

Nina Humar, univ. dipl. inž. grad.
humar.nina@gmail.com



prof. dr. Dejan Zupan, univ. dipl. inž. mat.
dejan.zupan@fgg.uni-lj.si



dr. Andrej Vidmar, univ. dipl. inž. grad.
andrej.vidmar@fgg.uni-lj.si



doc. dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.
gregor.trtnik@fgg.uni-lj.si



izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, univ. dipl. inž. grad.
andrej.kryzanowski@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 539.3/4:627.82

MERITVE TEMPERATURNEGA POLJA V MASIVNEM BETONU Z OPTIČNIMI KABLI

TEMPERATURE FIELD MEASUREMENTS IN MASSIVE CONCRETE WITH FIBER OPTIC CABLES

Povzetek

Velike betonske pregrade sodijo med najpogostejše nadzorovane konstrukcije, kar je razumljivo, če pomislimo na posledice njihove porušitve ali okvare opreme. V zadnjih desetletjih smo zaradi hitrega razvoja materialov in opreme pričali velikemu napredku merilnih tehnik in metod za spremljanje stanja pregrad. V naši raziskavi smo se osredotočili na spremljanje temperaturnega polja v zgodnjih fazah strjevanja betona pri masivnih konstrukcijah, ki je dober pokazatelj napovedi materialnih lastnosti strjenega betona. Klasični pristop spremljanja temperaturnega polja temelji na uporabi temperaturnih senzorjev s točkovnim zajemom podatkov. Zaradi omejenih možnosti uporabe točkovnih senzorjev v velikih konstrukcijskih blokih, s katerimi se srečujemo pri gradnji pregrad, je otežena izdelava kompleksnejše slike temperaturnega polja. V ta namen se je izkazala kot zelo učinkovita metoda uporaba optičnih merilnih kablov, ki omogočajo linijski zajem meritev temperature. V prispevku so predstavljene osnove uporabe optičnih kablov za spremljanje temperature v masivnih betonskih konstrukcijah in prikaz njihove praktične uporabe za spremljanje temperature med procesom hidratacije pri gradnji konstrukcijskega bloka na prelivnem polju pregrade Brežice.

Ključne besede: optična vlakna, masivni beton, hidratacija, temperatura, pregrade

Summary

Large concrete dams are among the most frequently monitored structures, which is understandable when considering the consequences of dam or equipment failure. In recent decades, due to the rapid development of materials and equipment, we have witnessed great progress in measuring techniques and methods for monitoring dam conditions. Our research focused on monitoring the temperature field in the early stages of concrete hardening in massive structures, which is a good indicator for the predicting the material properties of hardened concrete. The classical approach to temperature field monitoring is based on the use of temperature sensors with point data capture. Due to the limitations of using such sensors in large structural blocks, which we encounter in dam construction, it is difficult to create a more complex picture of the temperature field. For this purpose, the use of fiber optic cables, which allow linear capture of temperature measurements, has proven to be a very effective method. The article presents the basics of using fiber optic cables for temperature monitoring in massive concrete structures and shows their practical applicability for temperature monitoring during the hydration process in the construction of a structural block on the spillway section of the Brežice dam.

Key words: fiber optic, mass concrete, hydration, temperature, dams

1 UVOD

Spreminjanje temperature betona je eden pomembnejših kazalcev naraščanja trdnosti betona v zgodnih fazah strjevanja betona. S stalnim spremljanjem temperaturnega polja pri betoniranju velikih konstrukcijskih blokov lahko z dokaj veliko zanesljivostjo napovemo nekatere materialne lastnosti tako v fazi strjevanja kot v poznejših fazah, ko je beton že dosegel ustrezne materialne lastnosti. Zaradi običajnega načina postopne gradnje masivnih konstrukcij se pojavljajo tudi inducirani vplivi kot posledica vgrajevanja sosednjih blokov, kar vpliva na temperaturno polje v predhodno vgrajenih betonskih blokih. S tem se pomembno spreminja napetostno stanje v konstrukcijskih blokih, kar lahko v skrajnem primeru privede do nezaželenih procesov, na primer nastanka razpok in drugih anomalij ([Glišić, 2000], [Glišić, 2006], [Inaudi, 2005]).

Da bi se v čim večji meri izognili omenjenemu pojavu neugodnih napetostnih stanj, je potrebna prilagoditev tehnologije in dinamike gradnje masivnih betonskih konstrukcij. V dosednji inženirski praksi se je kot primerna metoda spremljanja neugodnih napetostnih stanj pokazala metoda merjenja temperaturnih sprememb znotraj in na površini konstrukcijskega bloka med procesom vezanja cementa oziroma strjevanja betona. Na ta način lahko pravočasno prepoznamo neugodna temperaturna stanja, izvedemo morebitne potrebne intervencije ter načrtujemo izboljšane tehnološke postopke.

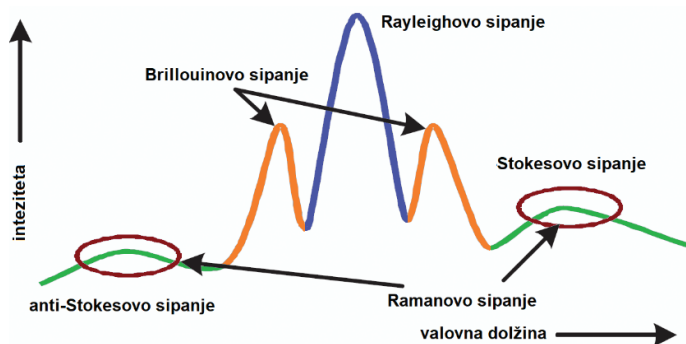
Klasični pristop pri spremljanju temperaturnega polja temelji na uporabi temperaturnih senzorjev s točkovnim zajemom podatkov. Na ta način dobimo zgolj omejeno količino podatkov v točno določenih točkah, saj je uporaba večje količine točkovnih senzorjev nepraktična, draga, predvsem pa izvedbeno težavna. V izogib omenjenim pomanjkljivostim se kot zanimiva alternativa ponuja uporaba optičnih merilnih kablov, ki omogočajo linijski zajem meritev [Humar, 2016].

V prispevku povzamemo teoretično ozadje uporabe optičnih merilnih kablov za spremljanje razvoja temperaturnega polja v (masivnih) betonskih konstrukcijah, opišemo uporabljeno merilno opremo, poudarimo nekatere prednosti tovrstnega inovativnega pristopa pri zasledovanju hidratacijskega procesa v masivnih betonskih konstrukcijah ter prikažemo praktični primer uporabe tehnologije optičnih kablov za spremljanje temperature med procesom hidratacije na gradnji dejanske masivne konstrukcije.

2 TEORETIČNE OSNOVE MERJENJA TEMPERATURE V MASIVIH BETONSKIH KONSTRUKCIJAH Z UPORABO OPTIČNIH VLAKEN

Z emitiranjem svetlobnega signala v optičnem vlaknu se svetloba razprši zaradi različnih dejavnikov. Razlikujemo linearno (elastično) sipanje, pri katerem so trki fotonov s snovjo elastični in fotoni ohranjajo energijo, pri čemer se frekvenca razpršene svetlobe ne spreminja (Rayleighovo sipanje), ter nelinearno (neelastično) sipanje, pri katerem se del vhodne svetlobe absorbira v optičnem vlaknu in se frekvenca razpršene svetlobe spremeni (Ramanovo in Brillouinovo sipanje) – slika 1. Pri neelastičnem sipanju se vhodni foton pretvori v

foton z nižjo energijo, hkrati pa poteka absorpcija v snov optičnega vlakna, pri kateri sodelujejo fononi, ki opisujejo oscilatorno vzbujanje kristalne mreže – pri Ramanovem sipanju visokoenergijski optični foton, pri Brillouinovem sipanju pa nizkoenergijski akustični foton. Slednje vpliva na frekvenčno razliko med vstopnim in izstopnim valom, ki je pri Ramanovem sipanju bistveno večja kot pri Brillouinovem. Pomembna razlika je tudi v tem, da pri Brillouinovem sipanju nastali val potuje zgolj nazaj, pri Ramanovem pa v obe smeri. Za merjenje temperatur z optičnimi vlakni je uporabno Ramanovo sipanje, Brillouinovo sipanje pa običajno uporabljamo za merjenje lastnosti elastičnega obnašanja materiala. Pri Ramanovem sipanju imamo, glede na vzbujanje kristalne mreže, opravo z zadosti velikim frekvenčnim zamikom. Val, ki je nastal s sipanjem in ga imenujemo Stokesov val, ima nižjo frekvenco in večjo valovno dolžino kot vhodni val. V primerih, ko gre za sipanje v materialu, kjer so molekule v vzbujenem stanju (na primer segrevanje optičnega vlakna), se pojavi Anti-Stokesov val, ki ima višjo frekvenco in nižjo valovno dolžino kot vhodni val [Hoffmann, 2007].



