

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*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Komunalna smer

Kandidat:

Matej Kodelja

Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpanih betonov

Diplomska naloga št.: 3074

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

Metod Mrzlikar

Ljubljana, 22. 6. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATEJ KODELJA** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

**» ŠTUDIJA UČINKOVITOSTI SUPERPLASTIFIKATORJEV ZA
ZAGOTAVLJANJE OBSTOJNOSTI ČRPNIH BETONOV «.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 28.5.2009

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691.32(043.2)
Avtor: Matej Kodelja
Mentor: doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentor: dipl. inž. grad. Metod Mrzlikar
Naslov: Študija učinkovitosti superplastifikatorja za zagotavljanje
obstojnosti črpnih betonov
Obseg in oprema: 109 str., 29 pregl., 50 sl.
Ključne besede: superplastifikator, beton, konsistenca, kamena moka, tlačna
trdnost betona

Izvodček

Sodoben, visokozmogljiv beton je skoraj nemogoče narediti brez kemijskih dodatkov, še posebej če potrebujemo črpne betone ter betone, ki obdržijo enako konsistenco od izdelave do vgradnje v večini pogojev okolja. In ravno to je bilo izhodišče moje diplomske naloge: izbrati kemijski dodatek tipa superplastifikator, ki bo dovolj učinkovit, praktičen za uporabo ter kompatibilen z materiali, ki sem jih imel na voljo. Osnovno recepturo sem dobil v laboratoriju betonarne, kjer sem izvajal preiskave in jo, glede na dobljene rezultate, spreminjal in prilagajal posamezni vrsti superplastifikatorja. Naredil sem 59 različnih receptur z 11 različnimi superplastifikatorji. Pri večini mešanic sem opravil meritve konsistence takoj po zamešanju betona ter pol ure in uro zatem. Nato sem posamezne mešanice betona vgradil v kalupe standardnih kock za preizkus tlačne trdnosti pri starosti 1, 3, 7 ter 28 dni. Za podrobnejši opis lastnosti sprojektiranih betonov v diplomski nalogi sem izbral 4 najboljše superplastifikatorje. Kot se je izkazalo, se superplastifikatorji zelo razlikujejo med seboj. Nekateri potrebujejo večjo količino finih delcev (uporabil sem kameno moko), drugi povzročajo velik delež zračnih por v svežem betonu. Ugotovil sem, da je potrebno izhajati iz zahtev glede lastnosti betona v svežem in strjenem stanju in temu prilagoditi sestavo betona. Sem spada tudi ustrezna izbira superplastifikatorja, ki mora biti kompatibilen z osnovnimi materiali za beton, ki so na voljo v betonarni.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 691.32(043.2)
Author: Matej Kodelja
Supervisor: dr. Violeta Bokan-Bosiljkov assist. prof.
Cosupervisor: CE Metod Mrzlikar
Title: Efficiency study of superplasticizers to ensure durability of concrete placed by pump.
Notes: 109 p., 29 tab., 50 fig.
Key words: superplasticizer, concrete, consistence, filler, compressive strength concrete

Abstract

Production of contemporary, high-performance concrete is almost impossible without chemical admixtures, particularly when plastic concrete is placed by pump or when adequate consistency has to be kept from manufacturing to placing of concrete in most environmental conditions. This was the starting point of my diploma work: to choose a chemical admixture - superplasticizer that will be sufficiently effective, practical to use and compatible with available basic materials. I obtained the basic proportion of concrete mix in the laboratory of a concrete plant, where I carried out experiments and, according to the results obtained, developed and adapted it to each type of superplasticizer. I made 59 different mix proportions, with 11 different superplasticizers. I carried out tests of consistency with most of the mixtures immediately after mixing of the concrete, as well as half an hour and an hour later. Then I made standard concrete cubes for compressive strength determination at the age of 1, 3, 7 and 28 days. In the diploma work I describe in detail properties of concrete mixtures made by the best 4 superplasticizers. As it turned out, the influence of used superplasticizers on properties of concrete mixtures differs substantially. Some require a large quantity of fine particles in the mixture (I used limestone filler), others cause a large percentage of air bubbles in fresh concrete. I found out that it is necessary to start from the requirements regarding the properties of concrete in fresh and hardened state and to adjust the composition of the concrete to meet the requirements. It also means selection of adequate superplasticizer, which has to be compatible with the basic materials for concrete that are available in concrete plant.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov ter somentorju dipl. inž. grad. Metodu Mrzlikarju iz Rokava d.o.o., Dekani.

Zahvala gre tudi vsej družini ter dekletu za pomoč in podporo v času izdelave naloge, pa tudi v celotnem času študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Cilj in namen diplomske naloge	1
2	SESTAVA BETONA	3
2.1	Osnovne zahteve za beton	3
2.2	Agregat.....	4
2.2.1	Potek določanja zrnastostne sestave agregata	6
2.3	Cement	8
2.3.1	Pridobivanje cementa	8
2.3.2	Sestava cementa	9
2.3.3	Proces hidratacije cementa	12
2.4	Praškasti materiali.....	14
2.4.1	Apnenčasta moka	15
2.5	Voda	16
2.6	Kemijski dodatki.....	17
2.6.1	Opis in oznake kemijskih dodatkov	17
2.6.2	Vrste kemijskih dodatkov	18
2.6.2.1	Aeranti	19
2.6.2.2	Plastifikatorji.....	22
2.6.2.3	Superplastifikatorji.....	24
2.6.2.3.1	Opis superplastifikatorjev.....	24
2.6.2.3.2	Razvoj superplastifikatorjev skozi čas.....	27
2.6.2.3.3	Primerjava med superplastifikatorji	30
2.6.2.3.4	Nameni uporabe superplastifikatorjev	31
2.6.2.3.5	Lastnosti strjenega betona z dodatkom superplastifikatorja ter odpornost betona na zmrzovanje/tajanje.....	31
2.6.2.3.6	Primerjava med plastifikatorji in superplastifikatorji.....	33
2.6.2.4	Zavlačevalci vezanja	34
2.6.2.5	Pospeševalci vezanja	35
2.6.2.6	Sredstva za kontrolo viskoznosti	37

3	BETON	39
3.1	Opis betona	39
3.2	Lastnosti betona	41
3.3	Tehnološke lastnosti betona	41
3.3.1	Vrsta betona	42
3.3.2	Razred tlačne trdnosti	43
3.3.3	Priprava betona	43
3.4	Preskušanje svežega betona	44
3.4.1	Odvzem vzorcev (SIST EN 12350-1:2001)	44
3.4.2	Posed stožca (SIST EN 12350-2:2001)	45
3.4.3	Gostota (SIST EN 12350-6:2001)	47
3.4.4	Vsebnost zraka v svežem betonu (SIST EN 12350-7:2001)	48
3.4.5	Preskusna metoda za določanje vodo - cementnega razmerja svežega betona (SIST 1026:2008)	50
3.5	Preskušanje strjenega betona	52
3.5.1	Oblike, mere in druge zahteve za preizkušance in kalupe (SIST EN 12390-1:2001)	53
3.5.2	Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti (SIST EN 12390-2:2001)	53
3.5.3	Tlačna trdnost preizkušancev (SIST EN 12390-3:2002)	54
3.5.4	Globina vpijanja vode pod pritiskom (SIST EN 12390-8:2001)	56
3.5.5	Preskus notranje odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju (SIST 1026:2008)	58
4	LASTNE PREISKAVE	60
4.1	Materiali	60
4.1.1	Agregat	60
4.1.2	Kamena moka	61
4.1.3	Cement	61
4.1.4	Voda	62
4.1.5	Kemijski dodatki	62
4.2	Projektiranje mešanic	63

4.3	Priprava mešanic	66
4.4	Preiskave na svežem betonu.....	68
4.5	Priprava preizkušancev za preiskavo tlačne trdnosti	71
5	REZULTATI.....	75
5.1	Rezultati preiskav na svežem betonu	75
5.1.1	Dodatek A	75
5.1.2	Dodatek B	82
5.1.3	Dodatek C	86
5.1.4	Dodatek D	87
5.2	Primerjava učinkovitosti različnih dodatkov na svežem betonu.....	87
5.3	Ugotovitve	93
5.4	Rezultati preiskave tlačne trdnosti.....	94
5.4.1	Dodatek A	94
5.4.2	Dodatek B	95
5.4.3	Dodatek C	97
5.4.4	Dodatek D	98
5.5	Primerjava tlačnih trdnosti za različne superplastifikatorje.....	100
5.6	Preskus VDT	101
5.7	Notranja odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju - NOZT	102
5.8	Ostali pogoji klasifikacije betona	102
6	ZAKLJUČEK.....	104
	VIRI.....	106

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Razvrščanje cementa.	11
Preglednica 2: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov.	16
Preglednica 3: Prednosti uporabe plastifikatorjev.	24
Preglednica 4: Primer doseženih visokih začetnih trdnosti pri uporabi superplastifikatorja v betonski mešanici.	25
Preglednica 5: Sprememba v času vezanja betona v odvisnosti od trenutka dodajanja 0,225 Ca-lignosulfonata.	35
Preglednica 6: Čas vezanja portland-cementne paste z dodatkom 2% CaCl ₂ ter 2% Ca-formiata ter brez dodatkov.	37
Preglednica 7: Lastnosti specialnega cementa CEM II/A-S 42,5R.	62
Preglednica 8: Tehnični podatki o superplastifikatorjih.	63
Preglednica 9: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom A.	64
Preglednica 10: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom B.	65
Preglednica 11: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom C.	65
Preglednica 12: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom D.	65
Preglednica 13: Število preizkušancev za tlačni preizkus pri posamezni starosti betona.	73
Preglednica 14: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A1 – A3).	75
Preglednica 15: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A4 – A6).	75
Preglednica 16: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A7 – A9).	76
Preglednica 17: Prikaz velikosti delcev kamene moke v kumulativnih odstotkih.	77
Preglednica 18: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B1 – B4).	82
Preglednica 19: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B5 – B8).	83
Preglednica 20: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B9 – B10).	83
Preglednica 21: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom C (C1 – C3).	86
Preglednica 22: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom C (C4 – C6).	86
Preglednica 23: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom D.	87
Preglednica 24: Tlačne trdnosti betona z dodatkom A.	94
Preglednica 25: Tlačne trdnosti betona z dodatkom B.	95
Preglednica 26: Tlačne trdnosti betona z dodatkom C.	97
Preglednica 27: Tlačne trdnosti betona z dodatkom D.	98

Preglednica 28: Globina vpijanja vode pod pritiskom.....	101
Preglednica 29: Priporočene mejne vrednosti in dosežene vrednosti.....	102

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz betona.	3
Slika 2: Delovanje lignosulfonatov.	28
Slika 3: Delovanje naftaeinskih in melaminskih molekul.	28
Slika 4: Prikaz sestave betona.	39
Slika 5: Prikaz izmere razleza.	47
Slika 6: Primer najpogosteje uporabljene zrnavostne sestave agregata v recepturah.	61
Slika 7: mešalec Liv, MLZ 130 NG.	67
Slika 8: Lopatka.	67
Slika 9: Posoda za vzorec.	67
Slika 10: Tehtnica.	67
Slika 11: Naprava določitev poseda in razleza.	68
Slika 12: Meritev poseda.	68
Slika 13: Meritev razleza.	68
Slika 14: Poroziometriška posoda.	69
Slika 15: Pravilno napolnjena posoda.	69
Slika 16: Delež zraka v svežem betonu v odstotkih.	69
Slika 17: Uporabljen termometer.	69
Slika 18: Določitev količine vode v svežem betonu.	70
Slika 19: Kalup kocke 150x150x150 mm.	71
Slika 20: Kalup prizme 100x100x400 mm.	71
Slika 21: Uporabljena vibracijska miza.	71
Slika 22: Kalup z strjenim betonom pred odstranitvijo kalupa.	72
Slika 23: Odstranjevanje kalupa.	72
Slika 24: Označevanje preizkušancev.	72
Slika 25: Hranjenje preizkušancev v bazenih z vodo do preizkusa.	72
Slika 26: Stiskalnica.	73
Slika 27: Porušitev preizkušanca.	73
Slika 28: Primer pravilne porušitve preizkušanca.	73
Slika 29: Spreminjanje V/C razmerja s časom.	77
Slika 30: Rezultati preiskave zrnavosti kamene moke z lasersko metodo.	78

Slika 31: Spreminjanje poseda s časom.....	79
Slika 32: Posed v obliki stožca.....	79
Slika 33: Posed v obliki kupole.....	79
Slika 34: Sovisnost med V/C razmerjem in posedom.....	80
Slika 35: Sovisnost med V/C razmerjem in razlezom.....	81
Slika 36: Sovisnost med V/C razmerjem in časom razleza.....	82
Slika 37: Spreminjanje V/C razmerja s časom.....	84
Slika 38: Spreminjanje poseda s časom.....	85
Slika 39: Sovisnost med V/C razmerjem in posedom.....	85
Slika 40: Sovisnost med V/C razmerjem in gostoto.....	88
Slika 41: Sovisnost med V/C razmerjem in količino superplastifikatorja.....	89
Slika 42: Sovisnost med deležem zraka in gostoto.....	90
Slika 43: Sovisnost med gostoto in količino superplastifikatorja.....	91
Slika 44: Sovisnost med gostoto in količino finih delcev.....	92
Slika 45: Sovisnost med deležem zraka in deležem superplastifikatorja.....	93
Slika 46: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom A.....	95
Slika 47: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom B.....	96
Slika 48: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom C.....	98
Slika 49: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom D.....	99
Slika 50: Primerjava razvoja tlačnih trdnosti med dodatki.....	101

1 UVOD

Beton je v današnjih časih nepogrešljiv konstrukcijski material, ki ga z vgrajevanjem v opaže in kalupe oblikujemo v poljubne oblike. Je keramični kompozitni material, pri katerem je mineralni agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Glavne sestavine betona so agregat, cement, voda ter kemijski in mineralni dodatki, ki se pri mešanju spremenijo v betonsko mešanico z visokoplastično konsistenco.

Tlačno trdnost in konsistenco betona med drugim pogojujejo tudi karakteristike vhodnih surovin in razmerja med njimi. Od masnega razmerja med vodo in cementom je odvisna stopnja hidratacije cementa in delež kapilarnih por ter s tem trdnost cementne matrike. Večja količina dodane vode sicer omogoča doseganje bolj plastične ali tekoče konsistence betona, vendar pa znižuje tlačno trdnost betona. Če zmanjšamo količino zmesne vode, pa se bistveno poslabša konsistenca svežega betona ter s tem možnost učinkovite zgostitve betona v opažu.

Pri črpnih betonih, ki imajo tekočo konsistenco, lahko zahtevo po visoki trdnosti in obstojnosti izpolnimo le z uporabo SP-ja. Dodatek superplastifikatorju omogoči doseganje tekoče konsistence pri dovolj nizkem vodo-cementnem razmerju, ki zagotavlja zahtevano trdnost in obstojnost betona. Zaradi doseganja ustrezne stabilnosti sveže mešanice vsebujejo črpnih betoni večji del finih delcev kot beton, ki se ne vgrajujejo s pomočjo črpalk. Ustrezno količino finih delcev lahko zagotovimo s povečanjem količine cementa, kar pa praviloma ni ekonomično. Zato je bolje uporabiti minimalno količino cementa, ki še zagotavlja izpolnitev zahteve glede trdnosti in obstojnosti betona, manjkajoče fine delce pa zagotoviti z dodajanjem cenejšega praškastega materiala, kot je na primer apnenčeva moka.

1.1 Cilj in namen diplomske naloge

Diplomska naloga je razdeljena na dva dela. Prvi, teoretični del, predstavlja podlago za drugi, eksperimentalni del. V prvem delu naloge predstavim lastnosti osnovnih materialov za izdelavo betona: agregat, cement, dodani praškasti materiali, voda ter kemijskih dodatkov. Sledi podrobnejša analiza sestave betona ter njegovih karakteristik. Ob koncu prvega dela

diplomske naloge pa sem še podrobno predstavil preiskave na svežem ter strjenem betonu, ki sem jih uporabil za oceno lastnosti betonov v laboratoriju. V drugem delu naloge podrobno opišem in predstavim eksperimentalni del ter prikažem in analiziram dobljene rezultate.

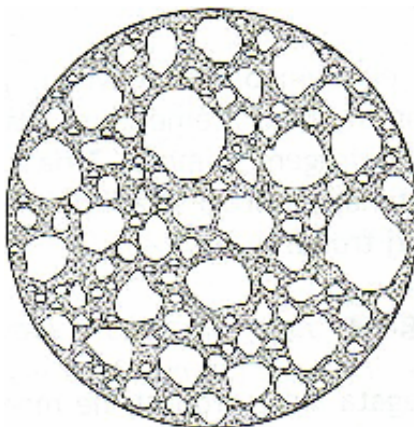
Glavni namen diplomske naloge je:

- preveriti učinkovitost več vrst superplastifikatorjev (različni proizvajalci, različne generacije superplastifikatorjev),
- določiti recepturo betona s predpisano konsistenco in črpnostjo,
- določiti optimalno količino in vrsto superplastifikatorja,
- določiti optimalno razmerje med ostalimi sestavinami betona,
- ugotoviti, kateri superplastifikator, ki je enostavno dostopen na slovenskem trgu, je najbolj kompatibilen z razpoložljivimi osnovnimi materiali za beton.

2 SESTAVA BETONA

2.1 Osnovne zahteve za beton

Beton je kompozit cementskega veziva, agregata, vode in dodatkov. Vse sestavine zmešamo in takrat začne med vodo in cementom kemijska reakcija, ki jo imenujemo hidratacija. Hidratacija je kemijsko-fizikalni proces. To je proces vezanja, gostitve ter predvsem strjevanja cementne paste. Cementni kamen je končni produkt procesa hidratacije. Pri tem dobimo monolitno celoto povezanih zrn agregata.



Slika 1: Shematski prikaz betona.

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 so sledeče:

- zahteva po skladnosti z EN 206-1,
- projektiran razred tlačne trdnosti $>C20/25$,
- odpornost na pogoje okolja,
- stopnje izpostavljenosti X0, XC1, XC2,
- nazivna velikost največjega zrna agregata,
- razred vsebnosti kloridov.

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.

Osnovne zahteve specifikacije predpisanega normalnega betona so sledeče:

- zahteva po skladnosti z EN 206-1,
- vsebnost cementa,
- vrsta in trdnostni razred cementa,
- vodo-cementno 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,
- če se uporabljajo kemijski in mineralni dodatki, njihovo poreklo in poreklo cementa, kot nadomestilo za karakteristike, ki jih drugače ni mogoče opredeliti.

2.2 Agregat

Agregat predstavlja največji delež prostornine betona. V betonu je kar 75% agregata, kar v veliki meri vpliva na tehnične in tehnološke lastnosti betona. Agregat je čist, trd in praviloma inerten material. Beton je lahko sestavljen iz dveh vrst agregata: prvi je naravno oblikovan agregat rečnih nanosov, drugi pa je drobljen agregat, ki ga pridobivamo v kamnolomih. Za dobro in kvalitetno betonsko mešanico potrebujemo agregat ustrezne zrnavostne sestave.

Agregat tudi v veliki meri vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice. Te so odvisne predvsem od njegove zrnavostne sestave, v manjši meri pa tudi od oblike in teksture površine zrn. Potrebno se je izogibati slabemu (drobljivemu) agregatu, zaradi njegovega vpliva na zmanjšanje trdnosti, deformacijske lastnosti ter slabšo odpornost proti agresivnim vplivom iz okolja.

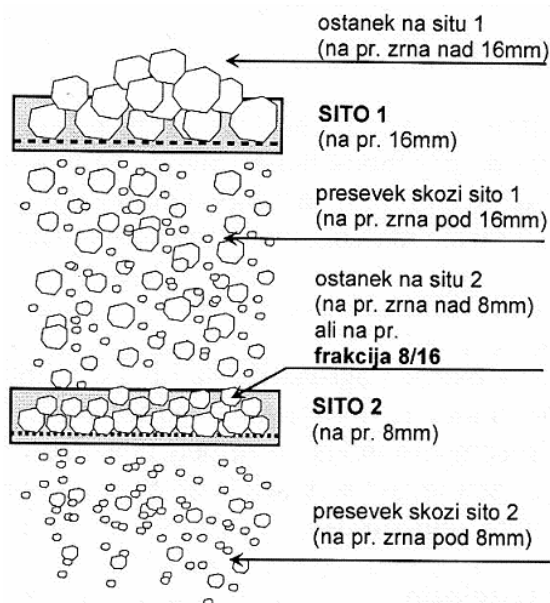
Pridobivanje proda je sicer lažje, vendar so njegove zaloge omejene. Njegove karakteristike se spreminjajo od nahajališča do nahajališča, pa tudi znotraj posameznega nahajališča. Prod je običajno sestavljen iz različnih vrst mineralov. Oblika zrn je zaobljena. To veliko pripomore k boljši vgradljivosti.

Mineraloška sestava kamnine iz katere proizvajajo drobljen agregat je običajno zelo homogena. V kamnolomih se običajno izkorišča ista vrsta stene tako, da se kakovost materiala spreminja le s spremembo položaja miniranja. Drobljenec ima po drugi strani to prednost, da ima petrografsko in fizikalno-mehansko homogenost. Ta se odraža pri redukciji notranjih napetosti, v boljši sprejemljivosti s cementno pasto ter manjšem diferencialnem krčenju betona. Drobljenec ima nepravilno obliko zrn, ki se pri vgrajevanju medsebojno klinijo. To veliko pripomore k nosilnosti betona pri tlačnih obremenitvah.

Na karakteristike svežega in strjenega betona bistveno vpliva zrnavostna sestava agregata. S kombiniranjem večjega števila frakcij agregata veliko pripomoremo k izboljšanju lastnosti betona, zmanjšamo trenje v masi ter zagotovimo boljšo zbitost zrn. To pomeni, da se votline med večjimi zrnimi zapolnijo z manjšimi zrnimi. Sveži beton bo ustrezno obdelaven in vgradljiv, če bo zrnavostna sestava agregata v določenih razmerjih znotraj mejnih zrnavostnih krivulj. Pri sestavljanju agregata ustrezne zrnivosti potrebujemo separiran agregat ustreznih frakcij.

Pri določanju zrnavostne sestave agregata stremimo k maksimalnemu možnemu deležu najbolj grobe frakcije agregata. Pri tem pa moramo upoštevati tudi druge relevantne zahteve glede karakteristik svežega in strjenega betona. Z velikim deležem grobih zrn namreč zmanjšamo količino potrebnega veziva, pri tem pa poslabšamo vgradljivost in obdelavnost sveže betonske mešanice in povečamo nevarnost segregacije. Vključitev ustreznega deleža drobnega agregata primerne zrnivosti predstavlja rešitev tovrstnih problemov. Zelo pomembno vlogo glede zagotavljanja določenih karakteristik sveže in strjene betonske mešanice imajo zrna drobnega agregata velikosti okrog 0,25 mm. Ta zrna zadržujejo vodo in tako preprečujejo njeno izcejanje ter povečajo odpornost na segregacijo. To je toliko bolj pomembno pri betonih z manjšo količino cementa. Ustrezen delež drobnega agregata je zelo pomemben tudi pri agregatih z neugodno obliko zrn (drobljenec), da zagotovimo ustrezno vgradljivost betonske mešanice.

Pri vsakem agregatu imamo vedno prisotne tudi praškaste in glinene delce. Količina teh delcev ne sme biti prevelika, ker lahko to v veliki meri vpliva na kvaliteto betona. To se kaže v zmanjšanju trdnosti in zmrzljinske odpornosti, povečanju krčenja in lezenja betona ter v povečanem vpijanju vode. Standardi podajajo maksimalne dovoljene deleže praškastih in glinenih delcev v agregatnih frakcijah.



Slika: Shematski prikaz sejanja agregatov.

(Vir: Žarnić, R. 1999, Osnovne lastnosti gradiv, str. 53.)

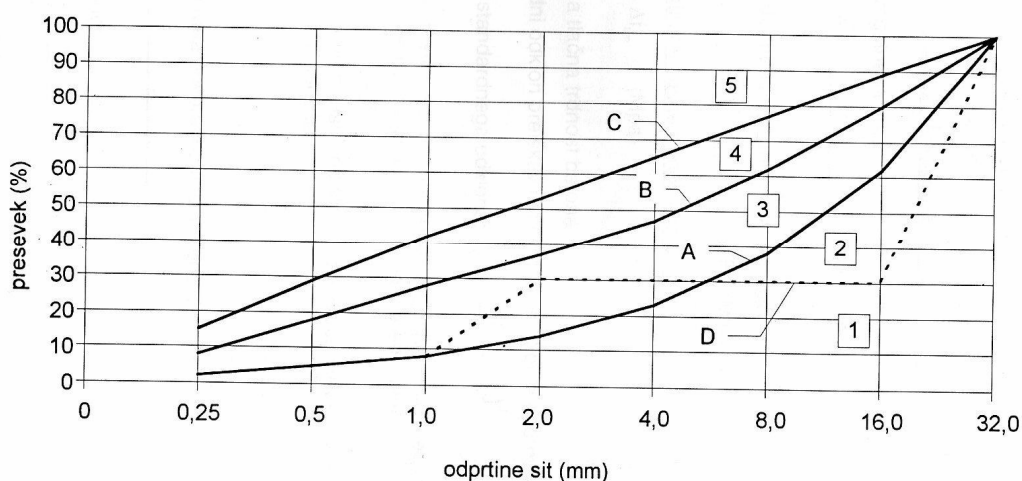
2.2.1 Potek določanja zrnastostne sestave agregata

Ko sestavljamo agregat ustrezne zrnastosti si pomagamo z naslednjimi principi:

- ko se uporabi agregat z zaobljenimi zrni (prod), ko se zahteva beton večjih trdnosti in ko imamo na razpolago učinkovita sredstva za vgrajevanje in zgoščevanje betona, lahko zmanjšamo delež drobnih frakcij v mešanici, kar pomeni, da naj se zrnastostna krivulja čimbolj približa standardni mejni krivulji A (slika na strani 7).
- ko oblika zrn ni ugodna (drobljenec) in ko nimamo na razpolago dovolj učinkovitih sredstev za vgrajevanje in zgoščevanje betona, moramo za dosego večjih trdnosti vključiti v betonsko mešanico večji delež drobnega agregata, kar pomeni, da naj se zrnastostna krivulja čimbolj približa standardni mejni krivulji B (slika na strani 7).

Predpisi oziroma standardi predajajo zrnastostno sestavo agregata v obliki mejnih krivulj, med katerimi naj bi potekala krivulja obravnavanega agregata. Posamezne krivulje nam podajo razmerja med odprtino sita (abscisna os) in količino preseveka skozi določeno sito izraženo v % od celotne količine agregata (ordinatna os). Pri sejalni analizi, s katero določamo zrnastostno sestavo agregata, ločimo pojme: presevek, ostanek na situ in frakcija. Presevek je tista količina agregata, ki pade skozi sito z določeno velikostjo odprtin. Ostanek na situ je količina agregata, ki ostane na situ z določeno velikostjo odprtin. Frakcija je količina agregata, ki pade skozi sito z določeno velikostjo odprtin in ostane na situ z manjšo velikostjo odprtin.

Spodnja slika prikazuje priporočene mejne krivulje za zrnastostno sestavo agregata, kot jih podaja slovenski standard SIST 1026: 2008.



Slika: Priporočene mejne krivulje zrnastosti za mešanico agregata.

(Vir: SIST 1026: 2008)

Pri izbiri vrste agregata, zrnastosti in kategorij (ploščatost, odpornost proti zmrzovanju/tajanju, odpornost proti abraziji finih delcev) je treba upoštevati:

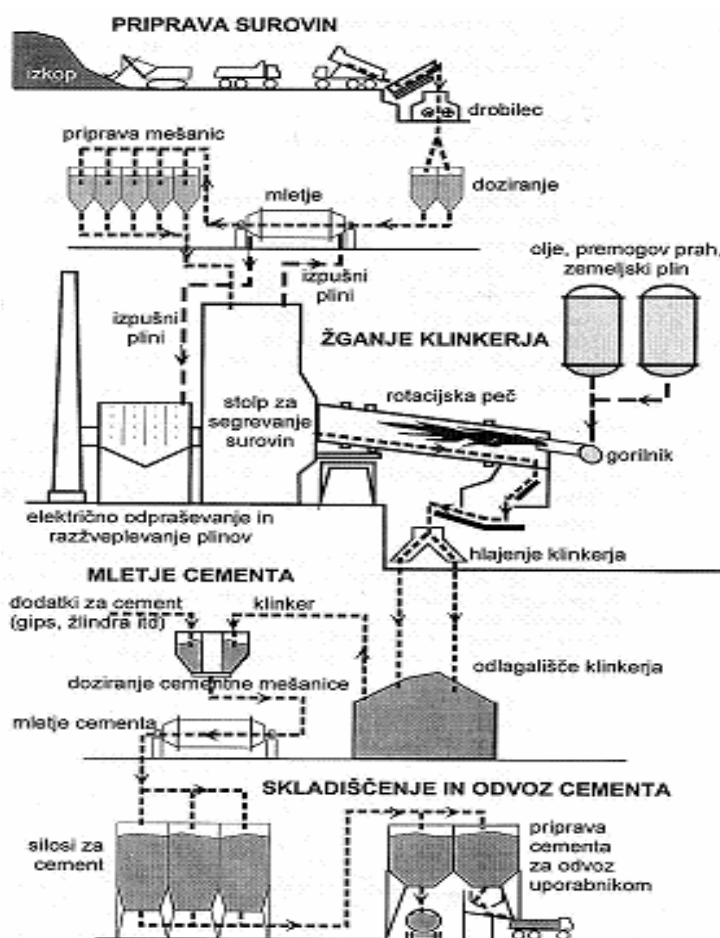
- način izvajanja del,
- končno uporabo betona,
- pogoje okolja, katerim bo beton izpostavljen,

- vse zahteve za agregat, izpostavljen na površini betona, ali agregat izpostavljen za strojno obdelavo površine betona.

Nazivno velikost največjega zrna agregata (D_{max}) je treba izbrati upoštevajoč debelino zaščitne plasti nad armaturo, najmanjšo dimenzijo prereza in najmanjšo svetlo razdaljo med sosednjima vzporednima armaturnima palicama v armiranobetonskem elementu.

2.3 Cement

2.3.1 Pridobivanje cementsa



Slika: Shematski prikaz proizvodnje cementsa.

(Vir: Žarnić, R. 1999, Osnovne lastnosti gradiv, str. 80.)

Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebuje naravni lapor, glina in apnenec. Ti materiali se po izkopu drobijo in transportirajo v silose. Na osnovi kemijske analize se mineralna mešanica dopolnjuje z manjkajočimi minerali. V glavnem se dodaja apno (CaO) in kremenčev pesek (SiO₂). Minerali se žgejo v rotacijski peči. Pri 100 °C oddajajo prosto vodo, pri 600 °C se izloča kristalno vezana voda, pri 900 °C se talita CaO in SiO₂, med 1200 °C in 1300 °C nastane talina, v kateri se tvorita minerala C₂S pri 1280 °C in C₃S pri 1450 °C. Dobljena zmes je cementni klinker, ki je podoben pepelu, ima granule s premerom nekaj centimetrov in je močno porozen. Klinker se hladi na sobno temperaturo in po dodajanju do 10% sadre (CaSO₄) melje v fin prah – portland cement. Cementni klinker je po sestavi poli-mineralni material.

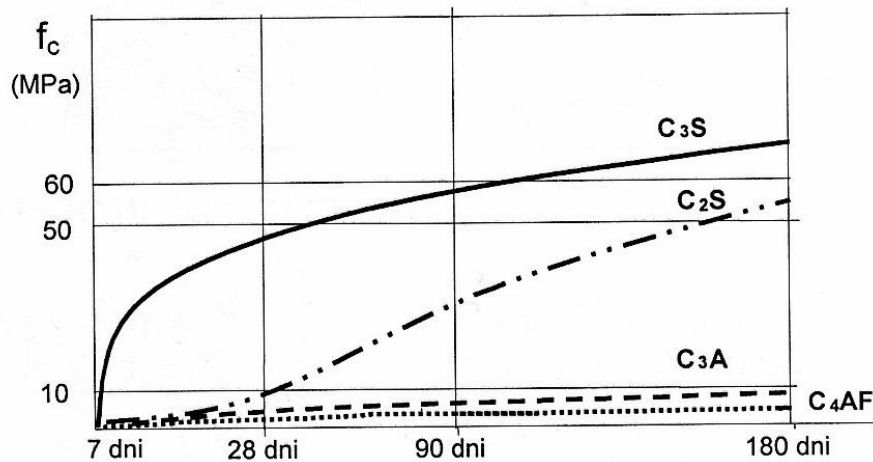
2.3.2 Sestava cementa

Osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja so:

- CaO – komponenta C (60 do 67%)
- SiO₂ – komponenta S (17 do 25%)
- Al₂O₃ – komponenta A (3 do 8%)
- Fe₂O₃ – komponenta F (0,5 do 6%)
- SO₄ – komponenta S (1 do 3%)
- primesi (nevezan CaO do 2%, MgO do 4%)
- alkalije (K₂O, Na₂O) (0,2 do 1,3%)

Minerali cementnega klinkerja, sestavljeni iz zgoraj navedenih spojin, so:

- trikalcijev silikat (alit) C₃S (3CaO, SiO₂) 40 do 70%
- dikalcijev silikat (belit) C₂S (2CaO, SiO₂) 5 do 30%
- trikalcijev aluminat C₃A (3CaO, Al₂O₃) 7 do 15%
- tetrakalcijev aluminat (ferit) C₄AF (4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃)



Slika: Diagram mineralov trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja.

(Vir: Žarnić, R. 1999, Osnovne lastnosti gradiv, str. 81.)

Slika na strani 10 prikazuje časovni potek naraščanja trdnosti posameznih mineralov cementa. K začetni trdnosti najbolj pripomore (2 – 3 dni do 50% skupne trdnosti) C₃S. C₂S na začetku veže počasneje, vendar dalj časa pridobiva na trdnosti. K končni trdnosti najmanj prispevata C₃A in C₄AF.

Cementu se med procesom proizvodnje portland cementa pri mletju dodajajo razni dodatki. Dodatki so neorganski materiali z določenimi hidravličnimi lastnostmi.

Dodatki v cementu so:

- naravni pucolani, ki so sedimentne kamnine ali pa snovi vulkanskega izvora. Naravni pucolani so bolj fino zmleti, zato potrebujemo večjo količino vode za standardno konsistenco. Posledica je zmanjšanje trdnosti cementnega kamna. Naravni pucolani imajo pa to dobro lastnost, da izboljšajo kohezijo betonske mešanice in njeno vodoneprepustnost.
- industrijski pucolani so termično obdelane gline in skrilavci ter zračno hlajene žindre, nastale pri proizvodnji svinca, bakra, cinka in v industriji fero zlitin. Mehanizem njihovega delovanja je enak kot pri naravnih pucolanih.
- granulirana plavžna žindra je stranski proizvod pri proizvodnji jekel v železarnah. V glavnem je sestavljena iz kalcijevega oksida, magnezijevega oksida, silicijevega oksida in

aluminijevega oksida. Dobri lastnosti žlindre sta povečanje obdelavnost in zvišanje končne trdnosti betona, slabša pa je znižanje začetne trdnosti betona.

- elektrofiltrski pepel pridobivamo z izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjenje z opršenim premogom. Delimo jih na silicijske in kalcijske, odvisno od vsebnosti CaO. V betonu deluje podobno kot pucolani, razen izrazito kalcijevih elektrofiltrskih pepelov.
- apnenec deluje v cementu kot polnilo.
- nedeklarirani dodatki so umetni ali naravni anorganski materiali. Cementu jih dodajamo kot dodatne sestavine v mejah do 5%. Njihove lastnosti so lahko inertnost, latentna hidravličnost, pucolanskost ali celo slabo izražena hidravličnost.
- mikrosilika se pridobiva v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremenca s premogom v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin. Sestavljajo jo zelo drobni delci kroglaste oblike. Njena specifična površina je nekaj deset-krat večja od cementa. Njen delež v cementu se praviloma giblje med 6 in 10% mase cementa. Njena učinkovitost se povečuje z vsebnostjo SiO₂.

Preglednica: Trdnostni razred cementov (MPa). (Vir: SIST EN 197-1:2002.)

trdnostni razred	zgodnaj trdnost		trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	minimalna	maksimalna
32,5N	-	≥ 16	≥ 32,5	≥ 52,5
32,5R	≥ 10	-	≥ 32,5	≥ 52,5
42,5N	≥ 10	-	≥ 42,5	≥ 62,5
42,5R	≥ 20	-	≥ 42,5	≥ 62,5
52,5N	≥ 20	-	≥ 52,5	-
52,5R	≥ 30	-	≥ 52,5	-

Glede na sestavo cementa, količino in vrsto dodanih mineralnih dodatkov, razvrščamo običajne cemente v pet glavnih vrst (*preglednica 1*).

Preglednica 1: Razvrščanje cementa.

vrsta cementa	opis	glavne sestavine	delež mineralnih dodatkov
CEM I	čisti portland cement	klinker	0%
CEM II	portland cement z mineralnimi dodatki	klinker, granulirana žindra (S), mikrosulika (D), pucolan (P,Q), elektrofilterski pepel (V,W), žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A 6-20% II/B 21-35%
CEM III	žlindrin cement	klinker, granulirana žindra (S),	III/A 36-65% III/B 66-80% III/C 81-95%
CEM IV	pucolanski cement	klinker, mikrosilika (D), pucolan (P,Q), elektrofilterski pepel (V)	IV/A 11-35% IV/B 36-55%
CEM V	mešani cement	klinker, granulirana žindra (S), pucolan (P,Q), elektrofilterski pepel (V)	V/A 36-60% V/B 61/80%

Cement je treba izbrati med tistimi cementi, ki veljajo za primerne in pri tem upoštevati:

- način izvajanja del,
- končno rabo betona,
- pogoje negovanja (toplotna obdelava),
- dimenzije konstrukcije (razvoj hidrationske toplote),
- pogoje okolja, katerim bo konstrukcija izpostavljena in
- potencialno reaktivnost agregata z alkalijami iz osnovnih materialov.

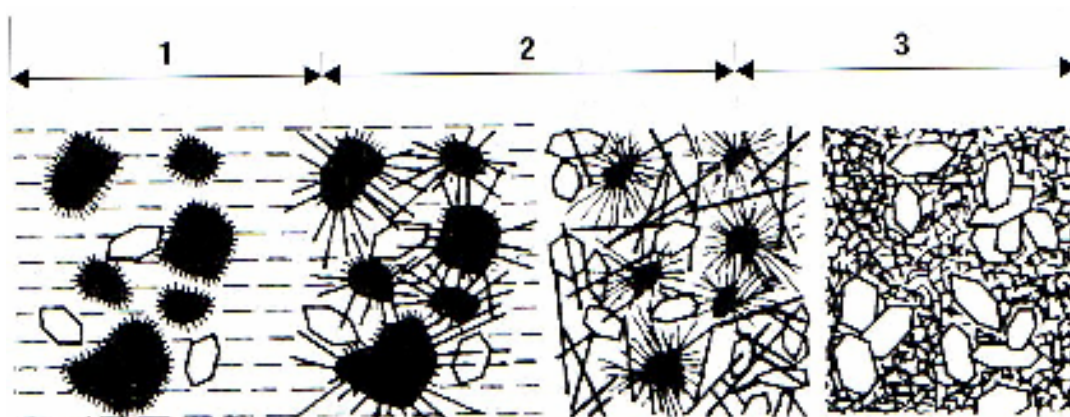
2.3.3 Proces hidratacije cementa

Hidratacija je proces vezanja cementa in vode. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali portland cementnega klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na druge. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in

kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov.

Hitrost hidratacije je odvisna od:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in zrnastne sestave cementa, vodo-cementnega razmera pri pripravi mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice in
- prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.



Slika: Prikaz hidratacijskih faz ter strukturnih sprememb med procesom hidratacije v cementu.

(Vir: Hirschi, T. 2005. Sika Concrete Handbook, str. 103.)

Proces vezanja in strjevanja je odvisen od masnega razmerja vode in cementa v cementni pasti. To razmerje se imenuje vodo-cementno razmerje (V/C). Po prehodu koloidnega sistema v cementni gel (2. faza v 3. fazo) nastaja porozna struktura.

Nastajajo:

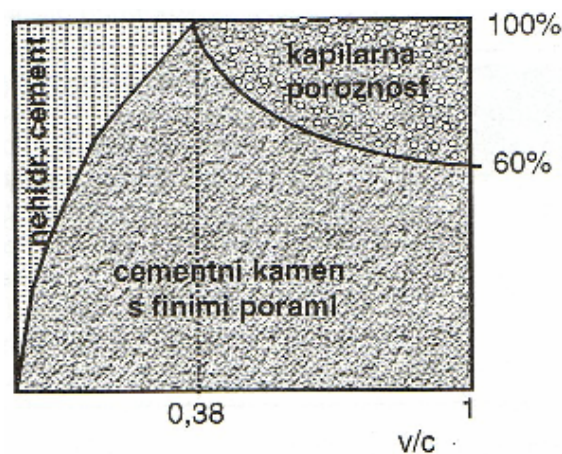
- gelske pore (0,2 do 5 μ m), ki so vedno zastopane v enakem deležu ne glede na stopnjo hidratacije cementa in so zapolnjene z vodo,
- kapilarne pore (0,05 do 1,3 μ m), ki jih je najmanj pri popolni hidrtaciji cementa, to je pri V/C = 0,38, ko se vsa cementna masa transformira v gel ter

- zračni mehurčki (10 do 1000 μ m), ki so zaprti za vdor vode.

Glede na velikost vodo - cementnega razmerja so možni trije primeri:

- $V/C < 0,38$, premalo vode za popolno hidratacijo cementa in zato del cementa ostane nehidratiziran,
- $V/C = 0,38$, idealne razmere pri katerih hidratizira ves cement,
- $V/C > 0,38$, vsa odvečna voda se namesti v kapilarnih porah.

Pri dejanskih razmerah v praksi $V/C = 0,38$ ponavadi ne zadošča za pripravo betona brez drugih dodatkov. Del vode izhlapi, hidratacija pa lahko poteka tudi več let. Debelejša zrna cementa nikoli ne hidratizirajo v celoti. V praksi je dosegljiva od 80 do 90% hidratacija cementnih zrn. Drobna zrna hidratizirajo v celoti, debela pa samo na površini. Zato je zaželeno, kar se da fino mletje cementa. Nehidratizirani delci cementa ne delujejo škodljivo, saj je trda lupina, ki jo sestavljajo produkti hidratacije, dovolj trdna.



Slika: Vpliv vodo - cementnega razmerja na sestavo cementnega kamna.

(Vir: Žarnić, R. 1999, Osnovne lastnosti gradiv, str. 83.)

2.4 Praškasti materiali

Skupino praškastih materialov sestavljajo: cement, mineralni dodatki ter delci agregata, ki so manjši od 0,125 mm. Praškaste materiale delimo v dve skupini: reaktivne in inertne.

Reaktivni praškasti materiali so mleta granulirana žindra, mikrosilika ter elektrofilterski

pepel. Inertni praškasti materiali pa so: zmleti polnilni materiali iz apnenca, dolomita, kremena, odpadnega stekla, odpraševanje drobljenega kamenega agregata...

Praškasti dodatki zagotavljajo fine delce, ki jih primanjkuje v zrnavostni sestavi cementa. Dodani delci povečajo stabilnost svežega betona in malt s tem, da zapolnijo prostor med relativno večjimi zrni cementa. Praviloma imajo tudi mazivni učinek. Najugodnejša oblika delcev mineralnega polnila je okrogla, saj kroglasti delci zmanjšajo notranje trenje v pasti.

Da bi zmanjšali ceno betona, se poskuša cement delno zamenjati z različnimi primernimi praškastimi polnili. Primerna zamenjava cementa s praškastimi delci poveča obdelavnost betona, njegovo trdnost in/ali trajnost.

2.4.1 Apnenčasta moka

Apnenčasto moko pridobivamo z mletjem apnenca ali z odpraševanjem drobljenega kamenega agregata. Uvrščamo jo med inertna polnila ali bolje, nepucolanska polnila.

Apnenčasta moka v betonu pospešuje hidratacijo cementa. Čim bolj fini so delci apnenčeve moke ter čim večji je delež kalcita v moki, tem bolj je pospešena hidratacija alita. Moka vpliva tudi na porast mikrotrdote in gostote strjene cementne paste. Kalcitni agregati namreč ustvarijo močnejšo vez v primerjavi z drugimi vrstami kamenega agregata. Pomemben vidik vpliva moke v hidritizirani cementni pasti je njen vpliv na lastnosti pri zgodnji starosti.

Fini delci velikost 5 μm zapolnijo votline med primerjalno bolj grobimi cementnimi zrni ter na ta način povečajo stabilnost svežega betona ter zmanjšajo prostor, katerega bi sicer zapolnila voda. S tem posredno zmanjšajo potrebo po vodi. Na trdnost strjenega betona vpliva količina zamenjave cementa s moko. Ugotovljeno je, da se pri 5% zamenjavi tlačna trdnost ne zmanjša, pri 25% deležu moke v vezivu pa tlačne trdnosti padejo. Ugotovili so tudi, da pri enaki trdnosti betona povečana količina apnenčevega polnila poveča modul elastičnosti betona.

2.5 Voda

Voda je pomembna komponenta vsake betonske mešanice, saj omogoča proces hidratacije cementa. V svežem betonu deluje voda kot komponenta za doseganje potrebne obdelavnosti betonske mešanice.

Za izdelavo betona uporabimo pitno vodo brez predhodnih preiskav. Če pa uporabimo vodo iz ostalih nahajališč (studenci, izviri, akumulacijska jezera,...), pa je potrebno predhodno opraviti analizo ustreznosti vode za izdelavo betona in s tem njeno neškodljivost za lastnosti strjenega betona (vezanje, strjevanje, obstojnost, korozija armature...).

Pri določevanju potrebne količine vode v kubičnem metru sveže betonske mešanice si pomagamo z enačbo:

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

Kjer je:

- V_a – voda, ki jo vpije agregat,
- V_p – voda, ki omoči površino agregata,
- 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.

Preglednica 2: Mejne vrednosti kemijskih lastnosti vode za pripravo betonov.

lastnosti vode	zahtevane vrednosti	
	armiran beton	prednapeti beton
pH vrednost	4,5 - 9,5	4,5 - 9,5
vsebnost kloridov (Cl ⁻)	≤300mg/l	≤100mg/l
vsebnost sulfatov (SO ₄ ²⁻)	≤2700mg/l	≤1000mg/l
vsebnost nitratov (NO ₃ ⁻)	≤500mg/l	≤500mg/l
vsebnost fosfatov (P ₂ O ₅)	≤100mg/l	≤100mg/l
vsebnost sulfidov (S ²⁻)	-	≤100mg/l

2.6 Kemijski dodatki

2.6.1 Opis in oznake kemijskih dodatkov

Kemijski dodatek je material dodan k vodi, agregatu ter cementu. Kemijski dodatki v betonu so snovi, ki s svojim kemijskim in/ali fizikalnim delovanjem vplivajo na določene lastnosti svežega in strjenega betona. Dodajajo se betonu pred ali med mešanjem v majhnih količinah (med 0,1 do 10% na maso cementa). Za doseg optimalnega želenega učinka potrebujemo dodatek, ki je najbolj kompatibilen z izbrano vrsto cementa in agregata. Kemijski dodatki so v tekočem ali praškastem stanju. Na vsakem dodatku nam proizvajalec navede tip dodatka, njegov osnovni namen, doziranje ter njegovo uporabo.

Uporaba kemijskih dodatkov – določa SIST EN 206-1:

- v primeru, da je uporabljena količina dodatka manjša od 2 g/kg cementa, je uporaba kemijskega dodatka dovoljena le, če je enakomerno premešan v delu vode za pripravo betona,
- celotna količina kemijskega dodatka ne sme presežati največjega, od proizvajalca priporočenega odmerka in tudi ne sme znašati več kot 50 g/kg cementa, razen če je vpliv večjega odmerka na lastnost in trajnost betona dokazan,
- če uporabljamo več kot en kemijski dodatek, je potrebno preveriti združljivost kemijskih dodatkov v okviru začetnih preiskav,
- če celotna količina tekočih kemijskih dodatkov presega 3 l/m³ betona, je potrebno vsebovano vodo upoštevati pri računu vodo-cementnega razmerja,
- dodatek mora biti popolnoma neškodljiv pri uporabi (varnostno in ekološko),
- dodatek mora biti učinkovit,
- dodatek mora imeti konstantne karakteristike,
- dodatek mora imeti ekološka dovoljenja,
- večino dodatkov deluje fizikalno ter kemično.

Kemijske dodatke uporabljamo za izboljšanje lastnosti svežega in strjenega betona. Pri svežem betonu za preprečevanje segregacije, preprečevanju izcejanja vode in izboljšanje

obdelavnosti, pri strjenem betonu pa za povečanje obstojnosti, vodoneprepustnosti, površinske in notranje trdnosti ter kemijske odpornosti. Dodatki nam pomagajo tudi pri betoniranju v neugodnih razmerah (neustrezne temperature, agresivno okolje...). Če potrebujemo beton z večjo plastičnostjo, lahko zadržimo enako vodo-cementno razmerje. Zelo pomembna lastnost pa je tudi ekonomičnost gradbenih del. Kemijski dodatki nam lahko zmanjšujejo ceno betona in omogočajo hitrejše napredovanje del in tako zmanjšujejo ceno konstrukcije.

Posamezni dodatki imajo več funkcij delovanja, zato jih je težko razvrstiti v skupine. Kemijske dodatke lahko razdelimo v dve skupini. V prvi skupini so kemikalije, ki začnejo takoj delovati na vodo-cementni sistem, vplivajo na površinsko napetost vode ter se adsorbirajo na površino delcev cementa. V drugi skupini pa so kemikalije, ki razpadajo na ione in vplivajo na kemične reakcije med cementom in vodo. To lahko traja od nekaj minut do nekaj ur po dodajanju. Fizikalni učinek prisotnosti teh dodatkov na reološke lastnosti svežega betona postane takoj viden, kemijski učinek pa šele po nekaj dneh do nekaj mesecih.

2.6.2 Vrste kemijskih dodatkov

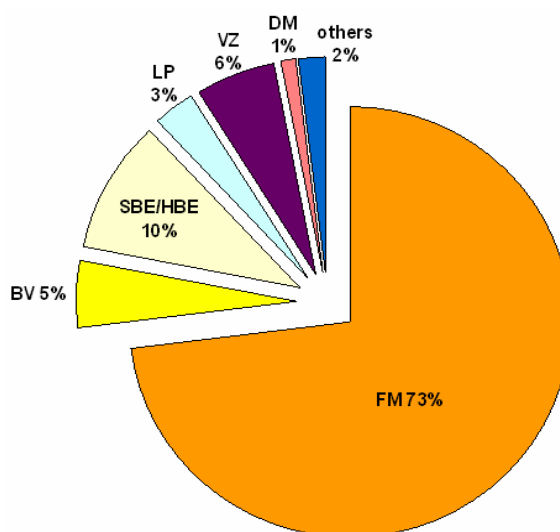
Kemijske dodatke delimo glede na njihovo osnovno funkcijo na:

- aerante,
- plastifikatorje,
- superplastifikatorje,
- zavlačevalce vezanja,
- pospeševalce vezanja,
- sredstva za kontrolo viskoznosti,
- ostale dodatke.

Preglednica: Oznake dodatkov (legenda za sliko na strani 20).

(Vir: Sika Slovenija)

vrsta dodatka	oznaka	kombinacije uporabe
plastifikatorji	BV	BV-VZ
superplastifikatorji	FM	FM-VZ / FM-HBE
aerant	LP	BV-LP / FM-LP
zavlačevalci vezanja	VZ	
pospeševalci vezanja	SBE	
pospeševalci strjevanja	HBE	



Slika: Uporaba dodatkov glede na vrsto.

(Vir: Sika Slovenija)

Preglednica: Pregled načina delovanja dodatkov.

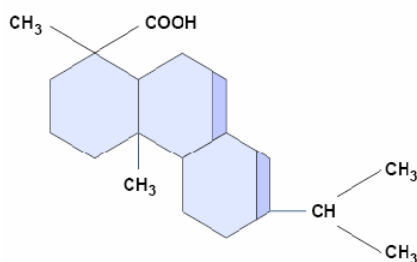
(Vir: Sika Slovenija)

vrsta dodatka	BV	FM	VZ	LP	SBE	HBE
učinki delovanja						
zmanjševanje vode ali izboljšanje obdelovalnosti	++	++		+		
določitev časa vezanja		(+/-)	++		++	(+)
vsebnost zraka		(-)		++		
segregacija (transport, uporabnost)	(-)	(+/-)				

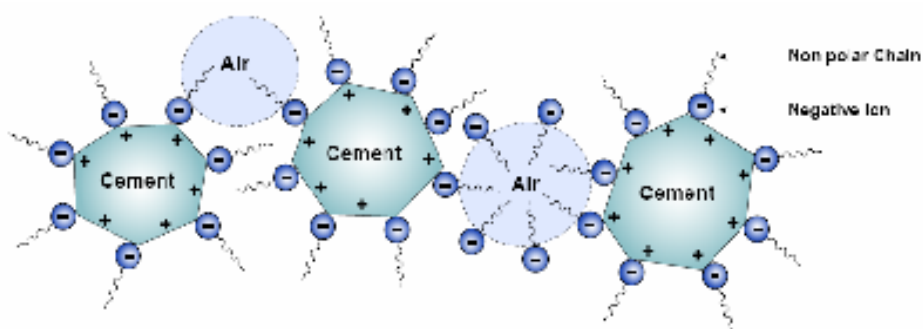
2.6.2.1 Aeranti

Aerante se uporablja pri vnosu kontrolirane količine stabilnih zračnih mehurčkov v betonsko mešanico. Če hočemo imeti beton odporen na zmrzovanje/tajanje brez in v prisotnosti talilnih soli, vnesemo s pomočjo aerantov v betonsko mešanico zračne mehurčke velikosti od 25 do 250 μm . Zračni mehurčki delujejo kot mazivo, kar nam pomaga zmanjšati segregacijo in izcejanje vode ter povečati kohezivnost in obdelavnost svežega betona. Vključitev zraka pripomore k izboljšanju obdelavnosti betonske mešanice takrat, ko imamo manj cementa ali vode ter grobi ali lahki agregat. Zato je metoda z vnosom zračnih mehurčkov splošno uporabljena pri sestavi velikih količin betona ter betona iz lahkih agregatov. Zaradi vnosa zraka v mešanico postanejo cementni delci spet hidrofobni. Vsako predoziranje bi v mešanici lahko povzročilo pretirane zamude pri hidrataciji cementa. Moramo pa tudi vedeti, da velika količina vnesenega zraka v mešanico povzroči pomembno zmanjšanje trdnosti. Vsak odstotek vnesenega zraka zmanjša tlačno trdnost betona za približno 5%. Da se izognemo izgubi trdnosti (zračne pore), lahko zmanjšamo vodo-cementno razmerje tako, da uporabimo ustrezen plastifikator ali superplastifikator. Lahko pa tudi že v osnovi uporabimo dodatek s kombiniranim učinkom aeriranja in plastificiranja.

Kemična formula tipičnega aeranta vsebuje nepolarno ogljikovodikovo verigo z anionsko skupino (slika spodaj na strani 21). Mehanizem delovanja je predstavljen na sliki na strani 22 zgoraj. Ko aerant dodamo sistemu voda - cement le-ta stabilizira zračne mehurčke po naslednjem mehanizmu: med mešanjem aeranta in vode se polarne skupine orientirajo proti vodni fazi in s tem znižajo površinsko napetost, kar spodbuja nastajanje mehurčkov ter prepreči tendenco združevanja razpršenih mehurčkov. Na površini cement - voda se polarne skupine vežejo na cement, ob tem pa se nepolarne skupine orientirajo proti vodi. Tako postane površina cementa hidrofobna in omogoči zraku, da izpodrine vodo in ostane vezan na cement v obliki mehurčkov.

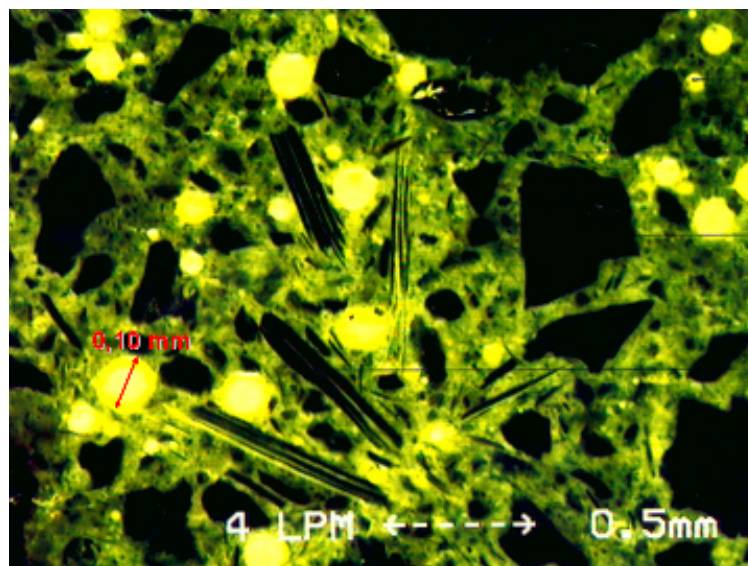


Slika: Kemijska formula tipičnega aeranta. (Vir: Kumar Mehta, P. 2006. Concrete. str. 285)



Slika: Mehanizem uvedbe zračnih mehurčkov v cementno pasto z aerantom; to je anionska površinsko aktivna snov z nepolarno ogljikovodikovo verigo.

(Vir: Kumar Mehta, P. 2006. Concrete. str. 285)



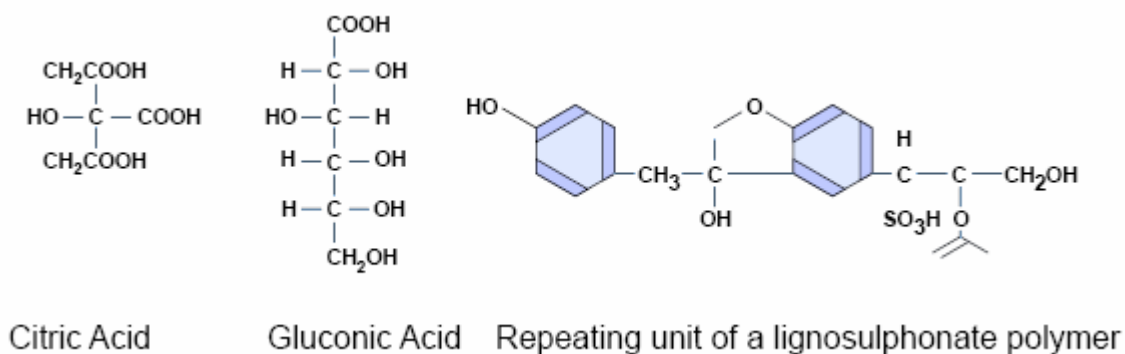
Slika: Prikaz zračnih mehurčkov v sestavljenem betonu.

(Vir: Sika Slovenija)

2.6.2.2 Plastifikatorji

Namen dodajanja plastifikatorjev je povečanje konsistence betona pri enakem V/C razmerju ali povečanje trdnosti z zmanjšanjem V/C razmerja.

Kemijska struktura treh najpomembnejših plastifikatorjev je prikazana na sliki na strani 23 zgoraj.



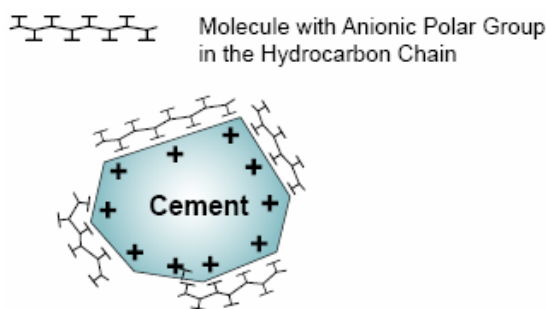
Slika: Formula tipičnih plastifikatorjev – to so ogljikovodiki za anionskimi polarnimi skupinami.

(Vir: Kumar Mehta, P. 2006. Concrete. str. 286)

V nasprotju z aeranti je za plastifikatorje značilno, da imajo anionske polarne skupine združene z verigo ogljikovodikov, ki je prav tako polarna oz. hidrofilna (v verigi je prisotnih več -OH skupin). Ko dodamo majhno količino vode v cement, brez dodajanja plastifikatorja, ne dosežemo dobro razpršenega sistema ker:

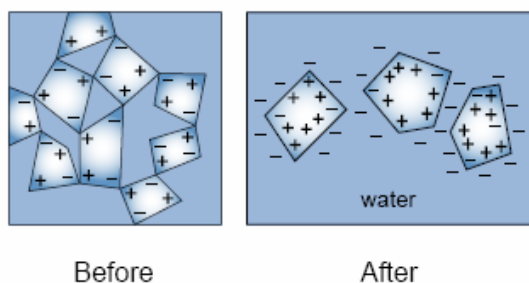
- prvič: voda ima visoko površinsko napetost,
- drugič: delci cementa se držijo skupaj ali se celo kosmičijo (med pozitivno in negativno nabitimi konci in površinami obstajajo privlačne sile).

