

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Murn, P. 2013. Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V.): 77 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Murn, P. 2013. Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V.): 77 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

PRIMOŽ MURN

**DOLOČANJE UČINKOVITOSTI AKTIVNE
TERMOGRAFIJE ZA ZAZNAVANJE ANOMALIJ V
BETONSKIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTIH**

Diplomska naloga št.: 3278/KS

**THE EFFICIENCY OF ACTIVE THERMOGRAPHY FOR
DETECTION OF DEFECTS IN CONCRETE
STRUCTURAL ELEMENTS**

Graduation thesis No.: 3278/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Patricia Cotič

Član komisije:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

doc. dr. Simon Schnabl

doc. dr. Dušan Žagar

Ljubljana, 25. 01. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Primož Murn izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih«.

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

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

Novo mesto, 2. 12. 2012

Primož Murn

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	537.5:624.012.4:691.32
Avtor:	Primož Murn
Mentor:	izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.
Somentor:	asist. Patricia Cotič, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih
Tip dokumenta:	diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	77 str., 3 pregl., 16 graf., 52 sl., 23 en.
Ključne besede:	neporušne preiskave, beton, termografija, aktivna termografija, infrardeče sevanje, prenos toplote, temperaturna slika, temperaturni kontrast

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljena aktivna termografija kot ena izmed metod neporušnega preskušanja v gradbeništvu. V diplomski so predstavljene osnove infrardeče termografije, ki so potrebne za razumevanje in pravilno uporabo metode. Opisano je delovanje infrardeče kamere ter več različnih načinov obdelave termografskih podatkov in primerjava med njimi. V eksperimentalnem delu je opravljena analiza učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. Preverjan je bil vpliv velikosti, oblike in globine anomalij, vpliv armature, starosti merjenca ter časa gretja preizkušancev na njihovo zaznavanje. Vse to je bilo narejeno na štirih betonskih prizmah, pripravljenih za potrebe teh preiskav. Rezultati so pokazali, da lahko veliko podatkov o preizkušancu postrežejo že temperaturni posnetki, vendar so ti precej občutljivi na nehomogeno gretje. Bolj jasne slike dobimo s pomočjo kontrastnih slik, boljše zaznavanje anomalij pa nam omogočajo časovne slike. Najbolj podroben vpogled v sestavo in stanje merjenca dobimo s kontrastnimi krivuljami, kjer spremljamo tako temperaturne kontraste, kot tudi čase, pri katerih so se ti v posameznih točkah pojavili.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 537.5:624.012.4:691.32

Author: Primož Murn

Supervisor: Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.

Cosupervisor: Asist. Patricia Cotič, B.Sc.

Title: The efficiency of active thermography for detection of defects in concrete structural elements

Document type: Graduation thesis - University studies

Notes: 77 p., 3 tab., 16 gr., 52 fig., 23 eq.

Key words: nondestructive testing, concrete, thermography, active thermography, infrared radiation, heat transfer, thermal image, thermal contrast

Abstract

In the diploma, active thermography as a non-destructive testing method for the investigation in civil engineering is presented. The first part contains the principles of infrared thermography that are needed to understand the method and for proper application of this method. Next, the basics of infrared camera were described with different possibilities in the processing of thermographic data with their comparison. Size, depth and shape of anomalies were taken into consideration with the age of the specimens as well as the influence of heating time and the influence of reinforcement in specimens. All tests were performed on four concrete blocks purposely made for this experiment. Results showed that in the case of homogeneous heating, many details can be obtained with the simple use of thermal images. However, images became clearer when thermal contrast images were used and more sensitive with timegrams. To acquire more detailed information about the specimen, the use of thermal contrast curves is recommended, where we track both the maximum thermal contrast and the time where it appears.

Zahvala

Rad bi se zahvalil mentorju izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu za nasvete pri izdelavi diplomske naloge in izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov za pomoč pri izdelavi betonskih preizkušancev. Velika zahvala gre tudi somentorici asist. Patricii Cotič, ki mi je nudila ogromno pomoč in mi namenila veliko mero potrpežljivosti. Zahvaljujem se ji tudi za programsko opremo, ki jo je za namen preiskav izdelala v sklopu svoje doktorske naloge, in sem jo uporabil za obdelavo in prikaz rezultatov.

Posebna hvala domačim za podporo, ljubezen in vero vame, da mi bo uspelo.

Hvala tudi tebi, Maja, ker si mi stala ob strani tekom celotnega študija, bila razumljiva in me vedno navdajala s pozitivizmom.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Predstavitev problema.....	1
1.2	Namen diplomske naloge.....	2
2	TERMOGRAFIJA - TEORETIČNO OZADJE	4
2.1	Toplota in temperatura	4
2.2	Prenos toplote	5
2.2.1	Kondukcija ali prevajanje toplote.....	6
2.2.2	Konvekcija	6
2.2.3	Radiacija ali sevanje	7
2.3	Spekter elektromagnetnega valovanja.....	8
2.3.1	Infrardeče sevanje.....	9
2.4	Izmenjava vpadnega toplotnega sevanja	10
2.5	Črno in realno telo	11
2.6	Vplivi okolja	13
2.7	Izračun temperature	15
2.8	Osnove delovanja termokamere	15
2.9	Tehnike merjenja pri aktivni termografiji.....	17
2.9.1	Impulzna termografija (angl. pulsed thermography).....	17
2.9.2	Ponavljajoča termografija (angl. step heating).....	18
2.9.3	Zaprta termografija (angl. lockin thermography).....	18
2.9.4	Vibracijska termografija (angl. vibrothermography).....	18
3	UPORABA TERMOGRAFIJE V GRADBENIŠTVU	19
3.1	Primeri nepravilnosti pri vgradnji gradbenih elementov in materialov	19
3.2	Netesnost oken.....	20
3.3	Odkrivanje vlažnosti.....	20
3.4	Toplotni mostovi.....	21
3.5	Pronicanje vode.....	22
3.6	Nepravilnosti v sistemu talnega gretja.....	22

3.7	Zagotavljanje kvalitete.....	23
3.8	Sanacija	23
3.9	Instalacija	23
3.10	Elektrika.....	24
3.11	Termografija na področju neporušnih preiskav	24
4	IZVEDBA AKTIVNE TERMOGRAFSKE MERITVE NA GRADBENIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTIH IN OBDELAVA TERMOGRAFSKIH PODATKOV ZA VIZUALIZACIJO REZULTATOV.	26
4.1	Meritve.....	26
4.2	Oprema.....	26
4.2.1	Grelna naprava.....	26
4.2.2	Termokamera	27
4.2.3	Programska oprema	27
4.3	Obdelava podatkov.....	27
4.3.1	Osnove termografske slike.....	27
4.3.2	Načini obdelave podatkov pri aktivni termografiji.....	30
5	TERMOGRAFSKA PREISKAVA BETONSKIH ELEMENTOV	34
5.1	Opis priprave elementov	34
5.1.1	Prvi preizkušaneec	36
5.1.2	Drugi preizkušaneec.....	37
5.1.3	Tretji preizkušaneec.....	39
5.1.4	Četrti preizkušaneec	40
5.2	Opis termografske opreme in postopka meritev	42
5.2.1	Gretje.....	42
5.2.2	Snemanje	43
5.2.3	Programska oprema	44
5.3	Rezultati.....	46
5.3.1	Temperaturne slike (angl. thermal images) pri različnih časih gretja in hlajenja	47

5.3.2	Kontrastne (angl. thermal contrast images) in časovne (angl. timegrams) slike.....	54
5.3.3	Kontrastne krivulje (angl. thermal contrast curves).....	58
6	ZAKLJUČEK.....	73
VIRI	76

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Okvirne vrednosti toplotne prevodnosti (¹ Brink, 2005; ² Maldague, 2001; ³ Louis, 2011)	6
Preglednica 2: Okvirne vrednosti toplotne prestopnosti (Koloini, 1999).....	7
Preglednica 3: Termične lastnosti uporabljenih materialov (¹ Brink, 2005; ² Maldague, 2001)	35

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 5.1: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 1	59
Grafikon 5.2: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 2	60
Grafikon 5.3: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 3	61
Grafikon 5.4: Maksimalna temperaturna razlika pri različnih časih gretja	62
Grafikon 5.5: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različnih časih gretja.....	62
Grafikon 5.6: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 1 za čas gretja 30 min.....	63
Grafikon 5.7: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 2 za čas gretja 30 min.....	64
Grafikon 5.8: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 3 za čas gretja 30 min.....	64
Grafikon 5.9: Maksimalna temperaturna razlika pri različni starosti preizkušanca.	65
Grafikon 5.10: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različni starosti preizkušanca	66
Grafikon 5.11: Vpliv globine kvadrov za čas gretja 30 min	67
Grafikon 5.12: Maksimalna temperaturna razlika pri različnih globinah anomalij	68
Grafikon 5.13: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različnih globinah anomalij.....	68
Grafikon 5.14: Vpliv materiala anomalije na globini 4,5 cm.....	70
Grafikon 5.15: Vpliv armature na 4,5 cm globoko vgrajene kvadre.....	71
Grafikon 5.16: Vpliv armature na 6 cm globoko vgrajene kvadre.....	72

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz določitve Kelvinove lestvice (Šolinc, 2000).....	5
Slika 2: Spekter elektromagnetnega valovanja (Strnad, 2004).....	9
Slika 3: Vpadlo sevanje in njegove komponente.....	10
Slika 4: Spektralna porazdelitev gostote toka sevanja črnega telesa pri različnih temperaturah (Maldague, 2001).....	12
Slika 5: Wienov zakon.....	13
Slika 6: Merjenje predmeta s termokamero.....	14
Slika 7: Sestava termokamere (FLIR, 2011).....	16
Slika 8: Manjkajoč panel termoizolacije (FLIR, 2011).....	20
Slika 9: Slabo tesnjeno strešno okno (FLIR, 2011).....	20
Slika 10: Vdor vlage na tleh (FLIR, 2011).....	21
Slika 11: Toplotni most (FLIR, 2011).....	21
Slika 12: Pronicanje vode na ravni strehi (FLIR, 2011).....	22
Slika 13: Počena cev v sistemu talnega gretja (FLIR, 2011).....	22
Slika 14: Posnetek, kjer se jasno vidi endoskeletna nosilna konstrukcija (FLIR, 2011).....	23
Slika 15: Detekcija nepravilnosti pri ceveh (FLIR, 2011).....	24
Slika 16: Pregrevanje varovalke (FLIR, 2011).....	24
Slika 17: Smeri osi pri termografiji.....	28
Slika 18: Termografska slika v 3D grafični obliki.....	28
Slika 19: Graf površinske temperature v odvisnosti od časa za točko nad anomalijo in referenčno točko.....	30
Slika 20: Temperaturna razlika med referenčno točko in točko nad anomalijo.....	31
Slika 21: Čas, ko se pojavi največji kontrast temperature v odvisnosti od globine anomalij (Maldague, 2001).....	32
Slika 22: Prikaz konstruiranja časovne slike (Maldague, 2001).....	33
Slika 23: Model opaža prvega ter drugega preizkušanca (na levi) in tretjega ter četrtega preizkušanca (na desni) v računalniški obliki.....	35
Slika 24: Načrt prvega preizkušanca.....	36
Slika 25: Model 1. preizkušanca ter 1. preizkušanec pred betoniranjem.....	37

Slika 26: Načrt drugega preizkušanca (modra barva označuje vodno anomalijo).....	38
Slika 27: Model 2. preizkušanca ter 2. preizkušanec pred betoniranjem.....	38
Slika 28: Načrt tretjega preizkušanca.....	39
Slika 29: Model 3. preizkušanca ter 3. preizkušanec pred betoniranjem.....	40
Slika 30: Načrt četrtega preizkušanca	41
Slika 31: Model 4. preizkušanca ter 4. preizkušanec pred betoniranjem.....	41
Slika 32: Snemanje preizkušanca.....	42
Slika 33: Sevalna peč, Quartz 1200	43
Slika 34: Uporabljena termokamera	44
Slika 35: FLIR ResearchIR Max 3.2 (pogovorno okno).....	45
Slika 36: Ir View 1.7.5 (pogovorno okno).....	46
Slika 37: Oznake anomalij	47
Slika 38: Temperaturne slike v °C preizkušanca 1A	49
Slika 39: Temperaturne slike v °C preizkušanca 1B	50
Slika 40: Temperaturne slike v °C preizkušanca 2	51
Slika 41: Temperaturne slike v °C preizkušanca 3	53
Slika 42: Temperaturne slike v °C preizkušanca 4	54
Slika 43: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 1A.....	55
Slika 44: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 1A	55
Slika 45: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 1B.....	56
Slika 46: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 1B.....	56
Slika 47: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 2	56
Slika 48: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 2	56
Slika 49: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 3	57
Slika 50: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 3	57
Slika 51: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 4	58
Slika 52: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 4	58

1 UVOD

1.1 Predstavitev problema

Toplota je zelo pomemben dejavnik človekovega vsakdanjika. Prevroče ali premrzlo ozračje bistveno vpliva na naše počutje, zato se želimo na vročino in mraz ustrezno pripraviti. Spremljamo vremensko napoved, kjer nam postrežejo s podatki temperatur za naslednje dni. Temperature pa ne merimo le pri vremenu, temveč ima velik vpliv tudi drugje. Spremljamo jo že od nekdaj. Sprva, ko še ni bilo na voljo ustreznih naprav, smo jo zaznavali kar z golo roko. Še vedno se pogosto dogodi, da z dlanjo otipamo skodelico vročega čaja, in se tako prepričamo, ali je dovolj hladen ozirom topel. Človeška koža ima namreč sposobnost, da zazna odklone temperature, ki so manjši od 1 °C v primerjavi z okoliško. Prvi korak k natančnemu merjenju temperature je naredil Galilejo leta 1593, ko je izumil termometer v obliki steklenega cilindra napolnjenega s tekočino, v kateri plavajo uteži. To je bil le začetek razvoja naprednejših aparatov, kajti danes je na trgu ogromno različnih analognih in elektronskih naprav, ki meritve temperatur opravljajo hitro in natančno.

Ena od tehnik s katero je mogoče prikazati temperaturne podatke je termografija. Izvajamo jo lahko na več načinov. Najbolj primitivno je z uporabo točkovnih kontaktnih ali nekontaktnih termometrov in nato z grafičnim prikazom rezultatov. V zadnjem času je pogosta izbira tudi uporaba termokamere, saj gre za precej hitrejše in enostavnejše izvajanje meritev. Njene prednosti so v tem, da lahko deluje v realnem času, zaznava na daljavo brez kontakta in meri na več točkah merjenca hkrati. Sprva so jo uporabljali v vojski, saj jim omogoča, da bolje »vidijo« tudi v pogojih za oko zmanjšane vidljivosti. Kasneje se je uporaba močno razširila in danes so termokamere uporabljene skoraj povsod, kjer se med nekim procesom ustvarja ali prenaša toplota.

Poleg uporabe v proizvodnji in distribuciji električne energije, proizvodnji in končni kontroli gospodinjskih aparatov, v železarnah, v proizvodnji stekla, gumarskih izdelkov in cementa, pri vzdrževanju energetske opreme, pregledovanju tiskanih vezij in v medicini, se veliko uporablja tudi v gradbeništvu. Že dolgo je v uporabi pri merjenju toplotnih izgub stavb in

iskanju toplotnih mostov in vlažnih mest, ugotavljanju kvalitete izolacijskih materialov in pri odkrivanju različnih napeljav. Zadnje čase pa uporaba termografije prodira tudi na področje neporušnih preiskav gradbenih materialov in konstrukcijskih elementov, saj z njo lahko vidimo tudi »nevidno«.

Pri vsakem procesu, kjer se porablja energija, se sprošča tudi neka količina toplote. Pri pasivni termografiji to zaznavamo prek mesta s povišano temperaturo. Območja, kjer opazimo razliko temperature okoli 5 °C, lahko pogosto predstavljajo že sum o nepravilnosti v merjencu. Pasivno termografijo se uporablja predvsem tam, kjer želimo najti anomalije v procesu, zato je ta način merjenja v gradbeništvu najbolj pogost.

Z razliko od pasivne termografije je pri aktivni merjencu najprej potrebno dovesti neko količino energije, saj lahko le tako izmerimo zadostne temperaturne razlike, da iz njih vidimo podpovršinske anomalije. Ta način merjenja je največkrat potreben na področju neporušnih preiskav gradbenih materialov in konstrukcijskih elementov.

1.2 Namen diplomske naloge

Osnovni namen diplomske naloge je predstaviti infrardečo termografijo kot eno izmed metod neporušnega preskušanja. Ker gre za dokaj novo in neraziskano področje bom preverjal, kako posamezni parametri vplivajo na uporabnost metode in kje je njena meja pri zaznavanju anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. Osnovna hipoteza, ki jo bom v delu zato preveril, je, da je z uporabo aktivne infrardeče termografije možno zaznavati prisotne anomalije v betonskih konstrukcijskih elementih.

V delu bom predstavil uporabo termografije predvsem v gradbeništvu. V okviru eksperimentalnega dela bom ugotavljal vpliv materialne zasnove anomalij v betonskih elementih, njihove globine, oblike, velikosti, vpliv armature in medsebojne povezave naštetih vplivov na njihovo zaznavanje.

Rezultati bodo prikazani v termografskih slikah, nato pa bom predstavil kakšne so prednosti in možnosti njihove nadaljnje obdelave.

2 TERMOGRAFIJA - TEORETIČNO OZADJE

Za boljše razumevanje infrardečega sevanja, termografije in delovanja termokamere, bom najprej predstavil osnovne pojme in fizikalne zakonitosti, s katerimi se tu srečujemo.

2.1 Toplota in temperatura

S pojmom toplota opisujemo energijo, ki prehaja s telesa z višjo temperaturo na telo z nižjo temperaturo. Molekule toplejše snovi imajo večjo povprečno kinetično energijo kot molekule v hladnejši snovi. Če dve telesi postavimo skupaj, da se dotikata, bodo molekule obeh snovi ob stičnih ploskvah trkale druga ob drugo in si tako izmenjale kinetično energijo. Na ta način se bo molekulam z višjo kinetično energijo ta v povprečju zmanjšala, tistim z manjšo kinetično energijo pa povečala. Tako se pretaka notranja energija iz toplejšega telesa proti hladnejšemu tako dolgo, dokler se temperatura oziroma povprečna kinetična energija molekul na stični ploskvi ne izenači. Ko se to zgodi, sta telesi v termičnem ravnovesju. Toplota, ki v določenem času preteče skozi snov, rečemo toplotni tok.

Bolj kot je dinamično gibanje molekul v snovi, višja je njena temperatura. Za opisovanje temperature uporabljamo različne temperaturne skale:

- Celzijeva [$^{\circ}\text{C}$],
- Kelvinova [$^{\circ}\text{K}$],
- Fahrenheitova [$^{\circ}\text{F}$].

Za pretvarjanje med posameznimi temperaturnimi lestvicami veljajo naslednje zveze:

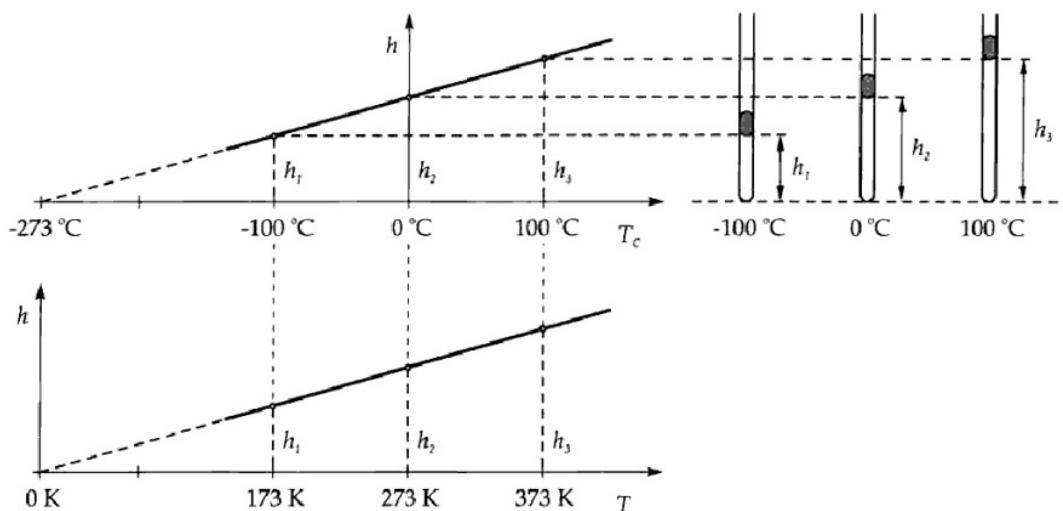
$$T(^{\circ}\text{C}) = [T(^{\circ}\text{F}) - 32] \times \frac{5}{9}, \quad (2.1)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{C}) \times \frac{9}{5} + 32, \quad (2.2)$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15. \quad (2.3)$$

Pri nas se v vsakdanjem življenju najpogosteje uporablja enota $^{\circ}\text{C}$, vendar je osnovna enota za temperaturo K (kelvin). Kadar temperaturo izrazimo s kelvini, govorimo o absolutni temperaturi. Definirana je na osnovi plinskega termometra. Ko se plinu v cevki temperatura zmanjša, se s tem zmanjša tudi njegova prostornina in višina stolpca. Obratno velja, če se plinu temperatura poveča.

Če naredimo tri meritve višine stolpca plina v cevki pri nekih izbranih temperaturah merjenih v stopinjah Celzija, opazimo, da gre za linearno zvezo, podaljšek te premice pa abscisno os seka pri temperaturi $-273,15^{\circ}\text{C}$ (Slika 1). Pri tej temperaturi bi bila prostornina plina enaka 0, zato domnevamo, da je to najnižja možna temperatura v naravi.



Slika 1: Prikaz določitve Kelvinove lestvice (Šolinc, 2000)

2.2 Prenos toplote

Obstaja več različnih načinov prenosa toplote. Osnovni načini so konvekcija ali prestop toplote, kondukcija ali prevajanje ter radiacija ali sevanje. Poleg vsakega posameznega je mogoča tudi njihova kombinacija, kjer pogosto prevladuje en od načinov.

2.2.1 Kondukcija ali prevajanje toplote

Kondukcija je prenašanje toplote v mirujočih trdnih telesih, tekočinah in plinih, vendar pa je najbolj pogosta za trdnine zaradi manjših medsebojnih razdalj med atomi. Dogaja se preko trkov sosednjih molekul ali atomov v telesu, ki pri tem prenašajo kinetično in potencialno energijo. Pri trku dveh molekul z različnimi hitrostmi hitrejša odda nekaj energije, počasnejša pa jo sprejme. Za takšno prevajanje toplote velja Fourierjev zakon oziroma zakon o prevajanju toplote:

$$j = -k \nabla T, \quad (2.4)$$

kjer je: j ...gostota toplotnega toka [W/m^2],
 k ... toplotna prevodnost [W/mK],
 ∇T ...temperaturni gradient [K/m].

Toplotna prevodnost je za različne snovi zelo različna. Snovi, ki imajo visoko vrednost k , bolje prevajajo toploto kot tiste z nizko vrednostjo.

Preglednica 1: Okvirne vrednosti toplotne prevodnosti (¹ Brink, 2005; ² Maldague, 2001; ³ Louis, 2011)

Snov	k [W/mK]
Jeklo	43 [2]
Beton	2,1 [1]
Opeka	0,69 [3]
Voda	0,60 [2]
Stiropor	0,035 [1]
Zrak	0,026 [1]

2.2.2 Konvekcija

Konvekcija je pojav prenosa toplote z gibanjem makroskopskih delcev in mešanjem hladnih in toplih delcev v kapljevinah, tj. tekočinah in plinih. Poznamo dve vrsti konvekcije: naravna

in prisiljena. Naravna je posledica vzgona zaradi razlik v gostoti snovi, ki jo povzroča samo ogrevanje, medtem ko je prisiljena posledica vsiljenega gibanja z ventilatorji, mešali ali črpalkami. Prehod toplote med trdno snovjo in tekočino ne more bit opravljen s konvekcijo, temveč je za to potrebna tudi kondukcija.

Konvekcijsko ohlajanje opisuje Newtonov zakon ohlajanja, ki je rešitev diferencialne enačbe, ki jo podaja Fourierev zakon (2.4).

$$\frac{dQ}{dt} = -h \cdot A \cdot (T - T_o), \quad (2.5)$$

kjer je: Q ...toplotna energija [J],
 T ...temperatura konvekcijske površine [K],
 T_o ...temperatura okolice [K],
 A ...površina [m²],
 h ...toplotna prestopnost [W/m²K].

Preglednica 2: Okvirne vrednosti toplotne prestopnosti (Koloini, 1999)

POJAV	h [W/m ² K]
Naravna konvekcija, zrak	5 - 50
Prisilna konvekcija, zrak	25 - 250
Ogrevanje vode, naravna konvekcija	50 - 1000
Prisilna konvekcija, voda	250 - 15000
Vretje vode	3500 - 4500
Kondenzacija pare v filmu	5000 - 15000

Vrednost toplotne prestopnosti h je odvisna od različnih fizikalnih lastnosti tekočine, njenega tlaka, temperature in hitrosti ter od materiala, hrapavosti in oblike površine stene.

2.2.3 Radiacija ali sevanje

Toplotno sevanje je prenos energije z elektromagnetnim valovanjem in poteka v območju valovnih dolžin med 10⁻⁴ m in 10⁻⁷ m. Za prenos toplote z radiacijo ne potrebujemo medija.