Slika 1. Spekter razpršene svetlobe pri osvetlitvi z laserskim svetlobnim virom (povzeto po [Hoffmann, 2007]).

Porazdeljeno zaznavanje temperature (Distributed temperature sensing – DTS) z optičnimi vlakni omogoča kontinuirno spremljanje temperaturnega polja vzdolž optičnega kabla. Pri temu načinu emitiramo kratek svetlobni impulz in z visoko časovno resolucijo merimo odboj razpršene Ramanove svetlobe. Intenzivnost odboja Ramanovega sipanja je odvisna od izgub in temperature vzdolž optičnega vlakna, čas med emitiranjem in odbitim signalom pa določa razdaljo vzdolž optičnega vlakna. Meritve z optičnimi vlakni ne zajemajo temperaturne spremembe točkovno, temveč podajo velikost najverjetnejše vrednosti pri temperaturni spremembi na določenem območju. Pri določitvi lokalnih temperaturnih sprememb je pomemben parameter prostorska ločljivost sistema DTS, ki je definirana s širino območja med izmerjenim 10-% in 90-% nivojem lokalne temperaturne spremembe, pri čemer 0 % in 100 % predstavljata stacionarni nivo pred in po lokalni temperaturni spremembi. Na območju temperaturne spremembe sistem DTS zazna spremembo temperature kot zvezno porazdeljeno krivuljo s krajnima vrednostma temperature na izhodiščnem nivoju, pred in po lokalni temperaturni spremembi. Če lokalna temperaturna sprememba obsega območje, ki je manjše od prostorske ločljivosti sistema DTS, je podana lokalna temperatura nižja glede na razmerje širine območja lokalne temperaturne spremembe l_s in prostorske ločljivosti

DTS [Hoffmann, 2007]. Za natančnost meritev temperaturnih sprememb je zato pomembno, da je širina območja lokalne temperaturne spremembe večja ali enaka prostorski ločljivosti sistema DTS (slika 2).

Poznana sta dva načina zaznavanja temperature s sistemom DTS: pasivni način, pri katerem merimo lokalne spremembe temperature zaradi zunanjih vplivov (hidracija cementa, nenadne spremembe temperature v okolici ipd.), in aktivni način, pri katerem segrevamo optična vlakna in merimo lokalne spremembe temperature pri ohlajanju optičnega vlakna (postopne spremembe temperature v okolici).



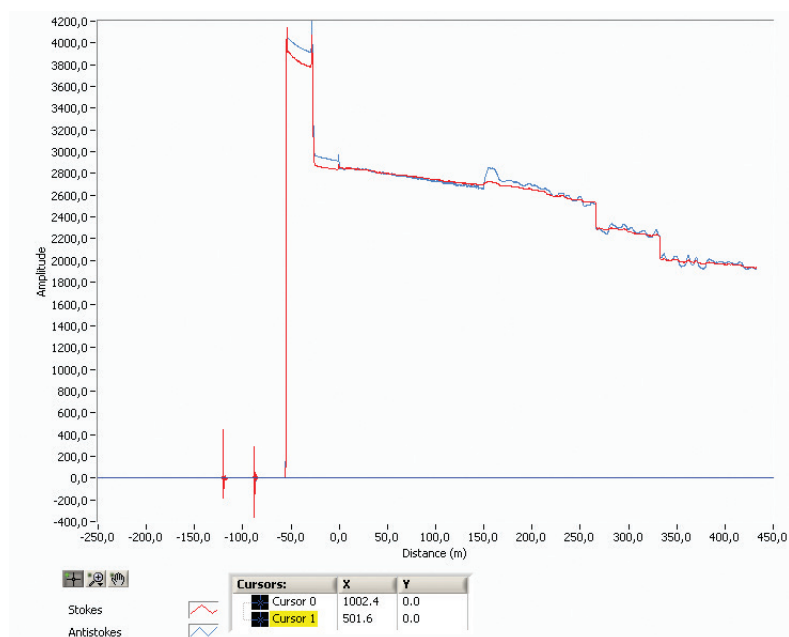
Slika 2. Razmerje med širino območja lokalne temperaturne spremembe in prostorske ločljivosti DTS [Hoffmann, 2007].

Spremljanje temperatur pri gradnji in opazovanju pregrad je eden od ključnih pokazateljev pri nadzoru pojava razpok v konstrukciji in stabilnosti pregrad. Običajna metoda, s katero določimo temperaturno polje v pregradni konstrukciji, temelji na vgrajenih točkovnih temperaturnih senzorjih in izdelavi numeričnih analiz temperaturnega polja v pregradi. Običajni računski modeli upoštevajo konstrukcijski beton

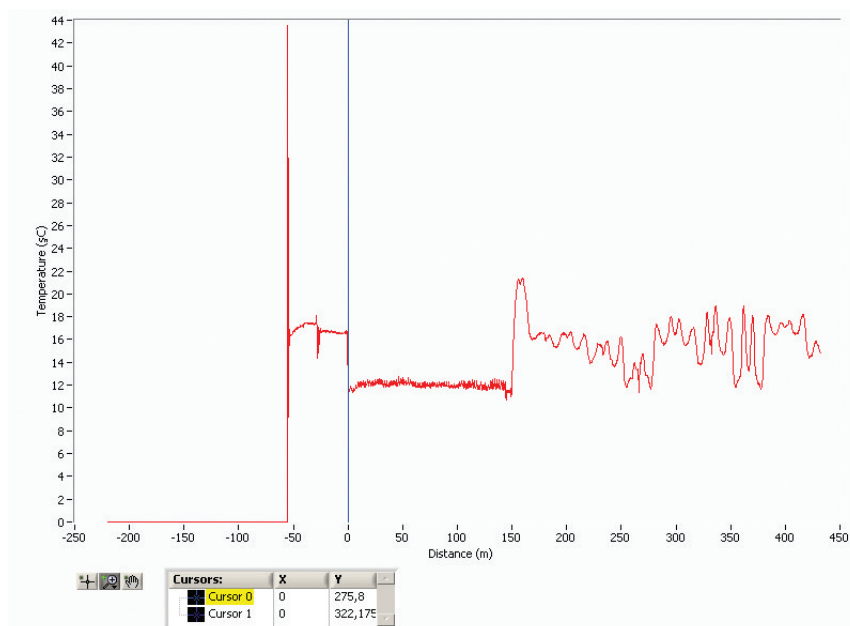
kot toplotno izotropen material, pri čemer pa praviloma ne upoštevajo faze strjevanja betona in hidracijskih temperatur. Zaradi tega obstajajo razlike med simuliranim temperaturnim poljem in realnim stanjem. Uvedba sistema DTS za spremljanje temperaturnega polja v primerjavi s točkovnim zajemom omogoča učinkovitejše spremljanje temperaturnih stanj znotraj pregrad ter možnost natančnejših in učinkovitejših ocen temperaturnega polja za potrebe različnih analiz pregrad [Peng, 2019].

