

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Žnidaršič, Š., 2016. Določitev optimalne adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentorja Trtnik, G., Unetič, A.): 79 str.

Datum arhiviranja: 07-07-2016

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Žnidaršič, Š., 2016. Določitev optimalne adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Trtnik, G., Unetič, A.): 79 pp.

Archiving Date: 07-07-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
GRADBENIŠTVO
SMER GRADBENE
KONSTRUKCIJE**

Kandidatka:

ŠPELA ŽNIDARŠIČ

**DOLOČITEV OPTIMALNE ADIABATNE KRIVULJE ZA
MASIVNE BETONE NA HE BREŽICE**

Diplomska naloga št.: 21/II.GR

**DETERMINATION OF THE OPTIMUM ADIABATIC
CURVE FOR MASS CONCRETE AT THE BREŽICE HPP**

Graduation thesis No.: 21/II.GR

Mentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Somentor:

dr. Gregor Trtnik
Andrej Unetič, dipl. inž. grad.

Ljubljana, 07. 06. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Špela Žnidaršič izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom »Določitev optimalne adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 20.4.2016

Špela Žnidaršič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	621.311.21:624.012.4(043)
Avtor:	Špela Žnidaršič
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski
Somentor:	dr. Gregor Trtnik
Somentor:	Andrej Unetič, dipl. inž. grad.
Naslov:	Določitev optimalne adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	79 str., 17 pregl., 60 sl., 20 en.
Ključne besede:	masivni beton, adiabatna kalorimetrija, visoke temperature v betonu, hidroelektrarna, razpoke, cement

Izvleček

V okviru izdelave tega magistrskega dela obravnavam potek adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice. Za podrobnejšo analizo je bilo potrebno poznati obnašanje in vpliv posameznih sestavnih delov betona na razvoj temperature v betonu. Za potrebe analize smo na gradbišču HE Brežice od avgusta do decembra 2015 izvajali meritve temperatur treh različnih receptur betona. Kot primerjalno recepturo smo vzeli obstoječo recepturo betona, ki jo trenutno uporabljajo za gradnjo HE Brežice, glede na to recepturo pa smo določili še dve, katere namen je bil zmanjšati maksimalne temperature v procesu hidratacije. Prva modificirana mešanica je imela zelo majhno količino cementa, vendar smo že v fazi načrtovanja recepture predvidevali, da bi takšna mešanica lahko predstavljala velik problem pri vgradnji, zato smo v nadaljevanju sestavili še recepturo za drugo korigirano mešanico. Ta je sicer vsebovala manjšo količino cementa kot primerjalna mešanica, a večjo kot prva korigirana mešanica. Na račun zmanjšanja količine cementa smo v tej mešanici povečali količino finih delcev, da bi obdržali čim boljše vgradljivost betona. Po podrobnejši analizi podatkov, ki smo jih pridobili s pomočjo poskusov, sem ugotovila, da zmanjšanje količine cementa v betonu zelo ugodno vpliva na adiabatno krivuljo. Mešanica z najmanjšo količino cementa je dosegla najmanjšo absolutno temperaturo, najmanjši dvig temperature in najmanjši relativni dvig temperature. Ta mešanica je dosegala tudi najmanjše hitrosti in pospeške povečevanja priraščanja temperature v betonu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	621.311.21:624.012.4(043)
Author:	Špela Žnidaršič
Supervisor:	Assist. Prof. Andrej Kryžanowski, Ph.D.
Cosupervisor:	Gregor Trtnik, Ph.D.
Cosupervisor:	Andrej Unetič, B.Sc.
Title:	Determination of the optimum Adiabatic Curve for Mass Concrete at the Brežice HPP
Document type:	M. Sc. Thesis
Scope and tools:	79 p., 17 tab., 60 fig., 20 eq.
Keywords:	mass concrete, adiabatic calorimetry, high concrete temperatures, Hydropower Plant, cracks, cement

Abstract

In the scope of this master's thesis we determined the adiabatic curve of massive concrete used in construction of Hydro power plant Brežice. Behavioral understanding of specific concrete components and their influences on development of temperature during concrete drying process was crucial for detailed analysis. For analysis purposes of temperature development in concrete drying process three different mixtures were used and measured during construction of HPP Brežice between August and December 2015. The mixture currently used for installation represented a reference for two other modified mixtures which we introduced with the purpose of minimizing the maximum temperature of hydration process. The first modified mixture contained a low percentage of cement. In the planning phase we assumed that installation of this mixture could represent a major problem, so we compiled a recipe for another adjusted mixture. This mixture contained a smaller amount of cement than the reference, but still higher than the first modified version. On the expense of reducing the quantity of cement we increased the number of fine particles to maintain best possible workability of concrete. After a detailed analysis of the data we obtained through experiments, we have found that reducing the amount of cement in concrete mixture has positive influence on the adiabatic curve. Blend with the minimum amount of cement has reached the minimum absolute temperature, minimum temperature rise and minimum relative temperature rise. This mixture has reached the minimum speed and accelerations of the temperature increase inside the concrete.

ZAHVALA

Za pomoč in podporo pri nastajanju magistrskega dela se iskreno zahvaljujem mentorjem doc. dr. Andreju Kryžanowskemu, dr. Gregorju Trtniku in Andreju Unetiču.

Hvala tudi družbam Igmat d.d., HSE Invest d.o.o., Rafael d.o.o., Kostak d.d., CGP d.d. in HESS d.o.o..

Zahvaljujem se tudi družini in vsem bližnjim, ki so mi v času študija in v času nastajanja magistrskega dela stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Namen magistrske naloge	1
1.2 Struktura magistrske naloge	1
2 SPLOŠNO O MASIVNIH BETONIH	3
3 SESTAVINE MASIVNIH BETONOV	4
3.1 AGREGAT	4
3.2 CEMENTI V MASIVNIH BETONIH IN HIDRATACIJA.....	4
3.2.1 Kemična sestava cementa.....	5
3.2.2 Lastnosti mineralov v cementu.....	6
3.2.3 Tipi cementa	7
3.2.4 Časovna obdobja hidratacije cementa	9
3.2.5 Hidratacijska toplota cementa.....	10
3.2.6 Proces hidratacije cementa in faktorji, ki vplivajo na hidratacijo	11
3.3 Mineralni dodatki.....	17
3.4 Kemični dodatki	17
4 RAZPOKE V MASIVNIH BETONIH	19
4.1 Nastanek razpok.....	20
4.2 Tehnološki ukrepi za zmanjševanje tvorbe razpok v masivnih betonih.....	20
4.2.1 Uporaba ustrezne sestave betona	20
4.2.2 Ustrezna izbira velikosti in geometrije betonskih blokov.....	21
4.2.3 Hlajenje sestavin sveže betonske mešanice	22
4.2.4 Nega betona v času strjevanja.....	24
4.2.5 Izbira primerne časa za betoniranje	24
4.2.6 Primerna vgradnja sveže betonske mešanice.....	24
4.3 Klasifikacija razpok po CEB	25
5 OBDELAVNOST BETONSKE MEŠANICE	26

5.1	Vpliv agregata.....	26
5.2	Vpliv cementa	27
5.3	Vpliv kemičnih dodatkov	27
5.4	Vpliv količine vode	28
5.5	Transport svežega betona z nizko vsebnostjo cementa do mesta vgradnje	28
6	HIDROELEKTRARNE NA SPODNJI SAVI	30
6.1	HE Vrhovo	32
6.2	HE Boštanj	32
6.3	HE Arto – Blanca	33
6.4	HE Krško	33
6.5	HE Brežice	34
6.5.1	Tehnični opis	35
6.6	HE Mokrice	36
7	BETONSKA DELA NA HE BREŽICE	37
7.1	Masivni betoni na HE Brežice	37
7.1.1	Zahteve za izdelavo hidrotehničnih betonov na HE Brežice.....	37
7.1.2	Izvedba betonskih del	37
8	ADIABATNA KALORIMETRIJA	42
8.1	Prava adiabatna kalorimetrija	42
8.2	Poladiabatna kalorimetrija.....	43
8.2.1	Toplotne izgube pri poladiabatnem preskusu [6].....	44
9	EKSPERIMENTALNI DEL	48
9.1	Recepture preskušanih betonskih mešanic.....	48
9.1.1	Sestava mešanice M1	49
9.1.2	Sestava mešanice M2	50
9.1.3	Sestava mešanice M3	51
9.2	Opis poskusa.....	52
9.3	Lastnosti sveže betonske mešanice	56
9.3.1	Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice z metodo s posedom	56
9.3.2	Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po SIST EN 12350-7	59
9.4	Razvoj trdnostnih karakteristik betonskih mešanic	59
9.4.1	Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev	60
9.5	Rezultati preiskav - adiabate.....	62
9.5.1	Mešanica M1	62
9.5.2	Mešanica M2	64

9.5.3	Mešanica M3	65
9.5.4	Primerjave rezultatov različnih mešanic	67
9.5.5	Hitrost priraščanja temperatur v mešanicah	69
9.5.6	Pospešek priraščanja temperatur v mešanicah.....	72
9.6	Interpretacija rezultatov.....	75
10	ZAKLJUČEK	77
VIRI		78

KAZALO SLIK

Slika 1: Časovni prikaz hidratacije cementne paste [30].....	4
Slika 2: Prirast temperature masivnega betona iz različnih tipov cementa pod adiabatnimi pogoji [8].....	8
Slika 3: Stopnje hidratacije cementa [20]	9
Slika 4: Hidratacija cementa [23].....	11
Slika 5: Razvoj hidratacije različnih sestavin cementa [20].....	12
Slika 6: Vpliv mineralov glede na čas poteka hidratacije [2]	13
Slika 7: Vpliv vsebnosti C ₃ A na proizvedeno toploto [20].....	13
Slika 8: Vpliv vsebnosti C ₃ S na toploto [20].....	14
Slika 9: Vpliv vodocementnega faktorja na stopnjo hidratacije [20]	15
Slika 10: Vpliv finosti cementnih delcev na razvoj toplote tekom hidratacije [20]	15
Slika 11: Vpliv različnih kemičnih dodatkov na razvoj toplote v strjujoči betonski mešanici [20]	18
Slika 12: Razvoj napetosti in natezne trdnosti v betonu v zgodnji starosti [20]	20
Slika 13: Vpliv debeline stene na temperaturo v betonskem elementu [13].....	21
Slika 14: Vpliv večanja začetne temperature sestavin betona na temperaturo betonske mešanice	23
Slika 15: Transportni trak za vgradnjo betona [11]	28
Slika 16: Transportni trak z vmesnim stebrom [11].....	29
Slika 17: Shema mobilnega transportnega traku [16].....	29
Slika 18: Delovanje HE [3]	30
Slika 19: Hidroelektrarne na spodnji Savi [4].....	31
Slika 20: Tehnični podatki hidroelektrarn na spodnji Savi.....	33
Slika 21: HE Brežice [4]	34
Slika 22: HE Brežice med gradnjo – november 2015 (vir: lasten).....	35
Slika 23: Prečni prerez strojnice HE Brežice [5]	35
Slika 24: Zaščita betona z zaščitno folijo po betoniranju na HE Brežice (vir: lasten)	40
Slika 25: Izbor načina nege betona glede na pogoje okolja in na temperaturo betonske mešanice [5]	41
Slika 26: Adiabatni preskus.....	43
Slika 27: Merska mesta v kocki.....	45
Slika 28: Dimenzije kocke (vir: lasten).....	52
Slika 29: Termočleni v kalupu pred betoniranjem (vir: lasten)	53

Slika 30: Sveža betonska mešanica (vir: lasten)	53
Slika 31: Vgrajevanje betona v kocko (vir: lasten)	54
Slika 32: Vgrajevanje (vir: lasten).....	54
Slika 33: Dimenzije kocke	55
Slika 34: Preskus - metoda s posedom	57
Slika 35: Postopek metode s posedom	57
Slika 36: Oblika poseda mešanice M2	58
Slika 37: Odčitavanje poseda sveže betonske mešanice	58
Slika 38: Porozimeter [1].....	59
Slika 39: Odvzem vzorcev za določitev trdnostnih karakteristik betona	60
Slika 40: Primerjava tlačnih trdnosti mešanic	61
Slika 41: Spreminjanje absolutne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa	62
Slika 42: Spreminjanje relativne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa	63
Slika 43: Spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M1 v odvisnosti od časa	63
Slika 44: Spreminjanje absolutne temperature v mešanici M2	64
Slika 45: Spreminjanje relativne temperature v mešanici M2	64
Slika 46: Spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M2 v odvisnosti od časa	65
Slika 47: Spreminjanje absolutne temperature v mešanici M3	65
Slika 48: Spreminjanje relativne temperature v mešanici M3	66
Slika 49: Spreminjanje relativnega dviga temperatur v mešanici M3	66
Slika 50: Spreminjanje absolutnih temperatur posamezne mešanice s časom.....	67
Slika 51: Spreminjanje relativnih temperatur posamezne mešanice s časom.....	68
Slika 52: Spreminjanje relativnega dviga temperatur posamezne mešanice s časom	69
Slika 53: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M1	69
Slika 54: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M2.....	70
Slika 55: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M3.....	71
Slika 56: Primerjava hitrosti priraščanja temperatur posamezne mešanice	71
Slika 57: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M1	72
Slika 58: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M2	73
Slika 59: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M3	74
Slika 60: Primerjava pospeškov spreminjanja temperatur v mešanicah	74

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Komponente klinkerja.....	5
Preglednica 2: Tipična sestava portland cementa [9].....	6
Preglednica 3: Značilnost različnih tipov cementa [23].....	7
Preglednica 4: Tipične sestave cementov in njihove lastnosti [14].....	8
Preglednica 5: Mineraloška sestava klinkerja [17].....	12
Preglednica 6: Specifične toplote glavnih sestavin betona [22].....	22
Preglednica 7: Klasifikacija razpok po CEB [26].....	25
Preglednica 8: Klasifikacija konsistence.....	26
Preglednica 9: Primerjava hidroelektrarn na spodnji Savi.....	32
Preglednica 10: Receptura mešanice M1.....	49
Preglednica 11: Receptura mešanice M2.....	50
Preglednica 12: Receptura mešanice M3.....	51
Preglednica 13: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M1.....	60
Preglednica 14: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M2.....	60
Preglednica 15: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M3.....	61
Preglednica 16: Absolutne temperature v mešanicah.....	67
Preglednica 17: Relativne temperature v mešanicah.....	68

1 UVOD

1.1 Namen magistrske naloge

Namen izdelave te magistrske naloge je analizirati vpliv sestave nekaterih betonskih mešanic, ki se tipično uporabljajo pri projektiranju sestave betonskih mešanic na HE Brežice in na podlagi pridobljenih rezultatov predlagati sestavo betonske mešanice, ki z vidika razvoja adiabatnih temperatur in osnovnih trdnostnih karakteristik najbolj zadosti projektnim zahtevam masivnih betonov pri gradnji masivnih elementov na HE Brežice.

Izgradnja verige hidroelektrarn na spodnji Savi je večnamenski projekt, ki pomembno prispeva k povečanju deleža proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov energije. Zgrajena veriga hidroelektrarn na spodnji Savi bo bistveno prispevala k povečanju zanesljivosti oskrbe z električno energijo, hkrati pa bo pripomogla tudi k povečanju deleža proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov. Hidroelektrarne na spodnji Savi so zasnovane kot pretočno-akumulacijske, z jezovno zgradbo in priključnimi energetskimi ter visokovodnimi nasipi. Z izvedbenega in organizacijskega vidika je najzahtevnejša konstrukcija jezovna zgradba, ki jo sestavljata dva sklopa: prelivni del in strojnica. Jezovna zgradba je armirano betonska zgradba iz masivnega betona. Masivni betoni so betoni, ki nastopajo v konstrukcijskih elementih velikih dimenzij, ki so tako velike, da je pri gradnji potrebno upoštevati posebne pogoje pri obvladovanju sproščanja toplote zaradi hidratacije cementa in volumskih deformacij, ki so posledica teh procesov [10].

Problem pri masivnih betonih predstavlja porast temperature, ki je posledica eksotermne reakcije vezanja cementnega veziva z vodo - hidratacije v času strjevanja. Če je izmenjava temperature zaradi velikih dimenzij ali vkleščenosti elementa v konstrukcijo ovirana, lahko v notranjosti elementa velikih dimenzij pride do pojava sorazmerno visokih temperatur, medtem ko so temperature okolice relativno nizke. Tovrstne razlike temperatur zelo neugodno vplivajo na strukturo betona, zato lahko hitro pride do razpok.

Za preprečevanje razpok v betonu je možnih veliko načinov, veliko pa je odvisno od sestave sveže betonske mešanice. Predmet naše raziskave je bila določitev adiabatne krivulje s pomočjo semi adiabatne metode za hidrotehnične betone na HE Brežice. Meritve smo izvajali na gradbišču HE Brežice med avgustom in decembrom 2015 na treh različnih recepturah betonov, ki so bile določene na osnovi modifikacije osnovne sestave, ki je bila uporabljena pri gradnji pregrade Brežice. Na osnovi analiz in interpretacije rezultatov smo potrdili ustreznost uporabljenih sestav betonov.

1.2 Struktura magistrske naloge

Magistrsko delo vsebuje poleg uvoda še devet poglavij. V poglavju *Splošno o masivnih betonih* so predstavljene bistvene lastnosti masivnih betonov, kje se jih uporablja in problemi tovrstnih betonov. V poglavju *Sestavine masivnih betonov* so predstavljene glavne sestavine masivnih

betonov in njihove lastnosti, saj je poznavanje lastnosti in obnašanja posamezne sestavine betona ključno pri določevanju receptur betonov s točno določenimi želenimi lastnostmi. Četrto poglavje *Razpoke v masivnih betonih* govori o razlogih za nastanek razpok in o tehnoloških ukrepih za preprečevanje nastanka razpok. Tudi poznavanje vzrokov za nastanek razpok je pomembno za določanje optimalnih receptur betona. V petem poglavju *Obdelavnost betonske mešanice* je predstavljen vpliv posameznih sestavin betonske mešanice na obdelavnost. Mnogokrat se obdelavnosti in vgradljivosti betona posveča premalo pozornosti, zato je v tem poglavju predstavljen vpliv vsake sestavine posebej. Pri masivnih betonih lahko zaradi želje po zmanjšanju dviga temperatur med strjevanjem in posledično zmanjšanja količine cementa pride do slabše vgradljivosti betona, kar pa lahko tehniko o primernosti takega betona za vgradnjo prevesi na strani betona, ki je sicer slabši z vidika prirasta temperature. Zato je pri načrtovanju potrebno upoštevati mnogo lastnosti in posledic posameznih faktorjev. Šesto poglavje *Hidroelektrarne na spodnji Savi* govori o hidroelektrarnah na spodnji Savi in električni energiji na splošno. V tem poglavju so v grobem predstavljene vse hidroelektrarne na spodnji Savi, tiste, ki so že zgrajene in tudi tiste, ki še bodo. V sedmem poglavju *Betoniranje na HE Brežice* so predstavljeni pogoji betoniranja na HE Brežice, pogoji receptur betonov in pogoji glede nege betona tekom strjevanja. Naslednje poglavje *Adiabatna kalorimetrija* govori o adiabatni kalorimetriji, saj je njeno poznavanje ključno za interpretacijo rezultatov meritev, ki smo jih izvajali na HE Brežice in za določitev optimalne adiabatne krivulje. V devetem poglavju *Eksperimentalni del* so predstavljeni rezultati meritev, v nadaljevanju pa tudi njihova interpretacija. V zadnjem poglavju *Zaključek* so strnjene vse zaključne misli in vsi zaključki magistrskega dela.

2 SPLOŠNO O MASIVNIH BETONIH

Masivni beton je po definiciji vsaka prostornina betona, ki ima dovolj velike dimenzije, da so potrebni ukrepi za zmanjšanje možnosti nastanka razpok zaradi generiranja toplote in spremljajočega prostorninskega raztezanja [28]. Masivni beton ima najmanjšo dimenzijo veliko vsaj 0,5m [2]. Ti betoni se v večini uporabljajo za gradnjo masivnih inženirskih objektov.

Največji problem masivnih betonov je veliko spreminjanje temperature v času strjevanja betona, posledično pa je možen razvoj previsokih temperatur v posameznih točkah oziroma prevelikih gradientov v temperaturnem polju masivnega betonskega elementa, kar lahko vodi do razpok oziroma vesplošnega poslabšanja kvalitete masovnih betonov. Zato je potrebno veliko pozornost posvetiti vsem faktorjem, ki pomembno vplivajo na spreminjanje temperature tekom strjevanja, kot so izbor sestavin in tehnologija vgradnje. Za ugotovitev obnašanja velikih betonskih blokov je potrebno poznati termične značilnosti betonske mešanice [26].

3 SESTAVINE MASIVNIH BETONOV

3.1 AGREGAT

Najbolj zastopana sestavina v betonski mešanici je agregat. Njegove lastnosti pogojujejo določene lastnosti betonske mešanice in strdelega betona. Agregat za beton mora imeti ustrezne lastnosti, kot so med drugim trdnost, obstojnost, ki značilno vplivajo na lastnosti betona. V betonu so zrna agregata povezana v celoto s pomočjo cementne paste. Cementna pasta mora biti v mešanici enakomerno porazdeljena, zapolnjen mora biti vsak prostor med zrni agregata. V betonski mešanici so zastopane različne frakcije agregata. Zrnovostno strukturo agregata nam določa granulometrijska krivulja. [30]

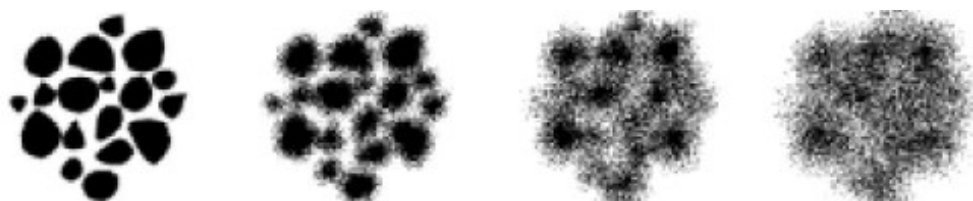
V masivnih betonih, pri katerih je največji problem doseganje visokih temperatur tekom strjevanja, si želimo količino cementa čim bolj zmanjšati. Zaradi tega moramo zmanjšano količino cementa čim bolj učinkovito nadomestiti s finimi delci agregata.

Agregat v betonu predstavlja nekakšno polnilo, ki ga povezuje cementni kamen. Agregat betonu daje trajnost in trdnost. Vendar pa je trdnost betona v veliki meri odvisna od kvalitete cementnega kamna in povezanosti zrn agregata s cementnim kamnom. Zrna agregata so praviloma vedno bolj trdna od cementnega kamna, beton pa se poruši, ko se poruši najšibkejši del celotnega kompozita – to je največkrat stik cementnega kamna in zrn agregata ali pa cementni kamen, ki je zaradi porozne strukture mnogo bolj dovzeten za škodljive zunanje vplive, ki zmanjšujejo trdnostne karakteristike materiala.

3.2 CEMENTI V MASIVNIH BETONIH IN HIDRATACIJA

Cement je hidravlično vezivo, ki pri reakciji z vodo – hidrataciji – veže in strjuje. Nastane cementni kamen, ki ima visoke trdnosti ter je odporen na vremenske vplive in kemijsko korozijo [17].

Hidratacija je proces vezanja vode in cementa (*Slika 1*). Sestavlja ga zapleten niz kemijskih reakcij med minerali cementnega klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na drugo. Na začetku je proces hidratacije odvisen od hitrosti reakcije mineralov cementnega klinkerja in kalcijevega sulfata, s katerim nadzorujemo proces hidratacije. V nadaljevanju postane proces bolj reguliran s postopno rastjo kristalov produktov hidratacije, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov. Hitrost hidratacije je odvisna tudi od vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice in prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici [30]



Slika 1: Časovni prikaz hidratacije cementne paste [30]

Pri vgradnji velikih masivnih betonskih blokov je potrebno veliko pozornost nameniti odvajanju toplote v okolico, saj ima lahko preveliko in prehitro sproščanje toplote negativne posledice. Zaradi velikih temperatur v notranjosti betona in nižjih temperatur v okolici pride lahko do prevelikih temperaturnih gradientov, kar vodi k velikim napetostim v notranjosti betona in posledično pojav razpok v betonu.

Na proces hidratacije in na količino sproščene toplote ter posledično na časovni razvoj krčenja in trdnosti cementnega kamna oz. betona vplivajo zlasti naslednji parametri [18]:

- razmerje vsebnosti štirih glavnih mineralov portland cementnega klinkerja,
- specifična površina cementa,
- količina in vrsta mineralnega dodatka,
- začetna temperatura svežega betona,
- vrsta kamenega agregata,
- temperatura in vlaga okolja med procesom hidratacije,
- vodocementno razmerje sveže betonske mešanice,
- vrsta in količina kemičnih dodatkov v betonski mešanici.

Cement najbolj vpliva na razvoj temperature v betonu v času strjevanja, zato je pomembno, da izberemo cement, ki najbolj ustreza našim zahtevam. Pri cementih, ki vsebujejo veliko količino trikalcijevega silikata in trikalcijevega aluminata ali pa so bolj fini, je sproščanje hidratacijske toplote večje kot pri cementih, kjer so deleži teh mineralov v sestavi manjši. Pozorni moramo biti tudi na količino cementa v betonski mešanici, saj večja količina cementa pomeni tudi več sproščene hidratacijske toplote in posledično višje temperature v masivnem betonskem bloku tekom strjevanja.

3.2.1 Kemična sestava cementa

Cement pridobivajo iz zmesi mineralov, ki so prisotni v naravnem laporju, apnencu in glini. Te surovine meljejo po mokrem in suhem postopku, nato pa surovino žgejo do območja sintranja. Dobljena surovina se imenuje cementni klinker, ki ga nato zmeljejo v zrna velikosti 5 do 30 μm , ki postanejo pri tej velikosti izjemno reaktivna v stiku z vodo. [30].

Preglednica 1 prikazuje osnovne minerale klinkerja, ki skupaj tvorijo nove spojine, ki vplivajo na proces hidratacije in obnašanja cementa. Nastanejo minerali cementnega klinkerja, ki so prikazani v preglednici 2 v razmerjih, tipičnih za sestavo portland cementa.

Preglednica 1: Komponente klinkerja

spojina	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
komponenta	C	S	A	F

Preglednica 2 prikazuje tipično sestavo portland cementa. Iz preglednice je razvidno, da je največji delež alita, sledita mu belit in celit. V manjšem deležu sta v cementu zastopana minerala ferit in sadra.

Preglednica 2: Tipična sestava portland cementa [9]

Ime	Kemična formula	Okrajšava	Delež [%]
Trikalcijev silikat (alit)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	55
Dikalcijski silikat (belit)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	18
Trikalcijev aluminat (celit)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10
Tetrakalcijev aluminat (ferit)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8
Kalcijev sulfat dihidrat (sadra)	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2	6

3.2.2 Lastnosti mineralov v cementu

Velika večina cementov je sestavljena iz štirih glavnih cementnih mineralov:

- trikalcijev silikat (alit) C_3S
- dikalcijev silikat (belit) C_2S
- trikalcijev aluminat (celit) C_3A
- tetrakalcijev aluminat (ferit) C_4AF

3.2.2.1 Trikalcijev silikat C_3S - alit

Trikalcijev silikat je najbolj zastopan mineral v portland cementu, saj zavzema približno 40 do 70% delež, poleg tega pa je tudi najbolj pomemben mineral. Največji delež končne trdnosti cementnega kamna prispeva prav C_3S , ki v drugi stopnji hidratacije tvori z belitom kristale kalcijevega silikat hidrata, ki ga imenujemo tudi C-H-S gel.

3.2.2.2 Dikalcijski silikat C_2S - belit

Dikalcijski silikat – belit je v betonu odgovoren za kasnejšo trdnost. Dikalcijski silikat je manj reaktiven kot trikalcijev silikat, ima nižjo toploto hidratacije in se počasneje kemijsko veže.

3.2.2.3 Trikalcijev aluminat C_3A - celit

Trikalcijev aluminat v cementu predstavlja približno 7-10% delež. Podobno kot C_3S je tudi trikalcijev aluminat visoko reaktiven, kar vodi k drastičnemu povečanju toplote v zgodnji starosti cementnega kamna. Produkti reakcije trikalcijevega aluminata z vodo prispevajo k zgodnjem prirastu trdnosti cementnega kamna. Trikalcijev aluminat je občutljiv na sulfatno reakcijo.

3.2.2.4 Tetrakalcijev aluminat C_4AF – ferit

Tetrakalcijev aluminat k trdnosti prispeva počasi, je pa bolj odporen na sulfatno korozijo kot trikalcijev aluminat C_3A .