Sevanje telesa opišemo s pomočjo Stefan-Boltzmanovega zakona za realno telo:

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.6)$$

kjer je:

ε ...emisivnost, parameter odvisen od lastnosti površine telesa [/],

σ ...Stefan-Boltzmanova konstanta [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$],

T ...absolutna temperatura površine telesa [K].

ε ima pri črnih telesih vrednost 1, pri realnih pa je ta manjša od 1.

2.3 Spekter elektromagnetnega valovanja

Elektromagnetni spekter je sestavljen iz elektromagnetnih valovanj, ki so razvrščena glede na njihove valovne dolžine ali frekvenco valovanja. Njuno medsebojno zvezo lahko opišemo z enačbo:

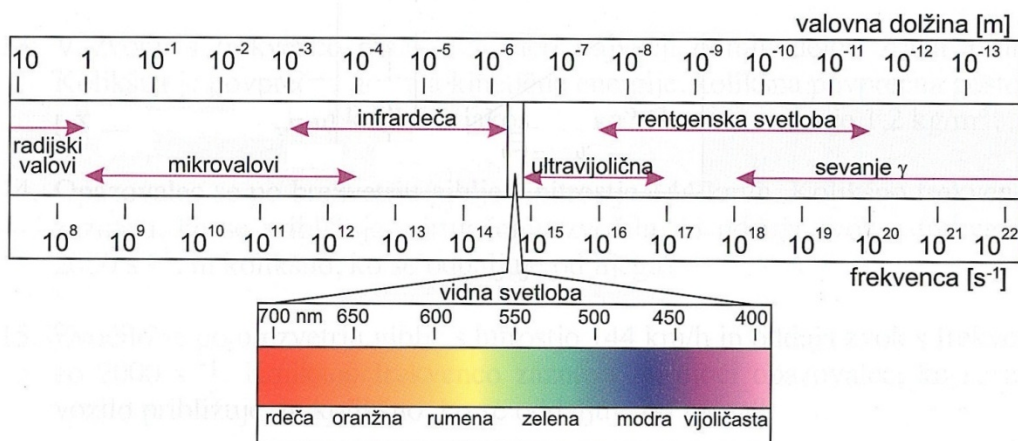
$$c = \nu \cdot \lambda, \quad (2.7)$$

kjer je: ν ...frekvenca valovanja [s^{-1}],

λ ...valovna dolžina [m],

c ...svetlobna hitrost [m/s].

Najmanjše valovne dolžine imajo gama žarki, največje pa radijski valovi. Vidna svetloba je nekje vmes z valovno dolžino približno med 380 in 750 nm. Meje med posameznimi sevanji so le okvirne, saj se en spekter preliva v drugega (Slika 2).



Slika 2: Spekter elektromagnetnega valovanja (Strnad, 2004)

2.3.1 Infrardeče sevanje

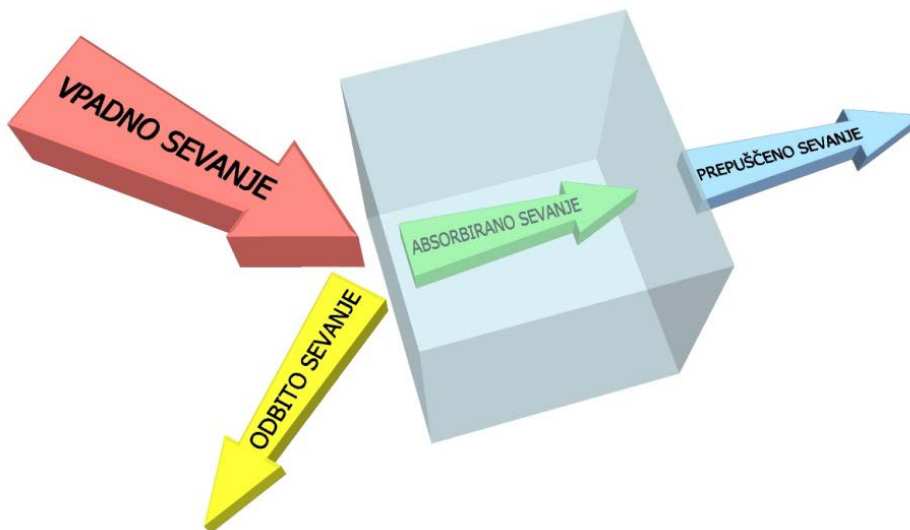
Infrardeče sevanje je leta 1800 po naključju odkril astronom in skladatelj Sir Frederick William Herschel, potem ko je s prizmo razklonil belo svetlobo, in dobil spekter barv od modre do rdeče. Skozi posamezno barvo je nato pomikal termometer ter beležil njeno temperaturo. Za referenčno vrednost je meritev izvajal tudi izven območja vidne svetlobe in opazil, da temperatura narašča tudi naprej od rdeče barve izven vidnega spektra. Te žarke je takrat poimenoval »nevidni žarki« ali »žarki, ki povzročijo toploto«. Ker po frekvenci valovanja sledijo rdeči svetlobi, so jih kasneje poimenovali kar infrardeča svetloba. Ta ima valovno dolžino med 700 nm in 1 mm, razdelimo pa jo na pet delov:

- bližnje infrardeče sevanje,
- kratkovalovno infrardeče sevanje,
- srednjevalovno infrardeče sevanje,
- dolgovalovno infrardeče sevanje,
- daljno infrardeče sevanje.

2.4 Izmenjava vpadnega toplotnega sevanja

V realnosti nobeno telo ne sprejme elektromagnetnega valovanja v celoti, temveč del valovanja odbije (ρ), del absorbira (α), del pa gre skozi njih (τ). Po zakonu o ohranitvi energije velja:

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (2.8)$$



Slika 3: Vpadlo sevanje in njegove komponente

Večina teles absorbira sevanje v tankih površinskih slojih, zato se energija v takem telesu prenaša izključno s prevajanjem toplote. Pri neprepustnih telesih je $\tau = 0$ in enačba (2.8) dobi obliko:

$$\alpha + \rho = 1. \quad (2.9)$$

Iz enačbe (2.9) vidimo, da sta odbojnost in absorptivnost nasprotno odvisna. Na njiju vplivajo obdelava površine in materialne lastnosti telesa, valovna dolžina, vpadni kot sevanja in temperatura.

Vsa telesa ne le sprejemajo, temveč tudi oddajajo energijo. To počnejo s sevanjem, ki sestoji iz lastnega sevanja, ki ga oddaja predmet (ta delež sevanja opišemo z emisivnostjo ε),

sevanja, ki ga predmet prepušča skozi sebe, in izvira iz drugih predmetov v ozadju (ta delež opiše τ), ter iz sevanja, ki se od predmeta odbije od drugih predmetov, ki so pred njim (ta delež opiše ρ). To lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1. \quad (2.10)$$

Telesa, ki energijo dobro absorbirajo, to tudi dobro sevajo. O tem govori Kirchhoffov zakon, ki pravi:

$$\alpha = \varepsilon. \quad (2.11)$$

2.5 Črno in realno telo

Črno telo popolnoma absorbira sevanje iz vseh smeri in vseh valovnih dolžin. Glede na površino pri določeni temperaturi seva največ energije. V realnosti tako telo sicer ne obstaja, v teoriji pa se ga kot dober približek veliko uporablja. Njegova vrednost emisivnosti je $\varepsilon = 1$, enako pa znaša tudi vrednost absorptivnosti $\alpha = 1$.

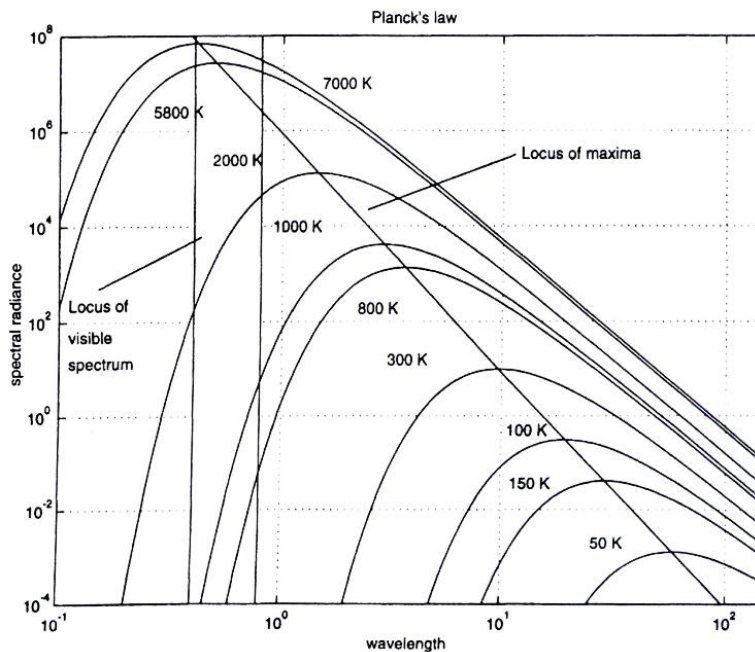
Črno telo lahko opišemo s tremi zakoni. Kadar govorimo o oddajanju toplote, gremo težko mimo **Planckovega zakona**. Ta podaja spektralno gostoto elektromagnetnega valovanja za vse valovne dolžine pri neki absolutni temperaturi T črnega telesa.

$$\frac{dj}{d\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}, \quad (2.12)$$

kjer je: k ... Boltzmanova konstanta [$1,381 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$],

h ... Planckova konstanta [$6,626 \cdot 10^{-34} Js$],

T ... absolutna temperatura črnega telesa [K].

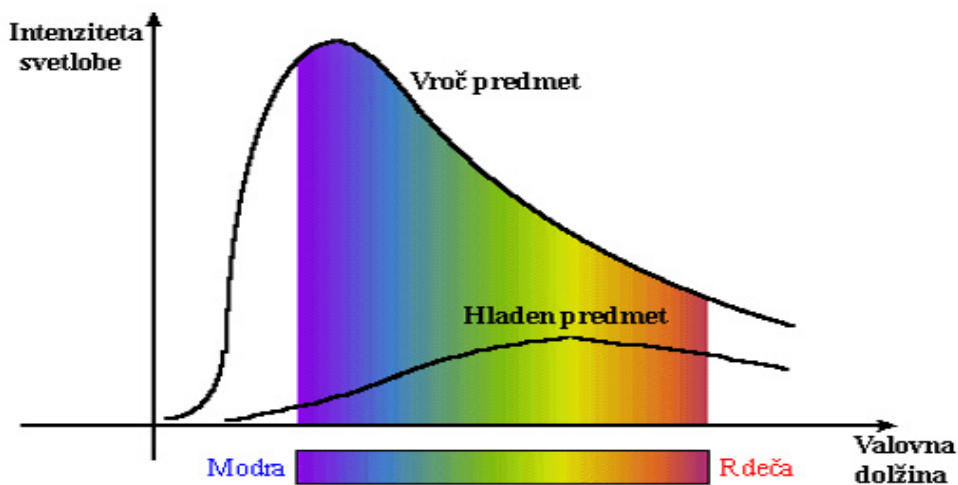


Slika 4: Spektralna porazdelitev gostote toka sevanja črnega telesa pri različnih temperaturah (Maldague, 2001)

Valovna dolžina sevanja, pri kateri telo seva največ (maksimum spektra po Planckovem zakonu), je obratno sorazmerna z njegovo temperaturo. Topla telesa torej sevajo več pri majhnih valovnih dolžinah, hladnejša pa pri večjih. To je zapisano z **Wienovim zakonom**:

$$\lambda_{max} \cdot T = k_w, \quad (2.13)$$

kjer je: λ_{max} ... valovna dolžina, ki ustreza vrhu spektralne gostote sevanja črnega telesa,
 T ... absolutna temperatura črnega telesa,
 k_w ... sorazmernostna fizikalna konstanta ($k_w = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$).



Slika 5: Wienov zakon

Stefan-Boltzmanov zakon podaja gostoto celotnega izsevanega energijskega toka za črno telo in ustreza integralu spektralne gostote sevanja črnega telesa pri določeni absolutni temperaturi T . Stefan je enačbo dobil na osnovi natančnih eksperimentov:

$$j = \sigma \cdot T^4. \quad (2.14)$$

Vsako telo, s temperaturo nad absolutno ničlo, oddaja energijo s sevanjem. Iz enačbe (2.14) lahko vidimo, da toplejši predmeti sevajo več energije kot hladnejši.

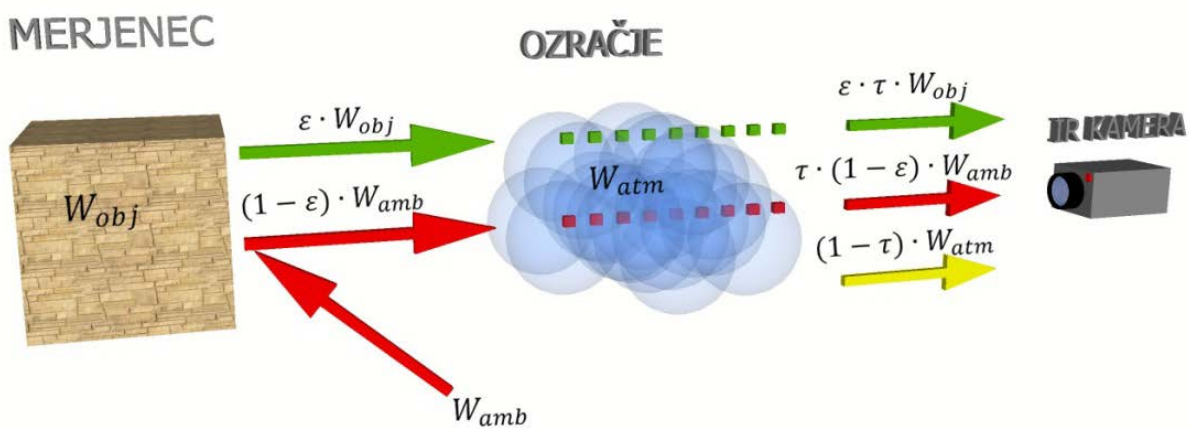
Realna telesa se ne obnašajo kot črna telesa, saj ne absorbirajo vsega vpadnega sevanja. Nekaj se ga tudi odbije ter prenese skozi. Absorptivnost in emisivnosti sta tu vedno manjši od 1.

2.6 Vplivi okolja

Delovanje infrardeče kamere je omejeno na območje atmosferskih oken. To je del spektra IR valovanja, ki ga ozračje najbolj prepušča. Najpomembnejše je atmosfersko okno med $7,5 \mu\text{m}$ ter $13,5 \mu\text{m}$.

Sevanje, ki potuje od merjenca do tarče, se v zraku nekoliko oslabi. To je posledica razprševanja delcev ter absorpcije sevanja plinov. Pri tem na meritve najbolj vpliva razdalja med kamero in merjencem, temperatura zraka ter relativna vlažnost. Izmerjena temperatura se namreč manjša z večanjem oddaljenosti med kamero ter merjencem. Zato je pomembno, da vplive okolja upoštevamo prek ustrezne korekcije.

Sevanje, ki zadane termokamero, prihaja iz treh različnih virov. Del sevanja prihaja direktno od merjenca (W_{obj}), del od drugih teles, ki so v okolici in reflektirajo na merjenca (W_{amb}), tretji del pa je prispevek zaradi emisivnosti ozračja (W_{atm}). Sevanje nato potuje do kamere, vendar del tega absorbira tudi ozračje. Zaradi Kirchhoffovega zakona ozračje sevanje tudi oddaja.



Slika 6: Merjenje predmeta s termokamero

Skupna količina sevanja, ki pade na objektiv je torej:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb} + (1 - \tau) \cdot W_{atm}, \quad (2.15)$$

kjer je: W_{tot} ...skupno sevanje, ki doseže termokamero,

W_{obj} ...sevanje merjenca,

W_{amb} ...sevanje okoliških teles,

W_{atm} ...sevanje ozračja,

ε ... emisivnost površine merjenca,

τ ... transmisivnost ozračja,

$(1 - \varepsilon)$... reflektivnost merjenca, ob upoštevanju nepropustnega telesa ($t=0$),

$(1 - \tau)$... emisivnost ozračja.

2.7 Izračun temperature

Termokamere se kalibrira na podlagi sevanja črnih teles. Sevanje se nato pretvori v temperaturo. Da bi dobili natančne podatke temperature za realno telo, potrebujemo tudi podatke o emisivnosti, ki je razmerje gostote izsevanega toka realnega telesa j_{RB} proti črnemu j_{BB} pri neki temperaturi in valovni dolžini.

$$\varepsilon = \frac{j_{RB}}{j_{BB}} \quad (2.16)$$

Kamera torej najprej določi sevanje črnega telesa, na podlagi Stefan-Boltzmanovega zakona pa pripadajočo temperaturo črnega telesa, ki se s koeficientom emisivnosti pretvori v temperaturo realnega telesa. Celoten izračun podaja enačba 2.6.

Začetna temperatura, ki jo odčita termokamera, je torej prenizka. Šele ko vnesemo podatek o emisivnosti, dobimo pravo vrednost temperature.

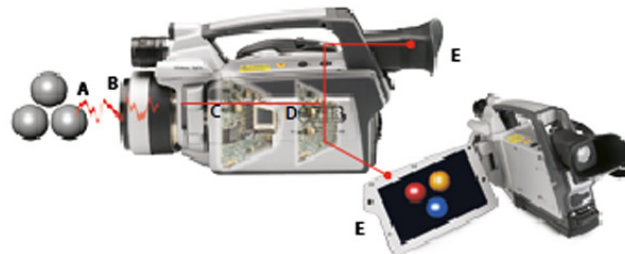
2.8 Osnove delovanja termokamere

Termokamera, ki jo v literaturi zasledimo tudi pod imenom toplotna ali infrardeča kamera, količino IR sevanja, ki prihaja od merjenca, prikaže kot sliko. Ta infrardeča slika je prikazana z barvami in njihovimi odtenki, odvisno v kateri barvni paleti prikazujemo rezultate. Vsaka barva v paleti prikazuje neko vrednost temperature, njena razporeditev pa nam lahko posredno daje tudi informacije o različnih stanjih merjenca.

Sestava termokamere je zelo podobna normalni videokameri. Glavni sestavni deli so

- optika (B),

- detektor (C),
- elektronika (D),
- prikazovalnik slike (E).



Slika 7: Sestava termokamere (FLIR, 2011)

Detektor je srce termokamere, ki infrardeče sevanje pretvarja v električne signale. Je tudi najdražji element. Poznamo dve vrsti detektorjev, fotonske in termične. Fotonski za delovanje izkoriščajo fotoefekt, medtem ko termični spremembe različnih lastnosti materialov, ki so funkcija temperature. Prvi so hitrejši in občutljivejši, a zahtevajo tudi hlajenje, kar se odraža tudi v ceni in krajši življenjski dobi. Najbolj se uporabljajo bolometrični termični detektorji, saj so cenejši in zajamejo širši spekter infrardeče svetlobe.

Optika pri termokameri je izdelana na enak način kot pri videokameri, le da precej bolje prepušča infrardeče sevanje. Za to so potrebni drugačni materiali, ki pa so cenovno manj ugodni. Najpogosteje se uporabljata germanij in silicij.

Ko se sevanje preko detektorja pretvori v električne signale, te obdela še elektronika in jih prikaže na prikazovalniku kot sliko.

2.9 Tehnike merjenja pri aktivni termografiji

2.9.1 Impulzna termografija (angl. pulsed thermography)

Impulzna termografija je zelo popularna metoda, pri kateri preizkušanelec najprej grejemo, nato pa merimo njegovo ohlajanje. Gre za hitro metodo, ki temelji na kratkem času gretja - od nekaj milisekund za dobro prevodne materiale, pa do nekaj minut za slabe prevodnike toplote. Zaradi kratkega časa merjenja je njena prednost v tem, da ni visokih temperatur, ki bi lahko poškodovali merjenec.

Med segrevanjem temperatura površine preizkušanca naraste, nato pa se energija z difuzijo prenaša v globino. Anomalije nekaj energije akumulirajo in s tem povzročijo moten toplotni tok, kar nam omogoča, da jih zaznamo. Globlje kot so anomalije, kasneje jih opazimo. Čas, v katerem anomalijo najbolj opazimo, je namreč obratno sorazmeren s toplotno difuzijo in premo sorazmeren kvadratu njene globine:

$$t \sim \frac{z^2}{\alpha}, \quad (2.17)$$

kjer je: t ...čas največjega temperaturnega kontrasta [s],
 z ...globina anomalije [m],
 α ...toplotna difuzija [m^2/s].

Globina anomalije je prav tako povezana z največjim kontrastom temperature napram okolici. Največji temperaturni kontrast je namreč obratno sorazmeren s kubikom globine anomalije:

$$c \sim \frac{1}{z^3}, \quad (2.18)$$

kjer je: c ...največji temperaturni kontrast [K],
 z ...globina anomalije [m].

2.9.2 Ponavljajoča termografija (angl. step heating)

Z razliko od impulzne termografije, kjer nas zanima sprememba temperature na merjencu po končanem gretju, tu spremljamo tudi njeno naraščanje med samim gretjem. Merjenec se greje v več korakih in z nizko močjo.

2.9.3 Zaprta termografija (angl. lockin thermography)

Ta metoda temelji na ustvarjanju toplotnih valov v preizkušancu zaradi periodičnega vzbujanja toplote.

2.9.4 Vibracijska termografija (angl. vibrothermography)

Vibracijska termografija mehanske vibracije pretvarja v toplotno energijo. Toplota se sprošča s trenjem na lokaciji anomalije.

3 UPORABA TERMOGRAFIJE V GRADBENIŠTVU

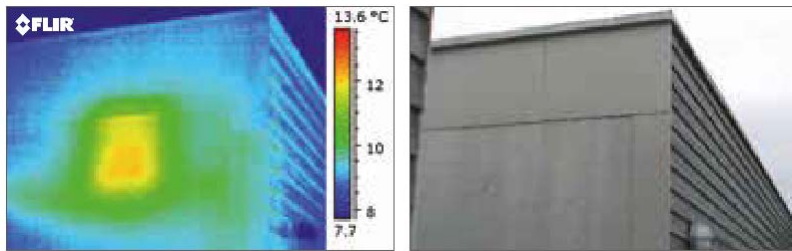
Od sedemdesetih let prejšnjega stoletja naprej smo se ljudje začeli bolj in bolj zavedati, da je energija dragocena in njeni viri omejeni. V želji po zmanjšanju in učinkovitejši rabi energije v gradbeništvu, ki predstavlja kar 40% celotne porabe energije v EU, so se zasnovali številni zakoni, ki predpisujejo najvišjo porabo (FLIR, 2011). Pri tem termografija omogoča, da ugotovimo ali je objekt grajen v okviru dovoljenih vrednosti.

S termografijo lahko analiziramo lastnosti objekta, ki so sicer navzven nevidne. Njena uporaba v gradbeništvu je tekom let postala zelo široka. Omogoča nam, da:

- izvajamo preglede objektov,
- najdemo toplotne mostove,
- ugotovimo nepravilnosti v konstrukciji pri vgradnji gradbenih elementov in materialov,
- ugotavljamo kvaliteto izolacijskih materialov,
- ugotovimo obnašanje konstrukcije in njenih elementov v požaru,
- iščemo pomanjkljivosti ovoja stavbe,
- najdemo vlago v objektu in se izognemo pojavu plesni,
- odkrivamo pomanjkljivosti in potek inštalacij (talno in stensko ogrevanje, odtoki, toplovodne cevi...),
- nadzorujemo in evidentiramo izvajanje energetske in gradbene ukrepe na stavbi,
- ugotovimo netesnosti oken in vrat,
- neporušne preiskave gradbenih materialov in konstrukcijskih elementov.

3.1 Primeri nepravilnosti pri vgradnji gradbenih elementov in materialov

Pri ugotavljanju nepravilnosti pri vgradnji gradbenih elementov in materialov ter s tem povezanih energijskih izgub je priporočljivo, da je razlika med zunanjo temperaturo in tisto v stavbi vsaj 10 °C. Pri nas se meritve praviloma izvajajo v zimskem času, ko je temperaturna razlika med notranjim zrakom in zunanostjo najvišja.

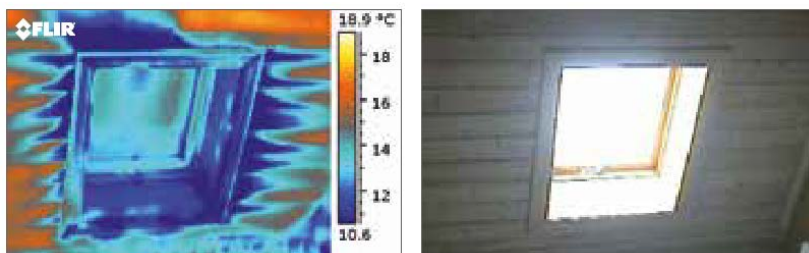


Slika 8: Manjkajoč panel termoizolacije (FLIR, 2011)

Notranjost objekta je toplejša od zunanega zraka (Slika 8). Stena zgradbe je sestavljena iz dveh plasti betona, med katerima se nahaja še toplotna izolacija. Iz termo slike se jasno vidi, da en panel termoizolacijskega materiala ni bil vgrajen. Brez uporabe termokamere bi napaka ostala skrita, ne glede na to ali steno opazujemo iz zunanje ali notranje strani.

3.2 Netesnost oken

Povečano porabo energije in nastanek kondenzacije lahko povzročijo tudi slabo tesnjena okna in uhajanje zraka.