3 OPIS UPORABLJENE MERILNE OPREME

Za izvedbe meritev smo uporabili opremo proizvajalca Silixa, ki omogoča pasivne meritve temperatur v temperaturnem razponu od -40°C do $+65^{\circ}\text{C}$. Naprava deluje po principu emitiranja svetlobnega impulza po optičnem vlaknu in meritve odboja svetlobnega impulza (Ramanovo sipanje) vzdolž optičnega vlakna. Mesto točke odboja je določeno glede na poznane hitrosti širjenja svetlobe v optičnem vlaknu. Temperaturno polje vzdolž optičnega vlakna določimo glede na velikost razmerja med amplitudama valovanja Stokesovega in Anti-Stokesovega sipanja (slika 3). Naprava omogoča poljubno pogostost meritev v intervalu od 5 s do 24 h, odvisno od namena izvedbe meritev. Natančnost meritev znaša $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ pri razmiku merskih točk od 25 cm do 2 m in prostorski ločljivosti okoli 0,6 m [Silixa, 2014]. Izhodni podatek meritve predstavlja zapis porazdelitve temperatur vzdolž merskega optičnega kabla (slika 4). Z večjim razmikom med merskimi točkami se sicer izboljša natančnost izmere, zmanjša pa se gostota merskih točk. V primeru gostejše porazdelitve merskih točk lahko natančnost meritev izboljšamo s podaljšanjem časovnega intervala zajema meritev. V našem primeru smo izbrali gostejšo porazdelitev merskih točk (minimalni razmik 25 cm) in izboljšali natančnost meritev z



Slika 3. Zapis amplitude valovanja Stokesovega in Anti-Stokesovega sipanja [Kryžanowski, 2015].



Slika 4. Zapis porazdelitve temperatur vzdolž merskega kabla [Kryžanowski, 2015].

daljšim časovnim intervalom zajema meritev (15 minut). Pri zasnovi meritev je bila namreč pomembnejša natančna določitev temperaturnega polja v celotnem konstrukcijskem bloku in manj sama natančnost izmere v merskih točkah, kar smo z izbrano zasnovo ustrezno dosegli.

Na napravo je mogoče hkrati priključiti do 4 merske kable, odvisno od načina priključitve optičnih kablov. Prva možnost je izvedba meritev s prostimi konci optičnih kablov, kar omogoča uporabo vseh štirih izhodov in največji doseg meritev 10.000 m. Slabost tega načina je večji šum zaradi dolžine optičnega kabla in nezmožnost ocene izgub sipane svetlobe vzdolž optičnega kabla, kar posledično zmanjša natančnost meritev. Druga možnost je izvedba meritev z zaprto zanko, pri kateri konec optičnega kabla priključimo nazaj na napravo. Pri temu načinu se doseg meritev in število merskih mest sicer razpolovi, se pa meritev temperature za vsako mersko točko izvede dvakrat. Rezultat meritev je simetrična slika porazdelitev temperatur vzdolž optičnega kabla, ki zajema tudi interno umerjanje meritev temperature z zanko optičnega vlakna v dolžini 55 m, ki je nameščena v sami napravi in meri referenčno temperaturo na lokaciji naprave. Za zunanje umerjanje meritev temperature sta, kot standardni del naprave, predvidena dva točkovna temperaturna senzorja, namenjena meritvam referenčnih temperatur na lokaciji naprave. V primeru uporabe optičnih kablov z izolacijo se temperaturno umerjanje izvede s točkovnim temperaturnim senzorjem in referenčno dolžino kabla (15 m), ki sta nameščena v izoliranem okolju s konstantnimi temperaturnimi razmerami (izolirana posoda z vodo z vzdrževanjem konstantne temperature) (slika 5).

Posebno pozornost pri načrtovanju meritev z optičnimi kablji je treba posvetiti izbiri ustreznega tipa optičnega kabla. Običajni telekomunikacijski optični kabel lahko uporabimo zgolj v laboratorijskih razmerah, v katerih vgrajujemo omejene količi-

ne svežega betona in lahko pri vgradnji in zgoščevanju posvetimo več pozornosti zaščiti optičnega kabla pred poškodbami. Pri izbiri tipa optičnega kabla za izvedbo terenskih meritev je treba upoštevati, da je kabel izpostavljen ekstremnim razmeram pri vgrajevanju in zgoščevanju betona, zato ga je treba ustrezno zaščititi.

Prinaširaziskavismo uporabili štiri različni optični kabel, ki ga sestavljata dve večrodovni (multi mode) optični vlakni z debelino stržena 50 μm in dve enorodovni (single mode) optični vlakni. Za meritve DTS se običajno uporabljajo večrodovna optična vlakna, ki so tudi priporočena za našo mersko opremo, enorodovna optična vlakna pa se praviloma uporabljajo na področju telekomunikacij. Zaščita optičnih vlaken je enaka kot pri običajnih telekomunikacijskih optičnih kablji: z dvojnim oplaščenjem vlakna in vmesnim slojem iz aramidnih vlaken



Slika 5. Zunanja kalibracija merilne opreme DTS (povzeto po [Silixa, 2014]).

za zagotovitev mehanske odpornosti kabla. Za doseg ustrežne odpornosti pri vgradnji betona so optična vlakna povezana v snop in oplaščena z jekleno oblogo debeline 0,2 mm, medprostor med optičnimi vlakni in jekleno oblogo pa je zapolnjen z gelom. Za zadostitev odpornosti proti kemični agresiji je izvedena še zunanja zaščita HDPE v debelini 0,4 mm – končna debelina celotnega kabla znaša 3,2 mm. Optični kabel omogoča razpon meritev med -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$, kar ustreza tehničnim lastnostim merske naprave. Dobavljena količina optičnega kabla v dolžini 1000 m je zadoščala glede na velikost konstrukcijskega bloka, potrebn po dodatnih prostih dolžinah za kalibracijo merske naprave, hkrati pa je omogočila možnost izvajanja kontrolnih meritev v sklopu rednega monitoringa.

4 PRIPRAVA TESTNEGA POLJA

4.1 Kratek opis HE Brežice in talne plošče podslapja

Praktični preizkus učinkovitosti uporabe optičnih kablov za spremljanje razvoja temperaturnega polja v masivnih betonskih konstrukcijah smo izvedli na posameznih betonskih elementih hidroelektrarne Brežice, ki predstavlja peto energetsko stopnjo v nizu hidroelektrarn na spodnji Savi (slika 6). Jezovno zgradbo iz masivnega betona sestavljajo pogonski objekt in pet prelivnih polj v skupni dolžini 160 m, ki s priključnimi zemeljskimi nasipi v skupni dolžini okoli 14 km ustvarjajo zadrževalnik pretočne akumulacije s prostornino več kot 19 milijonov m^3 . V strojnici so nameščene tri vertikalne, dvojno regulacijske Kaplanove turbine s skupno instalirano močjo 45,6 MW in načrtovano srednjo letno proizvodnjo 161 GWh.

Eden izmed elementov HE Brežice je tudi talna plošča podslapja na prvem prelivnem polju, ki se nahaja neposredno ob strojnici. Z namenom obvladovanja temperatur v masivnem betonu je bila talna plošča podslapja izvedena v dveh slojih debeline 1,5 m, in sicer v širini celotnega prelivnega polja. V vzdolžni smeri je zaradi izvedbenih razlogov izvedena prekinitev (dilatacija), ki deli posamezni sloj na dva izvedbeno ločena konstrukcijska bloka. Talno ploščo podslapja sestavljajo štirje izvedbeno samostojni konstrukcijski bloki z velikostjo

okoli 450 m^3 (slika 7). Velikost konstrukcijskega bloka je bila določena na osnovi izkušenj pri gradnji predhodnih pregrad na Savi in gradbiščnih proizvodnih kapacitet.

4.2 Lastnosti uporabljenega betona

Pri gradnji talne plošče podslapja je bil uporabljen poseben hidrotehnični beton z žilindrinim cementom tipa CEM III/B 32,5N-LH po standardu SIST EN 197-1 z nizko toploto hidratacije (LH). Agregat frakcij 0–45 mm je bil pridobljen s separacijo naravnega in drobljenega gramozja iz bližnjih kvartarnih nanosov reke Save. Beton je bil pripravljen na gradbiščni betonarni in vgrajen s črpanjem. Za zagotovitev primerne vgradljivosti svežega betona je bil dodan hiperplastifikator, za povečanje zmrzlinke obstojnosti pa aerant, ki hkrati tudi ugodno učinkuje na vgradljivost betona. Povprečna tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni je znašala 34,6 MPa.