Ko dodamo plastifikator s hidrofilno verigo v vodo - cementni sistem, se polarna veriga adsorbira vzdolž cementnih delcev. V tem primeru površinsko aktivna snov usmeri polarni konec proti vodi. Tako se zmanjša površinska napetost vode in cementni delec postane hidrofilen (slika na strani 23 spodaj).



Slika: Hidrofilen cementni delec. (Vir: Kumar Mehta, P. 2006. Concrete. str. 286)

Ker sloj vodnih dipolov obdaja hidrofilne cementne delce, je njihovo kosmičenje preprečeno. Tako dobimo dobro dispergirani sistem (slika zgoraj na strani 24).



Slika: Shematični prikaz nastanka kosmičev cementnih delcev pred dodatkom vodo-zmanjševalne mešanice ter po dodatku.

(Vir: Kumar Mehta, P. 2006. Concrete. str. 286)

Različne možnosti zmanjševanja vode v mešanici so prikazane v preglednici 3. V seriji A imamo 300 kg/m^3 cementa, vodo-cementno razmerje je 0,62, sveži beton ima 50 mm poseda, strjen beton pa 25 in 37 MPa tlačne trdnosti pri 7 in 28 dneh.

Pri sestavi B imamo namen povečati konsistenco pri enaki mešanici, to je brez dodajanja cementa ali vode. To smo zlahka dosegli z dodajanjem majhne količine plastifikatorja. Tak pristop je primeren, ko beton vgrajujemo v težko dostopna območja s črpalko.

Pri sestavi C imamo namen doseči višjo tlačno trdnost, brez da bi povečali vsebnost cementa ali zmanjšali konsistenco mešanice. Pri tem uporabimo enako količino plastifikatorja kot pri sestavi B. Količina vode v mešanici se zmanjša za 10% (s 186 na 168 kg/m^3), pri tem pa še vedno ohranimo 50 mm poseda. Kot rezultat zmanjšanja vodo-cementnega razmerja se tlačna

trdnost po 7-dneh poveča iz 25 na 34 MPa ter pri 28-dneh s 37 na 46 MPa. Ta pristop je uporaben, ko imamo predpisano največje vodo-cementno razmerje ter je zahtevana visoka zgodnja trdnost.

Pri sestavi D je prikazano, kako je mogoče z dodajanjem plastifikatorja privarčevati 10% cementa, ne da bi zmanjšali konsistenco in nosilnost. Poleg tega, da je beton cenejši, dosežemo tudi manjše povečanje temperature pri velikih količinah betona.

Preglednica 3: Prednosti uporabe plastifikatorjev.

oznaka preizkusa	količina	vodo-cementno	posed	tlačna trdnost	
	cementa	razmerje		(MPa)	
	(kg/m ³)		(mm)	7 dni	28 dni
A - primerjalni beton (brez dodatkov)	300	0,62	50	25	37
<i>plastifikator dodan z namenom:</i>					
B - povečanje konsistence	300	0,62	100	26	38
C - povečanje trdnosti	300	0,56	50	34	46
D - prihranek cementa	270	0,62	50	25,5	37,5

2.6.2.3 Superplastifikatorji

2.6.2.3.1 Opis superplastifikatorjev

Superplastifikatorje imenujemo tudi dodatke z visoko zmožnostjo zmanjšanja količine vode v betonski mešanici. Omogočajo namreč zmanjšanje količine vode v betonski mešanici za tri do štiri – krat, v primerjavi s plastifikatorji. Superplastifikatorji so sestavljeni iz anionskih površinsko aktivnih snovi z visoko molsko maso (20000 do 30000) in dolgimi ogljikovodikovimi verigami, na katerih so številne polarne skupine. Ob adsorpciji na

cementne delce površinsko aktivna snov ustvari močan negativni naboj, ki prispeva k znižanju površinske napetosti vode v okolici in bistveno poveča sposobnost tečenja sistema.

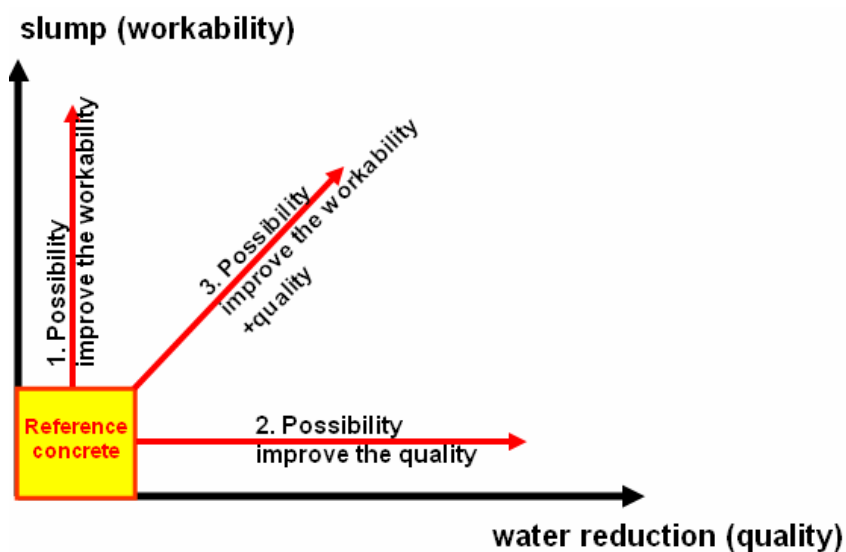
V primerjavi z normalnimi plastifikatorji lahko dodamo betonski mešanici relativno veliko količino superplastifikatorja, ne da bi povečali izcejanje vode ali zavlačevanje vezanja, kljub bistveno večji konsistenci betona. Verjetno je to posledica koloidne velikosti dolgih verig sestavin superplastifikatorja, ki zamašijo pretočne kanale za vodo, tako da običajno ne pride do segregacije betona. Odlična dispergirnost cementnih delcev v vodi verjetno pospeši hidratacijo, zato večinoma ne pride do zavlačevanja vezanja; prav nasprotno, običajno dobimo pospešeno vezanje in naraščanje trdnosti betona.

Z navadnimi plastifikatorji je možno doseči 5 do 10 odstotno zmanjšanje vode, s superplastifikatorji pa praviloma 20 do 30 odstotno, pri čemer še vedno ohranimo visoko konsistenco betona. Povečanje mehanskih lastnosti (tlačna in upogibna trdnost) dosežemo z primernim vodo-cementnim razmerjem. Pogosto se zgodi tudi, da pri istem vodo-cementnem razmerju dobimo z uporabo superplastifikatorjev v betonu večjo tlačno trdnost pri 1,3 in 7 dneh (preglednica 4). To je še najbolj pomembno pri betoniranju tistih betonskih objektov, kjer potrebujemo visoke trdnosti v najkrajšem možnem času. Z visoko količino cementa ter vodo-cementnim razmerjem bistveno manjšim od 0,4 je mogoče doseči še hitrejši razvoj trdnosti.

Preglednica 4: Primer doseženih visokih začetnih trdnosti pri uporabi superplastifikatorja v betonski mešanici.

test	količina cementa	vodo- cementno razmerje	posed	tlačna trdnost			
	(kg/m ³)		(mm)	(MPa)			
				1 dan	3 dni	7 dni	28 dni
primerjalni beton (brez dodatkov)	360	0,6	225	10	21	32	45
beton enake sestave kot primerjalni, vendar z manj vode ter z dodatkom 2% superplastifikatorja na maso cementa	360	0,45	225	20	35	43	55
beton z enakim vodo-cementnim razmerjem vendar brez dodanega superplastifikatorja ter z manjšim posedom kot prejšnji beton	360	0,45	30	16	28	37	52

Pri delu z superplastifikatorji je najpomembnejše, da predhodno poznamo predvidene lastnosti betona. Iz slike na strani 27 lahko razberemo s kakšnimi lastnostmi lahko operiramo. Odločiti se moramo med povečanjem obdelavnosti ali povečanjem kvalitete. Obstaja pa tudi možnost kombinacije delnega povečanja obdelavnosti in delnega povečanja kvalitete.



Slika: Superplastifikatorji – način delovanja. (Vir: Sika Slovenija)

Glede na uporabnost delimo superplastifikatorje na več vrst:

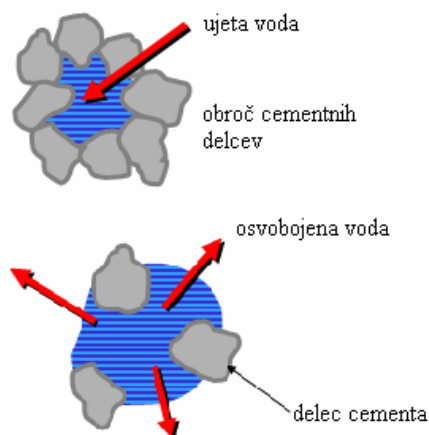
- standardni: uporaba v zimskih razmerah ter v prehodnem obdobju (jesen, pomlad),
- zakasnitveni: uporaba poleti in pri visokih temperaturah, ter ko potrebujemo dolgo obdelavnost betona (transport),
- pospeševalni: uporaba pozimi in pri nizkih temperaturah, ko potrebujemo visoke zgodnje trdnosti,
- kombinirani.

2.6.2.3.2 Razvoj superplastifikatorjev skozi čas

S časom se je tudi sestava superplastifikatorjev spreminjala. Z odkrivanjem kemijskega ozadja so pri različnih proizvajalcih odkrili spojine, ki vedno bolj zmanjšujejo potrebo po vodi v betonu.

Superplastifikatorji na osnovi lignosulfonatov

Že davnega leta 1930 so poznali dodatke, s katerimi je bilo možno zmanjšati količino vode do 10%, danes jih imenujemo plastifikatorji. Delujejo na osnovi lignosulfonatov.



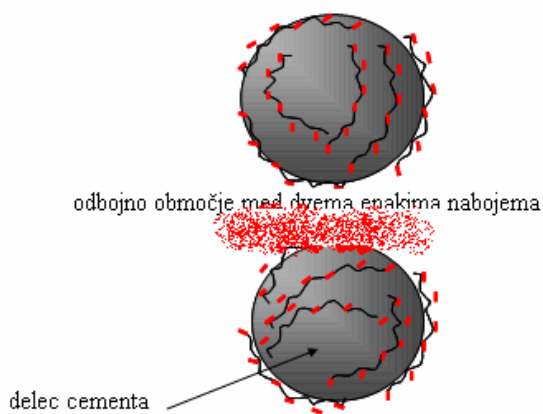
Slika 2: Delovanje lignosulfonatov.

Delovanje:

- elektrostatični odboj med delci,
- znižanje površinske napetosti vode,
- zakasnitev procesa hidratacije,
- sprostitvev ujete vode,
- izboljšanje obdelavnosti,
- zmanjšanje vode do 10%.

Superplastifikatorji na osnovi naftalenskih in melaminskih molekul

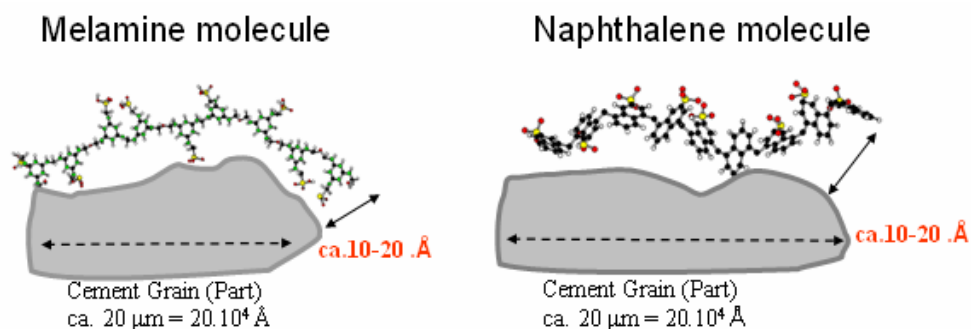
Med 2. svetovno vojno je razvoj superplastifikatorjev zastal. Do novih odkritij je prišlo šele v letih od 1970 do 1980, ko se naredili superplastifikatorje na osnovi naftalenskih in melaminskih molekul.



Slika 3: Delovanje naftalenskih in melaminskih molekul.

Delovanje:

- elektrostatični odboj med delci,
- negativno nabite molekule se adsorbirajo na cementne delce in povzročijo medsebojni odboj,
- izboljšanje obdelavnosti,
- zmanjšanje vode do 20%.



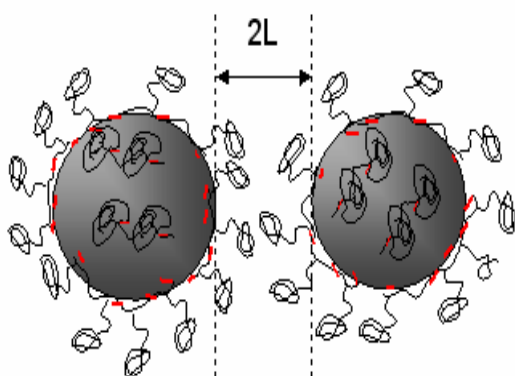
Slika: Detajlni vpogled v delovanje naftaeinskih in melaminskih molekul.

(Vir: Sika Slovenija)

Superplastifikatorji na osnovi polikarboksilatov

Po letu 1990 so razvili novo vrsto superplastifikatorjev, ki vsebujejo kopolimere na osnovi poliakrilatov, polikarboksilatov ter polietilenov. Razlika v delovanju v primerjavi s starimi superplastifikatorji je v tem, da so stari superplastifikatorji uporabljali elektrostatski odboj kot prevladujoč mehanizem razpršenosti cementa, novi pa zavirajo povezovanje cementnih zrn s prostorsko stabilizacijo.

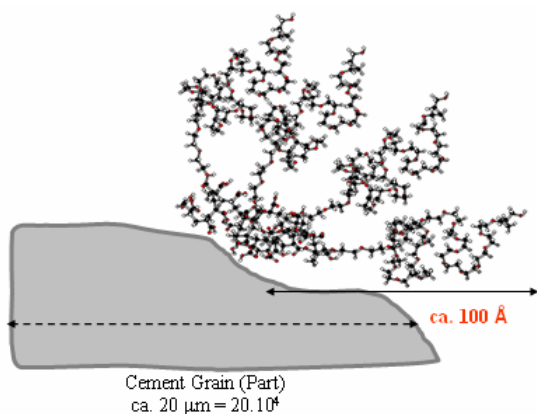
Superplastifikator na osnovi polikarboksilatov je površinsko aktivna snov, ki se adsorbira na površino cementnih zrn in povzroča disperzijo le-teh z električnim in steričnim oziroma prostorskim odbojem. Cementna zrna s sprejetim negativnim električnim nabojem iz karboksilatnih skupin se medsebojno odbijajo in dispergirana struktura cementnih zrn se stabilizira. Posledica negativnega odboja je nastanek orientiranih molekul na površini cementnih zrn, ki delujejo kot mazivo oziroma povečujejo obdelavnost svežega betona. Nastanek steričnega odboja povzročijo dolge verige iz polietilen oksidov, ki prostorsko preprečujejo, da bi se cementni delci združevali. Prostorski odboj ima veliko večji in dalj časa trajajoči učinek kot električni odboj.



Slika: Delovanje polikarboksilne strukture.
(Vir: Sika Slovenija)

Delovanje:

- elektrostatični odboj med delci,
- dolge prečne verige molekul delujejo kot ovira med cementnimi delci,
- s razpršenostjo cementnih delcev je preprečeno njihovo kosmičenje,
- izboljšanje obdelavnosti,
- zmanjšanje vode do 40%.

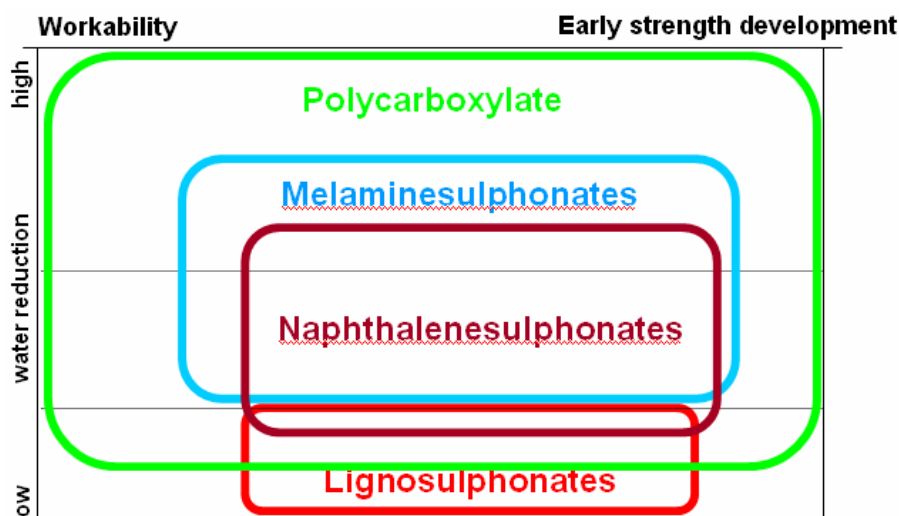


Slika: Detajlni vpogled v delovanje polikarboksilnih molekul.
(Vir: Sika Slovenija)

V primerjavi z melaminskimi in naftalenskimi molekulami so polikarboksilne molekule približno 5 do 10 krat večje. Imajo tudi večje število stranskih verig tako, da učinkoviteje pokrivajo cementne delce.

2.6.2.3.3 Primerjava med superplastifikatorji

Kot vidimo, se je z leti zelo spreminjala struktura molekul superplastifikatorjev. Slika na strani 32 shematično prikazuje učinkovitost različnih superplastifikatorjev glede na sposobnost zniževanja količine zamesne vode, obdelavnost in doseganje višjih zgodnjih trdnosti.



Slika: Učinkovitost različnih superplastifikatorjev.

(Vir: Sika Slovenija)

2.6.2.3.4 Nameni uporabe superplastifikatorjev

Prednosti uporabe superplastifikatorjev so:

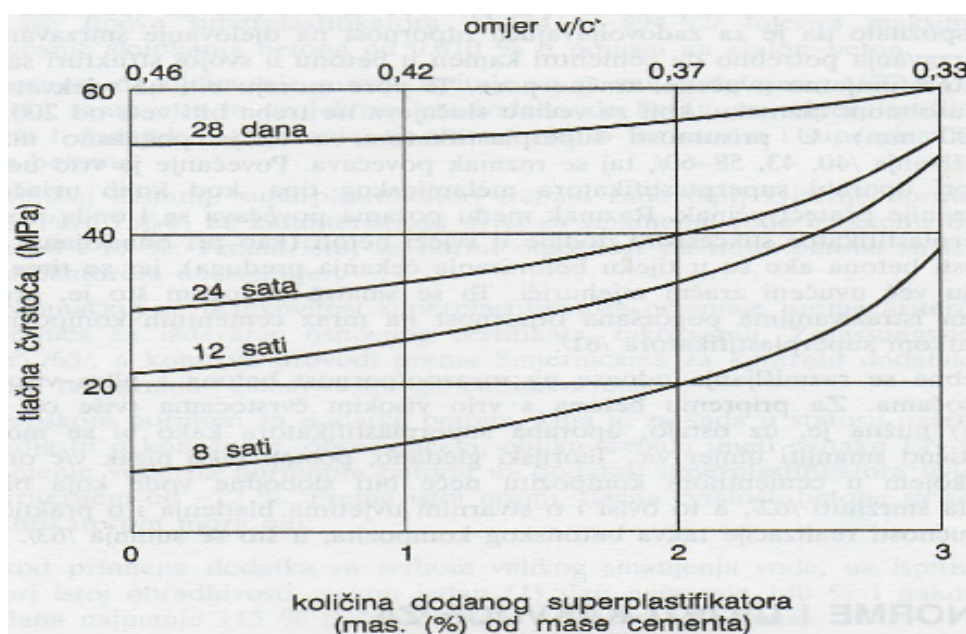
- zmanjšanje količine vode,
- daljši čas obdelavnosti betona,
- večje zgodnje trdnosti,
- boljše karakteristike betona takoj po izdelavi,
- cenejši visokozmogljiv betona.

Superplastifikatorji se največkrat uporabljajo v sledečih situacijah:

- za proizvodnjo betona z nizkim V/C razmerjem. Rezultat je visoka trdota pri isti količini cementa. Odmerek vode in cementa se lahko zniža do V/C razmerja 0,28,
- za proizvodnjo betona z zmanjšano količino cementa, vendar enakim V/C razmerjem,
- za proizvodnjo tekočega betona.

2.6.2.3.5 Lastnosti strjenega betona z dodatkom superplastifikatorja ter odpornost betona na zmrzovanje/tajanje

Uporaba superplastifikatorja vpliva na lastnosti strjene mešanice. Lastnosti strjenega betona so odvisne od tega ali uporabljamo superplastifikator za povečanje sposobnosti tečenja (obdelavnosti) ali za zmanjševanje količine zmesne vode potrebne za pripravo betonske mešanice. S povečanjem količine superplastifikatorja v betonski mešanici se zmanjša količina vode (oziroma V/C razmerje) za pripravo mešanice in s tem se poveča trdnost strjene mešanice.



Slika: Vpliv količine superplastifikatorja na povečanje tlačnih trdnosti betona (količina cementa 370 kg/m^3).

(Vir: Đureković, A. 1996, Cement cementni kompozit i dodaci za beton, str. 159)

Pri nizkem V/C razmerju pa imamo tudi manjšo poroznost in manjšo prepustnost betona. Zaradi gostejše strukture strjenega betona pri uporabi superplastifikatorja je beton tudi bolj odporen na delovanje agresivnih snovi iz okolja.

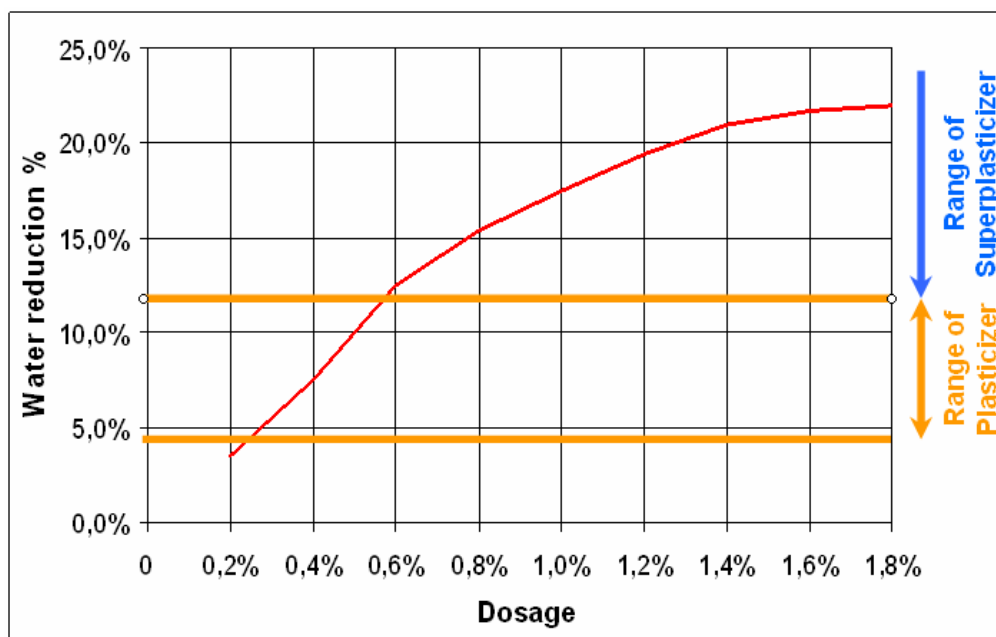
Kot vemo, z dodanim superplastifikatorjem ne moremo povsem odpraviti poškodb betona zaradi zmrzovanja/tajanja. Vendar se z zmanjševanjem prepustnosti betona, z uporabo superplastifikatorja, odpornost zelo izboljša. Vsak dodatek, ki pripomore k zmanjševanju ali preprečevanju nepravilne strukture v strjenem kompozitu, zmanjša prepustnost in s tem

vpijanje vode. Zasičenost betona z vodo pa je tisti parameter, ki ima največji vpliv na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju.

Doseganje zmrzljinske odpornosti betona z drugimi sredstvi, kot je ustrezen sistem zračnih por, še ni v celoti razjasnjeno. Vsekakor pa je dokazano, da z ustrezno količino in velikostjo zračnih mehurčkov, ki jih vnesemo v beton z aerantom, dosežemo ustrezno zmrzljinsko odpornost betona. Za običajne betone faktor oddaljenosti med zračnimi mehurčki praviloma ne sme biti večji od 0,25 mm. Z izboljšanjem kvalitete (trdnost, neprepustnost, ...) veziva, ki jo dosežemo z uporabo superplastifikatorjev, pa se potrebna razdalja med zračnimi mehurčki lahko poveča.

2.6.2.3.6 Primerjava med plastifikatorji in superplastifikatorji

Iz slike na strani 34 je prikazano razmerje med količino dodatka ter odstotkom zmanjšanja vode. Kot vidimo, so superplastifikatorji v primerjavi s plastifikatorji veliko bolj učinkoviti pri zmanjševanju količine vode, vendar potrebujemo večjo količino dodatka. Sicer pa se pri uporabi plastifikatorjev količina vode zmanjša od 5 do 12%, s superplastifikatorji pa nad 12%.



Slika: Primerjava med plastifikatorji in superplastifikatorji. (Vir: Sika Slovenija)

2.6.2.4 Zavlačevalci vezanja

Zavlačevalci so dodatki za beton, ki zavirajo hitrost vezanja cementa. Evropska norma ga definira kot: zaviralec je dodatek za beton, ki določeni mešanici podaljšuje čas prehoda iz plastičnega v trdno agregatno stanje. Skupaj s plastifikatorji nam pomagajo pri betoniranju pri visokih temperaturah oziroma pri gradnji masivnih objektov iz betona. S podaljševanjem trajanja plastičnega stanja betona zavlačevalci podaljšujejo obdobje, v katerem je omogočeno vibriranje betona.

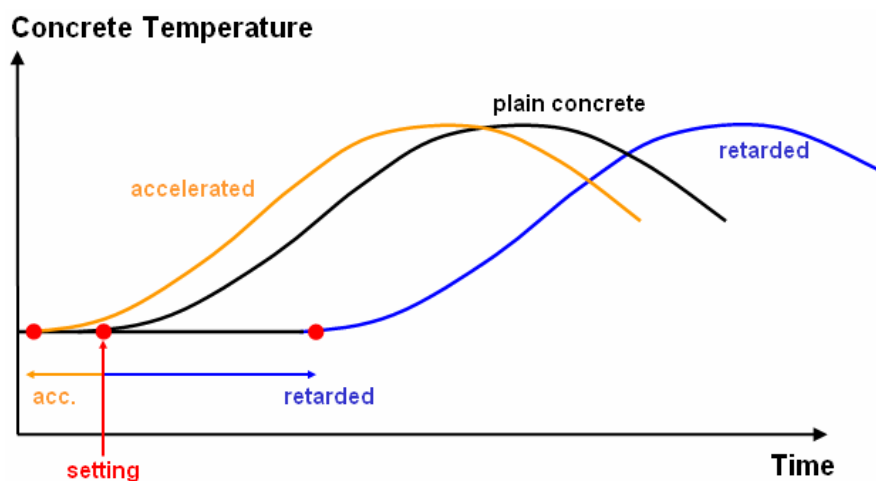
V prisotnosti zavlačevalca se tako začetek kot konec vezanja betona podaljšujeta za določeno obdobje. Ko pa to obdobje mine, se hidratacija z normalno hitrostjo nadaljuje oziroma lahko poteka hitreje. Aktivne substance zaviralcev ne delujejo samo kot zaviralci procesa hidratacije, ampak imajo tudi druge učinke, na primer plastifikacijskega. To je tudi razlog, da se pri poglavju o plastifikatorjih govori tudi zaviralcih. Iz tega sledi, da sta fizikalni in kemijski mehanizem delovanja pri obeh dodatkih zelo podobna.

Raziskovanje hidratacije klinkerskih mineralo portland cementa je pokazalo, da pri zavlačevanju hidratacije cementa pride najprej do zavlačevanja hidratacije alita. Pri isti vrsti zavlačevalca, odvisno od koncentracije in od drugih pogojev, pa je možno pospeševanje ali zavlačevanje hidratacije C₃A.

Pri zavlačevalcih je zelo pomemben čas vnosa v svežo betonsko mešanico. Kot je razvidno iz preglednice 5 je to najboljše 2 minuti po doziranju vode.

Preglednica 5: Sprememba v času vezanja betona v odvisnosti od trenutka dodajanja 0,225 Ca-lignosulfonata.

trenutek doziranja	odložitev časa vezanja	
	začetek vezanja	konec vezanja
	(h:min)	(h:min)
skupaj z vodo za pripravo betona	1:30	1:45
5 sekund kasneje	1:45	2:00
1 minuta kasneje	3:30	3:45
2 minuti kasneje	4:00	4:30



Slika: Prikaz razlike med pospeševalci in zaviralci vezanja v betonu.

(Vir: Sika Slovenija)

2.6.2.5 Pospeševalci vezanja

Pospeševalci vezanja za beton so dodatki, ki pospešijo hidratacijo cementa. To pomeni, da se s tem pospeši vezanje in v določenih primerih tudi strjevanje betona. Proces vezanja in proces strjevanja sta medsebojno povezana. Vseeno pa nekateri dodatki pospešijo le vezanje, drugi spet le strjevanje betona.

Evropska norma, ki obravnava dodatke za beton, specificira dve podvrsti pospeševalcev:

- pospeševalec vezanja je dodatek, ki mešanici skrajšuje čas prehoda iz plastičnega v trdno agregatno stanje,
- pospeševalec strjevanja je dodatek s katerim dosežemo zgodnjo trdnost, ne glede na čas vezanja.

Kemijski tipi pospeševalcev:

- kloridni: kalcijev klorid (CaCl_2), natrijev klorid (NaCl), aluminijev klorid (AlCl_3),
- nekloridni.

Kloridni pospeševalci

Glavna sestavina kloridnih pospeševalcev je kalcijev klorid. Uporablja se kot samostojni pospeševalec ali kot dodatek k drugim dodatkom za beton. Razloga za njegovo široko uporabo sta v tem, da zelo dobro deluje skupaj s portland cementom in je cenovno najugodnejši.

Prisotnost CaCl_2 zelo skrajša tako začetek kot konec vezanja. To je koristno za betoniranje pri nizkih temperaturah, pod 0°C . Tako se omogoči hitrejše razopažanje ter hitra uporaba betona. Največja dovoljena količina doziranja kalcijevega klorida je 5%, sicer pa je njegova uporaba med 1 in 4%. Zavedati pa se moramo, da s kloridnimi pospeševalci vnašamo v beton določen delež Cl^- ionov, katerih vsebnost v armiranem in prednapetem betonu je omejena.

