

Beton izložen djelovanju smrzavanja

Parčina, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:057553>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Parčina

Split, 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Beton izložen djelovanju smrzavanja

Završni rad

Split, 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Matija Parčina

BROJ INDEKSA: 4487

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Beton izložen djelovanju smrzavanja

Opis zadatka: Zadatak ovog završnog rada je obraditi utjecaj smrzavanja betona na njegova svojstva. Potrebno je prikazati mehanizam degradacije strukture betona izloženog djelovanju smrzavanja, principe projektiranja sastava betona uključivanjem trajnosti elemenata, te relevantne metode ispitivanja otpornosti betona na mraz. Projektirati sastav betona za zadanu konstrukciju (detalji prikazani u završnom radu).

U Splitu, 16.04.2020.

Voditelj Završnog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Beton izložen djelovanju smrzavanja

Sažetak:

Beton, kao jedan od najupotrebljivijih građevinskih materijala, kroz vijek trajanja izložen je različitim utjecajima i promjenama temperature. Budući da pri smrzavanju betona dolazi do brojnih procesa koji za beton, ali i cijelu konstrukciju mogu biti štetni, pri projektiranju i izvođenju potrebno je voditi računa da se sve prilagodi očekivanim uvjetima. U radu je prikazan utjecaj smrzavanja betona na njegova svojstva i strukturu kao i relevantne metode ispitivanja otpornosti betona na mraz te je izvršen proračun sastava betona za obiteljsku kuću sukladno tehničkim propisima.

Ključne riječi:

Beton, djelovanje smrzavanja

Concrete in the freezing process

Abstract:

Concrete, as one of the most frequently used materials, is exposed to different impacts and temperature varieties. In concrete freezing process there are a lot of actions potentially harmful because of what is necessary to adjust everything to expected conditions. In the following the impact of concrete freezing process on its characteristics is shown, as well as the relevant methods of the examination the resistance abstract to froast. Its also made the calculation of concrete structure of family house, under tehcnical regulations.

Keywords:

Concrete, freezing process

Sadržaj

1	UVOD.....	1
2	UTJECAJ TEMPERATURE NA BETON	2
2.1	Utjecaj temperature na ugrađeni beton.....	2
2.2	Betoniranje na niskim temperaturama	3
2.2.1	Aditivi za betoniranje na niskim temperaturama	4
2.2.2	Pravila kod betoniranja na niskim temperaturama	5
3	UTJECAJ SMRZAVANJA NA BETON	7
3.1	Djelovanje mraza na beton	7
3.2	Različiti mehanizmi pri smrzavanju betona	9
3.2.1	Djelovanje soli za odmrzavanje.....	9
3.2.2	Efekti uvučenog zraka.....	10
3.2.3	Nastanak oštećenja zbog smrzavanja	10
4	PROJEKTIRANJE BETONA OTPORNOG NA SMRZAVANJE	13
5	METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA SMRZAVANJE.....	16
5.1	Direktne metode ispitivanja.....	16
5.1.1	Ispitivanje ciklusima smrzavanja i odmrzavanja	16
5.2	Indirektne metode ispitivanja.....	18
5.2.1	Ispitivanje zračnih šupljina upotrebom analizatora (AVA metoda eng. Air Void Analyzer)	18
5.2.2	Ispitivanje zračnih šupljina mikroskopom	20
6	PRORAČUN SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE	21
6.1	Beton za međukatnu konstrukciju – B3	23
6.1.1	ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA Dmax	23
6.1.2	NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA.....	24
6.1.3	ODABIR KOMPONENTI BETONA	26
6.1.4	ODABRANE KOMPONENTE.....	30
6.1.5	RECEPTURA.....	30
6.2	Beton za zid podruma - B2	31
6.2.1	ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA Dmax	32
6.2.2	NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA.....	32
6.2.3	ODABIR KOMPONENTI BETONA.....	32

6.2.4	ODABRANE KOMPONENTE.....	33
6.2.5	RECEPTURA.....	34
6.3	Beton za temeljenje – B1.....	36
6.3.1	ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA Dmax	36
6.3.2	NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA.....	37
6.3.3	ODABIR KOMPONENTI BETONA.....	39
6.3.4	ODABRANE KOMPONENTE.....	40
6.3.5	RECEPTURA.....	41
6.4	Sumarni prikaz odabranih komponenti betona	42
7	ZAKLJUČAK	43
8	LITERATURA.....	44

1 UVOD

Beton je mnogokomponentni, polidisperzni, umjetni kameni građevinski materijal koji je sastavljen od pijeska i krupnog agregata, međusobno povezanih cementnim kamenom, nastalim hidratacijom i očvršćivanjem cementa kao veziva.

Iako se prva inačica betona koristila još od davnih vremena Egipćana i Rimljana koji su poznavali hidraulička svojstva mješavine pucolana, pečene gline i vapna koje su miješali sa pijeskom i drobljenom opekam dobijajući mort, beton je materijal novijeg doba.

Kroz godine istraživanja otkrivaju se hidraulička svojstva nekih drugih veziva te je Joseph Aspdin 1824.godine proizveo prvi Portland cement koji nije bio dovoljno pečen. Tek 1845.godine, Isaac Johnson je pečenjem mješavine i vapnenca sve do nastajanja klinkera, dobio Portland cement koji je danas u širokoj upotrebi. Prava prekretnica u korištenju betona je spoznaja da se beton može armirati čeličnim šipkama. Budući da sam beton, kao i svaki kamen ima veliku tlačnu, ali malu vlačnu čvrstoću, ta spoznaja je dovela do prave revolucije u graditeljstvu. Dodavanjem čelika betonu dobivamo kompozit koji omogućava dobru iskoristivost oba materijala i to na mjestima gdje su najbolji, beton u vlaku i čelik u tlaku.

Od otkrića betona pa do današnjih dana beton zauzima vodeće mjesto među materijalima u građevinarstvu te je postao sinonim za modernu i urbanu gradnju. Ubrzan razvoj života ljudi u svim područjima prati i razvoj u građevinarstvu pa se nameću i sve veći zahtjevi u pogledu veće trajnosti betona, većih čvrstoća, brže i lakše ugradnje... No, za postizanje traženih svojstava betona u konstrukciji, uz dobro poznavanje i strogu kontrolu svojstava komponenata, bitne su i pojedine faze u procesu proizvodnje kao što su transport, ugradnja i njega koje čine i veliki udio u ukupnim troškovima izvedbe betonskih konstrukcija. Između ostalog, povećanje produktivnosti, smanjenje troškova i povećanje brzine rada te poboljšanje uvjeta rada uz zadovoljavanje propisanih svojstava betona postali su prioritet u građevinarstvu. Budući da ugrađeni beton tijekom mnogih godina treba u svim uvjetima eksploatacije podnositi brojne različite utjecaje, postojanost betona jedna je od njegovih najvažnijih osobina.

2 UTJECAJ TEMPERATURE NA BETON

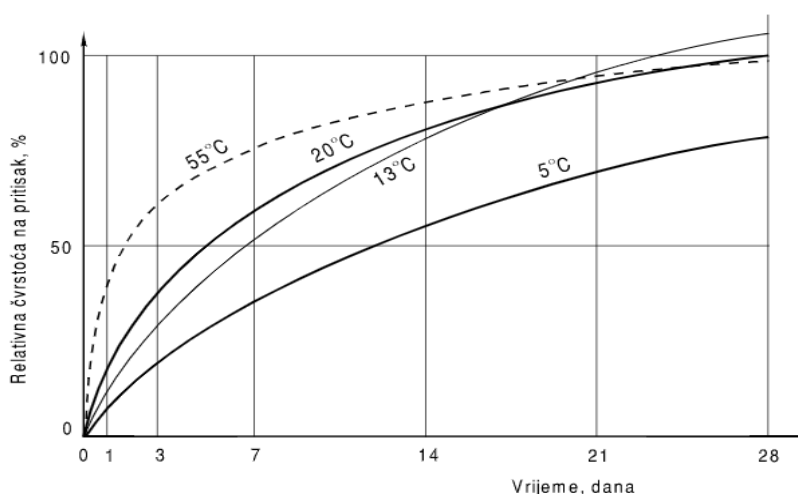
Laboratorijska ispitivanja betona obično se provode u kontroliranim uvjetima i konstantnoj temperaturi, no u praksi je on podložan različitim utjecajima i promjenama temperature.

Razvojem moderne gradnje koja se sve više odvija kako u područjima sa izrazito visokim, tako i u područjima sa izrazito niskim temperaturama, stvarni raspon temperature znatno se proširio te je projektiranje i izvođenje potrebno prilagoditi uvjetima okoliša.

Kada se očekuje betoniranje u vrlo vrućim ili vrlo hladnim klimatskim okolnostima, potrebno je pri spravljanju, ugradnji i njegovanju voditi računa o tome da poduzmemo posebne mjere zaštite svježeg i očvršćavajućeg betona. Pod ekstremnim klimatskim uvjetima podrazumijeva se dulje vremensko razdoblje temperatura nižih od $+5^{\circ}\text{C}$ odnosno viših od $+30^{\circ}\text{C}$, a beton treba zaštititi tako da svježja smjesa u razdoblju obrade ne prijeđe van tog raspona. Posebne mjere zaštite betona uključuju posebne uređaje na deponijama, u betonari i u prijevoznim sredstvima pa je vrlo važno da se pravovremeno počne s pripremama za betoniranje u ekstremnim klimatskim okolnostima.

2.1 Utjecaj temperature na ugrađeni beton

Utjecaj temperature na čvrstoću betona na pritisak prikazan je kvalitativnim dijagramima na slici 2.1.



Slika 2.1 Razvoj čvrstoće betona na pritisak na stalnoj temperaturi tijekom 28 dana [1]

Kao referentna čvrstoća uzeta je vrijednost čvrstoće betona koji je 28 dana čuvan na temperaturi od 20°C.

Najveći prirast čvrstoće tijekom prva 24 sata i prvih nekoliko dana postiže se na temperaturi od 55°C, ali daljnji razvoj čvrstoće je usporen, a konačna čvrstoća nešto niža.

Najveću konačnu čvrstoću postigao je beton održavan na temperaturi od 13°C (optimalna temperatura ovisi o klasi cementa, naznačeni dijagram vrijedi za klasu cementa 45).

Granicom niske temperature betona smatra se temperatura od 5°C, što znači da se ispod te temperature moraju poduzimati posebne mjere zaštite. Na toj temperaturi u prvim danima prirast čvrstoće betona je usporen, a i čvrstoća nakon 28 dana je znatno niska.

Ovakvo ponašanje betona objašnjava se razvojem kristala cementnih hidrata.

Na višim temperaturama iz površine čestica cementa izrastaju deblji i veći igličasti kristali, a ovoj hidratiziranog sloja oko zrnaca je relativno čvrst i debeo, što blokira pristup vode u unutrašnjost čestica i razvoj čvrstoće u kasnijem periodu. [1]

Na nižim temperatura igličasti kristali se razvijaju sporije, manje su debljine, ali njihov broj je neusporedivo veći te su zbog toga oni bolje međusobno isprepleteni.

Budući da je rast novih kristala moguć i u kasnijem periodu, rast čvrstoće betona u kasnijem periodu također je moguć, posebno nakon 28 dana.

