

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

Jamova 2, p. p. 3422
1115 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



**VISOKOŠOLSKI
STROKOVNI
ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidatka:

PETRA DURINI

Toplotni mostovi

Diplomska naloga št.: 448\SOG

Thermal bridges

Graduation thesis No.: 448\SOG

Mentor:
prof. dr. Aleš Krainer

Somentor:
viš. pred. dr. Roman Kunič

Predsednik komisije:
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 2012

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana Petra Durini izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Toplotni mostovi«.

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

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

Ljubljana, 12.1.2012

Petra Durini

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 772.96:624.91(043.2)
Avtor: Petra Durini
Mentor: prof. dr. Aleš Krainer
Somentor: viš. pred. dr. Roman Kunič
Naslov: Toplotni mostovi
Obseg in oprema: 84 str., 11 pregl., 54 sl.,
Ključne besede: toplotni mostovi, prenos toplote, termografija, konstrukcijski sklopi, IR kamera

Izvleček

Tema diplomskega dela predstavlja toplotni most kot "pereč problem v ovoju zgradbe", kjer so plasti toplotne izolacije pogosto prekinjene, namočene ali drugače poškodovane. Največkrat so posledica slabo načrtovanih detajlov pri prebojih (balkoni, terase, preklade in itd.), previsih, stebrih, priključkih kovinskih elementov, slabo tesnjenega stavbnega pohištva in podobno. Cilj diplomske naloge je splošna identifikacija pojava toplotnih mostov v teoriji ter odkrivanje toplotnih mostov v realnem času s termografijo objektov, saj nam le ta omogoča odličen pogled merjenega ciljnega objekta.

V prvih poglavjih diplomske naloge so, za lažje razumevanje izračunov v analizah, opisani mehanizmi prehoda toplote skozi konstrukcijski sklop. Predstavljeni so toplotni mostovi, križanja (potencialna mesta toplotnih mostov), posledice toplotnih mostov in obravnava toplotnih mostov v mednarodnih standardih. V nadaljevanju naloge je predstavljen pojem termografija in pa metode analiziranja anomalij s pomočjo infrardeče metode. Analitičen del diplomske naloge obravnava termografske posnetke merjenja/objekta. Termografski posnetek merjenja/objekta nam pokaže, kje so težave in mesta, ki nas posebej zanimajo. Toplotne slike sem posnela s termokamero FLIR S65. Nato sem jih obdelala v računalniškem programskem orodju ThermaCAMResearcherPro 2.9 ter na podlagi dobljenih termogramov analizirala škodne dogodke/poškodbe zaradi posledic toplotnih mostov na ovoju zgradbe. Posledice toplotnih mostov sem obravnavala tako s stališča energetske učinkovitosti (povečan toplotni tok) kot s stališča bivalnega ugodja v prostoru (znižanje površinske temperature).

BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 772.96:624.91(043.2)
Author: Petra Durini
Supervisor: prof. dr. Aleš Krainer
Co-supervisor: sen. lect. dr. Roman Kunič
Title: Thermal bridges
Notes: 84 p., 11 tab., 54 fig.
Key words: thermal bridges, heat transfer, thermography, constructional complexes, IR camera

Abstract

This thesis presents the thermal bridge as a “serious problem in the building envelope” where the heat insulation layer is often broken, wet or otherwise damaged which often happens as a result of poorly designed details in wall protrusions (balconies, terraces, bridge elements,), overhangs, pillars, metal connecting elements, poorly sealed doors and windows, etc. Goal of the thesis is a theoretical identification of the thermal bridge phenomena and a presentation of real-time object thermography which enables us an excellent overview of the object in question.

The first thesis chapters describe mechanics of heat transfer through the structural assembly, present thermal bridge phenomena, crossings (potential thermal bridge spots), consequences of thermal bridges and treatment of thermal bridges by international standards. In later chapters I am presenting thermography and methods to analyse anomalies using infrared method and analytically consider thermographic recordings of the measured object/building which pinpoints the spots of particular interest and possible problems. FLIR S65 was utilised to capture thermal recordings which were further processed with ThermaCAMResearcherPro 2.9 software tool. Based on results of thermogram analysis possible damaging effects or thermal bridge consequences were observed. Thermal bridge consequences were considered both in terms of energy efficiency (increased heat flow) and from the standpoint of comfort in living room (decreasing surface temperature).

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Alešu Krainerju in somentorju viš. pred. dr. Romanu Kuniču za pridobljeno znanje, sodelovanje in pomoč pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se gospodu Niku Tršanu za pomoč in pridobljeno znanje na področju termografije.

Hvala tudi vsem mojim bližnjim, posebno očetu, za vso ljubezen, potrpežljivost in pomoč v času mojega študija ter ob nastajanju diplomske naloge.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
2	PRENOS TOPLOTE	5
2.1	Kondukcija ali prevajanje toplote	5
2.2	Konvekcija ali prestop toplote	8
2.3	Radiacija ali elektromagnetno sevanje	9
2.4	Stacionaren prehod toplote skozi konstrukcijski sklop.....	10
3	TOPLOTNI MOSTOVI.....	11
3.1	Definicija toplotnih mostov	11
3.1.1	Oblike toplotnih mostov	11
3.1.1.1	Linijski toplotni mostovi	12
3.1.1.2	Točkovni toplotni most.....	13
3.1.2	Tipi toplotnih mostov.....	13
3.1.2.1	Geometrijski toplotni most	13
3.1.2.1	. Konstrukcijski (materialni) toplotni most	14
3.1.2.2	Konvekcijski toplotni most	15
3.2	Križanja	15
3.3	Posledice toplotnih mostov	22
3.3.1	Povečan toplotni tok	23
3.3.2	Znižanje notranje površinske temperature	23
3.3.2.1	Vpliv na toplotno ugodje	23
3.3.2.2	Vpliv na gradbeno konstrukcijo (kondenzacija).....	26
3.4	Standardi	30
3.4.1	Standard SIST EN ISO 10211:2008	31
3.4.2	Standard SIST EN ISO 14683:2007	33
4	TERMOGRAFIJA.....	36
4.1	Opredelitev (definicija) termografije	36
4.1.1	Uporaba termografije.....	36
4.1.2	Elektromagnetni spekter	39
4.2	IR kamera.....	40

4.2.1	Toplotna slika	41
4.2.1.1	Navidezna temperatura	41
4.3	Izmenjava energije s sevanjem.....	42
4.3.1	Vpadlo sevanje.....	42
4.3.2	Oddano sevanje	43
4.4	Nastavitev kamere.....	44
4.4.1	Reflektirana navidezna temperatura	44
4.4.2	Kompenzacija odboja	44
5	ODKRIVANJE ŠKODNIH DOGODKOV/POŠKODB S POMOČJO INFRARDEČE METODE	47
5.1	Metode analiziranja v termografiji	47
5.1.1	Kvalitativna metoda.....	48
5.1.2	Kvantitativna metoda	48
5.2	Škodni dogodki/poškodbe na zunanji steni.....	49
5.2.1	1. Analiza: znižanje notranjih površinskih temperatur.....	51
5.2.2	2. Analiza: povečan toplotni tok	53
6	ANALIZA TERMOGRAMOV: ZNIŽANJE NOTRANJIH POVRŠINSKIH TEMPERATUR	54
6.1	Primer: odkrivanje škodnih dogodkov/poškodb - visoko pritličje večstanovanjske stavbe	54
6.1.1.1	V območju toplotnega mostu (označeno z LIO1 na termogramu):	56
6.1.1.2	Izven območja toplotnega mostu (označeno z ARO1 na termogramu).....	57
6.1.2	Preverjanje zgoraj naštetih pogojev	57
6.1.2.1	Ugotovitve in komentar	58
6.2	Primeri analiz termogramov	59
7	ANALIZA TERMOGRAMA: POVEČAN TOPLOTNI TOK.....	66
7.1	Termografski pregled zunanje stene	66
7.2	Toplotni tok, ki ga oddaja stena.....	68
7.2.1	Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO1.....	69
7.2.2	Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO2.....	71
7.2.3	Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO3.....	72

7.3	Stacionaren prehod toplote skozi konstrukcijski sklop.....	73
7.3.1	Območje površine na termogramu z oznako ARO1.....	73
7.3.2	Območje površine na termogramu z oznako ARO2.....	75
7.3.3	Območje površine na termogramu z oznako ARO3.....	75
7.4	Primerjava rezultatov.....	76
8	ZAKLJUČEK.....	79
VIRI		82

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Naravna konvekcija	9
Preglednica 2: Emitivnost materialov (Tršan, 2011)	46
Preglednica 3: Predhodno izmerjeni robni parametri (povprečne vrednosti meritev)	57
Preglednica 4: Temperaturni parametri odčitani iz termograma	57
Preglednica 5: Primerjava rezultatov po območjih (ARO1, ARO2, ARO3)	73
Preglednica 6: Konstrukcijski sklop zunanje stene (površina označena na termogramu z ARO1)	74
Preglednica 7: Celotna toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa (ARO1)	74
Preglednica 8: Celotna toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa (ARO2)	75
Preglednica 9: Toplotna prehodnost dela konstrukcijskega sklopa na območju površine označene z ARO3	76
Preglednica 10: Rezultati analize – gostota toplotnega toka	76
Preglednica 11: Rezultati analize – toplotna prehodnost	77

KAZALO SLIK

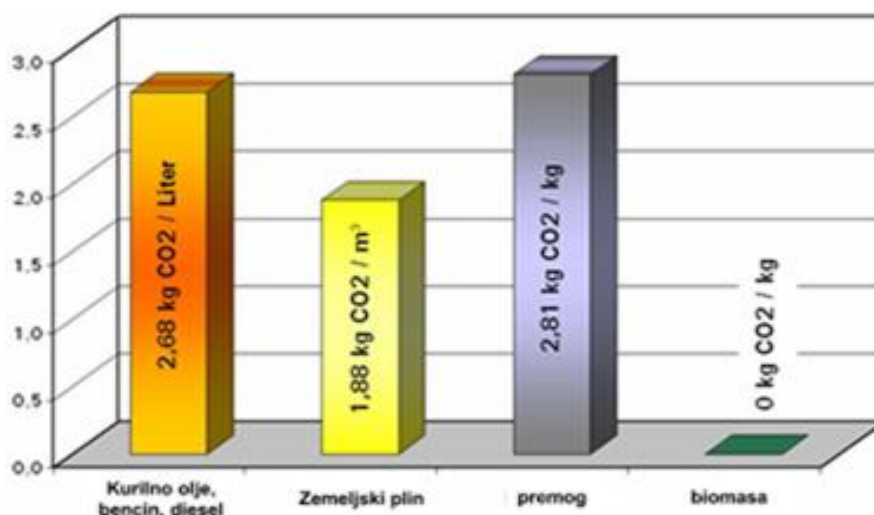
Slika 1.1: Količina ekvivalenta CO ₂ na enoto energetskega vira (MOVE - delavnice, 2011).....	1
Slika 3.1: Linijski toplotni most	12
Slika 3.2: Primera točkovnih toplotnih mostov (SIST EN ISO 10211, 2008)	13
Slika 3.3: Izoterme in toplotni tokovi na toplotnih mostovih (Jordan, 1997)	14
Slika 3.4: Konstrukcijskim toplotni most (stena – plošča).....	14
Slika 3.5: Potencialna mesta toplotni mostovi	16
Slika 3.6: Potencialna mesta toplotnih mostov	16
Slika 3.7: Križanja L	17
Slika 3.8: Križanja T	17
Slika 3.9: Križanja +	18
Slika 3.10: Križanje stena - okno	18
Slika 3.11: Matrika križanj (Mittag, 2000)	19
Slika 3.12: Rešitve križanj (Mittag, 2000)	20
Slika 3.13: Atlas toplotnih mostov (Hauser, G., Stiegel, H. 2006)	21
Slika 3.14: Povečan toplotni tok	
Slika 3.15: Znižanje površinskih temperatur.....	22
Slika 3.16 – Razmerje med sevalno temperaturo in temperaturo zraka; občutena temperatura (MOVE - delavnice, 2011)	24
Slika 3.17 – sevalna asimetrija (MOVE - delavnice, 2011).....	25
Slika 3.18: Mollierov diagram (katalog YTONG, 2011)	27
Slika 3.19: Faktor fRsi in $\Theta_{si,min}$ (Catalogue des ponts thermiques, 2011).....	29
Slika 3.20: Tesni referenčni primer št. 1 (SIST EN ISO 10211:2008).....	32
Slika 3.21: Določanje linijske toplotne prehodnosti (SIST EN ISO 10211:2008).....	33
Slika 3.22: Potencialna mesta toplotnih mostov (SIST EN ISO 14683:2007).....	34
Slika 3.23: Projektne vrednosti linearne toplotne prehodnosti (SIST EN ISO 14683:2007)	35
Slika 4.1: Toplotne izgube stavb	37
Slika 4.2: Vzdrževanje energetske opreme (Infrardeča termografija, 2005).....	38
Slika 4.3: Ležaj električnega motorja (Infrardeča termografija, 2005)	38
Slika 4.4: Medicina - odkrivanje bolezni (FLIR,2011)	38
Slika 4.5: Elektromagnetni spekter (Infrardeča termografija, 2005).....	39
Slika 4.6: Sestava IR kamera (Tršan, 2011).....	40
Slika 4.7: Toplotna slika linijskega toplotnega mostu	41
Slika 4.8: Programsko orodje ThermaCAM Researcher Pro 2.9	45
Slika 5.1: Tremokamera FLIR S65 (2011).....	47
Slika 5.2: Vidna slika problema	
Slika 5.3: ugotavljanje prisotnosti problema.....	48
Slika 5.4: Termogram – kvantitativna metod.....	49
Slika 5.5: Računanje faktorja fRsi.....	50
Slika 5.6: Računanje toplotnega toka	50
Slika 5.7: Zapisovalnik podatkov (angl. data logger)	51
Slika 5.8: Neustrezna uporaba prostora.....	52
Slika 5.9: Ustrezna uporaba stanovanja	52
Slika 6.1: Sestava zunanje stene	
Slika 6.2: Prezračevana fasada	54
Slika 6.3: Vidna slika – levo, toplotna slika - desno	55
Slika 6.4: Termogram toplotnega mostu	56
Slika 6.5: Prikaz površinskih temperatur na grafu	56
Slika 6.6: Toplotni most – križanje plošča – stena (balkon)	61
Slika 6.7: Preboj odtočne cevi.....	65

