

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:

Jazbec, K., 2013. Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V.): 73 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:

Jazbec, K., 2013. Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V.): 73 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

Kandidatka:

KARMEN JAZBEC

**INFRARDEČA TERMOGRAFIJA KOT METODA
ZAZNAVANJA SEGREGACIJE
SAMOZGOŠČEVALNEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 3350/KS

**INFRARED THERMOGRAPHY AS METHOD FOR
DETECTION OF SELF-COMPACTING CONCRETE
SEGREGATION**

Graduation thesis No.: 3350/KS

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Patricia Cotič

Član komisije:

izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Ljubljana, 17. 12. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

IZJAVE

Podpisana Karmen Jazbec izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom: »Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona«.

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

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

Ljubljana, 17.12.2013

Karmen Jazbec

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.3(497.4)(043.2)
Avtor:	Karmen Jazbec
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Somentor:	asist. Patricia Cotič, univ. dipl. inž. grad.
Naslov:	Infrardeča termografija kot metoda zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona
Tip dokumenta:	diplomska naloga - univerzitetni študij
Opis in oprema:	73 str., 53 sl., 11 pregl., 7 graf., 22 en.
Ključne besede:	samozgoščevalni beton, segregacija, neporušne preiskave, termografija, termokamera, prenos toplote, temperaturna slika, fazna slika

Izvleček

V diplomski nalogi smo s pomočjo infrardeče termografije analizirali sposobnost zaznavanja segregacije v laboratorijskih preizkušancih iz samozgoščevalnega betona v odvisnosti od lastnosti mešanice. V uvodnem delu so predstavljene fizikalne osnove infrardeče termografije, osnove sestave in delovanja termokamere, uporaba termografije v gradbeništvu in sorodnih področjih ter najpogostejši načini obdelave podatkov pri termografiji. Strnjeno so opisane tudi lastnosti samozgoščevalnega betona. V eksperimentalnem delu je opisana priprava preizkušancev iz različnih betonskih mešanic. V okviru diplomske naloge nas je zanimala sposobnost uporabe tako aktivne kot pasivne termografije za oceno lastnosti strjenega betona, tj. za zaznavanje možne segregacije betonske mešanice, kot tudi za oceno gostote in porznosti le-te. Za pripravo dveh serij preizkušancev smo uporabili tri različne agregate; dva lahka agregata (nizke in visoke gostote) in navadni agregat. V okviru prve serije preizkušancev, kjer so bili pogoji segregacije kontrolirani, je bila narejena občutljivostna analiza termografske metode za zaznavanje segregacije v odvisnosti od načina obdelave podatkov. Ugotovljeno je bilo, da nam z najboljšimi rezultati postrežejo fazne ter temperaturne slike, vendar slednje le v primeru idealno enakomernega segregiranja in homogene površine. Z drugo serijo preizkušancev, kjer smo segregacijo simulirali z bolj tekočo betonsko mešanico, smo učinkovitost faznih slik dodatno potrdili. V nalogi smo dodatno primerjali tudi preizkušance iz lahkega agregata različnih gostot in ugotovili, da ima preizkušanec iz lahkega agregata večje gostote manjšo termično difuzivnost. Kot primer zaznave segregacije s pasivno termografijo, smo kot vir toplote izkoristili hidratacijsko toploto betona in ugotovili, da je količina sproščene toplote po razopaženju že premajhna za zaznavo le-te. Na preprostem primeru plošče pa smo pokazali, da lahko s termografijo lepo zaznamo posamezne faze hidratacije betona.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	691.3(497.4)(043.2)
Author:	Karmen Jazbec
Supervisor:	Asocc. Prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor:	Asist. Patricia Cotič, B.SC.
Title:	Infrared thermography as method for detection of self-compacting concrete segregation
Document Type:	Graduation thesis – University studies
Notes:	73 p., 54 fig., 11 tab., 5 graph., 22 eq.
Keywords:	self-compacting concrete, segregation, nondestructive testing, thermography, infrared camera, heat transfer, thermal image, phase image

Abstract

In the thesis the capability of using infrared thermography for the detection of segregation in laboratory specimens made from self-compacting concretes is analyzed with respect to the mixture properties. In the introduction the physical basis of infrared thermography is presented as well as the composition and operation of an infrared camera. Moreover, the applications of infrared thermography in civil engineering and related fields are outlined together with the common data processing approaches. In addition, the properties of self-compacting concrete are briefly presented. In the experimental part, the construction of specimens from different concrete mixtures is described. The thesis focuses on the capability of using both active and passive thermography for the estimation of the properties of hardened concrete, i.e. for the detection of possible segregation of the concrete mixture, as well as for the evaluation of its density and porosity. For the preparation of two series of specimens three different aggregates were used; two lightweight (with high and low density) and one normal weight aggregate. On the specimens from the first series (controlled conditions for segregation) a sensitivity analysis of the performance of IR thermography for the detection of segregation was carried out with respect to the different data processing approaches. Phase and thermal images were found to yield the best results. However, for good thermal images, ideally uniform heating and homogeneous specimen surface is required. With the second series of specimens (segregation simulated by more fluid concrete mixture), the efficiency of phase images was additionally confirmed. In the framework of the thesis a comparison between specimens made from lightweight concrete of different densities was additionally carried out. Lightweight specimen of higher density was found to have lower thermal diffusivity. As an example of segregation detection with passive thermography, the concrete

hydratation heat was exploited as heating source. It was shown that after the removal of the framework the amount of the released heat was too low to enable segregation detection. However, on a simple concrete plate we demonstrated that thermography is capable of detecting individual steps of concrete hydration.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in koristne nasvete bi se v prvi vrsti rada zahvalila mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov. Posebna zahvala gre asist. Patricii Cotič, ki mi je nesebično razdajala svoje znanje ter bila v pomoč kadarkoli sem jo potrebovala. Zahvaljujem pa se tudi Franciju Čeponu, za pomoč pri laboratorijskem delu.

Zahvalila bi se rada tudi mami in očiju, ki sta mi stala ob strani skozi celoten študij, me spodbujala ter stiskala pesti kadar je bilo potrebno.

Vsem prijateljem in sošolcem pa hvala za ta čudovita nepozabna leta, ki smo jih skupaj preživel na predavanjih in izven njih.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
1.1 UVOD V INFRARDEČO TERMOGRAFIJO.....	1
1.2 MOTIVACIJA IN HIPOTEZA DIPLOMSKE NALOGE	2
2 INFRARDEČA TERMOGRAFIJA	5
2.1 FIZIKALNO OZADJE	5
2.1.1 Pojem in merjenje toplote	5
2.1.2 Prenos toplote	5
2.2 OSNOVE TERMOKAMERE.....	14
2.3 PASIVNA IN AKTIVNA TERMOGRAFIJA	15
2.3.1 Pasivna termografija	15
2.3.2 Aktivna termografija.....	16
2.4 UPORABA TERMOGRAFIJE	19
3 SAMOZGOŠČEVALNI BETON	23
3.1 SAMOZGOŠČEVALNI LAHKI BETON.....	23
3.1.1 Prednosti in slabostilahkih betonov	23
3.1.2 Termoizolativne lastnosti lahkih betonov	23
3.1.3 Agregat	23
3.1.4 Načini proizvodnje.....	24
3.2 PROBLEM SEGREGACIJE SAMOZGOŠČEVALNIH BETONOV	25
4 IZVEDBA TERMOGRAFSKE MERITVE IN OBDELAVA TERMOGRAFSKIH PODATKOV	29
4.1 UPORABNOST IN NATANČNOST MERITEV	29
4.2 OPREMA.....	29
4.2.1 Grelna naprava.....	30
4.2.2 Termokamera	30
4.2.3 Programska oprema	31
4.3 OBDELAVA PODATKOV	31
4.3.1 Osnovne termografske slike.....	31
4.3.2 Načini obdelave podatkov pri aktivni termografiji	33
5 TERMOGRAFSKA PREISKAVA BETONSKIH ELEMENTOV	37
5.1 OPIS PRIPRAVE PREIZKUŠANCEV	37
5.1.1 Prva serija preizkušancev-kocke.....	37
5.1.2 Druga serija preizkušancev	40
5.2 OPIS TERMOGRAFSKE NAPRAVE IN POSTOPKA MERITEV	43
5.2.1 Gretje	44
5.2.2 Snemanje	45
5.2.3 Programska oprema	45
6 REZULTATI TERMOGRAFSKIH PREISKAV	49
6.1 REZULTATI PREISKAVE SEGREGACIJE PRVE SERIJE PREIZKUŠANCEV	49
6.1.1 Temperaturne slike	49
6.1.2 Temperaturne krivulje.....	52
6.1.3 Fazne slike	58
6.1.4 Cepitev prve serije preizkušancev	59
6.2 REZULTATI PREISKAVE SEGREGACIJE DRUGE SERIJE PREIZKUŠANCEV	60
6.2.1 Fazne slike preizkušancev iz navadnega betona	61
6.2.2 Fazne slike preizkušancev iz lahkega betona.....	62
6.2.3 Primerjava poroznosti preizkušancev HDSKC in LDSKC	62

6.2.4 Opazovanje ohlajanja zaradi hidratacije kot primer pasivne termografije	63
6.2.5 Cepitev druge serije preizkušancev	65
6.3 ZAZNAVANJE POTEKA HIDRATACIJE S PASIVNO TERMOGRAFIJO	67
7 ZAKLJUČEK	69
VIRI	71

KAZALO PREGLEDNIC

Tabela 1: Toplotna prevodnost nekaterih snovi [3].....	7
Tabela 2: Približne vrednosti toplotnih prestopnosti [4].....	8
Tabela 3: Povprečna emisivnost površin nekaterih materilov pri pravokotnem sevanju [4]	13
Tabela 4: Načini gretja [20]	30
Tabela 5: Receptura kocke št. 1 [22];, Receptura kocke št. 2:	38
Tabela 6: Receptura kocke št. 3:, Receptura kocke št. 4 [22]:	38
Tabela 7: Receptura preizkušanca LDSCC	41
Tabela 8: Receptura preizkušanca LDSCC-s	42
Tabela 9: Receptura preizkušanca HDSCC.....	42
Tabela 10: Receptura preizkušanca SCC	42
Tabela 11: Receptura preizkušanca SCC-s	43

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO SLIK

Slika 1: Sir William Herschel.....	1
Slika 2: Prevajanje toplote pri gradbenih konstrukcijah	6
Slika 3: Elektromagnetni spekter 1: Rentgenski žarki, 2: UV sevanje, 3: vidni žarki, 4: infrardečo sevanje, 5: mikrovalovi, 6: radiovalovi [5]	8
Slika 4: Elektromagnetni spekter infrardečega sevanja	9
Slika 5: Valovna dolžina	9
Slika 6: Porazdelitev vpadlega sevanja	10
Slika 7: Spektri črnega telesa po teoriji Planckovega zakona	11
Slika 8: Shematični prikaz merjenja predmeta s kamero. (1) je okolje, (2) merjeni predmet, (3) ozračje in (4) kamera [5].....	14
Slika 9: Sestava termokamere [6].....	15
Slika 10: Princip pulzne termografije [9].....	17
Slika 11: Prikaz hitre Fourierjeve transformacije (FFT)	18
Slika 12: Manjkajoč del termoizolacije [12]	20
Slika 13: Površna vgradnja fasadne izolacije je razlog za toplotni most v hladnem kotu in posledično za nastanek kondenzacije ter plesni [13].....	21
Slika 14: Pregrevanje varovalke [12]	21
Slika 15: Glinena kroglica lahkega agregata-Liapor	24
Slika 16: Od leve proti desni: "No-fines" beton, lahkoagregatni beton-Liapor, penobeton.....	25
Slika 17: Vertikalni prerez betonskega elementa iz navadnega betona v katerem je prisoten pojav segregacije [17]	26
Slika 18: Standardni preizkus razleza s posedom in ugotavljanje segregacije s fizičnim dotikom in vizualno oceno betonske mešanice	27
Slika 19: Model postavitve opreme in preizkušanca pri aktivni termografiji	29
Slika 20: Smeri osi pri termografski sliki.....	31
Slika 21: Termografska slika v 3D obliki	32
Slika 22: Površinska temperatura v odvisnosti od časa za točko nad anomalijo (angl.defect) in referenčno točko (angl.referencepoint) ter temperaturna razlika (angl. temperature difference) med referenčno točko in točko nad anomalijo [20].....	34
Slika 23: Fazne slike betonskega preizkušanca z votlinami [20]	34
Slika 24: Fourierova transformacija funkcije v obliki pravokotnega signala.....	35
Slika 25: Čas, ko se pojavi največji kontrast v odvisnosti od globine anomalij [1].....	35
Slika 26: Prikaz izračuna časovne slike [1].....	36
Slika 27: Modeli preizkušancev 2 (levo) in 3 (desno).....	38
Slika 28: Uporabljen agregat iz ekspandirane gline –Liapor	39
Slika 29: Kocka št. 1, kocka št. 2, kocka št. 3 in kocka št. 4.....	39
Slika 30: Premazana kocka št. 1	40
Slika 31: Uporabljena izolacija	40
Slika 32: Potek izdelave betonskega preizkušanca	41
Slika 33: Uporabljen agregat za preizkušanca SCC in SCC-s	43
Slika 34: Snemanje preizkušanca: levo zaklonišče, desno hala laboratorija	44
Slika 35: Sevalni peči, Quartz 1200	44
Slika 36: Uporabljena termokamera FLIR A320	45
Slika 37: Pogovorno okno programa FLIR ResearcherIR MAX 3.2	46
Slika 38: Grafični vmesnik knjižnice IR_view	47
Slika 39: Kocka št. 1: od leve proti desni: začetek snemanja, po 750s snemanja, konec snemanja.....	50
Slika 40: Temperaturna slika preizkušanca po 200s	50
Slika 41: Kocka št. 2: od leve proti desni: začetek snemanja, 750s snemanja, konec snemanja.....	51

Slika 42: Kocka št.3: od leve proti desni: začetek snemanj, 750s snemanja, konec snemanja.....	51
Slika 43: Kocka št.4: od leve proti desni: začetek snemanja, 750s snemanja, konec snemanja.....	52
Slika 44: Fazne slike pri najnižji frekvenci preizkušancev od leve proti desni: kocka št. 1, kocka št. 2, kocka št. 3, kocka št. 4.....	59
Slika 45: Cepitev kock.....	60
Slika 46: Levo: prva fazna slika preizkušanca SCC, desno: prva fazna slika preizkušanca SCC-s	61
Slika 47: Levo: prva fazna slika preizkušanca LDSCC, desno: prva fazna slika preizkušanca LDSCC-s	62
Slika 48: Fazne slike preizkušancev HDSCC in LDSCC.....	63
Slika 49: Snemanje hidratacije preizkušancev levo SCC in desno SCC-s	64
Slika 50: Prva fazna slika preizkušanca SCC in prva fazna slika preizkušanca SCC-s	65
Slika 51: Cepitev preizkušancev.....	66
Slika 52: Zgornji in spodnji del preizkušanca LDSCC-s, zgornji in spodnji del preizkušanca SCC-s ter spodnji del preizkušanca SCC	66
Slika 53: Postavitev kamere pri meritvi	67

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primera eksponentnih krivulj, kjer puščice označujejo smeri naraščanja omenjenih količin	54
Grafikon 2: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 1	55
Grafikon 3: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 2	56
Grafikon 4: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 3	57
Grafikon 5: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 4	58
Grafikon 6: Potek hidratacije cementa v betonu	68
Grafikon 7: Rezultati preiskav vezanja betona s penetrometrom [18]	68

»Ta stran je namenoma prazna.«

KRATICE

FFT	Hitra Fourierova transformacija (angl. Fast Fourier Transformation)
HDSCC	Preizkušane iz lahkega samozgoščevalnega betona (lahek agregat visoke gostote)
IR	Infrardeče
LDSCC	Preizkušane iz lahkega samozgoščevalnega betona (lahek agregat nizke gostote)
LDSCC-s	Segregiran preizkušane iz lahkega samozgoščevalnega betona
SCC	Preizkušane iz samozgoščevalnega betona
SCC-s	Segregiran preizkušane iz samozgoščevalnega betona
SP	Superplastifikator

1 UVOD

1.1 Uvod v infrardečo termografijo

Beseda termografija je sestavljena iz grških besed »thermos, therme«, ki pomeni topel, toplota in »graphos«, ki pomeni pisati, zapisan. Torej je termografija tehnika merjenja prenosa toplote in prikazovanja temperature na merjencu.

Skozi zgodovino človeštva sta temperatura in toplota predstavljali velik pomen v človekovem življenju. Od jamskega človeka, ki si je z ognjem zagotovil svetlobo, toploto in varnost pred zvermi do današnjega časa, ko prevroče ali premrzlo vreme vpliva na naš vsakdanjik. Prav tako temperatura prostora, v katerem bivamo, igra veliko vlogo pri našem počutju.

Meritve temperature preizkušanca lahko opravimo z različnimi pripomočki, od kontaktnih termometrov do termokamer. Prav razvoj termokamer pa je pojmu termografija dodal pridevnik infrardeče. Kdo je uvedel izraz infrardeče sevanje pravzaprav ni znano, vemo pa, da se je prvi začel s tem ukvarjati angleški astronom sir William Herschel leta 1800. Raziskoval je toplotni učinek različnih barv v mavričnem spektru bele svetlobe (slika 1). Infrardeče sevanje je tako znano že več kot 200 let. Herschel je dokazal, da gre pri infrardečem sevanju za enako sevanje (elektromagnetno sevanje) kot ga ima vidna svetloba, le da ga človeške oči na zaznajo, kar je poimenoval »temna svetloba«.



Slika 1: Sir William Herschel

Napredek termografije je bil nato razmeroma počasen, problem je bil predvsem, kako zaznati infrardeče sevanje. Komaj leta 1830 je bil razvit prvi termičlen, ki je bil bolj občutljiv na infrardeče sevanje kot črno pobarvan termometer Williama Herschela. Osnovo za današnjo infrardečo termografijo pa je predstavljal izum Samuela Langleya, tj. bolometer - naprava, ki se ji na podlagi spremembe temperature spreminja električna upornost.

Prvi večji koraki so bili narejeni v letu 1940, ko je razvoj termokamer šel v dve smeri. Prva je bila razvoj detektorja in skenerja, druga pa razvoj elektronike. Leta 1956 so Američani prvi izdelali termokamero, ki je delovala v območju valovnih dolžin med 8 μm in 14 μm , namenjena je bila snemanju tal iz letala. To je bil začetek intenzivnega in uspešnega razvoja različnih termokamer za raznovrstne namene. Prvi so jih začeli uporabljati vojaki in tudi današnje armade bogatejših držav so opremljene z mnogimi tipi termokamer. V civilno sfero se je uporaba termokamer prebila okoli leta 1965 in danes skoraj ni področja človekovega delovanja, kjer se je ne bi dalo s pridom uporabljati [1].

1.2 Motivacija in hipoteza diplomske naloge

Do sedaj so se na naši fakulteti, v sklopu diplomske naloge Primoža Murna [2] in doktorske naloge Patricie Cotič (v pripravi), že opravile določene porušne termografske preiskave gradbenih konstrukcijskih elementov. Na ometanih kamnitih zidovih pod vplivom strižne obremenitve je bila raziskovana možnost zaznavanja odstopanja ometa in nastanka razpok¹. Na betonskih konstrukcijskih elementih pa je bila narejena analiza učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij [2]. Ugotavljali so vpliv velikosti, oblike in globine anomalij iz različnih materialov, vpliv armature, starosti preizkušanca ter časa gretja preizkušancev na njihovo zaznavanje.

V okviru te diplomske naloge nas ni posebej zanimalo zaznavanje napak kot vključkov v betonskih preizkušancih, temveč določitev napak zaradi same sestave betonske mešanice, natančneje segregacija betona. Slednja je lahko problem pri vgrajevanju betonov z velikim deležem vode ali velikim deležem superplastifikatorja. K segregaciji so nagnjeni tudi samozgoščevalni betoni, še posebej, če so iz lahkega ali težkega agregata. Učinkovito zaznavanje problema segregacije v betonu je zato nujno področje raziskovanja, k čemur smo pristopili z metodo infrardeče termografije.

Hipoteza diplomske naloge je, da lahko z uporabo infrardeče termografije učinkovito zaznamo segregacijo samozgoščevalnega betona.

¹ Vir: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413002136>

Učinkovitost zaznavanja segregacije samozgoščevalnega betona smo preverili z uporabo tako pasivne kot aktivne infrardeče termografije (v nadaljevanju opuščamo izraz »infrardeče«), pri čemer smo analizirali tudi uporabnost različnih načinov obdelave podatkov. Prav tako smo želeli ugotoviti ali je metoda z uporabljenimi termokamero dovolj občutljiva, da zazna razliko v sestavi preizkušancev zaradi različne poroznosti ali različne gostote agregata. Analizirali smo preizkušance, kjer oblika ter globina »anomalije« nista bili natančno določeni ter definirani, s tem smo naredili korak dlje pri uporabi termografije v gradbeništvu. Stopili pa smo tudi na nepoznano področje, saj nismo uspeli najti objav, kjer bi bile opisane podobne preiskave, kot smo jih opravili mi, zato nismo vedeli kaj pričakovati in ali bodo naši rezultati smiselni ter uporabni. Kaj nam je uspelo izmeriti in ovrednotiti ter kaj smo se naučili, pa je predstavljeno v nadaljevanju.

»Ta stran je namenoma prazna.«

2 INFRARDEČA TERMOGRAFIJA

2.1 Fizikalno ozadje

2.1.1 Pojem in merjenje toplote

Pojem toplote definiramo kot tisti del notranje energije, ki prehaja iz mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo, vendar morata biti mesti v toplotnem stiku. Toplo telo toploto odda, hladno pa jo prejme. Pojav, kjer se toplemu telesu temperatura zniža, hladnemu pa zviša, lahko izkoristimo za merjenje toplote.

Prvi zakon termodinamike pravi, da je sprememba notranje energije toplotno izoliranega telesa enaka vsoti prejetega ali oddanega dela in toplote. Toplote ne moremo izmeriti neposredno, ampak le posredno, preko temperaturnih sprememb, ki jih povzročajo.

2.1.2 Prenos toplote

Čeprav ima pri prenosu toplote skozi trdno snov vlogo le prevajanje toplote, imajo za razumevanje celotne termografske preiskave vlogo vsi trije različni načini prenosa toplote, tj. prevajanje in prestop toplote ter sevanje. V nadaljevanju zato povzemam po [3] fizikalno ozadje vseh treh načinov prenosa toplote.

Prevajanje toplote – kondukcija

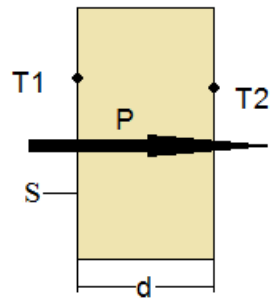
Prevajanje toplote ali kondukcija je pojav, kjer se toplota spontano širi po telesu z mesta z višjo temperaturo k mestu z nižjo temperaturo. Količina, ki opredeljuje jakost prevajanja toplote, je toplotni tok P . Če privzamemo, da se toplota širi le v eni smeri prečno na prerez S na sliki 2 (kar dobro velja za gradbene konstrukcije), lahko toplotni tok P definiramo kot

$$P = \frac{dQ}{dt}, \quad (2.1)$$

kjer so: P ...toplotni tok [W],

dQ ...množina toplote[J], ki steče v času dt skozi prečni prerez S [m²] snovi,

dt ...čas, v katerem steče toplota skozi prečni prerez S snovi.



Slika 2: Prevajanje toplote pri gradbenih konstrukcijah

Toplotni tok, ki pri tem teče skozi prečni prerez S , je po zakonu o prevajanju toplote sorazmeren velikosti prereza in spremembi temperature na obravnavani dolžini. Za steno s prečnim presežom S in debelino d se toplotni tok pri spremembi temperature ΔT zapiše kot

$$P = -\lambda * S * \frac{\Delta T}{d}. \quad (2.2)$$

Negativni predznak pri tem označuje, da toplota steče v smeri negativnega temperaturnega gradienta. Koeficient λ z enoto [W/mK] imenujemo toplotna prevodnost snovi in pove kolikšen toplotni tok prehaja skozi 1 m² površine in 1 m debeline zidu pri temperaturni razliki 1 K. Toplotna prevodnost je primarno odvisna od gostote (in poroznosti), vsebnosti vode in temperature snovi. Torej, bolj kot je neka snov lahka, zračna in izsušena, manj toplote prevaja.

