

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

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



Univerzitetni program gradbeništvo,  
Organizacijsko tehnološka smer

Kandidat:

**Jure Korla**

# **Optimizacija dimenzij blokov masivnega betona hidrotehničnih objektov**

**Diplomska naloga št.: 2885**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Igor Planinc

**Somentor:**

dr. Jakob Šušteršič

Ljubljana, 30. 5. 2006

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>UDK:</b>             | <b>004.42:519.61/.64:691.32(043.2)</b>   |
| <b>Avtor:</b>           | <b>Jure Korla</b>  |
| <b>Mentor:</b>          | <b>doc. dr. Igor Planinc</b>   |
| <b>Somentor:</b>        | <b>dr. Jakob Šušteršič, univ.dipl.inž.gradb.</b>                                     |
| <b>Naslov:</b>          | <b>Optimizacija dimenzij blokov masivnega betona<br/>hidrotehničnih objektov</b>     |
| <b>Obseg in oprema:</b> | <b>88 str., 12 pregl., 53 sl., 36 en.</b>  |
| <b>Ključne besede:</b>  | <b>masivni beton, optimizacija, hidratacijska toplota, prenos<br/>toplote, HEATC</b> |

### *IZVLEČEK*

*V diplomski nalogi smo analizirali ustreznost računalniškega programa HEATC za določitev časovnega spreminjanja temperaturnega polja strjujočih se masivnih betonov. Ustreznost smo analizirali s primerjavo med eksperimentalnimi rezultati, ki so bili pridobljeni med gradnjo hidroelektrarne Boštanj, in računskimi rezultati, ki smo jih izračunali s programom HEATC. V nadaljevanju smo s parametrično študijo ugotovili kako velikost masivnih betonskih blokov in spreminjanje temperature okolice vplivata predvsem na velikost temperaturnih gradientov v masivnem betonskem bloku. Ugotovili smo, da z računalniškim programom HEATC relativno dobro modeliramo časovno spreminjanje temperatur v masivnih betonskih blokih ter da velikost temperaturnih gradientov pri hidrataciji cementov z nizko hidratacijsko toploto ni kritična.*

---

## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

**UDK:** 004.42:519.61/.64:691.32(043.2)  
**Author:** Jure Korla  
**Supervisor:** assist. prof. Igor Planinc  
**Co-supervisor:** Ph.D. Jakob Šušteršič, b.s.c.e.  
**Title:** Dimension optimization of mass concrete blocks in hydraulic structures  
**Notes:** 88 p., 12 tab., 53 fig., 36 eq.  
**Key words:** mass concrete, optimisation, hydration heat, heat transfer, HEATC

### ABSTRACT

*In this assignment we have tested computer software HEATC – a program for computing temperature fields in different materials. We applied it as a tool for computing temperature fields in mass concrete. With comparison of on-site measurements and calculated values we have deduced that the HEATC can be effectively used for computing peak temperatures and temperature gradients in mass concrete. In the second part of the assignment we have studied effects of increasing size of massive concrete slabs on the generation of heat in massive concrete and effect of environment and concrete temperatures on the same. We have concluded that by using low-heat cement, peak temperatures are not problematic and that we should devote most of our attention to finding critical temperature gradients.*

## KAZALO

|  |          |
|--|----------|
| <b>1 UVOD .....</b>  | <b>1</b> |
| <b>2 PROCES HIDRATACIJE CEMENTA IN ENAČBE PRENOSA TOPLOTE...4</b>                              |          |
| 2.1 SPROŠČANJE TOPLOTE V SVEŽEM BETONU .....   | 4        |
| 2.1.1 CEMENT.....  | 4        |
| 2.1.1.1 Zgodovina <sup>1</sup> .....   | 4        |
| 2.1.1.2 Proizvodnja cementa <sup>8</sup> .....   | 5        |
| 2.1.1.3 Kemijska in mineraloška sestava portland cementa <sup>1,6</sup> .....                  | 8        |
| 2.1.1.4 Hidratacija cementa <sup>5</sup> .....   | 11       |
| 2.1.2. HIDRATACIJSKA TOPLOTA <sup>1,5</sup> .....  | 14       |
| 2.1.3. VRSTE CEMENTA .....   | 18       |
| 2.1.3.1. Ameriški ASTM <sup>15</sup> in slovenski SIST EN standard <sup>3,6</sup> .....        | 18       |
| 2.2 PRENOS TOPLOTE <sup>1</sup> .....  | 21       |
| 2.2.1. PREVAJANJE TOPLOTE .....  | 21       |
| 2.2.1.1. Osnovni pojmi prevajanja toplote.....   | 22       |
| 2.2.1.2. Enačbe prevajanja toplote.....  | 24       |
| 2.2.2. KONVEKCIJA .....  | 27       |
| 2.2.3 SEVANJE – RADIACIJA .....  | 28       |
| 2.2.4 ROBNI POGOJI .....   | 30       |
| 2.2.4.1 Predpisana temperatura.....  | 30       |
| 2.2.4.2 Predpisan toplotni pretok.....   | 30       |
| 2.2.4.3 Toplotni pretok, ki je sorazmeren temperaturni razliki .....                           | 31       |
| 2.2.4.4 Toplotni pretok, ki je nelinearno odvisen od temperatur na površini in v okolici ..... | 32       |
| 2.2.5. POGOJI NA MEJI DVEH DELOV .....   | 33       |
| 2.2.6 NOTRANJI VIRI TOPLOTE.....   | 34       |
| 2.2.7 RAČUNALNIŠKI PROGRAM HEATC.....  | 34       |
| <b>3 VALIDACIJA RAČUNSKEGA MODELA.....36</b>   |          |
| 3.1 MERITVE NA OBJEKTU HE BOŠTANJ .....  | 36       |
| 3.1.1 PRESKUS ADIABATSKIH TERMIČNIH KARAKTERISTIK BETONA- ATK.....                             | 40       |
| 3.1.2 MERITVE TEMPERATUR V OBODNI STENI GRADBENE JAME <sup>2</sup> .....                       | 42       |
| 3.1.3 MERITVE TEMPERATUR V JEZOVNI ZGRADBI - BLOK 3a.....                                      | 49       |
| 3.2 PRIMERJAVA MED IZMERJENIMI IN IZRAČUNANIMI TEMPERATURAMI .....                             | 52       |

---

|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.1 VODNJAK ŠT. 8 IN VODNJAK ŠT. 12.....   | 56        |
| 3.2.2 PRELIVNO POLJE - BLOK 3a .....   | 65        |
| <b>4 PARAMETRIČNA ŠTUDIJA .....</b>  | <b>69</b> |
| 4.1 PARAMETRIČNA ANALIZA – vpliv dimenzij masivnega betonskega bloka na<br>temperaturno polje .....            | 70        |
| 4.2 PARAMETRIČNA ANALIZA - vpliv zunanjih temperatur na temperaturno polje<br>masivnega betonskega bloka ..... | 75        |
| <b>5 ZAKLJUČKI.....</b>  | <b>82</b> |
| <b>VIRI.....</b>   | <b>84</b> |

## KAZALO PREGLEDNIC

|   |    |
|---|----|
| Preglednica 1: Razdelitev cementov skladno s standardom ASTM.....   | 20 |
| Preglednica 2: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah<br>vodnjaka št. 12.....  | 43 |
| Preglednica 3: Rezultati meritev adiabatskih termičnih karakteristik na betonu s sestavo št. 2 z<br>začetno temperaturo $T_z = + 21,0^{\circ}\text{C}$ . .... | 44 |
| Preglednica 4: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah<br>vodnjaka št. 8.....   | 46 |
| Preglednica 5: Rezultati meritev adiabatskih termičnih karakteristik na betonu s sestavo št. 3 z<br>začetno temperaturo $T_z = + 13,3^{\circ}\text{C}$ . .... | 47 |
| Preglednica 6: Časovno spreminjanje temperatur betona in zraka v okolici na bloku 3a.....   | 50 |
| Preglednica 7: Rezultati meritev adiabatskih termičnih karakteristik za beton s sestavo št. 11P.  | 51 |
| Preglednica 8: Vodnjak št. 8 primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami. ....   | 57 |
| Preglednica 9: Vodnjak št. 12 primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami. ....  | 62 |
| Preglednica 10: Prelivno polje blok 3a. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi<br>temperaturami.....  | 65 |
| Preglednica 11: Časovno spreminjanje temperature betona v sredini masivnega betonskega za<br>različne velikosti blokov.....                                   | 71 |
| Preglednica 12: Časovno spreminjanje temperatur v masivnem betonskem bloku glede na<br>izbrani temperaturni režim okolice.....                                | 78 |

---

## KAZALO SLIK

|  |    |
|--|----|
| Slika 1: Pakiranje cementa v 50-kilogramske vreče. ....  | 6  |
| Slika 2: Tehnološka shema proizvodnje klinkerja in mletja cementa. ....  | 7  |
| Slika 3: Apno - kalcijev oksid (CaO). ....   | 8  |
| Slika 4: Kremen - silicijev dioksid (SiO <sub>2</sub> ). ....  | 9  |
| Slika 5: Korund - aluminijev oksid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). ....   | 9  |
| Slika 6: Hematit - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....   | 10 |
| Slika 7: Hitrost pretvorbe klinkerjevih mineralov pri hidrataciji običajnega PC pri sobni temperaturi. ....                      | 13 |
| Slika 8: Hitrost nastajanja hidratacijskih produktov pri hidrataciji obočajnega PC pri sobni temperaturi. ....                   | 14 |
| Slika 9: Hitrost sproščanja toplote pri hidrataciji običajnega PC. ....  | 16 |
| Slika 10: Vpliv začetne temperature betona na povečanje temperature zaradi hidratacije. ....                                     | 17 |
| Slika 11: Priraščanje temperatur v adiabatkih pogojih med hidratacijo za različne tipe cementov po ASTM. ....                    | 18 |
| Slika 12: Razpored temperature T(x) pri stacionarnem prevajanju toplote skozi zid. ....  | 23 |
| Slika 13: Trdno telo, skozi katerega prehaja toplota. ....   | 26 |
| Slika 14: Program HEATC ob zagonu. ....  | 35 |
| Slika 15: Prikaz merilca ALMEMO. ....  | 36 |
| Slika 16: Makrolokacija verige elektrarn na spodnji Savi. ....   | 37 |
| Slika 17: Podoba HE Boštanj po koncu gradnje. ....   | 38 |
| Slika 18: Gradbena jama HE Boštanj. ....   | 39 |
| Slika 19: Geometrijski podatki obodnih sten gradbene jame. ....  | 39 |
| Slika 20: Potek gradnje obodnih sten gradbene jame. ....   | 40 |
| Slika 21: Komora za določitev adiabatkih termičnih karakteristik betona. ....  | 41 |
| Slika 22: Notranjost komore za preskus ATK. ....   | 41 |
| Slika 23: Merska mesta za merjenje temperatur v in ob vodnjaku. ....   | 42 |
| Slika 24: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št. 12. ....                      | 43 |
| Slika 25: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.2 z začetno temperaturo T <sub>z</sub> = + 21,0°C. .... | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 26: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št.8 .....                                 | 46 |
| Slika 27: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.3 z začetno temperaturo $T_z = + 13,3^{\circ}\text{C}$ . .....   | 48 |
| Slika 28: Geometrijski podatki bloka 3a ter merska mesta. ....  | 49 |
| Slika 29: Časovno spreminjanje temperatur betona in zraka na bloku 3a.....  | 51 |
| Slika 30: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.11P z začetno temperaturo $T_z = + 19,0^{\circ}\text{C}$ . ....  | 52 |
| Slika 31: Osnovna mreža končnih elementov za vodnjaka št. 8 in št. 12 ter lokacija merskega mesta.....                                    | 53 |
| Slika 32: Zgoščena mreža končnih elementov za vodnjak št. 8 ter lokacija merskega mesta.....  | 54 |
| Slika 33: Mreža končnih elementov za betonski blok št. 3a ter lega merskega mesta.....  | 55 |
| Slika 35: Vodnjak št. 8. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami.<br>Zgoščena mreža končnih elementov. ....              | 58 |
| Slika 36: Vodnjak št. 8. Primerjava med temperaturnima poljema, ki smo jih izračunali z osnovno in zgoščeno mrežo končnih elementov. .... | 59 |
| Slika 37: Vodnjak št. 8. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - osnovna mreža končnih elementov. ....    | 60 |
| Slika 38: Vodnjak št. 8. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - zgoščena mreža končnih elementov.....    | 61 |
| Slika 39: Primerjava meritev na terenu in izračuna s programom HEATC na osnovni mreži končnih elementov.....                              | 63 |
| Slika 40: Vodnjak št. 12. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - osnovna mreža končnih elementov. ....   | 64 |
| Slika 41: Primerjava meritev na terenu in izračuna s programom HEATC na osnovni mreži končnih elementov.....                              | 67 |
| Slika 42: Prikaz temperaturnega polja masivnega betonskega bloka 60 ur po betoniranju. ....   | 68 |
| Slika 43: Časovno spreminjanje temperature betona v sredini masivnega betonskega za različne velikosti blokov.....                        | 72 |
| Slika 44: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 60 ur po betoniranju. Višina bloka je 1.5 m.....              | 73 |

---



|  |    |
|--|----|
| Slika 45: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 80 ur po betoniranju. Višina bloka je 2.0 m. ....      | 73 |
| Slika 46: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 100 ur po betoniranju. Višina bloka je 2.5 m. ....     | 74 |
| Slika 47: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 110 ur po betoniranju. Višina bloka je 3.0 m. ....     | 74 |
| Slika 48: Predpostavljeno dnevno spreminjanje temperature v okolici obravnavanega masivnega betonskega bloka za mesec julij. ....  | 76 |
| Slika 49: Predpostavljeno dnevno spreminjanje temperature v okolici obravnavanega masivnega betonskega bloka za mesec januar. .... | 77 |
| Slika 50: Primerjava poteka temperatur za poletje, zimo in dejanske temperature betoniranja. ..                                    | 77 |
| Slika 51: Časovno spreminjanje temperatur v masivnem betonskem bloku glede na izbrani temperaturni režim okolice. ....             | 79 |
| Slika 52: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 120 ur po betoniranju v poletnih razmerah. ....        | 80 |
| Slika 53: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 190 ur po betoniranju v zimskih razmerah. ....         | 80 |

## 1 UVOD

Reka Sava je s svojimi pritoki najpomembnejši vodotok v Sloveniji. Njeno porečje obsega 10872 km<sup>2</sup> ali 53.6% površine Slovenije. Za razliko od drugih dveh glavnih vodotokov, Drave in Soče, je Sava s svojim porečjem energetsko slabo izkoriščena. Od razpoložljivega hidropotenciala je izkoriščenih slabih 12%. Tudi delež hidroenergije v celotni proizvodnji električne energije pri nas je majhen (30%). Skladno z zahtevami EU bo Slovenija obvezana povečati delež električne energije pridobljene iz obnovljivih virov<sup>13</sup>. V ta namen, kot tudi zaradi vedno večje porabe energije pri nas, se je na spodnjem toku reke Save, nižje od Zidanega mosta, začela graditi veriga šestih hidroelektrarn. Prva – HE Vrhovo je bila dokončana leta 1993, druga - HE Boštanj pa je v letu 2006 pred priključitvijo v omrežje. Ena izmed glavnih značilnosti gradnje hidroenergetskih objektov je uporaba masivnih betonov in s tem povezanih številnih napak, ki so posledica nepoznavanja in/ali neupoštevanja mehanskih lastnosti masivnih betonov.

Znano je, da se pri hidrataciji cementa sprošča toplota. V primeru standardnih betonskih konstrukcij se toplota zaradi hidratacije cementa hitro transportira in izgubi v okolju. Tako ta pojav nima bistvenega vpliva na mehansko obnašanje betonov, predvsem na njihovo poškodovanost. Ta je posledica oviranih temperaturnih deformacij krčenja betona zaradi večje togosti zunanjih površin betonskega bloka. Bistveno drugačne so razmere pri masivnih betonih. V tem primeru moramo pojavu razpok strjujočega se betona zaradi povišanih temperatur posvetiti v fazi projektiranja in gradnje posebno pozornost. Grobo lahko pojav hidratacije cementa in s tem povezanih mehanskih lastnosti betona razdelimo v dve fazi. V zgodnji fazi opazimo v notranjosti masivnega betonskega bloka povišanje temperatur, na hladnejši zunanji površini masivnega betona pa zaradi temperaturnih gradientov razpoke zaradi prekoračene natezne trdnosti betona. Te poškodbe betona opazimo v nekaj dneh po vgradnji betona. V fazi ohlajanja betona pa opazimo razpoke v notranjosti masivnega betonskega bloka. V tej fazi hidratacije je beton v notranjosti bloka bolj tog kot, površina, ki predstavlja oviro temperaturnim deformacijam krčenja betona in posledično nastanejo razpoke v notranjosti bloka.<sup>14</sup>

V literaturi obstajajo številni modeli s katerimi opišemo proces hidratacije cementa in transport toplote v strjujočem se betonu. V prvo skupino modelov prištevamo tiste, ki so zasnovani na mikro nivoju. Te uporabljamo predvsem takrat, ko analiziramo fizikalno-kemijske procese povezane s hidratacijo cementa.<sup>14</sup> Za gradbenike bolj zanimive so modeli v drugi skupini. V to skupino prištevamo tiste, ki nam omogočajo analizirati transport toplote zaradi hidratacije cementa na makro nivoju. Izhodišče vseh teh metod predstavlja znani Fourierjev zakon prenosa toplote.<sup>1</sup> Fourierjev zakon predstavlja sistem parcialnih diferencialnih enačb z ustreznimi začetnimi in robnimi pogoji. Zaradi matematične zahtevnosti te enačbe rešimo z numeričnimi postopki. Običajno z metodo končnih elementov ali pa pri geometrijsko pravilnih oblikah z diferenčno metodo.<sup>1</sup> Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo je bil za reševanje tovrstnih problemov pred leti izdelan računalniški program HEATC.<sup>1</sup> Uporaba programa pri analizi vpliva požara na obnašanje betonskih, lesenih in jeklenih konstrukcij je že dobro raziskana, nekoliko manj pa pri določitvi časovnega spreminjanja temperatur v strjujočem se masivnem betonskem bloku. V tej nalogi bomo skušali to vrzel nekoliko zapolniti.

V diplomski nalogi se bomo ukvarjali z oceno natančnosti računalniškega programa HEATC za določitev temperaturnega polja strjujočih se masivnih betonskih blokov. To bomo storili s primerjavo med eksperimentalnimi rezultati temperaturnega polja značilnih masivnih betonskih blokov na HE Boštanj in numeričnimi rezultati. V nadaljevanju naloge bomo izdelali parametrično študijo vpliva velikosti blokov in zunanjih temperatur na časovno spreminjanje temperatur, predvsem pa temperaturnih gradientov, po masivnem betonskem bloku.

Diploma ima poleg uvoda še štiri poglavja. V drugem poglavju predstavimo proces hidratacije cementa in osnovne enačbe prenosa toplote v strjujočem se betonu. Tretje poglavje je posvečeno meritvam in validaciji računalniškega programa HEATC. Časovno spreminjanje temperatur betonskih blokov smo merili na HE Boštanj, preskuse adiabatno-termičnih karakteristik betona pa smo izvajali v gradbenem laboratoriju IRMA v Trzinu. V četrtem poglavju smo izdelali parametrično študijo. Detajlno nas je zanimalo, kako velikost masivnega betonskega bloka in temperatura okolice ter temperatura betona pri vgradnji

vplivata na časovno spreminjanje temperatur v masivnem betonskem bloku. Na koncu smo podali zaključke.

---

## **2 PROCES HIDRATACIJE CEMENTA IN ENAČBE PRENOSA TOPLOTE**

### **2.1 SPROŠČANJE TOPLOTE V SVEŽEM BETONU**

Beton sestavljajo agregat, cementno vezivo in pore, v katerih je lahko voda ali zrak. Pretežni del prostornine betona zavzema agregat, ki tudi najbolj vpliva na gostoto in toplotno prevodnost betona, deloma pa tudi na specifično toploto betona. Na hitrost sproščanja in količino sproščene hidratacijske toplote najbolj vpliva vrsta cementa. Seveda pa je količina sproščene hidratacijske toplote odvisna tudi od količine cementa v betonski mešanici.

#### **2.1.1 CEMENT**

##### **2.1.1.1 Zgodovina <sup>1</sup>**

V preteklosti so se uporabljala v gradbeništvu različna vezivna sredstva. Egipčani so uporabljali žgani nečisti mavec. Rimljani in stari Grki so že pridobivali apno z žganjem apnenca. Apno so zmešali z vodo in peskom ter dobili prvi beton v zgodovini gradbeništvu, ki pa ni bil obstojen v vodi. To težavo so rešili tako, da so k apnencu dodali vulkanski pepel. Tako je nastal material, ki je po vezanju z vodo postal vodoodporen. Ta material je po kraju Pouzolli blizu Vezuva v današnji Italiji, kjer je bil prvič najden in uporabljen, dobil ime pucolanski cement. To ime se je za cemente narejene iz materialov s podobno mineralno sestavo obdržalo vse do danes. V srednjem veku je to znanje o gradbenih materialih utonilo v pozabo, za gradnjo pa se je uporabljalo le žgano apno. Ponovni vzpon je cement kot vezivno sredstvo doživel v 18. stoletju. Leta 1824 je Joseph Aspdin patentiral portland cement (okrajšano PC). Ime je dobil po podobnosti strjenega cementa in kamna v okolici Portlanda, kraja na jugu Anglije. Aspdin je pridobival cement z žganjem drobnozrnate gline in apnenca, toda na prenizki temperaturi. Zaradi tega pri žganju ni dobil cementnega klinkerja. Isaac Charles Johnson pa je leta 1847 uspel pridobiti z žganjem mešanice gline in krednega apnenca v pečeh cementni klinker. Pri žganju so se izvedle vse kemijske reakcije, pri katerih nastajajo sestavine cementa, ki imajo močno vezivno sposobnost. Novo vezivo se je v gradbeništvu hitro prijelo in uporaba cementa je začela hitro naraščati. Danes je poraba cementa v tonah na prebivalca eden od kazalcev razvitosti držav.

### 2.1.1.2 Proizvodnja cementa<sup>8</sup>

Osnovna surovina za proizvodnjo cementa je lapor, ki je homogena zmes apnenca in gline. Lapor je nastal v preteklih geoloških dobah s sedimentacijo. Če naravnega laporja ni dovolj za masovno proizvodnjo, se surovinsko mešanico, ki mora vsebovati 75-78% kalcijevega karbonata ( $\text{CaCO}_3$ ), pripravlja z mešanjem apnenih in glinenih komponent, ki imajo od 35% do 95%  $\text{CaCO}_3$ . Apneno komponento predstavlja apnenec kot vir  $\text{CaO}$ . Glinene komponente kot so glina in glinasti skrilavci so nosilci  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Z dodajanjem dolomita vnašamo v sistem  $\text{MgO}$ .

Pri proizvodnji cementa (glej sliko 2) sestavlja prvo fazo drobljenje surovin. V drobilniku se nasipani surovinski material drobi na granulacijo pod 30 mm, nato se zdrobljena surovina s tekočim trakom transportira v predhomogenizacijsko halo. Tu se zdrobljena surovinska mešanica, ki je pripravljena iz zelo različnih komponent homogenizira. Homogenizacija poteka tako, da se surovine po drobljenju s tekočimi trakovi transportira v predhomogenizacijsko halo na kup v več sto plasteh. Material, ki ga je na enem kupu lahko tudi 22 000 ton, se odvzema prečno. Na ta način je dosežena dokaj dobra homogenizacija surovine. V predhomogenizacijski hali sta dva kupa, od katerih se eden uporablja za proizvodnjo klinkerja, drugi pa je v fazi priprave. V splošnem ima cementarna surovinsko rezervo, ki zadošča za enotedensko proizvodnjo. Naslednja postaja homogeniziranega materiala je mlin surovin. Tu se homogeniziran material melje v laporno moko. Ob mletju se po potrebi dodajajo različni dodatki:

- piritni ogorki in podobne Fe komponente za korekcijo vsebnosti  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- kremenčev pesek, za korekcijo vsebnosti  $\text{SiO}_2$ ,
- boksit, za korekcijo vsebnosti  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in
- sadra, za korekcijo vsebnosti  $\text{SO}_3$ .

Po mletju surovine v mlinih dobimo laporno moko, to je sivo rumen, fin prah, ki ga skladiščimo v homogenizacijske silose. Za polnjenje le-teh se uporabljajo različni elevatorji in ciklonski transporterji. Laporna moka gre nato skozi izmenjevalec toplote v peč. S tem v procesu proizvodnje klinkerja optimiziramo izkoristek energije za pečenje klinkerja. V izmenjevalcu se surovina s pomočjo dimnih plinov iz rotacijske peči ogreje na temperaturo  $800-820^\circ\text{C}$ . Laporna moka se potem dozira v rotacijsko peč, ki ima obliko cevi premera do 5 m in dolžine do 150 m ter se med obratovanjem vrti s hitrostjo 1-2 obrata/min. Ta peč je

---

nekoliko nagnjena na svojo vodoravno lego, da se material prosto premika od izmenjevalca toplote (višji del) proti hladilnikom klinkerja, ki so nameščeni po obodu na izstopu iz peči. Potrebno energijo za žganje klinkerja dovajamo skozi gorilnik, ki se nahaja na spodnji strani peči, kjer klinker zapušča peč. Kot goriva lahko uporabljamo zemeljski plin, mazut, premogov prah, odpadna olja ali kombinacijo naštetih goriv. Dnevno porabi peč okoli 180 000 m<sup>3</sup> plina ali 160 t mazuta. Peč lahko ogrevamo tudi na zgornji strani pod izmenjevalcem toplote z odpadnimi gumami. Klinker, ki izstopa iz peči, najprej ohladimo in potem shranimo v skladišču, od tam pa se transportira z elevatorji do mlinov cementnega klinkerja. Klinker se zmelje v komornih, krogličnih mlinih z različnimi dodatki v fin sivo zelen prah - cement. Glede na zahtevane lastnosti in predpisane standarde, lahko cementi vsebujejo dodatke:

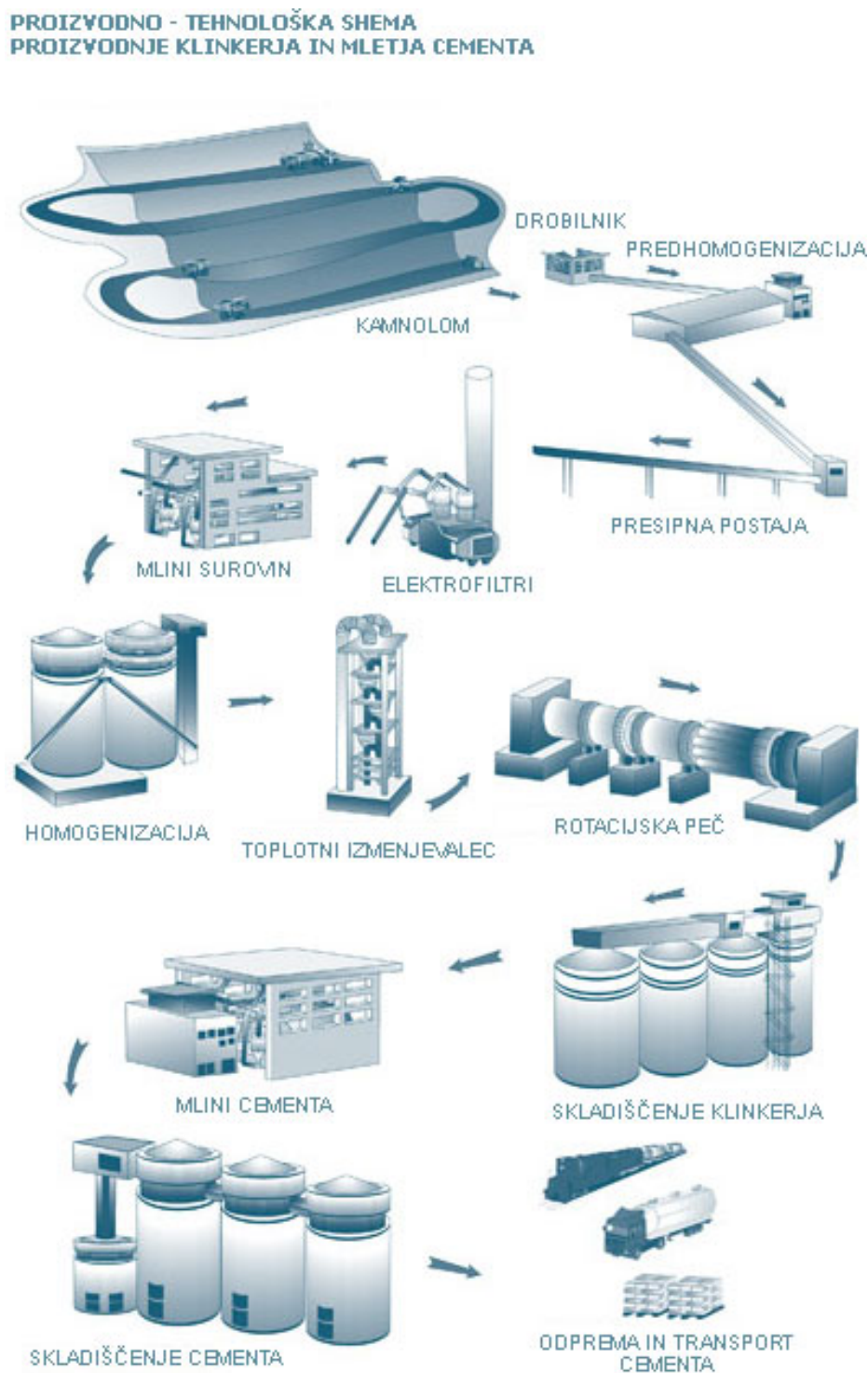
- sadro kot obvezen dodatek za regulacijo vezanja (v primeru pomanjkanja sulfata pride do prehitrega in lažnega vezanja),
- žlindre,
- pucolane (naravni in umetni),
- apnenec in
- elektrofilterski pepeli.