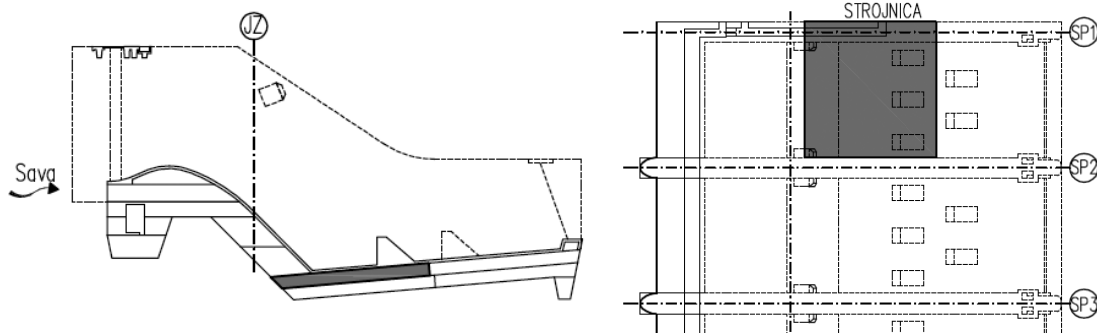
4.3 Opis testnega polja

Testno polje za meritve temperatur z optičnimi vlakni smo pripravili na območju talne plošče podslapja v konstrukcijskem bloku neposredno pod prelivno drčo. Ta lokacija je bila izbrana zaradi lažje montaže optičnih kablov in povezave v bližnjo kontrolno galerijo. Tako je omogočena uporabnost merske opreme tudi po končani gradnji v sklopu obratovalnega monitoringa pregrade.

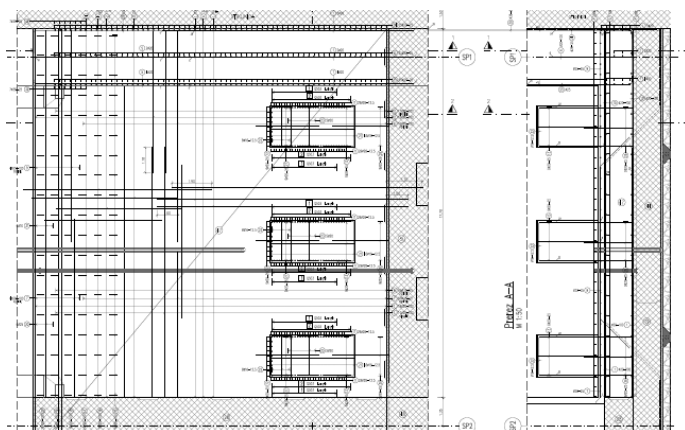
Konstrukcijski blok dimenzij $17,7 \times 17 \times 1,5 \text{ m}$ je armiranobetonska konstrukcija z glavno armaturo na vrhu in konstrukcijsko armaturo na dnu bloka. Glavna vzdolžna armatura poteka vzdolž osi pregrade in je položena na razdelilno armaturo, ki poteka v prečni smeri, tj. prečno na os pregrade. Distančne palice, položene na medsebojnem razmiku 0,5 m, povezujejo glavno armaturo spodnjega bloka in tvorijo v prečni smeri na os pregrade koridor (slika 8). Montaža merskega optičnega kabla je potekala v koridorjih, ki so prehodni po celotni dolžini. Pri tem smo se morali izogniti koridorjem, pri katerih je bila prehodnost omejena z armaturo razbijačev. Glede na prehodnost koridorjev je bilo mogoče v konstrukcijskem bloku vzpostaviti testno polje s sedmimi zankami, s katerimi smo v celoti pokrili prostornino konstrukcijskega bloka.



Slika 6. Pregrade na spodnji Savi in lokacija pregrade HE Brežice [HESS, 2022].



Slika 7. Lokacija testnega polja na prelivnem polju pregrade Brežice (povzeto po [IBE, 2014]).



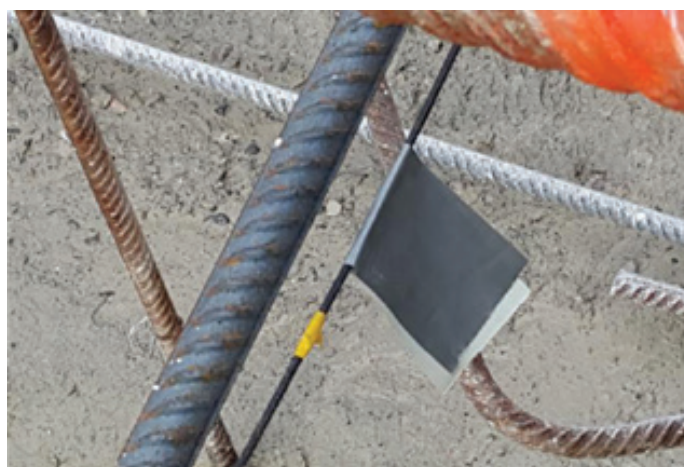
Slika 8. Armaturni načrt konstrukcijskega bloka (povzeto po [IBE, 2014]).



Slika 9. Nameščanje optičnega kabla.

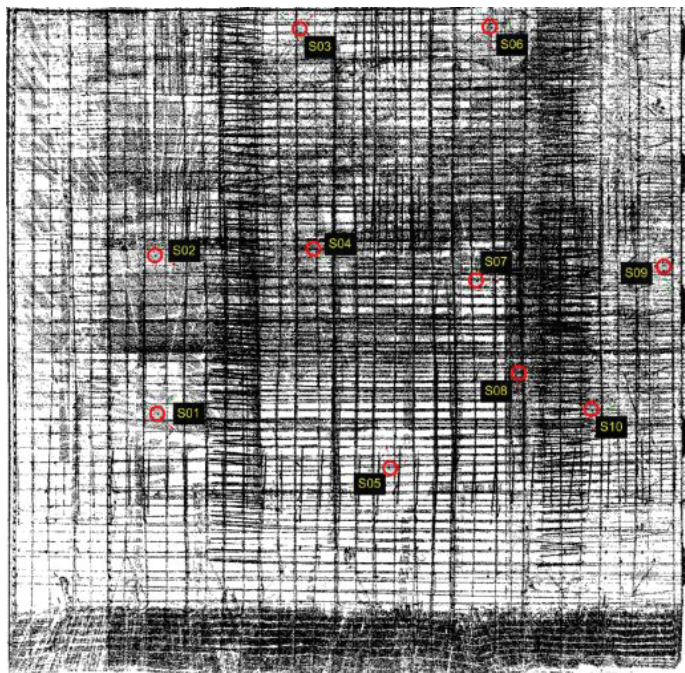
4.4 Namestitev optičnega kabla in definicija merilnih točk

Pri namestitvi optičnega kabla v konstrukcijskem bloku je bilo treba upoštevati vrsto dejavnikov, ki so vplivali na način in potek izvedbe. Nameščanje optičnega kabla je bilo mogoče izvesti šele po dokončni položitvi armature betonskega bloka neposredno pred glavno betonažo. Ker so se dela izvajala v poletnem času z nočnimi betonažami, smo imeli na voljo dovolj časa za namestitev kablov in izvedbo vseh predhodnih meritev. Optični kabel je bil na gradbišče dobavljen na kolutu v skupni dolžini 1.000 m. Pri nameščanju kabla je bilo treba nujno zagotoviti kontinuiranost zanke (slika 9). Posamezna zanka je bila sestavljena iz treh vej: i) na nivoju konstrukcijske armature, ii) na sredini konstrukcijskega bloka in iii) na nivoju glavne armature. Za zagotavljanje kontinuirnosti smo začeli z nameščanjem optičnega kabla v koridorju neposredno ob levem robu konstrukcijskega bloka in postopoma nadaljevali proti desnemu robu polja. Optični kabel smo na armaturene palice pričvrstili z vezicami in izvedli izmero v karakterističnih točkah z namenom grobega pozicioniranja optičnega kabla v konstrukcijskem bloku. Optični kabel ima na ovoju označeno metražo, ki smo jo v dolžinskih metrih še posebej označili z markirnimi trakovi in dodatno še stacionaže merskih točk s korakom 0,25 m (razmik merskih točk) za potrebe naknadne geodetske izmere (slika 10).



Slika 10. Označevanje stacionaže optičnega kabla in merskih točk.

