

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Ronkalj, B. 2012. Vpliv kemijske agresije na beton pri različnih temperaturah. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentorica Prinčič, T.): 49 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Ronkalj, B. 2012. Vpliv kemijske agresije na beton pri različnih temperaturah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Prinčič, T.): 49 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER

Kandidat:

BORIS RONKALJ

**VPLIV KEMIJSKE AGRESIJE NA BETON PRI
RAZLIČNIH TEMPERATURAH**

Diplomska naloga št.: 3271/PS

**THE INFLUENCE OF CHEMICAL AGGRESSION ON
THE CONCRETE AT DIFFERENT TEMPERATURE**

Graduation thesis No.: 3271/PS

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

Tina Prinčič, univ. dipl. inž. kem. tehnol.

Član komisije:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

doc. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 20. 12. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani BORIS RONKALJ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »VPLIV KEMIJSKE AGRESIJE NA BETON PRI RAZLIČNIH TEMPERATURAH«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani.

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

Ajdovščina, 13.8. 2012

Boris Ronkalj

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 54:691.3(043.2)
Avtor: Boris Ronkalj
Mentor: izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Somentor: Tina Prinčič, univ. dipl. inž. kem. inž.
Naslov: Vpliv kemijske agresije na beton pri različnih temperaturah
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 49 str., 27 sl., 10 pregl., 7 graf.
Ključne besede: beton, elastični modul, korozija, trdnost, temperatura.

Izvleček:

V diplomski nalogi smo spremljali, kako se mikrostruktura betona spreminja zaradi izpostavljenosti kislinskemu okolju pri normalni in povišani temperaturi. Te spremembe smo ocenili s spreminjanjem dinamičnega modula elastičnosti s časom. Določili smo tudi tlačno trdnost betona in njegovo odpornost proti prodoru vode. Dobljeni rezultati so bili različni za različne vrste obravnavanih betonov. V študiji smo zajeli dve vrsti agregata ter štiri različna veziva, kar pomeni osem različnih sestav betona. Kot referenčno vezivo smo izbrali čisti Portland cement (CEM I), v ostalih primerih pa smo dodali še mikrosiliko, elektrofiltrski pepel in/ali žlindro. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da je najbolj primerno vezivo za kislinsko agresijo, ki je bila predmet raziskav, žlindrin cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela in mikrosilike.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 54:691.3(043.2)
Author: Boris Ronkalj
Supervisor: assoc. prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
Cosupervisor: Tina Prinčič, B. Sc.
Title: The influence of chemical aggression on the concrete at different temperatures.
Document type Graduation thesis – university studies
Notes: 49 p., 27 fig., 10 tab., 7 grap.
Key words: concrete, modulus of elasticity, corrosion, strengt, temperature.

Abstract:

In this thesis, we were following changes of the concrete microstructure due to its exposure to acidic environment at normal and elevated temperatures. These changes were estimated by the monitoring changes of concrete's dynamic modulus of elasticity with time. We also determined compressive strength of concrete and its resistance to the penetration of water under pressure. The obtained results were different for different concrete mixtures under consideration. In the study we used two types of stone aggregate and four different binders which give eight different concrete mixtures. As a reference binder we selected pure Portland cement (CEM I), and to the other three binders we added silica fume, fly ash and/or slag to the clinker. Experimental results showed that the most adequate binder for an acidic environment under consideration is slag cement with the addition of fly ash and silica fume.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad. Prav tako se zahvaljujem so-mentorici, Tini Prinčič, univ. dipl. inž. kem. inž. in kolektivu Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij, ker so mi pomagali s svojimi izkušnjami.

Navsezadnje se zahvaljujem tudi družini, ki mi je ves čas stala ob strani in me podpirala.

KAZALO VSEBINE	
IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION	IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO PREGLEDNIC	IX
KAZALO GRAFIKONOV	X
KAZALO SLIK	XI
1 UVOD	1
Predstavitev problema	1
Namen diplomske naloge	1
2 OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONA	2
2.1 Cement	2
2.1.1 Proizvodnja cementa	2
2.1.2 Surovine za proizvodnjo cementa	4
2.1.3 Hidratacija cementa	8
2.1.4 Vrste silikatnih cementov	9
2.2 Agregat	9
2.2.1 Sejalna analiza	10
2.2.2 Splošni standardi za agregat	11
2.3 Voda	11
2.4 Kemijski dodatki betonu	12
2.4.1 Plastifikatorji	12
2.4.2 Superplastifikatorji	12
2.4.3 Hiperplastifikatorji	13
2.4.4 Dodatki proti krčenju	13
2.4.5 Pospeševalci in zaviralci	13
2.4.6 Aeranti	14
2.4.7 Dodatki proti zmrzovanju	14

3	BETON	15
3.1	Uporaba betona	15
3.2	Klasifikacija betona	16
3.3	Priprava betona	17
3.4	Odvzem vzorcev svežega betona za preiskave	18
3.5	Določitev vsebnosti zraka	18
3.6	Določitev obdelavnosti betona s posedom	19
3.7	Vgrajevanje betona	20
3.8	Izcejanje vode	20
3.9	Konsolidacija	20
3.10	Nega betona pri normalnih temperaturah	21
3.11	Nega in zaščita betona pri visokih temperaturah	21
4	KOROZIJA BETONA	23
4.1	Kemijska korozija	23
4.2	Reakcije povezane s spremembo volumna	24
4.3	Reakcije povezane z vezivom v cementnem kamnu	24
4.4	Fizikalni procesi propadanja cementnega kamna	24
4.5	Transportni mehanizmi agresivnih snovi v beton	24
4.5.1	Difuzija	25
4.5.2	Kapilarna absorpcija	26
4.5.3	Tečenje pod pritiskom	26
4.6	Kislinska korozija	27
4.7	Alkalno agregatne reakcije	29
4.7.1	Alkalno silikatna	29
4.7.2	Alkalno dolomitna reakcija	29
5	EKSPERIMENTALNI DEL	30
5.1	Osnovne komponente našega betona	30
5.1.1	Cementi in dodatki	30
5.1.2	Mineralni dodatki	31
5.1.3	Elektrofiltrski pepel ali EFP	31
5.1.4	Kemijski dodatek	31
5.1.5	Agregat	31
5.1.6	Voda	32
5.2	Postopek dela	32

5.2.1	Vrste preskušancev	32
5.2.2	Priprava raztopin različnih jakosti	34
5.2.3	Določanje dinamičnega modula elastičnosti	35
5.2.4	Rezultati meritev elastičnega modula	38
5.2.5	Določanje tlačne trdnosti	43
5.2.6	Prodor vode	45
6	SKLEP	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Tlačne trdnosti po SIST EN 197-1.....	2
Preglednica 2: Štirje osnovni minerali cementnega klinkerja.....	4
Preglednica 3: Različne trdnosti betona in delež sestavin v njem.....	17
Preglednica 4: Priporočljive vrednosti za minimalni čas negovanja svežega betona v dneh	22
Preglednica 5: Tri kategorije izpostavljenosti po SIST EN 206-1.....	28
Preglednica 6: Delež oksidov v različnih vrstah cementa in elektrofiltrskemu pepelu.....	30
Preglednica 7: Frakcije in njeni deleži za agregat A in B.....	31
Preglednica 8: Različne vrste betonskih mešanic.	33
Preglednica 9: Različne raztopine pri različnih temperaturah.	34
Preglednica 10: 28-dnevna tlačna trdnost, gostota in prodor vode.	46

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini A.	39
Grafikon 2: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini D.	39
Grafikon 3: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini E.....	40
Grafikon 4: Betonske mešanice 5, 6, 7, 8 z agregatom B v raztopini D.....	42
Grafikon 5: Vseh osem betonskih mešanic v raztopini D.	43
Grafikon 6: Tlačne trdnosti betonskih mešanic 1, 2, 3, 4 z agregatom A.	44
Grafikon 7: Tlačne trdnosti betonskih mešanic 5, 6, 7, 8 z agregatom B.....	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Moderni postopek proizvodnje cementa.	3
Slika 2: Rotacijska peč za proizvodnjo klinkerja.	4
Slika 3: Elektrofilitrski pepel.	6
Slika 4: Različna obdobja postopka hidratacije cementa.	9
Slika 5: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za beton.	11
Slika 6: Betonska cev.	15
Slika 7: Hoover dam.	16
Slika 8: Priprava betonske mešanice v laboratorijskem mešalcu.	17
Slika 9: Naprava (porozimeter) za določanje vsebnosti zraka v betonski mešanici po metodi tlaka.	19
Slika 10: Določanje poseda svežega betona.	19
Slika 11: Vibriranje med vgrajevanjem betona.	20
Slika 12: Nega betonskih kock v bazenih.	21
Slika 13: Shematski prikaz transportnih mehanizmov v poroznih materialih.	25
Slika 14: Vpliv geometrijskih parametrov por na prepustnost materiala.	27
Slika 15: Migracija ionov v beton in iz njega.	28
Slika 16: Alkalno-agregatna reakcija.	29
Slika 17: Sejalna krivulja agregatov A in B je obarvana rdeče.	32
Slika 18: Rezanje betonskih kock na prizme.	33
Slika 19: Betonske prizme smo dali v različne raztopine ter jih hermetično zaprli v plastične posode.	34
Slika 20: Merjenje pH raztopin.	35
Slika 21: Zveza med napetostjo in deformacijo pri betonu in pomen elastičnega modula.	36
Slika 22: Merjenje dolžine prizme.	37
Slika 23: Merjenje frekvenc z napravo GrindoSonic.	38
Slika 24: Kristalizacija etringita.	41
Slika 25: Raztezanje cementnega kamna zaradi tvorbe sekundarnega etringita pod mikroskopom.	41

Slika 26: Naprava za določanje tlačne trdnosti. 44

Slika 27: Kocko damo v napravo za preskušanje in jo nato podvržemo vodnemu pritisku. 46

1 UVOD

Predstavitev problema

V diplomski nalogi z naslovom »Vpliv kemijske agresije na beton pri različnih temperaturah« bomo predstavili, kako se beton odziva v agresivnem okolju. Beton je še do nedavnega veljal za več in trden material. V današnjem času nas zanima predvsem obstojnost in trajnost.

V praksi poškodbe betona nastanejo kot kombinacija fizikalnih in kemijskih vplivov. Zelo važen je vpliv okolja, vremena, plinov, mikroorganizmov in drugih dejavnikov. Le redko se zgodi, da na beton deluje samo eden dejavnik, zato je v večini primerov potrebno upoštevati kombinacijo več vrst različnih dejavnikov. Najvažnejši pa je namen njegove uporabe. Ključen pomen pri poškodbah ima voda in njena kemijska sestava.

V kolikor dobro poznamo proces propadanja betona, ga bomo znali kasneje tudi uspešno sanirati.

Namen diplomske naloge

Namen diplomske naloge je ugotoviti, kateri agregat, vezivo in dodatki so najprimernejši, da bo obstojnost betona največja v danem kislinskem okolju pri povišani temperaturi.

Agregat za izdelavo betona smo vzeli iz dveh različnih kamnolomov. Poimenovali smo ju agregat A in B. Tako kot je agregat za beton zelo pomemben, je pomembno tudi vezivo. Na podlagi dane stopnje kemijske agresije, ki ji bo beton izpostavljen, smo izbrali primerne mineralne dodatke za doseganje obstojnosti le tega. Za naše mešanice smo uporabili štiri različna veziva. Prvo vezivo je vsebovalo čisti portland cement, drugemu smo del portland cementa zamenjali z elektrofitrskim pepelom, tretjemu smo dodali še mikrosiliko in pri četrtemu smo za vezivo namesto portland cementa uporabili žlindrin cement z vsemi dodatki. Naredili smo več različnih preiskav na standardnih betonskih preizkušancih. Po določenem času smo na prizmah s pomočjo naprave GrindoSonic merili različne frekvence, dolžine s kljunastim merilom in mase s tehtnico. S temi podatki smo izračunali elastične module. Bili so izvedeni tudi drugi preiskavi kot sta prodor vode in tlačna trdnost. Na podlagi rezultatov opravljenih preiskav smo izbrali najustreznejšo betonsko mešanico, da bo obstojnost v danih pogojih okolja največja in kar je še najpomembnejše, da beton ne bi začel razpadati.

2 OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONA

Beton je kompozit agregata, cementa, vode in dodatkov. Po zmešanju sestavin se prične reakcija med cementom in vodo. Temu procesu pravimo hidratacija cementa.

2.1 Cement

Cement je mineralno vezivo, ki se uporablja v gradbeništvu za proizvodnjo betona ali malte. Ima hidravlične lastnosti, kar pomeni, da veže in strjuje v dotiku z vodo (Vrkljan D., 2010). Standard SIST EN 197-1 obravnava t.i. običajne cemente, katere razvršča tudi glede na doseženo tlačno trdnost. To prikazuje preglednica 1.

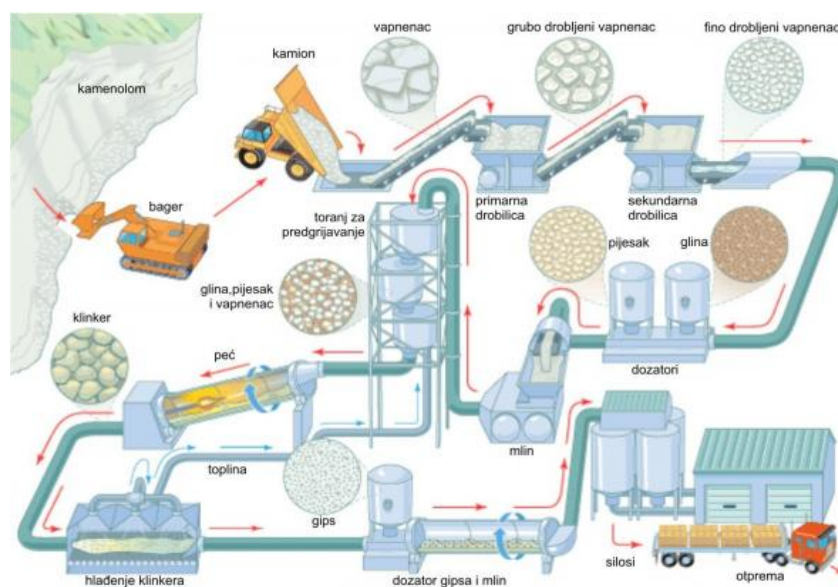
Preglednica 1: Tlačne trdnosti po SIST EN 197-1 (Žarnić, 2005: str. 88).

