15 cm.



Slika 29: a.) vgrajevanje, b.) vibriranje z iglo in na mizici.

V vzporedni preiskavi smo malte enakih sestav vgradili v kalupe za določanje časa vezanja malte. Imeli smo kalup prostornine 3,15 litrov, zato so bile potrebne mase sestavin večje.

Preglednica 9: Sestava mešanic za preiskavo vezanja malte.

Vzorci v kalupu (vezanje malte)	1.VZOREC	2.VZOREC	3.VZOREC	4.VZOREC
m-vode [g]	1177,97	990,68	825,55	673,16
m-cementa [g]	1682,86	1651,1	1651,1	1682,86
m-agregat [g]	4139,86	4507,52	4953,31	5502,92
v/c razmerje	0,7	0,6	0,5	0,4
volumen [cm ³]	3150	3150	3150	3150

Mešanice smo vgradili v dveh plasteh. V kalup vgrajeni mešanici z v/c razmerjem 0,4 in 0,5 smo z vibrirali z vibracijsko iglo in na vibracijski mizici. Pri ostalih mešanicah to ni bilo potrebno, ker so bile že dovolj tekoče in so med vgrajevanjem same prevzele obliko kalupa.

6.4 Preiskave na maltah

Preiskave na maltah so bile opravljene z namenom ocene njihove stabilnosti z metodo električne prevodnosti, ki je tudi v svetovnem merilu še v fazi razvoja. V bistvu smo želeli ugotoviti, ali metoda zazna razlike v vsebnosti vode v različnem sloju malte ali na različni višini kalupa, zaradi načrtne vgraditve slojev malte z različnim v/c razmerjem ali načrtno segregirane malte, ki ima v bližini vrha kalupa višjo vsebnost vode, kot v bližini dna kalupa. To smo preverjali tudi z vizualno oceno na prerezanih vzorcih strjenih malt. Kot dodaten del preiskav pa smo določevali še čas vezanja malt s penetrometrom.

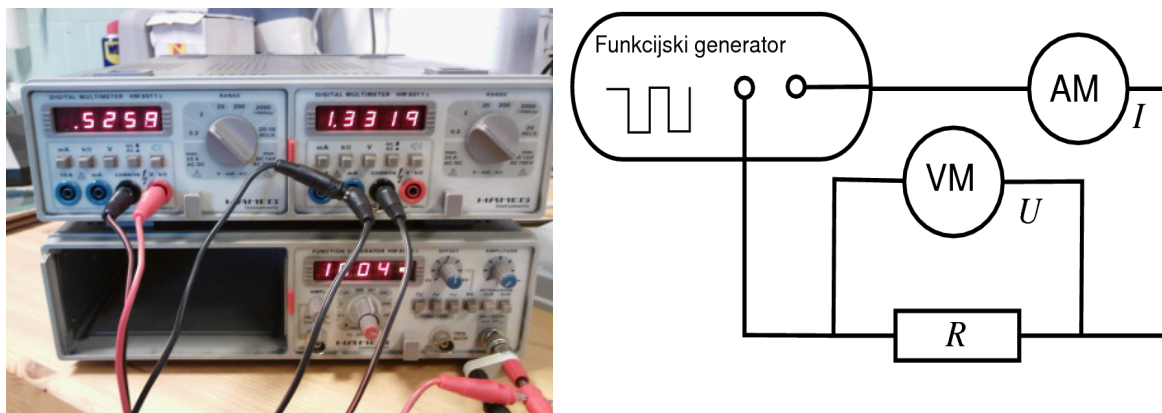
6.4.1 Preizkus z metodo električne prevodnosti

Pred temeljno preiskavo na sveži maltni mešanici smo najprej preizkusili zamisel na plastični cevi napolnjeni z destilirano vodo in dodajanjem soli. Destilirana voda sama po sebi ni električno prevodna, z dodatkom soli pa to postane. Plastična cev je bila višine 5 cm, premera 7 cm, navili smo 4 medeninaste vijake in jim postavili kontakte za elektrode, za merjenje električne prevodnosti. Rezultati, ki smo jih dobili, so bili pričakovani: večja, kot je bila koncentracija soli, večjo prevodnost raztopine smo izmerili. Ta preizkus smo pred temeljno preiskavo ponovili še z betonom in se nato lotili preizkusov z različnimi vzorci malte. Preizkus se je teoretično skladal z zamislimi.

Fizikalne priprave:

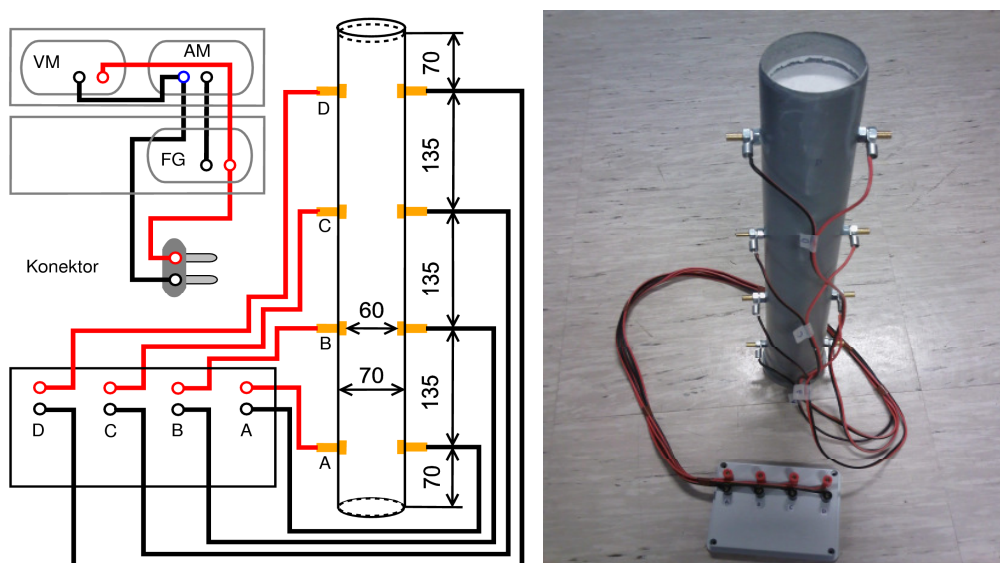
Funkcijski generator je naprava - izvora napetosti z različno frekvenco in obliko signala. Pri naših preizkusih smo uporabili pravokotno napetost s frekvenco 1 kHz. Napetost med elektrodama smo merili z voltmetrom (VM) z obsegom 2 V. Električni tok med elektrodama pa z ampermetrom (AM) z obsegom do 20 mA (miliamper). Po daljšem času, ko se prevodnost zmanjša, lahko tok pade na manj kot 2 mA. Zato smo v primerih, ko je bil tok manjši od 1,8 mA, povečali občutljivost tako, da smo prestavili območje AM na 2 mA. Meritev električne upornosti med elektrodama je potekala tako, da smo skozi merjenec z uporom R spustili izmenični tok (I) pravokotne oblike in merili padec napetosti (U). Tako

smo iz izmerjenega toka na AM in napetosti na elektrodah, izračunali upornost merjenca $R = U/I$.



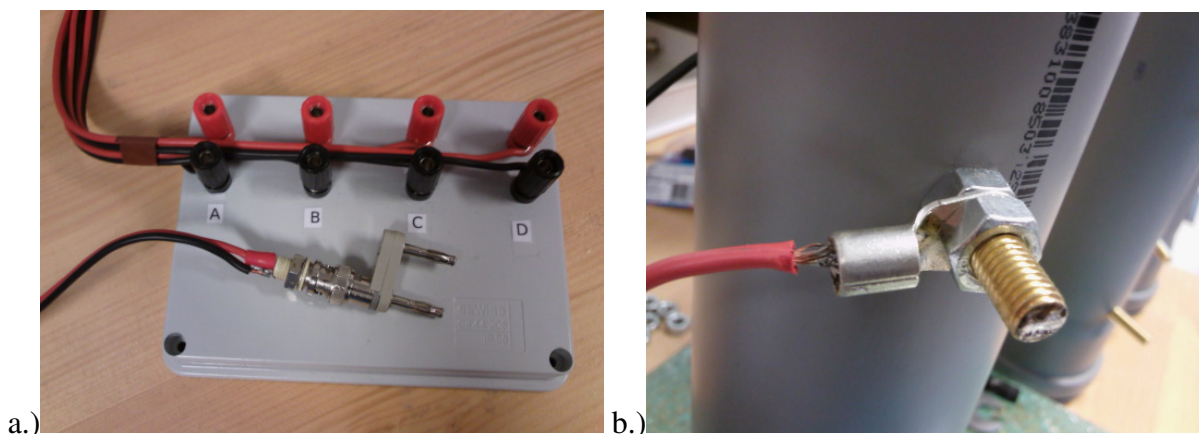
Slika 30: Funkcijski generator.

Kalup, plastično cev s premerom 70 mm in višino 550 mm, ki ima prostornino približno 2,1 litra, smo razdelili na 4 višine. Na višine 70, 205, 340 in 475 mm smo namestili po štiri pare medeninastih vijakov. Medeninasti vijaki dobro prevajajo električni tok, zato smo jih uporabili za elektrode A, B, C, D. V plastično cev smo zvrtili luknje in nanje pritrdili vijake, na zunanji strani smo jih s prvo matico zavili in fiksirali, potem vstavili prevodno objemko, ki je bila povezana s funkcijskim generatorjem, in objemko še z eno matico pritrdili. Stiki so morali biti trdni, da ne bi prihajalo do slabega kontakta.



Slika 31: Vzorec merjen z metodo električne prevodnosti.

V kalup smo vgradili svežo malto. Tok in napetost smo merili vsakih nekaj minut in sicer tako, da smo med elektrodami preklapljali s konektorjem (vtikačem, Slika 32a), ki smo ga vtikali v vtičnice povezane z elektrodami. Vsak par elektrod smo priključili za 10-15 s na funkcijski generator in zapisali tok, napetost in čas meritve. Med posameznimi meritvami nismo imeli priključenega nobenega para elektrod, da bi s tem zmanjšali morebitni vpliv toka skozi malto.

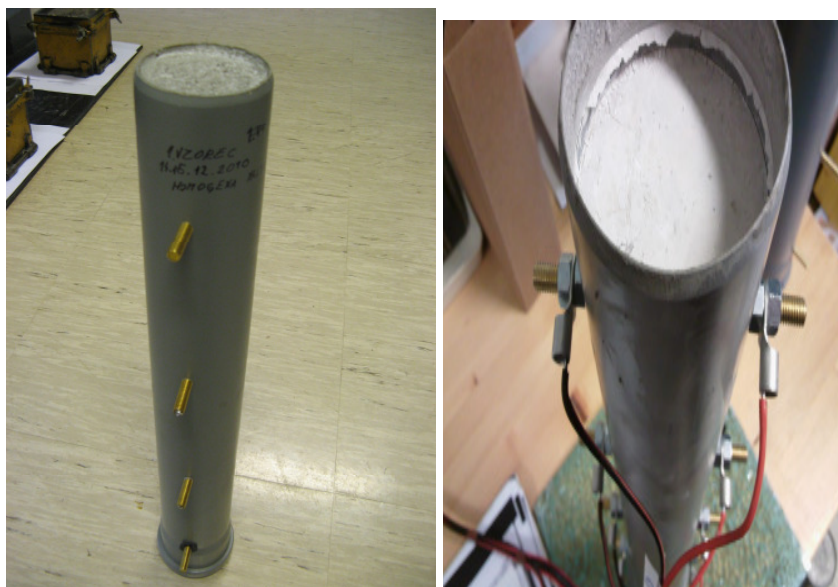


Slika 32: a.) konektor, b.) medeninast vijak, kot elektroda.

Ker smo merili napetost v V in tok v mA, so izračunane upornosti ($R=U/I$, enote V/mA) v k Ω (kilo-Ohmih), prevodnosti ($1/R=I/U$, enote mA/V) pa v mS (mili-Siemensih). Graf smo izrisali iz preračunanih podatkov in sicer električno prevodnost v odvisnosti od časa.

6.4.1.1 Meritve električne prevodnosti na homogeno vgrajeni malti

Meritve električne prevodnosti na 1.vzorcu. Po opisanem postopku smo zamešali homogeno navadno malto z v/c razmerjem 0,5 in jo v dveh slojih vgradili v plastično cev/kalup, kamor so že bili pritrjeni medeninasti vijaki. Ko smo s konektorjem preklapljali od A (spodnjega), preko B in C do D (zgornjega) para elektrod, smo izmenično medeninaste vijake priklopili na napetost iz funkcijskega generatorja. Takrat je med izbranim parom elektrod stekel električni tok. Zapisali smo si vrednost napetosti U , toka I in časa meritve.



