

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Hidrotehniška smer

Kandidat:

Andraž Hočevar

Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona

Diplomska naloga št.: 2956

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

mag. Franci Kavčič

Ljubljana, 20. 6. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **ANDRAŽ HOČEVAR** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»VPLIV VRSTE CEMENTA NA SULFATNO ODPORNOST BETONA«.

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

Ljubljana, 31.05.2007

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 69.32:691.54(043.2)
- Avtor:** Andraž Hočevar
- Mentor:** doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
- Somentor:** mag. Franci Kavčič
- Naslov:** Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona
- Obseg in oprema:** 72 str., 4 pregl., 40 sl., 17 en.
- Ključne besede:** sulfatna odpornost, sulfatna agresija, cement, hidratacija, vzbujeno valovanje, resonančna frekvenca, dinamični Youngov (elastični) modul.

Izvleček

V diplomski nalogi je obdelan mehanizem propadanja betona zaradi agresije okolice, ki jo predstavljajo sulfati. Ta pojav se pojavlja pri betonih, ki so izpostavljeni zemljinam in vodam z veliko vsebnostjo raztopljenih sulfatov. V prvem delu naloge smo predstavili posamezne komponente betona in njihov vpliv na izboljšanje sulfatne odpornosti. Predstavili smo tudi načine prodora sulfatov v notranjost betona in škodljive mehanizme različnih sulfatnih raztopin na cementni kamen. Zaenkrat še ni na razpolago standardizirane metode preskusa za določitev odpornosti betona proti tovrstni agresiji. Zato smo izvedli preskuse na večjih vrstah betonov z različnimi vrstami cementa in kemijskega dodatka, ki smo jih izpostavili različnim agresivnim medijem. Poleg klasičnih preskusnih metod, ki so v literaturi pogosto predstavljene, smo v našem primeru uporabili metodo merjenja resonančne frekvence vzorcev z napravo GrindoSonic. Na ta način se lahko spremlja razvoj dinamičnega Youngovega (elastičnega) modula betona. Na koncu smo med seboj primerjali vplive različnih cementov, vplive različnih kemijskih dodatkov in vplive različnih sulfatnih raztopin. Kot primerjavo smo uporabili vzorce, ki so bili potopljeni v destilirano vodo.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 69.32:691.54(043.2)
Author: Andraž Hočevar
Supervisor: Ph.D. Violeta Bokan-Bosiljkov, Assist. Prof.
Cosupervisor: MSc. Franci Kavčič
Title: The influence of types of cement on sulfate resistance of concrete
Notes: 72 p., 4 tab., 40 fig., 17 eq.
Key words: Sulfate resistance, sulfate attack, cement, hydration, impulse excitation of vibration, resonant frequency, dynamic Young's (elasticity) modulus

Abstract

In my diploma work I have covered the topic of the mechanism of concrete decaying as a result of the sulfate attack. This phenomenon affects concretes which are exposed to soils and waters with high sulphate content. In the first part of my diploma work I have presented constituents of concrete and their influence on the improvement of sulphate resistance. In addition I have also dealt with various ways in which the sulphates permeate into the concrete and the noxious mechanisms of different sulfate solutions on hardened cement paste. So far there is no standardised method of determining the resistance of concrete to this kind of attack, this is why I have made experiments on various of concrete mixes with different types of cement and admixtures, which were exposed to different attack media. Besides exploiting the classical, in literature often presented test methods, the method of measuring the resonance frequency of samples with the device GrindoSonic was also used. In this way the development of dynamic Young's (elasticity) modulus of concrete can be monitored. In the final part of the diploma work the influences of different cements, effects of various admixtures and impacts of different sulphate solutions were compared and discussed. As a control specimens, specimens exposed to distilled water were used.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri izdelavi diplomske naloge. Svoji mentorici doc.dr. Violeti Bokan – Bosiljkov in somentorju mag. Franciju Kavčiču ter vsem bodočim sodelavcem v podjetju Igmata d.d. in sošolcem s fakultete.

Zahvalil bi se rad tudi svoji družini, ki me je vsa leta študija podpirala in vzpodbujala.

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE	vi
KAZALO PREGLEDNIC	ix
KAZALO SLIK	x
1 UVOD	1
2 OSNOVNE KOMPONENTE BETONA	3
2.1 Uvod v beton	3
2.2 Mineralni agregat	3
2.3 Cement	7
2.3.1 Splošno o cementu	7
2.3.2 Portland cement	8
2.3.3 Pucolanski cement	9
2.3.4 Aluminatni cement	10
2.3.5 Oznake običajnih cementov	10
2.4 Voda	12
2.5 Dodatki betonu	14
2.5.1 Kemijski dodatki	14
2.5.2 Mineralni dodatki	16
3 SULFATNA AGRESIJA	17
3.1 Splošno	17
3.2 Hidratacija cementa	19
3.2.2 Trikalcijev silikat – C ₃ S	19
3.2.3 Dikalcijev silikat – C ₂ S	20
3.2.4 Trikalcijev aluminat – C ₃ A	20
3.2.5 Tetrakalcijev aluminat ferit – C ₄ AF	21
3.3 Transportni mehanizmi agresivnih snovi v beton	22
3.3.1 Vrste transportov	22
3.3.2 Difuzija	22

3.3.3	Kapilarna absorbcija	22
3.3.4	Tečenje pod pritiskom	23
3.3.5	Kombinacije procesov in vplivi na njihov potek	23
3.4	Mehanizem sulfatne agresije	25
3.4.1	Splošno o mehanizmu	25
3.4.2	Natrijev sulfat – Na₂SO₄	26
3.4.3	Magnezijev sulfat – MgSO₄	26
3.4.4	Amonijev sulfat – (NH₄)₂SO₄	27
3.4.5	Kombinacija s kloridi	27
3.5	Kako vplivati na izboljšanje sulfatne odpornosti	27
3.5.1	Vplivni parametri	27
3.5.2	Kemična sestava Portland cementa	28
3.5.3	Odpornost betona proti prodoru vode	28
4	MERITVE UPORABLJENE PRI EKSPERIMENTALNEM DELU	29
4.1	Določanje mase	29
4.2	Merjenje dolžine s kljunastim merilom	30
4.3	Meritve elastičnih karakteristik z vzbujenim valovanjem v vzorcu	31
4.3.1	Splošno o postopku	31
4.3.2	Določanje dinamičnih elastičnih karakteristik z napravo GrindoSonic	31
4.3.2.1	Metoda	31
4.3.2.2	Postopek določen s standardom	33
4.3.2.3	Izvedba meritve za vzorce kvadraste oblike	35
4.3.3	Izračun modulov	36
4.3.3.1	Dinamični Youngov modul	36
4.3.3.2	Dinamični strižni modul	37
4.4	Merilna negotovost	38
4.4.1	Splošno o merilni negotovosti	38
4.4.2	Merilna negotovost pri tehtanju	39
4.4.3	Merilna negotovost pri merjenju s kljunastim merilom	39
4.4.4	Merilna negotovost pri GrindoSonicu	39
4.4.5	Vpliv merilne negotovosti na izračun Youngovega modula	39

5	ANALIZA PREISKAVE	41
5.1	Opis preiskave	41
5.1.1	Namen in opis preiskave	41
5.1.2	Cementi in dodatki uporabljeni v preiskavi	41
5.1.3	Priprava betona in izdelava betonskih kock ter prizem	43
5.1.4	Raztopine, ki nastopajo v preiskavi	43
5.1.5	Potek meritev	48
5.1.5	Račun elastičnega modula iz rezultatov meritev	52
5.1.6	Posebnosti	53
5.2	Rezultati	53
5.2.1	Obnašanje betonov v različnih raztopinah	55
5.2.2	Obnašanje betonov z različnimi vrstami cementa v isti raztopini	58
5.2.3	Vpliv kemijskih dodatkov	62
5.2.3.1	Raztopina I	62
5.2.3.2	Raztopina II	64
5.2.3.3	Raztopina III	66
5.2.3.4	Raztopina IV	68
5.3	Komentar rezultatov	70
6	ZAKLJUČEK	71
	VIRI	73

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.1: Primer spremljanja koncentracij v raztopinah (številke obarvane rdeče pomenijo, da je koncentracija padla za več kot 10%. Takrat se v raztopino doda manjkajoče snovi)	44
Preglednica 5.2: Primer spremljanja pH vrednosti v raztopinah	46
Preglednica 5.3: Primer merjenja mase prizm. Vse prizme so izrezane iz iste kocke. Rezultati so podani v gramih.	49
Preglednica 5.4: Primer merjenja dolžine prizm. Vse prizme so izrezane iz iste kocke. Rezultati so podani na desetinko milimetra natančno.	51

KAZALO SLIK

Slika 2.1:	Zaklinjenost zrn	5
Slika 2.2:	Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito.	5
Slika 2.3:	CE informacija za agregat	6
Slika 3.1:	Naraščanje tlačne trdnosti v odvisnosti od časa pri posameznih mineralih v cementu (Muravljov, 2000)	21
Slika 3.2:	Mikroskopski posnetek tvorbe etringita v cementnem kamnu (www.understanding-cement.com)	25
Slika 4.1:	Vzorec na podporah	34
Slika 5.1:	Grafični prikaz spreminjanja koncentracij v raztopinah (vodoravne črte prikazujejo spodnjo mejo koncentracije posameznih ionov in so obarvane enako, kot je bila dejanska koncentracija ionov)	44
Slika 5.2:	Prikaz določanja umeritvene krivulje in merjenja koncentracij	45
Slika 5.3:	Primer spremljanja pH vrednosti v raztopini	46
Slika 5.4:	Odvzeti vzorci raztopin, pripravljene za določitev njihove koncentracije in pH vrednosti	47
Slika 5.5:	Shranjevanje vzorcev v raztopinah	48
Slika 5.6:	Shranjevanje vzorcev v raztopinah	48
Slika 5.7:	Ttehtanje vzorcev	49
Slika 5.8:	Spreminjanje mase prizem s časom. Vse prizme so iz iste kocke.	50
Slika 5.9:	Merjenje dolžine vzorcev s kljunastim merilom	50
Slika 5.10:	Spreminjanje dolžine prizem s časom. Vse prizme so iz iste kocke.	51
Slika 5.11:	Meritev z GrindoSonicom	52
Slika 5.12:	Kosmiči v raztopini magnezijevega sulfata	53
Slika 5.13:	Spreminjanje elastičnega modula s časom v prizmah ene kocke	54
Slika 5.14:	Beton z enakim cementom in enakim kemijskim dodatkom, potopljen v isto raztopino in razdeljen na prizme iz različnih kock s podano povprečno vrednostjo	55

Slika 5.15: Beton iz cementa A v različnih raztopinah	56
Slika 5.16: Beton iz cementa B v različnih raztopinah	57
Slika 5.17: Beton iz cementa C v različnih raztopinah	58
Slika 5.18: Betoni v destilirani vodi	59
Slika 5.19: Betoni v raztopini I	59
Slika 5.20: Betoni v raztopini II	60
Slika 5.21: Betoni v raztopini III	61
Slika 5.22: Betoni v raztopini IV	61
Slika 5.23: Beton s cementom A v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih	62
Slika 5.24: Beton s cementom B v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih	63
Slika 5.25: Beton s cementom C v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih	63
Slika 5.26: Beton s cementom A v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih	64
Slika 5.27: Beton s cementom B v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih	65
Slika 5.28: Beton s cementom C v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih	65
Slika 5.29: Beton s cementom A v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih	66
Slika 5.30: Beton s cementom B v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih	67
Slika 5.31: Beton s cementom C v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih	67
Slika 5.32: Beton s cementom A v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih	68
Slika 5.33: Beton s cementom B v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih	69
Slika 5.34: Beton s cementom C v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih	69

1 UVOD

Beton je zaradi svojih dobrih lastnosti, kot so nosilnost, funkcionalnost, obstojnosti, sposobnost oblikovanja v poljubne oblike in ekonomičnost, najbolj razširjen gradbeni material na svetu.

Zadnja desetletja se objekti gradijo v vse bolj ekstremnih okoljih in za vse bolj zahtevno uporabo. Zato je v ospredju vprašanje obstojnosti betona. Kot posledica se pojavlja veliko število različnih raziskav, ki obravnavajo procese propadanja betona. Vzroki za propadanje betona so lahko mehanske narave, kot je obraba na betonskih voziščih, erozija zaradi valovanja vode in podobno. Lahko pa so vzrok kemijsko – fizikalni procesi v betonu. V betonu se vedno pojavijo razpoke, ki so lahko posledica krčenja betona ob njegovem sušenju ali pa posledica obremenitev. V vsakem primeru se poslabša njegova odpornost proti prodoru agresivnih medijev. V okoljih, kjer se temperatura okolja spusti pod ledišče, beton uničujejo cikli tajanja in zmrzovanja. Voda, ki je prodrla v beton, ob zmrzovanju poveča svojo prostornino in tako povzroča notranje napetosti v betonu, ki povzročijo njegov razpad.

Proces razpadanja betona zaradi vod v katerih so raztopljene agresivne snovi, imenujemo korozija. Morska voda ima veliko vsebnost kloridov ter tudi sulfatov. Če taka voda prodre v beton ojačan z jeklenimi armaturnimi palicami, lahko pride do korozije armature. Jeklo kemično reagira s kloridi, tvori se železov oksid, ki ima večjo prostornino kot samo železo, zopet se pojavijo notranje napetosti in razpoke v betonu, odpadanje površinskih, zaščitnih plasti betona.

Enak proces razpadanja betona, zaradi nabrekanja v betonu, povzroča tudi sulfatna korozija. V tem primeru je agresiven medij voda, v kateri so raztopljeni sulfati. Agresivna voda prodre v beton, kjer sulfati kemično reagirajo s cementnim kamnom in tvorijo etringit. Ta ima večjo prostornino kot so jo imele snovi pred reakcijo, kar povzroča nabrekanje in posledično razpad betona.

V moji diplomski nalogi je poudarek na sulfatni agresiji na beton. To področje je najmanj raziskano od opisanih in zaenkrat še ni na voljo standardizirane metode za določitev odpornosti betona proti sulfatni agresiji. V nalogi smo uporabili metodo merjenja resonančne frekvence vzorca z napravo GrindoSonic, s katero se lahko spremlja razvoj dinamičnega elastičnega modula betona. V raziskave smo vključili različne vrste cementa in kemijskih dodatkov, katerih vplive na sulfatno odpornost betona smo želeli preveriti.

V okviru diplomske naloge sem v drugem poglavju predstavil osnovne komponente betona (mineralni agregat, cement, voda in dodatki) in njihove vrste ter njihov vpliv na sulfatno odpornost betona.

V tretjem poglavju je predstavljen mehanizem sulfatne korozije betona, v okviru katerega je predstavljena tudi hidratacija cementa in transportni mehanizmi agresivnih snovi v notranjost betona. Poudarek je na tvorbi etringita zaradi različnih sulfatnih raztopin in na možnih ukrepih, ki lahko izboljšajo sulfatno odpornost betona.

Ker je diplomska naloga eksperimentalnega tipa, so v četrtem poglavju predstavljeni postopki meritev, ki smo jih izvajali in posledice merskih napak. V petem poglavju pa so predstavljeni rezultati eksperimentalnih meritev in analiza vplivov vrste cementov ter kemijskih dodatkov na sulfatno odpornost betona.

Vedeti moramo, da je dobra vgradnja in nega betona na gradbišču bistvenega pomena. Brez tega ne zagotovimo zadostne odpornosti betona proti prodoru vode in povečamo možnost pojava razpok. Na gradbišču seveda ne moremo dosegati rezultatov, kakršne smo dosegli v laboratoriju.

2 OSNOVNE KOMPONENTE BETONA

2.1 Uvod v beton

Izraz »beton« v sebi skriva veliko gradbenih materialov kompozitnega tipa, ki se proizvajajo z vezavo kamnitih zrn z različnimi vezivnimi sredstvi (cement, bitumen...). Beton, o katerem bo govora v tej diplomski nalogi, je v osnovi zmes:

- mineralnega agregata,
- cementa,
- vode in
- dodatkov (ti vplivajo na posamezne karakteristike betona).

Vse osnovne sestavine zmešamo – homogeniziramo. Mešanica se preko suhe faze preoblikuje v svež beton in nato naprej v strjen beton. Cement in voda namreč tvorita cementno pasto, ki se strdi, kar se zgodi zaradi kemične reakcije, hidratacije, med obema sestavinama in tako poveže zrna agregata v kamnini podobno maso. Tako dobimo zelo prilagodljiv in najbolj pogosto uporabljen material v gradbeništvu.

2.2 Mineralni agregat

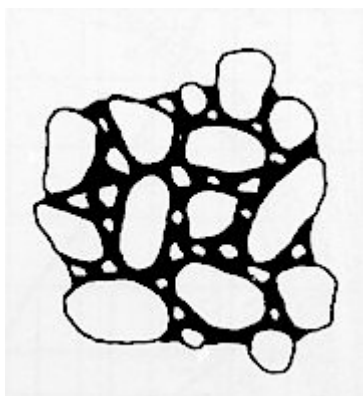
Mineralni agregat je glavna sestavina betona in predstavlja kar 60% do 75% njegove celotne prostornine (Kosmatka, 2002). Betonu daje skelet, zato je njegova izbira zelo pomembna. Agregat je večinoma sestavljen iz grobih in finih zrn, vsebuje pa tudi zrna drobirja in prah. Njegova trdnost in odpornost na zunanje vplive mora biti dovolj velika, da ne poslabša kakovosti betona. Je najtrša komponenta betona. Mineralni agregat razvrščamo na več načinov:

- glede na način nastanka ločimo metamorfni, eruptivni in sedimentni mineralni agregat,
- glede na način priprave in obliko ločimo prodnat in drobljen mineralni agregat.

Agregat mora biti čist. Izpolnjevati mora celo vrsto zahtev, da je primeren za uporabo v betonu. Zahteve so naslednje:

- mineraloško petrografska sestava in ugotavljanje prisotnosti snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo in strjevanje betona ter na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona. Vse morajo biti v določenih mejah. V primeru armiranega betona pa je pomembno tudi, da ne povzročajo korozije armature.
- Organske snovi (masti) zavirajo hidratacijo,
- obvitost posameznih zrn z glino onemogoča dobro povezavo med cementno pasto in zrni agregata,
- grudice gline,
- slaba odpornost zrn proti drobljenju,
- velika dovzetnost zrn za vpijanje vode,
- slaba oblika zrn (ploščata in podolgovata zrna) in
- slaba odpornost na mraz (zmrzovanje-tajanje) negativno vplivajo na mehanske lastnosti strjenega betona.
- Še posebno pozorni pa moramo biti na prisotnost amorfnega silicijevega dioksida. Ta povzroča alkalno-silikatno reakcijo v betonu, pri kateri prihaja do notranjih napetosti, posledično razpok in postopnega razpadanja betona.

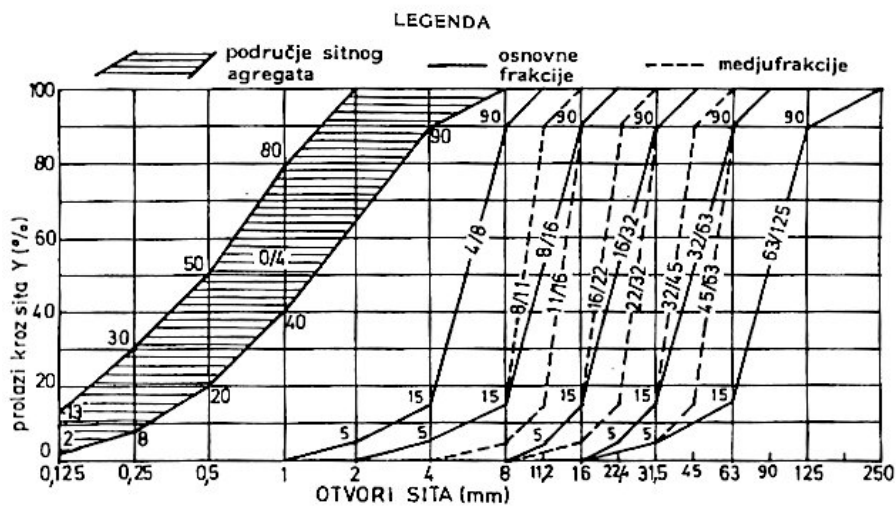
Prodat agregat zaradi svojih zaobljenih robov omogoča lažje vgrajevanje betona in s tem manjšo porabo vode in posledično manjše vodocementno razmerje. Vendar pa ima svoje slabe lastnosti. Ker je zelo nehomogen in je njegovo mineraloško sestavo težko kontrolirati predstavlja večjo nevarnost za pojav alkalno-silikatne reakcije, prav tako pa lahko vsebuje veliko organskih snovi. Danes se v proizvodnji betona večinoma uporablja drobljen agregat, ker je veliko bolj homogen kot naravni agregat. Zaradi ostrih robov se zrna med seboj zaklinijo, kar nam daje boljše mehanske lastnosti betonov. Z uporabo kemijskih dodatkov pa lahko zmanjšamo sicer večje vodocementno razmerje. Lastnosti betonov so pogosto odvisne od vsebnosti posameznega tipa agregata.



Beton mora vsebovati določeno mešanico grobih in finih frakcij, ker s tem vplivamo na vgradljivost betona in njegove mehanske lastnosti. Če imamo v betonu velik delež agregata grobe frakcije, mu izboljšamo mehanske lastnosti vendar poslabšamo vgradljivost in povečamo možnost segregacije. Prav tako zmanjšamo potrebo po cementni pasti in s tem ceno betona (Muravljov, 2000).

Slika 2.1: Zaklinjenost zrn

Velikost agregatnih zrn določamo s pomočjo sejalne analize. S tem postopkom določimo njihovo zrnastostno sestavo. Vzorec agregata presejemo skozi niz sit, ki so postavljena eno nad drugim, sito z največjimi odprtini je na vrhu. Zanima nas, koliko materiala se je presejalo skozi posamezno sito. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtini 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm in 63 mm. Za posebne zahteve vmes dodajamo sita 5,6 mm, 11,2 mm, 22,4 mm in 45 mm. Polnilni material, s katerim dosežemo posebne lastnosti v betonu, pa zahteva še uporabo sit 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm in 0,5 mm. Pri projektiranju betona govorimo o tem, koliko posamezne frakcije potrebujemo v sestavi betona, da dosežemo željene lastnosti. Frakcija je material, ki je ostal med dvema siti. Označimo jo po sistemu d/D, kjer d pomeni velikost odprtine sita na katerem se je material zaustavil in D velikost odprtine sita nad sitom d (primer; frakcija 8/16). Razmerje D/d ne sme biti manjše od 1,4.




Slika 2.2: Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito.

CE informacija

Ko proizvajalec doseže kakovost svojega proizvoda, ki ustreza predpisom in ko zaprosi za certifikat kontrole proizvodnje, je dolžan na svoje proizvode dodati CE informacijo. To je dokument iz katerega je razvidno v kateri razred spada agregat v posameznih kategorijah. V tem dokumentu najdemo celo vrsto informacij:

- oblika (podolgovatost – Flakiness indeks),
- velikost zrn (frakcija),
- specifična masa,
- čistost zrn (vsebnost školjk in vsebnost finih delcev),
- odpornost proti drobljenju,
- odpornost proti glajenju,
- odpornost proti abraziji,
- odpornost proti obrabi,
- sestava, vsebnost – kloridov; sulfatov topnih v kislini; žvepla; sestavin, ki spremenijo čas vezanja in strjevanja betona,
- prostorninska stabilnost – krčenje pri sušenju; vsebnost karbonatov; sestavine, ki vplivajo na prostorninsko stabilnost zračno hlajene plavžne žindre,
- vpijanje vode,
- radioaktivno žarčenje,
- sproščanje težkih kovin, poliaromatičnih ogljikov in ostalih nevarnih snovi,
- odpornost proti ciklom zmrzovanja in tajanja,
- odpornost proti alkalno – silikatni reakciji.



01234		
Any Co Ltd, PO Box 21, B-1050		
02		
0123-CPD-0456		
EN 12620		
Aggregates for concrete		
Particle shape	Declared value	(F)
Particle size	Designation	(d/D)
Particle density	Declared value	(Mg/m^3)
Cleanliness		
Fines quality	Pass/fail threshold value and Category	(%) (MB_{SE})
Shell content	Category	(e.g. SC_{10})
Resistance to fragmentation/crushing	Category	(LA_{10})
Resistance to polishing	Category	(PSV_{50})
Resistance to abrasion	Category	(AAV_{10}, A_{630})
Resistance to wear	Category	(M_{x20})
Composition/content		
Chlorides	Declared value	(% C)
Acid soluble sulfates	Category	(e.g. $AS_{0.1}$)
Total sulfur	Pass/fail threshold value	(% S)
Constituents which alter the rate of setting and hardening of concrete	Pass/fail threshold value	(Stiffening time in minutes and compressive strength S%)
Carbonate content	Declared value	(% CO_2)
Volume stability		
Drying shrinkage	Pass/fail threshold value	(% WS)
Constituents which affect the the volume stability of air-cooled blastfurnace slag	Declared value	(Appearance)
Carbonate content	Declared value	(% CO_2)
Water absorption	Declared value	(% WA)
Emission of radioactivity	Declared values as requested	
Release of heavy metals	} Threshold values valid in the place of use e.g. Substance X: $0.2 \mu m^3$	
Release of polyaromatic carbons		
Release of other dangerous substances		
Durability against freeze-thaw	Declared value	(F or MS)
Durability against alkali-silica reactivity	Declared value as requested	

Slika 2.3: CE informacija za agregat

2.3 Cement

2.3.1 Splošno o cementu

Cement, ki je silikatni material, uvrščamo med hidravlična veziva, ki vežejo in se strjujejo, ko mu dodamo vodo. Tako nastane cementni kamen. Pridobivamo ga z mletjem cementnega klinkerja in mineralnih dodatkov, npr. žindre, naravnih in umetnih pucolanov itd. Ti dodatki nam lahko spremenijo hitrost vezanja (skrajšajo ali podaljšajo), vplivajo na trdnost betona, povečajo odpornost v agresivnih okoljih in uravnavajo količino sproščene hidratacijske toplote (Muravljov, 2000).