3.2.3 Tipi cementa

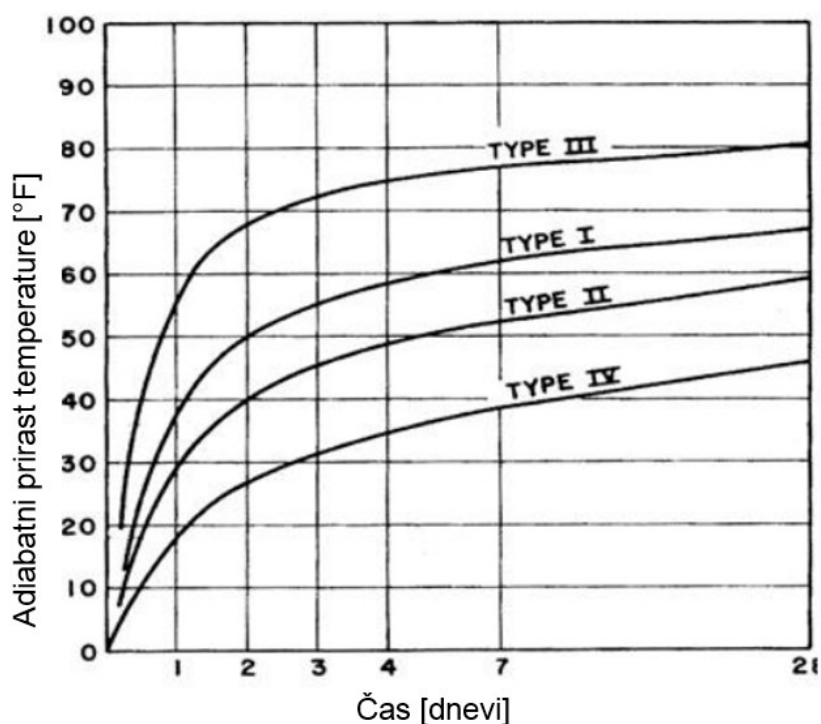
Preglednica 3: Značilnost različnih tipov cementa [23]

Vrsta cementa	Opis	karakteristike
Tip I	Čisti portlandski cement	Visoka vsebnost C_3S
Tip II	Portlandski cement z mineralnimi dodatki	Majhna vsebnost minerala C_3A (<8%)
Tip III	Žlindrin cement	Finejši cement, lahko vsebuje malo več minerala C_3S
Tip IV	Pucolanski cement	Nizka vsebnost minerala C_3S in C_3A
Tip V	Mešani cement	Zelo nizka vsebnost minerala C_3A

Za doseganje različnih in raznolikih lastnosti betona obstaja več različnih vrst cementa (*Preglednica 3*). Izbira tipa cementa je odvisna od želenega rezultata in lastnosti sveže betonske mešanice ali strjenega betona.

- TIP I – cement tipa I je vsestransko uporaben cement, uporaben za tlake, betonske stavbe, rezervoarje, cevi, prefabricirane elemente itd. V splošnem je cenejši od cementa tipa II.
- TIP II – Cement tipa II uporabimo takrat, ko želimo doseči manj proizvedene toplote tekom hidratacije cementa, saj ima tak cement manjšo količino minerala C_3A
- TIP III – cement tipa III najhitreje razvije zgodnjo trdnost po kontaktu z vodo, saj ima večjo specifično površino zaradi finejših delcev, ima pa tudi manjšo količino minerala C_3S
- TIP IV – cement tipa IV uporabimo takrat, ko želimo količino proizvedene toplote tekom hidratacije cementa zmanjšati na minimum. Tak cement je primeren za uporabo pri masivnih betonih, med hidratacijo proizvede manj toplote zaradi manjše vsebnosti minerala C_3S in večje vsebnosti minerala C_2S . Počasneje pridobiva na trdnosti v prvih dneh, medtem ko po 28 dneh doseže enako trdnost kot ostali cementi. Tak cement ima tudi večjo odpornost na sulfate.
- TIP V – cement tipa V uporabimo takrat, ko želimo doseči veliko odpornost na sulfate.

Slika 2 prikazuje prirast temperature masivnega betona iz različnih tipov cementa pod adiabatnimi pogoji. Iz slike je razvidno, da ima najmanjši prirast temperature cement tipa IV, največji pa cement tipa III. Te lastnosti gre pripisati različnim sestavam cementov, saj cement tipa IV vsebuje precej manj mineralov C_3A in C_3S , več pa vsebuje mineralov C_2S . Cement tipa III je finejši, kar zelo vpliva na hitrost reagiranja cementa z vodo, vsebuje pa lahko tudi malo več minerala C_3S , ki zelo burno reagira pri hidrataciji in pomembno vpliva na povečanje temperature v betonu že v zgodnji starosti.



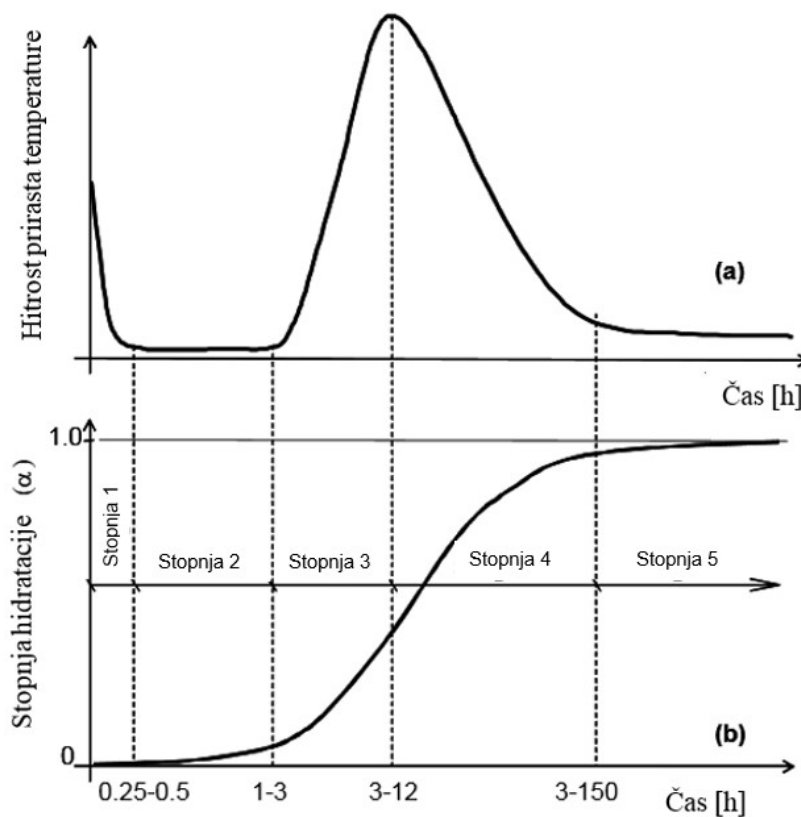
Slika 2: Prirast temperature masivnega betona iz različnih tipov cementa pod adiabatnimi pogoji [8]

Preglednica 4: Tipične sestave cementov in njihove lastnosti [14]

		Tip cementa				
		I	II	III	IV	V
Sestavine cementa	C ₃ S	55	55	55	42	55
	C ₂ S	18	19	17	32	22
	C ₃ A	10	6	10	4	4
	C ₄ AF	8	11	8	15	12
Finost [m ² /kg]		365	375	550	340	380
Tlačna trdnost po 1 dnevu [MPa]		15	14	24	4	12
Toplota hidratacije po 7 dneh [J/g]		350	265	370	235	310

Preglednica 4 prikazuje tipične sestave cementov in njihove lastnosti. Največjo finost zrn ima tip cementa III, zaradi česar je posledično hitrost reakcije na začetku hidratacije izredno burna, kar pomembno prispeva k povečani toploti hidratacije po sedmih dneh, saj ima tak cement največjo hidratacijsko toploto po sedmih dneh. Finost cementa tipa III in hitra reakcija pa pomembno vplivata na zgodnjo tlačno trdnost, kar je razvidno iz preglednice, saj ima tak cement daleč največjo zgodnjo trdnost. Cement tipa II vsebuje zelo malo minerala C₃A, ki sicer na toploto hidratacije najbolj vpliva, kar prispeva k izredno majhni toploti hidratacije po 7 dneh.

3.2.4 Časovna obdobja hidratacije cementa



Slika 3: Stopnje hidratacije cementa [20]

Slika 3 prikazuje graf hitrosti prirasta temperature in stopnjo hidratacije po času. Na grafu so prikazane tudi stopnje hidratacije.

3.2.4.1 Predindukcijsko obdobje

To obdobje traja prvih 15 do 30 minut po zamešanju cementa in vode. V vodi se spojine hitro raztapljajo in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta eksotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok, ki pa v betonu običajno ni zaznaven. Nastajati začnejo heksagonalni prizmatični kristali kalcijevega hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Zaradi kemijske reakcije med sadro in minerali kalcijevega aluminata pa nastaja tudi etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Formiranje etringita upočasni hidratacijo C_3A , zato se stopnja reakcije zelo upočasni, kar privede do stopnje mirovanja. Ker ta stopnja hidratacije nastopi takoj po zamešanju, vpliva na dvig začetne temperature sveže betonske mešanice po izhodu iz betonarne oziroma v betonskih hruškah.

3.2.4.2 Indukcijsko obdobje – obdobje mirovanja

To obdobje traja prvih nekaj ur po zamešanju cementa in vode. V tem obdobju se hitrost reakcij močno zniža. Nehidratizirani cementni delci se v predindukcijskem obdobju obdajo z zaščitno plastjo hidratacijskih produktov, zaradi česar pride do upočasnjevanja reakcij hidratacije. V tem

obdobju ne pride do prirasta trdnosti. Ta faza je izredno pomembna za obdelavnost in transport betona, saj omogoča normalno vgradnjo betona.

3.2.4.3 Obdobje pospešene hidratacije

Obdobje poteka od tretje do dvanajste ure po zamešanju cementne paste. Ta faza je odvisna od začetne temperature betonske mešanice in kemijskih dodatkov. Minerala alit (C_3S) in belit (C_2S) začeta hidratizirati in pri tem se sprošča toplota. Temperatura betona se močno poveča. V tej fazi cementni kamen otrdi. Kristali C-S-H gela rastejo in tako zgotijo strukturno mrežo cementnega kamna. Ti kristali so nosilci trdnosti cementnega kamna.

3.2.4.4 Obdobje pojemajoče hidratacije

Hitrost hidratacije začne padati, proces postane odvisen od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki predstavljajo opno okoli nehidratiziranih cementnih delcev. Kot posledica hidratacije med alitom in belitom, pri čemer se delež belita s časom povečuje, nastaja gel C-S-H.

3.2.4.5 Obdobje hitrosti hidratacije $<0,1^{\circ}C/h$

Hidratacijski proces se počasi umirja.

3.2.5 Hidratacijska toplota cementa

Hidratacija je proces vezanja vode in cementa. Sestavlja ga zapleten niz reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na drugo. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata.

V nadaljevanju postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov. Hitrost hidratacije je odvisna tudi od vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice in prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici [30].

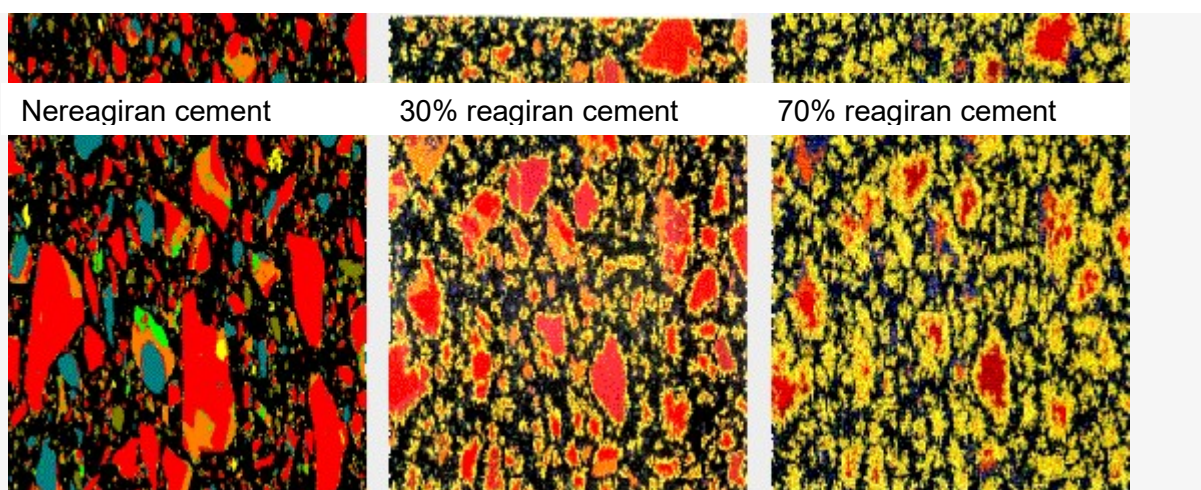
Ker je hidratacija cementa eksotermna reakcija, se tekom strjevanja betona sprošča hidratacijska toplota. Beton se zaradi tega segreva, hkrati pa se tudi hladi z oddajanjem toplote v okolico. Ta pojav je velik problem pri masivnih betoni. Zaradi velikih dimenzij betonskih blokov se beton segreva, saj ima majhno toplotno prevodnost, zato v okolico oddaja le malo toplote, znotraj pa se mu zato povečuje temperatura. Večje ko so dimenzije betonskega bloka, večji je problem segrevanja betona v času strjevanja, saj zaradi prevelikih temperatur in temperaturnih gradientov prihaja do razpok v betonu.

Stopnja hidratacije je odvisna od vodocementnega razmerja, vrste cementa, količine cementa, začetne temperature svežega betona ter robnih razmer izvedenih betonskih konstrukcij.

V masivne betone moramo vgrajevati cemente z nizko hidratacijsko toploto, poleg tega pa je potrebno v volumen betona vgraditi tudi čim manj cementa, saj s tem zmanjšamo hidratacijsko toploto. Vendar pa zmanjšanje količine cementa vodi k temu, da je betonu potrebno dodajati dodatke, s katerimi nadomestimo lastnosti, ki bi jih sicer zagotovila zadostna količina cementa.

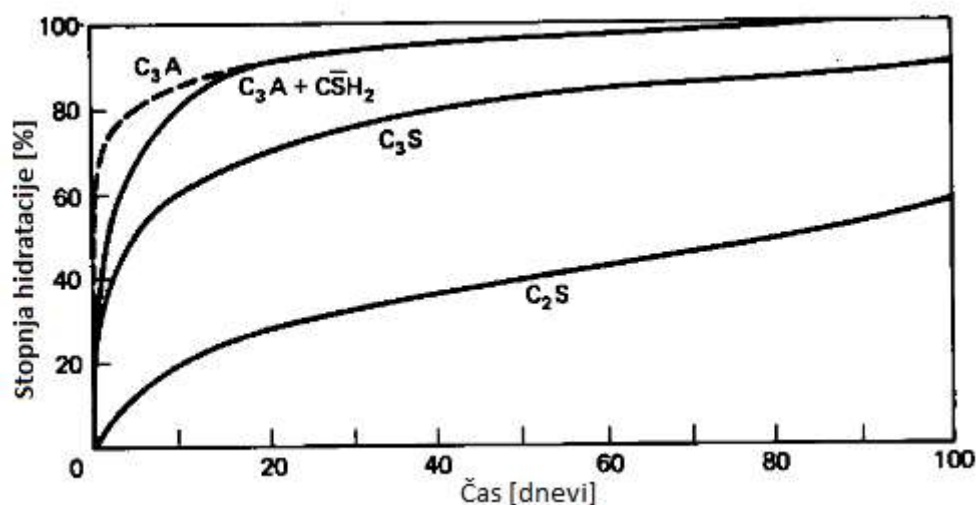
3.2.6 Proces hidratacije cementa in faktorji, ki vplivajo na hidratacijo

Proces hidratacije običajno opišemo s stopnjo hidratacije, to je tisti delež začetnega cementa, ki je po določenem času prešel v cementne hidrate – spojine komponent cementa z vodo. Za stopnjo hidratacije je v rabi tudi izraz »stopnja pretvorbe«, lahko pa jo imenujemo tudi »izkoristek cementa«. Pri stopnji hidratacije 0,6 oziroma 60% je le toliko cementa porabljenega za nastanek hidratov, preostalih 40% pa je ostalo nedotaknjenih in se v glavnem nahajajo v jedrih cementnih zrn in v notranjosti prvotnih kristalov cementnih mineralov. [23]



Slika 4: Hidratacija cementa [23]

Slika 4 prikazuje proces hidratacije cementa, pri kateri cement reagira z zmesno vodo. Prva slika prikazuje nereagiran cement, katerega delci so veliki nekaj mikronov. Na sliki so prikazane različne barve, ki prikazujejo različne minerale. Sredinska slika prikazuje cementno pasto, ki je že 30% reagirala z vodo. Rumene obloge okrog delcev cementa predstavljajo nov produkt hidratacije, to je C-S-H gel. C-S-H gel se razširja v vmesne prostore med delce, jih med seboj povezuje in daje cementu trdnost. Na zadnji sliki je prikazano stanje po hidrataciji in po nastajanju C-S-H gela. C-S-H gel je zapolnil vmesne prostore, zmanjšal še prostor, zapolnjen z vodo, ki je na sliki prikazan s črno barvo. To pripomore k manjši vodoprepustnosti betona.



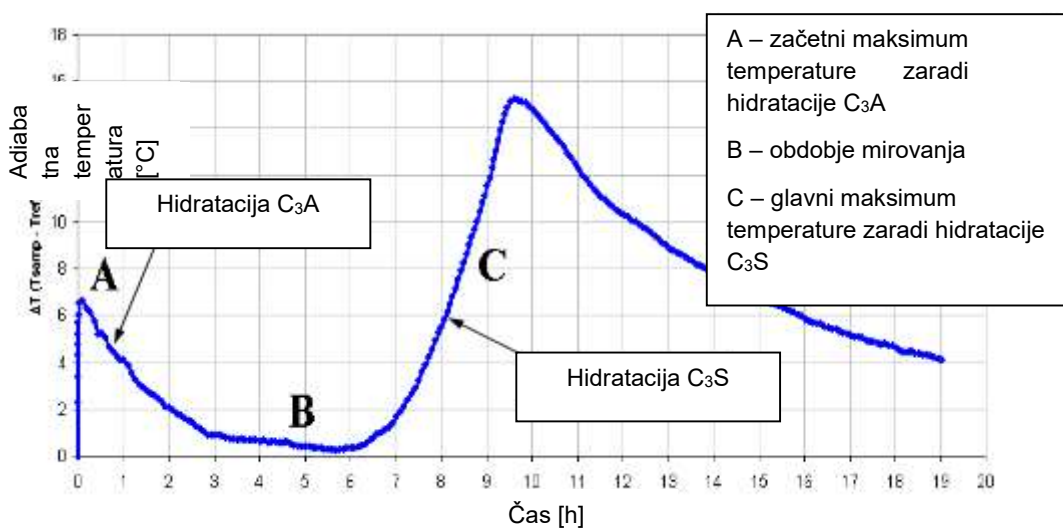
Slika 5: Razvoj hidratacije različnih sestavin cementa [20]

Slika 5 prikazuje stopnjo hidratacije različnih mineralov v cementu. Razvidno je, da minerala C_3A in C_3S največ prispevata k zgodnji hidrataciji, medtem ko C_2S reagira mnogo počasneje in da mešanica mineralov C_3A in CSH_2 počasneje razvija hidratacijsko toploto kot če mineral C_3A deluje posamezno. To dovoljuje cementu dolgo obdelavnost za primerno vgradnjo betona.

Preglednica 5: Mineraloška sestava klinkerja [17]

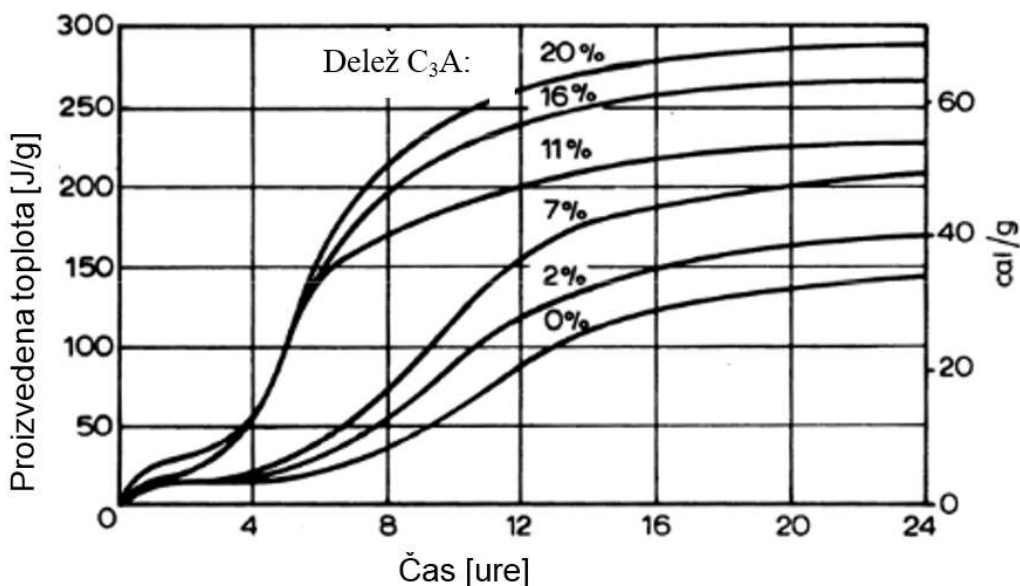
	Običajni PC klinker [%]	Klinker z nizko toploto hidratacije [%]
C_3S	60-70	34
C_2S	20-25	39
C_3A	7-10	2,1
C_4AF	7-10	18,8
CaO	2	0,7

Ker k visoki hidratacijski toploti cementa največ prispevata minerala C_3S in C_3A , je potrebno njun delež v cementu zmanjšati, če želimo doseči cement z nižjo hidratacijsko toploto. Preglednica 5 prikazuje količine posameznih mineralov pri običajnem cementu in pri cementu z nizko toploto hidratacije.



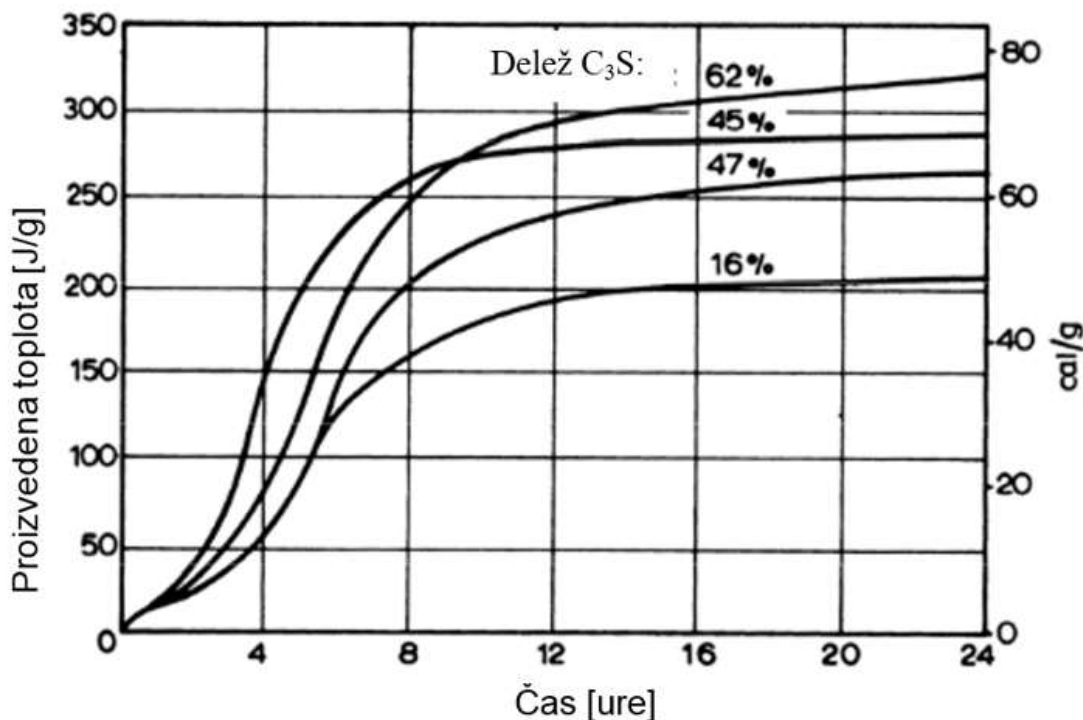
Slika 6: Vpliv mineralov glede na čas poteka hidratacije [2]

Slika 6 prikazuje vpliv različnih mineralov v cementu na potek hidratacije. Iz slike je razvidno da ima takoj po zamešanju hidratacija minerala C₃A največji vpliv na dvig adiabatne temperature. Takoj po začetni burni reakciji se stanje umiri, takrat nastopi obdobje mirovanja. Temperatura v betonu pade, dokler po približno šestih urah spet ne začne naraščati, tokrat zaradi hidratacije minerala C₃S. V tem obdobju nastopi globalni temperaturni maksimum.



Slika 7: Vpliv vsebnosti C₃A na proizvedeno toploto [20]

Slika 7 prikazuje vpliv količine C₃A na proizvedeno hidratacijsko toploto. 20% delež minerala C₃A pomeni približno 290 J/g več proizvedene hidratacijske toplote po 24 urah kot pri cementu brez tega minerala. Kar 270 J/g hidratacijske toplote se proizvede že v prvih 12 urah.

Slika 8: Vpliv vsebnosti C₃S na toploto [20]

Slika 8 prikazuje vpliv vsebnosti minerala C₃S na proizvedeno hidrationsko toploto. Če cement vsebuje 62% delež minerala C₃S, se po 24 urah po zamešanju proizvede približno 325 J/g hidrationske toplote. Po 12 urah se proizvede približno 250 J/g hidrationske toplote.

3.2.6.1 Vodocementni faktor

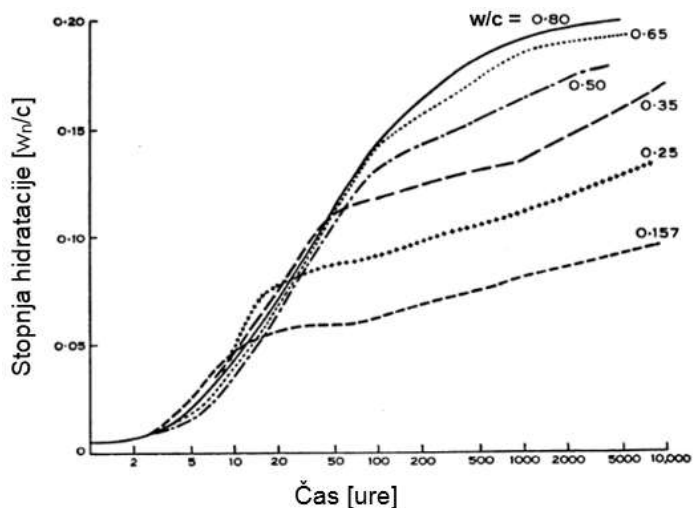
Vodocementni faktor predstavlja razmerje med količino vode v betonski mešanici in količino cementa. Če je vodocementni faktor nizek, je popolna hidrationska cementa nemogoča, saj ni zadostne količine za tvorbo hidrationskih produktov. Če je torej na voljo zadostna količina vode, bo hidrationska potekala neovirano in konstantno in praznine znotraj cementne paste bodo povsem zaponjene (Slika 9). Velja, da vodocementni faktor v zgodnji starosti betona na stopnjo hidrationske ne vpliva, vpliva pa na stopnjo hidrationske kasneje, ko je stopnja hidrationske nizka, če je vodocementni faktor nizek. Stopnja hidrationske cementa pomembno vpliva na količino sproščene toplote tekom hidrationske. Za čim večjo stopnjo hidrationske morajo biti zagotovljeni naslednji pogoji:

- *Zadosti prostora za produkte hidrationske*

Med hidrationsko cementni delci reagirajo s prosto vodo v betonski mešanici in tvorijo produkte hidrationske. Prostornina produktov hidrationske je enaka prostornini cementa in vode pred pričetkom reakcije. Pri hidrationsko produkti zapolnijo praznine, kjer se je prej nahajala voda. Ko prostora oz. vode ni več na razpolago, se hidrationska ustavi, saj ni več pogojev za formiranje produktov hidrationske.

- Zadostna količina vode za hidratacijo

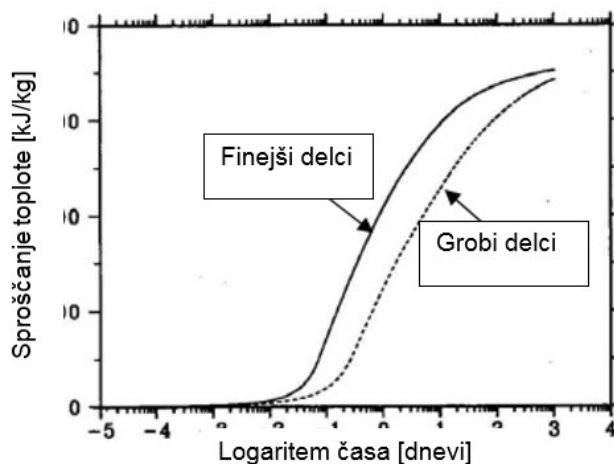
Za normalen potek hidratacije je potrebna prosta voda v betonski mešanici. Če v beton prodre še dodatna voda od zunaj, lahko dosežemo zelo visoko stopnjo hidratacije cementa.



Slika 9: Vpliv vodocementnega faktorja na stopnjo hidratacije [20]

3.2.6.2 Finost cementnih delcev

Finost cementnih delcev ponavadi izražamo s specifično površino cementnih delcev. Specifična površina cementnih delcev predstavlja celotno površino vseh cementnih delcev glede na težo vsega cementa. Bolj ko je cement fin, več je površin, preko katerih lahko cement reagira z vodo. Torej bolj ko je cement fin, hitreje se toplota sprošča tekom procesa hidratacije cementa, višja je stopnja hidratacije, kar vodi k višji zgodnji trdnosti. Finost cementa ima velik vpliv na vgradljivost, obdelavnost in vsebnost vode v betonu.



Slika 10: Vpliv finosti cementnih delcev na razvoj toplote tekom hidratacije [20]

Slika 10 prikazuje vpliv finosti cementnih delcev na razvoj toplote tekom hidratacije cementa. Iz slike lahko vidimo, da finejši delci vplivajo na hitrejši razvoj toplote tekom hidratacije, vendar pa finost cementnih delcev ne vpliva na končno toploto hidratacije.