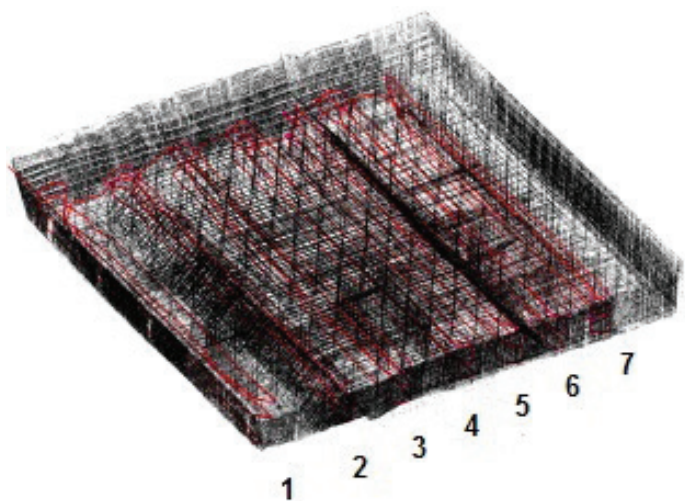
Z geodetsko izmero smo določili končni položaj optičnega kabla v konstrukcijskem bloku, saj smo povezali prostorske koordinate vsake merske točke z označeno mrežo (metražo) na optičnem kablju. Zaradi majhne debeline optičnega kabla v primerjavi z armaturnimi palicami nismo mogli uporabiti konvencionalnih geodetskih meritev. Terenska izmera je bila izvedena neposredno po položitvi optičnega kabla v konstrukcijskem bloku z metodo terestričnega laserskega skeniranja.



Slika 11. Prikaz stojišč skenerja v konstrukcijskem bloku [Vezočnik, 2015].

Celotno območje testnega polja smo zajeli s skeniranjem konstrukcijskega bloka iz desetih stojišč z zajemom okolice z ločljivostjo 3 x 3 mm na dolžini 5 m, kar znaša v celotnem vidnem območju instrumenta (100° v vertikalni in 360° v horizontalni smeri) okoli 30 milijonov točk na stojišče (slika 11).

Lego optičnega kabla smo določili v lokalnem koordinatnem sistemu z izhodiščem v levem gorvodnem delu konstrukcijskega bloka. Koordinatna os x je potekala v osi pregrade, os y v vzdolžni smeri z vodotokom oziroma v prečni smeri na os pregrade, os z pa v navpični smeri (slika 12). Lego optičnega kabla smo določili s programsko opremo proizvajalca skenerja (slika 13). Upoštevali smo oznake na optičnem kablju in določili



Slika 13. Določitev položaja optičnega kabla na območju konstrukcijskega bloka [Vezočnik, 2015].

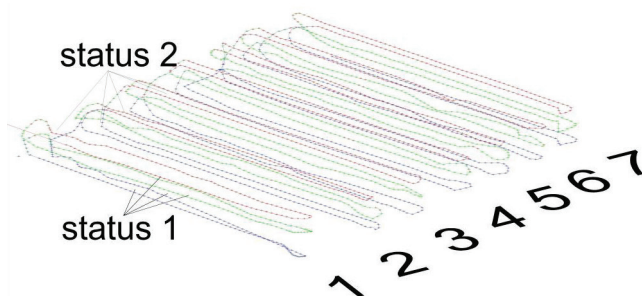


Slika 12. Postavitev koordinatnega sistema [Vezočnik, 2015].

merske točke na medsebojni razdalji 0,25 m z natančnostjo ± 1 cm, ki predstavljajo točke odčitka temperature. V sklopu geodetskih obdelav je bil vsaki merski točki dodan še poseben atribut – ali se točka nahaja na ravninskem delu (v polju – status 1) ali na neravnem delu (na robu polja – status 2), slika 14.

Na podlagi geodetskih izmer smo postavili izhodiščno točko na stacionaži +182 m optičnega kabla, ki predstavlja začetno mersko točko zanke 7 in leži na gorvodni strani na skrajnem levem robu konstrukcijskega bloka. Končna točka je na stacionaži +880 m, ki predstavlja končno mersko točko zanke in leži na gorvodni strani, na skrajnem desnem robu konstrukcijskega bloka. Efektivna dolžina aktivnega dela optičnega kabla v konstrukcijskem bloku je znašala 798 m, v obsegu skupno 2793 merskih točk. Vsaka merska točka je bila geopozicionirana glede na lokalni koordinatni sistem z izhodiščem v levem gorvodnem kotu prelivnega polja s pripadajočimi atributnimi podatki lokacije: glavna zanka, višinski položaj in lokacija posamezne zanke ter status lokacije. S temi podatki je bila vsaka posamezna merska točka natančno in enolično prostorsko določena (slika 14).

Opisana postavitev merskih zank je omogočila natančno interpretacijo zajetih podatkov. Vsaka zanka je sestavljena iz treh vej na različnih višinskih nivojih, ki so prilagojeni glede na položaj glavne armature v konstrukcijskem bloku. Postavitev



Slika 14. Pozicioniranje merskih točk vzdolž optičnega kabla.

optičnega kabla in veliko število merskih točk sta omogočala prikaz temperaturnega stanja vzdolž celotnega konstrukcijskega bloka. Kabel smo napeljali tudi vzdolž mejnih ploskev konstrukcijskega bloka, kar je omogočalo spremljanje temperaturnega stanja na robovih. Zajem podatkov bi lahko izvajali tudi z veliko večjo resolucijo z zgostitvijo merskih točk, kar pa bi bilo s tehničnega vidika težje izvedljivo. Kot smo potrdili z analizo meritev, je privzeta gostota merskih točk popolnoma ustrezala namenu preiskave.

4.5 Izvedba meritev

Z meritvami smo začeli hkrati z začetkom betoniranja. Temperature smo merili neprekinjeno še 21 dni, potem pa smo merilno mesto sprostili zaradi napredovanja gradbenih del. Merilno mesto smo postavili ob desnem stebru tik ob kontrolnem hodniku, kjer smo postavili mersko napravo, prost optični kabel dolžine 50 m za meritev okoliške temperature in posodo za umerjanje s prostim optičnim kablom dolžine 15 m za meritev referenčne temperature za umerjanje merske naprave. Meritve smo iz operativnih razlogov izvajali kot enosmerne s priključitvijo obeh razpoložljivih optičnih vlaken v kablju na 2 kanalih in z nastavitvijo izvajanja meritev s 15-minutnim časovnim razmikom. To pomeni, da je zajem meritev na vsakem kanalu potekal s korakom 30 minut. Po postavitvi merskega sistema smo še pred začetkom betonskih del izvedli kontrolno meritev, ki je pokazala, da je merski sistem v celoti delujoč. Ker je bila oprema nameščena v vplivnem območju izvajanja gradbenih del, jo je bilo treba ustrezno zaščititi. Merska oprema je bila ves čas meritev zavarovana z lesenim ohišjem, s katerim je bila zagotovljena zaščita pred zunanjimi vplivi in onemogočen dostop nepoklicanim do naprave (slika 15). Vzporedno z meritvami temperature v konstrukcijskem bloku smo spremljali tudi vremenske podatke (temperatura, padavine, vlažnost, hitrost vetra) z avtomatsko vremensko postajo (slika 16) in meritve temperature okolice betonskega bloka na obojni strani ob desnem stebru prelivnega polja s prostim optičnim kablom.

V času izvajanja meritev je bilo vreme suho. Povprečna dnevna maksimalna temperatura je nihala med 22 in 24 °C z najnižjo

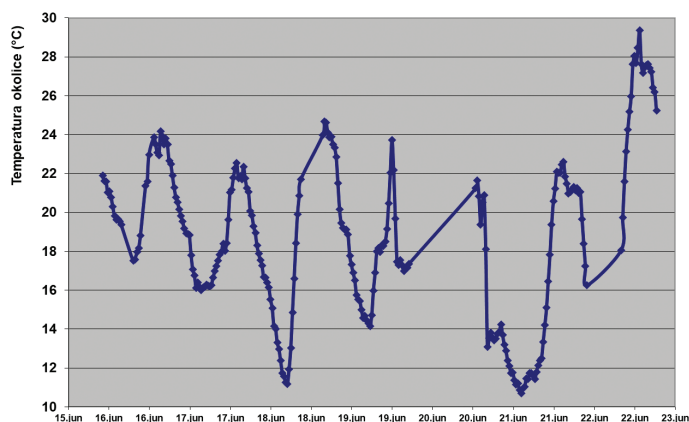


Slika 15. Merska naprava s prostim optičnim kablom in posodo za umerjanje.