Cementni klinker je glavna sestavina cementa. Je material, ki ga pridobivamo s sintranjem bazičnih (karbonatni materiali – apnenec) in kislih (glineni materiali) komponent. Standard SIST EN 197–1 opisuje zahteve glede sestave cementnega klinkerja. V tako pridobljenem cementnem klinkerju morata vsaj dve tretjini mase predstavljati minerala, kalcijeva silikata, C_3S (alit) in C_2S (belit). Masno razmerje v cementnem klinkerju med CaO in SiO_2 mora biti večje od 2, prisotnost prostih MgO in CaO moramo omejiti, ker v večjih količinah negativno vplivata na lastnosti cementa. Cement vsebuje tudi nekatere alkalije. Predstavnik sta Na_2O in K_2O .

Cement torej lahko vsebuje naslednje sestavine:

- cementni klinker (K),
- granulirano plavžno žindro (S),
- naravne pucolane (P),
- naravne kalcinirane pucolane (Q),
- elektrofiltrski pepel – silicijski, kalcijski (V, W),
- žgani skrilavec (T),
- apnenec (L, LL),
- mikrosiliko (D),
- kalcijev sulfat,
- polnila.

Cement delimo na več vrst:

- portland cement,
- pucolanski cement,
- aluminatni cement.

2.3.2 Portland cement

Materiali, ki jih uporabljamo za proizvodnjo portland cementa morajo vsebovati točno določeno količino kalcija (Ca), silicija (Si), aluminija (Al) in železa (Fe). Med pečenjem ti materiali medsebojno reagirajo, nastanejo združeni proizvodi, ki so v kemijskem ravnotežju.

Cement je v glavnem sestavljen iz štirih mineralov:

- alit – trikalcijev silikat ($C_3S - 3CaO \cdot SiO_2$). Več kot polovico cementa sestavlja ta mineral. Je visoko reaktiven in daje betonu visoke zgodnje trdnosti. Večji kot je odstotek tega minerala, večja je zgodnja trdnost. Ob vezavi sprošča veliko toplote.
- Belit – dikalcijev silikat ($C_2S - 2CaO \cdot SiO_2$). Reagira počasi in počasi pridobiva na trdnosti. Zanj je značilna nizka toplota hidratacije.
- Trikalcijev aluminat ($C_3A - 3CaO \cdot Al_2O_3$). Ta mineral v začetnih dneh hidratacije sprošča veliko toplote. Prispeva tudi k zgodnjim trdnostim betona. Je zelo občutljiv na sulfatno korozijo, zato ga poskušamo omejiti pod 5% celotne mase cementa.
- Tetrakalcijev aluminat ferit ($C_4AF - 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$). Je produkt vhodnih surovin, ki jih uporabljamo za zmanjšanje temperature pri sintranju. Povzroča počasno strjevanje in je odporen proti sulfatni koroziji. Cementu daje značilno sivo barvo.

Dodajamo tudi manjšo količino sadre, ki uravnava čas začetka hidratacije in hidratacijsko toploto. Najprej reagira z C_3A in tvori etringit (kalcijev sulfoaluminat), ki uravnava hidratacijo. Ta etringit pa kasneje reagira z nehidratiziranim C_3A in tvori monosulfat. Tvorba etringita v svežem betonu je koristna za kakovost betona. Drugače pa je s strjenim betonom. Etringit se v tem primeru tvori samo, če so v beton vdrti sulfati. Etringit ima večjo prostornino kot kalcijevi aluminathidrati iz katerih nastane, zato povzroča razpoke v betonu (Kosmatka, 2002).

Vrste običajnih cementov (razdelitev po SIST EN 197-1):

- CEM I,
- CEM II,
- CEM III,
- CEM IV,
- CEM V.

Standard znotraj glavnih vrst podaja še podvrste cementov. Skupaj poznamo 27 vrst običajnih cementov. Pod oznako CEM I se skrivajo običajni portlandski cementi, pod oznako CEM II pa portlandski cementi z različnimi dodatki, npr.:

- Portlandski cement z dodatkom žindre,
- Portlandski cement z dodatkom mikrosilike,
- Portlandski cement z dodatkom pucolana,
- Portlandski cement z dodatkom elektro-filtrskega pepela,
- Portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca,
- Portlandski cement z dodatkom apnenca in
- Portlandski mešani cement.

CEM III so žlindrini cementi, CEM IV pucolanski in CEM V mešani cementi. V vsaki od naštetih vrst poznamo še podvrste, ki se razlikujejo po deležu klinkerja in opisanih dodatkov v svoji sestavi (SIST EN 197-1:2002).

2.3.3 Pucolanski cement

To je naravni ali umetni material, ki vsebuje aktivni silicij. Pridobiva se z mletjem cementnega klinkerja, sadre in pucolana. Dovolj dobro zmlet in ob dodatku vode reagira z kalcijevim hidroksidom. Rezultat reakcije je zelo dobro vezivo.

Pucolanski cement z vodo reagira počasneje od navadnega cementa in razvije nižjo hidrationsko toploto. Zato je primeren za gradnjo velikih betonskih blokov (jezovi), kjer nam probleme povzroča neenakomerno ohlajanje v notranjosti in na površini, ki lahko povzroča razpoke v betonu. Zaradi počasne reakcije z vodo in počasne vezave je pri tem cementu

potrebna daljša nega betona, kot je to običajno. Končne trdnosti pa so podobne kot jih dosega navadni cement.

Pucolan prav tako poveča vodotesnost betona. Zaradi tega je bolj odporen proti zmrzovanju in se bolje obnese v agresivnih okoljih in zato je primeren tudi za gradnjo v morski vodi (Muravljov, 2000).

2.3.4 Aluminatni cement

Pridobivamo ga s taljenjem mineralov, ki vsebujejo kalcijev (apnenec) in aluminijev (boksit) oksid. Material talimo v posebnih elektro pečeh na temperaturi 1500°C do 1550°C. Njegova glavna lastnost je hitro strjevanje, kar pomeni hitro pridobivanje trdnosti. Strjevanje spremlja močna eksotermna reakcija, njegova hidratacijska toplota je zelo visoka, najvišja od vseh cementov. Po dveh do treh letih mu trdnost pade na vrednost približno enako tisti, ki jo je dosegel po enem dnevu (35 – 45 MPa).

Tudi ta cement je odporen proti sulfatom in morski vodi, zato ga lahko uporabljamo v agresivnih okoljih, razen tam, kjer so v okolici alkalije (Muravljov, 2000).

2.3.5 Oznake običajnih cementov

V oznaki najdemo vrsto cementa, razred zgodnje trdnosti, vrsto in količino dodatka (pri vrstah CEM II, CEM III, CEM IV in CEM V) ter trdnostni razred.

Razred zgodnje trdnosti:

- Običajna zgodnja trdnost – N (normal),
- Visoka zgodnja trdnost – R (rapid).

Standard v preglednici podaja mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti (SIST EN 197-1:2002, str 12):

Trdnostni razred	Tlačna trdnost MPa			Čas začetka vezanja min	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) mm
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost		
	2 dneva	7 dni	28 dni		
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≤ 10
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	
52,5 R	≥ 30,0	-			

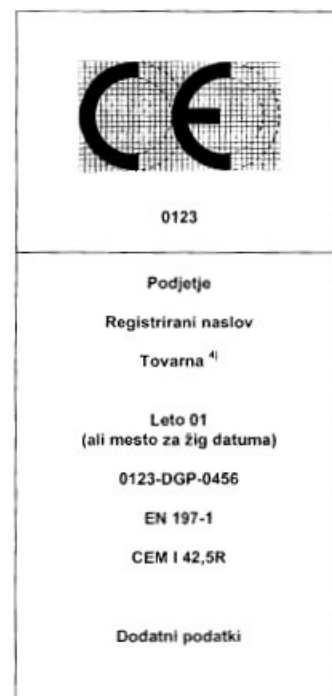
Primer označevanja:

Portlandski cement, skladen z EN 197-1, ki vsebuje 21% do 35% naravnega pucolana (P), trdnostnega razreda 42,5 in z običajno zgodnjo trdnostjo:

Portlandski cement EN 197-1-CEM II/B-P 42,5 N

CE informacija za cement ima enako vlogo kot tista za agregate. Kadar proizvajalec doseže skladnost s sistemom potrjevanja skladnosti, od certifikacijskega organa prejme certifikat EC o skladnosti, ki mu daje pravico do uporabe znaka CE. Na vrečah cementa, na katerih je znak CE, morajo biti navedeni naslednji spremljajoči podatki:

- razpoznavna številka certifikacijskega organa,
- ime ali razpoznavni znak proizvajalca,
- ime ali znak tovarne, v kateri je bil cement proizveden,
- zadnji dve številki leta v katerem je bil cement proizveden,
- številka EC standarda,
- številka evropskega standarda (EN 197 – 1),
- standardna oznaka cementa (opisano v tem poglavju),
- dodatni podatki (mejna vrednost za vsebnost kloridov, žarilno izgubo...).



Slika 2.4: CE informacija za cement

2.4 Voda

Voda je obvezna vhodna komponenta za proizvodnjo betona. Brez vode ne more potekati proces hidratacije. Ko betonski mešanici dodamo vodo, se začne odvijati kemijski proces imenovan hidratacija, pri katerem se sprošča hidratacijska toplota in se material strjuje. Vsaka voda, ki je pitna in nima posebnega okusa in vonja, je primerna za uporabo v betonu. Včasih pa je za pripravo betonske mešanice primerna tudi voda, ki ni pitna. Vendar pa mora biti taka voda preiskana. Dokazati moramo, da ne vpliva na kakovost betona. Pitna voda iz vodovoda ponavadi ustreza zahtevam za izdelavo betona.

Voda ne sme vsebovati snovi, ki bi vplivale:

- na čas začetka vezave cementa,
- na hidratacijo cementa,
- na kasnejše mehanske lastnosti
- na obstojnost betona ali,
- ki bi povzročale korozijo armature v armirano betonskih konstrukcijah.

Prav tako ne sme vsebovati glinastih delcev, delcev oglja in organskih delcev. Morska voda se lahko uporablja z velikimi omejitvami in samo za nearmirane konstrukcije.

Standard SIST EN 1008:2003 določa zahteve za primernost vode za pripravo betona. Standard zajema tudi vode pridobljene iz procesov v industriji betona. Voda, ki velja za pitno je skladno s tem standardom primerna za pripravo vode. Vodo lahko predhodno ocenimo, kot prikazuje naslednja preglednica (SIST EN 1008:2003, str. 5):

Zahteva	
Olja in masti	Ne več kot vidni sledovi.
Detergenti	Morebitna pena mora izginiti v dveh minutah.
Barva	Voda, ki ne prihaja iz industrije betona, se kvalitativno oceni kot blede rumena ali motna.
Izločene snovi	Voda iz industrije betona ima posebne zahteve, ki so opisane v aneksu A tega standarda, v točki 4.4.
	Voda iz drugih virov ima lahko največ 4 ml usedlin.
Vonj	Voda iz industrije betona ima dovoljen enak vonj, kot ga ima pitna voda, rahel vonj po cementu in rahel vonj po žveplovodiku, kadar je prisoten žlindrin cement.
	Voda iz drugih virov ne sme imeti vonja, razen vonja, ki je dopusten za pitno vodo. Po dodatku solne kisline ne sme smrdeti po žveplovodiku.
Kislina	$\text{pH} \geq 4$
Humusne snovi	Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna

Če voda ne ustreza eni ali več zahtevam iz zgornje razpredelnice, se mora dokazati njeno skladnost skladno s točko 4.4 tega standarda.

Standard pa določa tudi kemične lastnosti vode. Lastnosti so podane v tabelah in podajajo najvišjo še dovoljeno vsebnost škodljive substance v vodi (SIST EN 1008:2003, str. 5 in 6):

Snov		Najvišja vsebnost mg/l
Kloridi (Cl ⁻)	Prednapeti beton ali zalivna masa	500
	Beton z armaturo ali vgrajeno kovino	1000
	Beton brez armature ali vgrajene armature	4500
Sulfati (SO ₄ ²⁻)		2000
Alkalije		1500
Škodljivo onesnaženje	Sladkorji	100
	Fosfati (P ₂ O ₅)	100
	Nitrati (NO ₃ ⁻)	500
	Svinec (Pb ²⁺)	100
	Cink (Zn ²⁺)	100

Vpliv posameznih snovi:

- Karbonati (natrijevi in kalijevi) lahko vplivajo na čas začetka vezave,
- prevelika vsebnost kloridov lahko povzroči korozijo armature,
- biti moramo pozorni na vsebnost sulfatov, da ne pride do sulfatne korozije,
- nekatere soli lahko vplivajo na trdnost betona (magnezij, kalcij),
- kadar uporabljamo morsko vodo moramo uporabiti tudi sulfatno odporen cement in agregat, ki ni nagnjen k alkalno-silikatni reakciji. Na betonu se lahko pojavijo bele lise (eflorescenca). Morska voda ne vpliva na potek hidratacije, lahko pa pričakujemo večje začetne trdnosti in manjše končne,
- olja in organske nečistoče vplivajo na čas začetka vezave in na zmanjšanje končne trdnosti betona,
- voda lahko zmanjša učinek dodatkov k betonu, zato je vedno potrebno preveriti vodo, katera se bo uporabljala na gradbišču (Kosmatka, 2002).

2.5 Dodatki betonu

2.5.1 Kemijski dodatki

Ti dodatki se betonu dodajajo tik pred ali med mešanjem. S svojim fizikalnim, kemičnim ali kombiniranim delovanjem vplivajo na lastnosti svežega ali strjenega betona. Beton mora biti primeren za uporabo, trden, obstojen in odporen proti prodoru vode. Te lastnosti lahko zlahka dosežemo z uporabo kemijskih dodatkov. Glavni namen teh dodatkov je:

- zmanjšanje cene betona,
- doseganje določenih lastnosti betona lažje kot z drugimi načini,
- vzdrževati kakovost betona med prevozom, vgrajevanjem in nego betona.

Razdelitev glede na vpliv v betonu (Kosmatka, 2002):

- aeranti – v beton se uvedejo mikroskopsko majhni mehurčki zraka. Povečajo odpornost proti ciklom zmrzovanja in tajanja ter povečujejo odpornost proti kemijski koroziji betona. Prav tako omogočajo lažje vgrajevanje betona in preprečujejo segregacijo agregata,

- plastifikatorji – dodajajo se betonom srednje konsistence in srednjega v/c razmerja. Izboljšajo plastičnost betona in s tem olajšajo vgradljivost betona in zmanjšajo porabo vode (manjši v/c). Uporabljajo se v ozkih konstrukcijah in v konstrukcijah z velikim deležem armature,
- pospeševalci – pospešijo vezanje in povečajo zgodnje trdnosti betona. Pri uporabi pospeševalcev moramo biti previdni, saj predozacija lahko povzroči povečano krčenje ob sušenju betona, korozijo armature, težje vgrajevanje in izgubo trdnosti s starostjo,
- zaviralci – zavirajo vezanje in s tem omogočajo lažje vgrajevanje betona ob visokih temperaturah svežega betona, ki povzročajo hitro vezanje. Uporabo zaviralcev spremlja manjše zmanjšanje začetnih trdnosti,
- antifrizi – omogočajo betoniranje v hladnem vremenu (≤ 0 °C). Delujejo tako, da znižajo temperaturo ledišča vode,
- preprečevalci korozije armature – povečajo odpornost armature proti kloridom,
- preprečevalci alkali-silikatne reakcije – zmanjšajo nabrekanje zaradi alkali-silikatne reakcije,
- pigmenti – barvila, ki obarvajo beton. Barvne betone lahko uporabljamo pri vkopanih električnih vodih, kot opozorilo,
- dodatki za kompenziranje krčenja – zmanjšajo krčenje ob sušenju betona. Uporabljamo jih v objektih, kjer morajo biti razpoke omejene na minimum zaradi vzdržljivosti ali estetskih zahtev,
- dodatki za kontrolo hidratacije – uravnavajo potek hidratacije. Hidratacijo lahko popolnoma zaustavimo s stabilizatorjem in jo zaženemo naprej z dodatkom aktivatorja. Omogoča nam, da lahko dostavljeni beton uporabimo šele naslednji dan,
- mešani dodatki – povečanje vodotesnosti, izboljšanje povezave med starim in novim betonom, povzročanje nabrekanja betona pred strjevanjem, preprečevanje poraščenja z lišaji, sredstva proti spiranju cementa za uporabo pri betoniranju pod vodo...

2.5.2 Mineralni dodatki

Poznamo nepucolanske in pucolansko hidravlične dodatke, ki izboljšajo kohezijo in odpornost na segregacijo. Zmanjšajo tudi potrebo po cementu, kar zmanjša hidrationsko toploto in kasnejše krčenje. Mineralne dodatke klasificiramo glede na reakcijsko sposobnost z vodo in jih delimo na dva tipa:

- Tip I, nepucolanski dodatki, kot je apnenčeva ali dolomitna kamena moka. Presevek na situ 0,063 mm mora biti večji kot 70%,
- Tip II so pucolanski dodatki. Prvi je elektrofilitrski pepel (EFP), ki izboljšuje kohezivnost in zmanjšuje občutljivost na vsebnost vode v mešanici. Mikrosilika izboljšuje kohezivnost in segregacijsko odpornost. Granulirana plavžna žlindra zmanjša hidrationsko toploto in je običajno že sestavni del cementov CEM II in CEM III (Kavčič, 2007).

3 SULFATNA AGRESIJA

3.1 Splošno

Kaj so vzroki za poškodovanost betonskih konstrukcij? Poznamo več elementov agresivnega delovanja:

- kemijsko delovanje,
- fizikalno delovanje,
- biološko delovanje,
- ostali dejavniki.

Delovanje teh elementov je časovno zelo prepleteno, zato moramo upoštevati njihovo interakcijo. Ta diplomska naloga obravnava samo kemijsko delovanje na beton, ki ga imenujemo korozija betona in predstavlja proces propadanja betona zaradi kemijske agresije snovi iz okolice na sestavine cementnega kamna. Posledice so lahko rahljanje strukture cementnega kamna, povečanje poroznosti in prepustnosti za tekočine, uničevanje betona in zmanjšanje pH vrednosti (Kavčič, 2005).

V talni in morski vodi ter v tleh najdemo različne vrste sulfatnih soli. Sulfatni ioni iz naštetih medijev lahko povzročijo poškodbe betona, če jim je ta kakorkoli izpostavljen. Sulfati skozi porni sistem betona potujejo v njegovo notranjost in kemično reagirajo s produkti hidratacije. Nastali produkti pa imajo to lastnost, da povečajo svojo prostornino glede na prostornino izhodiščnih komponent. Zaradi tega nabrekanja se v betonu pojavijo notranje natezne napetosti. Beton nabreka dokler ni dosežena natezna trdnost betona (Ferraris, 2006) in pride do porušitve, ki se manifestira kot:

- pojav razpok na površini,
- odpadanje manjših delcev betona,
- izguba mase.

Sulfati natrija, magnezija, amonija in kalcija, ki jih v naravi najdemo v zemljini, raztopljene v talni vodi ali v odpadni vodi, so vedno nevarni za beton. Proces sulfatne agresije je mogoč samo, če je prisotna vlaga. Večja kot je relativna vlaga, večja je kemijska agresija (največja je, kadar je relativna vlaga >95%).

Standard SIST EN 206-1 podaja stopnje izpostavljenosti agresivnemu okolju. Opisuje različna agresivna okolja, od neagresivnega okolja, preko korozije zaradi karbonatizacije, korozije zaradi kloridov, ki ne izvirajo iz morske vode (soli za tajanje) in tistih, ki izvirajo iz morske vode, do zmrzovanja/tajanja in kemičnega delovanja. Predvideva tri stopnje izpostavljenosti kemičnemu delovanju:

- XA1 – malo agresivno kemično okolje,
- XA2 – zmerno agresivno kemično okolje,
- XA3 – močno agresivno kemično okolje.

V preglednici podaja tudi mejne vrednosti posameznih stopenj kemičnega delovanja naravnih zemljin in talne vode (SIST EN 206-1, str. 17):

Kemična karakteristika	XA1	XA2	XA3
Talna voda			
SO ₄ ²⁻ , mg/l	≥ 200 in ≤ 600	> 600 in ≤ 3000	3000 in ≤ 6000
pH	≤ 6,5 in ≥ 5,5	< 5,5 in ≥ 4,5	< 4,5 in ≥ 4,0
Agresivni CO ₂ , mg/l	≥ 15 in ≤ 40	> 40 in ≤ 100	> 100 do nasičenosti
NH ⁴⁺ , mg/l	≥ 15 in ≤ 30	> 30 in ≤ 60	> 60 in ≤ 100
Mg ²⁺ , mg/l	≥ 300 in ≤ 1000	> 1000 in ≤ 3000	> 3000 do nasičenosti
Zemljina			
SO ₄ ²⁻ , mg/l	≥ 2000 in ≤ 3000	> 3000 in ≤ 12000	> 12000 in ≤ 14000
Kislost, ml/kg	> 200	V praksi ne nastopa	

3.2 Hidratacija cementa

3.2.1 Uvod v hidratacijo

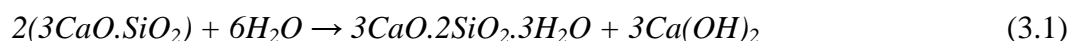
Hidratacija je proces spajanja cementa z vodo, produkte nastale v tem procesu pa imenujemo hidratacijski produkti.

Proces hidratacije portlandskega cementa je produkt reakcij posameznih komponent, mineralov (poglavje 2.3.2), ki sestavljajo cement in ki vsi reagirajo z vodo. Te reakcije povzročajo vezanje in strjevanje cementa. Proces hidratacije je odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerskih mineralov in kalcijevega sulfata. Hitrost procesa hidratacije določa mnogo faktorjev, kot na primer: fazna sestava klinkerja ter količina in vrsta tujih ionov v mineralih klinkerja, mikrostruktura klinkerja, količina in oblika kalcijevega sulfata, finost in zrnastostna sestava cementa, vodocementno razmerje oz. količina cementa pri pripravi mešanice ter prisotnost kemijskih dodatkov.

Vsi minerali prisotni v cementnem klinkerju v stiku z vodo reagirajo in se razčlenijo ter tako tvorijo hidratacijske komponente.

3.2.2 Trikalcijev silikat – C₃S

Po mešanju z vodo se hidratacija prične hitro. Začetna reakcija traja nekaj minut in spada v pred-indukcijsko obdobje hidratacije. V tem času poteka hitro raztapljanje spojin v vodi in s tem začetna hidratacija mineralov klinkerja. Delež minerala C₃S (razvije visoko hidratacijsko toploto), ki pri tej stopnji reagira, je nizek (2% do 10 %). Reakcija C₃S z vodo poteka po naslednji shemi:

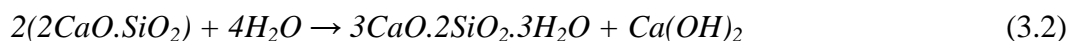


Produkt te hitre reakcije deluje kot zaščitni sloj na preostalem C₃S in upočasni reakcijo. To obdobje imenujemo indukcijsko in traja nekaj ur. Po razkroju zaščitnega sloja nastopi obdobje pospešene hidratacije, ki traja približno od tretje do dvanajste ure po zamešanju cementne paste. Kasneje se začne hitrost hidratacije zmanjševati, ker postane proces odvisen od difuzije

ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki predstavljajo opno okoli nehidratiziranih cementnih delcev. Kot produkt hidratacije nastaja $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$, ki ga imenujemo C-S-H gel (Kavčič, 2000).

3.2.3 Dikalcijev silikat – C_2S

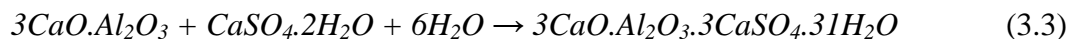
Prirast trdnosti je pri tem mineralu precej manjši, kar je posledica počasnejše začetne reakcije z vodo. Posledično se sprošča tudi veliko manj hidratacijske toplote. Po daljšem časovnem obdobju pa se njegove trdnosti bistveno ne razlikujejo od C_3S . Shema reakcije C_2S z vodo:



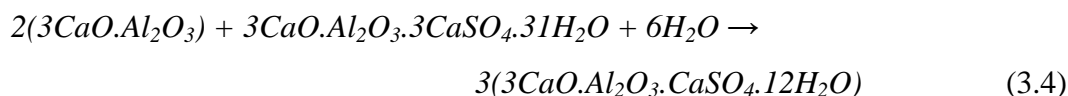
Od indukcijskega obdobja naprej je obnašanje zelo podobno, kot produkt hidratacije pa prav tako nastaja gel C-S-H.