Skoraj vse kovine imajo visoko toplotno prevodnost in so zato dobri prevodniki toplote, medtem ko so tekočine slabši prevodniki z vrednostmi koeficienta λ nekaj W/(mK). Toplotna prevodnost plinov je še manjša in meri samo nekaj stotink W/(mK). Vrednosti toplotnih prevodnosti nekaterih snovi, uporabnih v gradbeništvu so podane v tabeli 1. Vidimo lahko, da sta med najslabšimi prevodniki zrak in volna, kar izrabljamo pri volnenih oblačilih, pri večslojnih oknih in pri volnenih izolacijah.

Enačba (2.2) pravilno opiše prevajanje toplote le v stacionarnem režimu, kjer so robni pogoji temperature časovno neodvisni. Pri aktivni IR termografiji, kot bo v nadaljevanju opisano, pa z dovajanjem toplote preizkušanece segrevamo, s čimer se v času spreminja temperaturni profil površine stene. Za časovno odvisno prevajanje toplote, spreminjanje temperature določa parcialna diferencialna enačba

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.3)$$

kjer je $\alpha = \lambda / (\rho c_p)$ termična difuzivnost snovi, ρ gostota snovi in c_p specifična toplota snovi pri stalnem tlaku.

Tabela1: Toplotna prevodnost nekaterih snovi [3]²

Material	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Material	Toplotna prevodnost λ [W/mK]
Baker	390	Lahek agregat*	0,12-0,8
Aluminj	200	Opeka	0,63
Jeklo	50	Voda	0,59
Svinec	35	Les	0,04-0,12
Beton*	2,0	Min. volna*	0,04
Steklo	0,84	Zrak	0,024

Prestop toplote - konvekcija

Tekočine (plini in kapljevine) se kljub temu, da imajo malo toplotno prevodnost v nekaterih primerih segrejejo hitro. Razlog je v tem, da se pri njih toplota prenaša tudi z makroskopskim gibanjem molekul, tj. s prestopom toplote ali konvekcijo. Ločimo naravno konvekcijo, kjer gre za prenos toplote zaradi termičnega vzgona (segreta tekočina se bolj raztegne, nanjo zato deluje večji vzgon kot na hladnejšo tekočino), in prisilno konvekcijo, kjer pospešujemo konvekcijo z uporabo puhal, črpalk, mešal ali na kakšen drug način. Prestop toplote s konvekcijo je veliko hitrejši od prevajanja-kondukcije. Konvekcijo izračunamo z enačbo:

$$P = k * S * (T_1 - T_0), \quad (2.4)$$

kjer so: k ...toplotni prestopni koeficient [W/m²K], ki je odvisen od vrste snovi, hitrosti tokov,

S ...površina [m²],

T_1 ...temperatura konveksijske površine [K],

T_0 ...temperatura okolice [K].

²Vrednosti označene z zvezdico ne pripadajo viru [3], temveč:

Beton: http://www.fragmat.si/download/clanki/Gradbenik%20Prehod%20toplote_1.pdf

Lahek agregat – Liapor: www.liapor.com

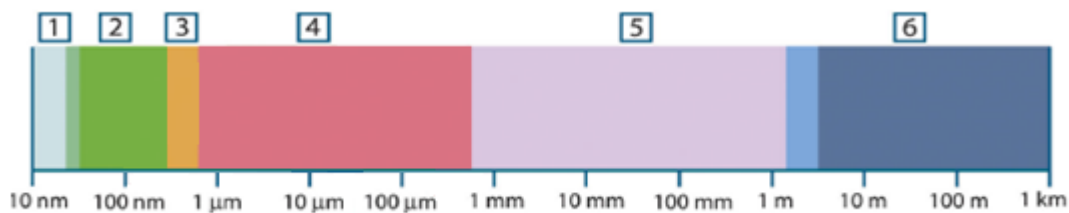
Mineralna volna: http://sl.wikipedia.org/wiki/Toplotna_prevodnost

Tabela 2: Približne vrednosti toplotnih prestopnosti [4]

Pojav	k [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
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

Sevanje ali radiacija

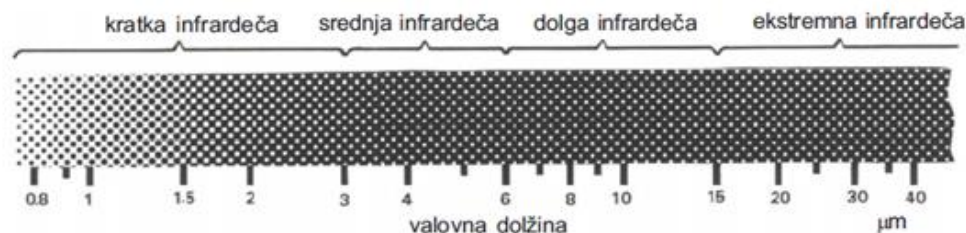
Ko telo prek svoje površine oddaja toploto in se ta prenaša skozi prostor kot elektromagnetno valovanje, imenujemo ta proces radiacija oziroma sevanje. Kot je prikazano na sliki 3 se elektromagnetni spekter glede na območje valovnih dolžin razvršča na več področij. Infrardeče valovanje se v elektromagnetnem spektru nahaja med vidnimi žarki in mikrovalovi ter obsega del od približno $0,75 \mu\text{m}$ do $15 \mu\text{m}$.



Slika 3: Elektromagnetni spekter 1: Rentgenski žarki, 2: UV sevanje, 3: vidni žarki, 4: infrardečo sevanje, 5: mikrovalovi, 6: radiovalovi [5]

Infrardeči pas se deli na štiri manjše pasove (slika 4):

- kratka infrardeča ($0,75 \mu\text{m} - 3 \mu\text{m}$),
- srednja infrardeča ($3 \mu\text{m} - 6 \mu\text{m}$),
- dolga infrardeča ($6 \mu\text{m} - 15 \mu\text{m}$) in
- ekstremna infrardeča valovna dolžina ($15 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$).



Slika 4: Elektromagnetni spekter infrardečega sevanja

(<http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:doc-FXURK150/4b7c65ab-4483-41e8-9b8c-e22eab876849/PDF>)

Sevanje kot elektromagnetno valovanje opišemo z valovno dolžino λ [m]³ in s frekvenco ν [Hz = s⁻¹]. Valovna dolžina predstavlja razdaljo med dvema vrhovoma valovanja, frekvenca pa predstavlja število valov, ki na sekundo prečkajo isto točko (slika 5).



Slika 5: Valovna dolžina

(<http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Vacuum+wavelength>)

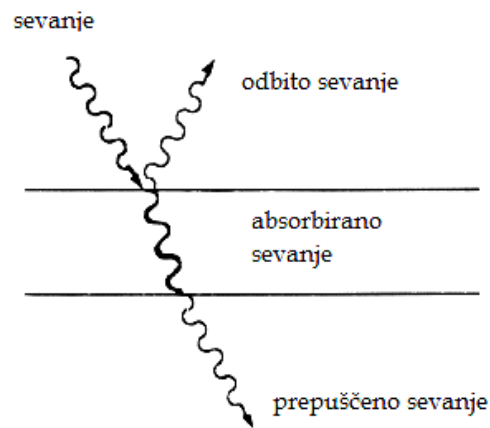
Sevanje črnega telesa

Idealnega črnega telesa v naravi ni, vendar je koncept le-tega zelo pomemben v termografiji. Uporaba termokamere se zelo poenostavi, če sevanje opazovanega telesa primerjamo s sevanjem črnega telesa.

Telo vso valovanje, ki do njega dospe, ne more sprejeti v celoti, nekaj valovanja se odbije, nekaj absorbira, nekaj pa ga gre skozi telo kot kaže slika 6. Deležu vpadne energije, ki se v telesu absorbira, pravimo absorptivnost (α), deležu energije, ki se odbije, odbojnost (ρ) in deležu energije, ki gre skozi telo, prepustnost (τ). Po zakonu o ohranitvi energije velja

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (2.5)$$

³ Ni enako kot toplotna prevodnost λ [W/m²K]



Slika 6: Porazdelitev vpadlega sevanja
(<http://www.ceramicx.com/infrared-heat/>)

Vsak izmed koeficientov ima lahko velikost od 0 do 1, odvisno koliko sevanja telo absorbira, odbija in prepušča. Izjema je črno telo, ki absorbira vso vpadlo sevanje pri katerikoli valovni dolžini, kar pomeni, da sta zanj odbojnost in prepustnost enaka nič. Idealni absorber pa je tudi idealni sevalec, kar opisuje Kirchoffov zakon:

$$\alpha = \varepsilon , \quad (2.6)$$

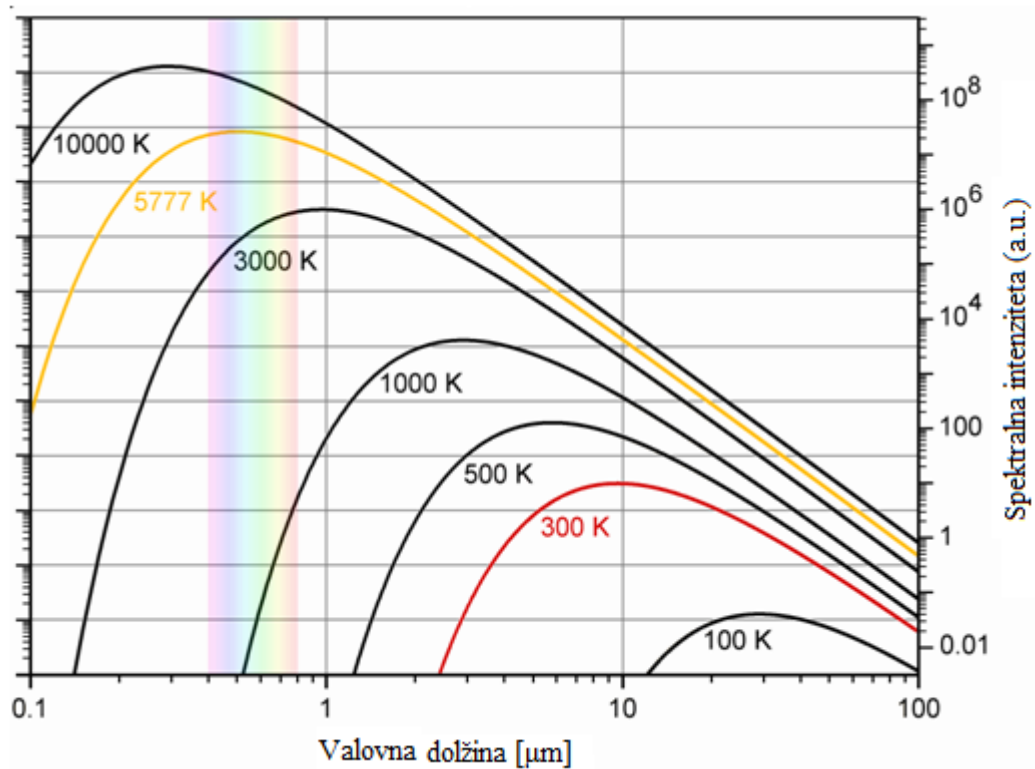
kjer je ε emisivnost telesa, tj. delež lastnega sevanja telesa. Z upoštevanjem Kirchoffovega zakona lahko delež odbite energije pri realnem neprepustnem telesu zapišemo kot

$$\rho = 1 - \varepsilon . \quad (2.7)$$

Trije fizikalni zakoni najlepše opišejo sevanje črnega telesa, in sicer Planckov zakon, Wienov zakon in Stefan-Boltzmannov zakon.

Planckov zakon

Od temperature telesa je odvisno, pri katerih valovnih dolžinah telo najbolj seva, kar opiše Planckov zakon. Iz slike 7 je razvidno, da telesa pri sobni temperaturi (t.j. 300K) najbolj sevajo ravno v infrardečem območju elektromagnetnega spektra, kar je ključnega pomena pri IR termografiji.



Slika 7: Spektri črnega telesa po teoriji Planckovega zakona
(http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png)

Na splošno Planckov zakon govori o tem, koliko sevajo telesa pri različnih valovnih dolžinah in različnih temperaturah. Enačba, ki to opisuje, je podana spodaj.

$$\frac{dj}{d\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi * h * c^2}{\lambda^5 * (\exp\left(\frac{h*c}{k_B*T*\lambda}\right) - 1)} \quad (2.8)$$

V enačbi so:

$\frac{dj}{d\lambda}(\lambda, T)$...gostota energijskega toka, ki jo seva enota črne ploskve v območju valovnih dolžin med λ in $\lambda+d\lambda$ pri temperaturi T. Pri tem je gostota energijskega toka dana z $j=P/S$,

h...Planckova konstanta, ki je enaka $6,62 \times 10^{-34}$ Js,

c...hitrost svetlobe v vakuumu, ki znaša 3×10^8 m/s,

k_B ...Boltzmannova konstanta, ki je enaka $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

Wienov zakon

S Planckovo funkcijo lahko iz pogoja ekstrema (kjer je odvod enačbe 2.8 enak 0) določimo tudi valovno dolžino, pri kateri je intenzivnost sevanja pri določeni temperaturi maksimalna. Maksimum je mogoče

tudi poiskati z Wienovim zakonom, ki pravi, da se vrh krivulje v Planckovi porazdelitvi premika v del z manjšimi valovnimi dolžinami pri naraščanju temperature. Zakon zapišemo z enačbo:

$$\lambda_{max} * T = k_w \quad (2.9)$$

Kjer sta: λ_{max} ...valovna dolžina, pri kateri telo največ seva in
 k_w ...Weinova konstanta, ki ima vrednost $2,898 \times 10^{-3}$ mK.

Stefan-Boltzmannov zakon

Če pa enačbo (2.8) integriramo po vseh valovnih dolžinah, dobimo gostoto skupnega izsevanega energijskega toka črnega telesa, ki jo podaja Stefan-Boltzmannov zakon. Po Stefan-Boltzmannovem zakonu je gostota skupnega izsevanega energijskega toka (j^*) premo sorazmerna četrti potenci njegove temperature in Stefan-Boltzmannovi konstanti v vrednosti $\sigma = 5,676 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

$$j^* = \sigma * T^4 \quad (2.10)$$

Sevanje realnega telesa

Realno telo seva manj kot črno. Količina, ki izraža sorazmeni delež med toplotnim tokom črnega telesa in toplotnim tokom realnega (sivega) telesa, je emisivnost in je dana z enačbo

$$\varepsilon = \frac{P_{sivo\ telo}}{P_{\text{crno}\ telo}} \quad (2.11)$$

Z upoštevanjem emisivnosti telesa, se Stefan-Boltzmannov zakon za sevanje realnega telesa zapiše:

$$j^*_{sivo\ telo} = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (2.12)$$

Črno telo ima emisivnost $\varepsilon = 1$, belo pa $\varepsilon = 0$. Popolnoma črnih teles v naravi ni, vendar pa vsako telo, ki ga premažemo s sajami ali črno matirano barvo, seva približno tako kot seva črno telo. S termokamero lahko določimo porazdelitev temperature po površini merjenca in prek te izsevane toplotno moč ter opazujemo okolico v drugi valovni dolžini kot s prostim očesom. Za pravilno oceno termodinamske temperature merjene površine s termokamero pa je nujno potreben podatek emisivnost površine.

Emisivnosti je več vrst: spektralna, utežna in totalna, ki prikazujejo spektralno porazdelitev sevanja ter usmerjena in hemisferna, ki prikazujeta geometrijsko porazdelitev sevanja. V praksi se najbolj

uporabljata hemisferna in usmerjena emisivnost. V primerih, ko je sevanje telesa zelo odvisno od smeri opazovanja, torej ko je emisivnost zelo usmerjena, moramo to dejstvo upoštevati pri meritvah in interpretaciji rezultatov. V praksi termokamero usmerimo čimbolj pravokotno na površino, zato tudi emisivnost imenujemo »pravokotna«. Pri delu s termokamero podatke glede emisivnosti najpogosteje prepisemo kar iz literature (npr. tabela 3).

Tabela 3: Povprečna emisivnost površin nekaterih materilov pri pravokotnem sevanju [4]

Površina	emisivnost
Aluminij-poliran	0,039
Železo-polirano	0,052
Železo-zarjavelo	0,685
Steklo-gladko	0,94
Opeka-rdeča	0,93
Opeka-silikatna	0,8-0,85
Beton	0,94

Vpliv ozračja

Ko opazujemo predmet s termokamero je med njima vedno ozračje, ki s svojimi lastnosti zelo vpliva na sliko, zato ga je potrebno poznati, meriti in preračunati njegove vplive.

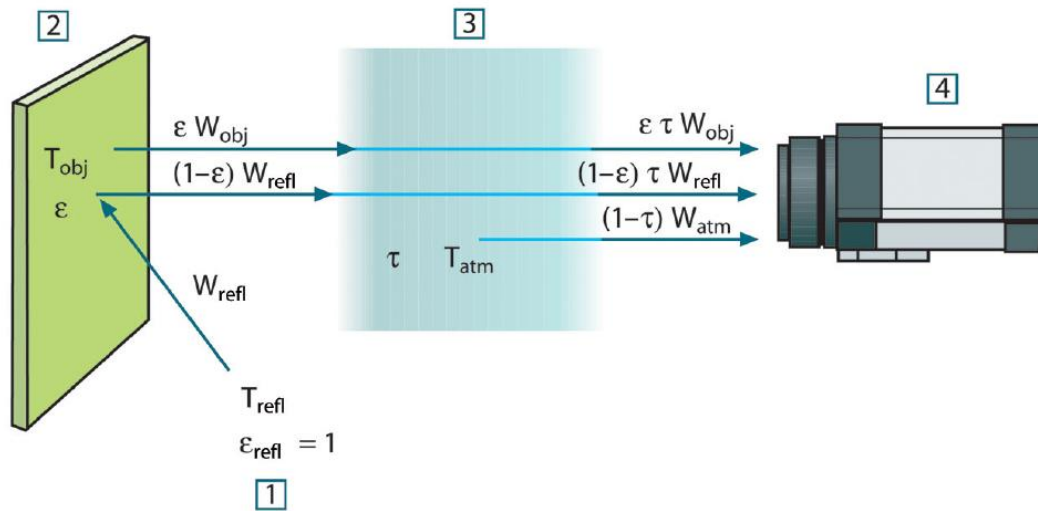
Sevanje se ob prehodu skozi ozračje zmanjšuje zaradi absorpcije ozračja ter razprševanja delcev v zraku. Velja, da večja kot je valovna dolžina sevanja in manjši kot so delci v ozračju, manjše je slabljenje sevanja. To je zelo pomemben podatek, saj to pomeni da je pri enakih fizikalnih pogojih v ozračju slabljenje infrardeče svetlobe z valovnimi dolžinami med 7,5 μm in 13,5 μm veliko manjše kot slabljenje vidne svetlobe. Skozi prah, dim, meglo vidimo zaradi tega s termokamero veliko bolje kot s prostim očesom.

Vendar pa termokamera ne prejema sevanja le od merjenega predmeta, ampak tudi od predmetov, ki se zrcalijo na površino predmeta ter od samega ozračja, ki zaradi absorbiranja sevanja, seva tudi samo, o čemer govori zgoraj omenjeni Kirchoffov zakon.

Imamo torej tri vire sevanja (slika 8):

1. Sevanje merjenega predmeta = $\epsilon * \tau * W_{obj}$, kjer je ϵ emisivnost predmeta in τ prepustnost ozračja.
2. Sevanje okoliških predmetov = $(1 - \epsilon) * \tau * W_{refl}$, kjer je $(1 - \epsilon)$ odbojnost predmeta ob upoštevanju neprepustnega telesa ($\tau = 0$).

3. Sevanje ozračja = $(1 - \tau) * W_{atm}$, kjer je $(1 - \tau)$ emisivnost ozračja.



Slika 8: Shematični prikaz merjenja predmeta s kamero. (1) je okolje, (2) merjeni predmet, (3) ozračje in (4) kamera [5].

Skupna količina sevanja, ki pade na objektiv termokamere je torej:

$$W_{tot} = \varepsilon * \tau * W_{obj} + (1 - \varepsilon) * \tau * W_{refl} + (1 - \tau) * W_{atm} . \quad (2.13)$$

2.2 Osnove termokamere

Čeprav infrardečega sevanja ni mogoče zaznati s človeškim očesom, ga lahko toplotna kamera pretvori v sliko, ki prikazuje spremembo temperature po telesu. Sevajo vsa telesa, ki imajo temperaturo nad absolutno ničlo, količina sevanja pa narašča s temperaturo. S termografijo lahko merimo temperaturo predmeta in prostora, ne da bi se dejansko dotaknili merjenca.

Sestava kamere je podobna sestavi digitalne video kamere. Glavne komponente so leče (B), ki usmerijo infrardeče sevanje (A) na detektor (C), elektronika za obdelavo podatkov (D) in programska oprema za procesiranje ter prikaz slik (E) (slika 9).



Slika 9: Sestava termokamere [6]

Vrsta stekla, ki se uporablja pri optičnih lečah video kamer, ne prevaja infrardečega valovanja dovolj dobro. V ta namen se za toplotno kamero uporabljajo materiali iz germanija in silicija, ki infrardečo svetlobo bolje prepuščajo. Če so leče ustrezne, lahko zagotovimo skoraj popolno prepustnost infrardečega sevanja.

Za razliko od digitalne video kamere, ki je občutljiva na elektromagnetni spekter vidne svetlobe, je detektor toplotne kamere občutljiv na valovanje infrardeče svetlobe. Obstajata dve vrsti detektorjev: termični in kvantni. Najpogosteje se uporabljajo nehlajeni mikrobolometrični termični detektorji, ki so narejeni iz prevodnih in polprevodnih materialov. Zajamejo širši spekter infrardeče svetlobe kot kvantni detektorji, ki delujejo na podlagi spremembe stanja elektronov v kristalni strukturi. Ti detektorji so hitrejši in bolj občutljivi kot termični, vendar pa za svoje delovanje potrebujejo ohlajanje.

Resolucija kamere lahko obsega območje od 160×120 do 1024×1024 pikslov velikosti mikrometra. Temperaturna občutljivost kamere omogoča zaznavanje temperature z natančnostjo manjšo od $\pm 1^\circ\text{C}$ [7].

2.3 Pasivna in aktivna termografija

IR termografija se lahko razdeli na dva različna pristopa merjenja temperature. Prvi pristop je pasivni pristop, kjer merimo naravno segrete predmete (kjer je toplotni vir sončno sevanje) nad temperaturo okolja. Drugi pristop pa je aktivni pristop, kjer je za izvedbo meritev potrebno umetno dovajanje toplote [8].

2.3.1 Pasivna termografija

V veliko industrijskih procesih je za uspešno delovanje potrebna višja temperatura in prav zaradi tega se lahko pasivna termografija izkaže za uporabno metodo. Uporablja se na področju proizvodnje, vzdrževanja, medicine, varstva pred ognjem, pri iskanju izgubljenih ljudi in nenazadnje na področju

neporušnega testiranja v gradbeništvu [8]. Na področju neporušnega testiranja se izkorišča naravna sprememba temperature, s katero lahko ugotovimo temperaturne izgube v zidovih, lokacijo vlažnih predelov v konstrukciji in lokacije lesenega opaža. Vendar pa je žal kar nekaj karakteristik, ki uporabo pasivne IR termografije v gradbeništvu otežujejo:

1. Gradbeni materiali imajo v splošnem zelo majhno toplotno prevodnost (glej tabelo 1), kar pomeni zelo počasen temperaturni odziv, torej počasno ogrevanje in počasno ohlajanje materialov.
2. Gradbene konstrukcije so velikih dimenzij z globoko ležečimi, težko dosegljivimi anomalijami (npr. kanali), ki jih ponavadi pokriva vsaj 10 cm debela plast kritja.
3. Zunanost stavb, mostovi in druge prometne konstrukcije so izpostavljeni spremenljivim okoljskim dejavnikom, ki imajo močan vpliv na uspešnost izvedene termografske meritve (nehomogeno gretje).
4. Nehomogena površina doprinese k zmanjšanju razmerja med signalom (zaželen signal) in hrupom (nezaželen signal) [9].

Kadar zaznamo neobičajno veliko razliko v temperaturi lahko sklepamo, da so se pojavile neke nepravilnosti (anomalije) v konstrukciji. Na splošno nam pasivna termografija poda rezultate kvalitativno, saj je cilj le ugotoviti, kje ležijo anomalije in jih izpostaviti [1].