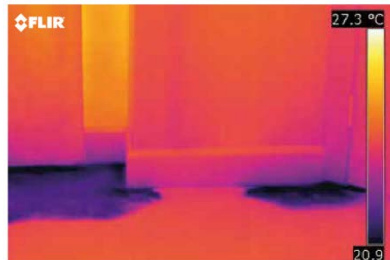


Slika 9: Slabo tesnjeno strešno okno (FLIR, 2011)

3.3 Odkrivanje vlažnosti

Posledice delovanja vlage se kažejo pri poškodbah na zidovih, propadanju temeljev, odpadanju ometa, poškodovani notranji opremi, ... Dolgotrajna čezmerna vlažnost lahko celo

resno ogrozi statično trdnost objekta, poleg tega pa zaradi nastanka plesnobe negativno vpliva na zdravje uporabnikov.

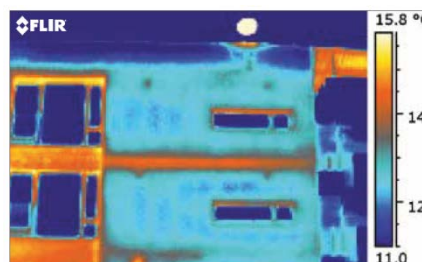


Slika 10: Vdor vlage na tleh (FLIR, 2011)

Da je termografija pri zaznavanju vlage lahko uporabna, moramo konstrukcijo najprej segreti. Vlažni materiali se namreč počasneje ohlajajo kot suhi in kontrast na termografski sliki postane bistveno večji.

3.4 Toplotni mostovi

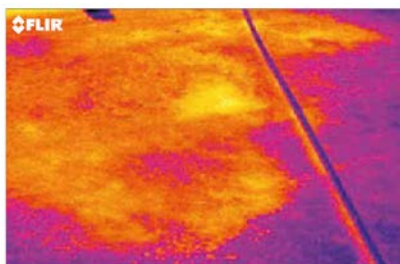
Pri stikovanju konstrukcijskih elementov se pogosto srečamo s toplotnimi mostovi. Ti povzročijo izrazite toplotne izgube, zniža se notranja površinska temperatura, kar lahko v najslabšem primeru privede do nastanka kondenzacije. Z uporabo termografije so te napake hitro in enostavno odkrite.



Slika 11: Toplotni most (FLIR, 2011)

3.5 Pronicanje vode

Termografija se uporablja tudi za odkrivanje mesta pronicanja vode. To se najpogosteje zgodi pri nenatančni izvedbi hidroizolacije na ravnih strehah. Meritve se opravijo ponoči ali pozno zvečer, ko se ozračje ter suhi deli ohladijo, voda pa dlje časa zadrži višjo temperaturo.

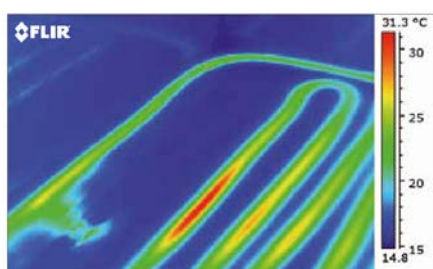


Slika 12: Pronicanje vode na ravni strehi (FLIR, 2011)

Z uporabo termokamere lahko enostavno odkrijemo mesto nepravilnosti in s tem izrazito zmanjšamo stroške sanacije.

3.6 Nepravilnosti v sistemu talnega gretja

Zaradi tople vode, ki se pretaka po ceveh sistema talnega gretja, so le-te vidne celo pod površjem in tako lahko hitro vidimo ter odkrijemo mesto z napako.



Slika 13: Počena cev v sistemu talnega gretja (FLIR, 2011)

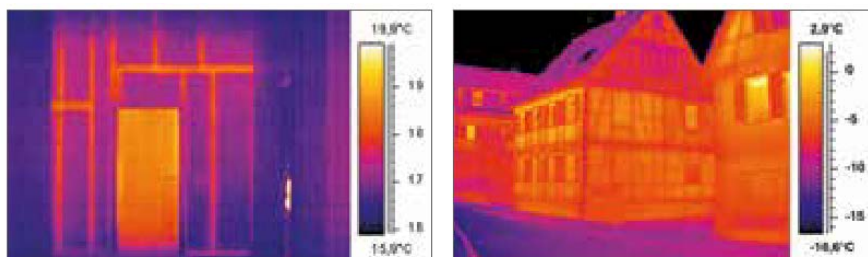
3.7 Zagotavljanje kvalitete

Termografija se uporablja tudi za potrebe zagotavljanja kvalitete stavbe ter pri pregledu in nadzoru novogradnje. Uporabna je tudi za ugotavljanje vlage v mladem betonu, kar nam omogoči, da izvedemo ukrepe, s katerimi pospešimo sušenje. Če je to mogoče, se lahko stavba po zaslugi termografije hitreje preda naročniku v uporabo.

3.8 Sanacija

S pomočjo termografije lahko dobimo pomembne podatke pri sanaciji stavb in spomenikov. Če imamo endoskeletni sistem, lahko s termokamero enostavno in jasno vidimo potek nosilne konstrukcije, četudi je ta skrita pod finalnimi oblogami.

Možna je tudi zaznava mest, kjer se finalna obdelava loči od zida in tako lahko pravočasno in uspešno ukrepamo.



Slika 14: Posnetek, kjer se jasno vidi endoskeletna nosilna konstrukcija (FLIR, 2011)

3.9 Instalacija

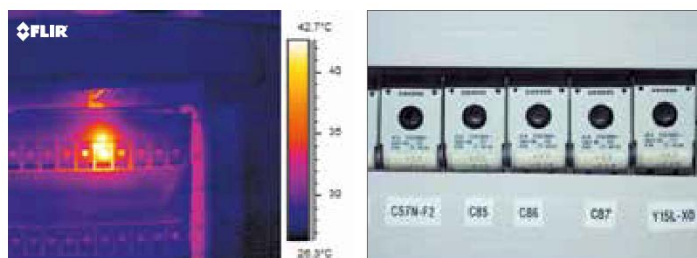
Zelo pogosta uporaba termografije je tudi pri detekciji zamašenih delov ali kakšnih drugih nepravilnosti v ceveh.



Slika 15: Detekcija nepravilnosti pri ceveh (FLIR, 2011)

3.10 Električna

Skoraj vsaka stavba ima veliko električnih napeljav in naprav. S termokamero lahko snemamo tudi električne omarice, varovalke, stike, ... Nepravilnosti v električnem omrežju se pogosto kažejo s povišanjem temperature na teh mestih. Če napake ne najdemo pravočasno, je v najslabšem primeru možen tudi vžig zaradi visokih temperatur in isker.



Slika 16: Pregrevanje varovalke (FLIR, 2011)

3.11 Termografija na področju neporušnih preiskav

Zadnje časa je uporabnost termografije moč zaslediti tudi pri neporušnih preiskavah gradbenih materialov in konstrukcijskih elementov, vendar je področje še precej raziskovalno. Za razumevanje fizikalnih procesov termografije pri uporabi na gradbenih materialih so v veliko pomoč enostavni testni preizkušanci, na katerih se lahko učimo. Tu je v preteklosti že delovala npr. skupina raziskovalcev na BAM-u (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) iz Nemčije v okviru projekta Onsiteformasonry (BAM, ITAM, 2004), ki je obsegal

uporabo različnih neporušnih metod na zidanih objektih, med katerimi je bila vključena tudi termografija.

Preko testnih betonskih preizkušancev so ugotavljali možnosti zaznave delaminacije različnih plasti, pozicije stikov posameznih elementov, nepravilnosti pri vgrajenih ojačitvah ter vlažnih mest v zidanih elementih in ostalih možnih nepravilnostih. Pridobljeno znanje so nato aplicirali tudi v praksi, ko so s pomočjo termografije lahko zaznali različne nepravilnosti v zgodovinskih stavbah, kot so Altes Museum v Berlinu ter na gradu Wartburg. Pri nas pa so podobne preiskave skupaj z BAM-om izvajali tudi člani Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij iz Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. V okviru projekta CULTURE 2000 so sodelovali pri aplikaciji termografije za diagnostiko zgodovinskih objektov (Bosiljkov in sod., 2010)

4 IZVEDBA AKTIVNE TERMOGRAFSKE MERITVE NA GRADBENIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTIH IN OBDELAVA TERMOGRAFSKIH PODATKOV ZA VIZUALIZACIJO REZULTATOV

4.1 Meritve

Način izvedbe in uspešnost termografskih meritev je odvisen predvsem od zgradbe preizkušanca, kaj na njem preiskujemo, razpoložljivih naprav in sposobnosti osebja, ki delo opravlja.

Za uspešne meritve je pomembno, da je preizkušanec dovolj dostopen in čim bolj homogen, z enakomerno emisivnostjo ter nizko reflektivnostjo. Izogniti se želimo posrednemu, odbitemu sevanju, premočnemu vetru in veliki količini prahu v zraku.

4.2 Oprema

Za izvedbo termografskih meritev potrebujemo ustrezno grelna napravo, infrardečo kamero in računalnik, ki služi za shranjevanje in obdelavo dobljenih podatkov.

4.2.1 Grelna naprava

Pri izvajanju aktivne termografije je za študijo časovne odvisnosti temperaturnega ohlajanja preizkušanca zelo pomembno, da preizkušanec ogrevamo čim bolj enakomerno. Možna je uporaba različnih načinov gretja, ki delujejo na principu konvekcije, kondukcije ali pa radiacije. Priporočljivo je, da se gretje opravlja s pomočjo računalniško vodenih skenerjev, saj tako dosežemo najvišjo stopnjo homogenosti. Čas segrevanja lahko variira od nekaj sekund pa vse tja do 60 min ali več, vendar merjenca ne želimo pregreti in s tem povzročiti dodatnih poškodb. Namesto gretja je seveda možno tudi hlajenje preizkušanca.

4.2.2 Termokamera

Ohlajanje merjenca spremljamo in beležimo s pomočjo termokamere. Pred začetkom izvajanja meritev je pomembno, da izberemo tako kamero, ki omogoča čim bolj optimalno izvajanje načrtovanih nalog. Pri tem je potrebno upoštevati njene tehnične specifikacije v odvisnosti od potreb in nalog, ki jih bomo z njo opravljali, njene zmožnosti uporabe v realnih pogojih, razpoložljive programske opreme in usposobljenosti uporabnika.

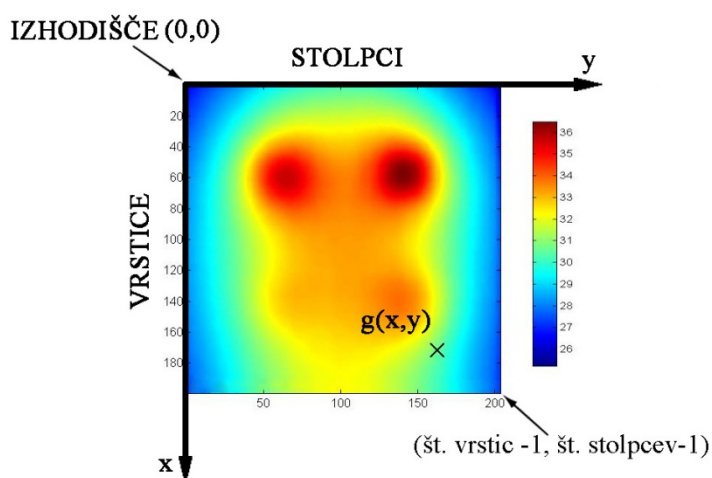
4.2.3 Programska oprema

Meritve je potrebno tudi shraniti, ustrezno obdelati in ovrednotiti. Za vse to potrebujemo primerno programsko opremo, ki pa je v večji meri pogojena z izbiro same termokamere ter zahtev in potreb po nadaljnji obdelavi podatkov.

4.3 Obdelava podatkov

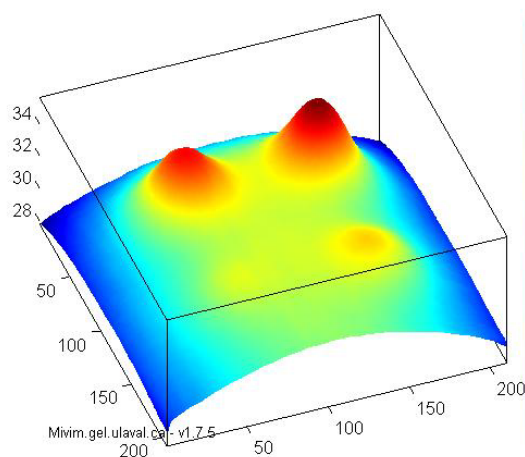
4.3.1 Osnove termografske slike

Digitalna slika je zvezna funkcija $g(x,y)$, ki je diskretizirana po prostorskih spremenljivkah in amplitudi. Lahko jo razumemo tudi kot matriko, kjer stolpci in vrstice predstavljajo koordinate točk na sliki, medtem ko same vrednosti predstavljajo stopnjo jakosti sevanja, temperature ali kontrasta.



Slika 17: Smeri osi pri termografiji

Podatki dobljeni iz infrardeče kamere so lahko 8, 12 ali 16 bitni, kar pomeni $2^8 = 256$ (0 do 255), $2^{12} = 4096$ (0 do 4095) ali $2^{16} = 65536$ jakostnih stopenj. Te navadno prikazujemo na traku z različnimi barvami ali njihovimi odtenki. Možen je tudi prikaz v 3D grafični obliki. Tu dodamo sliki še tretjo dimenzijo, ki predstavlja stopnjo jakosti. Višji kot je vrh, višja je stopnja jakosti.



Slika 18: Termografska slika v 3D grafični obliki

Velikost termografske slike je odvisna predvsem od infrardeče kamere. Običajne velikosti so od 64 x 64 pa vse do 512 x 512 in več točk. Možna je tudi pravokotna razporeditev točk. V splošnem velja:

$$g(x, y) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \dots & g(0, \text{št. stolpcev} - 1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \dots & g(1, \text{št. stolpcev} - 1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g(\text{št. vrstic} - 1, 0) & g(\text{št. vrstic} - 1, 1) & \dots & g(\text{št. vrstic} - 1, \text{št. stolpcev} - 1) \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$

Velikost slike je definirana kot

$$\text{št. vrstic} \cdot \text{št. stolpcev} \cdot b, \quad (4.2)$$

kjer je b število bitov.

Prostorska ločljivost slike je torej odvisna od velikosti matrike $g(x,y)$. Več vrstic in stolpcev oz. pikselov kot imamo, večja je ločljivost in obratno. Na žalost pa večja matrika pomeni tudi večjo količino podatkov in bolj dolgotrajno računanje. V splošnem je za opravljanje neporušnih preiskav gradbenih materialov priporočena minimalna prostorska ločljivost 2 mrad.

Poleg prostorske ločljivosti ima bistveno vlogo na kvaliteto meritev tudi temperaturna ločljivost, ki je karakteristika infrardeče kamere. Za opravljanje neporušnih preiskav gradbenih materialov je priporočena minimalna temperaturna ločljivost 0.2 K.

V primeru, da želimo spremljati časovno odvisnost temperaturnega profila, potrebujemo zajemanje slik z dovolj visoko frekvenco. Tu ima pomembno vlogo kompromis med pravšnjo frekvenco zajemanja slik in časom trajanja meritve, saj lahko sicer drastično povečamo velikost celotnega posnetka. Za opravljanje neporušnih preiskav gradbenih materialov je priporočena frekvenca nekaj Hz, čas zajemanja meritev pa nekaj minut, odvisno od globine predpostavljenih anomalij.

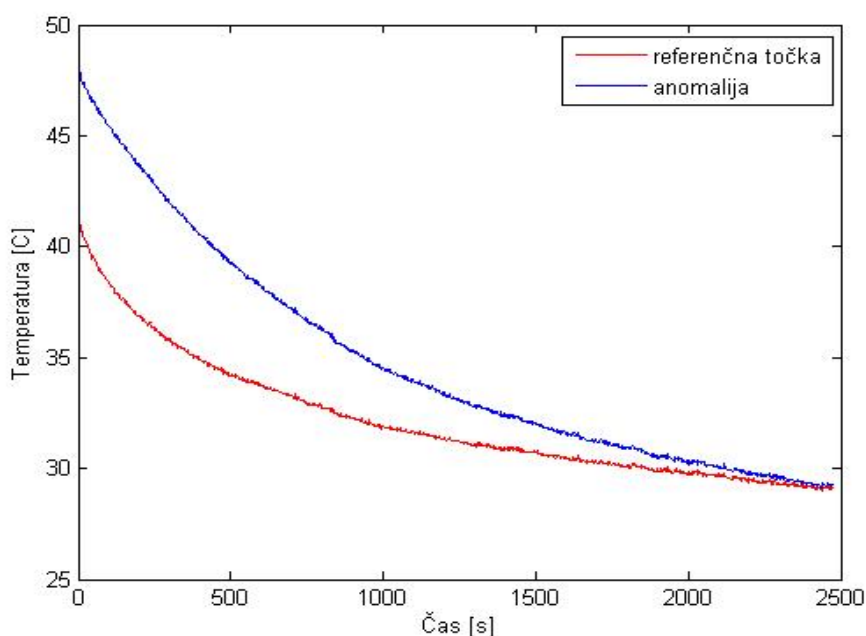
4.3.2 Načini obdelave podatkov pri aktivni termografiji

4.3.2.1 Temperaturni kontrast pri impulzni termografiji

Osnova termografije je merjenje temperature preizkušanca. Če spremljamo tudi njeno spreminjanje s časom, lahko za vsako točko, ki jo posnamemo, narišemo grafikon površinske temperature v odvisnosti od časa.

Tu nas zanima predvsem, kako po končanem gretju preizkušanca površinska temperatura pada za točko nad anomalijo (angl. defect area) v primerjavi z neko drugo referenčno točko brez anomalije (angl. sound area).

Raziskovalci na področju termografije so ugotovili, da je $t_{\Delta T_{\max}}$ premosorazmeren kvadratu globine anomalije in obratno sorazmeren s toplotno difuzivnostjo (enačba 2.17). Ta nam pove, kako hitro se materiali segrevajo, oziroma ohlajajo ob spremembi temperature v okolici. Večja kot je toplotna difuzivnost, hitreje se prenaša toplota.



Slika 19: Površinska temperatura v odvisnosti od časa za točko nad anomalijo in referenčno točko

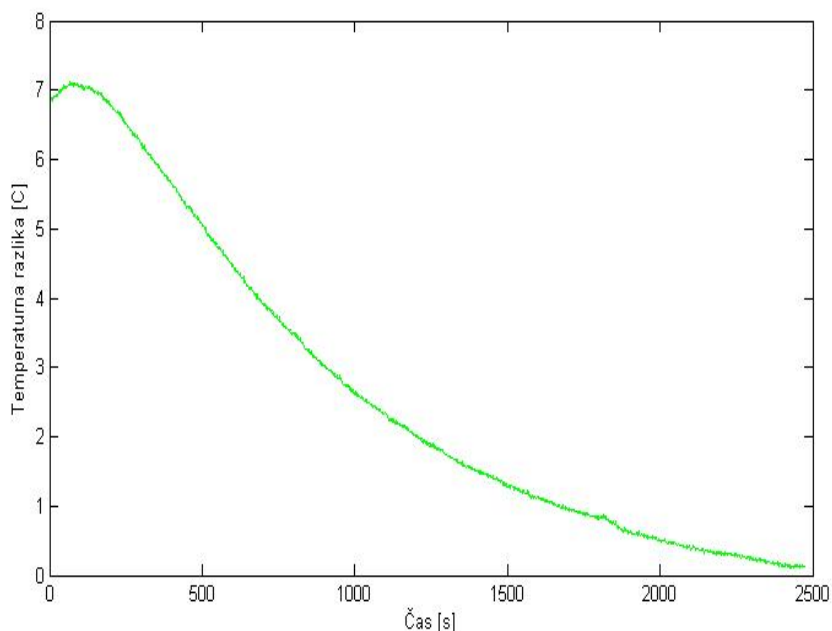
Ti dve krivulji lahko med seboj odštejemo in dobimo novo krivuljo temperaturne razlike v odvisnosti od časa. To lahko zapišemo z enačbo:

$$\Delta T(t) = T_{def}(t) - T_s(t), \quad (4.3)$$

kjer je: $\Delta T(t)$...temperaturna razlika med točko nad anomalijo ter referenčno točko, t.i. temperaturni kontrast,

$T_{def}(t)$...temperatura točke nad anomalijo,

$T_s(t)$...temperatura referenčne točke.



Slika 20: Temperaturna razlika med referenčno točko in točko nad anomalijo

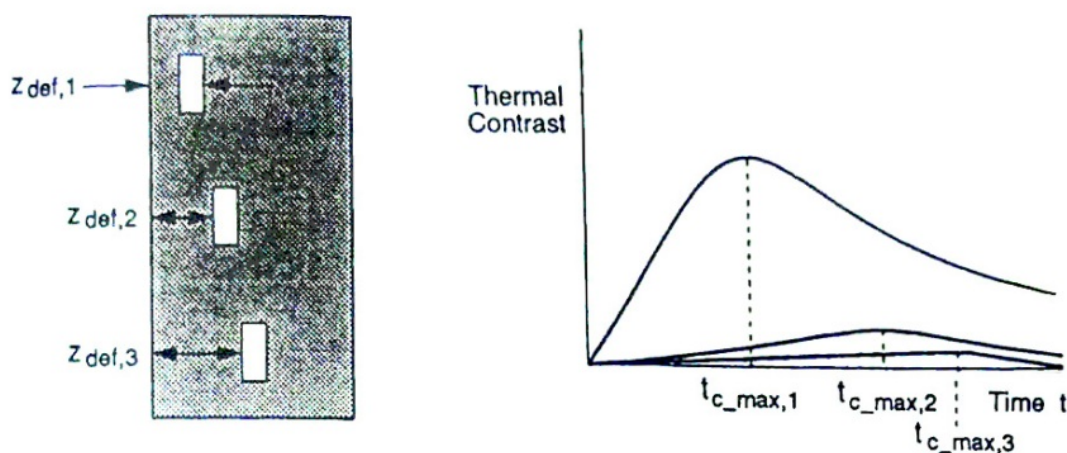
Take krivulje imajo po navadi vrh temperaturne razlike ΔT_{max} pri nekem času $t_{\Delta T_{max}}$, kar pa je odvisno predvsem od globine, vrste in termičnih lastnosti anomalij ter od časa gretja preizkušanca. Zaradi tega bi teoretično analiza kontrastnih krivulj lahko karakterizirala vrsto in tip anomalij.

4.3.2.2 Obdelava podatkov pri pulzno-fazni termografiji (angl. pulsed phase thermography)

Obdelava podatkov pri pulzno-fazni termografiji temelji na frekvenčni analizi časovne sekvence, na podlagi katere dobimo amplitudne in fazne slike. To nam omogoča uporaba hitre Fourierove transformacije (FFT). S takim načinom obdelave podatkov povežemo impulzno in zaprto termografijo.

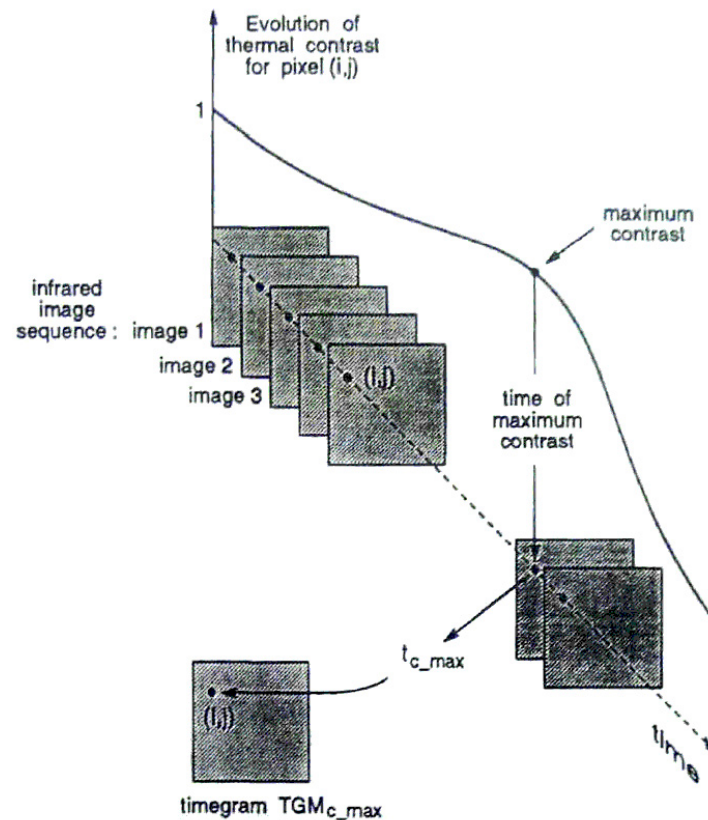
4.3.2.3 Toplotna tomografija (angl. thermal tomography)

Toplotna tomografija nam omogoča opazovanje preizkušanca po plasteh. Na sliki 21 je prikazano, kako se kontrasti temperatur spreminjajo po času v odvisnosti od globine. Če pogledamo enačbo 2.17 vidimo, da je čas, pri katerem je temperaturni kontrast največji (t_{c_max}), premo sorazmerno odvisen od kvadrata globine anomalije, ko imamo opravka s homogenimi materiali. Globlje kot so anomalije, večji bo t_{c_max} .