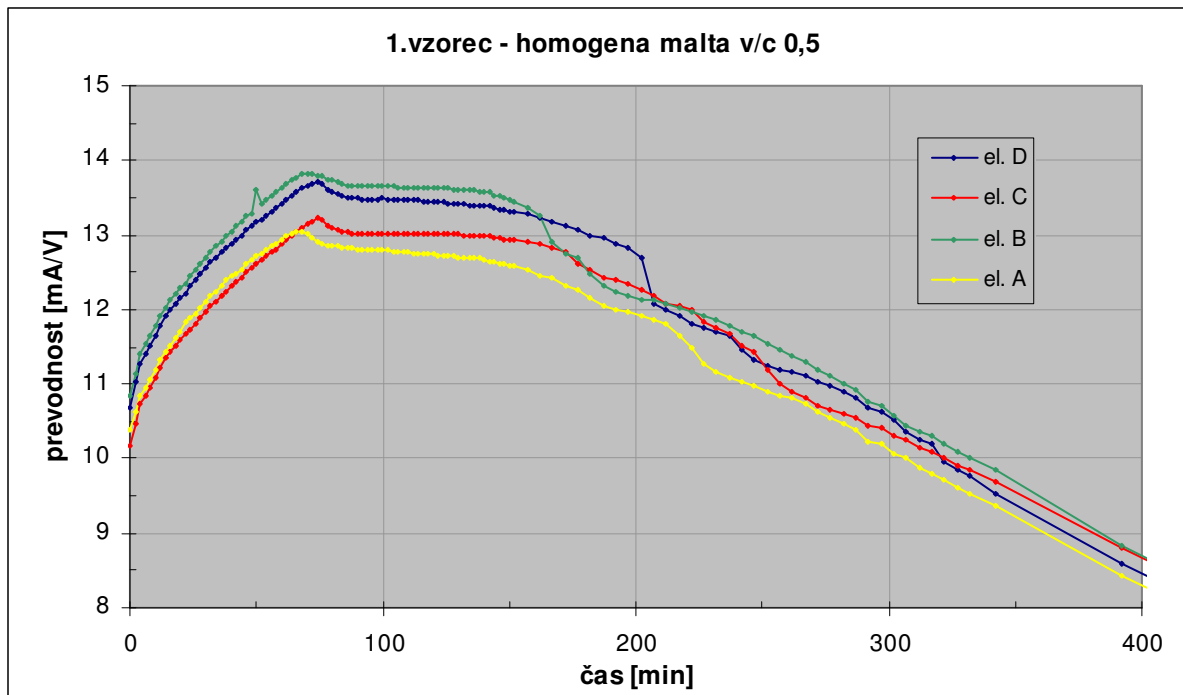
Slika 33: 1. vzorec homogene malte z v/c 0,5.

Meritve je potekala približno 400 min in na začetku je bilo potrebno meriti na 2 min, kasneje pa na 5 ali 10 min. Da smo lahko zaključili graf, ki smo ga preračunali in izrisali iz podatkov, smo še nekaj meritev opravili po več urah. Med preračunavanjem podatkov smo izračunali upornost, ki je razmerje med napetostjo in tokom, prevodnost, ki smo jo iskali, pa je obratna vrednost upornosti. Intervali območja izmerjenih napetosti, tokov in izračunanih električnih prevodnosti za prvih 400 min so prikazane v preglednici 10. Celotni časovni potek električne prevodnosti pa na grafikonih 1 in 2 na str. 56.

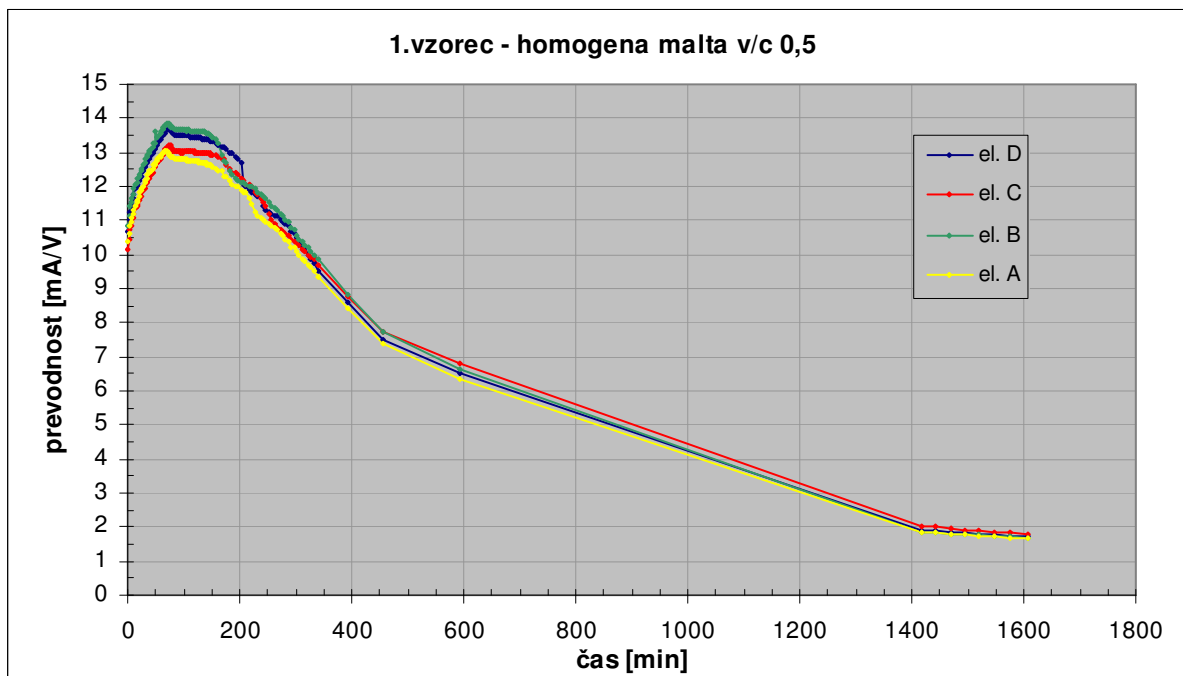
Preglednica 10: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 1. vzorcu.

MERITVE 1.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodnost [mA/V]
el. A	0,39 - 0,48	3,85 - 5,19	8,25 - 13,05
el. B	0,38 - 0,47	3,90 - 5,36	9,50 - 13,82
el. C	0,39 - 0,47	3,90 - 5,23	9,40 - 13,23
el. D	0,38 - 0,48	3,90 - 5,34	8,30 - 13,73

Kot je iz grafikona 1 razvidno, prevodnost najprej narašča potem pa s časom pada. Do naraščanja prevodnosti prihaja, ker je malta na začetku v svežem stanju in prihaja do sprememb v koncentraciji ionov (koncentracija se povečuje) v suspenziji zaradi raztapljanja klinkerskih mineralov in sadre za kontrolo vezanja cementa, zato je upor manjši, posledično večja pa električna prevodnost. Z napredovanjem procesa vezanja cementa, pozneje pa tudi strjevanja, pa se večja delež produktov hidratacije in manjša delež por s tem pa tudi gibljivost ionov skozi vodno raztopino v porah, kar se odraža v zmanjševanju električne prevodnosti. Ker je potek električne prevodnosti v odvisnosti od časa pri 1. vzorcu za vse višine približno enak smo ocenili, da je malta v kalup vgrajena homogeno ter, da je zadržala homogenost tudi v kalupu, zato je potek vezanja in strjevanja malte neodvisen od višine, kjer se nahajajo elektrode. Majhne razlike v absolutni vrednosti električne prevodnosti med elektrodami so lahko posledica majhnih mehanskih razlik med elektrodami, ki so nastale pri izdelavi le-teh.



Grafikon 1: Spreminjanje el. prevodnosti skozi malto z v/c 0,5 v 400 min.



Grafikon 2: Spreminjanje el. prevodnosti skozi homogeno malto z v/c 0,5.

Vzorec smo pustili 28 dni, da je dosegel ustrezno trdnost in ga nato prerezali po dolžini. Rezane površine so nam služile za vizualno oceno homogenosti malte v opažu.



Slika 34: Vizualna ocena homogenosti strjenega 1. vzorca malt.

Na podlagi vizualne ocene rezanih površin 1. vzorca (Slika 34) in sodeč po rezultatih iz grafikona 2 smo prišli do sklepa, da je malta zelo homogena in ne izkazuje nobenih znakov segregacije. Razporeditev delcev je primerna in prostornina kalupa dobro zapolnjena, zato je malta v 1. vzorcu stabilna. Sicer so delci pri malti slabše vidni, ker so zrna agregata manjša od 4 mm, zato je vizualna ocena bolj merodajna pri betonih z večjimi agregatnimi zrni. Na rezani površini vidimo tudi zračne pore, ki so posledica ne dovolj učinkovito zgoščene malte v kalupu po vgrajevanju. Zajete zračne pore nastanejo zaradi zajemanja zraka med mešanjem malte v mešalcu in so praviloma velike okrog 3 mm ter negativno vplivajo na trdnost betona. Pri vibriranju sveže malte se lahko te pore združujejo v večje zračne žepe, praviloma pa jih z zgoščevanjem izločimo.

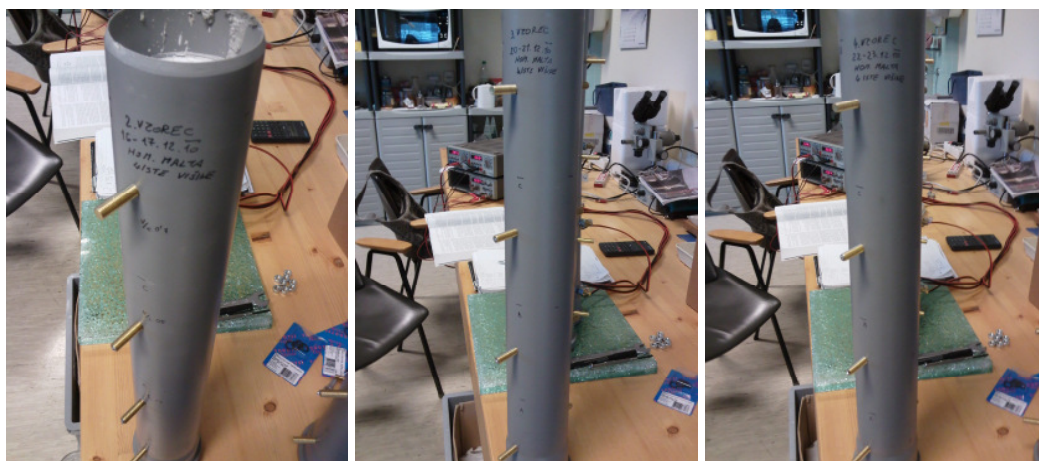
6.4.1.2 Meritve električne prevodnosti na slojih malte z različnimi v/c razmerji

Za vsak preizkus, ki se opravlja v laboratoriju z znanimi ali še nepreizkušenimi metodami, je praviloma potrebno narediti vsaj 3 paralelke ali več in primerjati dobljene rezultate, da pridemo do nekega povprečja in ugotovitev. Tako smo naredili tudi pri 2., 3. in 4. vzorcu, ki smo jih preizkušali z metodo električne prevodnosti.

Malte z različnim v/c razmerjem (sestavo podaja preglednica 8) smo zamešali v skladu z opisanim postopkom in nato v kalup - plastično cev vgradili štiri plasti malte, vsako z drugačnim v/c razmerjem. Vsako naslednjo plast smo vgradili približno 5 minut po vgradnji predhodne plasti. Načrtno smo se odločili, da se plasti s sosednjimi v/c razmerji ne stikajo, če je le mogoče. Na ta način smo želeli povečati razlike v sestavi (predvsem deležu vode) sosednjih plasti.

V plastično cev smo v prvo $\frac{1}{4}$ višine vgradili svežo malto z v/c razmerjem 0,4, kar pomeni, da je bila zelo gosta in slabo vgradljiva. V tej plasti so meritve potekale s spodnjim parom elektrod z oznako A. Drugo plast smo napolnili z malto z v/c razmerjem 0,6 in je bila redka ter dobro vgradljiva, in smo jo merili z drugim parom elektrod z oznako B. Tretja plast je vsebovala malto z v/c razmerjem 0,5. Ta malta je bila izbrana kot referenčna malta in smo zato večino preizkusov izvajali prav na tej mešanici. V tej plasti smo merili s parom elektrod C. Zgornjo plast smo napolnili z najbolj tekočo malto, z v/c razmerjem 0,7 in električno prevodnost skozi njo merili s parom elektrod D. Večje kot je v/c razmerje malte, daljši je čas vezanja in strjevanja.

Pri 2. vzorcu smo po vgraditvi prve plasti, spodnjo malto z v/c razmerjem 0,4 zgostili z vibracijsko iglo. Druge plasti smo nato samo vgradili brez vibriranja. Vsi kontakti so bili premazani z vakuumsko mastjo, ki še boljše zatesni stike medeninastih vijakov oziroma elektrod.