Oznaka trdnost	Zgodnja trdnost (MPa)		Standardna trdnost (MPa)	
	2 dni	7 dni	28 dni	
32,5N		> 16	> 32,5	< 52,5
32,5R	> 10			
42,5N	> 10		> 42,5	< 62,5
42,5R	> 20			
52,5N	> 20		> 52,5	
52,5R	> 30			

2.1.1 Proizvodnja cementa

Tipični proces proizvodnje cementa vključuje naslednje faze, kot prikazuje slika 1:

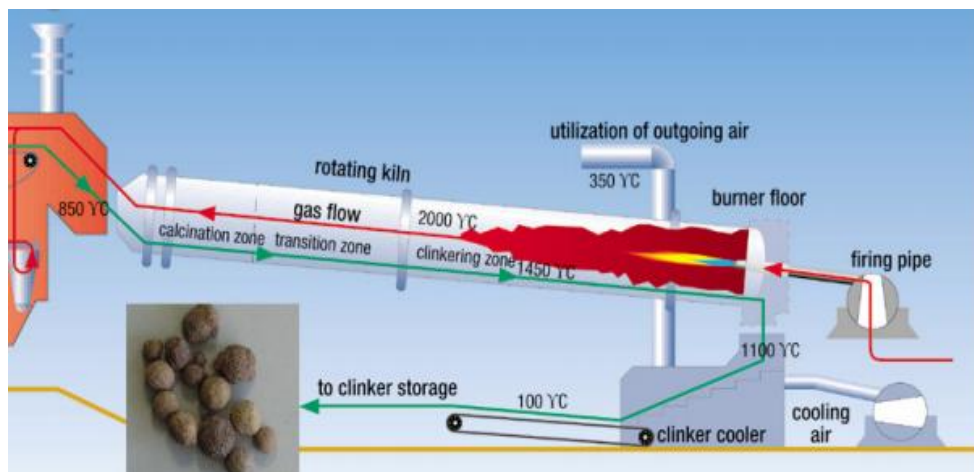
- eksploatacija mineralnih surovin,
- priprava-homogenizacija mineralnih surovin za proizvodnjo klinkerja,
- mešanje mineralnih surovin in proizvodnja klinkerja,
- mletje klinkerja in dodajanje dodatkov,
- pakiranje cementa.



Slika 1: Moderni postopek proizvodnje cementa (Vrkljan D., 2010: str 5).

Pri eksploataciji mineralnih surovin (apnenec in lapor) se z vrtnjem in miniranjem ali strojnim izkopom pridobiva material široke granulometrijske in neenakomerne kemijske sestave. Sledi predhomogeniziranje le teh, saj je homogena kemijska sestava zelo pomembna za proizvodnjo cementa. To se doseže tako, da se vzame vzorce iz lukenj za miniranje, na katerih se naredijo kemijske analize. Taka od-minirana surovina se tako lahko homogenizira že pri nakladanju in transportu. Homogeniziran material gre iz deponij v primarno in sekundarno drobilnico. Potrebno ga je prilagoditi, saj je velikost zrna lahko tedaj med nekaj milimetrov in 1,5 metra ali več. Drobilnice zmeljejo surovine v različne velikosti zrn. Doda se potrebne dodatke (na primer glino, pepelnato žlindro, boksit, piritne ogorke, itd). Delci surovinske moke se v suhem stanju kasneje ogrevajo v stolpu za pred-ogrevanje, kjer surovinsko moko obda protitočni vroč zrak. Na sliki 2 je to komora rdeče barve. Tu se surovina pred prihodom v rotacijsko peč delno kalcinira. To je proces termalne obdelave mineralnih substanc na visoki temperaturi in pod temperaturo taljenja. Rotacijska peč je jeklen cylinder premera nekaj metrov in dolžine 50-200 metrov, nagnjena malo na eno stran. Znotraj je obložen s posebno keramiko odporno na visoke temperature. Na spodnjem koncu je opremljen z gorilnikom, medtem ko zgornji konec služi kot vhod za surovine. Rotacija okrog vzdolžne osi povzroča postopno gibanje materiala z višje, hladnejše lege, proti nižji toplejši legi. Rezultat postopnega prehoda surovinske moke skozi različne temperaturne režime vzdolž rotacijske peči, kjer doseže material najvišjo temperaturo v coni sintranja (1400 - 1450 °C) ter faze hlajenja, ki sledi fazi žganja, je portland cementni klinker z ustrezno mineralno sestavo. Velikost klinkerja je med 1 mm in 25 mm. To vidimo tudi na sliki 2. Nato se melje v krogelnem mlinu na dimenzije cementa. Istočasno

se dodaja sadro ter mineralne dodatke, kot so žindra, elektrofiltrski pepel, mikrosilika itd. Vse je odvisno od tega, kakšen cement si želimo (Vrkljan D., 2010).



Slika 2: Rotacijska peč za proizvodnjo klinkerja (Vrkljan D., 2010: str 3).

2.1.2 Surovine za proizvodnjo cementa

2.1.2.1 Portland cementni klinker

Klinker sestavljajo štiri najbolj pogosti minerali in sicer alit, belit, aluminat in ferit. Alit najhitreje reagira, prispeva k visokim trdnostim in je najbolj pomemben. Belit zavira proces hidratacije in tako se sprošča veliko manj toplote kot pri alitu. Aluminat tudi prispeva k visoki začetni in končni trdnosti, vendar je zelo občutljiv na sulfatno korozijo. Ferit pa se strjuje počasi in je odporen na sulfatno korozijo. Delež glavnih mineralov v portland cementnem klinkerju je prikazan v preglednici 2 (Vrkljan D., 2010).

Preglednica 2: Štiri osnovni minerali cementnega klinkerja (Vrkljan D., 2010: str. 7).

	Približna kemijska formula	Zapis v kemiji cementa	Delež udeležbe v klinkerju (%)
Alit	trikalcijev silikat	C_3S	45-75
Belit	dikalcijev silikat	C_2S	7-32
Aluminat	trikalcijev aluminat	C_3A	0-13
Ferit	tetrakalcijev alumino-ferit	C_4AF	0-18

2.1.2.2 Mineralni dodatki

2.1.2.2.1 Elektrofiltrski pepel ali EFP

V skladu s SIST EN 197-1 je elektrofiltrski pepel mineralni dodatek cementnemu klinkerju, ki se dobi z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjene z uprašenim premogom.

Elektrofiltrski pepel je po naravi silikatno-aluminatni (silicijski) ali silikatno-apneni (kalcijski). Prvi ima pucolanske lastnosti, drugi ima lahko dodatno še hidravlične lastnosti.

Silicijski elektrofiltrski pepel (V)

Silicijski elektrofiltrski pepel je fin prah iz pretežno kroglastih delcev, ki imajo pucolanske lastnosti. Vsebovati mora predvsem reaktivni silicijev dioksid (SiO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3). Ostanek vsebuje železov oksid (Fe_2O_3) in druge spojine.

Delež reaktivnega kalcijevega oksida mora biti manjši od 10,0 % mase, delež prostega kalcijevega oksida, določenega po metodi, opisani v EN 451-1, ne sme biti večji od 1,0 % mase. Sprejemljiv je tudi elektrofiltrski pepel, ki vsebuje več kot 1,0 % mase in manj od 2,5 % mase prostega kalcijevega oksida, ob predpostavki, da ekspanzija (prostorninska obstojnost), preskušena po EN 196-3 na mešanici iz 30 % mase silicijskega elektrofiltrskega pepela in 70 % mase CEM I cementa, skladnega z EN 197-1, ni večja od 10 mm.

Delež reaktivnega silicijevega dioksida mora biti najmanj 25,0 % mase.

Kalcijski elektrofiltrski pepel (W)

Kalcijski elektrofiltrski pepel je fin prah, ki ima hidravlične in/ali pucolanske lastnosti. Vsebuje predvsem reaktivni kalcijev oksid (CaO), reaktivni silicijev dioksid (SiO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3). Ostanek vsebuje železov oksid (Fe_2O_3) in druge spojine. Delež reaktivnega kalcijevega oksida ne sme biti manjši od 10,0 % mase. Kalcijski elektrofiltrski pepeli, ki vsebujejo od 10,0 % do 15,0 % mase reaktivnega kalcijevega oksida, morajo vsebovati najmanj 25,0 % mase reaktivnega silicijevega dioksida.

Primerno zmleti kalcijski elektrofiltrski pepel, ki vsebuje več kot 15,0 % mase reaktivnega kalcijevega oksida, mora imeti tlačno trdnost po 28 dneh, preskušeno po EN 196-1, najmanj 10,0 MPa. Pred preskušanjem se mora elektrofiltrski pepel zmleti tako, da je finost, ki se izrazi kot masni delež

ostanka pepela po mokrem sejanju na situ z velikostjo odprtin $40\ \mu\text{m}$, med 10 % in 30 % mase. Preskusna malta se mora namesto s cementom pripraviti samo z zmletim kalcijevim elektrofiltrskim pepelom. Preskušanci se morajo razkalupiti 48 ur po pripravi in nato do preskušanja negovati v prostoru z relativno vlažnostjo najmanj 90 %.

Ekspanzija (prostorninska obstojnost) kalcijevskega elektrofiltrskega pepela, preskušena po EN 196-3 na mešanici iz 30 % mase kalcijevskega elektrofiltrskega pepela, zmletega kot je opisano zgoraj, in 70 % mase CEM I cementa, skladnega z EN 197-1, mora biti manjša od 10 mm.

EFP izboljša kohezijo sveže betonske mešanice, izboljša vodoneprepustnost strjenega betona ter zmanjša zgodnje trdnosti betona (Sika, 2010). Izgled EFP prikazuje slika 2.



Slika 3: Elektrofiltrski pepel (Mojdom, 2012).

2.1.2.2.2 Žindra

V skladu s SIST EN 197-1 je granulirana plavžna žindra mineralni dodatek cementnemu klinkerju, ki se dobi s hitrim hlajenjem žlindre taline s primerno sestavo, ki je taka, kot se dobi s taljenjem železove rude v plavžu in vsebuje najmanj dve tretjini mase steklaste žindre in ima hidravlične lastnosti, če je primerno aktivirana.

Seštevek mas kalcijevega oksida (CaO), magnezijevega oksida (MgO) in silicijevega dioksida (SiO_2) mora znašati najmanj dve tretjini mase granulirane plavžne žindre. Ostanek vsebuje aluminijev oksid (Al_2O_3) in manjše količine drugih sestavin. Masno razmerje $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ mora biti večje od 1,0. Žindro se uporablja pri proizvodnji betonov visokih zmogljivosti. Tovrstni betoni dosežejo nizko prepustnost in večjo odpornost na kloride, sulfate, ter pomaga pri zmanjšanju korozivnosti (wikipedia, 2012).

2.1.2.2.3 Naravni pucolani

V skladu s SIST EN 197-1 so pucolani naravne snovi, silikatne ali silikatno-aluminatne sestave ali kombinacija obeh. Pucolani, zmešani z vodo se sami ne strjujejo, toda fino zmleti v prisotnosti vode in pri normalni zunanji temperaturi reagirajo z raztopljenim kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)_2). Pri tem nastanejo spojine kalcijevih silikatov in kalcijevih aluminatov, ki dajejo trdnost. Te spojine so podobne tistim, ki nastanejo pri hidrataciji hidravličnih materialov. Pucolani vsebujejo predvsem reaktivni silicijev dioksid (SiO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3). Ostanek vsebuje železov oksid (Fe_2O_3) in druge okside. Delež reaktivnega kalcijevega oksida za hidratacijo je zanemarljiv. Delež reaktivnega silicijevega dioksida ne sme biti manjši od 25,0 % mase.

Pucolanski materiali morajo biti pravilno pripravljene, to pomeni, da morajo biti primerno izbrani, homogenizirani, osušeni ali toplotno obdelani in zdrobljeni ali zmleti, odvisno od tega, v kakšnem stanju so pridobljeni ali dostavljeni.

Naravni pucolan (P)

Naravni pucolani so ponavadi snovi vulkanskega izvora ali sedimentne kamnine s primerno kemično in mineraloško sestavo.

Naravni kalcinirani pucolan (Q)

Naravni kalcinirani pucolani so snovi vulkanskega izvora, gline, skrilavci ali sedimentne kamnine aktivirani s termično obdelavo.

2.1.2.2.4 Kalcijev sulfat

Med proizvodnjo cementa se za kontrolo vezanja dodaja k drugim sestavinam cementa kalcijev sulfat.

Kalcijev sulfat je lahko sadra (kalcijev sulfat dihidrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), polhidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (brezvodni kalcijev sulfat, CaSO_4) ali kakršnakoli mešanica le-teh. Sadra in anhidrit se nahajata v naravi. Kalcijev sulfat je tudi stranski proizvod nekaterih industrijskih procesov (SIST EN 197-1, 2011).

2.1.2.2.5 Mikrosilika

Mikrosilika, ki izpolnjuje določila standarda SIST EN 197-1 nastaja v proizvodnji silicijevih in ferossilicijevih zlitin v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremenca s premogom in sestoji iz zelo

drobnih kroglastih delcev, ki vsebujejo najmanj 85 % mase amorfnega silicijevega dioksida. Vsebnost elementarnega silicija (Si) ne sme biti večja od 0,4 % mase, določena skladno z ISO 9286.

Mikrosilika, ki se melje skupaj s klinkerjem in kalcijevim sulfatom, je lahko v originalnem stanju, stisnjena ali granulirana (z vodo), ali enakovredno pripravljena .

2.1.3 Hidratacija cementa

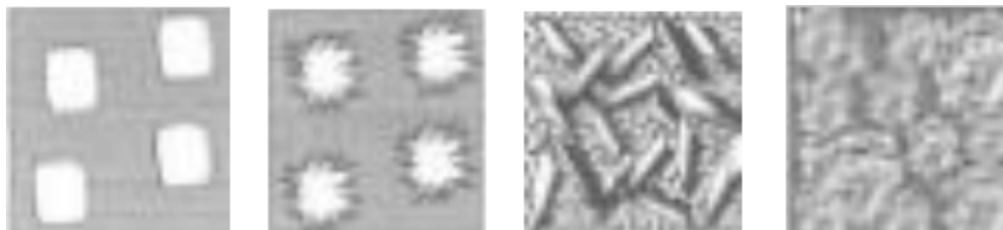
Hidratacija cementa je proces vezanja cementa in vode. Materiali s cementnim vezivom se iz tekočega v trdno stanje spreminjajo na osnovi eksotermne kemijske reakcije, ki ji pravimo vezanje. Pri tej reakciji se sprošča precejšnja količina hidrationske toplote. Za hidrationsjo cementa so značilne zapletene serije reakcij med vodo, minerali klinkerja in kalcijevim sulfatom (Žarnić, 2005).

Obstajajo različne vrste obdobji glede na količino sproščene hidrationske toplote (slika 4):

- Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut). Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidrationsja mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% C_3S . Mineral C_3A se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C_4AF reagira podobno kot C_3A , delež reagiranega C_2S pa je zelo majhen.
- Indukcijsko obdobje - relativno mirovanje (traja nekaj ur). Po začetni hitri hidrationsji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina. Prvi je po teoriji zaščitne plasti se hidrationsjski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidrationsja upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidrationsje
Drugi je po teoriji kristalizacijskih jeder. Nadaljevanje hidrationsje ovira nasičena raztopina kalcijevega hidroksida. S pojavom hidrationsjskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidrationsjski proces ponovno steče.
- Obdobje pospešene hidrationsje (tretja do dvanajste ure procesa) - nasičena raztopina z novo nastalimi kristali preide v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. Hitrost hidrationsje C_3S in C_2S narašča in doseže maksimalne vrednosti..
- Obdobje pojemajoče hidrationsje (do konca hidrationsje) - hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidrationsjskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih zrn. Nastaja C-S-H gel, kot posledica hidrationsje C_3S in C_2S . Na začetku nastali etringit reagira z nehidratiziranim C_3A in C_4AF in nastane

monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen. .

(Žarnič, 2005)



Slika 4: Različna obdobja postopka hidratacije cementa (Žarnič, 2005: str. 91).