2.2 Betoniranje na niskim temperaturama

Niske temperature imaju brojne učinke na ponašanje betona, a većina njih je povezana sa smanjenjem brzine hidratacije cementa. U hladnim klimatskim okolnostima, svježi beton potrebno je zaštititi od smrzavanja te osigurati povoljne termohigrometrijske uvjete za proces hidratacije cementa odnosno očvršćavanje betona. Ako je temperatura betona za vrijeme otvrdnjavanja manja od 5°C, čvrstoća betona raste veoma sporo te je uz poduzimanje posebnih mjera zaštite, beton potrebno dugo držati u oplati. Ako beton smrzne, proces hidratacije se prekida, a nakon odmrzavanja, prirast čvrstoće zanemariv te se ugrađeni beton mora odstraniti. Bitno je da beton dostigne dovoljnu čvrstoću kojom će se suprotstaviti širenju vode pri prelasku u led. Međutim, ne može se utvrditi u kojoj starosti je beton dovoljno čvrst da mu se struktura ne ošteti pri smrzavanju [2]. Za strukturu mladog betona najopasniji su ciklusi smrzavanja i odmrzavanja. Kako bi se spriječila oštećenja mladog betona od djelovanja mraza, potrebno je osigurati početnu temperaturu, a zatim tijekom njegovanja zaštititi beton od gubitka topline. Beton koji je jednom počeo

hidrataciju, sam će se dalje dovoljno zagrijavati. Na slici 2.2 prikazane su početne temperature svježeg betona za zimsko betoniranje dobivene praktičnim iskustvom.

temperatura zraka [°C]	< 30 cm	30 - 90 cm	90 - 180 cm	> 180 cm
5°C	13	10	7	5
5 do -1°C	16	13	10	7
-1 do -18°C	18	16	13	10
< -18°C	21	18	16	13

Slika 2.2 Preporučene početne temperature svježeg betona za zimsko betoniranje [2]

Section size, minimum dimension, in. (mm)					
		<12 in. (300 mm)	12–36 in. (300–900 mm)	36–72 in. (900–1800 mm)	>72 in. (1800 mm)
Line	Air Temp.				
Minimum concrete temperature as placed and maintained					
1	–	55 °F (13 °C)	50 °F (10 °C)	45 °F (7 °C)	40 °F (5 °C)
Minimum concrete temperature as mixed for indicated air temperature*					
2	Above 30 °F (–1°C)	60 °F (16 °C)	55 °F (13 °C)	50 °F (10 °C)	45 °F (7 °C)
3	0 to 30 °F (–18 to –1°C)	65 °F (18 °C)	60 °F (16 °C)	55 °F (13 °C)	50 °F (10 °C)
4	Below 0 °F (–18 °C)	70 °F (21 °C)	65 °F (18 °C)	60 °F (16 °C)	55 °F (13 °C)
Maximum allowable gradual temperature drop in first 24 hr after end of protection					
5	–	50 °F (28 °C)	40 °F (22 °C)	30 °F (17 °C)	20 °F (11 °C)

* For colder weather a greater margin in temperature is provided between concrete as mixed and required minimum temperature of fresh concrete in place.

Slika 2.3 Preporučene temperature u ovisnosti od dimenzija betoniranog elementa [5]

2.2.1 Aditivi za betoniranje na niskim temperaturama

Kod betoniranja na niskim temperaturama ponekad se koriste i određeni aditivi koji znatno snižavaju ledište vode i sprječavaju smrzavanje betona na temperaturama ispod 0°C. Ako se ne provode preporučene mjere zaštite betona, beton s dodatkom aditiva neće smrznuti, ali će njegova čvrstoća sporo rasti na stalnoj niskoj temperaturi. Iz navedenog razloga, unatoč korištenju aditiva, mjere za betoniranje na niskim temperaturama valja djelomično ili u potpunosti provoditi. Upotrebom aditiva ostvaruju se izvjesne uštede u mjerama zaštite te se povećava sigurnost u radu.

Aditivi za betoniranje na niskim temperaturama se mogu podijeliti u dvije glavne skupine: antifrizne tvari uz pomoć kojih se snižava ledište vodene otopine i kombinacije anifriznih tvari i ubrzivača vezanja.

Klasični antifrizni aditivi su NaCl, CaCl₂, K₂CO₃, NaNO₂, ureja i njihove kombinacije. Ovi aditivi na temperaturama ispod 0°C mogu biti djelotvorni samo ako se dodaju betonu u velikim dozama, znatno iznad 10% na masu cementa. Kod tako velikih doza oni često uzrokuju štetne efekte u očvrslom betonu te se više ne primjenjuju.

Komercijalni aditivi su najčešće kombinacije ubrzivača očvršćivanja i antifriznih tvari. Kod njih, glavni efekt ubrzivača je ubrzanje oslobađanja topline hidratacije cementa. Dodaju u količini od otprilike 2% na masu cementa.

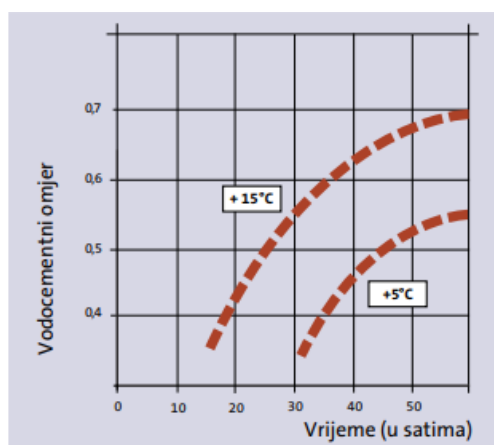
2.2.2 Pravila kod betoniranja na niskim temperaturama

Mjere koje je potrebno poduzeti pri betoniranju na niskim temperaturama prema fazama izvedbe:

Planiranje i priprema

- koristiti betone sa nižim vodocementnim faktorom, *slika 2.4* prikazuje vrijeme potrebno za postizanje otpornosti na prvo smrzavanje (tlačna čvrstoća ≥ 5 N/mm²)

prema vodocementnom faktoru pri raznim temperaturama betona



Slika 2.4 [3]

- pripremiti materijale za toplinsku izolaciju svježeg betona
- ostaviti beton dulje u oplati i produljiti vrijeme njege betona
- koristiti materijale s boljim toplinskim izolacijskim svojstvima prilikom izrade oplata te pri njezi betona
- pri proizvodnji betona koristiti toplu vodu, odnosno agregat te konstruktivni element zaštititi protiv gubitka temperature

- svježi beton zaštititi od smrzavanja te izbjegavati nagle promjene temperature

Ugradnja betona

- beton se ne smije ugrađivati na smrznuto tlo ili smrznute dijelove konstrukcije
- unaprijed zagrijan beton ugrađuje se u oplata očišćene od leda i odmah zaštićuje
- poduzeti mjere da se u ugrađenom betonu i dalje može mjeriti temperatura te neprestano provjeravati temperaturu betona koji ugrađujemo, pri ugradnji betona temperatura mora biti iznad 10°C

Njega betona

- unatoč tome što ugrađeni beton sam razvija dovoljno topline potrebno ga je zaštititi od gubitka topline i vlage neposredno nakon njegova postavljanja, to se postiže npr. oblaganjem oplata toplinskom izolacijom u obliku ploča (*slika 2.5*)



Slika 2.5 [4]

- cijelu konstrukciju treba održavati zagrijanom do stvaranja otpornosti na mraz, to se postiže npr. pomoću izolirajuće termo folije (*slika 2.6*)

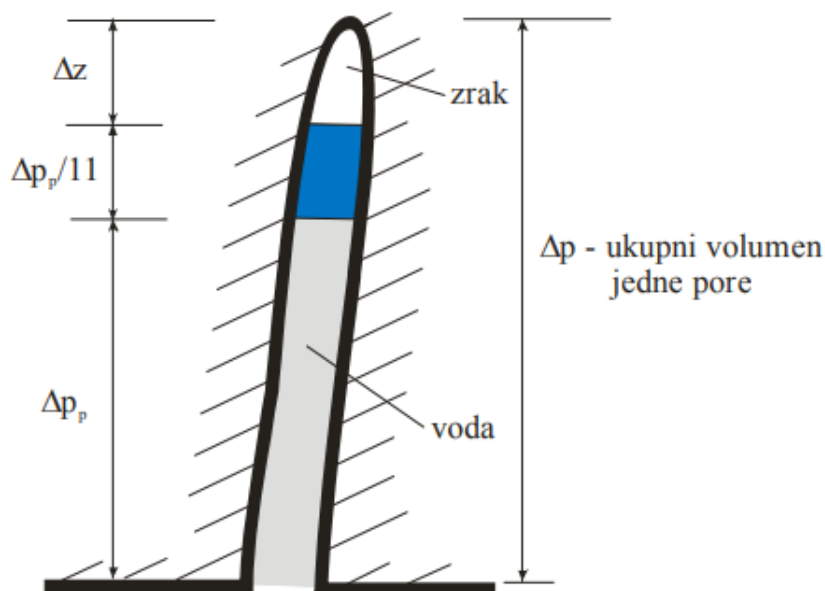


Slika 2.6 [5]

3 UTJECAJ SMRZAVANJA NA BETON

3.1 Djelovanje mraza na beton

Ako se tvar čije su pore djelomično ispunjene vodom izloži djelovanju mraza, voda kristalizira u led i povećava volumen za oko 1/11. Voda teži zauzeti veći volumen od prvobitnog te se širi prema prostoru koji je ispunjen zrakom (slika 3.1).



Slika 3.1 Shema širenja leda u kapilarnoj pori [4]

Zbog otpora krute tvari, led se ne može širiti u smjeru okomito na stijenku pore, već samo u smjeru osi pore. Zbog širenja, između leda i stijenke pore javlja se trenje, otpor stijenke naziva se kristalizacijski pritisak leda i iznosi oko 4 MPa. Međutim, ukoliko led ispuni sav prostor u pori, pritisak se naglo povećava, pri temperaturi od -22°C on dolazi na 220 MPa što je veće od čvrstoće materijala i dolazi do razaranja. Porastom temperature na 0°C taj skok se neznatno smanjuje. Ako i nakon smrzavanja vode u pori ostane nešto zraka, neće doći do štećenja tvari. Dakle, uvjet da ne dođe do razaranja tvari oko jedne pore je (1):

$$\Delta z \geq 0$$

$$\Delta z = \Delta p - \left(\Delta p_u + \frac{\Delta p_u}{11} \right) = \Delta p - \frac{12}{11} \Delta p_u \geq 0$$

$$\Delta p_u \leq \frac{11}{12} \Delta p$$

p – poroznost materijala, odnosno volumna koncentracija kapilarnih pora

U – upijanje vode (adsorpcija), odnosno maksimalna moguća volumna koncentracija vode u kapilarnim porama

U/p (K_u) – koeficijent zasićenja materijala (Hirschwaldov koeficijent)

$$U \leq \frac{11}{12} p$$

$$\frac{U}{p} \leq \frac{11}{12} = 0,92$$

Iz čega slijedi da do razaranja materijala ne može doći ako je Hirschwaldov koeficijent manji od 0,92. Međutim, to vrijedi samo ako su sve pore na jednom kraju zatvorene. Kako pri kretanju vode i leda u porama, uslijed trenja i pritiska od 4 MPa, te nehomogenosti materijala uvijek dolazi do oštećenja, zbog sigurnosti se uzima da je materijal otporan na smrzavanje ako se Hirschwaldov koeficijent kreće između 0,80 i 0,85.

Mnogo izraženiji efekt nastaje pri smrzavanju vode u porama. Budući da smrzavanje počinje od površine krutog tijela, na površini led zatvori praktično sve pore. Dakle, bez obzira na to da li su prije smrzavanja pore bile zatvorene ili nisu, za ocjenu hoće li doći do razaranja materijala nije mjerodavan Hirschwaldov koeficijent, već stupanj zasićenja pora vodom.

$$K_s = \frac{S}{p}$$

S – volumna koncentracija vode u porama

Iz navedenog možemo zaključiti da će do oštećenja krute tvari doći samo ako je ono dovoljno zasićeno vodom. To jest, ako je stupanj zasićenja vodom između 0,82 i 0,92.

3.2 Različiti mehanizmi pri smrzavanju betona

Razaranje betona djelovanjem niskih temperatura vrlo je složena pojava. U krupnijim kapilarama voda se počinje smrzavati kod 0°C , dok će u manjim porama temperatura biti znatno niža i prije nego što voda kristalizira. Pri smrzavanju beton bubri zbog pritiska leda u porama. Međutim, voda adsorbirana u gel porama počinje smrzavati tek na -78°C , što mehanizam djelovanja leda čini još složenijim.

Snižanjem temperature beton se temperaturno skuplja [6]. Budući da je led jako malo stišljiv, odupire se skupljanju te se vlak u krutoj tvari povećava. Zbog skupljanja, dio adsorbirane vode gel istiskuje u kapilarne pore i tamo lokalno povećava stupanj zasićenja. Ovi efekti se zbrajaju s efektima od povećanja volumena vode pri smrzavanju.