2.3.2 Aktivna termografija

Kot sem že omenila je pri aktivni termografiji, nasprotno kot pri pasivni termografiji, potreben zunanji vir toplote, ki ogreva opazovani predmet. S tem odpravimo veliko težav, s katerimi smo se srečali pri pasivni termografiji. V ta namen je bilo razvitih več metod aktivne termografije, ki jih bom predstavila v nadaljevanju.

Pulzna termografija (angl. pulsed thermography)

Pulzna termografija je ena izmed najbolj razširjenih metod aktivne termografije. Eden izmed pglavitnih razlogov za razširjenost je zagotovo hitrost metode. Preiskava lahko traja od nekaj milisekund do nekaj minut. Za preizkušance iz materialov z veliko toplotno prevodnostjo (jeklo) je dovolj že nekaj milisekund, medtem ko je preizkušance iz materialov z majhno toplotno prevodnostjo (beton, opeka) potrebno greti več minut. Tako hitro gretje preprečuje, da bi preizkušanec preveč segreli in ga s tem poškodovali.

Bistvo metode je v tem, da preizkušanec na hitro segrejemo in opazujemo temperaturni profil njegovega ohlajanja (slika 10). Neobičajno obnašanje tega profila nakazuje na podpovršinske anomalije. Ko preizkušanec gremo se temperatura na površini hitro viša, čim preizkušanec nehamo greti se le-ta

začne ohlajati in temperatura na površini začne padati. Ta pojav je posledica prevajanja (difuzije) toplote pod površino telesa. Prisotnost anomalij zmanjša stopnjo difuzije in tako provzroči, da se na mestu anomalije temperatura na površju niža počasneje kot na preostalem delu, to pomeni, da se je obenem toplota počasneje širila v notranjost preizkušanca zaradi manjše toplotne prevodnosti.

Globlje ležeče anomalije kasneje povzročijo spremembo temperature na površini preizkušanca, vidimo pa jih tudi z zmanjšanim ter razpršenim kontrastom. Čas, ko anomalijo najbolje opazimo (tj. pri največjem temperaturnem kontrastu) je funkcija kvadrata globine anomalije in toplotne difuzije

$$t \approx \frac{z^2}{\alpha}, \quad (2.14)$$

kjer so: t ...čas največjega temperaturnega kontrasta [s],

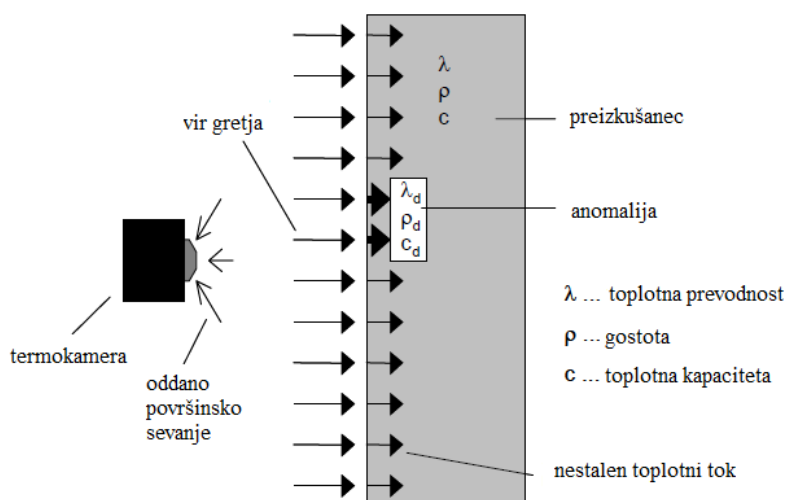
z ...globina anomalije [m],

α ...termičnadifuzivnost [m^2/s].

Vidimo, da se čas največjega temperaturnega kontrasta hitro večja z globino anomalije. Izguba kontrasta pa je obratnosorazmerna s kubom globine anomalije:

$$C \approx \frac{1}{z^3}, \quad (2.15)$$

kjer je C največji temperaturni kontrast [K].



Slika 10: Princip pulzne termografije [9]

Zaprta termografija (angl. lock-in thermography)

Zaprta termografija temelji na proizvodjanju toplotnih valov v preizkušancu zaradi periodičnega vzbujanja toplote.

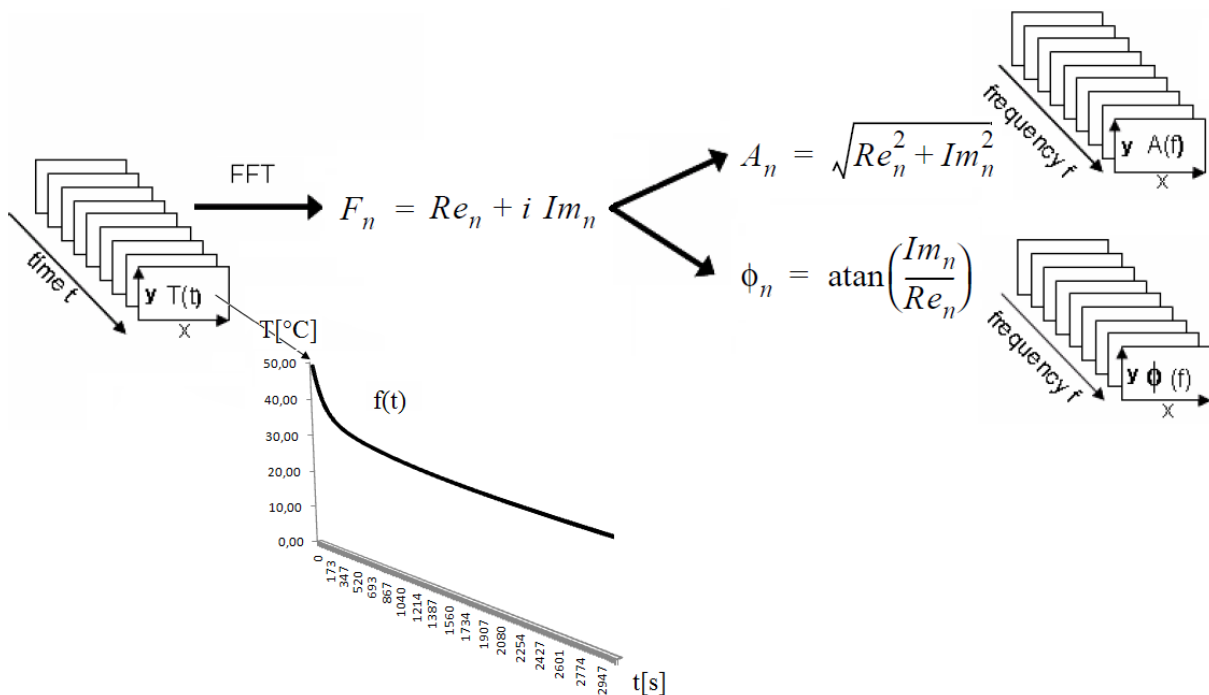
Pulzno-fazna termografija (angl. pulsed phase thermography)

Pulzno-fazna termografija je kombinacija pulzne termografije in zaprte termografije. Preizkušanec grejemo enako kot pri pulzni termografiji, analiza razvoja temperature pa je kot pri zaprti termografiji, tj. v frekvenčni domeni z izvedbo hitre Fourierjeve transformacije (angl. Fast Fourier transformation - FFT) časovnih signalov za vsak piksel na površini.

Iz termografske meritve dobimo dvodimenzionalne slike v časovnem profilu, nato pa s FFT iz časovne domene preidemo v frekvenčno domeno. Fourierjeva transformacija

$$F_n = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{-i\omega t} dt = Re(\omega) + iIm(\omega), \quad (2.16)$$

kjer je i imaginarno število, $Re(\omega)$ in $Im(\omega)$ pa sta realna in imaginarna komponenta transformacije, nam da amplitudne in fazne slike odvisne od frekvence. Shema FFT je prikazana na spodnji sliki (slika 11).



Slika 11: Prikaz hitre Fourierjeve transformacije (FFT)

Enačba $A_n = \sqrt{\text{Re}_n^2 + \text{Im}_n^2}$ predstavlja vrednost amplitude, enačba $\phi_n = \text{atan}\left(\frac{\text{Im}_n}{\text{Re}_n}\right)$ pa vrednost faze, ki jo dobimo za posamezen piksel n na sliki v odvisnosti od frekvence. Preizkušanece nato lahko obravnavamo skozi amplitudne ali fazne slike. Vendar pa se glavne prednosti pulzno-fazne termografije pokažejo ravno pri lastnostih faznih slik, ki so:

- boljša zaznava anomalij in defektov ter »globlji« vpogled v preizkušanece,
- manjši vpliv površinskih nehomogenosti,
- manjša občutljivost na nehomogeno gretje preizkušancea,
- boljša resolucija ter boljša zaznava geometrije defekta,
- pozicije defekta ni potrebno poznati v naprej.

Vse te lastnosti so tudi prednosti faznih slik v primerjavi z amplitudnimi in temperaturnimi slikami. Zaključimo lahko, da je kvalitativna pulzno-fazna termografija zelo primerna metoda ravno za neporušna testiranja v gradbeništvo [10].

Ponavljajoča termografija (angl. step heating)

Za razliko od pulzne termografije, kjer preizkušanece začnemo snemati takoj po končanem gretju, pri ponavljajoči termografiji snemamo preizkušanece že tekom gretja, saj nas zanima tudi naraščanje temperature že med samim gretjem. Preizkušanece se greje po več korakih in z manjšo močjo.

Vibracijska termografija (angl. vibrothermography)

Pri vibracijski termografiji je toplotni tok proizveden natančno nad anomalijo, toplotna energija pa je proizvedena z mehanskimi vibracijami.

2.4 Uporaba termografije

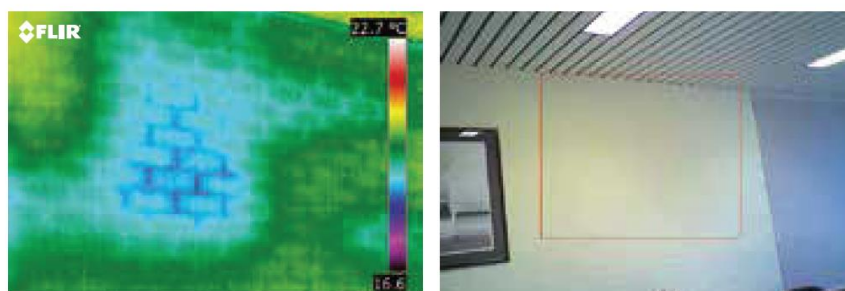
V preteklih letih se je IR termografija uveljavila kot uporabna metoda za neporušna testiranja. Je neinvazivna in nekontaktna metoda merjenja temperature in prikaza porazdelitve temperature po površini kakršnegakoli objekta, te lastnosti pa ji omogočajo široko možnost uporabe na vseh področjih. Termografija ponuja tudi nekontaktno, široko področje zaznavanja podpovršinskih anomalij. Uporabljena je lahko kot nadomestna ali dodatna preiskava že znanih neporušnih preiskav. Omogoča hiter pregled objektov, saj je možno naenkrat pregledati več kvadratnih metrov površine. Rezultati, ki jih dobimo, so relativno enostavni za interpretacijo, saj so prikazani slikovno. Poleg vsega tega pa je metoda popolnoma varna za uporabo.

Vendarle pa ima termografija tudi nekaj slabosti. Največjo težavo predstavlja hitro in enotno gretje večje površine, ki ga je večkrat težko zagotoviti. Zaznati je možno le napake oz. defekte, ki imajo dovolj

različno toplotno prevodnost od ostalega materiala. Nenazadnje pa je metoda omejena tudi z debelino preizkušanca, saj toplotni tok lahko prodre največ približno 10cm pod površino [8, 11].

S termografijo analiziramo lastnosti objekta, ki so sicer očem skrite. Njena uporaba v gradbeništvu je tekom let, v želji po zmanjšanju in učinkovitejši rabi energije, postala zelo široka. Omogoča nam, da:

- Ugotovimo nepravilnosti v konstrukciji pri vgradnji gradbenih elementov in materialov ter s tem povezanih energijskih izgub (primer prikazan na sliki 12). Meritve se pravilnoma izvajajo v zimskem času, saj je minimalna potrebna razlika med notranjo in zunanjo temperaturo 10°C.



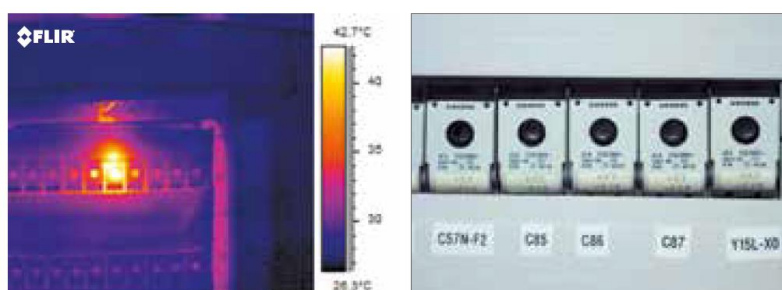
Slika 12: Manjkajoč del termoizolacije [12]

- Ugotovimo netesnost oken, ki lahko povzročijo povečano porabo energije in nastanek kondenzacije.
- Odkrijemo vlažne predele konstrukcije. Posledice delovanja vlage lahko opazimo pri poškodbah na zidovih, propadanju temeljev, odpadanju ometa, poškodovani notranji opremi,... V kolikor objekta ne saniramo dovolj hitro, ima lahko dolgotrajna vlažnost velik vpliv na statično stabilnost objekta, poleg tega lahko resno vpliva na zdravje uporabnikov. Da lahko naredimo ustrezne meritve, moramo konstrukcijo najprej segreti. Le tako lahko zagotovimo dovolj velik kontrast med suho in vlažno površino, saj se vlažni predeli ohlajajo veliko počasneje.
- Odkrijemo toplotne mostove, ki nastanejo pri stikovanju različnih konstrukcijskih elementov. Ti povzročijo izrazite toplotne izgube, privedejo pa lahko tudi do kondenzacije na notranji strani konstrukcije (slika 13).



Slika 13: Površna vgradnja fasadne izolacije je razlog za toplotni most v hladnem kotu in posledično za nastanek kondenzacije ter plesni [13].

- Odkrijemo mesto pronicanja vode, ki se najraje zgodi pri nenatančni izvedbi hidroizolacije na ravnih strehah. Meritve se izvajajo zvečer, ko se suhi predeli ter ozračje ohladijo, vlažni deli pa zaradi zadrževanja topote ostanejo dlje časa topli.
- Ugotovimo nepravilnosti v sistemu talnega gretja. Odkrijemo jih lahko zelo hitro, saj se po ceveh talnega gretja pretaka topla voda, le te pa so zaradi tega vidne tudi pod površjem.
- Zagotovimo kvaliteto stavbe, uporabimo pa jo lahko tudi pri pregledu in nadzoru novogradnje. V kolikor bi želeli predati hišo v uporabo hitreje, bi lahko s termografijo ugotovili nivo vlage v mladem betonu, kar bi nam omogočilo, da bi izvedli ukrepe za pospešeno sušenje stavbe.
- Poiščemo zamašene dele cevi ali kakšne druge nepravilnosti.
- Ugotovimo nepravilnosti v električnem omrežju, ki se pogosto kažejo s povišanjem temperature na teh mestih. Zaradi visokih temperatur in isker je možen celo vžig, zato je zelo pomembno, da napako najdemo pravočasno (primer prikazan na sliki 14) [2].



Slika 14: Pregrevanje varovalke [12]

- Pridobimo pomembne podatke pred sanacijo stavb in spomenikov. Odkrijemo lahko podometne strukture, kot so portali, vrata, okna in druge skrite oblike, ki so pomembne pri prenovi objektov.

Primeri uporabe termografije izven področja gradbeništva pa so:

- Restavriranje fresk, kjer je zelo uspešna metoda, saj hitro in učinkovito ugotovi lokacijo in velikost predelov, na katerih je določen sloj ometa s poslikavo odstopil od podlage. Za uspešnost meritev moramo notranji prostor najprej segreti.
- Medicina, kjer odmeva predvsem uporaba termografije v zvezi z odkrivanjem raka dojk. Termogafski pregled lahko odkirje spremembe v dojki precej prej kot mamograf, poleg tega pa je postopek neboleč, nekontakten in neinvaziven [11].
- Varovanje in nadzor različnih območij, ki potrebujejo nočni ali 24 urni nadzor, kot so letališča, državne meje, elektrarne, pristanišča, šole, industrijske hale,...

3 SAMOZGOŠČEVALNI BETON

Samozgoščevalni betonje visokozmogljiv beton, ki je samo zaradi delovanja lastne teže in lastne sposobnosti tečenja, to je brez vibriranja, sposoben zapolniti opaž poljubne oblike, popolnoma oblit nameščeno armaturo, se odzračiti in v določenih primerih tudi znivelirati, ne da bi pri tem kazal očitne znake segregacije [14].

3.1 Samozgoščevalni lahki beton

3.1.1 Prednosti in slabosti lahkih betonov

Lahki beton ima zelo dobro toplotno izolativnost in zadovoljivo trajnost, vendar ni odporen na abrazijo (obrabo). Je veliko boljši izolator kot navaden beton ali opeka, saj ima dosti nižjo toplotno prevodnost. Z zmanjšanjem gostote pa se lastnost še izboljša. Gostota lahkih betonov se giblje od 300kg/m^3 do 1850kg/m^3 . Ker pri betonskih konstrukcijah lastna teža konstrukcije predstavlja veliko obremenitev, sta majhna teža in gostota lahkih betonov velika prednost. Tekom gradnje z lahkim betonom opaž ni tako obremenjen, saj na njega delujejo manjši pritiski. Zaradi zmanjšanja teže materialov je povečana tudi produktivnost in hitrost gradnje [15].

Kot slabost lahkih betonov je potrebno omeniti nagnjenost k segregiranju, saj lahek agregat rad splava na površje, v kolikor receptura betona ni pravilna. Zaradi tega somešanje, vgradnja in obdelava nekoliko bolj kompleksni in potrebujejo več pozornosti. Izdelava lahkih betonov je tudi nekoliko dražja kot izdelava navadnih betonov [15].

3.1.2 Termoizolativne lastnosti lahkih betonov

Kot sem že omenila, ima lahki beton relativno visoko toplotno izolativnost, ki je bolj kot ne obratno sorazmerna z gostoto materiala. Zrak je slab prevajalec toplote (glej tabelo 1), zato je posledično tudi porozni lahki beton slab prevajalec toplote, vendar pa je iz istega razloga dober izolator. Tako lahko enostavno vidimo, kako je toplotna izolativnost snovi tesno povezana z gostoto snovi. Lažja kot je snov, več zraka vsebuje in bolj je izolativna [16].

3.1.3 Agregat

Glavna karakteristika lahkih agregatov je njihova visoka poroznost, ki se kaže v nizki specifični teži. Nekateri lahki agregati so naravnega izvora, nekateri pa so izdelani v proizvodnem obratu [15].

Naravni agregat

Plovec, žlindra, vulkanski pepel-tuf in diatomit so glavni predstavniki naravnih agregatov. Vsi razen diatomita so vulkanskega izvora. Naravni agregati niso zelo pogosto uporabljeni, saj jih lahko najdemo samo v nekaterih območjih. Najpogosteje je uporabljen plovec, ki je svetlo obarvano, penasto vulkansko steklo in ima gostoto v razsutem stanju v območju od 500 kg/m^3 do 900 kg/m^3 . Beton iz plovca pa doseže zadovoljivo gostoto od 700 kg/m^3 do 1400 kg/m^3 , je dober izolator, vendar pa je občutljiv na obrabo in krčenje [15].

Umetni agregat

Pogosto so poznani pod različnimi tržnimi imeni, vendar jih je najbolje razvrščati glede na metodo proizvodnje in glede na surovino iz katere so bili proizvedeni.

V diplomski nalogi je bil uporabljen agregat iz ekspandirane gline s tržnim imenom Liapor (slika 15). Agregat iz ekspandirane gline je sicer pridobljen iz naravnega mineralnega materiala, vendar njegova proizvodnja poteka z žganjem v rotacijski peči. Agregat iz ekspandirane gline ima idealno obliko delcev, saj je površina rahlo hrapava in zaprta, notranjost zrn pa ima običajno pravilno fino strukturo por. Zaradi svoje strukture por in poroznosti so visoko kakovostne glinene kroglice visoko toplotno izolativne in hkrati dobro akumulirajo toploto.⁴



*Slika 15: Glinena kroglica lahkega agregata-Liapor
(<http://www.meier-baustoffe.de/liapor-grundstoff.html>)*

3.1.4 Načini proizvodnje

Vsem načinom proizvodnje lahkih betonov je skupna vključitev zraka v sestavo betona. To lahko dosežemo na tri načine (slika16):

- odstranitev finih delcev (»no-fines« ali drenažni beton)

⁴ Vir: <http://www.liapor.com/en/group.php>

- nadomestitev gramoza ali drobljenega kamnitega agregata z votlim celičastim ali poroznim agregatom, ki vsebuje zrak (lahkoagregatni beton)
- ustvarjanje plinskih mehurčkov v vezivu, ki nam da gobi podobno strukturo (avtoklaviran celičasti beton)



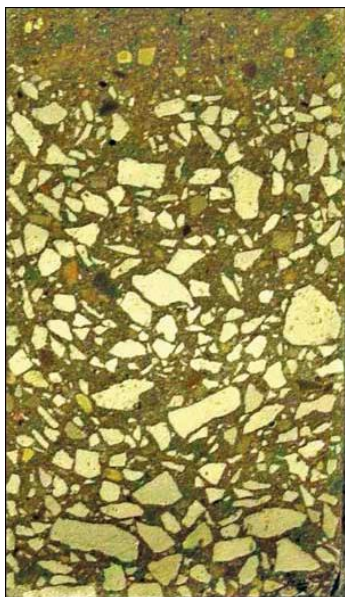
Slika 16: Od leve proti desni: "No-fines" beton, laškoagregatni beton-Liapor, penobeton
(<http://reforestation.me/fire-no-fines-concrete/>, <http://www.stylepark.com/en/liapor/leichtbeton-gefuegedicht>, <http://www.understanding-cement.com/autoclaved-aerated-concrete.html>)

3.2 Problem segregacije samozgoščevalnih betonov

Odpornost na segregacijo je sposobnost suspenzije delcev, da obdrži svojo homogenost med mešanjem, transportom in vgrajevanjem. Segregacijo pa lahko opišemo kot razporeditev sestavnih komponent sveže betonske mešanice tako, da le-te niso več enakomerno porazdeljene [17, 18].

Pri betonih iz agregata normalne gostote pri segregaciji večja agregatna zrna potonejo na dno, na vrhu pa se začne nabirati cementna malta ali pasta (slika 17). Pri betonih iz lahkih agregatov pa je situacija ravno obratna, saj večja lahka agregatna zrna splavajo na površje. Da bi se segregaciji izognili lahko upoštevamo osnovne principe rokovanja z betonom, kot so:

- učinkovita mešanica s porabo minimalne količine vode,
- oprema, s katero lahko hitro in učinkovito vgradimo beton,
- primerna konsolidacija betona,
- dobro usposobljena delovna sila [19].



Slika 17: Vertikalni prerez betonskega elementa iz navadnega betona v katerem je prisoten pojav segregacije [17]

Vzroki za segregacijo pa so:

- neustrezno razmerje vhodnih sestavin (razlike v količini, velikosti, gostoti, obliki agregatnih zrn, pretirana uporaba kemijskih dodatkov, neustrezno v/c razmerje,...),
- nepravilno mešanje,
- preveč tekoča sveža mešanica.

Možnost segregacije lahko zmanjšamo tudi z zmanjšanjem največjega zrna agregata, omejeno vsebnostjo agregata in uporabo paste z nizkim razmerjem med vodo in praškastimi delci. Posledice segregacije so slabše mehanske lastnosti strjenega betona in manjša obstojnost [17,18].

Ker je segregacija grobega agregata lahko velik problem za nekatere mešanice samozgoščevalnega betona, je bilo do danes predlaganih kar nekaj empiričnih preizkusov, s katerimi naj bi bilo moč preveriti ali betonska mešanica segregira. Vendar pa se v praksi najpogosteje uporablja standardni preizkus razleza s posedom, kjer sta izrazito viden obroč cementne paste na robu razlezenega vzorca betona ali nekoliko večja količina agregata nabranega v središču jasna indikatorja, da sveža betonska mešanica segregira (slika 18 levo). Drugi način pa je vizualna ocena ter fizični dotik sveže mešanice (slika 18 desno). Tako se pri določanju segregacije še vedno večinoma zanašamo na izkušnje in občutek. Tak pregled je seveda zelo subjektiven, zato je najbolje, da ga opravi izkušeni strokovnjak [17].