2.1.4 Vrste silikatnih cementov

Portland cement je značilni predstavnik silikatnih cementov. Uporablja se brez ali z mineralnimi dodatki. Dodatki sami ne morejo vezati z vodo, to sposobnost pa dobijo, ko se pomešajo s cementom (granulirana plavžna žindra, elektrofitrski pepel, naravni pucolani, mikrosilika, itd). Delež mineralnih dodatkov v portland cementu je omejen na 35%. Izjema je mikrosilika, ki se je lahko doda le 10%. Cement, ki vsebuje večjo količino žindre (od 35 do 95%), se imenuje žlindrin cement. Cement z veliko količino pucolana (nad 35%) se imenuje pucolanski cement. Na vrečah cementa se nahajajo standardizirane oznake, ki označujejo sestavo cementa.

Žlindrini in pucolanski cementi so bolj odporni na agresivno delovanje sulfatnih soli, ki se nahajajo v vodi ali v tleh, razvijajo manj hidratacijske toplote kot portland cement, imajo pa manjšo začetno trdnost. Ta se s časom večja in kasneje lahko doseže enako vrednost kot pri ustreznem portland cementu. Uporabljajo se za podmorske gradnje in gradnje masivnih betonskih objektov (pregrade).

2.2 Agregat

Agregat je zrnat material v katerega spadajo pesek, gramoz in drobljenec. Je glavna sestavina betona in predstavlja do 78 procentov njegove prostornine. Različne vrste agregata ločimo glede na to, kako je nastal. Obstajajo sedimentni, metamorfni in magmatski agregati. Beton je lahko sestavljen iz naravno oblikovanega agregata aluvialnega izvora, peska ali prod. Po drugi strani pa je lahko umetno pridobljen v kamnolomu, z razstreljevanjem kamnine, drobljenjem in sejanjem. Če hočemo, da bo beton zelo obstojen, potrebujemo zelo kvaliteten agregat dobre zrnastostne sestave. Tudi trdnost in druge fizikalne lastnosti betona so pomembno odvisne od vrste agregata. Pomembna je tudi oblika zrn

in tekstura površine zrn. Droben agregat ima zrno manjše od 4 mm in večje od 0,125 mm medtem, ko ima grob agregat zrno večje od 4 mm. Kombiniranje različnih frakcij in njihovo razmerje so ključnega pomena za kvaliteto betona. Boljše je, če so frakcije heterogene, saj to pomeni, da bo prostor med velikimi zrni čim bolj zapolnjen z manjšimi. Iz tega sledi, da bodo mehanske lastnosti betona zagotovo boljše (P. Kumar Mehta, 1986).

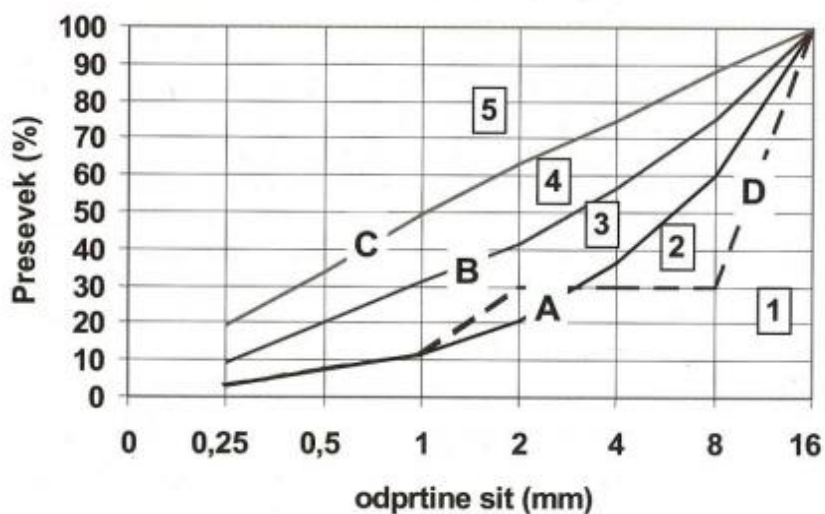
Zrnavostna sestava agregata mora biti takšna, da zagotavlja ustrezno kohezivnost betona. Ko vgrajujemo beton v kalupe ali opaže je zelo pomembno, da ne pride do segregacije. Če kombinacija izbranega agregata in cementa ne zagotavlja ustrezne kohezivnosti betona, si lahko pomagamo s kemijskimi dodatki tipa plastifikator, superplastifikator in gostilec.

2.2.1 Sejalna analiza

S sejalno analizo določamo velikost agregatnih zrn. Imamo več različnih principov s katerimi pravilno sestavimo agregat ustrezne zrnivosti. Tako imamo tudi več različnih zrnavostnih krivulj. Skozi niz sit presejemo agregat. Sita so postavljena eno nad drugim tako, da je sito z največjo odprtino na vrhu in z najmanjšo na dnu. Obstajajo sita z odprtinami 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm in 63 mm. Standardna sita so sita z odprtinami kvadratne oblike in velikost sita je takšna, kot je dolžina stranice kvadratne odprtine. Bistveno za nas je, koliko agregata se bo presejalo skozi posamezno sito. Frakcija je to, kar se preseje skozi zgornje sito in ostane na spodnjem situ. Označimo jo z d/D . D je velikost sita nad sitom z odprtino d . Na slednjem se material zaustavi. Pri sejalni analizi uporabljamo še pojme presevek in ostanek na situ. Presevek skozi sito d je masa ali delež agregata, ki se preseje skozi to sito, ostanek na situ d pa je tista količina materiala (masa ali delež), ki ostane na situ z velikostjo odprtine d . Sejanje na situ je končano, ko se v eni minuti sejanja masa agregata na situ ne zmanjša za več kot 1%. Vzorec agregata, ki ga sejemo, mora biti suh.

Obstajajo mejne zrnavostne sestave agregata (zrnavostne krivulje), ki jih podaja standard SIST 1026:2008. Krivulja našega agregata leži praviloma nekje med temi krivuljami. Na sliki 5 so prikazane mejne zrnavostne krivulje za največje zrno agregata 16 mm (Žarnić, 2005).

Na sliki 5 je lepo vidno, da so na x osi-abcisa podane odprtine sit v mm in na y si-ordinati pa delež presevka v % od celotne mase agregata. S številkami so označena območja od 1 do 5. Območji 1 in 5 nista sprejemljivi. Praviloma je najbolj ugodno, če zrnavostna sestava agregata pade v območje 3 (Žarnić, 2005).



Slika 5: Priporočene mejne krivulje zrnivosti za beton (Žarnić, 2005: str. 57).

2.2.2 Splošni standardi za agregat

Če želimo, da bo agregat primeren za izdelavo betona, mora poleg ustrezne zrnovostne sestave izpolnjevati še druge zahteve glede lastnosti. Imeti mora:

- ustrezno obliko zrn, določeno z modulom oblike zrn,
- ustrezno prostorninsko maso zrn,
- ustrezno majhen delež finih delcev in ustrezno kakovost finih delcev,
- dovolj majhno vsebnost sulfatov ali kloridov,
- ustrezno zmrzlinško odpornost (Žarnić, 2005).

2.3 Voda

Voda je ena od treh osnovnih komponent betona. Samo cement brez vode ne more hidratizirati. Voda, katero uporabljamo za cementno pasto, je velikokrat voda iz vodovodnega omrežja. Te ni potrebno analizirati v laboratorijih. Nepitno vodo pa moramo obvezno analizirati po SIST EN 1008, se pravi jo testirati in s tem ugotoviti, katere škodljive primesi vsebuje.

Pod nepitno vodo lahko štejemo vodo iz različnih akumulacijskih napajališč, potokov, studencev in morja. Škodljive snovi, ki jih voda ne sme vsebovati so:

- sulfati (soli, katere povečajo volumen med kristalizacijo),
- organske primesi,
- kloridi (korozijska armature).

Naredimo dve primerjalni analizi. Najprej naredimo betonsko mešanico z destilirano vodo, nato še z našo vodo. Če razmak med začetkom in koncem vezanja ni večji od 30 minut in tlačna trdnost manjša od 10%, je naša voda uporabna za izdelavo betona. Ko imamo nearmiran beton, lahko uporabimo tudi morsko vodo. Tu obstaja meja petih gramov soli na liter vode.

Posledice nastale zaradi uporabe neprimerne vode:

- eflorescenca,
- cementni kamen je prostorninsko nestabilen,
- časovni potek hidratacije je drugačen,
- korozija betona.

(Birk, 2010)

2.4 Kemijski dodatki betonu

2.4.1 Plastifikatorji

Plastifikatorji omogočajo znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco. Lahko pa se povečata posed in razlez brez spremembe v količini vode. Standard SIST EN 934-2 zahteva, da plastifikatorji zagotavljajo enako obdelovalnost betona pri vsaj 5 % manjšem odmerku vode.

Imamo plastifikatorje na bazi ligno-sulfonatov. To so praviloma plastifikatorji v tekočem stanju, s katerim dosežemo boljše zgoščenost, obdelovalnost in vgradljivost betona. Možnost redukcije vode je do 15 %, večje zgodnje in končne trdnosti pa dosegamo tudi pri nizkih temperaturah. Ne povzročajo zračnih por in beton lahko transportiramo v vseh letnih časih. Prednosti so v tem, da se razvije zgodnja trdnost tudi pri nizkih temperaturah in ga uporabljajmo pri zahtevnih površinah vidnega betona.

2.4.2 Superplastifikatorji

Omogočajo visoko znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali povečajo posed/razlez brez spremembe v količini vode. Superplastifikatorji morajo zagotoviti vsaj 12 % zmanjšanje vode pri enaki obdelovalnosti. Še posebej učinkoviti so superplastifikatorji nove generacije imenovani tudi hiperplastifikatorji. Ti omogočajo znižanje potrebnega odmerka vode v svežem betonu tudi za 30 %. Pri tem je vgradljivost takšna, da betona ni potrebno niti vibrirati. Tu se beton giblje podobno kot med in zanesljivo zapolnjuje tudi ozke prehode. Višje so tudi začetne in končne trdnosti. Uporablja se za beton tekoče konsistence in beton s pospešenim strjevanjem. Kot močan plastifikator omogoča enostavnejšo pripravo, pri vgrajevanju ni segregacije in omogoča hiter začetek vezanja

cementne paste. Čas strjevanja se ne podaljša tudi pri velikih dozah. Ima učinek zgoščevanja in z njim dosežemo lepše površine strjenega betona. Uporabljamo ga za transportni beton (Sika, 2010).

2.4.3 Hiperplastifikatorji

Hiperplastifikatorji so dodatki na osnovi modificiranih polikarboksilatov. Učinki polikarboksilatov so naslednji: vnos elektrostatičnega odboja med delci cementa in mineralnih dodatkov, dolge molekule, ki delujejo kot ovira med cementnimi delci ter učinkovita disperzija cementa, ki ovira kosmičenje.

Prednosti uporabe hiperplastifikatorjev so: zmanjšanje V/C razmerja tudi do 40 %, podaljšan čas obdelavnosti brez zavlačevanja vezanja, izboljšane lastnosti svežega betona, višje začetne trdnosti, visoke končne trdnosti betona in visoka homogenost. Kombinacija različnih vrst polikarboksilatov in drugih dodatkov omogoča pripravo takšnih dodatkov, ki so usklajeni z uporabljenimi cementi in agregati ter izpolnjujejo različne zahteve.

2.4.4 Dodatki proti krčenju

So dodatki betonu in maltam za zmanjševanje krčenja v času hidratacije, vezanja in sušenja.

Preprečujejo nastanek velikih razpok. Uporabljamo ga pri visoko-zahtevnih betonih, kjer je potrebno drastično zmanjšanje krčenja. Znižuje hidratacijsko temperaturo betona in omogoča betoniranje brez delovnih stikov. Izboljšuje vodoneprepustnost. Ne vsebuje kloridov in ga brez težav uporabljamo pri armiranih betonih. Lahko ga uporabimo z aeranti in plastifikatorji pri betonih brez dilatacij in ploščah. Prednosti so v tem, da zmanjšujejo hidratacijsko temperaturo betona in povečajo vodoneprepustnost.

2.4.5 Pospeševalci in zaviralci

Pospeševalci in zaviralci so dodatki, ki pospešijo in zavirajo vezanje betona. Pospeševalci skrajšujejo čas do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdno stanje. Zaviralci pa ta čas podaljšujejo. S pospeševalci se zgodnja trdnost betona poveča. Slaba lastnost pospeševalcev je, da s tem, ko se pospeši vezanje, se s tem tudi poveča krčenje betona in s tem nastanek razpok. Razpoke pa povzročijo hitrejšo korozijo armature. Zaviralci nam pomagajo tam, kjer so temperature visoke. Zavirajo vezanje in povzročijo, da se beton lažje vgrajuje. Tako kot pospeševalci povečajo zgodnjo trdnost, tako zaviralci zmanjšajo zgodnjo trdnost betona.

2.4.6 Aeranti

S pomočjo aerantov se med mešanjem vnese v beton kontrolirano količino majhnih, enakomerno porazdeljenih zračnih mehurčkov. Aeranti so torej dodatki za tvorbo mikropor. Uporabljamo jih pri običajnem betonu, betonu za ceste, robnike, itd. Poveča odpornost proti zmrzovanju/tajanju in vplivu soli ter olajša pripravo betona. Ne spreminja časa vezanja. Uporabljamo ga tudi za izboljšanje črpnih lastnosti betona.

2.4.7 Dodatki proti zmrzovanju

Dodatki proti zmrzovanju so dodatki za zimsko betoniranje, s katerimi pozimi povečamo odpornost proti zmrzovanju in pospešujemo vezanje cementa. S pomočjo teh dodatkov dvignemo temperaturo betona zaradi pospešene hidratacije. Povečujejo trdnost in plastičnost betona brez povečanja količine vode. Ne vsebujejo kloridov, ki so škodljivi za armaturo. Po potrebi se je potrebno držati pravil o zimskem betoniranju. Betoniranja v poznem popoldnevu se je treba izogniti, če je predvidena temperatura ponoči manjša od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beton je potrebno prvih 12 ur nujno zaščititi s tkanino ali PVC-jem.

3 BETON

3.1 Uporaba betona

Čeprav ima jeklo večjo specifično gostoto in je bolj duktilno kot beton, ostaja beton še vedno najbolj željen gradbeni material. Eden od razlogov je ta, da je zelo dobro odporen na vodo, za razliko od lesa in navadnega jekla. Na slednje voda močno vpliva, zato lahko beton uporabljamo za nadziranje, shranjevanje in transport vode. Raba betona je že vsakdanja za gradnjo jezov (slika 8), kanalov, vodnih cevi (slika 7) in vodohranov. Uporablja se ga tudi za podpiranje, prilaganje in polnjenje tam, kjer beton ni primarni material neke konstrukcije. Trajnost in odpornost betona na agresivne vode je povzročila, da se ga uporablja v industriji, kjer je voda zelo onesnažena, celo toksična. Drugi razlog, zakaj je beton najširše uporabljan gradbeni material je ta, da z njim lahko gradimo objekte različnih oblik in velikosti. Razlog za to je lastnost svežega betona, da prevzame obliko opaža, v katerega beton vgradimo. S časom se beton strdi in doseže visoke trdnosti. (Mehta, 1986).



Slika 6: Betonska cev (Nivo, 2012).



Slika 7: Hoover dam (DesertUSA, 2012).

Tretji razlog za njegovo široko uporabo je ta, da je najcenejši med gradbenimi materiali, saj so osnovni materiali praviloma na razpolago blizu betonarn, kjer se beton proizvaja. V primerjavi z drugimi gradbenimi materiali se za beton porabi bistveno manj energije za njegovo proizvodnjo (P. Kumar Mehta, 1986).