Smrzavanje betona počinje od površine i prema dubini napreduje sve sporije te su zbog toga oštećenja površine najviše izražena. Svježi beton je skoro potpuno zasićen vodom, led razbija kristale hidrata u začetku i tajno gotovo potpuno sprječava očvršćivanje.

3.2.1 Djelovanje soli za odmrzavanje

Soli za odmrzavanje koje se koriste za posipanje prometnica, za sprječavanje smrzavanja površine, kao što su NaCl i CaCl_2 i druge, otapaju se u vodi koja prodire u pore. Za vrijeme smrzavanja, smrzava se samo voda, a soli ostaju u nesmrznutoj vodi, gdje se njihova koncentracija povećava. Tada u porama dolazi do različitih efekata.

Osmoza je difuzijski proces kojim se izjednačava koncentracija dvaju otopina različitih jačina koje su odijeljene polupropusnom membranom. Na strani gdje je jača otopina pojačava se pritisak koji se naziva osmotski tlak. Adsorbirana voda iz gel pora kreće se prema kapilarnim porama u kojima je otopina soli i tamo uzrokuje veliki osmotski tlak koji se povećava sa povećanjem koncentracije soli u otopini. Efekt osmotskog tlaka se zbraja s efektom pritiska leda u porama. Kad otopina postane zasićena zbog povećanja koncentracije soli, počinje kristalizacija soli u porama, a kristalizacijski pritisak soli na

stijenke pora istog je reda veličine kao pritisak leda. Zbog navedenih efekata, beton izložen djelovanju soli za odmrzavanje brže se oštećuje i razara.

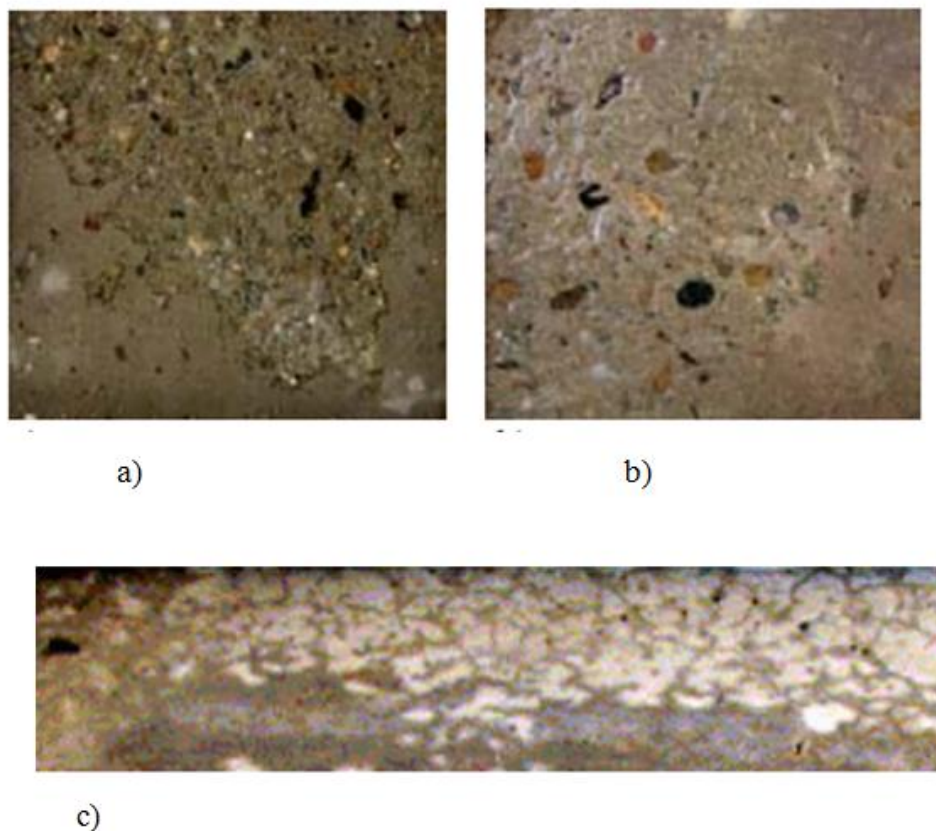
3.2.2 Efekti uvučenog zraka

Iako manje propustan beton, odnosno betonska konstrukcija, ima veću otpornost na mraz, efekti uvučenog zraka su iznimka.

Mehanizam djelovanja mraza drastično se mijenja uvlačenjem mjehurića zraka u beton i stvaranjem kuglastih pora. Efekti su povoljniji što su kuglaste pore sitnije, u što većem broju i jednoliko raspoređene u betonu. Ova geometrijska svojstva kuglastih pora definira faktor razmaka pora koji se određuje mikroskopskom metodom, na prerezanom uzorku očvrslog betona. Taj faktor razmaka predstavlja prosječan međusobni razmak kuglastih pora u cementnom kamenu. Kako se u kuglastim porama nalaze mjehurići zraka, povećanje volumena vode u sustavu pora kompenzira se stiskanjem tog tlaka. Budući da pritisak leda u porama ne prelazi 4MPa, takav beton ne bubri pri smrzavanju. Naprotiv, prevladava temperaturno skupljanje betona [1]. Uvlačenjem zraka u beton, postiže se još jedan, jednako važan efekt. Beton zadane obradivosti ima približno za onoliko manju volumnu koncentraciju vode, odnosno kapilarnih pora, koliko iznosi volumna koncentracija uvučenog zraka. Dakle, dio kapilarnih pora, koje su uzrok oštećenjima, zamjenjuje se uvučenim zrakom [1]. Osim toga, kuglaste pore prekidaju kapilare, čime se još više smanjuje stupanj zasićenja betona vodom. Ukoliko beton ima faktor razmaka pora manji od 0,2mm, smatra se da je otporan na mraz.

3.2.3 Nastanak oštećenja zbog smrzavanja

U krajevima s hladnom klimom, smrzavanje je jedan od glavnih čimbenika nastajanja oštećenja betonskih konstrukcija. Oštećenja betona zbog smrzavanja javljaju se u nekoliko različitih oblika. Najučestalija oštećenja su pojave pukotina i odlamanje dijelova betona. Također je poznato da pojava pukotina između zrna agregata i cementnog kamena ovisi o vrsti i podrijetlu agregata. Slika prikazuje različite vrste oštećenja zbog djelovanja smrzavanja koja se manifestiraju kao površinsko ljuštenje (*slika 3.2 a*), pucanje zrna agregata (*slika 3.2 b*) i nastajanje pukotina (*slika 3.2 c*)



Slika 3.2 Primjeri različitih vrsta oštećenja izazvanih smrzavanjem betona

[8]

- a) ljuštenje površine betona
- b) oštećenja zbog pucanja zrna agregata
- c) pojava pukotina

Najjednostavnije promatrano, može se reći da oštećivanje betona zbog smrzavanja proizlazi iz pojave da led zauzima 9% veći volumen od vode. Smrzavanjem vode u sustavu pora betona induciraju se naprezanja, a kad ta naprezanja postanu veća od vlačne čvrstoće betona dolazi do razaranja strukture betona. Za pojavu oštećenja betona zbog smrzavanja može biti odgovoran i agregat. Agregati niske poroznosti i velike čvrstoće ne dovode do oštećenja jer su elastična naprezanja u porama agregata manja od njegove vlačne čvrstoće. Kod srednje poroznih agregata zbog hidrauličkog tlaka može doći do pucanja zrna i pojave iskakanja dijelova zrna iz betona, čime nastaju točkasta oštećenja (*slika 3.2 b*). Propusnost agregata ima dvostruku ulogu, određuje stupanj zasićenosti agregata vodom te određuje stupanj u kojem će voda izlaziti iz agregata. Beton sa sitnijim frakcijama otporniji je na

djelovanje mraza nego beton sa krupnijim agregatom. To se objašnjava time što kod sitnijeg agregata dio vode pri smrzavanju može izaći van i smanjiti tlak. Agregati sa velikom poroznošću smrzavanjem se ne oštećuju, ali se uočava pojava razdvajanja veze između cementne paste i agregata do koje dolazi zbog izlaska vode iz agregata.

Muttaqin [8] je promatrao deformacije uzoraka betona pod utjecajem ciklusa smrzavanja i odmrzavanja. Mehanizam oštećenja podijelio je u tri faze – nezasićeni uvjeti, proces zasićivanja i zasićeni uvjeti. Uočio je različito ponašanje nezasićenih uzoraka, uzoraka u fazi zasićivanja i potpuno zasićenih uzoraka (*tablica 3.1*)

Tablica 3.1 Deformacije uzoraka betona izloženih ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [8]

		NEZASIĆENI BETON u porama je mala količina vode i nema vode u okolini	PROCES ZASIĆIVANJA pore su djelomično napunjene vodom i dostupna je voda iz okoline	ZASIĆENI BETON pore su potpuno napunjene vodom
SMRZAVANJE	od T_{max} do $0^{\circ}C$	- toplinsko skupljanje betona	- toplinsko skupljanje betona	- toplinsko skupljanje betona
	od $0^{\circ}C$ do $-10^{\circ}C$	- skupljanje betona voda iz malih pora kreće se prema fronti leda – negativni hidraulički tlak zbog male količine vode led ne zauzme cijeli volumen velikih pora, pa ne dolazi do pozitivnog hidrauličkog tlaka.	- blago širenje betona u nekim porama led se širi više od volumena pora – pozitivni hidraulički tlak	- veliko širenje betona voda se smrzava u velikim porama - pojava pozitivnog hidrauličkog tlaka
	ispod $-10^{\circ}C$	- zauzme cijeli volumen velikih pora, pa ne dolazi do pozitivnog hidrauličkog tlaka.	- skupljanje betona led ima manji koeficijent toplinskog širenja od betona – neke od pora koje je led potpuno zauzimao postaju djelomično popunjene ledom – transport vode iz manjih pora – pojava negativnog hidrauličkog tlaka.	- veliko širenje betona voda se smrzava u manjim porama - povećavanje pozitivnog hidrauličkog tlaka
ODMRZAVANJE	od T_{min} do $-5^{\circ}C$	- širenje betona dolazi toplinskog širenja leda koje je veće od toplinskog širenja betona	- širenje betona dolazi do toplinskog širenja leda koje je veće od toplinskog širenja betona	- toplinsko širenje betona
	od $-5^{\circ}C$ do $0^{\circ}C$		- skupljanje betona led se topi, a kako voda zahtijeva manji volumen dolazi do transporta vode iz manjih pora – negativni hidraul. tlak	
	od $0^{\circ}C$ do T_{max}	- toplinsko širenje betona (u okolini nema dostupne vode)	- dodatno širenje zbog kapilarnog upijanja vode iz okoline	



Slika 3.3 Oštećenje betona zbog smrzavanja [10]



Slika 3.3 Oštećenje betona zbog smrzavanja [10]

4 PROJEKTIRANJE BETONA OTPORNOG NA SMRZAVANJE

Kod građevina pod utjecajem atmosferskih djelovanja, čija se otpornost određuje ispitivanjima, od posebne je važnosti koristiti beton otporan na mraz i sol.

Priprema takvih betona uključuje odgovarajući sustav uvučenih zračnih pora, nizak vodocementni faktor, agregat koji ne zahtjeva veću količinu vode, toplinski koeficijent rastezanja koji je kompatibilan toplinskom koeficijentu rastezanja cementnog kamena, visok postotak dovršene hidratacije te pravilna ugradnja. Dodavanjem aeranta betonu povećava se otpornost prema mrazu što se događa zbog svojstva aeranta koji pri miješanju s betonom stvara ravnomjerno raspoređene zračne mjehuriće. Time je vodi omogućeno da ih pri tečenju, zbog započetog procesa smrzavanja, ispuni te na taj način djeluju i kao amortizeri tlaka. Razmak dvaju krajeva mjehurića iznosi 0,10 do 0,20mm (*prema HRN EN 480-11*).