3.2.4 Trikalcijev aluminat – C_3A

Njegova reakcija je hipna. Ker je v cementu prisotna sadra ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), se pri hidrataciji tvori kalcijev sulfoaluminat – etringit:



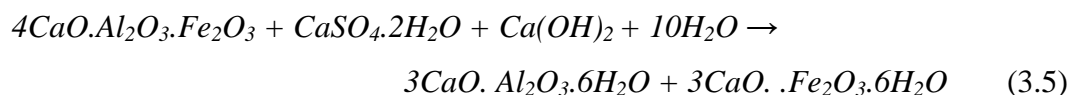
Etringit ima veliko večjo prostornino kot vhodne komponente, vendar v tem primeru to ni nevarno, saj je cementna pasta še v tekočem, plastičnem stanju. Tvorba etringita je zelo hitra. Pri tem se okoli cementnih delcev tvori plast etringita, ki zavira hidratacijo. S sadro torej uravnavamo potek hidratacije. Nastali etringit je obstojen samo dokler je koncentracija sulfatov v betonu dovolj visoka. V obdobju pojemajoče hidratacije se porabi vsa sadra, zato posledično koncentracija sulfatov pade. S tem etringit postane nestabilen in reagira s preostalim C_3A , tvori se kalcijev mono sulfoaluminat:



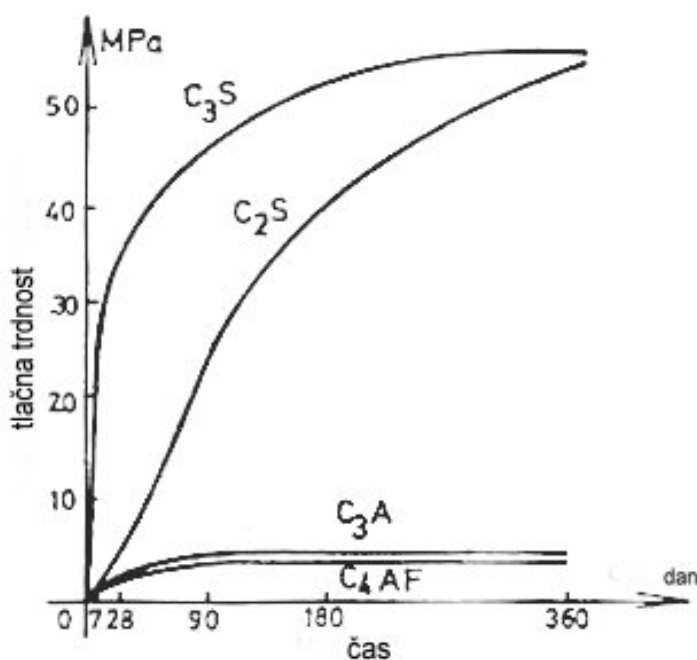
Tvorba etringita je nevarna, ko je beton že v strjenem stanju. Če je beton izpostavljen zunanjemu viru sulfatnih ionov tvori etringit, ki lahko povzroči poškodbe betona.

3.2.5 Tetrakalcijev aluminat ferit – C₄AF

Reakcija je podobna kot pri C₃A, vendar počasnejša:



Ob tej reakciji cementna pasta ne nabreka, saj produkti, ki vsebujejo železo, ne nabrekajo. Nestabilni etringit v obdobju pojemajoče hidratacije reagira tudi s C₄AF. Dolgoletne raziskave so pokazale, da C₄AF povečuje sulfatno odpornost cementa, ker v njegovi reakciji z vodo ne nastaja etringit, kasneje pa z njim reagira in ga eliminira iz cementne paste.



Slika 3.1: Naraščanje tlačne trdnosti v odvisnosti od časa pri posameznih mineralih v cementu
(Muravljov, 2000)

3.3 Transportni mehanizmi agresivnih snovi v beton

3.3.1 Vrste transportov

Med agresivne snovi štejemo katerokoli, na beton in armaturo destruktivno delujočo snov. Med njimi je tudi voda, ki nastopa kot reagent v kemijskih reakcijah in kot nosilec agresivnih snovi (Cl^- , sulfati,...), ki so v vodi raztopljene. Prodiranje agresivnih snovi v beton lahko razložimo s tremi fizikalnimi procesi:

- difuzija,
- kapilarno vpijanje (absorbpcija),
- tečenje pod pritiskom.

3.3.2 Difuzija

Vzrok za difuzijske procese so razlike v koncentraciji snovi (C), ki se po preseku in s časom spreminja. Sam proces opišemo z 2. Fickovim zakonom difuzije:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

kjer je :

$\frac{\partial C}{\partial t}$ - sprememba koncentracije snovi s časom,

$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ - sprememba koncentracije snovi po globini,

D - koeficient difuzije.

3.3.3 Kapilarna absorbpcija

Količina absorbirane vode q_a (kg/m^2) v času t (s) je odvisna od kapilarne poroznosti in je sorazmerna koeficientu kapilarne absorbpcije A , ki se izraža v $\text{kg}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2$ in se določi s preskusom.

$$q_a = \frac{A}{2 \cdot \sqrt{t}} \quad (3.7)$$

Kapilarna absorbpcija je posledica površinske napetosti vode. Zaradi površinske napetosti vode se oblikujejo kapilarne sile, 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 vpiljal (absorbicija), med sušenjem pa jo bo iz enakega razloga zelo počasi oddajal. Za transport vode z delovanjem kapilarnih sil so prepustne kapilare in makrokapilare ($10^{-3} - 10^{-1}$ mm) ter razpoke podobnega velikostnega reda.

3.3.4 Tečenje pod pritiskom

Za ta primer mora biti beton potopljen v vodi, ker prihaja do vdora vode v beton skozi kapilare in velike odprte pore zaradi hidrostatičnega pritiska. Tečenje pod pritiskom opišemo s Darcyjevim zakonom:

$$q = k \cdot \frac{h}{l} \cdot A \quad (3.8)$$

q – pretok (m^3/s),

k – koeficient prepustnosti (m/s),

$h/l = i$ – hidravlični gradient (padec h navidezne vodne gladine na dolžini l),

A – površina pretočnega preseka (m^2).

3.3.5 Kombinacije procesov in vplivi na njihov potek

Transportni mehanizmi ponavadi nastopajo kot kombinacija zgoraj opisanih osnovnih fizikalnih procesov in so odvisni od strukture betona in količine vode oz. vlage v betonu in okolici:

- v primeru vlažnega zraka prihaja do prodiranja vodnih hlapov, plinov iz okolice in v vodi raztopljenih snovi s procesom difuzije,
- v primeru dežja ali pljuskanja vode prihaja do kombinacije kapilarne absorbicije in difuzije,
- v primeru potopljenega betona pa se odvijata procesa kapilarne absorbicije in tečenja pod pritiskom.

Relativna vlažnost v porah betona vpliva na debelino vodnega filma, ki se zaradi površinske napetosti adsorbira na stene por. Vodni film se odebeli, ko se zviša relativna vlažnost. V skrajnem primeru pride do kapilarne kondenzacije. To je dogodek, ko se pore z nadaljnim

večanjem vsebnosti vlage v porah zapolnijo z vodo. V tako zasičenem betonu je difuzija plinov (CO_2 , O_2) zanemarljivo majhna.

Kadar je beton izpostavljen le vlagi iz zraka, so stene manjših por obdane z vodnim filmom, večje pore pa imajo še dovolj zračnega prostora, da je omogočena difuzija in z njo transport plinov. Do razlik v koncentraciji pride, ker se reagent porablja v kemijskih reakcijah v betonu. S tem se količina reagenta zmanjšuje, zmanjša se njegova koncentracija, kar posledično privede do dotekanja novih količin reagenta – difuzije. Difuzija vlage poteka, ko se spremeni vlažnost v okolici. Difuzija snovi raztopljenih v vodi (Cl^-) se odvija po vodnem filmu na stenah por in v porah zapolnjenih z vodo. Z manjšanjem debeline vodnega filma se bo zmanjšala tudi hitrost difuzije v vodi raztopljenih snovi.

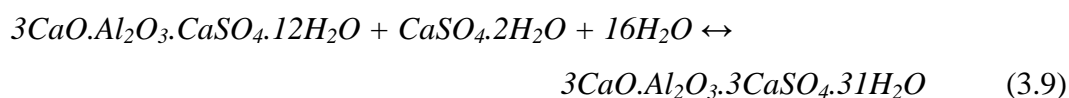
Pri močenju betonske površine se pojavlja transport vodne mase s kapilarno absorbcijo in s tem v njej raztopljenih snovi. Kadar močimo betonsko površino se pore hitro zasitijo, kar zatre difuzijo plinov. Pri cikličnem močenju in sušenju je hitrost prodiranja v vodi raztopljenih agresivnih snovi močno pospešena. Raztopljene snovi se koncentrirajo v globini, do katere seže izhlapevanje. Ker beton vodo hitreje vpija, kot pa se suši, je vlažnost betona običajno večja od povprečne relativne vlažnosti v okolici. Vodni film na stenah por je posledično dovolj debel, da se nakopičene agresivne snovi lahko z difuzijo premikajo naprej v globino betona.

Pri stalno potopljenih konstrukcijah prodre v beton večja količina vode, ker se poleg procesa kapilarne absorbcije, odvija tudi tečenje pod pritiskom, ki pospeši transport. Če je prisotno tudi izhlapevanje skozi betonske površine, ki so izpostavljene zraku (npr. na zunanji strani bazenov čistilnih naprav...), se lahko razvije stalni transport vode. Intenzivnost transporta vode pa je odvisna od izhlapevanja, kapilarnega vpijanja in tečenja pod pritiskom. Ob izhlapevanju se v površinskem delu betona odlagajo snovi (sulfati, kloridi...), ki so vstopile z vodo in lahko dosežejo tu zelo visoke koncentracije. Na zunanji strani lahko pride do odlaganja soli. Pojav opazimo kot bele lise na površini in ga imenujemo eflorescenca.

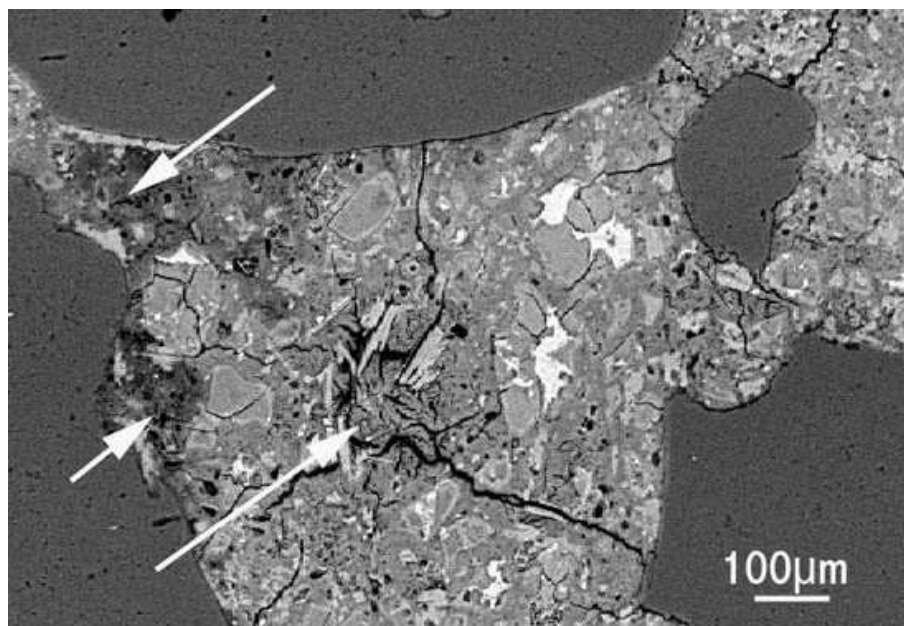
3.4 Mehanizem sulfatne agresije

3.4.1 Splošno o mehanizmu

Sulfatna agresija je definirana kot kemična reakcija, ki se zgodi v betonu, ko je ta že v strjenem stanju. Če je strjen beton izpostavljen zunanjemu viru raztopljenih sulfatnih ionov, lahko koncentracija sulfatov v porni vodi betona naraste. Mono sulfoaluminat postane nestabilen, ko naraste koncentracija sulfatnih ionov in zato se pretvori nazaj v etringit:



Ta reakcija najpogosteje povzroča težave, ker etringit zaseda dvakrat večjo prostornino kot mono sulfoaluminat. Ko votli prostori v cementni pasti ne morejo več prevzeti nadaljnjega nabrekanja, notranje natezne obremenitve povzročijo pokanje strjenega betona. To vodi k tipičnim posledicam sulfatne agresije: izgubi prečnega prereza in trdnosti, krušenju površine betona in končno k popolnemu razpadu betona. Reakcije, ki se zgodijo prve, se zgodijo v največji globini betona.



Slika 3.2: Mikroskopski posnetek tvorbe etringita v cementnem kamnu (www.understanding-cement.com)

3.4.2 Natrijev sulfat – Na_2SO_4

V primeru sulfatne agresije pogosto govorimo o reakciji med trdno snovjo (cementnim kamnom) in raztopljenimi snovmi (sulfati) v agresivni raztopini. To zakrije dejstvo, da so reakcije kationov in anionov v raztopini pravzaprav ločene. V primeru Na_2SO_4 poteka reakcija z SO_4^{2-} ioni.

Predvideva se, da se tvorba etringita iz mono sulfoaluminata zgodi z razkrojem in usedanjem. Reakcija za svoj potek potrebuje zadostno količino Ca^{2+} , SO_4^{2-} in H_2O . Ioni SO_4^{2-} vstopijo v reakcijo iz zunanje raztopine (sulfati raztopljeni v odpadni vodi), vir ionov Ca^{2+} je $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ko pa se ta vir iztroši ali je težje dostopen, reakcija te ione črpa iz C-S-H gela, ki se delno dekalcinira t.j. razmerje Ca/Si pade. V kasnejših fazah se poleg etringita tvori tudi sadra, ki za svojo tvorbo prav tako potrebuje Ca^{2+} . Pojavijo se razpoke, pogosto povezane z žilami sadre. Tvorba sadre je bolj razširjena na robovih (v primeru preizkušancev na robovih prizme).

Raztopine z Na_2SO_4 reagirajo z mineralom C_3S , raztopine z višjo koncentracijo Na_2SO_4 pa reagirajo tudi s C_2S . Ta reakcija je domnevno povezana s tvorbo sadre.

3.4.3 Magnezijev sulfat – MgSO_4

Pri magnezijevem sulfatu poleg SO_4^{2-} ionov v reakciji nastopajo tudi Mg^{2+} ioni. Veliko študij je pokazalo, da je magnezijev sulfat bolj agresiven kot natrijev v primeru, da je njuna koncentracija enaka. Kadar je prisoten Mg^{2+} se v reakciji tvori tudi brucit – $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in serpentin – $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Pri betonu, potopljenem v raztopino magnezijevega sulfata, se na površini tvori brucit in sadra, ki se nahaja med brucitom in površino betona. Na robovih, kjer je napad hujši, se tvori tudi serpentin. Ta faza je začetni produkt reakcije v sistemu $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$.

Dekalcinacija C-S-H gela je v primeru agresije z magnezijevim sulfatom znatno večja kot v primeru agresije z natrijevim sulfatom. Dekalcinacija vodi k popolnemu propadu C-S-H gela s tvorbo silika gela. Tako velika dekalcinacija je posledica majhne topnosti brucita, ki je odgovoren za znižanje pH vrednosti raztopine v porah betona.

3.4.4 Amonijev sulfat – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Ta sulfat ravno tako kot prejšnja dva povzročata tvorbo etringita. Reakcije so podobne kot v prejšnjih primerih. Najdemo pa ga predvsem v odpadnih vodah, fekalijah.

3.4.5 Kombinacija s kloridi

Kloridi so v betonu načeloma nevarni zaradi korozije jeklene armature, ki je vgrajena v beton. Če kloridi prodrejo v beton do globine na kateri se nahaja armatura, lahko le-ta začne rjaveti. Železo, ko rjavi, povečuje svojo prostornino, kar lahko povzroči poškodbe betona – odpadanje zgornje plasti betona.

Kloridi, kot sta Mg_2Cl_2 in AlCl_3 , reagirajo z apnom in tvorijo v vodi lahko topne snovi in tako uničujejo beton. Kloridi z alkalno kovinskimi ioni, kot sta Na in K, ne reagirajo z betonom, lahko pa v koncentriranih raztopinah lužijo apno. Lahko pa lužijo tudi kalcij, če se tvori CaCl_2 (Biczók, 1972).

3.5 Kako vplivati na izboljšanje sulfatne odpornosti

3.5.1 Vplivni parametri

Mnogo parametrov vpliva na odpornost betona proti sulfatni agresiji. Ti parametri so:

- kemična sestava cementa,
- kvaliteta projektiranja, vgradnje in nege betona,
- koncentracija zunanjih virov sulfatnih ionov,
- stopnja izpostavljenosti betona sulfatno agresivnemu okolju.

Če vodi, ki vsebuje sulfate, ne moremo preprečiti dostopa do betona, je obramba pred sulfatno agresijo omejena na pravilno izbiro cementa ter pravilno projektiranje, vgradnjo in nego betona. Zadnja parametra sta pogojena z lokacijo, kjer bo beton vgrajen. Projektant mora zato predpisati beton, ki bo sulfatno odporen v prej izbranem okolju.

3.5.2 Kemična sestava Portland cementa

Kemična sestava cementa ima direkten vpliv na kemične reakcije, ki potekajo ob procesu sulfatne agresije.

Največji vpliv imata trikalcijev aluminat in sadra, ki sta neposredno udeležena v tvorbi etringita in mono sulfoaluminata v svežem betonu ter kasneje etringita v strjenem betonu. Količina trikalcijevega aluminata je najpogostejši pokazatelj za sulfatno odpornost cementa, ki jo lahko merimo. S količino trikalcijevega aluminata kontroliramo količino mono sulfoaluminata, ki nastaja v svežem betonu in s tem količino mono sulfoaluminata, ki bi se lahko v strjenem betonu pretvoril v etringit, ki se kaže v nabrekanju materiala in v poškodbah materiala, ki so značilne za sulfatno agresijo.

3.5.3 Odpornost betona proti prodoru vode

Ko inženirji še niso imeli na voljo sulfatno odpornih cementov, so za preprečitev sulfatne agresije poznali samo eno rešitev. To je bilo povečanje odpornosti betona proti prodoru vode. Ker je bil beton manj vodoprepusten, je vanj prodrlo manj sulfatov raztopljenih v vodi. Večjo odpornost betona proti prodoru vode lahko zagotovimo na več načinov:

- zmanjšamo delež vode ali povečamo delež cementa in s tem zmanjšamo V/C razmerje,
- izberemo materiale primerne za to nalogo (čisti agregati,...),
- načrtujemo prava razmerja v betonski mešanici,
- cementu dodajamo mineralne dodatke (žlindra, elektrofiltrski pepel...),
- uporabljamo aerante,
- pri vgradnji beton čimbolj zgostimo,
- po vgradnji poskrbimo za pravilno nego betona,
- uporabljamo težke betone.

Raziskave so pokazale, da je majhna vodoprepustnost betona dobrodošla lastnost pri odpornosti betona proti sulfatni agresiji. Vendar pa zmanjšanje vodoprepustnosti betona ni zadostne ukrep za preprečitev poškodb betona zaradi sulfatnega napada.

4 MERITVE UPORABLJENE PRI EKSPERIMENTALNEM DELU

4.1 Določanje mase

Maso lahko merimo na več različnih načinov, in sicer z:

- utežmi,
- neavtomatskimi tehtnicami,
- avtomatskimi tehtnicami,
- tehtnicami za gradbene primere.

Pri našem delu uporabljamo neavtomatske tehtnice, ki jih delimo na:

- analitske – specialna točnost, razred točnosti I (ultramikro, mikro, analizno-laboratorijske),
- precizne – velika točnost, razred točnosti II (lekarniške, zlatarske, laboratorijske),
- industrijske – srednja in povprečna točnost, razreda točnosti III in IV (medicinske, mostne, trgovske).

Tehtnice so sedaj večinoma elektronske, v laboratorijih pa še najdemo delujoče mehanske.

Razredi točnosti (Lotrič, 2007, str. 5):

razred	preskusni razdelek e	število preskusnih razdelkov n	minimalno tehtanje
I	$\geq 1 \text{ mg}$	≥ 50000	100 e
II	$1 \text{ mg} \leq e \leq 50 \text{ mg}$	$100 \leq n \leq 100000$	20 e
	$\geq 0,1 \text{ g}$	$5000 \leq n \leq 100000$	50 e
III	$0,1 \text{ g} \leq e \leq 2 \text{ g}$	$100 \leq n \leq 10000$	20 e
	$\geq 5 \text{ g}$	$500 \leq n \leq 10000$	20 e
IV	$\geq 5 \text{ g}$	$100 \leq n \leq 1000$	10 e

Miza za tehtanje mora biti dovolj konstrukcijsko močna in prenašati kar se da malo vibracij.

Ne sme biti magnetna in varovala naj bi pred elektrostatiko.

Prostor, kjer tehtamo, naj ima samo en vhod z drsnimi vrati, ker povzročajo manj prepiha. Imeti mora čim manj oken, da se izognemo direktnemu soncu. Zagotoviti moramo tudi konstantno temperaturo in relativno vlago zraka med 45% in 60% v prostoru. Pred tehtanjem preverimo, če je zračni mehurček (libela) v začrtanem krogu in sprožimo postopek notranjega naravnavanja. Tehtnice po končanem tehtanju ne izklapljamemo iz električnega omrežja, ker s tem ohranjamo termalno ravnotežje v tehtnici.

Pri samem tehtanju moramo biti pozorni, da vzorec vedno postavljamo čimbolj na sredino tehtalne plošče.

4.2 Merjenje dolžine s kljunastim merilom

Pri merjenju s kljunastim merilom moramo biti pozorni na lego merila na predmetu, ki ga merimo. Merilo moramo ob predmet prisloniti pod pravilnim kotom in omogočiti dober stik.

Natančnost meritev je odvisna od spretnosti merilca. Kljunasto merilo moramo pozorno in s pravilno silo prisloniti ob merjeni predmet. Tako predmet kot merilo sta do neke mere elastična, zato velikost sile vpliva na meritev. Prevelika sila povzroči deformacijo merjenca in merila in zato merilo pokaže premajhno vrednost. Zaradi premajhne sile kontakt med merjencem in merilom ni dober, zato merilo pokaže preveliko vrednost.

Poznamo analogna in digitalna kljunasta merila. V zadnjem času se veliko več uporabljajo digitalna kljunasta merila, ker je odčitavanje rezultatov veliko lažje. Omogočajo tudi tariranje instrumenta, kar nam omogoča lažje diferencialno merjenje, brez kasnejšega odštevanja. Lahko jih tudi povežemo z osebnimi računalniki in podatke neposredno prenašamo v program s pomočjo programske opreme.

4.3 Meritve elastičnih karakteristik z vzbujenim valovanjem v vzorcu

4.3.1 Splošno o postopku

Ta postopek meritve nam omogoča določanje dinamičnih elastičnih karakteristik elastičnih materialov. Vsak vzorec ima svojo resonančno frekvenco, ki jo določajo elastični modul, masa in geometrija vzorca. Dinamične elastične karakteristike so torej lahko izračunane, če lahko maso, geometrijo vzorca in njegovo resonančno frekvenco izmerimo. Vzorec mora biti pravokotne ali cilindrične oblike. Za določitev (elastičnega) Youngovega modula uporabimo upogibni in longitudinalni način vzbujanja frekvence, za določitev dinamičnega strižnega modula pa uporabimo torzijski način. Oba modula uporabimo za izračun Poissonovega števila.

Ta postopek meri osnovno resonančno frekvenco vzorca, ki je vzbujena z enim elastičnim udarcem z orodjem za vzbujanje mehanskih impulzov. Sprejemnik zazna mehanske vibracije, ki jih pretvori v električne signale. Podpore za vzorec, točke vzbujanja vibracij in točke zaznavanja vibracij so določene tako, da omogočajo meritev željenega načina prehodnih vibracij.

4.3.2 Določanje dinamičnih elastičnih karakteristik z napravo GrindoSonic

GrindoSonic je instrument, ki meri elastične karakteristike materialov. Deluje na principu indukcije valovanja v vzorcu z mehanskim impulzom. Pri tem ne pride do porušitve materiala vzorca, zato se tudi zaradi enostavnosti in hitrosti meritve lahko doseže veliko število ponovljivih rezultatov, s katerimi se lahko spremlja tudi karakteristike materiala skozi njegovo življensko dobo.

4.3.2.1 Metoda

Osnova metode merjenja z napravo GrindoSonic je tehnika vzbujanja valovanja v vzorcu z impulzom in omogoča dinamično določanje elastičnih lastnosti materialov. Postopek meritve je sestavljen iz:

- vzbujanja valovanja v vzorcu z lahkim mehanskim impulzom in

- analize lastnega nihanja med kasnejšo prosto relaksacijo. To vzbujanje je podano na tak način, da povzroči zahtevan način valovanja.

Načini za detekcijo vibracijskega gibanja:

- Piezo-električni detektor vibriranja zazna lastno mehansko nihanje v vzorcu. Senzor je prilagodljiv del inštrumenta, ki pokrije celotno območje frekvenc GrindoSonica. Narejen je iz občutljivega piezo-električnega elementa in električnega predojačevalca. Bela pika na senzorju označuje smer maksimalne občutljivosti, zato mora biti med meritvijo pravilno usmerjena. Pika mora vedno kazati v smeri vibracije.
- Drugi način je akustični mikrofoni. Prednost tega senzorja je, da ni v kontaktu z vzorcem, uporaben pa je predvsem v relativno tihih okoljih.

Analogni signal iz detektorja se najprej vodi v dvostopenjski linearni ojačevalnik, nato pa se mu natančno določi perioda električnega signala. Takoj ko detektor vrha signala zazna, da prihajajoči signal začenja padati, se potrdi podatek in začne se merjenje zaporednih period. Inštrument zazna vse razpoložljive periode in shrani rezultate v spominu mikroprocesorja za nadaljno analizo rezultatov. Ko se prihajajoči signal porazgubi, procesor izbere meritev, ki ustreza najbolj nepopačeni obliki vala valovanja in prikaže rezultat meritve na zaslonu aparata. Rezultat lahko prikažemo na dva osnovna načina:

- Običajni način (R), t.j. časovna razlika med dvema periodama osnovnega vibriranja, ki jo izrazimo v milisekundah ali mikrosekundah.
- Izpis frekvence (F), ki je podana v herzih ali kiloherzih.

Povezava med obema načinoma je zelo preprosta:

$$F = \frac{2000000}{R} \dots [R] = \mu s, [F] = Hz \quad (4.1)$$

Signal se lahko prenese tudi na računalnik preko dveh serijskih izhodov za avtomatizacijo in nadaljno obdelavo.

S to metodo se lahko testira vse elastične materiale, pod pogojem, da notranje dušenje ne preseže določene vrednosti. Test ne zahteva točno določenih dimenzij in oblik vzorca.