Slika 7.1: Funkcionalna analiza konstrukcijskega sklopa	66
Slika 7.2: Pritrjevanje VIP panelov, obojestransko zaščitenih z FRAGMAT NEO SUPER	67
Slika 7.3: Termogram zunanje fasade (VIP paneli) – označeni površini z ARO2 in ARO3 predstavljajo toplotni most, kjer je toplotni upor manjši kot v območju površine označene z ARO1	68
Slika 7.4: Območje/površina ARO1: $T_{povp} = 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	69
Slika 7.5: Območje/površina ARO2: $T_{povp} = 1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	71
Slika 7.6: Območje/površina ARO3: $T_{povp} = 2,0^{\circ}\text{C}$	72

1 UVOD

V današnjem času slišimo vedno več informacij o podnebnih spremembah in posledicah, ki jih lahko prinese globalno segrevanje. Vedno več virov omenja, da je globalno segrevanje posledica človekovega potratnega ravnanja z energijo. Dejstvo je, da so se emisije toplogrednih plinov v zadnjih desetletjih izrazito povečale. Prekomerna poraba fosilnih goriv za potrebe stavbnega sektorja, pogon prevoznih sredstev, proizvodnja drugih oblik energije in industrijske proizvodnje prispevajo k naraščanju koncentracije emisij toplogrednih plinov, predvsem CO₂.

Po podatkih ESTTP (European Solar Thermal Technology Platform) okoli 50% skupne proizvedene energije na področju Evrope porabimo v stavbnem sektorju. Z vidika trajnostnega razvoja je potrebno količino energije v večini nadomestiti z obnovljivimi viri. Leta 1992 je bil s konvencijo ZN v Riu (UN, 1992) uveljavljen izraz »sustainable development« (trajnostni razvoj), ki se danes pojavlja v vsakem pravnem aktu v razlagi pojmov in pomeni »popolno uravnoteženje ekonomskih, socialnih, okoljskih in zdravstvenih vidikov razvoja« (Krainer in sod., 2008). Da bi zagotovili potrebam trajnostnega razvoja, se smernice dolgoročnega razvoja kažejo tudi pri gradnji stavb t. i. trajnostna gradnja. CIB (Conseil International du Batiment), mednarodna organizacija za raziskave in inovacije v gradbeništvu, je leta 1994 definirala cilj trajnostne gradnje kot »ustvarjanje in upravljanje zdravega delovnega in bivalnega okolja, ki temelji na uporabi učinkovitih virov in ekološko varnih smernicah gradnje« (Kibert, 2008).



Slika 1.1: Količina ekvivalenta CO₂ na enoto energetskega vira (MOVE - delavnice, 2011)

Uporaba obnovljivih virov energije predstavlja v prihodnosti veliko ekološko razbremenitev, saj zajemanje OVE ne izčrpa vira in ne povzroča onesnaževanja okolja (slika 1.1). Obnovljivi viri energije vključujejo vse vire energije, ki jih zajemamo iz stalnih naravnih procesov, kot so sončno sevanje, veter, vodni tok v rekah ali potokih (hidroenergija), fotosinteza, s katero rastline gradijo biomaso, biobavica in zemeljski toplotni tokovi (geotermalna energija). Prav tako moramo z uporabo obnovljivih virov energije v stavbah zagotavljati najmanj 25 % moči za gretje, prezračevanje, hlajenje in pripravo tople vode (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, 2010).

Evropska komisija se spopada predvsem z ekološko razsežnostjo trajnostnega razvoja in veliko vlaga v raziskave in razvoj nizkoenergijskih tehnologij. Pri tem se spopada z vprašanjem, kako doseči ekonomsko in socialno neodvisnost razvoja. Energetska učinkovitost je eden glavnih ciljev ter tudi ključni dejavnik pri doseganju dolgoročnih energetske in podnebne cilje. EU si je zadala tri pomembne ukrepe (20% manj emisij, 20% manj porabe energije oz. večja učinkovitost, 20% potrebe po energiji iz obnovljivih virov). Ti ukrepi obsegajo predvsem strožje zahteve glede toplotnih lastnosti ovoja stavb, energetske učinkovitejša sistema za ogrevanje, prezračevanje, hlajenje, pripravo tople vode in razsvetljavo prostorov ter izkoriščanje obnovljivih virov energije v stavbah. S tem naj bi Evropo usmerila v trajnostno prihodnost in nizkoogljično, energetsko učinkovito gospodarstvo ter obenem spoštovala Kojotski protokol k Okvirni konvenciji ZN o spremembi podnebja (Evropska komisija, 2011).

Vendar se moramo pri vseh teh ciljih in ukrepih Evropske unije, zavedati, da omejitev rabe energije ne sme vplivati na našo bivalno ugodje v stavbi. Prof. dr. Aleša Krainerja (2009) v svojem članku Enostransko varčevanje z energijo pravi, da je najpomembnejša funkcija bivalnega in delovnega okolja dinamična komunikacija z zunanjim okoljem. Ta funkcija je povezana z oblikovanjem zdravega, udobnega in prijetnega okolja, pa tudi z učinkovito uporabo razpoložljivih naravnih virov. »Trajnostna stavba ni le energetsko varčna, temveč zagotavlja tudi zdravo bivalno okolje« (Krainer, 2009). Človek okoli 90% življenja preživi v notranjih prostorih. Kako kvalitetno bo preživel ta čas, je odvisno od bivalnega ugodja. Bivalno ugodje je definirano kot dobro telesno in duševno stanje počutja v določenem prostoru, ki ga dosežemo s primernim toplotnim, svetlobnim in zvočnim udobjem ter kvaliteto zraka (Hens, 2007).

Če ovoj stavbe kakovostno toplotno izoliramo, dosežemo boljše počutje v prostoru in prihranimo pri rabi energije. Zunanji ovoj stavbe je sestavljen iz elementov, ki ločijo in ščitijo notranje okolje pred zunanjimi vplivi (Hens, 2007). Pomembni zunanji dejavniki so klimatski dejavniki. Zunanja temperatura je prevladujoč klimatski dejavnik pri porabi energije (Miloradović, 2009). Zaradi

toplotnega ugodja pozimi povečano ogrevamo prostore, poleti jih hladimo. Toplota prehaja skozi ovoj stavbe in se v tokovih odvaja v okolje. Z uspešno zasnovo stavbe lahko zmanjšamo toplotne izgube in posledično potratno rabo energije za ogrevanje oziroma ohlajanje prostorov. Pri doseganju navedenega cilja je v veliko pomoč novi pravilnik o učinkoviti rabi energije PURES-2 2010 s pripadajočo tehnično smernico TSG-1-004. Pravilnik o učinkoviti rabi energije je gradbeni predpis, ki ga moramo upoštevati pri načrtovanju stavbe in stavbnega ovoja. Ta na podlagi Zakona o graditvi objektov predstavlja prenos zahtev, usmeritev in priporočil evropske zakonodaje v slovenski pravni red. PURES 2010 temelji na treh pravnih podlagah. Najstarejša med njimi je direktiva o gradbenih proizvodih 89/106/EEC iz leta 1988, ki obravnava temeljne zahteve za stalno vgrajene elemente v objekte in za bivalne pogoje v grajenem okolju. Druga pravna podlaga je prenovljena direktiva o energetske učinkovitosti stavb 2010/31/EU, tretji pravni dokument pa je direktiva o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov 2009/28/ES (Galonja S., Krainer A., 2010).

Pri načrtovanju zasnove stavbe, ki jo moramo obravnavati kot celoto, sta pomembna in temeljna vsebinska člena 6. in 8. člen pravilnika (Krainer, 2010). V 8. členu (arhitekturna zasnova) bi z vidika toplotnih mostov izpostavila zahtevo, ki jo mora arhitekturna zasnova upoštevati in sicer zahtevo po tem, da mora biti razmerje med ovojem stavbe in njenim volumnom čim bolj ugodno. Vsaka nepotrebna členjenost stavbe ali elementov lahko povzroči toplotne mostove (TSG-1-004). Pri vplivu toplotnih mostov na letno potrebo po toploti pa je predvsem pomemben 9. člen PURES-2 2010, ki se nanaša na toplotno zaščito. Ta mora biti gradbeno-fizikalno korektno izvedena in brez toplotnih mostov v zunanjem ovoju stavbe.

Problem, ki ga obravnavam v diplomskem delu je, da kljub dobro toplotno izoliranemu ovoju stavbe še zmeraj ostajajo nerešeni problemi toplotnih mostov, z njimi povezane toplotne izgube stavb in znižanje površinske temperature notranje stene ter posledično slabše bivalne razmere v prostoru.

Namen diplomske naloge je splošna identifikacija pojava toplotnih mostov v teoriji in odkrivanje toplotnih mostov na ovoju stavbe v realnem času, s pomočjo kvalitativne infrardeče metode objektov. Na podlagi pridobljenih toplotnih slik s kvalitativno infrardečo metodo bom uporabila kvantitativno metodo, s katero bom analizirala in obravnavala termograme. Posneti termogrami bodo obravnavani v naslednjih dveh sklopih analiz. V prvi analizi bom na podlagi termogramov, posnetih od znotraj, ugotavljala kritične površinske temperature na območju toplotnih mostov, pri katerih prihaja do »perečih« problemov na notranji površini ovoja stavbe. Preverila bom, ali te površinske temperature zadostujejo pogoju s katerim ocenjujemo možnost nastanka plesni na površini konstrukcije. V gradbeni fiziki ta pogoj oziroma merilo imenujemo temperaturni faktor ali faktor padca površinske

temperature fRsi. Prav tako bom preverila ali izmerjene površinske temperature padejo pod temperaturo rosišča. V drugi analizi bom obravnavala termograme, posnete od zunaj, kjer bom ugotavljala toplotni tok, ki ga oddaja stena na treh označenih območjih (ARO1, ARO2, ARO3). Dobljene rezultate iz analize termograma bom primerjala z rezultati stacionarne analize. Predhodno bom v teoretičnem delu diplomske naloge prikazala potrebne teoretične osnove in pojme za lažje razumevanje delovanja konstrukcijskega sklopa in vzrokov pojava toplotnih mostov. Na osnovi pridobljenega strokovnega znanja bom po zaključenih analizah termogramov s kvantitativno metodo podala ugotovitve in kritične komentarje.