Nekloridni pospeševalci

Največji problem pri uporabi kloridnih pospeševalcev v armiranem betonu je pospešitev procesa korozije armature. Zato namesto CaCl_2 poskušamo najti pospeševalec s podobnimi

učinki, vendar brez Cl^- ionov. Med alternative pospeševalcev spadajo organske in anorganske snovi vključno z aluminati, sulfati, formiati, nitrati, karbonati, trietanolamini ter formaldehidi.

Vezanje materialov s portland cementnim vezivom se pospeši s prisotnostjo Ca-formiata, vendar so potrebna večja doziranja kot pri CaCl_2 . Preglednica 6 prikazuje vezanje portland-cementne paste pri isti količini doziranja Ca-formiata in CaCl_2 .

Preglednica 6: Čas vezanja portland-cementne paste z dodatkom 2% CaCl_2 ter 2% Ca-formiata ter brez dodatkov.

	začetek vezanja (min.)	konec vezanja (min.)
portland-cementna mešanica brez dodatka	150	210
portland-cementna mešanica z 2% CaCl_2	60	80
portland-cementna mešanica z 2% Ca-formijata	90	115

Iz preglednice 6 je razvidno tudi, da kalcijev formiat poveča zgodnje trdnosti, vendar so potrebne večje dozacije kot pri CaCl_2 .

2.6.2.6 Sredstva za kontrolo viskoznosti

Sredstva za kontrolo viskoznosti ali dodatki proti izpiranju so dodatki za povečevanje stabilnosti materialov na bazi cementa. Ti dodatki lahko zmanjšajo nevarnost ločitve heterogenih sestavin betona med transportom, vgrajevanjem in zgoščevanjem ter zagotavljajo dodatno stabilnost do začetka strjevanja. Obstajajo štiri osnovne skupine dodatkov za kontrolo viskoznosti: na bazi celuloze, polietilenglikola, poliakrilatov in biopolimerov.

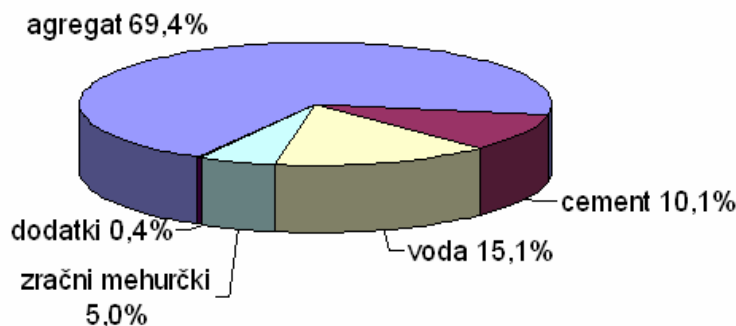
Če imamo betonsko mešanico z dodatkom superplastifikatorja, ki kaže nagnjenost k segregaciji, je uporaba sredstva za kontrolo viskoznosti zelo pogosta. Z ustrezno kombinacijo

sredstev za kontrolo viskoznosti in superplastifikatorja lahko dobimo stabilno betonsko mešanico.

Materiali na bazi cementa, ki vsebujejo sredstva za kontrolo viskoznosti, so lahko močno psevdoplastični celo ob prisotnosti superplastifikatorjev in omogočajo zagotovitev reoloških profilov, ki se jih brez tovrstnih dodatkov težko doseže. Ustrezna kombinacija sredstva za kontrolo viskoznosti in superplastifikatorja omogoča proizvodnjo materialov na bazi cementa z visoko sposobnostjo tečenja in z ustrezno stabilnostjo. Take karakteristike so uporabne pri različnih materialih na bazi cementa, kot so podvodni beton, tekoči beton, samozgoščevalni beton, injekcijske cementne malte,...

3 BETON

3.1 Opis betona



Slika 4: Prikaz sestave betona

Gradnja z betonom je izredno enostavna, hitra in poceni. Beton lahko dosega velike trdnosti in je razmeroma odporen na zunanje vplive in staranje. Primeren je za vse vrste gradenj, od visokogradnje do inženirskih objektov, tudi na področjih, kjer poleg statične obtežbe nastopajo druge izredne obtežbe (potres, močni vetrovi, valovi).

Beton je v ožjem pomenu keramični kompozitni material, pri katerem je mineralni agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen strjenega betona nastane v procesu hidratacije in strjevanja cementne paste. Ta nastane z mešanjem cementa, vode in različnih dodatkov, s katerimi se regulirajo lastnosti betona. Betonska struktura vsebuje določeno število odprtih in zaprtih por, ki jih zapolnjuje zrak. Poleg povsem mineralnih betonov se v graditeljstvu uporabljajo tudi betoni z organsko, polimerno matrico, ki so po sestavi keramično-polimerni kompozit.

Agregat tvori večino betonske mase in je zato njegov izbor (zrnavostna sestava, čistost, oblika, primesi,...) ključnega pomena za kakovost in lastnosti betona. Drugi odločilni parameter je kakovost cementne paste, ki je odvisna od cementa, vode in uporabljenih dodatkov. V idealno projektiranem in izdelanem betonu je vsako zrno agregata oblepljeno s

cementno pasto, vsi prostori med zrnji so zapolnjeni, cementna pasta pa vsebuje le drobno zaprto poroznost (pri idealnem $V/C = 0,38$). Dejanske razmere se razlikujejo od idealnih, vendar razvoj tehnologije betona stremi k čim bolj idealnim razmeram. Parameter, ki najbolj vpliva na lastnost betona je vodo-cementno razmerje (razmerje med maso vode in cementa v betonu).

Zmanjšanje količine vode vpliva na sledeče lastnosti betona:

- zvišanje mehanskih lastnosti,
- zvišanje vodoneprepustnosti betonu in znižanje vpijanja vode,
- zvišanje odpornosti na vremenske vplive in na agresivnost okolja,
- boljšo sprijemnost med plastmi betona in med betonom in armaturo,
- zmanjšanje prostorninskih sprememb pri sušenju in namakanju,
- znižanje števila in velikosti razpok zaradi krčenja.

Na splošno velja, da je velikost vodo-cementnega razmerja obratno sorazmerna kakovosti betona ob pogoju enake vgradljivosti.

Dodatki, ki jih dodajamo, vplivajo na:

- časovni potek vezanja in strjevanja cementne paste,
- zmanjšanje potrebe po vodi,
- poboljšanje obdelovalnosti betona,
- vključitev zračnih mehurčkov in ustvarjanje zaprte poroznosti betona,
- reguliranje ostalih lastnosti betona.

Vgradljivost je sposobnost betonske mešanice, da se enostavno vgradi, lepo zapolni kalup (opaž) in se dobro zgosti z razpoložljivimi sredstvi za zgoščevanje. Zaželeno je, da pri vsem tem betonska mešanica obdrži homogenost, kar je v veliki meri odvisno od nastale kohezije. V nekaterih primerih se posebej zahteva taka obdelovalnost betonske mešanice, da se poleg vgrajevanja in zgoščevanja lahko obdela tudi vidne površine. Potrebna vgradljivost se določi s posrednim merjenjem reoloških lastnosti s pomočjo poenostavljenih metod, s katerimi ocenjujemo obdelavnost betonskih mešanic: metoda s posedom, metoda z razlezom,...

3.2 Lastnosti betona

Dobre lastnosti strjenega betona so izrednega pomena za zagotavljanje dolge življenjske dobe konstrukcij, seveda ob upoštevanju predpostavk, da je konstrukcija v normalnih klimatskih pogojih, da je obremenjena in uporabljana, 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.

O pripravi betonske mešanice sem že nekaj povedal, tako da mi ostaneta še druga dva dejavnika, torej nega betona in sušenje betona.

Končna trdnost betona je seveda odvisna od nege betona v času strjevanja in od vlažnosti okolja, v katerem se beton nahaja. Trdnost betona narašča, dokler so v cementni pasti še nehidratizirana zrnca cementa. Tako proces sušenja poteka nemoteno, če je ustrezna relativna vlažnost okolja in če je temperatura okolja dovolj visoka. Zato je nujna nega betona z zagotavljanjem ustrezne vlažnosti okolja, vsaj v prvem mesecu starosti betona.

Sušenje betona ne prispeva k njegovi trdnosti, ker proces hidratacije, za katerega smo prej omenili, da zagotavlja trdnost betona, potrebuje vlago. Tako osušeni beton nima vedno ustrezne in predvidene stopnje trdnosti, saj so določeni delci cementa lahko ostali nehidratizirani. Prehitro sušenje betona povzroča razlike med lastnostmi zunanjega betona in betona v notranjosti in lahko povzroči njegovo krčenje in pokanje. Betoni, ki imajo razmeroma veliko odprto površino, kot so npr. stene in plošče, se sušijo veliko hitreje kot na primer stebri.

3.3 Tehnološke lastnosti betona

Pomembne tehnološke lastnosti betona so:

- odpornost proti obrabi,
- vodotesnost,
- zmrzljinska odpornost,
- prostorninska stabilnost betona.

Odpornost betona proti obrabi je pomembna predvsem za površine, ki so izpostavljene mehanskim vplivom in tekoči vodi. Odpornost proti obrabi je sorazmerna s trdnostjo betona. Visokoodporni betoni morajo tako biti izdelani iz trdnega in trdega agregata in površinsko ustrezno obdelani.

Vodotesni betoni morajo zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Prepuščanje vode je odvisno od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter od razmerja med njima. 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 strjevanjem ustrezno negovan. Največji vpliv na vodotesnost pa imata razpokanost in odprta poroznost betona.

S prepustnostjo betona je povezana tudi zmrzljinska odpornost betona. Proces zmrzovanja znižuje življenjsko dobo betona, dodatno pa jo znižujejo še prisotnost in vpliv različnih kemikalij. Zmrzljinska odpornost betona se lahko poveča s postopkom aeriranja betona, pri čemer del vode dodatno izcedimo iz agregata.

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. Na prostorninsko stabilnost vplivajo še količina in zrnastost agregata, način nege betona med strjevanjem in stopnja hidratacije cementa.

3.3.1 Vrsta betona

Poznamo dve osnovni vrsti betona:

- težki (prostorninska masa okoli 2300 kg/m^3). Uporablja se za nosilne konstrukcijske elemente (nosilci mostov, betonski stebri zgradb ipd.)
- lahki beton (prostorninska masa pod 1900 kg/m^3). Ima nižjo trdnost in gostoto ter boljšo toplotno izolativnost (estrihi, betonski zidaki ipd.).

3.3.2 Razred tlačne trdnosti

Razred tlačne trdnosti ja karakteristična tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni, določena na standardnem valju ali kocki in izražena v N/mm^2 .

Karakteristična tlačna trdnost je vrednost trdnosti, pod katero je pričakovati 5% rezultatov vseh možnih meritev trdnosti na obravnavani količini betona. Standardni valj ima višino 300 mm in premer 150 mm, standardna kocka pa rob z dolžino 150 mm. Tlačna trdnost betona s starostjo narašča (tudi po 28 dneh, pa tudi še več kot po 20 letih). Dokazovanje razreda tlačne trdnosti je obvezno za vsak objekt, oziroma za vsak konstrukcijski element. Oznake so določene na podlagi določil standarda SIST EN 206-1.

3.3.3 Priprava betona

V gradbeni praksi se beton praviloma pripravlja na strojni način, manjše količine pa izjemoma na ročni način. Na manjših in odročnih gradbiščih uporabljajo različne vrste mešalcev, na večjih gradbiščih beton dobavljajo iz betonarn. V betonarnah pripravljajo na industrijski način velike količine betonov po zahtevanih recepturah in ga transportirajo s posebnimi vozili za transport svežega betona.

Betonski mešalci na gradbiščih imajo prostornino od 50 – 150 l, v betonarnah pa od 250 do več tisoč litrov. Najbolj pogosto se uporablja protitlačne mešalce z navpično osjo. Os je postavljena ekscentrično glede na boben mešalca. V takih mešalcih se beton kakovostno zmeša v času od 30 do 60 sekund.

Proces določanja razmerij posameznih komponent betona in doziranje je v sodobnih betonarnah povsem avtomatiziran in računalniško voden. Cement in agregat se praviloma dozirata po masi (s sistemom tehtnic), voda in tekoči dodatki pa po principu meritve pretoka tekočine. Pri avtomatiziranem mešanju se odtehtane količine agregata in cementa suho zmešajo (najprej grobe frakcije agregata in cement, na to se dodajajo drobne frakcije). V suho mešanico se dozira ustrezna količina vode in njej primešanih dodatkov.

3.4 Preskušanje svežega betona

Opis postopkov preskušanja svežega betona, ki sem jih uporabil pri določitvi lastnosti svežih betonov.

3.4.1 Odvzem vzorcev (SIST EN 12350-1:2001)

Oprema:

- lopatka ali podoben pripomoček primeren za odvzem vzorca,
- posoda za vzorec,
- termometer za izmero temperature betona.

Postopek:

Iz količine zmešanega betona, ki jo preskušamo, odvezamo količino svežega betona, ki je vsaj 1,5 krat večja od količine potrebne za izvedbo preiskave sveže mešanice in ne manjša od 0,02 m³. To količino imenujemo vzorec. Vzorec pred preiskavo hranimo na čisti površini ali v čisti posodi. Pred vgradnjo v naprave za preizkušanje sveže mešanice betona moramo vzorec temeljito premešati. Čas med pripravo betona in preskušanjem mora biti čim krajši.

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- oznako vzorca,
- vrsto vzorca (celota ali del vzorca),
- lokacijo preizkušanja,

- datum preizkušanja,
- kakršnakoli odstopanja od standardnih meritev,
- vremenske razmere,
- temperatura betona med preiskavo.

3.4.2 Posed stožca (SIST EN 12350-2:2001)

Najbolj preprosta metoda, ki je dovolj zanesljiva za kvantitativno določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic.

Oprema:

- kalup za oblikovanje preizkusnega vzorca,
- zgoščevalna palica,
- ravnilo,
- podstavek,
- lopatka.

Postopek:

Preden začnemo s preiskavo navlažimo notranjost prisekanega stožca in površino podlage tako, da na plošči ni proste vode. Prisekan stožec (konus) postavimo točno na sredino podlage ter ga držimo trdno na podlago ali stopimo na privarjeni nožici. Konus polnimo z lopatko v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast prebodemo s standardno kovinsko palico ($\phi 16$, z zaobljenim vrhom 60cm) s 25 udarci. Prvo plast prebadamo po celi višini, pri prebadanju naslednjih plasti pa mora palica prodreti do spodnje plasti. Ko zgostimo zgornjo plast, odstranimo presežek betona in izravnamo površino z lopatko. Konus počasi dvignemo (5-10s) in ga prestavimo ob betonski stožec. Ravnilo ali standardno palico za zgoščevanje položimo na zgornji rob konusa tako, da sega čez posede preizkušane. Z merilom določimo razdaljo med prvotno višino preizkušanca (višino kalupa) in najvišjo točko posedanega betonskega preizkušanca. Razlika višin (Δh), zaokrožena na 10 mm, je mera za konsistenco

po tej metodi. Celoten postopek, od začetka polnjenja do odstranitve kalupa mora potekati brez prekinitev in ne sme trajati več kot 150s.

Poročilo o preiskavi vsebuje:

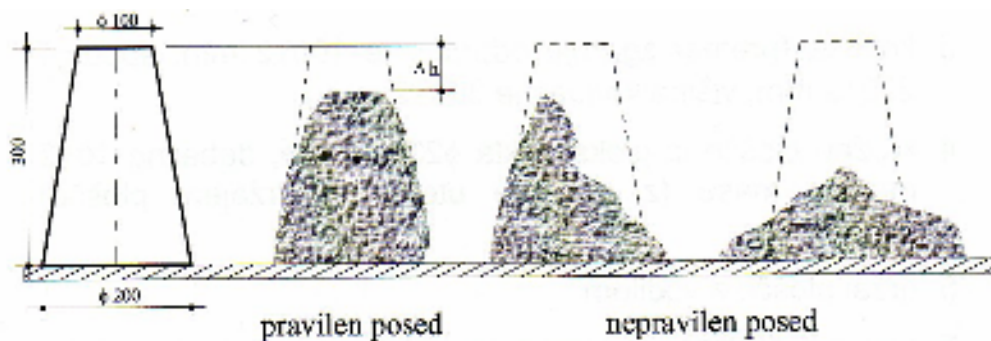
- oznako vzorca,
- lokacijo preskusa,
- datum preskusa,
- vrsto preskusa,
- izmero poseda zaokroženo na 10 mm,
- kakršnakoli odstopanja od standardnih meritev,
- temperaturo betona med preiskavo.

V primeru nepravilnega poseda preizkušanca moramo preiskavo ponoviti.

Preglednica: Razred poseda

(Vir: SIST EN 206-1: 2003, str. 18)

razred	posed (mm)
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220



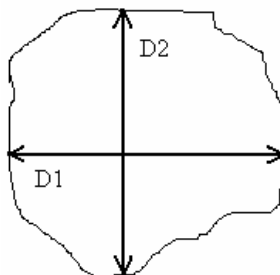
Slika: Metoda s posedom

(Vir: Žarnić, R. 2007, Gradiva vaje, str. 52)

Poleg poseda sem meril tudi razlez preizkušanca pri preiskavi s posedom.

Postopek:

Mera konsistence po tej metodi je povprečje dveh medsebojno pravokotnih premerov razlezene betonske mase (največjim D_1 in najmanjšim D_2).



Slika 5: Prikaz izmere razleza

Ta metoda nam poleg stopnje vgradljivosti betonske mešanice nazorno pokaže segregacijo betona; v enem primeru se pokaže z izločanjem debelejših zrn iz betonske mase, kar je znak majhne kohezivnosti, v drugem primeru pa se pojavi pri židkih betonih, kjer se cementno mleko izloča iz jedra betonske mase.

3.4.3 Gostota (SIST EN 12350-6:2001)

Svež beton vgradimo v vodo-neprepustno posodo z znano prostornino in maso, ki jo stehamo. Prostorninska masa svežega betona predstavlja zanesljiv pokazatelj mnogih lastnosti strjenega betona. Betoni primerljive sestave, ki imajo večjo prostorninsko maso, so bolj zgoščeni in imajo po strditvi praviloma tudi boljše mehanske lastnosti, vodoneprepustnost, zmrzlinško odpornost, odpornost na kemične vplive itd.

Oprema:

- neprepustna jeklena posoda,
- vibracijska miza,
- tehtnica,
- lopatka,
- posoda za vzorec.

Postopek:

Določa se takoj po končani izdelavi preizkušanca tako, da se kalup z preizkušancem z zunanje strani dobro očisti in stehta. Poznati moramo maso praznega kalupa (m_1) z natančnostjo $\pm 0,1\%$. Kalup polnimo v treh slojih. Ko napolnimo posamezen sloj, vibriramo. Potrebno je paziti, da ne vibriramo prekomerno, ker v tem primeru izgubimo vneseni zrak. Ko je kalup napolnjen do vrha, odstranimo odvečni material in površino preizkušancu zgladimo. Kalup z vzorcem stehtamo in dobimo maso m_2 .

Prostorninsko maso določamo s pomočjo izraza: $D = \frac{m_2 - m_1}{V}$

D	...	gostota svežega betona (kg/m^3)
m_1	...	masa kalupa (kg)
m_2	...	masa kalupa z vzorcem (kg)
V	...	prostornina kalupa (m^3)

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- oznako vzorca,
- lokacijo preskušanja,
- datum preskušanja,
- izračun gostote svežega betona,
- kakršnakoli odstopanja od standardnih meritev,
- temperaturo betona med preiskavo.

3.4.4 Vsebnost zraka v svežem betonu (SIST EN 12350-7:2001)

Oprema:

- naprava za merjenje vsebnosti zraka (posoda, pokrov posode, merilec pritiska, zračna tlačilka),
- vibracijska miza,
- lopatka,
- posoda za vzorec,

- brizgalka.

Postopek:

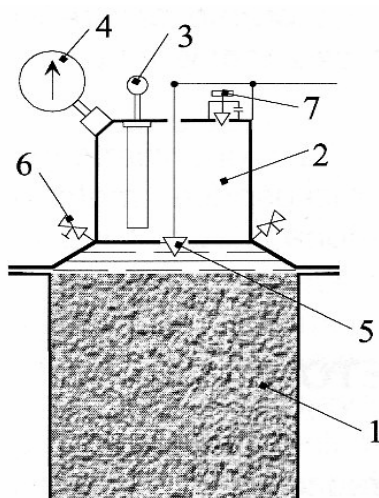
Vzorec svežega betona odvezamemo iz mešalca in ga damo v izbrano posodo. Vzorec dobro premešamo z lopatko.

Spodnjo, valjasto posodo (1) napolnimo s svežim betonom. Vgradimo ga po postopku, ki ga uporabljamo pri vgrajevanju svežega betona v kalupe. Višek materiala odstranimo z ravnilom in sicer tako, da ostane zgornja površina betona po odstranitvi odvečnega betona gladka.

Nalagajoč površine osnovne posode in pokrova (2) pazljivo očistimo. Na osnovno posodo namestimo pokrov. Z objemko pritrdimo pokrov na spodnjo posodo in se prepričamo ali sta posoda in pokrov dobro stisnjena. Zapremo glavni ventil in odpremo stranska ventila (6).

Skozi odprtini z ventilom (6) vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki in začne iztekati voda, ventila zapremo.

Z ročno zračno črpalko (3) vnesemo toliko zraka v predkomoro (pokrov), da kazalec na manometru (4) pokaže nulo. V primeru, da je pritisk v predkomori previsok, odvečen zrak izpustimo skozi izpustni ventil (7). Nekaj sekund po izravnavanju tlaka odpremo ventil (5) in na manometru odčitamo "porozimetrijski indeks". Če je poroziometer pravilno umerjen, predstavlja "porozimetrijski indeks" hkrati tudi delež zraka v % glede na celotni volumen svežega betona v posodi.



Slika: Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu.

(Vir: Žarnić, R. 2007, Gradiva vaje, str. 52)

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- oznako vzorca,
- lokacijo preskušanja,
- datum preskušanja,
- konsistenco,
- izmerjeno količino zraka,
- kakršnakoli odstopanja od standardnih meritev,
- temperaturo betona med preiskavo.

3.4.5 Preskusna metoda za določanje vodo - cementnega razmerja svežega betona (SIST 1026:2008)

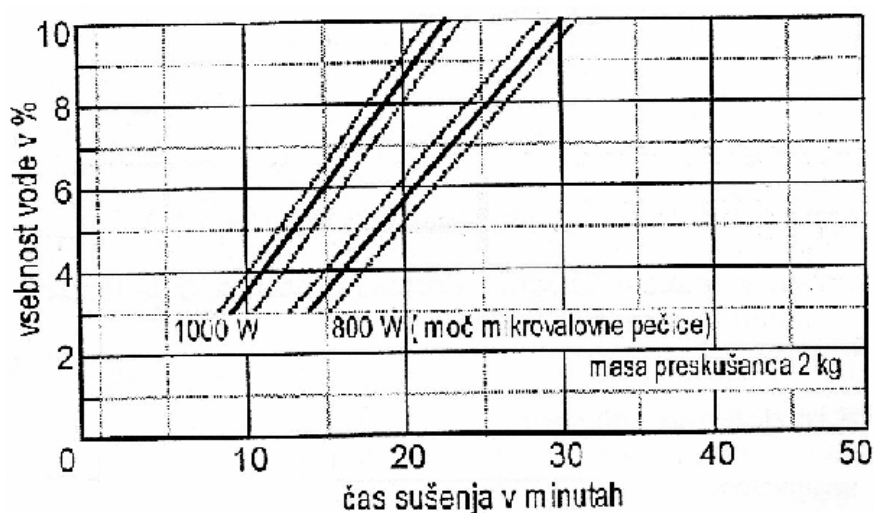
Ta metoda določa vodo - cementno ali vodovezivno razmerje svežega betona s sušenjem vzorca svežega betona. Količino vode v vzorcu svežega betona se določi z meritvijo izgube mase med sušenjem svežega betona v mikrovalovni pečici. Celotna količina vode v svežem betonu in vrednost vodo - cementnega razmerja pa se določita z izračuni.

Oprema za sušenje v mikrovalovni pečici:

- elektronska tehtnica (natančnost 1 g),
- lopatica,
- posoda za vzorec,
- mikrovalovna pečica (najmanj 800 W),
- posoda za v mikrovalovno pečico.

Postopek:

Vzorec pripravimo v skladu s SIST EN 12350-1. Za preiskavo vzamemo maso betonu M_{bs} , ki ga damo v ustrezno posodo in ga posušimo do stalne mase v mikrovalovni pečici. Sušenje se mora začeti najpozneje 30 minut po prvem stiku cementa in vode. Čas sušenja preberemo iz slike na strani 52. Po ohladitvi se izmeri masa posušenega vzorca M_{bp} .



Slika: Informativni čas sušenja v mikrovalovni pečici.

(Vir: SIST 1026:2008, str. 40)

Izračun masnega deleža celotne količine vode v svežem betonu:
$$v = \frac{M_{bs} - M_{bp}}{M_{bs}} * 100\%$$

v ... masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %),

M_{bs} ... masa vzorca svežega betona (kg),

M_{bp} ... masa vzorca posušenega betona (kg).

Izračun celotne količine betona v 1 m^3 vgrajenega svežega betona: $V = \rho_{bs} * v$

- V ... celotna količina vode v 1 m³ vgrajenega svežega betona (kg/m³),
ρ_{bs} ... prostorninska masa svežega betona (kg/m³),
v ... masni delež celotne vode v svežem betonu (m/m %).

Izračun vode, ki jo vpije agregat: $V_{WA} = \sum_{i=1}^n WA_i * M_{Ai}$

- V_{WA} ... količina vode, ki jo vpije agregat v 1 m³ vgrajenega svežega betona (kg/m³),
WA_i ... vpijanje vode i-te frakcije agregata (m/m %),
M_{Ai} ... količina i-te frakcije v 1 m³ vgrajenega svežega betona (kg/m³).

Izračun efektivne vsebnosti vode v svežem betonu: $V_{ef} = V - V_{WA}$

- V_{ef} ... efektivna vsebnost vode v 1 m³ vgrajenega svežega betona (kg/m³).

Izračun vodo - cementnega razmerja: $v/c = \frac{V_{ef}}{DV}$

- V/C ... vodo - cementno razmerje svežega betona,
DV ... količina veziva v 1 m³ vgrajenega svežega betona (njegova povprečna masa v tej vrsti betona iz odčitanih količin na betonarni).

Poročilo o preiskavi vsebuje:

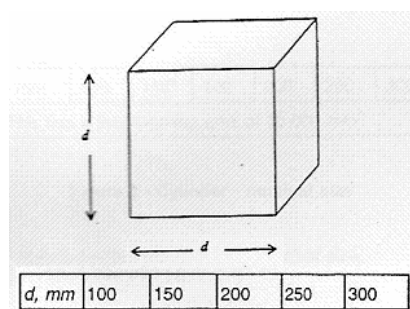
- oznako vzorca,
- lokacijo izdelave preizkušanca in izvajanje preiskave,
- datum in čas izdelave preizkušanca in izvajanje preizkušanja,
- gostoto preizkušanca,
- razmerje V/C,
- temperaturo vzorca,
- temperaturo zraka.

3.5 Preskušanje strjenega betona

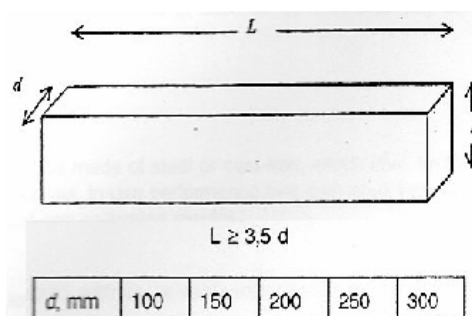
V tem poglavju opisujem preskusne metode na strjenem betonu, ki sem jih uporabil za oceno lastnosti strjenega betona.

3.5.1 Oblike, mere in druge zahteve za preizkušance in kalupe (SIST EN 12390-1:2001)

Betonski preizkušanci so lahko v obliki kocke, prizme ali valja. Standard predpisuje dimenzije kalupov za izdelavo preizkušancev. Namen standardiziranja preizkušancev je primerljivost rezultatov preiskav strjenega betona.



Slika: Dimenzije kocke.



Slika: Dimenzije prizme.

Vir: SIST EN 12390-1:2001, str. 4, 6

Kocke uporabljamo za tlačni in posredni natezni (cepilni) preskus. Prizme uporabljamo predvsem za upogibni preskus. Preostala dela prizme po upogibnem preskusu lahko uporabimo za tlačni in posredni natezni (cepilni) preskus.

3.5.2 Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti (SIST EN 12390-2:2001)

V tem standardu je opisana izdelava vzorcev za preizkus tlačne trdnosti. Kalupi za izdelavo preizkušancev morajo biti vodotesni in narejeni iz materiala, ki ne vpija vode, ne reagira s cementom in omogoča zagotovitev predpisanih toleranc dimenzij standardiziranih preizkušancev.

Oprema:

- kalupi,
- vibracijska miza,
- lopatka,
- posoda za vzorec.

Postopek:

Preden začnemo s polnjenjem, moramo notranje površine kalupa na tanko premazati z mineralnim oljem. Kalupe polnimo najmanj v dveh plasteh, vendar nobena plast ne sme biti debelejša od 100 mm. Kalup vibriramo na mizici, dokler ne preneha izhajati zrak v obliki mehurjev in dokler se na površini betona ne pojavi tanka plast cementnega mleka.

Prekomerno vibriranje je škodljivo, ker lahko povzroči segregacijo betona. Vibriramo lahko na vibracijski mizi s frekvenco vsaj 40 Hz. Po vgradnji betona v kalupe moramo presežek betona odstraniti in površino zravnati z zidarsko žlico.

Preizkušance moramo vidno in trajno označiti ter pri tem paziti, da ne pride do poškodb. Zapis o preizkušancih hranimo, da lahko sledimo njihov izvor. Do preizkušanja jih negujemo na temperaturi okoli $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Preizkušanec mora ostati v kalupu najmanj 16 ur in največ 3 dni, zaščiten pred udarci, vibracijami in izsušitvijo (prekrijemo jih z vlažno tkanino). Po razkalupljenju hranimo preizkušance potopljene v vodi ali v prostoru s stalno vlago (relativna vlaga $>95\%$) ter stalno temperaturo $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- oznako vzorca,
- lokacijo in datum preizkušanja,
- kakršnakoli odstopanja od standardnih meritev,
- temperaturo betona med preiskavo.

3.5.3 Tlačna trdnost preizkušancev (SIST EN 12390-3:2002)

V tem standardu je opisan postopek tlačnega preizkusa na strjenem betonu.