Slika 21: Čas, ko se pojavi največji kontrast temperature v odvisnosti od globine anomalij
(Maldague, 2001)

Čas, ko nastopi največji temperaturni kontrast, lahko izračunamo v vsaki točki merjenega objekta. Če te vrednosti združimo, lahko ustvarimo t.i. časovno sliko (timegram). Postopek je prikazan na sliki 22.



Slika 22: Prikaz konstruiranja časovne slike (Maldague, 2001)

Pri enakomernem gretju površine predmeta, bi tako imela območja z enakimi termalnimi lastnostmi enake t_{c_max} . Časovne slike lahko omejimo na maksimalen in minimalen čas $[t_1, t_2]$ in tako spremljamo le določene t_{c_max} . Ker vemo, da je t_{c_max} odvisen od globine, se z različnimi časovnimi intervali lahko na nek način premikamo po globini preizkušanca.

5 TERMOGRAFSKA PREISKAVA BETONSKIH ELEMENTOV

Za preverjanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih elementih so se pripravili štiri preizkušanci. Vsak od njih je imel vgrajene različne anomalije v odvisnosti od velikosti, globine in materiala.

5.1 Opis priprave elementov

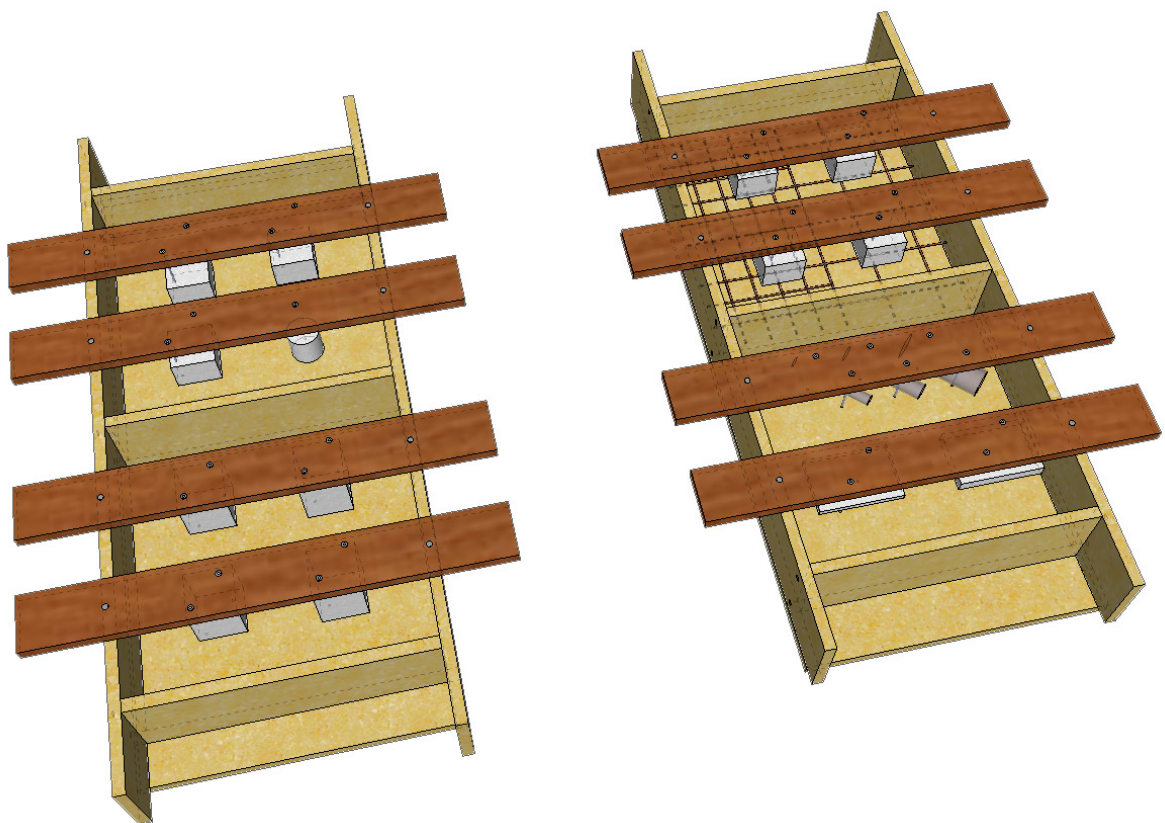
Kot osnovo za preizkušance smo naredili kvadratne prizme velikosti 50 cm x 50 cm x 15 cm. V vse preizkušance je bil vgrajen enak beton (samozgoščevalni SCC beton), narejen po recepturi:

- Cement CEM I 42,5 R: 16 kg
- Apnenčeva moka: 10,4 kg
- Voda: 7,2 kg
- Drobljen apnenčev agregat (po frakciji):
 - 0/2mm: 13,52 kg
 - 0/4mm: 28,2 kg
 - 4/8mm: 14,68 kg
- Superplastifikator SIKA Viscocrete 5 NPL (0.6%): 158,4 g
- Zračna poroznost: 2,5 %

Pri preizkušancih smo uporabili različne materiale s katerimi smo simulirali anomalije. Njihove termične lastnosti so podane v preglednici 3.

Preglednica 3: Termične lastnosti uporabljenih materialov (¹ Brink, 2005; ² Maldague, 2001)

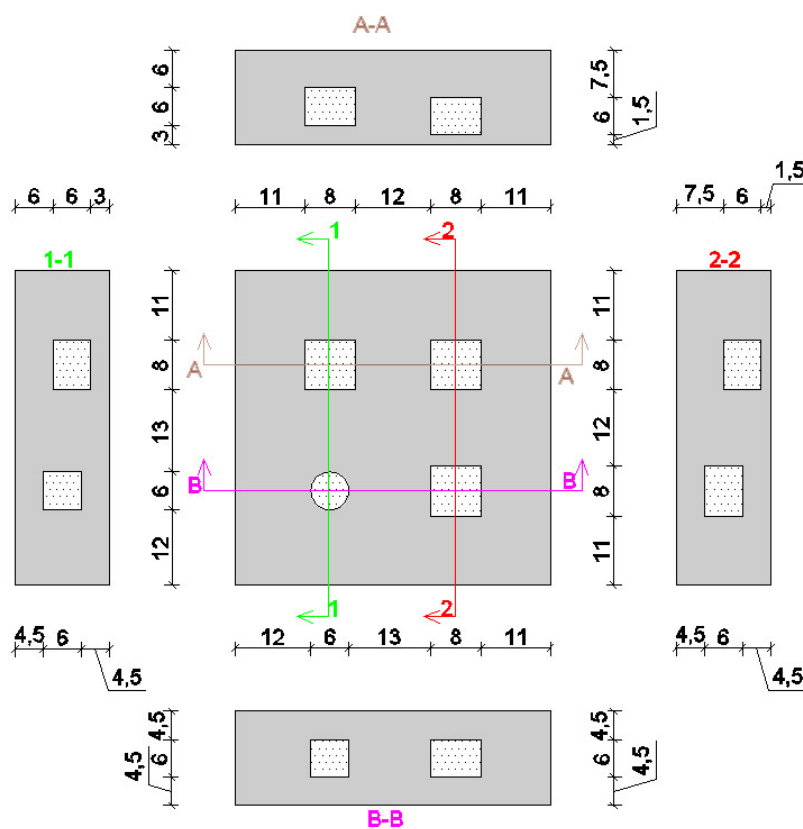
	BETON	STIROPOR	ZRAK	VODA	JEKLO (C=1%)
k [W/(m·K)]	2,1 [1]	0,035 [1]	0,026 [1]	0,60 [2]	43 [2]
ρ [kg/m ³]	2400 [1]	20 [1]	1,149 [1]	1000 [2]	7801 [2]
c [J/(kg·K)]	1000 [1]	1500 [1]	1007 [1]	4180 [2]	473 [2]
α [*10 ⁻⁷ m ² /s]	8,75 [1]	11,7 [1]	228 [1]	1,4 [2]	117,2 [2]



Slika 23: Model opaža prvega ter drugega preizkušanca (na levi) in tretjega ter četrtega preizkušanca (na desni).

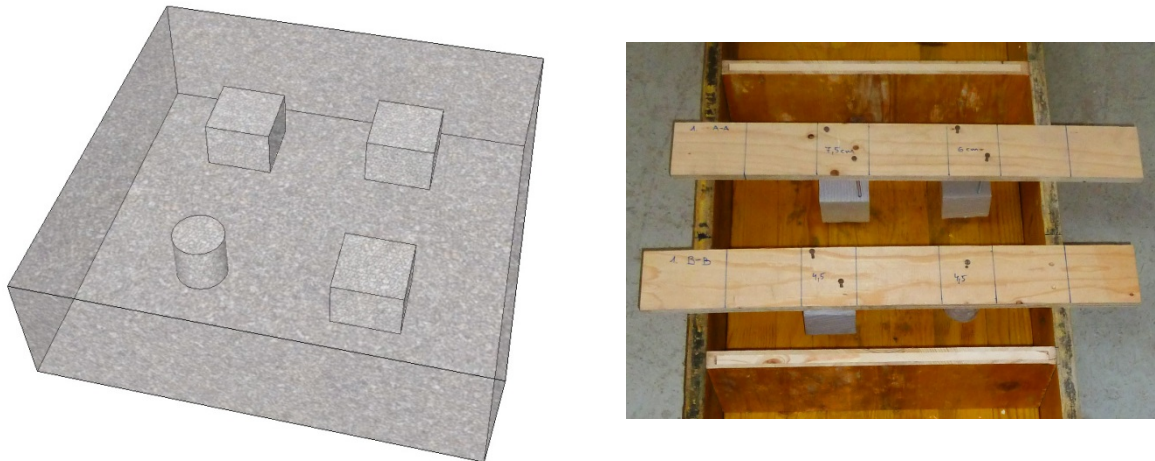
5.1.1 Prvi preizkušaneec

S prvim preizkušaneecem smo želeli preučiti odvisnost globine zračne votline na zaznavanje s termografijo. Naredil sem 3 kvadre ter 1 valj iz ekspaniranega polistirena. Kvadri so bili dimenzij $8 \times 8 \times 6 \text{ cm}^3$, valj pa je imel premer 6 cm, prav toliko pa je bil tudi visok. Z njimi smo želeli simulirati zračne votline v betonu. Kvadri so bili postavljeni na globine 1,5 cm, 3 cm in 4,5 cm od površja, valj na globino 4,5 cm.



Slika 24: Načrt prvega preizkušaneca

Zaradi sile vzgona sem moral vgrajene elemente fiksirati, da se ne bi dvignili na površje betona ali se kako drugače premaknili. Pri tem sem si pomagal z dolgimi in debelimi žebli, ki sem jih zabil skozi deske in jih zasidral v EPS, kot je razvidno iz slike 23.

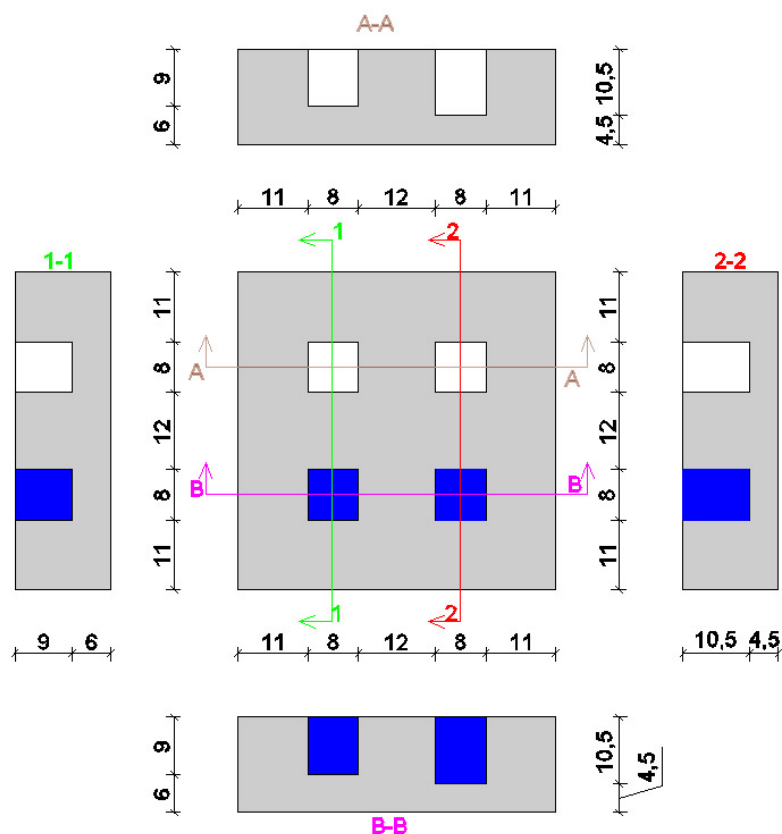


Slika 25: Model 1. preizkušanca ter 1. preizkušanec pred betoniranjem

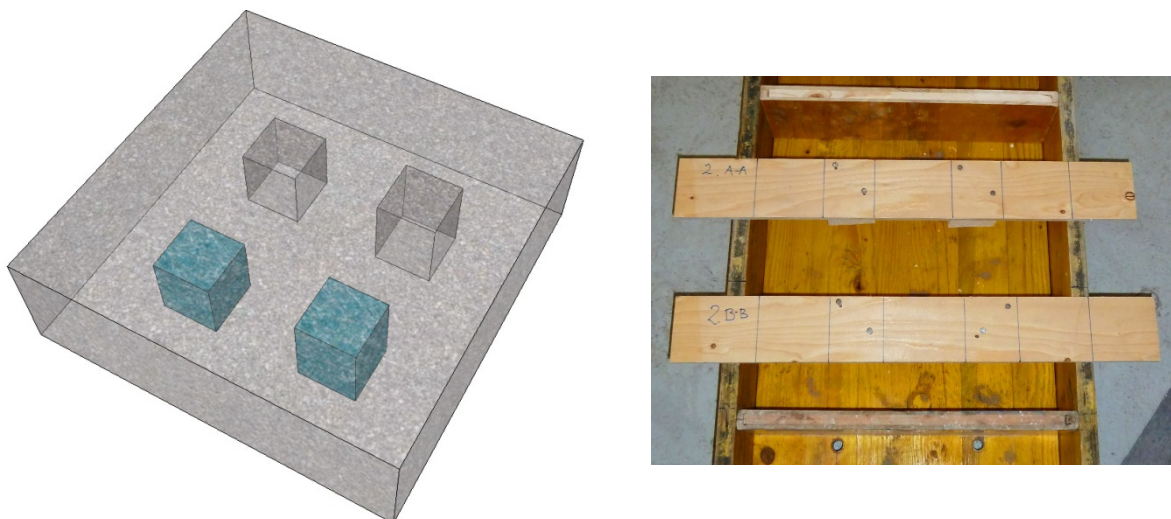
Ker nisem hotel imeti negativnih vplivov kovine, sem žeblice ovil v plastiko, saj jih je bilo tako lažje izvleči iz preizkušanca v fazi strjevanja betona.

5.1.2 Drugi preizkušanec

Pri drugem preizkušancu smo želeli analizirati vpliv različnih materialov na uspešnost zaznavanja anomalij. Simuliral sem vodo, ki je ujeta v betonu, in pravo zračno votlino. V betonu smo zato naredili štiri luknje. Dve sta bili globoki 9 cm, dve pa 10,5 cm (Slika 26). Luknje smo naredili tako, da smo med betoniranjem uporabili EPS, ki smo ga po strditvi betona odstranili.



Slika 26: Načrt drugega preizkušanca (modra barva označuje vodno anomalijo)



Slika 27: Model 2. preizkušanca ter 2. preizkušavec pred betoniranjem

Ko se je beton strdil, sem zgornji dve luknji pustil prazni, v spodnji pa sem vstavil vodo s pomočjo balončkov, ki so zapolnili volumen posamezne luknje.

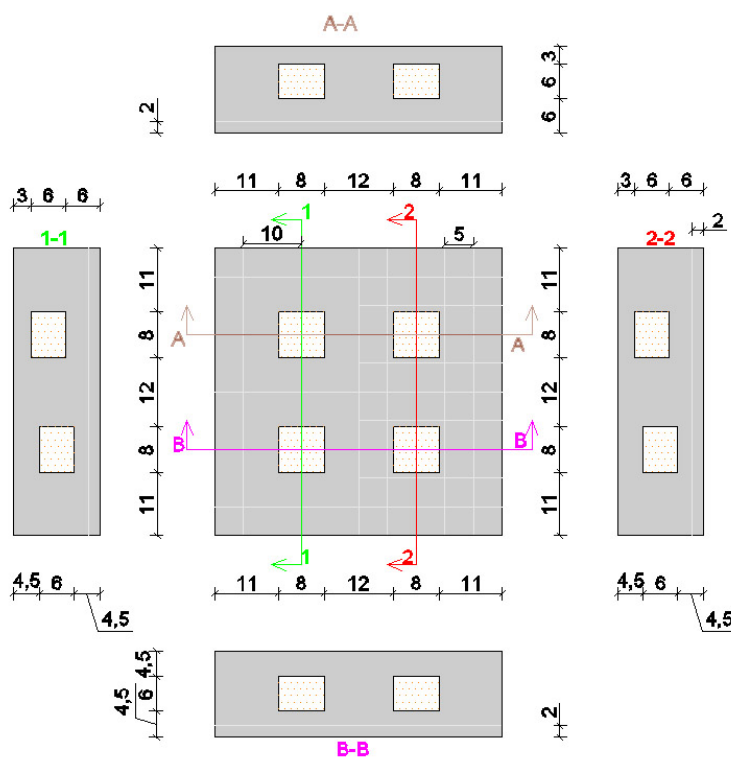
$$V_1 = A \cdot h_1 = 8 \text{ cm} \cdot 8 \text{ cm} \cdot 9 \text{ cm} = 576 \text{ cm}^3 \quad (5.1)$$

$$V_2 = A \cdot h_2 = 8 \text{ cm} \cdot 8 \text{ cm} \cdot 10,5 \text{ cm} = 672 \text{ cm}^3 \quad (5.2)$$

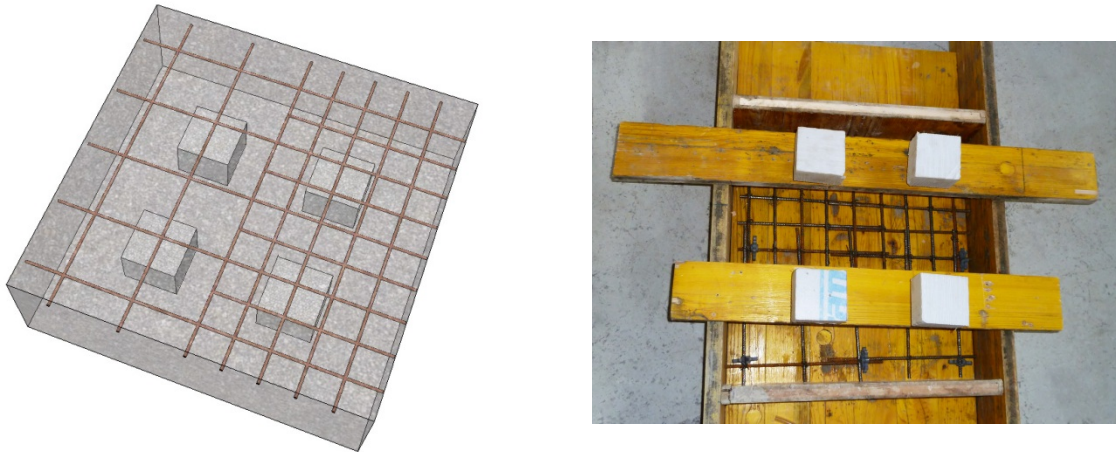
5.1.3 Tretji preizkušane

V tretjem primeru nas je zanimal vpliv armature pred anomalijo na učinkovitost zaznavanja s termografijo. V ta namen sem naredil armaturo, ki je bila prekrita z dvema centimetroma krovne plasti. Pri mreži sem uporabil dva različna rastra. Manjši je bil 5 cm x 5 cm, večji pa 10 cm x 10 cm.

V beton sem nato vstavil še štiri kvadre ekspaniranega polistirena velikosti 8 x 8 x 6 cm³, ki sem jih postavil različno globoko, in sicer na 6 cm oziroma 4,5 cm.



Slika 28: Načrt tretjega preizkušanca

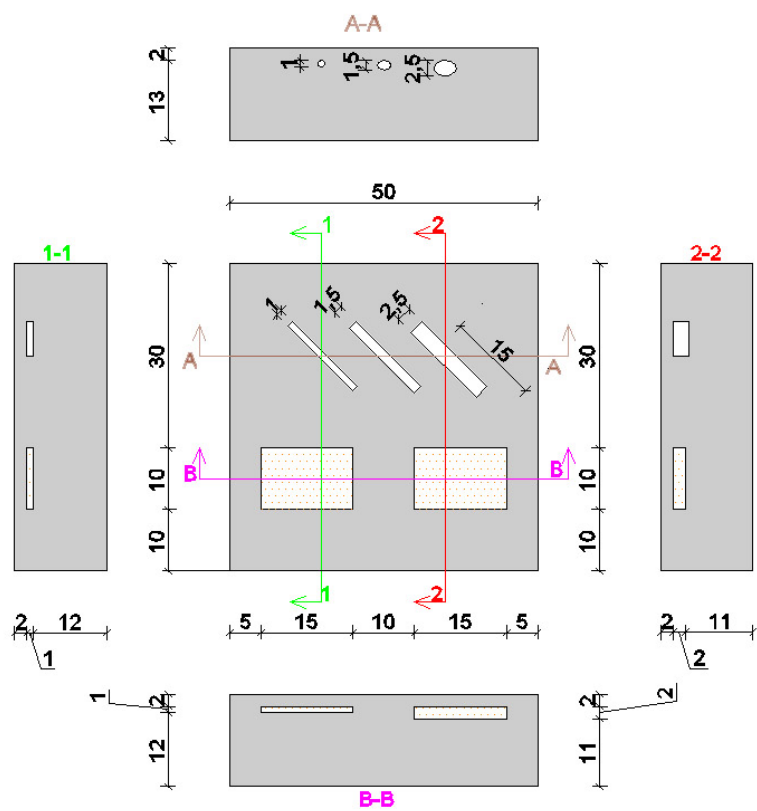


Slika 29: Model 3. preizkušanca ter 3. preizkušavec pred betoniranjem

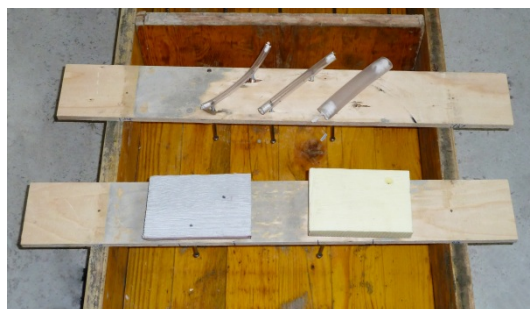
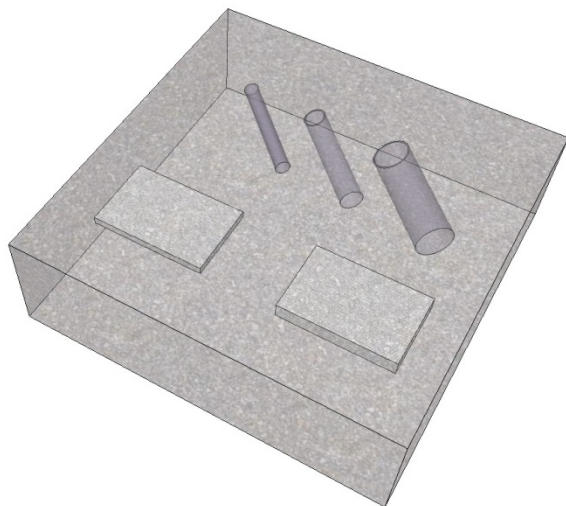
5.1.4 Četrty preizkušavec

Zanimalo me je tudi, kako bi se dalo s termografijo zaznati cevi v betonu. V zgornji del četrtega preizkušanca sem zato vstavil 3 PVC cevi. Vse so imele dolžino 15 cm, položene so bile v globino 2 cm, razlikovale pa so se po premeru. Najmanjša je imela 1 cm premera, naslednja 1,5 cm, največja pa je bila premera 2,5 cm. Pred začetkom betoniranja sem cevi tudi zamašil, da bi ostale votle.

V spodnji del preizkušanca sem vstavil plošči iz ekstrudiranega polistirena. Te bi lahko predstavljale kakšno delaminacijo. Plošči sta bili dimenzije 10 cm x 15 cm. Ena od njiju je imela debelino 1 cm, druga pa 2 cm, kolikor je pri obeh znašala tudi krovna plast.



Slika 30: Načrt četrtega preizkušanca



Slika 31: Model 4. preizkušanca ter 4. preizkušavec pred betoniranjem

5.2 Opis termografske opreme in postopka meritev

Teste sem opravljal v zaprtih in praznih prostorih zgradbe KPL, saj sem želel imeti čim manj zunanjih vplivov na meritve.