2 PRENOS TOPLOTE

Opredelitev prehoda toplote lahko najdemo v različnih virih. O prehodu toplote (energije) govorimo, kadar toplota prehaja iz enega telesa na drugo kot posledica temperaturnih razlik med njima (Šolinc, 1992). Za razumevanje pojavov prenosa toplote sta pomembna 1. in 2. zakon termodinamike, ki določata potrebno količino toplote za prehod sistema iz enega ravnotežnega stanja v drugega. 1. zakon govori o ohranjanju energije in pravi, da je sprememba notranje energije enaka vsoti sprejetega ali oddanega dela in toplote. 2. zakon termodinamike vsebuje več različnih formulacij. Formulacija, ki nas najbolj zanima, pravi, da, spontan prehod toplote s hladnejšega telesa na vroče telo ni mogoč (Georgijević, 2003). Pri prehodu toplote se ne ukvarjamo več z ravnotežnimi stanji, kot pri vedi termodinamike (1. zakon termodinamike), zato za vrednotenje procesa izmenjave energije potrebujemo mehanizem prehoda toplote. Pomembno je dejstvo, da prehoda toplote ne moremo preprečiti, lahko ga samo zmanjšamo. Teorijo prehoda toplote sem raziskala z namenom, da bi lažje razumela pojave med prehodom toplote skozi konstrukcijski sklop ter si s tem ustvarila podlago za izračun toplotnega toka, ki ga oddaja stena. Ta izračun bom računala v analitičnem delu diplomske naloge, na podlagi termogramov.

Skozi konstrukcijski sklop obravnavamo tri mehanizme prehoda toplote; kondukcija, konvekcija in radiacija. Teorijo mehanizmov prehoda toplote sem povzela po knjigi *Building physics* avtorja Huga Hensa (2007).

2.1 Kondukcija ali prevajanje toplote

Prevajanje toplote je pojav med vibriranjem molekul, kjer ob trku toplejša in hitrejša molekula odda nekaj svoje gibalne količine počasnejši in hladnejši molekuli.

Mehanizem prehoda toplote s kondukcijo v trdnih snoveh (konstrukcijski sklop) je v termografiji zelo pomemben, kajti večina objektov, ki jih analiziramo s termokamero, je iz trdnih snovi. Veliko je primerov, kjer je prevajanje edini način prehoda toplote v trdnih snoveh. Prevajanje toplote po večplastnem kompleksnem sistemu potuje od točke z višjo temperaturo do točke z nižjo temperaturo.

Analizo prevoda toplote preučujemo na prostorski in časovni porazdelitvi temperaturnega polja tj. porazdelitvena funkcija temperature, ki predstavlja porazdelitev temperature vzdolž vsake smeri koordinatnega sistema (x, y, z), v odvisnosti od časa (t):

$$T = T(x, y, z, t) \quad (1)$$

Pri prevodu toplote ločimo stacionaren in nestacionaren prevod toplote. Pri nestacionarnem prevodu toplote skozi konstrukcijski sklop moramo upoštevati časovno in krajevno spreminjajoče se robne pogoje, kot so notranja in zunanja temperatura, notranja in zunanja vlažnost zraka ter atmosferski tlak. Pri stacionarnem prevodu toplote skozi ovoj stavbe pa predpostavimo, da so vse spremenljivke in robni pogoji neodvisni od časa.

Vektorsko relacijo med gostoto toplotnega toka in temperaturo je prvi izrazil francoski fizik Fourier. Enačba (2) je empirični kondukcijski zakon, poznan kot 1. Fourierjev zakon:

$$q = -\lambda \text{ grad } T \quad (2)$$

Spodaj navedena enačba (3) je splošna kondukcijska enačba za nestacionarno stanje, poznana kot 2. Fourierjev zakon.

$$\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\Phi'}{\lambda} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Pri stacionarnem prevodu toplote upoštevamo naslednje predpostavke:

- fizikalni parametri sistema so konstante (toplotna prevodnost, gostota telesa in specifična toplotna kapaciteta),
- obtežba je trenutna,
- toplotni tok je konstanten.

Ob upoštevanju naštetih predpostavk lahko enačbo (3) zapišemo v t. i. Laplaceovi obliki (Pierre-Simon marquis de Laplace, 1827):

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

Streha, strop in stene se obravnavajo kot ploskovni gradbeni elementi, zato lahko toplotni tok skozi sisteme obravnavamo kot enodimenzionalno. Stacionarni prevod v eni dimenziji lahko opišemo s 1. Fourierjevim zakonom, katerega sem navedla na začetku poglavja.

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (5)$$

Če predpostavimo, da je obravnavano telo homogeno in izotropno (material prevaja toploto v vse smeri enako), še dodatno poenostavimo enačbo (5).

$$q_{\text{kondukcije}} = \lambda \frac{\Delta T}{d} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6)$$

Iz enačbe (6) je razvidno, da je gostota toplotnega toka pri prevajanju toplote sorazmerna temperaturnemu gradientu.

Sorazmernosti faktor " λ " imenujemo toplotna prevodnost materiala. Njena enota je $[\text{W}/(\text{mK})]$ in »je specifična lastnost materiala, določena pri srednji delovni temperaturi (običajno 20%) in vlažnosti (na 50-odstotni zračni vlagi) materiala. Pove nam, kolikšen toplotni tok preteče pri stacionarnih pogojih v eni uri skozi material z debelino 1m in površino 1m^2 pri temperaturni razliki 1 K v smeri pravokotno na mejno ploskev (Kunič, 2011).

Toplotna prehodnost, ki ima oznako U in enoto $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$, je za razliko od toplotne prevodnosti lastnost celotnega konstrukcijskega sklopa. Konstrukcijski sklop je lahko sestavljen iz več različnih materialov, katerih plasti imajo različne toplotne upore.

Enačba (7) prikazuje toplotni upor za posamezno plast konstrukcijskega sklopa, kjer toplota prehaja s kondukcijo. Toplotni upor z oznako R in enoto $[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ zavira prehajanje toplotnega toka skozi plast konstrukcijskega skopa. Večji ko je toplotni upor, boljša je izolativnost materiala.

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (7)$$

$$U = \frac{\lambda}{d} = \frac{1}{R} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (8)$$

2.2 Konvekcija ali prestop toplote

Pri obravnavanju konstrukcijskega sklopa si konvekcijo najbolje predstavljamo kot posledico temperaturnih razlik in mešanja zračnih mas, kjer toplota prestopa med plinom (tanek zračni sloj tik ob površini sistema) in trdnim telesom ter obratno. Proces prestopa toplote je odvisen od specifičnih vrst robnih pogojev (smer toplotnega toka, izpostavljenost podnebnim vplivom, površinske lastnosti stene in lega konstrukcijskega sklopa), ki vplivajo na oddajanje ali sprejemanje toplote iz stene.

Toplotnega upora pri konvekciji in radiaciji ne moremo izračunati kot razmerje med debelino sloja in toplotne prevodnosti. Zato je vpeljana toplotna prestopnost α . Pri računu prestopa toplote na notranji steni predpostavimo prosto konvekcijo, na zunanji steni pa prisilno konvekcijo. Osnovna enačba toplotnega toka konvekcije je:

$$q_{konvekcije} = \alpha_k T_{si} - T_{n,z} \quad [\text{W/m}^2] \quad (9)$$

kjer so:

α_k	koeficient toplotne prestopnosti $[\text{W/m}^2\text{K}]$,
T_{si}	temperatura stene,
$T_{n,z}$	temperatura zunaj/notri.

Koeficient toplotne prestopnosti je odvisen od različnih parametrov: temperature, vrste plina, hitrosti plina, obdelanosti stične površine in geometrijskih karakteristik. Zaradi naštetih parametrov je konvekcija tako kompleksna, da je v standardih poenostavljena s konstantnimi prestopnimi koeficienti.

Za izračun toplotnega toka, ki ga oddaja stena, sem potrebovala izračunan koeficient toplotne prestopnosti in ne poenostavljen konstantni koeficient, vzet po standardih za primere stacionarnih analiz. Koeficient toplotne prestopnosti sem izračunala po enačbi za naravno konvekcijo (10). Predpostavila sem, da nimam drugih sil, ki bi mi povzročale prisilno konvekcijo.

$$\alpha_k = a \frac{\Delta\theta}{L}^b \quad (10)$$

kjer so:

L , b in a vrednosti, prikazane v preglednici 1, $\Delta\theta$ pa je temperaturna razlika med mejno plastjo zraka in površinsko temperaturo stene.

Preglednica 1: Naravna konvekcija

	POGOJI	a	b	L
Vertikalna površina	$10^{-4} < L^3 \Delta\theta \leq 7$	1,4	1/4	1
	$7 < L^3 \Delta\theta \leq 10^3$	1,3	1/3	1

2.3 Radiacija ali elektromagnetno sevanje

Radiacija je prenos toplote z oddajanjem in absorpcijo toplotne energije brez neposrednega stika. Elektromagnetno sevanje ni odvisno od vrste medija in lahko poteka tudi po vakumu. Vsa telesa, ki imajo temperaturo nad absolutno ničlo (0K), sevajo ali absorbirajo elektromagnetno valovanje iz okolice. Toplotno sevanje vključuje vsa elektromagnetna valovanja (ultravijolična-UV, svetlobo-L in infrardeča-IR) v območju valovnih dolžin med 10^{-7} in 10^{-4} nm.

Gostoto energijskega toka za realna telesa izračunamo po enačbi:

$$q_r = \alpha_{radiacije} (T_{si} + T_{z,n}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (11)$$

kjer so:

α_r koeficient toplotne prestopnosti,

T_{si} temperatura stene,

$T_{n,z}$ temperatura zunaj/notri.

Toplotno prestopnost radiacije izračunamo po naslednji enačbi:

$$\alpha_r = 4 \varepsilon \sigma T_m^3 \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (12)$$

kjer so:

ε emitivnost stene,

σ Štefanova konstanta; $5,67 \times 10^{-8} [\text{W/m}^2\text{K}^4]$

T_m povprečje zunanje/notranje temperature in površinske temperature stene [K].

2.4 Stacionaren prehod toplote skozi konstrukcijski sklop

V mejnih plasteh zraka se upošteva vpliv konvekcije in radiacije, ki jih zaradi močnega prepletanja med seboj združimo v eno vrednost toplotne prestopnosti (α). Teorija mejnih plasti nam omogoča, da v primeru stacionarne analize mejno zračno plast obravnavamo kot dodatni homogeni sloj materiala s konstantnimi lastnostmi. Tako v skladu s standardi za izračun prestopa privzamemo mejne plasti na notranji strani $\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ in na zunanji strani $\alpha_e = 23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Toplotni upor mejne zračne plasti za 1 m^2 stene prikazujeta enačbi (13) za zunanjo mejno zračno plast in enačba (14) za notranjo mejno zračno plast:

$$Re = \frac{1}{\alpha_e} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (13)$$

$$Ri = \frac{1}{\alpha_i} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (14)$$

V standardu SIST EN ISO 6946:2008 je definirana računska metoda za izračun toplotne prehodnosti in toplotne upornosti za potrebe obravnave gradbenih konstrukcij.

Skupni upor konstrukcijskega sklopa:

$$R_k = \frac{1}{\alpha_z} + (d_i / \lambda_i) + \frac{1}{\alpha_n} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}] \quad (15)$$

Celotna toplotna prehodnost homogenih gradbenih konstrukcij – U faktor.

$$U_k = \frac{1}{R_k} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (16)$$

3 TOPLOTNI MOSTOVI

Toplotni mostovi so šibka mesta gradbene konstrukcije, kjer je toplotni upor konstrukcijskega sklopa bistveno manjši od toplotnega upora na sosednjih mestih. S termografijo najlažje in najhitreje odkrijemo šibka mesta v ovoju stavbe. Termografija nam na toplotni sliki prikaže izvor (termični gradient) in obliko (enodimenzionalnih, dvodimenzionalnih ali tridimenzionalnih) toplotnih izgub, ne pa konkretnega vzroka nastalih problemov. Predhodno pridobljeno teoretično znanje je zelo pomembno za obdelavo in analizo toplotnih slik: razumeti moramo delovanje konstrukcijskega sklopa in poznati možnosti, zakaj je prišlo do konkretnega problema in kakšne so njegove posledice. Pri tem nam zelo pomaga pridobljena dokumentacija, izračuni in načrti obravnavanega problema.

3.1 Definicija toplotnih mostov

Definicija toplotnih mostov, povzeta po SIST EN ISO 10211: Toplotni mostovi so deli ovoja stavbe, kjer se sicer enakomerni toplotni upor spremeni zaradi:

- popolnega ali delnega preboja ovoja stavbe z materiali drugačne prevodnosti,
- spremembe v debelini gradbenega elementa,
- razlike v notranji in zunanji površini, ki nastanejo na stikih sten/tal/stropa.