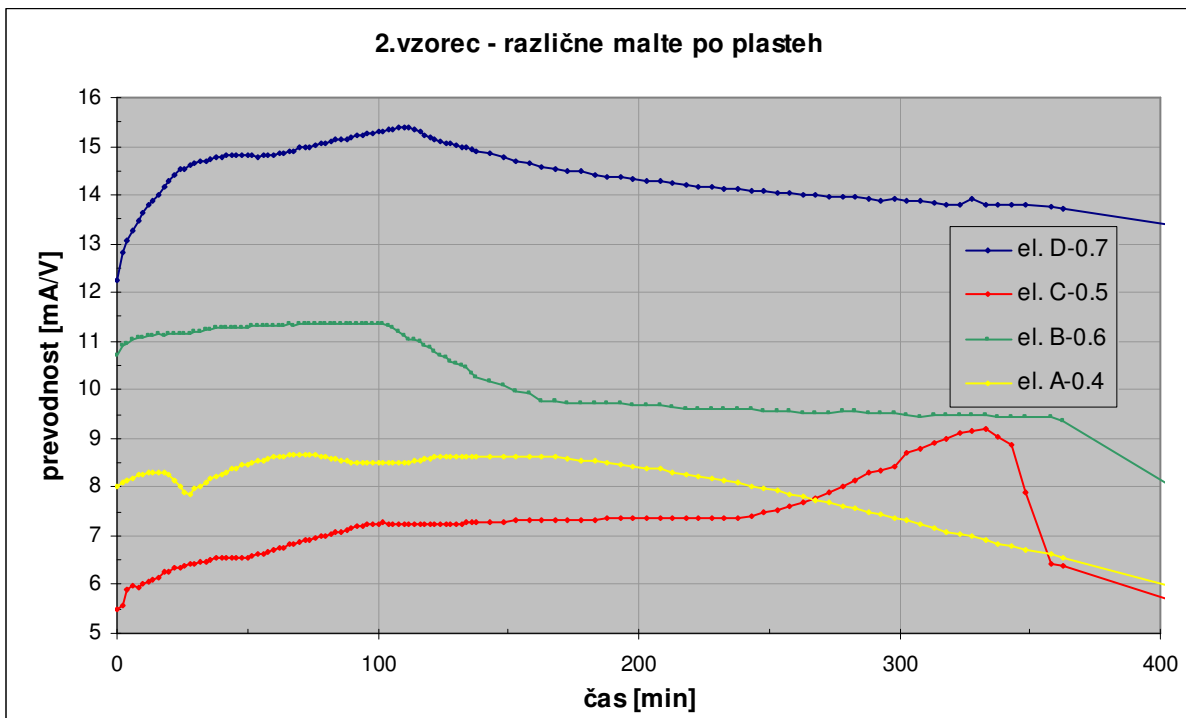


Slika 35: 2., 3., 4. vzorec malt z različnim v/c po plasteh.

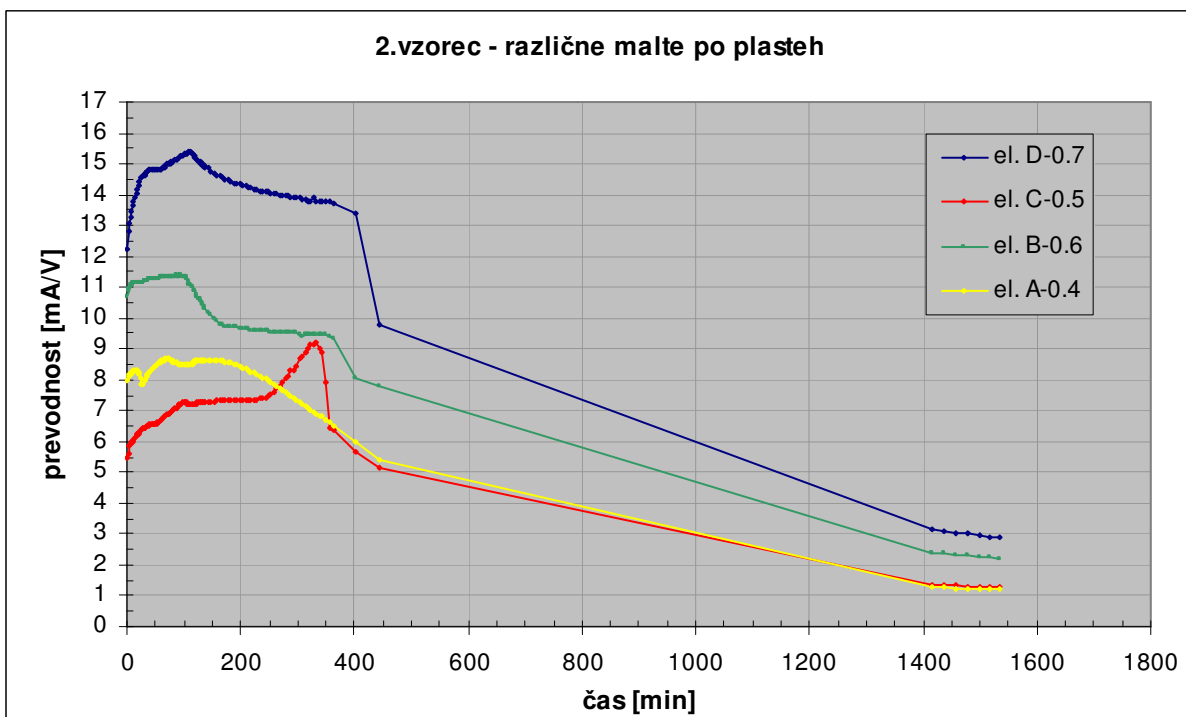
Med samim postopkom merjenja so se pojavljale nekatere težave z odčitavanjem toka in napetosti. Ko smo priključili konektor in počakali nekaj sekund, da bi se meritve, ki jih je prikazal funkcijski generator, umirile, so se najprej težave pokazale po slabih 150 min merjenja pri paru elektrod A v spodnji plasti in trajale 50 min. Do takrat je napetost padala, potem pa spet malo naraščala, ter prav tako tudi tok, ki je najprej naraščal in potem padal. Meritve se niso hotele umiriti, zato smo rabili več kot 30 s, da smo rezultat odčitali. Ko sta se napetost in tok pri elektrodah A umirila, se je isto ponovilo na elektrodah B v drugi plasti, ter po 250 min še na elektrodah C v tretji plasti. To je razvidno iz grafikonov 3 in 4 (str. 60). Pri vseh meritvah je tako, da če napetost pada potem tok narašča in obratno. Nismo znali razjasniti, zakaj je do take variabilnosti oz. netočnih rezultatov prišlo, zato smo iskali razlago v vizualni oceni homogenosti na strjenih vzorcih. Lahko, da je na to vplivalo, ker nismo zgostili vseh plasti z vibriranjem in so ostale v malti ujete večje zračne pore ali pa je probleme povzročala uporabljena vakuumaska mast na kontaktih. Rezultati meritev v prvih 400 min na 2. vzorcu, s plastmi z različnimi v/c razmerji, so prikazane v preglednici 11.

Preglednica 11: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 2. vzorcu.

MERITVE 2.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodenost [mA/V]
el. A - v/c 0,4	0,47 - 0,55	3,15 - 4,09	5,70 - 8,64
el. B - v/c 0,6	0,42 - 0,49	3,90 - 4,86	8,00 - 11,37
el. C - v/c 0,5	0,46 - 0,55	3,05 - 4,25	5,47 - 9,19
el. D - v/c 0,7	0,37 - 0,41	5,05 - 5,78	12,25 - 15,38

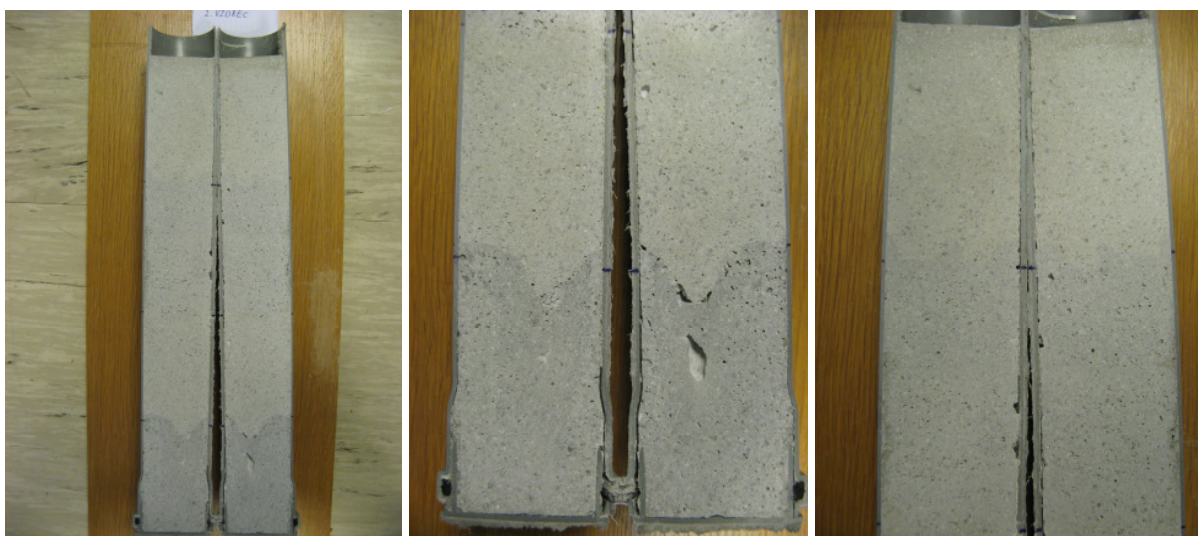


Grafikon 3: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 2. vzorcu v 400 min.



Grafikon 4: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 2. vzorcu.

Pri vizualni oceni homogenosti smo ugotovili, da se plasti ločijo med seboj in se delci niso premešali. Vsaka plast ima lepo razporejene delce in pri nobeni ni vidna segregacija, le pri zgornji plasti, ki je vsebovala malto z v/c razmerjem 0,7, je bila malta tako tekoča, da se je na vrhu izločila voda. V najbolj gosti spodnji plasti vidimo velik zračni žep, kar bi lahko vplivalo na rezultate meritev v tej plasti. Pri drugih plasteh in parih elektrod tovrstnega problema ni bilo, saj so plasti skoraj brez zračnih por.



Slika 36: Vizualna ocena homogenosti strjenega 2. vzorca.

Ko smo primerjali rezultate dobljene na 1. vzorcu in v tretji plasti 2. vzorca, vgrajene malte so imele enako sestavo in v/c razmerje 0,5, smo ugotovili, da se rezultati ne ujemajo in so popolnoma različni.

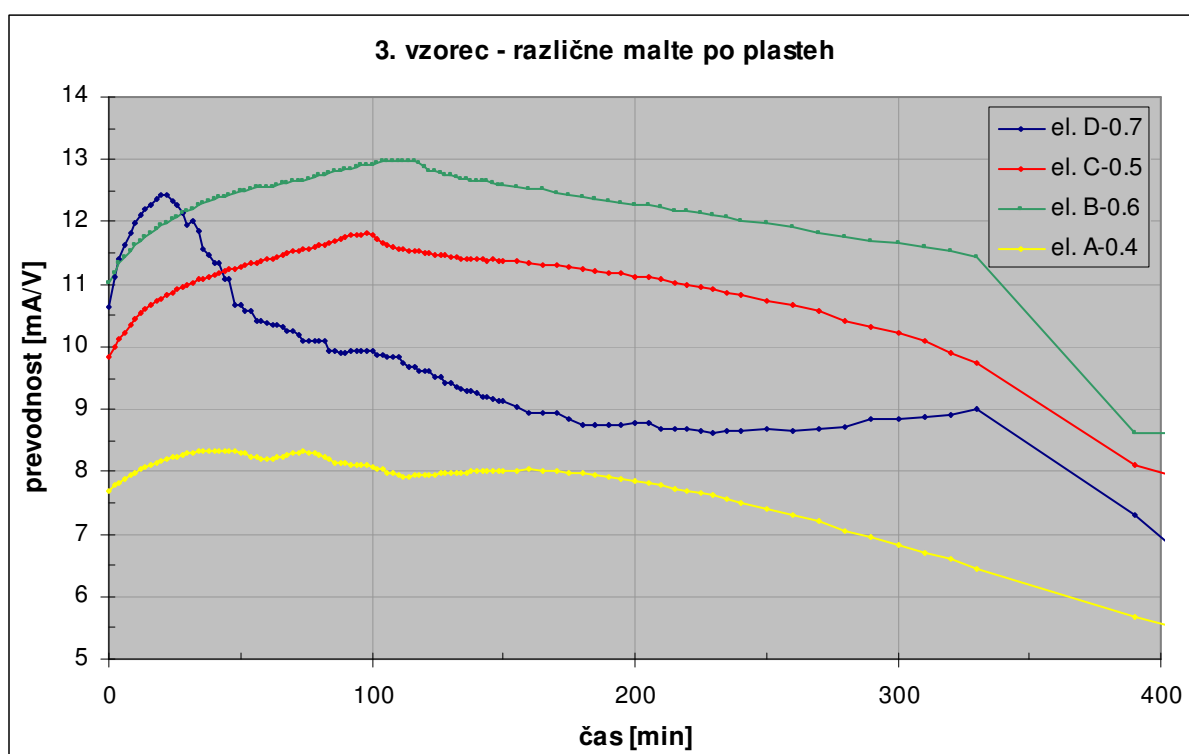
Pri 3. vzorcu smo po vgraditvi plasti malt vsako posebej z vibrirali, najdlje spodnjo plast, ker je bila najbolj gosta, potem pa tretjo z v/c razmerjem 0,5. Druga plast in zgornja sta vsebovali bolj tekočo, lepo vgradljivo malto in skoraj ni bilo potrebe po zgoščevanju. Zato smo ti dve plasti z vibrirali le malo, da smo izločili zračne pore. Kontakti so bili premazani z vakuumsko mastjo, kot pri 2. vzorcu.