Slika 32: Snemanje preizkušanca

5.2.1 Gretje

Večji raziskovalni inštituti za gretje preizkušancev uporabijo skenerje, v našem primeru pa sem to poskušal doseči na več načinov. Najprej sem poizkusil z enim infrardečim grelcem, ki sem ga ročno premikal na konstantni razdalji. Zaradi vpliva človeškega faktorja z rezultati nisem bil zadovoljen, saj so se nekateri predeli preizkušanca bistveno bolj segreli kot drugi. Nato sem poizkusil s postavitvijo grelca na neko konstantno oddaljenost. Zaradi premajhne moči grelca se preizkušanec ni dovolj segrel, oziroma če sem ga postavil bližje, je segreval le določen predel. Kot najboljša varianta se je na koncu izkazala, da sem dva grelca, enega nad drugim, postavil na razdaljo 45 cm od preizkušanca. Pri tem sem uporabil električni sevalni peči tipa Quartz 1200. Vsaka od njiju je dimenzij 47 x 9 x 13,5 cm³ in ima nazivno moč 1200 W.



Slika 33: Sevalna peč, Quartz 1200

Čas segrevanja preizkušancev sem spreminjal od 5 min, 15 min, 30 min do 45 min. Po končanem gretju sem grelce kar se da hitro umaknil, pred tem pa že pripravil kamero za snemanje. Za pridobitev uporabnih podatkov je namreč zelo pomembnih že prvih nekaj sekund snemanja.

5.2.2 Snemanje

Za snemanje sem uporabil kamero FLIR A320. Kamera nima svojega LCD zaslona, zato je bila potrebna uporaba računalnika, na katerega se priključi s pomočjo ethernet kabla. Ohišje je iz aluminija in tehta 0,7 kg. Naprava je velika $17 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ in ima zmožnost snemanja do 30 slik na sekundo. Največja kakovost slike znaša 320×240 točk. Nehlajeni mikrobolometer kot detektor zajema IR spekter od 7,5 do $13 \mu\text{m}$, kar je seveda ravno v območju atmosferskega okna, in ima goriščno razdaljo 18 mm. Temperaturna ločljivost je 50 mK pri $30 \text{ }^\circ\text{C}$, prostorska ločljivost pa 1,36 mrad.

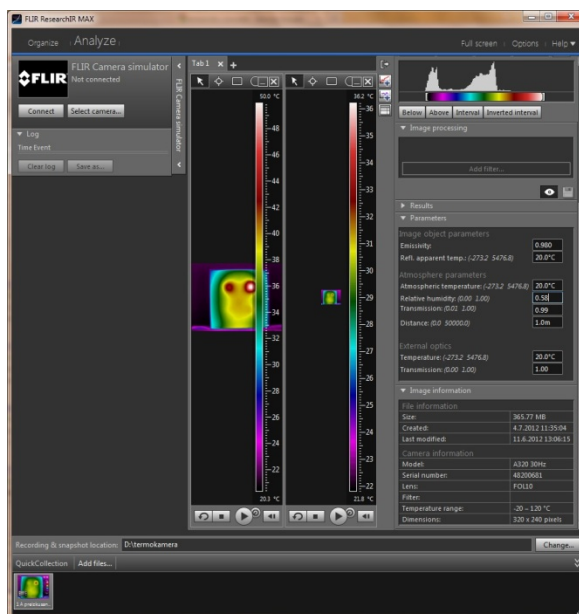


Slika 34: Uporabljena termokamera

Vse preizkušance sem snemal 45 min, na oddaljenosti 95 cm od njihove površine, pri frekvenci ene slike na sekundo (1 Hz) in 16 bitih/točko. Dodatno sem uporabil še širokokotni objektiv.

5.2.3 Programska oprema

Snemanje sem izvajal s pomočjo prosto dostopne demo verzije programa FLIR ResearchIR Max 3.2 (FLIR, 2012). Z njim sem upravljal s kamero, jo kalibriral, fokusiral in nastavil frekvenco ter čas snemanja.



Slika 35: FLIR ResearchIR Max 3.2 (pogovorno okno)

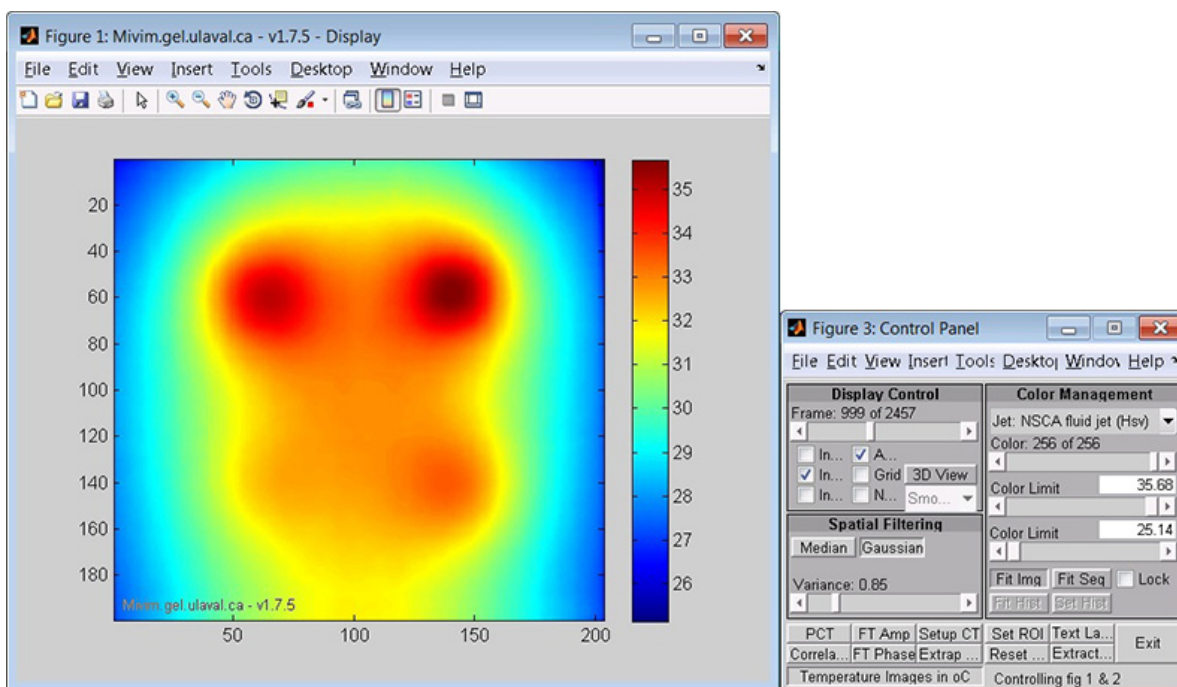
V programu je potrebno podati tudi različne parametre, s katerimi opravimo korekcijo zaradi zunanjih vplivov, in tako dobimo dejansko temperaturo preizkušancev. Glede na opazovan beton, sem za koeficient emisivnosti iz tabel izbral vrednost $\varepsilon = 0,93$. Potrebno je bilo vnesti tudi temperaturo zraka ter vlažnost, ki sem ju redno spremljal. Te vrednosti so bile spremenljive, zato sem vzel povprečje med začetno vrednostjo in vrednostjo na koncu merjenja. Upošteval sem tudi oddaljenost termokamere od preizkušanca ter transmisivnost ozračja, za katero sem ohranil priporočeno vrednost 1,0.

Za potrebe nadaljnje obdelave sem termografske sekvenčne datoteke izvozil v *.csv formatu. Kasneje sem podatke obdelal s pomočjo Matlab-a in prosto dostopnima knjižicama textscantool (McGarrity, 2007) ter IR_view (Pilla, Klein, 2008).

Textscantool je interaktivni grafični vmesnik za delo z datotekami velikih velikosti. Osnovne Matlabove funkcije namreč ne omogočajo uvoza datotek velikosti 1GB ali več. Program omogoča enostavno izbiro ter uporabo podatkov, ki jih potrebujemo.

IR_view je namenjen pregledovanju in obdelavi infrardečih slik za potrebe neporušnih metod. Pri svojih raziskavah sem ga uporabljal predvsem za pregledovanje temperaturnih slik po

različnih časih, jih opazoval z različnimi barvnimi skalami ter za izločitev za meritve nepomembnih območji, ki so bila okoli preizkušanca. To je le nekaj od več funkcij, ki jih program IR_view ponuja.



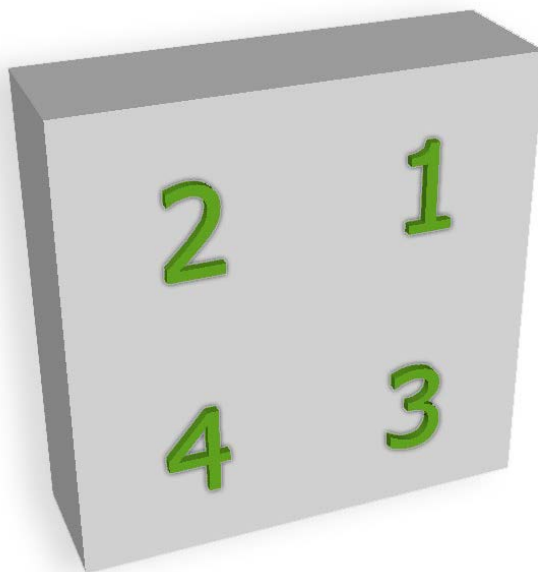
Slika 36: Ir View 1.7.5 (pogovorno okno)

5.3 Rezultati

V okviru preiskav sem spremljal temperaturne slike posameznih preizkušancev, kasneje pa sem preko obdelave podatkov primerjal tudi temperature površinskih točk nad anomalijami s tistimi brez anomalij.

Temperaturne slike so zelo uporabne, ko nas zanima le prisotnost anomalij in ne toliko njihove lastnosti. Njihova prednost je tudi v hitrosti, saj ni potrebe po kakšni dodatni obdelavi. Tako imenovane kontrastne krivulje pa nam omogočijo, da o preizkušancu in anomalijah izvemo nekoliko več.

Preizkušanec 1 sem meril iz sprednje in zadnje strani ter s tem dobil podatke o več različnih globinah. Sprednjo stran sem poimenoval 1A (stran s plitvejšimi anomalijami) zadnjo pa 1B. Pri preizkušancih 1, 2 in 3 sem posamezne anomalije označil s številkami za bolj transparenten prikaz rezultatov.



Slika 37: Oznake anomalij

5.3.1 Temperaturne slike (angl. thermal images) pri različnih časih gretja in hlajenja

Pred začetkom preiskav se je porajalo vprašanje, koliko časa naj grejem preizkušance ter koliko časa naj opazujem njihovo ohlajanje, da bi dobil optimalne rezultate. Preveril sem več različnih variant. Na vseh merjencih sem teste izvajal pri časih 5 min, 15 min, 30 min in 45 min gretja, snemal pa sem jih 45 min. Kasneje sem s pomočjo programske opreme preveril tudi, kako se anomalije vidijo po različnih časih ohlajanja.

5.3.1.1 Preizkušanec 1A

Pri prvem preizkušancu že iz temperaturnih slik dobimo dobro predstavo o anomalijah. Kvader, ki je na poziciji 1, se zelo lepo vidi že po 5. min gretja in praktično takoj po izklopu gretja, vendar pa je zato še opazen vpliv nehomogenega segrevanja. Vgrajen je 1,5 cm globoko in do prvih 15 min ohlajanja se lepo vidi tudi njegova oblika z močnim

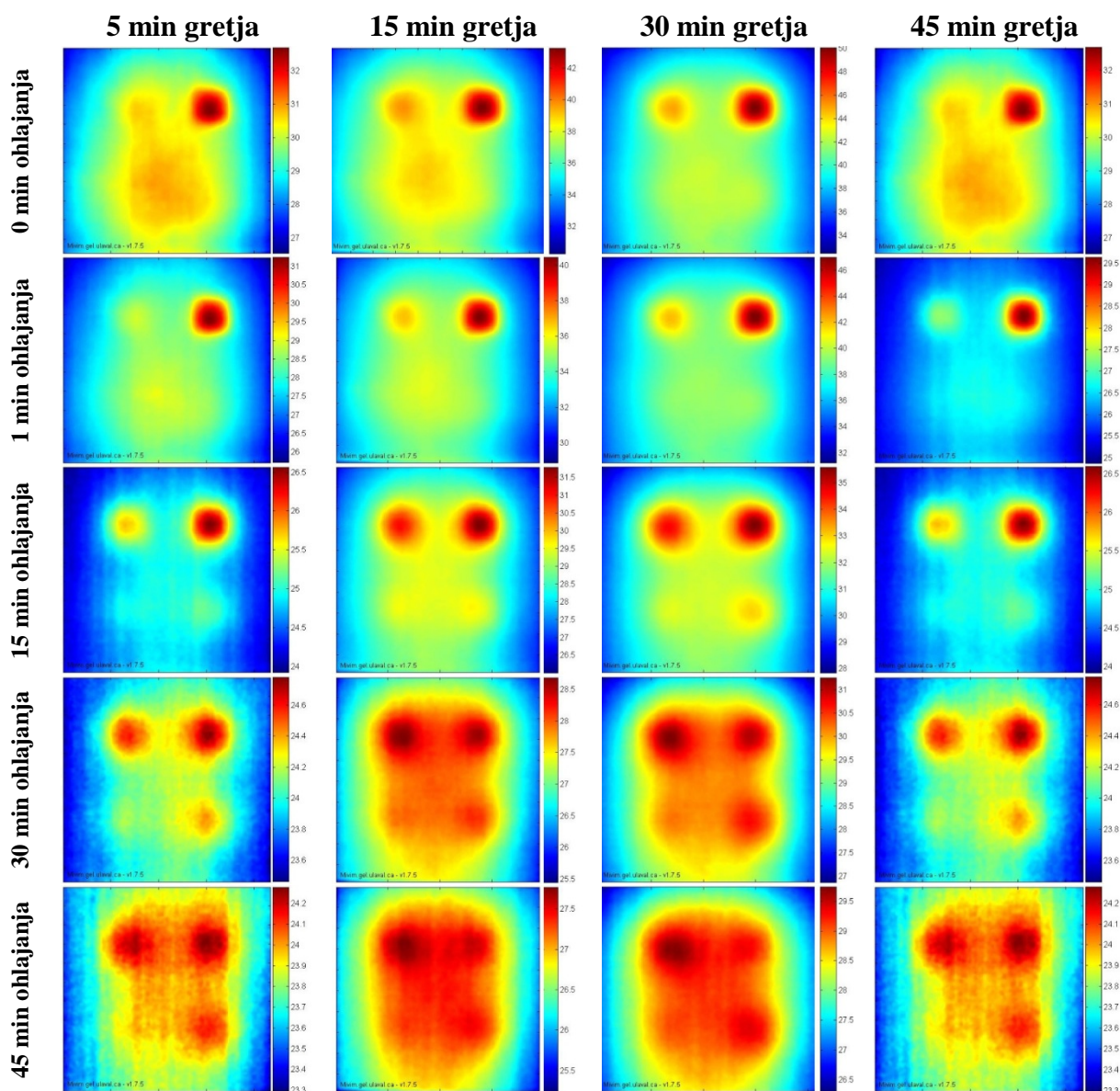
temperaturnim kontrastom glede na okolico. Oblika po daljšem času ohlajanja postane že nekoliko bolj zabrisana.

Pričakovano se naslednji opazi kvader iz pozicije 2, ki prvemu sledi tudi po globini. Leži 3 cm pod površino, kar pa je očitno že dovolj, da njegova oblika ni povsem jasna iz temperaturnih slik. Z večanjem globine je ta seveda še slabša, kar je moč opaziti pri kvadru iz pozicije 3.

Opazimo, da je 5 min gretja premalo, da bi videli valj. Razlog za to ne tiči le v njegovi globini temveč tudi v obliki. To ugotovimo, če valj primerjamo s kvadrom iz pozicije 3, ki leži enako globoko. Pri tem je seveda potrebno omeniti tudi možnost, da se je valj glede na kvader med betoniranjem lahko tudi nekoliko premaknil.

Globlje kot je vgrajen predmet, dlje časa moramo preizkušanec greti in dlje se more ohlajati, da ga opazimo. Razlog za to je v tem, da toplotni tok potrebuje nekaj časa, da sploh doseže anomalijo, medtem ko sta potek in čas ohlajanja na površini pogojena s toplotno prevodnostjo stiropora, ki je manjša od vrednosti za beton. Toplotna prevodnost snovi določa sposobnost za prenos toplote, zato vgrajen stiropor dlje časa zadrži toploto kot beton. Iz te ugotovitve lahko tudi približno sklepamo, kako si anomalije sledijo po globini, če bi nam ti podatki bili neznani.

Če gledamo preizkušanec kot celoto, dobimo najbolj jasne temperaturne slike po 30 min gretja. Zanimivo pa je, da lahko tudi s 5 min ogrevanja dobimo kar dobro predstavo o poziciji anomalij.



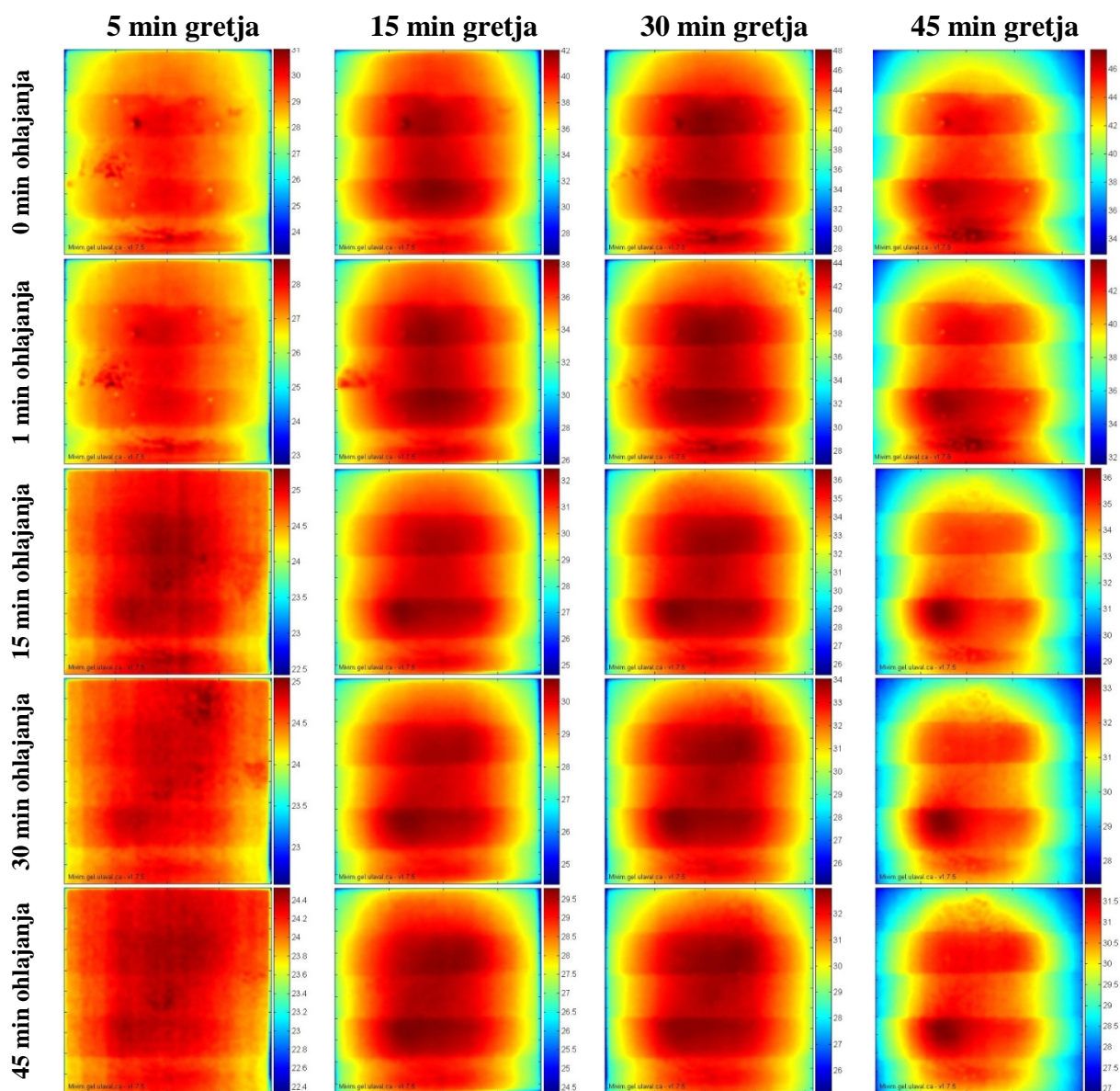
Slika 38: Temperaturne slike v °C preizkušanca 1A

5.3.1.2 Preizkušanec 1B

Temperaturne slike posnete iz druge strani prvega preizkušanca so bistveno slabše. Razlog za take rezultate je predvsem v večji globini vgrajenih predmetov, kar pa je bil tudi vzrok, da smo najbolj pregledne slike dobili, ko smo preizkušanec segrevali 45 min dolgo.

Jasno se vidi le kvadrat na poziciji 4, ki leži ravno v sredini preizkušanca, 4,5 cm od površja. Na isti globini je tudi valj, vsi ostali pa so vstavljeni globlje.

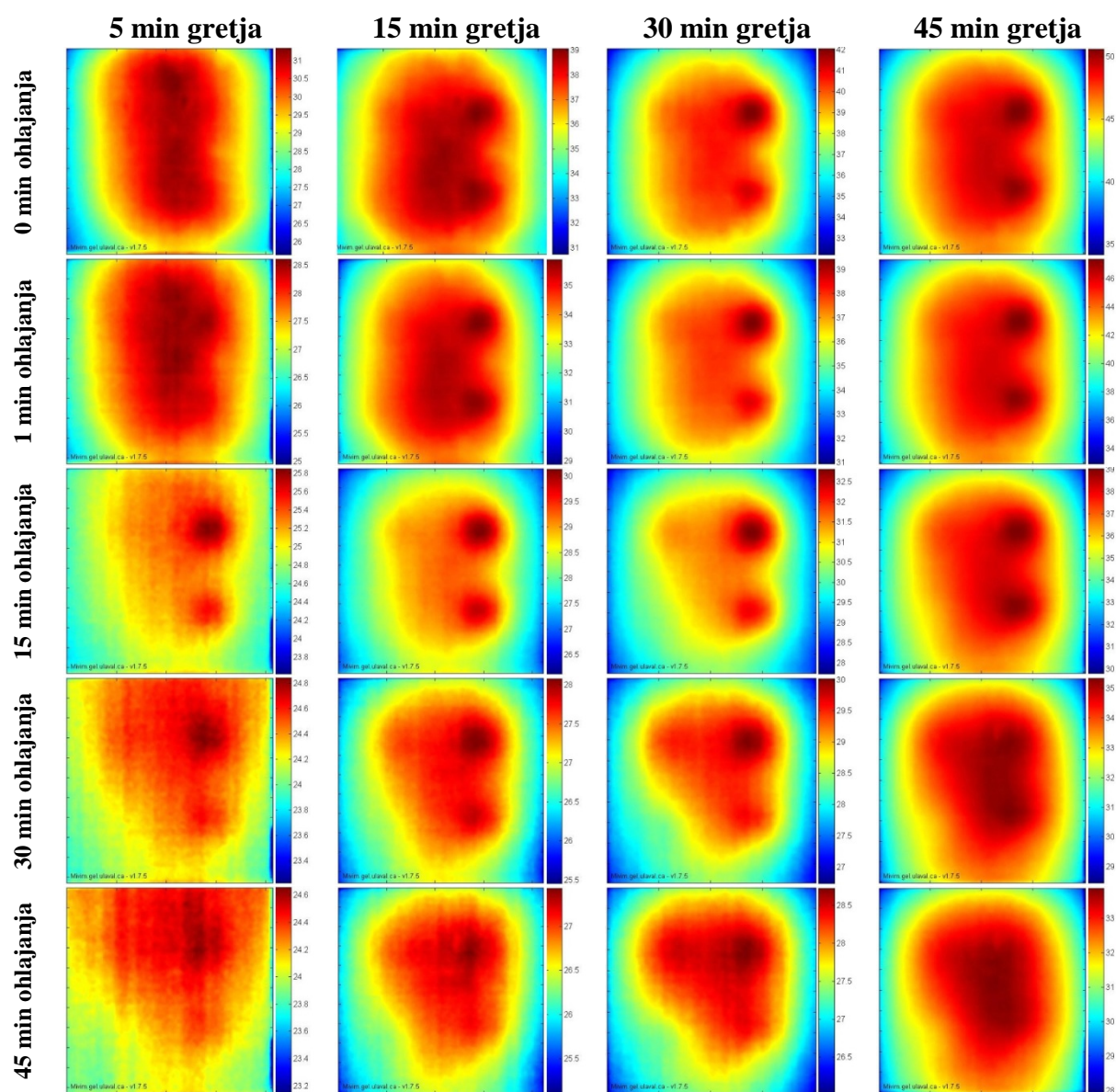
Na vseh slikah se vidita tudi dva horizontalna pasova, ki pa sta posledica malenkost spremenjene hrapavosti betona. Na tem mestu sta bili med betoniranjem položeni dve deski, ki sta fiksirali vgrajene predmete. Čeprav na prvi pogled to ne predstavlja kakšnega večjega vpliva na meritve, temu vendarle ni tako. Ta dva pasova, sta nekoliko bolj gladka in imata posledično manjšo vrednost emisivnosti, kar se bo odražalo v manjših napakah v rezultatih.



Slika 39: Temperaturne slike v °C preizkušanca 1B

5.3.1.3 Preizkušane 2

Pričakovano se desna stran preizkušanca vidi boljše, saj so anomalije tam bolj plitve. Tiste na globini 6 cm skoraj niso bile zaznane. Morda je iz temperaturnega gradienta moč sklepati, da imamo anomalijo tudi na poziciji 2. Ugotovimo, da prej in z večjim kontrastom vidimo zračno anomalijo na poziciji 1 kot vodno anomalijo na poziciji 3. Razlog za to gre iskati predvsem v različnih materialnih lastnostih, saj ima zrak bistveno manjšo toplotno prevodnost kot voda (0,026 W/mK napram 0,60 W/mK).