Slika 16. Vremenska postaja.

in najvišjo temperaturo 11 °C oziroma 30 °C (slika 17). Med potekom meritev je mestoma prišlo do krajše prekinitve napajanja merske opreme in posledično do izpada podatkovnega niza. Intervali prekinitev so bili dovolj kratki, da je bilo mogoče manjkajoče podatke ustrezno računsko nadomestiti. Za primerjavo in kontrolo rezultatov, dobljenih na terenu, je bil v času izvedbe talne plošče podslapja v laboratoriju izveden tudi poladiabatski poskus na standardnem preizkušancu enake betonske mešanice, kakršna je bila uporabljena pri gradnji talne plošče podslapja.



Slika 17. Temperatura okolice v času izvajanja meritev.

5 REZULTATI MERITEV

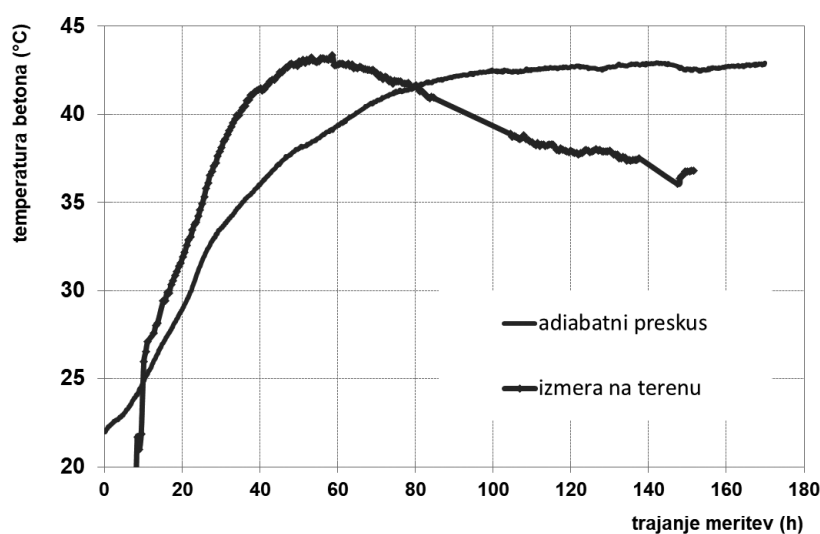
Pri analizi rezultatov meritev je bilo ugotovljeno, da zapis meritev obsega točke do stacionaže +573,75 m, kar pomeni, da smo razpolagali z rezultati meritev v 1.568 merskih točkah v 4 aktivnih zankah (od 4 do 7). Domnevamo, da je pri vgrajevanju betona prišlo do pretrganja ali večje poškodbe optičnega kabla na območju prehoda med 3. in 4. zanko. Kljub temu so se meritve izkazale kot regularne, saj smo z aktivnimi zankami zajeli

več kot polovico vsega merskega polja, vključno z zajemom temperaturnega stanja v osrednjem delu konstrukcijskega bloka. S tem smo pridobili dovolj kakovostnih podatkov za poznejše analize temperaturnega stanja v fazi strjevanja betona. Pozneje izvedene meritve so potrdile, da je prišlo do prekinitev optičnega kabla zgolj lokalno in da je mogoče preostale 3 zanke aktivirati z zaprto zanko ter z aktivacijo vseh 4 razpoložljivih kanalov vzpostaviti sočasno izmero temperaturnega polja v celotnem konstrukcijskem bloku.

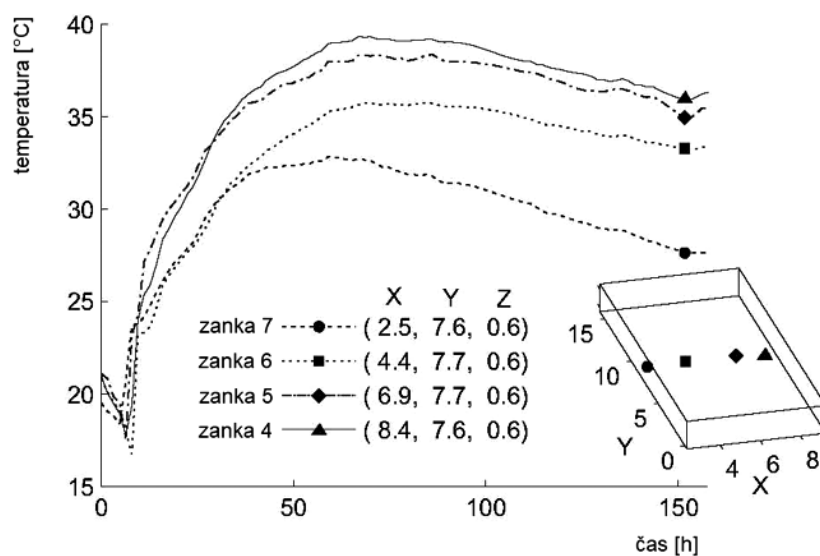
Adiabatnim razmeram v laboratoriju so najbližje merske točke pri dnu v osrednjem delu konstrukcijskega bloka. Začetni prirast temperature v konstrukcijskem bloku je bil opazno hitrejši kot pri referenčnem laboratorijskem poskusu (slika 18). Vzrok za to je verjetno dejstvo, da je proces hidratacije v konstrukcijskem bloku potekal pri bistveno višjih zunanjih temperaturah kot preskus v standardnih laboratorijskih razmerah ($20 \pm 2^\circ\text{C}$). Iz

slike je razvidno, da to ni bistveno vplivalo na velikost končnih (najvišjih) temperatur. Najvišja temperatura v konstrukcijskem bloku je dosegla $43,8^\circ\text{C}$ približno 48 ur po vgradnji, medtem ko je znašala končna temperatura (dosežena po približno 100 urah) pri laboratorijskem poskusu $42,9^\circ\text{C}$ oziroma $37,7^\circ\text{C}$ po 48 urah. Če primerjamo potek temperature pri dnu konstrukcijskega bloka v prečni smeri, je najizrazitejši prirast temperature izmerjen v središču konstrukcijskega bloka in se proti robu bloka vidno zmanjšuje (slika 19). Vzrok za različne hitrosti prirasta temperature v prečni smeri je posledica robnih pogojev, kjer je zaznaven vpliv sosednjih konstrukcijskih blokov in deloma tudi dnevnih temperaturnih nihanj v okolici.

Primerjave temperatur v konstrukcijskem bloku v navpični smeri so še zanimivejše. Poudariti moramo, da se je po vgradnji konstrukcijskega bloka izvajala predpisana mokra nega betona, površina pa ni bila posebej termično zaščite-



Slika 18. Primerjava karakterističnih krivulj v adiabatnih razmerah.

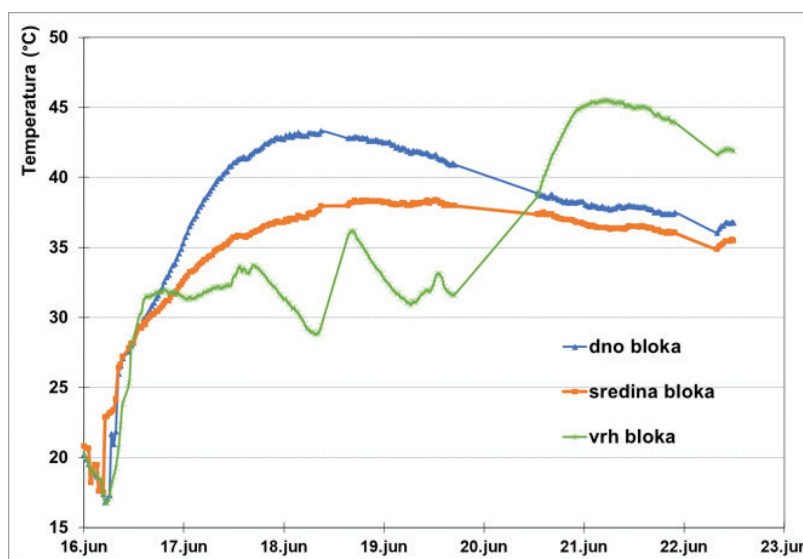


Slika 19. Prikaz časovnega poteka temperature pri dnu konstrukcijskega bloka.