Agregati s niskom poroznošću i velikom čvrstoćom, zbog elastičnih naprezanja u porama manjih od vlačne čvrstoće, ne dovode do oštećenja. Kako kod sitnijeg agregata dio vode pri smrzavanju izlazi i smanjuje tlak, beton sa sitnijim frakcijama otporniji je na djelovanje mraza nego što je beton sa krupnijim agregatom.

U pogledu trajnosti, tehnički propis za betonske konstrukcije oslanja se na normu HRN EN 206-1:2006 Beton – 1.dio: Specifikacije, svojstva , proizvodnja i sukladnost. Prema navedenoj normi djelovanje okoliša na betonske konstrukcije određuje se "razredima izloženosti" (*slika 4.1*). Prema razredima izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi kojih se treba držati pri projektiranju odgovarajućeg sastava betona, te njegova svojstva poput tlačne čvrstoće, minimalne debljine zaštitnog sloja, maksimalnog vodo-cementnog faktora, te minimalnog sadržaja pora i klorida.

5 Korozijska izloženost betonskih konstrukcija smrzavanjem i odmrzavanjem sa ili bez sredstva za odmrzavanje		
Kada je beton izložen značajnom djelovanju smrzavanja i odmrzavanja u vlažnom stanju, razrede izloženosti treba svrstati kako slijedi:		
XF1	Umjereno zasićenje vodom, bez sredstva za odmrzavanje	Vanjski elementi
XF2	Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda	Područja prskanja vode s prometnih površina, sa sredstvom za odleđivanje (ali drugačije od onog za XF4); područje prskanja morskom vodom
XF3	Jako zasićenje vodom, bez sredstva za odmrzavanje	Otvoreni spremnici za vodu, elementi u području kvašenja vodom (slatkovodna jezera i/ili rijeke)
XF4	Jako zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morskom vodom	Prometne površine tretirane sredstvima za odmrzavanje; pretežno vodoravni elementi izloženi prskanju vode s prometnih površina na koja se nanose sredstva za odleđivanje; parkirališne ploče bez zaštitnog sloja ^{b)} ; elementi u području morske plime; mjesta na kojima može doći do struganja u postrojenjima za tretiranje voda iz kanalizacije

Slika 4.1 Razredi izloženosti betonskih konstrukcija (utjecaj smrzavanja, (HRN EN 206-1:2006))

Aditivi koji snižavaju ledište vode i sprječavaju smrzavanje betona na temperaturama nižim od 0°C također imaju ulogu pri projektiranju betona otpornog na smrzavanje. Antifrizne tvari djeluju na način da snižavaju ledište vodene otopine, ali njihova primjena u određenim dozama uzrokuje štetne efekte u očvrslom betonu te se oni više ne koriste. Postoje i kombinacije antifriznih tvari i ubrzivača vezanja, njihov glavni efekt je ubrzanje oslobađanja topline hidratacije cementa. Dodaju se u količini od oko 2% na masu cementa. Budući da zbor cementa i ostalih parametara sastava betona, pogotovo u nepovoljnim uvjetima okoliša, ima utjecaj na trajnost betona, npr. otpornost na smrzavanje, kemijsku otpornost i zaštitu armature, potrebno je zadovoljiti minimalne tehnološke zahtjeve. Minimalni tehnološki zahtjevi, prema kojima se projektira odgovarajući sastav betona kao i svojstva betona (tlačna čvrstoća, minimalni zaštitni sloj, maksimalni vodo-cementni omjera, minimalni sadržaj pora), definirani su prema razredima izloženosti pojedinoga betona. Preporučene vrijednosti prikazane su na slici 4.2.

Razred izloženo sti	Max v/c omjer	Min razred čvrstoće	Min. količina cementa (kg/m ³)	Min količina zraka (%)	Drugi zahtjevi
Nema rizika korozije					
X 0	-	C20/25	-	-	-
Korozija karbonatizacijom					
XC 1	0,65	C25/30	260	-	
XC 2	0,60	C30/37	280	-	
XC 3	0,55	C30/37	280	-	
XC 4	0,50	C30/37	300	-	
Kloridna korozija, morska					
XS 1	0,50	C30/37	300	-	
XS 2	0,45	C35/45	320	-	
XS 3	0,45	C35/45	340	-	
Kloridna korozija, van mora					
XD 1	0,55	C30/37	300	-	
XD 2	0,55	C30/37	300	-	
XD 3	0,45	C35/45	320	-	
Smrzavanje i odmrzavanje					
XF 1	0,55	C30/37	300	-	Agregat prema HRN EN 12620 s dovoljnom otpornošću na smrzavanje
XF 2	0,55	C25/30	300	4,0 ^a	
XF 3	0,50	C30/37	320	4,0 ^a	
XF 4	0,45	C30/37	340	4,0 ^a	
Kemijski agresivni okoliš					
XA 1	0,55	C30/37	300	-	Sulfatno otporni cement ^b
XA 2	0,50	C30/37	320	-	
XA 3	0,45	C35/45	360	-	

Slika 4.2 Preporučene vrijednosti sastava betona prema klasama izloženosti (TPBK)

5 METODE ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA SMRZAVANJE

Metode ispitivanja otpornosti betona na djelovanje smrzavanja mogu biti direktne gdje se ispitivanje provodi izmjeničnim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja očvrsnulog betona prema propisanim normama ili indirektne, mjerenjem sustava zračnih pora (ukupni sadržaj zraka, faktor razmaka, specifična ploština) na očvrnulom (mikroskopske metode) ili svježem betonu (uporabom analizatora zračnih šupljina – AVA uređaj).

5.1 Direktne metode ispitivanja

5.1.1 Ispitivanje ciklusima smrzavanja i odmrzavanja

Ispitivanje otpornosti očvrsnulog betona na mraz vrši se ciklusima smrzavanja i otapanja ispitnih tijela. Kao ispitno tijelo najčešće se koristi kocka duljine brida 15 cm, a može se koristiti i kocka s duljinom brida 20 cm ili valjak s promjerom baze od 15 cm i visinom 15 cm.

Ovo ispitivanje obuhvaća ciklus zamrzavanja u hladnjaku u trajanju od 4 sata na konstantnoj temperaturi od -20°C i odmrzavanja u bazenu u trajanju od 4 sata s vodom konstantne temperature od 20°C za uzorke oblika kocke s bridovima od 15cm i valjka 15/15cm, odnosno u trajanju zamrzavanja od 6 sati na temperaturi od -20°C i odmrzavanja u vodi temperature 20°C u trajanju od 6 sati za uzorke oblika kocke s bridovima 20cm. Nakon određenog broja ciklusa, tijela se ispituju na pritisak [1]. Ukoliko čvrstoća ispitnih tijela iznosi najmanje 75% čvrstoće nesmrzanih ispitinih tijela, ista se smatraju otpornim na pritisak. Broj ciklusa smrzavanja i otapanja pri kojem beton ispuni navedeni uvjet naziva se marka otpornosti na mraz [1]. Broj ciklusa određuje se propisima, za svaku tvar posebno. Prema HRN standardu predviđaju se sljedeće marke otpornosti na mraz (navedene vrijednosti nisu zahtjevi standarda, već preporuke, a marku odabire projektant betonske konstrukcije):

M – 50 za mediteransku klimu

M – 100 za kontinentalnu klimu

M – 150 za planinske krajeve

M – 200 za planinske krajeve



Slika 5.1 Uređaj za ispitivanje otpornosti betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [9]



Slika 5.2 Uređaj za ispitivanje otpornosti betona ciklusima smrzavanja i odmrzavanja [9]

5.2 Indirektne metode ispitivanja

5.2.1 Ispitivanje zračnih šupljina upotrebom analizatora (AVA metoda eng. Air Void Analyzer)

Ova metoda svoj rad temelji na AVA uređaju na način da analizira količinu zračnih pora svježeg betona. Način na koje se to može odviti jest za vrijeme probnog lijevanja bilo to iz miksera betona na gradilištu ili neposredno nakon postupka betoniranja. Da bi izmjerio strukturu zračnih pora svježeg betona, uređaj zahtjeva vrijeme od 25 minuta. Ovim načinom možemo kontrolirati karakteristike zračnih pora te na vrijeme ispraviti sastav betona ako zahtjevi odudaraju od željenog. Vibrirajuća žičana košarica sredstvo je kojim se uzima uzorak morta iz betona.

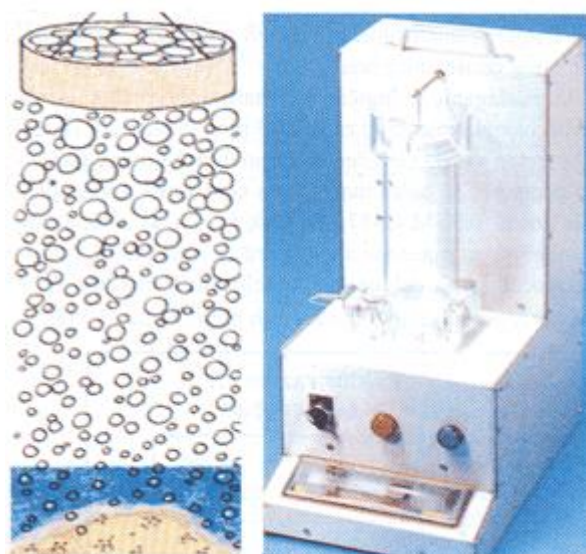
Mort veličine zrna agregata do 6mm ulazi u košaricu u količini od 20cm³ (slika 5.3).



Slika 5.3 Vibrirajuća košarica za uzimanje uzorka [7]

Postupak se odvija na način da se u vertikalnu cijev uvuče uzorak, a na njenom dnu se nalazi plavo obojena viskozna tekućina iznad koje je voda. Miješanjem uzorka s tekućinom pojavljuju se mjehurići zraka brzinom proporcionalno veličini. S obzirom na vrijeme u kojem je određeni broj mjehurića pristigao ispod potopljene plutajuće kugle na računalu, uzgon se mijenja. Veličina mjehurića zraka koji dolaze ispod kugle može varirati od nekoliko µm do nekoliko mm. Mjerimo do postizanja jednakog rezultata bar dvije uzastopne minute (na raspolaganju 25 minuta). Uređaj je programiran da očita ravnotežu te

da proračuna parametre mjehurića zraka (odnosi se na faktor razmaka, specifičnu površinu mjehurića i ukupni volumen zraka; rezultate očitavamo unutar 25 minuta). Uzorke vadimo nakon završnog zbijanja kako bi definirali parametre zračnih pora dobivenih iz jezgre očvrstnalog betona. Treba obratiti pozornost da uzorci od 20cm^3 ne mjere točnu količinu velikih zračnih pora budući da uređaj ne mjeri potpuni udio zraka u betonu. Sukladno tomu ukupni sadržaj zraka dobivenog uređajem ne odgovara zbilji.



Slika 5.4 Analizator zračnih pora i prikaz oslobađanja mjehurića [7]



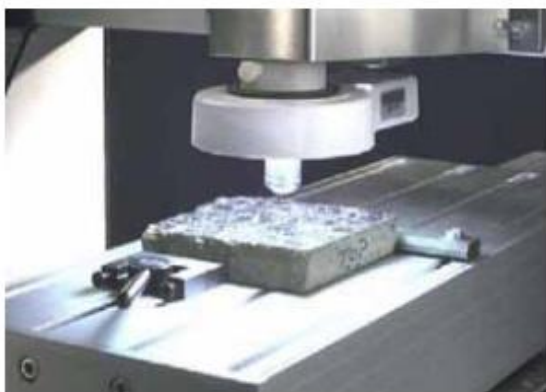
Slika 5.5 Shematski prikaz djelovanja analizatora zračnih pora [7]

5.2.2 Ispitivanje zračnih šupljina mikroskopom

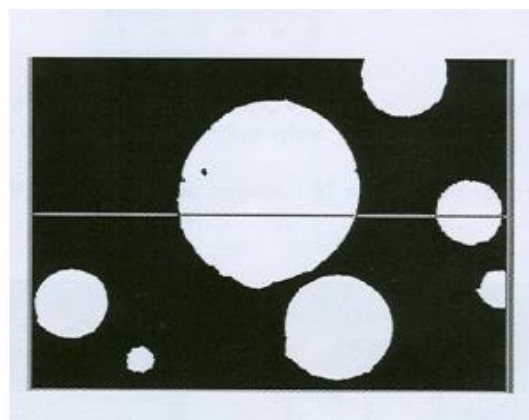
Slika 5.6 prikazuje RapidAir 457 koji omogućuje, u vremenskom periodu od 15 minuta, automatsku analizu sadržaja zraka u očvrslom betonu. Postupak se provodi na način da se izdvoji jezgra koja se zatim reže, brusi i polira, a kao rezultat se dobije ravna i glatka površina oštih bridova. Mikroskop služi kao uređaj za provjeru kvalitete plohe (Slika 5.8). Površina, koja sadrži sloj crne tinte, obojena je tvrdim pečatom. Gumenom se lopaticom, nakon što se uzorak na temperaturi od 55°C zagrijao na površini, stavlja bijela cinkova pasta svojstva otapanja na površini i ispunjavanja pora. Ostavlja se da se ohladi, a potom uklanja uz pomoć ravne čelične lopatice te mikroskopom provjerava crno bijeli kontrast. Uzorak se zatim smješta na pomični podij pod nadzorom videokamere; podij automatski pomiče kontrolna jedinica te skeniranjem očitava podatke o sadržaju zraka, specifičnoj površini i faktoru razmaka.