Slika 18: Standardni preizkus razleza s posedom in ugotavljanje segregacije s fizičnim dotikom in vizualno oceno betonske mešanice

»Ta stran je namenoma prazna.«

4 IZVEDBA TERMOGRAFSKE MERITVE IN OBDELAVA TERMOGRAFSKIH PODATKOV

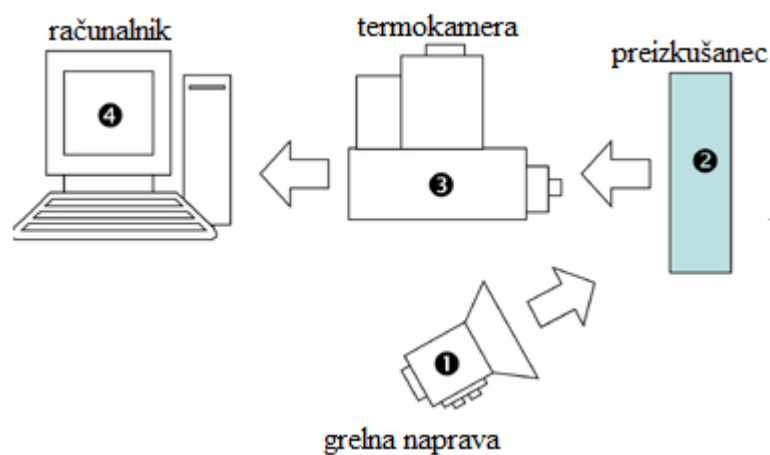
4.1 Uporabnost in natančnost meritev

Uporabnost in natančnost meritev pri aktivni in pasivni termografiji je odvisna od problema, ki si ga zadamo, objekta, ki ga preiskujemo in od uporabljene opreme.

Za uspešno izvedene meritve moramo zagotoviti dostopno in dobro vidno površino objekta, ki ga preiskujemo. Površina mora biti tudi čim bolj homogena v smislu enotne emisivnosti in majhne reflektivnosti. Preprečiti moramo posredno in neposredno sevanje drugih objektov na površino našega preizkušanca ter zagotoviti, da ozračje vsebuje čim manj prašnih delcev, prav tako pa je pomembno, da preprečimo dotok vetra, ki lahko povzroči prehitro odtekanje toplote [20].

4.2 Oprema

Za uspešno izvedbo eksperimenta potrebujemo grelno napravo, termokamera in računalnik, ki omogoči shranjevanje podatkov v realnem času ter kasnejšo obdelavo le teh (slika 19).



Slika 19: Model postavitve opreme in preizkušanca pri aktivni termografiji

V kolikor izvajamo pasivno termografijo grelna naprava seveda ni potrebna.

4.2.1 Grelna naprava

Z grelna napravo moramo ustvariti čim bolj homogen toplotni tok, kar je v praksi zelo težko zagotoviti. Kot je razloženo v poglavju 2.1.2 se lahko toplota širi na tri različne načine: s konvekcijo, radiacijo in kondukcijo, ki jih tudi izkoriščamo pri različnih načinih gretja. V kolikor bi želeli znižati temperaturo na površini preizkušanca, pa je možno tudi ohlajanje le-te.

Tabela 4: Načini gretja [20]

Radiacija	Konvekcija	Kondukcija
Infrardeči sevalnik	Ventilator z vročim zrakom	Ogrevalni podstavek
Bliskavica	Sušilnik za lase	Hladilne vrečke
Halogenska luč		Peltierove enote ⁵
Laser		
Sončna svetloba		

Za najbolj uporabne se izkažejo infrardeči sevalniki, s katerimi lahko hitro in učinkovito zagotovimo homogeno rast temperature. V kolikor je mogoče, sevalnike s pomočjo računalniškega vodenja premikamo na ustrezni razdalji in s tem zagotovimo kar se da homogeno segretje površine. Čas gretja lahko traja različno dolgo, od nekaj sekund pa do ene ure. Paziti moramo le, da se temperatura na površini ne dvigne nad 50°C (oz. manj, če zahtevano), saj to lahko povzroči poškodbe na površini preizkušanca.

Za meritve izvedene na gradbišču lahko uporabimo tudi grelec z ventilatorjem.

4.2.2 Termokamera

Ohlajanje površine našega preizkušanca opazujemo s termokamero. Preden začnemo z izvajanjem meritve moramo skrbno izbrati termokamero, ki najbolje ustreza našemu načinu izvajanja meritev. Pri izbiri se seveda naslanjamo na tehnične karakteristike proizvajalca, saj iz njih ocenimo ali bomo dobili zanesljive ter uporabne rezultate meritev. Termokamera mora biti s svojimi tehničnimi lastnostmi prilagojena zahtevam, ki jih določa uporaba v realnih pogojih, razpoložljiva programska oprema in usposobljenost uporabnika, tako da z njo lahko izmerimo vse tisto, kar zahteva naš projekt [21].

⁵Peltierova enota je naprava, ki prenaša toploto iz ene strani naprave na drugo s porabo električne energije.

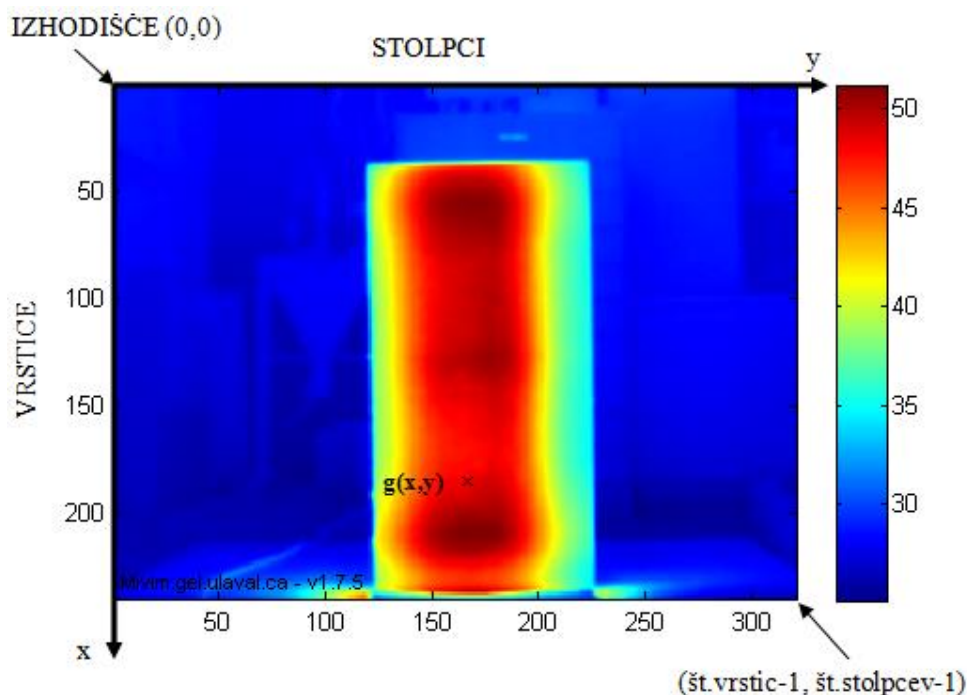
4.2.3 Programska oprema

Ker je meritve potrebno tudi shraniti, obdelati in ustrezno ovrednotiti, potrebujemo za vse to primerno programsko opremo. Odločitev, kakšna naj bo ta programska oprema, pa je pogojena z izbiro termokamere in potreb ter zahtev po nadaljni obdelavi podatkov [2].

4.3 Obdelava podatkov

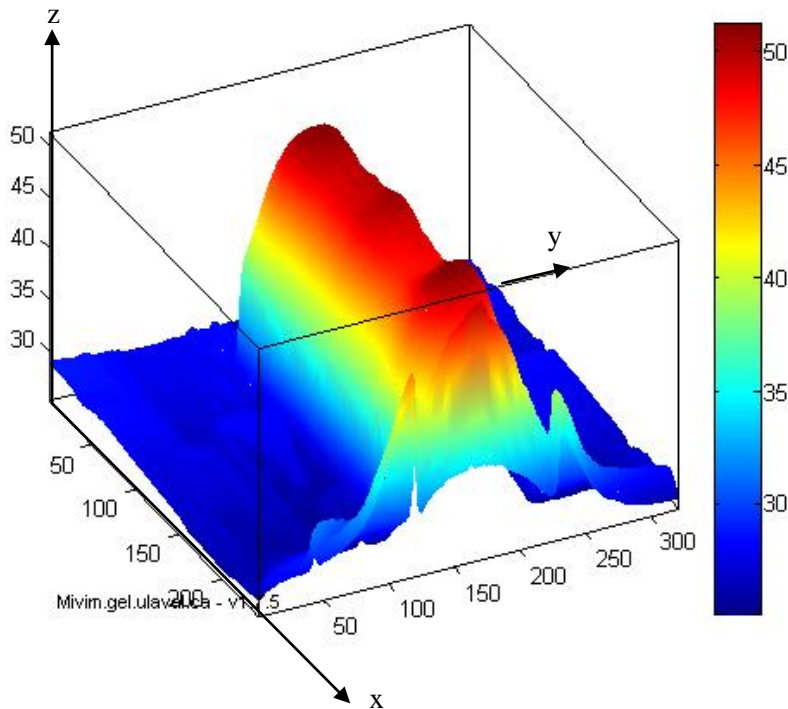
4.3.1 Osnovne termografske slike

Digitalna slika, ki jo pri termografski meritvi dobimo kot podatek, je zvezna funkcija $g(x,y)$, diskretizirana po spremenljivkah x in y ter jakosti. Predstavlja jo matrika, kjer lahko stolpce in vrstice razumemo kot koordinate točk na sliki, medtem ko same vrednosti matrike predstavljajo stopnjo jakosti sevanja oz. površinsko temperaturo preizkušanca (slika 20).



Slika 20: Smeri osi pri termografski sliki

Podatki, ki jih pridobimo iz termokamere so lahko 8, 12 ali 16 bitni, kar pomeni $2^8=256$ (0 do 255), $2^{12}=4096$ (0 do 4095) ali $2^{16}=65536$ (0 do 65535) jakostnih stopenj. V diplomski nalogi bo uporabljena barvna lestvica prikazana na sliki 20, kjer rdeče barve predstavljajo višjo temperaturo merjenca oz. večjo jakost sevanja, modre barve pa manjšo. Rezultate pa je možno predstaviti tudi v 3D obliki, kjer je tretja os jakost in višji kot je vrh, višja je jakost (slika 21).



Slika 21: Termografska slika v 3D obliki

Velikost slike je različna in je odvisna predvsem od termokamere, ki smo jo uporabili. Poleg velikosti posameznega piksla (število bitov), je pomembna prostorska velikost slike. Te so lahko od 64×64 do 512×512 in več točk, možna pa je tudi pravokotna razporeditev točk.

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

Če upoštevamo še velikost posameznega piksla, je celotna velikost slike definirana kot

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

kjer je b število bitov potrebnih za shranitev ene točke na sliki.

Prostorska ločljivost slike je torej odvisna od velikosti matrike $g(x,y)$. Več vrstic in stolpcev pomeni večjo kvaliteto slike, vendar pa to pomeni večjo količino podatkov in daljši čas izračuna [1].

Za preiskave gradbenih konstrukcij je priporočena minimalna prostorska ločljivost 2 mrad.

Na kvaliteto meritev pa vpliva tudi temperaturna ločljivost, priporočena vrednost le te pri neporušnih preiskavah gradbenih materialov je 0,2 K.

V kolikor želimo spremljati časovno odvisnost temperaturnega profila, moramo določiti frekvenco zajemanja slik in čas meritve. Za opravljanje neporušnih preiskav gradbenih materialov je priporočena vrednost okoli 1 Hz, čas meritve pa nekaj minut [2].

4.3.2 Načini obdelave podatkov pri aktivni termografiji

Ker je pri aktivni termografiji poznanih več tehnik testiranja preizkušancev, obstaja tudi več načinov obdelave pridobljenih podatkov. V nadaljevanju bodo predstavljeni najbolj pogosti načini ter tisti, ki je bil uporabljen pri naši preiskavi.

Temperaturni kontrast pri pulzni termografiji

Osnova termografije je merjenje površinske temperature preizkušanca. V kolikor spremljamo tudi časovni potek ohlajanja površinske temperature kot pri postopku pulzne termografije, lahko za vsako točko na površini narišemo grafikon površinske temperature v odvisnosti od časa. Če izkoriščamo dejstvo, da točke nad anomalijo izkazujejo spremenjen temperaturni profil glede na referenčno območje (brez anomalije), nas posebej zanima, kakšna je razlika v poteku temperaturnega odziva točke nad anomalijo glede na referenčno točko.

Če ti dve krivulji med sabo odštejemo dobimo novo krivuljo v odvisnosti od časa, krivuljo temperaturnega kontrasta (slika 22). Zapišemo jo z enačbo:

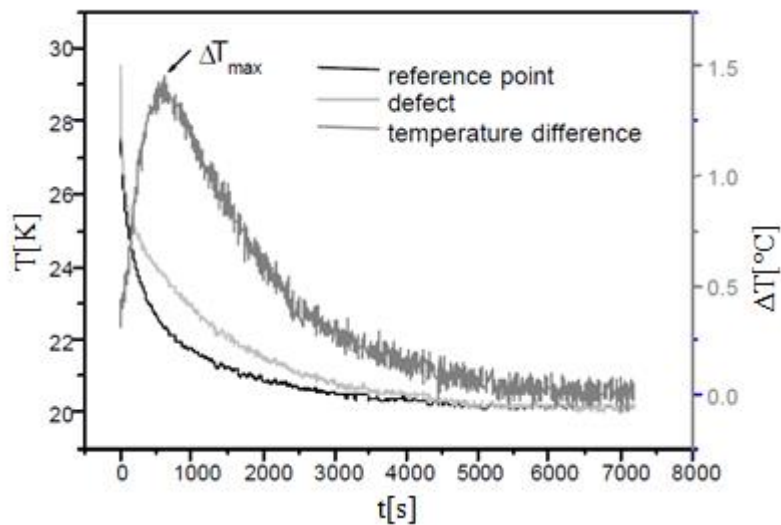
$$\Delta T(t) = T_{\text{def}}(t) - T_s(t), \quad (4.3)$$

kjer so: $\Delta T(t)$...temperaturni kontrast,

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

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

Čas pri katerem pride do največjega temperaturnega kontrasta ($t_{\Delta T_{\text{max}}}$) je odvisen predvsem od globine, vrste in termičnih lastnosti anomalij [13].

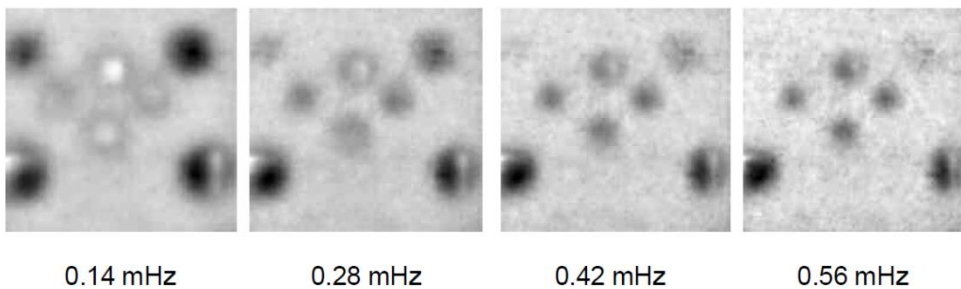


Slika 22: Površinska temperatura v odvisnosti od časa za točko nad anomalijo (angl. defect) in referenčno točko (angl. reference point) ter temperaturna razlika (angl. temperature difference) med referenčno točko in točko nad anomalijo [20]

Vendar pa krivulje temperaturnih kontrastov pri rešitvi našega problema niso koristne, saj ne poznamo globine segregacije, poleg tega ta ne nastopi le na eni določeni točki, ampak je naključno porazdeljena po celotnem profilu preizkušanca, tj. izbira primerne referenčne točke bi bila zahtevna ali celo neustrezna.

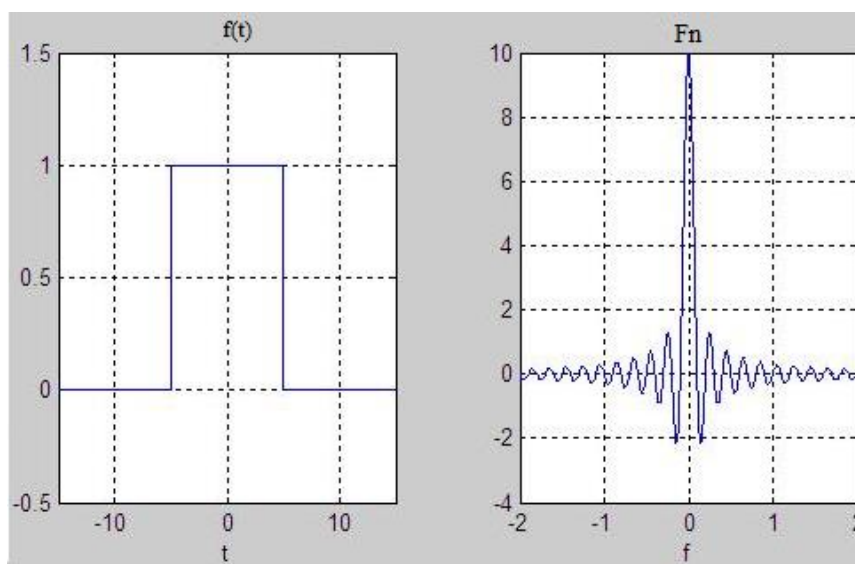
Obdelava podatkov pri pulzno-fazni termografiji

Pri obdelavi faznih slik se opremo predvsem na prve fazne slike, ki jih dobimo s pomočjo FFT, o kateri smo govorili v poglavju 2.3.2 Aktivna termografija. Vemo, da nižje frekvence prodrejo globlje v preizkušanelec, saj toplotni valovi (angl. thermal waves) nižjih frekvenc penetrirajo globlje in počasneje v preizkušanelec (slika 23). Tako prva fazna slika, ki je slika pri najnižji frekvenci, nosi informacijo o celem globinskem profilu preizkušanca, do koder je toplota penetrirala. Višje frekvence pa kažejo majhne temperaturne kontraste in bi jih uporabili, če bi gledali pojav manjših lokalnih napak (recimo razpok).



Slika 23: Fazne slike betonskega preizkušanca z votlinami [20]

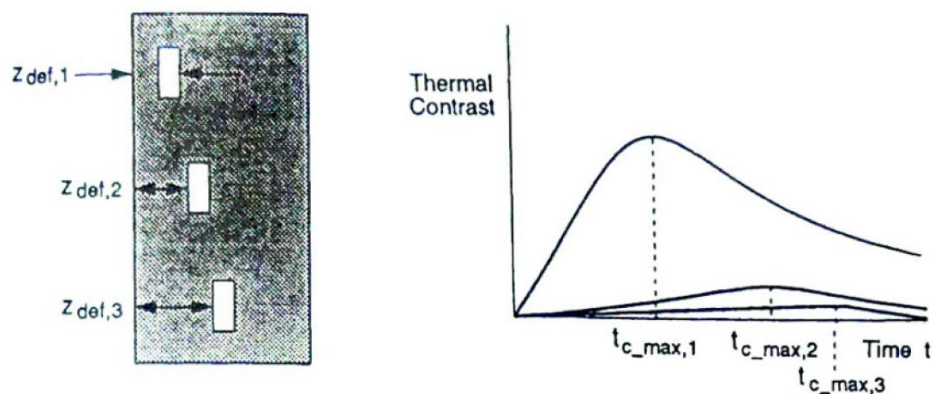
Tehnika testiranja preizkušnca pri pulzno-fazni termografiji je gretje z daljšim pulzom (nekaj minut). To pomeni, da dovedeno toploto lahko opiše funkcija $f(t)$ v obliki pravokotnega signala (slika 24 levo). Izkaže se, da po FFT dobimo iz funkcije $f(t)$ funkcijo F_n v taki obliki, da imamo pri najnižji frekvenci (f) nakopičene največ energije (slika 24 desno). To je tudi razlog zakaj gledamo prvo fazno sliko.



Slika 24: Fourierova transformacija funkcije v obliki pravokotnega signala
(<http://www.thefouriertransform.com/transform/fourier.php>)

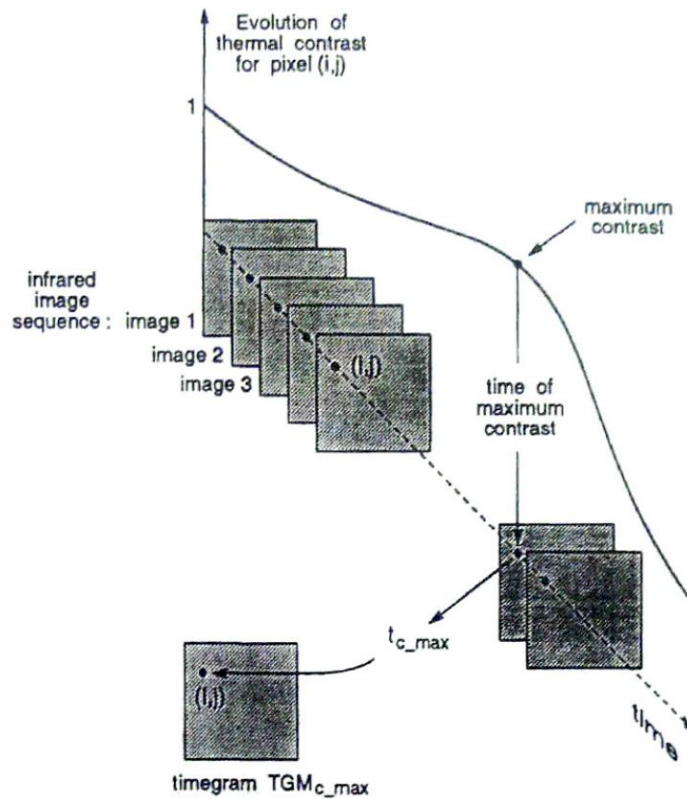
Toplotna tomografija

Ideja toplotne tomografije je, da preizkušanec prikazemo po plasteh, kar dosežemo s prikazom časov, kjer nastopijo največji temperaturni kontrasti. Iz slike 25 je namreč razvidno, da je čas nastopa največjega kontrasta odvisen od globine anomalije. Največji temperaturni kontrast pripada najmanjši globini prav tako pa nastopi najhitreje, kar potrjuje enačbi (2.14) in (2.15).



Slika 25: Čas, ko se pojavi največji kontrast v odvisnosti od globine anomalij [1]

Čas, ko nastopi največji temperaturni kontrast lahko zapišemo za vsako točko na merjencu. Če te vrednosti temperaturnih kontrastov združimo, lahko ustvarimo t.i. časovno sliko (timegram), kar je prikazana na sliki 26.



Slika 26: Prikaz izračuna časovne slike [1]

Če predpostavimo, da ima merjenec enakomerno segreto površino, bi imela območja z enakimi toplotnimi lastnosti enake t_{c_max} . Časovne slike lahko omejimo na največji in najmanjši čas $[t_1, t_2]$ in tako spremljamo le določene temperaturne kontraste. Ker vemo, da je t_{c_max} odvisen od globine, se z različnimi časovnimi intervali lahko na nek način premikamo po globini preizkušanca.

Vendar pa toplotna tomografija prav tako, iz istega razloga kot temperaturni kontrast pri pulzni termografiji, ni koristna pri naši preiskavi.