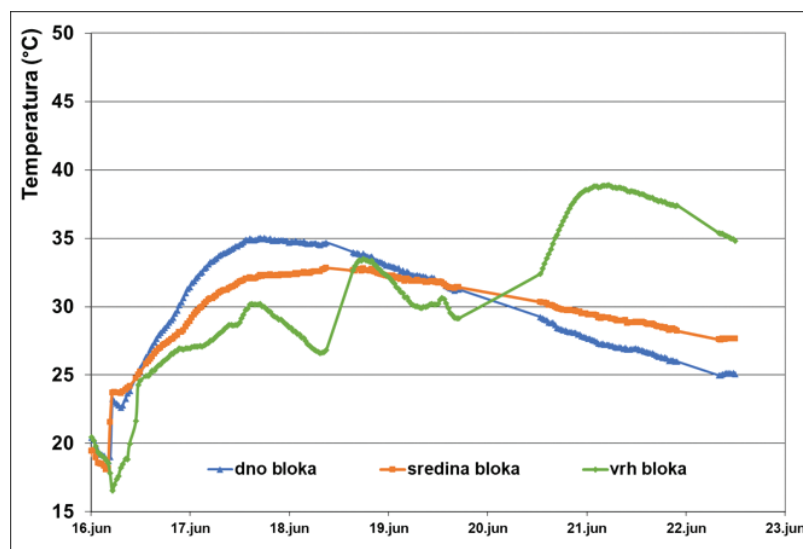
na. Proti površju konstrukcijskega bloka so se najvišje temperature nižale, kar kaže na lažjo izmenjavo toplote iz površine konstrukcijskega bloka v okolico. Smo pa bližje površju zasledili zelo izrazita dnevna nihanja temperatur. Največje temperaturne razlike so znašale od $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ do $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ na razdalji 60 cm, kar kaže na sorazmerno velike temperaturne obremenitve betona v tem območju. Temperaturni gradienti so bili predvsem posledica nihanj zunanjih temperatur, pri čemer pa temperaturni gradienti na enaki razdalji v notranjosti konstrukcijskega bloka niso presegali $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ (slika 20 in 21).

Na sliki 22 je prikazan časovni potek temperaturnega polja v notranjosti konstrukcijskega bloka v prvih petih dneh po vgradnji betona. V prikazu so zajete meritve polovice bloka (zanke 4 do 7). Prostorski prikaz razvoja poteka temperaturnega polja v konstrukcijskem bloku smo naredili na osnovi interpolaci-

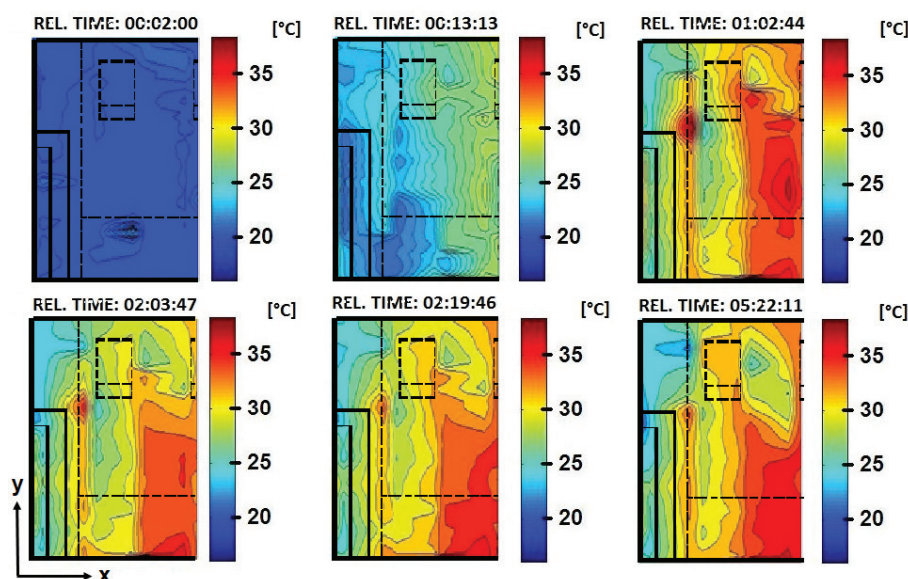
je rezultatov točkovnih meritev, nivojsko med posameznimi vejami in prostorsko med zankami z računskim modelom, razvitim v sklopu predmetnega raziskovalnega projekta v programskem okolju Matlab. Najopaznejši dvig temperature je bil zabeležen v središču konstrukcijskega bloka in se je proti robu močno nižal. Slika temperaturnega polja se znatno razlikuje od pričakovane porazdelitve temperaturnih gradientov od notranjosti proti robu konstrukcijskega bloka in uveljavljenih modelov. Če je v notranjosti konstrukcijskega bloka porazdelitev temperaturnih gradientov v okviru pričakovanih vrednosti, se slika v območju vpliva sosednjih konstrukcijskih blokov znatno spremeni. To se kaže na levem boku konstrukcijskega bloka, kjer je izjemno jasno izražen vpliv na temperaturno polje na območju, na katerem je talna plošča podslapja vpeta v stranski steber prelivnega polja. Pri konvencionalnih analizah poteka temperaturnih polj takih anomalij ni bilo mogoče zaznati. Pomembna ugotovitev naših analiz je izmer-



Slika 20. Prikaz časovnega poteka temperature po vertikalnem prerezu v zanki 4 v sredini konstrukcijskega bloka.



Slika 21. Prikaz časovnega poteka temperature po vertikalnem prerezu v zanki 7 na levem robu konstrukcijskega bloka.



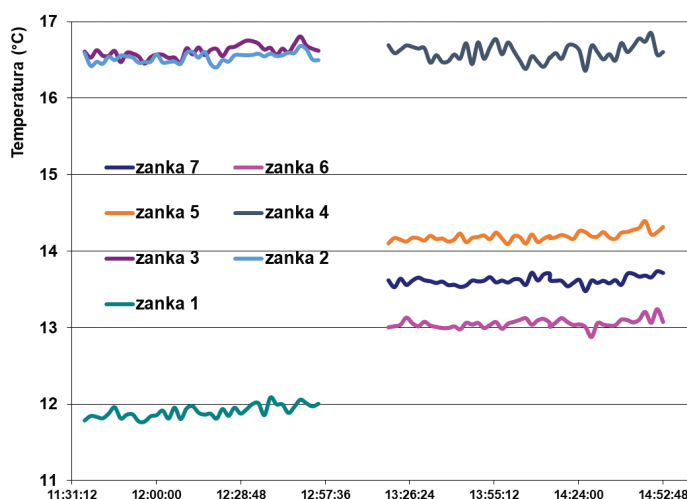
Slika 22. Porazdelitve temperature pri različnih časih, vrh bloka.

jena prisotnost velikih lokalnih temperaturnih gradientov, ki znatno presegajo pričakovane vrednosti in možnost kritičnih napetostnih stanj na mestih, kjer tovrstnih fenomenov ne bi pričakovali.

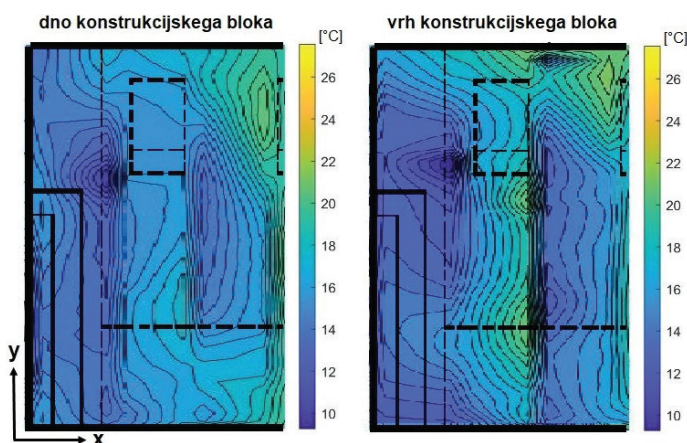
Po zaključku gradbenih del na prvem prelivnem polju smo izvedli še kontrolne meritve in prikazali uporabnost merske opreme v okviru rednega obratovalnega monitoringa. V času izvajanja meritev še ni bilo izvedene preusmeritve in prelivno polje še ni bilo potopljeno. Zaradi prekinjenega optičnega kabla smo morali izvesti meritev za vsako vejo posebej. V sklopu kontrolnih meritev smo naredili po dve seriji zajema podatkov, s čimer smo preverili sposobnost registracije temperatur v obeh vejah merskega kabla. V tem sklopu smo zajeli zapis meritev od stacionaže +180 do stacionaže +880 m v skupno 2.793 merskih točkah. Ob tem so bile zajete tudi merske točke od stacionaže +573,75 m, v dolžini optičnega kabla 306,25 m (zanke 1 do 3), ki pri prvem sklopu meritev zaradi poškodbe kabla niso bile zajete. Meritve smo izvedli za kratko časovno obdobje, vendar z dovolj dolgim reprezentativnim časovnim razponom, da smo potrdili enakomernost pridobljenih rezultatov. Rezultati meritev kažejo, da so vrednosti v obeh vejah v mejah pričakovanih vrednosti. S tem smo potrdili, da je optični kabel na celotni dolžini operativen in funkcionalen.