3.2 Klasifikacija betona

Beton je glede teže klasificiran v tri kategorije. Če vsebuje naravni pesek in gramoz ali naravni drobljen agregat, ima gostoto okoli 2400 kg/m^3 . Tega imenujemo normalno-težek beton in je najbolj pogosto uporabljen za gradnjo. Izraz lahek beton se uporablja za betone, ki imajo gostoto manjšo od 1800 kg/m^3 . Klasifikacija je prikazana v preglednici 3. Po drugi strani pa je težek beton sestavljen iz agregata visoke gostote in ima gostoto okoli 3200 kg/m^3 . Uporablja se za zaščito pred sevanjem.

Betone razdelimo v tri kategorije, odvisne od tlačne trdnosti betona:

- beton nizkih trdnosti: manj kot 20 MPa tlačne trdnosti,
- beton običajnih trdnosti: 20 do 40 MPa tlačne trdnosti,
- beton visokih trdnosti: več kot 40 MPa tlačne trdnosti.

(Mehta, 1986)

Preglednica 3: Različne trdnosti betona in delež sestavin v njem (Mehta, 1986: str. 11).

BETON	nizko-trden	srednje-trden	visoko-trden
Cement (kg/m ³)	257	360	515
Voda (kg/m ³)	180	180	180
droben agregat (kg/m ³)	808	856	900
grob agregat (kg/m ³)	1180	1042	880
Delež cementne paste:			
procent po masi	18	22,1	28,1
procent po volumnu	26	29,3	34,3
V/c količnik po masi	0,7	0,5	0,35
trdnost (Mpa)	18	30	60

3.3 Priprava betona

Beton se praviloma pripravlja na strojni način, manjše količine pa lahko tudi na ročni. Uporabljamo različne vrste mešalcev. Danes je večina betonov transportnih betonov, ki jih zamešajo v betonarnah. Iz betonarn beton transportirajo v transportnih mešalcih do gradbišč. Na sliki 9 vidimo manjši laboratorijski mešalec.



Slika 8: Priprava betonske mešanice v laboratorijskem mešalcu (Prinčič, 2012).

Beton se kakovostno zmeša že v 30 do 60 sekundah (Gradiva vaje, 2005).

3.4 Odvzem vzorcev svežega betona za preiskave

Odvzem vzorcev svežega betona za preiskave opisuje standard SIST EN 12350-1. Iz količine betona, katerega preizkušamo, odvzamemo svež beton v količini, ki je vsaj 1,5 krat večja od količine potrebne za izvedbo preiskave in ne manjša od $0,02 \text{ m}^3$. To količino imenujemo vzorec. V vseh fazah odvzema moramo ščititi vzorec pred izgubo vode, pred vplivi povišane temperature in segregacijo (Gradiva vaje, 2005).

3.5 Določitev vsebnosti zraka

Delež zraka v betonu določamo po standardu SIST EN 12350-7. Standard opisuje dve metodi, (metoda vodnega stolpca, metoda s tlakom) za določanje vsebnosti zraka v svežem betonu, ki je pripravljen z normalno težkim agregatom, katerega največje zrno ni večje od 63 mm. V diplomski nalogi smo določali vsebnost zraka z metodo tlaka. Princip metode je, da v zatesnjeni posodi (slika 10) združimo znano prostornino zraka z znanim tlakom ter neznan prostornino zraka v vzorcu svežega betona. Skala manometra je kalibrirana tako, da kazalec na manometru pokaže rezultirajoč tlak kot delež zraka v svežem betonu v odstotkih. Posodo napolnimo z svežim betonom v treh slojih. Višek odstranimo z ravnilom, da je površina gladka. Na osnovno posodo pritrdimo pokrov in skozi odprtini z ventilom vlijemo vodo, dokler ne zapolnimo prostora nad betonom. Ventila zapremo, ko prenehajo izhajati zračni mehurčki. Nato z ročno črpalko vnesemo toliko zraka v pred-komoro, da kazalec na manometru pokaže nulo. Takrat je zračni pritisk približno 100 kPa. Po nekaj sekundah odpremo ventil in na manometru odčitamo indeks, ki predstavlja delež zraka v % (Gradiva vaje, 2005).



Slika 9: Naprava (porozimeter) za določanje vsebnosti zraka v betonski mešanici po metodi tlaka (Lafarge, 2012).

3.6 Določitev obdelavnosti betona s posedom

Metodo za določanje obdelavnosti svežega betona je tudi metoda s posedom. Trideset sekund po napolnitvi odstranimo konus. Odstranjujemo ga počasi (5 do 10 s). Ravnilo postavimo na zgornji rob konusa, da seže nad betonski stožec in izmerimo višinsko razliko (slika 11). Razlika višin je mera za konsistenco. Celoten potek ne sme trajati več kot 150s (Gradiva vaje, 2005).



Slika 10: Določanje poseda svežega betona (Prinčič, 2012).

3.7 Vgrajevanje betona

Zelo pomembno pri vgrajevanju betona je, da ne pride do segregacije. Ko beton transportiramo in vgrajujemo, morajo biti zrna v mešanici enakomerno porazdeljena, da ne pride do posedanja večjih zrn na dno. Betonska mešanica mora biti homogena. Najboljše je, če beton pripravljamo blizu mesta vgradnje (Žarnič, 2005).

3.8 Izcejanje vode

Do izcejanja vode pride zaradi segregacije in slabe homogenosti. To je pojav, ko se na vrhu sveže betonske mešanice nabira voda. Posledica tega je, da je na vrhu V/C količnik prevelik, na dnu pa premajhen. Zgornja plast ima zato slabo trdnost in obstojnost ter neprepustnost. Pojav izcejanja zmanjšamo z aeriranjem, ustrezno zrnovostno sestavo agregata, z različnimi kemijskimi dodatki ali nadomestnimi cementnimi materiali (Žarnič, 2005).

3.9 Konsolidacija

Ko vgrajujemo beton, moramo s pomočjo vibratorjev in nabijal spraviti delce sveže betonske mešanice v gibanje, da se zmanjša njihovo medsebojno trenje. Mešanica se s tem bolj zgosti. Vibriranje uporabimo pri manjšem deležu cementne paste v svežem betonu. Vibratorji so lahko iglaste oblike (slika 12) ali pa so pritrjeni na kovinske opaže (Žarnič, 2005).



Slika 11: Vibriranje med vgrajevanjem betona (Pravi majstor, 2012).

3.10 Nega betona pri normalnih temperaturah

Proces hidratacije smo že podrobno opisali v prejšnjem poglavju. Po vgraditvi betona je potrebno beton pravilno negovati. Dokler so v cementni pasti še nehidratizirani delci cementa, trdnost betona narašča, če je na razpolago dovolj vode. Najpomembnejše je, da beton negujemo v prvem mesecu starosti. Vlažnost mora biti vsaj 80% in temperatura okolice mora biti dovolj visoka. Zelo pomembno je, kako se beton suši. Prehitro sušenje povzroča razlike med zunanjim in notranjim betonom. V notranjosti se beton veliko počasneje suši. Posledica tega so razpoke. Temu se izognemo s pokrivanjem betona z mokrimi prevlekami in različnimi folijami, polivamo ga z vodo, uporabimo kemijska sredstva za nego itd. Beton se bo čez celoten prerez tako sušil enakomerno (Žarnič, 2005). Mi smo betonske kocke negovali v vodnih bazenčkih, kot kaže slika 13.



Slika 12: Nega betonskih kock v bazenih (Prinčič, 2012).

3.11 Nega in zaščita betona pri visokih temperaturah

Ko dnevna temperatura preseže 30 °C, moramo upoštevati pogoje visokih temperatur. Zakonitosti so enake, kot pri normalnih pogojih, samo upoštevati je potrebno večje izhlapevanje in temperaturo. Ko se beton veže, ne sme temperatura betona preseči 65 °C. V takih razmerah je hidratacija cementa močno pospešena in sledi lahko močno krčenje, ki povzroči oblikovanje razpok v betonu. Zato je beton potrebno ustrezno negovati vsaj 7 dni. Mlad beton moramo ustrezno hladiti in vlažiti s polivanjem in pršenjem vode, lahko pa tudi s pokrivanjem le tega z različnimi materiali, ki vzdržujejo vlago. Paziti pa moramo, da ga ne polivamo z vodo preveč intenzivno, saj lahko izperemo cementno malto. Poleg tega pa segret beton lahko tudi razpoka, če ga polivamo z mrzlo vodo, saj se po prerezu pojavijo velike temperaturne razlike.

**Preglednica 4: Priporočljive vrednosti za minimalni čas negovanja svežega betona v dneh
(Bratina, 2012).**

Temperatura (°C)	Relativna vlažnost (%)			
	0 do 25	25 do 50	50 do 75	75 do 100
40 do 45	6	5	4	3
35 do 40	7	6	5	4
30 do 35	6	5	4	3
25 do 30	5	4	3	
20 do 25	4	3		
15 do 20	3			
10 do 15	3			
5 do 10	3	3		

Iz preglednice 4 je razvidno, da imata temperatura in relativna vlažnost okolice zelo pomembno vlogo pri negi svežega betona. Višja je temperatura in manjša je vlažnost, več dni moramo beton negovati. Rumena barva predstavlja območje, kjer betonu ni potrebno posvečati posebne pozornosti pri negovanju. Če je pri negi betona prisoten tudi veter, se izhlapevanje vode samo se pospeši (Božič, /).

4 KOROZIJA BETONA

Ko voda, ki vsebuje škodljive snovi, vstopa v beton, se lahko pojavi propadanje betona. Cement ima porozno strukturo, zato pride do kemijskih reakcij s produkti hidratacije. Rezultat tovrstnih reakcij so velikokrat mehanske poškodbe betona. Ker se poškodbam izogibamo, je zelo pomembno, kako se beton obnaša v nekem agresivnem okolju. V diplomski nalogi smo ocenjevali, kako je beton odporen na kisle raztopine pri sobni in povišani temperaturi.

4.1 Kemijska korozija

Največji razlog za razpadanje betona je kemijska korozija, ki neposredno napade vezivo strjenega betona in le redko agregatna zrna. Lahko nastane na površini ali v notranjosti betona. Na to vplivajo neprepustnost, nega betona in vgradnja. Med kemijsko korozijo štejemo delovanje kloridov na armaturo, delovanje sulfatov, delovanje kislin in mehke vode, karbonatizacijo betona,..in drugo. V pore betona kemijske substance vdrejo s pomočjo:

- vode (morska voda, deževnica, odpadna voda,..),
- zraka (dimni plini kot so CO_2 , SO_2 ,..),
- kloridi iz agregata in kemijskih dodatkov.

Ko voda z drugimi kemijskimi snovmi vstopa v beton iz okolja, velikokrat nastanejo produkti reakcij med produkti hidratacije cementa in kemijskimi snovmi, katerih prostornina je večja od prostornine snovi, ki v reakcijo vstopajo. Produkti s povečano prostornino so vzrok razpok, katere nastanejo zaradi napetosti, ki jih povzročajo ti produkti. Razpokam se izognemo z uporabo ustreznih materialov v določenem okolju in z dovolj gostim betonom.

Najpomembnejše pri dimenzioniranju in načrtovanju betonskih konstrukcij je poznavanje, kako beton reagira z določenimi agresivnimi snovmi. Testi v laboratoriju na primer ne pokažejo realne ocene sulfatne korozije v daljšem časovnem obdobju. Če poznamo lastnosti cementnega kamna, agregata in njihove stopnje ranljivosti na agresivne vplive okolja, lahko zmanjšamo korozijo betona na minimum. V AB konstrukcijah je stopnja zaščite armature odvisna od strukture in razpokanosti cementnega kamna. Poznamo več vrst korozije:

- reakcije ionske izmenjave med agresivnimi raztopinami in ioni spojin strjenega cementa,
- alkalno agregatna reakcija med alkalijami v vezivu in minerali v agregatu,
- nabrekanje in pokanje zaradi nastanka ekspanzije (širjenje) produktov v betonu,
- hidroliza in izluževanje komponent strjenega cementnega kamna.

Glavni mehanizmi, ki prispevajo k propadanju cementnega kamna so reakcije povezane z volumsko spremembo znotraj materiala. Pomembne so tudi kemijske reakcije povezane z razpadom vezivne komponente cementnega kamna in še fizikalni procesi, ki vplivajo na propadanje cementnega kamna (krčenje, zmrzovanje/tajanje,...).

4.2 Reakcije povezane s spremembo volumna

Pri teh reakcijah iz reaktantov z nizko gostoto nastajajo produkti z visoko gostoto, kar povzroča napetosti v materialu, ki lahko povzročijo destrukcijo in nastanek razpok. Lahko pa se zgodi obraten proces, ko iz reaktantov z visoko gostoto nastajajo snovi z nizko gostoto in pri tem postaja material porozen.

4.3 Reakcije povezane z vezivom v cementnem kamnu

Te reakcije povezujejo procese med vezivno snovjo v cementnem kamnu (C-H-S gel) in drugo snovjo iz zunanje okolice (magnezij, sulfat in karbonat).

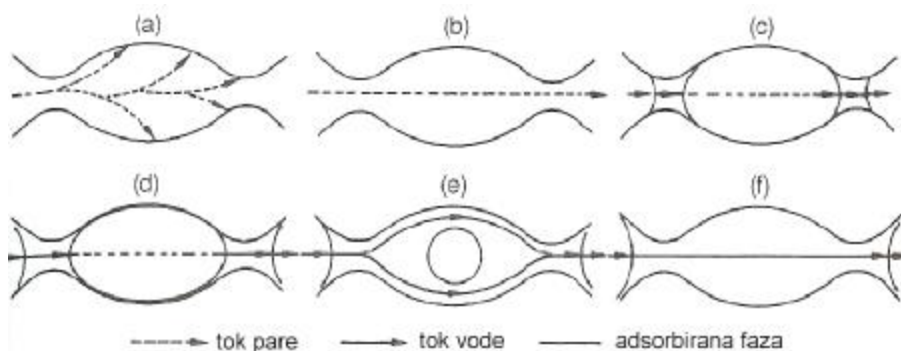
4.4 Fizikalni procesi propadanja cementnega kamna

Sem spadajo poškodbe zaradi krčenja materiala, mehanskih obremenitev in temperaturnega gradienta. Hitrost reakcij je odvisna od transporta snovi znotraj materiala, poroznosti, razpok in prisotnosti vode. Slednja je odlično transportno sredstvo za snovi v materialu. V suhem betonu so transportni tokovi skoraj ničelni.

4.5 Transportni mehanizmi agresivnih snovi v beton

Transport snovi v betonih je odvisen od poroznosti, porazdelitve por po velikosti, povezanosti in zapletenosti pornega sistema. Omenjene lastnosti pornega sistema zavisijo predvsem od uporabljenih

materialov, v/c razmerja, stopnje hidratacije, priprave in vgradnje materiala ter od nege.



Slika 13: Shematski prikaz transportnih mehanizmov v poroznih materialih.