Zahtevane karakteristike za posamezne tipe cementa dosežemo tudi z ustrezno finostjo mletja. Pri tem je pomembna specifična površina cementa. Ta nam pove kako fino je cement zmlet. Pomemben podatek je tudi ostanek na situ 90 µm. Cement nato transportiramo v skladišče cementa. Cement se po mletju skladišči v silosih in pripravlja na kamionsko in vavonsko odpremo v vrečah (slika 1)<sup>9</sup> in v razsutem stanju - rinfuzo. Proizvodno-tehnološko shemo proizvodnje klinkerja in mletja cementa prikazujemo na sliki 2.



Slika 1: Pakiranje cementa v 50-kilogramske vreče.

V Sloveniji izdelujemo cement v Anhovem (Salonit Anhovo) in v Trbovljah (Lafarge), ki skupaj izdelata letno okoli 1 225 000 ton cementa.



Slika 2: Tehnološka shema proizvodnje klinkerja in mletja cementa.



### 2.1.1.3 Kemijska in mineraloška sestava portland cementa <sup>1,6</sup>

Cement sestavljajo pretežno Ca, Si, Al in Fe oksidi. Količina kalcijevega oksida (CaO) v cementu je 60-67%, silicijevega oksida (SiO<sub>2</sub>) je 17-25%, aluminijevega oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) je 3-8% in železovega oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.5-6%. V manjši meri vsebuje cement tudi magnezijev oksid (MgO), titanov dioksid (TiO<sub>2</sub>), manganov oksid (Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), kalijev dioksid (KO<sub>2</sub>) in natrijev dioksid (NaO<sub>2</sub>). Ti oksidi predstavljajo nečistoče v sestavi cementa.

Kalcijev oksid (CaO) (slika 3) oziroma apno je zelo pomembna sestavina cementa. Večinoma ga dobimo z razgradnjo kalcijevega karbonata (CaCO<sub>3</sub>). Apno je bele barve in je amorfni material. Gostota apna je 3 080 do 3 300 kg/m<sup>3</sup>. Kemična reaktivnost apna je odvisna od temperature, na kateri je bilo apno pripravljeno. Apno, ki ni bilo segreto nad 1000°C, se pogasi takoj, ko mu dodamo vodo. Če smo apno segrevali pri višjih temperaturah, potrebuje za hidratacijo več časa. Tališče apna je pri 2 570°C. V portland cementu je le majhna količina prostega kalcijevega oksida.



*Slika 3: Apno - kalcijev oksid (CaO).*

Produkt hidratacije kalcijevega oksida je kalcijev hidroksid (Ca(OH)<sub>2</sub>). Kalcijev hidroksid razpade na kalcijev oksid in vodo že pri temperaturi 400°C in ga takoj po žganju ne zasledimo v cementnem klinkerju. Nastane šele ob mletju klinkerja, ko le-temu dodajamo mavec. Kalcijev hidroksid reagira z ogljikovim dioksidom (CO<sub>2</sub>) v kalcijev karbonat (CaCO<sub>3</sub>) – apnenec. Ta reakcija je vzrok za strjevanje apnenih malt. Pogoj za to reakcijo pa je vlažno okolje.

Silicijev dioksid (SiO<sub>2</sub>) (slika 4) oziroma kremen je najpogostejši mineral v naravi in je komponenta mnogih silikatov, kamor uvrščamo tudi gline. V cementih je prisoten v

kombinaciji z drugimi oksidi. Je glavna sestavina pucolanov, uporabljamo pa ga lahko tudi kot agregat v maltah. V naravi najdemo kremen v kristalni obliki. Kremen ima gostoto  $2\,651\text{ kg/m}^3$  in trdoto 7 po Mohsovi lestvici. Pri segrevanju osnovna oblika kremena prehaja v sekundarne, pri nadaljnjem segrevanju, če ni prepočasno, pa prosto preide v amorfno obliko – steklo. Kremen je pri sobni temperaturi kemično zelo nereaktiven.



*Slika 4: Kremen - silicijev dioksid ( $\text{SiO}_2$ ).*

Aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (slika 5) je pomembna komponenta cementa. V cementih se obnaša kot kislina. Nahaja se v kombinaciji s silicijevim dioksidom v alumosilikatih – v glinah. Prosto se nahaja v boksitu tj. aluminijevi rudi. Čisti aluminijev oksid se v naravi nahaja v kristalni obliki kot korund. Tališče korunda ocenjujejo na  $2\,040^\circ\text{C}$ , gostoto pa na  $3\,900$  do  $4\,100\text{ kg/m}^3$ . Trdota korunda je 9. Ob hidrataciji portland cementa ne pride do nastanka hidratiranega aluminijevega oksida. Le-ta nastane ob hidrataciji visoko aluminatnih cementov.



*Slika 5: Korund - aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).*

Poznamo več vrst železovih oksidov. Vseh je v običajnih portland cementih relativno malo, pomembneje pa so zastopani v visoko aluminatnih cementih. Količina limonita ( $\text{FeO}$ ) v

---

portland cementih je zanemarljiva. Nekaj več je hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (slika 6), ki podobno kot aluminijev oksid deluje v cementu kot kislina.



Slika 6: Hematit -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Pri segrevanju sestavin cementa se opisani oksidi združujejo v kompleksnejše produkte. Tako se doseže skoraj popolno stanje kemijskega ravnotežja. To ravnotežje pa se na žalost ne ohranja pri ohlajevanju. Hitrost ohlajevanja vpliva na stopnjo kristalizacije in na količino amorfnega materiala, ki ima sicer enak kemijski sestav, vendar drugačne lastnosti. Dodatni problem se pojavi, ko raztopljen klinker reagira z že kristaliziranimi delci. Kljub tem težavam lahko predpostavimo, da je cement v stanju zmrznjenega kemijskega ravnotežja.

Osnovne sestavine cementa običajno označimo z okrajšanimi simboli oksidov: CaO s C,  $\text{SiO}_2$  s S,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z A in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s F. Obstajajo dvojni, trojni in četverni sistemi oksidov, ki imajo dve, tri ali štiri različne vrste oksidov. Četverni sistemi oksidov se v cementu pojavljajo redko.

V splošnem poznamo zelo različne dvojne in trojne sisteme z različnimi oksidi in različnimi razmerji med oksidi. Glavne sestavine portland cementa pa so trikalcijev silikat –  $\text{C}_3\text{S}$ , dikalcijev silikat –  $\text{C}_2\text{S}$ , trikalcijev aluminat –  $\text{C}_3\text{A}$  in tetrakalcijev alumoforit –  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Trikalcijev silikat – alit ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ali krajše  $\text{C}_3\text{S}$ ) ponavadi predstavlja glavno komponento cementa. Pojavlja se v obliki enakomerno majhnih brezbarvnih zrn. Njegova gostota je  $3\ 150\ \text{kg/m}^3$ . V običajnem portland cementu je 30-60% trikalcijevega silikata. Je zelo reaktiven, pri strjevanju daje visoke trdnosti betona, pri hidrataciji pa sprošča veliko toplote.

Dikalcijev silikat – belit ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ali krajše  $\text{C}_2\text{S}$ ) lahko opazimo v cementu v treh oblikah (nekateri trdijo, da celo v štirih). Različne oblike so stabilne v različnih temperaturnih območjih. Gostota belita se spreminja od  $2\,970 - 3\,400\text{ kg/m}^3$ , torej se pri spreminjanju oblik pri konstantni masi spreminja prostornina. V cementu se ponavadi nahaja oblika, ki jo spoznamo po zaokroženi obliki zrnca. V običajnih portland cementih imamo 15-35% belita. Zanj je značilno počasno in postopno strjevanje betona, pri hidrataciji pa sprošča malo toplote.

Trikalcijev aluminat ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ali krajše  $\text{C}_3\text{A}$ ) se v cementu nahaja v obliki enakomernih zrnca, ki včasih na zunaj kažejo kubično kristalno zgradbo. Trdota trikalcijevega aluminata je 6, gostota je  $3040\text{ kg/m}^3$ , tališče pa je pri  $1535^\circ\text{C}$ . Pri tej temperaturi  $\text{C}_3\text{A}$  razpade na  $\text{CaO}$  in talino. Trikalcijevega aluminata je v cementu relativno malo, v običajnem portland cementu približno 10%, je pa pomembna sestavina cementa. Ob dotiku z vodo izredno hitro reagira, zato običajno dodajamo cementu mavec, ki deluje kot zaviralec hidratacije  $\text{C}_3\text{A}$ . Hidrat  $\text{C}_3\text{A}$  ima precej porozno strukturo. Če bi dovolili, da bi  $\text{C}_3\text{A}$  hidratiral prvi, bi bila celotna struktura hidratiranega cementa bolj porozna. To bi negativno vplivalo na lastnosti cementa kot veziva. Občutljiv pa je na sulfatno korozijo.

Tetrakalcijev alumino ferit je dejansko le oznaka za trojni sistem  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Pojavlja se v razmerjih  $\text{C}_2\text{F}$  do  $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$ . V običajnem portland cementu je približno 10%  $\text{C}_4\text{AF}$ . Zanj je značilno počasno strjevanje betona, pri hidrataciji pa sprošča malo toplote. Je pa odpornejši na sulfatno korozijo od  $\text{C}_3\text{A}$ .

#### **2.1.1.4. Hidratacija cementa <sup>5</sup>**

Kemijski proces hidratacije cementa je zelo kompleksen. Opišemo ga s serijo reakcij med posameznimi klinkerjevimi minerali ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  in  $\text{C}_4\text{AF}$ ), kalcijevim sulfatom in vodo. Reakcije potekajo tako vzporedno kot zaporedno z različnimi hitrostmi in tudi vplivajo ena na drugo.

V začetku hidratacije je proces kontroliran s hitrostjo raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. Sledi obdobje mirovanja, ki traja nekaj ur. V nadaljevanju postane hitrost

---

hidracije odvisna od hitrosti nukleacije in rasti kristalov hidrationskih produktov, v končni fazi pa od hitrosti difuzije vode in v vodi raztopljenih ionov.

Kinetiko hidrationskega procesa določajo:

- fazna sestava klinkerja ter količina in vrsta tujih ionov v mineralih klinkerja,
- mikrostruktura klinkerja, ki je odvisna od pogojev žganja klinkerja (hitrosti segrevanja, maksimalne temperature žganja ter hitrosti ohlajanja),
- količina in oblika kalcijevega sulfata,
- finost cementa in granulacijska sestava cementa,
- vodocementno razmerje pri pripravi mešanice,
- pogoji zorenja (vlaga in temperatura) in
- prisotnost kemičnih dodatkov v mešanici.

Glede na hitrost sproščanja toplote hidrationske lahko hidrationsko razdelimo na več stopenj:

**Pred-indukcijsko obdobje** traja prvih nekaj minut po zamešanju cementa in vode. V tem času poteka hitro raztapljanje klinkerjevih mineralov v vodi in začetna faza hidrationske je le-teh. Oba procesa sta eksotermna, zato je tudi toplotni tok na začetku velik.

Delež  $C_3S$ , ki hidratizira v tej stopnji, ostane nizek in običajno znaša med 2% in 10%.  $C_3A$  se raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni v raztopini klinkerjevih mineralov, pri čemer nastaja etringit (AFt). Deleža  $C_3A$  in  $C_4AF$ , ki reagirata v tej stopnji, znaša 5-25% (slika 7)<sup>5</sup>. Delež  $C_2S$ , ki reagira v tej stopnji, pa je običajno zelo nizek.

**Indukcijsko obdobje ali obdobje mirovanja** traja prvih nekaj ur. Po začetnem kratkem obdobju hitre hidrationske, se hitrost reakcij zelo zmanjša. Vzrok za pojav indukcijskega obdobja in tudi začetek obdobja pospešene hidrationske razlagata dve teoriji.

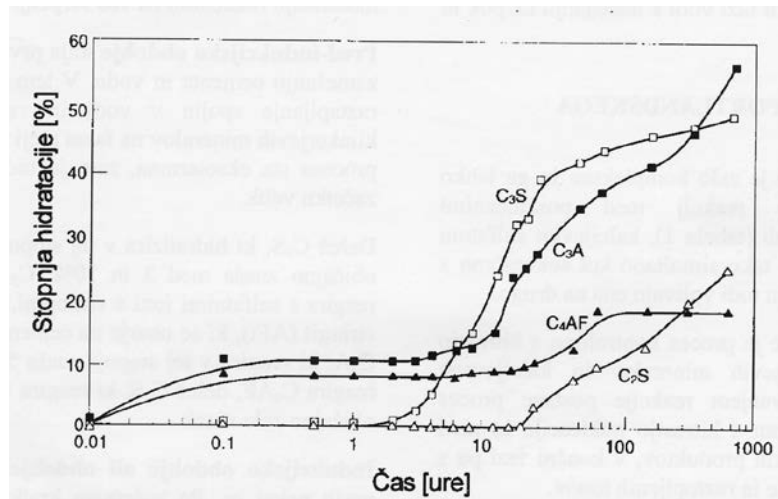
Teorija zaščitnega sloja pravi, da se nehidratizirani cementni delci v pred-indukcijskem obdobju obdajo z zaščitno plastjo hidrationskih produktov. Zaradi tega pride do upočasnevanja reakcij hidrationske. V nadaljevanju pa zaradi morfoloških sprememb hidratov, ki sestavljajo zaščitni sloj, le-ta počasi oziroma postane bolj permeabilen, kar povzroči ponovni proces hidrationske cementa.

Teorija kristalizacijskih jeder pa pojasni pojav obdobja mirovanja z nastankom nasičene raztopine kalcijevega hidroksida, ki onemogoči nadaljne reakcije. Ko se v raztopini pojavijo

kristalizacijska jedra, se prične izločanje kristalov kalcijevega hidroksida nanje. Koncentracija kalcijevih ionov v raztopini ponovno pade in indukcijsko obdobje je s temkončano.

**Obdobje pospešene hidratacije** traja 3 do 12 ur po zamešanju cementne paste. Ta faza hidratacije je kontrolirana s hitrostjo nukleacije in rasti hidratacijskih produktov. Hitrost hidratacije  $C_3S$  in  $C_2S$  se povečuje in doseže maksimalne vrednosti (slika 7)<sup>5</sup>.

V obdobju **pojemažoč** hidratacije se začne hitrost reakcij ponovno manjšati, proces postane odvisen od hitrosti difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki obdajajo nehidratizirane cementne delce. C-S-H nastaja kot posledica hidratacije  $C_3S$  in  $C_2S$ , kjer delež  $C_2S$  s časom narašča. Zaradi tega začne hitrost nastajanja kalcijevega hidroksida padati. Etringit, ki je nastal v začetku hidratacije, začne zdaj zaradi pomanjkanja sulfata v raztopini reagirati z nehidratiziranimi  $C_3A$  in  $C_4AF$ . Pri tem nastaja monosulfat (AFm). Sledi zorenje hidratiziranega materiala, ki je povezano z nadaljno polikondenzacijo  $SiO_4$  tetraedrov in podaljševanjem verig  $SiO_4$  v nastalem C-S-H gelu.



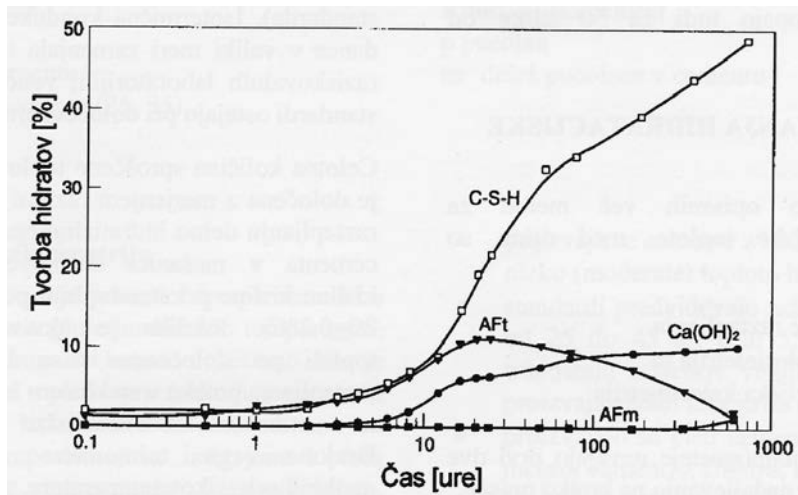
Slika 7: Hitrost pretvorbe klinkerjevih mineralov pri hidrataciji običajnega PC pri sobni temperaturi.

Produkti hidratacije so hidrati. Delimo jih na:

- hidrate kalcijevih silikatov (C-S-H) in
- hidrate trikalcijevega aluminata (Aft, AFm).

V cementu je največ kalcijevih silikatov, zato je hidratacija le-teh zelo pomembna. Približna formula za hidrate kalcijevih silikatov je  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  ali C-S-H. Hidrat je na videz amorfna snov, vendar mikroskopske raziskave pokažejo kristalno strukturo.

Na sliki (slika 8)<sup>5</sup> prikazujemo hitrost nastajanja različnih hidratacijskih produktov običajnega portlandskega cementa pri sobni temperaturi.



Slika 8: Hitrost nastajanja hidratacijskih produktov pri hidrataciji obočajnega PC pri sobni temperaturi.

Na koncu omenimo še pomembno ugotovitev pri procesu hidratacije cementa, ki pravi da so po 28 dneh cementna zrnca hidratirana le do globine 4  $\mu\text{m}$ , po enem letu pa le dvakrat globlje. Tako je popolna hidratacija možna le pri zrnih cementa manjših od 50  $\mu\text{m}$ , pa še to le pri posebnih načinih betoniranja. Zaradi tega je razumljivo, da velikost zrn cementa vpliva na trdnost cementa in s tem na trdnost betona. Posledično je pri starosti 28 dni tlačna trdnost betona ali cementnega kamna (strjene cementne paste) pri bolj grobih zrnih cementa do 15% manjša, kot pri bolj drobnih.

Vsebnost vode v betonu je pomembna, saj hidratacija in vezanje lahko potekata le v območjih, kjer je dovolj vode. Če je ni dovolj, pride zaradi absorpcije vode do pojava samoizsuševanja in hidratacija se upočasni in poslabša. Vodocementno razmerje večje od 0.50 že omogoča hidratacijo z enako hitrostjo, kot če bi cementno pasto hranili v vlažnem okolju.

### 2.1.2. HIDRATACIJSKA TOPLOTA <sup>1,5</sup>

Hidratacija je eksotermna kemijska reakcija. Zato se ob hidrataciji sprošča toplota, ki doseže do 500 J/g cementa. Pri vezanju cementa se toplota sprošča:

- zaradi kemijske reakcije cementa in vode in
- zaradi absorpcije vode na površini strjene cementne paste.

Sproščena toplota se zaradi relativno slabe prevodnosti betona ne more hitro izgubiti v okolje. Zato se beton v notranjosti debelejših slojev zelo segreje. Na robu pa se beton ohladi na temperaturo okolice, kar lahko povzroči znatne temperaturne gradiente. Do podobnih ali še večjih temperaturnih gradientov lahko pride tudi v zaključni fazi hidratacije ali celo po zaključku hidratacije, ko se beton ohlaja. V notranjosti betonskih blokov se pojavijo razpoke, ki lahko katastrofalno vplivajo na obstojnost konstrukcije. Obstajajo različni tehnološki postopki, s katerimi zmanjšamo negativen vpliv sproščanja hidratacijske toplote na nastanek razpok v masivnem betonu:

- predhodno ohlajanje svežega betona,
- ohlajanje med samim vezanjem betona s pomočjo hladne vode, ki teče skozi cevi postavljene v masivnem betonskem bloku,
- zamenjava dela cementa z dobrim pucolanom,
- vgrajevanje betona v tanjših plasteh,
- zmanjšanje količine cementa v betonu na vrednost, ki še omogoči zahtevano trdnost,
- uporaba cementa z nizko hidratacijsko toploto in
- podaljšanje časa med vgraditvami posameznih slojev.

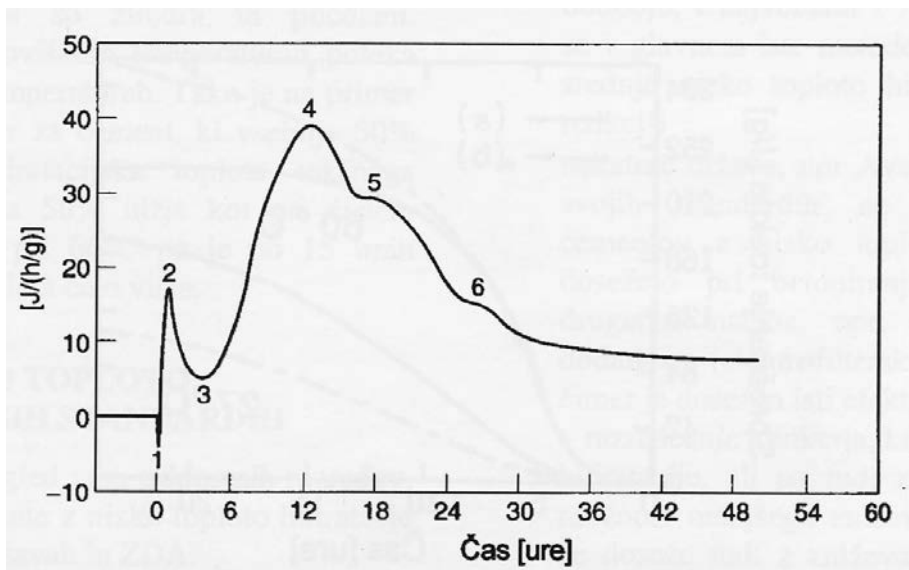
Po drugi strani pa v mrzlem okolju izkoristimo sproščanje hidratacijske toplote za preprečitev zmrzovanja vode v sveže vgrajenem betonu. To velja predvsem pri standardnih gradbenih konstrukcijah.

Hitrost sproščanja hidratacijske toplote za običajne portlandske cemente prikazujemo na sliki 9<sup>(5)</sup> Če cementi vsebujejo kalijev sulfat ( $K_2SO_4$ ), se takoj po zamešanju zgodi majhna endotermna reakcija (reakcija pri kateri se absorbira toplota iz okolice) povezana z raztapljanjem le-tega (1). Intenzivno sproščanje toplote z maksimumom (2) po nekaj minutah hidratacije je posledica hitre reakcije  $C_3S$  in  $C_3A$  v pred-indukcijskem obdobju. K temu procesu sproščanja toplote prispeva tudi hidratacija kalcijevega sulfata hemihidrata v dihidrat. Upočasnjenu prirastku hidratacijske toplote v obdobju mirovanja, ki se na krivulji kaže kot minimum (3), sledi glavna eksotermna reakcija (4), ki doseže maksimum po nekaj urah in je posledica hidratacije  $C_3S$  ter nastajanja C-S-H in portlandita (kalcijevega hidroksida). Po tem se hitrost reakcije ponovno upočasni. Na delu krivulje, ki sledi glavnemu eksotermu včasih

---



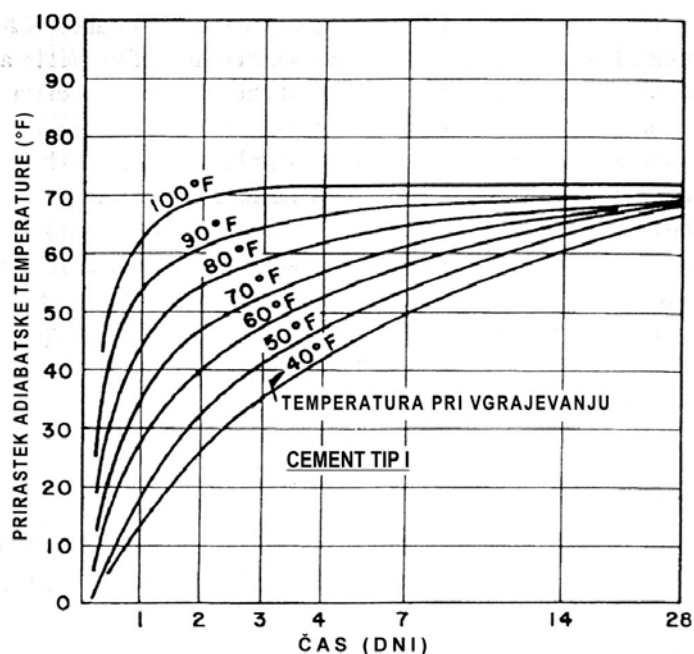
zasledimo še dve grbi. Prva (5) je posledica ponovne tvorbe etringita, druga (6) pa je povezana s pretvorbo etringita v monosulfat (AFm).