Območje elastičnih modulov merjencev pa je široko - od 100 MPa do 840 GPa. Meritve so se že opravile v območju temperature od -180 do 1500 °C. Izvedba testa je zelo enostavna in hitra, z minimalno obremenitvijo vzorca. Izmerjeni elastični moduli tako izvirajo iz krivulje napetost – raztezek, zato dajo pravi ali tangentni modul. To tudi pomeni, da je meritev čisto neporušitvene oblike za vzorec.

4.3.2.2 Postopek določen s standardom

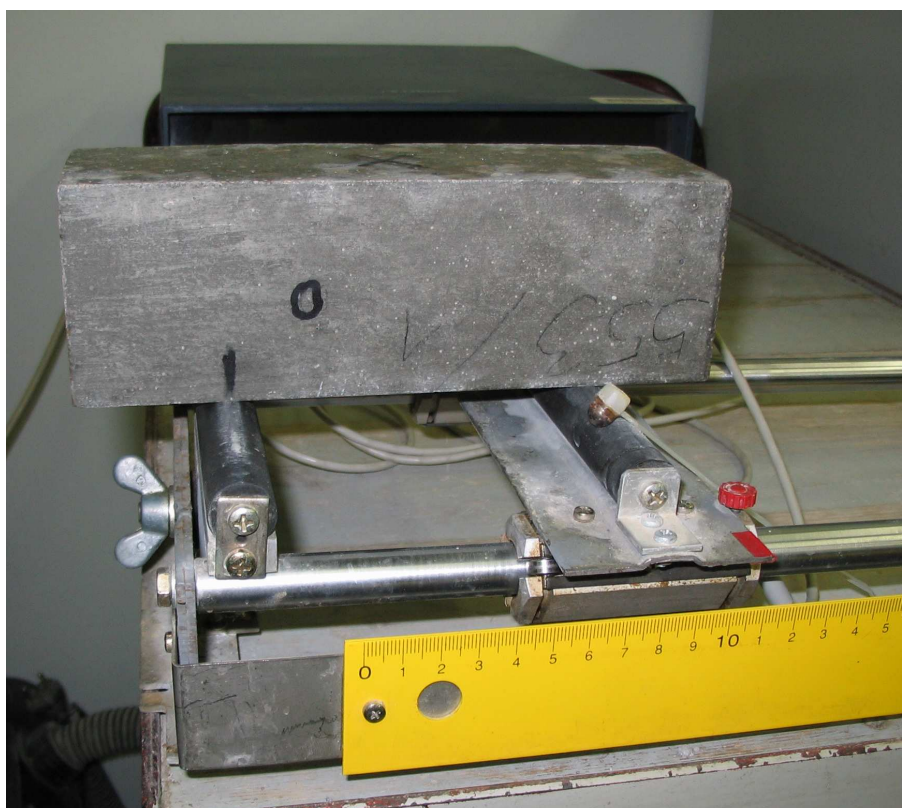
Postopek izvedbe in analize meritve, ki se jo uporablja, je povzet iz standarda ASTM E 1867-99. Po standardu se lahko ta metoda uporablja za razvoj, karakterizacijo materialov ali za namen kontrole kvalitete. Namenjena je za določanje dinamičnega modula elastičnosti materialov, ki so elastični, homogeni in izotropni (imajo iste fizikalne lastnosti), so na sobni temperaturi in v obliki prizem pravokotnega preseka. Metoda je uporabna tudi za kompozitne, nehomogene in neizotropne materiale z natančnim upoštevanjem učinkov nehomogenosti, ki direktno vplivajo na elastične lastnosti.

Aparature:

- naprava za natančno detekcijo, analizo in merjenje osnovne resonančne frekvence ali periode oddanega prostega valovanja.
- Impulser (kladivce - vzbujevalnik nihanja) je orodje, s katerim se ustvari impulz z lahkim udarcem na točno določenem mestu na vzorcu. Velikost in oblika impulserja je odvisna od velikosti in mase vzorca ter potrebne sile za ustvarjanje vibracije. Za običajne vzorce je to 10 cm dolga plastična paličica, ki ima na koncu pritrjeno jekleno kroglico s premerom 5 mm, s katero se ustvari udarec.
- Z detektorjem signala se izmeri ostalo prosto valovanje v vzorcu. Detektorji, ki poberejo signal iz direktnega kontakta z vzorcem, so navadno piezoelektrični akcelorimetri ali pa se vibracija izmeri z merilcem deformacij. Za brezkontaktno detekcijo valovanja se ponavadi uporabljajo akustični mikrofoni. Frekvenčno območje detektorja mora biti ustrezno pričakovanim frekvencam vzorca.
- Elektronski sistem je sestavljen iz ojačevalnika signala, ki ga zazna detektor, analizatorja tega ojačanega signala in sistema, ki določi frekvenco ter prikaže rezultat. Za obdelavo signala je tako primeren sistem analize frekvence z

možnostjo shranjevanja rezultatov v spominu. Z digitalnim osciloskopom s spominom in s sistemom analize signala s hitro Fourierjevo transformacijo je sistem sposoben analizirati tudi bolj zahtevne oblike valovanj in tako določiti osnovno resonančno frekvenco.

- Podpore služijo izoliranju zunanjih vibracij na vzorec, brez da bi omejile zahtevan način valovanja vzorca, zato morajo imeti za vsak način valovanja tudi ustrezno obliko.



Slika 4.1: Vzorec na podporah

Vzorec mora biti pravokotne ali pa okrogle oblike preseka, z ravnimi površinami ploskev. Resonančna frekvenca za dani vzorec je funkcija dimenzij, mase in modula vzorca, zato morajo biti dimenzije (razmerje med širino, debelino in dolžino) izbrane tako, da prihaja do čim manj eksperimentalnih težav med meritvijo in kasneje med izračunom. Dimenzije in masa vzorca morajo biti izmerjene z določeno natančnostjo. Na vzorcu je treba določiti in označiti točko udarca, mesto, kjer se pritakne senzor valovanja ter mesto, kjer vzorec nalega na podpore.

4.3.2.3 Izvedba meritve za vzorce kvadraste oblike

Napravo GrindoSonic vklopimo in pustimo, da se stabilizira. S priloženim kalibriranim referenčnim vzorcem lahko preverimo pravilno delovanje naprave.

Osnovna upogibna resonančna frekvenca izven ravnine upogiba

Vzorec postavimo na vzporedni podpori tako, da je razdalja med koncem vzorca in podporo enaka $0,224 \cdot L$ (L ... dolžina vzorca). Detektor valovanja pritaknemo k vzorcju in ugotovimo smer njegove največje občutljivosti. Usmerimo ga v smeri valovanja (bela pika mora kazati v smer valovanja). Detektor pritaknemo na vzorec samo toliko stran od podpore kolikor je nujno, da še lahko izvedemo meritve. Na vzorec pritiskamo s tako veliko konstantno silo, da ne motimo vibriranja vzorca. Po vzorcju udarimo z kladivcem lahkotno in elastično. Udarjamo toliko časa, da leži vrednost na zaslonu v petih zaporednih udarcih, v območju 1% med njimi. Povprečje teh vrednosti je rezultat.

Osnovna upogibna resonančna frekvenca v ravnini upogiba

Postopek meritve in pozicija podpor je enaka kot v prejšnjem primeru. Meritev lahko izvedemo na dva načina. Zamenjamo ploskvi, na katerih sta točki udarca in detektorja, ali pa cel vzorec obrnemo za 90 stopinj, s tem, da se morata v izračunu med seboj zamenjati debelina in širina vzorca.

Osnovna torzijska resonančna frekvenca

Podpori za meritve te frekvence sta med seboj pravokotni in potekata po sredini dolžine in širine vzorca. Detektor valovanja pritaknemo na enem od kvadrantov, približno $0,224 \cdot L$ od konca vzorca, blizu roba. Mesto udarca pa je na nasprotni diagonalni strani. Rezultat meritve dobimo enako kot v prejšnjih dveh primerih.

Osnovna longitudinalna resonančna frekvenca

Lokacija podpor je enaka kot v prejšnjem primeru (torzijska frekvenca). Mesto udarca je v sredini ene od končnih ploskev. Detektor pa pritaknemo na zgornji ploskvi, nekaj centimetrov od roba na drugi strani vzorca in je usmerjen proti točki udarca.

4.3.3 Izračun modulov

Potek izračuna dinamičnega Youngovega in strižnega modula po standardu ASTM E 1876-99

4.3.3.1 Dinamični Youngov modul

Osnovna upogibna frekvenca valovanja za vzorec pravokotnega preseka

$$E = 0.9465 \frac{m \cdot f_f^2}{b} \cdot \frac{L^3}{t^3} T_1 \quad (4.2)$$

E = Youngov modul [Pa]

m = masa vzorca [g]

b = širina vzorca [mm]

L = dolžina vzorca [mm]

t = debelina vzorca [mm]

f_f = osnovna resonančna frekvenca vzorca za upogib [Hz]

T_1 = korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco, ki upošteva geometrijo vzorca, Poissonovo število,...

$$T_1 = 1 + 6.585(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8.34(1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (4.3)$$

μ = Poissonovo število

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (4.4)$$

- Če je $L/t \geq 20$, se T_1 poenostavi v

$$T_1 = \left[1 + 6.585 \left(\frac{t}{L}\right)^2 \right] \quad (4.5)$$

in E se izračuna direktno.

- Če je $L/t < 20$, in je Poissonovo število znano, ga vstavimo v enačbo (4.3), izračunamo T_I in nato izračunamo še E .

- Če je $L/t < 20$, Poissonovo število pa ni znano, se mora privzeti začetno Poissonovo število, da lahko začnemo z izračunom. Za določanje Poissonovega števila osnovanega na eksperimentalnem Youngovem in strižnem modulu se uporabi naslednji iteracijski postopek (1) do (5):

- (1) Izmeri se osnovno resonančno in torzijsko frekvenco vzorca s pravokotnim presekom, uporabi se enačbi (4.6) in (4.7) za določitev dinamičnega strižnega modula.
- (2) Za izračun dinamičnega Youngovega modula se uporabi enačbi (4.2) in (4.3).
- (3) Za določitev nove vrednosti Poissonovega števila se v enačbo (4.4) vstavi vrednosti za strižni in Youngov modul.
- (4) Ponavlja se postopek (2) in (3), dokler ne prihaja več do pomembne razlike (manj kot 2%) med zadnjo in predzadnjo vrednostjo za Poissonovo število. Zadnjo vrednost se vzame za končno vrednost Poissonovega števila.
- (5) S tem številom se izračuna še ostale količine.

4.3.3.2 Dinamični strižni modul

Osnovna torzijska resonančna frekvenca za vzorec pravokotnega preseka

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} \left(\frac{B}{1+A} \right) \quad (4.6)$$

G = dinamični strižni modul (Pa)

f_t = osnovna torzijska resonančna frekvenca (Hz)

A in B sta empirična korekcijska faktorja, odvisna od razmerja med debelino in širino vzorca. A ima vpliv manjši od 2%, zato je lahko izpuščen, razen če je zahtevana napaka izračuna manjša od 2%.

$$B = \left[\frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4\left(\frac{t}{b}\right) - 2.52\left(\frac{t}{b}\right)^2 + 0.21\left(\frac{t}{b}\right)^6} \right] \quad (4.7)$$

$$A = \frac{\left[0.5062 - 0.8776\frac{b}{t} + 0.3504\left(\frac{b}{t}\right)^2 - 0.0078 \right]}{12.03\frac{b}{t} + 9.892\left(\frac{b}{t}\right)^2} \quad (4.8)$$

4.4 Merilna negotovost

4.4.1 Splošno o merilni negotovosti

Merilna negotovost je številski podatek, ki nam pove, kako kakovostno smo meritev izvedli in je kvantitativno merilo, ki opisuje, kako močno dvomimo v izmerjeni rezultat. V splošnem nobena meritev ni idealna in so zato rezultati meritev vedno le približki prave vrednosti merjene veličine. Merilna negotovost je tako količina, ki nam določa, v katerih mejah okrog izmerjene vrednosti se nahaja pravi rezultat in s kakšno verjetnostjo.

Pri preizkušanju se lahko pojavijo naslednji različni viri merilnih negotovosti:

- Nepopolna definicija preskusa, nejasen opis zahteve (npr. temperatura pri preskušanjih, podana kot sobna temperatura).
- Nepopolna realizacija preskusnega postopka (kadar pogojev preskušanja ne moremo v celoti realizirati).
- Premajhno reprezentativno vzorčenje.
- Osebni vpliv preskuševalca pri odčitavanju analognih instrumentov.
- Ločljivost merilnega instrumenta ali prag zaznavanja, napake zaradi gradacije skale.

4.4.2 Merilna negotovost pri tehtanju

Zavedati se moramo, da pogoji pri vsakdanjem delu niso enaki kot tisti pri kalibraciji. Tehtano telo ni enake oblike (volumen = vzgon), temperatura se razlikuje in postopek merjenja je drugačen (eno tehtanje za eno breme ...). Do napak lahko pride, ker se tehtnica po obremenitvi ne razbremeni takoj, ker je breme lahko postavljeno ekscentrično in zaradi uporabe tariranja.

4.4.3 Merilna negotovost pri merjenju s kljunastim merilom

Na meritev vplivajo zunanji pogoji, ki so drugačni kot ob kalibraciji instrumenta. Preskuševalec ima velik vpliv pri postavitvi instrumenta. Lega mora biti vzporedna z telesom, ki mu merimo dimenzije. Pri analognem instrumentu se ta vpliv še poveča, kajti vsakdo lahko drugače presodi izmerjeno dimenzijo.

4.4.4 Merilna negotovost pri GrindoSonicu

Tako kot pri drugih instrumentih imajo vpliv zunanji pogoji. Vplivajo pa tudi:

- Postavitev detektorja signala. Bela pika mora kazati v smer valovanja.
- Lokacija detektorja signala. Vedno v isti točki.
- Mesto udarca.
- Postavitev vzorca na podpore.

4.4.5 Vpliv merilne negotovosti na izračun Youngovega modula

Pri preračunu elastičnega modula v enačbe vstavljamo izmerjene vrednosti. Ker je pri meritvah vedno prisotna napaka se ta prenese v izračun. Ker vrednosti v enačbah nastopajo s potencami se ta napaka še dodatno poveča. V naslednji preglednici so podane velikosti teh napak (Kozamernik, 2003, str. 6):

veličina	napaka pri meritvi	potenca veličine v enačbi za modul	napaka pri izračunu
frekvenca	0.1 %	f^2	0.2 %
dolžina	0.1 %	L^3	0.3 %
masa	0.1 %	m	0.1 %
širina	0.1 %	b^{-1}	0.1 %
debelina	0.1 %	t^3	0.3 %
premer	0.1 %	D^{-4}	0.4 %

5 ANALIZA PREISKAVE

5.1 Opis preiskave

5.1.1 Namen in opis preiskave

V okviru diplomske naloge smo želeli preiskati vpliv različnih vrst cementa in kemijskih dodatkov na sulfatno odpornost betonov, izpostavljenih različnim raztopinam sulfatov. Spremljali smo potek razvoja dinamičnega elastičnega modula. Istočasno smo spremljali tudi spremembe dolžine in mase betonskih vzorcev.

V eksperimentalni del preiskave so vključene tri različne vrste cementov in trije različni kemijski dodatki. Vzorce smo potopili v pet različnih raztopin, od katerih je ena etalonska (destilirana voda).

V sklopu preiskave je bilo pripravljenih devet različnih betonskih mešanic. Vsakemu od treh cementov smo dodali tri različne kemijske dodatke.

5.1.2 Cementi in dodatki uporabljeni v preiskavi

V preiskavi smo uporabili tri različne cemente:

- cement A,
- cement B,
- cement C.

In tri različne kemijske dodatke:

- dodatek 1,
- dodatek 2,
- dodatek 3.

Cement A je portlandski cement z dodatkom žindre, trdnostnega razreda 42,5 in z visoko zgodnjo trdnostjo. Vsebuje minimalno 80% cementnega klinkerja, 6% - 20% granulirane plavžne žindre in do 5% polnil. Ne sme vsebovati več kot:

- 4% sulfata (kot SO_3),
- 0,1% klorida,
- 6,6 % C_3A .

Cement B je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 z običajno zgodnjo trdnostjo in povišano odpornostjo proti agresiji sulfatnih ionov (SR – sulphat resistant). Vsebuje minimalno 95% cementnega klinkerja z nizko vsebnostjo aluminata (C_3A). Njegove kemijske zahteve so omejene na največ:

- 3,5% sulfata (kot SO_3),
- 0,1% klorida,
- 5% žarilne izgube,
- 3% netopnega ostanka,
- 2,5% C_3A .

Cement C je mešani cement z dodatkom žindre in naravnega pucolana, trdnostnega razreda 32,5 in z običajno zgodnjo trdnostjo ter nizko toploto hidratacije (LH – low heat). Vsebuje minimalno 40% portlandskega cementnega klinkerja, maksimalno 30% granulirane plavžne žindre in maksimalno 30% naravnega pucolana. Ne sme vsebovati več kot:

- 3,5% sulfata (kot SO_3),
- 0,1% klorida,
- 3,6 % C_3A .

Iz vsake mešanice smo naredili tri betonske kocke dimenzij 200×200×200 mm, katere smo z diamantno rezalno ploščo razrezali na devet prizem približnih dimenzij 63×63×200 mm. Za vsako mešanico smo tako dobili 27 prizem. Edina izjema je cement B z dodatkom 1. V tem primeru so bile narejene tri prizme dimenzij 100×100×400 mm. Iz vsake prizme smo izrezali dve manjši prizmi enakih približnih dimenzij kot v prejšnjem primeru. Skupaj torej dobimo 6 prizem za to betonsko mešanico in vse skupaj 222 prizem.

5.1.3 Priprava betona in izdelava betonskih kock ter prizem

Beton smo v kalupe vgradili skladno s standardom SIST EN 12350-6. Kalup najprej napolnimo približno do polovice in ga zvibriramo na vibracijski mizi. Vibriramo ga toliko časa dokler se na površini pojavljajo večji mehurčki in je površina motna. Nato kalup napolnimo do konca in zopet vibriramo na vibracijski mizi. Zaradi lažjega razkalupljanja stranice kalupa namažemo z opažnim oljem, ki je biološko razgradljivo.

Po končani vgradnji betona v kalupe moramo poskrbeti za pravilno nego betona, ki je določena s standardom SIST EN 12390-2. Vzorce moramo pustiti v kalupih vsaj 16 ur (da preprečimo sprijemanje s stranicami kalupa in s tem poškodbe vzorca), vendar ne več kot 3 dni. Zaščitimo jih pred vibracijami, šokom in dehidracijo (pokrijemo jih s PVC folijo). Do razkalupljanja jih moramo hraniti pri temperaturi $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Po razkalupljanju nego vzorcev, vse do preiskave, izvajamo v vodi, katere temperatura je $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ oziroma v relativni vlagi $\geq 95\%$. Trdnost betona je zelo odvisna od temperaturno – vlažnostnih pogojev. Pri premajhni relativni vlagi lahko beton dehidrira, kar upočasni hidratacijo. Prav tako pa lahko hidratacijo upočasnijo prenizke temperature.

5.1.4 Raztopine, ki nastopajo v preiskavi

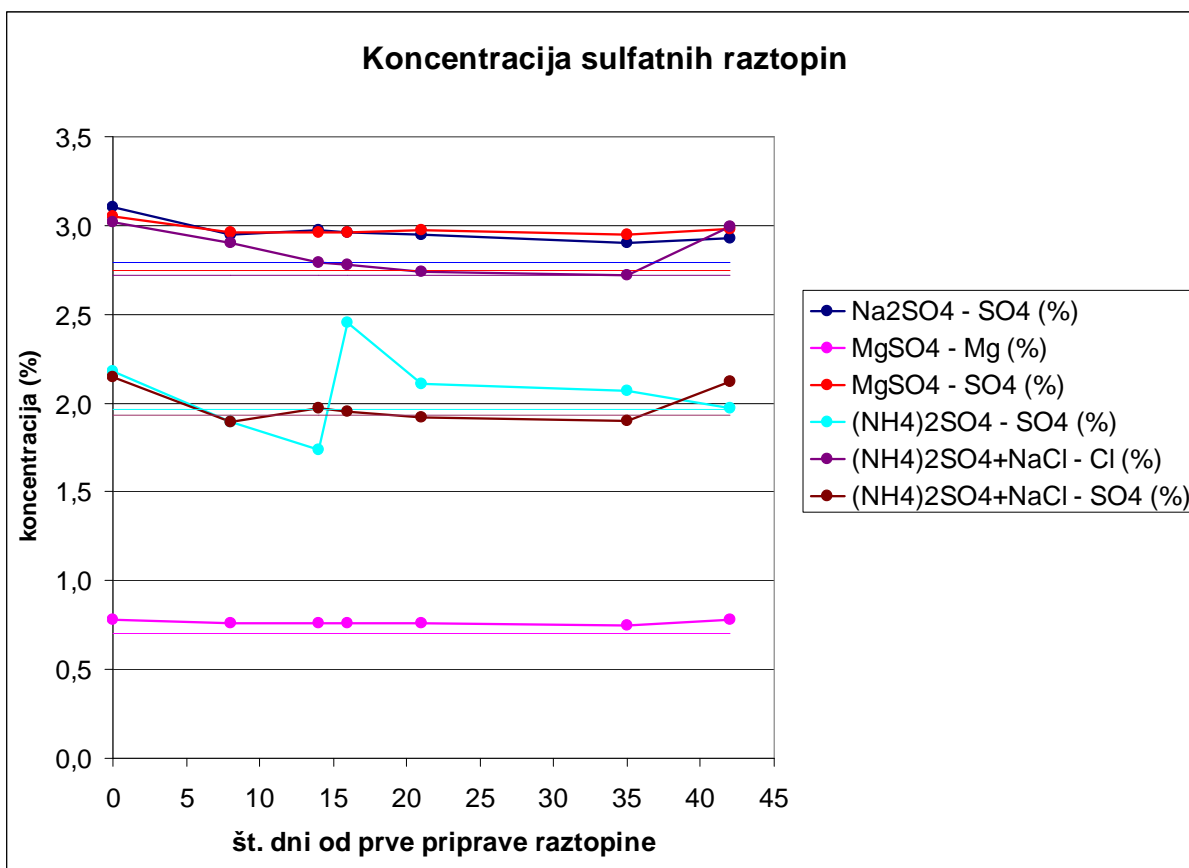
Betonske vzorce smo izpostavili različnim agresivnim medijem:

- raztopina I – Na_2SO_4 (4,50%),
- raztopina II – MgSO_4 (7,73%),
- raztopina III – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (3%),
- raztopina IV – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NaCl}$ (3% + 5%),
- raztopina V – destilirana voda – etalon.

Med preiskavo je zagotovljena čim bolj konstantna koncentracija raztopin. Spremlja se koncentracija kovinskih in sulfatnih ionov ter kloridov, in sicer se spremlja tedensko.

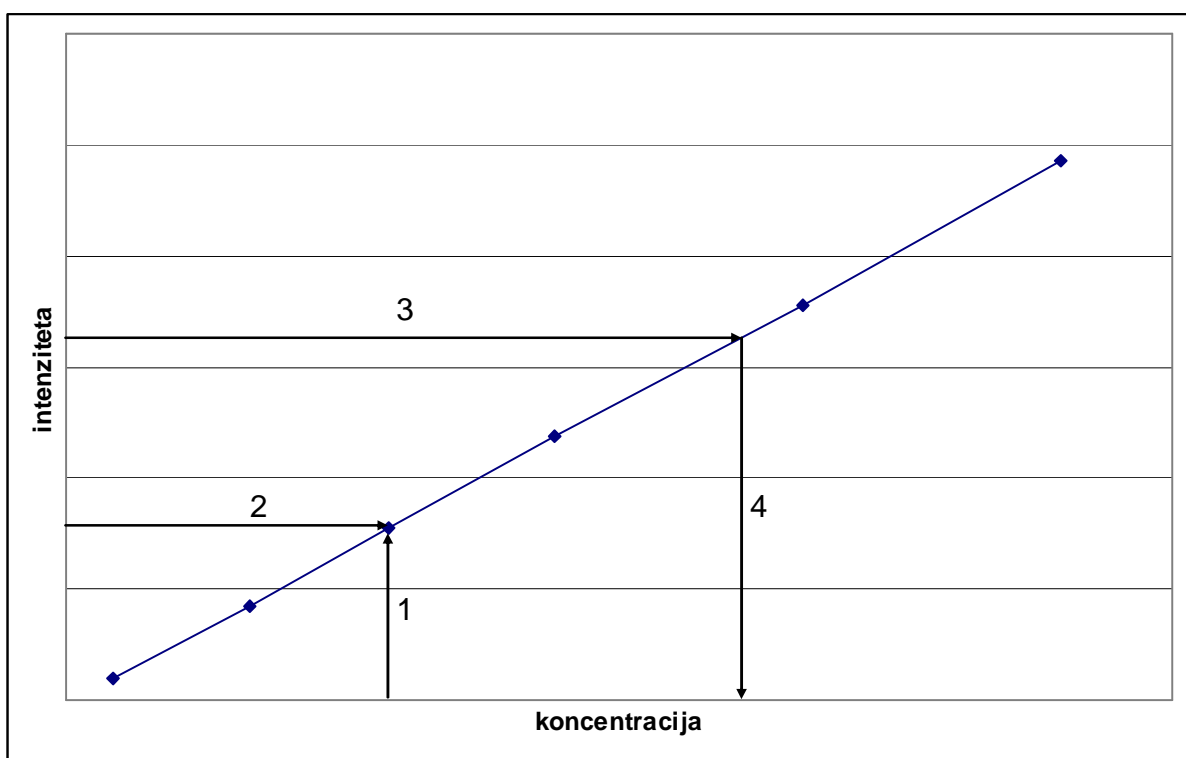
Preglednica 5.1: Primer spremljanja koncentracij v raztopinah (številke obarvane rdeče pomenijo, da je koncentracija padla za več kot 10%. Takrat se v raztopino doda manjkajoče snovi)

Dan	Cement A					
	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄		(NH ₄) ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄ + NaCl	
	SO ₄ (%)	Mg (%)	SO ₄ (%)	SO ₄ (%)	Cl (%)	SO ₄ (%)
0	3,10	0,78	3,05	2,18	3,02	2,15
8	2,95	0,76	2,96	1,89	2,90	1,89
14	2,97	0,76	2,96	1,74	2,79	1,97
16	-	-	-	2,45	-	-
21	2,95	0,76	2,97	2,11	2,74	1,92
35	2,90	0,75	2,95	2,07	2,72	1,90
42	2,93	0,78	2,98	1,97	2,99	2,12



Slika 5.1: Grafični prikaz spreminjanja koncentracij v raztopinah (vodoravne črte prikazujejo spodnjo mejo koncentracije posameznih ionov in so obarvane enako, kot je bila dejanska koncentracija ionov)

Koncentracije so bile določene z rentgenskim fluorescenčnim spektrometrom. Za določanje koncentracije so bile pripravljene umeritvene krivulje. Umeritveno krivuljo (slika 5.2) pripravimo tako, da pripravimo raztopine s točno znano koncentracijo željenih snovi. Nato tem pripravljenim raztopinam z spektrometrom določimo njihovo intenziteto. Tako dobimo več točk, ki jih povežemo v krivuljo (koraka 1 in 2). Ko imamo umeritveno krivuljo znano, lahko vzorcem z neznano koncentracijo izmerimo njihovo intenziteto in iz prej dobljenega diagrama razberemo njihovo koncentracijo (koraka 3 in 4).