Običajno se transportni mehanizmi v poroznih materialih shematsko prikažejo s pomočjo modela idealizirane pore, zožene na obeh straneh (Slika 13). Ker pa je voda glavni vir propadanja materialov s cementnim vezivom, se praviloma mehanizmi transporta opišejo na primeru vode. Pri zelo nizki relativni vlagi okolice je voda v obliki pare in se adsorbira na suhe površine produktov hidratacije (stopnja a). Z naraščanjem vlage je adsorbpcija vode končana in začne se direktno gibanje pare skozi poro zaradi razlik v tlaku ali koncentraciji, to je difuzija vodne pare (stopnja b). Stopnja c nastopi, ko je relativna vlaga dovolj visoka, da pride do kondenziranja vode v zoženih predelih pore. Ta kondenzacija skrajša pot za prenos pare in s tem poveča stopnjo gibljivosti. Območja s kondenzirano vodo se z večanjem vlažnosti širijo (stopnja d) dokler se ne povežejo z adsorbiranimi vodnimi molekulami na razširjenem delu pore in vzpostavi se tako imenovano kapilarno gibanje vode vzdolž sten por. Z nadaljnjim naraščanjem vlažnosti nastopi tečenje vode zaradi razlike v tlaku, najprej v nepopolno zasičenem stanju (stopnja e), na koncu pa še v zasičenem stanju (stopnja f). Poleg vode se bodo skozi zasičene pore gibale seveda tudi snovi in plini, razstopljeni v vodi. Na podlagi opisanih transportnih mehanizmov v poroznih materialih ločimo tri procese fizikalne penetracije v porozni material: Tečenje pod tlakom, difuzijo in kapilarna absorpcija.

4.5.1 Difuzija

Difuzija je velikokrat osnovni mehanizem transporta raztopljenih ionov. Je posledica naključnega termalnega gibanja molekul. To povzroča transport raztopljenih snovi (kontaminantov) iz področij z visoko koncentracijo k področjem z nizko koncentracijo. Hitrost difuzije je odvisna od velikosti razlike koncentracij na dani razdalji (koncentracijski gradient) v porni strukturi materiala. Razlika v difuzijskem obnašanju med različnimi kemijskimi specijami je praviloma relativno majhna. Za to gibanje velja Fickov zakon:

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

kjer je za x-smer:

J = gostota snovnega toka

dC/dx = sprememba koncentracije v x smeri

D = konstanta, ki jo imenujemo difuzijski koeficient, z enoto m²/s

4.5.2 Kapilarna absorpcija

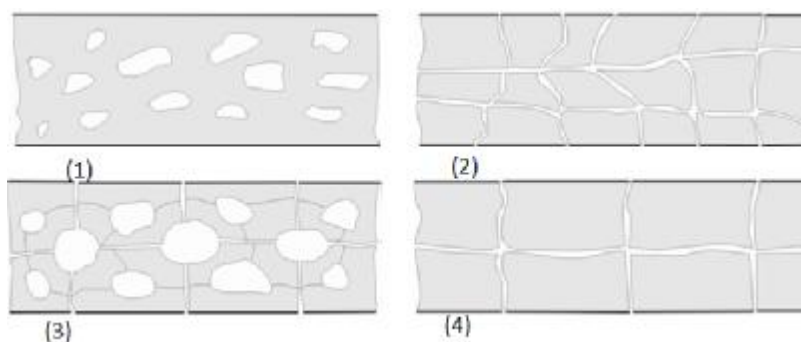
Je posledica površinske napetosti vode, na katero delujejo adhezijske sile drugih snovi. Oblikujejo se kapilarne sile v enakem velikostnem razredu kot sila teže tekočinskega stolpca, ki potegnejo vodo skozi pore. Višina kapilarnega stolpca v vertikalnih kapilarah je določena z ravnotežjem med kapilarnimi silami in težo vodnega stolpca. Zaradi podtlaka, ki nastane v vodi, ki se v kapilari dvigne, bo beton vodo zelo hitro vpijal (absorpcija), med sušenjem pa jo bo iz enakega razloga zelo počasi oddajal.

4.5.3 Tečenje pod pritiskom

Tečenje pod pritiskom se vzpostavi v betonu, ki je potopljen v vodi, ko pride do vdora vode skozi kapilare in pore zaradi hidrostatičnega pritiska. Prepustnost je odvisna od poroznosti. Imamo štiri različne tipe (slika 15):

- neprepusten, a zelo porozen(1),
- prepusten in zmerno porozen(2),
- visoka stopnja poroznosti, a nizka prepustnost(3),
- nizka stopnja poroznosti in visoka prepustnost(4).

(Prinčič, 2010)



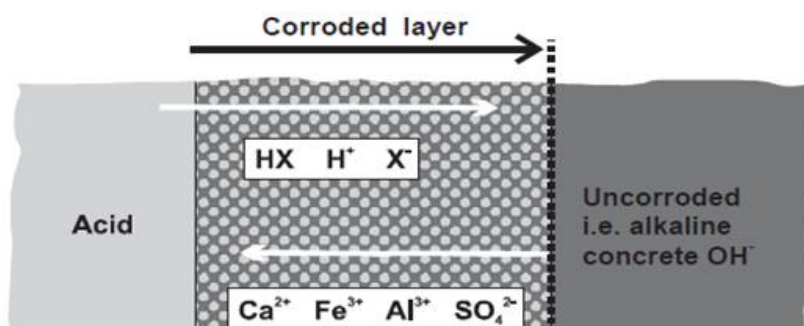
Slika 14: Vpliv geometrijskih parametrov por na prepustnost materiala (Prinčič, 2010: str. 9).

4.6 Kislinska korozija

Kislinski ioni, ki prodrejo v beton, povzročijo raztapljanje trdnih hidratacijskih produktov veziva. Lahko napadejo tudi agregat, saj ni stoodstotno odporen na kisline.

Eksperimenti nam kažejo, da je korozijska odpornost betona odvisna od kemijske sestave cementa in od pH kisline, katera je v stiku z betonsko površino. Odvisna je tudi od količine hidratacijskih produktov, kateri so udeleženi v reakcijah. Zaradi kislinske agresije aluminijevi, kalcijevi, silicijevi in železovi ioni difundirajo v poro vodo betona, ter kasneje pronicajo nazaj na površino betona. Izguba Fe_3 in Al_3 je počasnejša in se zgodi pri manjših pH vrednostih (močnejših kislinah). Izguba Ca_2 se zgodi že prej, pri večjih pH vrednostih, iz kalcijevega hidroksida. Zaradi izgube teh pomembnih ionov se spremenijo mehanske lastnosti betona. V večini primerov se trdnost, trdota in odpornost zmanjšajo. Ko se nezaščitene betonske površine, kot so cevi, zbirališča odpadnih vod, hladilni vodni stolpi in druge industrijske stavbe srečajo z kisljinami, lahko pride do razpok in poružitve. Taka izpostavljenost lahko resno ogrozi življenjsko dobo betona.

Stopnja korozije je odvisna od velikosti por. Poroznost se poveča, če je kalcij odstranjen od trdne matrice. Tako se krepi transport ionov v korozijsko plast. Ko je beton suh in izpostavljen kisljinam, kislinski ioni hitro vstopijo v pore s kapilarnim izluževanjem. Moker in vlažen beton ta pojav še pospeši in s tem se stopnja korozije poveča.



Slika 15: Migracija ionov v beton in iz njega (Robin E. Beddoe, 2005: str. 2334).

Napad kislin je po standardu SIST EN 206-1 razdeljen na tri kategorije, tako kot kaže preglednica 5. V razredu XA3, kjer je pH vrednost manj kot 4,5, so kisline najmočnejše. Srednja stopnja napada kislin je v razredu XA2 in najšibkejše so kisline v razredu XA1. Raztopine imajo različno kemijsko sestavo glede koncentracij H₂SO₃, HCl in HF. Ocena korozije je pogojena z debelino in poroznostjo razdelilne (corroded) plasti (Robin e. Beddoe, 2005).

Preglednica 5: Tri kategorije izpostavljenosti po SIST EN 206-1 (Robin E. Beddoe, Horst W. Dorner, 2005: str. 2334).

	pH	STOPNJA NAPADA
XA1	5,5-6,5	majhna
XA2	4,5-5,5	srednja
XA3	4,0-4,5	velika

V industrijskih okoljih so betonske površine izpostavljene agresivnim, gostim tekočinam. Naš poskus se osredotoča na kislinski napad na betone, v katerih kislina prodira s pomočjo difuzije. Moč napada je odvisna od jakosti kisline. Ocetne kisline razgrajujejo veliko manj kot mineralne kisline. PH kisline je odvisen od ravnovesja med protoni in kislinskimi anioni.

Tudi agregat ima pomembno vlogo pri našem poskusu. Če je beton zgrajen predvsem iz dolomita in apnenca moramo upoštevati še druge faktorje za kislinsko odpornost. Optimalna sestava betona za maksimalno kislinsko odpornost ni vedno odvisna od trdnosti betona in majhnega V/C količnika. V Nemčiji je najbolj kislinsko odporen beton zasnovan s kremenčevim agregatom in majhno količino veziva.

Stopnja korozije betona je kompleksen proces odvisen od kombinacije hidratacije, reaktivnosti agregata, dodatkov v betonu. Boljši odpor proti kislinam dosežemo z uporabo aluminatnega cementa. (Robin E. Beddoe, 2005).

4.7 Alkalno agregatne reakcije

4.7.1 Alkalno silikatna

Alkalno-silikatna reakcija je najbolj izražena alkalno-agregatna reakcija, katera se pojavi med določenimi minerali v agregatu in alkalijami v cementu. Če agregat vsebuje SiO_2 v amorfni obliki, lahko v trdnem betonu pride do take reakcije. Rezultat reakcije je alkalno-silikatni gel, ki je higroskopičen, zato v vlažnem okolju nabreka. Na ta načina nastanejo notranje napetosti, kar privede do notranjih razpok v betonu. Alkalno-silikatna reakcija nastane, če cement vsebuje več kot 0,5% alkalij.

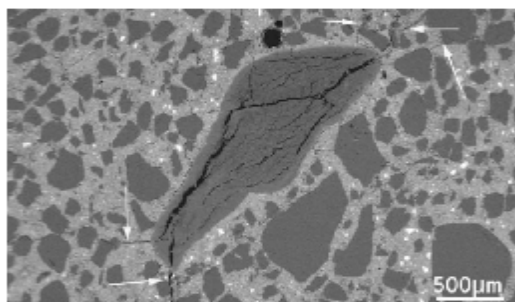
Kako lahko preprečimo tako reakcijo:

- če uporabimo cement z nizko vsebnostjo alkalij (surovine z nizkim deležem alkalij),
- z dodajanjem pucolana, ki vsebuje amorfni SiO_2 . Drobnomletni pucolani reagirajo z alkalijami, dokler je beton svež.

4.7.2 Alkalno dolomitna reakcija

Ta reakcija ni tako pomembna kot alkalno-silikatna. Pojavi se, če agregat vsebuje reaktivni dolomitni apnenec in na temperaturi nad $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posledice so podobne kot pri alkalno-silikatni reakciji (Vrkljan D., 2010).

Na sliki 17 vidimo, kako agregat razpoka. Razpoke so odvisne od vrste in oblike agregata. V tem primeru vidimo, kako podolgovat agregat razpoka v longitudinalni smeri.



Slika 16: Alkalno-agregatna reakcija. (Vrkljan D., 2010).

5 EKSPERIMENTALNI DEL

5.1 Osnovne komponente našega betona

5.1.1 Cementi in dodatki

V diplomski nalogi smo uporabili več vrst materialov za pripravo betona. Poleg portland cementa (CEM I) smo uporabili tudi žlindrin cement (CEM III). Slednji je veliko bolj odporen na kemijske reakcije, ki so posledica kislinskega okolja. Z različnimi dodatki je mogoče mehanske in kemijske lastnosti betona bistveno izboljšati. Cementu smo dodali še EFP, mikrosiliko in superplastifikator. V preglednici 6 so prikazane kemijske in fizikalne lastnosti cementov in elektrofiltrskega pepela. Portland cement in žlindrin cement je opisan v poglavju 2.1.4.

Preglednica 6: Delež oksidov v različnih vrstah cementa in elektrofiltrskemu pepelu.

DELEŽ V %	CEM I	CEM III	EFP
SiO ₂	19,33	26,98	41,98
Al ₂ O ₃	5,62	7,52	18,51
Fe ₂ O ₃	2,7	2,95	9,67
CaO	62,06	51,22	15,2
SO ₃	3,23	2,19	2,38
MgO	2,07	4,26	2,62
Na ₂ O	0,35	0,2	1,06
K ₂ O	0,75	0,81	1,91
Cl	0,009	0,007	0,006

5.1.2 Mineralni dodatki

5.1.2.1 Mikrosilika ali MS

Kot mineralni dodatek smo uporabili mikrosiliko. Več o mikrosilki je napisanega v poglavju 2.1.2.2.5.

5.1.3 Elektrofitrski pepel ali EFP

Kot zamenjavo dela cementa smo uporabili mineralni dodatek elektrofitrski pepel. Opisan je v poglavju 2.1.2.2.1.

5.1.4 Kemijski dodatek

5.1.4.1 Superplastifikator

Edini kemijski dodatek, ki smo ga uporabili za betonske mešanice, je superplastifikator na osnovi polikarboksilatov. Njegovo delovanje je opisano v poglavju 2.4.2.

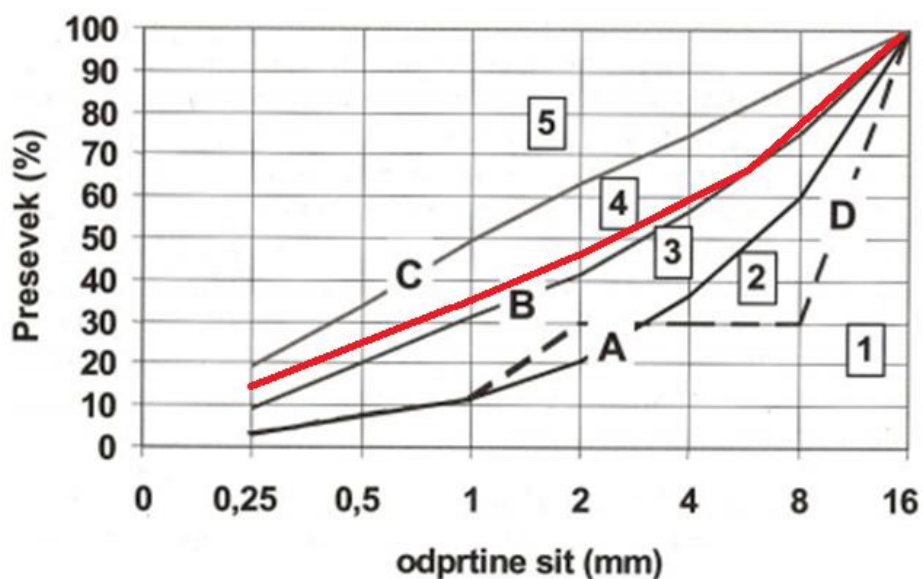
5.1.5 Agregat

Uporabili smo drobljeni karbonatni agregat iz dveh različnih kamnolomov. Prvi je agregat A, drugi pa agregat B. Več o agregatu je povedanega v poglavju 2.2. V preglednici 7 imamo opisane so navedene uporabljene frakcije in njihov delež za oba agregata.

Preglednica 7: Frakcije in njeni deleži za agregat A in B.

FRAKCIJA (mm)	DELEŽ FRAKCIJE (%)
0/2	33
2/4	22
4/8	10
8/16.	35

Na sliki 18 lahko vidimo, da naša sejalna krivulja, ki je rdeče barve in enaka za oba agregata leži znotraj območja 4 med krivuljama C in B.



Slika 17: Sejalna krivulja agregatov A in B je obarvana rdeče.