Slika 5.6 RapidAir 457 uređaj [7]



Slika 5.7 Pripremljen uzorak pozicioniran na uređaju [7]

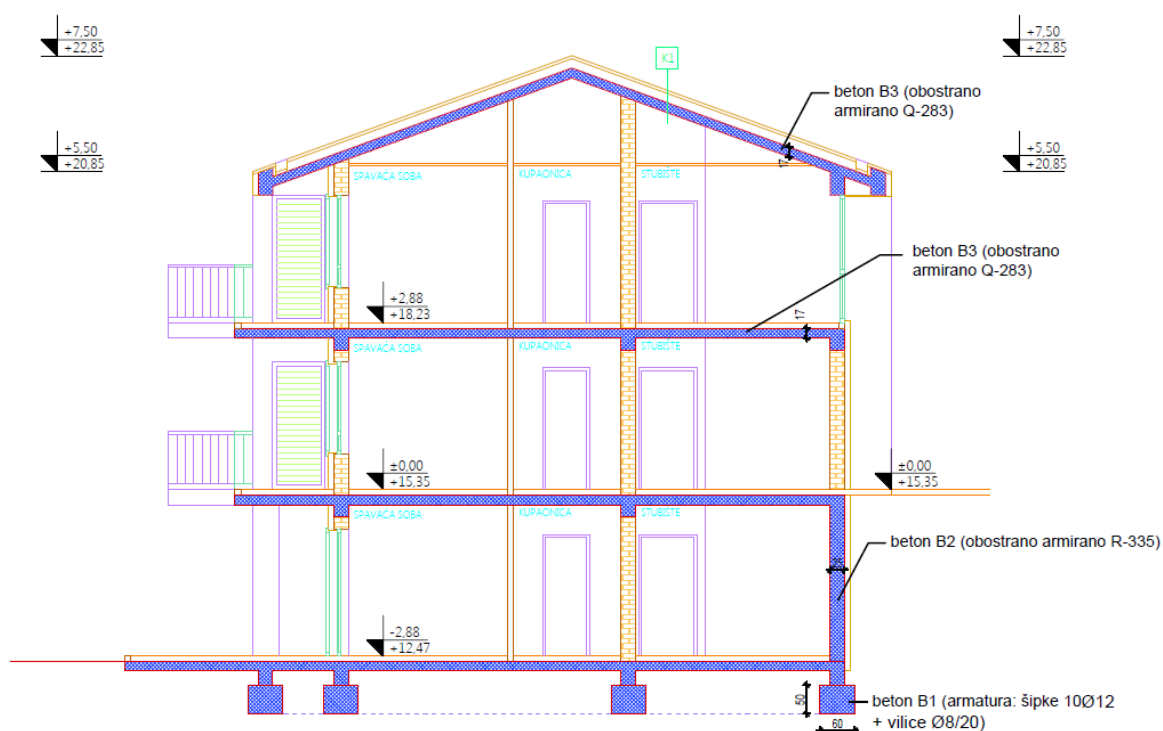


Slika 5.8 Mikroskopski uzorak [7]

6 PRORAČUN SASTAVA BETONSKE MJEŠAVINE

U nastavku se vrši proračun sastava betona za obiteljsku kuću prema skici (Slika 6.1.). Proračun pojedinog sastava betona vrši se u skladu s tehničkim propisom za betonske konstrukcije, koji propisuje tehnička svojstva i ostale zahtjeve bitne za beton koji se ugrađuje u konstrukciju. Građevina se nalazi u kontinentalnoj klimi s mogućnošću smrzavanja. Projektom konstrukcije definirana su tri tipa betona za koja vršimo proračun:

1. Beton za temeljenje – B1
2. Beton za zid podruma – B2
3. Beton za međukatnu konstrukciju – B3



Slika 6.1. Prikaz građevine i armiranobetonskih elemenata za koje se vrši proračun

Na raspolaganju su sljedeći materijali

Cement: CEM II/B-S 42.5 N

Agregat: Klis kosa 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 mm

Granulometrijska krivulja: Fuller

Beton: C30/37

Također je preporučena upotreba superplastifikatora BASF MasterGlenium Sky 626 u dozi 0,8-1,4 % mase cementa i gustoće 1,060-1,100 g/ml

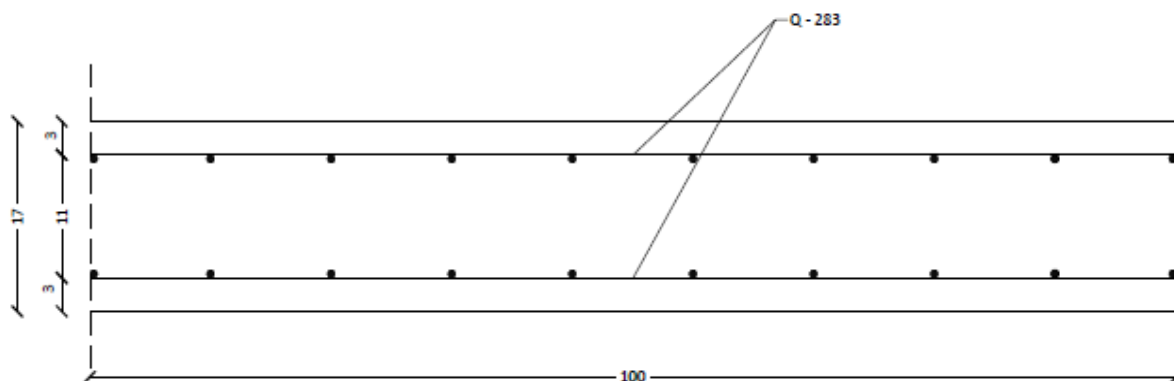
Tablica 6.1. Granulometrijski sastav agregata

Frak. br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	31.5	63
1	0 - 4	12.8	21.2	34.8	55.4	81.9	99.2	100	100	100	100
2	4 - 8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	9.4	98.2	100	100	100
3	8 - 16	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	19.3	92.0	100	100
4	16 - 31.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	17	100	100

Tablica 6.2. Apsorpcija i vlažnost agregata

Frakcija [mm]	Apsorpcija [%]	Vlažnost [%]
0 - 4	1.50	0.15
4 - 8	1.25	0.25
8 - 16	0.75	0.10
16 - 31.5	0.40	0.12

6.1 Beton za međukatnu konstrukciju – B3



Slika 6.2. Poprečni presjek armiranobetonske međukatne konstrukcije

6.1.1 ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA $D_{\max}$

Uvjeti za određivanje maksimalnog zrna agregata

- maksimalno zrno agregata ne smije biti veće od radijusa kalupa betonskog elementa $R=V/A$ (u cm)
- maksimalno zrno agregata ne smije biti veće od 0,8 horizontalnog razmaka armature $a_{\min}$
- maksimalno zrno agregata ne smije biti veće od 1/4 najmanje dimenzije elementa h (ili 1/3 debljine ploče d_{pl})
- maksimalno zrno agregata ne smije biti veće od debljine zaštitnog sloja betona c

$$V = 17 \times 100 \times 100 - \frac{0,6^2 \pi}{4} \times 100 \times \frac{100}{10} \times 4 = 168869,03 \text{ cm}^3$$

$$A = 100 \times 100 \times 2 + 0,6\pi \times 100 \times \frac{100}{10} \times 4 = 27539,82 \text{ cm}^2$$

$$R = \frac{V}{A} = \frac{168869,03}{27539,82} = 6,13 \text{ cm}$$

Uvjeti:

$$D_{\max} \leq R = 61,3\text{mm}$$

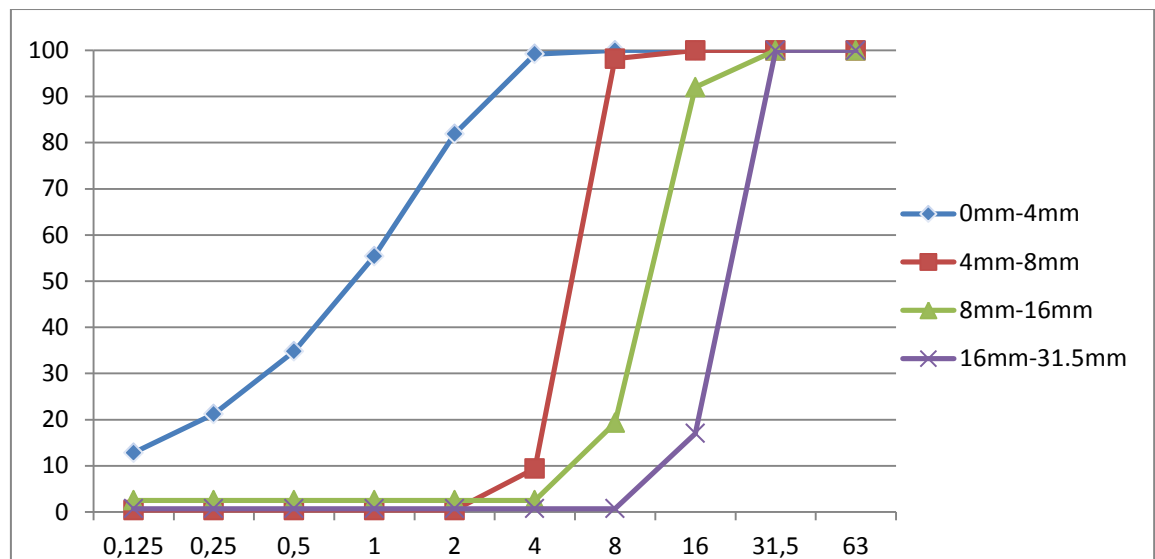
$$D_{\max} \leq 0,8a_{\min} = 80\text{mm}$$

$$D_{\max} \leq 1/3 d_{\text{pl}} = 1/3 \times 170 = 56,67 \text{ mm}$$

$$D_{\max} \leq c = 30\text{mm}$$

⇒ Odabrano je $D_{\max}=16\text{mm}$

6.1.2 NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA



Slika 6.3. Granulometrijske krivulje pojedinih frakcija

Prema granulometrijskoj krivulji Fuller određen je zadani sastav agregata te je prikazan u sljedećoj tablici:

$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Tablica 6.3. Zadani sastav agregata

	ZADANI SASTAV AGREGATA (%)								
Sito	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Zadano	8,84	12,50	17,68	25,00	35,36	50,00	70,71	100,00	100,00

EGZAKTNI PRORAČUN:

Gornja nazivna veličina najsitnije frakcije $D=4\text{mm}$

Koeficijenti zrnatosti stvarnog sastava mješavine frakcija

$$K_1 = (12,8 + 21,2 + 34,8 + 55,4 + 81,8 + 99,2) / 100 = 3,05$$

$$K_2 = (0,4 + 0,4 + 0,4 + 0,4 + 9,4) / 100 = 0,11$$

$$K_3 = (2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5) / 100 = 0,15$$

Koeficijent zrnatosti idealnog sastava do granice D_1

$$K_0 = (8,8 + 12,5 + 17,7 + 25,0 + 35,4 + 50,0) / 100 = 1,49$$

Sustav jednadžbi:

$$3,05X_1 + 0,11X_2 + 0,15X_3 = 1,49$$

$$100X_1 + 98,2X_2 + 19,3X_3 = 70,71$$

$100X_1 + 100X_2 + 100X_3 = 100$ <= Budući da se prolazi na situ $D=16\text{mm}$ ne mogu izjednačiti, mora se uzeti $p_{316}=100$.