Oprema:

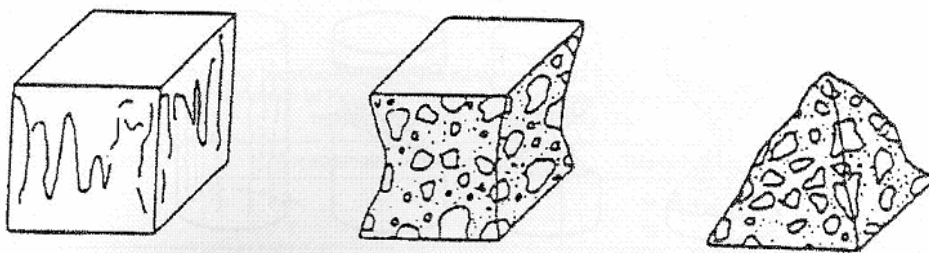
- stiskalnica v skladu z določili SIST EN 12390-4.

Postopek:

Preden položimo vzorec v stiskalnico ga je potrebno dobro obrisati in odstraniti odvečno vlago. Na stiskalnici očistimo površino tlačnih plošč, da pride do kontakta na celotni površini med preizkušancev in površino plošče. Pri postavitvi vzorca v stiskalnico je potrebno biti pozoren, da sta obe površini preizkušancu v stiku s ploščama gladki ter da je preizkušanec točno na sredini.

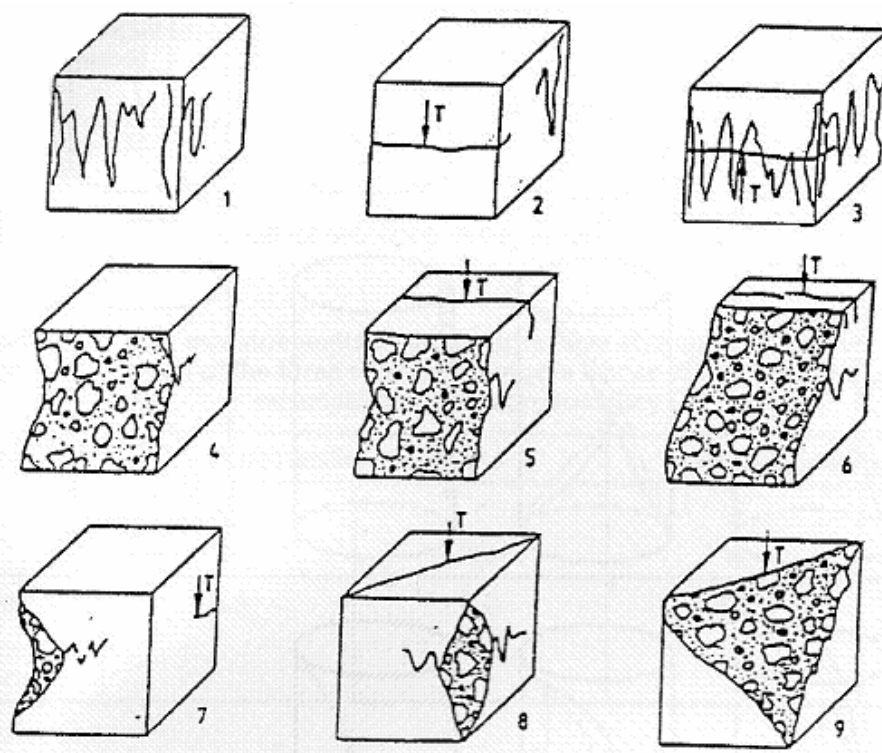
Ko začnemo z stiskanjem, moramo izbrati obremenjevanje z enakomernim naraščanjem sile tako, da je prirastek napetosti v območju $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$. Po nanosu začetne sile, ki ne sme biti večja od 30% porušne sile, je potrebno nanašati silo brez šokov in enakomerno, znotraj območja $\pm 10\%$ glede na izbrano konstantno hitrost obremenjevanja, vse do porušitve. Zapišemo največjo silo, ki jo je prenesel preizkušanec.

Primeri porušitve preizkušancev (kock) so prikazani na slikah na strani 55 in 56. Za vsak preizkušanec je potrebno preveriti, ali je bila njegova porušitev pravilna.



Slika: Pravilna porušitev kock.

(Vir: SIST EN 12390-3: 2002, str. 7)



Slika: Nepravilna porušitev kock.

(Vir: SIST EN 12390-3: 2002, str. 7)

Poročilo o preizkusu vsebuje:

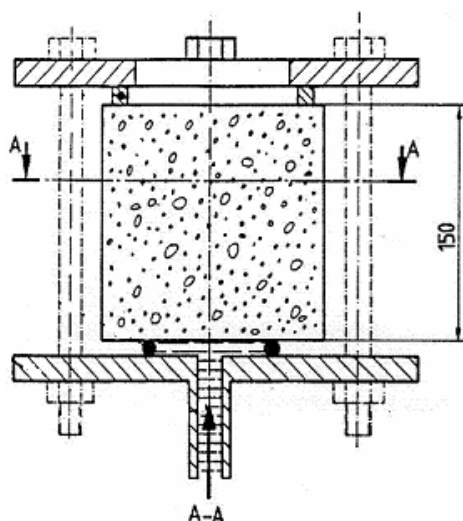
- oznako vzorca,
- dimenzije vzorca,
- datum preizkušanja,
- maksimalno silo ob porušitvi (KN),
- tlačno trdnost vzorca (MPa ali N/mm^2) zaokroženo na 0,1MPa,
- nepravilno porušitev (če je bila) in njen tip,
- kakršnakoli odstopanja od določil standarda,
- maso preizkušanca,
- prostorninska masa preizkušanca,
- čas preskusa,
- starost preizkušanca.

3.5.4 Globina vpijanja vode pod pritiskom (SIST EN 12390-8:2001)

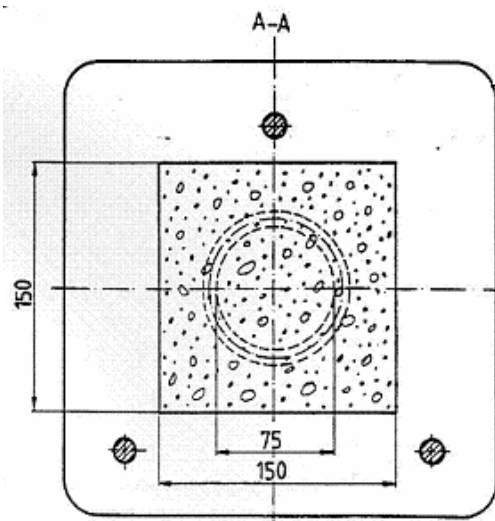
Pri tem standardu določimo, kako globoko prodre voda pod pritiskom, ki deluje na površino preizkušanca iz strjenega betona (kocka, prizma).

Oprema:

- oprema za testiranje (prikazano na dveh slikah na strani 58).



Slika: Naprava za testiranje vpijanja vode (s strani).



Slika: Naprava za testiranje vpijanja vode (z vrha).

(Vir: SIST EN 12390-8: 2000, str. 5)

Postopek:

Preskus začnemo, ko je vzorec star najmanj 28 dni. Preizkušane vstavimo v napravo, ki omogoča obremenitev ene od gladkih površin preizkušanca z vodo pod pritiskom enakim 500 ± 50 kPa. Obremenitev traja 72 ± 2 h. Med preizkusom občasno opazujemo videz površin preizkušanca, ki niso izpostavljene pritiskom vode. Zabeležimo vsa opažanja. Po 72 ± 2 h vzamemo preizkušane iz naprave. Preizkušane obrišemo in ga razcepimo na polovico vzdolž smeri prodora vode. Ko pregledujemo posamezno polovico preizkušanca, jo položimo tako, da gleda preizkusna ploskev navzdol. Takoj ko se polovica preizkušanca posuši do take mere, da se jasno vidi, do kje je penetrirala voda, se fronta vode označi s črto. Nato se izmeri največja globina prodora vode na 1 mm natančno.

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- oznako vzorca,
- datum začetka preizkusa,
- opis preizkušanca,
- smer nanosa vode pod pritiskom, glede na smer vgrajevanja betona v preizkušanec,
- največjo globino penetriranja (mm),
- kakršnakoli odstopanja od zahtev standarda.

Preglednica: Slovenski standard SIST 1026: 2008 navaja dovoljene vrednosti prodora vode za vsako od treh stopenj odpornosti proti prodoru vode.

(VIR: SIST 1026:2008, str. 21)

stopnja odpornosti proti prodoru vode	Največji dovoljeni prodor vode (mm)	največji dovoljeni odklon (mm)
PV-I	50	+ 15
PV-II	30	+ 10
PV-III	20	+ 5

3.5.5 Preskus notranje odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju (SIST 1026:2008)

Notranja odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju se ugotavlja z relativnim dinamičnim modulom elastičnosti betona po n ciklih zmrzovanja/tajanja, P_n . Število ciklov n je lahko 100 ali 150, kar je odvisno od predvidene stopnje izpostavljenosti betona zmrzovanju/tajanju v objektu.

Oprema:

- naprava za hlajenje z zrakom, ki je sposobna vzdrževati temperaturo zraka (-20 ± 2)°C in ki avtomatsko zapisuje temperaturo zraka v bližini preizkušancev, in napravo, ki je sposobna vzdrževati temperaturo vode (20 ± 2)°C ali kombinirana naprava,
- elektronska tehnika,
- merilo za merjenje mer preizkušancev s točnostjo 1 mm,
- naprava za določanje osnovne transverzalne frekvence na 1% natančno.

Postopek:

Imamo 3 prizme dimenzij 100x100x400 mm, ki jih izdelamo v laboratoriju. Beton naj bo enake vrste in enake starosti.

Za preizkus rabimo vsaj 28 dni stare preizkušance, ki jih hranimo v vodi s temperaturo $20\pm 2^\circ\text{C}$. Preizkušance vzamemo iz vode in jih stehamo ter izmerimo (prostornina) ter določimo prostorninsko maso betona. Naslednji korak je postavitvev preizkušancev v hladilno komoro. Pred preizkusom se po navodilih proizvajalca opreme določi osnovna transverzalna frekvenca nihanja v_{oi} vsakega preizkušanca. Nato se na vsakih 25 ± 2 ciklov zmrzovanja/tajanja opravijo ponovne meritve osnovne frekvence. Po zahtevanih n ciklih se dobi osnovna transverzalna frekvenca v_{ni} . Preiskava je sestavljena iz 2 ciklov: zmrzovanja, ki traja 4 ure (pri čemer je treba najpozneje v 3 urah doseči temperaturo $-20\pm 2^\circ\text{C}$), ter tajanja v vodi v trajanju 4 ure (pri čemer je treba najpozneje v 1 uri doseči temperaturo $+20\pm 2^\circ\text{C}$).

Izračun relativnega dinamičnega modula betona:
$$P_{ni} = \frac{v_{ni}^2}{v_{oi}^2} * 100\%$$

v_{oi} ... vrednost osnovne transverzalne frekvence nihanja i -tega preizkušanca pred začetkom preskusa (pri 0 ciklih zmrzovanja/tajanja v Hz),

v_{ni} ... vrednost osnovne transverzalne frekvence nihanja i -tega preizkušanca po n ciklih zmrzovanja/tajanja v Hz.

Poročilo o preiskavi vsebuje:

- podatke o betonu,
- podatke o merah, masi in gostoti preizkušancev pred preizkušanjem,
- rezultate meritev osnovne transverzalne frekvence posameznih preizkušancev po 0 ciklih,
- rezultate meritev osnovne transverzalne frekvence posameznih preizkušancev po vsakih 25 ± 2 cikla do n ciklov,
- rezultat preskusa (navesti povprečno in najnižjo ugotovljeno vrednost P_{ni} , določenih s preizkusom do predpisanega števila ciklov n).

4 LASTNE PREISKAVE

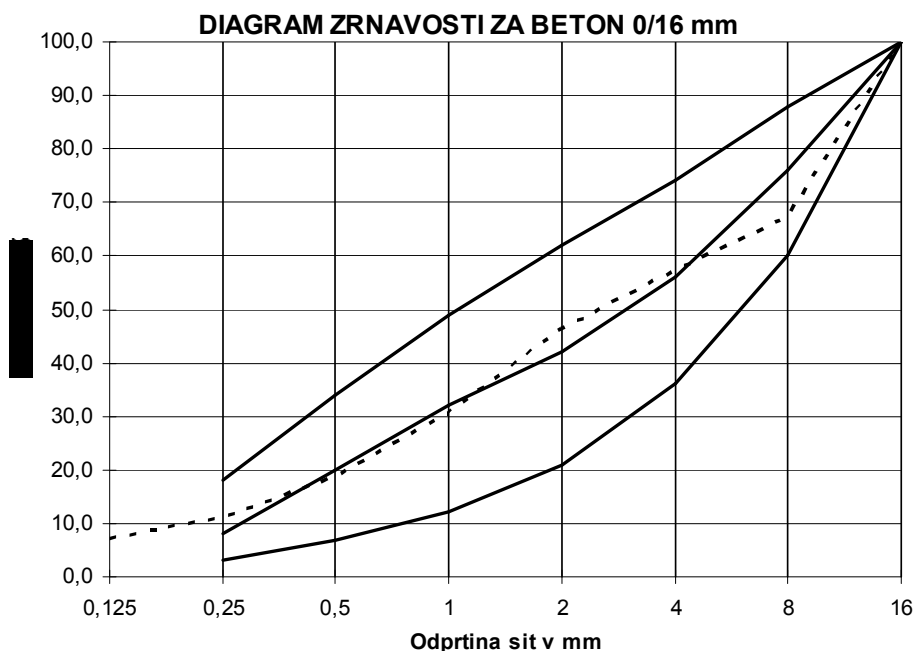
Preiskave sem začel 19.11.2008 v laboratoriju betonarne, zaključil pa 23.2.2009. Preiskave so predstavljale velik del diplomske naloge, vendar je to bilo potrebno, saj sem hotel dobiti čim več informacij o delovanju primerljivih superplastifikatorjev. Predvsem sem hotel določiti takšno sestavo betona, ki bo lahko takoj uporabljena v betonarni. To pomeni tudi, da je morala biti betonska mešanica cenovno sprejemljiva, njena uporaba pa možna v širokem spektru temperatur in podnebnih razmer.

4.1 Materiali

Črpane in transportne betone sem izdelal po preverjenih recepturah, ki sem jih dobil na betonarni. Uporabljal sem iste materiale, ki jih uporablja betonarna za vsakodnevno pripravo betonskih mešanic. Lastnosti materialov se od šarže do šarže zelo spreminjajo. To ni ravno najboljše za eksperimentalno delo, saj imamo zato dodatne spremenljivke, vendar je najbližje dejanskim razmeram v betonarni.

4.1.1 Agregat

Za sestavo betonske mešanice sem uporabljal drobljen apnenčev agregat iz bližnjega kamnoloma. Uporabljal sem tri različne frakcije in sicer: 0-4, 4-8 in 8-16. Agregat se je od šarže do šarže precej razlikoval. Predvsem njegova vlažnost ter količina finih delcev pri frakciji 0-4. Sicer tak postopek ni povsem laboratorijsko pravilen, vendar moja diplomska naloga temelji na čim bolj realnih okoliščinah. Kombinacija frakcij agregata se spreminja glede na posamezno mešanico. Razmerja sem spreminjal glede na izkušnje pridobljene pri predhodnih mešanicah ter po posvetu s somentorjem.



Slika 6: Primer najpogosteje uporabljene zrnastne sestave agregata v recepturah.

4.1.2 Kamena moka

Kamena moka, ki sem jo uporabljal je pridobljena z oprraševanjem drobljenega agregata, ki ga pridobivamo v kamnolomu. Kameno moko sem dodajal k posameznim mešanici, da bi zmanjšal količino cementa in istočasno zagotovil ustrezen delež finih delcev. Kot sem že prej omenil, je zelo pomembno kakšne kvalitete je agregat 0-4. Kamena moka se uporablja predvsem za zapolnitev votlin med večjimi zrnji, pomagala pa naj bi tudi pri pospešitvi hidratacije cementa, kar pomeni, da večji kot je delež kamene moke v mešanici, večje bi morale biti zgodnje tlačne trdnosti strjenega betona. Kameno moko lahko uporabimo tudi kot zamenjavo dela cementa, vendar je potrebno paziti na razmerja med moko in cementom. Pri mojih raziskavah nisem opazil pomembne razlike v zgodnjih trdnostih betonov z moko ali brez nje. Prostorninska masa kamene moke brez por in votlin je $2,7 \text{ g/cm}^3$. Količina kamene moke pri posameznih mešanicih je variirala od 80 do 120 kg/m^3 .

4.1.3 Cement

Pri izdelavi betonskih mešanic sem uporabljal dve vrsti cementa. Osnovni cement CEM II/B-M(L-P) 42,5N ter specialni cement CEM II/A-S 42,5R. Osnovni cement sem uporabljal samo pri začetnih preiskavah. Pozneje ga nisem več uporabljal, ker se je izkazalo, da z njim ni mogoče doseči zahtevanih lastnosti. Količina specialnega cementa pri posamezni mešanici je variirala od 340 do 400 kg/m³.

Preglednica 7: Lastnosti specialnega cementa CEM II/A-S 42,5R.

	zahteve standarda	dosežene pov. vrednosti
<i>kemijske zahteve</i>		
vsebnost sulfata	≤ 4,0 %	3,00%
vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,03%
<i>mehanske in fizikalne zahteve</i>		
zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	25 MPa
standrdna trdnost, 28 dni	42,5 - 62,5 MPa	50 MPa
čas začetka vezanja	≥ 60 min	125 min
prostorninska obstojnost	≤ 10 min	1 min

4.1.4 Voda

Pri pripravi mešanic sem uporabljal vodo iz vodovoda. Uporabljal sem vročo vodo, ki je imela okoli 60°C, to pa predvsem zato, ker sem hotel, da ima beton čim višjo temperaturo (uspelo mi je doseči temperaturo okoli 20°C). Večjo temperaturo ko ima beton, hitreje se spreminja s časom. Beton v hladnih razmerah ni tako problematičen glede hitrega spreminjanja konsistence kot beton pri visokih temperaturah (izguba konsistence).

4.1.5 Kemijski dodatki

Preizkusil sem 11 različnih vrst superplastifikatorjev. Nekateri med njimi so bili nove generacije, tako imenovani hiperplastifikatorji. Doziral sem jih zelo različno, predvsem glede na izkušnje iz predhodnih mešanj. Dodal sem jih v točno določenem trenutku (med mešanjem) in to takrat, ko sem dodal vse sestavine in ko je bilo dodano od 70 do 80%

zmesne vode. Preden sem ga dodal v mešanico, sem ga še dodatno razredčil z vodo, kot je opisano v standardu SIST EN 206-1: 2003.

Zaradi zahtev, ki sem jih postavil, so se samo 4-je dodatki izkazali kot primerni. Izbrane dodatke proizvajajo različni proizvajalci. Vsi superplastifikatorji so polikarboksilatnega tipa. Iz preglednice 8 razberemo podane karakteristike uporabljenih dodatkov pridobljene iz tehničnih listov proizvajalcev.

Preglednica 8: Tehnični podatki o superplastifikatorjih.

	dodatek A	dodatek B	dodatek C	dodatek D
izgled	tekočina	tekočina	tekočina	tekočina
barva	rumeno-rjava	rumeno-rjava	amber	svetlo rjava
gostota, 20°C (kg/dm ³)	1,08 ± 0,02	1,10 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,11 ± 0,03
vsebnost suhe snovi (%)	40 ± 2	35,0 ± 1,7	26 ± 1,3	40 ± 2
pH vrednost	ni podatka	7,5 ± 1	ni podatka	7 ± 1
priporočena dozacija (na težo cementa v %)	ni podatka	0,6 - 1,4	0,5 - 2	0,2 - 1

4.2 Projektiranje mešanic

Osnovno recepturo sem dobil na betonarni. Receptura je že zelo preizkušena in se dnevno uporablja. Glede na sprotne rezultate sem spreminjal razmerja sestavin betona v recepturi. Preden sem začel s sestavljanjem (malo spremenjenih) receptur, smo se dogovorili katere zahteve naj bi beton izpolnjeval. Zahteve na prvi pogled niso delovale težko dosegljive.

Beton naj bi dosegel naslednje kriterije:

- razred tlačne trdnosti: C25/30,
- klasifikacija: XC4, XD2, XS2, Dmax16, S5, PV-II,
- vrsta betona: MB 30/16 črpni vodotesni beton,
- vodo-cementni razmerje manjše ali enako 0,45,
- s časom se konsistenca betona ne sme bistveno spremeniti (od proizvodnje do vgradnje).

Preglednica 10: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom B.

MATERIALI	MEŠANICA z dodatkom B									
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
agregat (kg/m ³)										
0 - 4	1135	1077	1002	1014	994	982	994	947	958	958
4 - 8	235	223	179	181	177	175	177	169	171	171
8 - 16	587	557	608	615	603	596	603	575	582	582
cement (kg/m ³)	340	340	340	340	360	370	360	400	400	400
kamena moka (kg/m ³)	0	100	100	120	100	100	100	100	80	80
voda (kg/m ³)	152	151	161	151	160	164	159	177	177	177
superplastifikator (%/težo cementa)	0,4	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,7
V/C	0,45	0,45	0,48	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
delež zraka (%)	1,5	1,5	3	2,5	3	3	3	3	3	3

Preglednica 11: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom C.

MATERIALI	MEŠANICA z dodatkom C					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
agregat (kg/m ³)						
0 - 4	958	1028	970	970	970	970
4 - 8	171	184	173	173	173	173
8 - 16	582	624	589	589	589	589
cement (kg/m ³)	400	340	380	380	390	390
kamena moka (kg/m ³)	80	80	100	100	80	80
voda (kg/m ³)	178	150	167	168	173	173
superplastifikator (%/težo cementa)	0,6	0,8	1,0	0,9	0,8	0,8
V/C	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
delež zraka (%)	3	3	3	3	3	3

Preglednica 12: Sestava poskusnih mešanic z dodatkom D.

MATERIALI	MEŠANICA z dodatkom D				
	D1	D2	D3	D4	D5
agregat (kg/m ³)					
0 - 4	1089	1002	958	958	958
4 - 8	194	179	171	171	171
8 - 16	661	608	582	582	582
cement (kg/m ³)	340	340	400	400	400
kamena moka (kg/m ³)	0	100	80	80	80
voda (kg/m ³)	152	161	177	177	177
superplastifikator (%/težo cementa)	0,4	0,6	0,7	0,7	0,7
V/C	0,45	0,48	0,45	0,45	0,45
delež zraka (%)	2	3	3	3	3

4.3 Priprava mešanic

Po določitvi sestave mešanic sem začel s pripravo vseh potrebnih materialov. Za pripravo sem uporabljal standardne pripomočke in orodja. Pri vsaki recepturi sem zamešal 35 litrov sveže betonske mešanice. To je maksimalna količina betona, ki jo lahko učinkovito zmeša uporabljen mešalec. Zamešana količina je bila ravno pravšnja za izvedbo preizkusov ter za izdelavo 6-tih kock dimenzij 150x150x150mm.



Slika 7: mešalec Liv, MLZ 130 NG.



Slika 8: Lopatka.



Slika 9: Posoda za vzorec.



Slika 10: Tehtnica.

Vlažnost agregata ni bila konstantna, zato sem vodo dodajal postopoma in opazoval spreminjanje konsistence betonske mešanice. Superplastifikatorji imajo to pomembno lastnost, da lahko začnejo delovati v trenutku. Sicer ne vsi enako, vendar je potrebno biti zelo pozoren. V večini primerov je bilo potrebno dodati veliko manj vode, kot je bila določena v recepturi.

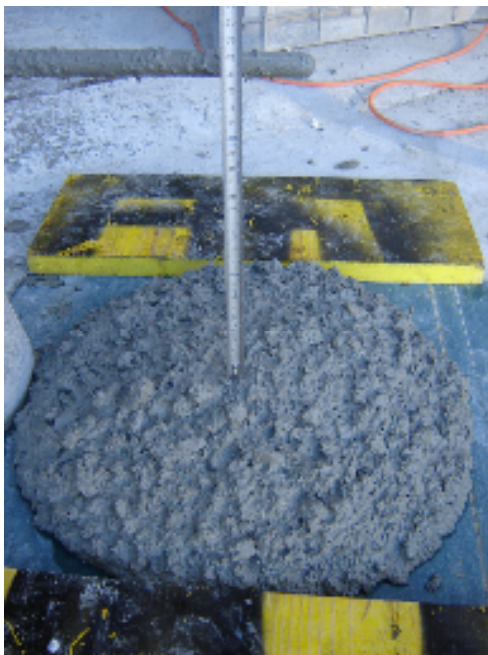
4.4 Preiskave na svežem betonu

Po končanem mešanju sem v naslednjih 15 do 20 minutah na svežem betonu opravil naslednje preiskave:

- posed in ralez s posedom: beton z dodanim superplastifikatorjem izgleda gost, vendar če imamo pravo razmerje materialov lahko dosežemo zelo velike posede in razleze z nizkim vodo-cementnim razmerjem.



Slika 11: Naprava določitev poseda in razleza.



Slika 12: Meritev poseda.



Slika 13: Meritev razleza.

- določitev količine zraka v sveži betonski mešanici: pore v betonu se zelo spreminjajo glede na dodatek, dodano kameno moko ter kdaj se izvaja preskus.



Slika 14: Porozimetrna posoda.



Slika 15: Pravilno napolnjena posoda.



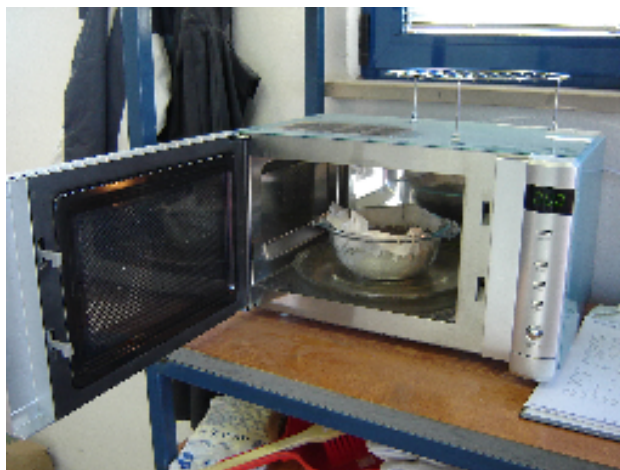
Slika 16: Delež zraka v svežem betonu v odstotkih.

- določitev temperature betona:



Slika 17: Uporabljen termometer.

- določitev količine vode v svežem betonu: svež beton sem dal v stekleno posodo, vse skupaj stehtal in postavil v mikrovalovno pečico, kjer se je beton sušil 30 minut. Beton in posodo sem potem še enkrat stehtal in izračunal razliko. Razlika predstavlja količino vode v betonu.



Slika 18: Določitev količine vode v svežem betonu.

Te meritve sem ponovil še 0,5 ure ter 1 uro po zamešanju betona. To pa zato, da vidim, kako beton ohranja ali izgublja lastnosti. Po vsaki meritvi sem beton, ki je ostal po preiskavah poseda, poroznosti in temperature dal nazaj v mešalec in ga ponovno premešal. Beton s superplastifikatorjem ima to lastnost, da ko nekaj časa stoji zglada kot da »ga stisne«, vendar, ko ga spet premešamo v mešalcu »oživi« in ima podobne lastnosti kot po začetnem mešanju (to lahko razberemo iz rezultatov v preglednicah od 14 do 23).

Z vsakim preskusom se izgubi veliko finih delcev in veziva, vendar moramo vedet, da je tudi pri normalni uporabi izguba teh sestavin kar precejšnja (ostanek v mikserju, delovnem orodju ...).

Po zadnjem preskusu (ena ura po zamešanju betona) sem naredil tudi 6 kock za preskus tlačne trdnosti. Ko sem pri vsaki recepturi in pri vsakem dodatku dosegel zahtevane lastnosti, sem izdelal še dodatnih 6 kock za tlačno trdnost za primerjavo, ter dodatno naredil še 3 kocke za določanje globine prodora vode pod pritiskom (VDT) ter 3 prizme 100x100x400 za določanje notranje odpornosti proti zmrzovanju/tajanju (NOZT).



Slika 19: Kalup kocke 150x150x150 mm.



Slika 20: Kalup prizme 100x100x400 mm.

Pri vgrajevanju betona v kalupe ter v poroziometriško posodo sem si pomagal z vibracijsko mizo.



Slika 21: Uporabljena vibracijska miza.

4.5 Priprava preizkušancev za preiskavo tlačne trdnosti

Kalupe z vgrajenim betonom sem dal v laboratorij ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) ter jih pokril z polivinilom. Naslednji dan sem jih razkalupil, 5 preizkušancev dal v vodo ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) ter jih pustil tam do preskusa tlačne trdnosti. Na enem preizkušancev pa sem določil tlačno trdnost že pri starosti 24 ur. Po odstranitvi kalupa se vsak vzorec še enkrat označil.



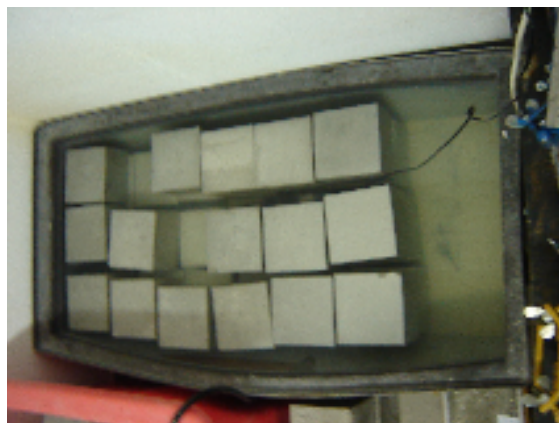
Slika 22: Kalup z strjenim betonom pred odstranitvijo kalupa.



Slika 23: Odstranjevanje kalupa.



Slika 24: Označevanje preizkušancev.



Slika 25: Hranjenje preizkušancev v bazenih z vodo do preizkusa.

Betoni izdelani z različnimi superplastifikatorji so bili vizualni zelo različni. Beton z dodatkom D se je na površini zelo svetil, imel je veliko število majhnih por ter je bil še topel, ko sem odstranjeval kalupe. Pri dodatku B se je ob robu nabralo cementno mleko.

Tlačne trdnosti sem določil pri starosti betona 1, 3, 7 ter 28 dni.

Preizkus tlačne trdnosti je potekal tako, da sem zjutraj vzeli vzorce iz vode, da je voda odtekla. Pozneje sem opravil preskus.



Slika 26: Stiskalnica.



Slika 27: Porušitev preizkušanca.



Slika 28: Primer pravilne porušitve preizkušanca.