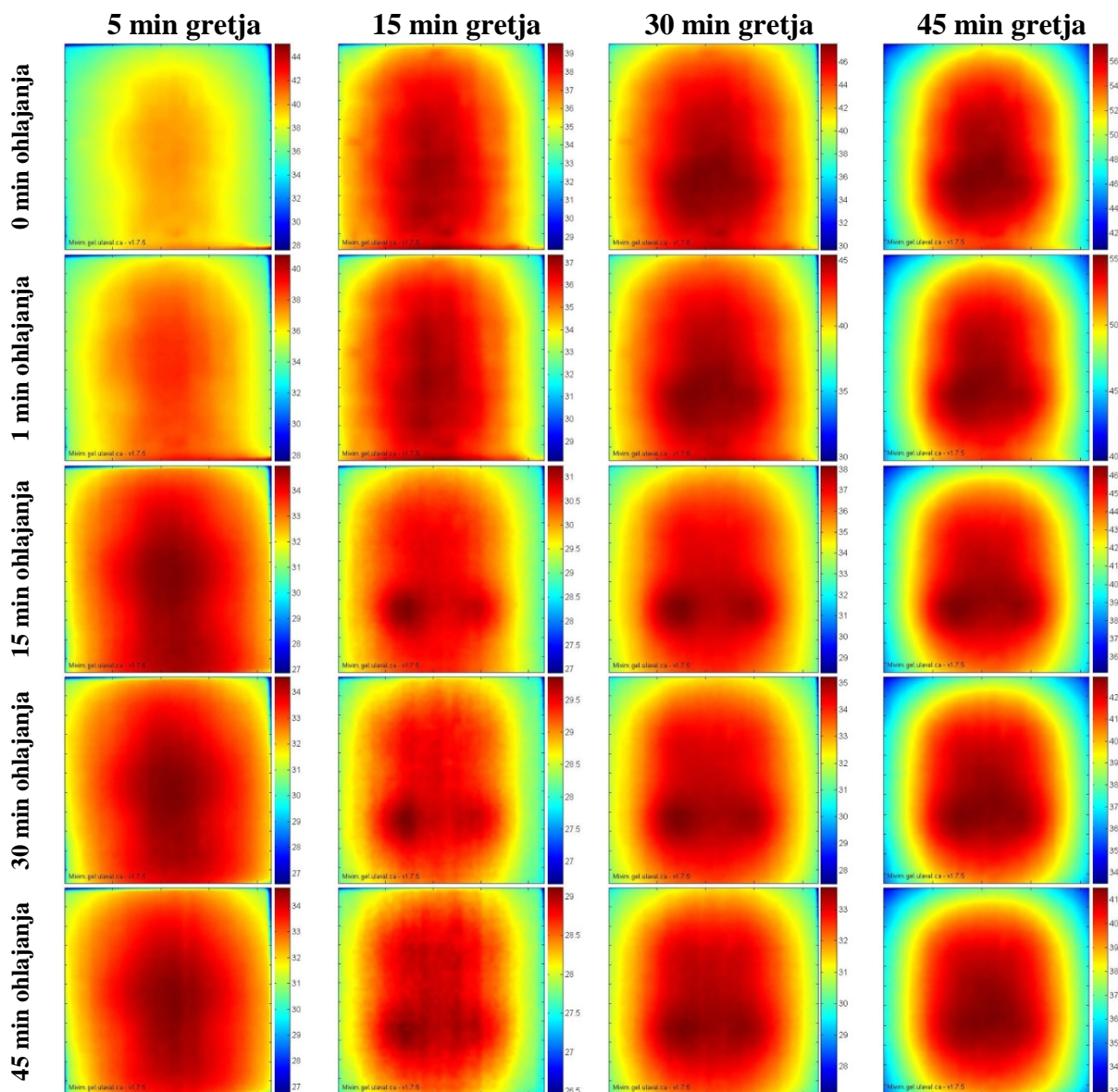


Slika 40: Temperaturne slike v °C preizkušanca 2

5.3.1.4 Preizkušavec 3

Pri tretjem preizkušancu se najbolje vidi anomalija iz pozicije 4. Tak rezultat je pričakovan, saj je tu kvader najbolj plitvo vgrajen, poleg tega pa ga prekriva manj gosta armatura rastra 10 cm. Čeprav leži enako globoko, je kvader na poziciji 3 nekoliko manj opazen. Prekriva ga namreč armatura rastra 5 cm, kar pa je očitno že dovolj, da je pretok toplote bolj moten, oz. se je več absorbira.

Kvadrovi na globini 6 cm se ne vidi, oz. so vidni le manjši obrisi. Opazimo lahko tudi, da kljub temu da ima armatura precej drugačno toplotno prevodnost od betona, je ni moč videti. Očitno je njena debelina premajhna glede na globino, na kateri je vgrajena, in ima tako le posreden vpliv na temperaturne slike.



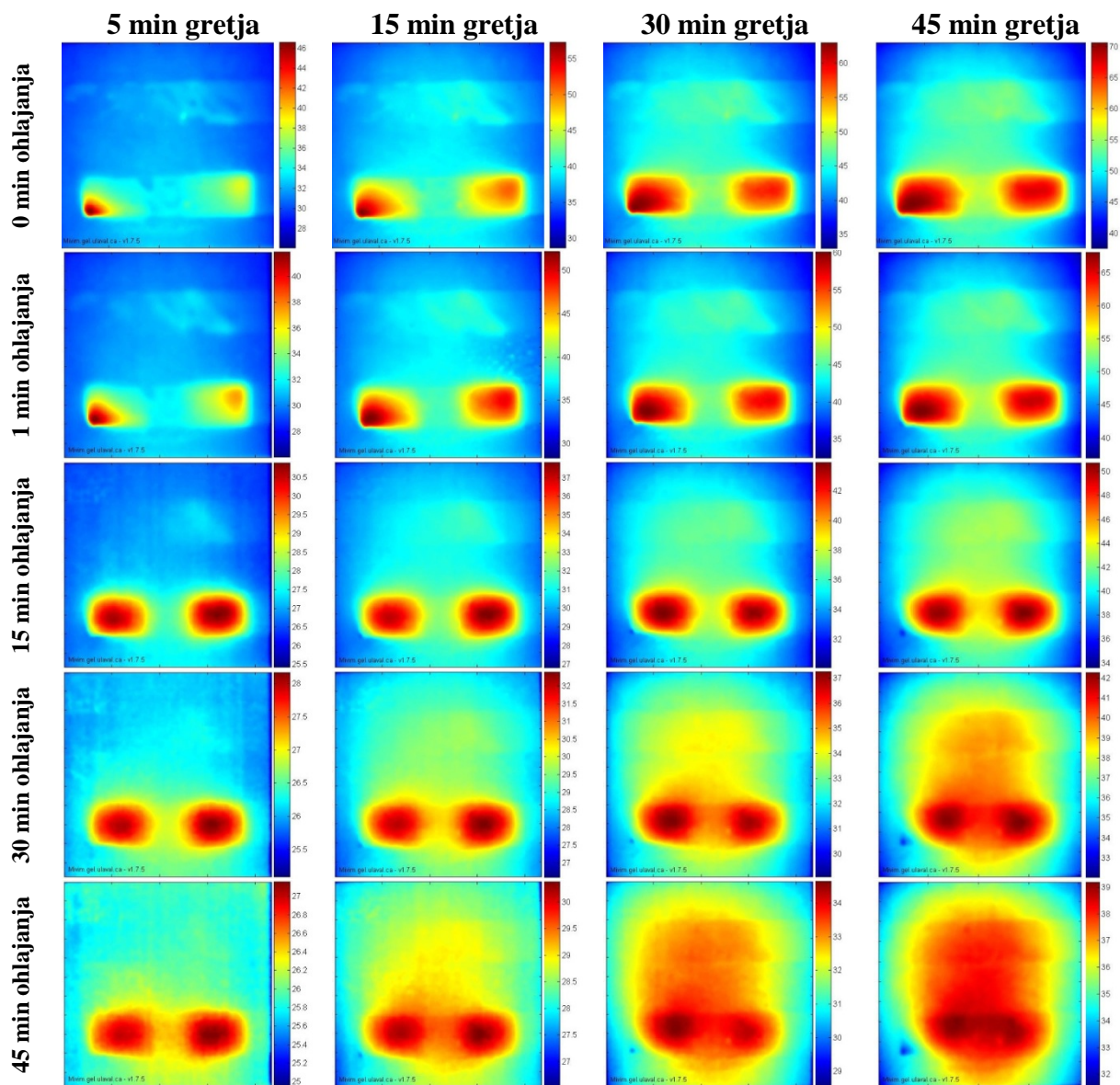
Slika 41: Temperaturne slike v °C preizkušanca 3

5.3.1.5 Preizkušavec 4

Pri zadnjem preizkušancu vidimo, da je prišlo do manjšega nenamerne nagnjenja pri ploščah iz ekstrudiranega polistirena, kar je verjetno posledica vgrajevanja betona. Do te ugotovitve pridemo zaradi bolj vročih robov pri ploskvah, ki so tudi bližje površju.

Presenetljivo slabo se vidijo cevi. Najožja je povsem neopazna. Razlog je v velikosti in globini. Za dobro zaznavo je bilo namreč s preiskav kompozitov ugotovljeno, da je minimalna

zaznavna velikost anomalije približno dvakrat večja od njene globine (Maldague, 2001), tu pa imamo premer cevi 1 cm s krovno plastjo 2 cm betona. Iz enakih razlogov se zelo slabo vidi tudi srednjo cev, medtem ko je največjo že možno opaziti.



Slika 42: Temperaturne slike v °C preizkušanca 4

5.3.2 Kontrastne (angl. thermal contrast images) in časovne (angl. timegrams) slike

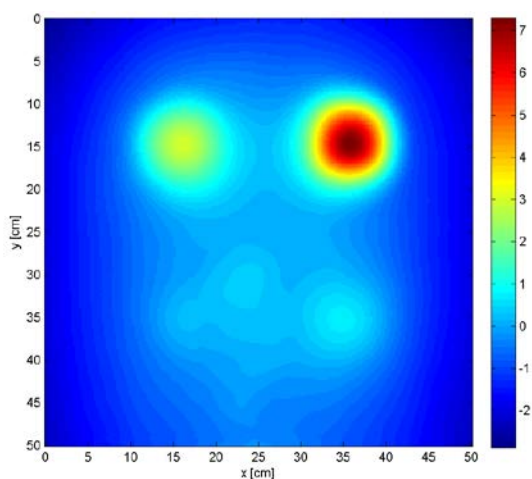
Pri termografskih slikah se pogosto zgodi, da anomalije niso dovolj jasne in so zabrisane. Njihovo vidljivost še poslabšamo, če preizkušance ne grejemo dovolj enakomerno. V naslednji fazi je zato smiselno sliko narediti bolj jasno in kakovostno. K izboljšanju

termografskih posnetkov z uporabo dodatnih postopkov obdelave stremimo namreč tudi zato, da bo učinkovitost termografije čim boljša tudi pri preiskavi realnih objektov, kjer pogoji merjenja pogosto niso optimalni.

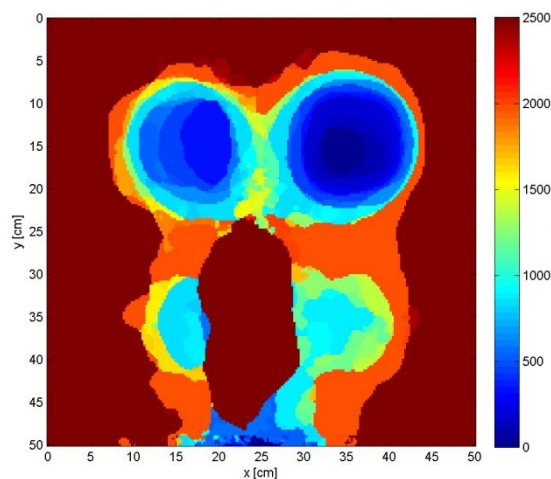
Pri izvedbi kontrastnih in časovnih slik sem uporabil tudi filtre povprečevanja, preden sem avtomatsko določil maksimum krivulje. Algoritem je vseboval preprosto uporabo globalnega maksimuma, vendar je bilo tudi z njim mogoče izboljšati zaznavo anomalij. Še veliko boljše slike bi lahko dobili, če bi uporabili naprednejše numerične metode za iskanje lokalnih ekstremov, vendar bi to že presegalo okvire moje diplomske naloge.

5.3.2.1 Preizkušavec 1A

Iz dobljenih slik za preizkušavec 1A lahko opazimo, da je kontrastna slika bolj »čista« v primerjavi s temperaturnimi slikami. Z njo zmanjšamo vpliv nehomogenega gretja in anomalije so bolj jasno vidne, vendar tudi tu ne zaznamo valja na globini 4,5 cm, medtem ko je njegovo prisotnost moč opaziti na časovni sliki.



Slika 43: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 1A

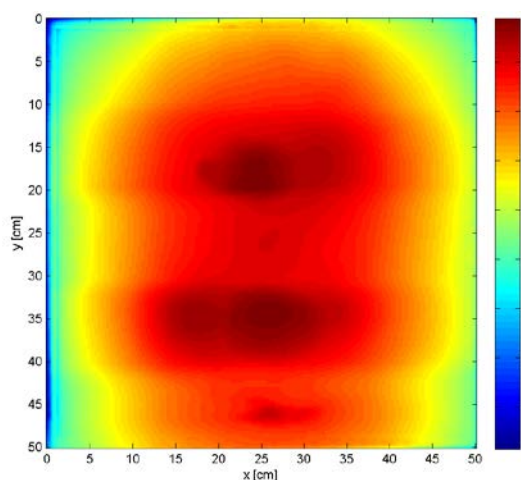


Slika 44: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 1A

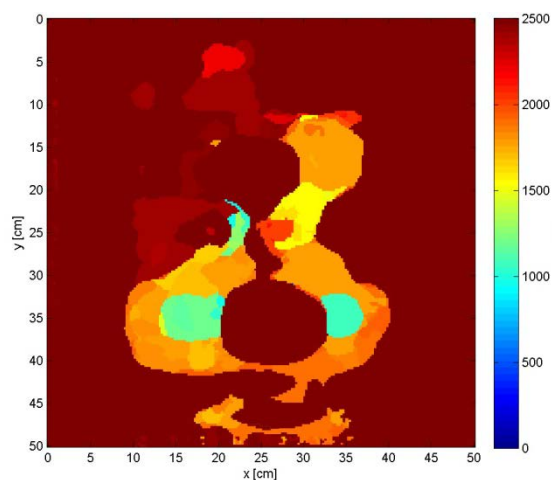
5.3.2.2 Preizkušavec 1B

S kontrastno sliko preizkušanca 1B ne dobimo novih informacij o anomalijah v preizkušancu. Drugače pa je pri časovni sliki, kjer lahko zaznamo obe spodnji anomaliji na globini 4,5 cm in

tudi anomalijo na poziciji 1, ki je kar 6 cm globoko in je na temperaturnih slikah ni bilo moč videti.



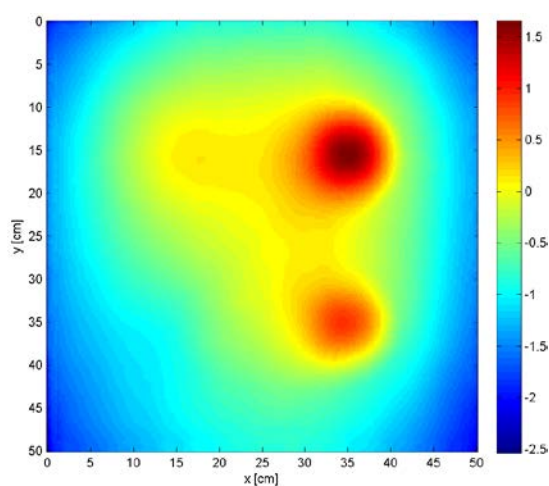
Slika 45: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 1B



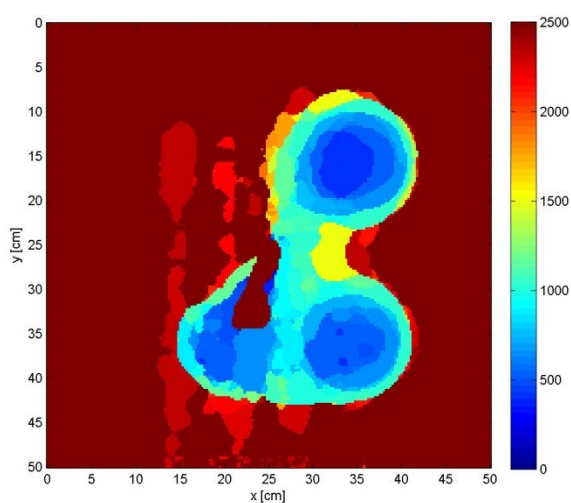
Slika 46: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 1B

5.3.2.3 Preizkušavec 2

Tako časovne kot kontrastne slike na preizkušancu uspešno prikazujejo nove rezultate. Kontrastna slika nam nakaže prisotnost anomalije na poziciji 2, na časovni pa vidimo anomalijo na poziciji 4. Obe sta na globini 6 cm, in sta ostali nevidni na temperaturnih slikah.



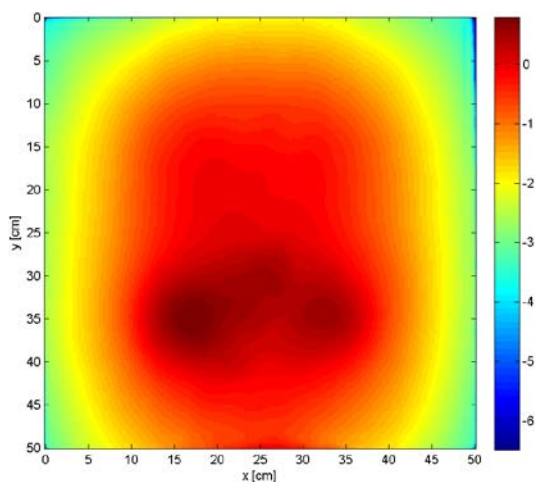
Slika 47: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 2



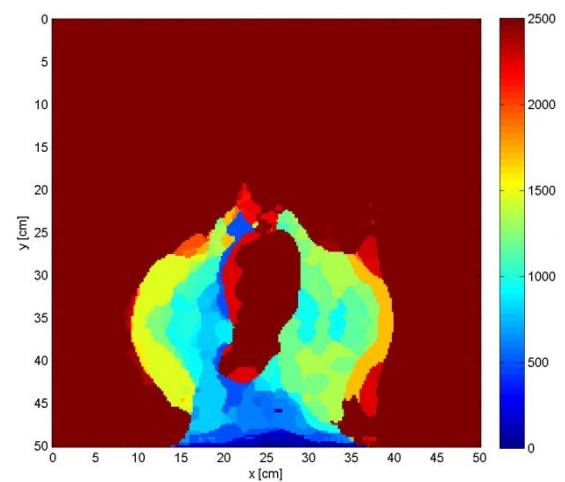
Slika 48: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 2

Preizkušanec 3

Pri preizkušancu 3 ne dobimo novih podatkov o anomaliji. Z obema slikama vidimo le anomalije na globini 4,5 cm, vendar so bile te vidne že na temperaturnih slikah. Vpliv armature očitno precej vpliva na določitev maksimumov kontrasta temperature in časa, ko ta nastopi. Možno je tudi, da je naš algoritem premalo občutljiv in bi bila preiskava bolj uspešna s kakšnim naprednejšim algoritmom.



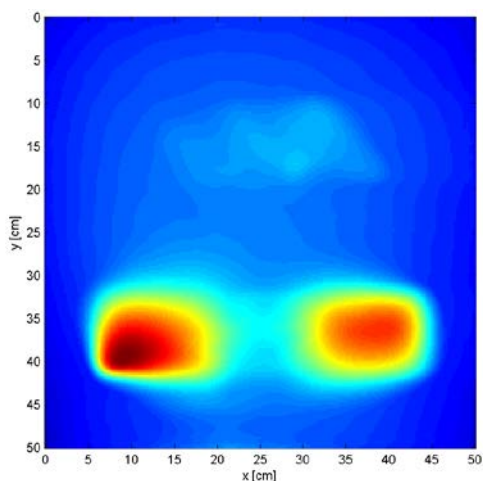
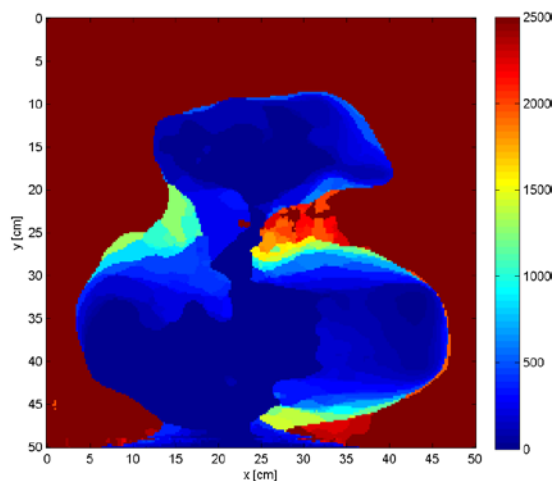
Slika 49: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 3



Slika 50: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 3

5.3.2.4 Preizkušanec 4

Na temperaturnih slikah sta bili dobro opazni plošči, precej manj pa cevi. Tam smo videli le največjo od njih, medtem ko so tu vidne sledi tudi ostalih dveh.

Slika 51: ΔT_{\max} [K] preizkušanca 4Slika 52: $t_{\Delta T_{\max}}$ [s] preizkušanca 4

5.3.3 Kontrastne krivulje (angl. thermal contrast curves)

S temperaturnimi in kontrastnimi slikami lahko dobimo hitro in celostno predstavo o sestavi in stanju preizkušancev, za podatke o preizkušancih in njihovih anomalijah, za nadaljnjo podrobnejšo preiskavo pa je dobro, da skonstruiramo tudi kontrastne krivulje.

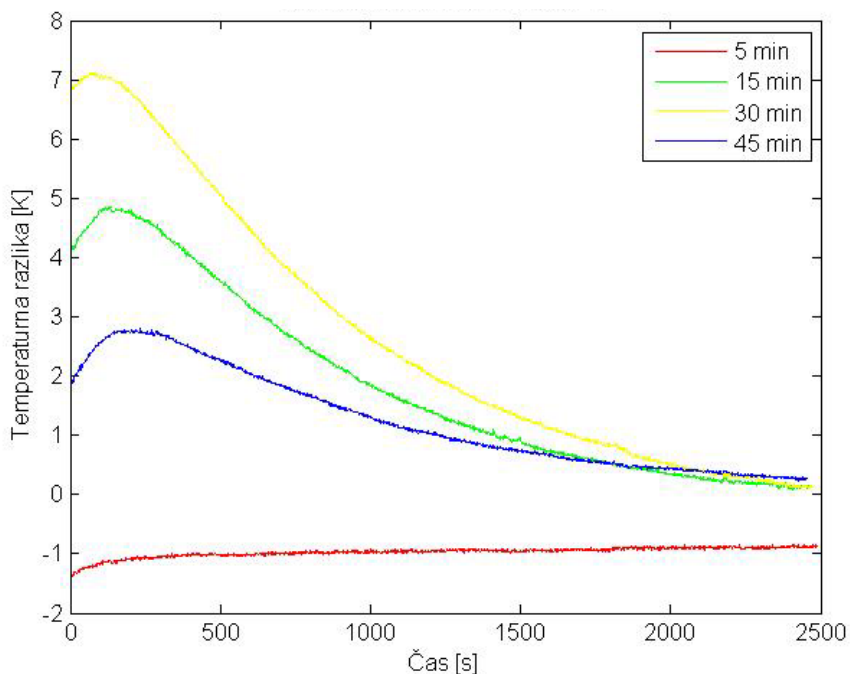
Izdelava kontrastnih krivulj je zelo podobna izdelavi kontrastnih slik, saj slednje dejansko konstruirajo kontrastne krivulje za posamezno točko. Z razliko od kontrastnih slik se tu osredotočimo le na temperaturni kontrast točk, ki so za nas zanimive. Ponavadi so te nad anomalijami. Tu nas, tako kot smo predstavili že pri kontrastnih slikah, ne zanima le kakšna je vrednost ΔT_{\max} , temveč v ozir vzamemo tudi čas, ko ta nastopi ($t_{\Delta T_{\max}}$). Spremljamo torej potek ΔT v odvisnosti od časa.

5.3.3.1 Vpliv časa gretja

Pred začetkom meritev moramo določiti, kako dolgo je smiselno segrevati vzorce. Če grejemo premalo časa, toplota doseže le površino preizkušanca (mogoče celo te ne) in anomalij ni moč zaznati. Tudi predolgo gretje ni ugodno, saj se s tem podaljša celotna meritev, temperaturne slike v poglavju 5.3.1 pa so pokazale, da se celo močno poslabša razmerje S/N (signal/šumu). Da bi dobil čim večje kontraste temperature, ki bi dali ostrejšje kontrastne slike, sem preveril, kako na te vpliva čas gretja pri različnih globinah kvadrov.