V času izvedbe kontrolnih meritev nismo imeli na voljo možnosti registracije temperature na sami lokaciji pregrade. Tako smo kot referenčno zunanjo temperaturo privzeli izmerjeno na lokalni meteorološki postaji 13 °C v času izvajanja meritev. V tem obdobju so bila registrirana tudi občutna nihanja temperature v nočnem času, ko so minimalne vrednosti znašale okoli 1 °C. Kot referenčna temperatura na lokaciji merske naprave je privzetih 12,5 °C, ki predstavlja temperaturo v kontrolnem hodniku, ki se praviloma ne spreminja. Rezultati kontrolnih meritev so pokazali, da so temperature znotraj konstrukcijskega bloka še vedno sorazmerno visoke v primerjavi s temperaturo okolice, za katero lahko kot referenčne privzamemo razmere na površini betonskega bloka. Na višjo temperaturo znotraj bloka vpliva proces hidratacije in počasnejše prehajanje toplote

iz notranjosti bloka. S kontrolnimi meritvami smo potrdili tudi ugotovitev, da je pričakovana porazdelitev temperatur v konstrukcijskemu bloku osno simetrična z maksimumi v centralnem delu konstrukcijskega bloka (zanki z oznako 2 in 4). Na robovih konstrukcijskega bloka se temperature znižujejo, kar je posledica vpliva bližine stebrov, pri katerih je prehod toplote zaradi sorazmerno večje površine konstrukcije lažji in posledično sorazmerno tudi hitreje ohlajanje od talne plošče (sliki 23 in 24). Najnižje temperature v notranjosti konstrukcijskega bloka so v rangu vrednosti referenčne temperature v kontrolnem hodniku, ki jo lahko privzamemo kot referenčno temperaturo betona v notranjosti pregrade. Na površini betonskega bloka so temperaturne razlike izrazitejšje, kar je posledica vpliva dnevnega nihanja temperature v okolici pregrade, ki je znašala v času izvajanja meritev na lokalni meteorološki postaji 13 °C, v nočnem času pa so temperature padle na okoli 1 °C.



Slika 23. Prikaz temperatur v zankah na sredini konstrukcijskega polja pri dnu.



Slika 24. Porazdelitev temperaturnega polja v konstrukcijskem bloku za dve višini.

6 ZAKLJUČEK

Izvedeni preskus je pokazal veliko uporabnost sistema optičnih kablov za spremljanje različnih procesov v masivnem betonu tako v času gradnje kot v zgodnjem hidratacijskem obdobju. Prikazan postopek predstavlja odličen način kontrole oziroma nadzora procesa hidratacije, s tem pa vezanja cementa in zgodnjega strjevanja betona v masivnih konstrukcijah, pri katerih je (začetno) sproščanje toplote ključnega pomena za zagotavljanje ustrezne kakovosti, trajnosti in varnosti konstrukcije.

Med glavnimi prednostmi spremljanja temperaturnega polja v masivnih betonskih elementih z optičnimi kabli v primerjavi s klasičnim točkovnim merjenjem temperature z vgrajenimi termočleni velja izpostaviti predvsem neprimerno večjo količino merskih točk, ki jih je mogoče poljubno izbirati. Pri tem je dimenzija optičnega kabla izjemno majhna, zaradi česar je poseg v samo sestavo konstrukcije praktično zanemarljiv iz vidika razvoja temperaturnega polja, doseganja materialnih lastnosti betona in ustreznosti vgrajevanja betona. Optični kabli so zaradi svoje sestave relativno neobčutljivi na ostale vplive, odporni proti okvaram in kompatibilni z naprednejšimi napravami, zaradi česar imajo lahko izjemno dolgo življenjsko dobo. Vse navedeno omogoča, da vgrajeni sistem optičnih kablov učinkovito uporabimo tudi za kontrolo stanja objekta v poznejših fazah (polnitev, eksploatacija) ter za dolgotrajno izvajanje rednega monitoringa masivnih betonskih konstrukcij.

Z vidika namena identifikacije temperaturnega polja v konstrukcijskem bloku sta se kot ustrezna izkazala uporabljena izbira razmika merskih točk in časovni interval zajema meritev. Natančnost izmere temperature v merskih točkah je odvisna od prostorske ločljivosti sistema DTS, kar pa (glede na velikost konstrukcijskega bloka) na rezultate meritev ni imelo značilnega vpliva. V primeru uporabe sistema DTS pri manjših konstrukcijskih elementih pa lahko prostorska ločljivost predstavlja pomemben faktor, ki ga je treba upoštevati pri zasnovi merskega sistema (večji razmik merskih točk, izvedba lokalnih zaprtih zank ipd.). Vsekakor to naslavlja dodatna vprašanja, na katere odgovore bo treba pridobiti pri nadaljnjih raziskavah.

7 ZAHVALA

Raziskovalni projekt je bil financiran s strani HESS (Hidroelektrarne na spodnji Savi) in sredstev ARRS (programska skupina P2-0180 in temeljni raziskovalni projekt J2-9196), za kar avtorji prispevka izražajo posebno zahvalo.

8 LITERATURA

Glišić, B. Simon, N., Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor, Cement & Concrete Composites, Volume 22, 115–119, 2000.

Glišić, B., Inaudi, D., Monitoring of Early and very early age Deformation of concrete Example paper, The International Journal on Hydropower and Dams, Volume 19/6, 87–92, 2006.

HESS, spletna stran: <https://www.he-ss.si/he-brevice-splosno.html>, Hidroelektrarne na spodnji Savi, datum vpogleda 15.5.2022, 2022.

Hoffmann, L., Müller, M., Krämer, S., Giebel, M., Schwotzer, G., Wieduwilt, T., Applications of fiber optic temperature measurement, Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering Volume 13/4, 363–378, 2007.

Humar, N., Milevski, S., Zupan, D., Vidmar, A., Kryžanowski, A., High resolution distributed fiber optic temperature measurement of massive concrete in concrete dams at an early age, Proc. International Symposium on »Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries«, 84th ICOLD Annual Meeting, Johannesburg, 21.-27.6. 2016, South Africa, 2016.

IBE, HE Brežice, prelivna polja, 3 načrt gradbenih konstrukcij, PZI, Ljubljana, 2014.

Inaudi, D., Glišić, B., Field Application of Fiber Optic Strain and Temperature Monitoring Systems, Opto-electronic Sensor-based monitoring in Geo-engineering, Nanjing, P.R.China, November 23–24, 2005.

Kryžanowski, A., Brilly, M., Vidmar, A., Zupan, D., Humar, N., Sečnik, M., Vihar, A., Sapač, K., Vežočnik, R., Gvozdanovič, T., Jud, S., Meritve temperature v betonskem bloku na prelivnem polju pregrade Brežice, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko, Končno poročilo raziskovalne naloge, naročnik: HESS, št. 2015/000106, Ljubljana, 2015.

Peng, H., Lin, P., Yang, N., Li, M., Qiao, Y., Real time thermal field analysis on Wudongde super high arch dam during construction, Global energy interconnection, Volume 2/3, 264–269, 2019.

Silixa, Software Manual, Silixa Ltd, Elstre, 2014.

Vežočnik, R., Gvozdanovič, T., Jud, S., Izvedba geodetskih laserskih meritev pozicije optičnega kabla, DFG, št. 10509, Ljubljana, 2015.