Tudi tu so se pojavile težave pri merjenju, najbolj očitne so bile pri elektrodah D v zgornji, najbolj redki plasti. Meritve amplitude signala so se začele spreminjati po 20 min, kar je potem trajalo cel čas merjenja. Tudi pri elektrodah A v spodnji plasti so po 60 min meritve

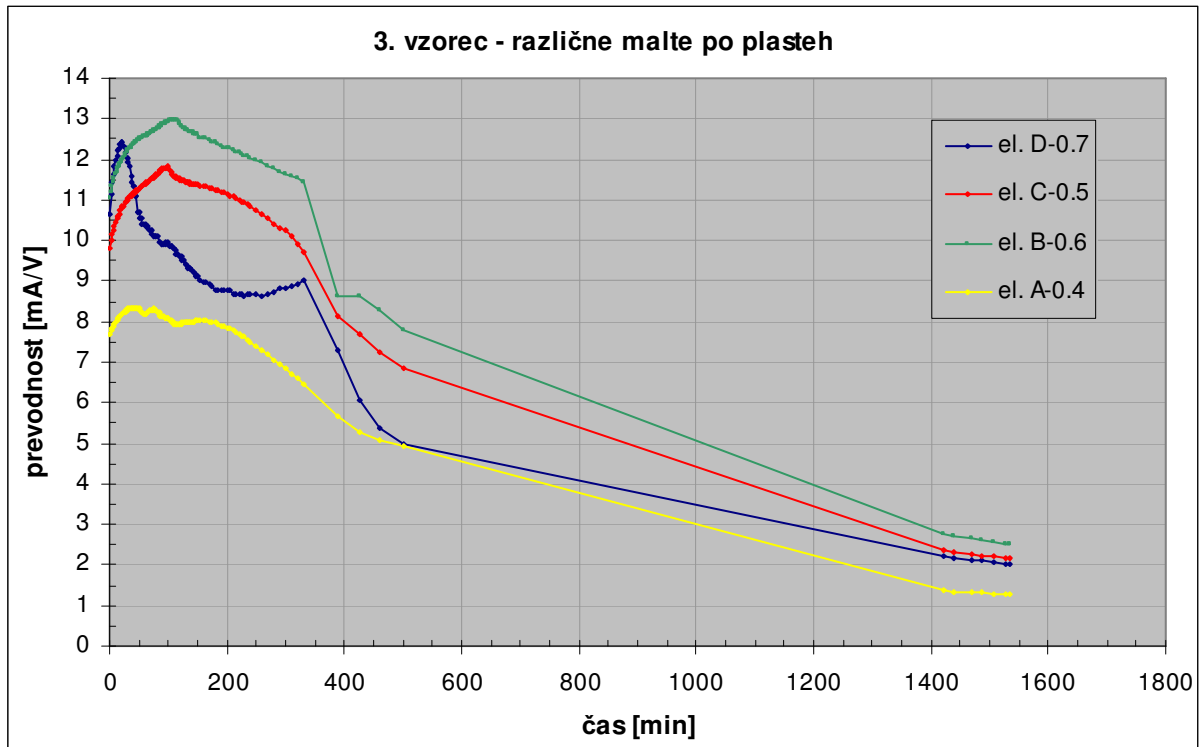
začele malo nihati, kar je trajalo skoraj 60 min. Elektrode B in C niso povzročale nobenih težav. Meritve v 400 min in gibanje rezultatov so prikazani v preglednici 12.

Preglednica 12: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 3. vzorcu.

MERITVE 3.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodnost [mA/V]
el. A - v/c 0,4	0,47 - 0,55	3,06 - 3,99	5,29 - 8,35
el. B - v/c 0,6	0,40 - 0,47	4,08 - 5,23	8,62 - 12,99
el. C - v/c 0,5	0,41 - 0,49	3,92 - 4,96	7,69 - 11,81
el. D - v/c 0,7	0,41 - 0,52	3,23 - 5,11	6,06 - 12,43



Grafikon 5: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 3. vzorcu v 400 min.



Grafikon 6: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 3. vzorcu.

Pri vizualni oceni homogenosti (Slika 37) smo ugotovili, da se delci med plastmi niso pomešali. Zaradi zgoščevanja vsake plasti ni velikega števila zračnih por, kar ugodno vpliva na rezultate meritev.



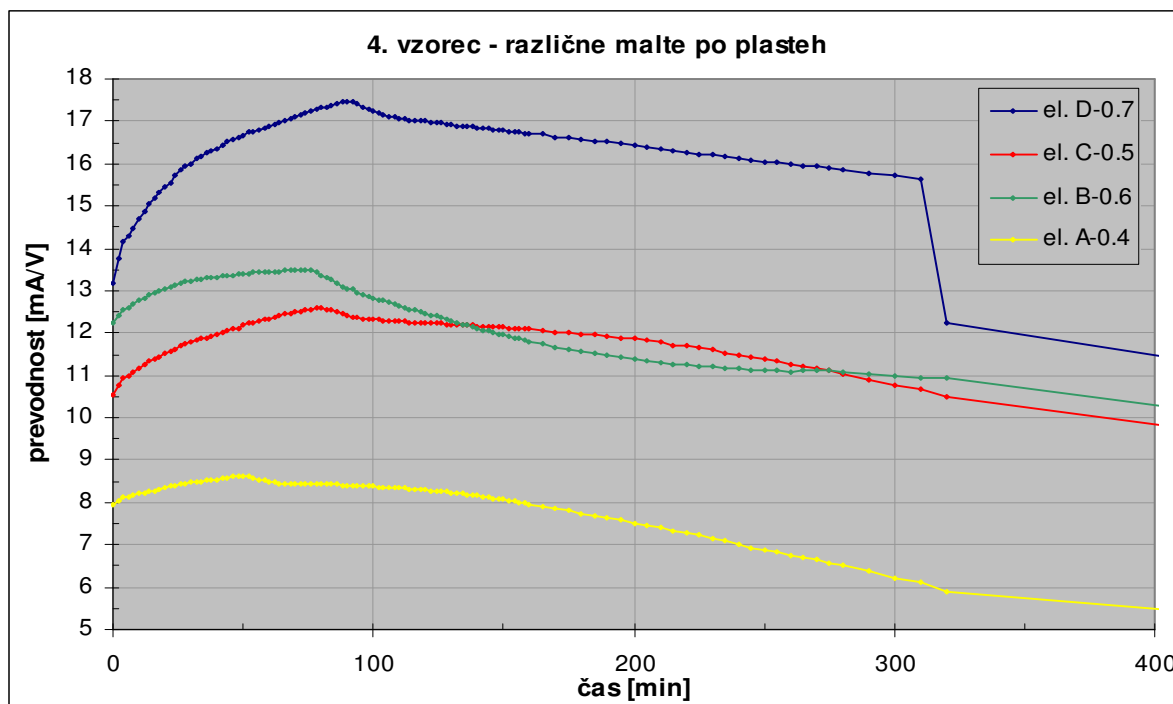
Slika 37: Vizualna ocena homogenosti strjenega 3. vzorca.

Še vedno pa z rezultati nismo bili zadovoljni, vsaj z vidika pričakovanj in rezultatov dobljenih na 1.vzorcju. Če pri 2. vzorcju izločimo rezultate za elektrodi C in pri 3. vzorcju za elektrodi D, potem se preostali rezultati na vzorcih 2 (grafikon 3) in 3 (grafikon 5) v grobem ujemajo.

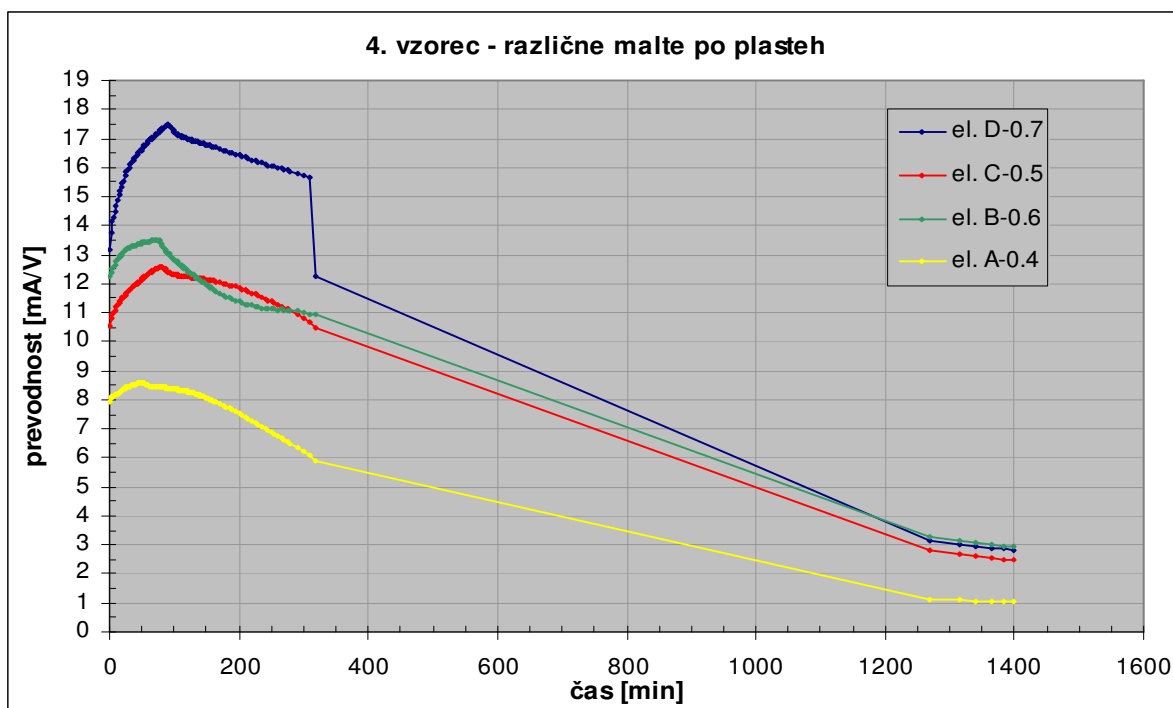
Pri 4. vzorcju smo vgradili malto, kot pri 3. vzorcju, torej vse plasti zgostili z vibriranjem in tretjo plast C še malo bolj z vibrirali. Ker je prihajalo do nenehne variabilnosti pri prejšnjih dveh vzorcih, tokrat nismo namazali kontaktov z vakuumsko mastjo, saj smo sklepali, da bi bila lahko mast krivec za variabilne rezultate. Cel postopek merjenja je potekal gladko, brez kakšnih večjih težav pri toku in napetosti. Na koncu smo dobili takšne rezultate, kot smo jih pričakovali. Meritve in gibanje rezultatov v 400 min prikazuje preglednica 13.

Preglednica 13: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 4. vzorcju.

MERITVE 4.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodnost [mA/V]
el. A - v/c 0,4	0,47 - 0,55	3,00 - 4,08	5,40 - 8,61
el. B - v/c 0,6	0,39 - 0,47	4,00 - 5,33	10,20 - 13,47
el. C - v/c 0,5	0,40 - 0,48	4,00 - 5,13	9,80 - 12,61
el. D - v/c 0,7	0,34 - 0,47	5,00 - 6,08	11,50 - 17,47



Grafikon 7: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 4. vzorcju v 400 min.



Grafikon 8: Spreminjanje el. prevodnosti skozi različne malte na 4. vzorcu.

Pri vizualni oceni homogenosti vidimo lepo razporeditev delcev in po plasteh ne prihaja do mešanja in segregacije. Na zgornji plasti je segregacija malo opazna čisto na vrhu, kjer se je izločala voda. Vidne so tudi zračne pore in zračni žepi predvsem v spodnji plasti. Na rezultate zračna žepa v spodnji plasti verjetno nista vplivala, saj je bil par elektrod A pozicioniran na sredi med obema zračnima žepoma. Glede na to, da smo dobro zvibrirali vse plasti, vidimo da je spodnja plast malte preveč gosta oz. ima premajhno v/c razmerje za učinkovito zgostitev.



Slika 38: Vizualna ocena homogenosti strjenega 4. vzorca.