3.2.6.3 Dimenzije betonskega elementa

Razvoj temperature vgrajenega betona je odvisen od pogojev prehajanja toplote. Večje ko so dimenzije elementa, več časa bo potrebnega, da toplota iz strjujočega betona preide v okolico, zato pri zelo velikih dimenzijah elementa temperatura okolice ne vpliva pomembno na temperaturo v središču betonskega elementa. Nasprotno je pri tankih elementih vpliv okoliške temperature na temperaturo v betonskem elementu velik. Pri elementih velikih dimenzij bo razvoj temperature v središču elementa podoben razvoju temperature v adiabatnih pogojih, saj je v tem primeru prisotnih le malo izgub toplote v okolico.

3.2.6.4 Začetna temperatura betonske mešanice

Na potek hidratacije pomembno vpliva tudi začetna temperatura sveže betonske mešanice. Hidratacija cementa pri višjih začetnih temperaturah je še bolj pospešena v prvih dneh po zamešanju, vendar se kasneje umiri.

Zaradi previsokih začetnih temperatur sveže betonske mešanice lahko pride do naslednjih težav:

- *Krajša življenjska doba betona*
Zaradi previsokih začetnih temperatur lahko pride do skrajšanja življenjske dobe betona, kar v nadaljevanju pomeni višje in nepotrebne stroške.
- *Slabše lastnosti sveže betonske mešanice*
Zaradi previsokih začetnih temperatur sveže betonske mešanice pride do spremenjenih lastnosti svežega betona. Za zamešanje in negovanje betona je potrebna večja količina vode, ki jo moramo dodajati tudi na gradbišču. Otežena je vgradnja takega betona, saj ga je težje vgraditi. Pri takem betonu je povečana tudi ogroženost za nastanek plastičnih razpok. Pri betonski mešanici s preveliko temperaturo so slabše tudi karakteristike kemičnih dodatkov v betonu.
- *Slabše lastnosti strjenega betona*
Zaradi prevelikih začetnih temperatur sveže betonske mešanice so lahko mnogo slabše tudi lastnosti strjenega betona. Tlačna trdnost po 28 dneh in kasneje je manjša kot pri betonih, ki so bili vgrajeni pri primernih temperaturah za vgradnjo. Zaradi previsokih temperatur je močno povečano tudi krčenje betona zaradi sušenja, zaradi česar pride do razpok in posledično manjše trajnosti takega betona. Zaradi povišane začetne temperature je večja tudi nevarnost za nastanek korozije armature, poveča se tudi prepustnost betona.
- *Velike temperaturne napetosti*
Zaradi previsokih temperatur betona v času vgradnje se tudi tekom strjevanja betona sprošča večja količina toplote in posledično so v takem betonu prisotne velike napetosti zaradi visokih temperatur, ki lahko privedejo do razpokanja.

Na proces hidratacije pomembno vplivajo tudi dodani mineralni in kemični dodatki v sveži betonski mešanici. Njihov vpliv je podrobneje predstavljen v poglavjih 3.3 in 3.4.

3.3 Mineralni dodatki

Uporaba mineralnih dodatkov je v masivnih betonih priporočljiva, saj lahko z mineralnimi dodatki vplivamo na proces hidratacije cementa. Najpogosteje uporabljana mineralna dodatka sta elektrofiltirski pepel in žindra. Dodatek elektrofiltirskega pepela zmanjšuje toploto hidratacije, saj zavira hidratacijo cementa. Sferična oblika zrn elektrofiltirskega pepela pripomore k izboljšanju obdelavnosti sveže betonske mešanice. Žindra se kot hidravlično vezivo aktivira z dodajanjem portland cementa, apna ali alkalij iz drugih virov. Hidratacija je v kombinaciji s portland cementom odvisna predvsem od razgradnje in raztapljanja steklaste strukture žindre. Do tega pojava pride zaradi sproščanja hidroksidnih ionov med hidratacijo portland cementa. S samo vodo ne moremo doseči zadostne hidratacije. Z žindro lahko nadomestimo do 70 % cementnega klinkerja [27].

3.4 Kemični dodatki

Poznamo veliko različnih vrst kemičnih dodatkov, ki jih lahko dodamo svežim betonskim mešanicam in jim s tem izboljšamo nekatere lastnosti. Zavedati se moramo, da lahko z izboljšanjem ene lastnosti betona vplivamo na poslabšanje druge lastnosti, zato moramo biti pri uporabi kemičnih dodatkov previdni in preudarni. Količino dodatka moramo določiti tako, da dosežemo kar se da najbolj optimalen končni rezultat, upoštevajoč zahtevane karakteristike svežega betona, strjenega betona, vremenske razmere, dimenzije betonskega bloka in tehnologijo vgradnje.

Poznamo različne kemične dodatke betonu, da dosežemo različne rezultate:

- *Kemični dodatki za zmanjševanje količine vode v betonski mešanici (Plastifikatorji)*

Če želimo zmanjšati količino vode v betonski mešanici oziroma če želimo zmanjšati vodocementno razmerje, to vpliva na manjšo obdelovalnost sveže betonske mešanice, kar lahko hitro privede do težav pri vgrajevanju. S tovrstnim kemičnim dodatkom povečamo obdelovalnost sveže betonske mešanice, saj vpliva na kemične reakcije v betonu tekom strjevanja.

- *Kemični dodatki za pospeševanje vezanja*

Tovrstni kemični dodatki v prvi vrsti vplivajo na hitrejši razvoj zgodnje trdnosti betona in hitrejši prirast ostalih količin betona. Takšni dodatki so predvsem priporočljivi za uporabo pri betoniranju v zimskih razmerah. Če takšne dodatke uporabljamo pri visokih temperaturah, lahko hitro pride do prevelikega porasta temperature v betonu tekom strjevanja, kar lahko privede do razpokanja betona.

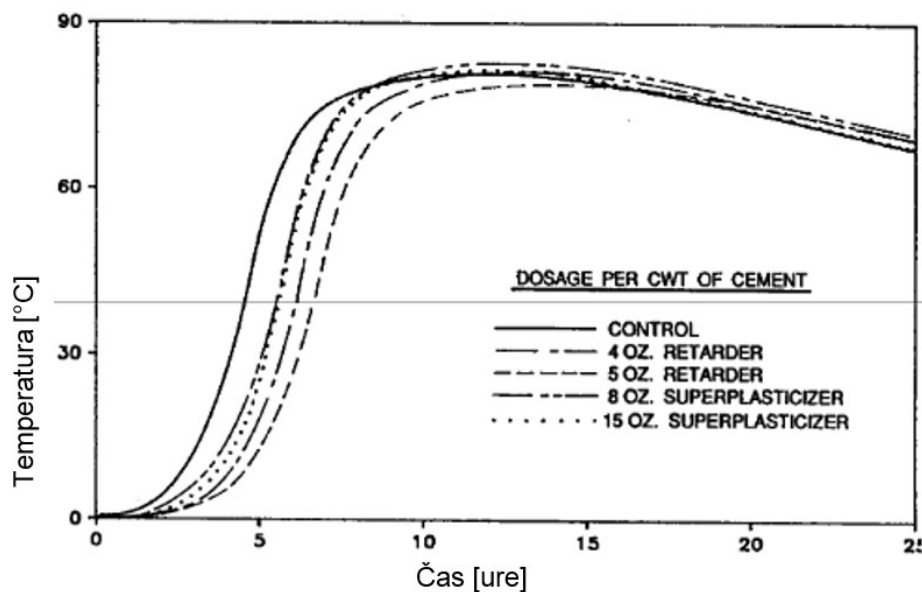
- *Zaviralci vezanja*

Zaviralci vezanja upočasnjujejo reakcijo cementne paste, saj imajo vpliv na stopnjo reagiranja cementa. Tovrstni dodatki so, za razliko od pospeševalcev vezanja, zelo primerni za betoniranje pri visokih temperaturah ali pri vgradnji večjih betonskih blokov. Zaviralci vezanja prav tako ne vplivajo zelo na končno doseženo temperaturo v

betonski mešanici, imajo pa sposobnost podaljšanja časa, ko pride do doseganja maksimalne temperature v strjujoči se betonski mešanici.

- *Superplastifikatorji*

Superplastifikatorji imajo v betonski mešanici podobno vlogo kot plastifikatorji, vendar pa v večji meri vplivajo na lastnosti betona kot plastifikatorji. Superplastifikatorji nimajo pomembnejšega vpliva na najvišjo doseženo temperaturo v strjujočem se betonu.



Slika 11: Vpliv različnih kemičnih dodatkov na razvoj toplote v strjujoči betonski mešanici [20]

Slika 11 prikazuje vpliv različnih kemičnih dodatkov na razvoj toplote v strjujoči betonski mešanici. Noben od dodatkov ne vpliva na maksimalno doseženo temperaturo, imajo pa vpliv na čas pojava maksimuma dosežene temperature. Zaviralci vezanja in superplastifikatorji pomembno vplivajo na zakasnitev pojava maksimuma temperature.

4 RAZPOKE V MASIVNIH BETONIH

Razpoke v betonu so pričakovani pojav, ki pa ga je potrebno kontrolirati in po potrebi sanirati. V masivnih betonih je vzrokov za nastanek razpok lahko več. Do razpok tako lahko pride zaradi napak v projektiranju, neustrezne izvedbe, zaradi neobičajne kombinacije zunanjih obremenitev, prostorninske spremembe v betonu ali zaradi neugodne kombinacije vseh naštetih vzrokov. Razpoke običajno nastajajo v mladem betonu, saj beton takrat še nima velike natezne trdnosti. Najprej se v betonu pojavijo mikrorazpoke, ki se povečujejo tekom strjevanja, predvsem zaradi krčenja betona in prevzemanja obtežb.

Za učinkovito sanacijo razpok v masivnih betonih je v prvi vrsti potrebno poznati vzrok nastanka razpok. Nato je potrebno ugotoviti nevarnost razpoke in se na podlagi ugotovitev odločiti za pravi postopek sanacije razpoke.

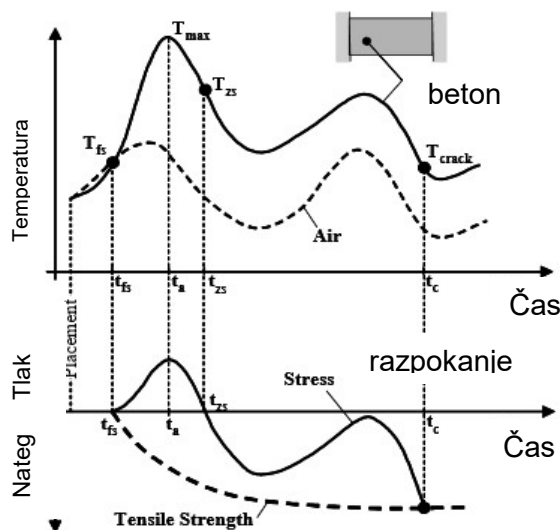
Razpoke v masivnih betonih največkrat nastajajo zaradi prevelikih temperaturnih gradientov v betonskih blokih. Z ustreznimi tehnološkimi ukrepi lahko precej zmanjšamo segrevanje betonskega bloka:

- Uporaba ustrezne sestave betona
- Ustrezna izbira velikosti in geometrije betonskih blokov
- Hlajenje sestavin sveže betonske mešanice
- Hlajenje betona v času strjevanja

V praksi do razpok po navadi pride zaradi:

- nepopolnega izvajanja del,
- prehitre odstranitve opaža in premajhne trdnosti betona pri odstranitvi opaža,
- deformacij zaradi temperaturnih sprememb,
- visoke hidratacijske toplote cementa in zaradi krčenja betona.

4.1 Nastanek razpok



Slika 12: Razvoj napetosti in natezne trdnosti v betonu v zgodnji starosti [20]

Slika 12 prikazuje razvoj napetosti v betonu zaradi spreminjanja temperature, hkrati pa prikazuje tudi razvoj natezne trdnosti strjujočega betona za element, polno vpet na obeh podporah. Ta graf prikazuje tipičen razvoj temperature v betonu, vgrajenem pri visokih temperaturah. Takoj po zamešanju betonske mešanice je beton plastičen in napetosti se v elementu ne pojavljajo dokler se ne formira zadostna količina produktov hidratacije pri času t_{fs} , ki vodijo k napetostim v elementu. Ker je hidratacija cementa eksotermna reakcija, temperatura v elementu naraste tekom strjevanja. Zaradi polne vpetosti elementa na obeh straneh, pride do tlačnih napetosti v elementu, saj se hoče element temperaturno raztezati, vendar mu je prosti raztezek onemogočen. V tej fazi je trdnost betona še izredno nizka, tlačne napetosti pa so visoke. Ko beton doseže maksimalno temperaturo T_{max} pri času t_a , se začne ohlajati, s tem pa se začnejo zmanjševati tudi tlačne napetosti v elementu, dokler niso v nekem trenutku nične pri času t_{zs} . Tedaj v betonu prvič nastopijo natezne napetosti. Bolj ko se element ohlaja, manjša je njegova temperatura, večje so natezne napetosti v elementu. V nekem trenutku t_c postane natezna napetost zaradi temperaturnega krčenja enaka, kot je natezna trdnost betona, kar privede do prvih razpok v betonu. Efektivna temperatura, ki povzroči razpokanje betona, je razlika med temperaturo, pri kateri so bile napetosti v elementu enake nič in med temperaturo pri razpokanju elementa.

4.2 Tehnološki ukrepi za zmanjševanje tvorbe razpok v masivnih betonih

4.2.1 Uporaba ustrezne sestave betona

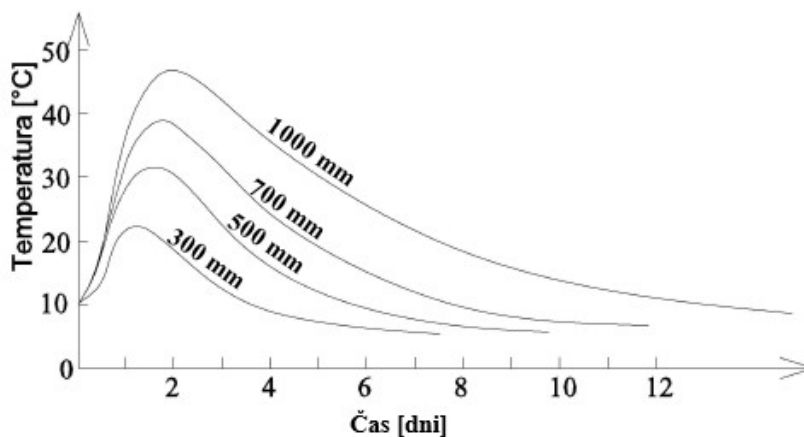
Pri masivnih betonih je potrebno veliko pozornost nameniti sestavi betonske mešanice, saj ta v veliki meri vpliva na temperaturo v strjujočem se betonu. Sestavina, ki na temperaturo betona v času strjevanja najbolj vpliva, je cement, ki zaradi sproščanja toplote tekom hidratacije zelo povečuje temperaturo v betonu. Ker pa ima cement tudi večji temperaturni razteznostni

koeficient, to zelo vpliva na nevarnost nastajanja razpok v betonu. Večja količina cementa v betonski mešanici sicer nemalokrat pride prav, saj cement ravno s svojim velikim sproščanjem toplote pripomore k višjim temperaturam betona, kar pride prav na primer pri betoniranju v zimskem času. Pri masivnih betonih pa je potrebno količino cementa zmanjšati, da imamo čim manjši temperaturni gradient med površino betona in njegovo notranjostjo. V masivnih betonih je za zmanjševanje razpok priporočljivo uporabljati tudi cemente z višjo natezno trdnostjo. V betonu moramo torej uporabiti optimalno količino posameznih sestavin betona, ki nam bo dala zahtevane karakteristike betona, hkrati pa bo zadostila pogojem glede obdelavnosti in temperature tekom strjevanja betona.

4.2.2 Ustrezna izbira velikosti in geometrije betonskih blokov

Ustrezna izbira velikosti in geometrije betonskih blokov zelo vpliva na temperaturo znotraj betonskega bloka. Beton se namreč v času strjevanja zaradi hidratacije cementa segreva. Če so dimenzije betonskega bloka dovolj majhne, se strjujoča notranjost betona lahko hladi preko zunanjih sten. Če pa je betonski blok velik, je temperaturni gradient med notranjostjo in zunanostjo betonskega bloka lahko že zelo velik. Zaradi tega prihaja do razpok v betonih. Vendar pa ima zmanjševanje dimenzij betonskih blokov slabo posledico, to so delovni stiki. Manjši ko so bloki, več bo delovnih stikov. Delovni stik pa je slabo mesto na konstrukciji, ki mu je potrebno posvetiti zelo veliko pozornosti. Iz tega razloga je potrebno izbrati neko optimalno srednjo pot. Kakovost izvedenega delovnega stika se ponavadi preverja s preskusi vodotesnosti in sprijemnosti. Za čim boljše izveden delovni stik je potrebno posebno pozornost nameniti naslednjim faktorjem:

- Pred betoniranjem novega betonskega bloka je potrebno površino prejšnjega temeljito očistiti in pripraviti, da se zagotovi čim boljše sprijemljivost starega in novega betona. Čiščenje betonske površine strjenega betona izvedemo z vodnim curkom pod pritiskom. Po čiščenju je potrebno poskrbeti, da na površini strjenega bloka ni stoječe vode.
- Na površino strjenega betonskega bloka naneseemo vezni sloj, ki vsebuje nekoliko večjo količino cementa kot celoten blok, kar zagotovi večjo sprijemljivost.



Slika 13: Vpliv debeline stene na temperaturo v betonskem elementu [13]

Slika 13 prikazuje vpliv oddaljenosti točke od površine na temperaturo znotraj strujočega se betonskega elementa. Sestava betonske mešanice je bila v vseh primerih enaka. Razvidno je, da večja kot je oddaljenost, večja je temperatura v jedru elementa, saj se z oddaljenostjo ne more zadostno in zadosti hitro ohlajati skozi zunanje površine elementa.

4.2.3 Hlajenje sestavin sveže betonske mešanice

Če je temperatura svežega betona zelo visoka, zaradi hitrega odvijanja procesa hidratacije nastanejo produkti, ki imajo slabše mehanske karakteristike, tako da se v strukturi betona pojavi povečano število mikrorazpok.

Ukrepi za zmanjšanje začetne temperature svežega betona so:

- Voda za beton naj ima čim manjšo temperaturo v času vgradnje. Shranjujemo jo v cisternah, vkopanih v zemljo in temperaturno izoliramo cevi za dovod vode do betonarne.
- Vodo v betonski mešanici lahko zamenjamo z določeno količino ledu.
- Možna je tudi uporaba tekočega dušika za hlajenje agregata.
- Cement naj ima čim manjšo temperaturo v času vgradnje. Silos za cement temperaturno zaščitimo, da temperatura uporabljenega cementa ni previsoka, vendar pa cement tudi ne sme biti podhlajen.
- Agregat naj ima čim manjšo temperaturo v času vgradnje. To lahko dosežemo s pokrivanjem deponij agregata ali dodatnim hlajenjem.
- Hruške za prevoz sveže betonske mešanice do mesta vgradnje ustrezno izoliramo oziroma jih ohladimo pred polnjenjem s svežim betonom.

Preglednica 6: Specifične toplote glavnih sestavin betona [22]

material	Specifična toplota [Kj/KgK]
AGREGAT	0,84
CEMENT	0,84
VODA	4,2

T_b temperatura betona

m_b masa betona

c_b specifična toplota betona

T_a temperatura agregata

m_a masa agregata

c_a specifična toplota agregata

T_v temperatura vode

m_v masa vode

c_v specifična toplota vode

T_c temperatura cementa

m_c masa cementa

c_c specifična toplota cementa

Izračun temperature sveže betonske mešanice: [12]

Specifična toplota
Betona (Preglednica 6):
$$c_b = \frac{m_a}{m_b} \cdot c_a + \frac{m_c}{m_b} \cdot c_c + \frac{m_v}{m_b} \cdot c_v$$

Kalorična enačba:
$$T_b \cdot m_b \cdot c_b = T_a \cdot m_a \cdot c_a + T_c \cdot m_c \cdot c_c + T_v \cdot m_v \cdot c_v$$

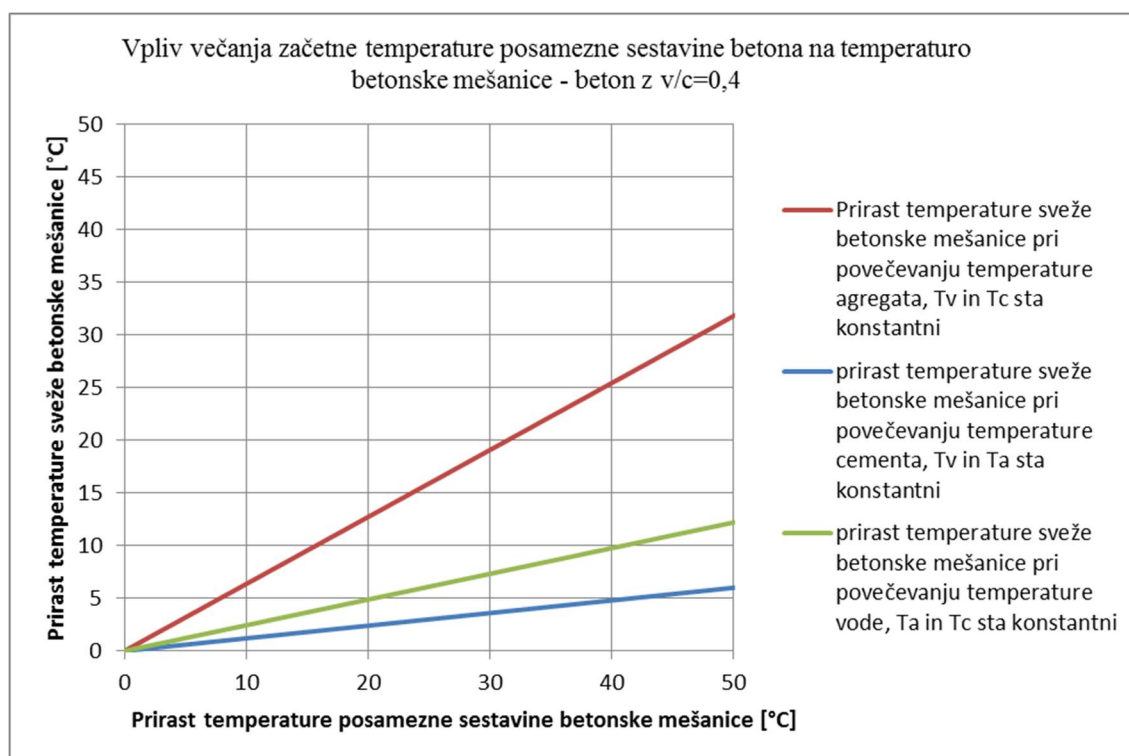
$$T_b \cdot m_b \cdot c_b = T_a \cdot m_a \cdot 0,84 + T_c \cdot m_c \cdot 0,84 + T_v \cdot m_v \cdot 4,2$$

$$T_b \cdot m_b \cdot \frac{c_b}{4,2} = (T_a \cdot m_a + T_c \cdot m_c) \cdot 0,2 + T_v \cdot m_v$$

$$T_b \cdot m_b \cdot \frac{\frac{m_a}{m_b} \cdot 0,84 + \frac{m_c}{m_b} \cdot 0,84 + \frac{m_v}{m_b} \cdot c_v}{4,2} = (T_a \cdot m_a + T_c \cdot m_c) \cdot 0,2 + T_v \cdot m_v$$

$$T_b \cdot m_b \cdot \left(\frac{m_a + m_c}{m_b} \cdot 0,2 + \frac{m_v}{m_b} \right) = (T_a \cdot m_a + T_c \cdot m_c) \cdot 0,2 + T_v \cdot m_v$$

$$T_b = \frac{0,2 \cdot (T_a \cdot m_a + T_c \cdot m_c) + T_v \cdot m_v}{0,2 \cdot (m_a + m_c) + m_v} \rightarrow \text{temperatura sveže betonske mešanice}$$



Slika 14: Vpliv večanja začetne temperature sestavin betona na temperaturo betonske mešanice

Slika 14 prikazuje, da na povišanje začetne temperature sveže betonske mešanice najbolj vpliva povišana temperatura agregata v betonski mešanici. Iz tega lahko sklepamo, da če

želimo najbolj učinkovito in enostavno zmanjšati začetno temperaturo sveže betonske mešanice, je najbolj racionalno zmanjšati temperaturo agregata v času zamešanja betonske mešanice. Najmanjši vpliv na končno temperaturo sveže betonske mešanice ima zmanjševanje temperature cementa, saj je cement v betonski mešanici zastopan v premajhni količini. Da bi imelo povečevanje temperature cementa enak vpliv kot večanje temperature vode, bi morala biti količina cementa 5x večja od količine vode v betonski mešanici, kar pomeni vodocementno razmerje 0,2, to pa je premajhno v/c razmerje, saj je beton s tako nizkim vodocementnim razmerjem praktično nemogoče vgraditi.

4.2.4 Nega betona v času strjevanja

Za čim večje preprečevanje razpok zaradi plastičnega krčenja in da ne zmanjšamo trdnosti betona zaradi izhajanja vlage iz betona, moramo beton tekom strjevanja zaščititi pred uhajanjem vlage v čim večji meri oziroma moramo zunanjo vlago tudi dodajati.

4.2.5 Izbira primerne časa za betoniranje

Za zmanjševanje razpok v betonu v poletnih mesecih je pomembna predvsem ustrezna izbira časa betoniranja. Za čim manjši vpliv zunanje temperature na sestavine betonske mešanice je najprimernejši čas za zamešanje betonske mešanice in za vgradnjo nočni čas, ko se sestavine že dovolj ohladijo.

4.2.6 Primerna vgradnja sveže betonske mešanice

Beton mora po zamešanju čim krajši čas potovati do mesta vgradnje in s čim manj motečimi dejavniki.

4.3 Klasifikacija razpok po CEB

Nastanek zgodnjih razpok v betonu navadno povzroči na gradbišču hidrotehničnega objekta veliko vznemirjenje. V praksi dejansko ni betona brez razpok. Toda njihovo število in velikost se lahko zmanjšata. Najprej je pomembno ugotoviti vzroke za nastanek razpok [26].

Preglednica 7: Klasifikacija razpok po CEB [26]

Vrsta razpoke	Čas in mesto nastanka razpok	Vzrok	Preprečevanje
Plastične razpoke	10 min do 3 ure, nad armaturo, na robovih nosilcev, na mestu spremembe dimenzij, plitve in široke na površini	izločanje vode in posedanje po kompaktiranju, hitro zgodnje sušenje	aeranti, fini pesek, zadrževanje vode, revibriranje
Zgodnje temperaturne spremembe	1 dan do 2 tedna, zunanje ali notranje omejitve na debelih betonskih elementih	temperaturni gradient, hitro hlajenje	toplotna izolacija, nizka začetna temperatura betona
Dolgotrajno krčenje zaradi sušenja	več tednov ali mesecev, na srednji tretjini razpona, tanjše plošče in stene	slaba nega, zgrešene dilatacije in delovne rege	zmanjšanje količine vode, boljša nega
Slučajne	1 do 7 dni, stene in plošče, ob opažu	preveč malte, tekoči beton. slaba nega	boljša nega, popraviti sestavo betona in zaključno obdelavo
Zaradi korozije armature	po 2 ali več letih, stebri in nosilci, posebno v vogalih, plošče	premajhen zaščitni sloj, kloridi	odpraviti vzroke
Alkalno – agregatna reakcija	po 5 ali več letih, v vlažnih okoljih, plitve in široke razpoke, krateri, obarvani gel	reaktivni agregati in visoke alkalije	uporaba pucolanov, nizkoalkalni cementi, odstraniti vlago

5 OBDELAVNOST BETONSKE MEŠANICE

Pri masivnih betonih največkrat stremimo k čim manjši temperaturi znotraj betonskega elementa, da ne pride do prevelikih razlik med notranjostjo elementa in okolico, ki se ohlaja in segreva mnogo hitreje kot se segreva beton. Za zmanjšanje temperature je najenostavnejši ukrep zmanjšanje količine cementa v betonu, saj ta zaradi hidratacije najbolj pripomore k visokim temperaturam betona tekom strjevanja. Vendar pa pri prevelikem zmanjšanju količine cementa v betonski mešanici pride do trdo plastične konsistence sveže betonske mešanice, kar pomeni, da je vgradljivost in obdelavnost takšne mešanice zelo otežena. V takem primeru je potrebno najti primerno tehnologije vgradnje betona, saj je tehnologija vgradnje betona zelo odvisna od vodocementnega razmerja.

Obdelavnost sveže betonske mešanice opišemo z njeno konsistenco (Preglednica 8).

Preglednica 8: Klasifikacija konsistence

Opis (meje) konsistence	Mere konsistence	
	Posed (mm)	Razlez (mm)
Zemeljsko vlažna	-	-
Trdoplastična	10 – 40	≤340
Srednjeplastična	50 – 90	350 – 410
Mehkoplastična	100 – 150	420 – 480
Zelo mehkoplastična	-	490 – 550
Tekoča	160 – 210	560 – 620
Zelo tekoča	≥ 220	≥ 630

5.1 Vpliv agregata

Ker agregat zavzema največjo prostornino izmed vseh sestavin v betonu, pomembno vpliva na vse lastnosti tako sveže betonske mešanice kot tudi strdelega betona. Tehnološka predelava agregata vpliva na konsistenco in kohezijo. Agregat s slabimi karakteristikami ima negativen vpliv na končno trdnost betona, odpornost proti različnim oblikam agresivnega vpliva okolja in deformacijske lastnosti.