5.1.6 Voda

Za naše betonske mešanice smo uporabili pitno vodo.

5.2 Postopek dela

Postopek dela za pripravo betonskih mešanic in določitev njihovih lastnosti v svežem stanju je podrobno opisan v poglavjih od 3.3 do 3.10. Postopek sestoji iz priprave betona, odvzema vzorcev za preiskave, določitve vsebnosti zraka, določitve obdelovalnosti betona, vgrajevanje v standardne kalupe, konsolidacije in nege. Po tem smo pripravili še preizkušance iz strjenega betona z razrezom standardnih kock.

5.2.1 Vrste preskušancev

Iz posamezne vrste betona smo pripravili več različnih preizkušancev:

- Pripravili smo dve betonski kocki dimenzij (20x20x20) cm, iz katerih smo izrezali 16 prizem dimenzij (4x4x16) cm (slika 19). Na teh prizmah smo merili dinamične elastične module.
- Pripravili smo 3 kocke dimenzij (15x15x15) cm za določitev tlačne trdnosti. Tlačno trdnost smo določali pri starostih 2, 7 in 28 dni,
- Pripravili eno kocko dimenzij (15x15x15) za test prodora vode (PV).



Slika 18: Rezanje betonskih kock na prizme (Prinčič, 2012).

Betone smo pripravili s štirimi različnimi vezivi. Količina veziva v betonu je bila vedno enaka. Referenčno vezivo je vsebovalo čisti portland cement (mešanici 1 in 5). Ker se odpornost betona na kemijsko korozijo izboljša z mineralnimi dodatki, smo del portland cementa zamenjali z EFP (mešanici 2 in 6). V mešanicah 3 in 7 smo poleg portland cementa in EFP dodali še mikrosiliko. Odpornost betona na kisline se poveča z uporabo žilindrinega cementa, ki smo ga uporabili v mešanicah 4 in 8. Vseh 8 mešanic je predstavljenih v preglednici 8. Štiri mešanice so z agregatom A, štiri z agregatom B.

Preglednica 8: Različne vrste betonskih mešanic.

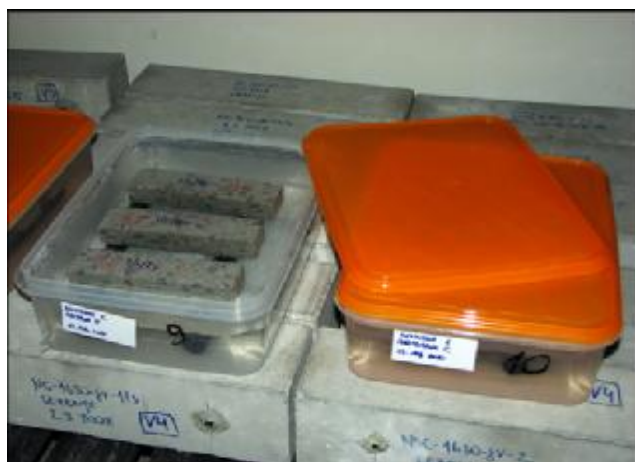
Vrsta	Betonska mešanica
1	CEM I + agregat A
2	CEM I + EFP + agregat A
3	CEM I + EFP + MS + agregat A
4	CEM III + EFP + MS + agregat A
5	CEM I + agregat B
6	CEM I + EFP + agregat B
7	CEM I + EFP + MS + agregat B
8	CEM III + EFP + MS + agregat B

5.2.2 Priprava raztopin različnih jakosti

Betonske prizme smo po štirinajstih dneh nege izpostavili trem različnim raztopinam. Pogoji kemijske agresije so pogojeni glede na analizo medija, ki mu bo beton izpostavljen. V preglednici 9 so navedene 3 različne raztopine različnih jakosti, ki smo jih uporabili pri naši študiji. Raztopina A je destilirana voda s pH vrednostjo 7, raztopina D je zelo močna kislina s pH okoli 2. Raztopina E je malo šibkejša od raztopine D, ima pH okoli 5 pri temperaturi 60 °C. Tri raztopine so predstavljene v preglednici 9.

Preglednica 9: Različne raztopine pri različnih temperaturah.

Oznaka raztopine	Vrsta raztopine	Ph raztopine
A	destilirana voda	7
D	raztopina pri 20 °C	2,0 - 2,1
E	raztopina pri 60 °C	4,9 - 5,0



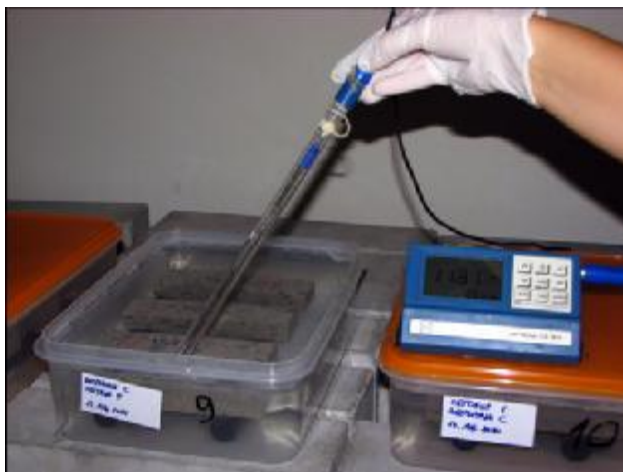
Slika 19: Betonske prizme smo dali v različne raztopine ter jih hermetično zaprli v plastične posode (Prinčič, 2012).

Navedene pH vrednosti raztopin veljajo pred tem, ko smo jih izpostavili betonskim prizmam v plastičnih posodah, kot prikazuje slika 20.

Različne betonske mešanice smo izpostavili določenemu agresivnemu okolju. Raztopini A in D sta imeli konstantno temperaturo 20 °C. Raztopina E je bila izpostavljena temperaturi 60 °C. Raztopina A,

destilirana voda, predstavlja referenčno raztopino, D in E pa predstavljata kislo agresivno okolje. Pomemben del preiskave je spremljanje rezultatov prizem v raztopinah pri 20 °C in 60 °C.

Ker je beton zelo bazičen, vrednosti pH raztopin v posameznih posodah z betonskimi prizmami dosežejo zelo visoke vrednosti. Raztopina E doseže tudi vrednost do 11, raztopina D pa tudi do 8. Način merjenja pH raztopin je vidno na sliki 21.



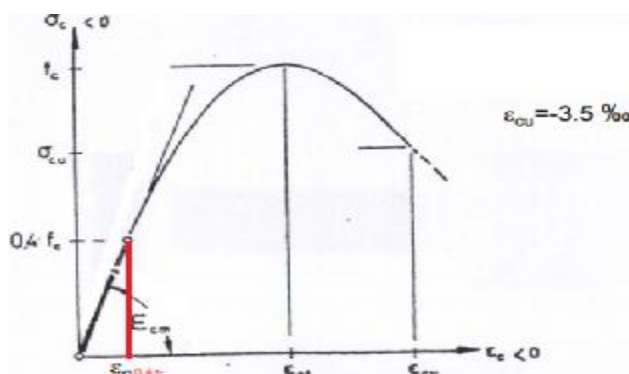
Slika 20: Merjenje pH raztopin (Prinčič, 2012).

5.2.3 Določanje dinamičnega modula elastičnosti

Določanje dinamičnega modula elastičnosti (v nadaljevanju E-modula ali elastičnega modula), natančneje sprememb E-modula s časom, predstavlja bistven del preiskav, medtem ko sta tlačna trdnost in prodor vode le vzporedni preiskavi opravljeni na strjenem betonu. Pri določanju elastičnega modula smo izhajali iz treh rezultatov (tri prizme) za vsako mešanico (1 do 8). Rezultat je povprečje rezultatov elastičnih modulov na teh treh prizmah za vsako od mešanic.

Elastični modul je fizikalna količina, določena pri raztezanju in stiskanju teles kot razmerje med mehansko napetostjo (silo na enoto preseka) in relativnim raztežkom v Hookovem zakonu. Navadno ga označujemo s črko *E*. Izpeljana enota za E-modul je N/mm² ali MPa (wikipedija, 2012).

Slika 22 prikazuje zvezo med napetostjo in deformacijo pri betonu. Z večanjem napetosti se večja tudi relativni raztezek vse do porušitve. Kasneje napetost pada.



Slika 21: Zveza med napetostjo in deformacijo pri betonu in pomen elastičnega modula (Marovič, 2007/08).

$$\varepsilon = L - L_0 / L_0$$

L_0 = začetna dolžina vzorca

L = končna dolžina vzorca pri določeni napetosti

Statični ali sekantni modul elastičnosti določimo s pomočjo enačbe:

$$E_{cm} = 0,4f_c / \varepsilon_c$$

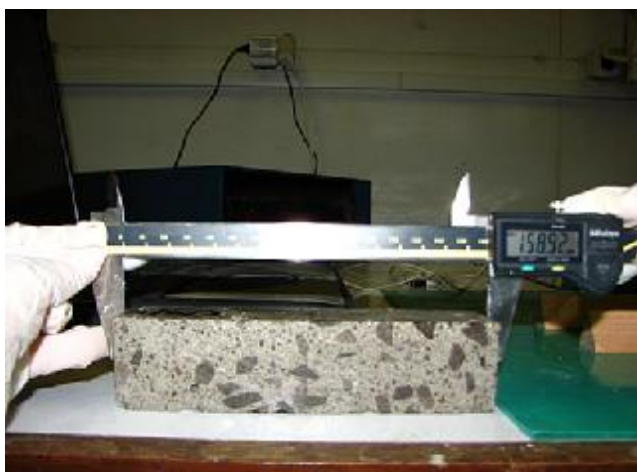
f_c = tlačna trdnost betona (MPa),

ε_c = specifična deformacija pri napetosti $0,4 f_c$,

ε_{cu} = specifična mejna deformacija betona .

V okviru naših preiskav smo določali dinamični ali tangentni modul elastičnosti, s pomočjo naprave Grindosonic. V ta namen smo opravili sledeče meritve:

- spremljali smo mase mokrih prizem (14, 28, 56,...dni),
- merili dolžino, širino, višino prizem s kljunastim merilom (slika 23),
- merili frekvence po standardnem postopku z napravo Grindosonic (slika 24).



Slika 22: Merjenje dolžine prizme (Prinčič, 2012).

Z napravo Grindosonic se meri elastične karakteristike materialov. Vsaka prizma ima zaradi drugačnega agregata in dodatkov drugačno osnovno resonančno frekvenco. Pri določitvi elastičnega modula smo uporabili longitudinalni način vzbujanja frekvence. Dinamični elastični modul se izračuna po formuli:

$$E = 0,9465 \cdot m \cdot f_r^2 \cdot L^3 \cdot T_1 / b \cdot t^3$$

E = dinamični elastični modul (Pa)

m = masa vzorca (g)

f_r = osnovna resonančna frekvenca vzorca za upogib (Hz)

L = dolžina vzorca (mm)

b = širina vzorca (mm)

t = debelina vzorca (mm)

T_1 = korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco, ki je odvisen od geometrije vzorca, Poissonovega števila,...Če je:

$L/t \geq 20$ velja poenostavljen izraz za T_1 :

$$T_1 = 1 + 6,585 (t / L)^2$$



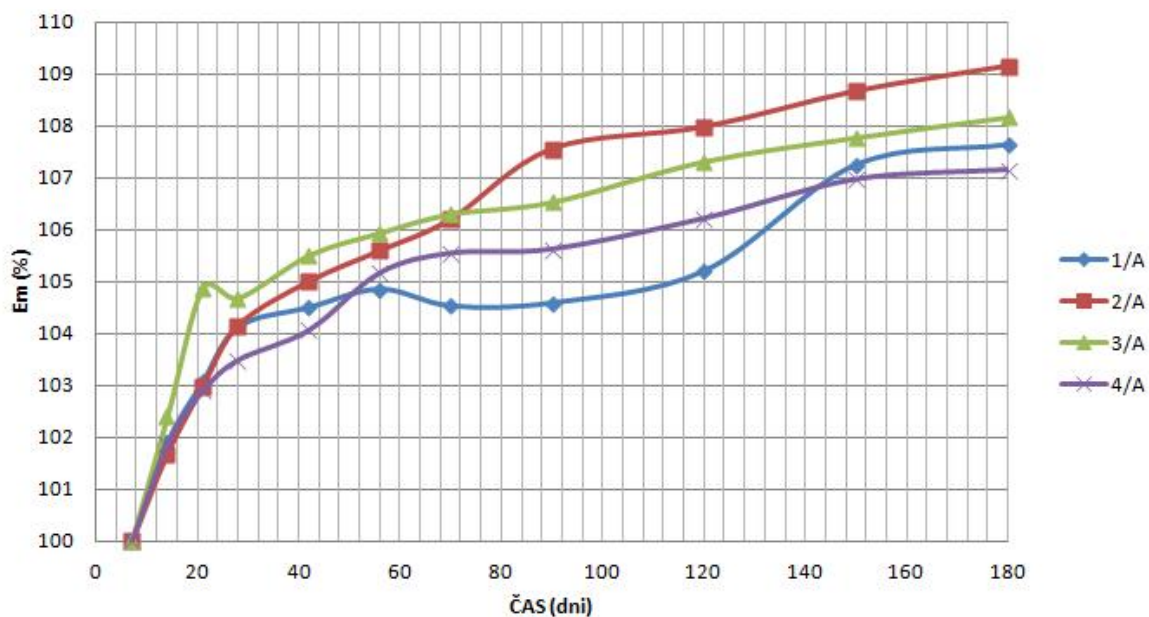
Slika 23: Merjenje frekvenc z napravo GrindoSonic (Prinčič, 2012).

Na sliki 24 je prikazan način merjenja frekvenc z napravo GrindoSonic. Prizme smo postavili na dve trikotni podpori tako, da se niso dotikale podlage. Z eno roko smo držali odčitovalec na sredini višine prizme, z drugo pa s pomočjo kladivca tolkli po sredini zgornjega dela prizme. Pri vsakem udarcu se je na napravi GrindoSonic izpisala frekvenca v različnih časovnih intervalih. Po vsaki prizmi smo desetkrat udarili in nato iz teh desetih rezultatov izračunali povprečno frekvenco. Slednjo imenujemo osnovna resonančna frekvenca za upogib v kHz.