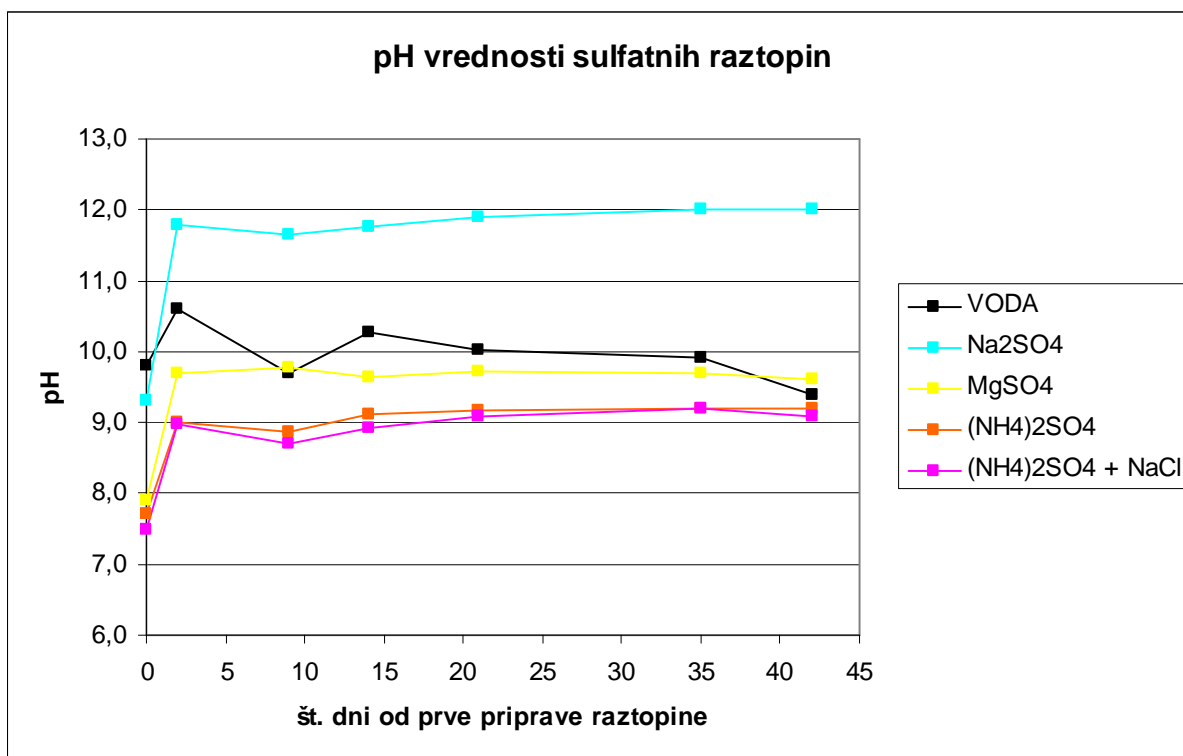


Slika 5.2: Prikaz določanja umeritvene krivulje in merjenja koncentracij

Poleg koncentracij se redno tedensko spremlja tudi pH vrednost raztopin.

Preglednica 5.2: Primer spremljanja pH vrednosti v raztopinah

Dan	Cement A				
	Voda	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄ + NaCl
0	9,8	9,3	7,9	7,7	7,5
2	10,6	11,8	9,7	9,0	9,0
9	9,7	11,7	9,8	8,9	8,7
14	10,3	11,8	9,6	9,1	8,9
21	10,0	11,9	9,7	9,2	9,1
35	9,9	12,0	9,7	9,2	9,2
42	9,4	12,0	9,6	9,2	9,1



Slika 5.3: Primer spremljanja pH vrednosti v raztopini

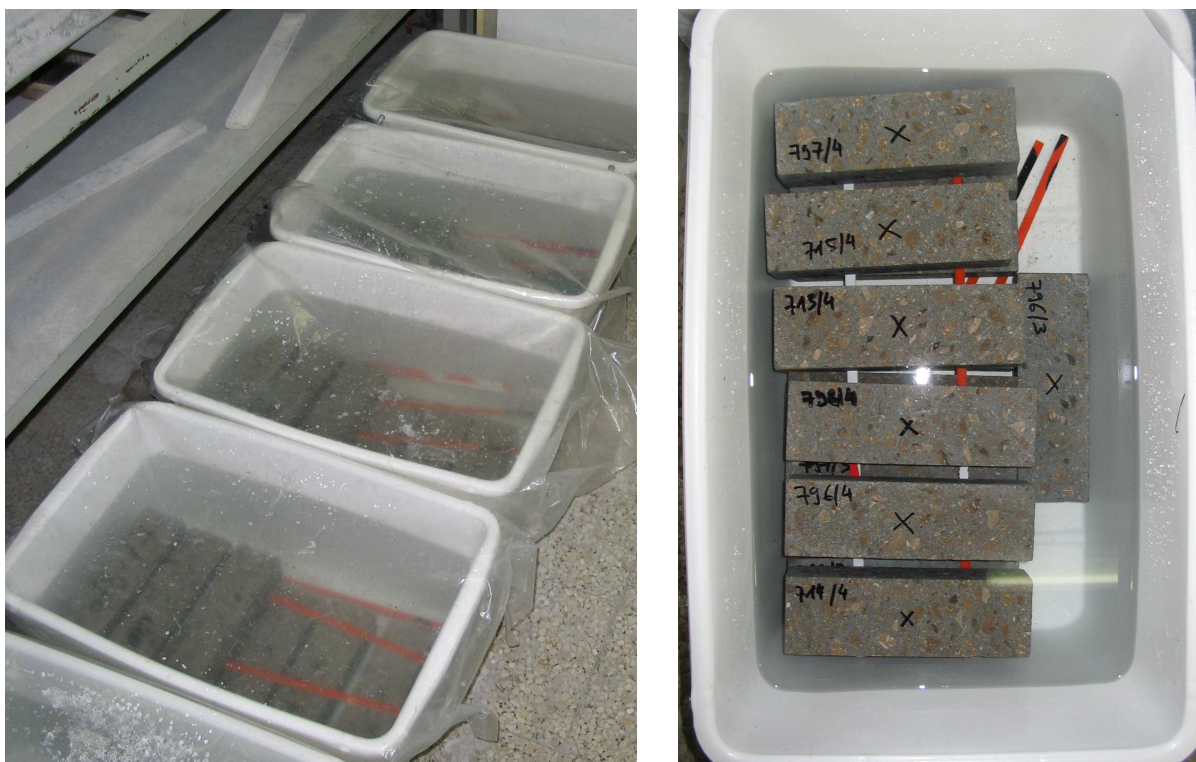
Pred vsakim merjenjem pH vrednosti in odvzemom vzorca za kontrolo koncentracije se raztopina dobro premeša.



Slika 5.4: Odvzeti vzorci raztopin, pripravljene za določitev njihove koncentracije in pH vrednosti

Prizme smo razporedili po raztopinah na sledeči način:

- po dve prizmi iz vsake kocke smo potopili v posamezno raztopino,
- zadnjo, deveto prizmo, smo potopili v etalon, kar nam omogoča kasnejše primerjave,
- v primeru cement B – dodatek 1 smo v raztopine I, II, IV in V potopili po eno prizmo, v raztopino III pa dve prizmi.



Slika 5.5 in slika 5.6: Shranjevanje vzorcev v raztopinah

5.1.5 Potek meritev

Meritve smo začeli izvajati s pogostostjo 1 meritev na teden, kasneje pa smo prešli na periodo ena meritev na 2 tedna, ker so se rezultati meritev spreminjali umirjeno, približno linearno in ne skokovito. Preden smo vzorce potopili v raztopine smo jih premerili in označili. Vsem vzorcem smo izmerili njihovo maso, dolžino, širino in debelino. Širine in debeline kasneje nismo več merili, kajti vzorci so premajhni in napaka meritve je lahko večja kot pa je dejanska sprememba dimenzije.

Za potrebe preračuna elastičnega modula smo vzporedno z merjenjem lastne resonančne frekvence merili tudi maso in dolžino vzorcev. Pred vsakim merjenjem smo vzorec obrisali s suho krpo, da bi zagotovili vedno enake pogoje. Posamezne parametre smo merili na naslednji način z naslednjo natančnostjo:

- **Maso** smo merili na neavtomatski tehtnici, rezultat pa odčitavali na gram natančno.

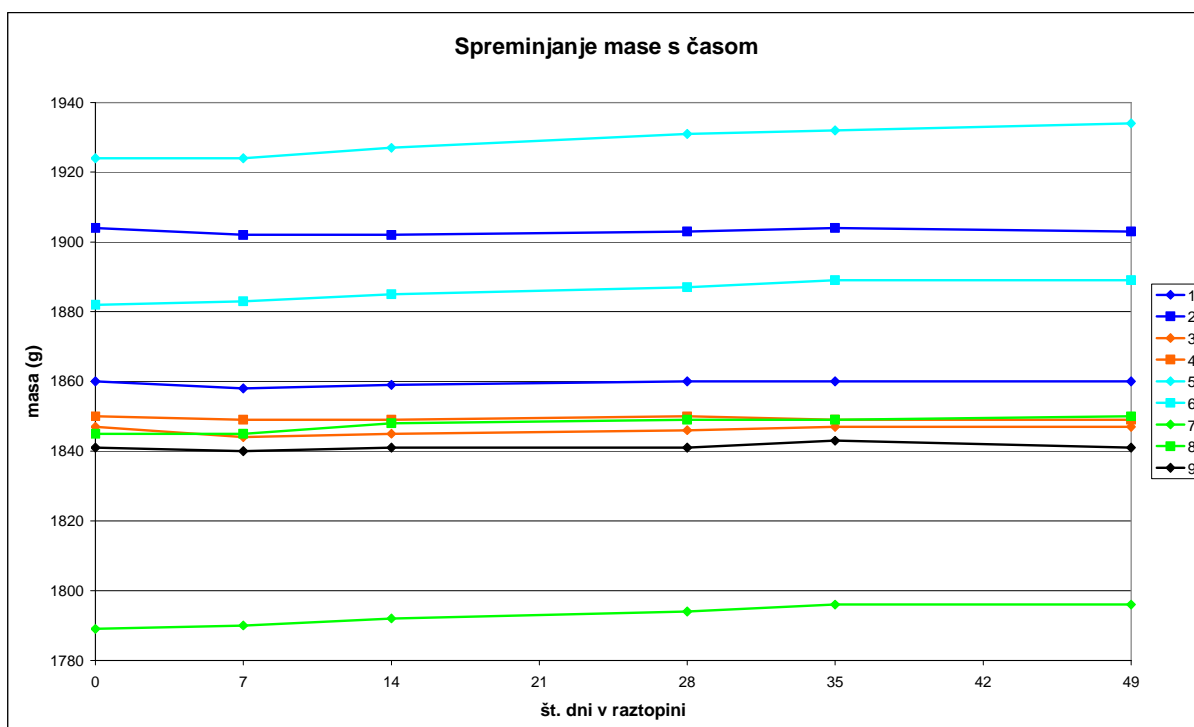


Slika 5.7: T tehtanje vzorcev

Preglednica 5.3: Primer merjenja mase prizm. Vse prizme so izrezane iz iste kocke. Rezultati so podani v gramih.

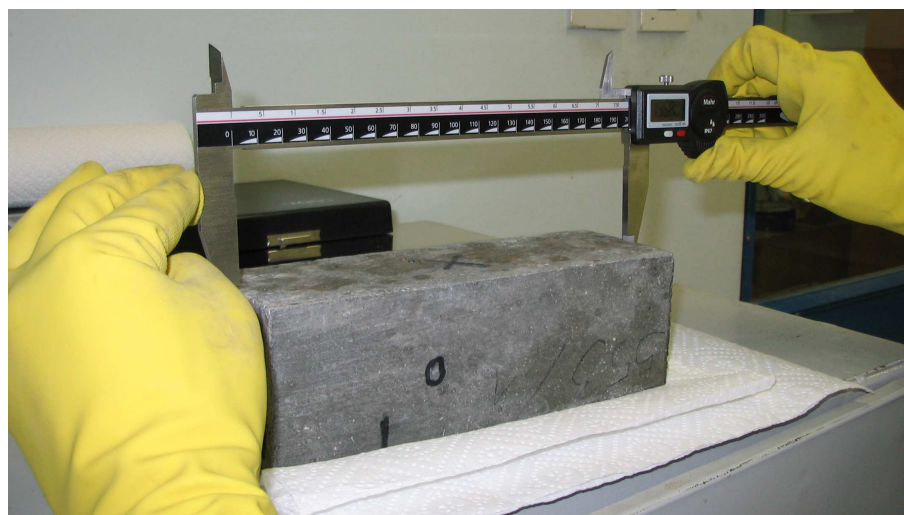
Št. prizme	Št. dni v raztopini					
	0	7	14	28	35	49
1	1860	1858	1859	1860	1860	1860
2	1904	1902	1902	1903	1904	1903
3	1847	1844	1845	1846	1847	1847
4	1850	1849	1849	1850	1849	1849
5	1924	1924	1927	1931	1932	1934
6	1882	1883	1885	1887	1889	1889
7	1789	1790	1792	1794	1796	1796
8	1845	1845	1848	1849	1849	1850
9	1841	1840	1841	1841	1843	1841

Prizmi 1 in 2 sta potopljeni v raztopino I, prizmi 3 in 4 v raztopino II, prizmi 5 in 6 v raztopino III, prizmi 7 in 8 v raztopino IV in prizma 9 v destilirano vodo.



Slika 5.8: Spreminjanje mase prizem s časom. Vse prizme so iz iste kocke.

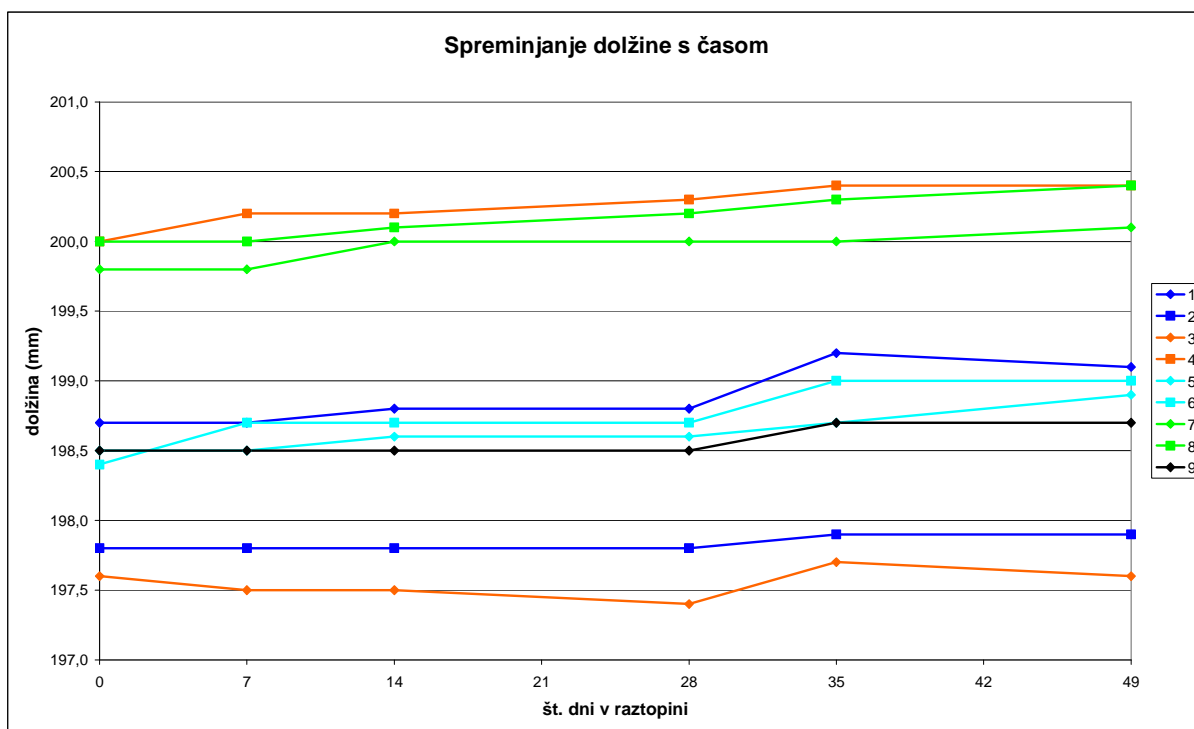
- **Dolžino** smo merili s kljunastim merilom na desetinko (0,1) milimetra natančno.



Slika 5.9: Merjenje dolžine vzorcev s kljunastim merilom

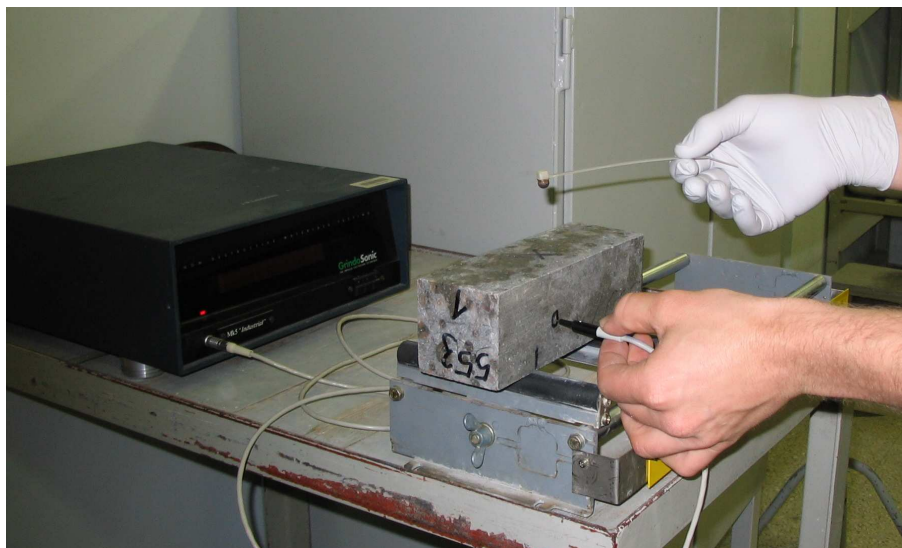
Preglednica 5.4: Primer merjenja dolžine prizm. Vse prizme so izrezane iz iste kocke.
 Rezultati so podani na desetinko milimetra natančno.

Št. prizme	Št. dni v raztopini					
	0	7	14	28	35	49
1	198,7	198,7	198,8	198,8	199,2	199,1
2	197,8	197,8	197,8	197,8	197,9	197,9
3	197,5	197,5	197,5	197,4	197,7	197,6
4	200,0	200,2	200,2	200,3	200,4	200,4
5	198,5	198,5	198,6	198,6	198,7	198,9
6	198,4	198,7	198,7	198,7	199,0	199,0
7	199,8	199,8	200,0	200,0	200,0	200,1
8	200,0	200,0	200,1	200,2	200,3	200,4
9	198,5	198,5	198,5	198,5	198,7	198,7



Slika 5.10: Spreminjanje dolžine prizem s časom. Vse prizme so iz iste kocke.

- **Periodo** osnovnega nihanja smo merili z instrumentom GrindoSonic. Instrument na zaslonu prikaže vrednost v milisekundah. Razdelek je ena milisekunda. Za zaznavo vibriranja smo uporabili piezo-električni detektor vibriranja.



Slika 5.11: Meritev z GrindoSonicom

Uporabljeni instrumentni za merjenje dolžine in mase omogočajo odčitavanje z večjo natančnostjo, vendar smo zaradi neravnih površin vzorcev in odprtih površinskih por v katerih se lahko zadržuje raztopina, rezultate zaokroževali po pravilu (natančnost merjenja je podana zgoraj):

- če je zadnja številka med 0 in 4, zaokroži navzdol,
- če je zadnja številka med 5 in 9, zaokroži navzgor.

5.1.5 Račun elastičnega modula iz rezultatov meritev

Račun je potekal po enačbah, ki so podane v poglavju 4.3.3.1. V našem primeru smo izvajali samo meritev osnovne upogibne frekvence v ravnini upogiba. Zato ni bil možen račun torzijskega modula in posledično tudi ne elastičnega modula, ker ni bilo možno izračunati Poissonovega števila μ . Zato smo Poissonovo število predpostavili; $\mu = 0,26$, in s tem omogočili izračun elastičnega modula. Kot končne rezultate smo določali spremembo elastičnega modula glede na začetnega in rezultat izrazili v odstotkih.

5.1.6 Posebnosti

- Na vzorcih potopljenih v amonijev sulfat so se nabrali igličasti kristali. Kemijska analiza je pokazala sestavo kristalov odvzetih s površine vzorcev. Kristali so sestavljeni iz sadre, amonijevega sulfata, kalcijevega hidroksida in dveh oblik etringita.
- V raztopini magnezijevega sulfata se je pojavilo veliko kosmičev.



Slika 5.12: Kosmiči v raztopini magnezijevega sulfata

5.2 Rezultati

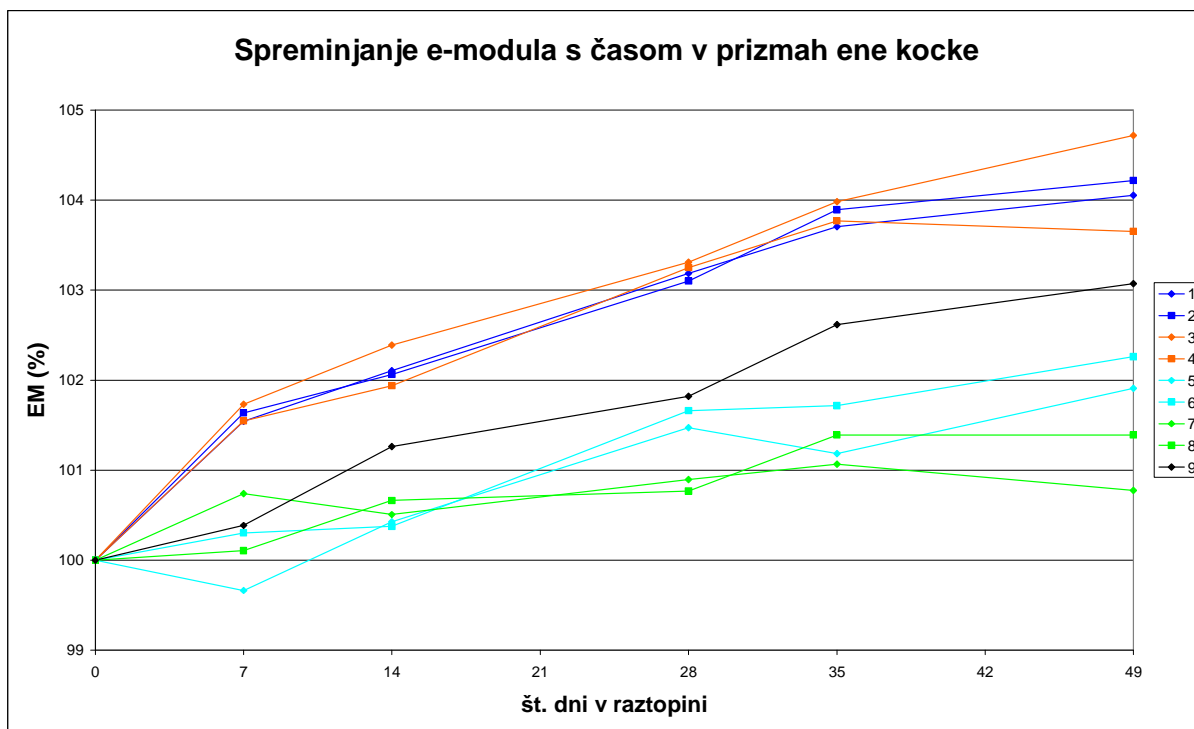
Namen diplomske naloge je bil preučiti vpliv vrste cementa na odpornost v agresivnih okoljih, v tem primeru sulfatno agresivnih. Rezultate meritev enakih mešanic smo zbrali skupaj v tabele. Ločili smo jih po vrsti cementa in raztopini, kateri so bili izpostavljeni. Nato smo določili povprečja. Začeli smo s splošnim povprečjem, v katerem smo dobili sliko, kako se beton iz posamezne vrste cementa obnaša v raztopini, nato pa smo rezultate razbili še po

vrsti kemijskega dodatka. Kasneje smo v povprečjih ločili še rezultate meritev prizem, katere so se sušile na zraku in tiste, ki se niso. Rezultate smo prikazali v obliki diagramov.