Prišli smo do sklepa, da smo šele na vzorcu 4 dobili prave rezultate, kar dodatno potrjuje primerjava rezultatov na 1. vzorcu in tretji plasti 4. vzorca, ki imata oba v/c razmerje 0,5. Rezultati meritev se namreč ujemajo. Največjo električno prevodnost, ki se giblje okoli 13 mA/V, dosežemo na tej sestavi malte med 60 in 90 min po začetku meritev.

Povzetek rezultatov za 2. do 4. vzorec s plastmi malte z različnimi v/c razmerji:

Vsi vzorci so bili mešani in testirani na standardni temperaturi okolja $20 \pm 2^\circ\text{C}$ in hkrati smo upoštevali vsa določila ustreznih standardov. Malte z različnim v/c razmerjem, ki smo jih vgradili po plasteh, bi lahko enačili z vzorci, ki bi po celi plastični cevi vsebovali samo eno malto. Torej smo si s tem skrajšali preizkuse in v enem vzorcu zajeli kar štiri.

Malta z v/c razmerjem 0,4 je najbolj gosta malta in v vseh treh primerih se amplitude signala gibajo med istim intervalom. Električna prevodnost se v prvi 400 min giblje med 5,30 in 8,65 mA/V. Sklepamo, da bo vsaka malta z večjim v/c razmerjem imela tudi večjo prevodnost skozi svežo malto pri enaki postavitvi in razdalji elektrod.

Malta z v/c razmerjem 0,5 je lepo vgradljiva malta, s tem, da smo jo vseeno malo zgostili z vibriranjem. Rezultati amplitude signala se v 3. in 4. vzorcu in pa v preizkušnem 1. vzorcu gibljejo v enakem intervalu, vrednosti pa odstopajo pri drugem vzorcu, kar je najverjetneje posledica premazanja stikov z mastjo in nezgoščenosti plasti. Električna prevodnost se giblje med 7,70 in 12,60 mA/V.

Tudi rezultati na malti z v/c razmerjem 0,6 in vzorcih 2, 3 in 4 se ujemajo, kot pri malti z v/c razmerjem 0,4. Njena električna prevodnosti pa se giblje med 8,00 in 13,50 mA/V.

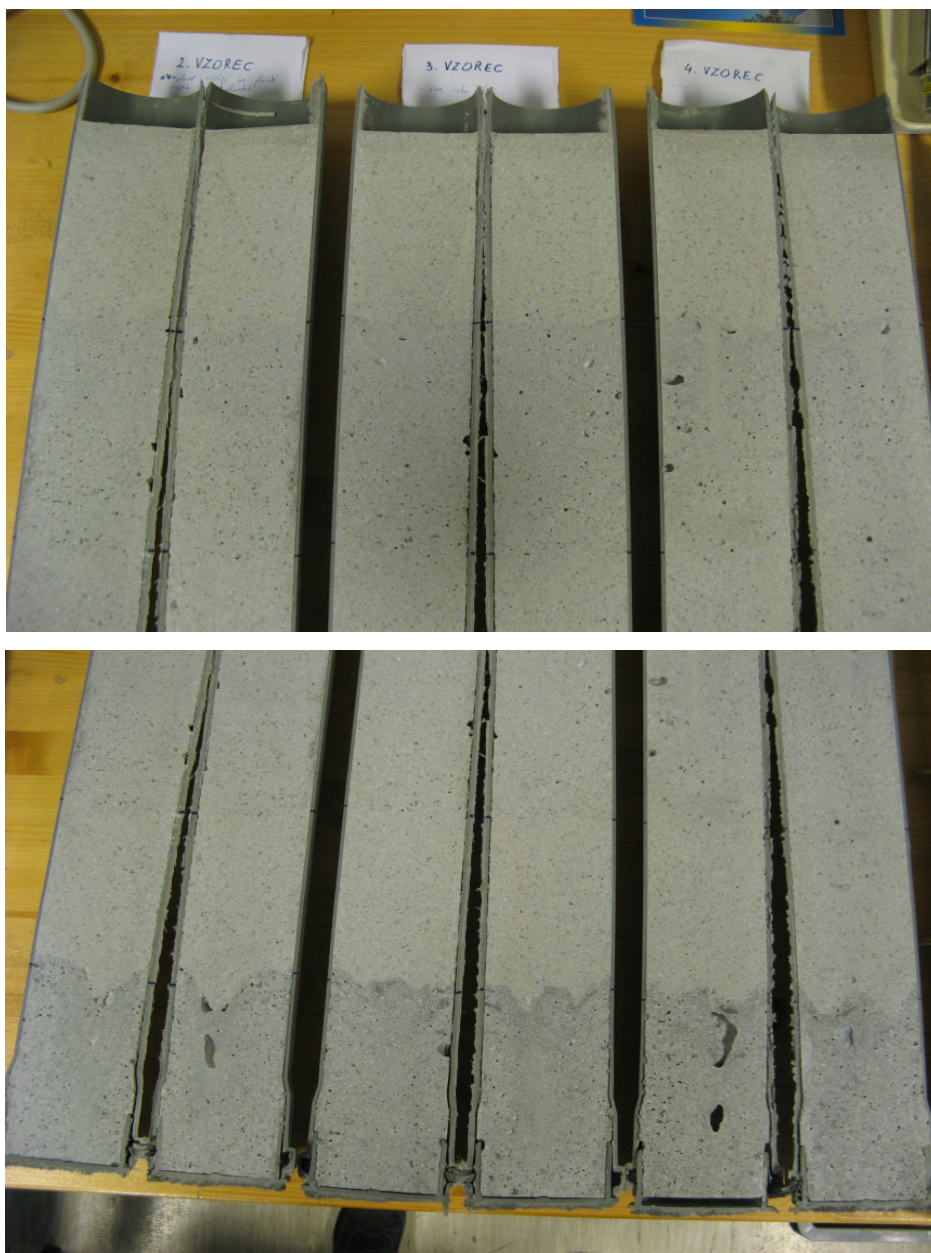
Meritve na zadnji plasti malte, ki je bila najbolj tekoča in ni bila potrebna zgostitev z vibriranjem, se ujemajo na vzorcih 2 in 4. Električna prevodnost je med 11,50 in 17,50 mA/V. Meritve pa odstopajo na vzorcu 3, kar smo spet pripisali uporabi masti za večjo tesnitev stikov. Kljub primerljivosti rezultatov na vzorcih 2 in 4 se najbolj zanašamo na rezultate meritev na 4. vzorcu. Ugotovili smo, da večje kot je v/c razmerje večja bo električna prevodnost čez vzorec, saj vezanje in strjevanje potekata dlje časa, na razpolago je več vode z raztopljenimi ioni, ki so tudi dlje časa gibljivi. Zamiki vgrajevanja po 5 min niso bili tako veliki, da bi bistveno vplivali na rezultate. Bolj kot to vpliva v/c razmerje.



Slika 39: Vsi vzorci malt z različnim v/c po plasteh.

Primerjava vizualnih ocen homogenosti vseh treh vzorcev pokaže, da zgoščevanje vpliva na homogenost in segregacijo. Prva plast je imela najbolj gosto malto in jo je bilo tudi zelo težko zgostiti. Zato so v tej plasti pogoste večje zračne pore, kar zmanjša homogenost plasti. Izven zračnih por pa so delci homogeno razporejeni, kar pomeni, da je malta stabilna.

Druga plast je lepo vgradljiva, homogena, brez zračnih por in ni segregirala, zato je ta plast najbolj stabilna. Prav tako tretja plast, le da ima več zračnih por, kar je lahko posledica zgoščevanja. Če drugo in tretjo plast primerjamo med seboj, ima tretja plast nekoliko slabšo homogenost. Pri zgornji najbolj tekoči plasti se vidi segregacija tik pod površino, kar je posledica izločanja vode. Še vedno pa je tudi ta plast relativno stabilna.

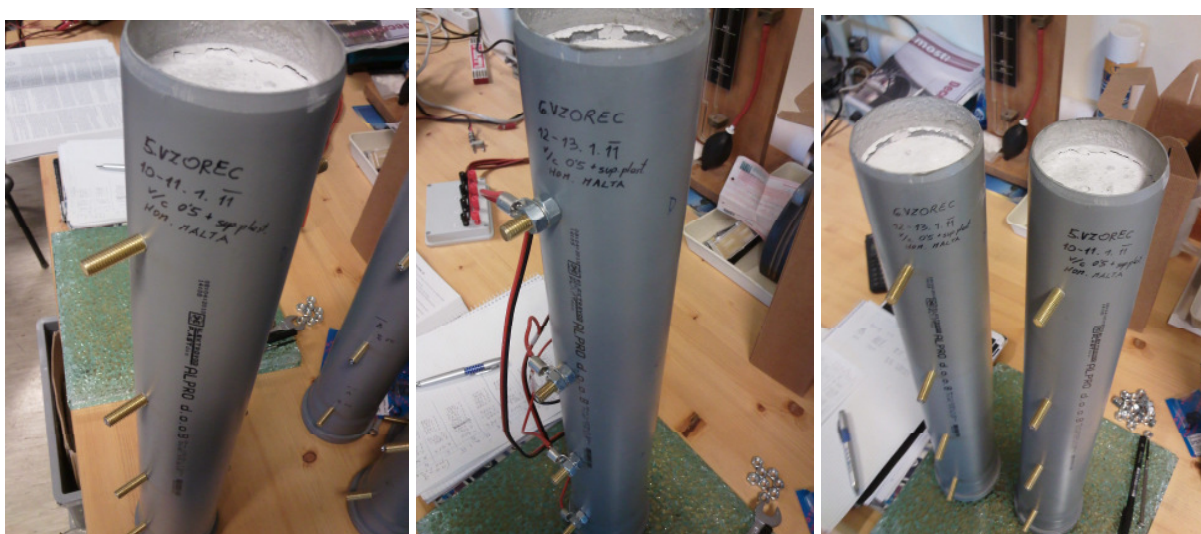


Slika 40: Vizualna ocena homogenosti vseh vzorcev malt po plasteh.

Vsa ne segregirana malta ima bolj homogene lastnosti, kot segregirana pri kateri se delci ločujejo. Ugotovili smo, da električna prevodnost doseže vrh nekje med 60 in 90 min po vgrajevanju. To bomo primerjali na naslednjem preizkusu vezanja malte in primerjali ta čas, s časom začetka in konca vezanja malte. Vse plasti malt so homogene, kar prikazuje razporeditev delcev. Zračne pore se pojavljajo predvsem v maltah z manjšim v/c razmerjem. V grobem so vse malte po plasteh stabilne. Že samo to, da niso segregirale pomeni, da je njihova stabilnost zadovoljiva.

6.4.1.3 Meritve električne prevodnosti pri segregirani malti

Pri 5. in 6. vzorcu smo malto z v/c razmerjem 0,5 dodali superplastifikator. Malto smo vgradili v plastično cev v enem sloju. Malta se je tako utekočinila, da je bila konsistenca malte podobna tisti pri v/c razmerju 0,7. Po vgraditvi v kalup – plastično cev smo najprej malto zgostili z vibracijsko iglo in nato še na vibracijski mizici, da bi prišlo do očitne segregacije. Zatem smo začeli z meritvami električne prevodnosti. Medeninasti vijaki niso bili premazani z mastjo, saj je to pri predhodnih meritvah negativno vplivalo na rezultate.

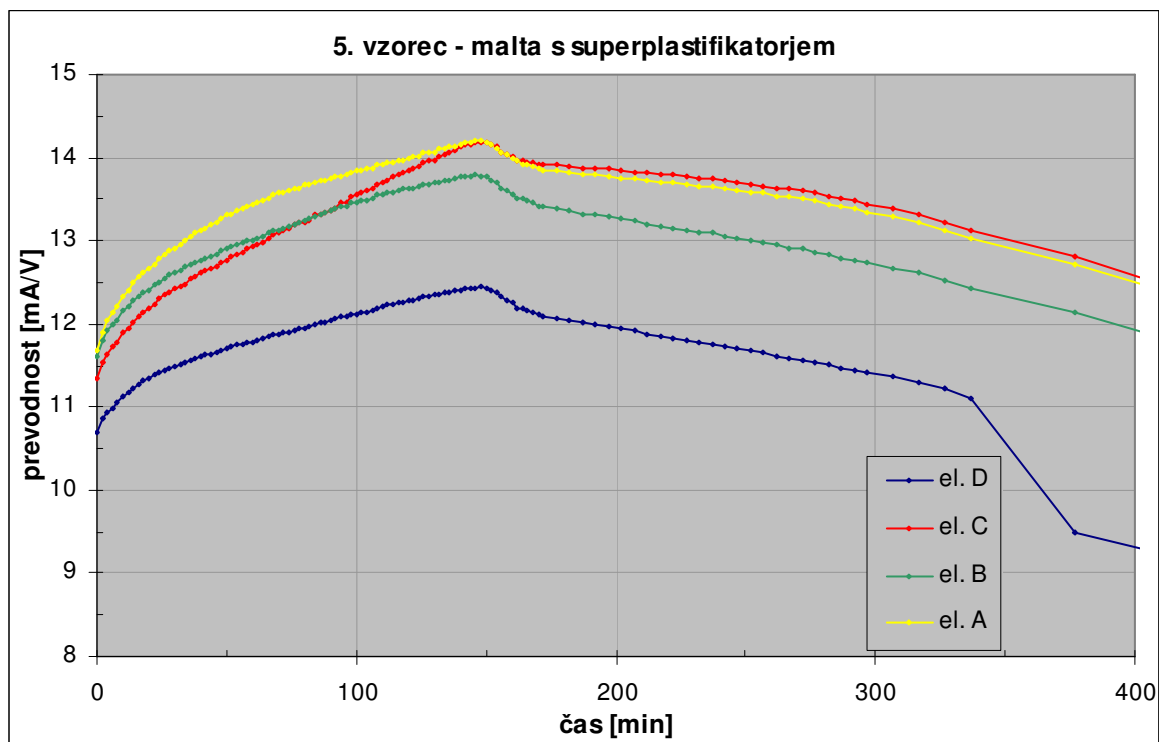


Slika 41: 5. in 6. vzorec malte s superplastifikatorjem.