5 TERMOGRAFSKA PREISKAVA BETONSKIH ELEMENTOV

5.1 Opis priprave preizkušancev

Za namen diplomske naloge smo analizirali dve seriji betonskih preizkušancev; 1. serija – manjše betonske kocke in 2. serija – večji betonski kvadri (manjši stenasti nosilci). Najprej smo pomerili preizkušance, ki smo jih naredili sami, tj. 2. serijo, kjer smo poskušali simulirati naravno povzročeno segregacijo zaradi sestave betonske mešanice. Izkazalo se je, da je interpretacija termografskih rezultatov zahtevna in da potrebujemo bolj kontrolirane pogoje segregacije za določitev smiselnih sklepov. Naknadno smo zato analizirali betonske kocke (1. serija). Ta serija je obsegala dve že pripravljene kocki v sklopu diplome Aleša Miketiča z naslovom »Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspanzirane gline« [22]. Pri tem je ena kocka imela zelo visoko stopnjo segregacije, medtem ko je bila druga homogena in brez segregacije. Da bi lahko raziskali občutljivost termografije v odvisnosti od stopnje segregacije, smo pripravili dve dodatni kocki, s katerima smo želeli simulirati segregacijo lahkega agregata iz ekspanzirane gline – liaporja. Za boljše razumevanje in predstavbo bom najprej predstavila rezultate, ki smo jih pridobili iz 1. serije preiskav (kocke), sledili bodo rezultati 2. serije preiskav (kvadri).

5.1.1 Prva serija preizkušancev-kocke

V ta sklop spadajo štiri kocke velikosti $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ iz lahkega agregata nizke gostote. Prostorninska masa takšnega agregata je 600kg/m^3 do 700kg/m^3 , torej gre za lahek toplotno izolacijski material z nizko prevodnostjo (slika 28). Kocki št. 1 in 4 sta bili pripravljene v okviru diplome Aleša Miketiča, kocki št. 2 in 3 pa smo naredili sami.

Sestave betonskih kock so skrbno preračunane, kocke pa so merjene v nadzorovanih pogojih (zaklonske Konstrukcijsko-prometna laboratorija). Potrudili smo se tudi, da je bila površina kock segreta kar najbolj homogeno, kar je bilo zaradi njihove majhnosti mogoče. V tabelah 5 in 6 podajam recepture betonskih mešanic, kjer okrajšava SP pomeni superplastifikator.

Kocki 1 in 4 predstavljata dva skrajna pojava. Prva kocka predstavlja segregacijo zelo visoke stopnje, četrta kocka pa predstavlja mešanico, kjer ni prišlo do segregacije. Z vmesnima kockama smo želeli doseči vmesne stopne segregacije. Pri prvi izmed vmesnih kock, kocki št. 2, smo vgradili tri 5 cm debele plasti različnih sestav, pri drugi izmed vmesnih kock, kocki št. 3, pa smo vgradili pet po 3 cm debelih plasti različnih sestav, kot kaže slika 27.

Tabela 5: Receptura kocke št. 1 [22]:

V Liapor 1/8	1kg (15,98%)
Cement ⁶	1,6kg (25,57%)
Moka	0,52kg (8,31%)
Pesek 0/4	2,4kg (38,35%)
Voda	0,72kg (11,51%)
SP	0,018kg (0,288%)

Receptura kocke št. 2:

Cement		0,605kg
Voda		0,245kg
I. plast	Liapor	/
	Pesek 0/4	1,81 kg
III. plast	Liapor	0,278 kg
	Pesek 0/4	0,667 kg
V. plast	Liapor	0,441 kg
	Pesek 0/4	/

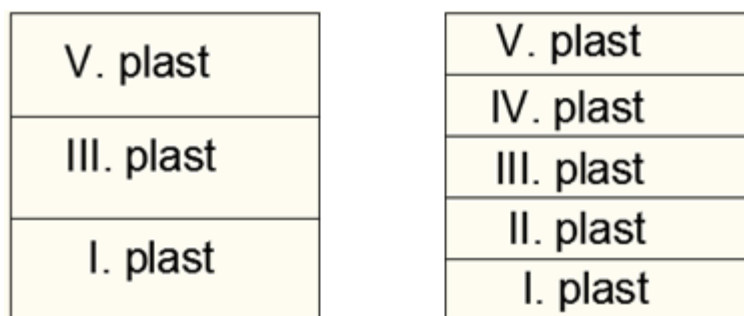
Tabela 6: Receptura kocke št. 3:

Cement		0,363 kg
Voda		0,148 kg
I. plast	Liapor	/
	Pesek 0/4	1,09 kg
II. plast	Liapor	0,0839 kg
	Pesek 0/4	0,745 kg
III. plast	Liapor	0,168 kg
	Pesek 0/4	0,401 kg
IV. plast	Liapor	0,216 kg
	Pesek 0/4	0,200 kg
V. plast	Liapor	0,265 kg
	Pesek 0/4	/

Receptura kocke št. 4 [22]:

V Liapor 1/8	12,5kg (15,46%)
Cement	27,12kg (33,56%)
Moka	/
Pesek 0/4	30kg (37,11%)
Voda	10,98kg (13,58%)
SP	0,234kg (0,289%)

Prostorninske mase mešanic za vse štiri kocke se gibljejo med $\gamma = 1310 - 1340 \text{ kg/m}^3$



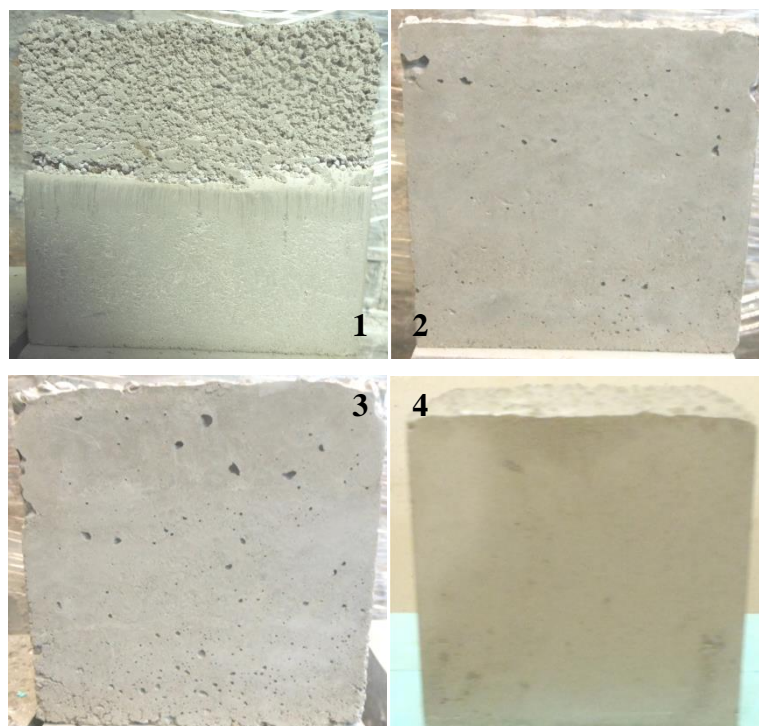
Slika 27: Modeli preizkušancev 2 (levo) in 3 (desno)

⁶Uporabljen cement CEM I 42,5 R



Slika 28: Uporabljen agregat iz ekspandirane gline –Liapor

Pri določanju recepture za kocki 2 in 3 smo spreminjali le volumsko razmerje agregatov, volumen cementa in vode pa je ostal enak. Tako smo dosegli, da je bilo volumsko razmerje med agregatom in vezivom vedno enako. Vsako izmed plasti smo vgradili posebej. Uporabljene kocke so prikazane na sliki 29.



Slika 29: Kocka št. 1, kocka št. 2, kocka št. 3 in kocka št. 4

Kocko št.1 je bilo potrebno premazati s plastjo cementne paste, saj je bilo potrebno doseči enakomerno emisivnost površine. Da se zgornji del kocke ni segreval prehitro, smo potrebovali plast ustrezne debeline. Odločili smo se za debelino enako 1,2cm (slika 30).



Slika 3030: Premazana kocka št. 1

Pri termografski analizi kock smo se želeli čim bolj približati idealnim pogojem, kjer predpostavljamo toplotni tok le v eni smeri. Zato smo pri meritvi teh preizkušancev uporabili dodatno toplotno izolacijo (slika 31), s čimer smo dosegli, da je toplotni tok prehajal le v smeri kamere, ter da se robovi niso prehitro ohlajali.



Slika 31: Uporabljena izolacija

5.1.2 Druga serija preizkušancev

Drugo serijo preizkušancev predstavljajo kvadri, manjši stenasti elementi širine 50 cm, višine približno 80 cm in debeline 10 cm, iz navadnega samozgoščevalnega betona in iz lahkega samozgoščevalnega betona (kjer smo za lahki agregat ponovno uporabili ekspanzirano glino oz. liapor). Zaradi večje teže preizkušancev le-teh po betoniranju nismo premaknili v prostor v zaklonišču, ampak so preiskave potekale v hali Konstrukcijsko-prometnega laboratorija, kjer so bili moteči dejavniki, kot je višja temperatura in zračni tokovi, veliko bolj prisotni in manj nadzorovani. Zaradi večje površine preizkušancev pa je bilo težje tudi homogeno gretje.

Potek priprave preizkušancev je potekal enako za vse preizkušance, ki smo jih naredili. Najprej smo sestavili opaž, nato smo zamešali betonsko mešanico iz sestavin, ki smo jih pred tem skrbno stehali in pripravili. Ko je bila mešanica zamešana, smo ocenili segregacijo, opravili preizkus z razlezom, določili

prostorninsko težo naše mešanice in jo nato vgradili v opaž. Betonski element smo pustili stati čez noč v opažu, da se je beton strdil in ga naslednji dan razopazili. Potek izdelave betonskega preizkušanca je slikovno prikazan na spodnji sliki (slika 31).



Slika 32: Potek izdelave betonskega preizkušanca

Preizkušanci se med seboj razlikujejo predvsem po uporabljenem agregatu. Prvi preizkušanec, ki smo ga pripravili, je bil iz lahkega agregata nizke gostote (LDSCC), receptura mešanice pa je bila enaka kot pri recepturi, ki so jo uporabili za kocko št. 4. Prostorninska masa agregata je 600kg/m^3 do 700kg/m^3 .

Tabela 7: Receptura preizkušanca LDSCC

Liapor (LD) 1/8	12,5kg
Cement	27,12kg
Pesek 0/4	30kg
Voda	10,63kg
SP	313g

Drugi preizkušanec (LDSCC-s) je imel podobno recepturo kot prvi preizkušanec (LDSCC), le da smo tokrat dodali večjo količino vode, ker smo želeli doseči segregacijo.

Tabela 8: Receptura preizkušanca LDSCC-s

Liapor (LD) 1/8	12,5kg
Cement	27,12kg
Pesek 0/4	30kg
Voda	13,12kg
SP	280,4g

Tretji preizkušaneec, ki smo ga pripravili, je bil iz lahkega agregata visoke gostote (HDSCC). Prostorninska masa tega agregata je 1150kg/m^3 do 1250kg/m^3 .

Tabela 9: Receptura preizkušanca HDSCC

Liapor (HD) 1/8	10kg
Liapor (HD) 4/8	10kg
Cement	21,7kg
Pesek 0/4	24kg
Voda	10kg
SP	220g

Četrty preizkušaneec, ki smo ga pripravili, je bil iz navadnega samozgoščevalnega betona (SCC). Prostorninska masa agregata je 2670kg/m^3 . Agregat je prikazan na sliki 33.

Tabela 10: Receptura preizkušanca SCC

Agregat 0/2	15,71kg
Agregat 0/4	23,54kg
Agregat 4/8	12,82kg
Agregat 8/16	19,26kg
Cement	17,55kg
Kamena moka	11,57kg
Voda	9,23kg
SP	190g

Peti preizkušaneec, ki smo ga pripravili, je imel enako recepturo kot četrti, le da smo zopet dodali večjo količino vode in manj superplastifikatorja, tako smo dosegli segregacijo (SCC-s).

Tabela 11: Receptura preizkušanca SCC-s

Agregat 0/2	15,71kg
Agregat 0/4	23,54kg
Agregat 4/8	12,82kg
Agregat 8/16	19,26kg
Cement	17,55kg
Kamena moka	11,57kg
Voda	10,302kg
SP	154,3g



Slika 33: Uporabljen agregat za preizkušanca SCC in SCC-s

5.2 Opis termografske naprave in postopka meritev

Kot sem že omenila so preiskave na večjih preizkušancih potekale v hali Konstrukcijsko-prometnega laboratorija, preiskave na kockah pa v zaklonišču (slika 34).



Slika 34: Snemanje preizkušanca: levo zaklonišče, desno hala laboratorija.

5.2.1 Gretje

Vse preizkušance, sem segrela na približno 50°C , kar je zgornja meja za izvanje meritev, ki smo jo želeli doseči, saj smo želeli, da toplotni tok prodre čim globlje v preizkušanec. Čas gretja je bil različno dolg, od 10 minut do pol ure, pomembno je bilo doseči 50°C ter čim bolj enakomerno površinsko temperaturo. Pri manjših preizkušancih sem to dosegla relativno hitro in enostavno, pri večjih preizkušancih pa mi je gretje povzročalo kar nekaj težav. V obeh primerih sem gretje izvajala ročno. Pri večjih preizkušancih sem gretje izvajala tako, da sem eno ali dve sevalni peči enakomerno premikala približno 10 – 20cm stran od preizkušanca. Ker je tu vpliv človeškega faktorja večji, sem pri manjših preizkušancih sevalno peč nepremično držala na razdalji 20cm ter tako dosegla zadovoljivo enakomernost temperature po površini.

Sevalni peči, ki sem ju uporabila, sta dimenzij $47\text{cm}\times 9\text{cm}\times 13,5\text{cm}$, vsaka od njiju pa ima nazivno moč 1200W (slika 35). Po končanem gretju sem morala peči kar se da hitro umakniti in vključiti snemanje, saj je za pridobitev uporabnih podatkov pomembnih že prvih nekaj sekund ohlajanja.



Slika 35: Sevalni peči, Quartz 1200

5.2.2 Snemanje

Za snemanje sem uporabila termokamero FLIR A320 (slika 36). Kamera je težka 0,7 kg, njene dimenzije so 70mm×70mm×170mm in ima aluminijasto ohišje. Postavila sem jo na stativ približno 1 m-1,5 m stran od preizkušancev oz. na tako oddaljenost, da sem zajela celotno površino preizkušanca v objektiv. Priključila sem jo na računalnik in elektriko, ter počakala, da jo program zazna.

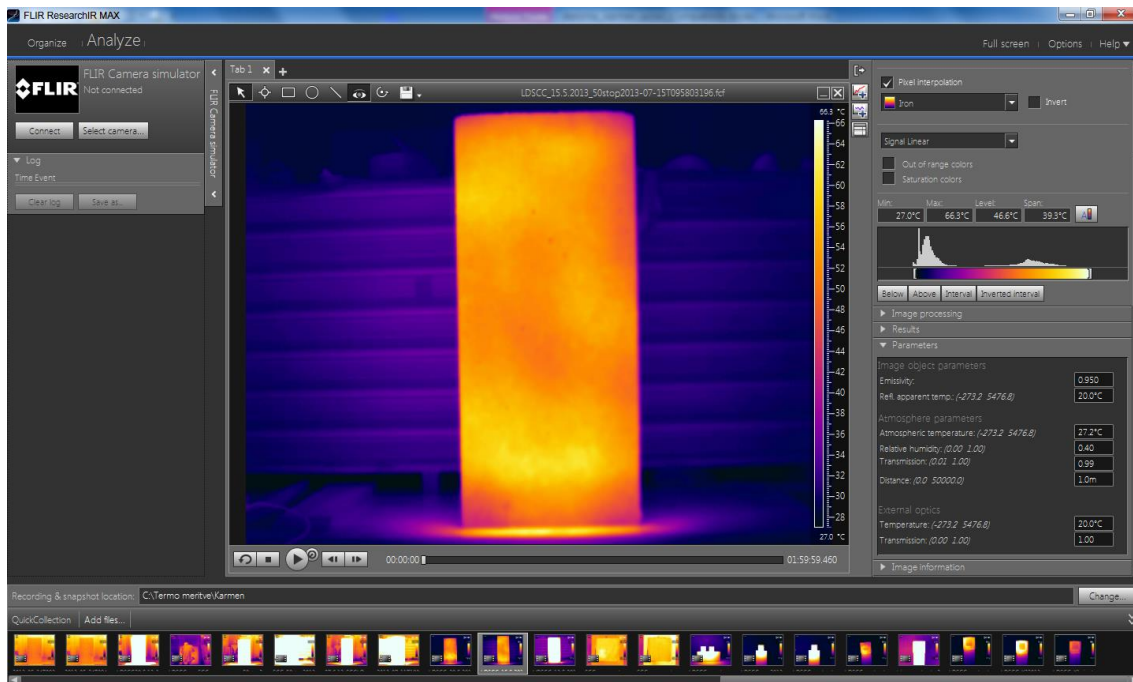


Slika 36: Uporabljena termokamera FLIR A320

Uporabila sem tudi širokokotni objektiv, ki mi je omogočil širši vidni kot. Kamera ima zmožnost snemanja do 30 posnetkov na sekundo. Ker smo v našem primeru zahtevali daljši čas merjenja (od 7 do 20 minut), kar bi za frekvenco okoli 1 Hz že dalo podatke velikosti nekaj GB, je za naše potrebe zadoščala uporaba frekvence 0,2 Hz. Prostorska velikost posamezne slike je 320×240 točk. Nehlajeni mikrobolometrični detektor zajema infrardeče sevanje od 7,5 μ m do 13 μ m. Kamera lahko deluje pri temperaturah od -15°C do 50°C, merjeni predmeti pa imajo lahko površinsko temperaturo od -40°C do 70°C.

5.2.3 Programska oprema

Za zajemanje podatkov je bil uporabljen, kot grafični vmesnik, program FLIR ResearchIR Max 3.2 (slika 37). Z njim lahko umerimo kamero, izostrimo sliko, nastavimo parametre kot so temperatura ter vlaga ozračja in emisivnost površine, ki se jo določi na podlagi literature ($\epsilon=0,94$ za beton). Nastavimo lahko tudi dolžino snemanja in frekvenco. Vse to je potrebno urediti pred snemanjem, saj moramo s pomočjo programa kamero zagnati takoj po končanem gretju.

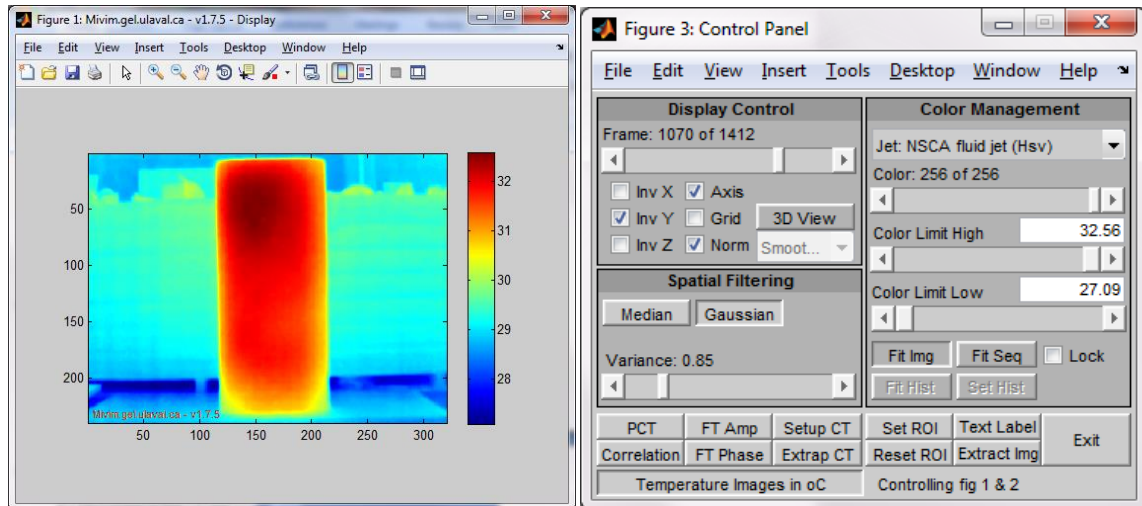


Slika 37: Pogovorno okno programa FLIR ResearchIR MAX 3.2

Podatke, ki sem jih dobila s programom FLIR ResearchIR sem najprej izvozila v formatu *.csv. Nadaljno obdelavo sem izvedla s pomočjo programa Matlab in prosto dostopnima knjižnicama textscantool [23] in IR_view [24].

Textscantool je interaktivni grafični vmesnik za delo z večjimi datotekami. Uporabimo ga, ker Matlabove funkcije ne omogočajo uvoza datotek večjih od 1GB. S programom lahko enostavno uporabimo in izberemo podatke, ki jih potrebujemo [2].

Knjižnica IR_view je namenjena predvsem pregledovanju in obdelavi infrardečih posnetkov za potrebe neporušnih testiranj. Pri svoji diplomski sem ga uporabljala predvsem za obdelavo in pregledovanje temperaturnih ter faznih slik. Z njim sem določila območje opazovanja preizkušanca (t.i.ROI) in razpon legend, naj je bila to temperaturna legenda ali fazna legenda. Nato sem lahko slike opazovala v različnih časih in z različnimi temperaturnimi skalami. Skala, ki je dala najbolj uporabne podatke je bila Jet: NSCA fluid jet (Hsv), ki je tudi prikazana na spodnji sliki (slika 38).



Slika 38: Grafični vmesnik knjižnice IR_view

»Ta stran je namenoma prazna.«

6 REZULTATI TERMOGRAFSKIH PREISKAV

6.1 Rezultati preiskave segregacije prve serije preizkušancev

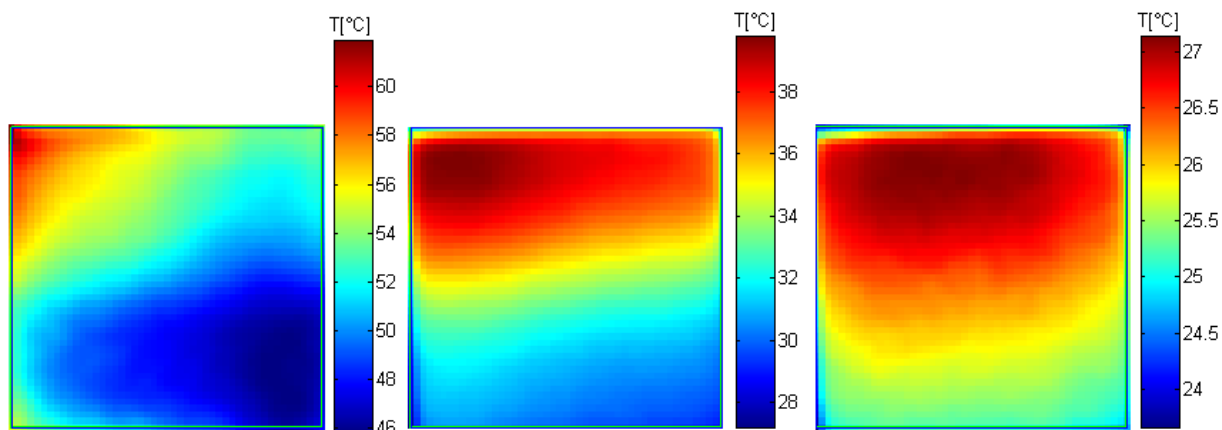
Glavni namen preiskav prve serije preizkušancev je bil določiti občutljivost termografske metode na zaznavanje segregacije lahkega agregata v odvisnosti od stopnje le-te. Z različnimi pristopi obdelave podatkov smo želeli pokazati, ali se da s pomočjo termografske preiskave ugotoviti ali je do segregacije prišlo. Trije različni načini obdelave rezultatov so prikazani v nadaljevanju.

6.1.1 Temperaturne slike

Temperaturne slike preizkušancev prikazujejo porazdelitev temperature po površini. Zraven vsake temperaturne slike je podana tudi temperaturna skala, ki se spreminja glede na trenutne vrednosti temperature na preizkušancu. Območja v bolj živih (rdečih) odtenkih imajo vedno višjo temperaturo kot območja v hladnejših (modrih) odtenkih.