V nekaterih literaturah opredeljujejo toplotne mostove na različne tipe toplotnih mostov, oziroma jih delijo na geometrijske, materialne (konstrukcijske) ter toplotne mostove pogojene s tesnenjem (konvekcijske) ovoja stavbe (več v poglavju Tipi toplotnih mostov).

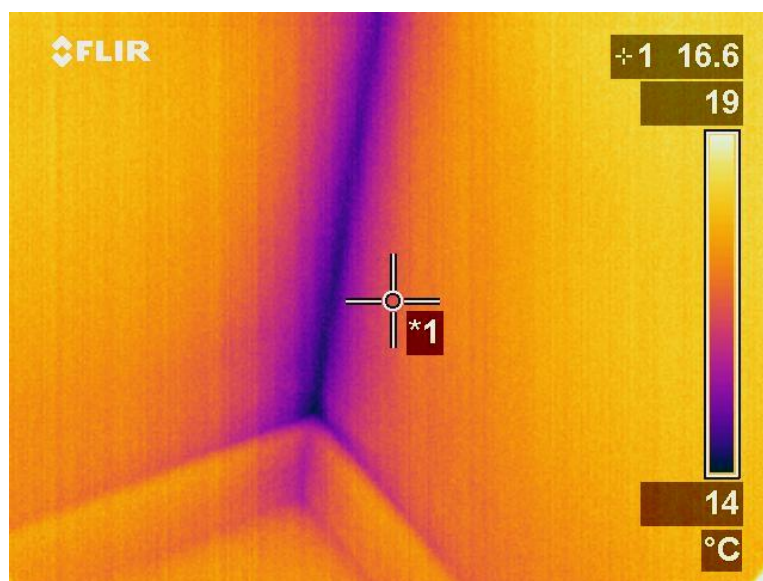
3.1.1 Oblike toplotnih mostov

Glede na obliko lahko toplotne mostove idealiziramo v:

- linijske in
- točkovne.

3.1.1.1 Linijski toplotni mostovi

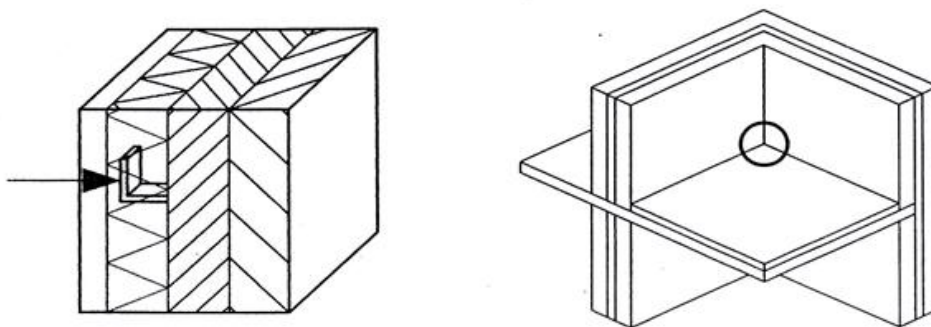
Po definiciji iz standarda SIST EN ISO 10211:2008 in SIST EN ISO 14683 ima linijski toplotni most konstanten prerez vzdolž ene izmed treh ortogonalnih osi. Glede na širino gradbenega elementa so linijski toplotni mostovi ozki in se raztezajo preko njegove celotne dolžine ali po dolžini, ki je večkratna debelina gradbenega elementa. Linijski toplotni most je zastopan v vseh tipih toplotnih mostov, tako geometrijskih kot materialnih (konstrukcijskih). Večina virov o gradbeni fiziki se v obravnavi toplotnih mostov omejuje samo na linijske in manj na točkovne toplotne mostove. Linijski toplotni mostovi so navadno predstavljeni v svojem prečnem prerezu skupaj s prerezom dela obdajajoče konstrukcije. Prečni prerezi nam služijo kot osnova za izdelavo 2D modela pri računanju dvodimenzionalnega toplotnega toka z numeričnimi metodami s pomočjo računalniških programov. Vrednosti za linijski toplotni most so podane na dolžinsko enoto toplotnega mostu. Te so lahko izračunane po numeričnih metoda, ali pa so vzete projektne vrednosti, dobljene iz atlasov in standardov (Jordan, 1997).



Slika 3.1: Linijski toplotni most

3.1.1.2 Točkovni toplotni most

V literaturi redko zasledimo definicije, pojasnila in napotke v zvezi z računanjem točkovnih toplotnih mostov. Najpogosteje so omenjeni določeni tipi točkovnih toplotnih mostov, tisti, ki so materialnega značaja, na primer konstrukcijski elementi s funkcijo pritrdjevanja in povezovanja (slika 3.2, levo). Njihove dimenzije so relativno majhne in bistveno ne presegajo dimenzij, povezanih z debelino gradbenega elementa. Standard SIST EN ISO 10211:2008 opredeli točkovne toplotne mostove kot lokalizirane toplotne mostove, katerih vpliv na skupni toplotni tok je predstavljen s točkovno toplotno prehodnostjo. Točkovna toplotna prehodnost (χ) se nanaša na 3D geometrijski model in s tem opredelimo točkovni toplotni most kot 3D centralni element (slika 3.2, desno) (Jordan, 1997).

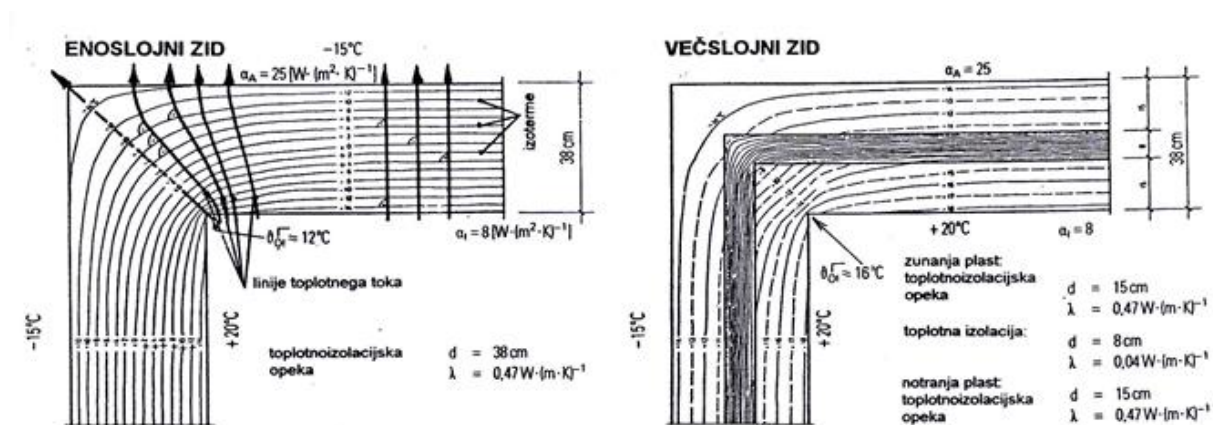


Slika 3.2: Primera točkovnih toplotnih mostov (SIST EN ISO 10211, 2008)

3.1.2 *Tipi toplotnih mostov*

3.1.2.1 Geometrijski toplotni most

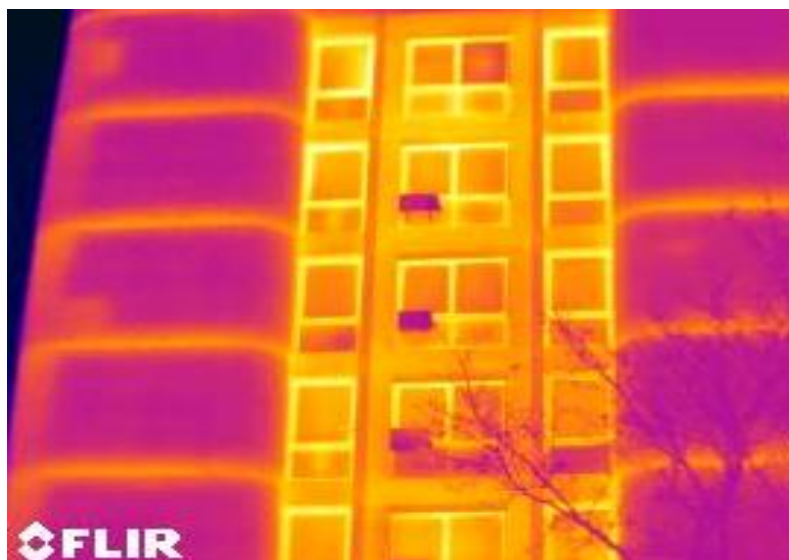
Geometrijski toplotni mostovi nastanejo na mestih, kjer je notranja površina, skozi katero uhaja toplota, manjša od zunanje. Zaradi povečevanja preseka, po katerem se toplota prevaja, se v tem lokalnem delu toplotni upor konstrukcije manjša, oziroma se prevodnost povečuje. Geometrijski toplotni mostovi so v zgradbi pogosti in se jim ne moremo izogniti. Nastanejo na vsakem stiku stene pod določenim kotom in so dvodimenzionalni (linijski), trodimenzionalni (točkovni), konkavni in konveksni. Vpliv linijskih ali točkovnih mostov preverjamo z dvodimenzionalnimi in trodimenzionalnimi numeričnimi metodami. Kot osnovno pravilo velja, da se je potrebno izogibati stikom pod kotom, manjšim od 90° , ukrivljeni elementi ali sklopi pa naj imajo čim večji radij.



Slika 3.3: Izoterme in toplotni tokovi na toplotnih mostovih (Jordan, 1997)

3.1.2.1 Konstrukcijski (materialni) toplotni most

Nastane tam, kjer je prekinjen toplotni ovoj zgradbe. Največkrat je posledica slabo načrtovanih detajlov pri prebojih, previsih (konzolah), priključkih, rebrih, prekinitvah toplotne izolacije. Poseben primer te vrste toplotnega mostu je navlaženi del konstrukcije, še posebej materiala za toplotno zaščito. Navlažen material namreč predstavlja toplotni most, saj se mu zaradi vsebnosti vlage oziroma vode toplotna prevodnost poveča.



Slika 3.4: Konstrukcijski toplotni most (stena – plošča)

Potencialna mesta konstrukcijskih toplotnih mostov so na vseh križanjih konstrukcijskih sklopov in sicer pri prebojih zaradi dimnikov in zračnikov, pri napuščih, pri vogalnih vertikalnih protipotresnih vezeh, pri okenskih špaletah in omaricah za roloje, ob ležiščih betonskih plošč, pri neposrednih nadaljevanjih armiranobetonskih plošč in zidov v balkonske plošče in stene, pri cevnih napeljavah v stenah in v območju zidnih podstavkov ter temeljev. Več o tem v nadaljevanju.

3.1.2.2 Konvekcijski toplotni most

Konvekcijski toplotni mostovi so mesta v ovoju stavbe, kjer je zaradi prekinitev ali netesnosti omogočen pretok notranjega, navlaženega zraka v konstrukcijski sklop. Vpliv nevarnosti kondenzacije vodne pare znotraj konstrukcijskega sklopa zaradi slabe zrakotesnosti stikov je večji od nevarnosti kondenzacije zaradi ovirane difuzije vodne pare.

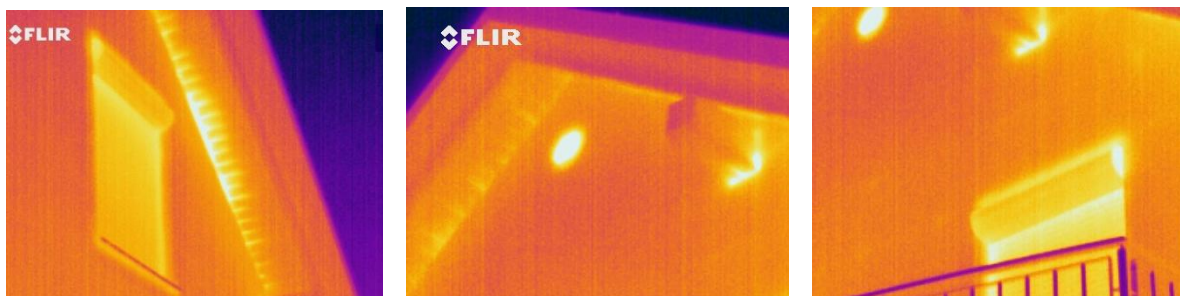
Potencialna mesta konvekcijskih mostov so okenske preklade in izolirane strehe nad ogrevanim prostorom. Dosledno je treba zatesniti (zlepiti) stike vetrne oziroma parne zapore na notranji strani.