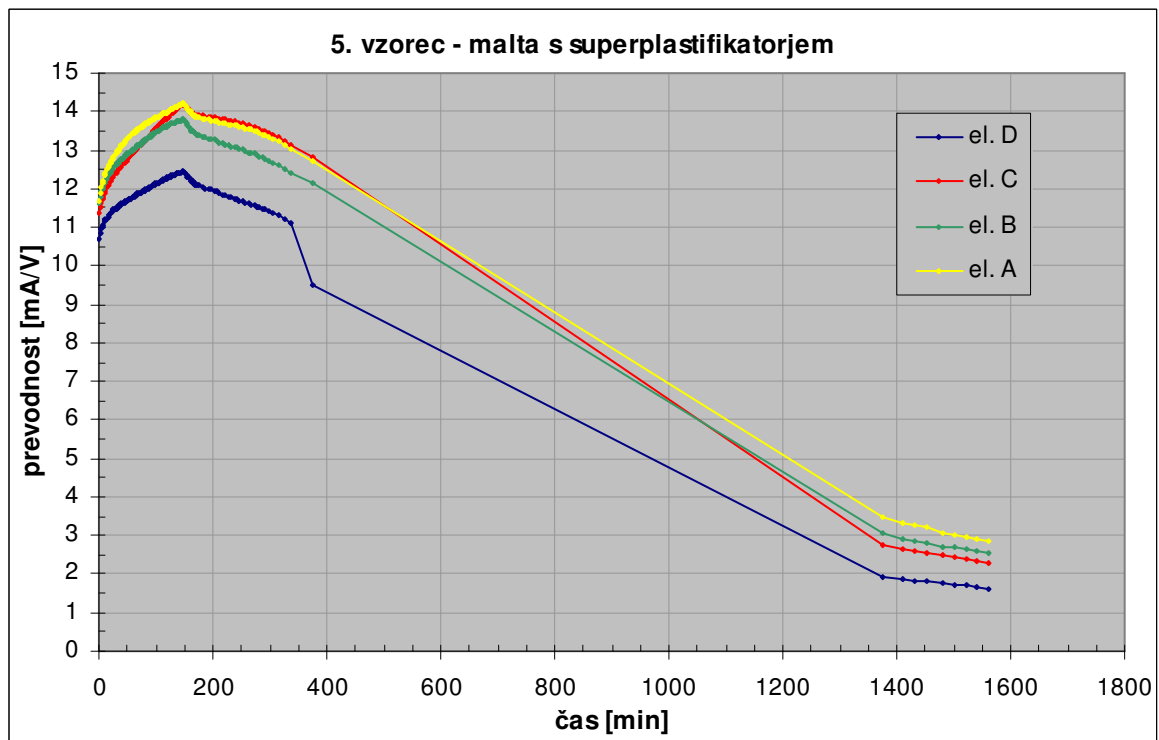
Pri 5. vzorcu so meritve potekale brez težav, le dobljeni rezultati niso bili pričakovani. Meritve v prvih 400 min so prikazane v preglednici 14.

Preglednica 14: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 5. vzorcu.

MERITVE 5.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodnost [mA/V]
el. A	0,38 - 0,44	4,70 - 5,48	11,65 - 14,21
el. B	0,39 - 0,45	4,70 - 5,38	11,60 - 14,00
el. C	0,38 - 0,45	4,70 - 5,47	11,34 - 14,20
el. D	0,40 - 0,49	4,40 - 5,10	9,50 - 12,44



Grafikon 9: Spreminjanje el. prevodnosti na 5. vzorcu malte s superplast. v 400 min.



Grafikon 10: Spreminjanje el. prevodnosti na 5. vzorcu malte s superplast.

Vizualna ocena prikazuje lepo kompaktnost malte, saj skoraj ni zračnih por. Zrna agregata so lepo razporejeni in ne prihaja do izrazite segregacije. Na zgornjem delu je plast, kjer se je izločevala voda in je zato izrazito segregirana.



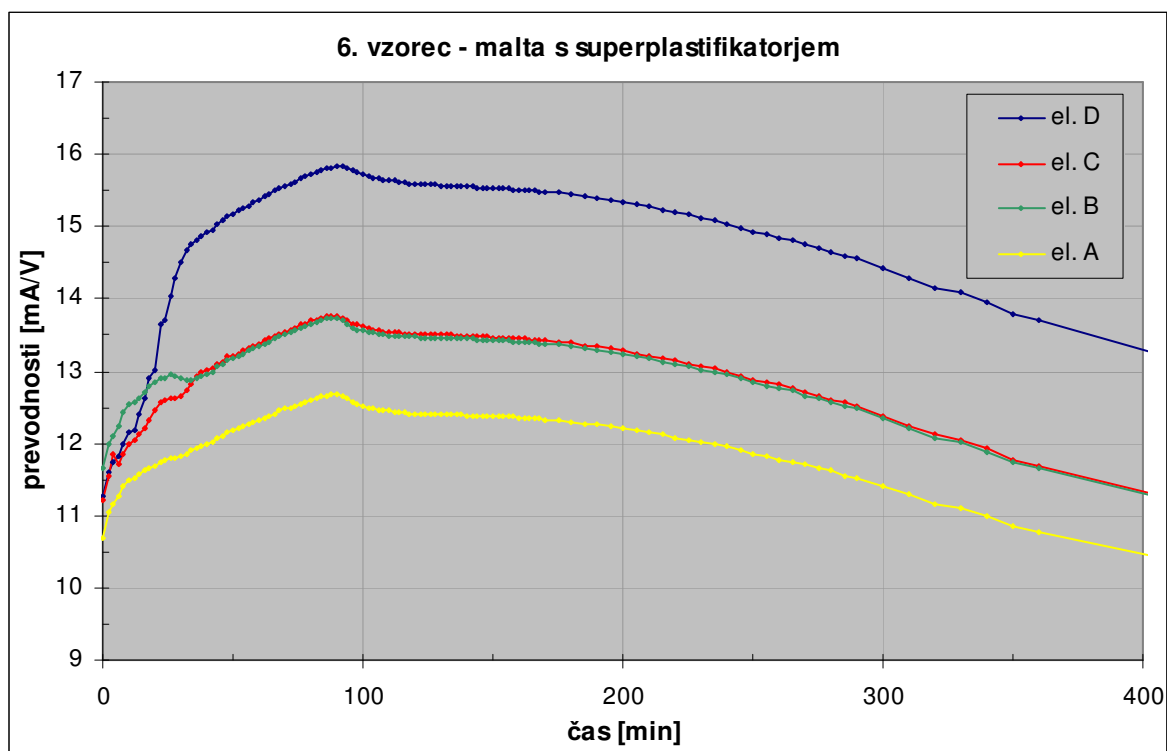
Slika 42: Vizualna ocena homogenosti strjenega 5. vzorca malte.

Iz vizualne ocene (Slika 42) in rezultatov meritev na grafikonu 9 in 10, smo prišli do sklepa, da je malta dokaj homogena in posledično stabilna, kljub zmerni segregaciji. Meritve električne prevodnosti na elektrodah od A do C se ujemajo, kar je v skladu z vizualno oceno stabilnosti malte v pripadajočih slojih. Drugače je v plasti D, za katero smo pričakovali največjo prevodnost, dobili pa najmanjšo. Edina razlaga, ki se nam zdi smiselna je ta, da je prišlo tudi do segregacije cementnih zrn, zato se je v tej plasti izločila predvsem voda z malo raztopljenimi ioni.

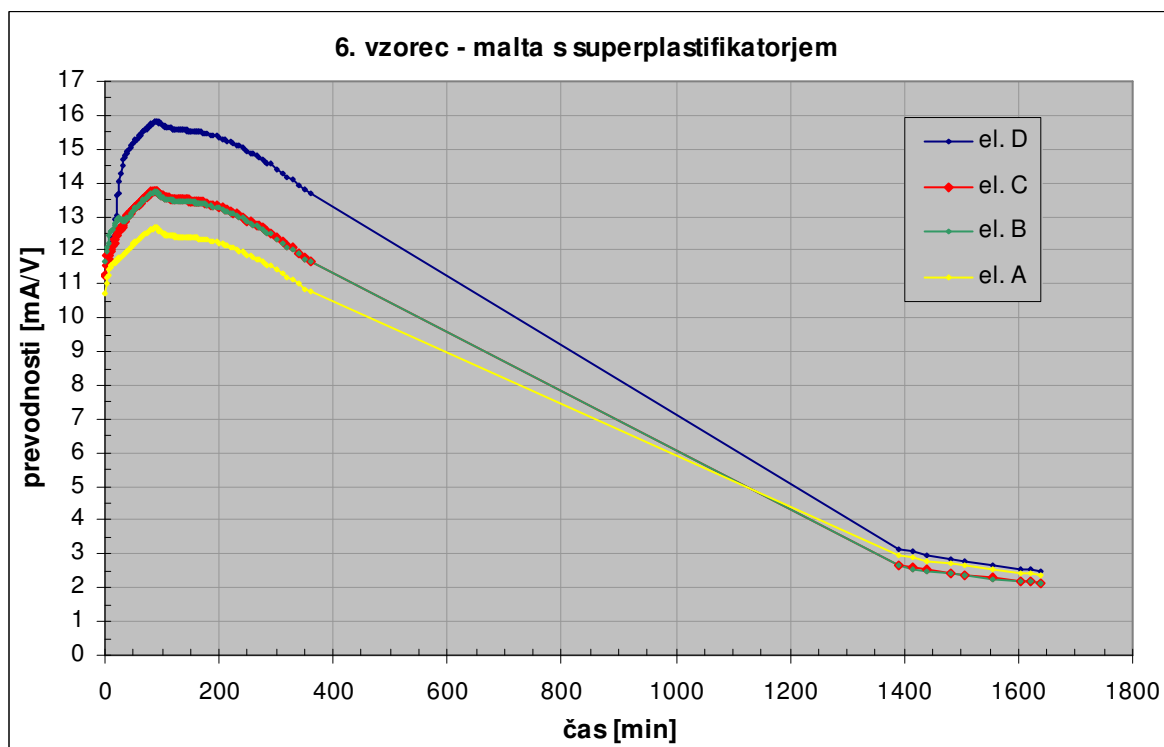
Priprava vzorca in meritve na 6. vzorcu so potekali enako kot na 5. vzorcu, le da smo na 6. vzorcu dobili pričakovane rezultate. Meritve prvih 400 min so podane v preglednici 15.

Preglednica 15: Meritve na elektrodah v prvih 400 minutah na 6. vzorcu.

MERITVE 6.	napetost [V]	tok [mA]	el.prevodnost [mA/V]
el. A	0,40 - 0,44	4,65 - 5,15	10,50 - 12,68
el. B	0,39 - 0,43	4,87 - 5,37	11,20 - 13,75
el. C	0,39 - 0,43	4,78 - 5,38	11,20 - 13,76
el. D	0,36 - 0,43	4,80 - 5,79	11,25 - 15,84

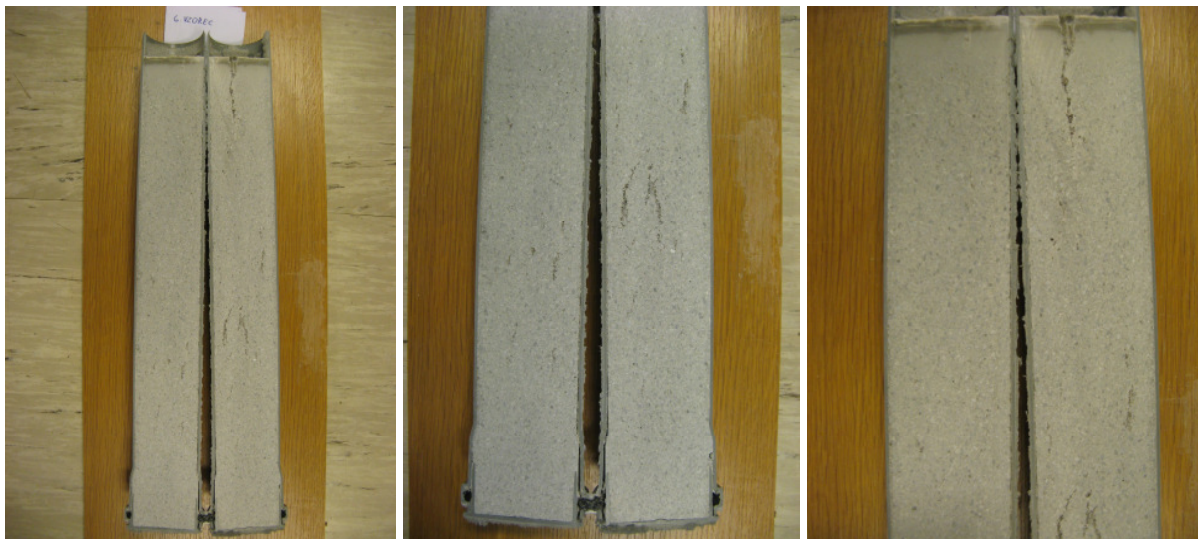


Grafikon 11: Spreminjanje el. prevodnosti na 6. vzorcu malte s superplast. v 400 min.