Preglednica 13: Število preizkušancev za tlačni preizkus pri posamezni starosti betona.

dan preizkusa	število preizkušancev (150x150x150)mm
1.	1
3.	1
7.	2
28.	2

5 REZULTATI

5.1 Rezultati preiskav na svežem betonu

Na spodnjih preglednicah (od 14 do 23) so prikazani rezultati posameznih preiskav. Gostoto sem izračunal iz povprečja gostot treh kock ter porozimeterske posode.

5.1.1 Dodatek A

Preglednica 14: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A1 – A3).

oznaka vzorca	A1			A2			A3		
čas (h)	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
Temp. zraka (°C)	11	11	11	7	8	8	3	4	5
Temp. betona (°C)	20,9	17	14,8	17,5	13,9	12,1	16,8	12,7	10,3
posed (mm)	250	245	240	235	220	210	235	225	220
razlez (mm)	560	530	450	470	400	350	470	430	390
čas razleza (s)	26	24	19	24,2	21,1	15,6	24,4	22,3	18,3
pore (%)	2,7	2,5	2,5	2,6	2,5	2,8	2,1	1,9	2,3
V/C	0,48	0,46	0,46	0,52	0,5	0,5	0,44	0,43	0,43
Gostota (kg/m ³)	2387	2393	2396	2392	2390	2383	2412	2416	2410
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	671 / 671			556 / 557			671 / 675		

OPOMBA:

Vsebnost delcev razumemo kot seštevek vseh finih delcev v recepturi (prva vrednost) ter kasneje po izračunu po opravljenih preizkusih (druga vrednost). Fini delci so: cement, kamena moka ter fina delca agregat frakcij 0-4.

Preglednica 15: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A4 – A6).

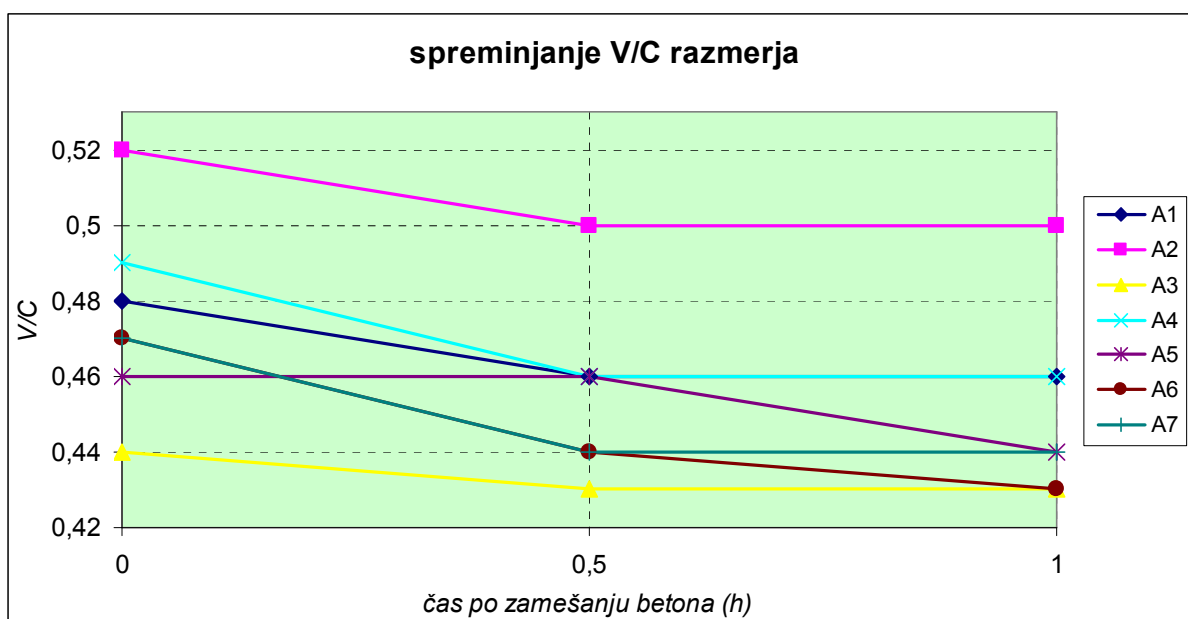
oznaka vzorca	A4			A5			A6		
čas (h)	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
Temp. zraka (°C)	0,6	1	1,5	5	6	6	10	10	11
Temp. betona (°C)	17,8	14,1	11,7	20,2	17	13,9	18,9	16,1	14,7
posed (mm)	240	235	220	235	235	210	240	225	220
razlez (mm)	480	430	380	490	460	370	470	400	350
čas razleza (s)	22,5	18,5	15	30,2	24,1	15	18,4	15	8,7
pore (%)	2,3	2,5	2,7	1,9	2,1	3,1	2,7	3	2,7
V/C	0,49	0,46	0,46	0,46	0,46	0,44	0,47	0,44	0,43
Gostota (kg/m ³)	2404	2402	2401	2422	2419	2405	2391	2384	2391
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	665 / 665			655 / 656			607 / 610		

Preglednica 16: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom A (A7 – A9).

oznaka vzorca	A7			A8	A9
čas (h)	0	0,5	1	0	0
Temp. zraka (°C)	0	0	1	8	6
Temp. betona (°C)	19,4	12,1	8,8	21,9	17,6
posed (mm)	240	225	215	240	240
razlez (mm)	500	400	350	500	460
čas razleza (s)	24,1	16,1	11,1	24,1	24,2
pore (%)	2	2,6	2,5	2,2	2,2
V/C	0,47	0,44	0,44	0,47	0,45
Gostota (kg/m ³)	2413	2402	2396	2395	2398
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	607 / 610			671 / 671	671 / 673

OPOMBA:

Z rumeno barvo je obarvana najboljša receptura: pri prvi izbrani mešanici (v tem primeru A3) so bile opravljene vse preiskave, pri drugi (v tem primeru A9) pa ponovitev iste mešanice za primerjavo ter nadaljnje preiskave.

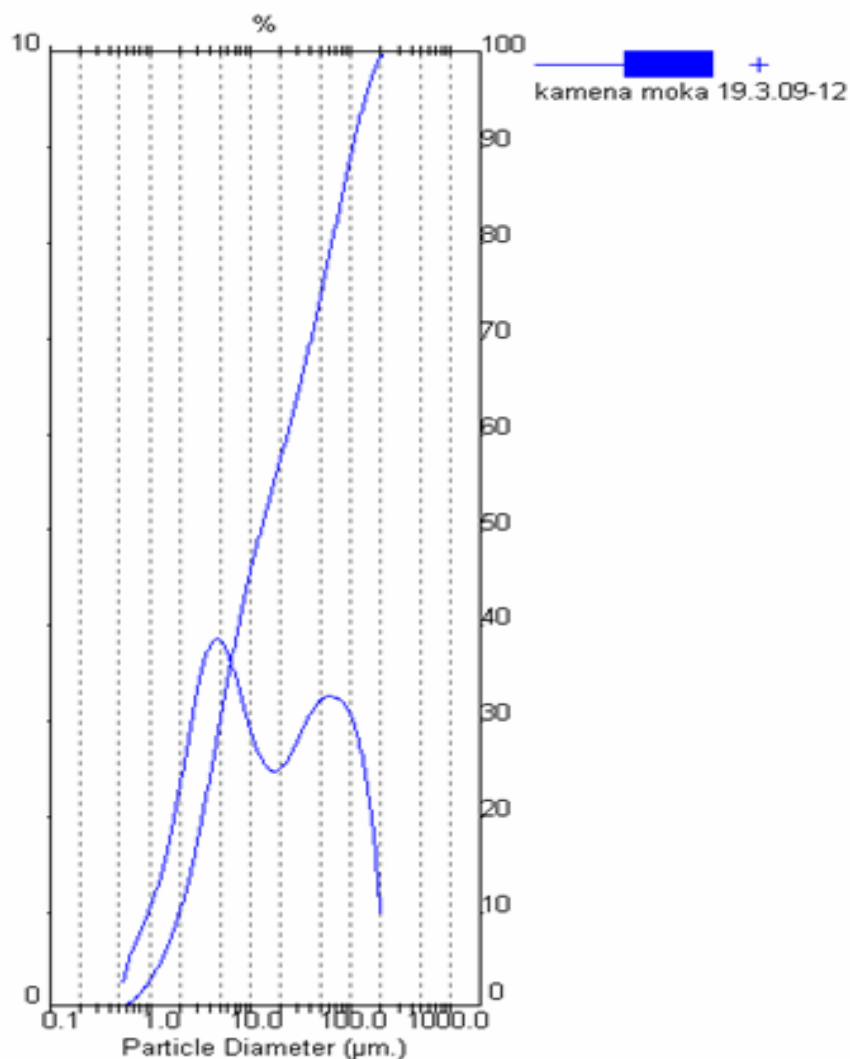


Slika 29: Spreminjanje V/C razmerja s časom.

Slika 29 prikazuje spreminjanje V/C razmerja s časom po zamešanju betona. V/C razmerje se manjša. To je posledica hidratacije cementnih zrn. Iz diagrama se tudi vidi, da je na začetku hidratacija intenzivnejša, potem pa intenzivnost upada. Za lažje razumevanje slike 29 si še enkrat osvežimo spomin o hidrataciji, ki sem opisal na strani 13. Preiskave so trajale eno uro, kar pomeni da imamo proces hidratacije v pred-indukcijskem obdobju (po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja - traja nekaj minut) in indukcijskem obdobju (po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša – traja nekaj ur). Pri tem dodatku se je pojavilo še eno zanimivo vprašanje. Pri mešanicah brez moke je bilo V/C razmerje takoj po zamešanju betonske mešanice veliko (okoli 0,47), potem pa je že pri naslednji meritvi padlo na 0,44 – 0,45 in potem bilo enako tudi pri končni meritvi. Pri recepturah z moko pa je bilo V/C razmerje konstantno (ni tako velik padec: z 0,45 na 0,44). Teoretično bi morale biti ravno obratno. Zato sem preveril zrnovostno sestavo kamene moke z lasersko metodo (preglednica 17 ter slika 30).

Preglednica 17: Prikaz velikosti delcev kamene moke v kumulativnih odstotkih.

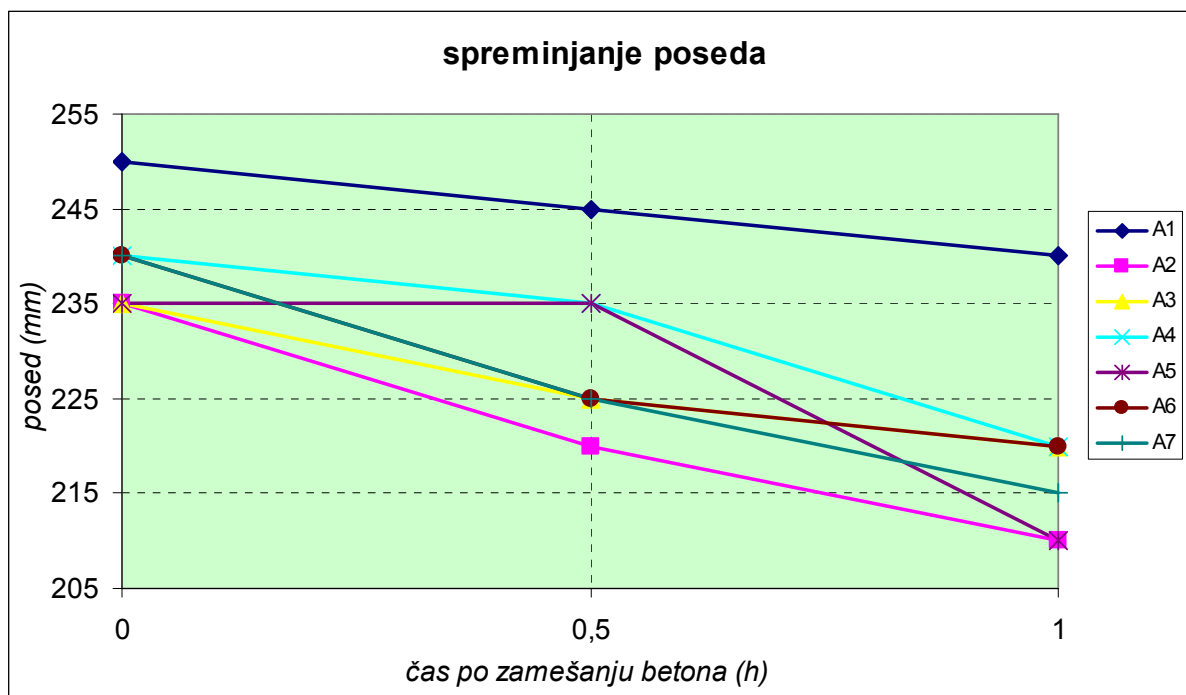
Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %
1.00	2.88	9.00	43.52	50.00	74.46	130.0	94.01
2.00	10.05	10.00	45.59	60.00	78.33	140.0	95.24
3.00	17.56	12.00	48.91	70.00	81.61	150.0	96.29
4.00	24.33	15.00	52.67	80.00	84.44	180.0	98.60
5.00	29.94	20.00	57.34	90.00	86.89	200.0	99.46
6.00	34.46	25.00	61.07	100.00	89.04	250.0	100.00
7.00	38.11	30.00	64.32	110.0	90.93	300.0	100.00
8.00	41.07	40.00	69.85	120.0	92.58	400.0	100.00



Slika 30: Rezultati preiskave zrnivosti kamene moka z lasersko metodo.

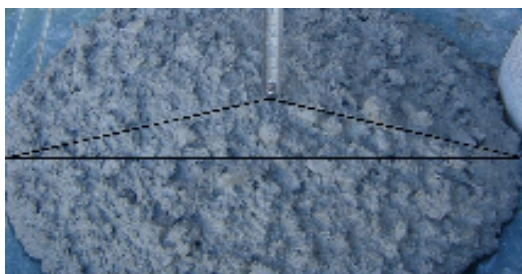
Iz preglednice 17 in slike 30 je razvidno, da ima izbrana kamena moka enakomerno razporejenost delcev, kar smo tudi pričakovali glede na to, da je pridobljena z odpraševanjem. Da bi ugotovili zakaj prihaja do takšnih rezultatov bi potrebno opraviti še

datne preiskave. To pa ni bistveno pri tej diplomski nalogi, zato se ne bom podrobneje spuščal v ta problem.

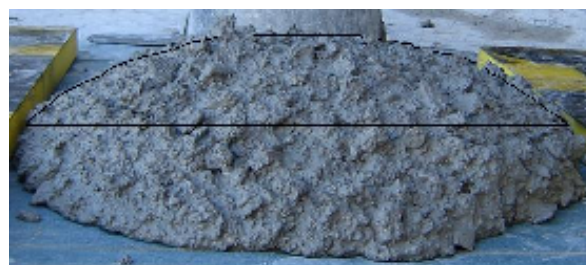


Slika 31: Spreminjanje poseda s časom.

Rezultati na sliki 31 so potrditev ugotovitve drugih raziskovalcev. Beton s časom spreminja konsistenco, manjša se mu posed. To se je lepo videlo pri izmeri poseda in razleza. Pri prvem preskusu, takoj po zamešanju betona, je posed v obliki stožca. Ko naredimo preskus po 1 uri, pa se oblika posedene mase spremeni v kupolo. S tem se betonu zmanjša tudi razlez.

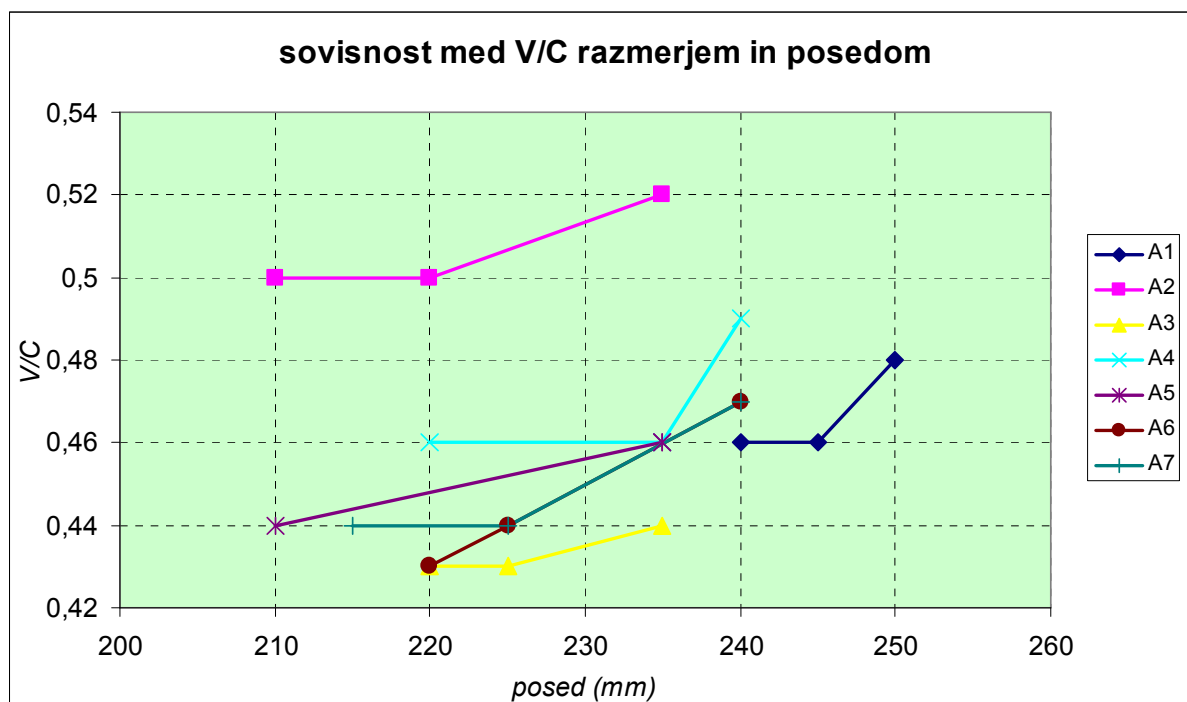


Slika 32: Posed v obliki stožca.



Slika 33: Posed v obliki kupole.

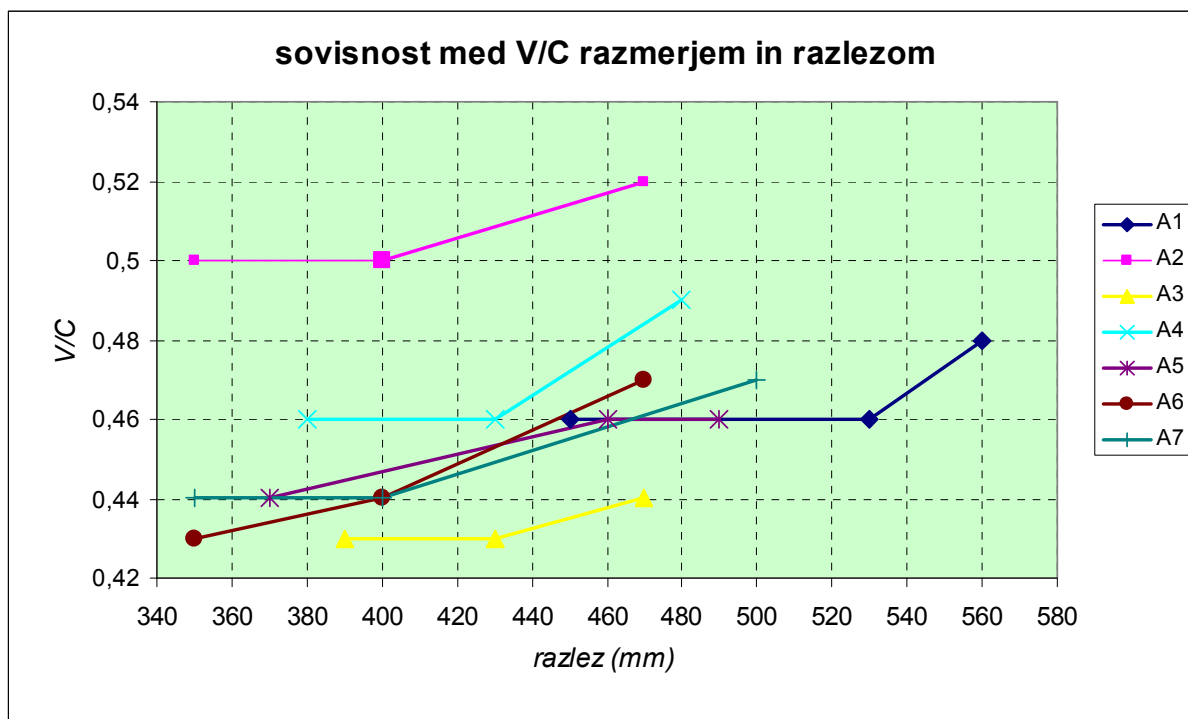
Kljub temu je potrebno poudariti, da beton, ki miruje, postane težak in deluje kot da ga »stisne«. Zato me je zanimalo, za koliko se betonu spremeni velikost poseda. Naredil sem meritev, vendar rezultat ni bistveno odstopal od izmere poseda takoj po zamešanju betona.



Slika 34: Sovisnost med V/C razmerjem in posedom.

V/C razmerje ↓ : posed ↓

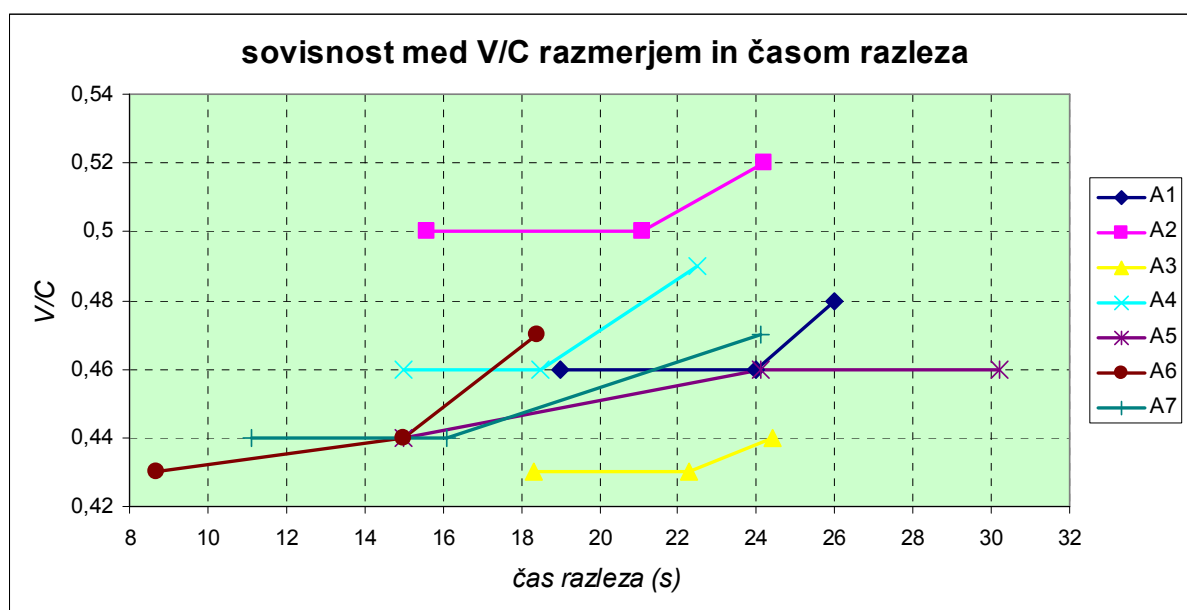
Še ena potrditev ugotovitve drugih raziskovalcev je slika 34. Pomeni namreč, da če se s časom zmanjšuje V/C razmerje se s tem zmanjšuje tudi posed sveže betonske mešanice. Kot vidimo, dobimo podobne sovisnosti tako v primeru, ko imamo večje kot v primeru, ko imamo manjše V/C razmerje.



Slika 35: Sovisnost med V/C razmerjem in razlezom.

V/C razmerje ↓ : razlez ↓

S hidratacijo cementa in s tem zmanjševanjem V/C razmerja s časom se zmanjšuje tudi razlez sveže betonske mešanice. Slika 35 je podobna sliki 34 s posedom. To ni nič neobičajnega saj sta posed in razlez odvisni lastnosti.



Slika 36: Sovisnost med V/C razmerjem in časom razleza.

V/C razmerje ↓ : čas razleza ↓

Beton s časom »stiska«, kar se pozna tako na V/C razmerju, kot pri času razleza pri preiskavi razleza s posedom. Predvsem se opazi velik padec V/C razmerja v primerjavi s časom razleza med takojšnjo in preiskavo po pol ure. Med preiskavama po pol ure in po eni uri pa beton »stisne« (manjši čas razleza), medtem ko V/C razmerje ostaja nespremenjeno. Iz tega lahko sklepamo, da poteka hidratacija cementa takoj po zamešanju (v bistvu v prvih nekaj minutah po zamešanju). To je pomemben podatek pri kalkulaciji časa prevoza betona na gradbišče in s tem izvedbe preiskav betona na samem gradbišču.

5.1.2 Dodatek B

Preglednica 18: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B1 – B4).

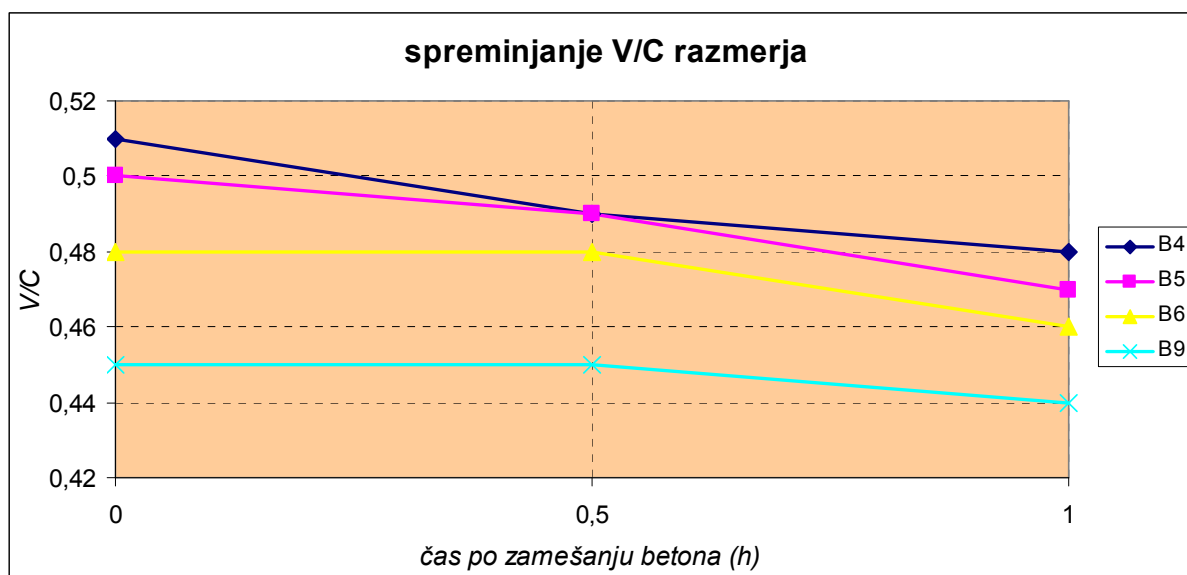
oznaka vzorca	B1			B2		B3		B4		
čas (h)	0			0		0, 0,5		0, 0,5, 1		
Temp. zraka (°C)	15,0			12,0		7,0, 8		10,0, 11, 11		
Temp. betona (°C)	14,9			16,4		14,3, 11,5		20,0, 16,5, 15,3		
posed (mm)	190			220		255, 255		205, 155, 85		
razlez (mm)	340			420		520, 490		330, 280, 240		
čas razleza (s)	/			/		11, 10		5,9, 4,8, 3,2		
pore (%)	3,9			3,6		2,2, 1,9		5, 5,3, 4,7		
V/C	0,54			0,48		0,63, 0,56		0,51, 0,49, 0,48		
Gostota (kg/m ³)	2361			2396		2364, 2385		2336, 2323, 2372		
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	566 / 549			566 / 556		639 / 626		662 / 659		

Preglednica 19: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B5 – B8).

oznaka vzorca	B5			B6			B7	B8
čas (h)	0, 0,5, 1			0, 0,5, 1			0	0
Temp. zraka (°C)	9,0, 10, 10			12,0, 12, 12			12,0	12,0
Temp. betona (°C)	20,6, 16,3, 14,3			21,4, 18, 16,3			20,3	21,4
posed (mm)	225, 230, 210			235, 230, 205			240	250
razlez (mm)	480, 430, 335			440, 380, 330			405	510
čas razleza (s)	13,5, 8,6, 9,1			13,4, 9,9, 8,8			14	14,1
pore (%)	1,6, 2,2, 3,5			2,3, 2,9, 2,9			2,1	2
V/C	0,5, 0,49, 0,47			0,48, 0,48, 0,46			0,49	0,47
Gostota (kg/m ³)	2396, 2394, 2390			2398, 2381, 2396			2407	2406
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	658 / 654			665 / 665			658 / 656	688 / 689

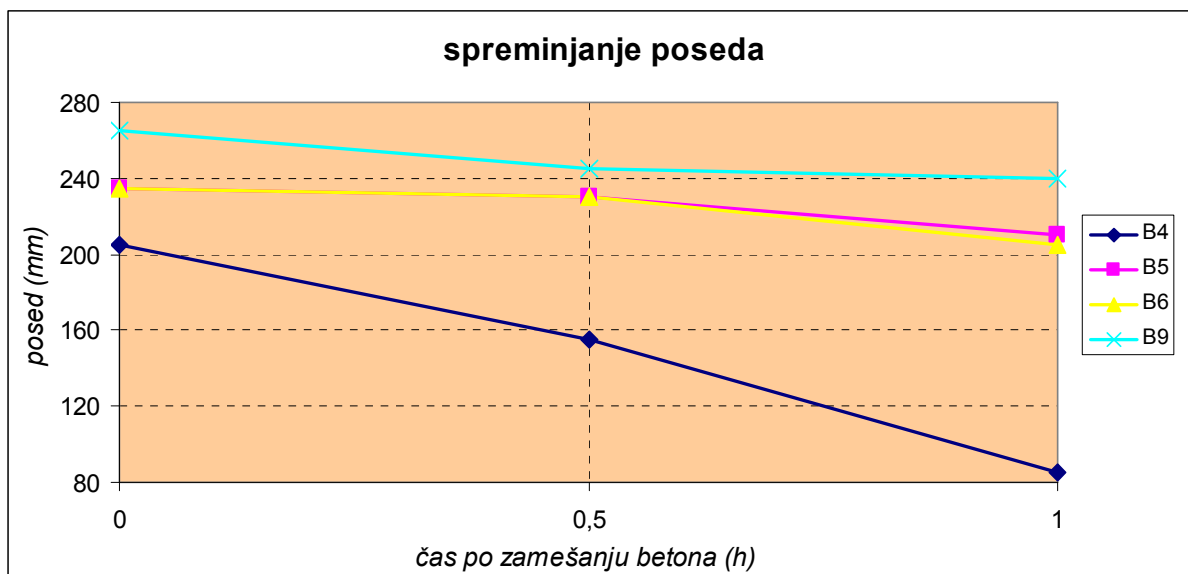
Preglednica 20: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom B (B9 – B10).

oznaka vzorca	B9			B10
čas (h)	0	0,5	1	0
Temp. zraka (°C)	11,0	11	12	7,0
Temp. betona (°C)	19,2	16	13,8	19,1
posed (mm)	265	245	240	240
razlez (mm)	575	470	450	470
čas razleza (s)	16,4	14,7	11,7	19,8
pore (%)	1,4	1,8	2,4	2
V/C	0,45	0,45	0,44	0,43
Gostota (kg/m ³)	2406	2411	2409	2427
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	671 / 674			671 / 676



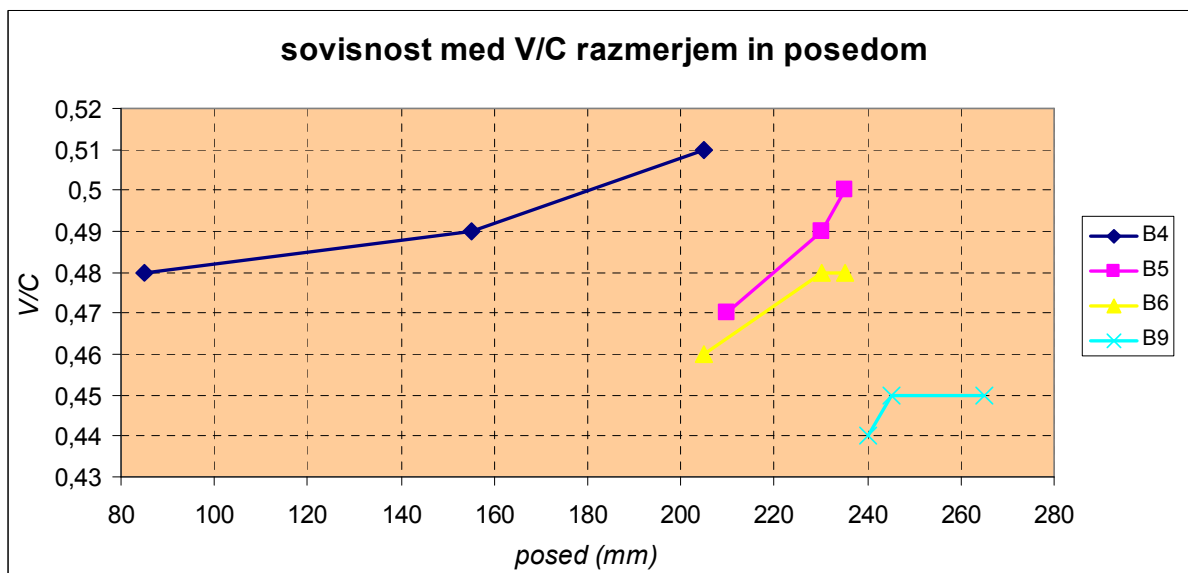
Slika 37: Spreminjanje V/C razmerja s časom.