Zrna agregata so lahko naravno ali umetno oblikovana. Med naravno oblikovana zrna štejemo na primer zrna nanešenega proda, ki ga pridobivamo z izkopom rečnega gramoza, med umetno oblikovana zrna pa štejemo drobljenec, ki ga pridobivamo v kamnolomih z drobljenjem kamnin večjih dimenzij. Prod ima zaobljeno obliko agregata, kar zelo izboljša obdelavnost oziroma vgradljivost sveže betonske mešanice. Drobljenec je homogen, kar zmanjša notranje

napetosti, sprejemljivost cementnega kamna s površino zrn je boljša. Ker so zrna drobljenca nepravilnih oblik, to vpliva na boljšo nosilnost betona zaradi boljše povezave med agregatom in cementom.

Da bi ceno betona čim bolj zmanjšali, stremimo k čim večjim zrnom agregata, saj lahko s tem zmanjšamo potrebno količino veziva, vplivamo pa na poslabšanje obdelavnosti in vgradljivosti sveže betonske mešanice. Zaradi prevelike količine grobega agregata v betonu lahko pride tudi do prevelike segregacije. Zaradi velikih stičnih površin ima beton z velikimi zrni agregata tudi nižjo trdnost. V izogib nezaželenim pojavom in lastnostim v betonu je potrebno najti optimalno zrnovostno strukturo agregata glede na naše želje, zahteve in želene lastnosti tako sveže betonske mešanice kot tudi strjenega betona.

V izogib omenjenim slabim lastnostim moramo v beton dodati ustrezno količino drobnih zrn agregata velikosti približno 0,25 mm. Drobna zrna zadržujejo vodo in zmanjšajo možnost za nastanek segregacije. Iz tega razloga je prisotnost teh zrn pomembna v betonih z manjšo količino cementa.

Za ustrezno vgradljivost betona je potrebno v betonsko mešanico zamešati primerno količino finih delcev, katere predstavljajo delci agregata manjši od 0,125 mm, mineralni dodatki in cement. V kolikor zmanjšamo količino cementa, jo je priporočljivo zamenjati s finimi delci v drugi obliki.

5.2 Vpliv cementa

Cement vpliva v precejšnji meri na obdelavnost in vgradljivost sveže betonske mešanice. Ker je cement fin, to zelo pripomore k dobri vgradljivosti, saj so pri obdelavnosti problem grobi in veliki delci. Pri masivnih betonih stremimo k zmanjšanju količine cementa v betonu, to pa predstavlja problem z vidika vgradljivosti, saj je za dobro vgradljivost potrebna zadostna količina cementne paste, ki deluje kot nekakšen lubrikant za agregat. Beton z veliko količino cementa in malo vode ima veliko kohezivnost in postane lepljiv. Iz tega razloga je potrebno najti optimalno količino vseh sestavin, da zadostimo vsem pogojem tako sveže betonske mešanice kot tudi strjenega betona in njegove trajnosti.

5.3 Vpliv kemičnih dodatkov

Če želimo zmanjšati količino vode v betonski mešanici oziroma če želimo zmanjšati vodocementno razmerje, to vpliva na slabšo obdelavnost sveže betonske mešanice, kar lahko hitro privede do težav pri vgrajevanju. S primernimi kemičnimi dodatki povečamo obdelovalnost sveže betonske mešanice.

Superplastifikatorji, ki jih uporabljamo v ta namen, imajo v betonski mešanici podobno vlogo kot plastifikatorji, vendar pa v večji meri vplivajo na lastnosti betona kot plastifikatorji. Superplastifikatorji nimajo pomembnejšega vpliva na najvišjo doseženo temperaturo v strujočem se betonu.

5.4 Vpliv količine vode

Vsebnost vode v sveži betonski mešanici je najpomembnejši faktor za obdelavnost in vgradljivost betona. Večanje količine vode zvišuje obdelavnost betonske mešanice. Vendar pa se je potrebno izogibati prevelikim količinam vode v betonu, saj s tem poslabšamo druge pomembne lastnosti betona, ki vplivajo na njegove mehanske karakteristike in trajnost.

5.5 Transport svežega betona z nizko vsebnostjo cementa do mesta vgradnje

Najbolj priročen in najpogosteje uporabljan način vgrajevanja betona je s pomočjo črpalk, ki so lahko stacionarne ali mobilne, najpogosteje se uporablja mobilne. Vendar pa pri vgradnji betona s pomočjo črpalk problem nastopi pri vgradnji betona trdo plastične konsistence, kar masivni beton pogosto je, saj takšen beton ne more skozi cevi.

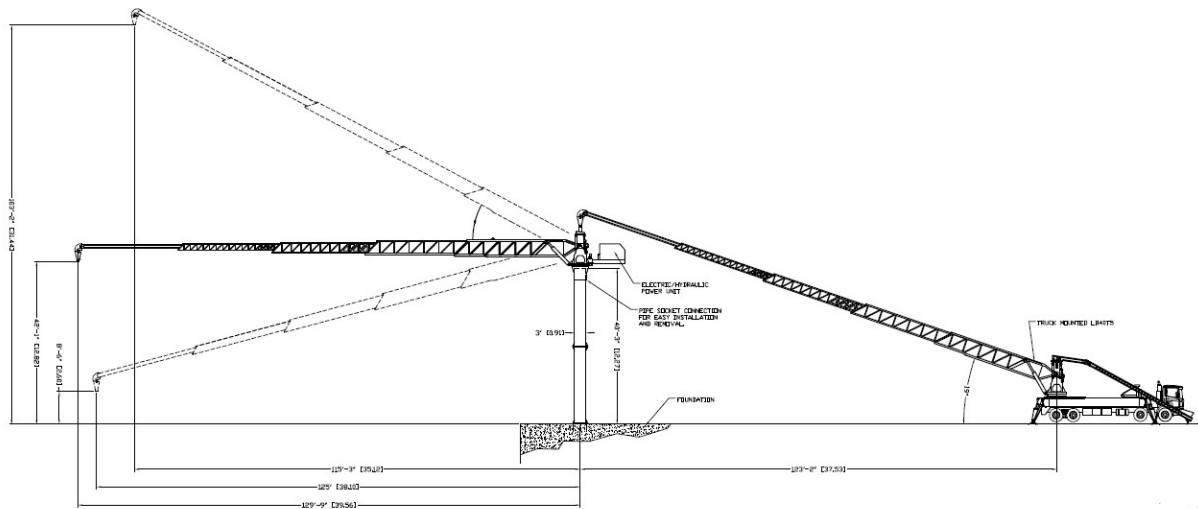
Zaradi tega je potrebno poiskati kakšen drug način vgradnje. Na gradbišču HE Brežice trenutno uporabljajo črpalke za vgradnjo betona, saj je konsistenca za vgradnjo s črpalkami primerna, vendar pa bi s spremembo recepture potrebovali drugačen način. Zaradi velikosti gradbišča hidroelektrarne je potrebno beton velikokrat vgrajevati v precej oddaljenem radiju, zato je potrebno najti primerno tehnologijo vgradnje tako z vidika časa kot tudi stroškov.

Za vgrajevanje trdo plastičnega betona na nedostopnih lokacijah se v svetu uporablja transportne trakove (Slika 15, Slika 16, Slika 17).

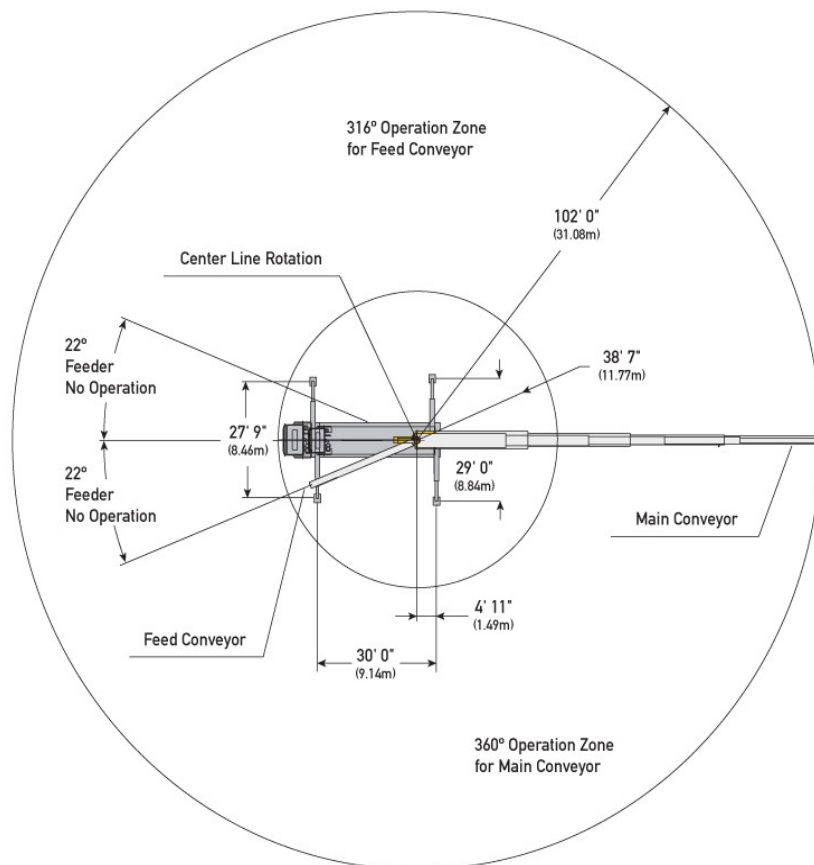
Transportni trakovi so uporabni za transport betona v horizontalni smeri, omejen pa je transport v vertikalni smeri. Zaradi svoje velike zmogljivosti so precej primerni za gradnjo pregrad in hidroelektrarn.



Slika 15: Transportni trak za vgradnjo betona [11]



Slika 16: Transportni trak z vmesnim stebrom [11]



Slika 17: Shema mobilnega transportnega traku [16]

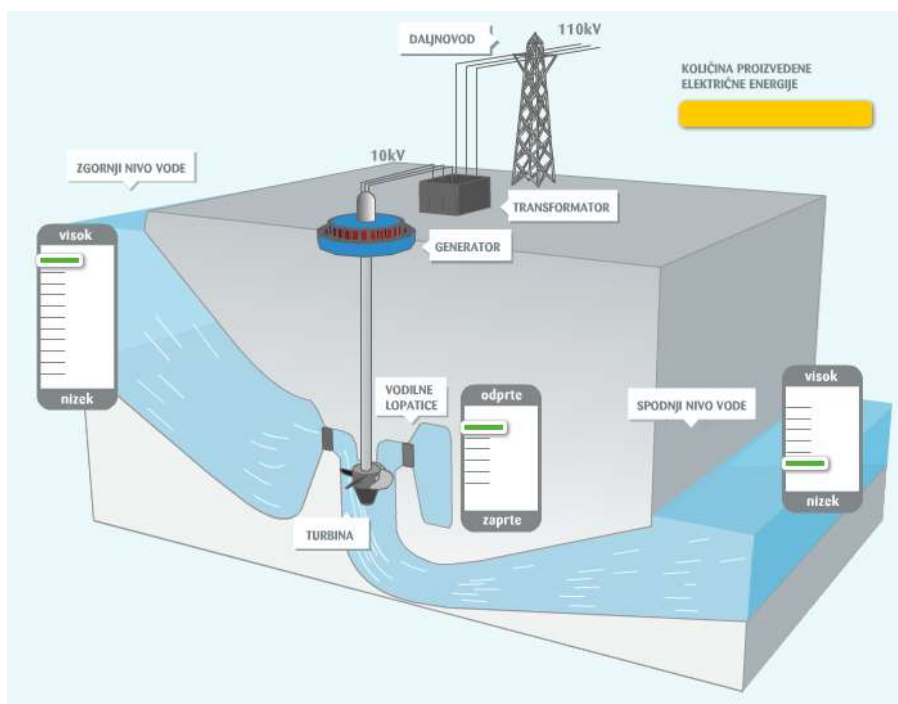
6 HIDROELEKTRARNE NA SPODNJI SAVI

Hidroelektrarne za proizvodnjo električne energije izkoriščajo potencialno energijo zajezone vode v akumulaciji, ki je ustvarjena z zaježitvijo rečnega toka s pregrado (Slika 18). Hkrati pa jezovna zgradba omogoča večjo poplavno varnost območja dolvodno od elektrarne, saj lahko s pomočjo hidroelektrarne kontroliramo rečni tok.

Hidroelektrarne lahko razvrščamo na različne načine, najbolj pogosta delitev pa je glede na njihovo velikost oziroma instalirano moč elektrarne:

- Velike hidroelektrarne; instalirana moč višja od 100 MW.
- Srednje hidroelektrarne: instalirana moč od 15 do 100 MW
- Male hidroelektrarne; instalirana moč od 1 do 15 MW
- Mini hidroelektrarne; instalirana moč od 100 kW do 1 MW
- Mikro hidroelektrarne; instalirana moč manjša od 100 kW

V Sloveniji sta dve veliki hidroelektrarni (Zlatoličje in Formin), na glavnih vodotokih prevladujejo srednje, na stranskih pa male in mini hidroelektrarne.



Slika 18: Delovanje HE [3]

Hidroelektrarne lahko med seboj delimo tudi na klasične in črpalne. Najbolj običajne v Sloveniji so klasične hidroelektrarne, ki jih predstavljata rečna pregrada in akumulacijsko jezero oziroma bazen. Za obratovanje izkorišča zalogo vode iz akumulacijskega bazena in ustvarjen hidravlični padec. Črpalna hidroelektrarna izkorišča potencialno energijo spodnjega in zgornjega akumulacijskega bazena. Ko je višek elektrike, črpalna iz spodnjega bazena prečrpa vodo v zgornji akumulacijski bazen, ko pa je potrebna proizvodnja električne energije, je obratno. Voda takrat teče iz zgornjega bazena v spodnji bazen in pri tem proizvaja elektriko.

Energija, ki jo pridobimo na ta način, je dražja od energije, pridobljene v klasični elektrarni, saj je za isto količino proizvedene elektrike potrebno porabiti več energije. Za črpanje vode iz spodnjega v zgornji bazen se namreč porablja že proizvedena energija. Zaradi možnosti hitrejšega reagiranja črpalne hidroelektrarne po višjih potrebah električne energije je taka elektrarna dobrodošla. Tovrstne elektrarne imajo velik pomen pri zagotavljanju stabilne preskrbe z elektriko v energetskega sistema [13].

Razlogi za izgradnjo verige HE so naslednji:

- okolju neškodljivi objekti in njihova dolga življenjska doba,
- ureditev vodotoka Save in boljši izkoristek ugodnega vira električne energije,
- del prihodka od koncesijske dajatve se lahko nameni izvajanju razvojnih programov,
- racionalna raba prostora,
- zagotavljanje novih delovnih mest,
- večja poplavna varnost,
- konkurenčnost slovenskega elektrogospodarstva,
- pripravljenost na povečevanje porabe električne energije,
- stabilnejše obratovanje energetskega sistema in večja samostojnost,
- bogatenje državnega kapitala,
- višja kakovost življenja.

Izgradnja verige hidroelektrarn na spodnji Savi je večnamenski projekt, ki pomembno prispeva k povečanju deleža proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov energije (Slika 19). Zgrajena veriga hidroelektrarn bo bistveno prispevala k povečanju zanesljivosti oskrbe z električno energijo, hkrati pa bo pripomogla tudi k povečanju deleža proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov [21].



Slika 19: Hidroelektrarne na spodnji Savi [4]

Preglednica 9: Primerjava hidroelektrarn na spodnji Savi

karakteristika	HE Vrhovo	HE Boštanj	HE Arto-Blanca	HE Krško	HE Brežice	HE Mokrice
Število agregatov	3	3	3	3	3	3
Nazivna moč elektrarne	34,2 MW	32,5 MW	39,12 MW	39,12 MW	45,3 MW	28,35 MW
Nazivni pretok elektrarne	500 m ³ /s	500 m ³ /s	500 m ³ /s	500 m ³ /s	500 m ³ /s	500 m ³ /s
Nazivni padec	8,1 m	7,47 m	9,29 m	9,14 m	11,00 m	7,47 m
Srednja letna proizvodnja	116 GWh	109 GWh	140 GWh	154 GWh	161 GWh	128 GWh
Kota zaježitve elektrarne	191,0 m.n.v.	182,2 m.n.v.	174,2 m.n.v.	164 m.n.v.	153 m.n.v.	141,5 m.n.v.
Srednji letni pretok	216 m ³ /s	193 m ³ /s	201 m ³ /s	205 m ³ /s	207 m ³ /s	261 m ³ /s
Prostornina akumulacije	8.600.000 m ²	8.000.000 m ³	9.950.000 m ³	6.310.000 m ³	19.300.000 m ³	8.300.000 m ³
Koristna prostornina akumulacije	1.160.000 m ³	1.170.000 m ³	1.300.00 m ³	1.180.00 m ³	3.400.000 m ³	2.640.000 m ³
Število prelivnih polj	5	5	5	5	5	6

6.1 HE Vrhovo

HE Vrhovo je prva v verigi hidroelektrarn na spodnji Savi. Jezovna zgradba HE Vrhovo je betonsko-težnostnega tipa.

Jezovno zgradbo sestavljajo strojnica, pet prelivnih polj in priključni zemeljski obrežni nasipi. V strojnici so nameščeni trije agregati (cevne turbine) s skupno požiralnostjo 500 m³/s. V konicah proizvodnje dajejo 34,2 MW moči, pri srednji letni proizvodnji 116 GWh. Prelivna polja so opremljena s segmentnimi zapornicami z nasajeno zaklopko in zaježitveno višino 10,5 m. Prevodna sposobnost prelivnih polj je 3100 m³/s, kar je enako 100-letni vodi [19].

6.2 HE Boštanj

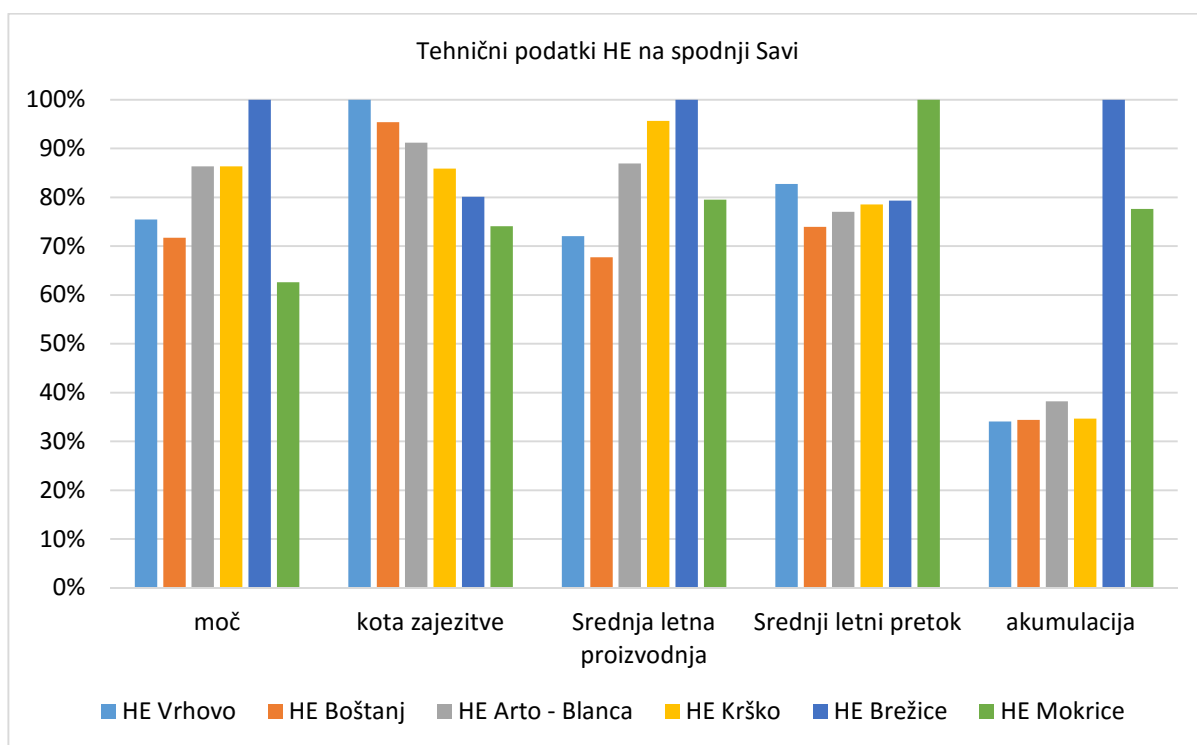
HE Boštanj je druga v verigi hidroelektrarn na spodnji Savi. Njena nazivna moč znaša 32,5 MW. Je pretočno akumulacijskega tipa z nameščenimi tremi cevni agregati z nazivnim pretokom 500m³/s. Ima 5 prelivnih polj in povprečno letno proizvodnjo 109 GWh. Z gradnjo HE Boštanj so začeli leta 2002, leta 2006 pa je pričela s poskusnim obratovanjem.

6.3 HE Arto – Blanca

HE Arto – Blanca je tretja v verigi hidroelektrarn na spodnji Savi. Njena nazivna moč znaša 39 MW. Je pretočno akumulacijskega tipa, s tremi vertikalnimi agregati z nazivnim pretokom 500 m³/s. HE Arto – Blanca ima 5 prelivnih polj in povprečno letno proizvodnjo 140 GWh.

6.4 HE Krško

HE Krško je četrta v verigi hidroelektrarn na spodnji Savi. Njena nazivna moč znaša 39 MW. Je pretočno akumulacijskega tipa, s tremi vertikalnimi agregati z nazivnim pretokom 500 m³/s. HE Krško ima 5 prelivnih polj in povprečno letno proizvodnjo 154 GWh.



Slika 20: Tehnični podatki hidroelektrarn na spodnji Savi

Slika 20 in

Preglednica 9 prikazujeta primerjavo tehničnih podatkov hidroelektrarn na spodnji Savi. Pri vsakem tehničnem podatku je kot referenčna vrednost vzeta vrednost tiste elektrarne, ki ima največjo zmogljivost v obravnavani kategoriji. Iz slike je tako enostavno ugotoviti, katera elektrarna je zmoglivejša v posamezni karakteristiki. Največjo moč ima elektrarna HE Brežice, najmanjšo pa bo imela HE Mokrice po izgradnji in sicer 63% moči HE Brežice. Najvišjo koto zaježitve ima HE Vrhovo, najmanjšo pa HE Mokrice. Najvišjo srednjo letno proizvodnjo bo imela HE Brežice, prav tako največjo akumulacijo, najvišji srednji letni pretok pa bo na HE Mokrice.

6.5 HE Brežice

HE Brežice (*Slika 21*) je peta hidroelektrarna v verigi šestih HE na spodnji Savi z nazivno močjo 45 MW. Je pretočno akumulacijskega tipa z nameščenimi tremi vertikalnimi agregati z nazivnim pretokom 500 m³/s, s petimi pretočnimi polji in povprečno letno proizvodnjo 161 GWh. HE Brežice bo v slovenski elektroenergetski sistem prispevala približno en odstotek trenutne letne proizvodnje električne energije v Sloveniji, proizvajala pa bo tudi vršno energijo ter nudila možnosti za prodajo sistemskih storitev. Predvidena je polna avtomatizacija elektrarne in obratovanje brez posadke ter daljinsko vodenje iz centra vodenja [4].

Hidroelektrarna Brežice bo imela skupaj s hidroelektrarno Mokrice funkcijo izravnalnega bazena za celotno verigo hidroelektrarn na Savi. HE Brežice sestavljata jezovna zgradba in akumulacijski bazen, ki sega do jezovne zgradbe hidroelektrarne Krško [4].

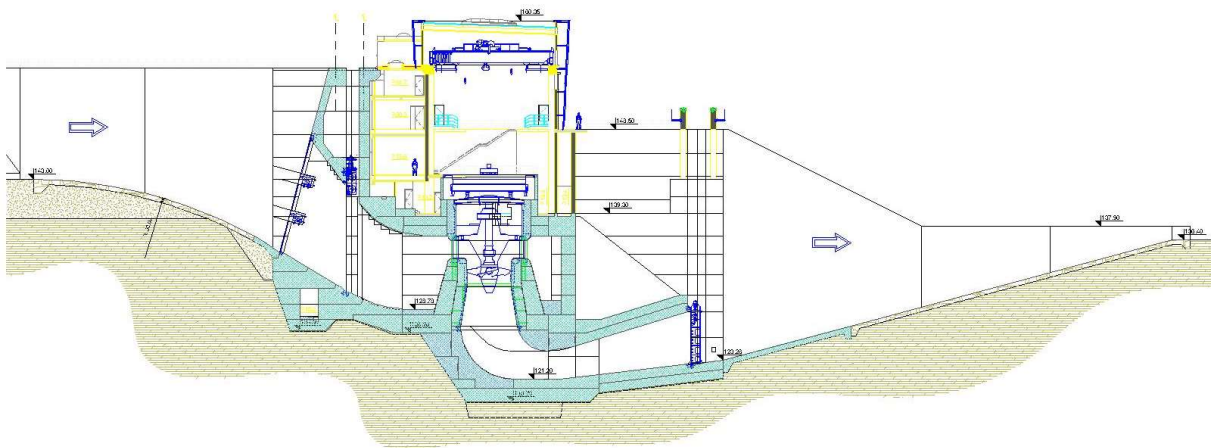


Slika 21: HE Brežice [4]



Slika 22: HE Brežice med gradnjo – november 2015 (vir: lasten)

HE Brežice (Slika 22, Slika 23) je rečni tip elektrarne. Rečni tip elektrarne pomeni, da jezovna zgradba hkrati predstavlja tudi pregradno konstrukcijo.



Slika 23: Prečni prerez strojnice HE Brežice [5]

6.5.1 Tehnični opis

HE Brežice je rečni tip hidroelektrarne, kjer jezovna zgradba istočasno predstavlja tudi pregradno konstrukcijo. Jezovno zgradbo sestavljajo naslednji objekti:

- strojnica na levem bregu Save,
- prelivna polja s podslapji,

- priključni nasip oz. plato na desnem bregu,
- priključni nasip oz. plato na levem bregu,
- navezavo strojnice in prelivnih polj dolvodno na oba bregova in gorvodno na nasipa bazena predstavljajo krilni zidovi.

Jezovna zgradba se nahaja cca 320 m gorvodno od obstoječega jeklenega mostu čez Savo, oziroma cca 1100 m gorvodno od sotočja Save in Krke. Mikrolokacija je bila v okviru idejnih rešitev (IBE, 2007) utemeljena predvsem s hidravlično-hidrološkega in geološkega vidika.

Lokacija HE Brežice je bila s predhodnimi študijami umeščena v prostor z razmeroma malo manevrskega prostora za spremembe. Mikrolokacijo opredeljujejo:

- sotočje Save in Krke z vsemi vplivi na hidravliko, predvsem na visokovodne razmere,
- bližina mostov in komunikacij ter mestnega jedra Brežic,
- poplavne površine v zaledju bodočih energetskih nasipov, s katerih je potrebno zagotoviti odtekanje vode oziroma neoviran pretok v času največjih poplav (levi in desni breg),
- dolvodna struga, v kateri je predvideno poglobljanje za zagotavljanje večjega energetskega izkoristka in za izboljšanje poplavne varnosti,
- geološka sestava tal na mikrolokaciji.

Na podlagi obstoječih geoloških podatkov je bilo ugotovljeno, da je matična hribina gorvodno od predlaganega profila HE v večji globini in bi bile zato bolj gorvodne lokacije za temeljenje manj ugodne. Na tej osnovi je bila brez variantiranja ohranjena predlagana lokacija pregradne osi [5].

Gladina zgornje vode bo nihala v razponu med 151,90-153,00. Kota gladine spodnje vode je odvisna od pretoka v profilu jezovne zgradbe. Obstajata dve krivulji: prva za čas do izgradnje in druga za čas po izgradnji dolvodne HE Mokrice, ko bo spodnjo vodo HE Brežice predstavljala zajezitev HE Mokrice.

Pri instaliranem pretoku 500 m³/s je pred izgradnjo HE Mokrice gladina spodnje vode na koti 140,48, po izgradnji pa bo 142,00 pri zgornji in 141,06 pri spodnji obratovalni koti HE Mokrice.

Da bi za čas do izgradnje dolvodne hidroelektrarne HE Mokrice povečali razpoložljivi padeč in posledično moč in proizvodnjo elektrarne, bodo dolvodno od elektrarne strugo poglobili.

6.6 HE Mokrice

HE Mokrice je zadnja hidroelektrarna v verigi šestih HE na spodnji Savi z nazivno močjo 28 MW. Je pretočno akumulacijskega tipa z nameščenimi tremi cevni agregati z nazivnim pretokom 500 m³/s, s šestimi pretočnimi polji in povprečno ocenjeno letno proizvodnjo 128 GWh [4].

7 BETONSKA DELA NA HE BREŽICE

7.1 Masivni betoni na HE Brežice

HE Brežice je grajena iz velike količine masivnih betonskih blokov. Za masivni beton se šteje vsak element, ki ima najmanjšo dimenzijo večjo od 50 cm [2]. Sestavo betona za gradnjo HE Brežice so določili na osnovi rezultatov začetnih preskusov, da so dosegli zahtevane lastnosti po projektu. V okviru teh preiskav so morali obvezno preskusiti priraščanje hidratacijske toplote strjujočega masivnega betona v adiabatnih pogojih.