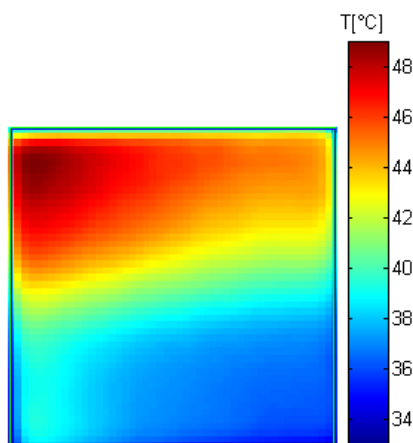
Kocka št. 1

Časovni razvoj temperature pri kocki št. 1 zelo dobro prikazuje segregacijo agregata v preizkušancu (slika 39). Že pri prvi temperaturni sliki lahko opazimo, da kljub temu, da smo na celotno površino preizkušanca dovedli enako velik toplotni tok, se spodnja plast segreje manj kot zgornja. Povprečna temperatura zgornje plasti je $53,6^{\circ}\text{C}$, spodnje pa $48,6^{\circ}\text{C}$. Razlog je v tem, da ko toplotni tok prodre do mesta z manjšo toplotno prevodnostjo, se le ta začne kopičiti, saj ne more tako hitro prehajati v material. Ta pojav se na površini kocke odraža kot povišanje temperature - v našem primeru je to na zgornjem območju. Po 750s je meja med zgornjo in spodnjo plastjo že zelo očitna in dobro se vidi, kako velik je temperaturni kontrast med njima. Povprečna temperatura zgornje plasti je 37°C , spodnje pa $31,8^{\circ}\text{C}$. Tudi po eni uri ohlajanja (zadnja slika) lahko vidimo, da je zgornja plast še vedno toplejša kot spodnja. Povprečna temperatura zgornje plasti je $26,7^{\circ}\text{C}$, spodnje pa $25,7^{\circ}\text{C}$. Iz teh podatkov lahko sklepamo, da ima zgornja plast slabšo toplotno prevodnost kot spodnja, kar je za mesto segregacije smiselno, saj se zaradi večje količine lahkega agregata in večje količine zraka toplota tam dlje časa akumulira oz. slabše prevaja skozi preizkušane.



Slika 39: Kocka št. 1: od leve proti desni: začetek snemanja, po 750s snemanja, konec snemanja

Začetek različnega ohlajanja zgornjega in spodnjega območja lahko opazimo že po 200s kjer lahko vidimo, da se že izoblikuje meja med zgornjo in spodnjo plastjo (slika 40).



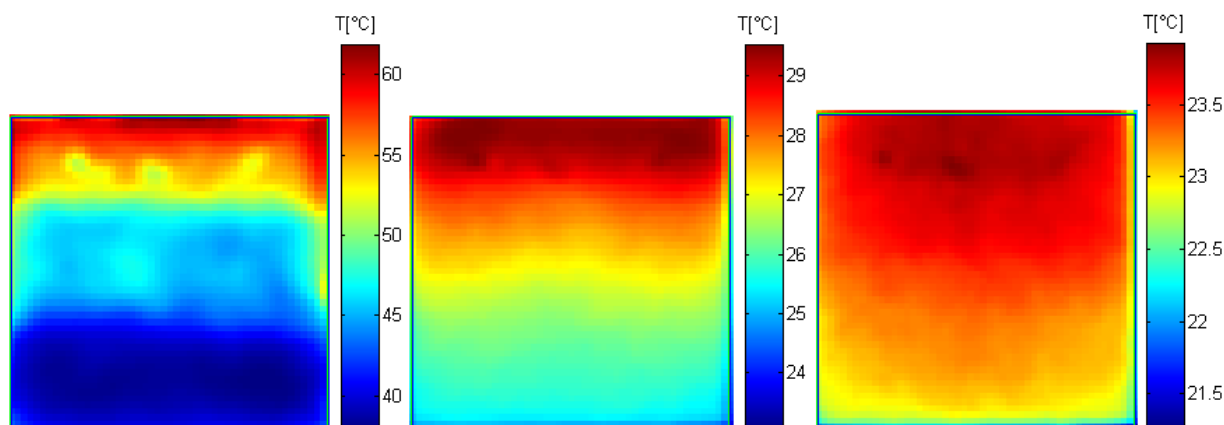
Slika 40: Temperaturna slika preizkušanca po 200s

Na podlagi te slike lahko kvalitativno ocenimo globino segregacije. Ker se je meja izoblikovala dokaj hitro, vemo da segregacija nastopi dokaj plitko. V kolikor bi poznali toplotno difuzivnost našega materiala, bi lahko teoretično s pomočjo enačbe (2.14) izračunali globino, na kateri nastopi segregacija. Za to bi izmed vseh temperaturnih slik morali poiskati stanje, kjer dosežemo maksimalni temperaturni kontrast glede na nesegregirano referenčno območje.

To oceno bi lahko podali samo za to kocko, saj je njena sestava specifična (segregacija nastopi na globini, ki ustreza debelini sloja premaza). Pri ostalih kockah težko govorimo o globini, na kateri nastopi segregacija, saj je to globalen pojav, ki je naključno porazdeljen po celotnem preizkušancu.

Kocka št. 2

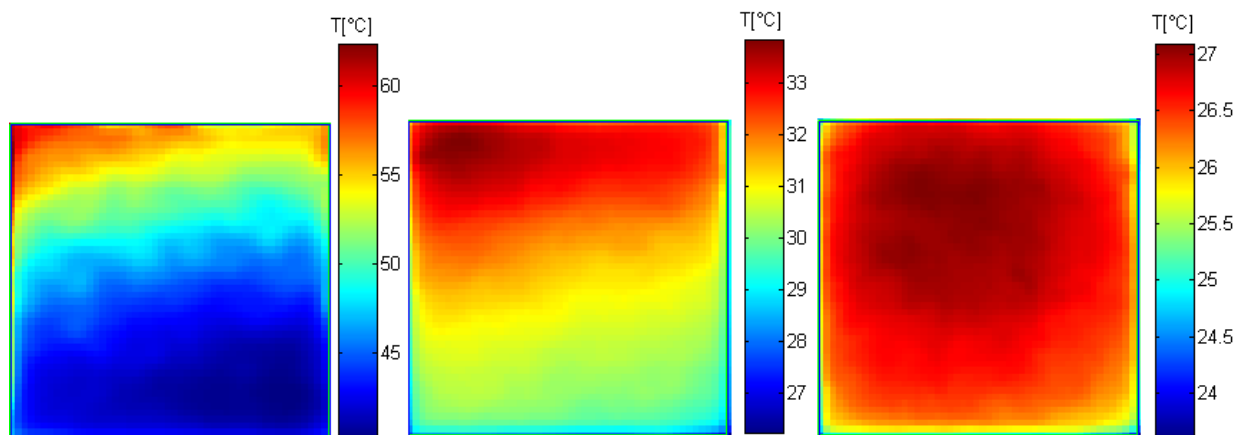
Pri kocki št. 2 so na prvi sliki (slika 41) lepo vidne različne plasti, ki smo jih vgradili z namenom simulacije segregacije. Površina zgornje plasti, kjer je največ lahkega agregata, se je najbolj segrela (povprečna temperatura je $56,1^{\circ}\text{C}$), srednja plast, kjer je manj lahkega agregata, se je segrela za približno 10 stopinj manj in spodnja plast, kjer ni nič lahkega agregata, se je segrela najmanj (povprečna temperatura je $40,2^{\circ}\text{C}$). Tudi po 750s je razlika v plasteh še zmeraj lepo vidna, razlike med temperaturami so sicer manjše, vendar še zmeraj opazne, medtem ko je ob koncu snemanja temperatura preizkušanca skoraj po vsej površini enaka, giblje se od 23°C do $23,5^{\circ}\text{C}$.



Slika 41: Kocka št. 2: od leve proti desni: začetek snemanja, 750s snemanja, konec snemanja

Kocka št. 3

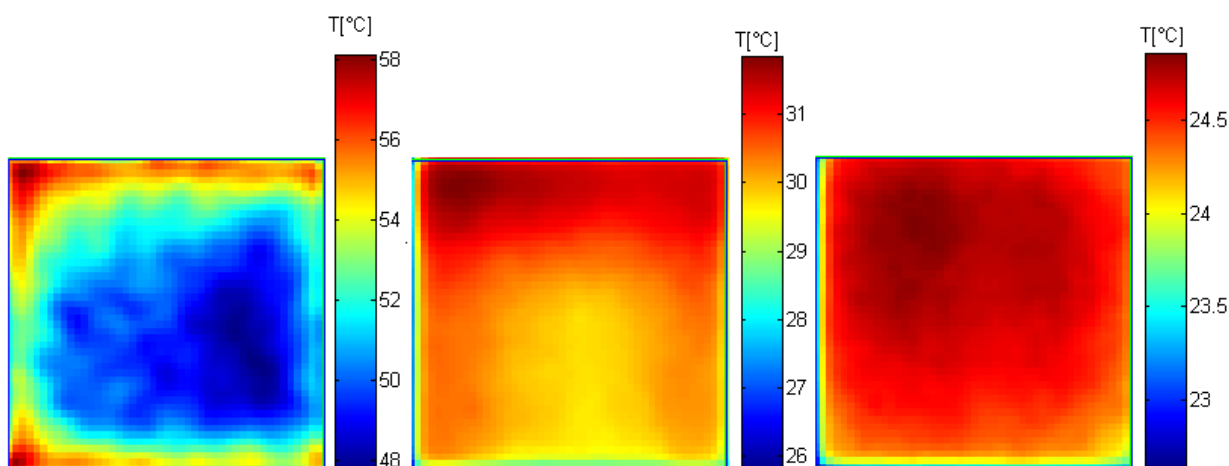
Tudi pri tej kocki lahko s pomočjo temperaturnih slik ugotovimo, da je kocka segregirala (slika 42). Območje z večjo količino lahkega agregata je slabše prevajalo toploto in se zaradi tega bolj segrelo na površini po končanem gretju, zaradi istega razloga pa tudi počasneje odvaja toploto.



Slika 42: Kocka št.3: od leve proti desni: začetek snemanj, 750s snemanja, konec snemanja

Kocka št. 4

Na prvi temperaturni sliki kocke št. 4 (slika 43) lahko vidimo, da je večinski del preizkušanca segret na 49°C do 50°C. Na drugi sliki vidimo, da je nekoliko bolj segret zgornji del preizkušanca za približno 1°C, kar ni prevelika temperaturna razlika. Na zadnji temperaturni sliki pa se temperatura giblje po celotnem preizkušancu okoli 24,5°C. Ker je kocka št.4 homogena (materialne lastnosti se ne spreminjajo oz. le minimalno), je po celotni površini akumulirala približno enako toplote in se obenem tudi ohlajala dokaj enakomerno po celotni površini.



Slika 43: Kocka št.4: od leve proti desni: začetek snemanja, 750s snemanja, konec snemanja

Temperaturne slike so se izkazale za učinkovito in predvsem hitro orodje pri zaznavi različne sestave preizkušancev. Dokaj natančno so nam pokazale, da je sestava v preizkušancih različna ter da se materialne lastnosti po plasteh razlikujejo med seboj. Prednost je tudi, da za njihovo uporabo ne potrebujemo nadaljne obdelave. Pogoji za uporabnost temperaturnih slik pa je, da je preizkušanec segret homogeno, torej, da je toplotni tok, ki ga dovedemo, enak po vsej površini, kar je na gradbišču težko zagotoviti. Pomembno je tudi, da je površina brez nepravilnosti. Na prvi temperaturni sliki kocke št. 2 lahko vidimo vpliv površinskih lukenj v zgornji tretjini preizkušanca, ki se pokažejo kot neko lokalno zmanjšanje temperature. Da bi premostili slabost uporabe temperaturnih slik za zaznavo segregacije, s čimer bi IR termografija lahko tudi lažje postala potencialna neporušna metoda z večjo natančnostjo v praksi na gradbiščih, nas je zanimalo, če lahko s kakim drugim postopkom obdelave podatkov izboljšamo natančnost zaznavanja. V prvi vrsti nas je zato zanimal odziv, ki ga dajo temperaturne krivulje, ki omogočajo spremljanje temperaturnega ohlajanja v času za posamezen piksel.

6.1.2 Temperaturne krivulje

Za razumevanje poteka ohlajanja v odvisnosti od stanja betonske strukture je smiselno, da rezultate meritev opišemo s teoretičnim modelom, ki se izmerjenim podatkom čim bolj prilega (metoda

najmanjših kvadratov). Podrobnejši pogled temperaturnega ohlajanja pod pogoji pulznega segrevanja pokaže, da temperaturno odvisnost lahko opišemo z vsoto eksponentnih členov. Kaže se, da bi primerna funkcija bila lahko vsota dveh ali treh ekponentnih členov. Vendar, ker bi stopnjo ohlajanja želeli povezati z difuzijsko konstanto materiala, bi želeli imeti le en člen v modelu. Izkaže se, da je zato primernejša izbira ekponentne funkcije, kjer čas nastopa pod korenom. Temperaturne krivulje območij, ki smo jih dobili iz eksperimenta, smo zato modelirali z eksponentno funkcijo

$$f(t) = A e^{-\alpha\sqrt{t}} + B, \quad (6.1)$$

ki je dala zelo dobre rezultate. V vseh primerih je bila vrednost napake determinacijskega koeficienta R^2 manjša od 0.002. Koeficient α tako predstavlja oceno toplotne difuzivnosti, ki določa, kako hitro se temperatura izenači pri prehajaju iz toplejših na hladnejša mesta ali posplošeno rečeno, kako hitro je eksponentno ohlajanje. Konstanti A in B za interpretacijo rezultatov nista bistveni.

Čeprav sem toplotno difuzivnost že omenila v poglavju 2.1.2, jo sedaj natančneje opredelim

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * c_p}, \quad (6.2)$$

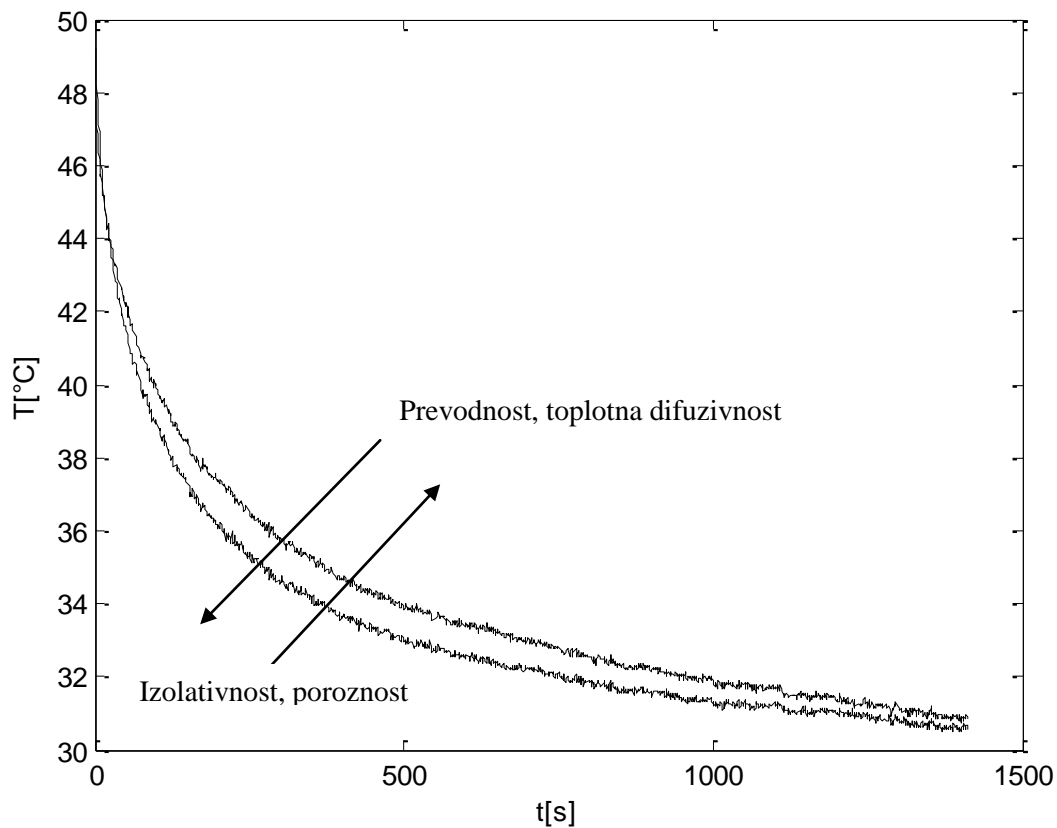
kjer so: α ...termična difuzivnost snovi [m^2/s]

ρ ...gostota snovi [kg/m^3]

c_p ...toplotna kapaciteta pri stalnem tlaku [J/K]

λ ...toplotna prevodnost [W/mK].

Iz enačbe (6.2) vidimo, da na difuzivnost toplote ne vpliva le toplotna prevodnost materiala, ampak tudi gostota in toplotna kapaciteta. V grobem približku lahko predpostavimo, da se toplotna kapaciteta različnih betonov ne spreminja veliko. Torej bi načeloma višjo termično difuzivnost snovi pričakovali pri materialih z visoko toplotno prevodnostjo in majhno gostoto. V splošnem pa je tudi toplotna prevodnost odvisna od gostote, saj vemo, da imajo porozni materiali nizke gostote nizko toplotno prevodnost. Zato direktno sklepanje o termični difuzivnosti pri spremembi materialnih lastnosti ni preprosto. Kljub temu pa iz oblike krivulje lahko rečemo, da večja kot je toplotna difuzivnost (in s tem prevodnost), bolj strmo pada krivulja temperature. Zgornje trditve so prikazane na spodnjem grafikonu 1.



Grafikon 1: Primeri eksponentnih krivulj, kjer puščice označujejo smeri naraščanja omenjenih količin

Kocka št.1

Eksponentna funkcija, ki opisuje ohlajanje zgornjega (segregiranega) dela kocke št.1:

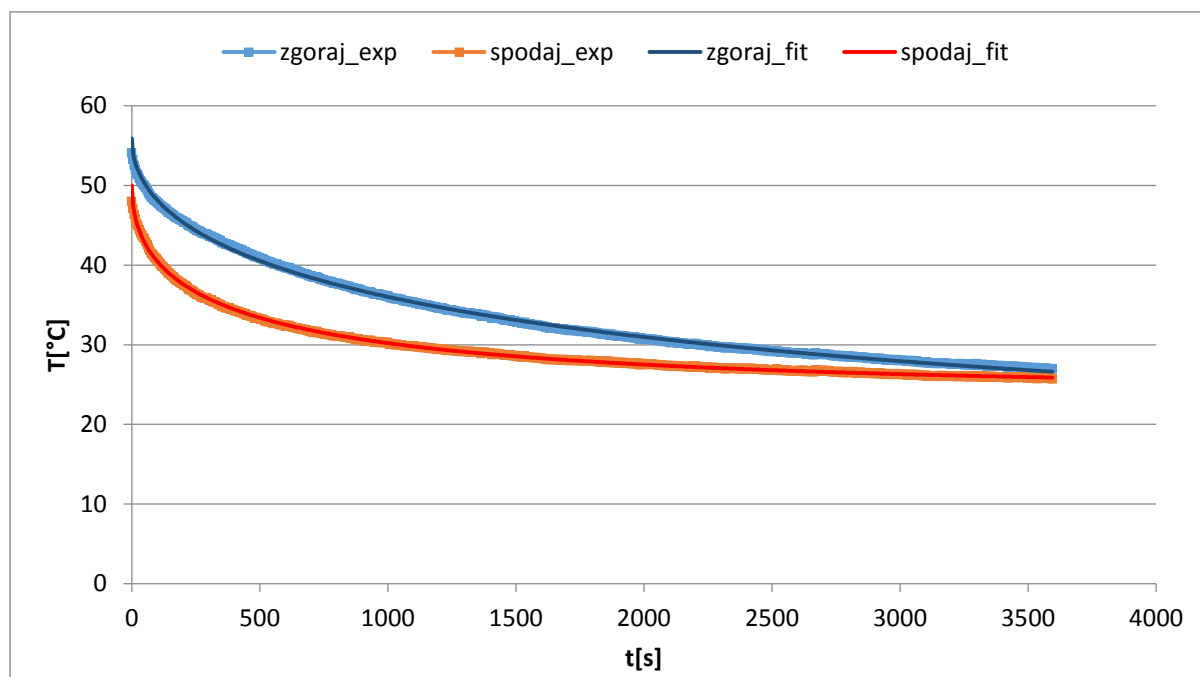
$$f(t) = 40,7 \cdot e^{-0,0212\sqrt{t}} + 15,2$$

Eksponentna funkcija, ki opisuje ohlajanje spodnjega (homogenega) dela kocke št.1:

$$f(t) = 25,7 \cdot e^{-0,0465\sqrt{t}} + 24,3$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Koefficient } \alpha_z = 0,0212 \\ \text{Koefficient } \alpha_s = 0,0465 \end{array} \right\} \alpha_z < \alpha_s$$

Razmerje med toplotnima difuzivnostima, ki je nekaj več kot 200% glede na spodnje homogeno območje, je v skladu z našimi pričakovanji. Toplotna difuzivnost zgornjega območja je manjša kot pri spodnjem, saj je tam toplotna prevodnost manjša. Enako lahko sklepamo iz grafikona 2, kjer krivulja zgornjega območja počasneje pada (manj strm padec) kot krivulja spodnjega območja, kar pomeni, da je material v zgornjem območju manj prevoden od materiala v spodnjem območju in zato razlika v krivuljah kaže na segregacijo.