Slika 9: Hitrost sproščanja toplote pri hidrataciji običajnega PC.

Pomembno je tudi, da se pri običajnih portland cementih polovica hidrationske toplote sprosti v prvih treh dneh, tri četrtine v prvem tednu in 83 do 91 % v prvih šestih mesecih.

Časovni potek sproščanja toplote je odvisen od temperature betona pri vgrajevanju. Hitrost sproščanja hidrationske toplote je vsaj na začetku nekoliko višja pri višjih začetnih temperaturah betona (slika 10)<sup>3</sup>. Nekateri raziskovalci trdijo, da je hitrost sproščanja toplote pri višjih začetnih temperaturah večja pri poljubnem času. Zato je večja tudi celotna sproščena hidrationska toplota. Drugi raziskovalci pa so ugotovili, da pri previsokih začetnih temperaturah hidrationska poteka po hitrem začetku upočasni in je manjša tudi celotna sproščena hidrationska toplota. Ta pojav pojasnijo s tem, da pri visoki temperaturi hidrationska poteka izjemno hitro. Produkti hidrationske se nakopičijo na mestu, kjer se je reakcija zgodila in se ne morejo optimalno razporediti, kot se to zgodi pri vgradnji betona z nižjo začetno temperaturo. Nadaljnja hidrationska je pri tem ovirana.

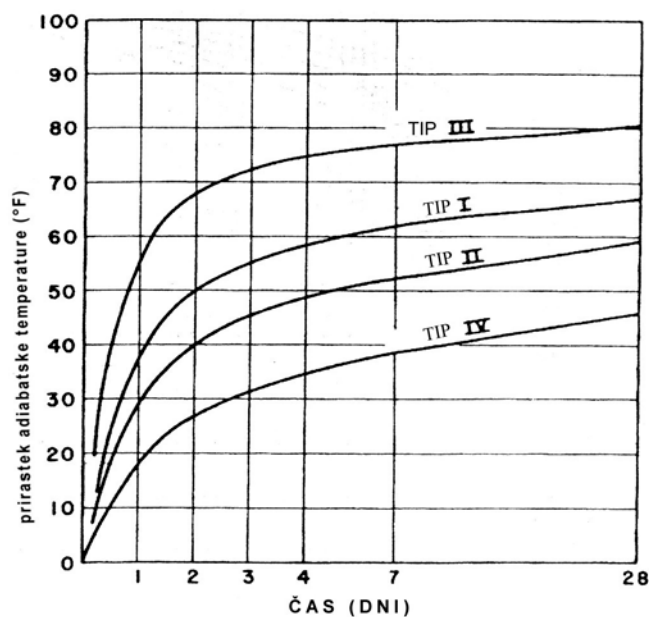


Slika 10: Vpliv začetne temperature betona na povečanje temperature zaradi hidratacije.

Posamezne sestavine cementa imajo zelo različne prispevke k celotni sproščeni hidratacijski toploti.  $C_3S$  prispeva 502 J/g,  $C_2S$  260 J/g,  $C_3A$  867 J/g in  $C_4AF$  prispeva 419 J/g.

Deleži različnih sestavin cementa odločilno vplivajo na hidratacijsko toploto celotnega cementa. Čisti cement (tip cementa I po ASTM) vsebuje 30-60%  $C_3S$ , 15-35%  $C_2S$  in približno 10%  $C_3A$ . Običajni cement (tip cementa II po ASTM) ima manjši delež  $C_3A$  in večji delež  $C_2S$  in zato razvije nižjo hidratacijsko toploto. Pri večjem deležu  $C_3A$  (tip cementa III po ASTM) je lahko hidratacijska toplota cementa tudi do 100% večja. Pri cementu z nizkim deležem  $C_3S$  in  $C_3A$  (tip cementa IV po ASTM) dosega hidratacijska toplota cementa le polovico toplote cementa tipa III.

Na sliki (slika 11)<sup>3</sup> prikazujemo krivulje prirastkov temperatur med hidratacijo cementa v adiabatih pogojih za različne tipe cementov po ASTM.



| Tip cementa po ASTM | Finost po ASTM C 115 cm <sup>2</sup> /gm | Hidrationska toplota pri 28 dneh cal/gm |
|---------------------|--|---|
| I                   | 1790                                     | 87                                      |
| II                  | 1890                                     | 76                                      |
| III                 | 2030                                     | 105                                     |
| IV                  | 1910                                     | 60                                      |

Slika 11: Prirščanje temperatur v adiabatnih pogojih med hidratacijo za različne tipe cementov po ASTM.

## 2.1.3. VRSTE CEMENTA

Proizvajalci cementa ponujajoemente z različnimi lastnostmi. V grobem jih lahko razdelimo v portland cemente, ki jih je največ, metalurške cemente, pucolanske cemente, supersulfatne cemente in aluminatne cemente.

### 2.1.3.1. Ameriški ASTM<sup>15</sup> in slovenski SIST EN standard<sup>3,6</sup>

Preglednica 1 prikazuje vrste portlandskih cementov, kot jih poznajo ameriški (ASTM) standardi.

Portlandski cement tipa I je normalni portlandski cement. To je kvaliteten cement, s katerim betoni dosegajo dobro trdnost. Uporaben je za gradnjo vseh vrst betonov v običajnih gradbenih konstrukcijah.

Portlandski cement tipa II je po osnovnih karakteristikah praktično enak cementu tipa I. Razlikuje se v tem da se v procesu hidratacije sprosti manj hidratacijske toplote. To je posledica dejstva, da ta cement vsebuje več  $C_2S$  in manj  $C_3A$ . Cement tipa II je odporen proti zmerno sulfatno agresivnim vodam, ker ima nizko vsebnost  $C_3A$ , ki s sulfati tvori destruktivno delujoči etringit.

Portlandski cement tipa III je visokovredni portlandski cement, ki hitro razvije visoke začetne trdnosti. Vezanje tega cementa je normalno, trdnosti pa naraščajo in so po enem dnevu najmanj 18 MPa. Cement tega tipa se uporablja za gradnjo prednapetih betonskih konstrukcij, pri gradnji prefabriciranih tankih betonskih gradbenih elementov ter povsod tam, kjer se zahteva hitro razopazjenje betona in visoko trdnost betona že v zgodnjem času betoniranja.

Portlandski cement tipa IV ima nižjo vsebnost  $C_3S$  in  $C_3A$ , torej ne vsebuje veliko mineralov, ki razvijejo največ hidratacijske toplote, zato se pri hidrataciji ne sprosti veliko hidratacijske toplote in se zato uporablja pri betoniranju konstrukcij iz masivnega betona.

Portlandski cement tipa V je zaradi nizke vsebnosti  $C_3A$  odporen proti sulfatnim vodam in se uporablja povsod tam, kjer nastopa sulfatna korozija.

Portlandski cement tipa IS je cement s 25-70 % dodane žindre. Dobimo ga s skupnim mletjem žindre in cementnega klinkerja. Obstaja tudi tip S, ki je mešanica hidriranega apna in vsaj 70% žindre, in se meša s portland cementom.

Portlandski cement tipa IP je mešanica portland cementa ali portland cementa z dodatkom žindre in fino mletega pucolana, ki ga je 15-40 %. Obstaja tudi tip P z deležem pucolana > 40%.

---

*Preglednica 1: Razdelitev cementov skladno s standardom ASTM.*

| Tip cementa             | Angleški opis                  | Opis po ASTM |
|-------------------------|--------------------------------|--------------|
| običajni PC             | ordinary portland              | Type I       |
| hitro vezoči PC         | rapid hardening portland       | Type III     |
| zelo hitro vezoči PC    | extra rapid hardening portland | -            |
| nizko toplotni PC       | low heat portland              | Type IV      |
| mešani PC               | modified cement                | Type II      |
| sulfatnoodporni PC      | sulphate resisting portland    | Type V       |
| PC z dodatkom žindre    | portland blast-furnace slag    | Type IS      |
| PC z dodatkom pucolanov | portland-pozzolana             | Type IP      |
| beli PC                 | white portland                 | -            |

V novem slovenskem standardu SIST EN 197-1 se cementi delijo na:

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

Znotraj teh glavnih vrst so navedene še posamezne podvrste cementov, skupaj 27 običajnih cementov. Oznaka CEM I predstavlja čisti portlandski cement brez dodatkov, oznaka CEM II pa portlandske cemente z različnimi dodatki:

- portlandski cement z dodatkom žindre,
- portlandski cement z dodatkom mikrosilike,
- portlandski cement z dodatkom pucolana,
- portlandski cement z dodatkom elektofiltrskega pepela,
- portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca,
- portlandski cement z dodatkom apnenca in
- portlandski mešani cement.

Oznaka CEM III predstavlja žlindrin cement, oznaka CEM IV pucolanski cement, oznaka CEM V pa mešani cement.

## **2.2 PRENOS TOPLOTE <sup>1</sup>**

Če imata dva dela nekega telesa oziroma snovi različni temperaturi, se toplota prenaša od toplejšega k hladnejšemu delu in se tako temperaturna razlika manjša. Prenos toplote poteka na tri različne načine:

- prevajanje (kondukcija) toplote, to je prenos toplote skozi snov zaradi prenosa energije med posameznimi molekulami,
- konvekcija, to je prenos toplote zaradi relativnega makroskopskega gibanja snovi in
- sevanje (radiacija), to je prenos toplote s pomočjo elektromagnetnega sevanja med dvema relativno oddaljenima deloma.

V snovi, ki se nahaja v plinastem agregatnem stanju, sta poglobitni obliki prenašanja toplote konvekcija in radiacija, manjša pa je vloga kondukcije. V snovi v tekočem agregatnem stanju so približno enakovredno prisotne vse tri oblike prenosa toplote. Če se snov nahaja v trdnem agregatnem stanju, ni konvekcije, vpliv radiacije pa je zanemarljiv. Zato je prevajanje toplote najvažnejša oblika prenosa toplotne energije skozi trdno telo. Konvekcija in sevanje pa sta pomembni obliki prenosa toplote na zunanji površini trdnega telesa.

### **2.2.1. PREVAJANJE TOPLOTE**

Toplota snovi je dejansko notranja energija snovi, ki je odvisna od fizikalno-kemijskega stanja snovi - orientacije in gibanja molekul in atomov v snovi. To stanje snovi kvantitativno podajamo s temperaturo. Ker je toplotna energija odvisna od translatornega gibanja, rotacije in nihanja molekul (atomov), je tudi prevajanje toplote neposredno odvisno od teh gibanj. Pri višji temperaturi se povečajo hitrosti in frekvence gibanja molekul (atomov), zato bo tudi prevajanje toplote intenzivnejše pri višji temperaturi. Ugotovili so, da poteka prevajanje toplote v amorfnih trdnih snoveh, tekočinah in plinih preko neposrednega prenosa energije od molekule (atoma) na molekulo (atom). Pri bolj urejeni strukturi snovi (kristali) pa se nihanje posameznih molekul (atomov) prenese na nihanje celotne (kristalne) mreže. Trdne snovi lahko delimo na dielektrične in kovinske. V dielektričnih snoveh prevajanje toplote poteka le s pomočjo gibanja molekul (atomov), pri kovinah in drugih električnih prevodnikih pa pri

---

prevajanju sodelujejo tudi prosti elektroni. Zato so dobri električni prevodniki ponavadi tudi boljši toplotni prevodniki.

Pri spremembi iz trdnega agregatnega stanja v tekoče se poruši urejena struktura, za kar se porabi določena energija (energija talitve). Kljub temu pa se ohranijo močne medmolekularne vezi in je stanje precej podobno stanju v trdnem agregatnem stanju.

Pri spremembi agregatnega stanja iz tekočega v plinasto pa se porušijo vse medmolekularne vezi, razdalje med posameznimi molekulami se zelo povečajo, molekule se lahko prosto gibajo v vseh smereh in se le občasno trčijo s posameznimi drugimi molekulami. Prevajanje toplote v plinih je zato drugačen pojav in ga tudi drugače obravnavamo.

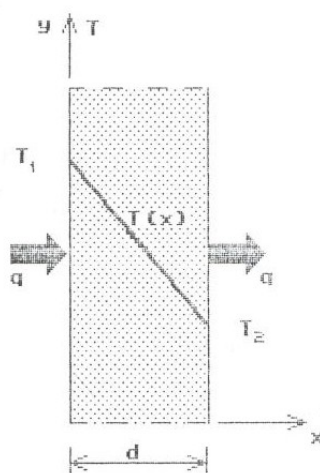
### **2.2.1.1. Osnovni pojmi prevajanja toplote**

Opazujemo prevajanje toplote skozi raven zid debeline  $d$  in dovolj velikih drugih dveh dimenzij, tako da je prevajanje toplote v smeri pravokotno na steno zidu nemoteno. Na eni strani ohranjamo konstantno temperaturo  $T_1$ , na drugi pa  $T_2$ . Ko se doseže stacionarno stanje, to je, ko se temperature v zidu s časom ne spreminjajo, merimo toplotni pretok  $q$  skozi izbrano površino zidu  $A$  (glej sliko 12).

Merjenja kažejo, da količino toplotnega pretoka lahko opišemo z izrazom

$$q = \frac{k \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{d} \quad , \quad (2.1)$$

kjer je  $k$  ( $\text{J/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ) koeficient toplotne prevodnosti. Zakon, ki ga določa enačba (2.1), imenujemo Fourierjev zakon.



Slika 12: Razpored temperature  $T(x)$  pri stacionarnem prevajanju toplote skozi zid.

Koeficient toplotne prevodnosti je skoraj pri vseh snoveh odvisen od temperature. Nekatere snovi (les, kristali) so anizotropne glede na sposobnost prevajanja toplote. Les je tipičen anizotropen material, toplotna prevodnost lesa v smeri pravokotno na vlakna je lahko 2 do 4 krat večja od prevodnosti vzdolž vlaken. Odvisnost koeficienta toplotne prevodnosti od temperature lahko pri večini snoveh in pri majhnih razlikah v temperaturi opišemo z linearno funkcijo

$$k(T) = k_0 \cdot (1 + k_1 \cdot T), \quad (2.2)$$

kjer sta konstanti  $k_0$  in  $k_1$  lastnosti snovi, vendar je  $k_1$  majhna in ponavadi negativna vrednost.

V nadaljevanju opišemo pojav pri katerem snovi, ki ima določeno prostornino  $V$  in temperaturo  $T_0$  začnemo dovajati ali odvajati toplotno energijo in merimo spremembo temperature  $(T - T_0)$ . Ta preizkus ponavljamo tudi za različne gostote iste snovi. S preskusi ugotovimo, da lahko količino toplote, ki smo jo morali dovesti v snov ali odvesti iz snovi, opišemo z izrazom

$$Q = \rho \cdot c \cdot (T - T_0) \cdot V, \quad (2.3)$$

kjer je  $c$  ( $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ) specifična toplota snovi,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) pa je gostota. Enačba (2.3) pove, da je specifična toplota tista količina toplote, ki je potrebna, da segrejemo maso 1 kg snovi za  $1^\circ\text{C}$ .



Tudi specifična toplota je pri večini snovi odvisna od temperature. Pri računanju prevajanja toplote skozi snov pri temperaturah, kjer se spremeni agregatno stanje snovi, lahko pojav opišemo s spreminjanjem specifične toplote v odvisnosti od temperature. Obnašanje snovi glede prevajanja toplote je namreč enako, kot če bi snov pri temperaturi spremembe agregatnega stanja imela med spreminjanjem agregatnega stanja zelo veliko specifično toploto.

V literaturi pogosto uporabljajo termično difuzivnost snovi

$$\alpha = \frac{k}{(\rho \cdot c)} . \quad (2.4)$$

Termična difuzivnost snovi nam pove, ali je v snovi možno burno časovno spreminjanje temperature (velika termična difuzivnost) ali pa se s časom temperatura lahko le počasi spreminja (majhna termična difuzivnost). Termično difuzivnost uporabimo, če želimo računati z brezdimenzionalnimi spremenljivkami.

### 2.2.1.2. Enačbe prevajanja toplote

Enačbo (2.1) zapišemo za diferencialni del površine obravnavanega telesa

$$dq = -k \cdot T_{,N} \cdot dA , \quad (2.5)$$

kjer smo z  $T_{,N}$  označili odvod temperature v smeri normale na telo. Negativni predznak v enačbi (2.5) poudarja, da toplotni tok teče od dela snovi z višjo temperaturo proti delu snovi z nižjo temperaturo. Enačba (2.5) velja za izotropno snov, za anizotropno snov pa moramo zapisati

$$dq = -k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i \cdot dA . \quad (2.6)$$

Enačbo (2.3) odvajamo po času in dobimo

$$q = \rho \cdot c \cdot T_{,t} \cdot V . \quad (2.7)$$

Enačbo (2.7) zapišemo za elementaren delec s prostornino  $dV$

$$dq = \rho \cdot c \cdot T_{,t} \cdot dV . \quad (2.8)$$

Enačbo (2.8) integriramo po poljubno izbranem delu telesa s prostornino  $V$ , enačbo (2.6) pa po površini  $S$  tega dela telesa. Prispevke površinskega in prostorninskega integrala izenačimo in dobimo

$$-\oint_S k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i \cdot dA = \int_V \rho \cdot c \cdot T_{,t} \cdot dV . \quad (2.9)$$

Z uporabo Gaussovega izreka transformiramo izraz na levi strani enačbe (2.9) in dobimo enačbo v Kartezijevem koordinatnem sistemu

$$\int_V (k_{ij} \cdot T_{,i})_{,j} dV = \int_V \rho \cdot c \cdot T_{,t} \cdot dV . \quad (2.10)$$

Iz enačbe (2.10) dobimo ob upoštevanju možnosti notranjega prostorninskega izvira ali ponora toplote  $q_{Sp}$  osnovno enačbo prevajanja toplote znotraj telesa

$$V: (k_{ij} \cdot T_{,i})_{,j} + q_{Sp} - \rho \cdot c \cdot T_{,t} = 0 . \quad (2.11)$$

Poleg parcialne diferencialne enačbe (2.11), ki opisuje prevajanje toplote znotraj telesa, moramo zapisati še enačbe, ki opisujejo robne in začetne pogoje. Za površino  $S_T$ , kjer je predpisana temperatura, zapišemo enačbo

$$S_T: T_S - T = 0 . \quad (2.12)$$

Za površino  $S_q$  (glej sliko 13), kjer je predpisan toplotni pretok  $q_s$ , zapišemo v skladu z enačbo (2.6)

$$S_q: k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + q_s = 0 . \quad (2.13)$$

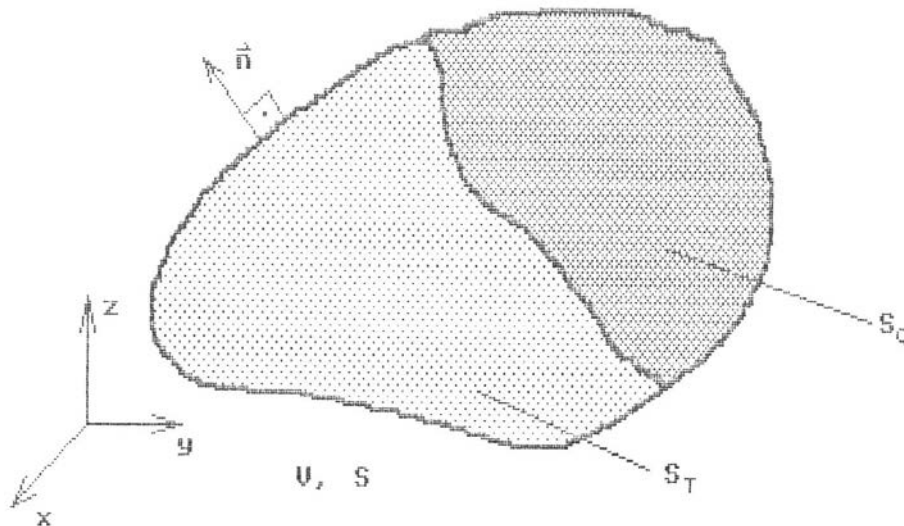
Ponavadi pretok toplote  $q_s$  razčlenimo glede na možne vire toplote

$$q_s = q_0 + q_C + q_R , \quad (2.14)$$

Kjer je  $q_0$  predpisan toplotni pretok, ki ni odvisen od temperature na robu (osončenje),  $q_C$  je pretok toplote zaradi konvekcije in  $q_R$  je pretok toplote zaradi radiacije.

Začetni pogoj za temperaturo zapišemo z enačbo

$$T(x_i, 0) = T_0(x_i). \quad (2.15)$$



Slika 13: Trdno telo, skozi katerega prehaja toplota.

V enačbah (2.6-2.15) predstavljajo oznake:

$T_{,t}$  – odvod temperature po času,

$k_{ij}$  – tenzor toplotne prevodnosti,

$_{,i}$  – odvod po koordinati  $x_i$ ,

$_{,j}$  – odvod po koordinati  $x_j$ ,

$q_{Sp}$  – prostorninski toplotni pretok zaradi izvira ali ponora toplote v snovi,

$T_S$  – predpisana temperatura na površini,

$n_i$  – komponente vektorja normale na površino telesa,

$q_S$  – predpisan toplotni pretok skozi površino telesa,

$T_0(x_i)$  – funkcija, ki določa začetno temperaturo v vseh točkah telesa.

Za reševanje problema z metodo končnih elementov moramo enačbe še nadalje preoblikovati.

Vpeljemo virtualno temperaturo  $\delta T(x,t)$ , ki zadošča pogojema:

- poljubna zvezna, v splošnem od nič različna funkcija na  $V$  in  $S_Q$  in

- enaka nič na  $S_T$ .

Enačbe (2.11-2.13) pomnožimo z  $\delta T$ , integriramo po področju veljavnosti enačbe in seštejemo. Tako dobimo

$$\int_V \left( (k_{ij} \cdot T_{,i})_{,j} + q_{Sp} - \rho \cdot c \cdot T_{,t} \right) \cdot \delta T \cdot dV - \int_{S_q} (k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + q_s) \cdot \delta T \cdot dS + \int_{S_t} (T_s - T) \cdot \delta T \cdot dS = 0 \quad (2.16)$$

Prvi člen v prostorninskem integralu te enačbe preoblikujemo

$$\left( k_{ij} \cdot T_{,i} \right)_{,j} \delta T = \left( k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot \delta T \right)_{,i} - k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot \delta T_{,i} \quad (2.17)$$

in uporabimo Gaussov izrek. S tem iz integralov v (2.16) izločimo druge odvode.

Upoštevamo drugo predpostavko o virtualni temperaturi  $\delta T$  in iz enačbe (2.16) izpeljemo princip virtualnih temperatur

$$\int_V (k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot \delta T_{,i}) \cdot dV + \int_V (q_{Sp} - \rho \cdot c \cdot T_{,t}) \cdot \delta T \cdot dV - \int_{S_q} q_s \cdot \delta T \cdot dS = 0 \quad (2.18)$$

Enačba (2.18) je analogna enačbi pretoka nestisljive tekočine skozi zasičeno porozno zemljino in tudi enačbi difuzije vodne pare v telesih.

## 2.2.2. KONVEKCIJA

Prenos toplote s konvekcijo nastopi zaradi makroskopskega gibanja snovi. Pri obravnavi prenosa toplote skozi trdno telo pride do konvekcijskega prenosa toplote na meji med trdnim telesom in okolico, ki je lahko tekočina ali plin.

Poznamo dva osnovna tipa konvekcije. Pri prisiljeni konvekciji se tekočina (plin) giblje in s tem prenaša toplotno energijo zaradi nekega zunanega vzroka (rečni tok, veter...). Pri naravni konvekciji pa so vzrok za gibanje tekočine (plina) same razlike v temperaturi. Temperaturne razlike v tekočini (plinu) povzročijo razlike v gostoti, pri izravnavi teh razlik v gostoti pa pride do gibanja snovi.

Če bi hoteli prisiljeno konvekcijo računati zelo natančno, bi morali upoštevati zakone dinamike tekočin in plinov. Pri različnih tipih pretoka tekočin (laminaren, turbulenten tok, tok ki se cepi, gibanje tekočine z veliko hitrostjo) bi računali na različne načine. Podobni so problemi pri naravni konvekciji, kjer je računanje odvisno od lege površine. Naravni konvekciji ob vodoravni plošči in vertikalni steni se precej razlikujeta. Ob naravni in prisiljeni konvekciji pa lahko pride tudi do kondenzacije plinov na površini ali pa izhlapevanja tekočine (na primer vode) s površine. Ob kondenzaciji plina imamo presežek toplote, ki se nato prevaja skozi telo, obratno pa se mora pri izhlapevanju toplota prevajati proti površini telesa. Vse to zelo otežuje račun in razumevanje pojava, zato poskušamo računanje konvekcije poenostaviti. Poenostavljeno upoštevanje konvekcije je opisano v poglavjih 2.2.4.3 in 2.2.4.4.

### 2.2.3 SEVANJE – RADIACIJA

Vsako telo zaradi gibanja molekul (atomov), ki ga sestavljajo, seva elektromagnetne valove. Energijski tok, ki ga telo seva, je odvisen od "temnosti" in temperature površine telesa. Bolj črna telesa pri višji temperaturi sevajo močneje. Ugotovili so, da se površinski toplotni pretok, ki ga popolnoma črno telo seva v prazen (pol)prostor, spreminja po enačbi

$$q_s = \sigma \cdot T^4, \quad (2.19)$$

ki jo poznamo pod imenom Stefanov zakon.  $\sigma = 2.041 \times 10^{-4} \text{ J/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°K}^4$  je Stefan-Boltzmannova konstanta, temperaturo  $T$  pa moramo podajati v  $\text{°K}$ . Nečrna telesa pri enaki temperaturi sevajo manj kot črno telo. Za taka telesa napišemo enačbo, ki je podobna enačbi (2.19)

$$q_s = e \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (2.20)$$

Faktor  $e$  je emisivnost sevalne površine. Emisivnost v splošnem narašča s temperaturo. Velja, da je  $e \leq 1$ .