7.1.1 Zahteve za izdelavo hidrotehničnih betonov na HE Brežice

Pri projektiranju sestave hidrotehničnih betonov, je bilo potrebno upoštevati naslednje zahteve [5]:

- izbrati je bilo potrebno čim večji premer zrna D_{max} kamenega agregata,
- določiti je bilo potrebno čim nižje možne vsebnosti cementa ob doseganju vseh zahtev tehničnih pogojev,
- določiti je bilo potrebno optimalne količine mineralnih in kemijskih dodatkov (pepeli in drugo),
- začetna temperatura svežega masivnega betona ni smela biti višja od $+ 25^{\circ}\text{C}$,
- zagotoviti je bilo potrebno dovolj počasen razvoj hidratacijske toplote in dovolj zmanjšano stopnjo krčenja - največja dovoljena temperatura strjujočega se betona $\leq + 55^{\circ}\text{C}$, gradient temperature v bloku je smel znašati največ 25°C na 0,5 m v katerikoli smeri in povprečen skrček pri starosti betona 180 dni ≤ 0.7 mm/m,
- pri uporabi nizkohidratacijskih cementov ali mineralnih dodatkov za upočasnitev razvoja hidratacijske toplote se je za merodajno starost, pri kateri so se ugotovljale lastnosti betona, določilo termin 90 dni,
- zagotoviti je bilo potrebno zadostno stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV-II – največja globina prodora vode $e_{max} = 30$ mm pri starosti betona 90 dni,
- izbrati je bilo potrebno postopke manipulacije, transporta in betoniranja ter izbor konsistenčne stopnje. Med manipulacijo, transportom in vgrajevanjem ni smelo priti do segregiranja in naknadnega izločanja vode,
- betoni, izpostavljeni stalnemu vlaženju in sušenju in ki niso bili začasne konstrukcije, so morali izkazovati notranjo odpornost proti zmrzovanju/tajanju do 200 ciklov.

7.1.2 Izvedba betonskih del

7.1.2.1 Projekt betona

Pri gradnji HE Brežice je moral izvajalec upoštevati točno določene zahteve. Najmanj tri dni pred začetkom betoniranja posameznih delov ali sklopov objekta je moral inženirju predložiti projekt betona, v katerem so bile določene količine in sestave betonskih mešanic, ki so jih uporabljali na delu ali sklopu objekta, kakovostne zahteve za doseg projektiranih lastnosti

betona, načrt betoniranja, organizacijo in opremo za proizvodnjo, manipulacijo in vgrajevanje, način negovanja betona, program tekočih preskusov in način jemanja vzorcev za preskuse ter način opaževanja in razopaževanja, odranja in montaže prefabriciranih elementov, v kolikor to ni bilo določeno že v projektu. Projekt betona je moral potrditi inženir pred začetkom betoniranja.

7.1.2.2 Priprava betona

Vse betone za HE so proizvajali na betonarskem obratu, ki ima urejeno certificirano proizvodnjo.

7.1.2.3 Transport in manipulacija svežega betona

Transporti in manipulacija svežega betona pred vgradnjo so morali biti izvedeni tako, da ni prišlo do segregacije, izsuševanja, zmočenja, prevelike ohladitve ali segrevanja in spremembe konsistence. Pri uporabi vmesnih prekladalnih silosov je bilo potrebno s preskusom po določilih tehničnih pogojev določiti časovno omejitev za "čakanje" tega betona v mirujočem stanju, kar je moralo biti navedeno v projektu betona. Pri vseh oblikah manipulacije je bilo potrebno preprečiti segregiranje betona. Višina prostega padanja betona je bila za posamezne vrste betona ustrezno omejena. V ta namen je moral biti betonarski obrat oziroma gradbišče opremljeno s primernimi kontraktorskimi cevmi, drsnimi žlebovi ali transportnimi trakovi. Padajoči beton ni smel prosto naletavati na armaturo. Zaradi segregacije takšnega betona ni bilo dovoljeno vgraditi. Beton, ki se mu je zaradi predolge manipulacije ali transporta vgradljivost tako spremenila, da ga z obstoječo gradbiščno opremo ni bilo mogoče več kakovostno vgraditi, je bil zavrnjen. Naknadno popraviljanje konsistence betona ni bilo dovoljeno. Betone, ki bi pri transportu lahko segregirali, je bilo dovoljeno transportirati le s posebnimi transportnimi mešalniki.

7.1.2.4 Vnašanje betona v opaž in vgrajevanje

Pred vsakim betoniranjem je moral izvajalec inženirju predložiti plan betoniranja z vsemi podatki o sestavi in načinu uporabe betona ter tekoče kontrole vključno z navedbo odgovorne osebe izvajalca, ki je vodila betoniranje. Z betoniranjem so lahko pričeli, ko je inženir potrdil plan betoniranja in prevzel armaturo ter podlago ali opaže. Beton so vnašali v približno vodoravnih slojih tako, da ni segregiral in da je bilo med vibriranjem naslednjega sloja še možno revibriranje (dodatno zgoščevanje) predhodnega sloja. Debelina slojev ni smela presežati 60 cm. Dodatno zgoščanje sveže betonske mešanice je bilo odvisno od sestave betona, temperature zraka in betona, vrste uporabljenih naprav za zgoščanje, velikosti konstrukcijskega elementa. Optimalni čas so je ugotovili eksperimentalno na licu mesta med vgrajevanjem, ob upoštevanju rezultatov meritev v okviru začetnih preskusov. Vsekakor pa je »prehitro« dodatno zgoščevanje boljše od aplikacije samo primarnega zgoščevanja, ki ne prepreči naknadnega posedanja betona. Pri vgrajevanju beton ni smel prosto padati z višine večje kot 1 m, razen če je bilo to določeno s projektom betona, ki ga je potrdil inženir. Zgoščevanje svežega betona so, v kolikor ni bilo to s projektom betona, ki ga je potrdil inženir,

drugače določeno, izvajali z uporabo ustreznih vibratorjev (pervibratorji, opažni vibratorji, vibracijske letve, planvibratorji).

7.1.2.5 Betoniranje v posebnih pogojih

V dežju se betoniranje praviloma ni izvajalo, razen v posebnih primerih, ko je inženir po preveritvi zaščitnih ukrepov, ki jih je izvršil izvajalec, takšno betoniranje odobril z vpisom v gradbeni dnevnik. Če je pričelo deževati sredi poteka betoniranja, je bilo potrebno še nevgrajeni beton v transportnih in manipulacijskih sredstvih zaščititi pred razmočenjem. Že vgrajeni beton je bilo potrebno čim hitreje zgostiti in zaščititi njegovo površino pred izpiranjem. Morebitno vodo, ki se je nabrala na površini betona ali v opažu, je bilo potrebno pred nadaljevanjem betoniranja odstraniti.

Pri močnem sončnem sevanju in suhem vetru je moral biti beton zaščiten med transportom, manipulacijo in po dokončani vgradnji tako, da je bilo preprečeno izsuševanje. Pri temperaturah preko $+30^{\circ}\text{C}$ je moral biti beton vgrajen in zaključno obdelan pred pretekom 30 minut od zaključka transportne manipulacije. Maksimalna dovoljena temperatura betona pri vgrajevanju je bila $+25^{\circ}\text{C}$.

Pri betoniranju pozimi je moral izvajalec zagotoviti temperaturo svežega betona najmanj $+7^{\circ}\text{C}$, izjemoma, s posebnim pisnim dovoljenjem inženirja pa $+5^{\circ}\text{C}$. Vgrajeni beton (predvsem proste površine) se ni smel ohladiti pod $+5^{\circ}\text{C}$ do časa, dokler ni dosegel tlačne trdnosti najmanj $7,5\text{ N/mm}^2$. Prav tako je moral izvajalec zagotoviti temperaturo podlage (temeljna tla ali star beton oziroma masivni opaži) najmanj $+5^{\circ}\text{C}$ v globino do 10 cm globoko. V primeru nevarnosti nastajanja razpok zaradi prevelikih temperaturnih gradientov je lahko inženir od izvajalca zahteval izvedbo dokaznega betoniranja karakterističnega bloka z meritvami notranjih temperatur in glede na ugotovljene rezultate meritev zahteval spremembo velikosti blokov ali tehnologije oziroma sestave betona.

7.1.2.6 Poročilo o betoniranju

Izvajalec je moral dnevno za vsak odsek betoniranja izdelati poročilo o poteku betoniranja. Takšno poročilo je moralo vsebovati označbo odseka in čas betoniranja, prevzem opaža, armature in vrste zaščitnih ukrepov, sestavo (šifro) betona in vgrajeno količino, temperaturo betona in okolice, morebitne odmike od projekta betona, posebne dogodke.

7.1.2.7 Zaščitni ukrepi in nega betona

Skladno z določili v tehničnih pogojih je bil izvajalec dolžan zaščitne ukrepe in nego betona podrobno opredeliti v elaboratu izvedbe posameznih del oz. v projektu betona. Vsako površino betona je bilo potrebno najmanj 3 dni po zaključku betoniranja ščititi pred izsuševanjem z vlaženjem, opršilnimi zaščitnimi sredstvi (filmi) ali s prekritjem s folijami (Slika 24). Inženir je lahko po svoji presoji v odvisnosti od sestave betonov in vremenskih pogojev zahteval podaljšanje zaščitnih ukrepov do starosti betona največ 14 dni. Način nege delovnih stikov ni

smel vplivati na kasnejšo sprijemljivost z novim betonom. Zato se opršilna sredstva v ta namen praviloma niso uporabljala.

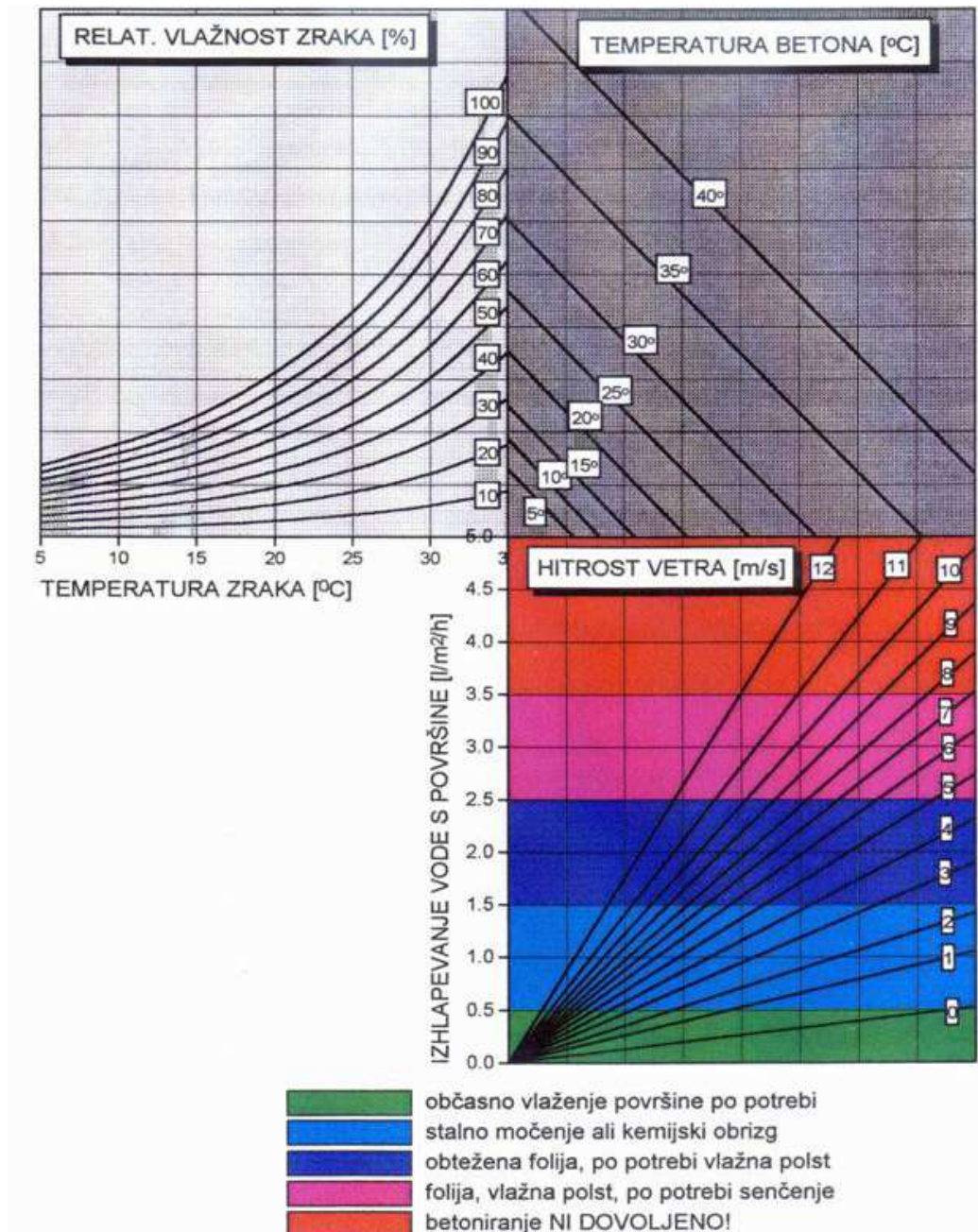
V primerih nenadnih vremenskih sprememb, ko inženir ni mogel zahtevati dodatnih zaščitnih ukrepov, je bil izvajalec dolžan upoštevati določila ne glede na vrsto že potrjene zaščite, ki jo je inženir odobril pred začetkom betoniranja.

Pri izvedbi betonskih konstrukcij, zlasti masivnih betonov, je bil izvajalec dolžan predvideti in izvajati vse ukrepe za zadostitev zahtevam v zvezi s temperaturami sveže betonske mešanice (hlajenje agregata in vode v poletnem, ogrevanje v zimskem času) in hidratacijskimi temperaturami vgrajenega betona (hlajenje oz. ogrevanje konstrukcij).



Slika 24: Zaščita betona z zaščitno folijo po betoniranju na HE Brežice (vir: lasten)

Slika 25 prikazuje diagram, ki služi kot pomoč pri izbiri pravilne nege betona po vgraditvi glede na pogoje okolja. Na izbor nege betona vplivajo temperatura zraka, hitrost vetra in relativna vlažnost zraka. Glede na te tri podatke lahko določimo stopnjo nege betona. Če vremenski pogoji niso kritični in je temperatura betona in zraka optimalna, zadostuje le občasno vlaženje površine po potrebi, če pa vremenski pogoji postanejo ekstremni, je velika možnost da betoniranje ni dovoljeno.



Slika 25: Izbor načina nege betona glede na pogoje okolja in na temperaturo betonske mešanice [5]

8 ADIABATNA KALORIMetriJA

Količini sproščene toplote tekom hidratacije cementa v betonu se posveča relativno malo pozornosti, glede na to, da lahko zaradi prevelike sproščene toplote hitro pride do nastanka temperaturnih razpok, kar lahko močno vpliva na trajnost betona in betonskih konstrukcij. Temperatura v času strjevanja močno vpliva na razvoj strukture betona.

Tekom strjevanja betona se proizvaja veliko toplote zaradi kemične reakcije cementa z vodo. Velika količina toplote v betonu lahko povzroči velik prirast temperature v strjujočem se betonu, tudi do 60°C. Toplota iz betona izhaja preko zunanjih površin betonskega elementa, zato temperatura v elementu ni enakomerna, ampak se spreminja iz notranjosti proti zunanjim površinam, kar privede do neenakomernega krčenja betonskega elementa. Nastanejo namreč veliki temperaturni gradienti ter posledično velike natezne napetosti, zaradi česar pride do temperaturnih razpok v betonskem elementu. Tovrstne razpoke vplivajo na izgled, vodotesnost, celovitost in trajnost betona. Da bi preprečili omenjene negativne posledice temperaturnega krčenja in temperaturnih razpok, so predpisane maksimalne dovoljene temperature strjujočega se betona in največji dovoljeni gradienti temperature v betonskih elementih.

Da bi zadostili obema pogoju, je potrebno čim bolj omejiti najvišjo doseženo temperaturo betona in omejiti izgube toplote skozi površine betona.

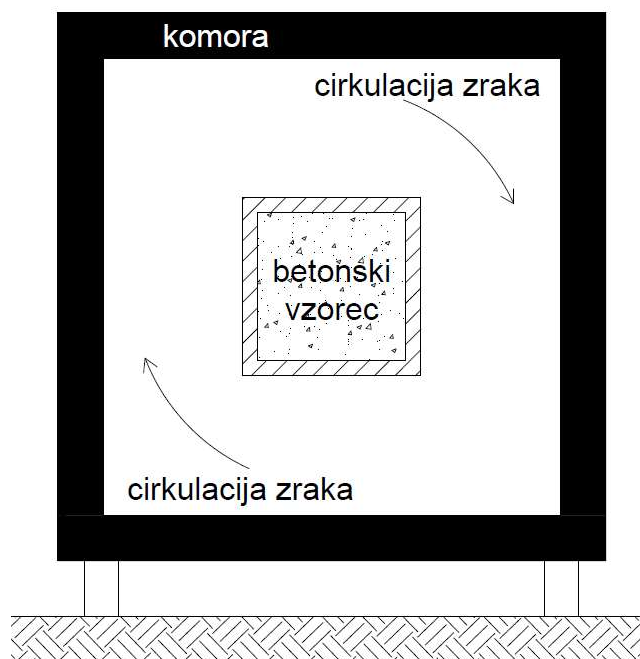
Zmanjšanje najvišje temperature betona lahko dosežemo med drugim s pravilno izbiro betonske mešanice, začetna temperatura betona pa ne sme biti previsoka. Izgube skozi betonske površine zmanjšamo z izolacijo zunanjih sten betonskega elementa.

Količino sproščene toplote lahko opišemo s prirastom adiabatne temperature, ki predstavlja prirast temperature pod adiabatnimi pogoji. Prirast adiabatne temperature je odvisen od sestavin betonske mešanice, predvsem od finosti, izvora in tipa cementa in od začetne temperature betonske mešanice [15].

8.1 Prava adiabatna kalorimetrija

Za izvedbo adiabatnega preskusa je potrebno popolnoma preprečiti toplotne izgube skozi zunanje površine elementa v okolico. V realnosti je zelo težko v popolnosti kontrolirati oziroma preprečiti toplotne izgube, lahko pa jih zmanjšamo na minimum z dobro toplotno izolacijo in s kontroliranjem okoliške temperature. Takšen poskus se izvede v adiabatnem kalorimetru, v katerem je temperatura zraka kontrolirana in regulirana tako, da je v vsakem trenutku enaka temperaturi v betonu. Na ta način se temperaturne razlike v centru betona in na površini zmanjšajo na minimum.

Prava adiabatna kalorimetrija je zelo priporočljiva in uporabna metoda za določitev adiabatne krivulje betonske mešanice, saj lahko poda prave vrednosti direktno iz rezultatov preskusa. Preskuse se izvaja v računalniško kontrolirani komori (*Slika 26*), ki temperaturo zraka v komori spreminja s časom tako, da temperatura sledi temperaturi strjujočega se betona v središču vzorca, tako da so izgube toplote preko površin betona v okolico praktično enake nič.



Slika 26: Adiabatni preskus

Tovrstni poskusi v adiabatnih kalorimetrih so zelo natančni, sofisticirani in tudi dražji, potrebno pa jih je izvesti v laboratoriju.

8.2 Poladiabatna kalorimetrija

Zaradi drage in zahtevne izvedbe pravega adiabatnega preskusa se pogosto poslužujemo pol-adiabatnih poskusov, ki so lažji za izvedbo in jih lahko izvajamo tudi na gradbišču. Natančnost poskusa je manjša, temperature ne moremo kontrolirati tako kot pri adiabatnem poskusu, lahko pa toplotne izgube, ki so zaradi tega nastale, upoštevamo pri interpretaciji rezultatov. Pri pol-adiabatnem preskusu uporabljamo toplotno izolacijo okrog betonskega elementa, zunanjo temperaturo zraka pa težko kontroliramo in reguliramo. Pri isti količini toplotne izolacije okrog betonskega elementa dobimo večjo napako, če je vzorec manjši, če pa je vzorec večji, pa je napaka manjša. Zaradi izgub toplote je merjena temperatura v vzorcu vedno manjša kot adiabatna temperatura [7].

Adiabatna kalorimetrija temelji na tem, da se tekom reakcije nič toplote ne izgubi v okolico in da se nič toplote ne absorbira v notranjost elementa. Pri poladiabatni kalorimetriji se nekaj toplote izgubi v okolico. Metoda omogoča merjenje prirastka temperature in hitrosti sproščanja toplote ter končno temperaturo, ki jo v cementnem kamnu ali betonu dosežemo. Ker je celotna sproščena temperatura pri hidrataciji v adiabatnem kalorimetru deloma odvisna od dosežene končne temperature, bo izmerjena toplota hidratacije, tj. dvig temperature v preskušancu, odvisna od toplotne kapacitete vzorca in sproščene toplote [17]. Metoda daje tudi bolj realne podatke o obnašanju materiala pri pogojih vgradnje.

8.2.1 Toplotne izgube pri poladiabatnem preskusu [6]

Imamo strjujoč betonski element volumna V , z vseh strani oblečenega v toplotno izolacijo. Srednjo temperaturo v betonu poimenujemo T_V , začetno temperaturo T_P , adiabatno temperaturo pa T_G . Dejanska izmerjena temperaturno razlika betonskega elementa in začetne temperature $T_V - T_P$ je manjša kot dejanska adiabatna temperatura zaradi izgub toplote H_L v okolico.

Izgubo toplote v okolico zapišemo kot:

$$H_L = m \cdot c \cdot \Delta T_L = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T_L \quad (1)$$

$$\Delta T_L = \frac{H_L}{\rho c V} \quad (2)$$

$$T_V - T_P = T_G - \Delta T_L = T_G - \frac{H_L}{V \rho c} \quad (3)$$

$$\text{Adiabatna temperatura: } T_G = (T_V - T_P) + \frac{H_L}{V \rho c} \quad (4)$$

$$\text{Fourierjev zakon o prevajanju toplote skozi snov: } \frac{\partial H_L}{\partial t} = k(T_S - T_A) \quad (5)$$

Fourierjev zakon o prevajanju toplote določa izgubo toplote skozi termoizolacijsko snov okrog betonskega elementa. T_S predstavlja srednjo temperaturo na površini betona, T_A predstavlja temperaturo okoliškega medija, zraka, k pa predstavlja toplotno konduktivnost termoizolacijskega materiala. Če enačbo (5) integriramo po času, dobimo naslednje:

$$H_L = k \int_0^t (T_S - T_A) dt \quad (6)$$

$$\text{Od tod sledi: } T_G = (T_V - T_P) + \frac{k}{V \rho c} \int_0^t (T_S - T_A) dt \quad (7)$$

Koeficient pred integralom označimo s simbolom λ , tako da dobimo:

$$T_G = (T_V - T_P) + \lambda \int_0^t (T_S - T_A) dt \quad (8)$$

Da lahko izračunamo izgube toplote skozi zunanje površine, moramo določiti vrednosti λ , T_S in T_V . Potrebno je določiti vrednost λ . To naredimo tako, da upoštevamo dejstvo, da je po približno 120 urah sprememba adiabatne temperature T_G v nekem kratkem času enaka 0, saj se proces umiri.

Enačbo (8) odvajamo po času t :

$$\frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial T_V}{\partial t} + \lambda(T_S - T_A) \xrightarrow{\text{po 120 urah}} \lambda = -\frac{\frac{\partial T_V}{\partial t}}{(T_S - T_A)} \quad (9)$$

Da bi lahko določili vrednost λ , moramo najprej izračunati povprečno vrednost temperature betona v celotni prostornini T_V , in izračunati povprečno vrednost temperature betona na površini T_A .

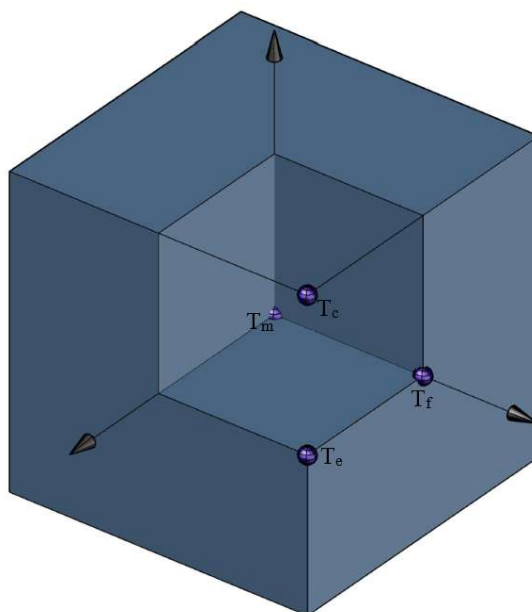
Temperatura betona se po celotnem elementu spreminja, zato moramo za vsako mesto v betonskem elementu poznati njegovo temperaturo, oziroma jo opisati s funkcijo. Uporabimo polinomsko kvartično funkcijo oblike:

$$T(x, y, z) = \omega_1 + \omega_2(x^4 + y^4 + z^4) + \omega_3(x^4y^4 + x^4z^4 + y^4z^4) + \omega_4(x^4y^4z^4) \quad (10)$$

Za določitev konstant ω_1 , ω_2 , ω_3 in ω_4 moramo poznati temperaturo vsaj na štirih mestih v določenem času v betonskem elementu.

Adiabatne in poladiabatne poskuse se praviloma izvajajo na elementih v obliki kocke. Tovrstna oblika ima prednost, saj je temperatura po kocki vzdolž vseh treh osi enaka, zato lahko temperaturo merimo na manj mestih, izračun pa je enostavnejši. Če poskus delamo na betonski kocki, so najbolj primerna za merjenje temperature naslednja štiri mesta (Slika 27):

- T_m ... center mase, sredina kocke; $[x=0, y=0, z=0]$
- T_f ... center ene stranske ploskve; $[x=0, y=1, z=0]$
- T_e ... sredina enega roba; $[x=1, y=1, z=0]$
- T_c ... vogal kocke; $[x=1, y=1, z=1]$



Slika 27: Merska mesta v kocki

Reševanje enačbe (10):

$$T(x, y, z) = \omega_1 + \omega_2(x^4 + y^4 + z^4) + \omega_3(x^4y^4 + x^4z^4 + y^4z^4) + \omega_4(x^4y^4z^4)$$

$$T_m = T(0,0,0) = \omega_1 \quad \rightarrow \quad \omega_1 = T_m \quad (11)$$

$$T_f = T(0,1,0) = \omega_1 + \omega_2 \quad \rightarrow \quad \omega_2 = T_f - T_m \quad (12)$$

$$T_e = T(1,1,0) = \omega_1 + \omega_2 \cdot 2 + \omega_3 \quad \rightarrow \quad \omega_3 = T_e - 2T_f + T_m \quad (13)$$

$$T_c = T(1,1,1) = \omega_1 + \omega_2 \cdot 3 + \omega_3 \cdot 3 + \omega_4 \quad \rightarrow \quad \omega_4 = T_c - T_m + 3T_f - 3T_e \quad (14)$$

Rešitev:

$$T(x,y,z) = T_m + (T_f - T_m)(x^4 + y^4 + z^4) + (T_e - 2T_f + T_m)(x^4 y^4 + x^4 z^4 + y^4 z^4) + (T_c - T_m + 3T_f - 3T_e)(x^4 y^4 z^4) \quad (15)$$

Ko smo določili konstante v enačbi (10), lahko določimo vrednosti T_V in T_S . To storimo s pomočjo enačbe:

$$T_V = \frac{1}{V} \int_V T(x,y,z) dV \quad (16)$$

Reševanje enačbe (16):

$$T_V = \frac{1}{V} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\omega_1 + \omega_2(x^4 + y^4 + z^4) + \omega_3(x^4 y^4 + x^4 z^4 + y^4 z^4) + \omega_4(x^4 y^4 z^4)) dx dy dz$$

$$T_V = \frac{1}{V} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\omega_1 \cdot 2 + \omega_2 \left(\frac{2}{5} + y^4 \cdot 2 + z^4 \cdot 2 \right) + \omega_3 \left(\frac{2}{5} y^4 + \frac{2}{5} z^4 + y^4 z^4 \cdot 2 \right) + \omega_4 \left(\frac{2}{5} y^4 z^4 \right) \right) dy dz$$

$$T_V = \frac{1}{V} \int_{-1}^1 \left(\omega_1 \cdot 2 \cdot 2 + \omega_2 \left(\frac{2}{5} \cdot 2 + \frac{2}{5} \cdot 2 + z^4 \cdot 2 \cdot 2 \right) + \omega_3 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} + \frac{2}{5} z^4 \cdot 2 + \frac{2}{5} z^4 \cdot 2 \right) + \omega_4 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} z^4 \right) \right) dz$$

$$T_V = \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 2} \left(\omega_1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 + \omega_2 \left(\frac{2 \cdot 2 \cdot 2}{5} + \frac{2 \cdot 2 \cdot 2}{5} + \frac{2 \cdot 2 \cdot 2}{5} \right) + \omega_3 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \cdot 2 + \frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \cdot 2 + \frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \cdot 2 \right) + \omega_4 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \right) \right)$$

$$T_V = \frac{1}{8} \left(\omega_1 \cdot 8 + \omega_2 \left(\frac{8}{5} + \frac{8}{5} + \frac{8}{5} \right) + \omega_3 \left(\frac{8}{25} + \frac{8}{25} + \frac{8}{25} \right) + \omega_4 \frac{8}{125} \right) =$$

$$= \frac{1}{8} \left(\omega_1 \cdot 8 + \omega_2 \left(\frac{24}{5} \right) + \omega_3 \left(\frac{24}{25} \right) + \omega_4 \frac{8}{125} \right) = \omega_1 + \omega_2 \frac{3}{5} + \omega_3 \frac{3}{25} + \omega_4 \frac{1}{125} =$$

$$= \frac{125}{125} T_m + \frac{75}{125} (T_f - T_m) + \frac{15}{125} (T_e - 2T_f + T_m) + \frac{1}{125} (T_c - T_m + 3T_f - 3T_e)$$

$$= T_m \left(\frac{125}{125} - \frac{75}{125} + \frac{15}{125} - \frac{1}{125} \right) + T_f \left(\frac{75}{125} - \frac{30}{125} + \frac{3}{125} \right) + T_e \left(\frac{15}{125} - \frac{3}{125} \right) + T_c \frac{1}{125}$$

$$T_V = T_m \frac{64}{125} + T_f \frac{48}{125} + T_e \frac{12}{125} + T_c \frac{1}{125} \quad (17)$$

Iz vrednotenja vrednosti T_S :

$$T_S = \frac{1}{A} \int_A T(x,y,z) dA \quad (18)$$

$$\begin{aligned} T_S &= \frac{1}{A} \int_A T(x,y,z) dA = \frac{1}{A} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\omega_1 + \omega_2(x^4 + y^4 + 1) + \omega_3(x^4 y^4 + x^4 + y^4) + \omega_4(x^4 y^4)) dx dy \\ &= \frac{1}{A} \int_{-1}^1 \left(\omega_1 \cdot 2 + \omega_2 \left(\frac{2}{5} + y^4 \cdot 2 + 2 \right) + \omega_3 \left(\frac{2}{5} y^4 + \frac{2}{5} + y^4 \cdot 2 \right) + \omega_4 \left(\frac{2}{5} y^4 \right) \right) dy \\ &= \frac{1}{A} \left(\omega_1 \cdot 2 \cdot 2 + \omega_2 \left(\frac{2}{5} \cdot 2 + \frac{2}{5} \cdot 2 + 2 \cdot 2 \right) + \omega_3 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} + \frac{2}{5} \cdot 2 + \frac{2}{5} \cdot 2 \right) + \omega_4 \left(\frac{2}{5} \cdot \frac{2}{5} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2 \cdot 2} \left(\omega_1 \cdot 4 + \omega_2 \left(\frac{4}{5} + \frac{4}{5} + 4 \right) + \omega_3 \left(\frac{4}{25} + \frac{4}{5} + \frac{4}{5} \right) + \omega_4 \frac{4}{25} \right) \\ &= \frac{25}{25} \omega_1 + \omega_2 \frac{35}{25} + \omega_3 \frac{11}{25} + \omega_4 \frac{1}{25} = \frac{25}{25} T_m + (T_f - T_m) \frac{35}{25} + (T_e - 2T_f + T_m) \frac{11}{25} + (T_c - T_m + 3T_f - 3T_e) \frac{1}{25} \\ &= T_m \left(\frac{25}{25} - \frac{35}{25} + \frac{11}{25} - \frac{1}{25} \right) + T_f \left(\frac{35}{25} - \frac{22}{25} + \frac{3}{25} \right) + T_e \left(\frac{11}{25} - \frac{3}{25} \right) + T_c \frac{1}{25} \\ T_S &= \frac{16}{25} T_f + \frac{8}{25} T_e + \frac{1}{25} T_c \quad (19) \end{aligned}$$

Sedaj poznamo vse izraze za izračun enačbe (8). Čas razdelimo na manjše časovne enote, enačbo (8) lahko na ta način integriramo numerično:

$$T_G = (T_V - T_P) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n (T_S - T_A)_i \Delta t_i \right) \quad (20)$$

kjer člen $(T_S - T_A)_i$ pomeni spremembo temperatur v časovnem koraku i , Δt_i je velikost časovnega koraka v časovnem koraku i in n pomeni število časovnih korakov. Ker se temperaturna razlika s časom spreminja zelo počasi, je dovolj majhen korak za izračun 5 minut.