Grafikon 12: Spreminjanje el. prevodnosti na 6. vzorcu malte s superplast.

Vizualna ocena pokaže malo več zračnih por in prisotnost kanalov, vzdolž katerih se je najverjetneje izcejala voda.. Na tem vzorcu lahko opazimo izrazito ločevanje delcev. Malta na vzorcu je segregirana, kar je še posebej vidno v zgornjih plasteh.



Slika 43: Vizualna ocena homogenosti strjenega 6. vzorca malte.

Prišli smo do sklepa, da se vizualna ocena (Slika 43) in meritve prikazane na grafikonu 11 in 12 ujemajo v vseh pogledih in pričakovanjih. Malta je zaradi segregacije manj stabilna, poleg tega pa kaže, da je potekalo posedanje zrn agregata zaradi segregacije drugače, kot pri 5. vzorcu. Največji delež zrna agregata je v plasti A, najmanjši pa v plasti D. Poleg tega pri vzorcu 6 najverjetneje ni prišlo do segregacije cementnih zrn, ali vsaj ne tako izrazite, kot pri vzorcu 5.

Povzetek rezultatov na dveh vzorcih malte, ki smo ji dodali superplastifikator

Z dodatkom superplastifikatorja smo dosegli tekočo konsistenco malte. Pri taki malti je izboljšana vgradljivost, vodotesnosti in obdelavnost. Superplastifikatorji so učinkoviti pri zmanjšanju količine vode. Vzorci so bili mešani in testirani na standardni temperaturi $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ z upoštevanjem vseh določil ustreznih standardov.

Opravili smo meritve na dveh preizkušancih. Rezultati meritev so se dovolj dobro ujemali na plasteh A, B in C. V prvih 400 min se vrednosti električne prevodnosti gibljejo v grobem med 11 in 14 mA/V. Izjema je najvišja plast D, kjer pri 5. vzorcu nismo dobili pričakovanih

rezultatov meritev, saj je bila izmerjena električna prevodnost manjša, kot pri plasteh z manjšim deležem vode. Običajno opravimo meritve na vsaj treh paralelkah, za ustrezno oceno povprečne vrednosti. V našem primeru meritev na tretji paralelki nismo opravili.

Na podlagi rezultatov meritev na vzorcu 6 lahko ugotovimo, da je električna prevodnost najmanjša v spodnji plasti z največjim deležem agregatnih zrn in postopoma narašča proti vrhni plasti, kjer je delež agregatnih zrn najmanjši.



Slika 44: Vizualna ocena homogenosti dveh vzorcev s superplastifikatorjem.

Pri vizualni oceni je zelo razvidna segregacija pri 6. vzorcu. Segregirana malta ni stabilna, zato njene lastnosti vzdolž višine preizkušanca niso homogene. Ker pri malti nimamo agregatnih zrn večjih od 4 mm, dosežena segregacija ni zelo očitna. Prav zato je stabilnost malte še vedno zadovoljiva. Ugotovili smo, da električna prevodnost doseže vrh nekje med 70 in 90 min po vgrajevanju.

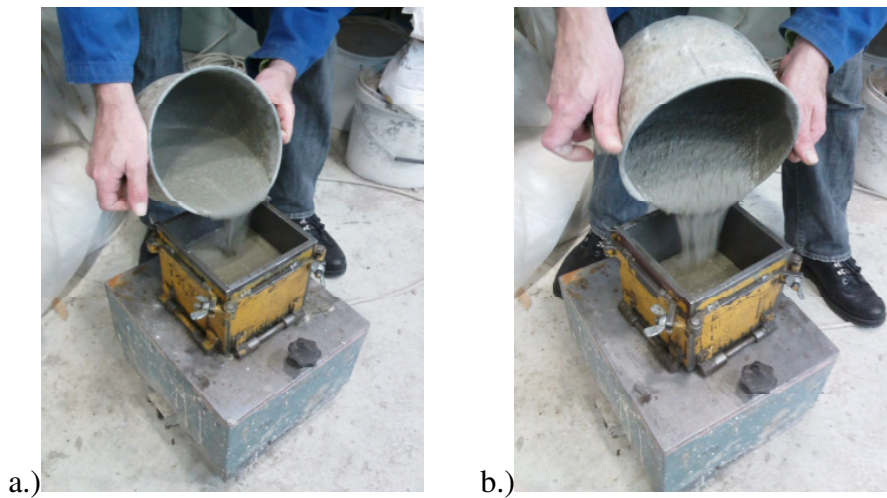
6.4.2 Preizkus določanja začetka in konca vezanja malte

Ves postopek je temeljil na določilih standarda ASTM C 403 M – 05, ki je podrobneje opisan kot ekvivalenten postopek v bivšem slovenskem standardu JUS U.M1.019. Za preiskavo smo uporabili standardne kalupe 15/15/15 cm, ki smo jih pred začetkom vgrajevanja očistili in namazali z oljem, da se malta ne bi sprijela s steno kalupa. Čas je bil merjen od začetka hidratacije, to je od stika cementa in vode. Vse vzorce smo hranili in določevali čas vezanja v prostoru s temperaturo $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.



Slika 45: Standardni kalupi 15/15/15 cm.

Svežo maltno mešanico smo zamešali po standardnem postopku in vgradili v dveh slojih v kalupe do 1 cm pod vrhom, tako da je bila cela prostornina $3,15 \text{ dm}^3$. V 1. vzorec smo vgradili malto z v/c razmerjem 0,7 in v 2. vzorec malto z v/c razmerjem 0,6. Ti malti sta bili zelo plastične konsistence, kar pomeni, da sta se lepo vgradili. V 3. vzorec smo vgradili malto z v/c razmerjem 0,5 in v 4. vzorec malto z v/c razmerjem 0,4. Ti malti sta bolj gosti, zato ju je tudi težje obdelovati in ju je potrebno bolj in dlje časa zgoščevati. Vsako plast smo zgostili z vibracijsko iglo in nato še na vibracijski mizici.



Slika 46: a.) vgrajevanje malte z v/c 0,7 b.) in malte z v/c 0,6.

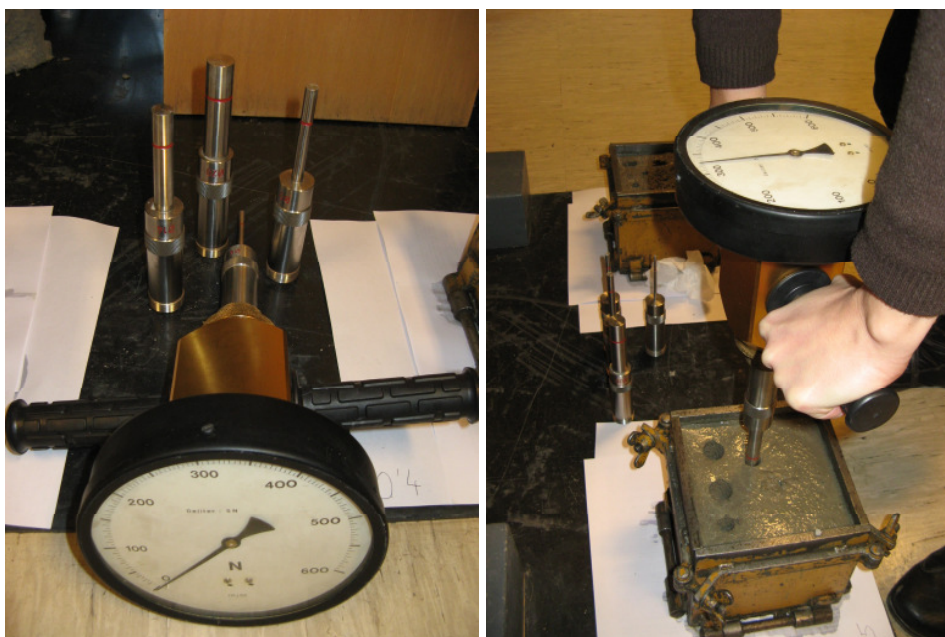


Slika 47: a.) vgrajevanje malte z v/c 0,5 b.) malte z v/c 0,4.



Slika 48: Zgoščevanje z vibracijsko iglo in na vibracijski mizici.

Preden smo začeli meriti čas vezanja smo vzorce pustili mirovati in čakali, da se malta toliko strdi, da bo začetek vezanja merjen od 3,5 MPa. Naprava, s katero smo merili oz. vtiskali iglo v malto se imenuje penetrometer, ki meri silo vtiskanja v N (Newton) in ima rezdelbo od 0-600 N. Igle imajo prečni prerez 16, 32, 65, 161, 323, 645 mm² oz. premer Ø 4, 6, 9, 14, 20, 28 mm ter zarezo na 25 mm od konice, do katere jo v 10 s vtisnemo v malto.



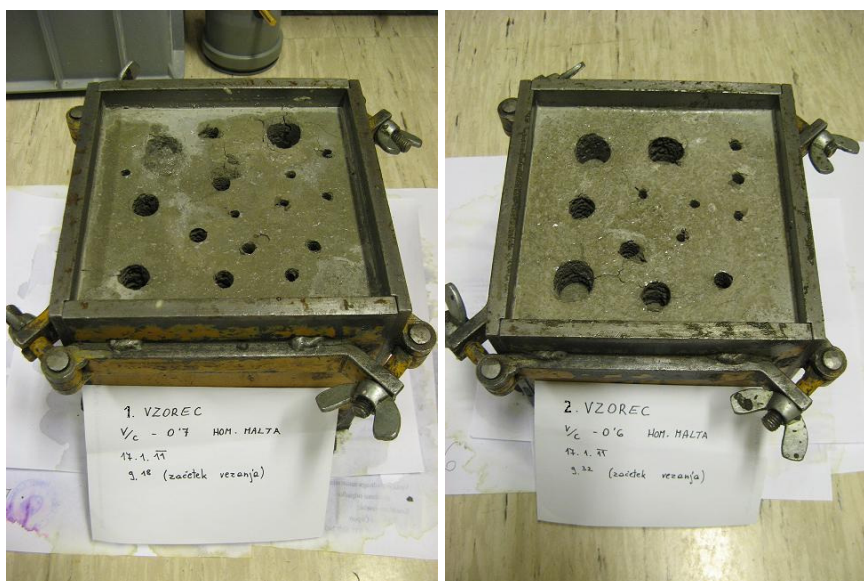
Slika 49: Penetrometer z iglami in postopek vtiskanja.

Meriti smo začeli na 4. vzorcu, kjer se je malta najhitreje strjevala in sicer po 90 minutah. Potem smo začeli z meritvami na 3. vzorcu po 180 min, na 2. vzorcu z malto z v/c razmerjem 0,6 po 290 min in na 1. vzorcu po 400 min. Bolj tekoča malta je vezala dlje časa, zato so se posledično začetki vezanja začeli kasneje.



Slika 50: Vzorci z malto različnih v/c razmerji.