Vsako realno telo seva določeno količino energije. Prav tako pa vsako telo absorbira, odbija in prepušča energijo, ki prispe do telesa zaradi sevanja drugih teles. Zapišemo lahko

$$\frac{E_a}{E} + \frac{E_r}{E} + \frac{E_p}{E} = a + r + p = 1, \quad (2.21)$$

kjer je  $E$  skupna energija, ki je s sevanjem prispela do telesa,  $E_a$  je energija, ki jo je telo absorbiralo,  $E_r$  je energija, ki jo je telo odbilo (refleksija),  $E_p$  je energija, ki jo je telo prepustilo. Oznake  $a$ ,  $r$  in  $p$  pa določajo absorptivnost, odbojnost (reflektivnost) in prepustnost (prosojnost). Pomemben zakon v zvezi z absorpcijo in sevanjem je Kirchhoffov zakon. Ta nam pove, da je za iste valovne dolžine elektromagnetnega valovanja emisivnost površine enaka absorptivnosti

$$e = a. \quad (2.22)$$

V naravi pa je tako, da telo nikoli ne seva v prazen (pol)prostor, ki se obnaša kot popolnoma črno telo pri temperaturi  $0^\circ\text{K}$  in absorbira vse elektromagnetno valovanje (enačba 2.20). Telo seva proti drugemu telesu, ki energijo absorbira in jo seveda tudi seva. Za neskončni ravni vzporedni površini z enakima emisivnostima (absorptivnostima)  $e$  in različnima konstantnima temperaturama  $T_1$  in  $T_2$  izračunamo površinski toplotni pretok skozi površino s temperaturo  $T_1$  po enačbi (2.20) in dobimo

$$q_s = e \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4). \quad (2.23)$$

Za natančno določitev izmenjave energije med dvema telesoma poljubne oblike z različnima emisivnostima in različnima temperaturama enačba seveda ni tako preprosta. Upoštevati moramo še Lambertov zakon in integrirati energijski tok zaradi sevanja in absorpcije v vseh smereh v vseh delcih telesa, ki ga obravnavamo, in okoliških teles. Lambertov zakon pove, da se energija sevanja spreminja v odvisnosti od kota naklonjenosti od normale ( $\Omega$ ) po enačbi

$$E_{om}(\Omega) = E_N \cdot \cos(\Omega). \quad (2.24)$$

V enačbi (2.24) je  $E_{om}$  energija, ki pripada žarkom, nagnjenim za kot  $\Omega$  glede na normalo in  $E_N$  energija, ki pripada žarkom v smeri normale na sevalno površino.

Za običajne računske primere je točen način računanja neprimeren. Večinoma uporabimo pri računu izraz v enačbi (2.23) in s pravilno izbiro poteka temperature sevajočih predmetov v

---

okolici ( $T_2$ , oziroma splošneje  $T_R$  - temperatura sevajočih predmetov v okolici) simuliramo dejansko dogajanje.

## 2.2.4 ROBNI POGOJI

Osnovni tipi robnih pogojev so:

- predpisana temperatura na površini,
- predpisan površinski toplotni pretok; poseben primer je popolna toplotna izolacija - predpisan pretok je enak nič,
- toplotni pretok je linearno odvisen od razlike med temperaturo na površini in temperature okolice in
- toplotni pretok je nelinearno odvisen od razlike med temperaturo na površini in temperature okolice.

### 2.2.4.1 Predpisana temperatura

Predpisana temperatura je lahko konstantna, odvisna od časa, odvisna od koordinat ali pa odvisna od časa in koordinat. To je za račun najenostavnejši robni pogoj. Naloge s takšnimi robnimi pogoji so pogosto analitično rešljive. Žal pa je v praksi temperatura le redko predpisana, saj težko ohranjamo željeno temperaturo na robu. Bolj primeren je robni pogoj, s katerim na robu predpišemo toplotni pretok.

### 2.2.4.2 Predpisan toplotni pretok

Ta robni pogoj opišemo z enačbo

$$k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i = -q_S, \quad (2.25)$$

kjer je toplotni pretok  $q_S$  neodvisen od temperature, pogosto pa je odvisen od časa in kraja. Poseben primer predpisanega toplotnega pretoka je popolna toplotna izolacija. Če imamo izotropen material, lahko ta robni pogoj opišemo z izrazom

$$T_i \cdot n_i = 0, \quad (2.26)$$

ki ne vključuje materialnih parametrov. Značilen praktični primer predpisanega toplotnega pretoka na površini je absorpcija sončnega sevanja – insolacija.

### 2.2.4.3 Toplotni pretok, ki je sorazmeren temperaturni razliki

Kadar je toplotni pretok sorazmeren razliki v temperaturah površine telesa in okolice, lahko robni pogoj (2.13) zapišemo v obliki

$$k_{ij} \cdot T_j \cdot n_i + h \cdot (T - T_A) = 0. \quad (2.27)$$

Tu smo s  $h$  označili prestopni koeficient, s  $T_A$  pa temperaturo okolice (ambienta). Če je  $h$  zelo velik v primerjavi s  $k_{ij}$ , je robni pogoj (2.27) približno enak robnemu pogoju s predpisano temperaturo na površini. Če je  $h$  enak nič, predstavlja enačba (2.27) toplotno izoliran robni pogoj.

Ta robni pogoj večinoma uporabimo, ko hočemo računati vpliv naravne ali prisiljene konvekcije na prenos toplotne energije na robu. Ponavadi predpostavimo, da je  $h$  konstanta. Nekateri avtorji navajajo, da je  $h$  linearno odvisen od hitrosti vetra pri prisiljeni konvekciji. Drugi pa za posamezne primere prisiljene konvekcije (tok v cevi, tok okoli valja...) podajajo natančnejše izraze za prestopni koeficient, ki je odvisen od hitrosti vetra, premera cevi, tipa pretoka tekočine (plina) – laminarni, turbulentni ali mešani tok.

Drugi primer robnega pogoja (2.27) je prevajanje toplote skozi tanek sloj slabeag toplotnega prevodnika. V naravi so taki sloji precej običajni: sloj oksidirane kovine, sloj nanešene umazanije, opaž ob betonski konstrukciji, tanek sloj tekočine ali plina, ki miruje in ni podvržen konvekciji. V tem primeru prestopni koeficient zapišemo v odvisnosti od toplotne prevodnosti sloja ( $k'$ ) in debeline sloja  $d$

$$h = \frac{k'}{d}. \quad (2.28)$$

---



#### 2.2.4.4 Toplotni pretok, ki je nelinearno odvisen od temperatur na površini in v okolici

To je najbolj splošen primer robnega pogoja, ki ga obravnavamo. Enačbo (2.13) zapišemo v obliki

$$k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + h(T, t) \cdot f(T) = 0. \quad (2.29)$$

Najbolj značilen primer takega nelinearnega robnega pogoja je sevanje s površine telesa. S pomočjo enačbe (2.23) dobi ta robni pogoj obliko

$$k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + \sigma \cdot e \cdot (T^4 - T_R^4) = 0, \quad (2.30)$$

oziroma po preoblikovanju

$$k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + h_R \cdot (T - T_R) = 0, \quad (2.31)$$

kjer je

$$h_R = \sigma \cdot e \cdot (T^2 + T_R^2) \cdot (T + T_R) = 0. \quad (2.32)$$

V enačbah (2.30-2.32) je:

$h_R$  – radiacijski prestopni koeficient,

$T_R$  – temperatura sevajočih teles v okolici,

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konstanta,

$e$  – emisivnost.

Za majhne temperaturne razlike ( $T_R - T$ ) je

$$h_R \approx 4 \cdot \sigma \cdot e \cdot T_R^3. \quad (2.33)$$

V tem primeru se robni pogoj (2.30) linearizira, saj dobimo robni pogoj (2.27).

Drugi robni pogoj, ki ga lahko opišemo z enačbo (2.29) je naravna konvekcija zraka.

Ugotovili so, da je toplotni pretok zaradi naravne konvekcije približno sorazmeren s  $5/4$

potenco razlike temperatur na površini in v okolici. Za sloje tekočine (plina) reda velikosti nekaj cm ali več torej velja približno

$$k_{ij} \cdot T_{,j} \cdot n_i + h \cdot (T - T_A)^{\frac{5}{4}} = 0 \quad (2.34)$$

Nekateri avtorji navajajo, da je tudi prisiljena konvekcija ob navpičnem zidu nelinearen robni pogoj in da jo lahko približno opišemo s podobno enačbo kot naravno konvekcijo. Za konvekcijo vzdolž navpičnega zidu podajajo odvisnost prestopnega koeficienta  $h$  od temperaturne razlike  $(T - T_A)$  z enačbama

$$\begin{aligned} h &= h_0 \cdot (T - T_A)^{\frac{1}{3}} && \text{za turbulentni tok,} \\ h &= h_0 \cdot \left[ \frac{(T - T_A)}{H} \right]^{\frac{1}{4}} && \text{za laminarni tok,} \end{aligned} \quad (2.35)$$

kjer je  $H$  višina navpičnega zidu,  $h_0$  pa nek referenčni prestopni koeficient.

V analizi za opis konvekcije večinoma uporabljamo linearni robni pogoj (2.27).

### 2.2.5. POGOJI NA MEJI DVEH DELOV

V naravi so telesa pogosto sestavljena iz delov, ki imajo različne fizikalne lastnosti. Na mejah teh delov moramo postaviti posebne pogoje.

Vemo, da je temperatura na meji enaka za oba dela telesa (del A in del B), saj bi sicer imeli temperaturni skok oziroma neskončen temperaturni gradient. Vemo tudi, da je pretok skozi mejno površino enak za oba dela telesa, če le nimamo nekega koncentriranega vira toplote na njuni meji. Za delce na meji lahko zato zahtevamo, da velja

$$\begin{aligned} T^A &= T^B && \text{in} \\ k^A_{ij} \cdot T^A_{,j} \cdot n_i &= k^B_{ij} \cdot T^B_{,j} \cdot n_i. \end{aligned} \quad (2.36)$$

## 2.2.6 NOTRANJI VIRI TOPLOTE

Pri analizi prenosa toplote skozi trdna telesa je zelo pomemben vpliv notranjih virov toplotne energije. Toplotna energija se lahko sprošča zaradi različnih vzrokov:

- kemične reakcije v snovi (npr. hidratacija cementa),
- viskoznih in plastičnih deformacij v snovi,
- prehoda električnega toka skozi snov,
- radioaktivnega razpada snovi,
- dielektričnega ali indukcijskega segrevanja in
- absorpcije radioaktivnega sevanja.

V tej nalogi nas predvsem zanima notranje sproščanje toplote zaradi hidratacije cementa.

## 2.2.7 RAČUNALNIŠKI PROGRAM HEATC

Za reševanje parcialne diferencialne enačbe prevajanja toplote (enačba 2.11) in njenih robnih in začetnih pogojev (enačbi 2.12 in 2.14) smo uporabili metodo končnih elementov.

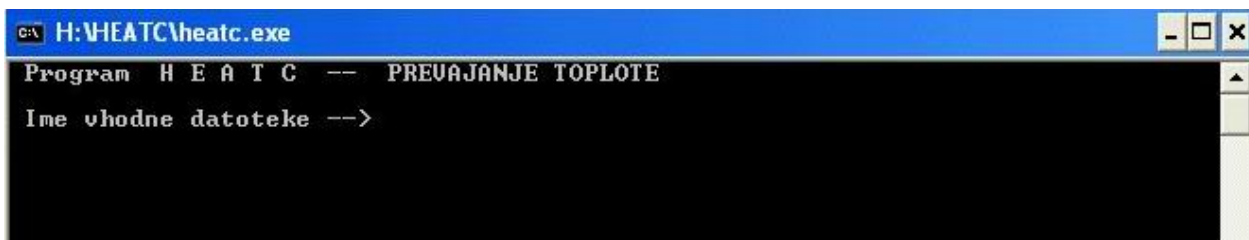
Podrobnosti o tej metodi so opisane v številnih knjigah, zato v nadaljevanju navajamo le glavne značilnosti te metode.

Poljubno telo razrežemo na končne elemente, ki so med seboj povezani z vozlišči. Neznano spreminjanje temperature po telesu nato opišemo z interpolacijskimi nastavki, ki se izražajo z vozliščnimi temperaturami. S tem prevedemo nalogo na reševanje sistema navadnih, običajno kvazi linearnih diferencialnih enačb prvega reda za vozliščne temperature v odvisnosti od časa. Ta sistem rešimo z dvotočkovno direktno integracijo tipa »korak za korakom«. Kadar termični parametri ali specifični toplotni pretoki niso odvisni od iskane temperature, oziroma kadar ne upoštevamo sevanja, je dobljeni sistem enačb linearen; v nasprotnem primeru je nelinearen in je zato potrebno v vsakem časovnem koraku iteracijsko reševanje.

Na teh osnovah je bil na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo izdelan računalniški program HEATC (slika 14). Zasnovan je bil za reševanje problemov prevajanja toplote skozi trdne snovi. Uporaba programa pri analizi vpliva požara na obnašanje betonskih, lesenih in jeklenih

konstrukcij je že dobro raziskana, nekoliko manj pa pri določitvi časovnega spreminjanja temperatur v strjujočem masivnem betonskem bloku. V tej nalogi bomo skušali to vrzel, predvsem validacijo programa pri gradnji hidroenergetskih objektov, nekoliko zapolniti.

Računalniški program HEATC je raziskovalni program, kljub temu pa prijazen do uporabnika (slika 14).



*Slika 14: Program HEATC ob zagonu.*

V naslednjem poglavju se bomo ukvarjali z oceno natančnosti računalniškega programa HEATC za določitev temperaturnega polja strjujočih se masivnih betonskih blokov. To bomo storili s primerjavo med eksperimentalnimi rezultati temperaturnega polja značilnih masivnih betonskih blokov na HE Boštanj in numeričnimi rezultati.

### 3 VALIDACIJA RAČUNSKEGA MODELA

Kot smo že povedali je osnovni cilj diplomske naloge oceniti natančnost računalniškega programa HEATC za določitev časovnega spreminjanja temperatur v masivnem betonskem bloku pri gradnji hidroenergetskih objektov. To je vsebina tega poglavja.

#### 3.1 MERITVE NA OBJEKTU HE BOŠTANJ

Meritve časovnega spreminjanja temperatur masivnih betonskih blokov so se izvajale s pomočjo univerzalnega merilnega instrumenta ALMEMO 2690-8, ki je prikazan na sliki 15. Merilec ima možnost merjenja petih različnih fizikalnih količin. Nanj so bili preko konektorjev priključeni senzorji za merjenje temperature (termo-členi). Podatki so se po merjenju prenesli na osebni računalnik s pomočjo kabla za prenos podatkov.



*Slika 15: Prikaz merilca ALMEMO.*

Meritve so se izvajale med gradnjo gradbene jame in med gradnjo jezovne zgradbe HE Boštanj.

Ta elektrarna spada v trenutno največji energetski projekt v Sloveniji - izgradnjo verige petih novih hidroelektrarn na spodnji Savi. Hidroelektrarne Boštanj, Blanca, Brežice, Krško in Mokrice (slika 16) bodo več kot podvojile proizvodnjo električne energije na reki Savi. Električna energija novih elektrarn, ki bodo zgrajene postopno do leta 2018, bo predstavljala 21 odstotkov proizvodnje električne energije slovenskih hidroelektrarn in bo predvidoma pokrivala šest odstotkov skupne porabe električne energije v državi.<sup>7</sup>



Slika 16: Makrolokacija verige elektrarn na spodnji Savi.

Hidroelektrarna Boštanj je postavljena na okljuku reke Save, kjer poteka 46. vzporednik (slika 17). Osnovni tehnični podatki o elektrarni so<sup>7</sup>:

- instaliran pretok:  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $3 \times 166,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ),
- višina padca: 8,20 m,
- največja moč: 32,5 MW,
- srednja letna proizvodnja: 115 GWh,
- koristna prostornina bazena:  $1.000.000 \text{ m}^3$  in
- srednji letni pretok:  $235 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Med gradbene elemente iz masivnih betonov pri tej elektrarni prištevamo obodne stene gradbene jame, ki so izvedene iz vodnjakov in vmesnih sten, in seveda jezovno zgradbo.



*Slika 17: Podoba HE Boštanj po koncu gradnje.*

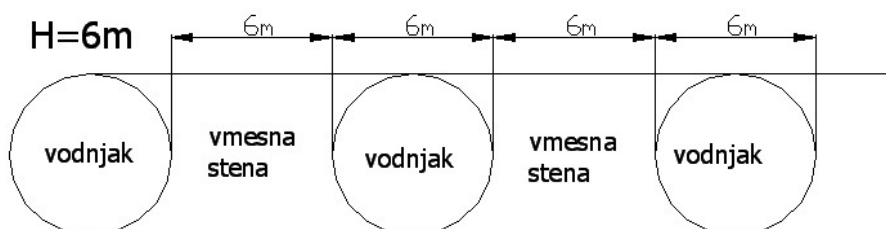
Masivni beton se je pri tem projektu najprej vgrajeval v obodno steno gradbene jame HE Boštanj, ki je prikazana na sliki 18. Detajlni prikaz obodne stene in postopek gradnje le-te pa je prikazan na slikah 19 in 20. Projekt je predvideval, da bodo obodne stene gradbene jame izvedene kot monolit iz vodnjakov in vmesnih sten, pri čemer naj bi bili vodnjaki v sredini zapolnjeni z drugačnim betonom, kot je bil uporabljen za stene vodnjaka in za vmesne stene. Vodnjaki in vmesne stene so imeli po projektu veliko prostornino, saj je v njih najmanjša dimenzija mnogo večja kot 0,5 m.

Med samo gradnjo pa se je izvajalec odločil, da zaradi enostavnejše gradnje vodnjake v celoti izdelal z istim betonom. Tistim, ki je bil predviden za gradnjo sten vodnjakov in vmesnih sten med vodnjaki. S tem so se količine naenkrat vgrajenega betona dodatno povečale, kar pomeni, da se je v obodne stene, torej vodnjake in vmesne stene vgrajeval masivni beton.



*Slika 18: Gradbena jama HE Boštanj.*

Na sliki 18 vidimo gradbeno jamo HE Boštanj slikano z levega brega Save. V ozadju je magistralna cesta Krško-Zidani Most in vas Boštanj.



*Slika 19: Geometrijski podatki obodnih sten gradbene jame.*

Pri gradnji obodne stene gradbene jame so izvajalci najprej betonirali vodnjake, kasneje pa vmesne stene med dvema vodnjakoma. Na sliki 20 vidimo potek gradnje. Na levi strani slike so vidni vodnjaki brez vmesnih sten, na desni pa so vodnjaki z dokončanimi vmesnimi stenami.





*Slika 20: Potek gradnje obodnih sten gradbene jame.*

Meritve, ki so se izvajale na vodnjakih so bile:

- temperatura betona v sredini masivnega betonskega bloka – vodnjaka,
- temperatura zraka v okolici in
- temperatura rečne vode ob vodnjaku.

Dodatno smo merili tudi temperaturo vgrajenega strjujočega se betona v adiabatnem kalorimetru. To meritev smo izvedli v laboratoriju. Kot smo že povedali, predstavlja ta meritev notranji vir toplote in služi kot osnovni podatek pri analizi temperaturnega polja v masivnem betonskem bloku z računalniškim programom HEATC

### **3.1.1 PRESKUS ADIABATSKIH TERMIČNIH KARAKTERISTIK BETONA- ATK**

Pri preskusu adiabatnih termičnih karakteristikah betona, ki ga krajše označimo ATK, merimo sproščanje hidratacijske toplote cementa v adiabatnih razmerah. O adiabatnih razmerah govorimo takrat, ko med preskusom ni mogoča izmenjava toplote z okolico. Osnovna oprema za izvedbo preskusa je komora, ki lahko vzdržuje poljubno temperaturo s sposobnostjo hlajenja in gretja. Imeti mora vsaj dva merilca temperature. Na sliki 21 je prikazana komora za preskus ATK. Notranjost komore z dvema merilcema temperature pa je prikazana na sliki 22.



*Slika 21: Komora za določitev adiabatnih termičnih karakteristik betona.*

Sam postopek meritve poteka takole. Najprej damo v komoro posodo s svežim betonom. Enega od merilcev temperature vstavimo v sveži beton, z drugim pa merimo temperaturo v komori. Komora je programirana tako, da merilec temperature zraka v komori sledi spremembam temperature betona. S tem zagotavljamo minimalen vpliv okolja na proces hidratacije cementa. Zajem podatkov se vrši kontinuirno, oziroma na poljubne časovne intervale. Zadnji del opreme pa je uporabniku prijazna programska oprema. Ta nam omogoča hiter in enostaven prikaz podatkov preskusa.

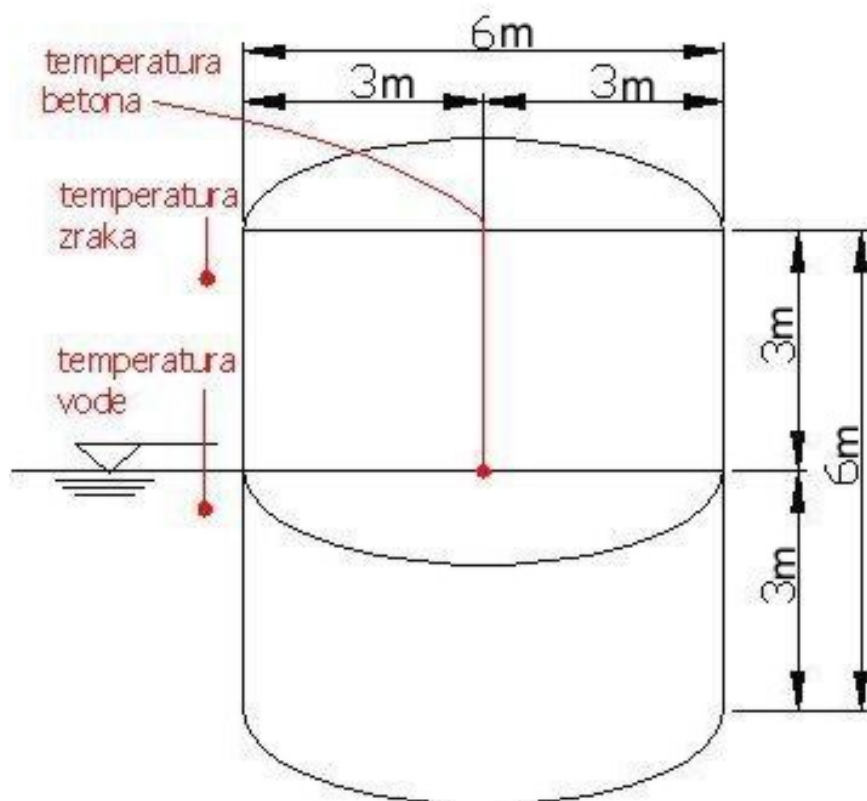


*Slika 22: Notranjost komore za preskus ATK.*

---

### 3.1.2 MERITVE TEMPERATUR V OBODNI STENI GRADBENE JAME <sup>2</sup>

Prva meritev časovnega spreminjanja temperature v strujučem se betonu se je izvajala na vodnjaku št. 12, ki je bil zgrajen 20.02.2003. Merjena je bila temperatura strujočega betona, temperatura zraka v okolici in temperatura rečne vode. Na sliki 23 so prikazana merska mesta v in ob vodnjaku.



Slika 23: Merska mesta za merjenje temperatur v in ob vodnjaku.

Sestava betona, ki je bil vgrajen v vodnjak št. 12 (sestava št.2), je bila naslednja:

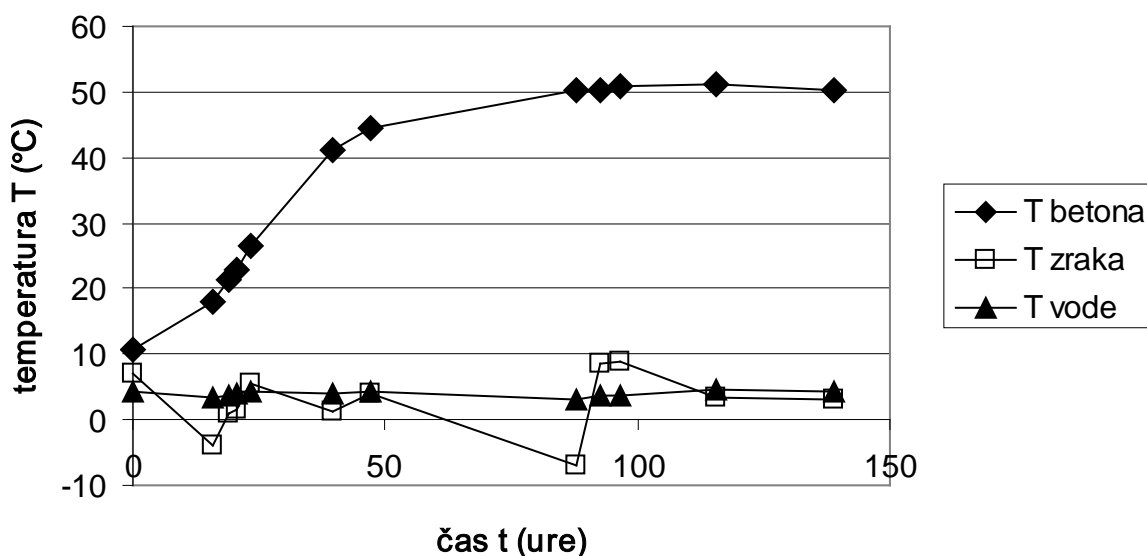
- cement: Trbovlje CEM II/B-M (P-S) 42,5 N,
- DC = 350 kg/m<sup>3</sup> vgrajenega betona,
- v/c razmerje = 0,55,
- D<sub>max</sub> = 32 mm in
- količina delcev agregata < 0,25 mm je večja od 120 kg/m<sup>3</sup> vgrajenega betona.

Temperatura sveže betonske mešanice pri vgradnji je bila T<sub>z</sub> = +10,8°C. Izmerjeno časovno spreminjanje temperatur betona v vodnjaku št. 12, okoliškega zraka in reke Save so podani v preglednici 2 in na sliki 24.

Preglednica 2: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št. 12.

| čas [ure] | temperatura betona [°C] | temperatura zraka [°C] | temperatura vode [°C] |
|-----------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 0         | 10.8                    | 6.9                    | 4.4                   |
| 16        | 18                      | -4                     | 3.5                   |
| 19        | 21.3                    | 1                      | 3.8                   |
| 20.5      | 22.9                    | 1.7                    | 4.1                   |
| 23.5      | 26.6                    | 5.5                    | 4.2                   |
| 39.5      | 41                      | 1.2                    | 4                     |
| 47        | 44.6                    | 4                      | 4.3                   |
| 88        | 50.4                    | -7.1                   | 3.2                   |
| 92.5      | 50.4                    | 8.5                    | 3.6                   |
| 96.5      | 51                      | 8.8                    | 3.8                   |
| 115.5     | 51.2                    | 3.4                    | 4.5                   |
| 139       | 50.4                    | 3.1                    | 4.2                   |

### vodnjak št. 12, betonirano 20.02.2003



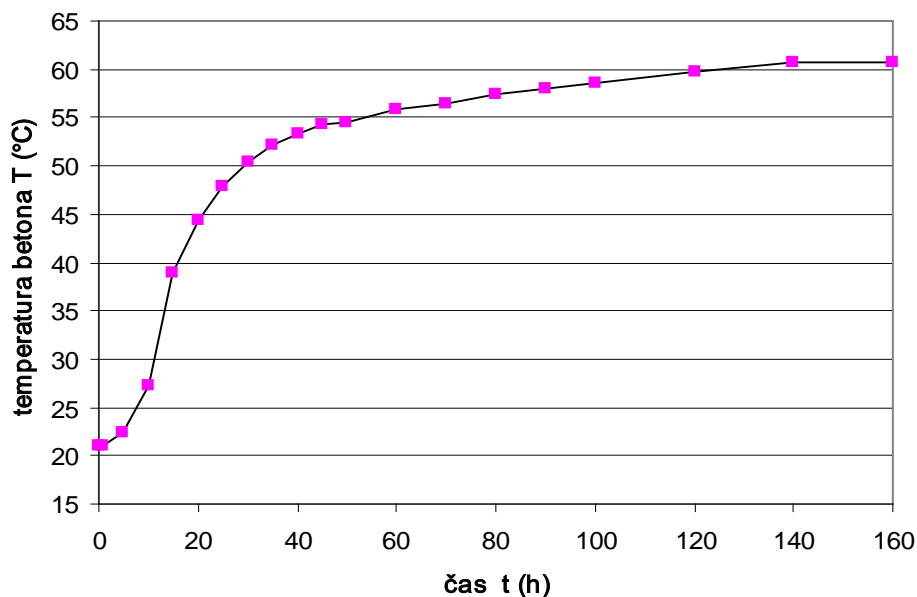
Slika 24: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št. 12.