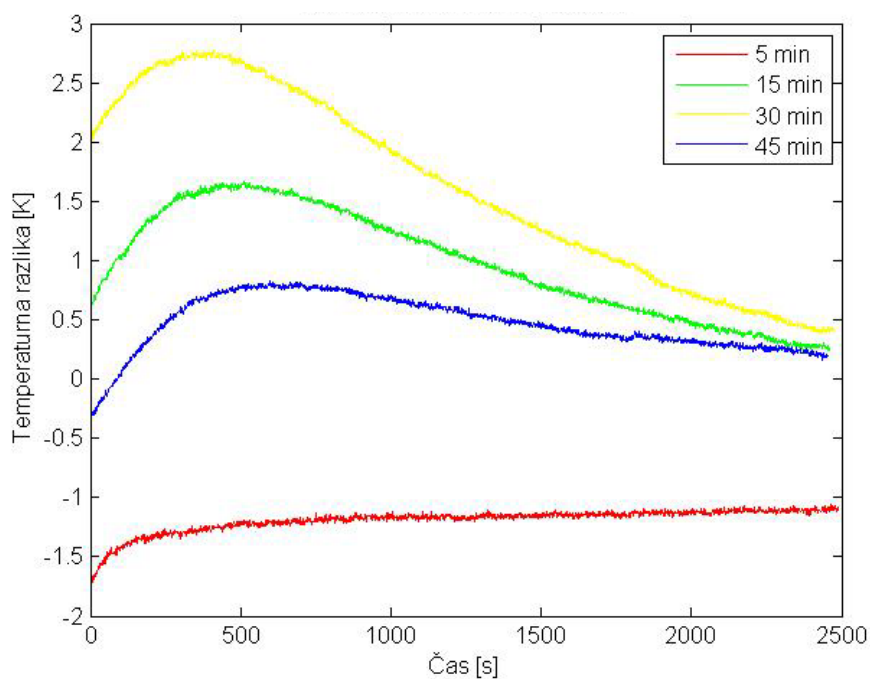
Pri preizkušancu 1A pri najbolj plitvem kvadru se lepo vidi, kako s podaljšanjem časa gretja temperaturno razliko večamo in tako dobivamo boljši kontrast med anomalijo in homogenim mestom. Obenem se pa tudi opazi, da predolg čas segrevanja poslabša zaznavanje plitvih anomalij, saj se trend monotonega večanje kontrasta tu poruši. Kontrastne krivulje nam torej pomagajo, da kvantitativno ocenimo optimalni čas segrevanja, kar smo iz temperaturnih slik lahko le kvalitativno ocenili. V primeru anomalije 1 (globina 1,5 cm) je ta po naših rezultatih med 30 in 45 min. Čas pri katerem dobimo maksimalno temperaturno razliko, se z večanjem časa gretja počasi zmanjšuje. Tak trend je spet moč opaziti vse do 45. min gretja preizkušanca, ko temperaturna razlika ponovno upade. Glede na čase, kjer nastopi maksimalna temperaturna razlika, bi za optimalni čas segrevanja 30 min zadoščalo že merjenje krajše od 5 min.

Čeprav smo na podlagi temperaturnih slik sklepali, da je takojšnje zaznavanje 1,5 cm globoke anomalije možno, kontrastne krivulje kažejo, da so te meritve precej neverodostojne vse do prvih 15 min ohlajanja.

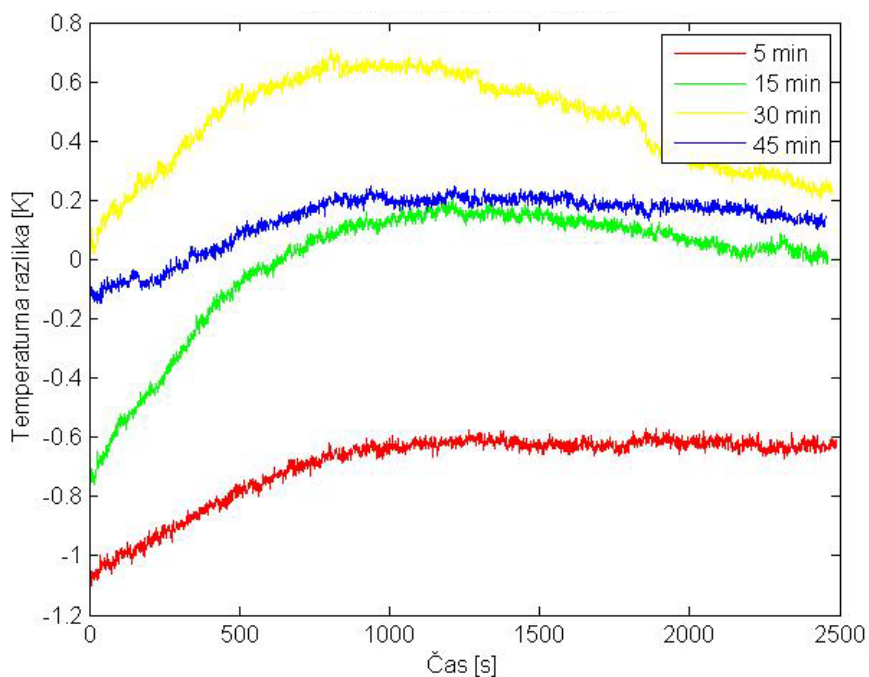


Grafikon 5.1: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 1

Do povsem enakih ugotovitev pridemo tudi, ko opazujemo krivulje temperaturne razlike v odvisnosti od časa pri 3 cm globoko vgrajenem kvadru. V primerjavi s prejšnjim je temperaturna razlika sicer nekoliko nižja, kar lahko pripišemo večji globini anomalije. Ta zveza je opisana tudi v enačbi 2.18. Rezultati kažejo, da je tudi za zaznavanje 3 cm globoke anomalije optimalni čas segrevanja med 30 in 45 min, potrebni čas merjenja pri tem času segrevanja pa znaša okoli 7 min.



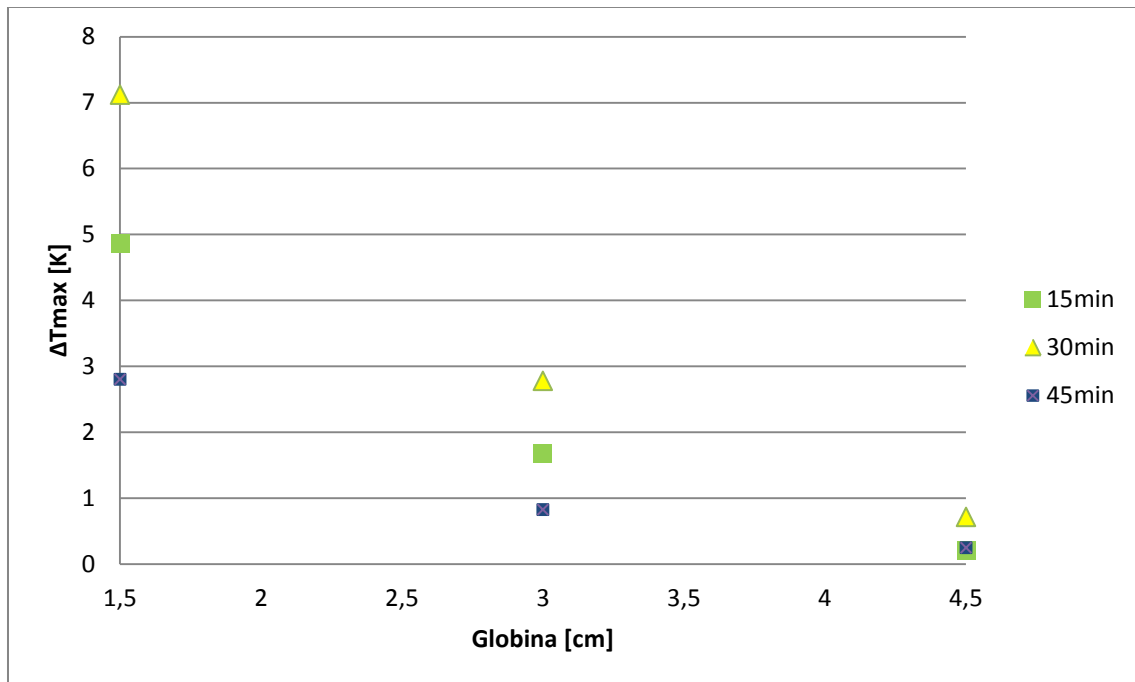
Grafikon 5.2: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 2



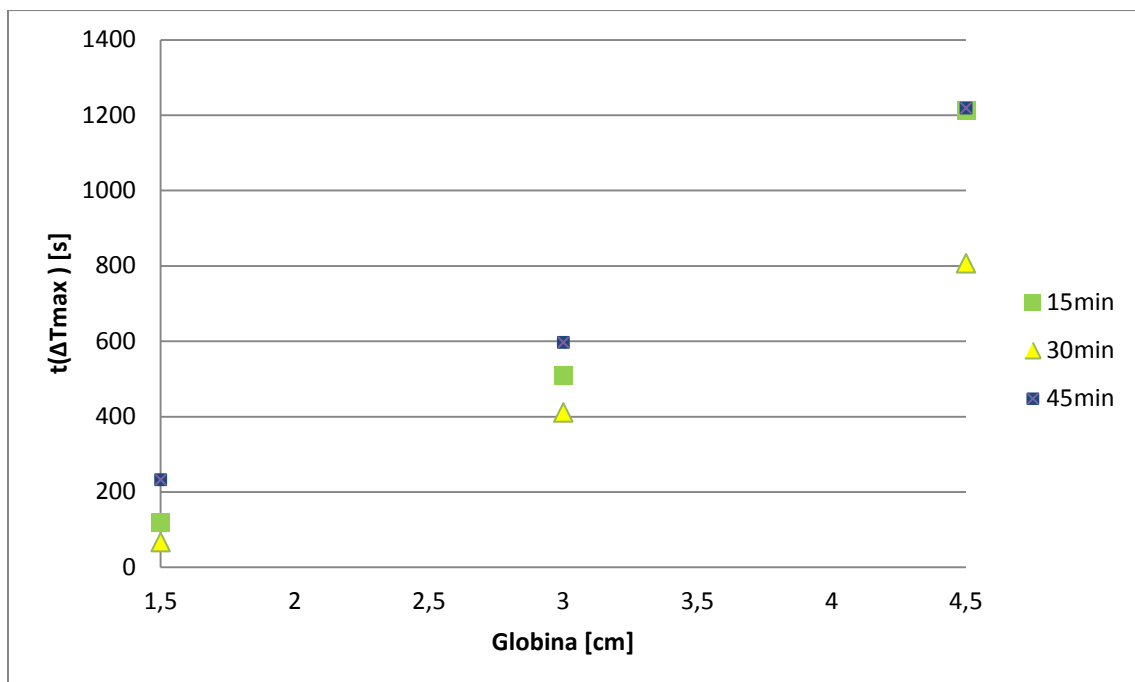
Grafikon 5.3: Vpliv časa gretja 1A preizkušanca na poziciji 3

Z večanjem globine anomalij trend postaja vse manj izrazit. Krivulje postajajo čedalje bolj raztegnjene, največji temperaturni kontrasti pa se manjšajo. Po 30 min gretju je povprečne maksimalnih kontrastov temperature na sredini preizkušanca, kjer ni anomalij, 0,635 K, kar je zelo blizu kontrastu iz pozicije 3, ki znaša 0,725 K. Iz tega lahko sklepamo, da se je na globini 4,5 cm razmerje S/N poslabšalo do te mere, da podatki niso več dovolj verodostojni. Maksimalni kontrasti iz pozicije 1 znašajo 7,203 K, iz pozicije 2 pa 2,800 K, kar nam zagotavlja bistveno bolj zanesljive rezultate.

Zanimiv je tudi pogled na grafikona 5.4 in 5.5, ki bolj nazorno prikazujeta, kako se največji temperaturni kontrast spreminja z globino pri različnih časih gretja in kdaj se ta kontrast pojavi. Ker že iz grafikonov 5.1, 5.2 in 5.3 vidimo, da 5 minutno gretje močno odstopa od ostalih, ga tu nisem prikazoval. Očitno je tako kratek čas ogrevanja premalo, da bi toplota dosegla globlje dele preizkušanca in zato ti podatki niso merodajni. Grafikona lepo kažeta, da na vseh obravnavanih globinah dobimo največji ΔT_{\max} pri 30 min gretju, ta pa pri takem gretju nastopi tudi hitreje. V primeru, da bi imeli podatke tudi za vmesne manjkajoče globine, bi lahko predlagali tudi ustrezen fit, vendar je v našem primeru to težko.



Grafikon 5.4: Maksimalna temperaturna razlika pri različnih časih gretja



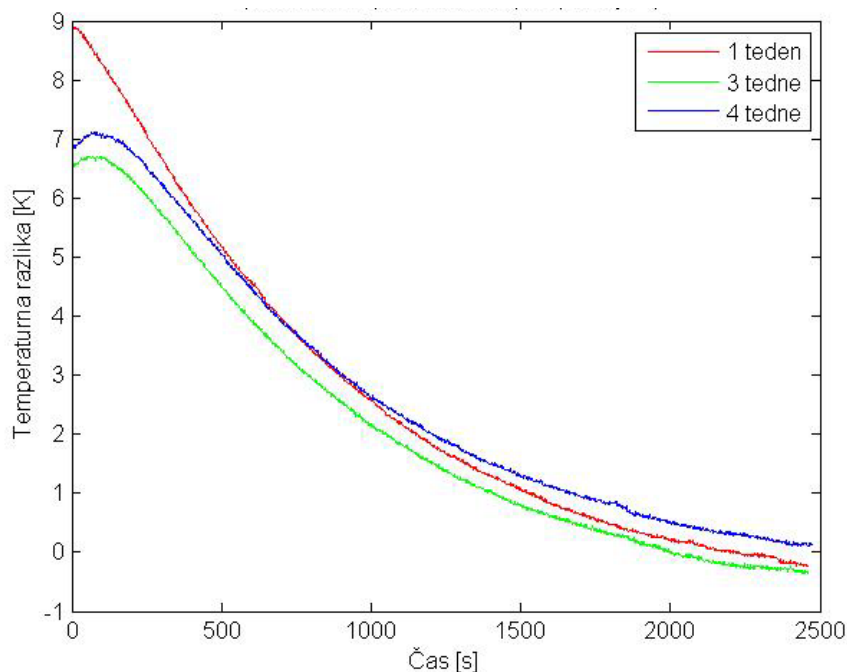
Grafikon 5.5: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različnih časih gretja

Ker sem ugotovil, da je najbolj optimalno segrevati 30 min, bodo vsi nadaljnji rezultati prikazani za ta čas gretja.

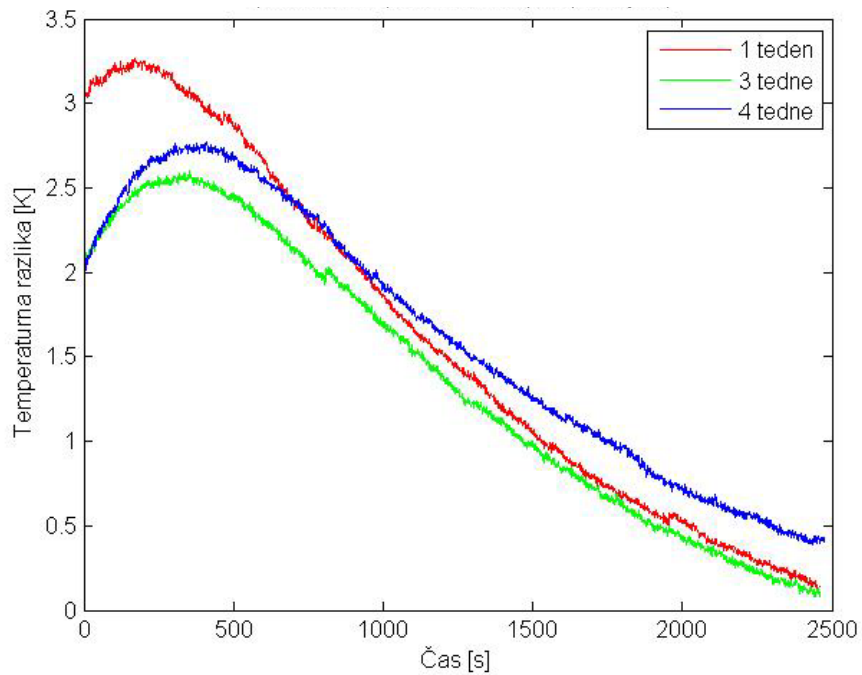
5.3.3.2 Vpliv starosti betona

Vemo, da ima mlajši beton več vlage, ki jo nato s staranjem izgublja. Največje spremembe v vlažnosti se pojavijo v prvih tednih, zato me je zanimalo, kako ta vpliva na termografske meritve.

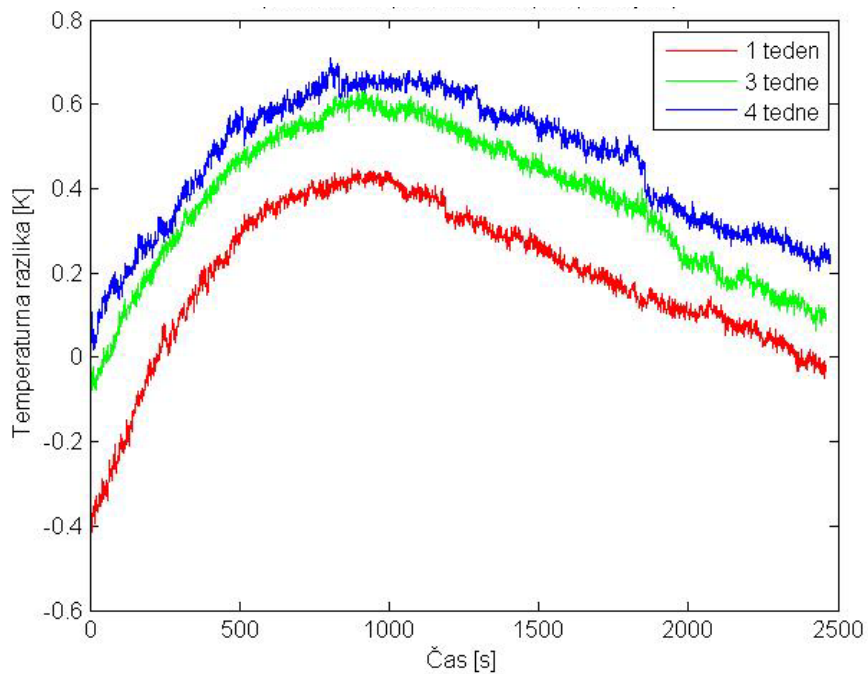
Na preizkušancu 1A na poziciji 1 je vpliv starosti skoraj zanemarljiv. Večja temperaturna razlika se pojavi le pri preizkušancu staremu 1 teden pri prvih petih minutah ohlajanja. Na poziciji 2 dobimo enake ugotovitve kot pri poziciji 1. Zaradi večje globine se začetna razlika med krivuljami nekoliko zmanjša. Še najmanjše odstopanje pa dobimo na najglobljem delu, na poziciji tri, ko je razlika med krivuljami manjša od 0,5 K.



Grafikon 5.6: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 1 za čas gretja 30 min



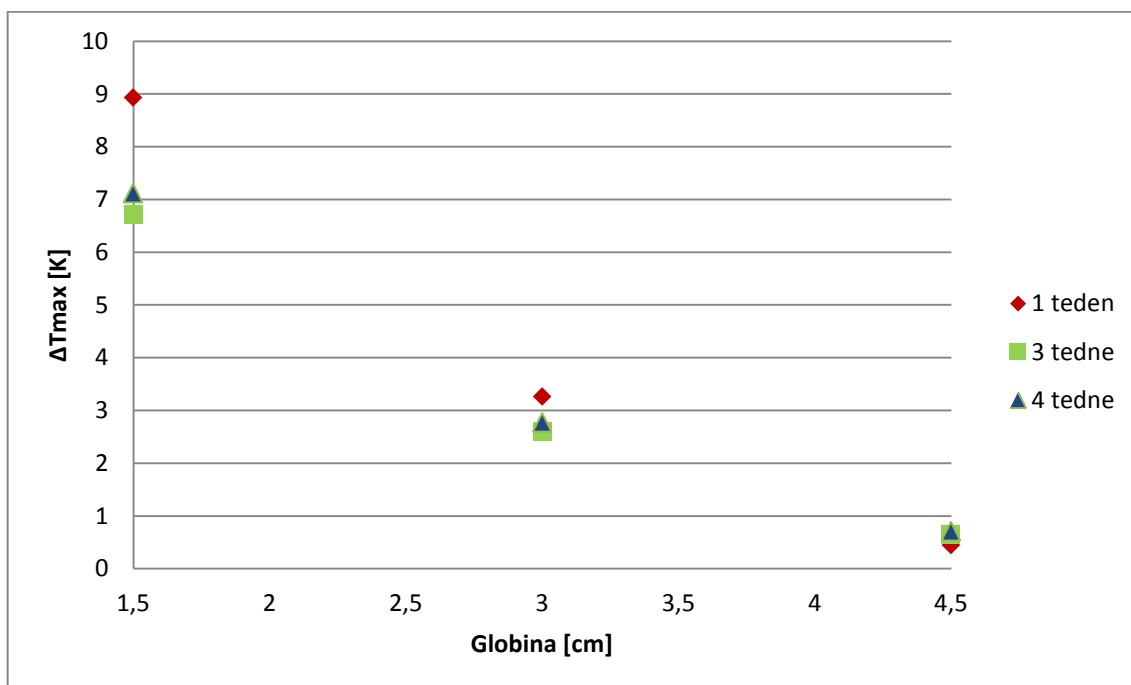
Grafikon 5.7: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 2 za čas gretja 30 min



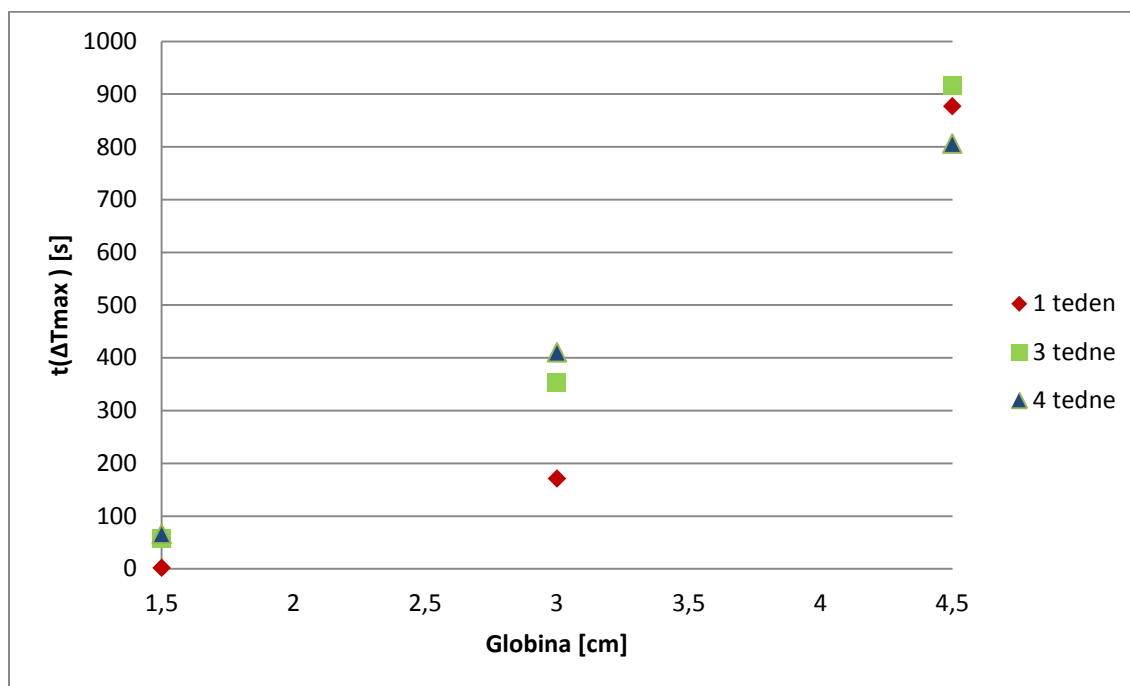
Grafikon 5.8: Vpliv starosti betona preizkušanca 1A na poziciji 3 za čas gretja 30 min

Prvi teden, ko je beton še precej vlažen, opazimo nekoliko večje temperaturne razlike, ki se po treh tednih že bistveno zmanjšajo, še posebno v primeru plitvih anomalij. Takrat vrednosti že skoraj sovpadajo s tistimi, ki smo jih dobili po 4. tednih starosti preizkušanca. Iz tega lahko sklepamo tudi, da je beton v tem času že izgubil količino vlage, ki vpliva na termografske meritve.

Trend padanja kontrasta temperature sicer ni povsem monoton, kar je posledica tudi tega, da so rezultati dobljeni iz več različnih meritev.



Grafikon 5.9: Maksimalna temperaturna razlika pri različni starosti preizkušanca.