Rješenja:

$$X_1 = 46\%$$

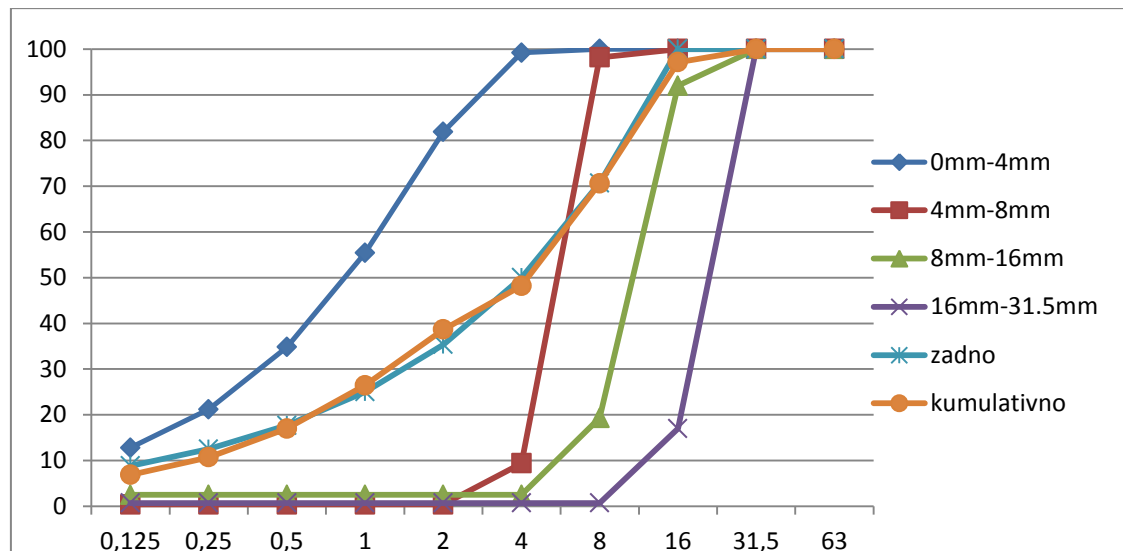
$$X_2 = 18\%$$

$$X_3 = 36\%$$

Suma: 100%

Tablica 6.4. Kumulativni sastav agregata

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
0-4	0,46	5,888	9,752	16,008	25,484	37,67	45,632	46	46	46	46
4-8	0,18	0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	1,692	17,676	18	18	18
8-16	0,36	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	6,948	33,12	36	36
16-31,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ukupno	100	6,9	10,7	17,0	26,5	38,6	48,2	70,6	97,1	100,0	100,0



Slika 6.4. Granulometrijska krivulja agregata

6.1.3 ODABIR KOMPONENTI BETONA

6.1.3.1 Uvjet čvrstoće betona

Zahtijevana klasa betona je 30/37

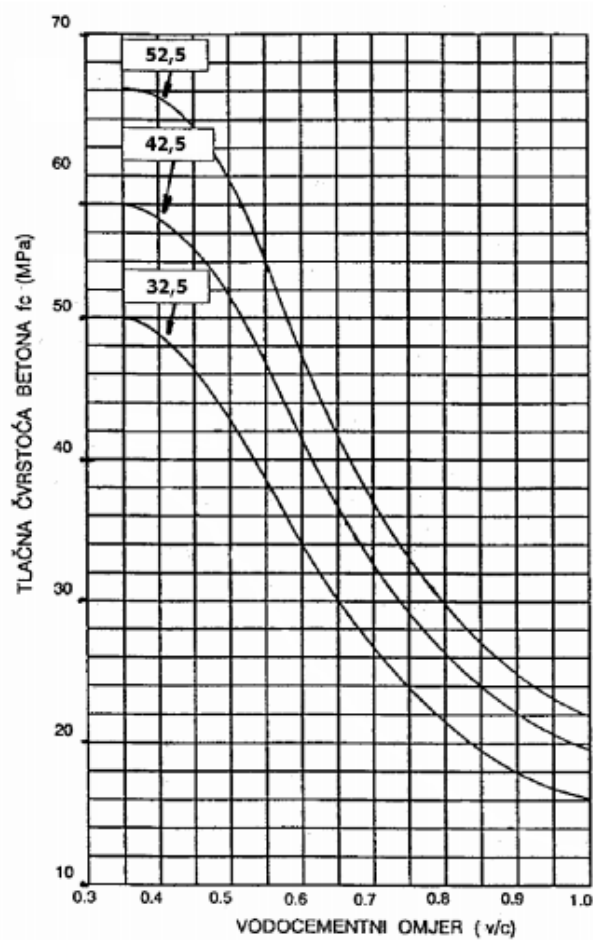
Uvjet: $f_{cm} > f_{ck} + (6 \text{ do } 12)$

$$f_{cm} > 37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2$$

Razred čvrstoće cementa: CEM II/B-S 42.5 N

Ovisnost tlačne čvrstoće betona i vodo-cementnog omjera za različite razrede cementa iskazana je Walz-ovim dijagramom (Slika 6.5). Prema dobivenoj tlačnoj čvrstoći betona i razredu čvrstoće cementa očitamo w/c omjer.

Očitani w/c omjer: 0,57



Slika 6.5 Walz-ov dijagram

6.1.3.2 Uvjet trajnosti

Razred izloženosti: XF2

Opis okoliša: Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda

Prema razredu izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi prema kojima se treba projektirati odgovarajući sastav betona (Slika 6.6).

Razred izloženosti	Max. W/C omjer	Min. razred čvrstoće	Min. kol. cementa (kg/m ³)	Min kol. zraka (%)	Drugi zahtjevi
XF2	0.55	C25/30	300	4.0	-

Slika 6.6 Minimalni tehnološki uvjeti za određeni razred izloženosti

Napomena: Budući da područje razreda izloženosti ima rizika od smrzavanja, potrebno je dodati aerant, za maksimalno zrno $D_{\max}=16\text{mm}$ odabran je sadržaj uvučenog zraka 6,0% (Tablica 6.5).

Tablica 6.5 Količina mikropora uvučenog zraka u odnosu na najveću frakciju agregata

Najveća frakcija agregata (mm)	Količina pora (%)	
	Uvučeni zrak (aerirani beton)	Zahvaćeni zrak (ne aerirani zrak)
32-63	2-3	0,4
16-32	3-5	1,5
8-16	5-7	2,5
4-8	7-10	2-3

6.1.3.3 Uvjet obradivosti

Tip konstrukcija: armiranobetonska međukatna konstrukcija

ODABRANO (Slika 6.7, Slika 6.8):

Transportna sredstva: pumpa, posuda na kranu

Preporučena konzistencija: 60-120mm

Razred konzistencije svježeg betona: S2

Tip konstrukcije	Transportna sredstva	Konzistencija -slijeganje, (mm)
Slaboarmirani ili nearmirani temelji i blokovi	trake, specijalne posude	10 - 50
Armirani temelji, zidovi, ploče, stupovi	pumpa, posuda na kranu	60 - 120
Jako armirani presjeci stupova i greda	pumpa, posuda na kranu	80 - 160
Kolničke ploče, industrijski podovi	trake kamioni	10 - 50
Betoniranje pod vodom	pumpe cijevi	120 - 180
Masivni hidrotehnički betoni	trake, kamioni, silobusi	10 - 50
Zalijevanje sidara, podlijevanje ploča strojeva	posude	130 - 200

Slika 6.7 Odabir slijeganja prema tipu konstruktivnog elementa

RAZREDI KONZISTENCIJE							
Razredi slijeganjem		Vebe razredi		Razredi zbijanjem		Razredi rasprostiranjem	
Razred	Slijeganje (mm)	Razred	Vebe vrijeme (s)	Razred	Stupanj zbijenosti	Razred	Promjer rasprostiranja (mm)
S1	10 do 40	V0	≥ 31	C0	$\geq 1,46$	F1	≤ 340
S2	50 do 90	V1	30 do 21	C1	1,45 do 1,26	F2	350 do 410
S3	100 do 150	V2	20 do 11	C2	1,25 do 1,11	F3	420 do 480
S4	160 do 210	V3	10 do 6	C3	1,10 do 1,04	F4	490 do 550
S5 ¹⁾	≥ 220	V4	5 do 3	C4	$< 1,04$	F5	560 do 620
-	-	-	-	-	-	F6	≥ 630

Slika 6.8 Razredi konzistencije svježeg betona

Za drobljeni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller, maksimalno zrno agregata $D_{\max}=16\text{mm}$ i razred konzistencije S2, odabrano je 185 litara potrebne količine vode za 1m^3 betona (Slika 6.9).

Dodavanjem superplastifikatora BASF MasterGlenium Sky 629 redukcija potrebne količine vode iz uvjeta obradivosti je za 10% $\Rightarrow 166,5\text{l}$

LITARA VODE ZA 1m^3 SVJEŽEG BETONA						
Granična linija	Drobljeni agregat			Riječni agregat		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
A 63	120	145	160	95	125	140
A 32	130	155	175	105	135	150
A 16	140	170	190	120	155	175
A 8	155	190	210	150	185	205
B 63	135	160	180	115	145	165
B 32	140	175	195	130	165	185
B 16	150	185	205	140	180	200
B 8	175	205	225	170	200	220
C 63	145	180	200	135	175	190
C 32	165	200	220	160	195	215
C 16	185	215	235	175	205	225
C 8	200	230	250	185	215	235

Slika 6.9 Približna količina vode za 1m^3 betona u ovisnosti maksimalnog zrna i konzistencije slijeganja

6.1.4 ODABRANE KOMPONENTE

Prethodno odabrane komponente za sastav betona B3 prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 6.6 Prikaz odabranih komponenti za sastav betona B3

Vrsta cementa	CEM II/B-S 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	16
Udio zraka u betonu (%)	6 %
w/c omjer uvjet čvrstoće	0,57
uvjet trajnosti	0,55
odabrano	0,55
Količina vode za 1 m ³ betona (lit)	166,5
Količina cementa uvjet čvrstoće	303
uvjet trajnosti	300
odabrano	303

6.1.5 RECEPTURA

Proračun sastava betona B3 prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.7 Proračun sastava betona B3

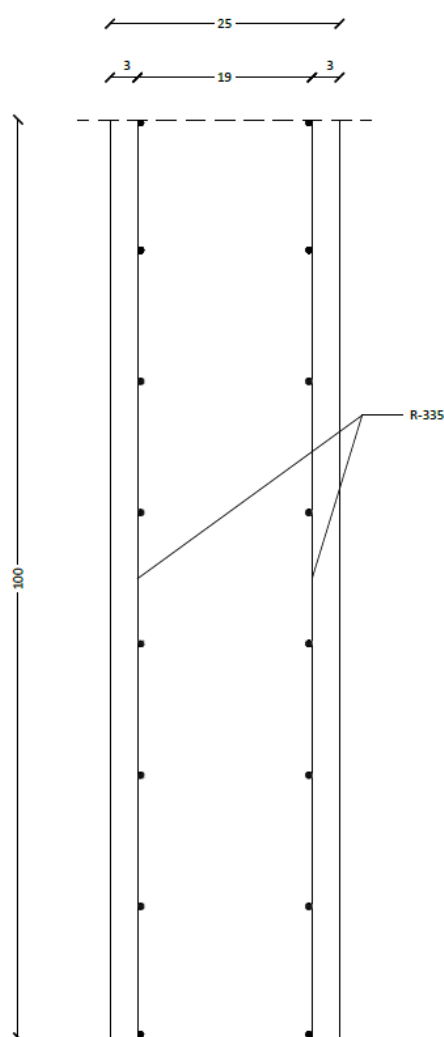
SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm ³)	VOLUMEN (dm ³)
Cement CEM II 42,5 N	303	3,10	97,74
Voda	166,5	1,00	166,5
w/c 0,55			
Dodaci Superplastifikator: MasterGlenium Sky 629 0,9%Mc	2,73	1,10	2,48
Zrak 6,0%	0	0	60
Agregat	1817,86	2,70	673,28
Ukupno	2290,09		1000

Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.8 Proračun korekcije vlažnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGIRANA MASA
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	46	836,2156	1,5	12,5432	0,15	1,25432	824,9266894
4-8	18	327,2148	1,25	4,09019	0,25	0,81804	323,942652
8-16	36	654,4296	0,75	4,90822	0,1	0,65443	650,1758076
VODA		166,5		21,5416		2,72679	147,685149

6.2 Beton za zid podruma - B2



Slika 6.10 Poprečni presjek armiranobetonskog zida podruma

6.2.1 ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA $D_{\max}$

$$V = 25 \times 100 \times 100 - \frac{0,8^2 \pi}{4} \times 100 \times \frac{100}{15} \times 2 - \frac{0,5^2 \pi}{4} \times 100 \times \frac{100}{25} \times 2$$

$$= 249172,71 \text{ cm}^3$$

$$A = 100 \times 100 \times 2 + 0,8 \pi \times 100 \times \frac{100}{15} \times 2 + 0,5 \pi \times 100 \times \frac{100}{25} \times 2 = 24607,67 \text{ cm}^3$$

$$R = \frac{249172,71}{24607,67} = 10,13 \text{ cm}$$

Uvjeti:

$$D_{\max} \leq R = 101,3 \text{ mm}$$

$$D_{\max} \leq 0,8 a_{\min} = 120 \text{ mm}$$

$$D_{\max} \leq 1/4 h_{\min} = 1/4 \times 250 = 62,5 \text{ mm}$$

$$D_{\max} \leq c = 30 \text{ mm}$$

⇒ Odabrano je $D_{\max} = 16 \text{ mm}$

6.2.2 NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA

Uvjeti granulometrije agregata za beton B2 su isti kao i uvjeti granulometrije agregata za beton B3 pa se primjenjuju prethodno izračunata učešća frakcija iz proračuna sastava betona B3:

$$X_1 = 46\%$$

$$X_2 = 18\%$$

$$X_3 = 36\%$$

6.2.3 ODABIR KOMPONENTI BETONA

6.2.3.1 Uvjet čvrstoće

Zahtijevana klasa betona je 30/37

Uvjet: $f_{\text{cm}} > f_{\text{ck}} + (6 \text{ do } 12)$

$$f_{\text{cm}} > 37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2$$

Razred čvrstoće cementa: CEM II/B-S 42.5 N

Očitani w/c omjer: 0,57 (Waltz-ov dijagram, *Slika 6.5*)

6.2.3.2 Uvjet trajnosti

Budući da je razred izloženosti betona B2 jednak razredu izloženosti betona B3, usvajaju se određeni parametri iz proračuna sastava betona B3 (*Slika 6.6*)

Razred izloženosti: XF2

Opis okoliša: Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda.

Max. w/c omjer: 0,55

Minimalna količina cementa: 300kg/m³

Potrebno je dodati aerant te je za maksimalno zrno $D_{\max}=16\text{mm}$ odabran sadržaj uvučenog zraka 6% (*Tablica 6.5*).

6.2.3.3 Uvjet obradivosti

Tip konstrukcije (*Slika 6.6*): armiranobetonski zid

ODABRANO (*Slika 6.6, Slika 6.7*):

Transportna sredstva: pumpa, posuda na kranu

Preporučena konzistencija: 60-120mm

Razred konzistencije svježeg betona: S2

Za drobljeni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller, maksimalno zrno agregata $D_{\max}=16\text{mm}$ i razred konzistencije S2, odabrano je 185 litara potrebne količine vode za 1m³ betona (*Slika 6.9*).

Dodavanjem superplastifikatora BASF MasterGlenium Sky 629 redukcija potrebne količine vode za 10% $\Rightarrow 166,5\text{l}$

6.2.4 ODABRANE KOMPONENTE

Prethodno odabrane komponente za sastav betona B3 prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 6.9 Prikaz odabranih komponenti za sastav betona B2

Vrsta cementa	CEM II/B-S 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	16
Udio zraka u betonu (%)	6 %
w/c omjer uvjet čvrstoće	0,57
uvjet trajnosti	0,55
odabrano	0,55
Količina vode za 1 m ³ betona (lit)	166,5
Količina cementa uvjet čvrstoće	303
uvjet trajnosti	300
odabrano	303

6.2.5 RECEPTURA

Proračun sastava betona B3 prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.10 Proračun sastava betona B3

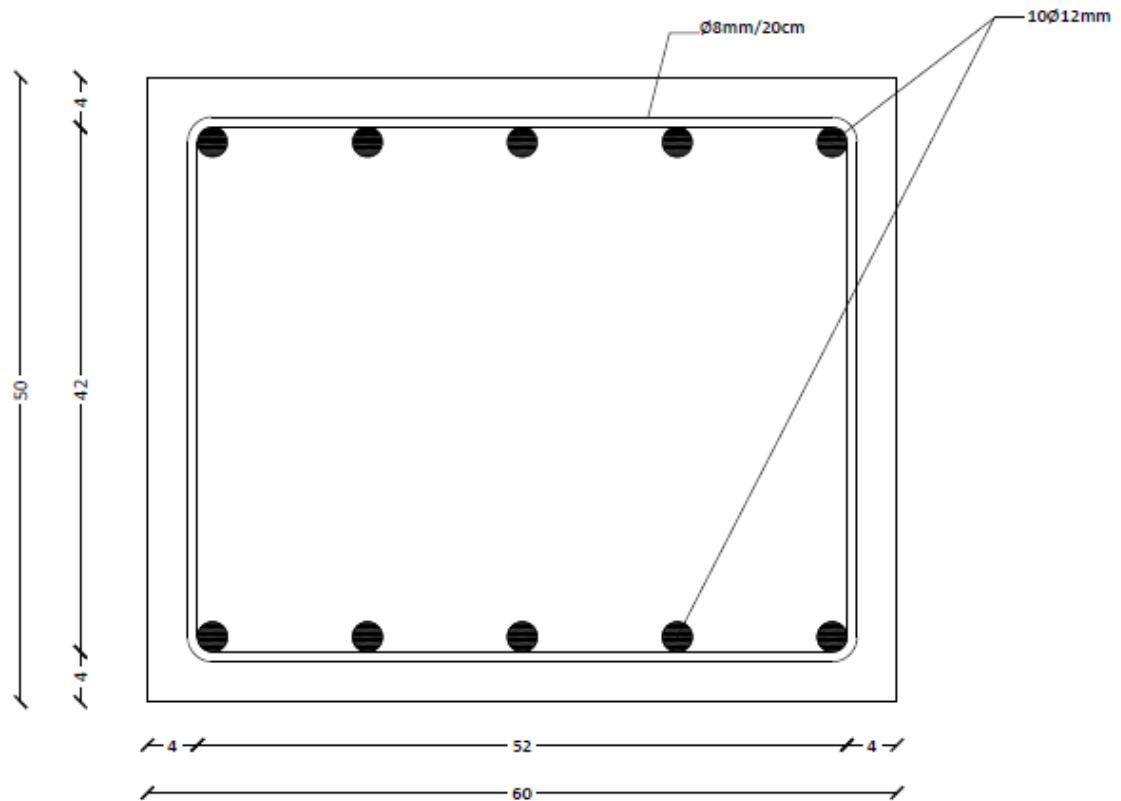
SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm ³)	VOLUMEN (dm ³)
Cement CEM II 42,5 N	303	3,10	97,74
Voda	166,5	1,00	166,5
w/c 0,55			
Dodaci Superplastifikator: MasterGlenium Sky 629 0,9%Mc	2,73	1,10	2,48
Zrak 6,0%	0	0	60
Agregat	1817,86	2,70	673,28
Ukupno	2290,09		1000

Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.11 Proračun korekcije vlažnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGIRANA MASA
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	46	836,2156	1,5	12,5432	0,15	1,25432	824,9266894
4-8	18	327,2148	1,25	4,09019	0,25	0,81804	323,942652
8-16	36	654,4296	0,75	4,90822	0,1	0,65443	650,1758076
VODA		166,5		21,5416		2,72679	147,685149

6.3 Beton za temeljenje – B1



Slika 6.11 Poprečni presjek armiranobetonskog temelja

6.3.1 ODREĐIVANJE MAKSIMALNOG ZRNA AGREGATA $D_{\max}$

$$V = 60 \times 50 \times 100 - \frac{1,2^2 \pi}{4} \times 100 \times 10 - \frac{0,8^2 \pi}{4} \times (52,8 + 42,8) \times 2 \times \frac{100}{20}$$

$$= 298388,49 \text{ cm}^3$$

$$A = 60 \times 100 \times 2 + 50 \times 100 \times 2 + 1,2 \pi \times 100 \times 10 + 0,8 \pi \times (52,8 + 42,8) \times 2$$

$$\times \frac{100}{20} = 28172,60 \text{ cm}^2$$

$$R = \frac{V}{A} = \frac{298388,49}{28172,60} = 10,59 \text{ cm}$$

Uvjeti:

$$D_{\max} \leq R = 105,9\text{mm}$$

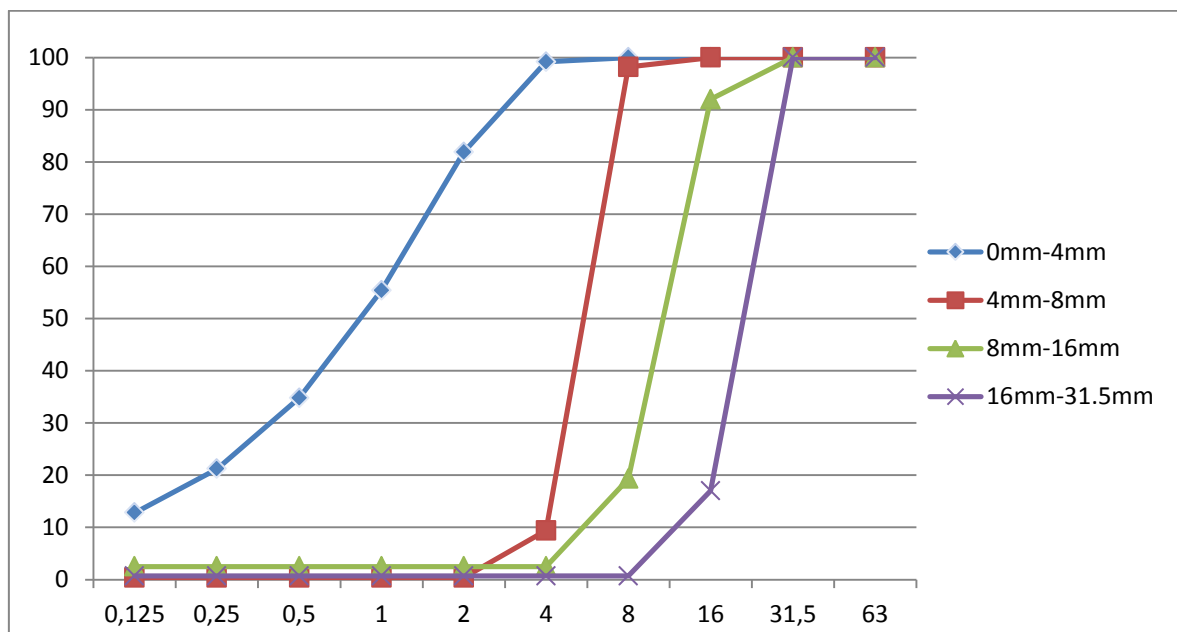
$$D_{\max} \leq 0,8a_{\min} = 32\text{mm}$$

$$D_{\max} \leq 1/4 h_{\min} = 1/4 \times 500 = 125\text{mm}$$

$$D_{\max} \leq c = 40\text{mm}$$

⇒ Odabrano je $D_{\max}=31,5\text{ mm}$

6.3.2 NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA



Slika 6.12 Granulometrijske krivulje pojedinih frakcija

Prema granulometrijskoj krivulji Fuller određen je zadani sastav agregata te je prikazan u sljedećoj tablici:

Tablica 6.12 Zadani sastav agregata

	ZADANI SASTAV AGREGATA (%)								
Sito	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Zadano	6,30	8,91	12,60	17,82	25,20	35,63	50,40	71,27	100,00

EGZAKTNI PRORAČUN:

Gornja nazivna veličina najsitnije frakcije $D=4\text{mm}$

Koeficijenti zrnatosti stvarnog sastava mješavine frakcija

$$K_1 = (12,8 + 21,2 + 34,8 + 55,4 + 81,9 + 99,2) / 100 = 3,05$$

$$K_2 = (0,4 + 0,4 + 0,4 + 0,4 + 0,4 + 9,4) / 100 = 0,11$$

$$K_3 = (2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5 + 2,5) / 100 = 0,15$$

$$K_4 = (0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,7 + 0,7) / 100 = 0,04$$

Koeficijent zrnatosti idealnog sastava do granice D_1

$$K_o = (6,3 + 8,9 + 12,6 + 17,8 + 25,2 + 35,6) / 100 = 1,06$$

Sustav jednadžbi:

$$3,05X_1 + 0,11X_2 + 0,15X_3 + 0,04X_4 = 1,06$$

$$100X_1 + 98,2X_2 + 19,3X_3 + 0,7X_4 = 50,4$$

$$100X_1 + 100X_2 + 92,0X_3 + 17X_4 = 71,3$$

$$100X_1 + 100X_2 + 100 + 100X_4 = 100$$

Rješenja:

$$X_1 = 33\%$$

$$X_2 = 13\%$$

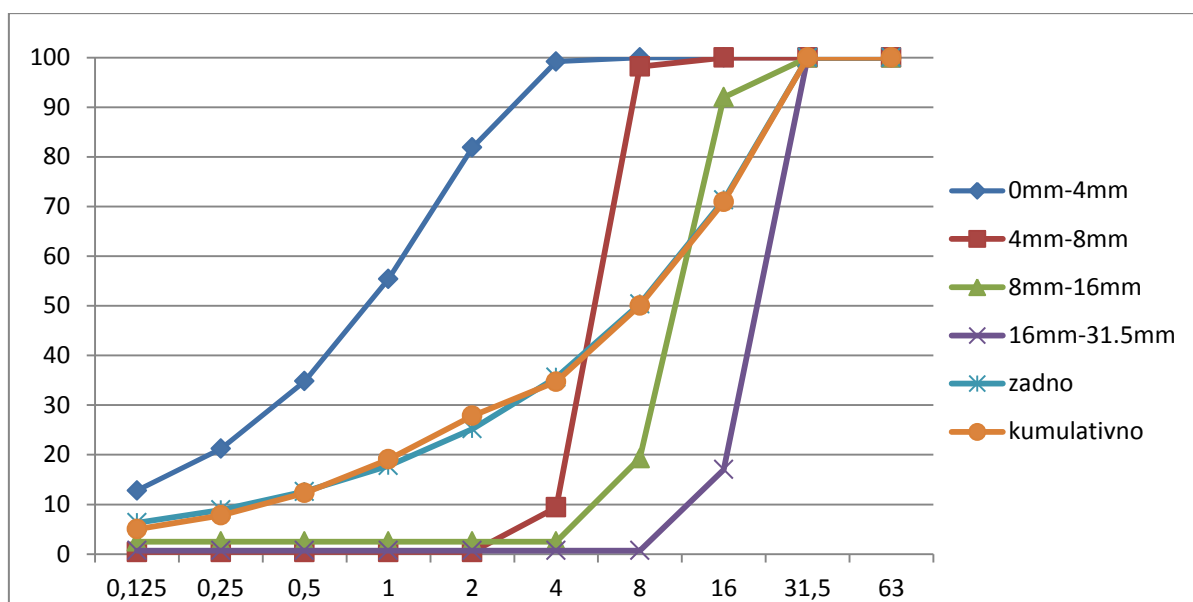
$$X_3 = 21\%$$

$$X_4 = 33\%$$

Suma: 100%

Tablica 6.13 Kumulativni sastav agregata

Frak.br.	Veličina	GRANULACIJA - PROLAZ U %									
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
0-4	0,33	4,224	6,996	11,484	18,282	27,027	32,736	33	33	33	33
4-8	0,13	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	1,222	12,766	13	13	13
8-16	0,21	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	0,525	4,053	19,32	21	21
16-31,5	0,33	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	0,231	5,61	33	33
ukupno	100	5,0	7,8	12,3	19,1	27,8	34,7	50,1	70,9	100,0	100,0



Slika 6.13 Granulometrijska krivulja agregata

6.3.3 ODABIR KOMPONENTI BETONA

6.3.3.1 Uvjet čvrstoće

Zahtijevana klasa betona je 30/37

Uvjet: $f_{cm} > f_{ck} + (6 \text{ do } 12)$

$$f_{cm} > 37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2$$

Razred čvrstoće cementa: CEM II/B-S 42.5 N

Očitani w/c omjer: 0,57 (Waltz-ov dijagram, Slika 6.5)

6.3.3.2 Uvjet trajnosti

Prema razredu izloženosti dani su minimalni tehnološki zahtjevi prema kojima se treba projektirati odgovarajući sastav betona (Slika 6.6).

Razred izloženosti: XF2

Opis okoliša: Umjereno zasićenje vodom, sa sredstvom za odmrzavanje ili morska voda.

Max w/c omjer: 0,55

Minimalna količina cementa: 300kg/m³

Napomena: Budući da područje razreda ima rizika od smrzavanja, potrebno je dodati aerant, za maksimalno zrno $D_{max}=31,5\text{mm}$ odabran je sadržaj uvučenog zraka 4% (Tablica 6.5).

6.3.3.3 Uvjet obradivosti

Tip konstrukcije: armiranobetonski temelj

ODABRANO (Slika 6.7, Slika 6.8):

Transportna sredstva: pumpa, posuda na kranu

Preporučena konzistencija: 60-120mm

Razred konzistencije: S2

Za drobljeni agregat, granulometrijsku krivulju Fuller, maksimalno zrno agregata $D_{\max}=31,5\text{mm}$ i razred konzistencije S2, odabrano je 175 litara potrebne količine vode za 1m^3 betona (Slika 6.9).

Dodavanjem superplastifikatora BASF MasterGlenium Sky 629 redukcija potrebne količine vode iz uvjeta obradivosti je za 10% $\Rightarrow 157,5\text{l}$

6.3.4 ODABRANE KOMPONENTE

Prethodno odabrane komponente za sastav betona B1 prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 6.14 Prikaz odabranih komponenti za sastav betona B1

Vrsta cementa	CEM II/B-S 42.5
Vrsta agregata	Drobljeni agregat
Najveće zrno agregata (mm)	31,5
Udio zraka u betonu (%)	4 %
w/c omjer	uvjet čvrstoće
uvjet trajnosti	0,57
odabrano	0,55
Količina vode za 1 m^3 betona (lit)	0,55
Količina cementa	157,5
uvjet čvrstoće	286,36
uvjet trajnosti	300
odabrano	300

6.3.5 RECEPTURA

Proračun sastava betona B1 prikazan je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.15 Proračun sastava betona B1

SASTAV	MASA (kg)	GUSTOĆA (kg/dm ³)	VOLUMEN (dm ³)
Cement CEM II 42,5 N	300	3,10	96,77
Voda	157,5	1,00	157,5
w/c 0,55			
Dodaci Superplastifikator: MasterGlenium Sky 629 0,9%Mc	2,70	1,10	2,45
Zrak 4,0%	0	0	40
Agregat	1898,86	2,70	703,28
Ukupno	2359,1		1000

Korekcija za vlažnost i apsorpciju agregata prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 6.16 Proračun korekcije vlažnosti i apsorpcije agregata

SASTAV	MASA		APSORPCIJA		VLAŽNOST		KORIGIRANAMASA
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg
0-4	33	625,35	1,5	9,380201	0,15	0,93802	616,9045196
4-8	13	246,35	1,25	3,079359	0,25	0,615872	243,885213
8-16	21	397,95	0,75	2,984609	0,1	0,397948	395,3612387
16-31.5	22	416,9	0,4	1,667591	0,12	0,500277	415,7304862
VODA		157,5		17,11176		2,452117	142,8403574

6.4 Sumarni prikaz odabranih komponenti betona

Tablica 6.17 Sumarni prikaz odabranih komponenti betona

SVOJSTVA	BETON B1	BETON B2	BETON B3
Klasa betona	C30/37	C30/37	C30/37
Vrsta cementa	CEM II 42,5 N	CEM II 42,5 N	CEM II 42,5 N
Masa cementa	300 kg	303 kg	303 kg
w/c	0,55	0,55	0,55
Dmax	31,5 mm	16 mm	16 mm
Razred konzistencije	S2	S2	S2
Udio zraka (%)	4%	6%	6%
Masa agregata	1898,86 kg	1817,86 kg	1817,86 kg

7 ZAKLJUČAK

Kroz svoj vijek, beton je izložen raznim djelovanjima i temperaturama te je pri projektiranju i izvođenju potrebno voditi računa o tome da se postupa u skladu s tehničkim propisima i normama. Pri betoniranju na niskim temperaturama, svježi beton potrebno je zaštititi od smrzavanja te osigurati povoljne uvjete za očvršćivanje betona. Bitno je da beton dostigne dovoljnu čvrstoću kojom će se suprotstaviti širenju vode pri prelasku u led.

Kod metoda ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje uočeno je da je najpovoljnije korištenje analizatora zračnih pora jer se uzorci mogu uzeti na bilo kojem mjestu te je u fazi pripremanja moguće korigirati sastav betona, a time izbjeći naknadne sanacije.

Iz provedenih proračuna sastava betona pojedinog betonskog elementa obale iz poglavlja 6., vidljiv je udio pojedine komponente betonske mješavine. Od navedenih materijala od kojih se beton proizvodi, najveći udio u betonu ima agregat, zauzimajući 75% smjese betona. 25% betonske mješavine sačinjava cementi kamen, mješavina cementa i vode. Najmanji udio u sastavu imaju kemijski i mineralni aditivi. Također je vidljiv utjecaj aditiva na smanjenje potrebne količine vode koja dodatno uzrokuje smanjenje količine ostalih komponenti sastava betonske smjese. Pri tome se postiže ekonomična izrada betonske smjese i bolja konzistencija svježeg betona.

8 LITERATURA

- [1] Krstulović P. (2000.) Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split
- [2] Ukrainczyk V.(1994.): BETON; Struktura, Svojstva, Tehnologija, ALCOR, Zagreb
- [3] Holcim; Cement. Beton. Agregat.
https://www.holcim.hr/sites/croatia/files/documents/Holcim_Betoniranje_po_hladnom_vre_menu.pdf
- [4] Krstulović P., Juradin S.: ZAPISI S PREDAVANJA, GRAĐEVINSKI MATERIJALI, Građevinsko arhitektonski fakultet
- [5] Vidaković D: BETONIRANJE PRI VISOKIM I NISKIM TEMPERATURAMA, Građevinski fakultet Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku
<http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/tehnologija-i-strojevi-za-gradjenje/Betoniranje-EkstremneTEMPERAT.pdf>
- [7] Uzelac, S., Trubić, A. H., Šustić, I. (2007): Metode ispitivanja otpornosti betona na smrzavanje
- [8] Ilile M., Sekulić D: Mehanizmi i modeliranje oštećenja betona djelovanjem smrzavanja
- [9] <http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Durability:Slabtester>
- [10] <https://civildigital.com/freeze-thaw-damage-concrete-effects-preventive-measures/>
- [11] Beslač J: MATERIJALI U ARHITEKTURI I GRAĐEVINARSTVU, Školska knjiga, Zagreb