Adiabatske termične karakteristike vgrajenega betona s sestavo št. 2 so bile izmerjene v gradbenem laboratoriju IRMA v Trzinu dne 17.03.2003. Temperatura uporabljenega svežega betona pri vgradnji je bila  $T_z = +21,0^{\circ}\text{C}$ . Časovno spreminjanje temperatur ATK meritve je podano v preglednici 3 in na sliki 25.

Preglednica 3: Rezultati meritev adiabatnih termičnih karakteristik na betonu s sestavo št. 2 z začetno temperaturo  $T_z = + 21,0^\circ\text{C}$ .

| čas<br>[ure] | temperatura<br>betona<br>[°C] |
|--------------|-------------------------------|
| 0.08         | 21                            |
| 1            | 21                            |
| 5            | 22.3                          |
| 10           | 27.3                          |
| 15           | 39.0                          |
| 20           | 44.4                          |
| 25           | 48.0                          |
| 30           | 50.4                          |
| 35           | 52.2                          |
| 40           | 53.4                          |
| 45           | 54.2                          |
| 50           | 54.6                          |
| 60           | 55.9                          |
| 70           | 56.4                          |
| 80           | 57.5                          |
| 90           | 58.0                          |
| 100          | 58.6                          |
| 120          | 59.7                          |
| 140          | 60.8                          |
| 160          | 60.8                          |

Iz slike 25 kot tudi iz preglednice 3 je razvidno, da je bila dosežena najvišja temperatura  $T = + 60.8^\circ\text{C}$  po šestih dneh od vgradnje betona.



Slika 25: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.2 z začetno temperaturo  $T_z = +21,0^{\circ}\text{C}$ .

Druga meritev časovnega spreminjanja temperature v strjajočem betonu se je izvajala na vodnjaku št. 8. Ta je bil zgrajen 25.03.2003. Tudi v tem primeru je bila merjena temperatura strjujočega se betona, temperatura zraka v okolici in temperatura rečne vode. Sestava tega betona (sestava št.3) je bila naslednja:

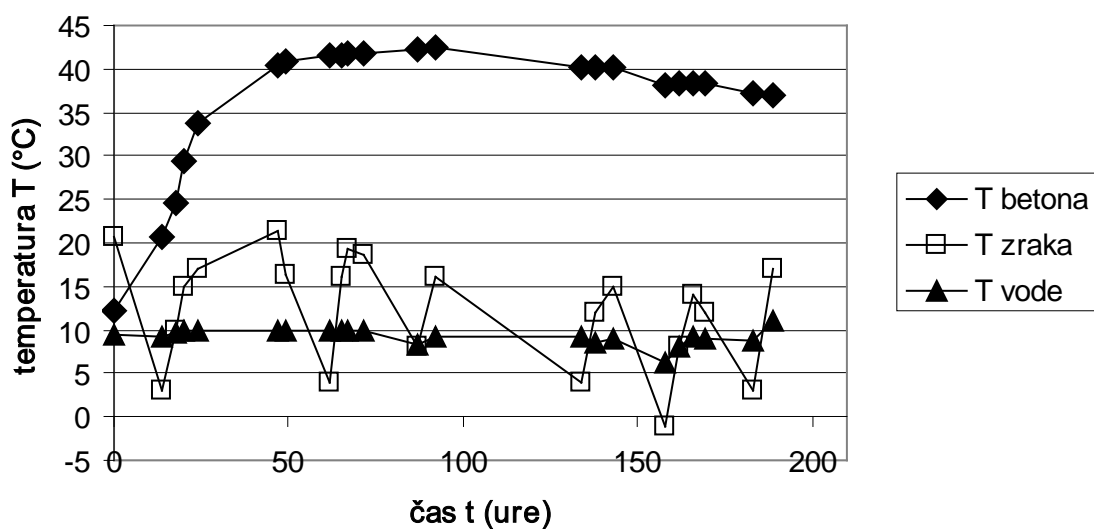
- cement: Trbovlje CEM II/B-M (P-S) 42,5 N,
- DC =  $300 \text{ kg/m}^3$  vgrajenega betona,
- v/c razmerje = 0,60
- $D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$ .

Temperatura sveže betonske mešanice pri vgradnji je bila  $T_z = +12,3^{\circ}\text{C}$ . Izmerjeno časovno spreminjanje temperatur betona v vodnjaku št. 8, okoliškega zraka in reke Save so podani v preglednici 4 in na sliki 26.

Preglednica 4: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št. 8.

| čas [ure] | temperatura betona [°C] | temperatura zraka [°C] | temperatura vode [°C] |
|-----------|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 0         | 12.3                    | 20.8                   | 9.4                   |
| 14        | 20.7                    | 3                      | 9.3                   |
| 18        | 24.5                    | 10                     | 9.7                   |
| 20        | 29.4                    | 15                     | 9.8                   |
| 24        | 33.7                    | 17                     | 9.9                   |
| 47        | 40.3                    | 21.4                   | 10                    |
| 49.3      | 40.9                    | 16.4                   | 9.9                   |
| 62        | 41.6                    | 4                      | 9.8                   |
| 65.5      | 41.6                    | 16.2                   | 9.8                   |
| 67        | 41.7                    | 19.4                   | 9.9                   |
| 71.5      | 41.9                    | 18.7                   | 9.9                   |
| 87        | 42.2                    | 8                      | 8.2                   |
| 92        | 42.4                    | 16                     | 9.3                   |
| 134       | 40.1                    | 4                      | 9.2                   |
| 138       | 40.1                    | 12                     | 8.6                   |
| 143       | 40.2                    | 15                     | 8.9                   |
| 158       | 38.2                    | -1                     | 6.3                   |
| 162       | 38.3                    | 8                      | 8                     |
| 166       | 38.3                    | 14                     | 9.2                   |
| 169.5     | 38.4                    | 12                     | 9                     |
| 183       | 37.2                    | 3                      | 8.8                   |
| 189<      | 36.9                    | 17                     | 11.1                  |

**vodnjak št. 8, betonirano 25.03.2003**



Slika 26: Časovno spreminjanje temperatur betona, zraka in reke Save v merskih točkah vodnjaka št.8 .

Tudi sedaj so bile adiabske termične karakteristike vgrajenega betona s sestavo št. 3 izmerjene v gradbenem laboratoriju IRMA v Trzinu dne 16.05.2003. Temperatura betona pri vgradnji je bila  $T_z = + 13.3^{\circ}\text{C}$ . Časovno spreminjanje temperatur ATK meritve je podano v preglednici 5 in na sliki 27.

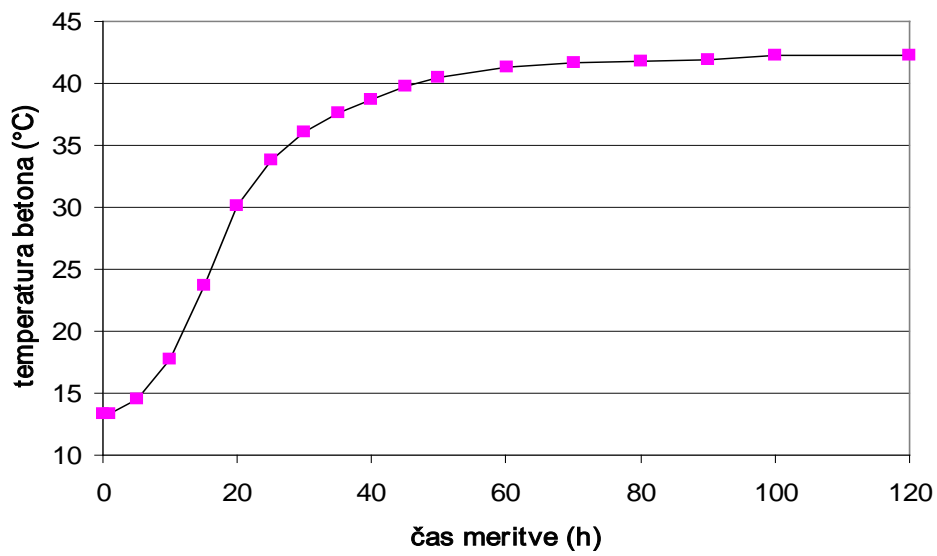
*Preglednica 5: Rezultati meritev adiabskih termičnih karakteristik na betonu s sestavo št. 3 z začetno temperaturo  $T_z = + 13,3^{\circ}\text{C}$ .*

| čas<br>[ure] | temperatura<br>betona<br>[ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|--------------|---|
| 0.08         | 13.3  |
| 1            | 13.3  |
| 5            | 14.6  |
| 10           | 17.7  |
| 15           | 23.7  |
| 20           | 30.1  |
| 25           | 33.8  |
| 30           | 36.0  |
| 35           | 37.6  |
| 40           | 38.7  |
| 45           | 39.7  |
| 50           | 40.5  |
| 60           | 41.3  |
| 70           | 41.7  |
| 80           | 41.7  |
| 90           | 41.9  |
| 100          | 42.3  |
| 120          | 42.3  |

Iz slike 27 kot tudi preglednice 5 je razvidno, da je bila dosežena najvišja temperatura  $T = + 42.3^{\circ}\text{C}$  po petih dneh od vgradnje betona.

---

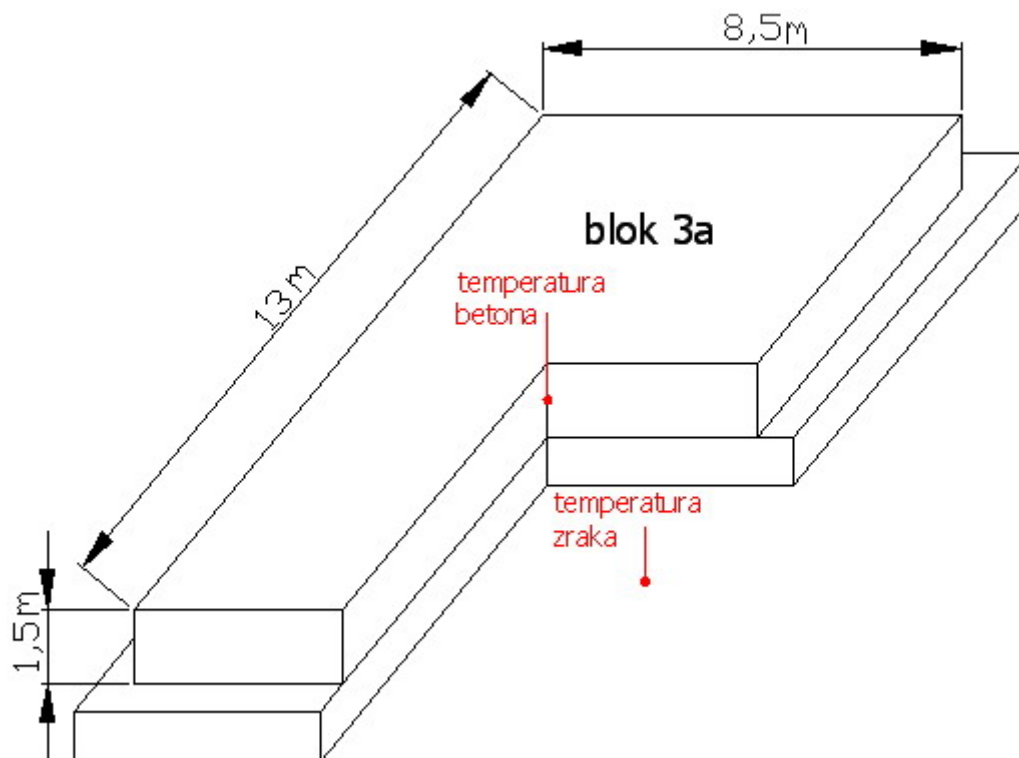




Slika 27: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.3 z začetno temperaturo  $T_z = +13,3^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.3 MERITVE TEMPERATUR V JEZOVNI ZGRADBI - BLOK 3a

Tretja meritev časovnega spreminjanja temperatur v masivnem betonskem bloku se je izvajala med gradnjo prelivnega polja hidroelektrarne. Betonski bloki so bili različnih dimenzij. Kot referenčni blok je bil izbran blok z oznako 3a. Geometrijske podatke tega bloka ter merska mesta prikazuje slika 28.



Slika 28: Geometrijski podatki bloka 3a ter merska mesta.

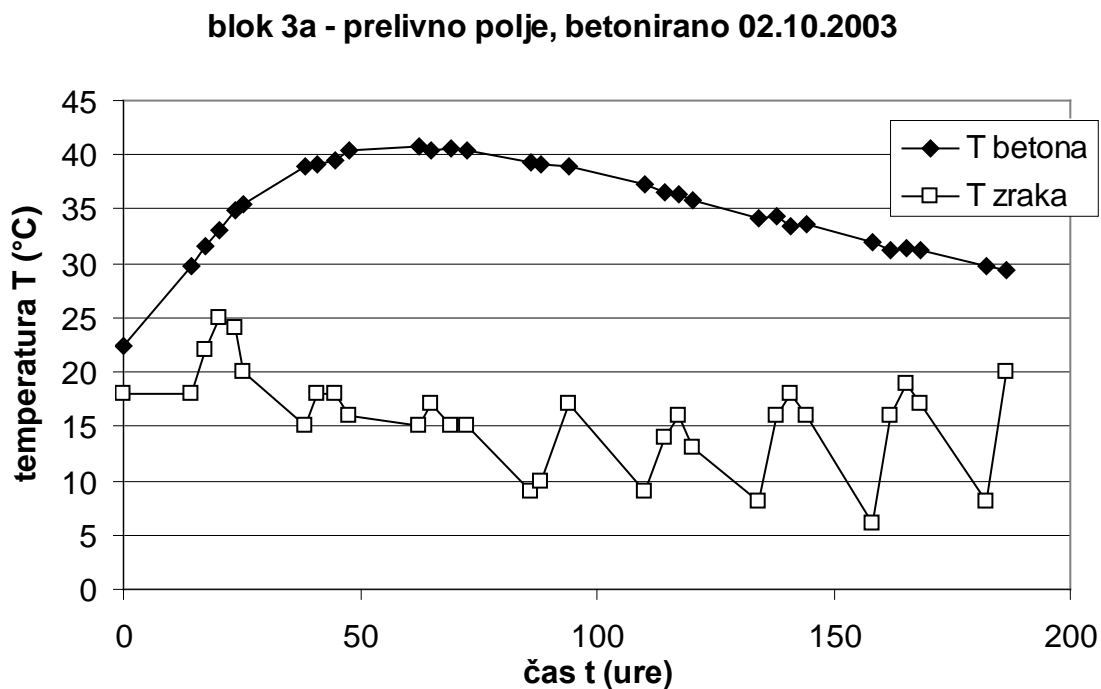
Obravnnavani masivni betonski blok je bil betoniran dne 02.10.2003. Vgrajen je bil na betonsko podlago in ob straneh zaščiten z lesenim opažem. Poleg meritve temperature strjujočega betona smo merili tudi temperaturo zraka v okolici. Sestava tega betona (sestava št.11P) je bila naslednja:

- cement: Trbovlje CEM II/B-M (S-P) 32,5 LH,
- DC = 270 kg/m<sup>3</sup> vgrajenega betona,
- Delta Extra = 1% teže cementa,
- v/c razmerje = 0,60,
- D<sub>max</sub> = 63 mm.

Temperatura betonske mešanice pri vgradnji je bila  $T_z = +22,5^{\circ}\text{C}$ . Izmerjeno časovno spreminjanje temperatur betona in okoliškega zraka so podani v preglednici 6 in na sliki 29.

Preglednica 6: Časovno spreminjanje temperatur betona in zraka v okolici na bloku 3a.

| čas<br>[ure] | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>zraka<br>[°C] |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|
| 0            | 22.5                          | 18.0                         |
| 14.2         | 29.8                          | 18.0                         |
| 17.5         | 31.6                          | 22.0                         |
| 20.3         | 33.1                          | 25.0                         |
| 23.5         | 34.9                          | 24.0                         |
| 25.2         | 35.5                          | 20.0                         |
| 38.2         | 38.9                          | 15.0                         |
| 41           | 39.1                          | 18.0                         |
| 44.8         | 39.4                          | 18.0                         |
| 47.5         | 40.4                          | 16.0                         |
| 62.4         | 40.7                          | 15.0                         |
| 65.1         | 40.4                          | 17.0                         |
| 69.4         | 40.6                          | 15.0                         |
| 72.5         | 40.5                          | 15.0                         |
| 86.2         | 39.3                          | 9.0                          |
| 88.2         | 39.2                          | 10.0                         |
| 94           | 38.9                          | 17.0                         |
| 110.2        | 37.3                          | 9.0                          |
| 114.2        | 36.6                          | 14.0                         |
| 117.1        | 36.4                          | 16.0                         |
| 120.2        | 35.9                          | 13.0                         |
| 134.2        | 34.2                          | 8.0                          |
| 138.1        | 34.4                          | 16.0                         |
| 140.9        | 33.4                          | 18.0                         |
| 144.1        | 33.6                          | 16.0                         |
| 158.2        | 31.9                          | 6.0                          |
| 162.2        | 31.3                          | 16.0                         |
| 165.2        | 31.4                          | 19.0                         |
| 168.2        | 31.3                          | 17.0                         |
| 182.2        | 29.8                          | 8.0                          |
| 186.5        | 29.4                          | 20.0                         |



Slika 29: Časovno spreminjanje temperatur betona in zraka na bloku 3a.

Tudi sedaj so bile adiabatne termične karakteristike vgrajenega betona s sestavo 11P izmerjene v gradbenem laboratoriju IRMA v Trzinu dne 15.10.2003. betona pri vgradnji je bila  $T_z = + 19.0^{\circ}\text{C}$ . Časovno spreminjanje temperatur ATK meritve je podano v preglednici 7 in na sliki 30.

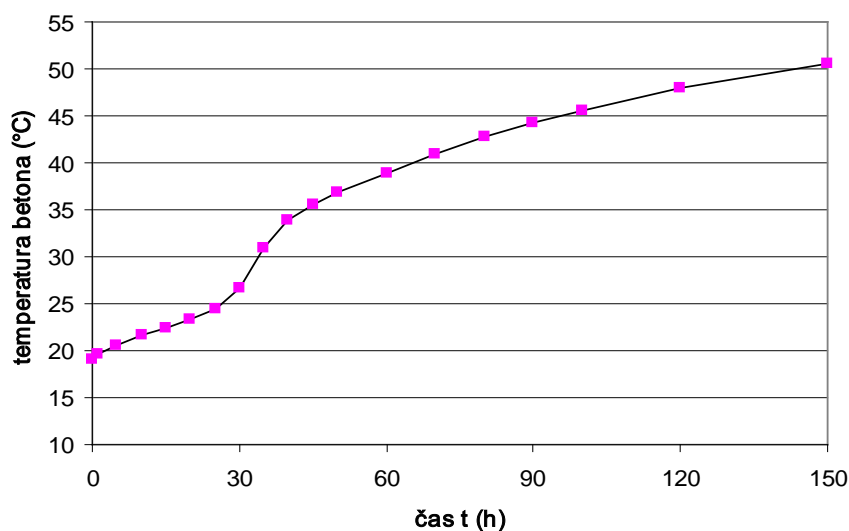
Preglednica 7: Rezultati meritev adiabatnih termičnih karakteristik za beton s sestavo št. 11P.

| čas [ure] | temperatura betona [°C] |
|-----------|-------------------------|
| 0.17      | 19                      |
| 1         | 19.7                    |
| 5         | 20.6                    |
| 10        | 21.7                    |
| 15        | 22.5                    |
| 20        | 23.3                    |
| 25        | 24.4                    |
| 30        | 26.7                    |
| 35        | 31.0                    |
| 40        | 33.9                    |

se nadaljuje

nadaljevanje

|     |      |
|-----|------|
| 45  | 35.5 |
| 50  | 36.8 |
| 60  | 39.0 |
| 70  | 40.8 |
| 80  | 42.7 |
| 90  | 44.3 |
| 100 | 45.5 |
| 120 | 48.0 |
| 150 | 50.6 |



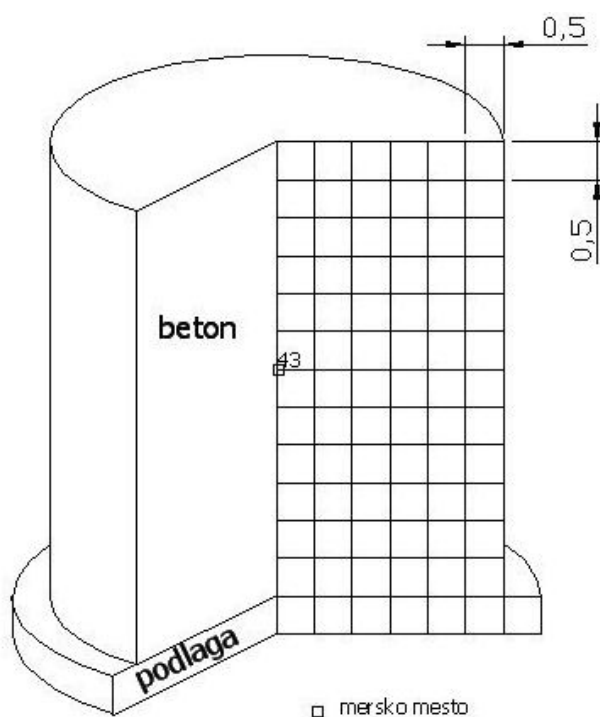
Slika 30: Meritev temperature v adiabatnem kalorimetru betona sestave št.11P z začetno temperaturo  $T_z = +19,0^{\circ}\text{C}$ .

Iz slike 30 in preglednice 7 je razvidno, da je bila najvišja dosežena temperatura  $T = +50,6^{\circ}\text{C}$  po šestih dneh od vgradnje betona.

### **3.2 PRIMERJAVA MED IZMERJENIMI IN IZRAČUNANIMI TEMPERATURAMI**

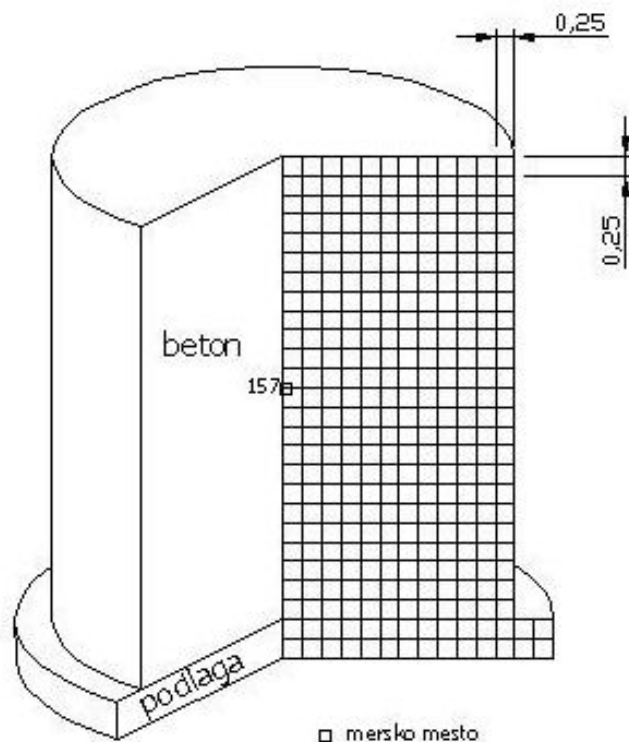
V tem poglavju ocenjujemo natančnost računalniškega programa HEATC za določitev časovnega spreminjanja temperatur v masivnih betonskih blokih. To storimo s primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami v izbranih točkah masivnih betonskih vodnjakov in masivnega betonskega bloka na HE Boštanj. Validacijo rezultatov smo opravili najprej na masivnih betonskih vodnjakih. Geometrijske in materialne podatke o betonskih vodnjakih smo opisali že v poglavju 3.1.2, zato jih tu ne ponavljamo. Pomembno pa je, da so bili vodnjaki na zgornji površini nezakriti.

V programu HEATC smo za izračun temperaturnega polja v masivnem betonskem vodnjaku izbrali tridimenzionalni valjasti končni element. To nam je omogočilo, da smo obravnavali le polovico navpičnega osnega prereza vodnjaka. Ta del smo razdelil na 72 končnih elementov velikosti  $0.5 \times 0.5$  m. Da smo v analizi upoštevali tudi kamnito podlago smo k osnovni mreži elementov dodali še 7 končnih elementov iste velikosti, s katerimi smo modelirali del rečnega dna v globini 0.5 m. Mreža 79 končnih elementov ima tako 100 vozlišč. Prikazana je na sliki 31.



Slika 31: Osnovna mreža končnih elementov za vodnjaka št. 8 in št. 12 ter lokacija merskega mesta.

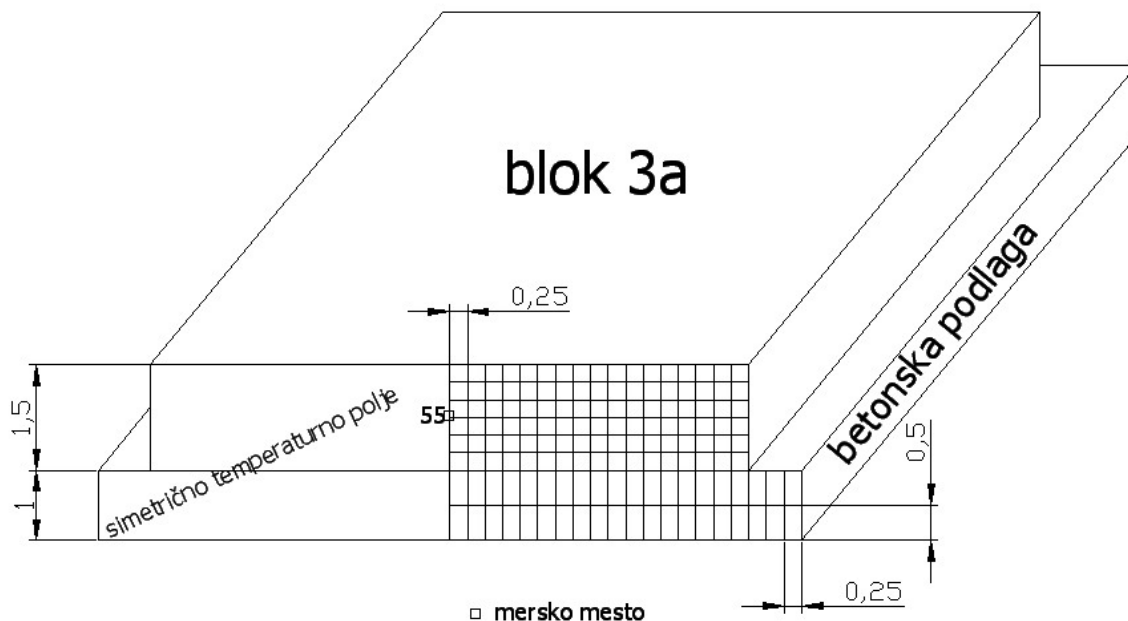
Da smo lahko ocenili natančnost izračunanega temperaturnega polja vodnjaka, smo v nadaljevanju le-tega modelirali še z gostejšo mrežo končnih elementov. Zgoščeno mrežo končnih elementov velikosti  $0.25 \times 0.25$  m sestavlja 316 elementov in 357 vozlišč. Prikazujemo jo na sliki 32.