3.2 **Križanja**

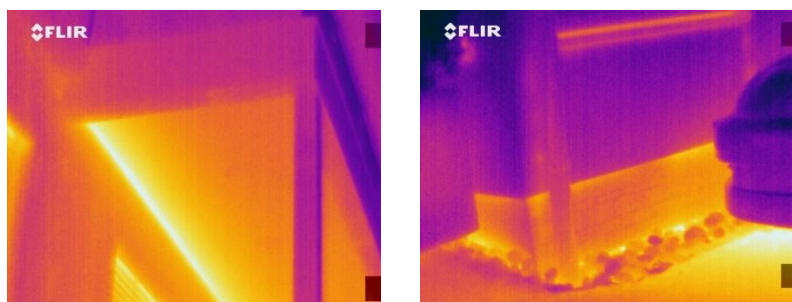
Pri načrtovanju, projektiranju in izvedbi stavbnega ovoja je potrebno paziti, da je vpliv toplotnih mostov čim manjši oziroma, da se toplotne mostove v ovoju stavbe odpravi. Kot sem že predhodno omenila, se geometrijskim toplotnim mostovom ne moremo izogniti, lahko pa preprečimo vpliv konstrukcijskih toplotnih mostov s skrbno načrtovanim križanjem konstrukcijskih sklopov na t.i. potencialnih mestih za toplotne mostove v stavbnem ovoju. Potencialna mesta za toplotne mostove na ovoju stavbe so slabo načrtovana križanja (Jordan, 1997), kjer se stakneta dva ali več različnih konstrukcijskih sklopov.

Potencialna mesta toplotnih mostov:

- streha: sleme, dimnik, zračnik (slika 3.5 - sredina),
- streha – stena: napušč, vogal napušča (slika 3.5 - levo),
- stena – okno: omarica za roloje, špalete (slika 3.5 - desno),
- stena – plošča: ležišče plošče, balkon (slika 3.6 – levo),
- stena: cevne napeljave, cokel, temelj (slika 3.6 - desno).

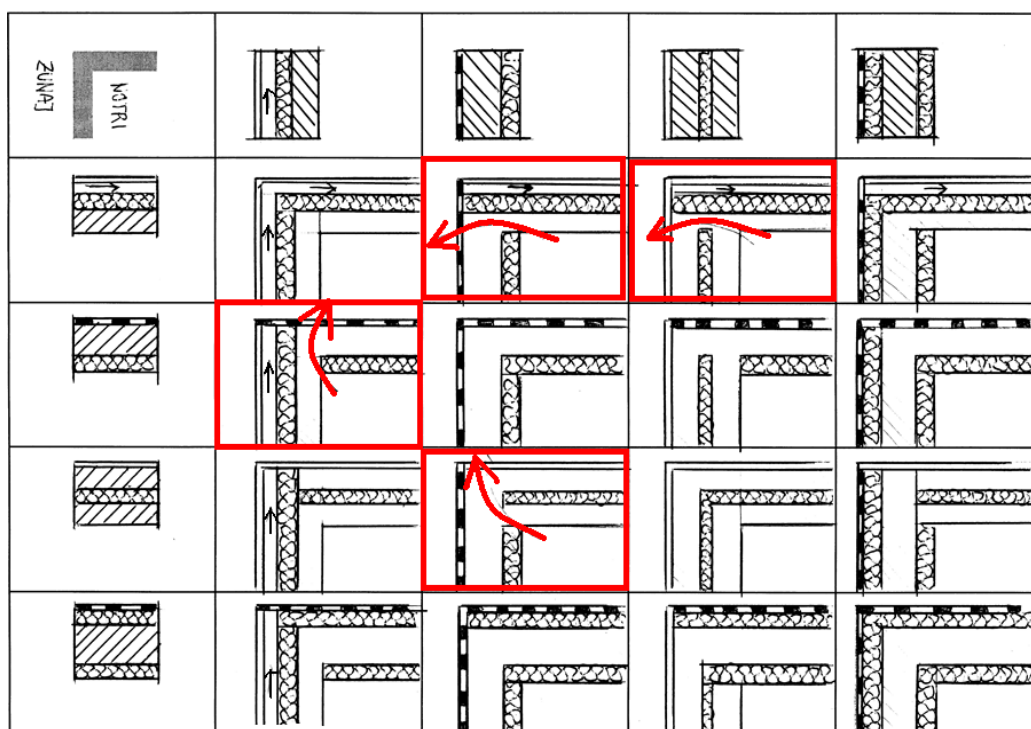


Slika 3.5: Potencialna mesta toplotni mostovi

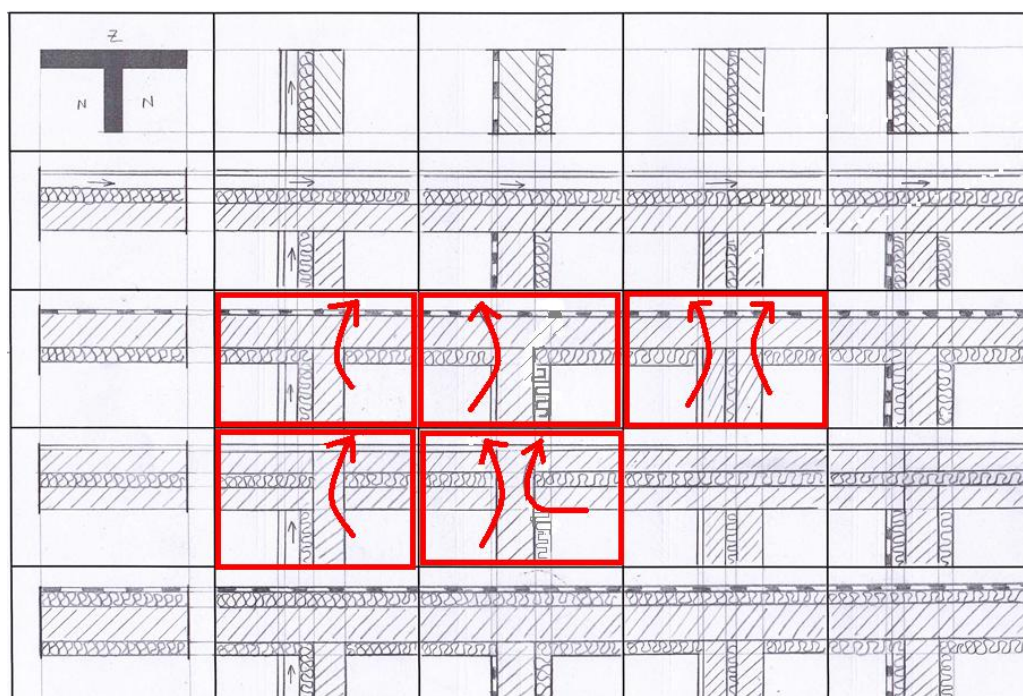


Slika 3.6: Potencialna mesta toplotnih mostov

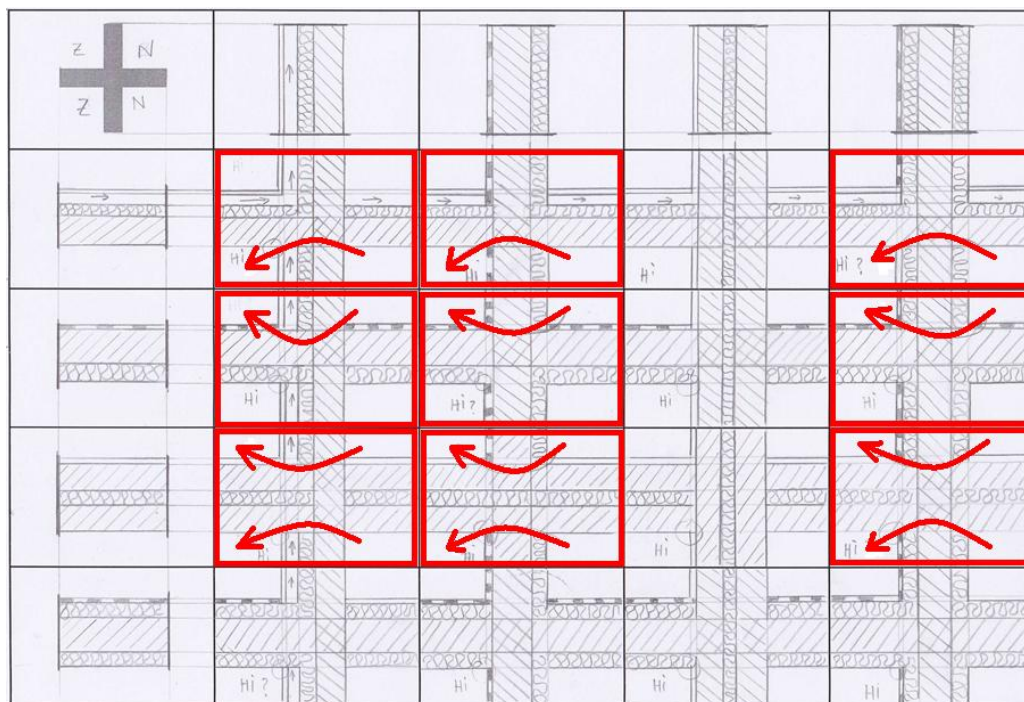
Konstruktivski sklop najprej obravnavamo kot kombinacijo treh osnovnih plasti; nosilna konstrukcija, toplotna izolacija in hidroizolacija. Osnovne plasti morajo biti neprekinjene in povezane tako, da bo stavbni ovoj pravilno deloval. Nato vključimo vse ostale plasti, ki nastopajo v konstrukcijskem sklopu. Pri obravnavi konstrukcijskih sklopov si pomagamo z matriko križanj, ki jo izdelamo glede na geometrijo (križanja L, T, +, stena - okno) in definiramo glede na način nosilne konstrukcije, pozicije toplotne izolacije in načina hidroizolacije. Na slikah 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 prikazujem matrike križanj L, T, + in križanje v ravnini (stena – okno), ki smo jih izpeljevali na vajah pri predmetu Stavbarstvo (Kristl, 2011).