Iz grafa na sliki 37 lepo vidimo, da manjše kot je začetno V/C razmerje, manj se to razmerje spreminja s časom. To je pomembna in dobrodošla lastnost.



Slika 38: Spreminjanje poseda s časom.

Rezultati na sliki 38 ustrezajo pričakovanjem, razen pri mešanici B4. Pri mešanici B4 je razmerje sestavin zelo slabo in dodatek s tem nima ustreznega učinka.



Slika 39: Sovisnost med V/C razmerjem in posedom.

Diagram na sliki 39 se precej razlikuje od diagrama pri dodatku A (slika 34). Pri dodatku B tudi med polurno preiskavo in preiskavo po eni uri pada vrednost V/C razmerja, kar pomeni,

da še vedno poteka proces hidratizacije cementa. Potrebno bi bilo preveriti, kako bi bilo 90 minut po zamešanju betona.

V/C razmerje ↓ : posed ↓

5.1.3 Dodatek C

Preglednica 21: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom C (C1 – C3).

oznaka vzorca	C1			C2			C3	
	0	0,5	1	0	0,5	1	0	1
čas (h)	10,0	10	11	9,0	10	10	10,0	10
Temp. zraka (°C)	21,7	18,5	16,8	19,9	16,2	14,6	18,9	15,6
Temp. betona (°C)	220	205	120	225	180	105	255	240
posed (mm)	400	330	240	430	310	230	550	420
razlez (mm)	9,8	6,8	3,3	12,6	8	3	18,1	9,1
čas razleza (s)	2,9	3,4	3,7	2,5	3,3	3,3	2,7	3,3
pore (%)	0,46	0,44	0,43	0,49	0,5	0,48	0,47	0,43
V/C	2390	2381	2379	2407	2393	2389	2399	2392
Gostota (kg/m ³)	671 / 672			625 / 621			673 / 674	
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)								

Preglednica 22: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom C (C4 – C6).

oznaka vzorca	C4			C5			C6
	0	0,5	1	0	0,5	1	0
čas (h)	1,6	2	2,3	10,0	11	11	10,0
Temp. zraka (°C)	15,7	12,5	10,8	19,4	16,8	15,1	19,5
Temp. betona (°C)	245	225	205	230	225	180	240
posed (mm)	530	400	330	410	350	280	540
čas razleza (s)	18,7	13	9,8	16,4	11	8	22,3
pore (%)	3,2	2,8	3,4	2,4	3,5	3,6	1,9
V/C	0,45	0,43	0,44	0,44	0,43	0,42	0,45
Gostota (kg/m ³)	2394	2408	2406	2418	2391	2392	2409
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	673 / 673			663 / 665			663 / 666

5.1.4 Dodatek D

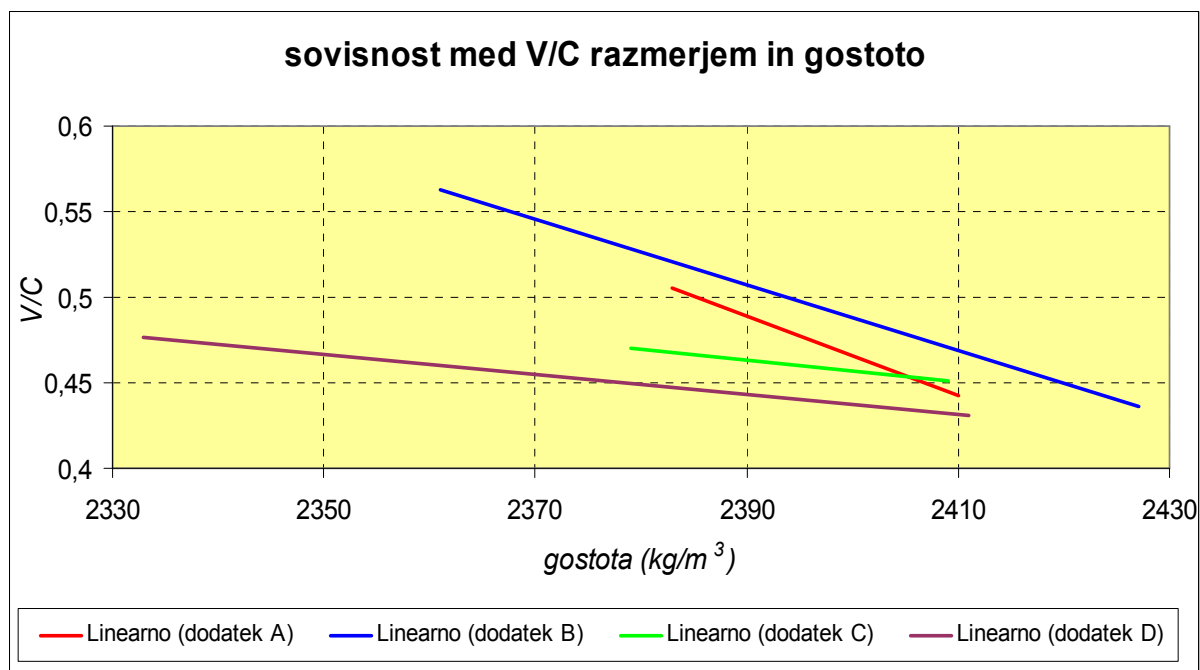
Preglednica 23: Rezultati preiskav na svežem betonu z dodatkom D.

oznaka vzorca	D1	D2	D3			D4	D5	
čas (h)	0	0	0,5	0	0,5	1	0	0
Temp. zraka (°C)	13,0	5,0	5	12,0	12	12	10,0	12,0
Temp. betona (°C)	19,0	18,3	13,4	20,0	16,7	14,8	19,2	19,1
posed (mm)	115	240	230	270	240	240	245	230
razlez (mm)	230	470	410	610	520	480	580	480
čas razleza (s)	/	10,3	10,4	21	14,8	12,5	22,1	20,9
pore (%)	3,6	4,5	5,5	4	5,4	6	3,3	3,3
V/C	0,48	0,51	0,51	0,43	0,43	0,41	0,43	0,42
Gostota (kg/m ³)	2354	2323	2347	2346	2330	2333	2409	2411
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	557 / 549	639 / 629		671 / 666			671 / 672	671 / 673

Kot vidimo že iz rezultatov v preglednici 23, bi z izrisom diagramov za dodatek D dobili podobne diagrame kot za dodatka A in B. Pri dodatku C pa prihaja do določenih odstopanj, vendar ne tako velikih, da ne bi veljale ugotovitve, podane v nadaljevanju (potrebne dodatne meritve). Iz tega sklepamo, da imajo betoni z dodanim superplastifikatorjem podobne lastnosti.

5.2 Primerjava učinkovitosti različnih dodatkov na svežem betonu

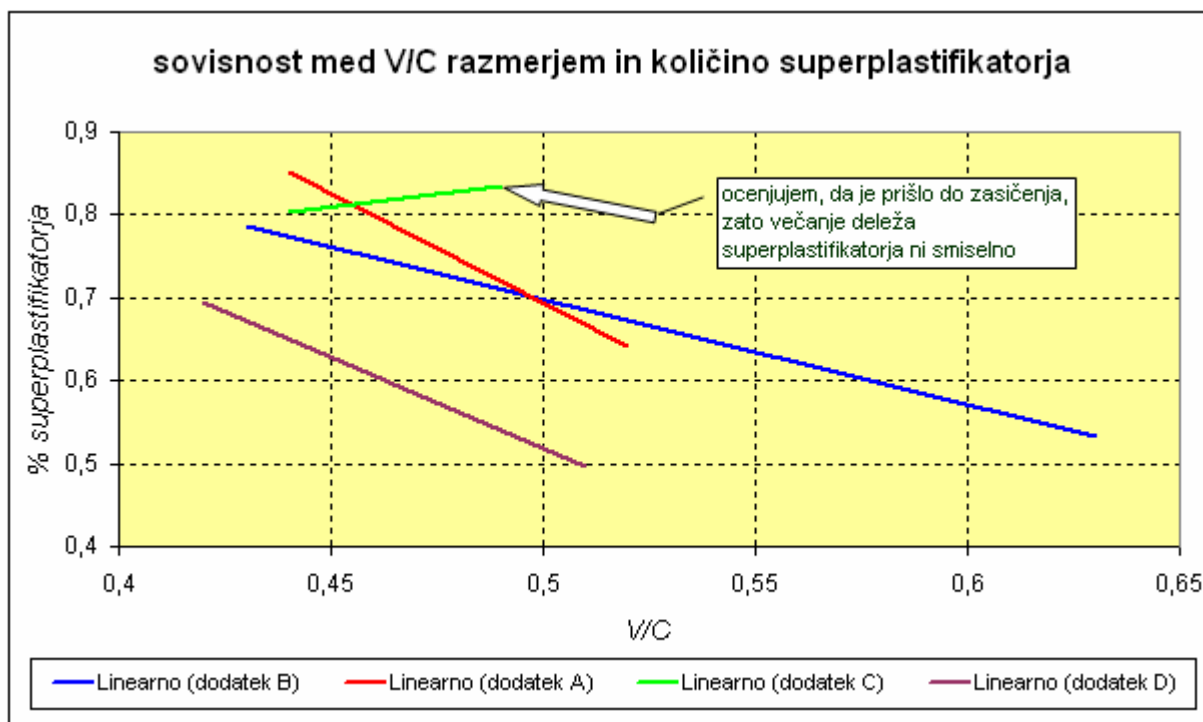
Da bi dobili jasnejšo sliko o učinkovitosti uporabljenih superplastifikatorjev sem jih združil v skupne diagrame. Na diagramih (slike od 40 do 45) so prikazane regresijske premice za posamezno vrsto superplastifikatorja. Potrebno je povedati, da posamezni rezultati precej odstopajo od regresijske premice (majhen faktor korelacije R^2), vendar je to povsem razumljivo, saj je zelo težko dobiti idealne rezultate pri tako velikem številu spremenljivk (kvaliteta agregata, kvaliteta cementa, vremenski pogoji,...). Mislim, da je prikaz samo regresijskih premic (brez posameznih točk - vrednosti), zadosten pokazatelj odnosa med posameznimi vrednostmi v diagramih.



Slika 40: Sovisnost med V/C razmerjem in gostoto.

V/C razmerje ↓ : gostota ↑

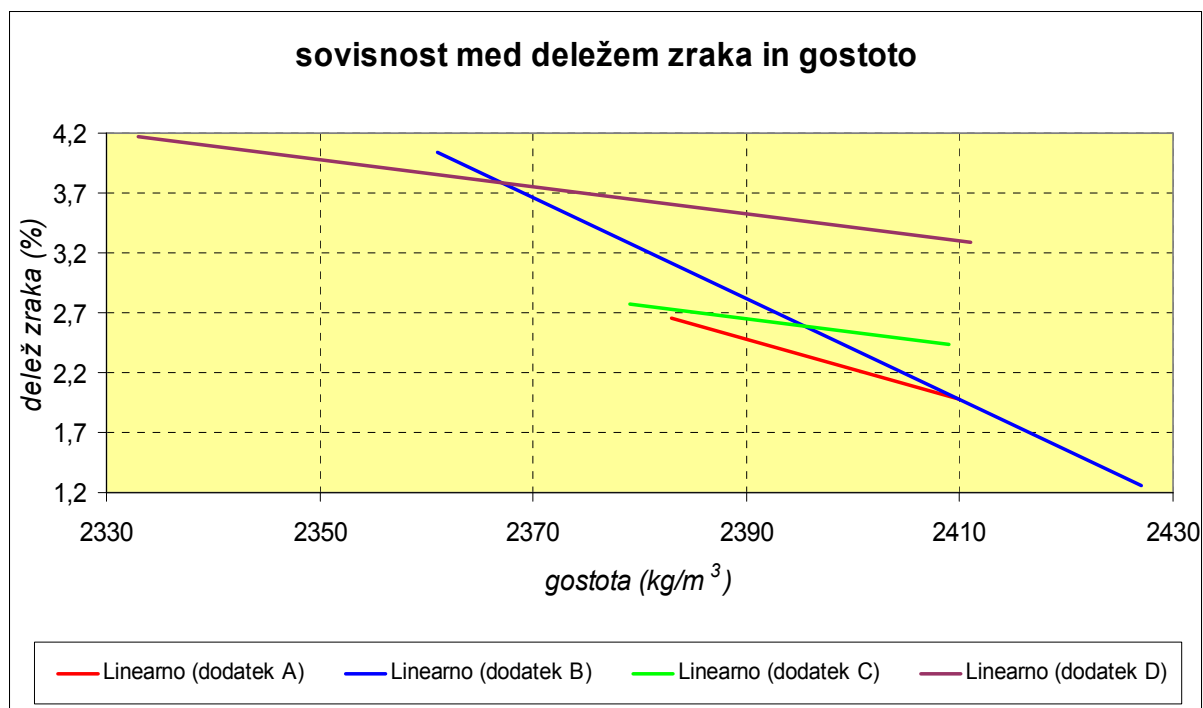
Iz diagrama na sliki 40 lahko razberemo, da sta velikost V/C razmerja in gostota obratnosorazmerno odvisna. Vidimo tudi, da imajo dodatki približno enako tendenco. Vendar sta se oblikovali dve skupini (dodatka A in B izkazujeta večjo izgubo V/C razmerja s prirastkom gostote).



Slika 41: Sovisnost med V/C razmerjem in količino superplastifikatorja.

V/C razmerje ↓ : superplastifikator ↑

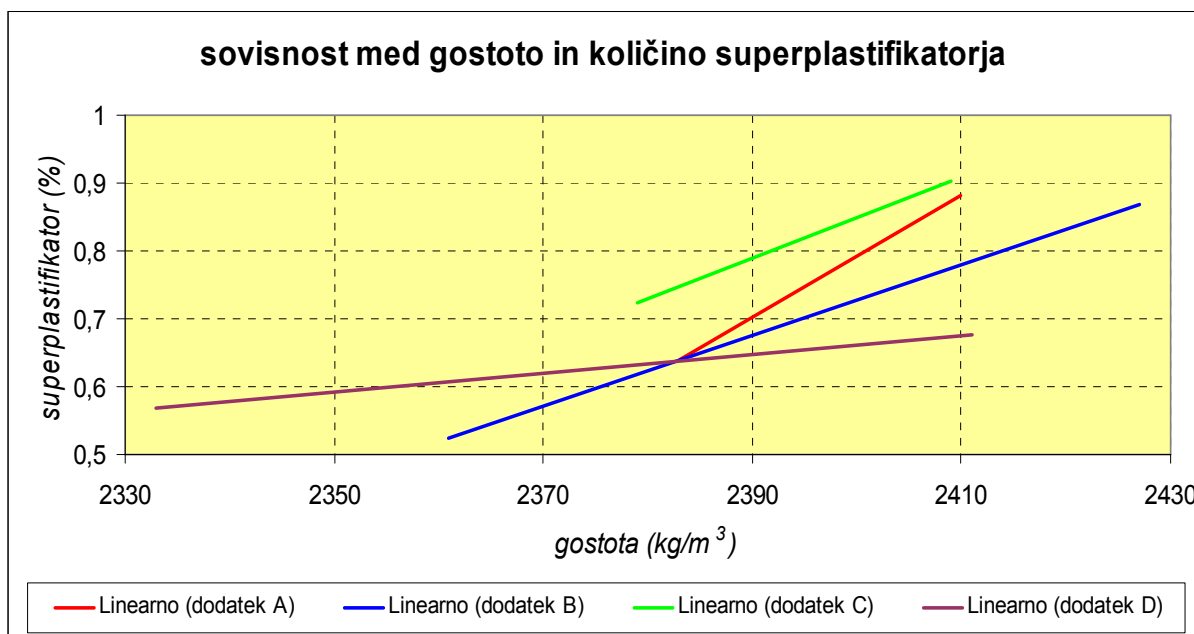
Količina superplastifikatorja in V/C razmerje sta obratnosorazmerna. To je tudi namen superplastifikatorja. Vendar, kot vidimo, se pri dodatku C lahko zgodi tudi nasprotno. Ta pojav je verjetno posledica tega, da smo že z začetnim deležem superplastifikatorja dosegli zasičenje s superplastifikatorjem, zato nadaljnje naraščanje deleža superplastifikatorja nima več ustreznega učinka na konsistenco betona. Pri ostalih treh dodatkih pride do različnih tendenc. Kot vidimo, je najmočnejši dodatek A saj glede na količino dodanega superplastifikatorja prihaja do največjega znižanja V/C razmerja.



Slika 42: Sovisnost med deležem zraka in gostoto.

delež zraka ↓ : gostota ↑

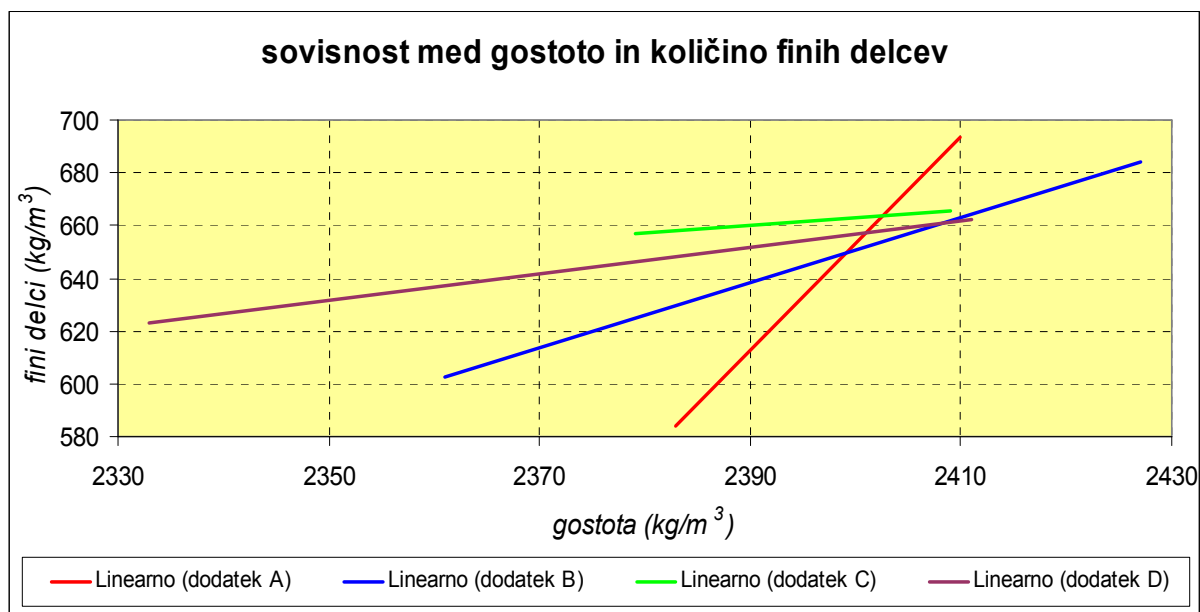
Količina zraka v sveži betonski mešanici zelo vpliva na gostoto. Večja kot je količina zraka, manjša je gostota. Tovrsten učinek je bil najmočnejši pri dodatku B, saj je premica zelo strma. Če pogledamo še rezultate v tabelah vidimo, da je velika razlika med posameznimi dodatki. Z dodatkom D sem dobil najslabše rezultate, saj je bilo z njim zelo težko oziroma nemogoče doseči nizek odstotek zraka v mešanici. Dodatka A in C izkazujeta podobne rezultate (premiči sta dokaj položni), vendar dodatka ne delujeta tako močno kot dodatek B. Seveda je potrebno povedati, da na sovisnost na sliki 42 pomembno vpliva količina dodanega superplastifikatorja.



Slika 43: Sovisnost med gostoto in količino superplastifikatorja.

superplastifikator ↓ : gostota ↓

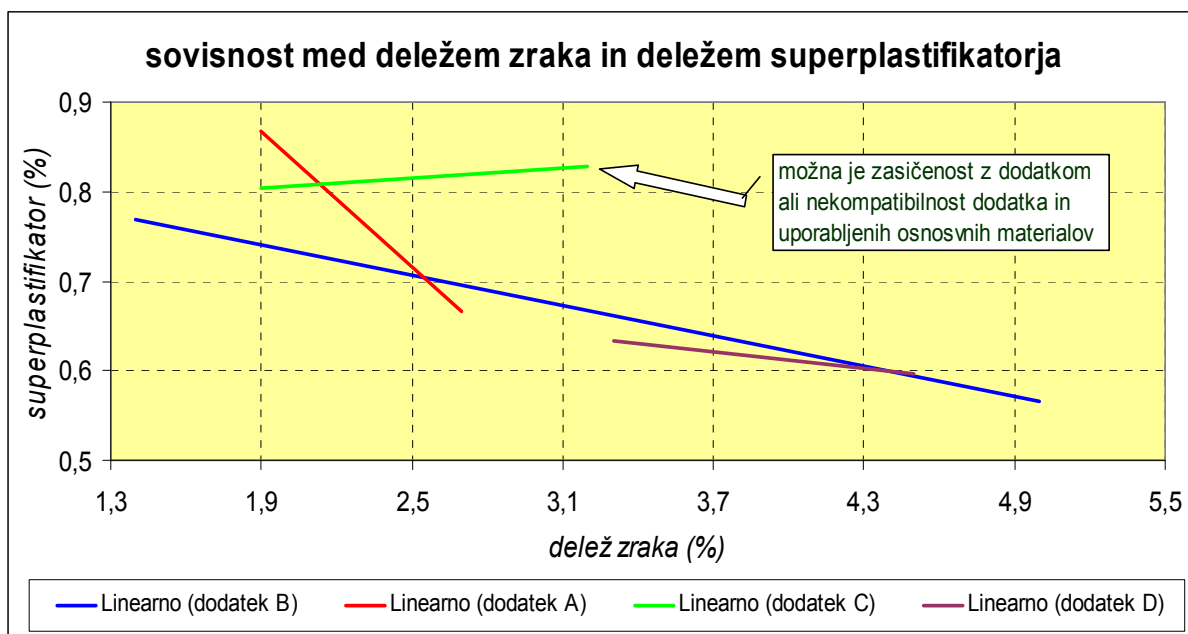
Regresijske premice nam jasno prikazujejo sovisnost med količino superplastifikatorja ter gostoto betonske mešanice. Več dodatka je v betonu – težji je! Med samimi vzorci se je to zelo opazilo (izgled sveže betonske mešanice), čeprav glede na rezultate to ni povsem očitno. Mešanice z dodatkom B in D so bile zelo težke, zelo težko vgradljive s črpalko. Že njihovo mešanje, ko beton stoji nekaj minut, je zelo težavno. Beton z dodatkom C je bil malo boljši, najboljše pa se je izkazal dodatek A. To se vidi tudi iz diagrama na sliki 43 saj je regresijska premica zelo strma kar pomeni, da se gostota zelo malo spremeni s spreminjanjem količine dodatka (glede na ostale dodatke).



Slika 44: Sovisnost med gostoto in količino finih delcev.

količina finih delcev ↓ : gostota ↓

Količina finih delcev zelo različno vpliva na posamezen superplastifikator. Pri preiskavah se je to izražalo v penjenju betona ter posledično posedanju agregata. Dodatki B, C in D potrebujejo velik delež finih delcev, za dodatek A pa to ni povsem nujno. Večja kot je količina finih delcev večja je gostota! To se vidi tudi iz diagrama na sliki 44. Pri dodatku A se vidi, da količina finih delcev bistveno ne vpliva na gostoto. Tudi njen učinek med preiskavami se ni bistveno razlikoval po tem, ali je v njem kamena moka ali ne. Tudi pri diagramu na sliki 44 lahko rečemo, da dodatek C izkazuje najslabše rezultate. Zanimivost zgornjih rezultatov je, da se regresijske premice sekajo skoraj na istem mestu. To bi lahko pomenilo, da za vse dodatke velja, da če imamo okoli 660 kg/m^3 finih delcev v betonu, bomo dobili gostoto betona okoli 2400 kg/m^3 .



Slika 45: Sovisnost med deležem zraka in deležem superplastifikatorja.

delež zraka ↓ : superplastifikator ↑

Praviloma velja, da večji, kot je delež superplastifikatorja, manjša je količina zraka v svežem betonu. To nam kažejo tudi diagram na sliki 45. Vendar se spet zatakne pri dodatku C. Dodatek A ima najboljši rezultat, saj se s spreminjanjem količine dodatka, količina zraka v sveži betonski mešanici bistveno ne spreminja. Dodatek D pa je znan v tem, da nam poveča delež zraka v betonu.

Iz diagramov na slikah med 40 in 45 lahko razberemo, da dodatek C verjetno ni kompatibilen z uporabljenimi materiali (agregat, cement, kamena moka), ali pa je pri uporabljenih količinah superplastifikatorja že nastopilo zasičenje cementne paste s tem dodatkom. Najboljši dodatek, glede na uporabljene materiale, je vsekakor dodatek A, saj je v vseh primerjavah najugodnejši.

5.3 Ugotovitve

Glede na lastnosti svežega betona sem izbrane dodatke razvrstil v 2 skupini. In sicer:

- dodatek primeren za doseg V/C razmerja 0,42 – 0,46 (**dodatek A**); beton lep, lepljiv, lepo vgradljiv s črpalko.
- dodatek primeren za doseg V/C razmerja 0,47 – 0,5 (**dodatki B, C, D**); če hočemo naredit beton s temi dodatki z nižjim V/C razmerjem (0,45) postane beton težek (zelo težko bi ga bilo črpati). Sicer je lep in lepljiv ob pravih pogojih, ko pa se ti le malo spremenijo, se takoj zapeni, agregat se posede in na površini se pojavi voda.

5.4 Rezultati preiskave tlačne trdnosti

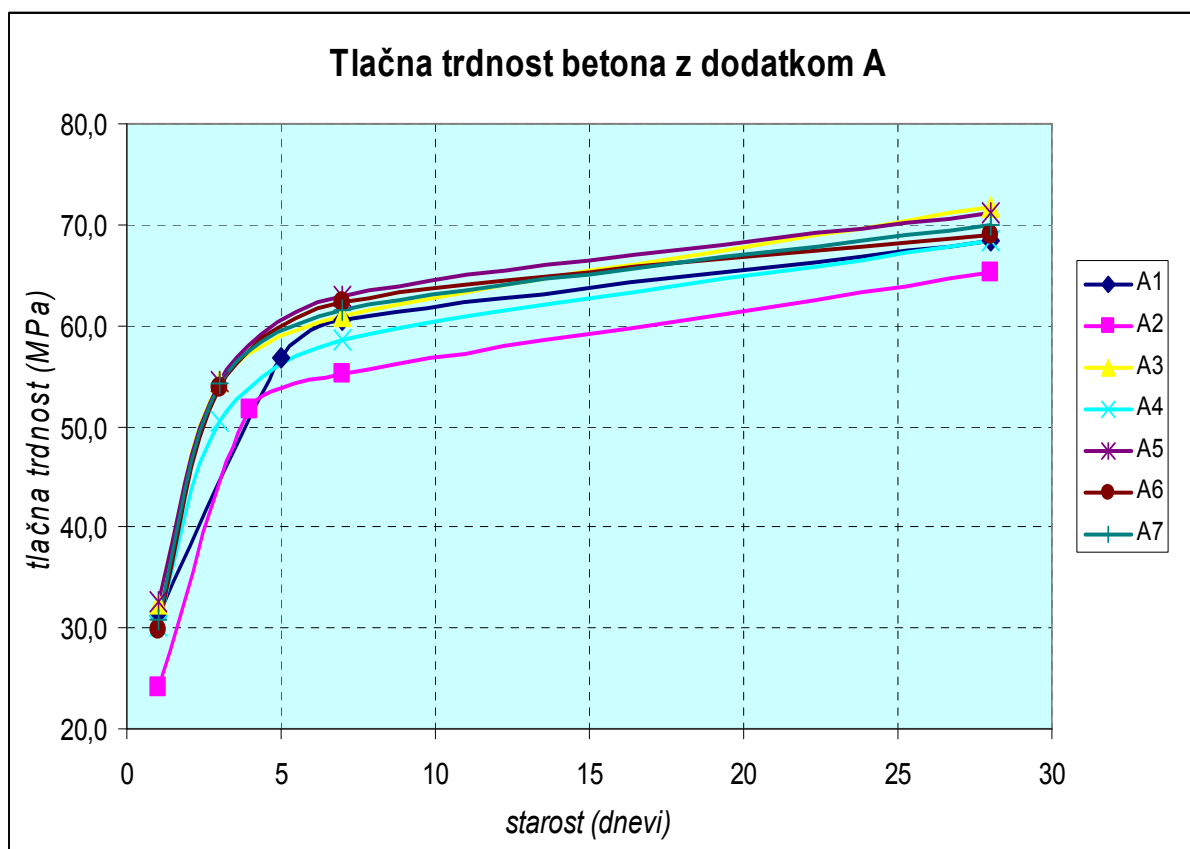
5.4.1 Dodatek A

Preglednica 24: Tlačne trdnosti betona z dodatkom A.

oznaka vzorca	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
starost preizkušanca (dnevi)				ker tega preskusa nisem opravil sem vrednost predpostavil glede na rezultate pri podobnih recepturah					
1	31,2	24,2	32,4	30,2	32,6	29,8	30,8	-	-
3	-	-	54,4	50,4	54,5	53,9	54,3	-	54,2
4	-	51,6	-	-	-	-	-	56,8	-
5	56,8	-	-	-	-	-	-	-	-
7	60,8	54,1	60,6	58,0	62,8	62,2	62,3	61,7	62,1
7	60,2	56,2	61,1	59,1	63,0	62,4	60,9	-	-
28	67,2	65,6	71,5	68,1	69,8	69,3	68,3	-	-
28	69,4	65,0	71,9	68,6	72,5	68,6	71,8	-	-

OPOMBA:

Nekateri preskusi tlačne trdnosti niso bili opravljeni točno po programu, vendar mislim, da to bistveno ne vpliva na prikaz rezultatov pri preglednicah 24 in 27 ter na slikah 46 in 49.