9 EKSPERIMENTALNI DEL

V okviru izdelave te magistrske naloge smo v obdobju od junija 2015 do decembra 2015 na gradbišču HE Brežice in v laboratoriju za beton Inštituta Igmat d.d. opravili različne preiskave treh različnih betonskih mešanic s ciljem ugotovitve najprimernejše mešanice za gradnjo hidroelektrarn na spodnji Savi.

9.1 Recepture preskušanih betonskih mešanic

V sklopu raziskav smo izdelali tri različne betonske mešanice. Imenovali smo jih M1, M2 in M3. Mešanica M1 je bila referenčna, to je mešanica, ki je bila uporabljena pri vgradnji masivnih betonskih elementov na pregradi Brežice. Namen našega dela je primerjalna analiza temperaturnega prirasta v masivnem betonu s spreminjanjem deležev vhodnih sestavin betona. V raziskavo smo vključili dve modifikaciji osnovne sestave: z zmanjšanjem deleža cementa v sestavi – M2 in z zmanjšanjem deleža cementa v sestavi in nadomestitvijo s finimi frakcijami mineralnega agregata – M3. V vseh recepturah smo uporabili enak agregat, enak cement, enako vodo in enake dodatke. V betonskih sestavah smo uporabili dodatka za izboljšanje zmrzilske odpornosti in obdelavnosti svežega betona pri vgradnji.

Dodatek Cementol Eta S je namenjen za uvajanje zračnih mikromehurčkov v svež beton. Na ta način dosežemo visoko odpornost strjenega betona proti zmrzali in odjugu ter proti delovanju atmosferilij in korozivnih raztopin, zlasti solem, ki jih uporabljajo za posipavanje cest pozimi. Uporabljamo ga pri izdelavi vseh betonskih objektov in prefabrikatov, ki so izpostavljeni delovanju mraza, soli ipd. (cestišča, letališke piste, mostovi, jezovi, kanali, pločniki, robniki, strešniki itd.). Stabilni zračni mikromehurčki, ki nastanejo v svežem betonu ob dodatku aeranta, omogočajo v strjenem betonu sprostitev notranjih napetosti, ki nastanejo zaradi povečanja volumna pri zmrzovanju vode v kapilarnih porah. Hkrati prekinjajo kapilarni sistem por in na ta način delujejo kot zapora, ki zmanjšuje prodiranje vode oz. raztopin soli s površine betona v notranjost ter tako izboljšajo vodonepropustnost betona. Z dodatkom aeranta izboljšamo tudi obdelavnost svežega betona. [25]

Dodatek Cementol Hiperplast 182 je specialen visoko učinkovit superplastifikator nove generacije – hiperplastifikator, posebej primeren za izdelavo gradbiščnih in transportnih betonov z nižjimi dozami cementa in višjimi zahtevami glede časa obdelavnosti sveže betonske mešanice. Njegova uporaba omogoča močno zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betona in s tem povečanje trdnosti betona, močno izboljšanje obdelavnosti betona ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode, nima negativnih učinkov na razvoj zgodnjih trdnosti, boljše držanje konsistence svežega betona s časom kot pri uporabi superplastifikatorjev predhodnih generacij. Cementol Hiperplast 182 je posebej primeren za izdelavo lahko vgradljivih betonov. Učinek je seveda odvisen od: vrste cementa, količine cementa, v/c razmerja, sestave agregata (dovolj finih delcev) in dozacije Cementola Hiperplast 182. Cementol Hiperplast 182 se absorbira na cementne delce. Zaradi svoje prostorske strukture polimerne molekule omrežijo cementne delce in preprečijo njihovo združevanje. Adsorpcija zaradi specifičnosti strukture polimera poteka postopno in dalj časa, zato je

učinkovitost večja oziroma je čas obdelavnosti takih betonov daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih. [24]

9.1.1 Sestava mešanice M1

Mešanica M1 predstavlja referenčno mešanico, ki jo redno uporabljajo na gradbišču HE Brežice za izgradnjo masivnih blokov. Gre za hidrotehnični beton z oznako 37/45 20H. Sestavo mešanice M1 prikazuje Preglednica 10.

Preglednica 10: Receptura mešanice M1

Mešanica M1		
Trdnostni razred	C16/20	
Vrsta betona	Hidrotehnični	
Dmax	45	
Sestava mešanice M1		
Agregat		
0 mm - 4 mm D	400 kg	2058 kg
0 mm – 4 mm N	605 kg	
8 mm – 16 mm	286 kg	
16 mm – 32 mm	337 kg	
32 mm – 45 mm	430 kg	
Cement	260 kg	
32,5 N LH	260 kg	
Voda	100 l	
Dodatki		
ETA S	1,5 l	
Hiperplastifikator	1,0 l	

9.1.2 Sestava mešanice M2

Prva modifikacija mešanice M1, ki je bila preskušana in izvedena, je bila od primerjalne mešanice drugačna v količini cementa. Že tako precej majhno količino cementa v mešanici M1, ki je znašala 260 kg, smo zmanjšali za 60 kg, kar lahko precej vpliva na vgradljivost sveže betonske mešanice. Na račun zmanjšanja količine cementa smo dodali več drobljenega agregata frakcije 0-4 mm. Sestavo mešanice M2 prikazuje Preglednica 11.

Preglednica 11: Receptura mešanice M2

Mešanica M2		
Trdnostni razred		C16/20
Vrsta betona		Hidrotehnični
Dmax		45 mm
Sestava mešanice M2		
Agregat		2135 kg
0 mm - 4 mm D	470 kg	
0 mm – 4 mm N	605 kg	
8 mm – 16 mm	290 kg	
16 mm – 32 mm	335 kg	
32 mm – 45 mm	435 kg	
Cement		200 kg
- 32,5 N LH	200 kg	
Voda		110 kg
Dodatki		
- ETA S		0,12 kg
- Hiperplastifikator		1,20 kg

9.1.3 Sestava mešanice M3

Mešanica M3 je bila od mešanice M1 drugačna tako, da smo zmanjšali količino cementa za 30 kg na kubični meter betona, na ta račun pa smo povečali količino zelo finih delcev velikosti 0-1 mm. V recepturo za betonsko mešanico smo dodali 100 kg mivke. Na ta način smo poskrbeli, da se vgradljivost drastično ni zmanjšala. Sestavo mešanice M3 prikazuje Preglednica 12.

Preglednica 12: Receptura mešanice M3

Mešanica M3		
Trdnostni razred	C16/20	
Vrsta betona	Hidrotehnični	
Dmax	45	
Sestava mešanice M3		
Agregat		2150 kg
0 mm – 1 mm mivka	100 kg	
0 mm - 4 mm D	425 kg	
0 mm – 4 mm N	540 kg	
8 mm – 16 mm	295 kg	
16 mm – 32 mm	305 kg	
32 mm – 45 mm	485 kg	
Cement		230 kg
- 32,5 N LH	230 kg	
Voda		60 kg
Dodatki		
- ETA S		0,12 kg
- Hiperplastifikator		1,20 kg

9.2 Opis poskusa

Na gradbišču HE Brežice smo izvedli meritve treh različnih betonskih mešanic. Meritve smo izvajali v prostorih betonarn podjetij CGP d.d. in Kostak d.d. (Slika 30). Za določitev adiabatne krivulje betonskih mešanic smo uporabili metodo pol-adiabatne kalorimetrije. Za izvedbo poskusa smo uporabili kocko, velikosti 0,5m x 0,5m x 0,5m (Slika 28), ki je bila izolirana z vseh strani z izolacijo debeline 10 cm, s čimer smo poskušali čimbolj preprečiti uhajanje toplote v zunanjo okolico.



Slika 28: Dimenzije kocke (vir: lasten)

Slika 29 prikazuje namestitev termočlenov v kocki, s pomočjo katerih smo merili spreminjanje temperature v betonski kocki na štirih različnih mestih.



Slika 29: Termočleni v kalupu pred betoniranjem (vir: lasten)



Slika 30: Sveža betonska mešanica (vir: lasten)

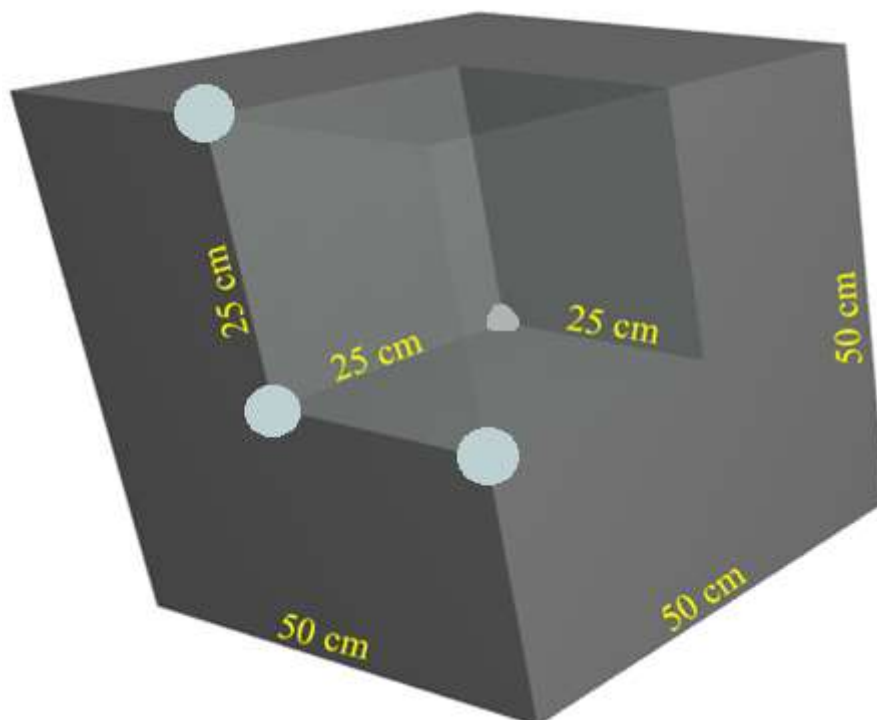
Kocko za izvedbo adiabatnega preiskusa smo postavili pod streho, na neosončen prostor. V notranjost kocke smo namestili folijo, ki je preprečevala izhajanje vlage iz betona. Slika 31 in Slika 32 prikazujeta vgrajevanje betona v kocko. Beton smo vgrajevali postopoma z vmesnim vibriranjem.



Slika 31: Vgrajevanje betona v kocko (vir: lasten)



Slika 32: Vgrajevanje (vir: lasten)



Slika 33: Dimenzije kocke

V okviru raziskovalne naloge smo vsaki mešanici določili potek adiabatne krivulje z uporabo metode pol-adiabatne kalorimetrije. V preskusu smo časovno spreminjanje temperature merili na štirih lokacijah vzorca, in sicer:

- T_m - center vzorca
- T_e - v sredinski osi stranice vzorca pod vrhom
- T_f - center stranice vzorca
- T_c - v vogalu vzorca

Slika 33 prikazuje shemo merilnih mest v vzorcu v obliki kocke. Namen tega preskusa je izračun adiabatne krivulje betonske mešanice, ki je ena izmed osnovnih karakteristik masivnega betona. Opisuje intenzivnost hidratacijskega procesa betonske mešanice na podlagi adiabatnega dviga temperature betona, t.j. brez izgube toplote, ki se sprošča zaradi hidratacijskega procesa v okolico. Omenjen preizkus je znan kot semi-adiabatni oziroma pol adiabatni preizkus, adiabatna krivulja pa je določena z ustreznim računskim upoštevanjem izgub toplote betona v okolico.

Za izvajanje meritev uporabljamo posebne predhodno kalibrirane termočlene ter ustrezno napravo za zajem podatkov proizvajalca Almemo. Podatke zajemamo v vnaprej določenih, poljubno majhnih časovnih intervalih.

9.3 Lastnosti sveže betonske mešanice

Betonske mešanice smo zamešali na gradbišču HE Brežice, in sicer prvič v betonarni podjetja CGP d.d. iz Novega mesta, nato pa dvakrat v betonarni podjetja KOSTAK d.d. iz Krškega. Iz količine betona, ki smo jo preizkušali, smo odvzeli vzorec. Pazili smo, da je bil čas med zamešanjem betonske mešanice in preskušanjem čim krajši. V vseh fazah odvzema, transporta in uporabe smo vzorce ustrezno zaščitili pred izgubo vode, pred povišano temperaturo in segregacijo.

V okviru poskusa smo določili naslednje lastnosti sveže betonske mešanice:

- gostota svežega betona skladno s standardom SIST EN 12350-6,
- konsistenca svežega betona (posed) skladno s standardom SIST EN 12350-2,
- začetna temperatura svežega betona TZ in
- vsebnost zraka v svežem betonu skladno s standardom SIST EN 12350-7.

9.3.1 Preskušanje konsistence sveže betonske mešanice z metodo s posedom

Konsistenca je skupek lastnosti svežega betona, ki vplivajo na njegove transportne lastnosti (vgradljivost, obdelavnost, zgostitev). S preskušanjem konsistence na mestu proizvodnje betona in zlasti še na mestu vgradnje se lahko, na posreden način, zelo uspešno kontrolira dejansko vodocementno razmerje v sveži betonski mešanici [29].

Glede na veljavne standarde določamo konsistenco betona na štiri načine:

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

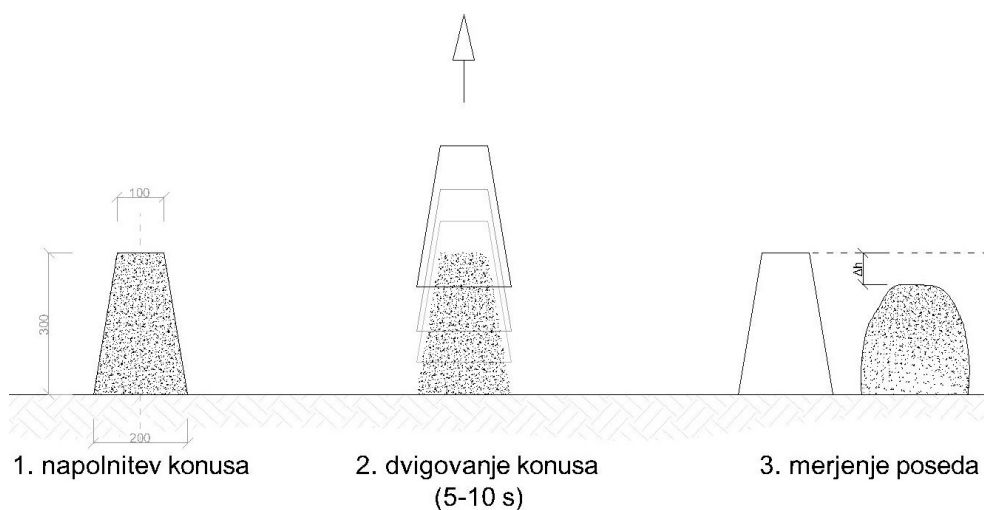
Za potrebe našega preskusa smo za določanje konsistence sveže betonske mešanice uporabili postopek poseda (Slika 34), saj sta metodi s postopkom poseda in s postopkom razleza bolj primerni za plastične mešanice svežega betona, metoda z aparatom Vebe in metoda s postopkom zgoščevanja pri vibriranju pa sta bolj primerni za bolj suhe mešanice.

Metoda s posedom je zelo preprosta metoda, hkrati pa je dovolj zanesljiva za določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic. Ker je ta metoda tako enostavna, jo zelo pogosto uporabljajo na gradbiščih.



Slika 34: Preskus - metoda s posedom

Na ploščo postavimo konus, ki ga z zidarsko žlico napolnimo v treh plasteh približno enake višine. S standardno kovinsko palico nabijemo vsako plast posebej s 25 udarci. Vsako plast moramo prebadati po celotni višini. Prvo plast do dna, zgornji 2 plasti pa skozi trenutno plast vse do spodnje plasti. Na vrhu nam ostane višek betonske mešanice, ki jo odstranimo, površino pa zravnamo z zidarsko žlico. Počakamo 30 sekund, nato pa konus počasi dvigujemo in ga prestavimo ob betonski stožec (Slika 35). S pomočjo palice za nabijanje in metra izmerimo razliko med vrhom konusa in vrhom betonske mešanice, ki predstavlja mero za konsistenco po tej metodi. Celoten postopek ne sme trajati več kot 150 sekund.



Slika 35: Postopek metode s posedom

Metoda s posedom je primerna za betone s konsistenco od 10 do 210 mm (Slika 36, Slika 37). V primeru porušitve vzorca je potrebno preiskavo ponoviti [29].



Slika 36: Oblika poseda mešanice M2



Slika 37: Odčitavanje poseda sveže betonske mešanice

9.3.2 Določanje vsebnosti zraka v svežem betonu po SIST EN 12350-7

Za določitev vsebnosti zraka v svežem betonu je potrebno vzeti vzorec svežega betona po standardu SIST EN 12350-1. To pomeni, da iz količine betona, ki jo preskušamo, vzamemo količino svežega betona, ki je vsaj 1,5 krat večja od količine, ki jo potrebujemo za izvedbo preskusa in ne sme biti manjša od 0,02 m³. Pred preskušanjem vzorec z lopatico dobro premešamo. Osnovno posodo (Slika 38) napolnimo s svežim betonom v treh slojih. S kovinskim ravnilom odstranimo višek betonske mešanice, tako da površina ostane gladka. Na posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtini z ventilom vlijemo vodo, s pomočjo katere zapolnimo prostor med posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki, ventila zapremo. Z ročno črpalko v pokrov vnesemo toliko zraka, da je v pokrovu zračni pritisk 98.066 kPa. Nekaj sekund po izravnavi tlaka odpremo ventil in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks, ki predstavlja delež zraka v % glede na celotno prostornino svežega betona v posodi [29].



Slika 38: Porozimeter [1]

9.4 Razvoj trdnostnih karakteristik betonskih mešanic

Skladno s standardom SIST EN 12390-3 smo na vzorcih v obliki kock, velikosti 15cm x 15 cm x 15 cm (Slika 39) določali tlačne trdnosti posameznih betonskih mešanic po 1,3,7 in 28 dneh. Do preiskave so bili posamezni vzorci negovani skladno s standardom SIST EN 12390-2.



Slika 39: Odvzem vzorcev za določitev trdnostnih karakteristik betona

9.4.1 Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev

Tlačne trdnosti posameznih mešanic smo preskušali na treh vzorcih po enem, treh, sedmih in 28 dneh. Tlačno trdnost mešanice po določenem času pa smo dobili s povprečjem rezultatov dobljenih tlačnih trdnosti na posameznem vzorcu. Preglednica 13 prikazuje rezultate tlačnih trdnosti preskušancev za mešanico M1. Po 1 dnevu od zamešanja je imela mešanica M1 tlačno trdnost 2,1 MPa, po 3 dneh 8,8 MPa, po 7 dneh 20,7 MPa in po 28 dneh 34,6 MPa.

Preglednica 13: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M1

Starost betona	Mešanica M1 - tlačne trdnosti preskušanih kock [MPa]			
	kocka 1	kocka 2	kocka 3	povprečje
1 dan	1,3	2,4	2,7	2,1
3 dni	9,1	8,4	8,8	8,8
7 dni	21,1	20	21	20,7
28 dni	35,9	34,6	33,2	34,6

Preglednica 14 prikazuje rezultate tlačnih trdnosti preskušancev mešanice M2. Po 1 dnevu je bila tlačna trdnost 2,2 MPa, po 3 dneh 5,7 MPa, po 11,7 MPa in po 28 dneh 28,7 MPa.

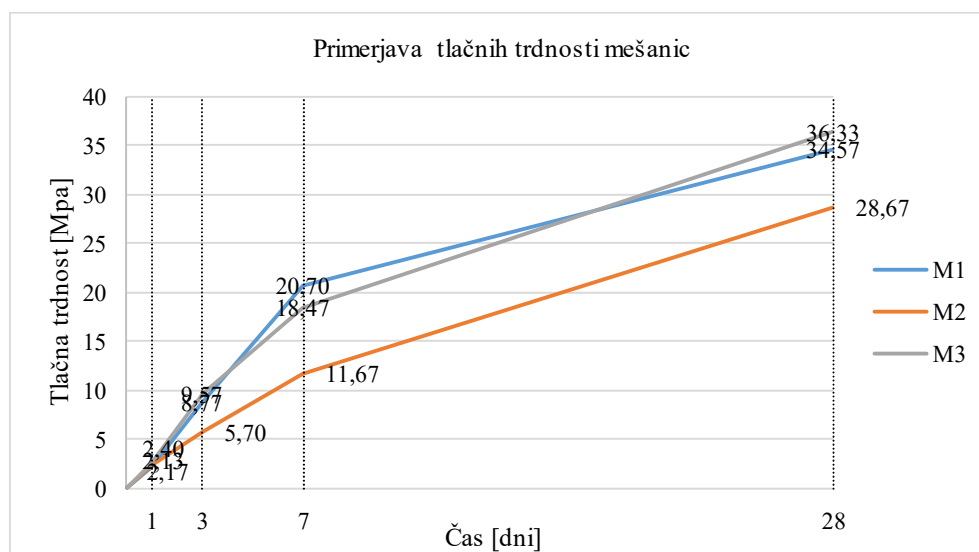
Preglednica 14: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M2

Starost betona	Mešanica M2 - tlačne trdnosti preskušanih kock [MPa]			
	kocka 1	kocka 2	kocka 3	povprečje
1 dan	2,1	2,1	2,3	2,2
3 dni	5,7	5,8	5,6	5,7
7 dni	11,7	11,3	12	11,7
28 dni	28,2	29,2	28,6	28,7

Preglednica 15 prikazuje rezultate tlačnih trdnosti preskušancev mešanice M3. Po 1 dnevu je bila tlačna trdnost mešanice M3 2,4 MPa, po 3 dneh 9,6 MPa, po 7 dneh 18,5 MPa in po 28 dneh 36,3 MPa.

Preglednica 15: Rezultati tlačnih trdnosti preskušancev - mešanica M3

Starost betona	Mešanica M3 - tlačne trdnosti preskušanih kock [MPa]			
	kocka 1	kocka 2	kocka 3	povprečje
1 dan	2,3	2,4	2,5	2,4
3 dni	9,8	9,8	9,1	9,6
7 dni	18,4	18,6	18,4	18,5
28 dni	35,4	36,2	37,4	36,3



Slika 40: Primerjava tlačnih trdnosti mešanic

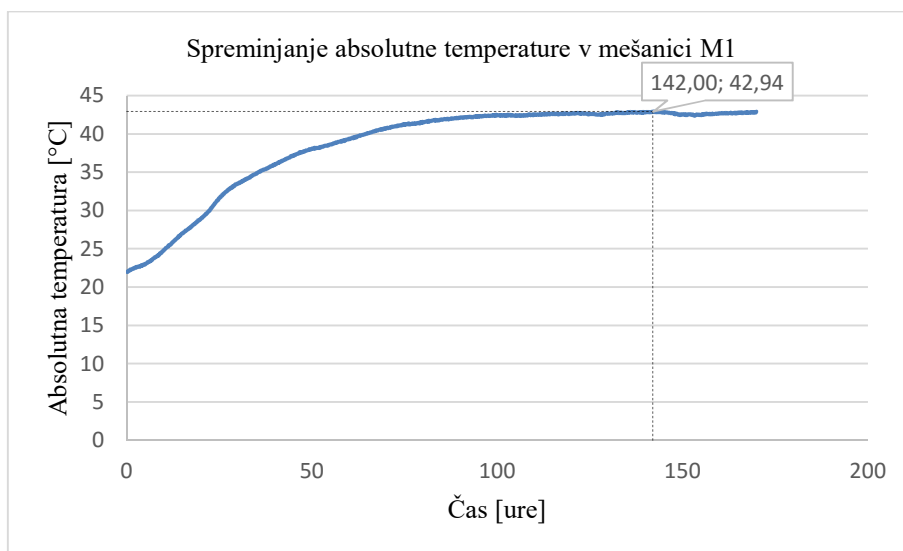
Slika 40 prikazuje primerjavo tlačnih trdnosti vseh treh mešanic, ki smo jih obravnavali v našem preskusu. Iz rezultatov je razvidno, da se majhna količina cementa v mešanici M2 precej pozna pri razvoju tlačne trdnosti betona, saj tlačna trdnost mešanice M2 po 3 dneh doseže 65%, po 7 dneh 56%, po 28 dneh pa 83% tlačne trdnosti primerjalne mešanice M1. Tlačna trdnost mešanice M2 je tako precej manjša od ostalih dveh mešanic, tako v zgodnjem času, kot tudi po 28 dneh. Tlačne trdnosti mešanic M1 in M3 so si precej podobne. Posledica precejšnjega zmanjšanja količine cementa v mešanici M2 zelo vpliva na razvoj zgodnjih tlačnih trdnosti, kar

posledično pomeni kasnejšo možnost razopaževanja takšnega betona, kar pa je neugodna lastnost, ki si je ne želimo.