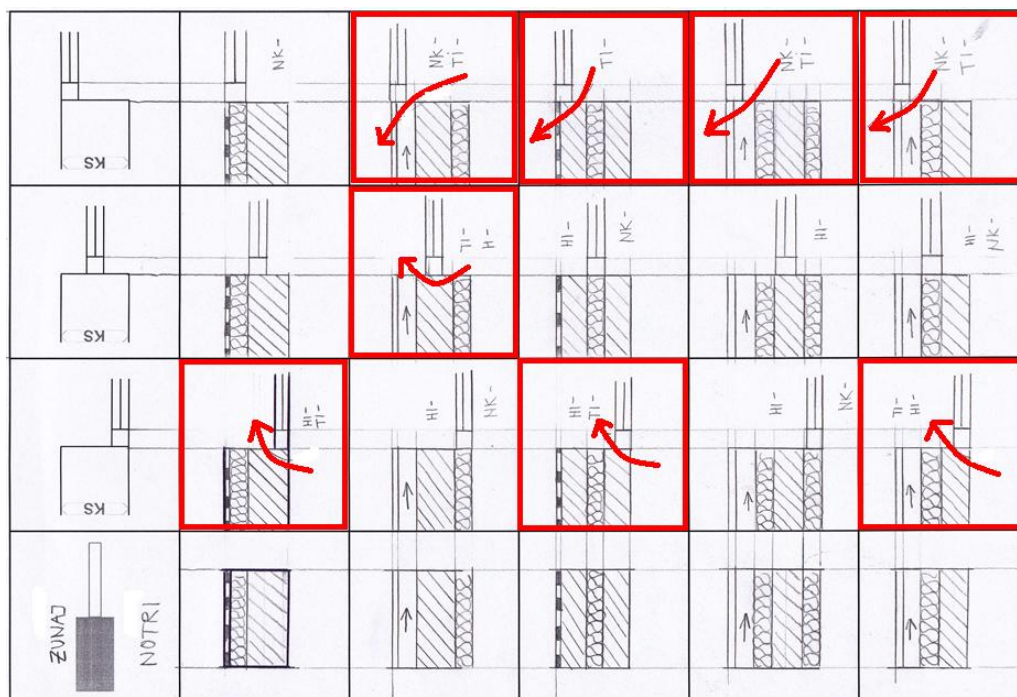
Slika 3.7: Križanja L



Slika 3.8: Križanja T



Slika 3.9: Križanja +



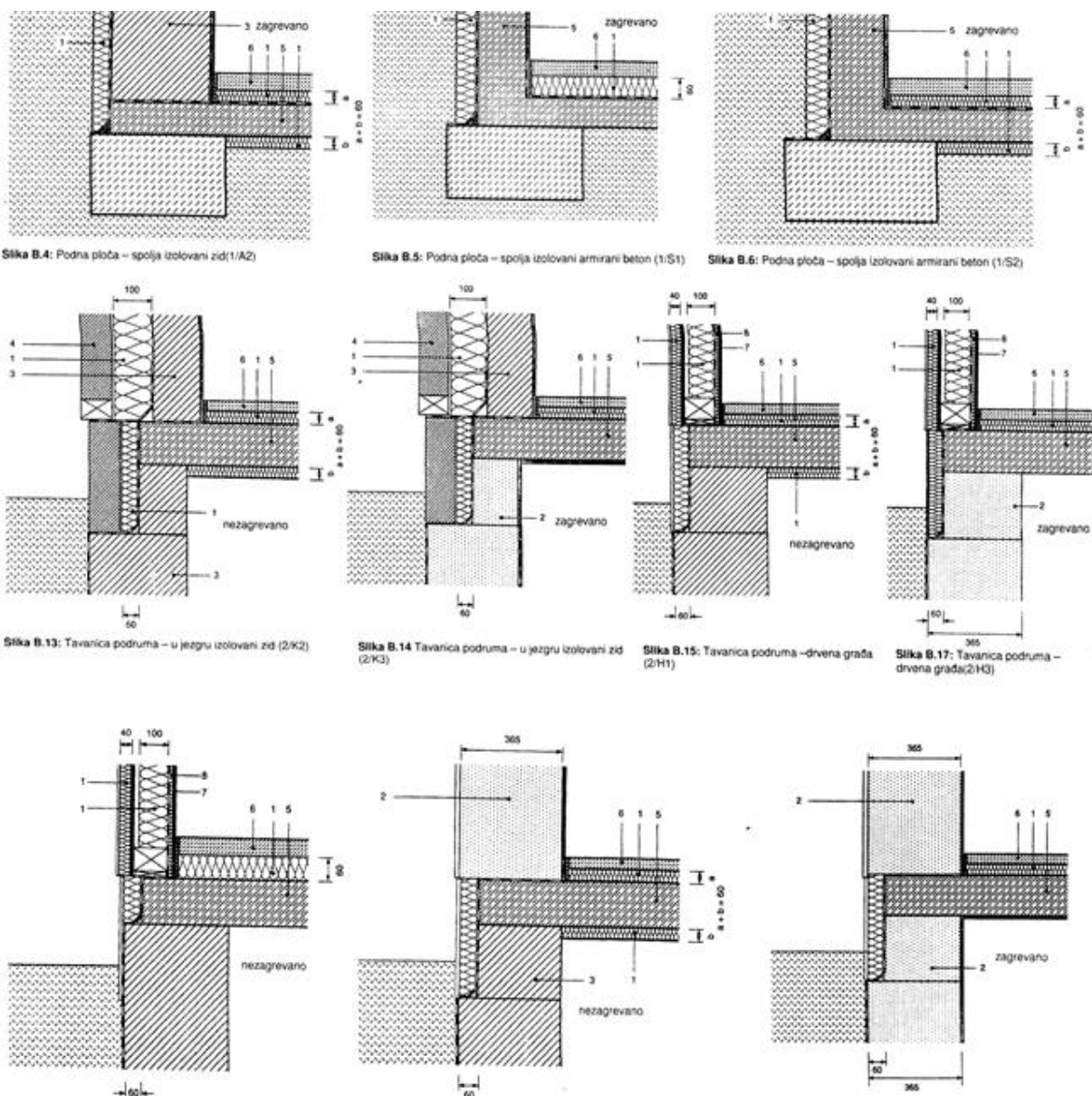
Slika 3.10: Križanje stena - okno

Matrike križanj, ki nam služijo kot pomoč pri načrtovanju, lahko najdemo v različnih literaturah. Na spodnji sliki so prikazane variante križanj iz priručnika Građevinske konstrukcije (Mittag, 2000), ki se sklicuje na DIN 4108.

Redovni poprečni presek Vrsta priključka		M	A	K	S	H
						
Slika						
1		Slika B.1 i slika B.2	Slika B.3 i slika B.4	—	Slika B.5 i slika B.6	—
2		Slika B.7 i slika B.9	Slika B.10 i slika B.11	Slika B.12 i slika B.14		Slika B.15 i slika B.17
3		Slika B.18	Slika B.19	Slika B.20		Slika B.21
4		Slika B.22	Slika B.23	Slika B.24		Slika B.25
5		Slika B.26	Slika B.27	Slika B.28		Slika B.29
6		Slika B.30	Slika B.31	Slika B.32		—
7		Slika B.33 i Slika B.34	Slika B.35 i Slika B.36			—
8		Slika B.37				—
9		Slika B.38 i Slika B.39	Slika B.40	Slika B.41		Slika B.42
10		Slika B.43	Slika B.44			—
11		Slika B.45	Slika B.46			—

Slika 3.11: Matrika križanj (Mittag, 2000)

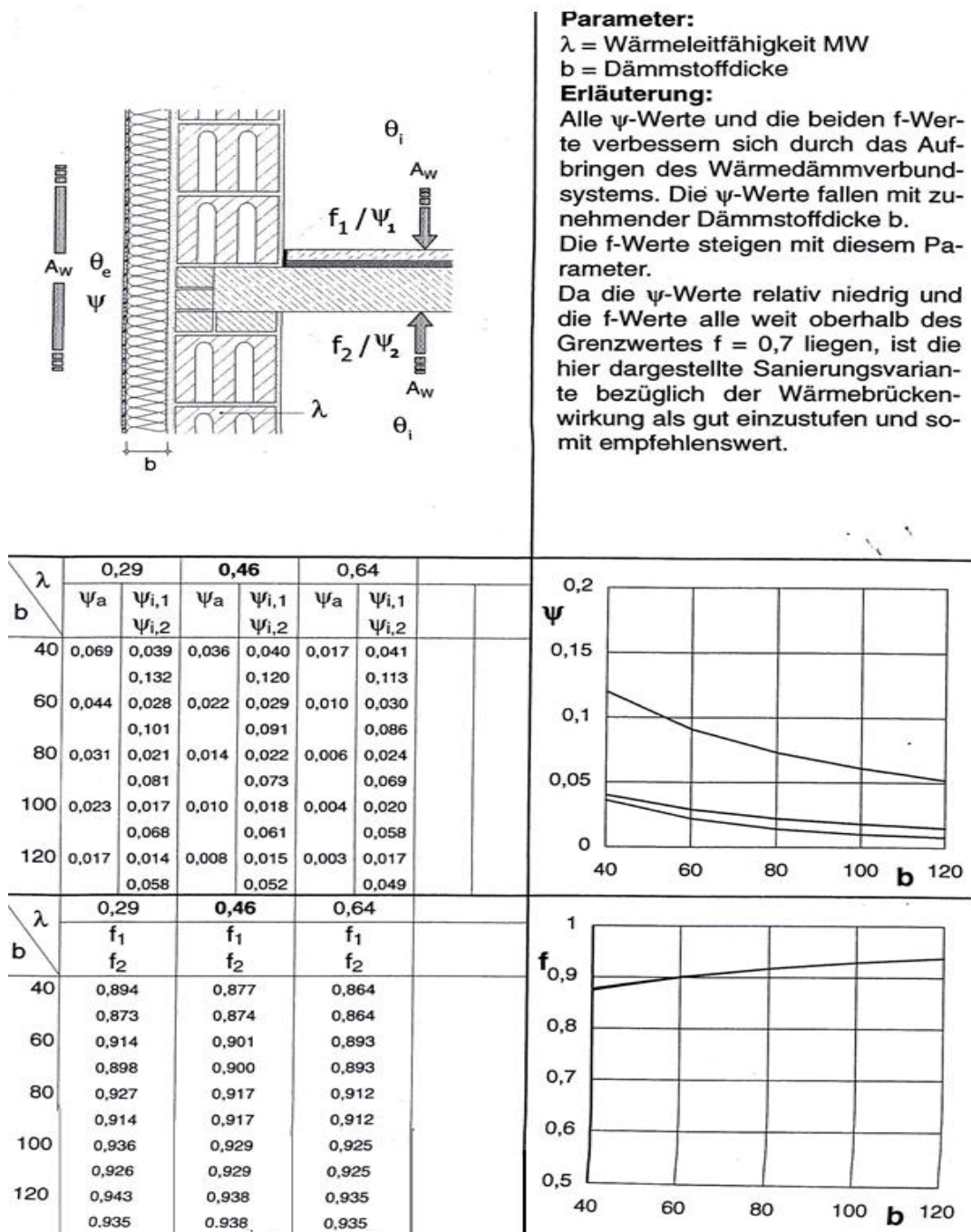
Spodnja slika prikazuje rešitve zgoraj nastavljenih matrik.



Slika 3.12: Rešitve križanj (Mittag, 2000)

S skrbnim načrtovanjem detajlov se lahko izognemo morebitnim konstrukcijskim toplotnim mostovom. Na podlagi pravilnika o učinkoviti rabi energije se je treba toplotnim mostovom z linijsko toplotno prehodnostjo $\psi > 0,2 \text{ W/mK}$ z ukrepi z zadnjega stanja gradbene tehnike izogniti s popravki načrtovanih detajlov. Če to ni mogoče, je treba dokazati, da vodna para na mestih toplotnih mostov ne

bo kondenzirala. Pri načrtovanju detajlov in iskanju vrednosti linijske toplotne prehodnosti toplotnih mostov so nam v veliko pomoč razni atlasi toplotnih mostov (slika 3.13), ki predstavljajo možne rešitve in podajajo vrednosti ψ .



Slika 3.13: Atlas toplotnih mostov (Hauser, G., Stiegel, H. 2006)

Tehnična smernica se na vpliv toplotnih mostov sklicuje na standarda ISO 14683 in ISO 10211. »Če imajo vsi toplotni mostovi v stavbi linijsko toplotno prehodnost $\psi < 0,2 \text{ W/mK}$ (standard SIST EN ISO 14683, tabela 2), se lahko njihov vpliv upošteva na poenostavljen način, s povečanjem toplotne prehodnosti celotnega ovoja stavbe za $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$ « (TSG-1-004). V praksi se velikokrat dogaja, da se predpostavi linijska toplotna prehodnost toplotnih mostov v stavbi $\psi < 0,2$ ter se tako izogne upoštevanju vpliva toplotnih mostov v računu potrebne toplote za ogrevanje. Taki praksi se je potrebno v prihodnje izogibati, saj je vpliv toplotnih mostov pri dobro izoliranih stavbah in dobrem tesnjenju ovoja toliko večji. Pri starejših stavbah, kjer ni dobre toplotne izolacije in je vgrajeno staro, netesno stavbno pohištvo, je vpliv toplotnih mostov manj opazen. Razlog ni v tem, da ne bi bilo toplotnih mostov, ampak je prezračevanje zaradi netesnosti ovoja tako intenzivno, da se vlaga, ki nastaja v stanovanju, sproti odvaja v okolico.

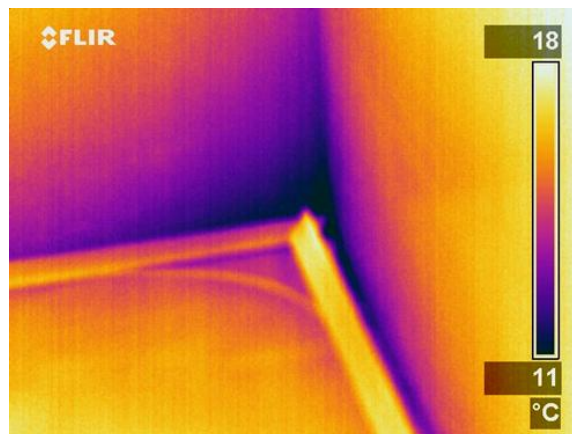
3.3 Posledice toplotnih mostov

Na mestih v ovoj zgradbe, kjer so toplotni mostovi, je toplotni upor bistveno manjši od toplotnega upora na sosednjih mestih. Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa se poveča in posledično tudi toplotni tok skozi ovoj zgradbe, ki povzroči znižanje površinskih temperatur na notranji strani konstrukcije. Pri pregledu objekta s termografijo, se na toplotnih slikah lepo vidijo posledice toplotnih mostov (slika 3.14 in 3.15):

- povečan toplotni tok (toplotne izgube),
- znižanje površinskih temperatur (kondenzacija, plesen, povečano odlaganje prahu).