Grafikon 2: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 1

Kocka št. 2 in kocka št. 3

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje zgornjega dela kocke št. 2:

$$f(t) = 36,8 \cdot e^{-0,0618\sqrt{t}} + 22,4 \quad \alpha_z = 0,0618$$

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje srednjega dela kocke št. 2:

$$f(t) = 31,8 \cdot e^{-0,062\sqrt{t}} + 22,5 \quad \alpha_{sr} = 0,0620$$

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje spodnjega dela kocke št. 2:

$$f(t) = 19,1 \cdot e^{-0,06\sqrt{t}} + 22,4 \quad \alpha_s = 0,0600$$

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje zgornjega dela kocke št. 3:

$$f(t) = 30,0 \cdot e^{-0,0434\sqrt{t}} + 23,7 \quad \alpha_z = 0,0434$$

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje srednjega dela kocke št. 3:

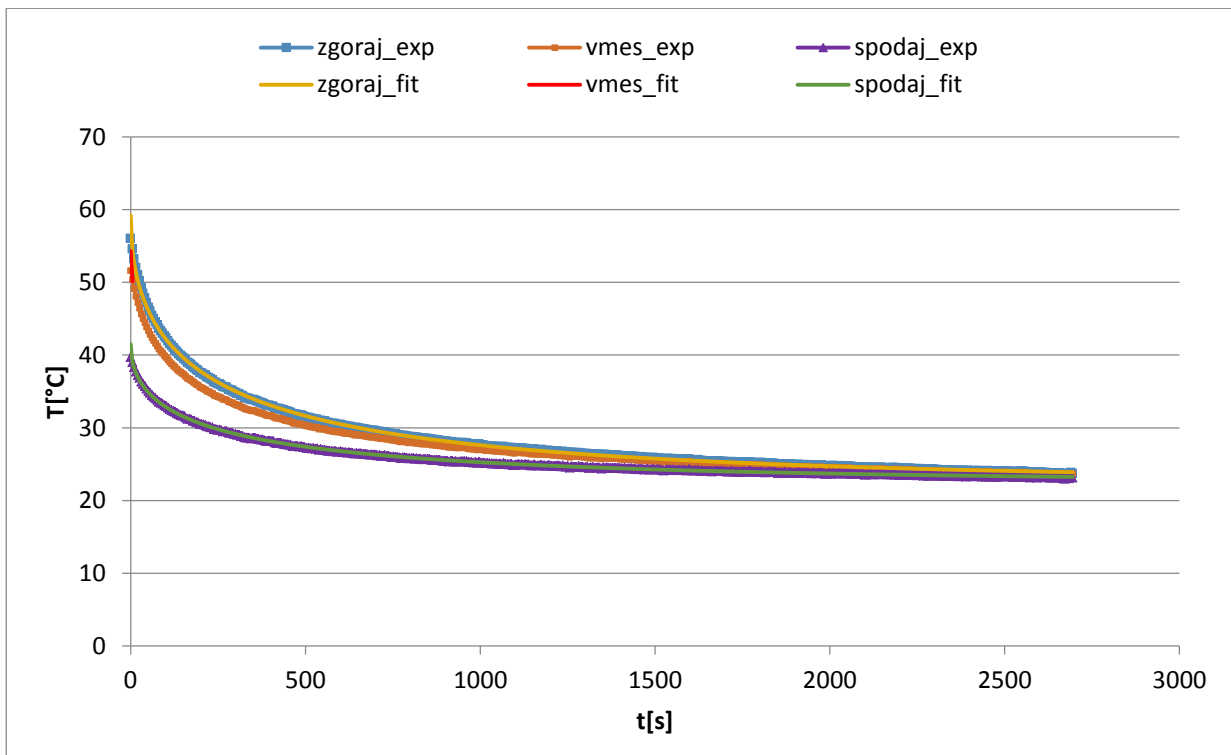
$$f(t) = 20,3 \cdot e^{-0,0403\sqrt{t}} + 24,4 \quad \alpha_{sr} = 0,0403$$

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje spodnjega dela kocke št. 3:

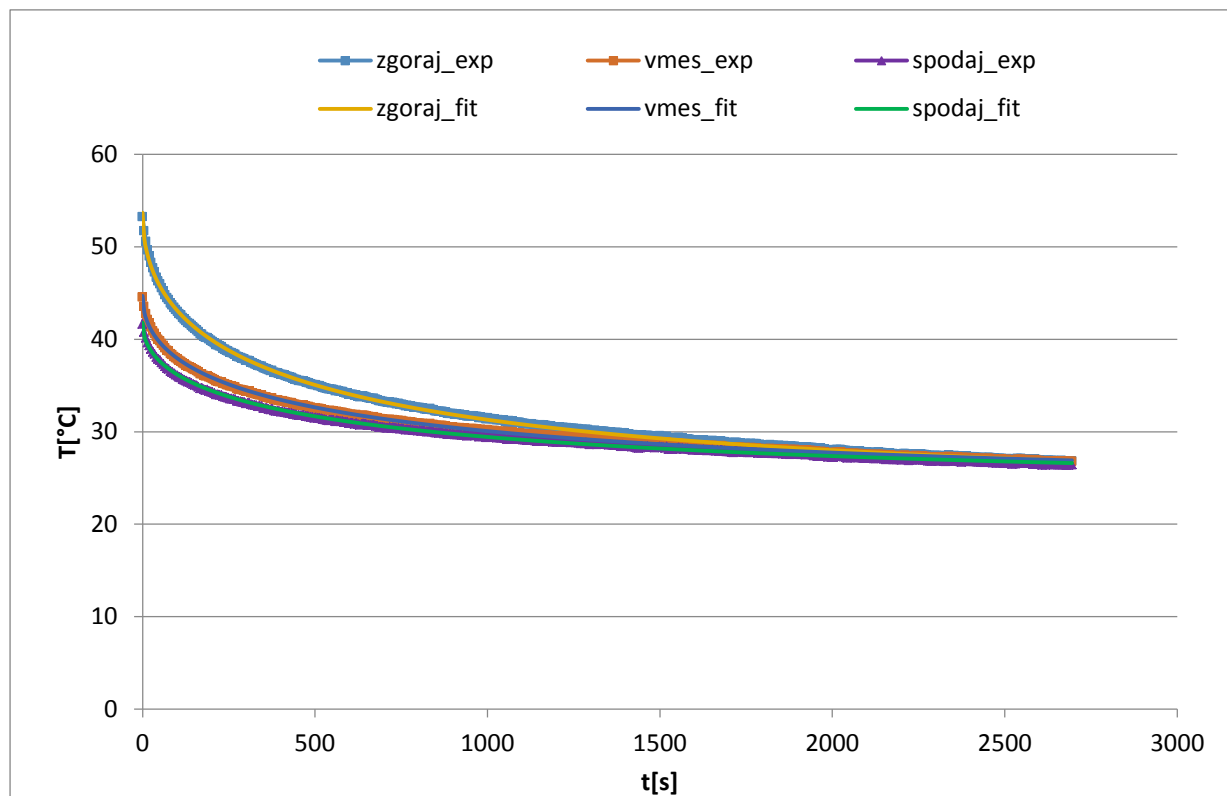
$$f(t) = 17,6 \cdot e^{-0,0383\sqrt{t}} + 24,2 \quad \alpha_s = 0,0383$$

Čeprav se rezultati teh dveh kock ne ujemajo z našimi pričakovanji, saj si vrednosti toplotne difuzivnosti α , glede na materialne lastnosti kock, ne sledijo v pravilnem vrstnem redu, lahko v prvi vrsti tudi opazimo, da se ocenjene termične difuzivnosti posameznih plasti ne spreminjajo veliko. Za kocko št. 2 je sprememba glede na povprečno le okoli 2 %, pri kocki št. 3 pa okoli 6 %. Razlog za takšne rezultate, kljub temu, da je do segregacije prišlo (kot bo prikazano v nadaljevanju), smo poiskali

v dejstvu, da smo ti dve kocki greli dva dni po razopaženju, to je pri bistveno manjši starosti kot smo greli kocki št. 1 in št.4. Ker smo kocki greli tako hitro po razopaženju, sta imeli večjo vsebnost vlage, ki je pripomogla k večji toplotni prevodnosti, poleg tega je povzročila večjo gostoto materiala. Razmerje med toplotno prevodnostjo in gostoto, za posamezne vgrajene plasti, je težko določljivo, saj toplotna prevodnost za npr. navadni beton narašča z večanjem vlažnosti hitreje kot toplotna prevodnost lahkega betona, enako pa velja za gostoto. Katera izmed vrednosti je dominantnejša je težko reči, domnevamo pa da je to v tem primeru gostota. Poleg tega se poraja vprašanje, če je kontrast v termičnih lastnostih med lahkim in navadnim agregatom dovolj velik, da bi ga zaznali s termografsko meritvijo. Obstaja možnost, da je pri kocki št. 1 k dovolj velikemu kontrastu v toplotnih difuzivnostih med zgornjo in spodnjo plastjo pripomogla tudi velika vsebnost zraka v zgornji plasti in ne le prisotnost liaporja, kot v kockah 2 in 3.



Grafikon 3: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 2



Grafikon 4: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 3

Pri obeh kockah imajo temperaturne krivulje zgornjih območij največji padec, kar pomeni da so se zgornja območja hitreje ohlajala (grafikon 3 in 4). To seveda ni smiselno za material, kjer je največ lahkega agregata. S tem pa se potrди ugotovitev, da je rezultat zaradi vlažnosti preizkušancev popačen.

Kocka št. 4

EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje zgornjega dela kocke št. 4:

$$f(t) = 27,8 \cdot e^{-0,0486\sqrt{t}} + 23,5 \quad \alpha_z = 0,0486$$

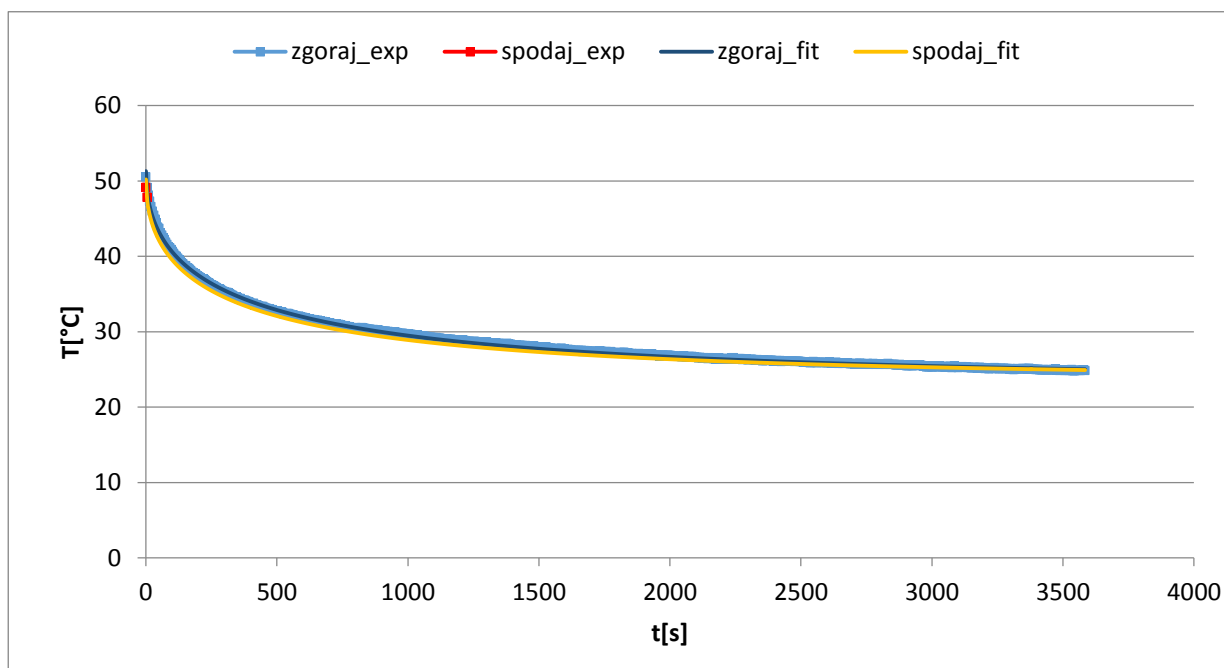
EkspONENTNA funkcija, ki opisuje ohlajanje spodnjega dela kocke št. 4:

$$f(t) = 26,5 \cdot e^{-0,0515\sqrt{t}} + 23,7 \quad \alpha_s = 0,0515$$

Koeficienta α_z in α_s od povprečne vrednosti odstopata za manj kot 3 %.

Kocka št. 4 je preizkušanec, kjer do segregacije ni prišlo, torej je njegova sestava homogena. Lastnosti kot so prevodnost, izolativnost in poroznost naj bi bile na vseh območjih preizkušanca zelo podobne ali celo enake. Slednje potrjujejo eksponentne enačbe, ki smo jih prilagodili temperaturnim krivuljam ohlajanja in spodnji grafikon 5, kjer lahko vidimo skoraj popolno ujemanje krivulj spodnjega območja in krivulj zgornjega območja. Omeniti velja, da relativno homogenost preizkušanca potrjuje ne le

razlika v termični difuzivnosti, temveč tudi konstantna člena, ki sta zelo podobna in kažeta na zelo podobni krivulji.



Grafikon 5: Primerjava izmerjenih in modeliranih temperaturnih krivulj za kocko št. 4

Po daljši in dokaj zahtevni obdelavi podatkov, nam temperaturne krivulje dajo pravilne ter smiselne rezultate glede na stanje, ki ga imamo. Vseeno smo želeli poiskati način prikaza in interpretacijo rezultatov, ki bi bila za uporabnika, ki ni podkovan s širokim teoretičnim znanjem, enostavnejša.

6.1.3 Fazne slike

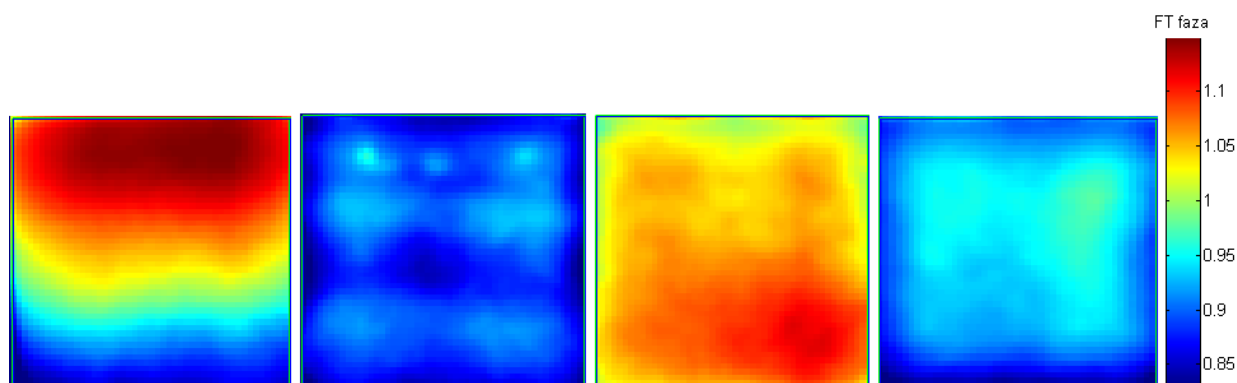
Naslednji način obdelave podatkov so fazne slike. Prednosti le teh so nam poznane, o njih smo govorili na strani 19.

Vemo, da večja vrednost faze pomeni manjšo toplotno prevodnost, kar lahko vidimo iz spodnje enačbe, če upoštevamo FFT na preprosti eksponentni enačbi z enim členom:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{I(\omega)}{R(\omega)} \propto \operatorname{arctg} \left(-\frac{\omega}{\alpha} \right). \quad (6.3)$$

Če α povečujemo, se zmanjšuje vrednost ulomka $\frac{\omega}{\alpha}$ s tem pa tudi vrednost faze ϕ .

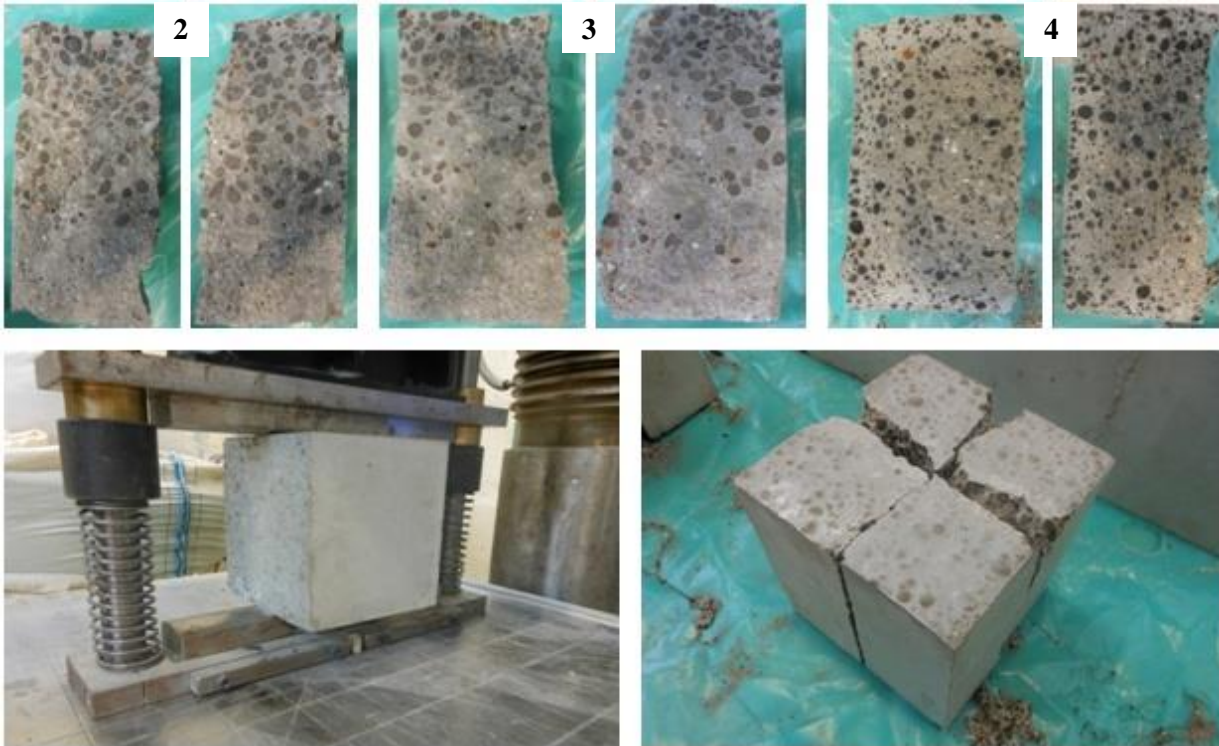
Iz faznih slik pri najnižji frekvenci za vse štiri preizkušance lahko vidimo (slika 44), da ima najvišjo vrednost faze zgornje območje prve kocke (povprečna vrednost faze je 1,12) kar je smiselno, saj je tam največja koncentracija lahkega agregata, ki ima najmanjšo prevodnost. Vrednosti faz druge in tretje kocke so sicer glede na eksponentne enačbe, ki smo jih dobili, pravilne, o razlogih, zakaj so fazne slike za ti dve kocki neustrezne, pa smo razpravljali že pri obravnavi temperaturnih krivulj. Pri drugi kocki vidimo, da vrednost faz malenkostno narašča proti zgornjemu območju. Pri tretji kocki pa ravno obratno, vrednosti faz naraščajo proti spodnjemu območju. Povprečna vrednost faze zgornjega dela zadnje kocke je 0,947, povprečna vrednost faze spodnjega dela kocke je 0,938. Razlika je majhna, saj gre za homogen element z enakomernim razporedom zrn lahkega agregata.



Slika 44: Fazne slike pri najnižji frekvenci preizkušancev od leve proti desni: kocka št. 1, kocka št. 2, kocka št. 3, kocka št. 4

6.1.4 Cepitev prve serije preizkušancev

Ker nas je zanimalo, kakšno je dejansko stanje in kako točne so naše interpretacije rezultatov, smo se odločili, da naše preizkušance razcepimo. Razcepili smo vse kocke razen kocke št. 1, saj je njena sestava več kot očitna. Iz slike 45 lahko vidimo, da nam je pri kockah št. 2 in 3 simulacija segregacije uspela ter, da je sestava četrte kocke homogena.

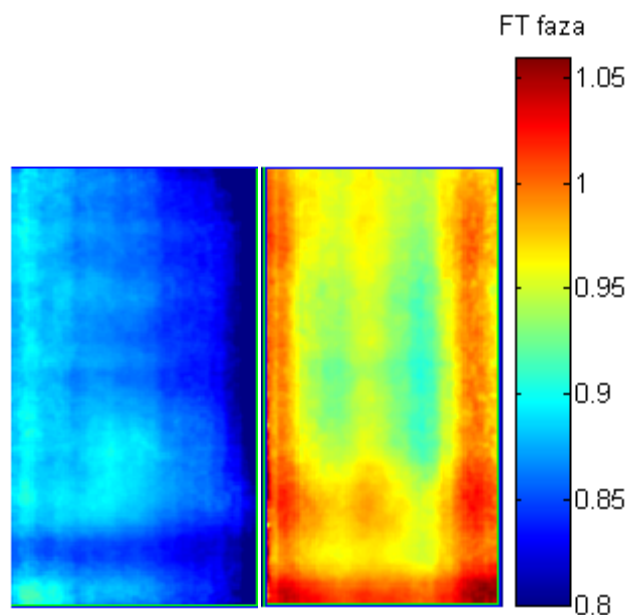


Slika 45: Cepitev kock

6.2 Rezultati preiskave segregacije druge serije preizkušancev

Pri drugi seriji preizkušancev smo se osredotočili le na fazne slike pri najnižji frekvenci, saj smo iz zgornjih rezultatov ugotovili, da pravilno opišejo termične lastnosti in s tem stanje preizkušanca. Ti preizkušanci so se, preden smo jih merili, sušili dovolj dolgo, tako da je bila vsebnost vlage manjša in s tem možnost za ustreznost faznih slik večja. Poleg tega so ti preizkušanci večji, zato je bilo težje zagotoviti enakomerno segrevanje površine. Temperaturne slike bi bile zaradi tega manj uporabne.

6.2.1 Fazne slike preizkušancev iz navadnega betona

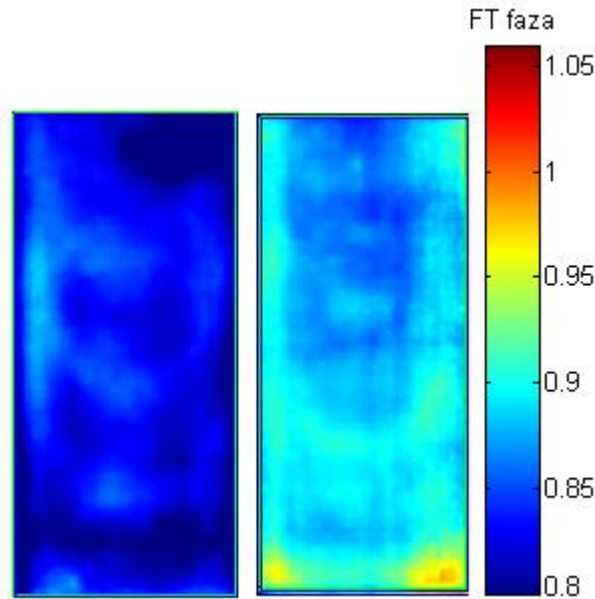


Slika 46: Levo: prva fazna slika preizkušanca SCC, desno: prva fazna slika preizkušanca SCC-s

Vrednosti faze, ki jih doseže nesegregirani preizkušanec (slika 46 levo) so od 0,80 do 0,90, vendar če robove zanemarimo in upoštevamo le osrednji del preizkušanca, bi lahko rekli, da so razlike med vrednostmi manjše ter, da dosegajo vrednosti od 0,85 do 0,89. Pri segregiranem preizkušancu (slika 46 desno) lahko opazimo, da vrednosti faz dosegajo vrednosti od 0,90 do 1,025, če pogledamo osrednji del pa so te vrednosti od 0,91 do 0,99. Razlog, da lahko robove zanemarimo je v tem, da se tam, kjer je element v stiku z zrakom ali z lesom (spodnji rob), toplota prevaja drugače kot v sredinskem delu preizkušanca.

Pri segregiranem preizkušancu lahko opazimo tudi očitno razliko med vrednostmi faz v zgornjem območju in vrednostmi faz v spodnjem območju. V spodnjem območju je povprečna vrednost faze (povprečeno glede na večje število pikslov) 0,985, v zgornjem območju pa 0,947. Pri nesegregiranem preizkušancu pa je povprečna vrednost faze zgornjega dela 0,860, spodnjega pa 0,869. Vidimo, da je razlika pri nesegregiranem preizkušancu veliko manjša, kar dokazuje da je ta preizkušanec bolj homogen element. Pri segregiranem preizkušancu so vrednosti spodaj višje kot zgoraj, kar je pravilno, saj višja vrednost faze pomeni manjšo prevodnost in večjo poroznost. Tak rezultat je smiseln, saj je zaradi večjih zrn, ki so potonila na dno tam lahko večji delež zraka, to pa povzroča manjšo prevodnost.

6.2.2 Fazne slike preizkušancev iz lahkega betona

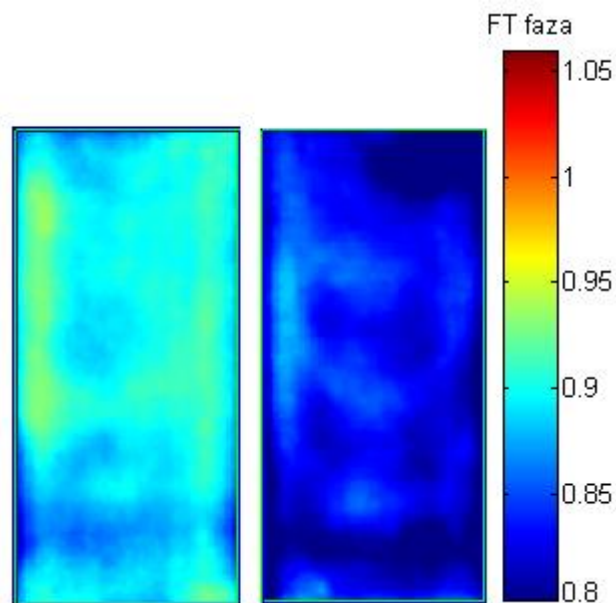


Slika 47: Levo: prva fazna slika preizkušanca LDSCC, desno: prva fazna slika preizkušanca LDSCC-s

Pri preizkušancu LDSCC (slika 47 levo) se vrednosti faz gibljejo po celotnem preizkušancu med 0,82 in 0,86. Povprečna vrednost faze spodnjega dela preizkušanca je 0,824. Povprečna vrednost faze zgornjega dela preizkušanca pa je 0,832. Vidimo, da sta si vrednosti zelo blizu, kar je smiselno, saj je preizkušanec homogen. Pri preizkušancu LDSCC-s (slika 47 desno) se vrednosti faz gibljejo od 0,85 do 0,9. Povprečna vrednost faz na spodnjem območju je 0,893, povprečna vrednost faz na zgornjem območju pa 0,870. Rezultati so ravno obratni, kot smo jih pričakovali. Pričakovali smo namreč, da bodo vrednosti faz večje na zgornjem območju. Naša pričakovanja so temeljila na dejstvu, da pri segregaciji lahkega agregata le ta splava proti površju, kar bi povzročilo manjšo poroznost in večjo prevodnost spodnjega dela in posledično manjše vrednosti faz spodnjega dela. Domnevamo, da se je zgodilo ravno obratno, torej, da je koncentracija agregata večja proti dnu preizkušanca.