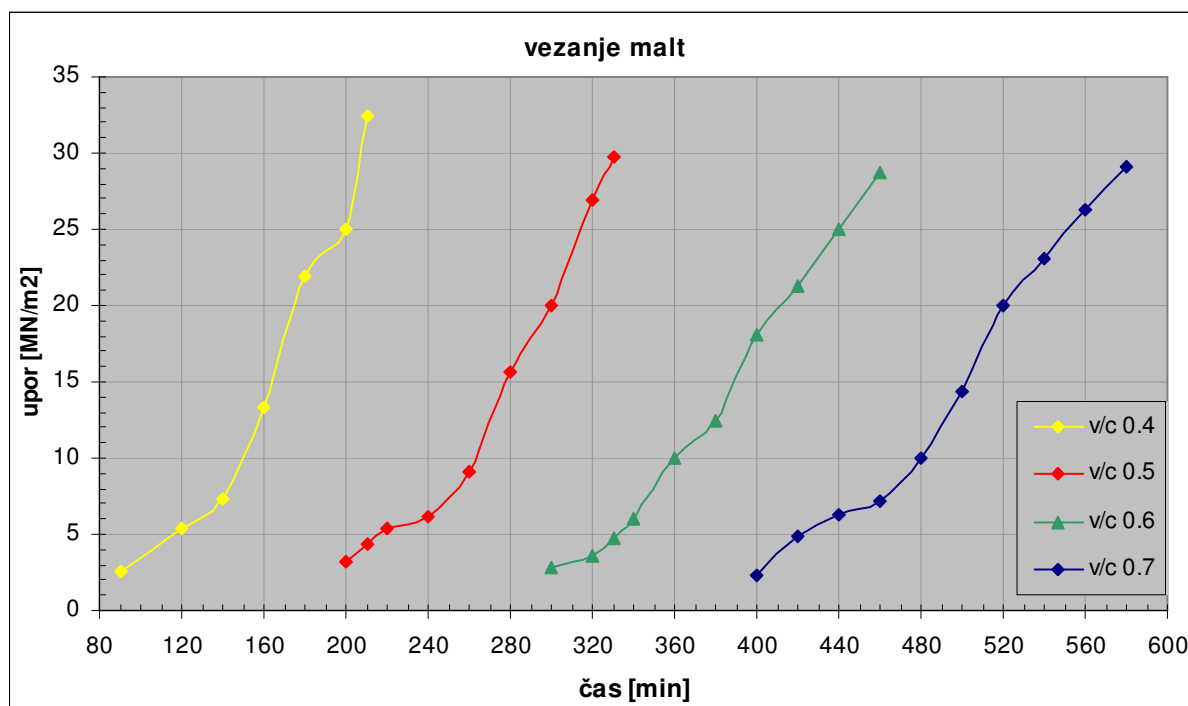
Igel s premerom \varnothing 28 in 20 mm nismo uporabili, začeli smo z iglo premera \varnothing 14 in premer po potrebi zmanjševali. Vtiskali smo igle v intervalih po 20 min oz. na koncu po potrebi, da smo dobili konec vezanja. Prehod na iglo manjšega premera smo izbrali, ko je potrebna sila prekoračila vrednost 600 N v 10 s na 25 mm globine vtiskanja. Še sprejemljiva sila se giblje med 100 in 550 N. Igle smo morali vstavljati v vzorec vsaj 25 mm od stene kalupa in razdalja med iglami ni smela biti manjša od 2 premerov igle oz. 15 mm.



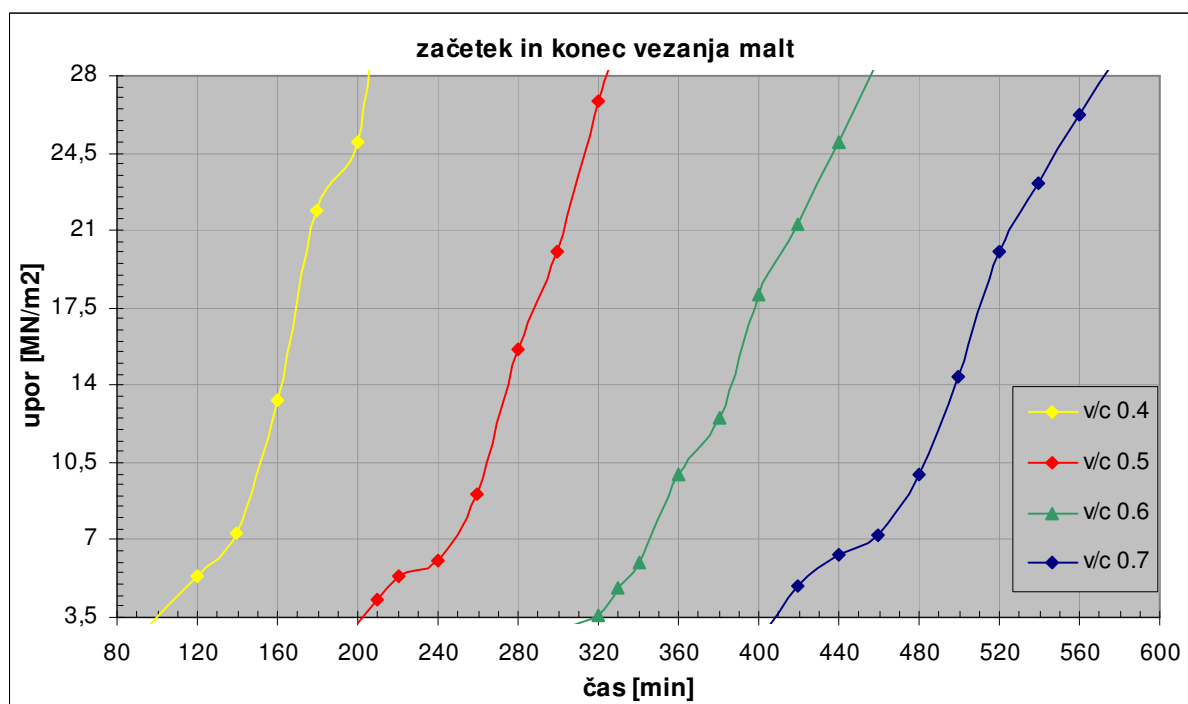
Slika 51: 1. in 2. vzorec malte z v/c razmerjem 0,7 in 0,6.



Slika 52: 3. in 4. vzorec malte z v/c razmerjem 0,5 in 0,4.



Grafikon 13: Časovni potek vezanja malt različnih v/c razmerij.



Grafikon 14: Začetek in konec vezanja malt različnih v/c razmerij.

Začetek vezanja malte je pri $3,5 \text{ MN/m}^2$ ter konec vezanja pri 28 MN/m^2 . Da smo dobili takšne rezultate, smo morali silo (N) izmerjeno na penetromertu, deliti s tistim presekom (v mm^2) igle, katere premer \emptyset smo vtiskali. Na primer, ko smo vtisnili iglo $\emptyset 9$ in izmerili silo 320 N , smo to delili s 161 mm^2 in dobili $4,9 \text{ N/mm}^2$, kar je identično enotama MN/m^2 in MPa . Kot rezultat smo dobili tudi časovni potek vezanja, ter s pomočjo teh diagramov določili začetek in konec vezanja.

Pri vseh vzorci smo naredili od 7 do 10 meritev, da smo dobili pravi potek vezanja. Iz grafikona 14 lahko odčitamo za vsako maltno mešanico čas vezanja ali pa z interpolacijo rezultatov dobimo točne meritve časa. Pri 1. vzorcu, ki ima malto z v/c razmerjem 0,7 se je vezanje začelo po 409 minutah in končalo po 573 minutah, 2. vzorec z malto z v/c razmerjem 0,6 ima začetek vezanja po 317 min in konec po 456 min. Pri 3. vzorcu z v/c razmerjem 0,5 je začetek vezanja po 203 min in konec po 324 min. Pri zadnjem, 4. vzorcu z v/c razmerjem 0,4 se je vezanje začelo po 100 min in končalo po 204 min.

Prišli smo do sklepa, da bolj goste malte z manjšim v/c razmerjem začnejo vezati hitreje in tudi hitreje dosežejo konec vezanja. Tako se posledično pri maltah z večjim v/c razmerjem, podaljša čas začetka vezanja in tudi kasneje pride do konca vezanja pri 28 MPa .

7 ZAKLJUČEK

Na podlagi rezultatov opravljenih meritev električne prevodnosti skozi svežo malto smo prišli do nekaterih podobnih ugotovitev, kot raziskovalci pred nami. Poleg tega smo ugotovili, da lahko določeni ukrepi, kot je na primer uporaba vakuumske masti za izboljšanje stika, vplivajo na meritve električnega toka tako, da povzročajo nepričakovana nihanja meritev. Zato smo pri analizah dobljenih rezultatov to upoštevali.

Poudariti moramo, da so bile raziskave opravljene v laboratoriju, kjer lahko ves čas poteka meritev, vzdržujemo konstantne pogoje okolja (temperaturo). Na terenu lahko veter, vlažnost, temperaturne razlike precej spreminjajo pogoje okolja, s tem pa tudi obnašanje materialov s cementnim vezivom v svežem stanju. Poleg tega pa na terenu težko zagotovimo tudi ustrezno in ponovljivo pripravo in vgradnjo mešanic s cementnim vezivom, kot smo to lahko zagotovili v laboratoriju.

Stabilnost svežih malt je bila v naši raziskavi ocenjena s pomočjo metode električne prevodnosti in vizualne ocene, vzporedno pa smo opravili tudi preiskave vezanja malt. Ugotovili smo, da večji kot je delež agregatnih zrn v sloju malte, bolj kot je sloj malte homogen ter manjše kot je v/c razmerje sloja malte, manjša je električna prevodnost skozi sloj malte. Na stabilnost svežih malt vplivata predvsem nehomogena vgraditev sveže mešanice, segregacija in izločanje vode. O dobri stabilnosti lahko govorimo, ko malta ni segregirana in ima homogen izgled. To zagotovimo z ustreznim razmerjem med masami osnovnih materialov in ustreznim v/c razmerjem ter seveda z ustreznim vgrajevanjem malte v kalup ali opaž.

Primerjava rezultatov merjenja električne prevodnosti in vezanja malt, predvsem časov začetka in konca vezanja, pokaže, da med dobljenimi rezultati ni korelacije. Najvišje vrednosti električne prevodnosti pri maltah brez superplastifikatorja dosežemo v času od 50 do 100 minut po zamešanju malte, najhitrejši začetek vezanja pa je pri malti z v/c razmerjem 0,4 in sicer 100 minut. Rezultati preiskav vezanja malt kažejo, da so časi začetka vezanja pri

3,5 MPa in konca vezanja pri 28 MPa, krajši, če ima malta manjše v/c razmerje. Preiskave so bile opravljene na homogenih, ne segregiranih vzorcih.

VIRI

Berdajs, A., Bertoncelj, J., Gruden, T., Murn, Z., Musi, A., Paulik, B., Slokan, I., Štembalj – Capuder, M., Zorman, F., Žitnik, D., Žitnik, J. 1998. Gradbeniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 509 str.

Golob, D. 2007. Vpliv vrste polimerne disperzije na mehanske in fizikalne lastnosti sanacijskih malt in betonov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Komunalna smer: 71 str.

Koželj, G. 2010. Odpornost proti prodoru vode za lahkogradljiv beton iz savskega proda iz krške kotline. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Smer operativno gradbeništvo: 67 str.

Mesbah, H.A., Yahia, A., Khayat, K.H. 2009. Validation of electrical conductivity method to assess static stability of SCC, INSA Rennes and Universite de Sherbrooke: 11 str.

Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materiali. Beograd, Akademska misao: 209 str.

Muravljov, M. 1991. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga: 451 str.

Turk, F. 2005. Zasnova in lastnosti samozgoščevalnih betonov izdelanih z drobljenim agregatom... Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 82 str.

Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. 2009/2010. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

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

ASTM C 403 M-05: 1997 - Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance - *American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.

JUS U.M1.019: 1981 - Određivanje vremena vezivanja betonskih mešavina merenjem otpora pri utiskivanju igle - Štampa Savezni zavod za standardizaciju, Beograd.

Spletni viri

Beton.

<http://www.slonep.net/gradnja/gradbeni-materiali/beton-2565> (21.3.2011)

Cement - gradbeni materiali.

http://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/cement_425r/ (21.3.2011)

Černilogar, L. dec. 2010. Dodatki za beton, Gradbenik, str. 100-103.

http://www.tkk.si/filelib/prakticni_nasveti/clanki/gr_12_2010_tkk.pdf (21.3.2011)

Delovanje okolja na beton.

<http://www.korak.ws/clanki/procesi-propadanja-betona--1-del.html> (21.3.2011)

Električna prevodnost.

<http://scp.s-scptuj.mb.edus.si/~gorisekt/Novice/RSM/Prehodna/Tok/tok.html> (21.3.2011)

Mesbah, H.A., et al. 2011. Electrical conductivity method to assess static stability of self-consolidating concrete, *Cem.Concr. Res.*

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWG-5282PKS-1&_user=10&_coverDate=02%2F25%2F2011&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1687537832&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=ed0af174fbf38a45b65428d720839589&searchtype=a (21.3.2011)

Metoda s posedom.

<http://www.builderbill-diy-help.com/concrete-testing.html> (21.3.2011)

Preiskovalne metode za beton.

<http://geotechnical-equipment.com/Concrete.html> (21.3.2011)

Proizvodnja cementa.

http://www.lafarge.si/?stran=show_text&id=120&znamka=16&selectedMeni=1&selectedMeniText=Proizvodnja%20cementa (21.3.2011)

Schindler, A.K., Prediction of concrete setting, Auburn University, Alabama.

<http://www.eng.auburn.edu/users/antons/Publications/RILEM-Schindler-Concrete-Setting-Dec-03.pdf> (21.3.2011)