Slika 3.14: Povečan toplotni tok



Slika 3.15: Znižanje površinskih temperatur

3.3.1 Povečan toplotni tok

Učinek toplotnih mostov negativno vpliva na toplotno bilanco stavbe. Toplotni tok, ki uhaja skozi konstrukcijski sklop, ne povzroča le znižanje notranje površinske temperature, ampak tudi višje zunanje površinske temperature (slika 3.14 in 3.15). Toplotne izgube skozi ovoj stavbe zahtevajo za doseganje toplotnega ugodja višje temperature zraka v prostoru in s tem večjo porabo energije za ogrevanje. Posledično so višji stroški za ogrevanje in povečano onesnaževanje okolja z škodljivimi emisijami CO₂, ki nastajajo pri izgorevanju energetskega virov.

3.3.2 Znižanje notranje površinske temperature

V območjih toplotnih mostov so zaradi povečanega toplotnega toka temperature na površini notranje stene nižje. Najbolj problematični so vogali zgradbe, ki predstavljajo geometrijski toplotni most in se mu ne moremo izogniti. K znižanju površinskih temperatur pa dodatno prispeva še neugoden upor notranje prestopnosti. Prav tako je temperaturni razpon, ki je lepo viden na termogramih, odvisen od vrste toplotnega mostu, sestave konstrukcijskega sklopa, izbranih materialov in robnih pogojev (temperature, upora toplotne prestopnosti). Pri sestavi konstrukcijskega sklopa je pomemben položaj toplotne izolacije. Najbolj primeren položaj toplotnoizolacijskega sloja je na zunanji strani ovoja stavb, tako z vidika toplotno-difuzijskega odziva, kot tudi preprečevanja toplotnih mostov. Znižanje površinskih temperatur in neustrezno razmerje vlage in temperature v stavbi neposredno vpliva na toplotno ugodje v prostoru in posredno povzroča, tako za konstrukcijo kot za človeka, neugodne posledice in poškodbe konstrukcije (Jordan, Knez, 2009).

3.3.2.1 Vpliv na toplotno ugodje

Toplotno ugodje v prostoru človek doseže, kadar so energijski tokovi med človeškim telesom in okolico v ravnovesju. Na to ravnovesje vplivajo človekovi subjektivni parametri (človekova fizična aktivnost, vrsta obleke) in splošni mikroklimatski parametri. Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb se na projektiran in izmerjen občutek človekovega toplotnega ugodja sklicuje na standard ISO 7730:1993, ta pa določitev toplotnega ugodja definira z metodami t. i. »Predicted mean vote – PMV« metodo in t. i. »Percentage of people dissatisfied – PDD« metodo. V okviru naloge se nisem podrobneje poglobila v metode. Z vidika toplotnih mostov na toplotno ugodje človeka so me podrobneje zanimali mikroklimatski parametri. Mikroklimatske parametre lahko do neke mere uravnavamo s subjektivnimi parametri. Mikroklimatski parametri morajo biti sprejemljivi, drugače

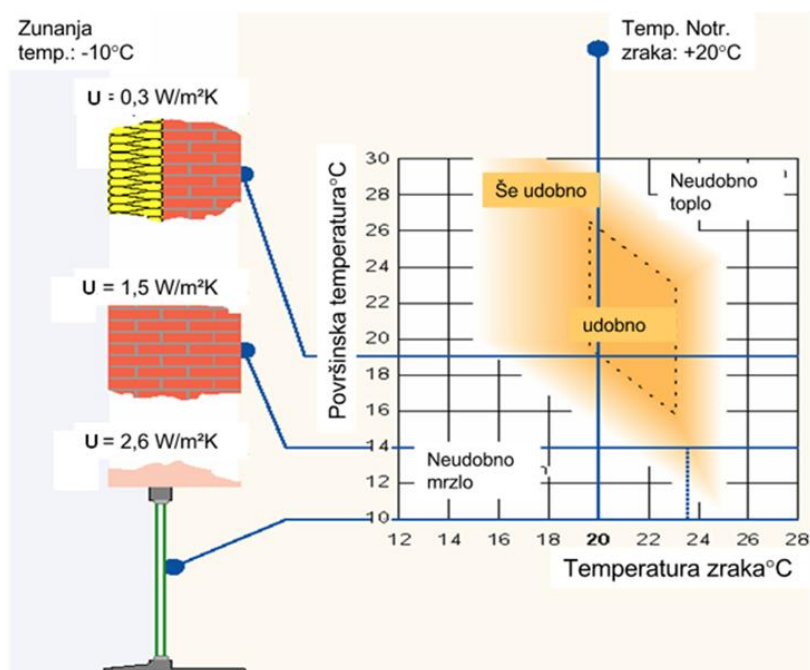
lahko njihovo kombinacijo občutimo kot neugodno. Za doseganje sprejemljivih parametrov nam je v pomoč pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb.

Mikroklimatski parametri toplotnega ugodja so:

- temperatura zraka v prostoru,
- temperatura obodnih površin,
- hitrost gibanja zraka v prostoru,
- relativna vlažnost v prostoru.

V okviru diplomske naloge sta predstavljena mikroklimatska parametra (temperatura zraka in temperatura obodnih površin) ter njuno medsebojno delovanje t. i. občutena temperatura. Relativna vlažnost je obravnavana v naslednjem poglavju (Vpliv na gradbeno konstrukcijo).

Temperatura zraka je zelo pomemben faktor, saj so previsoke temperature nezaželeni z vidika učinkovite rabe energije. Prav tako je preveliko razmerje med temperaturo zraka v prostoru in srednjo sevalno temperaturo za človeka neugodno (slika 3.16).



Slika 3.16 – Razmerje med sevalno temperaturo in temperaturo zraka; občutena temperatura (MOVE - delavnice, 2011)

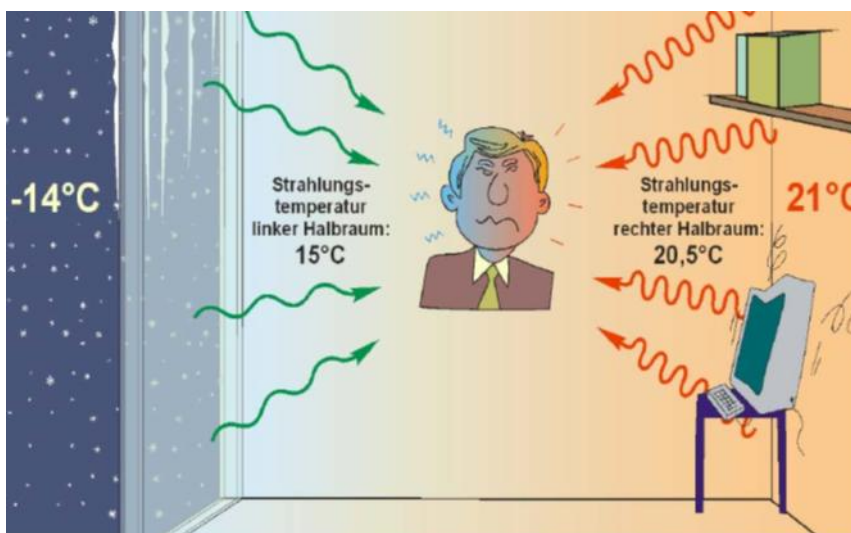
Srednja sevalna temperatura je povprečna temperatura vseh površin, ki nas obdajajo v prostoru, in naj ne bi bila nižja za več kot 2 K od temperature zraka. Vedno več virov omenja, da sta občutena temperatura in sevalna asimetrija bolj pomembna dejavnika kot temperatura zraka v prostoru. Po pravilnik o prezračevanju in klimatizacij stavb optimalno občuteno temperaturo uporabljamo za načrtovanje toplotnega ugodja v prostorih.

OBCUTENA TEMPERATURA (ang. operative temperature)

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb definira občuteno ali operativno temperaturo kot srednjo temperaturo, med temperaturo zraka v prostoru in srednjo sevalno temperaturo notranje površine v odvisnosti od hitrosti zraka. Optimalna občutena temperatura v odvisnosti od aktivnosti in obleke uporabnika prostora pa se določi skladno s SIST CR 1752.

NESIMETRIČNOST SEVALNE TEMPERATURE

Nesimetričnost sevalne temperature je odvisna od razlike sevalne temperature dveh nasproti si ležečih ploskev; pod – strop in stena – stena manj kot 5 K, okno – stena manj kot 10 K.



Slika 3.17 – sevalna asimetrija (MOVE - delavnice, 2011)

3.3.2.2 Vpliv na gradbeno konstrukcijo (kondenzacija)

Znižanje notranjih površinskih temperatur, ki je posledica t. i. toplotnih mostov in slabo izoliranih sten, posredno vplivajo na trajnost gradbene konstrukcije in predvsem na zdravje človeka.

3.3.2.2.1 *Kondenzacija vodne pare na notranji površini ovoja stavbe (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb Ur. l. RS, št. 42/2002)*

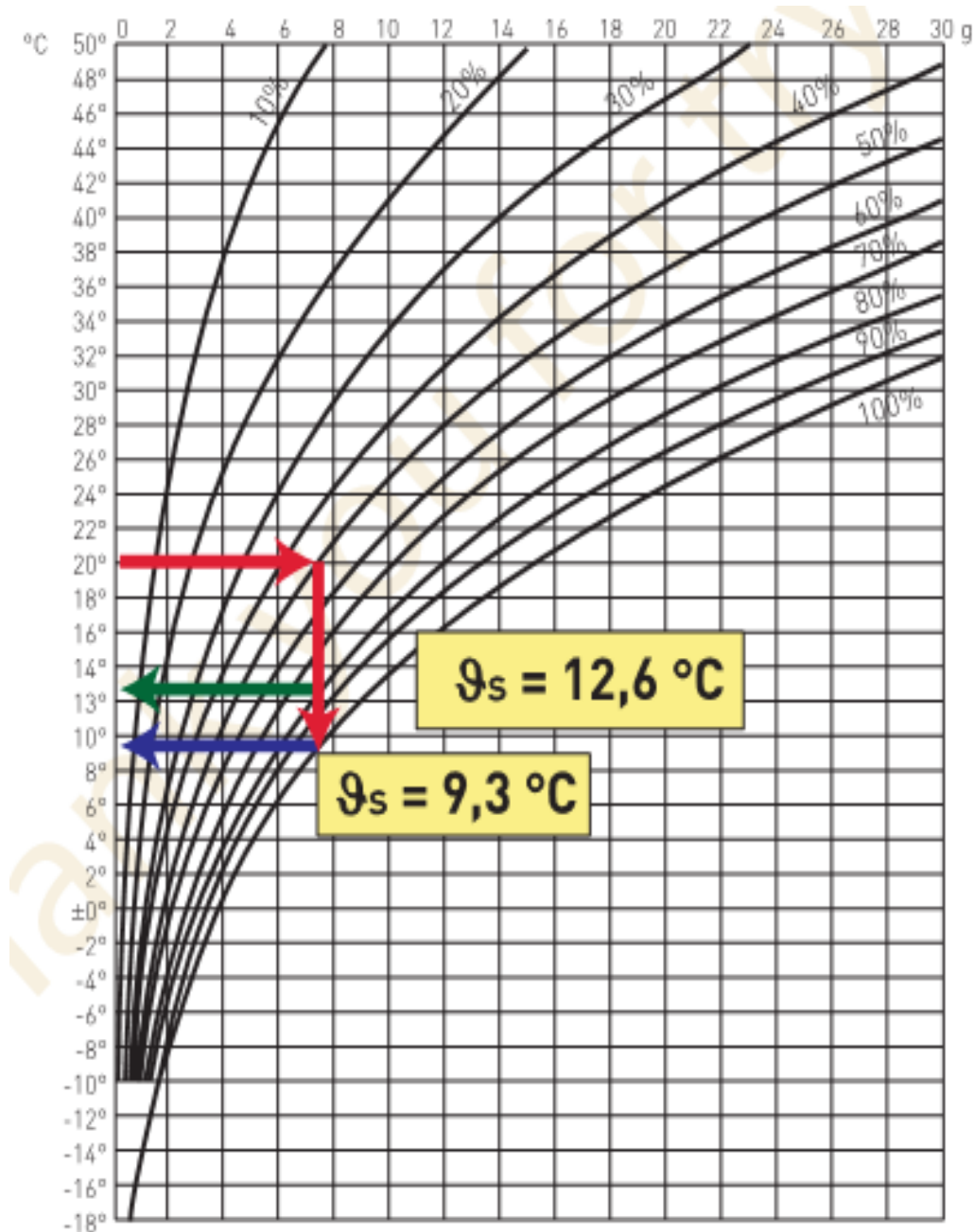
Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb Ur. l. RS, št. 42/2002 v 12. členu določa, da mora biti v prostorih zagotovljena takšna vlažnost zraka, da s svojim neposrednim oziroma posrednim učinkom ne vpliva na ugodje in zdravje ljudi ter ne povzroči nastanka površinske kondenzacije na stenah. Pri temperaturi zraka med 20 °C in 26 °C je območje dopustne relativne vlažnosti med 30 % in 70 % (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, 2002).