Ker smo računali povprečja, na diagramih ni vidno kakšen je raztros rezultatov. Do raztrosa rezultatov lahko prihaja zaradi:

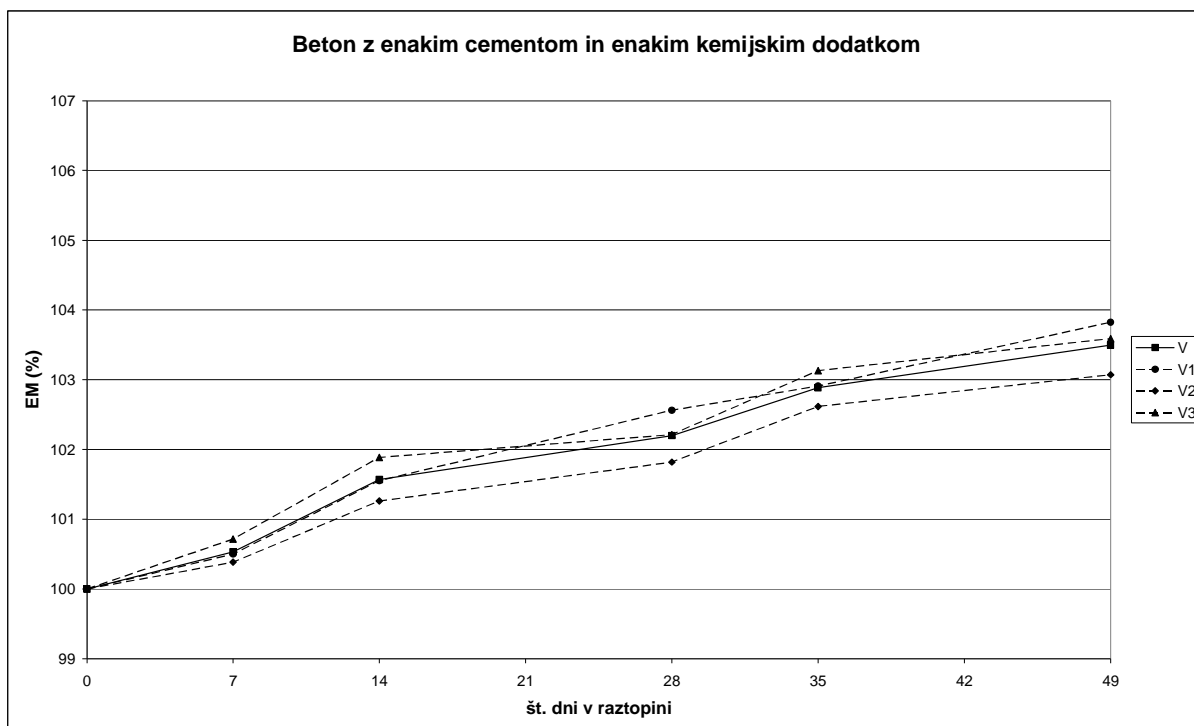
- notranje razporeditve zrn agregata, ki se razlikuje med posameznimi prizmami,
- ne dovolj homogenizirane betonske mešanice,
- tega, ker ne moremo vsakič zamešati popolnoma enake mešanice,
- napake meritve,
- vpliva merilca.

Kot primer velikosti raztrosa sta podana naslednja diagrama, ki prikazujeta spremembo elastičnega modula. Na sliki 5.13 so podane vse prizme izrezane iz iste kocke. Razvidno je, da se rezultati prizem potopljenih v enakih raztopinah med seboj ne razlikujejo za več kot $\pm 0,5\%$.



Slika 5.13: Spreminjanje elastičnega modula s časom v prizmah ene kocke

Na naslednji sliki 5.14 je prikazan razvoj elastičnega modula pri prizmah potopljenih v isto raztopino, vendar pa so prizme izrezane iz različnih kock (1, 2 in 3) z enako recepturo betonske mešanice. Kot primerjava je podana povprečna vrednost vseh teh rezultatov (izrisana s polno črto), ki jo kasneje tudi uporabljamo za analize. Tudi na tem grafu opazimo, da so vsi rezultati v območju $\pm 0,5\%$. To vrednost si bomo zapomnili za naslednje analize.

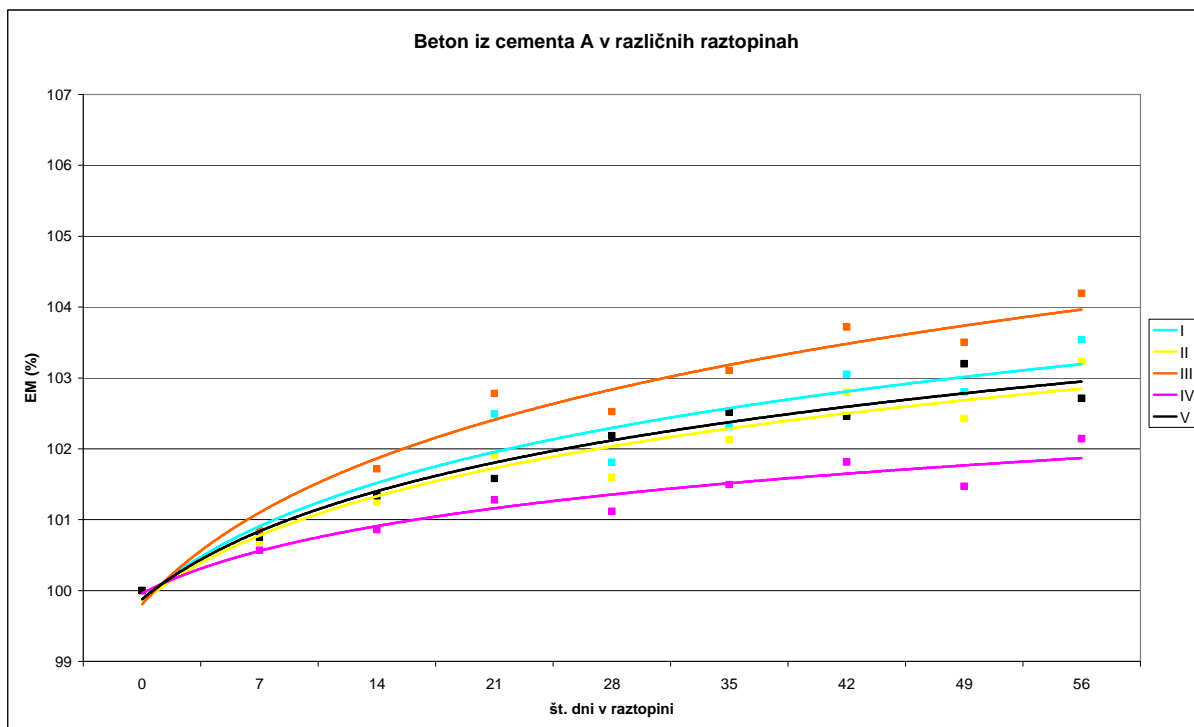


Slika 5.14: Beton z enakim cementom in enakim kemijskim dodatkom, potopljen v isto raztopino in razdeljen na prizme iz različnih kock s podano povprečno vrednostjo

5.2.1 Obnašanje betonov v različnih raztopinah

Vse vrste betonov smo izpostavili enakim raztopinam z enako koncentracijo sulfatov. Vsaka od petih črt na diagramu predstavlja eno raztopino. Črna črta predstavlja raztopino V, ki je etalon (destilirana voda) in nam služi za orientacijo in primerjavo.

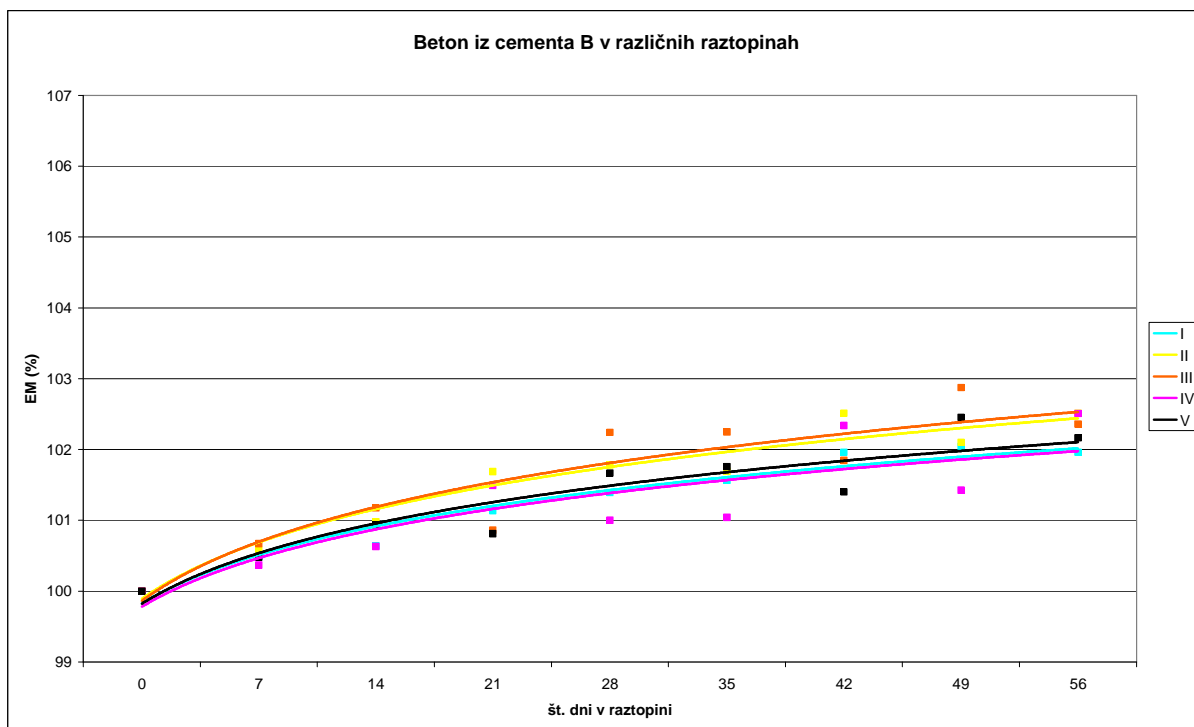
Na vseh diagramih je opazen relativno velik raztros rezultatov. Za boljšo predstavo smo zato z metodo najmanjših kvadratov določili krivuljo, ki prikazuje trend naraščanja elastičnega modula. V mislih moramo imeti, da so ti rezultati samo povprečja meritev, v katerih so združeni vsi betoni z enakim cementom in različnimi dodatki.



Slika 5.15: Beton iz cementa A v različnih raztopinah

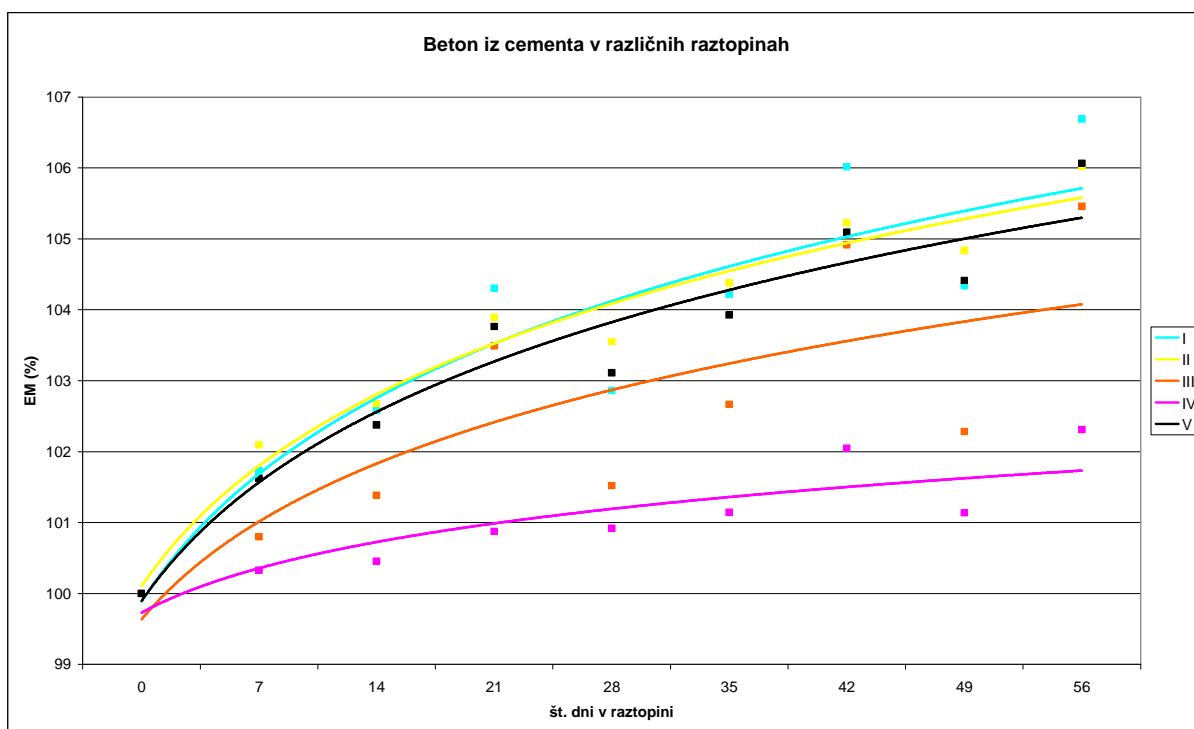
Časovni razvoj elastičnega modula betona, ki vključuje cement A, je predstavljen na sliki 5.15. Opazimo, da ni večjih razlik med posameznimi raztopinami (ob upoštevanju raztrosa rezultatov $\pm 0,5\%$). Izstopa samo beton v raztopini IV. To je amonijev sulfat z dodatkom kuhinjske soli (NaCl). Vendar pa je to odstopanje zelo majhno, skoraj v območju naše napake pri merjenju in izračunu.

Na sliki 5.16 je prikazan časovni razvoj elastičnega modula betona z vključenim cementom B. Razmerja med krivuljami na diagramu so varljiva, saj je naš raztros rezultatov večji, kot pa so razlike med njimi. Lahko torej rečemo, da nobena raztopina ne vpliva bistveno na cement B, saj so vse krivulje zelo blizu etalonski. Cement B je tisti, ki ima povečano sulfatno odpornost in je tak rezultat seveda logičen.



Slika 5.16: Beton iz cementa B v različnih raztopinah

V primeru betona s cementom C pa se rezultati za različne raztopine med seboj pomembno razlikujejo (slika 5.17). Poleg tega je za ta beton značilno tudi hitrejše naraščanje modula elastičnosti s trajanjem izpostavljenosti betona raztopinam. Raztopini I in II v dosedanjem poteku raziskave še ne vplivata neugodno na ta beton. Krivulje lepo sledijo etalonski. Pri raztopini III pa že zaznamo spremembe. Povečanje elastičnega modula je kljub upoštevanju raztrosa rezultatov manjše kot pri raztopinah I in II. Največja razlika pri betonu s cementom C pa je v primeru raztopine IV. Prirastek modula je glede na ostale raztopine veliko manjši. Tudi če ga postavimo na zgornjo mejo (ob upoštevanju raztrosa rezultatov +0,5%) in ostale na spodnjo mejo, je razlika še vedno 1%. Lahko torej ocenimo, da je raztopina IV najbolj neugodna za beton iz te vrste cementa.

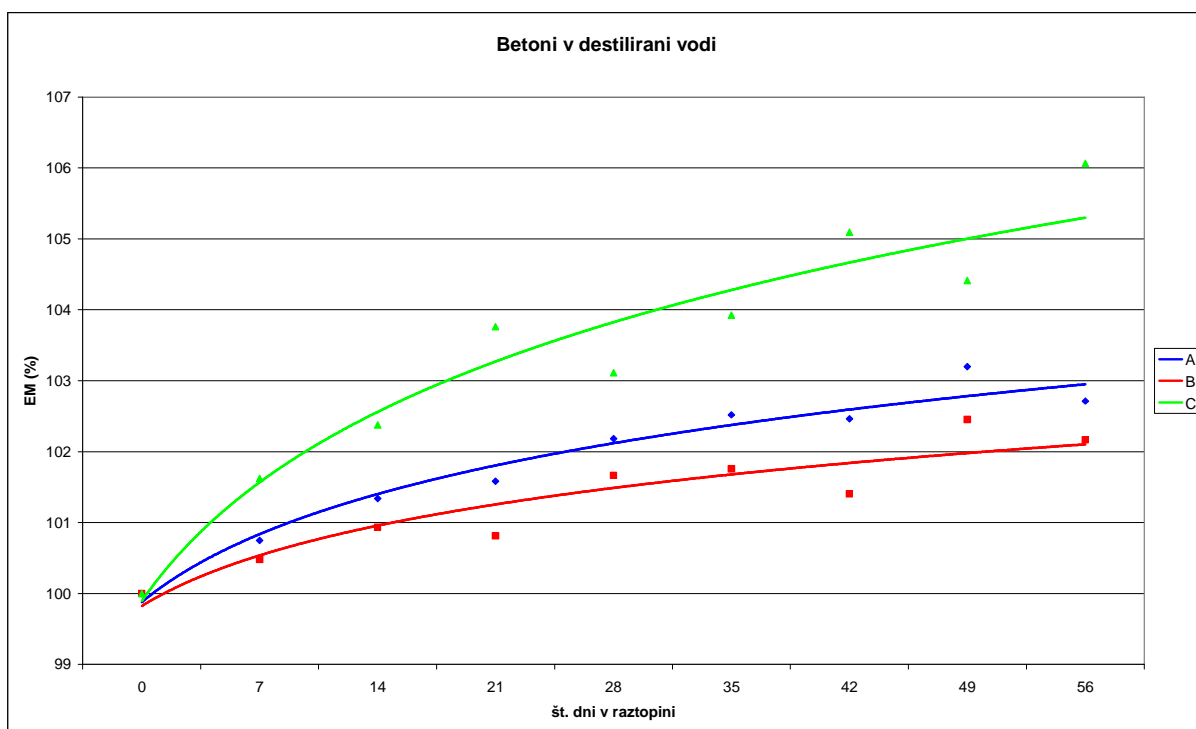


Slika 5.17: Beton iz cementa C v različnih raztopinah

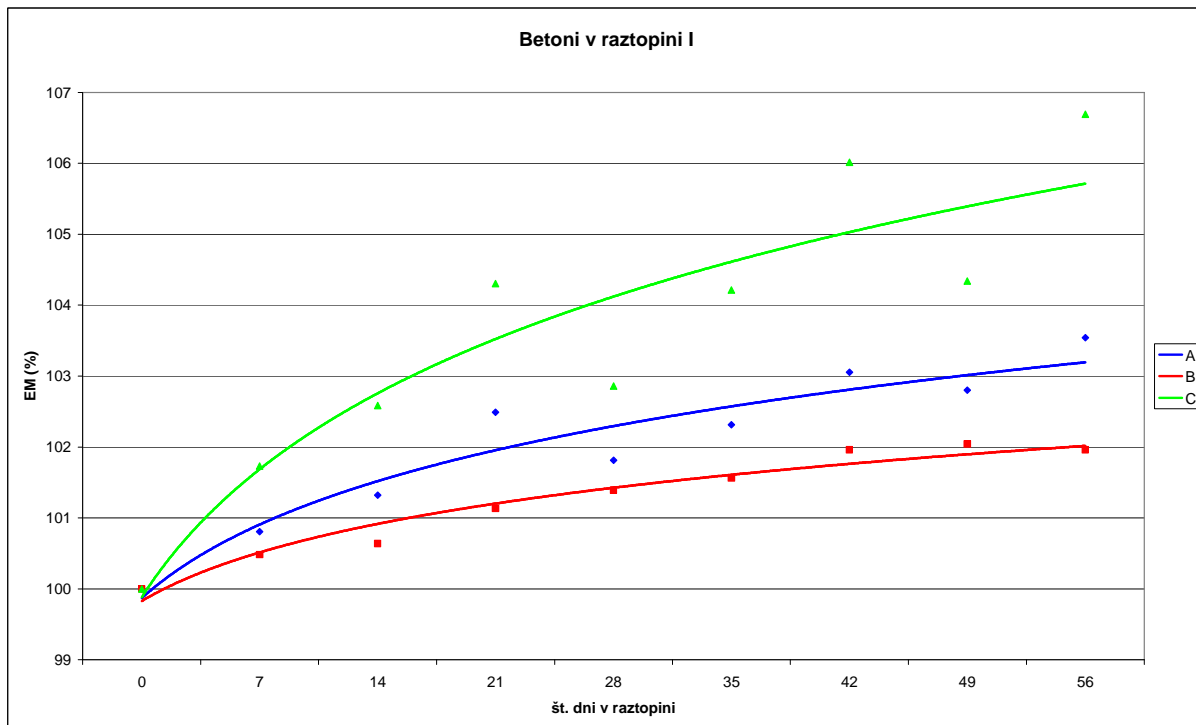
5.2.2 Obnašanje betonov z različnimi vrstami cementa v isti raztopini

V tem poglavju bom primerjal, kako določena raztopina vpliva na betone izdelane z različnimi cementa. Zopet imamo opravka s splošnimi povprečji. Rezultati so ločeni samo po cementu in raztopini. Kot podlago za kasnejše primerjave smo si najprej ogledali obnašanje betonov v etalonu (slika 5.18). Elastični modul je najbolj zrasel pri betonu s cementom C, medtem ko sta betona s cementoma A in B primerljiva.

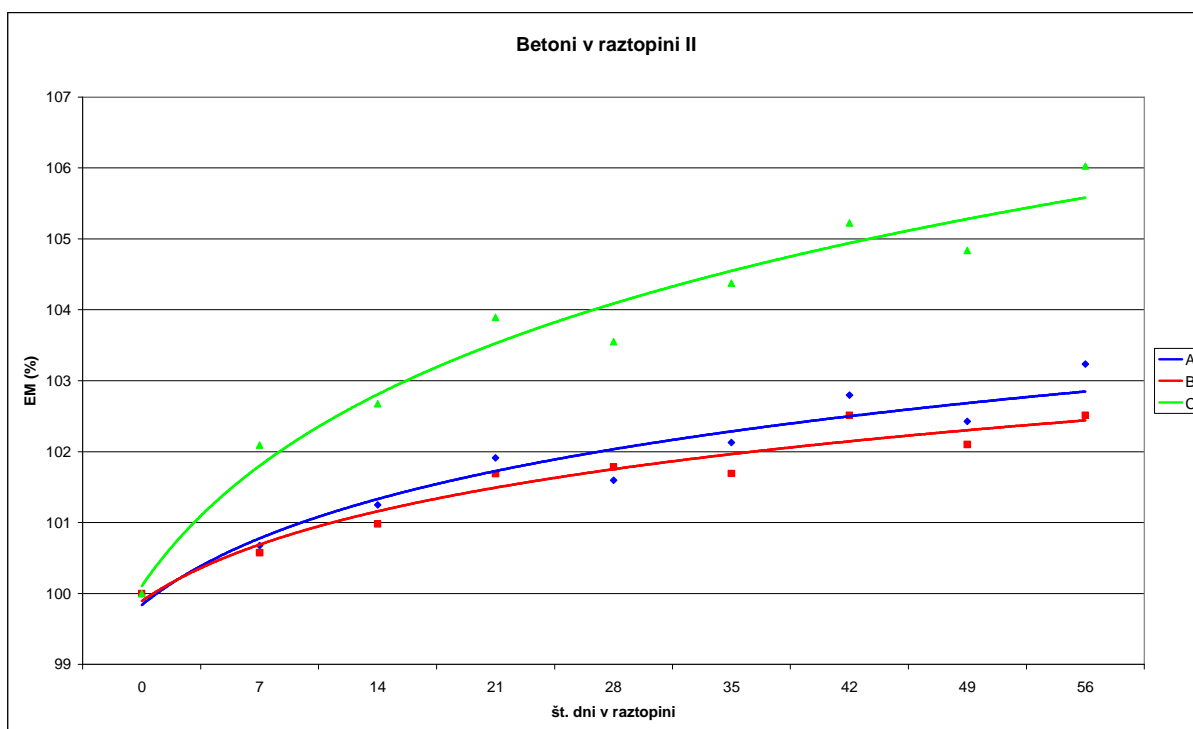
Sliki 5.19 in 5.20 potrjujeta tisto kar smo opazili že v točki 5.2.1. Raztopini I in II v obravnavanem časovnem obdobju še nista nevarni za betone v naši preiskavi. Diagrami so si med seboj zelo podobni in razmerja med posameznimi betoni ostajajo nespremenjena. Opazne so sicer manjše spremembe, vendar pa so le-te manjše kot je naš raztros rezultatov.