9.5 Rezultati preiskav - adiabate

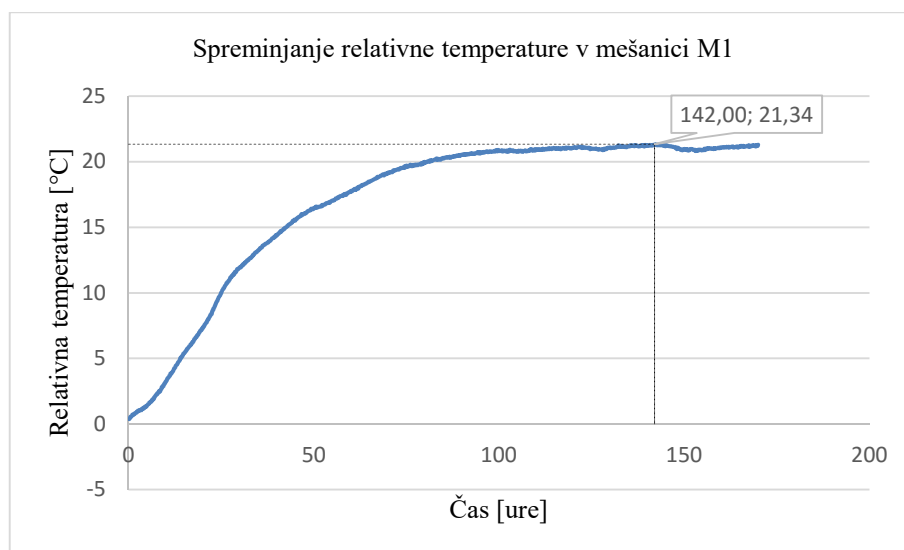
9.5.1 Mešanica M1

Prva mešanica, ki smo jo na gradbišču zabetonirali za potrebe izdelave preiskave, je bila mešanica M1. Betonaža se je izvajala 16. junija 2015 ob 8:20 uri zjutraj, ko je bilo zunaj $18,3^{\circ}\text{C}$. Ob zamešanju je imela sveža betonska mešanica $21,9^{\circ}\text{C}$, posed je znašal 60 mm in vsebnost 3,80% por.



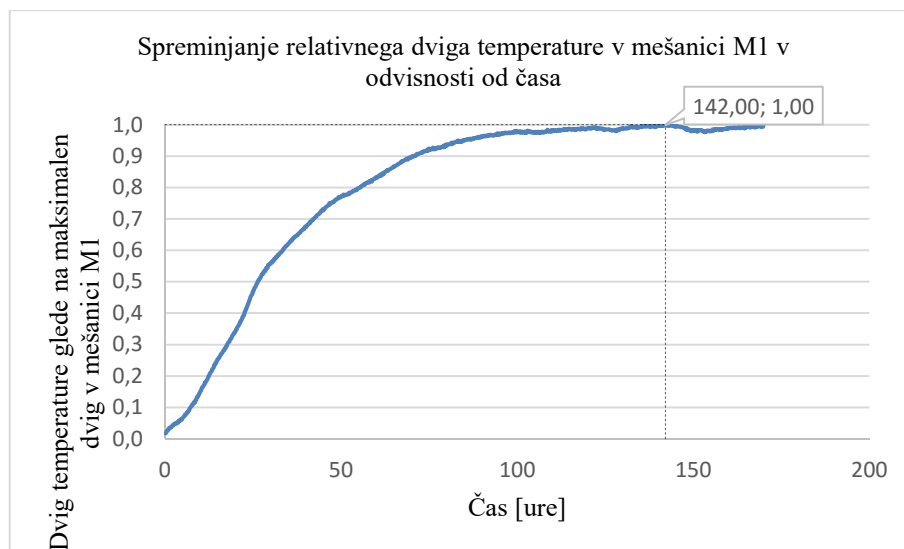
Slika 41: Spreminjanje absolutne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa

Slika 41 prikazuje spreminjanje absolutne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa. Mešanico M1 smo zamešali v mesecu juniju, ko je bila zunanja temperatura zraka precej visoka, zato je imela mešanica M1 najvišjo začetno temperaturo betona, $21,6^{\circ}\text{C}$. Maksimalna absolutna temperatura betona je znašala $42,94^{\circ}\text{C}$, 142 ur po zamešanju betonske mešanice. Iz slike 40 je razvidno tudi, da se je po približno 100 urah od zamešanja absolutna temperatura ustalila pri približno $42,4^{\circ}\text{C}$ oziroma ni več naraščala.



Slika 42: Spreminjanje relativne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa

Slika 42 prikazuje spreminjanje relativne temperature mešanice M1 v odvisnosti od časa. Razvidno je, da se je relativna temperatura v mešanici M2 tekom strjevanja betona povečala za maksimalno 21,34°C po 142 urah od zamešanja.

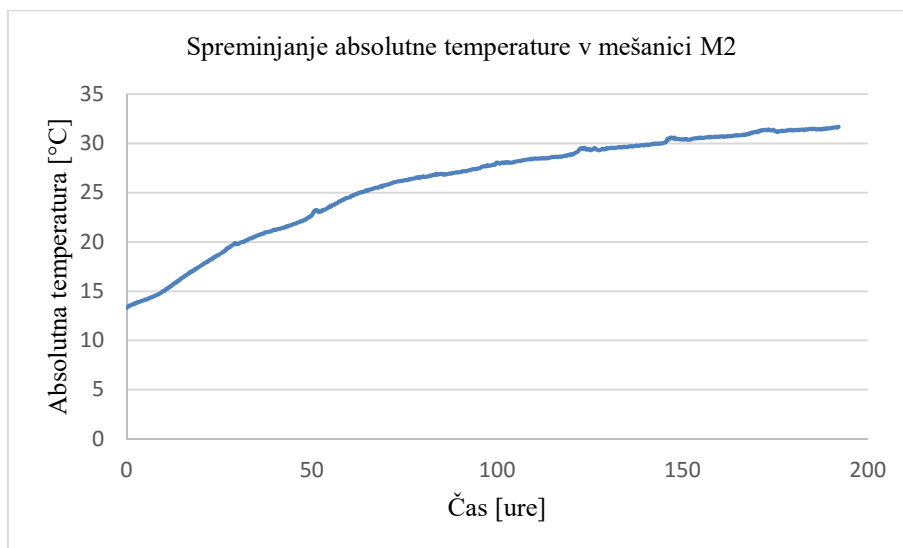


Slika 43: Spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M1 v odvisnosti od časa

Slika 43 prikazuje spreminjanje relativnega dviga temperature tekom strjevanja betona v mešanici M1. Razvidno je, da je maksimum dosežen po 142 urah, kasneje pa so vrednosti relativnega dviga le malo pod 1, kar pomeni da se je temperatura po tem času ustalila.

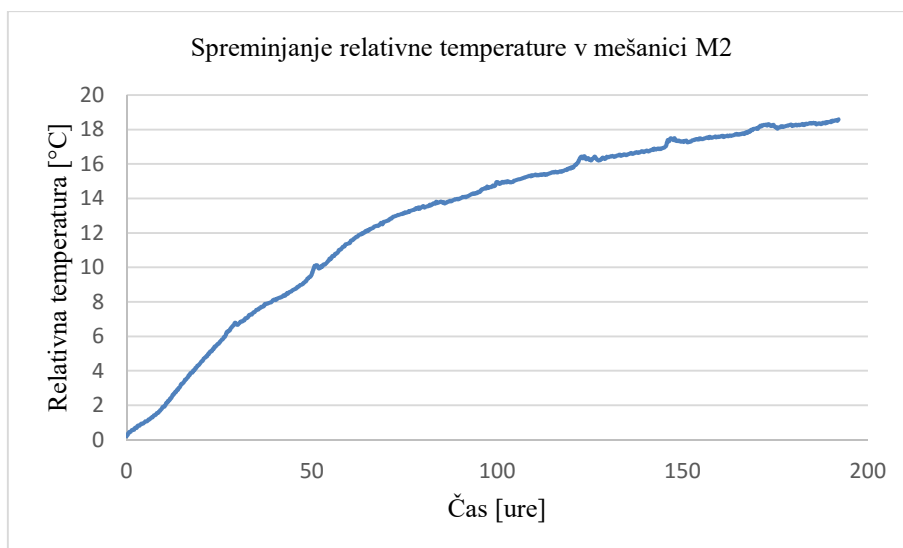
9.5.2 Mešanica M2

Druga mešanica, ki smo jo na gradbišču zabetonirali za potrebe izdelave preiskave, je bila mešanica M2. Betonaža se je izvajala 19. oktobra 2015. Ob zamešanju je imela sveža betonska mešanica 13°C, posed je znašal 80mm in vsebnost 5,50% por.



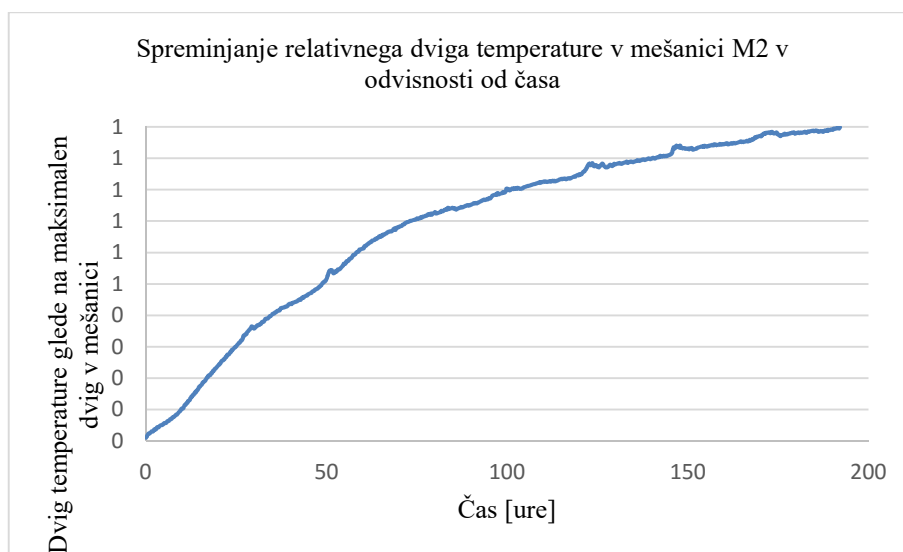
Slika 44: Spreminjanje absolutne temperature v mešanici M2

Slika 44 prikazuje spreminjanje absolutne temperature v mešanici M2. Razvidno je, da je bila temperatura betona ob zamešanju enaka 13,1°C, najvišja temperatura pa je bila dosežena po 192 urah, ko je ta znašala 31,7°C.



Slika 45: Spreminjanje relativne temperature v mešanici M2

Slika 45 prikazuje spreminjanje relativne temperature v mešanici M2. Razvidno je da je bila maksimalna temperatura dosežena po 192 urah, ko je ta znašala 18,6 °C.

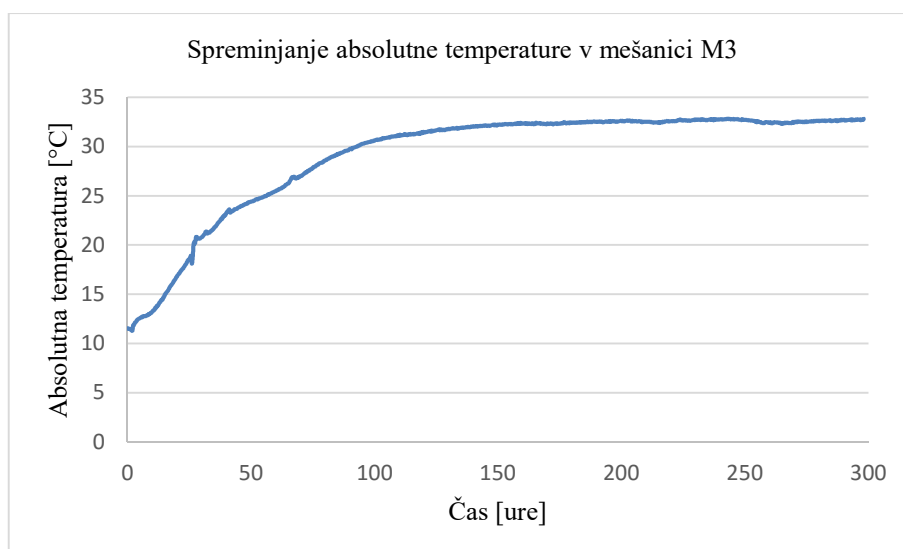


Slika 46: Spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M2 v odvisnosti od časa

Slika 46 prikazuje spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M2 v odvisnosti od časa. Maksimalni relativni dvig je dosežen po 192 urah (8 dni).

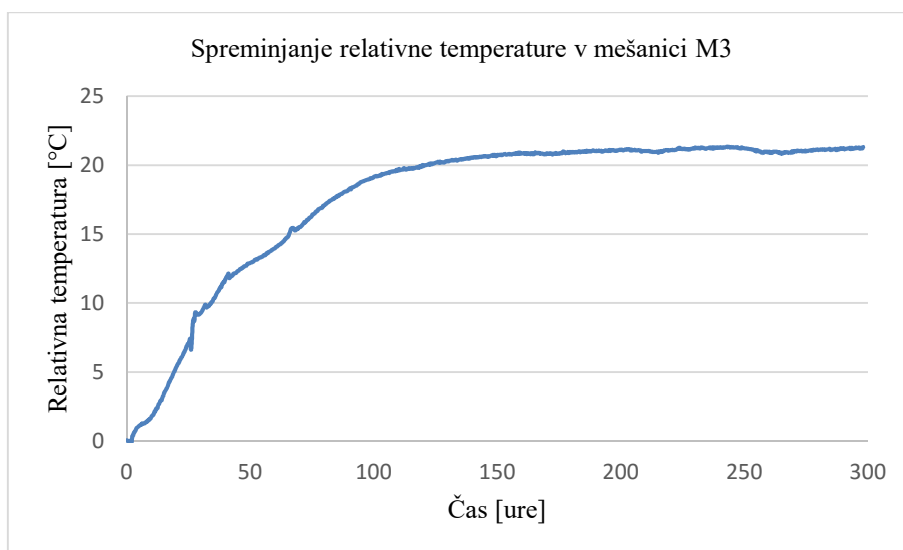
9.5.3 Mešanica M3

Tretja mešanica, ki smo jo na gradbišču zabetonirali za potrebe izdelave preiskave, je bila mešanica M3. Betonaža se je izvajala 1. decembra 2015. Ob zamešanju je imela sveža betonska mešanica $11,8^{\circ}\text{C}$, posed je znašal 90mm in vsebnost 6,00% por.



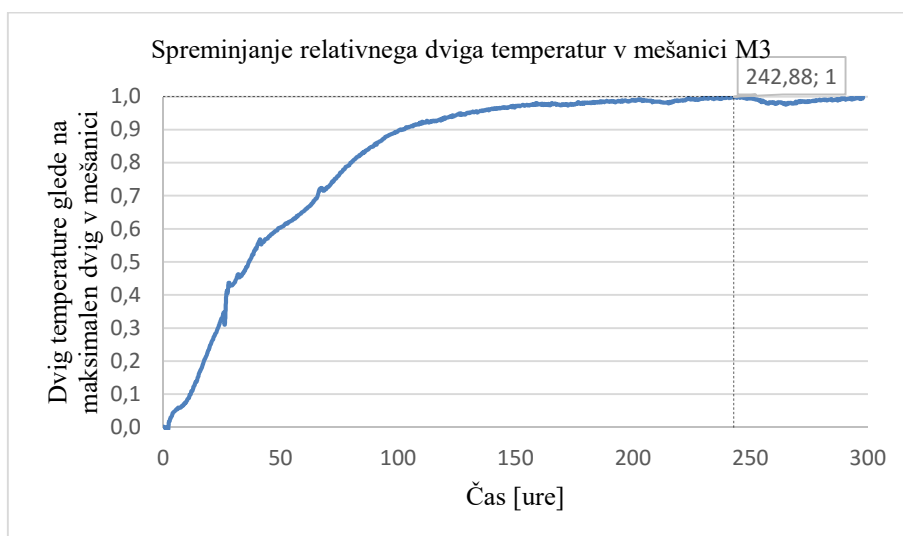
Slika 47: Spreminjanje absolutne temperature v mešanici M3

Slika 47 prikazuje spreminjanje absolutne temperature v mešanici M3 v odvisnosti od časa. Začetna temperatura betonske mešanice je znašala $11,5^{\circ}\text{C}$. Maksimalna temperatura v mešanici M3 je bila dosežena po 242,88 urah od zamešanja in je znašala $32,84^{\circ}\text{C}$.



Slika 48: Spreminjanje relativne temperature v mešanici M3

Slika 48 Prikazuje spreminjanje relativne temperature v mešanici M3. Iz slike je razvidno, da je maksimalen dvig temperature tekom strjevanja mešanice M2 znašal 21,34°C.

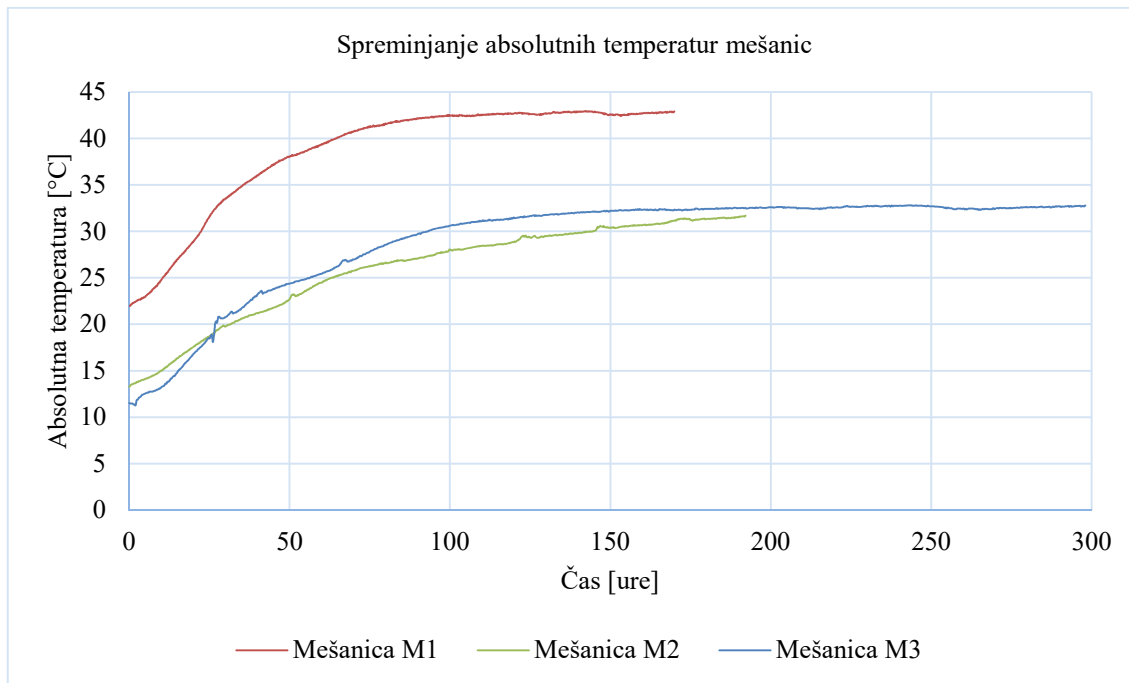


Slika 49: Spreminjanje relativnega dviga temperatur v mešanici M3

Slika 49 prikazuje spreminjanje relativnega dviga temperature v mešanici M3 v odvisnosti od časa. Maksimalen dvig temperature je nastopil po 242,88 urah.

9.5.4 Primerjave rezultatov različnih mešanic

9.5.4.1 Primerjava absolutnih temperatur



Slika 50: Spreminjanje absolutnih temperatur posamezne mešanice s časom

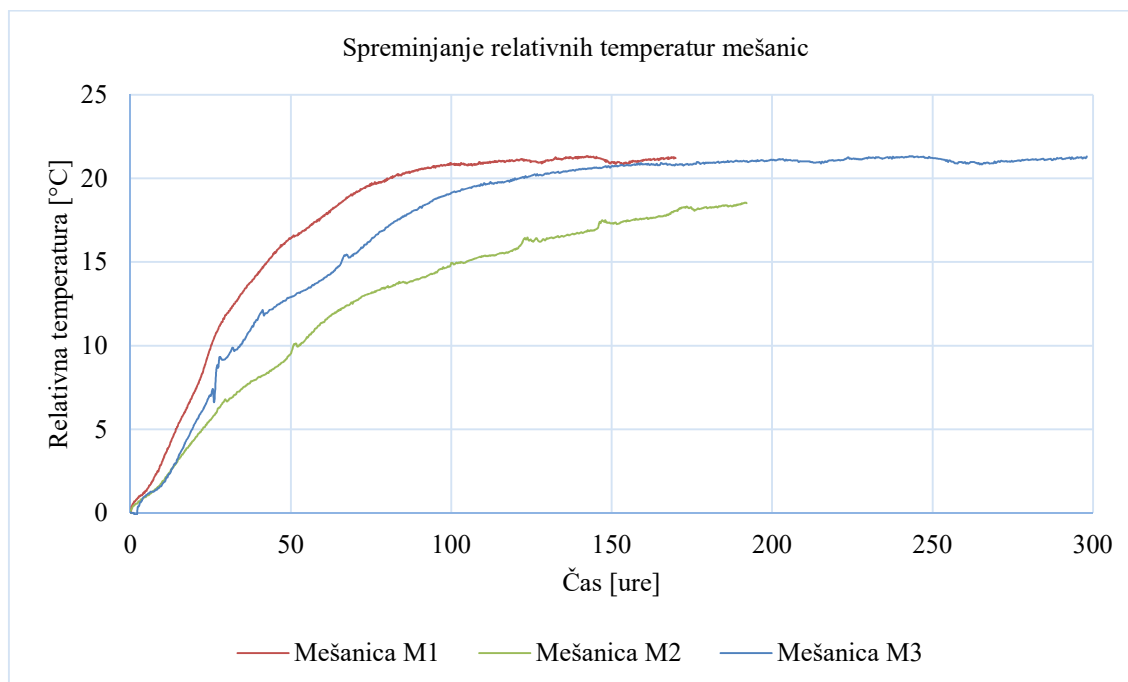
Slika 50 prikazuje spreminjanje absolutnih temperatur vseh treh obravnavanih mešanic. Najvišjo izmerjeno temperaturo ima mešanica M1 po 142 urah od zamešanja in znaša 42,94°C. Najnižjo maksimalno absolutno temperaturo ima mešanica M2 po 192 urah od zamešanja (Preglednica 16).

Preglednica 16: Absolutne temperature v mešanicah

Mešanica	Maksimalna absolutna temperatura [°C]	Čas nastopa max temperature [ur]
M1	42,94	142,0
M2	31,70	192,0
M3	32,84	242,9

Boljše kot absolutne temperature in njihove maksimume je primerjati relativne temperature, saj moramo upoštevati, da so bile mešanice zamešane v različnih letnih časih, pri različnih temperaturah okolice, zato so bile tudi začetne temperature obravnavanih betonskih mešanic različne.

9.5.4.2 Primerjava relativnih temperatur



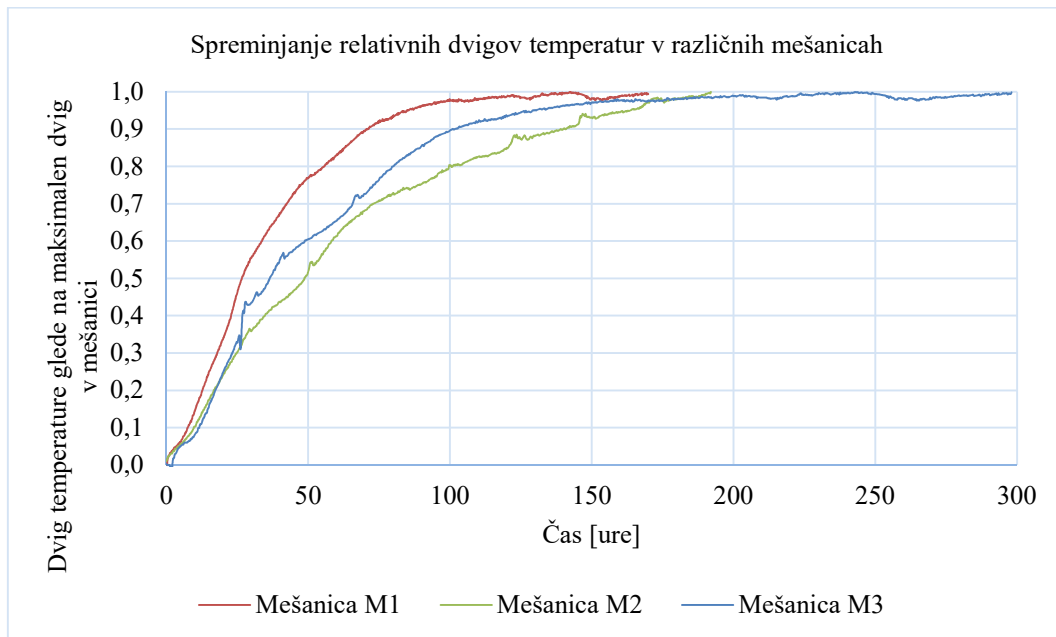
Slika 51: Spreminjanje relativnih temperatur posamezne mešanice s časom

Slika 51 prikazuje spreminjanje relativnih temperatur vseh treh različnih obravnavanih mešanic. Iz te slike je razvidno, da maksimum temperature najprej doseže mešanica M1, in sicer po 142 urah od zamešanja. Mešanici M1 in M3 dosežeta enak maksimalni relativni dvig temperature, ki znaša 21,34°C, le da ga mešanica M1 doseže že po 142 urah, mešanica M3 pa maksimum doseže po 242,9 urah (Preglednica 17). Najmanjši relativni dvig temperature doseže mešanica M2, in sicer 18,6°C po 192 urah od zamešanja. Ta ugoden rezultat zmanjšanja dviga temperature tekom strjevanja lahko pripišemo precej manjši količini cementa v betonu, saj je zaradi tega hidrationska toplota manjša. Iz te slike je razvidno tudi, da ima mešanica M1 precej višji prirast temperature.

Preglednica 17: Relativne temperature v mešanicah

Mešanica	Maksimalna relativna temperatura [°C]	Čas nastopa max temperature [ur]
M1	21,34	142,0
M2	18,60	192,0
M3	21,34	242,9

9.5.4.3 Primerjava relativnih dvigov temperatur v posamezni mešanici

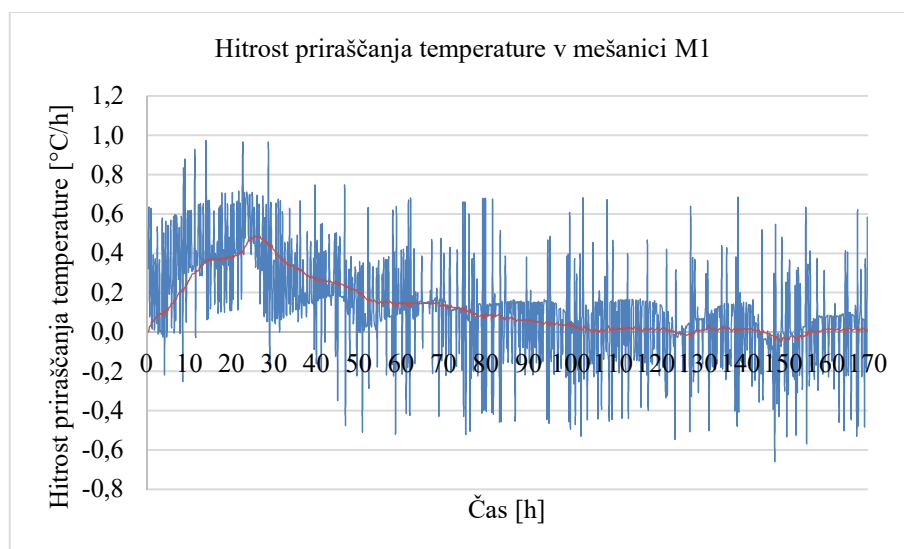


Slika 52: Spreminjanje relativnega dviga temperatur posamezne mešanice s časom

Slika 52 prikazuje spreminjanje relativnega dviga temperatur posamezne mešanice v odvisnosti od časa. Razvidno je, da se pri mešanici M1 temperatura hitreje dviguje kot pri ostalih dveh mešanicah.

9.5.5 Hitrost priraščanja temperatur v mešanicah

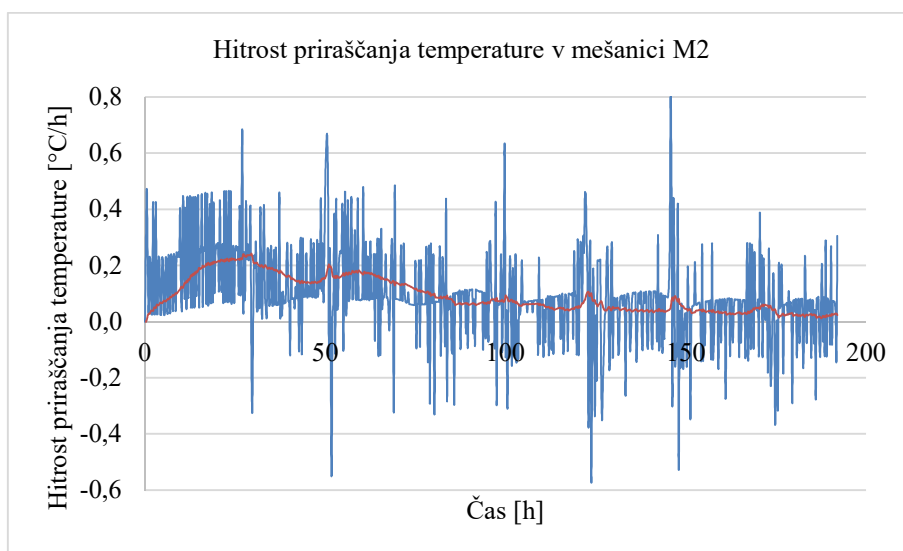
9.5.5.1 Hitrost priraščanja temperature v mešanici M1



Slika 53: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M1

Slika 53 prikazuje hitrost priraščanja temperature v strjujoči se betonski mešanici M1. Hitrost priraščanja temperature smo dobili z numeričnim odvajanjem temperatur po času. Moder graf prikazuje hitrosti priraščanja, dobljene neposredno iz eksperimenta, rdeča črta pa predstavlja zglajene podatke hitrosti priraščanja temperature, ki bolj pregledno prikazujejo želene informacije. Iz slike je razvidno, da hitrost priraščanja temperature narašča približno do 26. ure od zamešanja, nato pa hitrost priraščanja počasi prične padati. Hitrost priraščanja temperature pri času $t=125$ h doseže vrednost 0, kar pomeni da se takrat temperatura ustali.