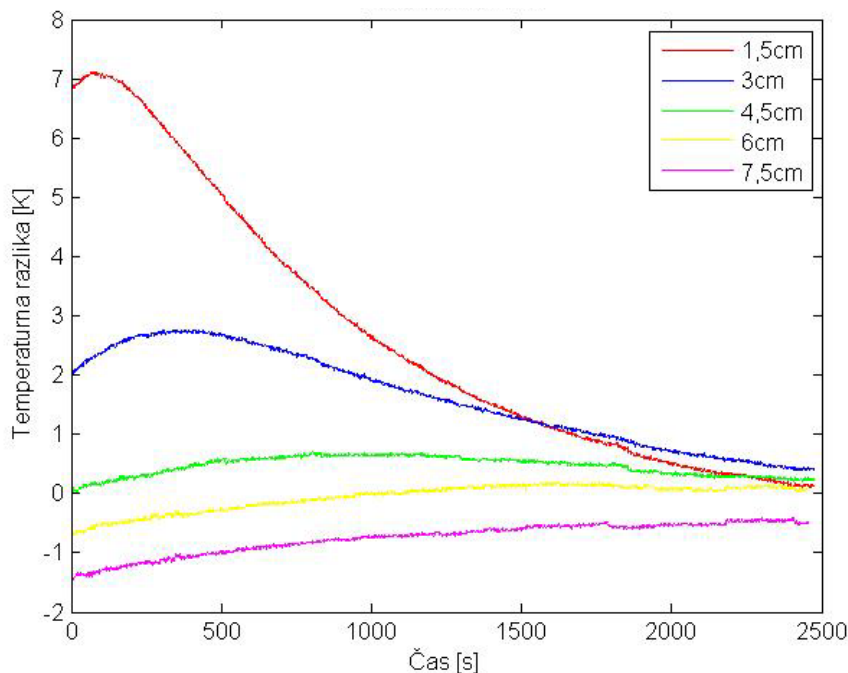


Grafikon 5.10: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različni starosti preizkušanca

5.3.3.3 Vpliv globine anomalij

Ko preiskujemo anomalije v betonu, nas poleg velikosti največkrat zanima tudi njihova globina. Primerjal sem, kakšen je potek temperaturne razlike pri petih različnih globinah in opazoval, če obstaja kakšen vzorec po katerem se kontrastne krivulje spreminjajo.

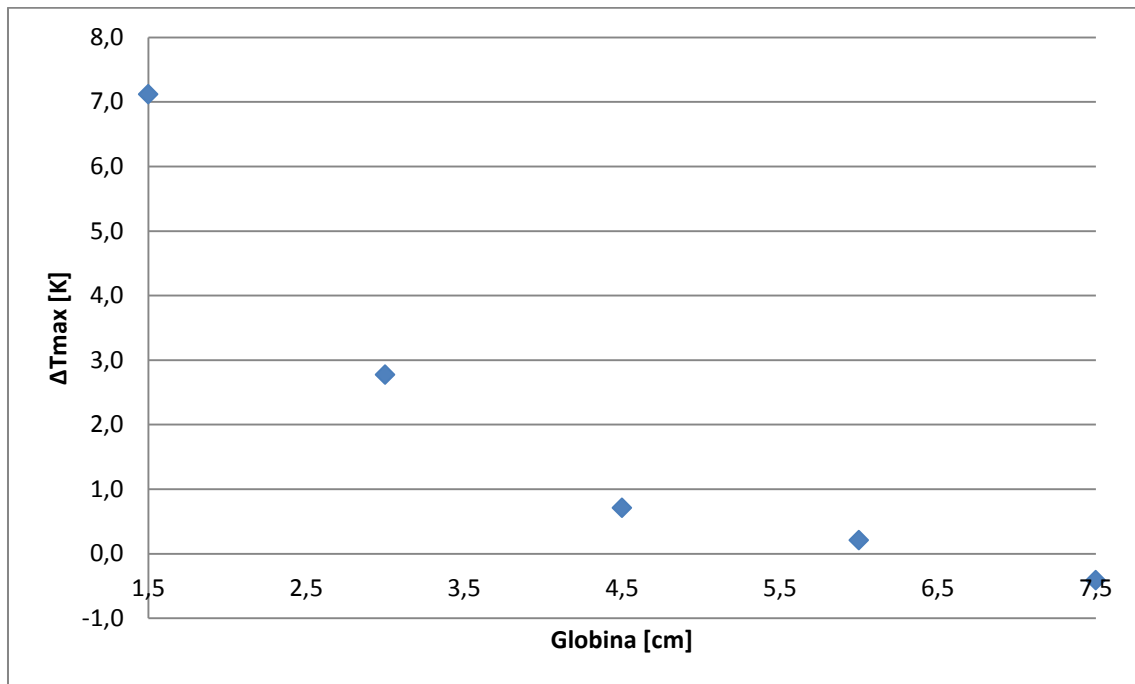
Iz grafikona 5.11 lahko hitro ugotovimo, da vrh kontrastnih krivulj z večanjem globine anomalij pada in postaja čedalje manj izrazit. Pri večanju globine se tudi pojavi kasneje, torej pri daljšem času ohlajanja. Oba fenomena opisujeta enačbi 2.17 in 2.18, ki pravita, da je kontrast obratno sorazmeren z globino na tretjo potenco, čas ko se ta pojavi pa je premo sorazmerna s kvadratom globine.



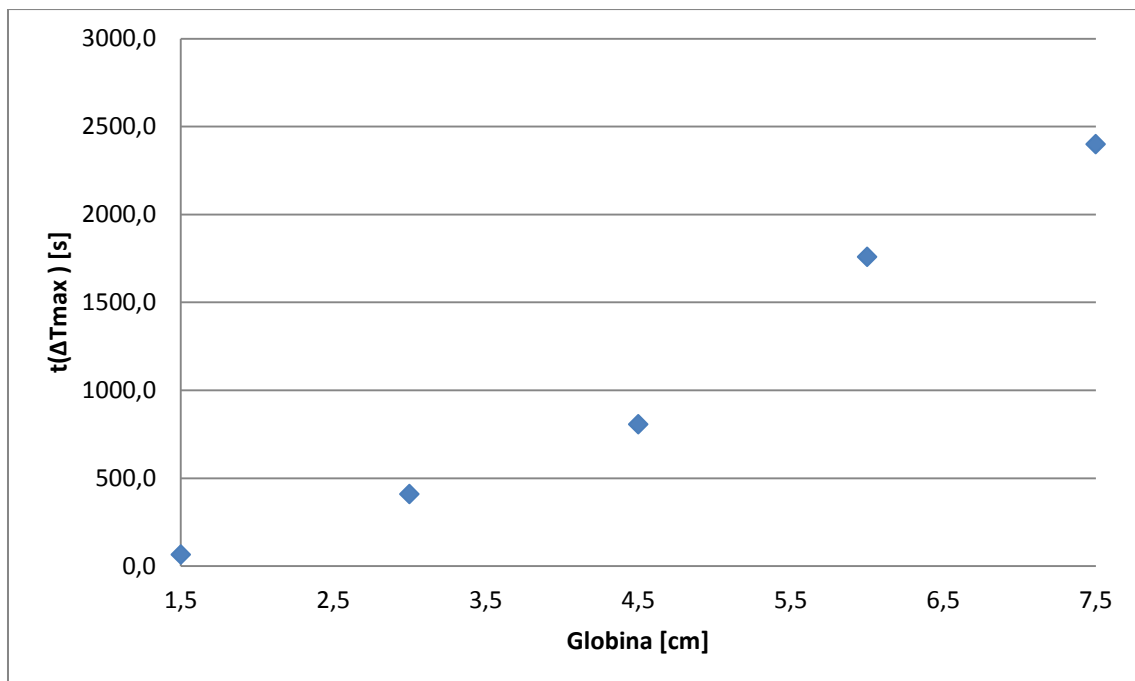
Grafikon 5.11: Vpliv globine kvadrov za čas gretja 30 min

Prejšnje ugotovitve so bolj nazorno prikazane z grafoma 5.12 in 5.13, kjer se vidi trend padanja temperaturne razlike z globino in rast časa, ko nastopi maksimalna razlika.

Vse to nas pripeljejo do ideje, da bi bilo mogoče k stvari pristopiti tudi v obratnem vrstnem redu. Ob enakih pogojih ogrevanja in merjenja ter enaki materialni zasnovi in obdelavi preizkušanca, bi torej lahko iz temperaturne razlike, oz. časa pri katerem se ta pojavi, približno določili globino anomalije. Za samo točnost take analize, bi bilo morda bolje izhajati iz grafikona $t_{\Delta T_{max}}$ v odvisnosti od globine, saj je ta manj občutljiv na morebitno nehomogeno gretje. Za prenos takega postopka v prakso bi seveda morali analizirati odvisnost temperaturne razlike oz. časa od globine anomalije za različne čase segrevanja, vključiti bi bilo potrebno tudi druge parametre kot so velikost, oblika in material anomalije.



Grafikon 5.12: Maksimalna temperaturna razlika pri različnih globinah anomalij



Grafikon 5.13: Čas maksimalne temperaturne razlike pri različnih globinah anomalij

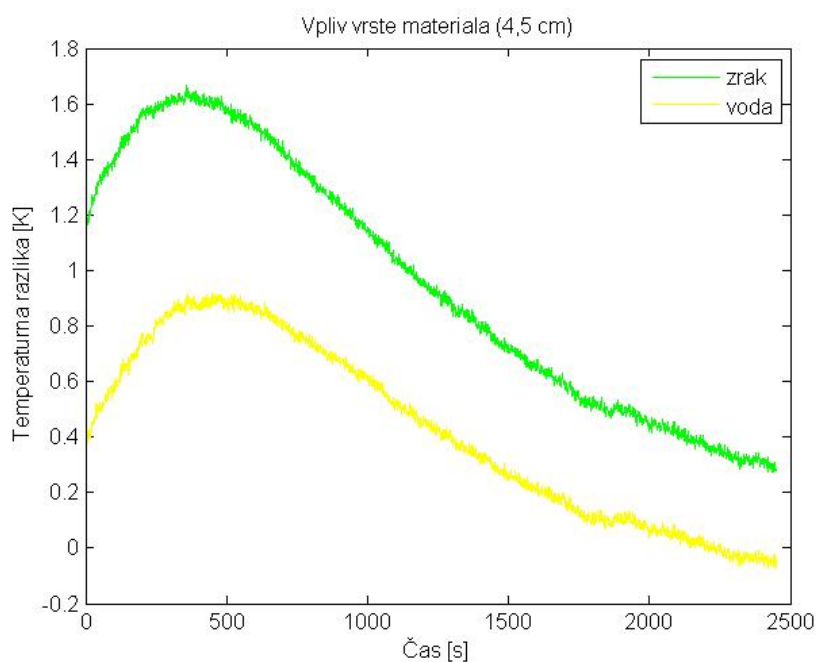
5.3.3.4 Vpliv materiala anomalije

Vsi rezultati, ki jih dobimo iz termografskih preiskav temeljijo na tem, da prehoda toplote iz toplega proti hladnemu delu ni mogoče preprečiti, lahko pa jo upočasnimo ali pospešimo glede na okoliški material. Različni materiali imajo različne izolativne sposobnosti oz. različne faktorje toplotne prevodnosti in glede na svojo gostoto in toplotno kapaciteto tudi drugačne vrednosti toplotne difuzije (preglednica 3). EPS ima na primer manjšo toplotno prevodnost kot beton, zato lahko pričakujemo, da so tudi kontrastne krivulje na mestih anomalij z različnimi materiali različne. V ta namen sem preveril, kako se ΔT_{\max} in $t_{\Delta T_{\max}}$ razlikujeta, če imamo anomalije iz zraka ali vode.

$t_{\Delta T_{\max}}$ je premo sorazmeren kvadratu globine anomalije in obratno sorazmeren s toplotno difuzivnostjo (enačba 2.17). Ta nam pove, kako hitro se materiali segrevajo, oziroma ohlajajo ob spremembi temperature v okolici. Večja kot je toplotna difuzivnost, hitreje se prenaša toplota. Ker ima zrak toplotno difuzivnost precej večjo kot voda, tako sklepamo da bo $t_{\Delta T_{\max}}$ pri njem krajši.

Rezultati prikazani na grafikonu 5.14 potrjujejo teorijo. Kontrastna krivulja dobljena pri zračni anomaliji doseže svoj vrh 92 s prej kot krivulja dobljena pri vodi. Vidimo lahko tudi, da na kontrast temperature očitno bolj vpliva toplotna prevodnost k , na $t_{\Delta T_{\max}}$ pa toplotna difuzija.

Na istem vzorcu sem imel pripravljene tudi dve luknji na globini 6 cm, vendar jih s termokamero ni bilo moč zaznati. Primerjava s prejšnjimi rezultati bi bila torej trivialna, zato sem se odločil, te izpustiti.

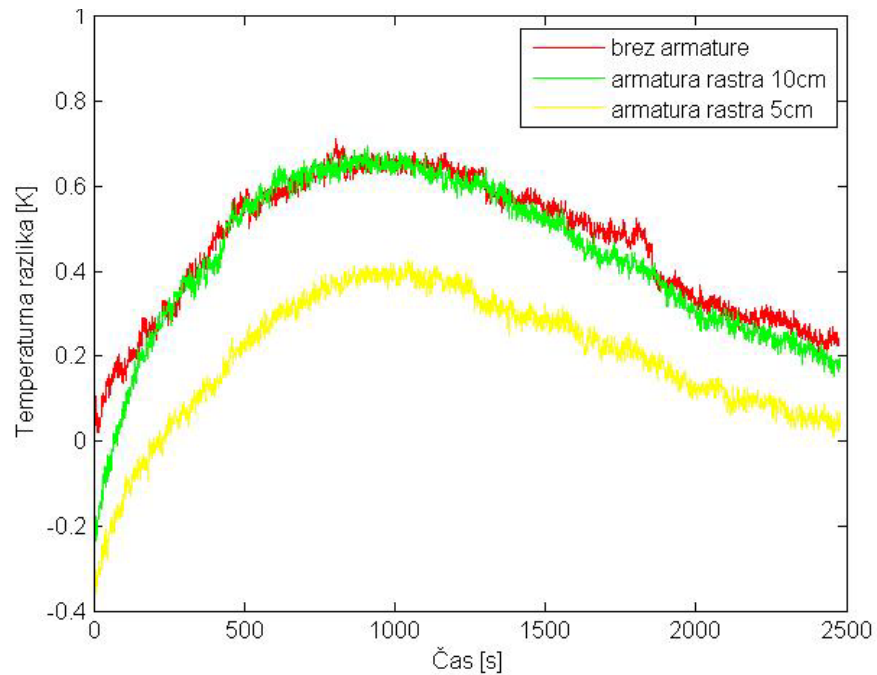


Grafikon 5.14: Vpliv materiala anomalije na globini 4,5 cm

5.3.3.5 Vpliv armature

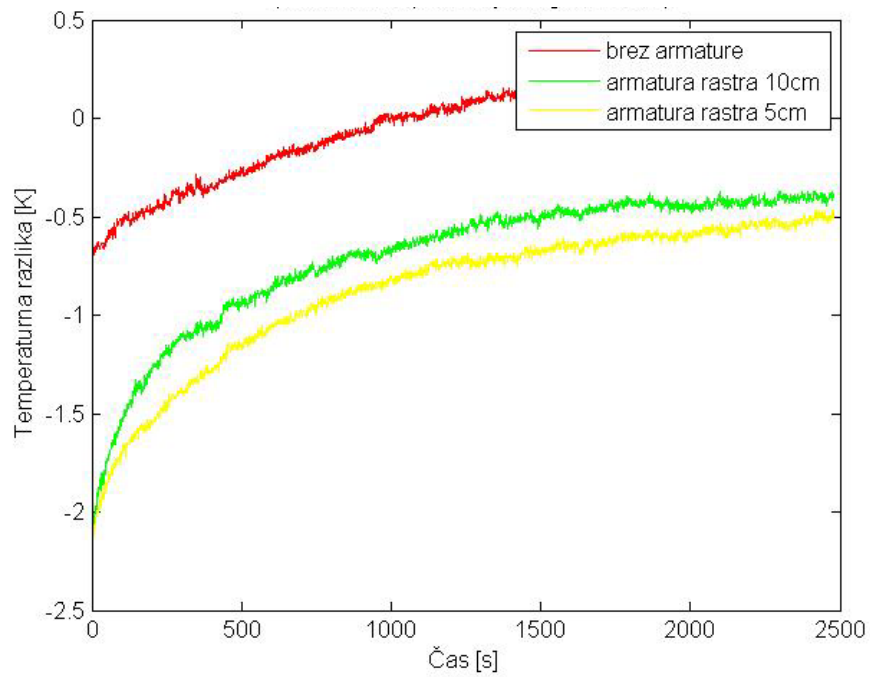
Pogosto se zgodi, da nad anomalijo ni le beton ampak tudi armatura. Preverjal sem, kako različni rasteri armature nad anomalijo vplivajo na potek kontrastnih krivulj.

Iz grafikona 5.15 vidimo, da armatura z rastrom 10 cm bistveno ne vpliva na zaznavanje vgrajenega kvadra, medtem ko armatura rastra 5 cm zniža vrh kontrastne krivulje. Pričakovali bi, da bo tudi večji raster nekoliko znižal temperaturno razliko. Razlog za tak rezultat je mogoče iskati v nenamernem zamiku kvadrov pod armaturo, ki so se očitno med vgradnjo nekoliko dvignili. S tem se je temperaturna razlika povečala in se približala tisti od kvadra brez armature. Na rezultat lahko nekoliko vpliva tudi to, da so podatki pridobljeni iz dveh različnih preizkušancev, in iz različnih meritev, kjer so bili tudi malenkostno drugačni robni pogoji.



Grafikon 5.15: Vpliv armature na 4,5 cm globoko vgrajene kvadre

Z razliko od grafikona 5.15, imamo pri anomalijah z globine 6 cm bolj realne rezultate. Več kot imamo armature, nižja je temperaturna razlika. Glede na to, da so rezultati dobljeni iz dveh različnih preizkušancev, vseeno obstaja verjetnost manjše napake.



Grafikon 5.16: Vpliv armature na 6 cm globoko vgrajene kvadre

Skupne ugotovitve so, da z večanjem armature znižamo ΔT_{\max} , medtem ko na $t_{\Delta T_{\max}}$ bistveno ne vpliva.

6 ZAKLJUČEK

Infrardeča termografija predstavlja eno od tehnik neporušnega preskušanja za ugotavljanje kakovosti in stanja merjenca. S pojavom natančnih termokamer je postala hitra, učinkovita in natančna, in četudi je bila sprva namenjena uporabi v vojski, je odličen pripomoček tudi na drugih področjih. To sem uspel prikazati tudi v diplomski nalogi.

Za izvajanje termografije je pomembno razumevanje osnovnih pojmov, saj lahko le tako pravilno vrednotimo rezultate. Ključno je tudi, da izberemo ustrezne naprave tako za snemanje kot tudi gretje. Nehomogeno gretje nam lahko postreže z neverodostojnimi podatki, ki lahko vodijo k napačni interpretaciji rezultatov. Za obdelavo termografskih posnetkov pa potrebujemo tudi ustrezno programsko opremo, ki je odvisna od opreme in tehnike izvajanja meritev ter velikosti končnih datotek. Ravno slednje predstavlja še vedno velik problem.

V diplomu je prikazanih več načinov uporabe aktivne termografije za potrebe neporušnega preskušanja testnih betonskih konstrukcijskih elementov. Najbolj osnovno prikazovanje rezultatov nam omogočajo temperaturni posnetki oziroma temperaturne slike. To je tudi edini način, ki sem ga uporabil pri vseh štirih preizkušancih. Četudi gre zgolj za kvalitativno meritev, nam vseeno lahko postreže z zanimivimi rezultati. Pomembno je da merjence pred snemanjem grejemo dovolj dolgo, da toplotni tok doseže globino anomalij. Plitvejšje anomalije so se napram globljim zaznale hitreje in prej so se ohladile ter izginile iz temperaturne slike. Tako lahko dobimo grobo oceno o globini ene v primerjavi z drugo. Izkazalo se je tudi, da se z globino izgublja jasnost oblike anomalij. Ko smo kvader iz stiropora zamenjali za vodo, smo zaradi večje toplotne prevodnosti vode, dobili manjše kontraste temperature in kasneje smo jih videli. Na kvaliteto slik vpliva tudi armatura, ki absorbira toplotni tok in zato so anomalije slabše vidne. Cevi, ki so bile vgrajene v četrtem preizkušancu, so bile slabo opazne. Povsem drugače pa bi bilo, če bi se po njih pretakal topel medij.

Vpliv nehomogenega gretja lahko na en način zmanjšamo s pomočjo kontrastnih slik. Z njimi, s primernimi filtri povprečevanja, dobimo bolj jasne slike. Bolj kot kontrastne slike, se na boljše zaznavanje anomalij odzivajo časovne slike. Čeprav na prvi pogled te slike niso videti

zelo jasne, smo z njimi vseeno lahko zaznali globlje anomalije, ki so bile pred tem za nas nevidne. Za njihovo izdelavo moramo poznati tudi mesta brez anomalij.

Bolj podroben vpogled na sestavo ter stanje merjenca nam omogočajo kontrastne krivulje. Tu smo sočasno spremljali največje temperaturne kontraste in čase, pri katerih so se ti pojavili v posameznih točkah. Z njimi smo ugotovili, da povečanje časa gretja merjenca ugodno vpliva na zaznavo anomalij, vendar z njim ne smemo pretiravati. Za najbolj optimalen čas se je v meritvah izkazalo 30 min gretja, najbolj optimalen čas ohlajanja pa je odvisen od globine anomalij. Ugotovili smo, da je za globino 3 cm dovolj 7 min ohlajanja, pri 1,5 cm pa že manj od 5 min. Merjence smo preizkušali tudi pri različnih starostih in posledično različnih vlažnostih, da bi analizirali tudi ta vpliv na termografske meritve. Krivulje so najbolj odstopale predvsem v prvih tednih sušenja betona, ko je ta izgubljal največ vode. Temperaturni kontrasti se manjšajo vse do takrat, ko je beton suh. Armatura na $t_{\Delta T_{\max}}$ bistveno ne vpliva, zato pa zmanjša kontraste temperature, ki padajo tudi z večanjem globine anomalij, medtem ko se takrat $t_{\Delta T_{\max}}$ povečujejo. Ti podatki so tudi nekoliko manj občutljivi na nehomogeno gretje. Pokazalo se je, da na $t_{\Delta T_{\max}}$ bolj vpliva toplotna prevodnost, na ΔT_{\max} pa toplotna difuzija.

Dobljeni rezultati nam torej omogočajo zelo dober vpogled v notranjost merjencev. Za njihovo absolutno verodostojnost bi bilo predvsem zaradi možnih napak med betoniranjem morda smiselno preizkušance preskusiti z delno destruktivnimi metodami (sondiranje, boroskopija) ter na osnovi rezultatov teh preiskav primerjati dejansko stanje z izmerjenim.

Področje aktivne termografije je zelo široko. Vsekakor je to ena od primernih metod predvsem pri merjenju elementov, ki so po celotni površini enakomerno hrapavi, saj se emisivnost sicer spreminja. Poleg tega je metoda omejena na zaznavanje razmeroma plitvih napak v notranji strukturi, do nekje 10 cm. Ravno njena velika natančnost v zaznavanju izjemno plitkih anomalij ter popolnoma nedestruktiven način merjenja sta glavni prednosti za aplikacijo metode pri problemih delaminacije betona sodobnih gradbenih objektov in na stavbah kulturne dediščine, kjer je pereč problem odstopanje ometa. Veda je razmeroma mlada in pričakujemo lahko, da bo z večjim številom preiskav in meritev na različnih

preizkušancih dobila trdne temelje za uporabo med drugimi neporušnimi metodami preiskav gradbenih materialov.

VIRI

BAM, ITAM. 2004. Technical guidelines for an appropriate use of the suggested equipment. http://www.onsiteformasonry.bam.de/Documents/CD_ONSITE/guidelines/D11_1_thermography.pdf (Pridobljeno 2. 12. 2012.)

Bosiljkov, V., Maierhofer, C., Koepf, Ch., Wöstmann, J. 2010. Assessment of Structure Through Non-Destructive Tests (NDT) and Minor Destructive Tests (MDT) Investigation: Case Study of The Church at Carthusian Monastery at Žice (SLOVENIA). *Int. j. archit. herit.* 4, 1: 1-15.

Brink, A. 2005. Einsatz der Impuls-Thermografie zur quantitativen zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Berlin, TU Berlin, Dissertation: 122 str.

FLIR. 2011. Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications. http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf (Pridobljeno 2. 12. 2012.)

FLIR. 2012. ResearchIR Max 3.2. http://flir.custhelp.com/app/account/fl_download_software (Pridobljeno 6. 12. 2012.)

Koloini, T. 1999. Prenos toplote in snovi. Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 273 str.

Louis, T. 2011. Heat transfer applications for the practicing engineer. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc.: str. 643.

Maldague, X. 2001. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons, Inc.: 684 str.

McGarrity, S. 2007. Textscantool.

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16075-textscantool>

(Pridobljeno 6. 12. 2012.)

Pilla, M., Klein, M. 2008. Ir View.

http://vision.gel.ulaval.ca/~klein/ir_view/IR_View.zip (Pridobljeno 6. 12. 2012.)

Strnad, J. 2004. Mala fizika 2. Ljubljana, DZS: 320 str.

Šolinc, H. 2000. Skozi fiziko z rešenimi nalogami: Toplota : zbirka nalog. Ljubljana, DZS: 322 str.

Štuhec, M. 2002. Fizika. Tržič, Učila international: 476 str.

Tršan, N. 2007. Delo in varnost.

<http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:DOC-78SG38HX/c56a4606-498d-4d74-8895-7321b403bf90/PDF> (Pridobljeno 2. 12. 2012.)