Slika 32: Zgoščena mreža končnih elementov za vodnjak št. 8 ter lokacija merskega mesta.

V nadaljevanju smo natančnost računalniškega programa HEATC ocenili tudi s primerjavo temperaturnega polja pri masivnem betonskem bloku z oznako 3a. Tudi za ta primer smo geometrijske in materialne podatke bloka predstavili v poglavju 3.1.3, zato jih tu detajlneje ne predstavljamo. Med gradnjo so bile stranske ploskve bloka opažene z lesenim opažem, podlaga pa je bila iz betona (slika 28). Na zgornji površini je bil betonski blok nezakrit.

Za določitev temperaturnega polja v betonskem bloku smo uporabili dvodimenzionalni pravokotni štirivozliščni končni element. Zaradi simetrije bloka pa smo obravnavali le polovico navpičnega prečnega prereza bloka (slika 33). Ta del smo razdelili na 102 končna elementa velikosti  $0,25 \times 0,25$  m. Da smo v analizi upoštevali tudi betonsko podlago smo k mreži končnih elementov dodali še 40 končnih elementov velikosti  $0,25 \times 0,50$  m. S temi elementi smo modelirali del betonske podlage do globine 1.0 m. Mreža 142 končnih elementov ima tako 171 vozlišč in je prikazana na sliki 33.



Slika 33: Mreža končnih elementov za betonski blok št. 3a ter lega merskega mesta.

Vse primere smo analizirali do starosti betona 200 ur s časovnim korakom 1 ure.

Metode za merjenje termičnih lastnosti betona so podane v »Handbook for Concrete and Cement«. Postopek določitve toplotne prevodnosti je podan s postopkom CRD C 44-63, za določitev specifične toplote pa je podana metoda v CRD C 124-73, vendar termične lastnosti betona in kamnite podlage vodnjakov niso bile izmerjene, zato smo jih ocenili s pomočjo podatkov v literaturi<sup>4</sup>. Tako smo za masivni beton izbrali:

$$k= 9300 \text{ J/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C},$$

$$c=930 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C},$$

$$\rho=2450 \text{ kg/m}^3,$$

za kamnito podlago – skalo pa vrednosti:

$$k= 10000 \text{ J/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C},$$

$$c=800 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C},$$

$$\rho=2500 \text{ kg/m}^3.$$

Prestopni koeficient na zgornji površini obravnavanih betonskih vodnjakov in masivnega betonskega bloka, kjer se nezakrit beton stika z zrakom, je bil ocenjen na osnovi podatkov iz literature<sup>4</sup> na vrednost  $50000 \text{ J/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ . Opaž vodnjaka oziroma betonskega bloka je bil v



računski analizi upoštevan z nadomestnim prestopnim koeficientom v smislu enačbe (2.28). Tako smo za nadomestni prestopni koeficient opaža pri vodnjaku in pri betonskem bloku izbrali  $15000 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ . Pri delu vodnjaka, ki je pod vodo, pa je zaradi vlažnosti lesa nekoliko večji, ocenili smo ga na  $75000 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ . Prestopni koeficient je v veliki meri odvisen od hitrosti vetra. Ker se ta stalno spreminja, je podatek relativno nezanesljiv. Aktivacijska energija cementa je bila ocenjena na osnovi priporočil literature<sup>4</sup> in je  $E_A=33500 \text{ J/mol}$ .

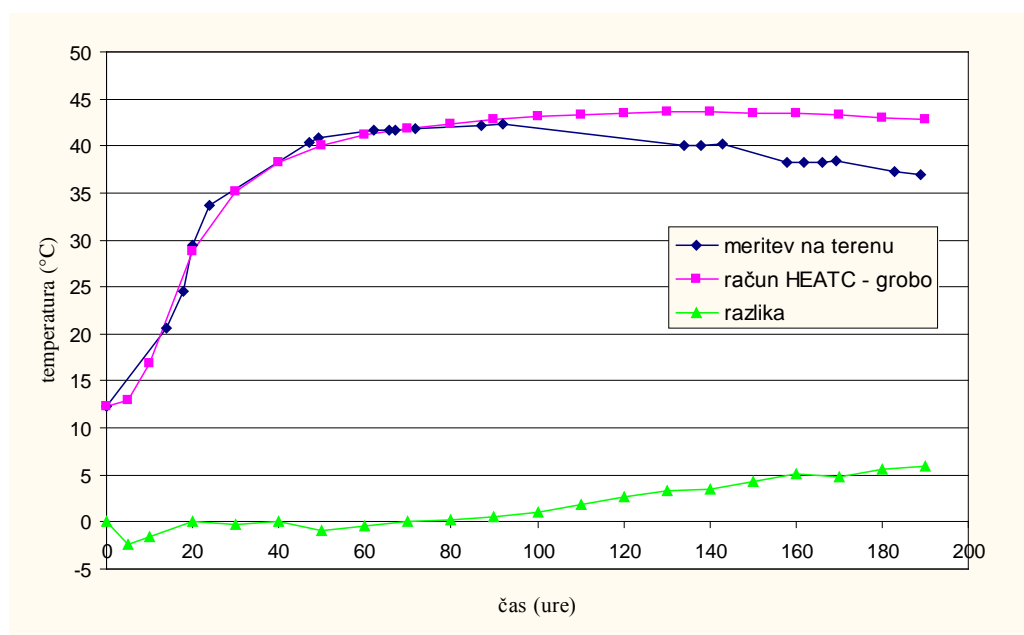
### **3.2.1 VODNJAK ŠT. 8 IN VODNJAK ŠT. 12**

Kot smo že povedali, je bil betonski vodnjak št. 8 betoniran 25.03.2003. Na terenu so bile opravljene meritve časovnega spreminjanja temperatur strjujočega betona na mestu vozlišča št. 43 (osnovna mreža končnih elementov) oziroma na mestu vozlišča št. 157 (zgoščena mreža končnih elementov). Časovno spreminjanje temperaturnega polja strjujočega betona smo v nadaljevanju določili s programom HEATC. Pri tem smo upoštevali robne pogoje, ki so najbolj ustrezali razmeram v okolici. Da smo ocenili natančnost računa, smo primer analizirali z dvema mrežama končnih elementov. Prvič z mrežo končnih elementov velikih  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , dodatno pa še z gostejšo mrežo končnih elementov velikih  $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ . Primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami prikazujemo v preglednici 8. Z modro barvo so označene temperature izračunane z linearno interpolacijo.

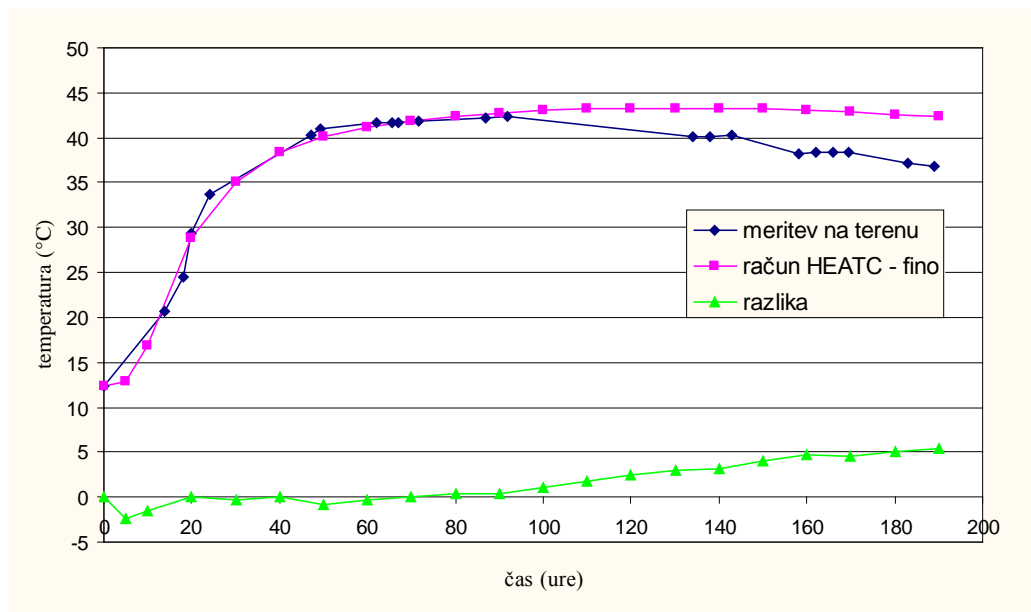
Preglednica 8: Vodnjak št. 8 primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami.

| čas<br>[ure] | meritev na<br>terenu          | račun HEATC –<br>osnovna mreža KE |                 | račun HEATC -<br>zgoščena mreža KE |                 |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|
|              | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C]     | razlika<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C]      | razlika<br>[°C] |
| 0            | 12.3                          | 12.3                              | 0.0             | 12.3                               | 0.0             |
| 5            | 15.3                          | 12.9                              | -2.4            | 12.9                               | -2.4            |
| 10           | 18.3                          | 16.8                              | -1.5            | 16.8                               | -1.5            |
| 14           | 20.7                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 18           | 24.5                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 20           | 29.4                          | 28.8                              | -0.6            | 28.8                               | -0.6            |
| 24           | 33.7                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 30           | 35.4                          | 35.1                              | -0.3            | 35.1                               | -0.3            |
| 40           | 38.3                          | 38.3                              | 0.0             | 38.3                               | 0.0             |
| 47           | 40.3                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 50           | 40.9                          | 40.0                              | -0.9            | 40.1                               | -0.8            |
| 60           | 41.5                          | 41.2                              | -0.3            | 41.2                               | -0.3            |
| 62           | 41.6                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 65.5         | 41.6                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 67           | 41.7                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 70           | 41.8                          | 41.9                              | 0.1             | 41.9                               | 0.1             |
| 71.5         | 41.9                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 80           | 42.1                          | 42.4                              | 0.3             | 42.4                               | 0.3             |
| 87           | 42.2                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 90           | 42.3                          | 42.8                              | 0.5             | 42.8                               | 0.5             |
| 92           | 42.4                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 100          | 42.0                          | 43.1                              | 1.1             | 43.0                               | 1.1             |
| 110          | 41.4                          | 43.3                              | 1.9             | 43.2                               | 1.8             |
| 120          | 40.9                          | 43.5                              | 2.6             | 43.3                               | 2.4             |
| 130          | 40.3                          | 43.6                              | 3.2             | 43.3                               | 3.0             |
| 134          | 40.1                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 138          | 40.1                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 140          | 40.1                          | 43.6                              | 3.5             | 43.3                               | 3.2             |
| 143          | 40.2                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 150          | 39.3                          | 43.5                              | 4.3             | 43.2                               | 3.9             |
| 158          | 38.2                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 160          | 38.3                          | 43.4                              | 5.1             | 43.1                               | 4.8             |
| 166          | 38.3                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 170          | 38.4                          | 43.3                              | 4.9             | 42.9                               | 4.5             |
| 180          | 37.5                          | 43.0                              | 5.6             | 42.6                               | 5.1             |
| 183          | 37.2                          | -                                 | -               | -                                  | -               |
| 190          | 36.9                          | 42.8                              | 5.9             | 42.3                               | 5.4             |

Še nazorneje prikazeta primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami sliki 34 in 35 in sicer slika 34 za osnovno mrežo končnih elementov, slika 35 pa za zgoščeno mrežo končnih elementov.

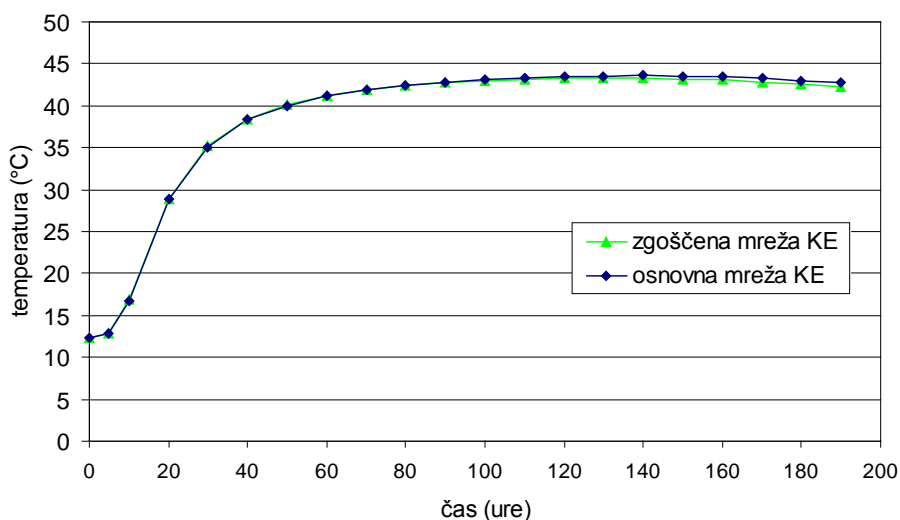


Slika 34: Vodnjak št. 8. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami. Osnovna mreža končnih elementov.



Slika 35: Vodnjak št. 8. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami. Zgoščena mreža končnih elementov.

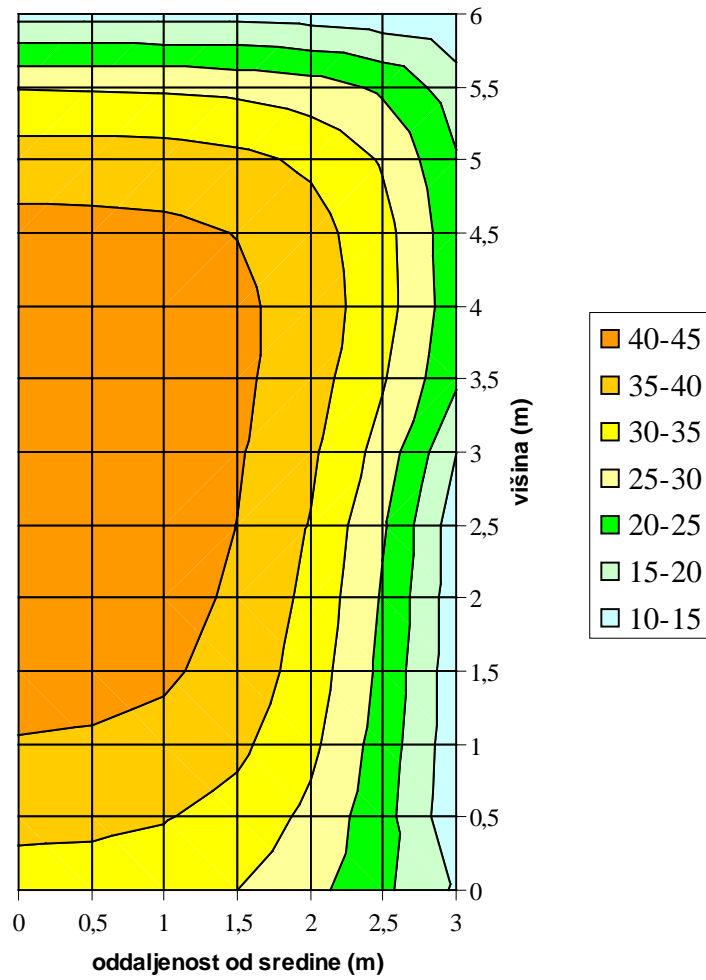
V nadaljevanju analiziramo natančnost izračunanega temperaturnega polja s programom HEATC. Primerjavo rezultatov, ki smo jih izračunali z osnovno in zgoščeno mrežo končnih rezultatov, prikazuje slika 36. Rezultati nedvoumno dokazujejo, da zgoščevanje mreže končnih elementov bistveno ne poveča natančnosti računa.



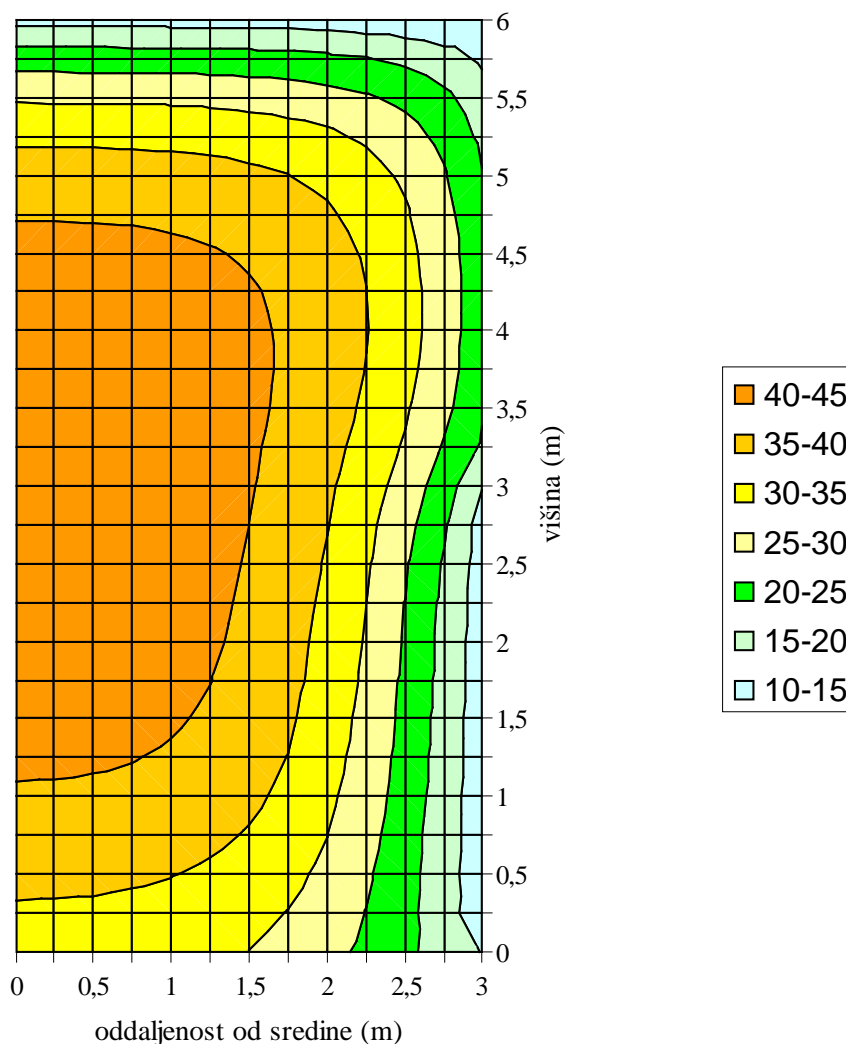
Slika 36: Vodnjak št. 8. Primerjava med temperaturnima poljema, ki smo jih izračunali z osnovno in zgoščeno mrežo končnih elementov.

Analiza primerjave med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami pri vodnjaku št. 8 je pokazala relativno dobro ujemanje. Tako je razlika temperatur do  $t=100$  ur manjša kot  $1^{\circ}\text{C}$ . Kasneje je napaka nekoliko večja, toda nikoli ne preseže  $6^{\circ}\text{C}$ . Verjetni razlog za napako je v tem, da so med gradnjo opaž po 100 urah odstranili, tega pa v računu nismo upoštevali.

Na pojav razpok v masivnem betonu vplivajo predvsem temperaturni gradienti. Zato smo v nadaljevanju prikazali tudi razporeditev temperaturnega polja v betonskem vodnjaku pri času 130 ur. Kot lahko vidimo na sliki 34 v tem času temperatura na merskem mestu doseže največjo vrednost. Tudi sedaj smo prikazali razporeditev temperaturnega polja za osnovno mrežo končnih elementov (slika 37) in za zgoščeno mrežo končnih elementov (slika 38).



Slika 37: Vodnjak št. 8. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - osnovna mreža končnih elementov.



Slika 38: Vodnjak št. 8. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - zgoščena mreža končnih elementov.

Na slikah 37 in 38 opazimo, da temperaturni gradienti nikoli ne presežejo priporočene mejne vrednosti  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup>

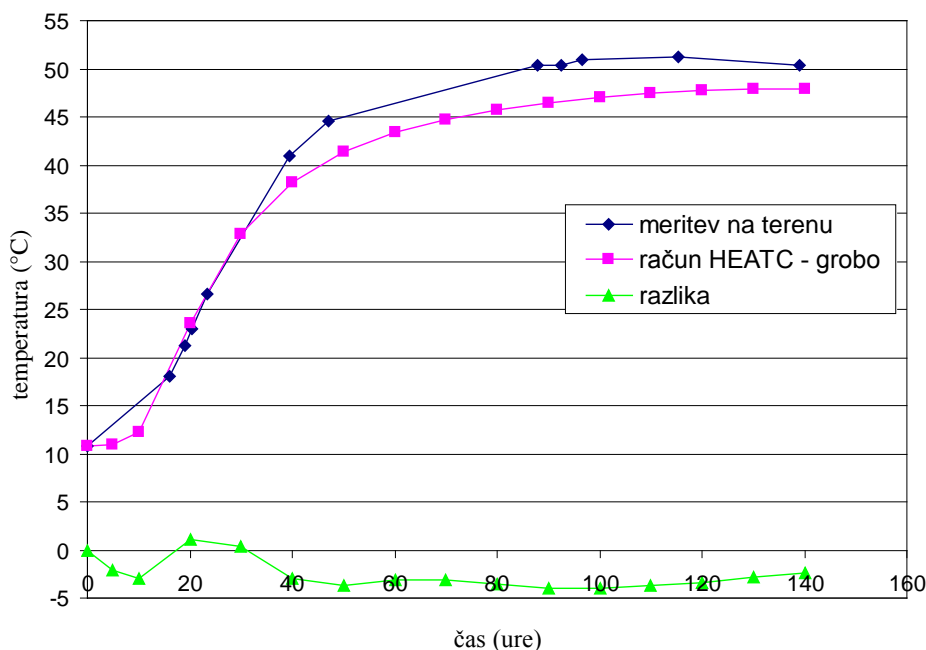
V naslednjem koraku analiziramo še vodnjak št. 12. Ta je bil betoniran 20.02.2003. Na gradbišču so bile opravljene meritve časovnega spreminjanja temperatur strjujočega betona na mestu vozlišča št. 43. Ker smo v poglavju 3.2.1 dokazali, da gostitev mreže končnih elementov ne vpliva na natančnost računa, smo primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi izdelali samo za osnovno mrežo končnih elementov. Primerjavo med izmerjenimi

in izračunanimi temperaturami prikazujemo v preglednici 9. Z modro barvo so označene temperature izračunane z linearno interpolacijo.

*Preglednica 9: Vodnjak št. 12 primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami.*

| čas<br>[ure] | meritev na<br>terenu          | račun HEATC –<br>osnovna mreža KE |                 |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
|              | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C]     | razlika<br>[°C] |
| 0            | 10.8                          | 10.8                              | 0.0             |
| 5            | 13.1                          | 11.0                              | -2.1            |
| 10           | 15.3                          | 12.3                              | -3.0            |
| 16           | 18.0                          | -                                 | -               |
| 19           | 21.3                          | -                                 | -               |
| 20           | 22.9                          | 23.5                              | 0.6             |
| 24           | 26.6                          | -                                 | -               |
| 30           | 32.0                          | 32.9                              | 0.9             |
| 40           | 41.0                          | 38.2                              | -2.8            |
| 47           | 44.6                          | -                                 | -               |
| 50           | 45.0                          | 41.4                              | -3.7            |
| 60           | 46.4                          | 43.4                              | -3.1            |
| 70           | 47.9                          | 44.7                              | -3.1            |
| 80           | 49.3                          | 45.7                              | -3.6            |
| 88           | 50.4                          | -                                 | -               |
| 90           | 50.4                          | 46.5                              | -4.0            |
| 92           | 50.4                          | -                                 | -               |
| 97           | 51.0                          | -                                 | -               |
| 100          | 51.0                          | 47.0                              | -4.0            |
| 110          | 51.1                          | 47.4                              | -3.7            |
| 115          | 51.2                          | -                                 | -               |
| 120          | 51.0                          | 47.7                              | -3.3            |
| 130          | 50.7                          | 47.9                              | -2.8            |
| 140          | 50.4                          | 48.0                              | -2.4            |

Še nazorneje prikaže primerjavo med izmerjenimi temperaturami in temperaturami izračunanimi za osnovno mrežo končnih elementov slika 39.

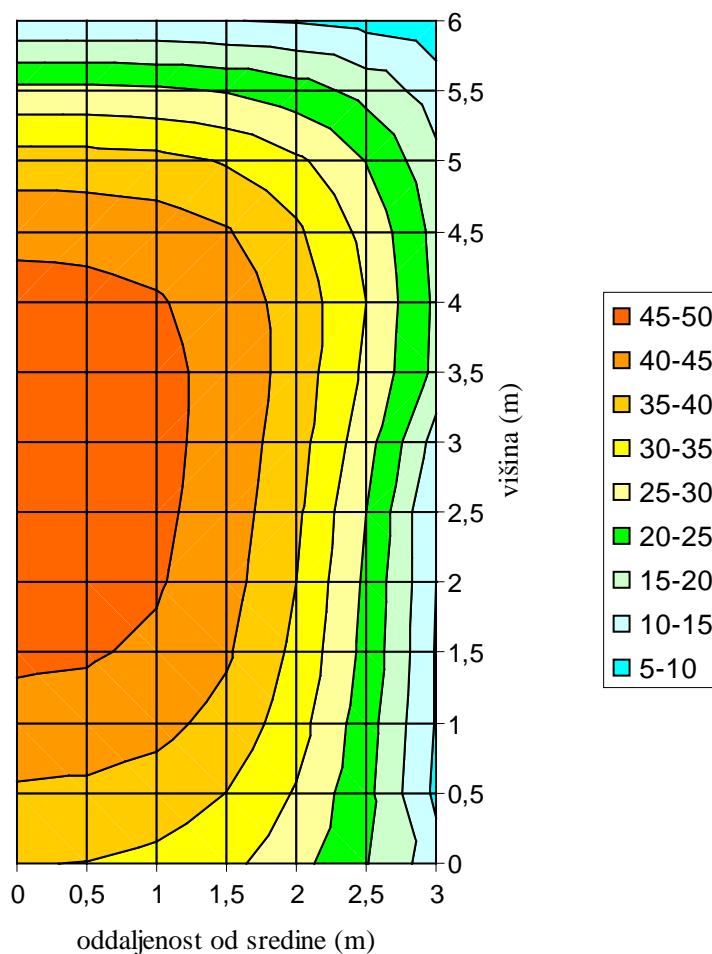


Slika 39: Primerjava meritev na terenu in izračuna s programom HEATC na osnovni mreži končnih elementov.

Analiza primerjave med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami pri vodnjaku št. 12 je pokazala relativno dobro ujemanje. Tako je razlika temperatur do  $t=30$  ur manjša kot  $1^{\circ}\text{C}$ . Kasneje je napaka nekoliko večja, toda nikoli ne preseže  $4^{\circ}\text{C}$ . Verjetni razlog za napako je v težavah pri meritvi adiabatских termičnih karakteristik recepture št. 2.