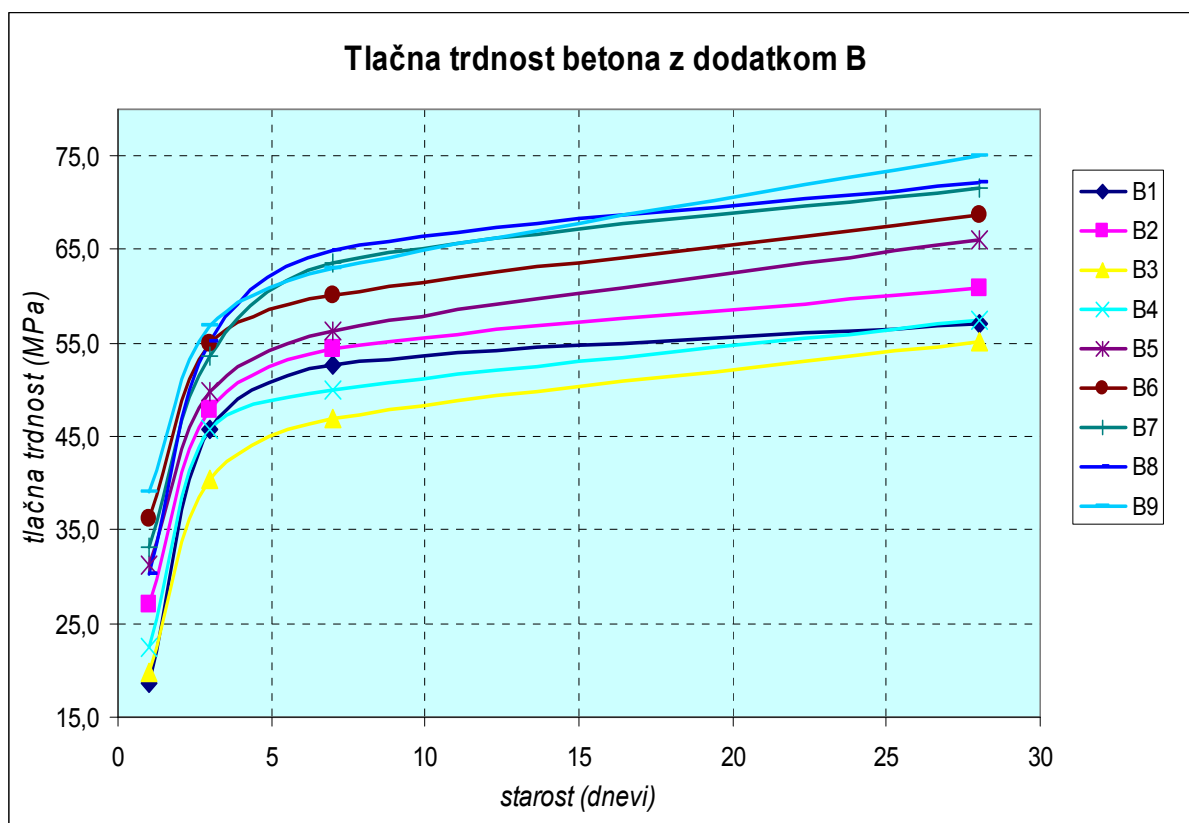
Slika 46: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom A.

Kot pri vseh drugih dodatkih se tudi pri tem takoj vidi, da s 340 kg cementa dosežemo nižje trdnosti, predvsem zaradi najvišjega V/C razmerja (receptura A2). Rezultati na sliki 46 so zelo zanimivi, če nas zanima primerjava rezultatov dobljenih na betonu brez kamene moke in na betonu z moko. Vidimo namreč, da je učinek delovanja superplastifikatorja skoraj neodvisen od kamene moke (sicer sem v recepturi malo spremenili razmerje agregata, vendar sta količina cementa in količina superplastifikatorja ostali enaki). Iz tega sklepamo, da količina finih delcev ne vpliva na tlačno trdnost. Kar pomeni, da je ta dodatek zelo različen od ostalih. Tega pojava si ne znam razložiti, vendar bi bila to zanimiva tema za nadaljnjo raziskovanje.

5.4.2 Dodatek B

Preglednica 25: Tlačne trdnosti betona z dodatkom B.

oznaka vzorca	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
starost preizkušanca (dni)										
1	18,7	27,1	19,7	22,4	31,2	36,2	33,2	30,2	39,0	-
3	45,8	47,8	40,5	45,7	49,8	54,9	53,7	55,2	56,8	60,6
7	53,4	55,1	46,2	49,9	55,2	60,9	64,4	64,6	63,4	66,8
7	52,0	53,6	47,7	-	57,4	59,3	62,9	65,1	62,6	-
28	57,0	64,0	55,2	57,5	66,8	68,3	71,5	71,3	75,3	-
28	57,3	57,8	55,1	-	65,4	69,2	71,7	72,9	74,7	-



Slika 47: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom B.

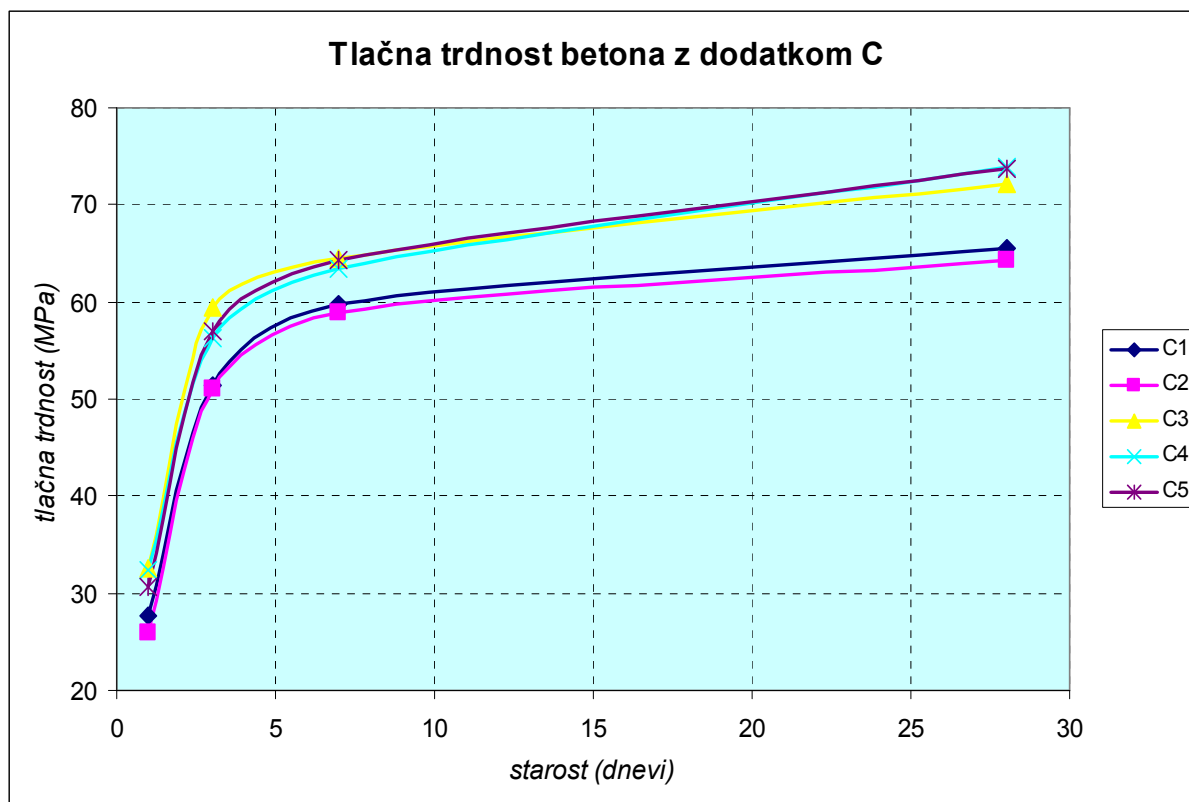
Za dodatek B velja, da potrebuje veliko količino finih delcev. Iz rezultatov v preglednici 25 in grafa na sliki 47 je razvidno, da tudi če nimamo moke (receptura B1) lahko dosegamo večje tlačne trdnosti kot z njo (recepturi B3, B4) ob višjem V/C razmerju. Druga karakteristika je, da se zgodnje tlačne trdnosti betona večajo z večanjem količine cementa ter primerno količino superplastifikatorja. Tlačne trdnosti enakomerno naraščajo pri vseh recepturah (7 - dnevne trdnosti so 91% 28 - dnevne tlačne trdnosti pri vseh recepturah). Iz

tega lahko sklepamo, da dodatek ne vpliva na povečanje trdnost, betona med 7 in 28 dnevno starostjo betona. Rezultati za recepturo B9 pa so nekaj posebnega. Ta beton dosega največjo zgodnjo tlačno trdnost (1. in 3. dan), potem pri starosti 7 dni trdnost ni več najvišja, pri starosti 28 dni pa spet dosega največjo tlačno trdnost. Mislim, da je to optimalna mešanica s tem dodatkom, saj si takih rezultatov želimo (največja zgodnja in končna tlačna trdnost). Vmesno stanje nas niti toliko ne zanima.

5.4.3 Dodatek C

Preglednica 26: Tlačne trdnosti betona z dodatkom C.

oznaka vzorca	C1	C2	C3	C4	C5	C6
starost preizkušanca (dni)						
1	27,7	25,9	32,5	32,3	30,6	-
3	51,4	51,0	59,5	56,2	56,9	54,7
7	60,6	58,4	64,3	63,6	63,4	62,5
7	58,8	59,5	64,7	63,1	65,1	-
28	66,2	63,3	73,0	73,1	71,5	-
28	64,7	65,4	71,2	74,6	76,1	-



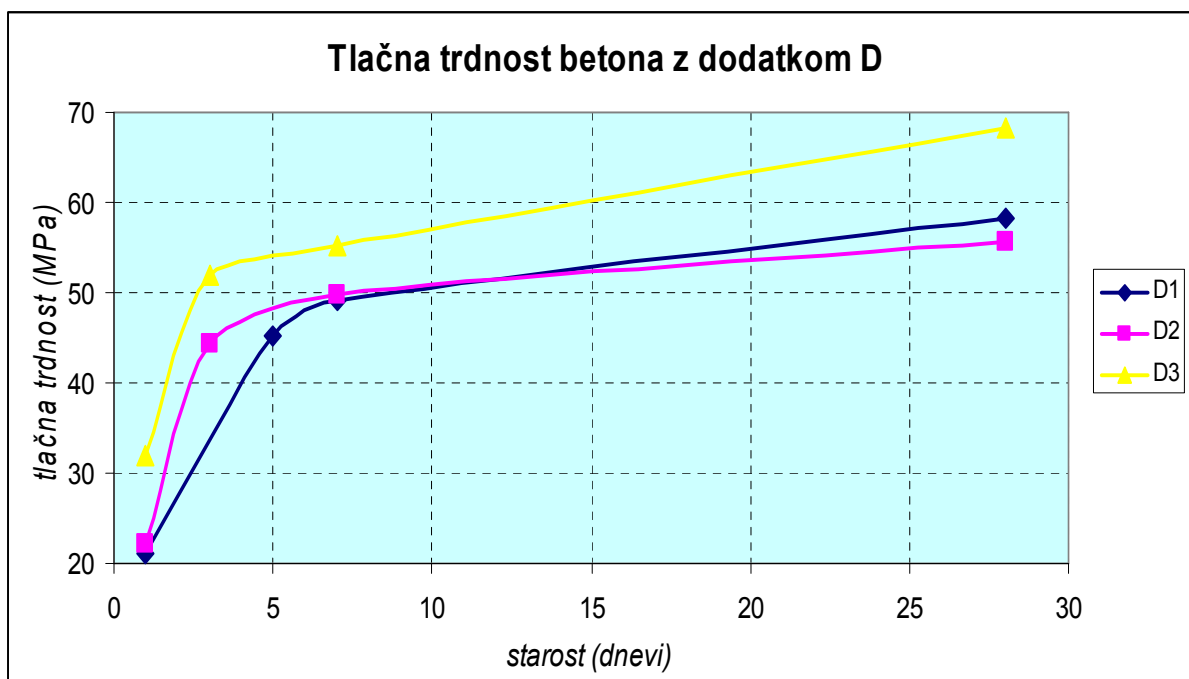
Slika 48: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom C.

Iz diagrama na sliki 48 se zelo lepo vidi, da če nimamo najboljših razmerij med cementom ter količino superplastifikatorja, ne dosegamo trdnosti, ki bi jih lahko. Beton C2 dosega najmanjše trdnosti zaradi največjega V/C razmerja, pri betonu C1 pa očitno nismo dosegli ustrezne dispergiraniosti praškastih delcev. Dodatek C se je ves čas kazal kot problematičen, verjetno zaradi nekompatibilnosti z uporabljenimi materiali. In prav to je lahko razlog za dobljene rezultate tlačnih trdnosti, ki vedno niso v skladu s pričakovanji.

5.4.4 Dodatek D

Preglednica 27: Tlačne trdnosti betona z dodatkom D.

oznaka vzorca	D1	D2	D3	D4	D5
starost preizkušanca (dni)					
1	21,0	22,1	31,9	-	-
3	-	44,3	52,0	57,9	58,7
5	45,2	-	-	-	-
7	49,4	50,3	53,8	65,6	66,9
7	48,8	49,4	56,6	-	-
28	59,2	55,5	66,1	-	-
28	57,3	55,8	70,6	-	-



Slika 49: Razvoj tlačne trdnosti betonov z dodatkom D.

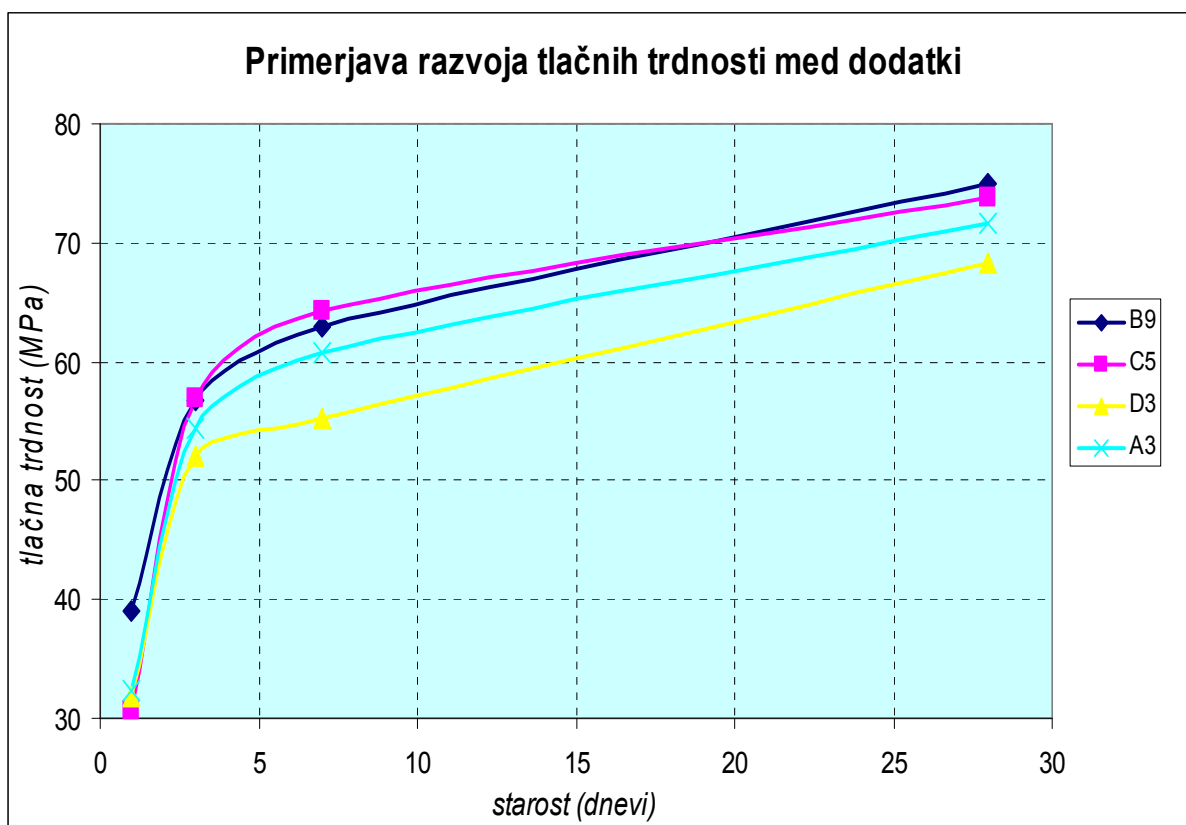
Iz diagrama na sliki 49 vidimo zanimivo primerjavo med recepturama D1 ter D2. D1 nima dodane kamene moke in ima manjšo količino dodatka kot receptura D2. Ima sicer slabšo začetno, ampak večjo končno tlačno trdnost. Iz tega sklepamo, da tudi moka pobere nekaj supeplastifikatorja. Za kakšno podrobnejšo oceno delovanja tega superplastifikatorja pa bi potrebovali večjo količino rezultatov. Jasno je pa prikazana tendenca naraščanja tlačne trdnosti s starostjo, ki bistveno ne odstopa od receptur z ostalimi dodatki. Primerjava trdnosti receptur D1 in D2 tudi pokaže, da je moka v tem primeru povečala zgodnjo trdnost betona in

kompensirala zmanjšanje trdnosti, ki bi ga pričakovali zaradi višjega V/C razmerja pri betonu D2.

5.5 Primerjava tlačnih trdnosti za različne superplastifikatorje

Diagram na sliki 50 prikazuje naraščanje tlačne trdnosti betonov, izdelanih s štirimi različnimi superplastifikatorji. Prikazane rezultate sem izbral glede na lastnosti betona v svežem stanju (izpolnitev predpostavljenih kriterijev). Daleč najvišjo enodnevno trdnost doseže receptura B9 (dodatek B). Vendar s časom hitrost naraščanja trdnosti ni več tako velika, tako da ga že po tretjem dnevu ulovi receptura C5 (dodatek C). Pri starosti 28. dni izkazuje skoraj identične rezultate. Najslabše so trdnosti pri dodatku D (receptura D3). Sicer dosežemo z njim podobne enodnevnosti kot pri recepturah A3 in C5, vendar so že po 3 - eh dneh trdnosti manjše. Razlika v trdnosti ostane vse do starosti 28 dni. Receptura z dodatkom A (A3) dosega povprečne rezultate, glede na ostale dodatke. Če potrebujemo dodatek, s katerim dosežemo največje začetne trdnosti (preizkus TT prvi dan) ter zanesljive končne trdnosti, potem izberemo dodatek B. Sicer pa trdnosti s časom konstantno naraščajo, kar pomeni, da imajo vsi dodatki podoben učinek na naraščanje trdnosti betona s časom.

Kot vidimo dobimo po 28-dneh veliko večje tlačne trdnosti, kot smo jih zahtevali. Beton zmešan z izbranimi dodatki bi lahko z veliko verjetnostjo uvrstili v razred tlačne trdnosti C 50/60. Sicer so to samo začetne preiskave in bi bilo potrebno za dokončno določitev razreda tlačne trdnosti opraviti preiskave na večjem številu preizkušancev.



Slika 50: Primerjava razvoja tlačnih trdnosti med dodatki

5.6 Preskus VDT

Preiskave za ugotavljanje globine vpijanja vode pod pritiskom so opravili na inštitutu, ki je usposobljen za izvajanje tovrstnih preiskav. Kot sem že omenil, sem za vsako najboljšo recepturo s posameznim dodatkom beton še enkrat zamešal ter naredil 3 standardne kocke za VDT preskus.

Kocke so bile izpostavljene 72 urnemu delovanju vodnega pritiska 5 barov. Rezultati preskusa so podani v preglednici 28.

Preglednica 28: Globina vpijanja vode pod pritiskom.

vrsta dodatka	globina vpijanja vode (mm)			
	dodatek A	dodatek B	dodatek C	dodatek D
tehnološke kocke				
1.	ni rezultatov	10	8	8
2.	ni rezultatov	15	10	5
3.	ni rezultatov	12	10	11

Kot vidimo iz rezultatov, so betoni dosegli zahtevano odpornost proti prodoru vode. Še več kot to, dosegli so najvišji možni razred (PV-I). To je bilo tudi za pričakovati, saj velika količina majhnih delcev (cementa, frakcije 0-4 ter kamene moke) s primerno količino superplastifikatorja naredi beton gostejši, kar pomeni zelo malo kapilarnih por in s tem preprečitev dostopa vode v beton. Zanimivo je tudi to, da smo pri dodatku D, ki je vnesel v beton največji delež zračnih mehurčkov dobili najboljše rezultate. Za dodatek A rezultati še niso na voljo.

5.7 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju - NOZT

Preiskave so še v teku, zato do zaključka diplomske naloge nisem imel rezultatov.

Predvidevam pa, glede na rezultate ostalih preizkusov na strjenem betonu, da bi morali betoni brez problema prestati ta preizkus.

5.8 Ostali pogoji klasifikacije betona

Za konec preverimo še, ali obravnavani betoni z dodanim superplastifikatorjem ustrezajo zahtevam. Priporočila glede zahtev za razvrstitev v posamezne razrede dobimo v standardu SIST EN 206-1:2003 na strani 59 (dodatek F).

Preglednica 29: Priporočene mejne vrednosti in dosežene vrednosti.

	priporočene mejne vrednosti			dosežene vrednosti			
	XC4	XD2	XS2	dod. A	dod. B	dod. C	dod. D
max. V/C	0,5	0,55	0,45	0,44	0,45	0,44	0,43
min. trdnostni razred	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 50/60	C 50/60	C 50/60	C 50/60
min. vrednost cementa kg/m³	300	300	320	400	400	390	400

Kot vidimo iz preglednice 29 smo pri vseh betonih dosegli priporočene vrednosti. Pri prvi stopnji izpostavljenosti (korozija zaradi karbonatizacije – XC4) je to najostrejši pogoj, ki ga predpisuje standard. Pri ostalih dveh (drugi kloridi – XD2, morska voda – XS2) pa bi beton lahko klasificirali tudi za stopnjo višje in sicer XD3 ter XS3.

6 ZAKLJUČEK

Na tržišču je veliko različnih vrst superplastifikatorjev, vendar je vsak specifičen in je lahko kompatibilen samo z določenimi vrstami cementa, kamene moke in/ali agregata. To ne pomeni, da z dodatki, ki niso popolnoma kompatibilni, ne moremo narediti dobrega betona, vendar pa s tem ne izkoristimo v celoti, kar nam dodatek omogoča. Danes lahko nekatera podjetja že po naročilu izdelajo dodatek, ki je optimalno kompatibilen z osnovnimi materiali za beton, vendar to naredijo le v primeru velike potrošnje njihovih proizvodov. To pa v mojem primeru ni bilo mogoče.

Dobljeni rezultati veljajo samo za te preiskave, v tem letnem času in s temi materiali. Da bi najboljši rezultat dejansko prišel v proizvodnjo, bi bilo potrebno opraviti še veliko preiskav, predvsem poleti, ko so na primorskem zelo visoke temperature. Beton bi se s časom drugače obnašal.

Glede na prikazane rezultate vidimo, da nobeden dodatek ni najboljši v vseh pogledih. To bi bilo zelo presenetljivo. Vsak dodatek ima svoje prednosti in slabosti. Kot vidimo, dodatek A prevladuje pri kvaliteti sveže betonske mešanice, dodatek B pa pri kvaliteti strjenih betonov, pri tlačnih trdnostih. Ko projektiramo betonsko mešanico je potrebno dobro vedeti, kaj sploh želimo, kakšen naj bo beton. Ne glede na karakteristike pa se vse vrti okoli končne cene betona. Najprej sem planiral, da bom obdelal tudi to področje vendar, bi se obseg diplomske naloge s tem zelo povečal. Poleg tega pa so bili nekateri superplastifikatorji, ki sem jih uporabil, še v fazi razvoja, tako da njihova cena zaenkrat še ni določena.

Za konec si pogledjmo še ali lahko odgovorimo na začetne predpostavke, ki sem jih zapisal v poglavju *Cilj in namen diplomske naloge*:

- preizkusil sem 11 različnih superplastifikatorjev različnih generacij, ki sem jih dobil od 5-tih različnih proizvajalcev,
- kot je razvidno iz rezultatov predstavljenih v nalogi sem določil recepturo, ki je zelo podobna pri vseh 4-ih najboljših recepturah pri posameznem dodatku,

- optimalna količina superplastifikatorja nove generacije je 0,7 – 0,8 %. To ne pomeni, da če bi pri tisti recepturi, kjer je optimum 0,7 % dodali 0,8 %, da bi se razmerje podrlo. Dobili bi podobne rezultate, vendar ne najboljših,
- iskanje idealnega razmerja sestavin betona je zelo težko in dolgotrajno delo. Začetne recepture sem dobil na betonarni in jih sproti, s pomočjo somentorja, spreminjal in prilagajal rezultatom,
- najboljšega superplastifikatorja ni! Vsak ima svoje prednosti in slabosti. Pri mojih raziskavah sta 2 dodatka precej izstopala. To ne pomeni, da druga dva nista dobra, ampak lahko sklepamo, da nista dovolj kompatibilna z uporabljenimi materiali.

V skoraj tri mesece trajajočih preiskavah sem se veliko naučil o betonu in delovanju superplastifikatorjev. Za preiskave sem porabil 3800 kg agregata, 900 kg cementa, vendar še vedno ne morem reči, da so moje končne recepture najboljše, kar se da narediti s posameznim superplastifikatorjem, da izpolnim postavljene zahteve. Če bi hotel to doseči, bi morale preiskave trajati bistveno več časa. Potrebno je pa, tudi vedeti, da v vsakodnevni proizvodnji prihaja do relativno velikih nihanj v kvaliteti betona. To pomeni, da potrebujemo robustno recepturo, ki uspe kompenzirati vsa možna odstopanja v lastnostih osnovnih materialov.

Na koncu lahko ugotovim, da je najbolj optimalen superplastifikator za obravnavano betonarno superplastifikator A.

VIRI

Concrete training. 2008. Switzerland, Sika Concrete Academy, Interno gradivo, 162 strani

Đureković, A. 1996. Cement cementni kompozit i dodaci za beton. Zagreb, Institut
Građevinarstva Hrvatske: 358 strani

Hirschi, T., Knauber, M., Lanz, M., Schlumpf, J., Schrabback, J., Spirig, C., Waeber, U.
2005. Sika Concrete Handbook. Switzerland, Sika services AG: 147 strani

Kumar Mehta, P., Monteiro J. M. P., 2006. Concrete: Microstruture, Properties and Materials
(third edition), USA, Department of Civil and Environment Engineering University of
California at Berkeley: 659 strani

SIST EN 206-1, Beton – 1.del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost (istovetnost z
EN 206-1:2000): 66 strani

SIST 1026, Beton – 1.del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za
uporabo SIST EN 206-1 (revidirana izdaja): 49 strani

SIST EN 12350-1:2001, Preskušanje svežega betona – 1.del: Odvzem vzorcev: 4 strani

SIST EN 12350-2:2001, Preskušanje svežega betona – 2.del: Posed stožca: 7 strani

SIST EN 12350-5:2001, Preskušanje svežega betona – 5.del: Razlez: 7 strani

SIST EN 12350-6:2001, Preskušanje svežega betona – 6.del: Gostota: 8 strani

SIST EN 12350-7:2001, Preskušanje svežega betona – 7.del: Vsebnost zraka –
Poroziometrijske metode: 16 strani

SIST EN 12390-1:2001, Preskušanje strjenega betona – 1.del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe: 10 strani

SIST EN 12390-2:2001, Preskušanje strjenega betona – 2.del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti: 7 strani

SIST EN 12390-3:2002, Preskušanje strjenega betona – 3.del: Tlačna trdnost preiskušancev: 15 strani

SIST EN 12390-7:2001, Preskušanje strjenega betona – 7.del: Gostota strjenega betona: 9 strani

SIST EN 12390-8:2001, Preskušanje strjenega betona – 8.del: Globina vpijanja vode pod pritiskom: 5 strani

SIST CR 13902:2003, Preskusne metode za določevanje vodocementnega razmerja za svež beton: 7 strani

SIST EN 197-1:2002, Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente (istoveten z EN 197-1:2000)

SIST EN 934-2:2002, Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – 2. del: Kemijski dodatki za beton – Definicije, zahteve, skladnosti in označevanje (istoveten EN 934-2:2001)

SIST EN 1008:2003, Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona (istoveten EN 1008:2002)

Žarnić, R. 1999, Osnovne lastnosti gradiv. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, FGG: 319 strani

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan Bosiljkov, V., Dujič, B. 2007/2008, Gradiva vaje. Ljubljana.
Univerza v Ljubljani, FGG: 140 strani