Slika 5.18: Betoni v destilirani vodi



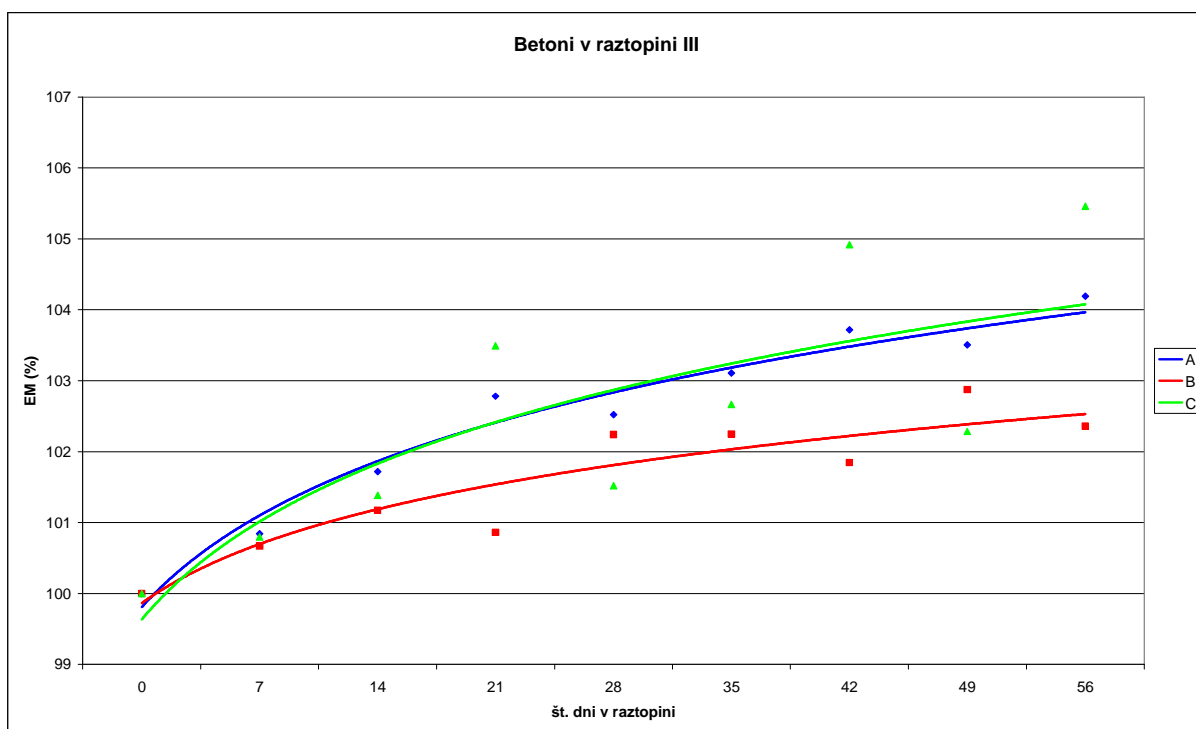
Slika 5.19: Betoni v raztopini I



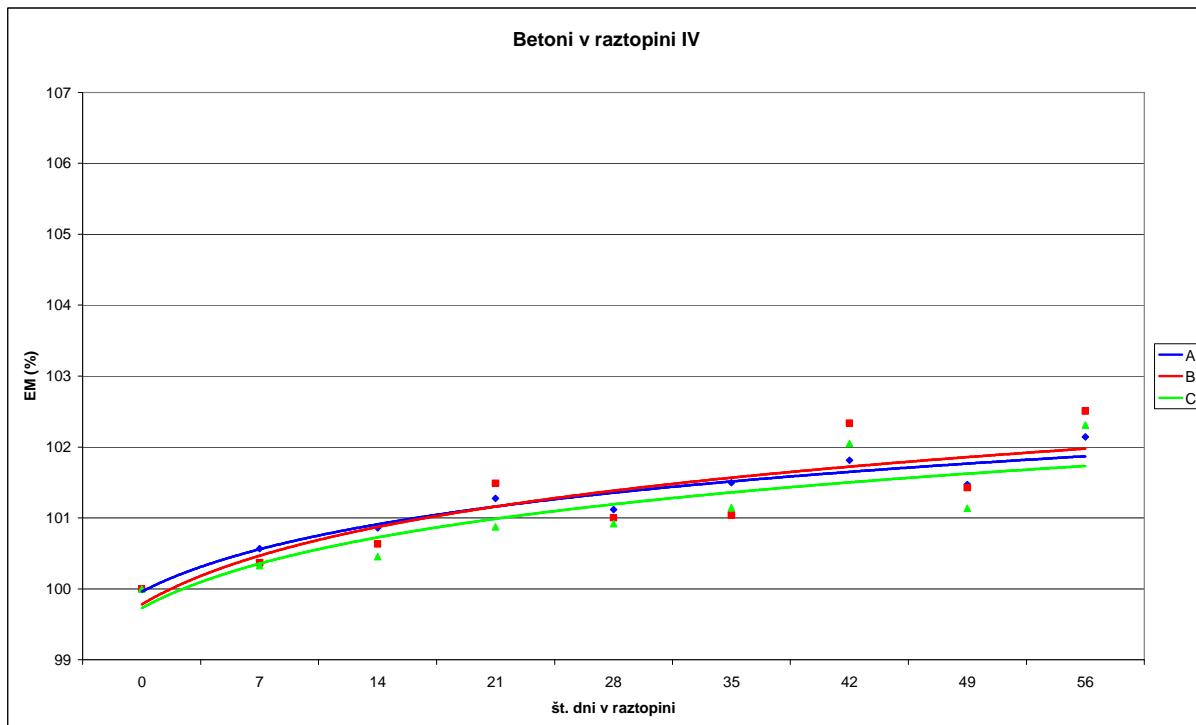
Slika 5.20: Betoni v raztopini II

Raztopina III vpliva na betona s cementoma A in C podobno. Vsaj če pogledamo krivulje na sliki 5.21. Vendar pa opazimo, da se vrednost elastičnega modula betona s cementom A ni spremenila glede na etalon. Spremembe se tako dogajajo le v betonu s cementom C, pri katerem se je modul elastičnosti glede na etalon zmanjšal.

Na sliki 5.22 je prikazano obnašanje vzorcev v raztopini IV. Krivulje se med seboj skoraj prekrivajo. Razvoj elastičnega modula je raztopina IV zelo zavrla. Dokazala se je kot najbolj agresiven medij. Ob primerjavi z ostalimi raztopinami opazimo, da je najbolj zmanjšala modul elastičnosti betonu iz cementa C, precej manj betonu iz cementa A, vendar malo manj, medtem ko se vrednost spremembe elastičnega modula betona B skoraj ni spremenila. Iz vsega povedanega lahko torej ugotovimo, da je beton iz cementa B najbolj odporen proti sulfatni agresiji, za njim rahlo zaostaja beton iz cementa A, bistveno pa je zmanjšana sulfatna odpornost betonu iz cementa C.



Slika 5.21: Betoni v raztopini III



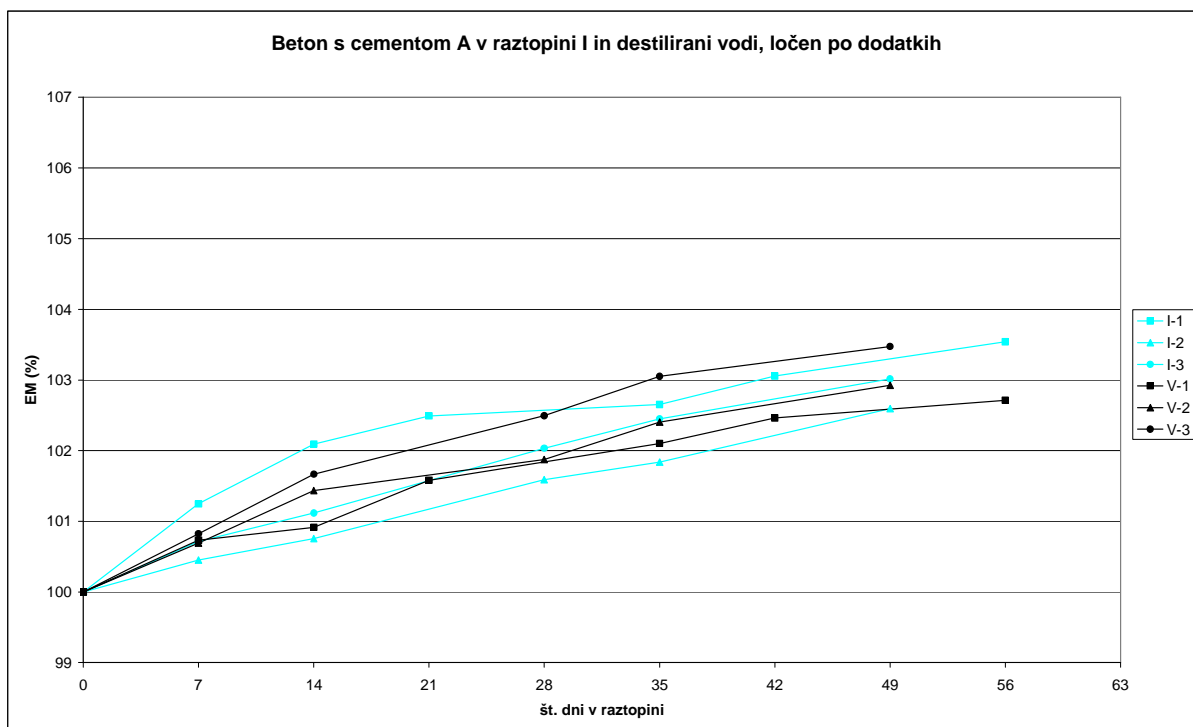
Slika 5.22: Betoni v raztopini IV

5.2.3 Vpliv kemijskih dodatkov

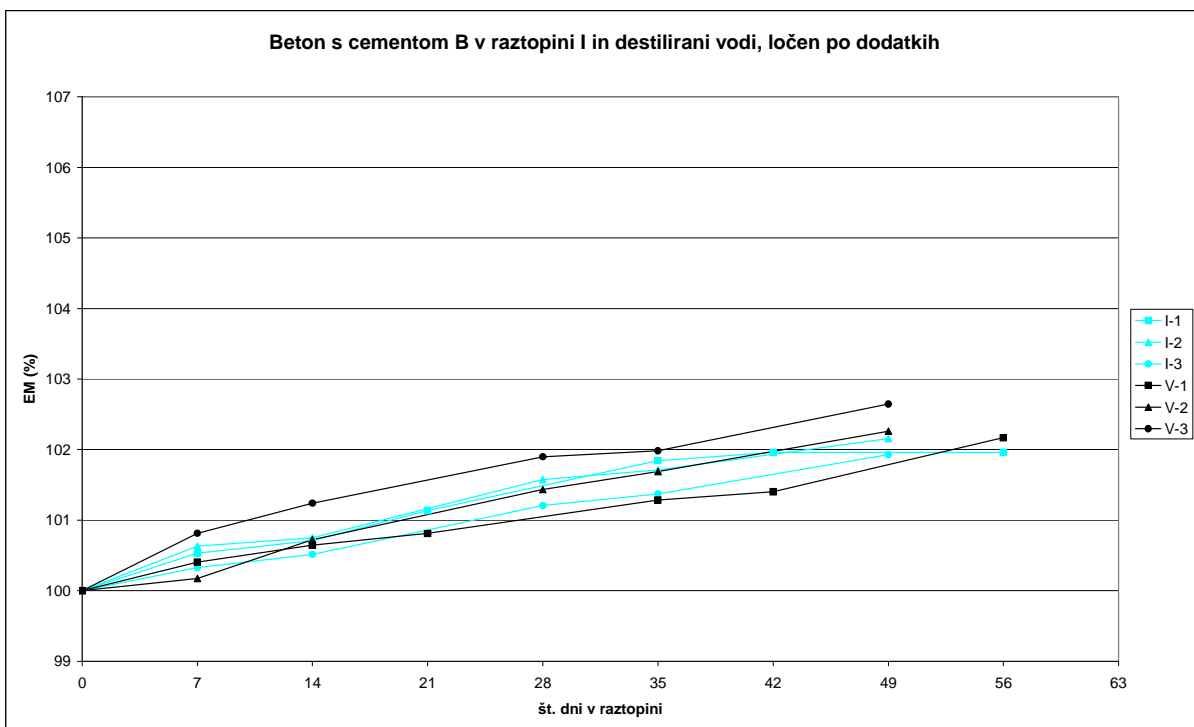
Vsak kemijski dodatek lahko z različnim cementom različno reagira. Lahko izboljša njegovo delovanje ali pa ga poslabša. Prav tako lahko dodatek vpliva na obnašanje betona v odvisnosti od tega, v kakšnem agresivnem mediju se le ta nahaja. Na naslednjih diagramih je prikazan vpliv kemijskega dodatka v kombinaciji z različnimi cementi. Obdelali bomo tudi vpliv dodatkov ob izpostavljenosti različnim agresivnim medijem. Na vsakem diagramu je podano tudi razvijanje elastičnega modula za enake vzorce potopljene v destilirano vodo.

5.2.3.1 Raztopina I

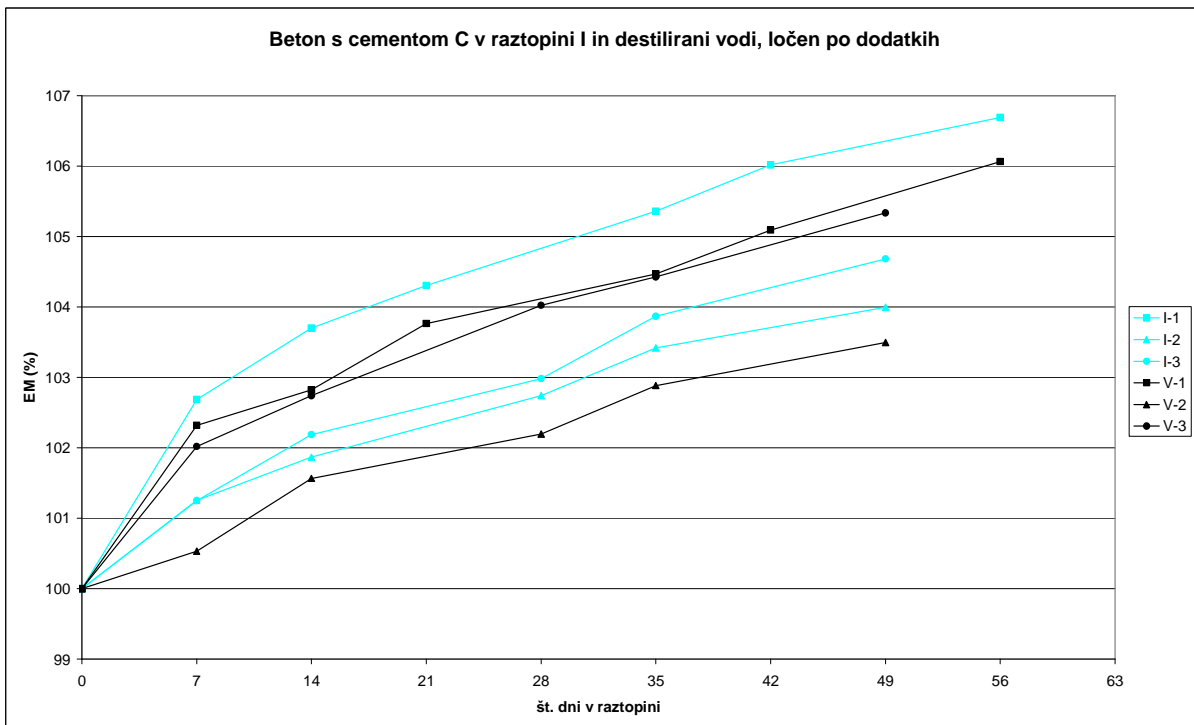
Raztopina I še ne vpliva vidno na beton. Pri betonu s cementoma A in B (sliki 5.23 in 5.24) so vse krivulje v zelo ozkem območju. Medsebojno se razlikujejo približno toliko, kot je naš raztros rezultatov. Kakšnih zakonitosti iz teh diagramov torej ne moremo razbrati. Lahko rečemo samo, da raztopina I do sedaj ni vidno reagirala z nobeno betonsko mešanico. Malo drugače je pri cementu C (slika 5.25). Krivulje so malo bolj razpršene, vendar pa še vedno ne toliko, da bi lahko označili kateri kemijski dodatek je najboljši ali najslabši.



Slika 5.23: Beton s cementom A v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih



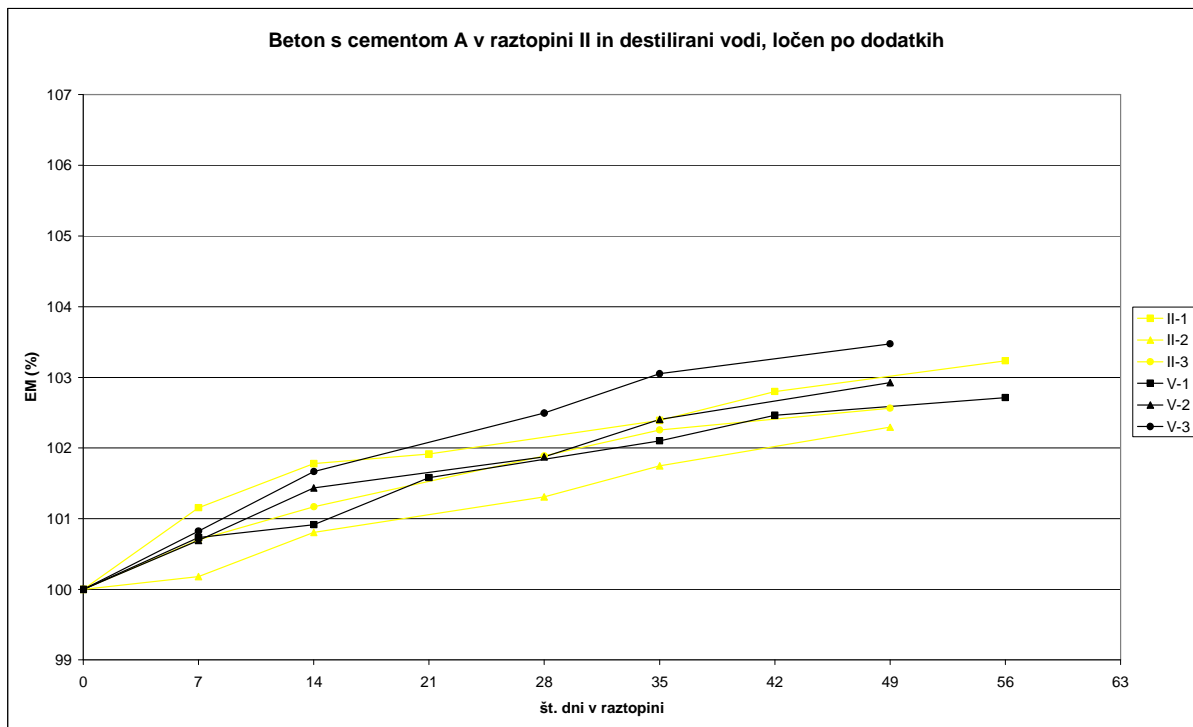
Slika 5.24: Beton s cementom B v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih



Slika 5.25: Beton s cementom C v raztopini I in destilirani vodi, ločen po dodatkih

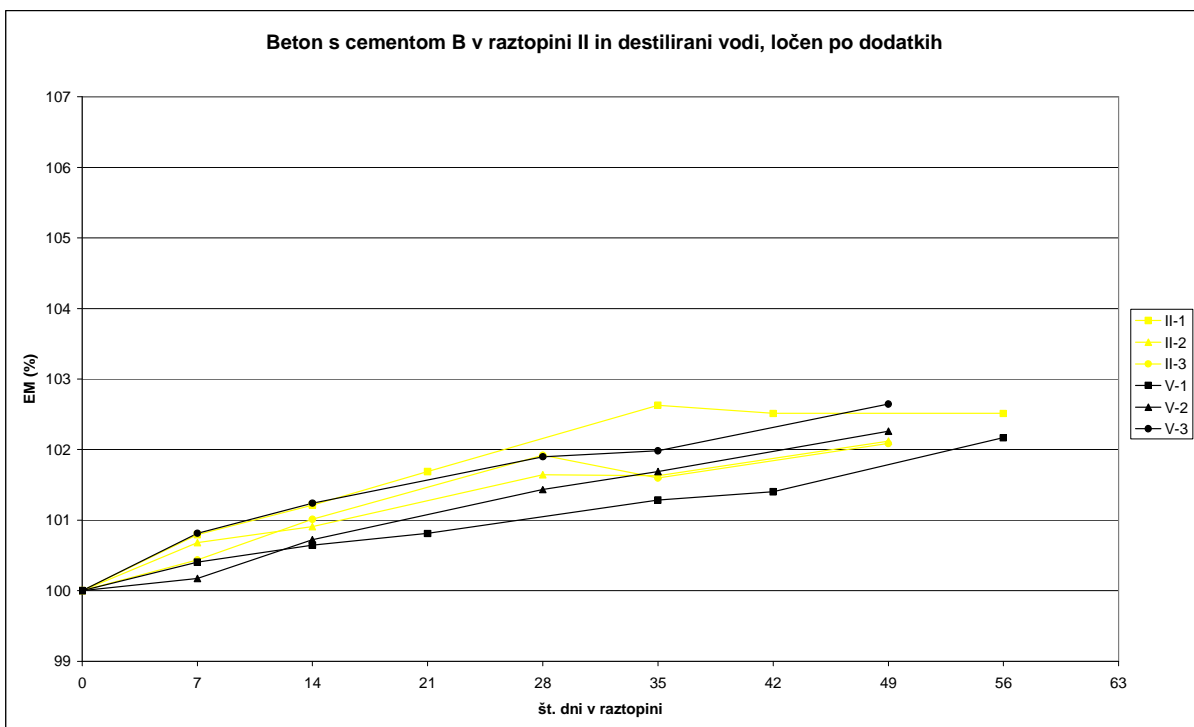
5.2.3.2 Raztopina II

Pri tej raztopini lahko le potrdimo ugotovitve iz prejšnjega poglavja. Tudi ta raztopina se zaenkrat ni izkazala za zelo agresivno, saj še ne vpliva vidno na beton.

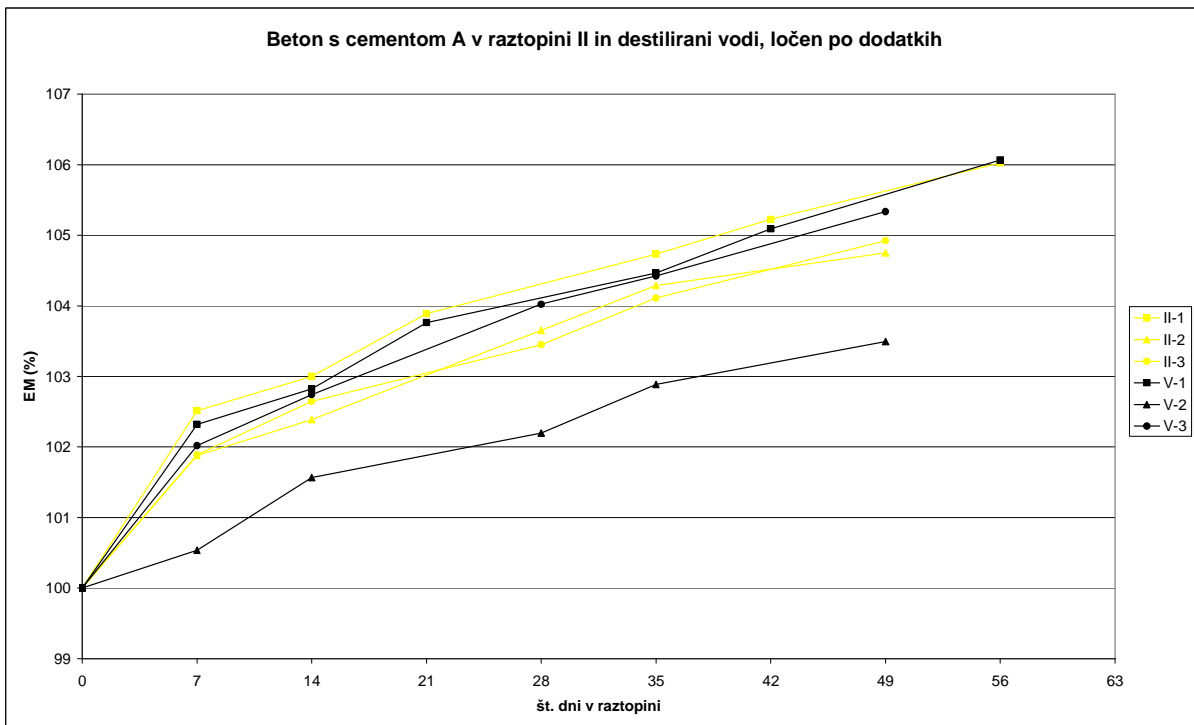


Slika 5.26: Beton s cementom A v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih

Ugotovitve glede vpliva dodatkov so zelo podobne tistim iz prejšnjega poglavja (slike 5.26, 5.27 in 5.28). Krivulje so si zelo blizu, zato ne moremo trditi, da so razlike med njimi res tiste prave razlike, če upoštevamo raztros $\pm 0,5\%$. Posebnosti torej zaenkrat še ni. Za vplive te raztopine bomo morali počakati na nadaljnji potek raziskave.