5.2.4 Rezultati meritev elastičnega modula

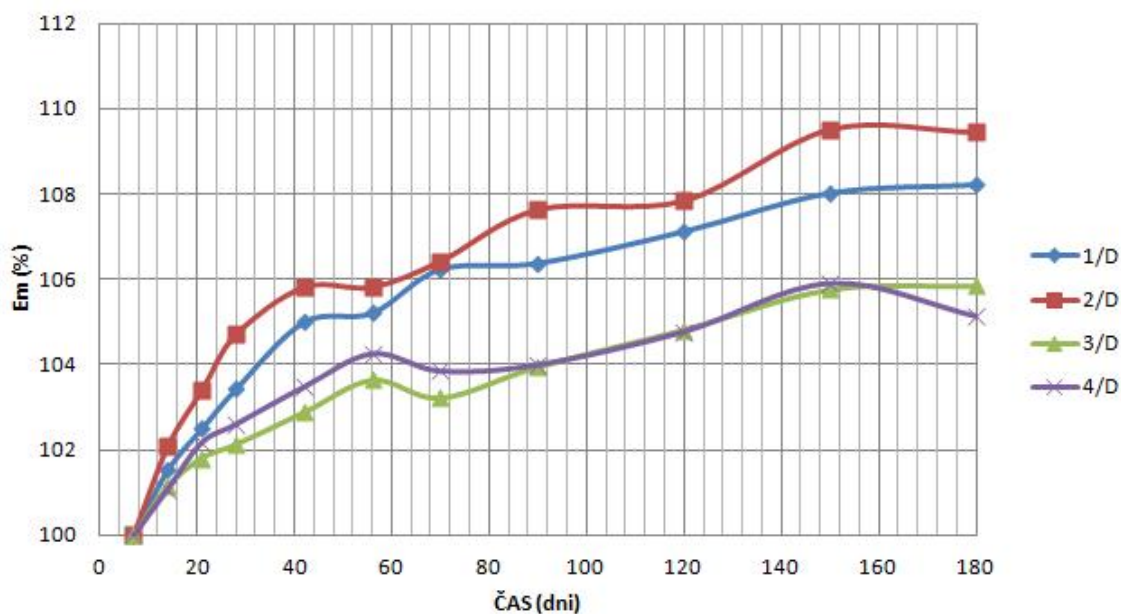
5.2.4.1 Agregat A

Imamo tri različne raztopine in sicer A, D in E. Vse tri smo nalili v plastične posode. Vanje smo nato položili betonske prizme z agregatom A, ter jih zaprli. Elastične karakteristike materialov smo določili z napravo GrindoSonic in sicer v časovnih intervalih 14, 21, 28, 42, 56, 70, 90, 120, 150, 180 dni. Iz grafikonov v nadaljevanju (grafikon 1 do 3) je razvidno, kako je sprememba elastičnega modula odvisna od časa za betonske mešanice.



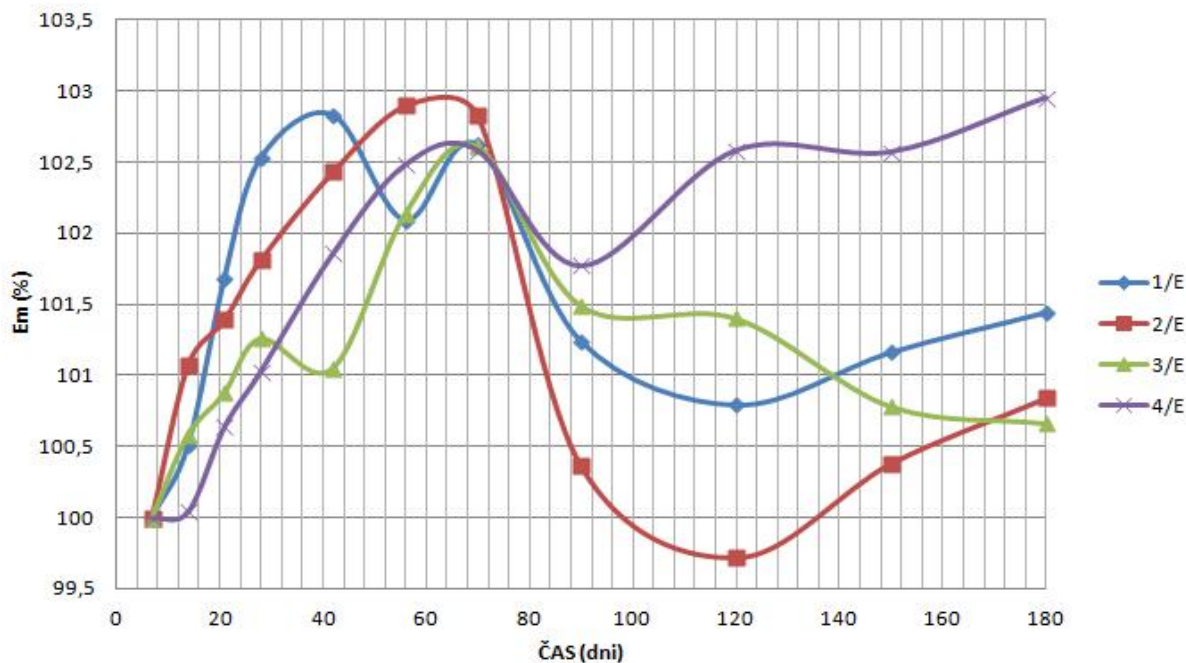
Grafikon 1: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini A.

V raztopini A elastični moduli s časom naraščajo. To prikazuje grafikon 1. Večji kot je modul, bolj je material gost in trden.



Grafikon 2: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini D.

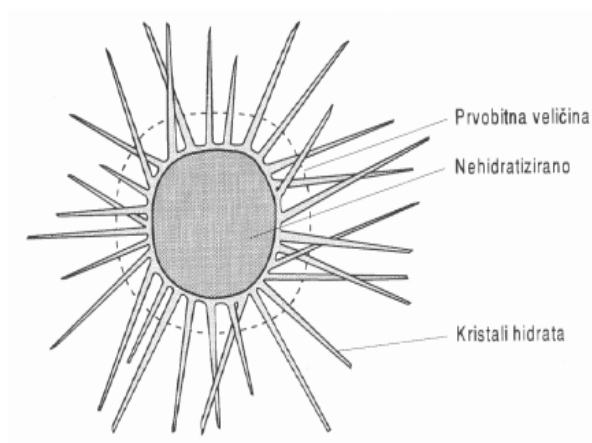
Grafikon 2 predstavlja spremembo elastičnega modula v raztopini D. Moduli s časom naraščajo, padati bi lahko začel le E-modul pri sestavi betona 4 in po 150 dnevni izpostavljenosti betona raztopini. Tu je vezivo kombinacija CEM III, EFP in mikrosilike. Tako, kot v raztopini A tudi v raztopini D ne pride do jasnega padanja elastičnega modula in s tem do večjih poškodb.



Grafikon 3: Betonske mešanice 1, 2, 3, 4 z agregatom A v raztopini E

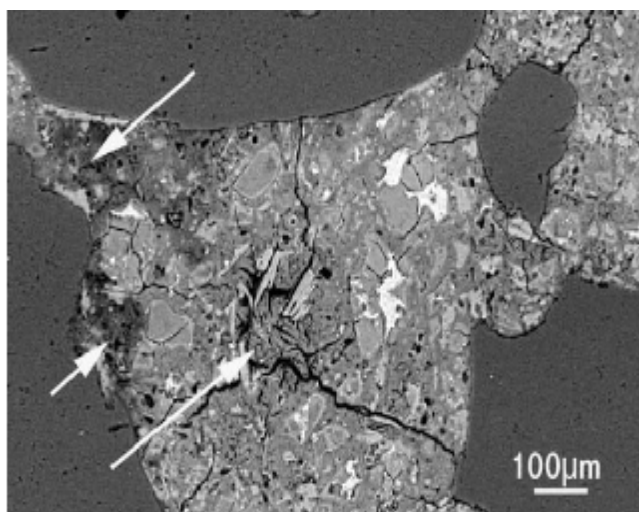
Vrednosti elastičnega modula za prizme iz betonskih mešanic 1, 2, 3, 4 v raztopini E naraščajo vse do 70. dneva, kot je prikazano na grafikonu 3. To pomeni, da se poroznost zmanjšuje. Iz tega sledi, da se gostota cementnega kamna s starostjo povečuje. To lahko pripišemo nastanku hidratacijskih produktov. Za betonske prizme, katere so bile izpostavljene raztopini E, se po 70. dneh njihove krivulje sekajo v eni točki. Pri izpostavljenosti prizem raztopini E za čas večji od 70 dni začnejo elastični moduli strmo padati. Padec je najbolj strm pri mešanici 2 (CEM I in EFP), najmanjša sprememba modula elastičnosti pa pripada mešanici 4 (CEM III, EFP in MS). Vidimo, da je stabilnost betona povezana z njegovo kemijsko sestavo. Po 120. dneh izpostavljenosti raztopini E krivulje ponovno naraščajo, razen pri mešanici 3. Ponovno naraščanje bi lahko bilo posledica zapoznelega oblikovanja etringita.

Etringit velikokrat nastane, če negujemo beton pri visokih temperaturah (s paro). Pri temperaturah višjih od 65 °C koncentracija sulfatnih ionov naraste.



Slika 24: Kristalizacija etringita. (Vrkljan D., 2010).

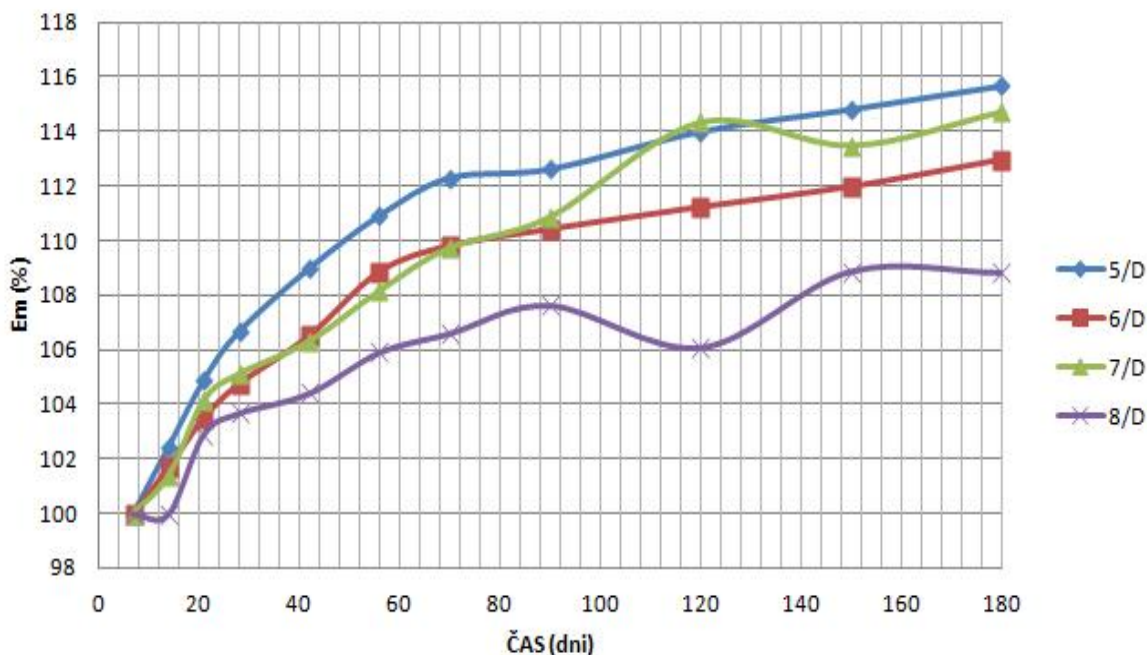
Etringit zasede večjo prostornino kot monosulfat, zato se oblikujejo razpoke v strjenem betonu. Razpoke zaradi zapoznelega oblikovanja etringita prikazuje slika 26.



Slika 25: Raztezanje cementnega kamna zaradi tvorbe sekundarnega etringita pod mikroskopom (Vrkljan D., 2010).

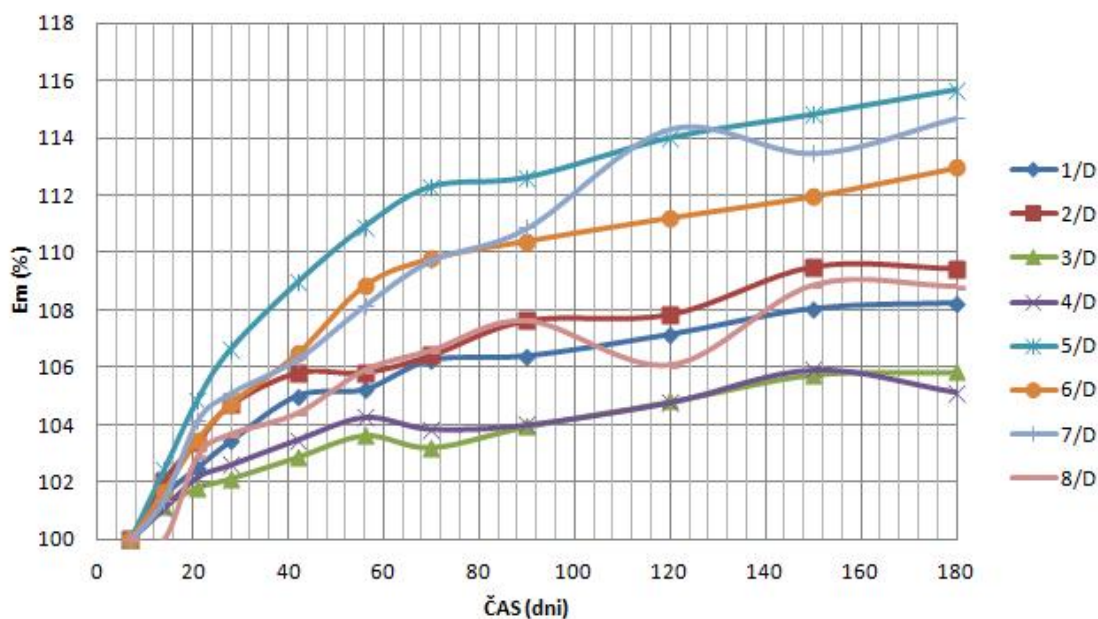
5.2.4.2 Agregat B

Za študijo vpliva vrste agregata smo pripravili še set štirih betonskih mešanic z enakim razmerjem sestavin betona vendar z drugim agregatom. Ta je agregat B.



Grafikon 4: Betonske mešanice 5, 6, 7, 8 z agregatom B v raztopini D.

Elastični moduli naraščajo enakomerno in počasi, kot je razvidno na grafikonu 4. Modul elastičnosti je zelo odvisen od granulometrijske sestave (velikosti delcev agregata) agregata, njegove gostote in trdnosti. Na grafikonu 5 vidimo, kako so elastični moduli odvisni od vrste agregata. Pri agregatu A elastični modul najhitreje narašča pri mešanici 1. Tu je vezivo portland cement brez dodatkov žindre, EFP in/ali mikrosilike. Podobno velja za mešanico 5 pri agregatu B. V obdobju 180 dni moduli ne padajo, kar pomeni, da se razpoke, ki bi jih detektirali z uporabljeno preskusno metodo, ne oblikujejo. Zato sklepamo, da v teh primerih ne pride do zapoznelega oblikovanja etringita. Iz dobljenih rezultatov vidimo, da temperatura zelo vpliva na mikrostrukturo betona, saj v destilirani vodi in kislem agresivnem okolju pri 20 °C ne pride do porušitve materiala. Vse mešanice so obstojne na izbrano jakost raztopine. Na grafikonu 5 vidimo, da je vseh 8 mešanic z obema vrstama agregata A in B odpornih na močno kislinsko okolje raztopine D pri 20 °C, saj elastični modul ne pada. Po drugi strani pa se pri šibkejšem agresivnem okolju ter povišani temperaturi (60 °C) material poruši. Tu se lastnosti betona poslabšajo in spremeni se struktura betona.



Grafikon 5: Vseh osem betonskih mešanic v raztopini D.