6.2.3 Primerjava poroznosti preizkušancev HDSCC in LDSCC

Pri naslednji preiskavi smo se osredotočili na razlike v termičnih lastnostih uporabljenih lahkih agregatov. Med seboj smo primerjali nesegregirana preizkušanca HDSCC in LDSCC. Želeli smo ugotoviti ali se razlika v gostoti in toplotni prevodnosti lahkih agregatov lahko zazna z aktivno termografsko meritvijo. Preizkušanca smo ogreli na 50°C, ko je temperatura na površini dosegla 50°C smo z gretjem prenehali in čim hitreje začeli s snemanjem.



Slika 48: Fazne slike preizkušancev HDSCC in LDSCC

Povprečna vrednost faze preizkušanca HDSCC (slika 48 levo) je 0,898, preizkušanca LDSCC (slika 48 desno) pa 0,831. Vrednosti faz so večje pri preizkušancu HDSCC, kar pomeni, da bi za HDSCC ocenili manjšo difuzivnost glede na LDSCC (enačba 6.3). Naše rezultate lahko razložimo s pomočjo definicije difuzivnosti snovi. Iz enačbe (6.2) vidimo, da na difuzivnost toplote ne vpliva le toplotna prevodnost materiala, ampak tudi gostota. Torej lahko sklepamo, da je na naš rezultat vplivalo razmerje med prevodnostjo in gostoto. Na spletu lahko zasledimo podatek, da je toplotna prevodnost uporabljenega lahkega agregata okoli 0,12 W/mK [25]. Natančnega podatka o toplotni prevodnosti lahkega agregata nizke gostote in o toplotni prevodnosti lahkega agregata visoke gostote, ki smo jih mi uporabili, nismo uspeli pridobiti, vendar vseeno lahko sklepamo, da se ne razlikujeta za več kot faktor 2. Toplotna kapaciteta obeh betonov pa je tudi približno enaka. Upoštevamo še, da ima agregat preizkušanca HDSCC gostoto od 1150 kg/m³ do 1250 kg/m³, agregat preizkušanca LDSCC pa od 600 do 700 kg/m³. Iz teh podatkov lahko z izračunom ocenimo, da je toplotna difuzivnost preizkušanca HDSCC manjša, kar se ujema z rezultati faznih slik.

6.2.4 Opazovanje ohlajanja zaradi hidratacije kot primer pasivne termografije

Eksotermno kemijsko reakcijo cementa z vodo, kjer se sprošča toplota, imenujemo hidratacija. Poteka od samega zamešanja pa tudi do enega leta in več. Hidratacija cementa poteka v več fazah. Strm začetni skok imenujemo pred-indukcijsko obdobje, zmanjšanje stopnje sproščene toplote predstavlja indukcijsko obdobje (obdobje relativnega mirovanja). Naslednja faza je ponovna rast stopnje sproščene toplote (obdobje pospešene hidratacije) in ko ta doseže vrh nastopi obdobje pojemajoče hidratacije [17].

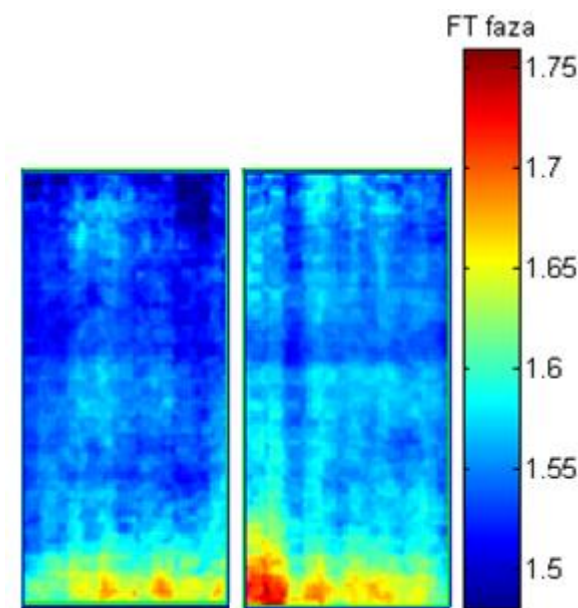
Ko smo preizkušance zabetonirali, smo jih čez noč pustili, da so se strdili, nato pa jih naslednji dan razopazili. Zaradi hidratacije cementa so bili preizkušanci zjutraj še zmeraj topli, kar smo izkoristili kot vir toplote. Želeli smo preveriti ali bi lahko spremembo v strukturi preizkušancev iz navadnega betona (SCC in SCC-s) zaznali le s hidratacijsko toploto, se pravi brez zunanje toplote, kar je princip pasivne termografije. Ko smo preizkušance razopazili, smo kamero kar najhitreje pripravili za snemanje in opazovali ohlajanje 2 uri.

Preizkušance smo pustili v opažu iz vseh stani, le spredaj smo ga odstranili, tako smo dosegli čim daljše zadržanje toplote v preizkušancu ter odvajanje toplote le s sprednje strani (slika 49).



Slika 49: Snemanje hidratacije preizkušancev levo SCC in desno SCC-s

Povprečna vrednost faze preizkušanca SCC (slika 50 levo) je 1,557, kar je malenkost manj od povprečne faze preizkušanca SCC-s (slika 50 desno), ki je 1,575. To, da ima SCC-s višjo vrednost faz glede na SCC se sicer ujema z rezultati aktivne termografije, vendar pa ne moremo zaznati lokalne segregacije, kot smo to lahko storili pri aktivni termografiji. Razlog je verjetno v tem, da se preizkušanec zaradi hidratacije segreje premalo, da bi zaznali spremembe v sestavi ali pa smo začeli snemati prepozno, ko sta bila preizkušanca že preveč ohlajena. Hitreje seveda nismo mogli, saj smo morali počakati, da je preizkušanec dovolj trden, da smo ga lahko razopazili. Upoštevati moramo tudi možnost, da smo do takšnih rezultatov prišli zaradi vlage, ki jo beton vsebuje takoj po razopazjenju.



Slika 50: Prva fazna slika preizkušanca SCC in prva fazna slika preizkušanca SCC-s

Ti rezultati pa so v nas zbudili zanimanje za naslednjo preiskavo. Odločili smo se preveriti ali je termokamera sploh dovolj občutljiva, da bo zaznala temperaturno razliko pri poteku hidratacije (predstavljeno v nadaljevanju, poglavje 6.3).

6.2.5 Cepitev druge serije preizkušancev

Razcepili smo preizkušance SCC-s, SCC in LDSCC-s. Najbolj nas je zanimalo, kakšno je stanje pri preizkušancu LDSCC-s, saj nam je termografska meritev dala rezultate, ki so kazali, da je agregat splaval navzdol, kar je drugače kot smo pričakovali.

Vsakega izmed preizkušancev smo porušili na način prikazan na sliki 51. Vstavili smo jih v stiskalnico za tlačno obremenjevanje in s pomočjo dveh železnih palic preizkušancec razcepili po dolžini. Tako smo dobili prerez po celotni višini preizkušanca in s tem dobili informacijo o razporeditvi delcev po višini preizkušanca.



Slika 51: Cepitev preizkušancev

Prerezi, ki smo jih dobili, so na sliki 52. Preizkušanec LDSCC-s ima gostoto zrn resnično večjo v spodnjem delu, kot je pokazala termografska meritev, naša domneva je s tem potrjena. Segregacija preizkušanca SCC-s je lepo vidna, večja zrna agregata so se nabrala na spodnjem delu. Preizkušanec SCC se nam ni porušil po pričakovanjih, razpadel je na tri kose, vendar se je spodnja polovica lepo razpolovila, tako da je spodnji del, ki je pomembnejši, vseeno lepo viden. Vidimo lahko, da je razporeditev agregatnih zrn enakomerna, kot smo tudi želeli in pričakovali na podlagi rezultatov termografskih meritev.

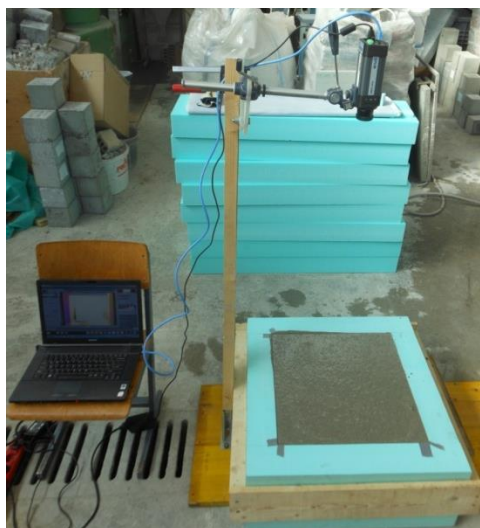


Slika 52: Zgornji in spodnji del preizkušanca LDSCC-s, zgornji in spodnji del preizkušanca SCC-s ter spodnji del preizkušanca SCC

6.3 Zaznavanje poteka hidratacije s pasivno termografijo

Zgornja meritev, kjer smo želeli hidrationsko toploto izkoristiti kot toplotni vir, nas je napeljala na zanimiv poskus. Zanimalo nas je, ali lahko s termokamero zaznavamo proces hidratacije, tj. njene posamezne faze. V ta namen smo pripravili ploščo, kjer bi hidrationsko lahko pričeli opazovati takoj po zabetoniranju.

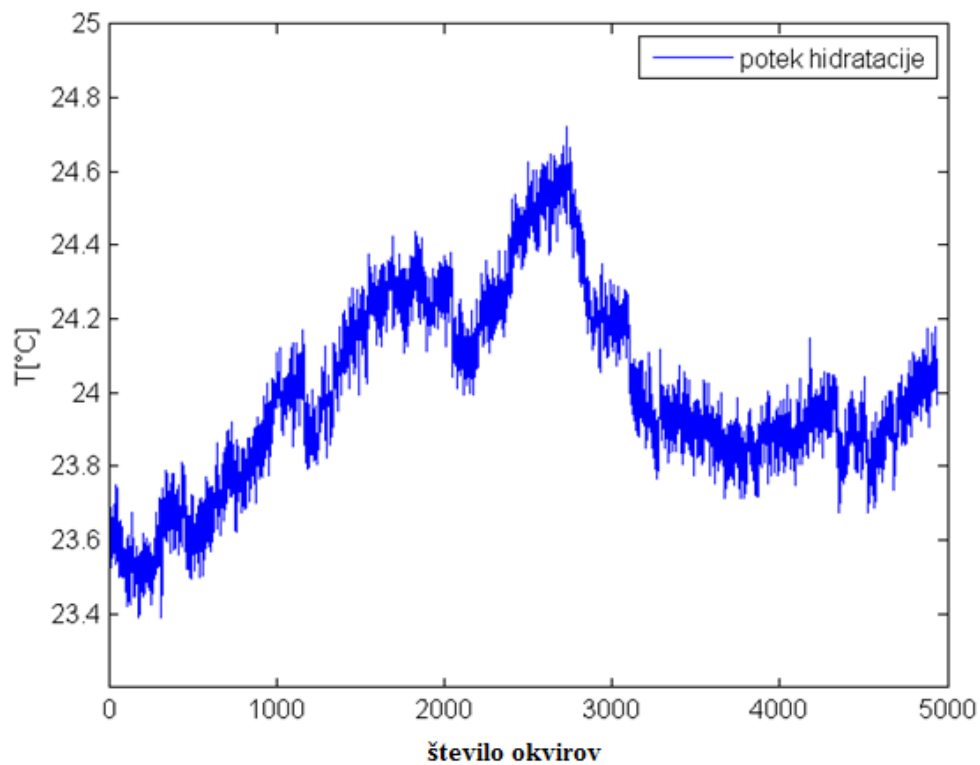
Sestavili smo opaž iz toplotnoizolacijskih ploščin vanj vgradili beton enake recepture kot za preizkušane SCC. Kamero smo pritrdili na vzvod in jo usmerili proti preizkušancu (slika 53). Takoj, ko smo beton vlili v opaž smo kamero prižgali in začeli s snemanjem.



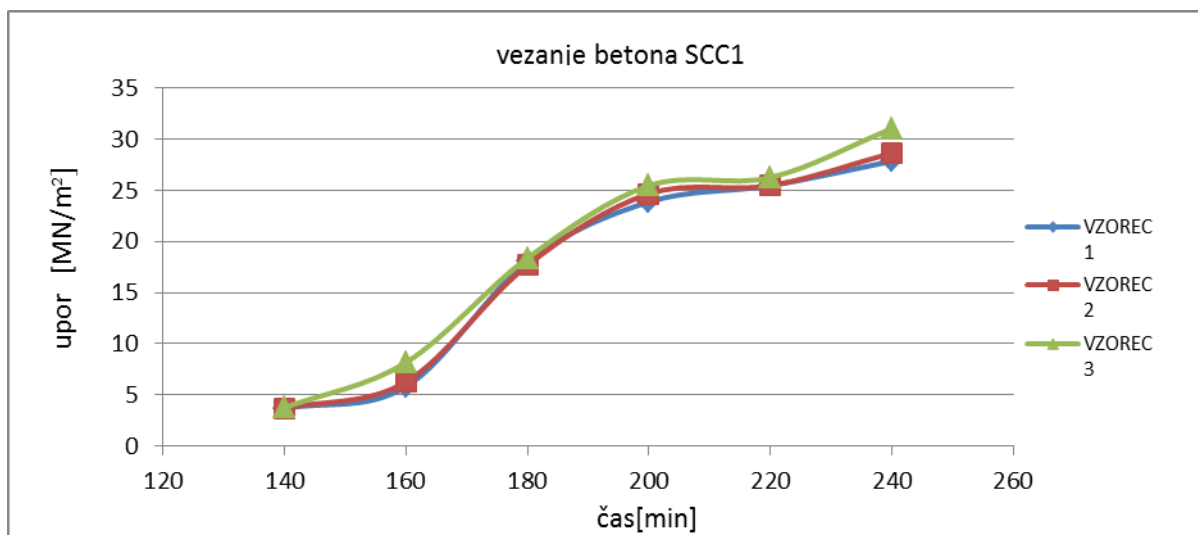
Slika 53: Postavitev kamere pri meritvi

Kamero smo pustili prižgano sedem ur, po sedmih urah pa smo dobili rezultate prikazane na grafikonu 6, kjer en okvir ustreza časovnemu intervalu 5s.

Kamera je zaznala globalni potek hidratacije, lepo pa je vidno predvsem območje pospešene in pojemajoče hidratacije. Zanimiva bi bila tudi primerjava poteka hidratacije za našo betonsko mešanico SCC s standardno uveljavljeno metodo s penetrometrom. Na tem mestu lahko opravimo le primerjavo z rezultati preiskav Gorana Šnepergerja, ki je v svoji diplomski nalogi meril vezanje SCC betona podobne sestave (grafikon 7). Ocenjen začetek vezanja betona sovpada z vrhom pri 1800 okvirjih, to je po dveh urah in tridesetih minutah. Vrh hidratacije nastopi po približno 3 urah in 45 minutah (na sliki pri številu 2700 okvirjev), kar je v skladu s pričakovanju in v skladu s časom, pri katerem lahko pričakujemo konec vezanja našega SCC betona. Nato nastopi obdobje pojemajoče hidratacije, katerega spremljanje smo zaključili po 7 urah snemanja.



Grafikon 6: Potek hidratacije cementa v betonu



Grafikon 7: Rezultati preiskav vezanja betona s penetrometrom [18]

7 ZAKLJUČEK

Za dobro razumevanje celotne termografije in predvsem termografije kot metode za neporušna testiranja, potrebujemo ogromno znanja in izkušenj. Ključnega pomena je dobro poznavanje fizikalnih osnov in delovanja ter uporabe kamere, saj lahko le tako zagotovimo pravilno interpretacijo rezultatov. Pomembno je tudi, da znamo izključiti vplive, ki nam zaradi različnih vzrokov dajo drugačne informacije od tistih, kot jih pričakujemo (npr. različna prevodnost na robovih preizkušanca, pregrevanje ali vpliv vlažnosti).

Infrardeča termografija se je v preteklosti že izkazala za učinkovito orodje zaznavanja različnih anomalij pri neporušnih metodah testiranja preizkušancev. Tudi raziskave, ki so potekale na naši fakulteti so to pokazale. Njena prednost pred ostalimi metodami neporušnega testiranja je predvsem nekontaktnost metode, tj. ne potrebujemo stika s preizkušancem, in pa relativno preprosto zajemanje podatkov.

Kot sem že omenila v uvodu, je področje, ki smo se ga lotili raziskovati v sklopu moje diplomske naloge, še dokaj novo in neraziskano. Uganko nam ni predstavljala le obdelava podatkov, ampak tudi interpretacija rezultatov. Kljub temu smo vseeno prišli do sledečih zanimivih zaključkov glede uporabe termografije kot metode za zaznavanje segregacije v samozgoščevalnem betonu:

- Temperaturne slike nam dajo sicer hitre in dokaj uporabne informacije, vendar so premalo natančne za ugotavljanje segregacije pri preizkušancih, kjer ni mogoče homogeno gretje. Poleg tega so občutljive na nepravilnosti na površini preizkušancev (luknjice). Vsekakor pa so se izkazale kot koristen vir informacij pri manjših preizkušancih, kjer je bil doveden toplotni tok po vsej površini kocke popolnoma enak.
- Temperaturne krivulje za razliko od temperaturnih slik omogočajo spremljanje celotnega ohlajanje za določeno točko. Z modeliranjem eksperimentalnih rezultatov s teoretično predpostavljeno funkcijsko odvisnostjo lahko dodatno kvalitativno ocenimo termično difuzivnost snovi. Slabost temperaturnih krivulj pa je, da lahko kvalitativno oceno termične difuzivnosti dobimo le za posamezne izbrane točke. Dodatno je za prenos v prakso zahteven način obdelave podatkov, ki zahteva izkušenega obdelovalca.
- Fazne slike so se izkazale za najbolj učinkovito orodje pri zaznavi različne sestave preizkušancev. Za razliko od temperaturnih slik so manj občutljive na nehomogeno segrevanje in nepravilnosti na površini, omogočajo pa tudi kvalitativno oceno difuzivnosti po celotnem merjnem območju. Videli smo, da se različna termična difuzivnost odraža v različni vrednosti faze. Območja z višjo difuzivnostjo imajo manjšo vrednost faze in obratno. Paziti moramo le, da so preizkušanci popolnoma suhi preden se lotimo gretja, saj vlaga povzroči spremenjeno

difuzivnost materiala. Interpretacija rezultatov s faznimi slikami se je izkazala za uporabnika, ki ni podkovan s širokim teoretičnim znanjem, enostavnejša.

- Segregacijo se z aktivno termografsko meritvijo da zaznati. Pri kockah smo jo zaznali tako s pomočjo temperaturnih slik, kjer je bilo to mogoče zaradi homogenega gretja, kot tudi s faznimi (kjer ni bilo motečega dejavnika vlage). Pri večjih preizkušancih smo jo s pomočjo faznih slik prav tako zaznali in to tudi v primerih s skoraj minimalno stopnjo segregacije.
- Ugotovili smo, da lahko s termografsko meritvijo ocenimo tudi razlike v termičnih lastnostih lahkih agregatov različnih gostot. Pokazalo se je, da ima preizkušanec iz lahkega agregata večje gostote manjšo termično difuzivnost kot agregat iz lahkega agregata manjše gostote.
- Hidracijska toplota po 24 urah se ni izkazala za dovolj velik vir toplote, da bi z njim lahko zaznali segregacijo. Možno je tudi, da je vsebnost vode v preizkušancu po razopazjenju prevelika in nam »popači« rezultate. Smo pa pokazali, da se s termokamero da zaznati hidracijo cementa v betonu in na podlagi le te oceniti začetek in konec vezanja betona.

Za nadaljne raziskave bi priporočala, da se preizkušance segreje na manj stopinj (na okoli 40°C), saj bi se tako izognili efektu pregrevanja, toplotni tok pa bi vseeno prodril dovolj globoko. Drugi pomemben napotek pa bi bil, da je potrebno z gretjem preizkušancev po razopazjenju počakati vsaj en mesec, da se znebimo vpliva vlažnosti betona.

Cepitev preizkušancev nam je dala veliko koristnih informacij, vendar pa bi bilo smiselno preveriti rezultate še s kakšno neporušno metodo (radar, ultrazvok).

Kljub vsem ugotovitvam se zavedamo, kako kompleksno je področje termografije in da bi bilo za absolutno verodostojnost naših rezultatov potrebno opraviti obsežnejše preiskave, s katerimi bi dobili bolj podroben vpogled v notranjost preizkušancev.

VIRI

- [1] 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.
- [2] Murn, P. 2013. Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba P. Murn): 77 str.
- [3] Črepinšek, L., 2005. Fizika. Del 1, Mehanika, nihanje, toplota. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo: 202 str.
- [4] Koloini, T. 1999. Prenos toplote in snovi. Ljubljana, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo: 273 str.
- [5] FLIR. 2012. User's manual, FLIR R&D software suite 3.1.:102 str.
[http://support.flir.com/DocDownload/Assets/61/English/T559132\\$a582.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/61/English/T559132$a582.pdf)
(Pridobljeno 21.8.2013)
- [6] FLIR. 2011. Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications.
http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf
(Pridobljeno 12.10.2013)
- [7] FLIR. The ultimate infrared handbook for r&d professionals.
http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559243/T559243_EN.pdf
(Pridobljeno 26.8.2013)
- [8] Maldague, X. 2002. Introduction to NDT by Active Infrared Thermography. Canada, Quebec City, Universite Laval, Electrical and Computing Engineering Department: 21 str
- [9] Arndt, R., Maierhofer, Ch., Röllig, M., et al. 2004. Structural Investigation of Concrete and Masonry Structures behind Plaster by means of Pulse Phase Thermography. Germany, Berlin, Federal Institute for Material Research and Testing (BAM): 6 str.
<http://qirt.org/archives/qirt2004/papers/044.pdf> (Pridobljeno 7.10.2013)

- [10] Arndt, R., Maierhofer C., Röllig M. 2006. Quantitative Pulse-Phase-Thermography for Masonry and Concrete Structures.
<http://ndt.net/article/ecndt2006/doc/P149.pdf> (Pridobljeno 18.9.2013)
- [11] Termografija, Oglasna priloga.2009. Finance (1.7. 2009): 35-39 str.
http://beta.finance.si/files/2009-06-01/finance_103_termografija.pdf (Pridobljeno 18.9.2013)
- [12] FLIR. 2011. Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications.
http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T820325/T820325_EN.pdf
(Pridobljeno 12. 10. 2013.)
- [13] Termografske novice. Ni oken, ni problemov, ali res?
<http://ss1.spletnik.si//000/000/12c/6f2/Tnovice%2003.pdf> (Pridobljeno 17.9.2013)
- [14] Duh, D. 2008. Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba D. Duh): 200 str.
- [15] Neville, A. M., 1986. Properties of concrete. Tretja izdaja. Harlow, Longman Scientific & Technical: 799 str.
- [16] Short, A., Kinniburgh, W. 1968. Lightweight concrete. London, CR Books: 368 str.
- [17] Gašperič, N. 2013. Vpliv zrnastostne sestave agregata in vrste suplastifikatorja na reološke lastnosti svežega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba N. Gašperič): 74 str.
- [18] Šneperger, G. 2011. Ocena stabilnosti svetlega samozgoščevalnega betona z metodo električne prevodnosti. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba G. Šneperger): 67 str.
- [19] Akers, D. J., Boyle M. J., Bremner, T. W. 2003. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete. American Concrete Institute. 38 str.
- [20] 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. 7. 2013.)

- [21] Študija energetske učinkovitosti stavb v pomurju z metodo termičnega diagnosticiranja ter izdelava predlogov normativnih kriterijev tehničnih karakteristik ustreznosti elementov preprečevanja toplotne izgube stavb.2007: 56 str.
http://www.lea-pomurje.si/datoteke/IR_Termodiagnosticirane_Pomurje.pdf
(Pridobljeno 11.11.2013)
- [22] Miketič, A. 2013. Samozgoščevalni betoni z agregatom iz ekspanzirane gline. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Odd. za gradbeništvo (samozaložba A. Miketič): 74 str.
- [23] McGarrity, S. 2007. Textscantool.
<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/16075-textscantool>
(Pridobljeno 12.5.2013)
- [24] Pilla, M., Klein, M. 2008. Ir View
http://vision.gel.ulaval.ca/~klein/ir_view/IR_View.zip(Pridobljeno 12.5.2013)
- [25] Konakova D., Čachova M., Vejmelkova E., Černý R. Properties of Plasters with Lightweight Aggregates. Prague, Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Materials Engineering and Chemistry: 6 str.
<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Paris/ECME/ECME-10.pdf>
(Pridobljeno 20. 11. 2013)