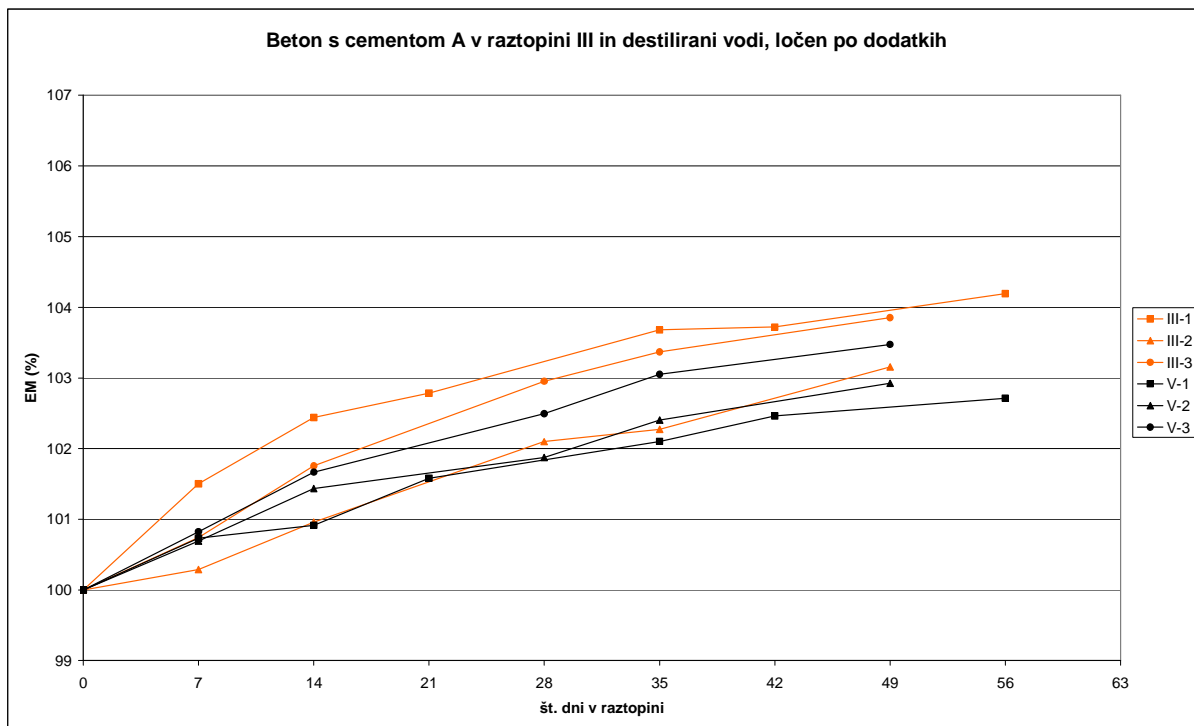


Slika 5.27: Beton s cementom B v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih



Slika 5.28: Beton s cementom C v raztopini II in destilirani vodi, ločen po dodatkih

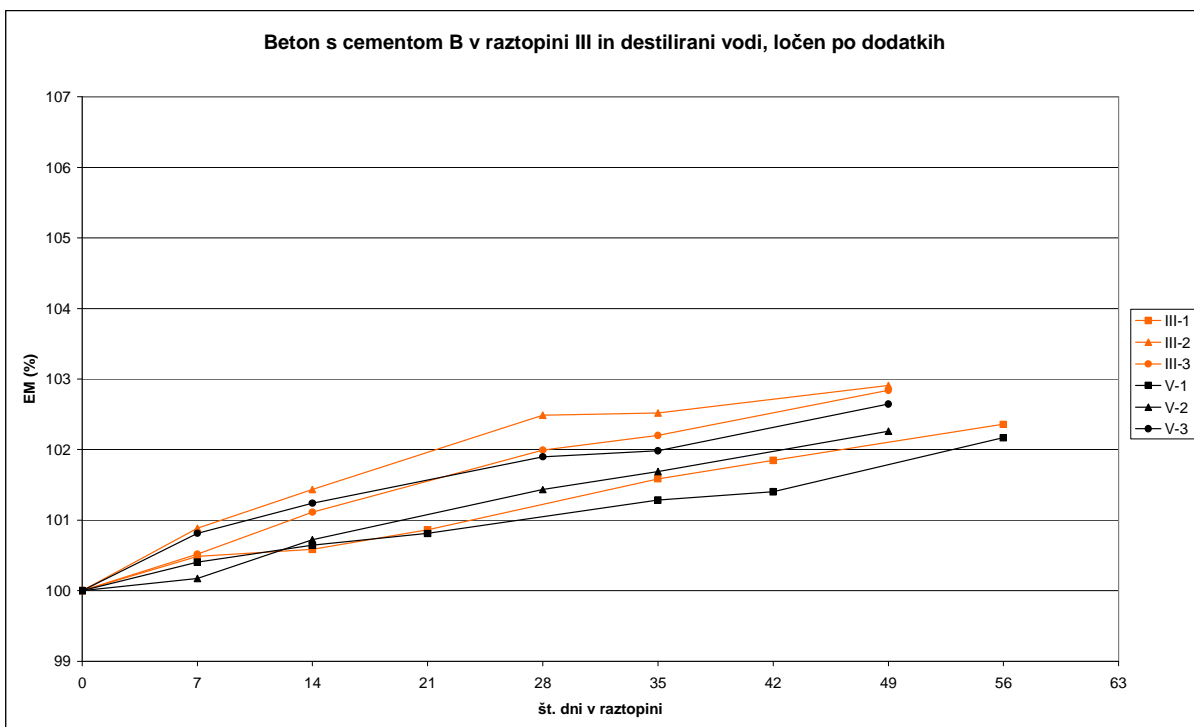
5.2.3.3 Raztopina III



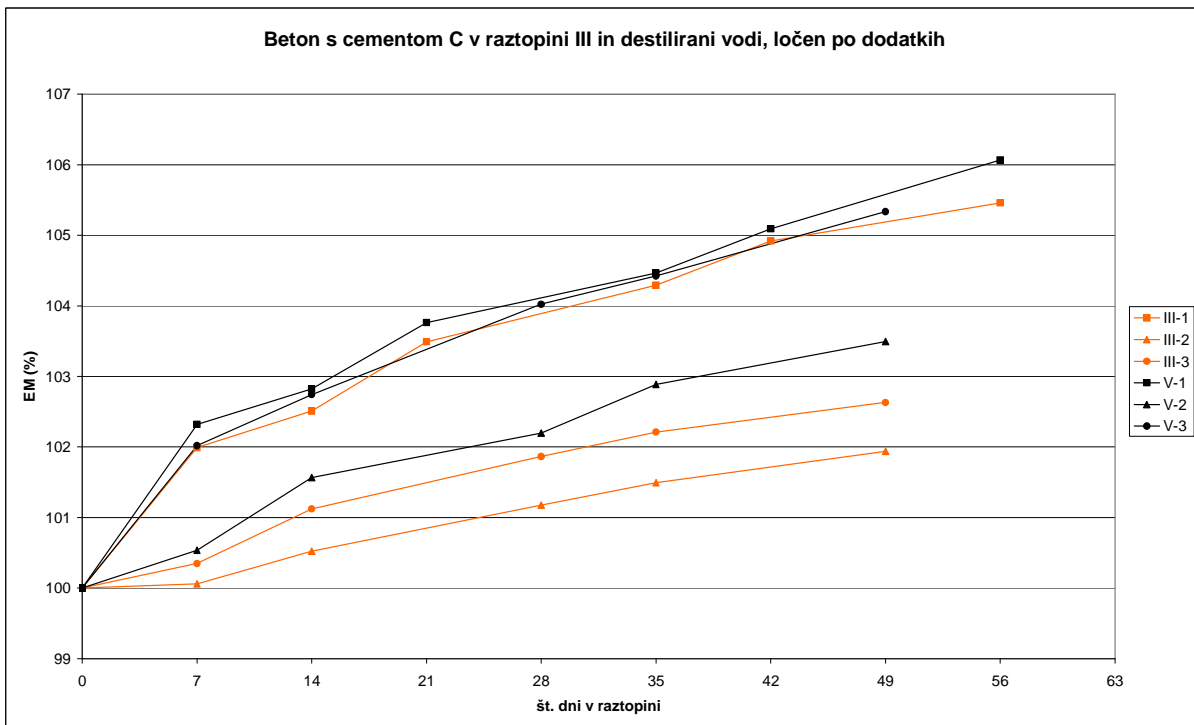
Slika 5.29: Beton s cementom A v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih

Raztopina III je hitreje reagirala in začela uničevati beton. Pri betonih s cementoma A in B se to sicer ni zgodilo. Prav tako ni vpliva kemijskih dodatkov. Pogled na diagrame je zelo podoben kot v prejšnjih dveh poglavjih (sliki 5.29 in 5.30).

Večje razlike pa so opazne pri betonu iz cementa C (slika 5.31). Beton s kemijskim dodatkom 1 se obnaša normalno, raztopina nanj torej ne vpliva. Pri betonu s kemijskim dodatkom 2 pa je razlika med etalonskim vzorcem in tistim, ki je potopljen v agresivno raztopino, kar 1,6%. Če upoštevamo raztros rezultatov bi lahko rekli, da je ta razlika sicer lahko samo 0,5%, vendar pa razlika je in lahko rečemo, da ima ta raztopina negativen vpliv na cement C s kemijskim dodatkom 2. Še večja pa je pri kemijskem dodatku 3, kar 2,7%. Kemijski dodatek 3 in cement C se torej v takem agresivnem okolju ne ujameta najbolje.



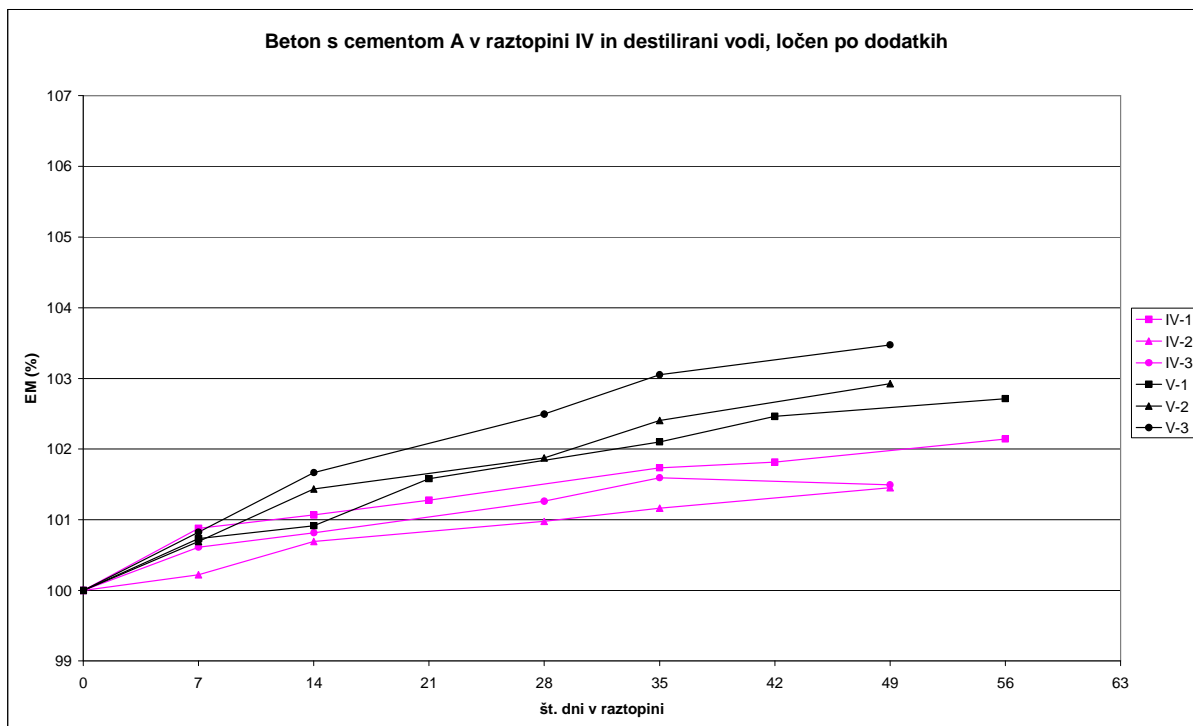
Slika 5.30: Beton s cementom B v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih



Slika 5.31: Beton s cementom C v raztopini III in destilirani vodi, ločen po dodatkih

5.2.3.4 Raztopina IV

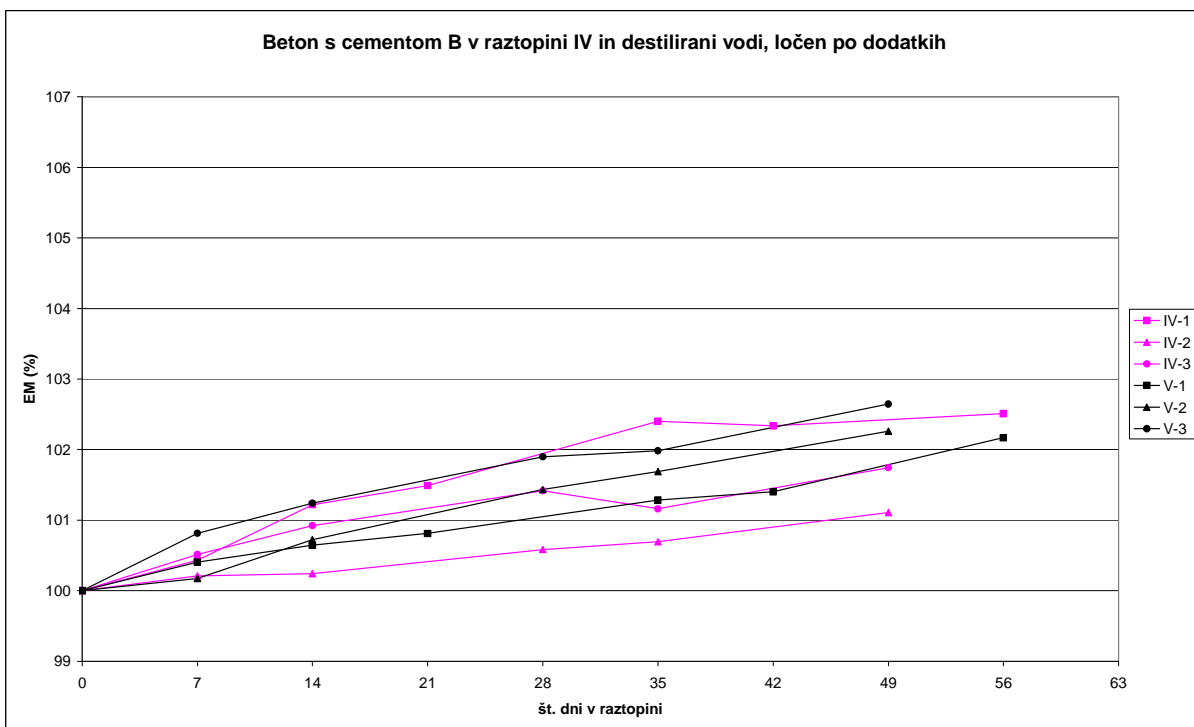
Pri izpostavitvi obravnavanih betonov raztopini IV smo dobili največje spremembe modula elastičnosti glede na etalonske preskušance. Razlike glede na etalon so pri tej raztopini opazne tudi pri cementu A in ne samo pri cementu C.



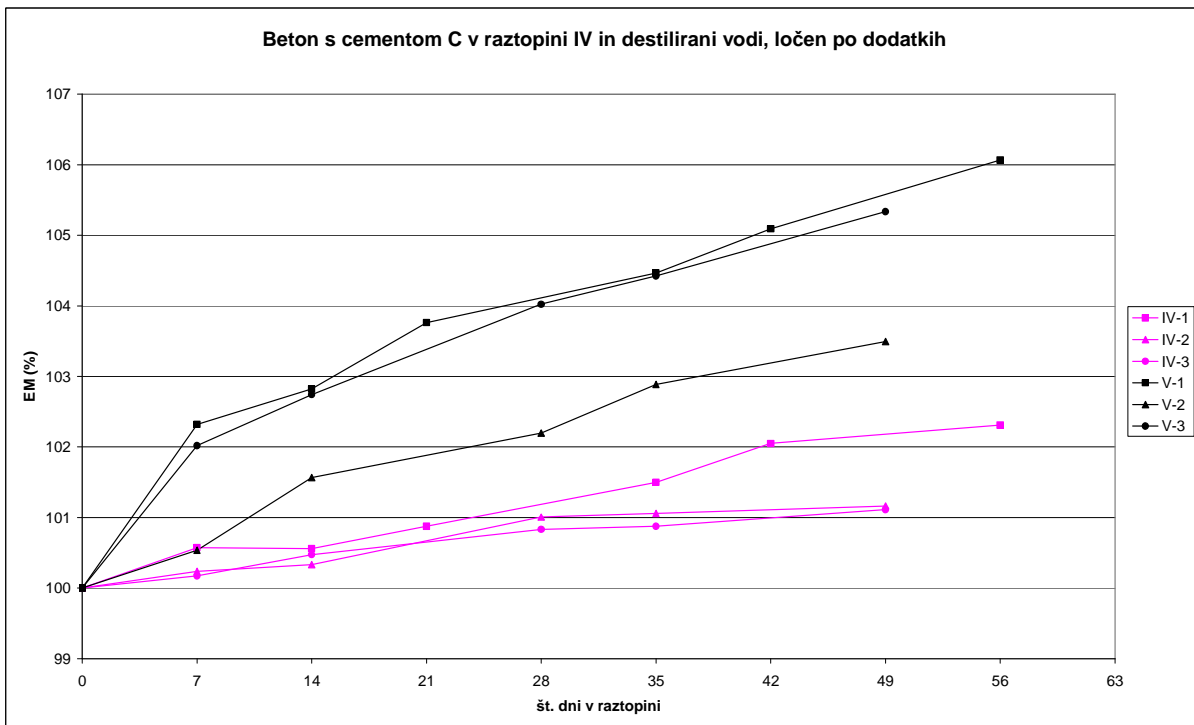
Slika 5.32: Beton s cementom A v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih

Rezultati prikazani na sliki 5.32 nam kažejo, da je prirast elastičnega modula s trajanjem izpostavljenosti pri vzorcih s cementom A v raztopini IV manjši kot pri etalonskih vzorcih. Pri betonu v kombinaciji s kemijskim dodatkom 1 ni opaziti sprememb. Pri kemijskem dodatku 2 je razlika 1,5%, pri kemijskem dodatku 3 pa 2%. Opazno je torej, da ta raztopina povzroča hujšo korozijo kot ostale, saj edina negativno vpliva ne beton s cementom A.

Pri betonu s cementom B (slika 5.33), ki ima povečano sulfatno odpornost, ni opaziti bistvenih sprememb. Tudi v tem primeru lahko ugotovimo, da uporaba sulfatno odpornega cementa poveča odpornost betona na sulfatni napad.



Slika 5.33: Beton s cementom B v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih



Slika 5.34: Beton s cementom C v raztopini IV in destilirani vodi, ločen po dodatkih

Daleč največji učinek na razvoj elastičnega modula ima raztopina IV na betone s cementom C (slika 5.34). Pri vseh dodatkih je opazna velika sprememba glede na etalonske vzorce. Razlika pri kemijskem dodatku 1 je 3,8%, pri kemijskem dodatku 2 je 2,3%, in pri kemijskem dodatku 3 pa je 4,2%. Ob upoštevanju raztrosa je ta razlika lahko tudi malo drugačna, vendar še vedno bistvena. Vpliv dodatka tu ni izrazit, ker je cement C zelo dovzeten za to vrsto korozije.

5.3 Komentar rezultatov

Naši vzorci so bili izpostavljeni agresivnim medijem 56 ali 49 dni. V tem času so se v odvisnosti od vrste agresivne raztopine, vrste cementa in tudi vrste kemijskega dodatka na vzorcih odvijale različne reakcije.

Na podlagi splošnih povprečij smo opazili, da najmočnejšo korozijo povzroča raztopina IV, amonijev sulfat z natrijevim kloridom. Sledi ji raztopina III, medtem ko raztopini I in II še nista vidno kemično odreagirali z betoni.

Pri betonih z vključenim cementom C smo opazili največji prirastek elastičnega modula, kar je posledica tega, da je to cement z nizko hidratacijsko toploto in pridobiva pomembno na trdnosti tudi, ko se pri ostalih dveh vrstah cementa naraščanje trdnosti že umiri. Je pa ta cement tudi daleč najbolj občutljiv na agresivno okolje. Je edini, pri katerem je viden vpliv raztopine III in ne samo raztopine IV. Če bi betone s cementom C izpostavili agresivnim medijem kasneje in počakali, da se razvije boljša struktura cementnega kamna, npr. po 90 dneh, bi bili lahko rezultati tudi boljši kot so v tej nalogi prikazani. Pri cementu A se je do sedaj pokazala rahla občutljivost le v primeru raztopine IV, v primeru cementa B pa še ni nikakršnih znakov razpada betona. To smo pričakovali, saj je to cement s povečano sulfatno odpornostjo, ki ima majhen delež C_3A .

Vpliva kemijskih dodatkov ni zaznati. Opazi se le manjši prirast elastičnega modula pri betonu s cementom C in kemijskim dodatkom 2 pri vzorcih potopljenih v destilirano vodo, kot pri betonu s tem cementom in ostalima dvema kemijskima dodatkom. To kaže na to, da se cement C in kemijski dodatek 2 ne ujameta tako dobro.

6 ZAKLJUČEK

Zaradi gradnje v vse bolj ekstremnih pogojih, zaradi zahtevnih uporabnikov in zaradi visokih stroškov vzdrževanja, želimo izdelati beton, ki bo čim bolj obstojen. Na to lastnost lahko vplivamo na več načinov. Beton moramo ustrezno projektirati za uporabo v okolju, v katerega ga bomo umestili, pravilno in kakovostno ga moramo vgraditi v objekt in ga kasneje pravilno negovati.

Beton mora biti odporen proti različnim dejavnikom, ki so odvisni od uporabe armirano betonskega objekta. Najbolj pogoste poškodbe nastanejo zaradi ciklov zmrzovanja in tajanja, zaradi korozije armature v betonu in zaradi sulfatne korozije cementnega kamna.

V diplomu smo želeli preveriti vpliv vrste cementa in kemijskega dodatka na sulfatno odpornost betona. V okviru eksperimentalnega dela smo pripravili devet različnih betonskih mešanic, preskušance izdelane iz njih pa smo izpostavili štirim različnim agresivnim medijem in destilirani vodi. Preskušanci, ki so bili potopljeni v destilirani vodi so bili etalonski preskušanci.

Betonskim vzorcem smo merili spremembo dimenzij, mase in resonančne frekvence, s pomočjo katere smo določili dinamični modul elastičnosti vzorcev. Merjenje resonančne frekvence in spremljanje njenega spreminjanja je poskus najti primerno metodo za ocenjevanje sulfatne odpornosti betonov, ki bo tudi dovolj hitra. Predvsem pri merjenju dimenzij vzorcev smo naleteli na pomanjkljivosti. V bodoče priporočam uporabo reperjev, ki se jih vgradi v vzorec, ko beton vgradimo v kalup.

Zavedati se moramo, da smo preizkuse opravili v idealiziranih laboratorijskih pogojih in da bodo pogoji pri vgradnji betona v dejanski objekt drugačni. Vlažnost zraka, temperatura zraka veter in ostali dejavniki lahko vplivajo na kakovost vgrajenega betona.

Prav tako pa se moramo zavedati, da brez dobre vgradnje betona, primerne konsolidacije in s tem izločitve zajetega zraka ter brez pravilne nege betona ne moremo dosegati načrtovane kakovosti betona. Samo dobra "receptura" ni nikoli dovolj za zagotovitev obstojnosti betona v ekstremnih pogojih.

V diplomski nalogi so predstavljeni delni rezultati preiskave, saj le ta še poteka. V mesecu in pol smo uspeli pokazati razliko med posameznimi cementi in kemijskimi dodatki uporabljenimi v betonskih mešanicah izpostavljenih agresivnim medijem. Odločitev o tem, katera kombinacija cementa in kemijskega dodatka je najbolj optimalna za preskušan beton izpostavljen sulfatni agresiji pa bo mogoča šele po zaključku preiskav.

VIRI

Biczók, I. 1972. Concrete corrosion and concrete protection, eight edition. Budapest, Akadémiai Kiadó: 545 str.

Clifton, R. J., Ponnensheim, J. M. 1994. Sulfate attack on cementitious materials: volumetric relations and expansions. <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build94/PDF/b94040.pdf>
(02.05.2007)

Ferraris, C. F., Stutzman, P. E., Snyder, K. A. 2006. Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach. USA, Portland cement association: 85 str.
<http://www.cement.org/bookstore/download.asp?mediatypeid=1&id=14064&itemid=SN2486>
(19.04.2007)

Gerbec, B. Proučevanje in dokazovanje korozijske odpornosti betonov v čistilni napravi Zalog. <http://www.salonit.si/uploads/files/Predavanje1.pdf> (23.04.2007)

Hafner, P. 2007. Vse kar morate vedeti o tehtanju. Ljubljana, Lotrič d.o.o. 61 str.

Kavčič, F. Betonske konstrukcije v okolju s kemično agresijo.
<http://www.salonit.si/uploads/files/Predavanje3.pdf> (23.04.2007)

Kavčič, F. 2007. Samozgoščevalni betoni (SCC) – presek stanja. Sct tehnični informator 67: 35-43.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. 2002. Design and control of concrete mixtures, 14th edition. Skokie, Portland cement association: 358 str.

Kozamernik, M. 2003. GrindoSonic - meritve elastičnih karakteristik z vzbujenim valovanjem v vzorcu. Ljubljana, Igmata d.d. 15f.

Lea, F. M. 1970. The chemistry of cement and concrete, third edition. London, Edward Arnold (publishers) Ltd.: 727 str.

Lemmens, J. W. Operating instructions for the GrindoSonic MK5 "industrial" instrument. 23 str.

Locher, F. W. 1998. Sulfatwiderstand von zement und seine prüfung. ZKG international 7/1998-51 jahrgang, 388-398.

Marchand, J., Skalny, J. P. 1999. Materials science of concrete: Sulfate attack mechanisms. Westerville, The American Ceramic Society: 371 str.

Mehta, P. K., 1986. Concrete: structure, properties and materials. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.: 450 str.

Mehta, P. K. 1992. Sulfate attack on concrete – a critical review. V: Skalny, J. Materials science of concrete III. Westerville, The American Ceramic Society: str. 105-130.

Muravljev, M. 2000. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, DIP "Građevinska knjiga": 451 str.

Prešern, K. 2000. Trajnost armirano betonskih konstrukcij v morskem okolju. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 97 f.

Stephens, J. B., Carrasquillo, R. L. 1999. Evaluating performance-based test and specifications for sulfate resistance in concrete. Austin, Center for Transportation Research: 182 str. http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/1706_3.pdf (19.04.2007)

Taylor, H. F. W. 1997. Cement chemistry, 2nd edition. London, Thomas Telford Publishing: 459 str.

Trtnik, G. 2004. Vpliv dodatkov na betoniranje v hladnem. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 70 f.

Understanding cement. Sulfate attack in concrete and mortar. <http://www.understanding-cement.com/sulfate.html> (02.05.2007)

SIST EN 12620:2002. Agregati za beton: 47 str.

SIST EN 206-1:2003. Beton - 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 72 str.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente (istoveten z EN 197-1:2000): 24 str.

SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona (istoveten EN 1008:2002): 16 str.

ASTM E 1876-99. Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration: 15 str.