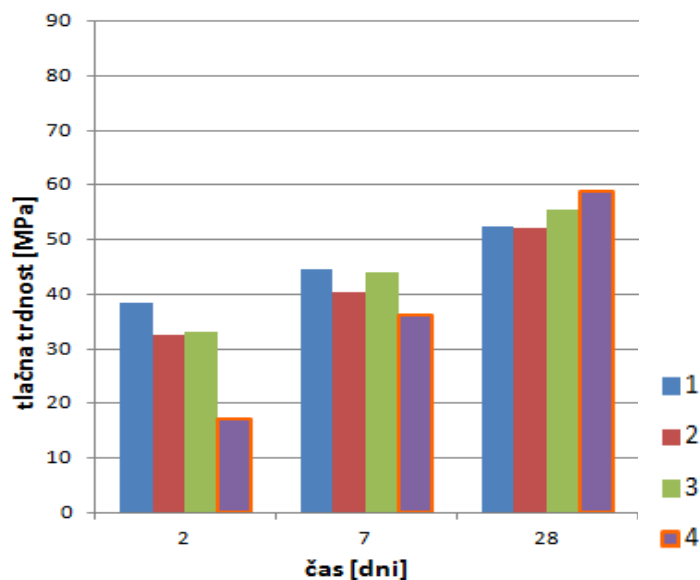
5.2.5 Določanje tlačne trdnosti

Tlačno trdnost določamo po standardiziranem postopku na valjih premera 15 cm in višine 30 cm ali na kockah z robom 15 cm pri starosti 28 dni ali pri drugačnih starostih. Definirana je kot največja izmerjena odpornost na osno tlačno obremenitev. Vzorci se jemlje dnevno v betonarnah ali na gradbišču, ker nas zanima kvaliteta vgrajenega betona. V betonarni pa spremljajo kvaliteto proizvodnje betona. Kocko ali valj damo v stiskalnico. Sila mora delovati pravokotno na površino. Hitrost obtežbe je $0,6 \text{ N/mm}^2\text{s} \pm 0,4 \text{ N/mm}^2\text{s}$ in je konstantna vse do porušitve vzorca. (Gradiva praktikum, 2008).



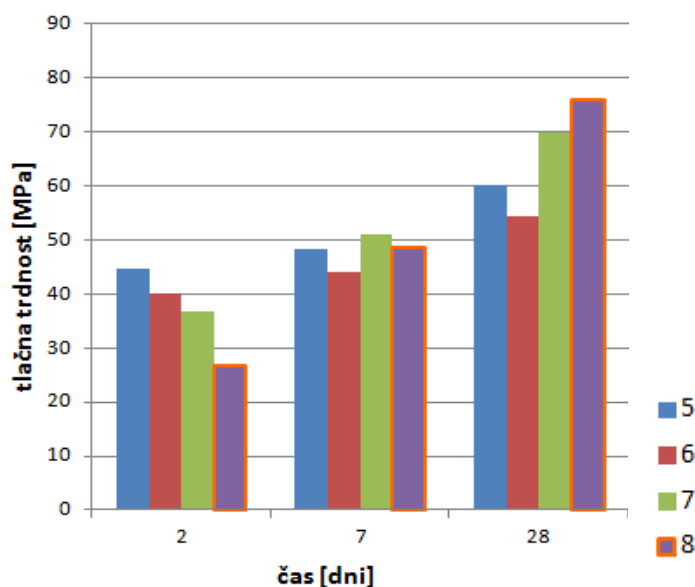
Slika 26: Naprava za določanje tlačne trdnosti (Lafarge, 2012).

Naprava za določanje tlačne trdnosti je prikazana na sliki 27.



Grafikon 6: Tlačne trdnosti betonskih mešanic 1, 2, 3, 4 z agregatom A.

Na grafikonu 6 lahko vidimo, da je začetna tlačna trdnost pri mešanicah z agregatom A večja, ko je vezivo le čisti portland cement (klinker), brez dodatkov mikrosilike, EFP in/ali žindre. Po 28 dneh se stanje spremeni in višje tlačne trdnosti začenjajo dosegati mešanice z mikrosiliko in EFP. Najvišjo tlačno trdnost po 28 dneh (malo pod 60 MPa) doseže mešanica 4 z žlindrinim cementom in dodatki mikrosilike in EFP. Nekoliko nižjo 28-dnevno tlačno trdnost doseže beton 3, ostali dve mešanici (1 in 2) pa dosežeta vrednosti okrog 50 MPa.



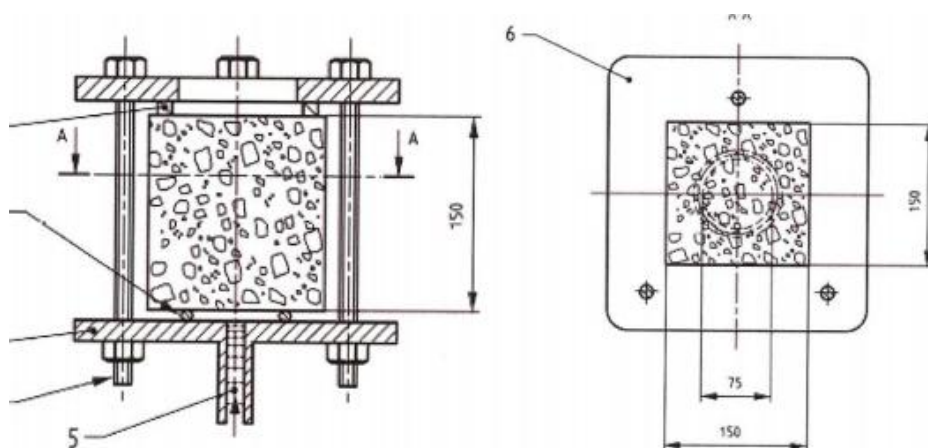
Grafikon 7: Tlačne trdnosti betonskih mešanic 5, 6, 7, 8 z agregatom B.

Grafikon 7 prikazuje razvoj tlačnih trdnosti betona do 28 dni za agregat B. Razvidno je, da so po 2 dneh začetne tlačne trdnosti s čistim Portland cementom brez dodatkov večje kot z mineralnimi dodatki. Po 28. dneh betona 7 in 8 dosežeta višje tlačne trdnosti kot beton 5. Podobno se obnašajo tudi mešanice z agregatom A. Najvišje tlačne trdnosti dosežejo torej betoni s kombinacijo mineralnih dodatkov EFP in mikrosilike. Iz primerjave rezultatov na grafikonih 6 in 7 lahko tudi zaključimo, da so 28-dnevne tlačne trdnosti betonov izdelanih z agregatom B od 5 do 17 MPa višje kot pri betonih z agregatom A.

Rezultati tlačnih trdnosti betonov niso reprezentativni, saj so bile meritve opravljene le na eni kocki. Dejanska razmerja med betonskimi mešanicami bi lahko ocenili šele na podlagi rezultatov vsaj treh preskusov za posamezno vrsto betona in starost preskušanca.

5.2.6 Prodor vode

Prodor vode izvajamo po standardnem postopku (SIST EN 12390-8) na kocki 150mm x 150mm x 150mm pri starosti vsaj 28 dni in ne več kot 35 dni. Voda pod konstantnim pritiskom prodira v kocko v napravi. Pritisk vode je približno 500 kPa. Kocko damo iz kalupa. Površino, katera je bila izpostavljena vodi pod pritiskom, zbrusimo. To delamo toliko časa, dokler ne odstranimo cementnega mleka z nje. Kocko nato razcepimo in pravokotno na površino odčitamo maksimalno globino v mm.



Slika 27: Kocko damo v napravo za preskušanje in jo nato podvržemo vodnemu pritisku (Birk, 2010: str. 33).

Preglednica 10 prikazuje rezultate za 8 različnih betonskih mešanic, globino prodora vode, tlačno trdnost pri starosti 28 dni in gostoto v strjenem stanju.

Preglednica 10: 28-dnevna tlačna trdnost, gostota in prodor vode.

Vrsta	Prodor vode(mm)	Tlačna trdnost po 28 dneh (MPa)	Gostota(kg/m ³)
1	15	52,3	2412
2	18	52,2	2400
3	5	55,5	2382
4	3	58,9	2375
5	0	60,0	2530
6	7	54,4	2489
7	3	69,9	2495
8	20	75,8	2501

Pri agregatu A voda najgloblje prodre v kocko s CEM I in elektrofitrskim pepelom. Najmanjši prodor vode se zgodi v kocki izdelani z betonskima mešanicama 3 in 4, kjer sta cementu CEM I ali CEM III dodana EFP in mikrosilika. Pri agregatu B je prodor vode velik samo pri betonski mešanici 8 (CEM III, EFP, MS, agregat B), drugače je prodor vode majhen. Ker je bil test opravljen le na eni kocki, je potrebno dobljene rezultate jemati z rezervo.

Vse betonske mešanice so uvrščene v najvišjo stopnjo odpornosti proti prodoru vode (PV3) v skladu z določili standarda SIST 1026:2008. To pomeni, da globina prodora vode ni večja od 20 mm (dovoljeno odstopanje +5 mm).

6 SKLEP

Študijo vpliva kemijske agresije na beton pri normalni in povišani temperaturi smo opravili z meritvami spreminjanja dinamičnega elastičnega modula v različnih časovnih intervalih. Pripravili smo osem različnih betonskih mešanic, ki smo jih izpostavili trem različnim raztopinam pri temperaturah 20 °C in 60 °C. Mešanice so se razlikovale po vrsti veziva in vrsti karbonatnega agregata. Za prve štiri smo uporabili agregat A, za druge štiri pa agregat B. Veziva so se razlikovala po vrsti osnovnega cementa (CEM I in CEM III) ter različnih dodanih mineralnih dodatkih (EFP in mikrosilika).

Cilj diplome je bil spremljati spremembe dinamičnih elastičnih modulov betonov s časom v različnih agresivnih okoljih in na podlagi dobljenih rezultatov oceniti morebitno poškodovanost njihove strukture. Elastični modul smo določali z napravo GrindoSonic v časovnih intervalih: 7, 14, 21, 28, 42, 56, 70, 90, 120, 150, 180 dni. Za vrednotenje betona v strjenem stanju smo po 28 dneh opravili še standardne preskusne metode, kot sta tlačna trdnost in odpornost proti prodoru vode pod pritiskom. Na preizkušancih v kisli raztopini E pri 60 °C smo ugotovili, da je beton zelo občutljiv na kombinacijo kisle raztopine in povišane temperature, saj se mikrostruktura betona občutno spremeni, kar dokazuje hitro nižanje modulov elastičnosti s časom po 70 dneh izpostavljanja preskušancev raztopini. Padec modula je bil najmanjši pri sestavi 4 (CEM III, EFP, mikrosilika, agregat A), zato je ta mešanica najbolj ugodna za dano kislo okolje. Žlindrin cement vsebuje manj kalcijevega aluminata. Iz tega sledi, da tvori manj monosulfata in zato se tvori manj sekundarnega etringita. Oblikovanje sekundarnega etringita namreč povzroči notranje napetosti v cementnem kamnu in s tem razpoke. Na podlagi dobljenih rezultatov lahko ugotovimo, da je šibkejše kislinsko okolje pri povišani temperaturi bolj agresivno za strukturo betona, kot zelo kislo okolje pri sobni temperaturi.

Vrednosti elastičnih modulov pri 20 °C naraščajo, kar pomeni, da ne nastajajo razpoke v strukturi strjenega betona. V raztopini A (destilirana voda) se najboljše obnaša mešanica 4. Tako kot v raztopini A, se tudi v raztopini D dobro obnašajo vse mešanice. To pomeni, da so vse odporne na dano kislinsko okolje.

Rezultati standardnih preiskav tlačne trdnosti pokažejo, da najvišje 28-dnevne tlačne trdnosti dosežeta mešanici 4 in 8, ki vsebujeta žlindrin cement z dodatkom mikrosilike in elektrofiltrskega pepela.

Tudi za določitev odpornosti betona proti prodoru vode smo uporabili standardni test. Prišli smo do ugotovitve, da je pri agregatu A najboljša mešanica 4. Prodor vode se z dodatkom mikrosilike zmanjša. Pri agregatu B smo dobili drugačni rezultat, saj je mešanica 8 z vsemi mineralnimi dodatki

dopustila največji prodor vode med vsemi preskušenimi betoni. Kljub temu so vsi betoni izpolnili zahtevo za stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV3 v skladu s SIST 1026:2008. Rezultati opravljene študije kažejo, da lahko vezivo z vključenimi različnimi mineralnimi dodatki in gosti strukturi, ki jo dosegamo z nizkim v/c razmerjem (uporaba kemijskega dodatka tipa superplastifikator) zelo izboljša odpornost in obstojnost betona v agresivnem kislinskem okolju pri povišani temperaturi.

VIRI

Beddoe Robin, E., Dorner Horst, W. 2005. Modelling acid attack on concrete: Part 1. The essential mechanisms: str. 2333-2339.

Birk, I. 2010. Odpornost proti prodoru vode za lahko-vgradljiv beton iz drobljenega apnenčevega agregata. Dipl. nal. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba. I. Birk): str. 4-5, 10, 33.

Božič, M. Tehnološka navodila za betonska dela. Sem. nal. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba. M. Božič): 13 str.

Bratina, S. 2012. Masivne konstrukcije II – pripomočki za vaje v št. letu 2011/12 (vaja 2). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 7 str.

DesertUSA. 2012.

http://www.desertusa.com/colorado/lm_nra/hoover/du_hoover.html (Pridobljeno 23.9.2012.)

Hanžič, L., Ivanič, A., Mautinger, A. 2008. Gradiva praktikum. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za Gradbeništvo: loč. pag.

Herak Marovič, V. 2007/08. Betonske konstrukcije I. Katedra za betonske konstrukcije i mostove. Stručni studij građevinarstva: 44 str.

Kumar Mehta, P. 1986. Concrete: Structure, Properties and Materials. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc.: str. 1-12, 52-54, 272.

Lafarge cement. 2012. Betonski laboratorij.

http://www.lafarge.si/?stran=show_text&id=122&znamka=18&selectedMeni=1&selectedMeniText=Betonski%20laboratorij (Pridobljeno 29.9.2012.)

Moj dom. 2012. Dnevnik.

<http://mojdom.dnevnik.si/sl/Varnost/4660/Elektrofiltrski+pepel%3A+strupeni+odpadki+v+vrtnih+gnojilih> (Pridobljeno 29.9.2012.)

Nivo. 2012.

<http://www.nivo.si/podjetje> (Pridobljeno 20.9.2012.)

Pravi majstor. 2012.

<http://www.pravimajstor.com/trazi/tag/betonska+konstrukcija> (Pridobljeno 28.9.2012.)

Prinčič, T. 2010. Študija obstojnosti betona na sulfatno korozijo. Podipl. nal. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (samozaložba. T. Prinčič): str. 6-15.

Ronkalj, I. Sika. 2010. Katalog proizvodov za gradbeništvo. Priročnik in cenik: str. 22-61.

SIST 1026. Slovenski standard, 2007. Beton-1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost-Pravila za uporabo SIST EN 206-1: str. 12,22.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2006. Vpliv nizkih temperatur okolice na vezanje in strjevanje betona. 8. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, Slovenija, 25-27 Oktober 2006. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 1-8.

Vrkljan, D., Klanfar, M. 2010. Tehnologija nemetalnih mineralnih sirovina. Zagreb, RGN-fakultet: str. 1-19.

Žarnič, R., Bokan Bosiljkov, V. 2004/05. Gradiva-vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 49-63.

Žarnič, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 55-57, 88-92, 112-113.

Wikipedia. 2012. Difuzija.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Difuzija> (Pridobljeno 28. 9. 2012.)

Wikipedia. 2012. Prožnostni modul.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Pro%C5%BEnostni_modul (Pridobljeno 29. 9. 2012.)

Wikipedia. 2012. Žlindra.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlindra> (Pridobljeno 30.9.2012.)