Na pojav razpok v masivnem betonu vplivajo predvsem temperaturni gradienti. Zato smo v nadaljevanju prikazali tudi razporeditev temperaturnega polja v betonskem vodnjaku pri času 140 ur. Kot lahko vidimo na sliki 39 v tem času temperatura na merskem mestu doseže največjo vrednost. Na sliki 40 smo prikazali razporeditev temperaturnega polja za osnovno mrežo končnih elementov.





Slika 40: Vodnjak št. 12. Razpored temperatur po prečnem prerezu vodnjaka 130 ur po betoniranju - osnovna mreža končnih elementov.

Na sliki 40 opazimo, da temperaturni gradienti nikoli ne presežejo priporočene mejne vrednosti  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup>

Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami pri vodnjakih št. 8 in št. 12 nedvoumno dokazuje veliko natančnost računalniškega programa HEATC tudi za analizo temperaturnega polja pri masivnih betonskih konstrukcijah hidroenergetskih objektov na spodnji Savi.

### 3.2.2 PRELIVNO POLJE - BLOK 3a

Kot smo že povedali, je bil blok 3a prelivnega polja betoniran dne 03.10.2003. Na terenu so bile opravljene meritve časovnega spreminjanja temperatur strjujočega betona na mestu vozlišča št. 55. Časovno spreminjanje temperaturnega polja strjujočega betona smo v nadaljevanju določili s programom HEATC. Pri tem smo upoštevali robne pogoje, ki so najbolj ustrezali razmeram v okolici. Ker je bil masivni betonski blok manjših dimenzij, smo tu opravili izračun na osnovni mreži končnih elementov velikosti 0.25 m × 0.25 m.

Primerjavo med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami prikazujemo v preglednici 10. Z modro barvo so označene temperature izračunane z linearno interpolacijo

*Preglednica 10: Prelivno polje blok 3a. Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami.*

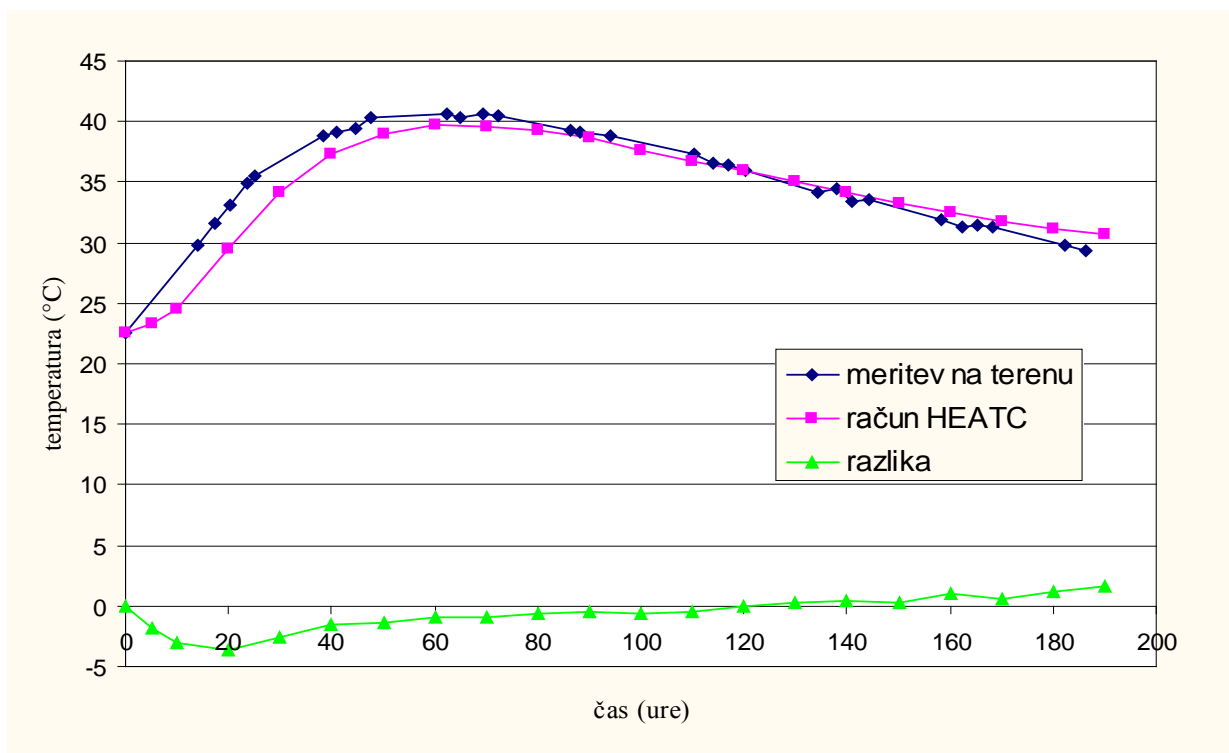
| čas<br>(ure) | meritev na<br>terenu          | račun HEATC –<br>osnovna mreža KE |                 |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
|              | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C]     | razlika<br>[°C] |
| 0            | 22.5                          | 22.5                              | 0.0             |
| 5            | 25.1                          | 23.2                              | -1.9            |
| 10           | 27.7                          | 24.6                              | -3.2            |
| 14           | 29.8                          | -                                 | -               |
| 20           | 33.1                          | 29.5                              | -3.6            |
| 23.5         | 34.9                          | -                                 | -               |
| 25           | 35.5                          | -                                 | -               |
| 30           | 36.8                          | 34.2                              | -2.7            |
| 38           | 38.9                          | -                                 | -               |
| 40           | 39.0                          | 37.4                              | -1.6            |
| 41           | 39.1                          | -                                 | -               |
| 45           | 39.4                          | -                                 | -               |
| 47.5         | 40.4                          | -                                 | -               |
| 50           | 40.5                          | 39.0                              | -1.4            |
| 60           | 40.7                          | 39.7                              | -1.0            |
| 62.5         | 40.7                          | -                                 | -               |
| 65           | 40.4                          | -                                 | -               |
| 70           | 40.6                          | 39.6                              | -1.0            |

se nadaljuje

nadaljevanje

|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| 72.5 | 40.5 | -    | -    |
| 80   | 39.8 | 39.2 | -0.6 |
| 86   | 39.3 | -    | -    |
| 88   | 39.2 | -    | -    |
| 90   | 39.1 | 38.6 | -0.5 |
| 94   | 38.9 | -    | -    |
| 100  | 38.3 | 37.7 | -0.6 |
| 110  | 37.3 | 36.8 | -0.5 |
| 114  | 36.6 | -    | -    |
| 117  | 36.4 | -    | -    |
| 120  | 35.9 | 35.9 | 0.0  |
| 130  | 34.7 | 35.0 | 0.3  |
| 134  | 34.2 | -    | -    |
| 138  | 34.4 | -    | -    |
| 140  | 33.4 | 34.2 | 0.8  |
| 144  | 33.6 | -    | -    |
| 150  | 32.9 | 33.2 | 0.4  |
| 158  | 31.9 | -    | -    |
| 160  | 31.6 | 32.6 | 1.0  |
| 162  | 31.3 | -    | -    |
| 165  | 31.4 | -    | -    |
| 168  | 31.3 | -    | -    |
| 170  | 31.1 | 31.8 | 0.7  |
| 180  | 30.0 | 31.2 | 1.1  |
| 182  | 29.8 | -    | -    |
| 190  | 29.4 | 30.6 | 1.2  |

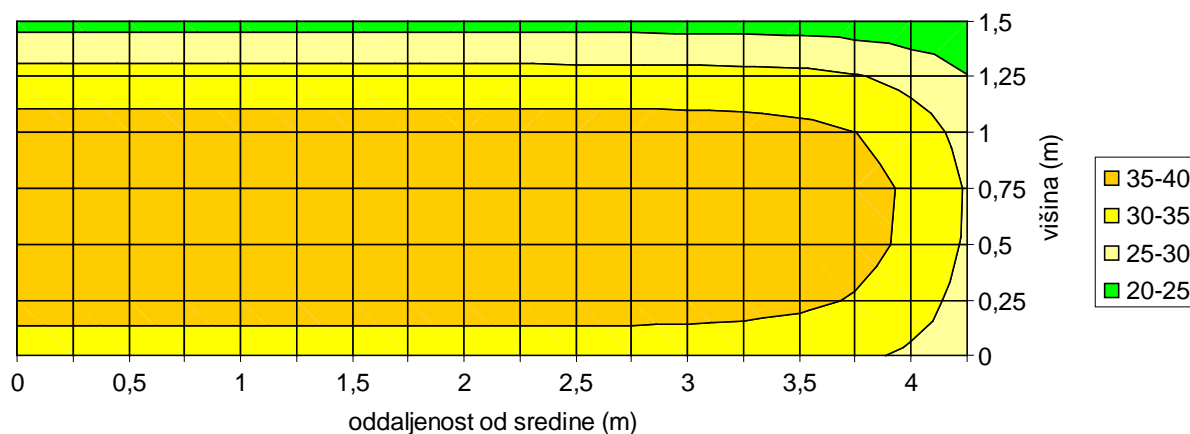
Še nazorneje prikaže primerjavo med izmerjenimi temperaturami in temperaturami izračunanimi za osnovno mrežo končnih elementov slika 41.



Slika 41: Primerjava meritev na terenu in izračuna s programom HEATC na osnovni mreži končnih elementov.

Analiza primerjave med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami pri betonskem bloku 3a je pokazala zelo dobro ujemanje. Skoraj v celotnem obravnavanem časovnem območju je razlika temperatur do manjša kot 1°C. Večja odstopanja so opazna le na začetku betoniranja (prvih 30 ur). Razlog je lahko to, da je od zamešanja do vgradnje betona poteklo že nekaj časa.

Na pojav razpok v masivnem betonu vplivajo predvsem temperaturni gradienti. Zato smo v nadaljevanju na sliki 42 prikazali tudi razporeditev temperaturnega polja v betonskem bloku 3a pri času 60 ur. Kot lahko vidimo na sliki 41 v tem času temperatura na merskem mestu doseže največjo vrednost.



Slika 42: Prikaz temperaturnega polja masivnega betonskega bloka 60 ur po betoniranju.

Na sliki 42 opazimo, da temperaturni gradienti nikoli ne presežejo priporočene mejne vrednosti  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup>

Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami pri referenčnem masivnem betonskem bloku 3a nedvoumno dokazuje veliko natančnost računalniškega programa HEATC tudi za analizo temperaturnega polja pri masivnih betonskih konstrukcijah hidroenergetskih objektov na spodnji Savi.

## 4 PARAMETRIČNA ŠTUDIJA

Rezultati prejšnjega poglavja dokazujejo, da z računalniškim programom HEATC relativno dobro modeliramo časovno spreminjanje temperatur v masivnih betonskih blokih. Detajlna analiza je pokazala, da je absolutna temperatura v betonskem bloku 3a relativno nizka, prav tako pa tudi temperaturni gradienti niso preveliki. To nas je navedlo na misel, da bi ugotovili, kako se spreminjajo temperaturni gradienti in maksimalne vrednosti temperatur, če bi se povečale dimenzije masivnih betonskih blokov. S tako povečanimi betonskimi bloki bi seveda bistveno povečali hitrost gradnje hidroelektrarn na spodnji Savi, kakor tudi zmanjšali količino delovnih stikov med masivnimi bloki. Ti so, kot je dobro znano, pri tovrstnih gradnjah zelo občutljiv tehnični problem.

Ker ima na razporeditev temperaturnega polja v masivnem betonskem bloku zunanja temperatura pomemben vpliv, bomo v nadaljevanju izdelali tudi parametrično študijo vpliva temperature okolice na velikost temperaturnega polja v masivnem bloku. Parametrične študije preostalih materialnih parametrov, kot so emisivnost, geografska lega gradbišča in številni drugi, niso predmet detajlne analize v tej diplomski nalogi.

## **4.1 PARAMETRIČNA ANALIZA – vpliv dimenzij masivnega betonskega bloka na temperaturno polje**

Parametrično analizo velikosti masivnega betonskega bloka na časovno spreminjanje temperaturnega polja smo izdelali za betonski blok 3a. Pri obravnavanem bloku, ki je širok 8.5 m in dolg 13 m smo spreminjali višino. Ta se je spreminjala od 1.5 m, preko 2.0 m in 2.5 m do 3.0 m. Pri parametrični analizi smo izbrali naslednje materialne parametre betona:

- $k=9300 \text{ J/m}\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ ,
- $c=930 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$ ,
- $\rho=2450 \text{ kg/m}^3$ ,
- nadomestni prestopni koeficient opaža= $15000 \text{ J/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{°C}$ ,
- aktivacijska energija cementa  $E_A=33500 \text{ J/mol}$ ,
- beton s sestavo 11P (glej poglavje 3.1.3).

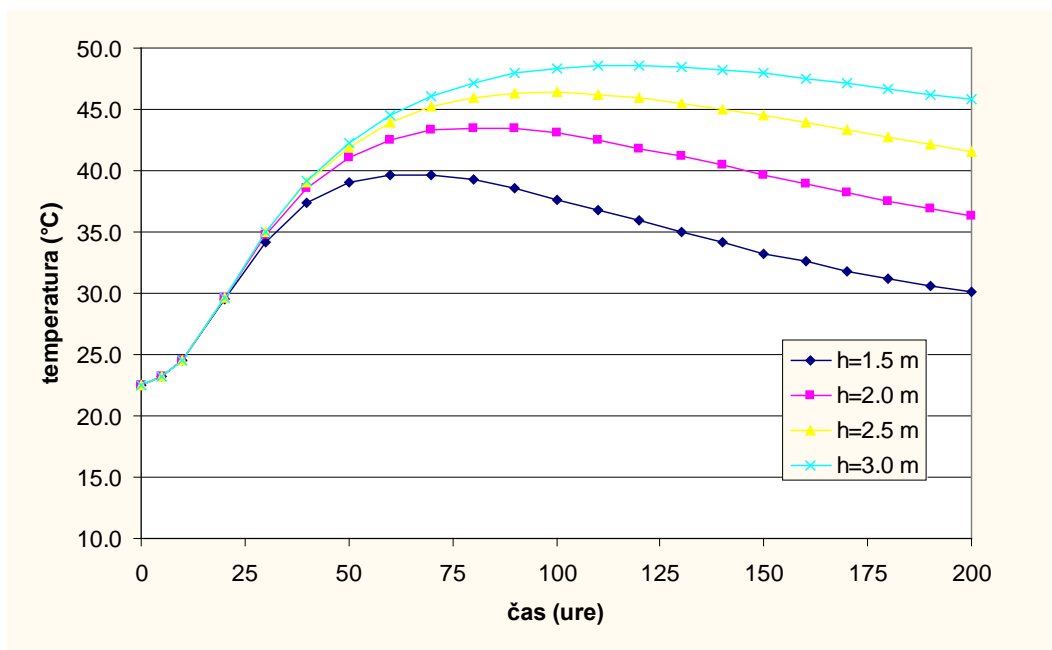
Masivne bloke smo modelirali z dvodimenzionalnimi pravokotnimi štirivozličnimi končnimi elementi velikosti  $0.25\times 0.25 \text{ m}$ . Zaradi simetrije smo obravnavali le polovico navpičnega prečnega prereza betonskega bloka. Da smo v analizi upoštevali vpliv betonske podlage, smo k mreži končnih elementov dodali še končne elemente velikosti  $0.25\times 0.5 \text{ m}$ , s katerimi smo modelirali del podlage bloka do globine 1.0 m. Parametrično analizo smo izdelali do starosti betona 200 ur, za korak časovne integracije pa smo izbrali 1 uro.

V preglednici 11 in na sliki 43 prikazujemo časovno spreminjanje temperature v sredini obravnavanega masivnega betonskega bloka, za različne velikosti blokov.

Preglednica 11: Časovno spreminjanje temperature betona v sredini masivnega betonskega za različne velikosti blokov.

| čas<br>[ure] | višina bloka                  |                               |                               |                               |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|              | h=1.5 m                       | h=2.0 m                       | h=2.5 m                       | h=3.0 m                       |
|              | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C] | Temperatura<br>betona<br>[°C] |
| 0            | 22.5                          | 22.5                          | 22.5                          | 22.5                          |
| 5            | 23.2                          | 23.2                          | 23.2                          | 23.2                          |
| 10           | 24.6                          | 24.5                          | 24.5                          | 24.5                          |
| 20           | 29.5                          | 29.7                          | 29.7                          | 29.7                          |
| 30           | 34.2                          | 34.8                          | 35.0                          | 35.0                          |
| 40           | 37.4                          | 38.6                          | 39.0                          | 39.1                          |
| 50           | 39.0                          | 41.1                          | 41.9                          | 42.2                          |
| 60           | 39.7                          | 42.5                          | 43.9                          | 44.5                          |
| 70           | 39.6                          | 43.3                          | 45.2                          | 46.1                          |
| 80           | 39.2                          | 43.5                          | 45.9                          | 47.2                          |
| 90           | 38.6                          | 43.4                          | 46.3                          | 47.9                          |
| 100          | 37.7                          | 43.0                          | 46.4                          | 48.4                          |
| 110          | 36.8                          | 42.5                          | 46.2                          | 48.6                          |
| 120          | 35.9                          | 41.8                          | 45.9                          | 48.6                          |
| 130          | 35.0                          | 41.1                          | 45.5                          | 48.5                          |
| 140          | 34.2                          | 40.4                          | 45.0                          | 48.2                          |
| 150          | 33.2                          | 39.7                          | 44.5                          | 47.9                          |
| 160          | 32.6                          | 39.0                          | 43.9                          | 47.6                          |
| 170          | 31.8                          | 38.3                          | 43.4                          | 47.1                          |
| 180          | 31.2                          | 37.5                          | 42.8                          | 46.7                          |
| 190          | 30.6                          | 36.9                          | 42.2                          | 46.2                          |
| 200          | 30.1                          | 36.3                          | 41.6                          | 45.8                          |

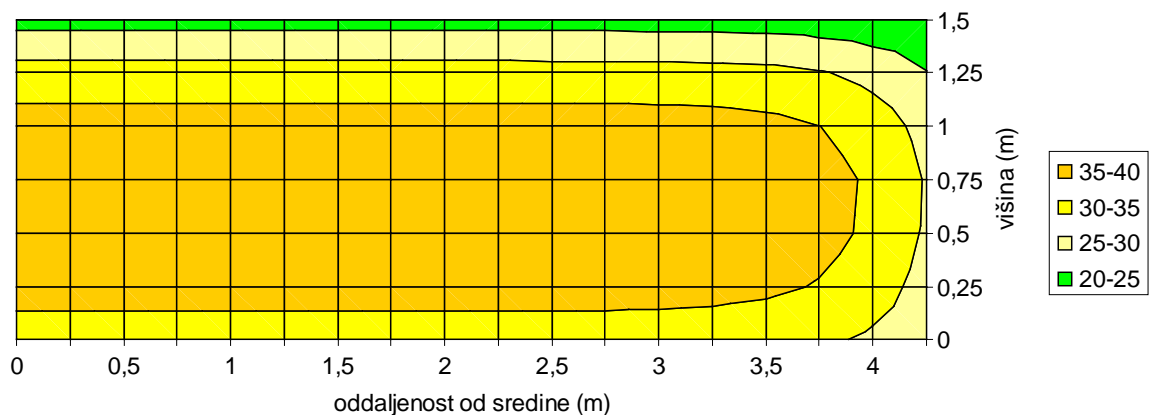




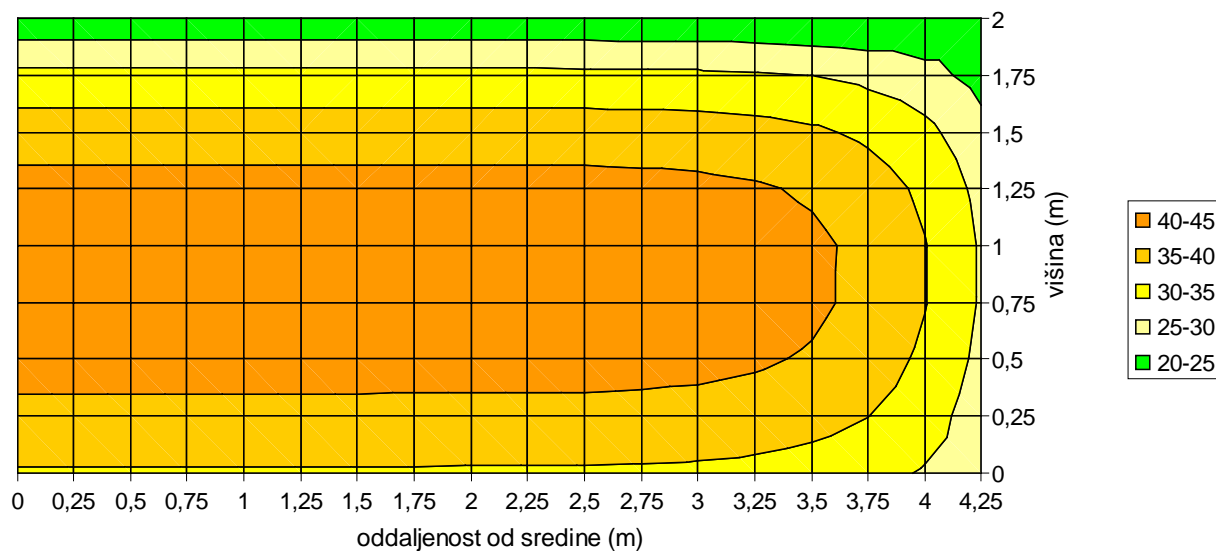
Slika 43: Časovno spreminjanje temperature betona v sredini masivnega betonskega za različne velikosti blokov.

Iz preglednice 11 kot tudi slike 44 je razvidno, da blok z višino 1.5 m doseže maksimalno temperaturo 39.7°C, blok z višino 2.0 m 43.5°C, blok z višino 2.5 m 46.4°C in blok z višino 3.0 m 48.6°C. Vse temperature so nižje od priporočene maksimalne temperature 55°C.<sup>16</sup>

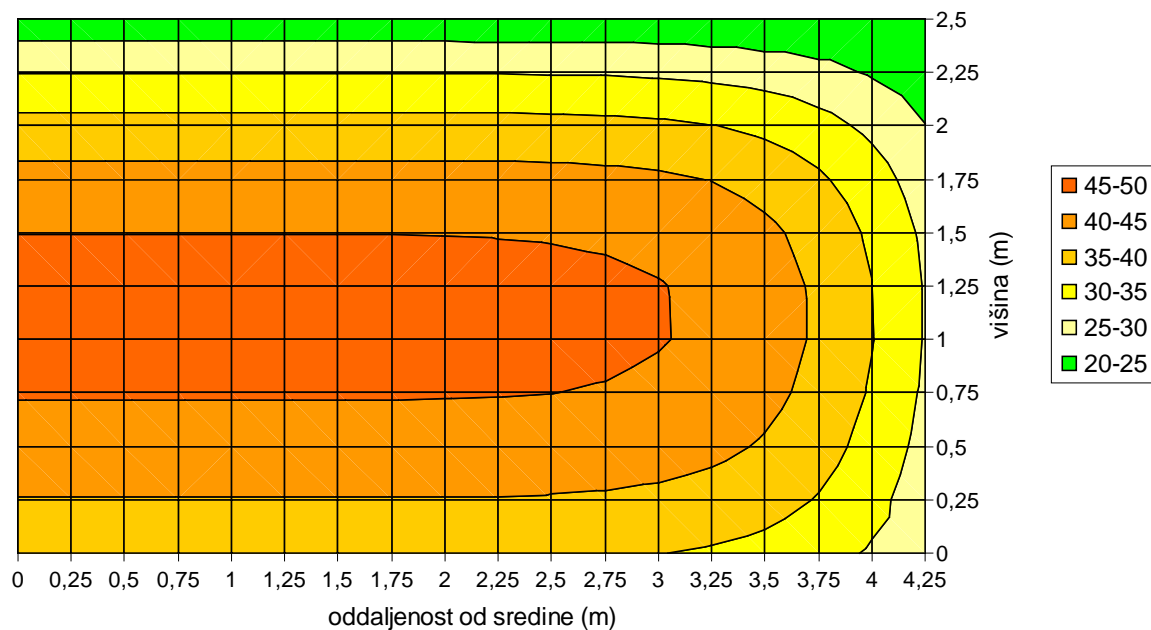
V nadaljevanju na slikah 44, 45, 46 in 47 prikazujem še razporeditev temperatur po prečnem prerezu betonskega bloka v času, ko v sredini betonskega bloka temperatura doseže maksimum. Skladno s preglednico 11 in sliko 43 lahko ugotovimo da je ta čas za blok višine 1.5 m 60 ur, za blok višine 2.0 m 80 ur, za blok višine 2.5 m 100 ur in za blok višine 3.0 m 110 ur.



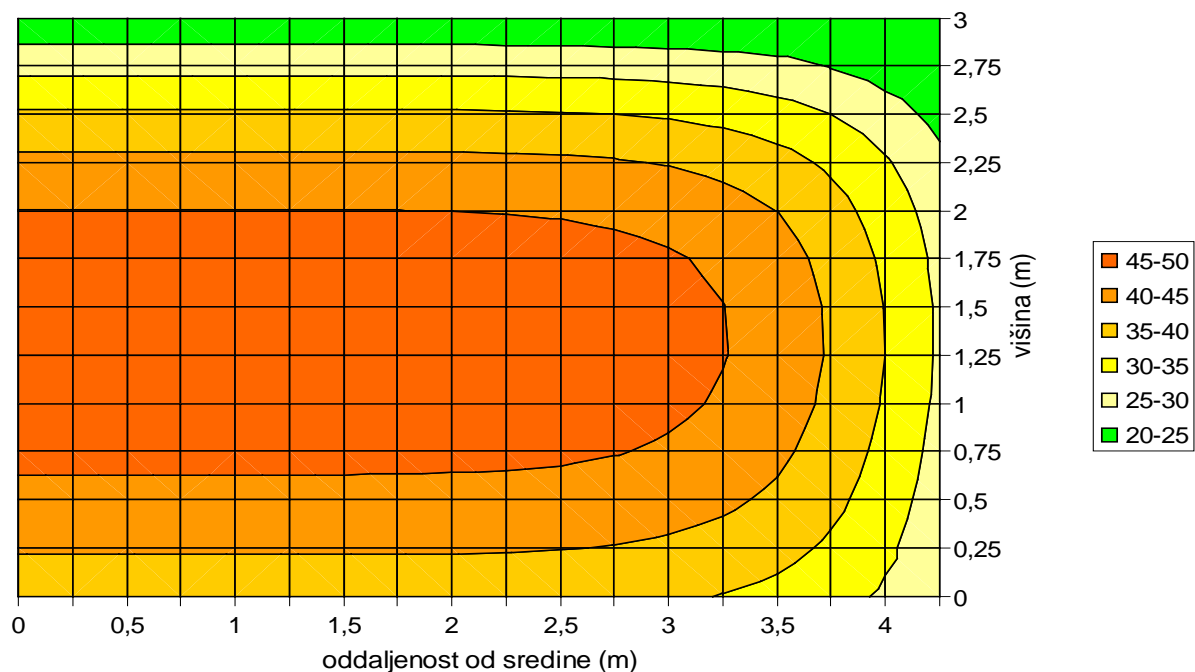
Slika 44: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 60 ur po betoniranju. Višina bloka je 1.5 m.