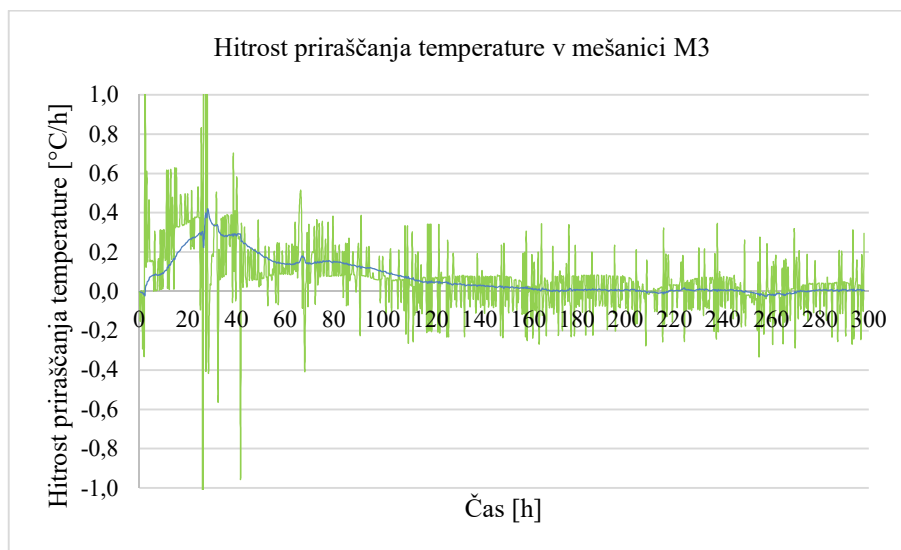
9.5.5.2 Hitrost priraščanja temperature v mešanici M2



Slika 54: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M2

Slika 54 prikazuje hitrost priraščanja temperature v strjujoči se betonski mešanici M2. Moder graf prikazuje hitrosti priraščanja, dobljene neposredno iz eksperimenta, rdeča črta pa predstavlja zglajene podatke hitrosti priraščanja temperature, ki bolj pregledno prikazujejo želene informacije. Iz slike je razvidno, da hitrost priraščanja temperature narašča približno do 29. ure od zamešanja, ko je hitrost priraščanja temperature največja in znaša $0,24^{\circ}\text{C/h}$, nato pa hitrost priraščanja počasi prične padati.

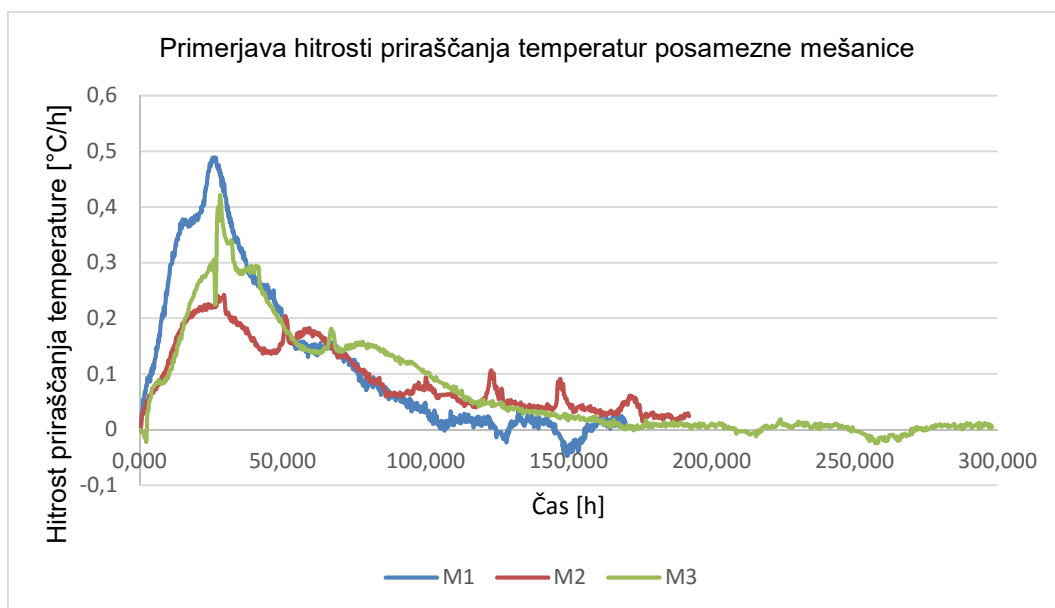
9.5.5.3 Hitrost priraščanja temperature v mešanici M3



Slika 55: Hitrost priraščanja temperature v mešanici M3

Slika 55 prikazuje hitrost priraščanja temperature v strjujoči se betonski mešanici M3. Zelen graf prikazuje hitrosti priraščanja, dobljene neposredno iz eksperimenta, modra črta pa predstavlja zglajene podatke hitrosti priraščanja temperature, ki bolj pregledno prikazujejo zelene informacije. Iz slike je razvidno, da hitrost priraščanja temperature narašča približno do 28. ure od zamešanja, ko hitrost priraščanja doseže maksimum in je enaka $0,69 \text{ °C/h}$, nato pa hitrost priraščanja počasi prične padati. Hitrost priraščanja temperature pri času $t=160 \text{ h}$ doseže vrednost 0, kar pomeni da se takrat temperatura počasi ustali.

9.5.5.4 Primerjava hitrosti priraščanja temperatur v mešanicah

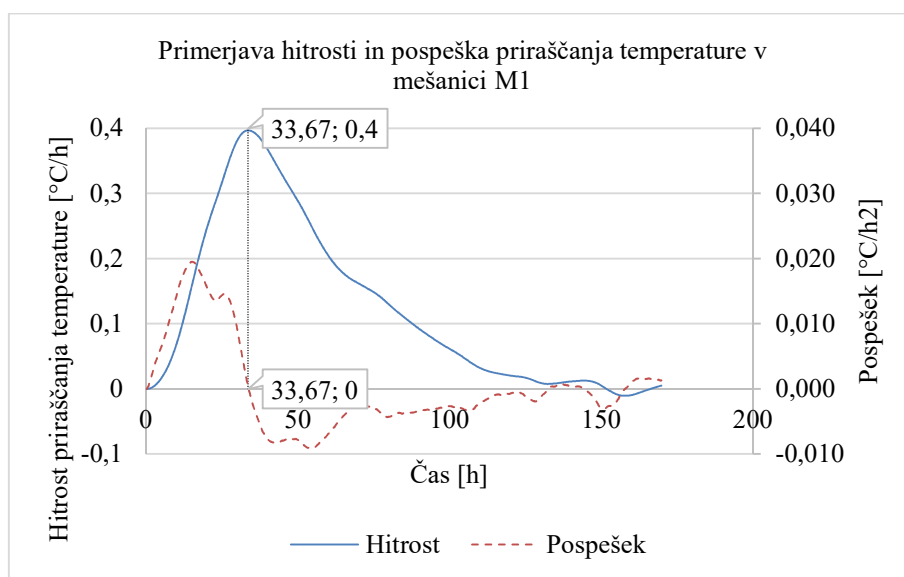


Slika 56: Primerjava hitrosti priraščanja temperatur posamezne mešanice

Slika 56 prikazuje primerjavo hitrosti priraščanja temperatur tekem strjevanja treh obravnavanih betonskih mešanic. Opaziti je, da je hitrost priraščanja temperatur največja v mešanici M1, najmanjša pa je v mešanici M2. Iz slike je mogoče videti tudi, da se maksimalne hitrosti v vseh treh mešanicah pojavijo ob približno enakem času.

9.5.6 Pospešek priraščanja temperatur v mešanicah

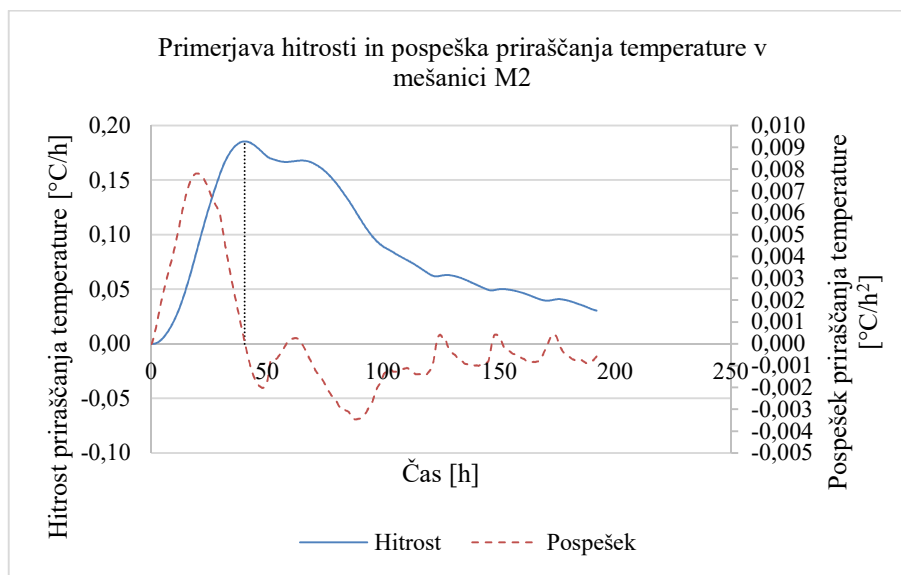
9.5.6.1 Pospešek priraščanja temperature v mešanici M1



Slika 57: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M1

Slika 57 prikazuje primerjavo hitrosti in pospeška spreminjanja temperature v mešanici M1. Iz grafov je razvidno, da je maksimalna hitrost priraščanja temperature dosežena po 33,67 urah od zamešanja, nato pa se hitrost začne zmanjševati. Funkcija hitrosti spreminjanja temperature v odvisnosti od časa takrat doseže globalni maksimum, posledica tega pa je, da je v tistem trenutku pospešek priraščanja temperature enak 0. Pospešek je pozitiven vse do 33,67. ure od zamešanja, ko funkcija hitrosti doseže maksimum, nato pa je pospešek negativen, kar pomeni, da se je hitrost spreminjanja temperature začela zmanjševati. Funkcija hitrosti še trikrat po dosežku svojega maksimuma doseže lokalne ekstreme, in sicer po 133,5 urah lokalni minimum, po 145,33 urah lokalni maksimum in po 157,67 urah lokalni minimum, vendar to ne vpliva več veliko na priraščanje temperature, saj do tega pride že, ko je hitrost priraščanja temperature zelo majhna.

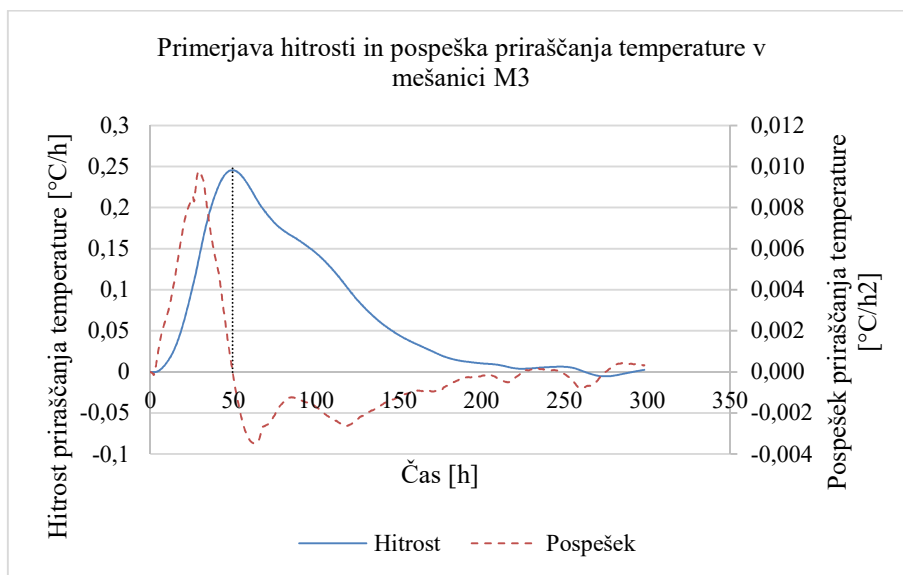
9.5.6.2 Pospešek priraščanja temperature v mešanici M2



Slika 58: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M2

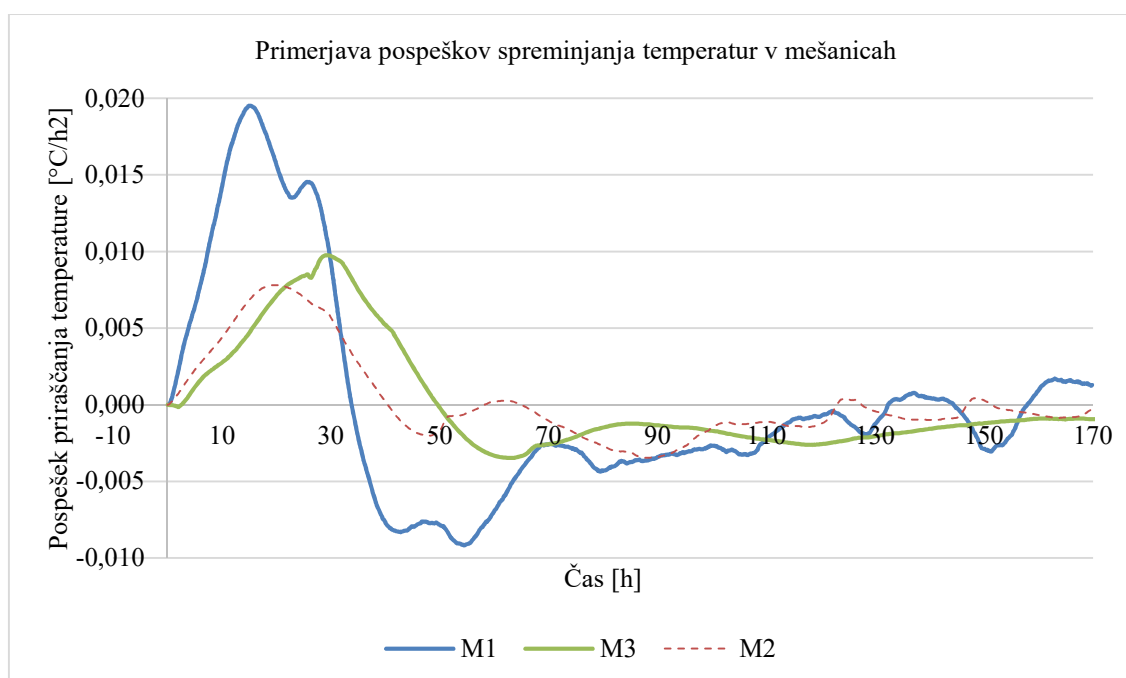
Slika 58 prikazuje primerjavo hitrosti in pospeška spreminjanja temperature v mešanici M2 tekom strjevanja. Hitrost spreminjanja temperature v mešanici M2 je največja po 40,25 urah od zamešanja, takrat ima funkcija pospeška spreminjanja temperature vrednost 0. V tej mešanici je mogoče opaziti precej nihanja v pospeških spreminjanja temperature, oziroma so spremembe pospeškov precej bolj izrazite kot pri ostalih dveh mešanicah. To je najlažje opaziti iz funkcije hitrosti, saj ima precej lokalnih ekstremov. Funkcija pospeška doseže svoj maksimum po 20 urah, ko znaša $0,0078^{\circ}\text{C}/\text{h}^2$, takrat je naklon funkcije hitrosti največji, prirast hitrosti je takrat največji, nato pa se počasi začne pospešek zmanjševati, hitrost pa še narašča, dokler je pospešek pozitiven.

9.5.6.3 Pospešek priraščanja temperature v mešanici M3



Slika 59: Primerjava hitrosti in pospeška priraščanja temperature v mešanici M3

Slika 59 prikazuje primerjavo hitrosti in pospeška spreminjanja temperature v mešanici M3. Hitrost priraščanja doseže maksimum po 49,8 urah od zamešanja, in sicer 0,248 °C/h. Takrat ima funkcija pospeška vrednost 0. Največji pospešek spreminjanja temperature nastopi po 30,36 urah od zamešanja, takrat ima funkcija hitrosti največji naklon. Po 49,8 urah od zamešanja se začne hitrost spreminjanja temperature zmanjševati in se počasi približa vrednosti 0. Takrat se temperatura betona preneha povečevati.



Slika 60: Primerjava pospeškov spreminjanja temperatur v mešanicah

Slika 60 prikazuje primerjavo pospeškov spreminjanja temperatur v mešanicah M1, M2 in M3. Iz te slike je dobro razvidno, da ima največji pospešek povečanja temperature na začetku mešanica M1, ki tudi doseže približno dvakrat večji pospešek od ostalih dveh mešanic. Vzrok za tako razliko je v sestavi mešanice M1, saj ta vsebuje več cementa, ki najbolj vpliva na visoke temperature v mešanici tekom strjevanja. Vpliv na hiter prirast temperature v mešanici M1 pa ima verjetno tudi začetna temperatura sveže betonske mešanice, saj je imela mešanica M1 pri zamešanju približno za 10°C višjo začetno temperaturo od ostalih dveh mešanic.

9.6 Interpretacija rezultatov

Na gradbišču HE Brežice smo v okviru izdelave te magistrske naloge opravili tri različne poskuse, s tremi različnimi recepturami betona, v katerih smo merili adiabatne spremembe temperatur v betonu in njihove tlačne trdnosti.

Iz rezultatov meritev, ki so predstavljeni v poglavjih 9.1 do 9.5 je razvidno naslednje:

- Največjo absolutno temperaturo je dosegla mešanica M1, in sicer 42,94°C, kar je za kar približno 10°C več od maksimalnih temperatur mešanic M2 in M3. Absolutnih temperatur betonov mešanic ne moremo neposredno primerjati med seboj, saj so bile tudi začetne temperature svežih betonskih mešanice zelo različne, kar privede tudi do različnih maksimumov. Iz tega razloga smo iz dobljenih podatkov izračunali maksimalne relativne temperature.
- Največji relativni dvig temperature sta dosegli mešanici M1 in M3, le čas nastopa maksimuma je bil precej različen. Najmanjši relativni dvig temperature je dosegla mešanica M2, iz česar lahko sklepamo, da je mešanica M2 glede dviga temperatur najbolj ugodna. Take rezultate lahko pripišemo zelo ugodni recepturi mešanice M2, saj je v tej mešanici količina cementa najmanjša.
- Iz primerjave relativnih dvigov temperatur je razvidno, da maksimalni dvig temperature najhitreje doseže mešanica M1, nato mešanica M3, in najkasneje mešanica M2. Pri mešanici M1 je krivulja priraščanja najstrmejša, kar nam pove, da je prirast temperatur v tej mešanici najhitrejši. Najpoložnejša krivulja priraščanja relativnih dvigov temperatur je pri mešanici M2, pojav maksimuma pa je najkasnejši.
- Hitrosti in pospeški priraščanja temperatur so izrazito najvišji pri mešanici M1, najmanjši pa pri mešanici M2. Maksimumi hitrosti se pri vseh treh mešanicah pojavijo ob približno istem času. Najmanjša hitrost priraščanja temperature mešanice M2 nam pove, da je mešanica M2 tudi iz tega vidika najprimernejša, saj taka mešanica najbolj zadosti pogojem čim nižjih temperatur in čim manjših sprememb temperatur vzdolž betonskega elementa tekom strjevanja, ki so lahko sicer ob visokih dnevnih in izredno nizkih nočnih temperaturah zelo velike.
- Najmanjšo tlačno trdnost doseže mešanica M2, kar je bilo pričakovano, saj ima ta mešanica najmanjšo vsebnost cementa, ki betonu daje trdnost. Mešanici M1 in M3 dosežeta približno enako trdnost.

Na podlagi vseh dobljenih rezultatov meritev in po podrobni analizi lahko ugotovimo, da ima zmanjšanje cementa zelo ugoden vpliv na zmanjšanje temperatur v strjujočem betonu. Kot najugodnejša mešanica se je izkazala mešanica M2, ki vsebuje najmanjšo količino betona. Pri

tež mešanici sta tudi hitrost in pospešek priraščanja temperature manjša kot pri ostalih dveh mešanicah. Na račun zmanjšanja količine cementa in zmanjšanja temperature v betonu so se taki mešanici poslabšale nekatere ostale lastnosti. Iz rezultatov je razvidno, da je tlačna trdnost takega betona manjša kot pri ostalih dveh mešanicah, vendar pa je še vedno dovolj velika, da zadosti vsem pogojem. Zelo verjetne slabe lastnosti betona iz recepture M2 so tudi slabša vgradljivost, črpnost in obdelavnost. Zaradi majhne količine cementa bi bilo črpanje takega betona verjetno nemogoče in bi bilo potrebno uporabiti druge metode, kot na primer transportne trakove (glej poglavje 5.5), kar pa lahko že močno vpliva na tehnologijo vgradnje, organizacijo gradbišča, stroške in čas izvedbe.

10 ZAKLJUČEK

V okviru izdelave tega magistrskega dela sem preučevala potek adiabatne krivulje za masivne betone na HE Brežice. Za podrobnejšo analizo je bilo potrebno poznati obnašanje in vpliv posameznih sestavnih betona na razvoj temperature v betonu. Na potek adiabatne temperature betona najbolj vpliva količina in vrsta cementa. Za potrebe analize smo na gradbišču HE Brežice od avgusta do decembra 2015 izvajali meritve treh različnih receptur betona. Kot primerjalno recepturo smo vzeli obstoječo recepturo betona, ki jo trenutno uporabljajo za gradnjo HE Brežice, glede na to recepturo pa smo določili še dve, katere namen je bil zmanjšati maksimalne temperature v procesu hidratacije. Prva modificirana mešanica je imela zelo majhno količino cementa, vendar smo že v fazi načrtovanja recepture predvidevali, da bi takšna mešanica lahko predstavljala velik problem pri vgradnji, zato smo v nadaljevanju sestavili še recepturo za drugo korigirano mešanico. Ta je sicer vsebovala manjšo količino cementa kot primerjalna mešanica, a večjo kot prva korigirana mešanica. Na račun zmanjšanja količine cementa smo v tej mešanici povečali količino finih delcev, da bi obdržali čim boljšo vgradljivost betona.

Po podrobnejši analizi podatkov, ki smo jih pridobili s pomočjo poskusov, sem ugotovila, da zmanjšanje količine cementa v betonu zelo ugodno vpliva na adiabatno krivuljo. Mešanica z najmanjšo količino cementa je dosegla najmanjšo absolutno temperaturo, najmanjši dvig temperature in najmanjši relativni dvig temperature. Ta mešanica je dosegala tudi najmanjše hitrosti in pospeške povečevanja priraščanja temperature v betonu.

Izboljšanje recepture za doseganje ugodnejših temperatur betona pa neugodno vpliva na nekatere druge lastnosti. Taka mešanica je dosegla najmanjšo tlačno trdnost izmed vseh treh, vendar pa razlika ni bila tako zelo velika. Sveža betonska mešanica z najmanjšo količino cementa pa je lahko neugodna za vgradnjo, saj zaradi majhne količine cementa nastane problem pri vgradljivosti take mešanice.

Optimalna adiabatna krivulja je dosežena pri mešanici M2 z najmanjšo količino cementa. Zaradi verjetno zelo slabe vgradljivosti takega betona pa je verjetno bolj optimalna izbira izbira betona po recepturi mešanice M3, ki je sicer nekoliko slabša z vidika adiabatne krivulje, je pa vgradljivost takega betona sigurno boljša in obdelavnost lažja. Pred menjavo recepture masivnega betona za gradnjo hidroelektrarn na spodnji Savi bi bilo potrebno izvesti še kakšen preskus glede vgradljivosti in posledično stroškov menjave tehnologije vgradnje takega betona. Tovrstni preskusi pa presegajo obseg izdelave te magistrske naloge.

VIRI

- [1] Controls Group. 2016.
http://www.controls-group.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110251439120_3.jpg (Pridobljeno 23. 02. 2016.)
- [2] Cost, T. 2008. Practical Semi-Adiabatic Calorimetry for Concrete Mixture Evaluation. V: TTCC/NCC Conference. Bloomington, Minnesota, 23.-25. september 2008.
http://www.cptechcenter.org/ncc/TTCC-NCC-documents/F2008-F2011/10PracticalSACTTCC-NCC9-23-08_000.pdf (Pridobljeno 04. 01. 2016.)
- [3] Dravske elektrarne Maribor d.o.o. 2015.
<http://www.dem.si/sl-si/> (Pridobljeno 21. 12. 2015.)
- [4] Hidroelektrarne na Spodnji Savi, d.o.o. 2015.
<http://www.he-ss.si/> (Pridobljeno 10. 10. 2015.)
- [5] IBE d.d. 2015. Projekt za izvedbo, HE Brežice/jezovna zgradba. Osebna komunikacija (21. 08. 2015.)
- [6] Ilc, A., Trtnik, G., Planinc, I., Turk, G. 2009. Temperaturna analiza postopne gradnje masivnih betonskih konstrukcij. Gradbeni vestnik 58, 3: 54-61.
- [7] Kavčič, F. 2005. Adiabatna kalorimetrija kot pomoč pri zagotavljanju trajnosti betonskih konstrukcij. V: Šajna, A. (ur.). Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah, Lipica, Slovenija, 10.–11. marec 2005. Ljubljana, Združenje za beton Slovenije: str. 138-145.
- [8] Kim, S. G. 2010. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Magistrsko delo. Ames, Iowa, Iowa State University (Samozaložba S. G. Kim): 114 str.
<http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2674&context=etd> (Pridobljeno 20. 11. 2015.)
- [9] Kosmatka, S., Farny, J. 1997. Portland Cement, Concrete, and Heat of Hydration. Concrete Technology today. Portland Cement Association 18, 2: 8 str.
<http://cement.org/tech/pdfs/pl972.pdf> (Pridobljeno 4. 1. 2016.)
- [10] Kryžanowski, A. 1999. Predstavitev gradnje hidroelektrarn na Savi, V: 6. slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, Ljubljana, Slovenija, 27.5.1999. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 77-82.
- [11] Loop Belt Industries. 2016.
www.loopbeltind.com (Pridobljeno 11. 03. 2016.)
- [12] Lopatič, J. 2013/2014. Izbrana poglavja iz masivnih konstrukcij. Zapiski predavanj. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [13] Miklič, J. 2004. Simulacijski model trga z električno energijo v Sloveniji. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta (samozaložba J. Miklič): 80 str.
- [14] Mindess, S., Young, J. F., Darwin, D. 1996. Concrete. Kansas, University of Kansas, Prentice Hall, 2nd Ed.
- [15] Nordic Concrete Federation. 2016.
https://pure.ltu.se/portal/files/43234498/Heat.Loss.Compensation.for.Semi_Adiabatic.Calorimetric.Tests.pdf (Pridobljeno 23. 02. 2016.)
- [16] Putzmeister America, Inc. 2016.

- http://www.putzmeisteramerica.com/products/telebelts/telebelts-telebelt-tb-600-truck-mounted-telescopic-belt-conveyor_ (Pridobljeno 23. 02. 2016.)
- [17] Reščič, L., Pešič, T. 1999. Cementi za masivne betone z nizko toploto hidratacije, V: 6. slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, Ljubljana, Slovenija, 27.5.1999. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 23–31.
- [18] Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Saje): 157 str.
- [19] Savske elektrarne Ljubljana d.d. 2015.
<http://www.sel.si/> (Pridobljeno 1. 12. 2015.)
- [20] Schindler, A. K., Dossey, T., McCullough, B. F. 2002. Temperature control during construction to improve the long term performance of portland cement concrete pavements. Center for transportation research, The University of Texas at Austin: 518 str.
https://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/0_1700_2.pdf (Pridobljeno 15. 10. 2015.)
- [21] Tehnična in okoljska problematika gradnje verige HE na spodnji Savi. 2005. SLOCOLD.
http://www.slocold.si/zbornik/Z_7.pdf (Pridobljeno 21. 11. 2015.)
- [22] The Engineering Toolbox. 2015.
<http://www.engineeringtoolbox.com/> (Pridobljeno 10. 09. 2015.)
- [23] Thomas, J., Jennings, H. 2015. The science of concrete.
<http://iti.northwestern.edu/cement/index.html> (pridobljeno 01. 10. 2015.)
- [24] TKK d.o.o. 2016.
http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/2013/Cementol%20Hiperplast%20182%20SLO.pdf (Pridobljeno 23. 02. 2016.)
- [25] TKK d.o.o. 2016.
<http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol/aeranti/cementol-eta-s> (Pridobljeno 23. 02. 2016.)
- [26] Ukrainczyk, V. 2002. Tehnologija masivnih betonov. V: IRMA (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, Ljubljana, Slovenija, 27. Maj 1999. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-9.
- [27] Virgalitte, S. J., Luther, M. D., Jere, H. R., Mather, B. 2000. Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. ACI Committee: 18 str.
- [28] Zajc, A. 2002. Tehnološki ukrepi za preprečevanje razpok v masivnih betonih. V: IRMA (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Razpoke v betonu, Ljubljana, Slovenija, 29. Maj 2002. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 33-38.
- [29] Žarnić, R. 2009. Gradiva vaje 2009/2010. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.
- [30] Žnidaršič, Š. 2012. Vpliv vsebnosti jeklenih vlaken in predhodno namočenega lahkega agregata na krčenje betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba Š. Žnidaršič): 35 str.