Slika 45: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 80 ur po betoniranju. Višina bloka je 2.0 m.



Slika 46: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 100 ur po betoniranju. Višina bloka je 2.5 m.



Slika 47: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 110 ur po betoniranju. Višina bloka je 3.0 m.

S primerjavo slik 44, 45, 46 in 47 ugotovimo, da so temperaturni gradienti pri vseh štirih masivnih betonskem blokih reda velikosti  $15^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ . To je veliko manj od priporočene mejne vrednosti  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup> Iz povedanega bi lahko sklepali, da so projektirane dimenzije masivnih blokov hidroelektrarn na spodnji Savi bistveno manjše od dovoljenih, vsaj kar se tiče dovoljenih temperaturnih gradientov in največjih temperatur.

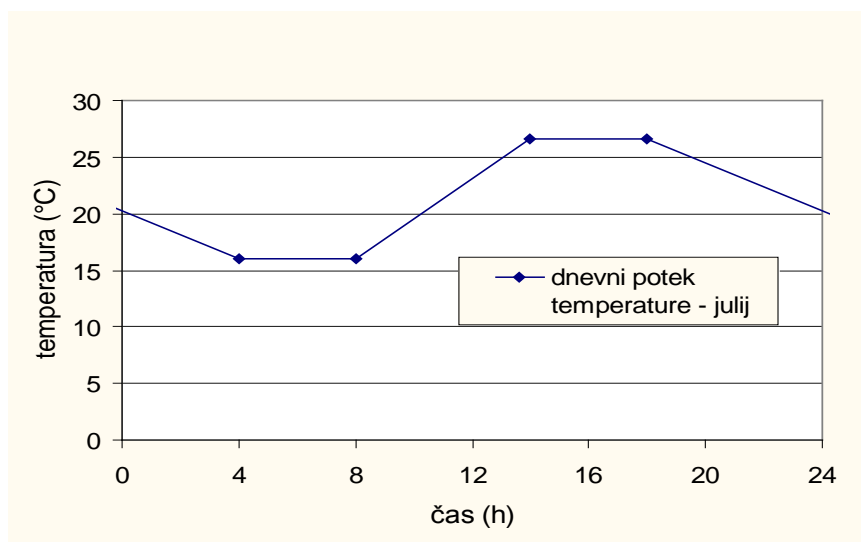
## ***4.2 PARAMETRIČNA ANALIZA - vpliv zunanjih temperatur na temperaturno polje masivnega betonskega bloka***

V nadaljevanju smo izdelali tudi parametrično analizo vpliva zunanjih temperatur na časovno spreminjanje temperatur pri največjem masivnem betonskem bloku. Podatke o bloku smo privzeli iz prejšnjega poglavja. Ta meri  $11.0 \times 8.5 \times 3.0\text{ m}$ . Za osnovo smo vzeli dejstvo, da betonski blok 3a, tudi če mu povečamo višino na 3.0 m pri danih temperaturah okolice zadosti zahtevam za dovoljene temperaturne gradiente in dovoljeno največjo absolutno temperaturo. Vprašali smo se, ali bo tudi v primeru betoniranja poleti, t.j. ob višjih temperaturah betona pri vgrajevanju in višjih zunanjih temperaturah, beton še zadovoljeval vse temperaturne zahteve. Prav tako nas je zanimalo, kaj se zgodi ob betoniranju tako velikega betonskega bloka v zimskem času. V obeh primerih bomo opazovali najvišje dosežene temperature v betonu in največje temperaturne gradiente.

V poletnem času smo privzeli temperaturo betona pri vgradnji  $25^{\circ}\text{C}$ , kar je maksimalna dovoljena temperatura betona pri vgradnji. Dnevni potek temperatur, kot je prikazan na sliki 48, smo dobili s pomočjo povprečnega temperaturnega minimuma in povprečnega temperaturnega maksimuma. Povprečni temperaturni minimum je povprečje najnižjih dnevnih temperatur v obravnavanem mesecu, povprečni temperaturni maksimum pa je povprečje najvišjih dnevnih temperatur v obravnavanem mesecu. Ker so bili edini dostopni podatki za mesto Ljubljana, smo te izbrali kot referenčne temperature okolice. Ocenjujemo pa, da s tem nismo naredili prevelike napake. Tako smo za mesec julij 2005 izbrali povprečni dnevni minimum  $16.0^{\circ}\text{C}$  in povprečni dnevni maksimum  $26.6^{\circ}\text{C}$ .<sup>10</sup>

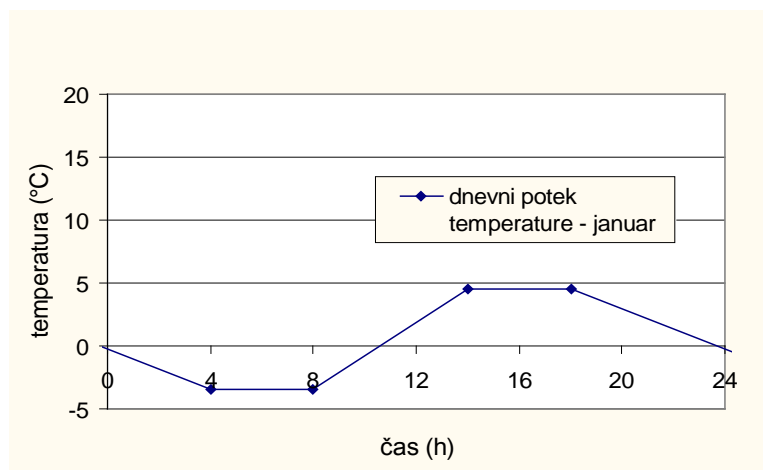
---

Zaradi ugodnejše priprave podatkov, smo izbrane temperature razdelili na intervale, kjer se je temperatura spreminjala linearno. Od 04.00 do 08.00 smo privzeli temperaturo dnevnega minimuma, nato temperatura narašča do dnevnega maksimuma, ki nastopi ob 14.00 in traja do 18.00. Potem temperatura pada do 04.00 ure naslednjega dne.



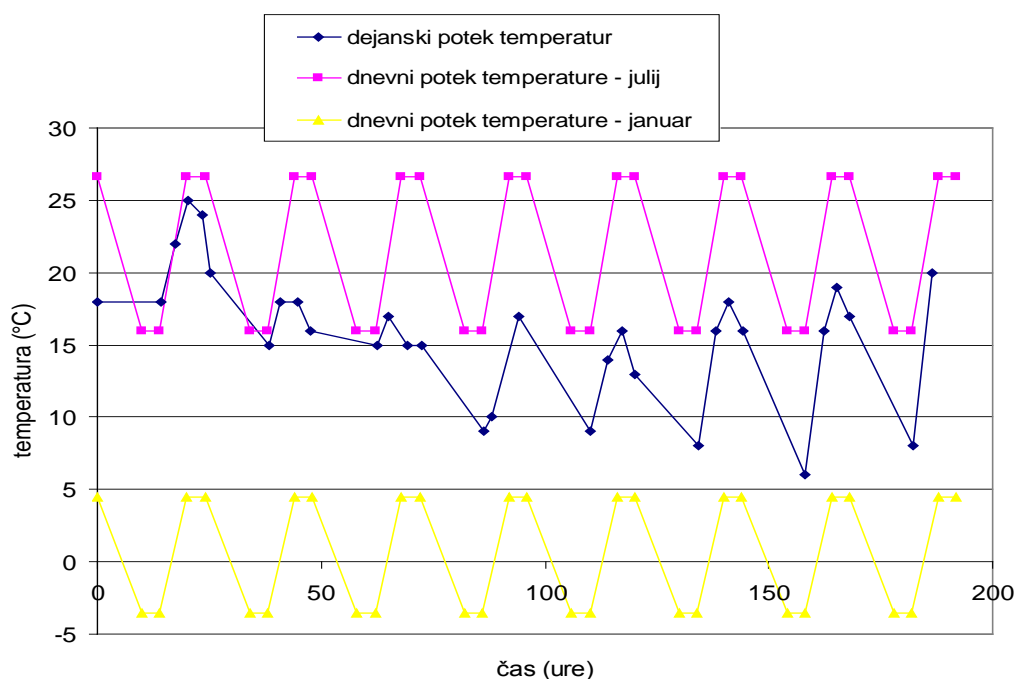
Slika 48: Predpostavljeno dnevno spreminjanje temperature v okolici obravnavanega masivnega betonskega bloka za mesec julij.

Za betoniranje v zimskem času smo privzeli temperaturo betona pri vgradnji  $5^{\circ}\text{C}$ , kar je minimalna dovoljena temperatura betona ob vgradnji. Dnevni potek temperatur, kot je prikazan na sliki 49, smo dobili s pomočjo povprečnega temperaturnega minimuma in povprečnega temperaturnega maksimuma.. Ker so bili edini dostopni podatki za mesto Ljubljana, smo tudi te izbrali kot referenčne temperature okolice. Ocenjujemo pa, da s tem tudi sedaj nismo naredili prevelike napake. Tako smo za mesec januar 2005 izbrali povprečni dnevni minimum  $-3.5^{\circ}\text{C}$  in povprečni dnevni maksimum  $4.5^{\circ}\text{C}$ .<sup>11</sup> Zaradi priprave podatkov smo te temperature razdelili na intervale, kjer se je temperatura spreminjala linearno. Od 04.00 do 08.00 smo privzeli temperaturo dnevnega minimuma, nato temperatura narašča do dnevnega maksimuma, ki nastopi ob 14.00 in traja do 18.00. Potem temperatura pada do 04.00 ure naslednjega dne.



Slika 49: Predpostavljeno dnevno spreminjanje temperature v okolici obravnavanega masivnega betonskega bloka za mesec januar.

Na sliki 50 podajamo poteke zunanjih temperatur za predpostavljeno betoniranje v zimskem času in v poletnem času. Za primerjavo smo na tej sliki prikazali tudi časovno spreminjanje temperatur okoliškega zraka v obdobju 02. - 10.10.2003, ko se je betoniral blok 3a prelivnega polja HE Boštanj. S tem potekom zunanjih temperatur smo v računalni v prejšnjem poglavju.



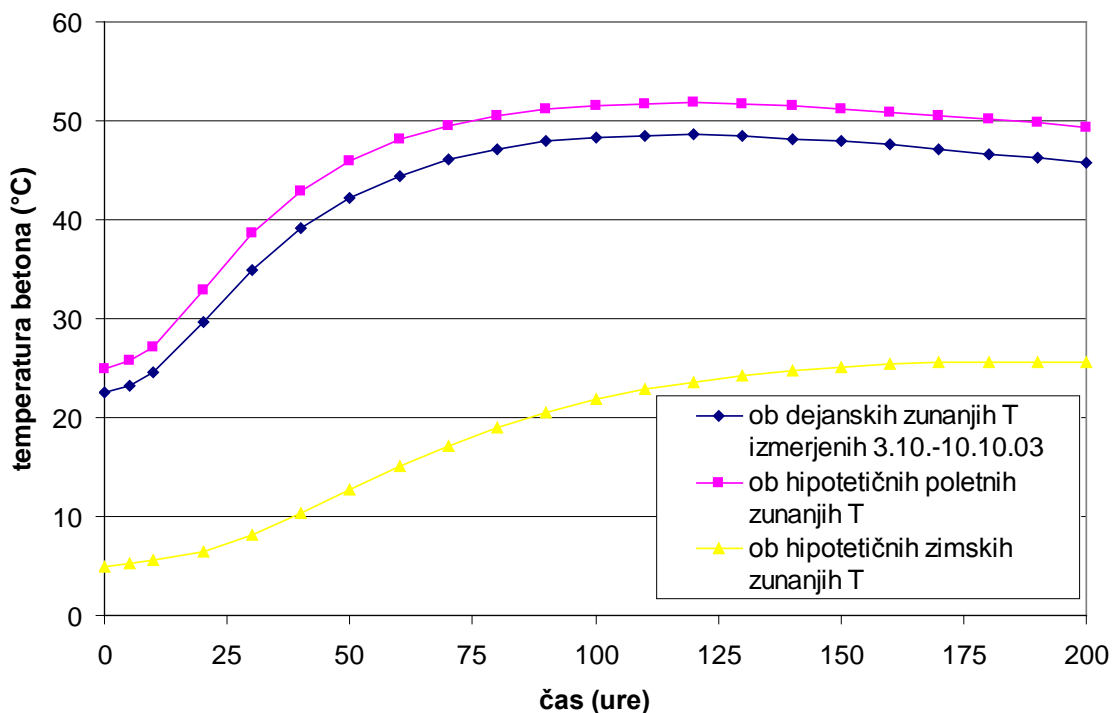
Slika 50: Primerjava poteka temperatur za poletje, zimo in dejanske temperature betoniranja.

V preglednici 12 in na sliki 51 prikazujemo časovno spreminjanje temperature v sredini masivnega betonskega bloka za oba temperaturna režima. Za lažjo orientacijo smo v

preglednici 12 in na sliki 51 prikazali tudi izračunano časovno spreminjanje temperatur v povečanem masivnem betonskem bloku 3a (h=3.0 m) iz prejšnjega poglavja.

*Preglednica 12: Časovno spreminjanje temperatur v masivnem betonskem bloku glede na izbrani temperaturni režim okolice.*

| čas<br>[ure] | temperaturne razmere          |                               |                               |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|              | dejansko                      | poletje                       | zima                          |
|              | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C] | temperatura<br>betona<br>[°C] |
| 0            | 22.5                          | 25.0                          | 5.0                           |
| 5            | 23.2                          | 25.7                          | 5.3                           |
| 10           | 24.5                          | 27.1                          | 5.6                           |
| 20           | 29.7                          | 32.9                          | 6.4                           |
| 30           | 35.0                          | 38.6                          | 8.1                           |
| 40           | 39.1                          | 42.9                          | 10.3                          |
| 50           | 42.2                          | 45.9                          | 12.8                          |
| 60           | 44.5                          | 48.1                          | 15.1                          |
| 70           | 46.1                          | 49.6                          | 17.2                          |
| 80           | 47.2                          | 50.6                          | 19.0                          |
| 90           | 47.9                          | 51.2                          | 20.5                          |
| 100          | 48.4                          | 51.6                          | 21.8                          |
| 110          | 48.6                          | 51.8                          | 22.8                          |
| 120          | 48.6                          | 51.8                          | 23.6                          |
| 130          | 48.5                          | 51.7                          | 24.3                          |
| 140          | 48.2                          | 51.5                          | 24.8                          |
| 150          | 47.9                          | 51.2                          | 25.1                          |
| 160          | 47.6                          | 50.9                          | 25.4                          |
| 170          | 47.1                          | 50.5                          | 25.6                          |
| 180          | 46.7                          | 50.2                          | 25.6                          |
| 190          | 46.2                          | 49.8                          | 25.7                          |
| 200          | 45.8                          | 49.3                          | 25.6                          |

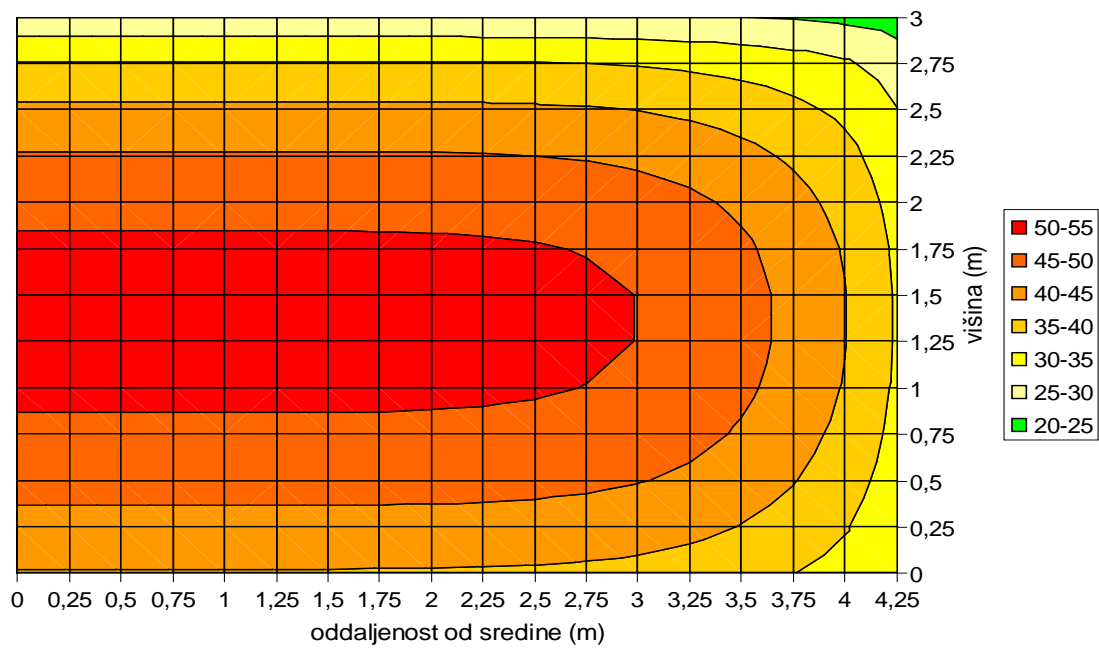


Slika 51: Časovno spreminjanje temperatur v masivnem betonskem bloku glede na izbrani temperaturni režim okolice.

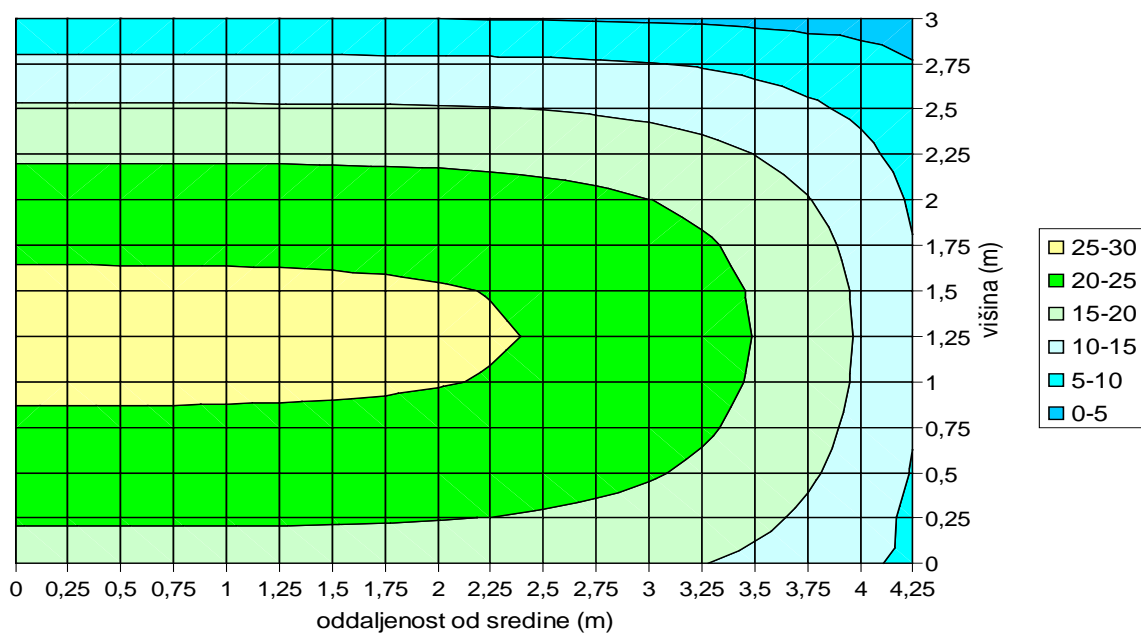
Iz preglednice 12 kot tudi slike 51 je razvidno, da je maksimalna temperatura v betonu pri zunanjih temperaturah, pri katerih je dejansko potekalo betoniranje, dosegla  $48.6^{\circ}\text{C}$  po 120 urah (glej tudi poglavje 4.1). Pri betonu s temperaturo betona pri vgradnji  $25.0^{\circ}\text{C}$  je najvišja dosežena temperatura znašala  $51.8^{\circ}\text{C}$  po 120 urah. Med zimskim betoniranjem s predpostavljeno temperaturo betona pri vgradnji  $5.0^{\circ}\text{C}$ , pa je beton dosegel najvišjo temperaturo  $25.7^{\circ}\text{C}$  in sicer 190 ur po začetku betoniranja. Tudi tu je v vseh primerih najvišja temperatura nižja od priporočene maksimalne absolutne temperature v betonu, ki je  $55^{\circ}\text{C}$ .<sup>16</sup>

V nadaljevanju na slikah 53 in 54 prikazujem še razpored temperatur v masivnem betonskem bloku pri času, ko po računu s programom HEATC temperatura v betonu doseže maksimum. Skladno s preglednico 12 in sliko 51 lahko ugotovimo da je iskani čas pri poletnem betoniranju 120 ur, pri zimskem betoniranju pa 190 ur.





Slika 52: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 120 ur po betoniranju v poletnih razmerah..



Slika 53: Razpored temperatur po prečnem prerezu masivnega betonskega bloka 190 ur po betoniranju v zimskih razmerah.

Temperaturni gradienti so v tem primeru na površini bloka približno  $15^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$  (poleti) in približno  $10^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$  (pozimi). To je veliko manj od priporočenih dovoljenih temperaturnih gradientov, ki so  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup>

Iz zgoraj navedenih dejstev lahko sklepamo, da je gradnja dvakrat večjih masivnih betonskih blokov hidroelektrarn na spodnji Savi izvedljiva v vseh običajnih pogojih zunanje temperature -poleti in pozimi. Temperaturni gradienti in največje absolutne temperature so v obeh skrajnih primerih manjši od dovoljenih. Seveda se ob teh ugotovitvah postavlja še vprašanje nastopa nenadnih ekstremnih vremenskih razmer (vročina, mraz, veter). Te lahko povzročijo višje temperaturne gradiente, kot so bili izračunani v posameznih primerih. Vendar pa ne verjamemo, da bi le-ti lahko dosegli mejne oziroma predpisane vrednosti.

## 5 ZAKLJUČKI

V diplomski nalogi smo analizirali ustreznost računalniškega programa HEATC za določitev časovnega spreminjanja temperaturnega polja strjujočih se masivnih betonov. Ustreznost smo analizirali s primerjavo med eksperimentalnimi rezultati, ki so bili pridobljeni med gradnjo hidroelektrarne Boštanj, in računskimi rezultati, ki smo jih izračunali s programom HEATC. V nadaljevanju smo s parametrično študijo ugotovili kako velikost masivnih betonskih blokov in spreminjanje temperature okolice vplivata na velikost temperaturnih gradientov in absolutne vrednosti temperatur v masivnem betonskem bloku.

Ugotovili smo da lahko z računalniškim programom HEATC relativno dobro modeliramo časovno spreminjanje temperatur v masivnih betonskih blokih. Z visoko stopnjo zanesljivosti ga je mogoče uporabiti za napovedovanje naraščanja temperatur v masivnih betonskih blokih med hidratacijo cementa in tudi vseh vrst zunanjih vplivov.

V nadaljevanju smo s pomočjo parametrične študije ugotovili, da je možno vgrajevati beton v veliko večjih betonskih blokih, kot so jih vgrajevali pri gradnji hidroelektrarne Boštanj. Bloki z dvakrat večjo višino (in hkrati prostornino), kot se gradijo pri HE Boštanj, še vedno ustrezajo zahtevi, da je maksimalna temperatura v masivnem betonskem bloku manjša od  $55^{\circ}\text{C}$ .<sup>16</sup>

Pri opazovanju temperaturnih gradientov smo ugotovili, da se večajo z velikostjo masivnih betonskih blokov. Največji so pri masivnem betonskem bloku z višino 3.0 m. Večji temperaturni gradienti, približno  $15^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$  na površini bloka, se pojavijo pri betonu z višjo začetno temperaturo, saj tu hidratacija poteka hitreje, toplota pa se v betonu odvaja počasi. Pri betonu z nizko začetno temperaturo so temperaturni gradienti približno  $10^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$  na površini bloka. To je veliko manj od priporočene mejne vrednosti  $25^{\circ}\text{C}/50\text{ cm}$ .<sup>16</sup>

V nadaljevanju bi lahko parametrično analizo razširili z upoštevanjem dodatnih parametrov kot so: vpliv osončenja na velikosti temperaturnih gradientov, vpliva tempa gradnje sosednjih betonskih blokov na velikosti temperatur v notranjosti betonskih blokov in vpliva uporabe

različnih agregatov na prevajanje toplote v betonu. Tako bi dobili bolj celovit pogled na problem akumuliranja toplote v mladem betonu.

Izračunane temperature in temperaturni gradienti pa so hkrati tudi podlaga za račun napetostnega in deformacijskega stanja v masivnem betonskem bloku, ki kot vemo, v največji meri določa pojav poškodb pri masivnih betonih.

## VIRI

1. Turk G., 1987, Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa, diplomska naloga, FGG, Ljubljana, 95 str.
2. Zajc A., Šušteršič J., Ercegovič R., Petrič B., 2005, Preprečevanje nastanka razpok v strjujočem masivnem betonu, referat, ZBS Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah, Lipica, 10. - 11.marec 2005, 14 str.
3. ACI Committee 207: Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures, Manual of American Concrete Institute, ACI 207.1R-96 in ACI 207.2R-95, 2005, Farmington Hills, MI, USA, American Concrete Institute, 38 in 26 str.
4. Saje M., Turk G., 1987, Račun temperatur v strjujočem se betonu, članek, Gradbeni vestnik, Leto XXXVI, št. 7-8, str. 177-182
5. Reščič L., Pešič T., 1999, Cementi za masivne betone z nizko toploto hidratacije, referat, Zbornik 6. slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, IRMA, Ljubljana, 27.05.1999, str. 23-31
6. Trtnik G., 2005, Tehnologija betona, seminarska naloga, FGG, Ljubljana, str. 6-7
7. <http://www.hse.si> (25.04.2006)
8. <http://www.salonit.si/predstavitev/shema/> (25.04.2006)
9. <http://www.lafarge.si> (25.04.2006)
10. Mesečni bilten, 2005, Ljubljana, Agencija RS za okolje, št. 7, letnik XII, str. 12
11. Mesečni bilten, 2005, Ljubljana, Agencija RS za okolje, št. 1, letnik XII, str. 12
12. Ukrainczyk V., 1999, Tehnologija masivnih betonov, referat, Zbornik 6. slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, IRMA, Ljubljana, 27.05.1999, str. 1-9
13. Kryžanowski A., 1999, Predstavitev gradnje hidroelektrarn na Savi, referat, Zbornik 6. slovenski kolokvij o betonih – Hidrotehnični betoni, IRMA, Ljubljana, 27.05.1999, str. 77-82
14. Garbozi EJ, Bentz DP, 1992, Computer-based models of the micro-structure and properties of cement-based materials. V: Proceedings of ninth International Conference on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. VI, 1992, p. 3-15.
15. Standard ASTM C-150
16. Šušteršič J., Planinc I., Turk G., Vukadin V., Zajc A., Dobnikar V., Leskovar I., Ercegovič R., 2006, Predhodne raziskave in optimiranje tehnološko-tehničnih rešitev izvajanja

betonarskih del pri izgradnji HE Blanca. Priloga 64: Tehnični pogoji za betonarska dela na  
HE Blanca. IRMA, Ljubljana, 2006, 424 str.

---