Temperatura in relativna vlažnost zraka sta tesno povezani. Zrak je zmes različnih plinov, ki sestavljajo ozračje, kjer je vedno prisotna tudi voda v svoji plinasti obliki, t. i. vodna para. Na količino vodne pare v ozračju najbolj vpliva temperatura zraka. Ozračje pri dani temperaturi lahko sprejme le določeno količino vode v obliki vodne pare. To maksimalno sprejeto količino vodne pare imenujemo nasičena vlažnost; vodna para zapolni vso kapaciteto zraka za sprejem vodne pare. Razmerje dejanske količine vlage v zraku in največje možne količine vlage (nasičena vlažnost) v zraku pri dani temperaturi imenujemo relativna vlažnost zraka. Kadar v zraku nastane presežek vodne pare, se ta začne izločati iz zraka v obliki tekoče vode. Temu pravimo kondenzacija vodne pare (Jordan, Knez, 2009).

Dodatno navlaževanje zraka in ohlajanje zraka lahko povzroči nastajanje kondenza na notranjih površinah konstrukcije. Temperatura zraka in relativna vlažnost v prostoru sta v takšnem razmerju, da pri dani površinski temperaturi prihaja do kondenza. K temu prispevajo tudi neučinkovito in nepravilno zračenje, neprimerni gradbeni materiali in njihova napačna vgradnja, neprimerna toplotna izolacija ter ovirano gibanje zraka ob konstrukciji (zavesa in koti, zaprti s pohištvo). Prav tako pride do kondenza na površini stene, kadar je temperatura stene dovolj nizka, da se mejna plast zraka ohladi po temperaturo rosišča (angl. dew point)(prav tam).

Temperatura rosišča je odvisna od temperature zraka in relativne zračne vlage v prostoru. Kot primer pri temperaturi 20 °C in pripadajoči relativni vlagi 50 %, odčitamo temperaturo rosišča glede na krivuljo 100 % vlažnosti, ki znaša 9,3 °C; modra črta na sliki 3.22. Če se mejna plast zraka ohladi pod

temperaturo 9,3 °C pri danih pogojih (20 °C in 50 % relativna zračna vlaga), se na površini stene pojavi kondenz. Glede na različne vrednosti relativne zračne vlažnosti in temperaturo zraka je mogoče grafično prikazati temperature, pri katerih se vodna para spremeni v kondenzat; Mollierov diagram (slika 3.18).



Slika 3.18: Mollierov diagram (Toplinski mostovi, 2011)

- Nastanek plesni

Pri ugotavljanju površinskih temperatur v območjih toplotnih mostov s pomočjo termografije, nas poleg temperature rosišča zanima tudi faktor padca površinske temperature f_{Rsi} (slika 3.19). Faktor f_{Rsi} je merilo, s katerim ocenjujemo možnost nastanka plesni na površini konstrukcije (Jordan, Knez 2009). Nastanek plesnobe se ne pojavi samo pri kondenzaciji vodne pare, ampak tudi pri daljši relativni zračni vlagi (najmanj 80 %), kar pomeni, da se lahko pojavlja že pri temperaturi nad temperaturo rosišča (Jordan, 1997). Zelena črta na diagramu prikazuje minimalno notranjo površinsko temperaturo 12,6 °C glede na 80 % vlažnost pri notranjih pogojih; temperatura zraka 20 °C in 50 % relativna zračna vlaga. To tudi ustreza minimalni zahtevi faktorju padca temperature $f_{Rsi} > 0.71$ za preprečevanje plesni. V analizah termogramov bom izračunavala faktor padca temperature in preverjala, ali ustreza minimalnim zahtevam. Za ugotavljanje toplotne ugodnosti pa moramo zadostiti pogoju $f_{Rsi} > 0.92$, glede na povprečno notranjo površinsko temperaturo stene (izven območja toplotnega mostu)

Definicija faktor padca površinske temperature, po standardu ISO 10211, je razmerje med temperaturno razliko med notranjim zrakom in notranjo površinsko temperaturo ter razlika med notranjim in zunanjim zrakom; enačba (17):

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (17)$$

kjer so:

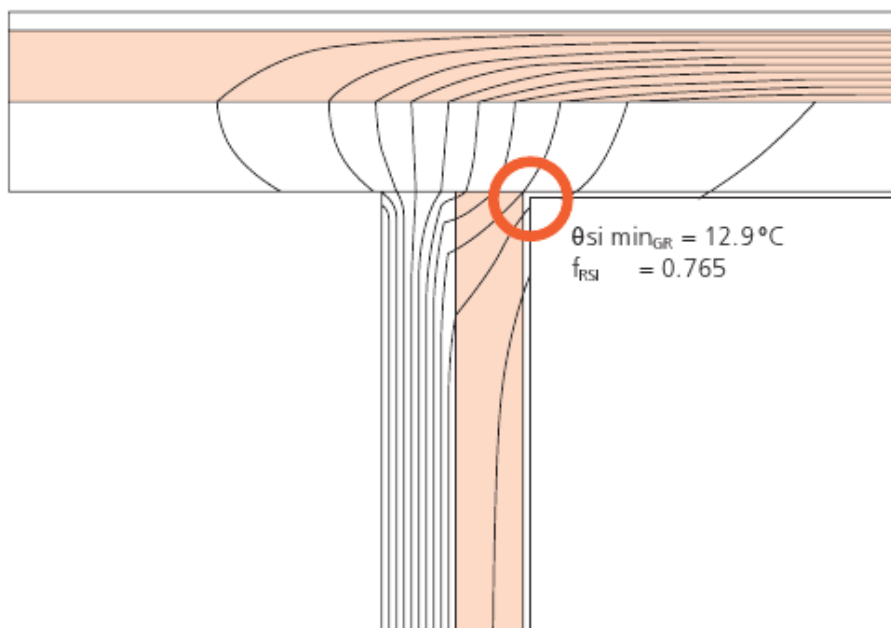
θ_{si} notranja površinska temperatura,

θ_e zunanja temperatur,

θ_i notranja temperatura.

Lahko pa tudi iz faktorja padca temperature izračunamo minimalno temperaturo stene, ki bi zadostila pogoju za preprečevanje pojava plesni.

$$\theta_{si} = f_{Rsi} \times \theta_i + \theta_e \quad (18)$$



Slika 3.19: Faktor f_{RSI} in $\Theta_{si,min}$ (Catalogue des ponts thermiques, 2011)

- Povečano odlaganje prahu

Posledica povečanega odlaganja prahu se pojavi po daljšem časovnem obdobju. »Zaradi električne izmenjave med medsebojno privlačnimi dipoli molekul vode in ioni prahu, se prašni delci na področju toplotnega mostu odlagajo v večji meri kot na ostalih površinah in obarvajo površino temneje« (Jordan, 1997).

3.3.2.2.2 Kondenzacija vodne pare v konstrukcijskem sklopu (difuzija vodne pare)

Difuzija je pojav, kjer vodna para v gradbeni konstrukciji prehaja iz plasti z večjo nasičenostjo k plastem z manjšo nasičenostjo z vlago, kot posledica razlike parcialnih tlakov vodne pare na obeh straneh stene. Tako kot toplotni tok tudi vodna para prehaja od toplejših proti hladnejšim plastem. Poznamo dva primera prehoda vodne pare skozi konstrukcijski sklop (Kristl, 2011):

- vodna para prehaja skozi vse plasti konstrukcije in ne prihaja do kondenza,
- vodna para se kondenzira v enem ali več slojih materialov konstrukcije.

Pri difuziji vodne pare skozi večplasten konstrukcijski sklop je zelo pomemben vrstni red posameznih slojev in njihove materialne lastnosti: debelina sloja (d) in koeficient paropropustnosti (μ) določenega materiala.

Vpliv kondenzacije vodne pare v konstrukcijskem sklopu povzroča povečano vlažnost materiala in posledično povečanje toplotne prevodnosti materiala. To je še posebej neugodno prav pri toplotnoizolacijskih materialih.

3.4 Standardi

V skladu z novim pravilnikom o učinkoviti rabi energije, PURES 2010, moramo v računu potrebne toplote za ogrevanje, Q_{NH} , določena po SIST EN ISO 13790:2008, upoštevati vpliv toplotnih mostov. Pripadajoča tehnična smernica TSG-1-004: 2010 se na vpliv toplotnih mostov v računu potrebne toplote za ogrevanje sklicuje na standarde: SIST EN ISO 13789:2008, SIST EN ISO 14683:2007 in SIST EN ISO 10211:2008.

Standard SIST EN ISO 13789:2008, Toplotne značilnosti stavb – Toplotni koeficienti pri prenosu toplote in prezračevanja – Računska metoda, določa količnik transmisijских toplotnih izgub, H_T [W/K] za izračun transmisijских toplotnih izgub Q_{tr} [kWh]. Količnik transmisijских izgub se izračuna po naslednji enačbi:

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A \quad [\text{W/K}] \quad (19)$$

V enačbi (19) se vpliv linijskih in točkovnih toplotnih mostov upošteva v koeficientu specifičnih transmisijских toplotnih izgub, H_D , ki se ga izračuna po enačbi (20).

$$H_D = \sum A_i U + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \quad [\text{W/K}] \quad (20)$$

kjer so:

H_D – količnik specifičnih transmisijских toplotnih izgub [W/K],

U_i – toplotna prehodnost i -tega homogenega konstrukcijskega sklopa [W/(m²K)],

l_k – dolžina linijskega toplotnega mostu,

ψ_k – linijska toplotna prehodnost [W/mK],

χ_j – točkovna toplotna prehodnost [W/K].

Na izračun linijske toplotne prehodnosti, ψ_k , se standard SIST EN ISO 13789 sklicuje na standarda SIST EN ISO 10211:2008 in SIST EN ISO 14683:2007. Na izračun točkovne toplotne prehodnosti pa se sklicuje le na standard SIST EN ISO 10211:2008.

3.4.1 Standard SIST EN ISO 10211:2008

Glede na stikanje gradbenih konstrukcij poznamo dve obliki geometrijskih mostov, linijski in točkovni toplotni most. Toplotni mostovi povzročajo 3D ali 2D toplotni tok, ki ga lahko natančno izračunamo z numeričnimi metodami. Obravnavan standard v 1. poglavju podaja specifikacije za izdelavo 3D ter 2D geometrijskega modela za numerični izračun:

- toplotnega toka: namen ugotavljanja je, da se oceni vpliv na skupne toplotne izgube),
- minimalnih površinskih temperatur: namen ugotavljanja je, da se oceni nevarnost površinske kondenzacije na kritičnih mestih).

Prva štiri poglavja predstavljajo uvod v ta standard. Navedene so predpostavke, na katerih temelji standard in referenčni dokumenti, opisane osnovne definicije in izrazi, prikazani so simboli in enote ter v četrtem poglavju so opisana načela uporabe.

Načela uporabe

Porazdelitev temperatur znotraj in toplotni tok skozi gradbeno konstrukcijo se lahko izračuna, če poznamo robne pogoje in konstrukcijske detajle. V ta namen je geometrijski model razdeljen na več majhnih homogenih delcev, od katerih ima vsak nespremenljivo toplotno prevodnost. Pravila delitve oziroma pravilno modeliranje konstrukcij opisuje peto poglavje tega standarda. Sestavo križanja konstrukcijskih sklopov je potrebno modelirati do 1m od opazovanega mesta. V konstrukcijah se lahko pojavijo sloji, ki nimajo konstantnega prereza ali toplotne prevodnosti. Standard za take primere v poglavju 5.3 opisuje pogoje za poenostavitev geometrijskega modela. Prav tako v podpoglavju 5.3.3 navaja uporabo kvazihomogenih elementov ali materialov za poenostavitev modela.

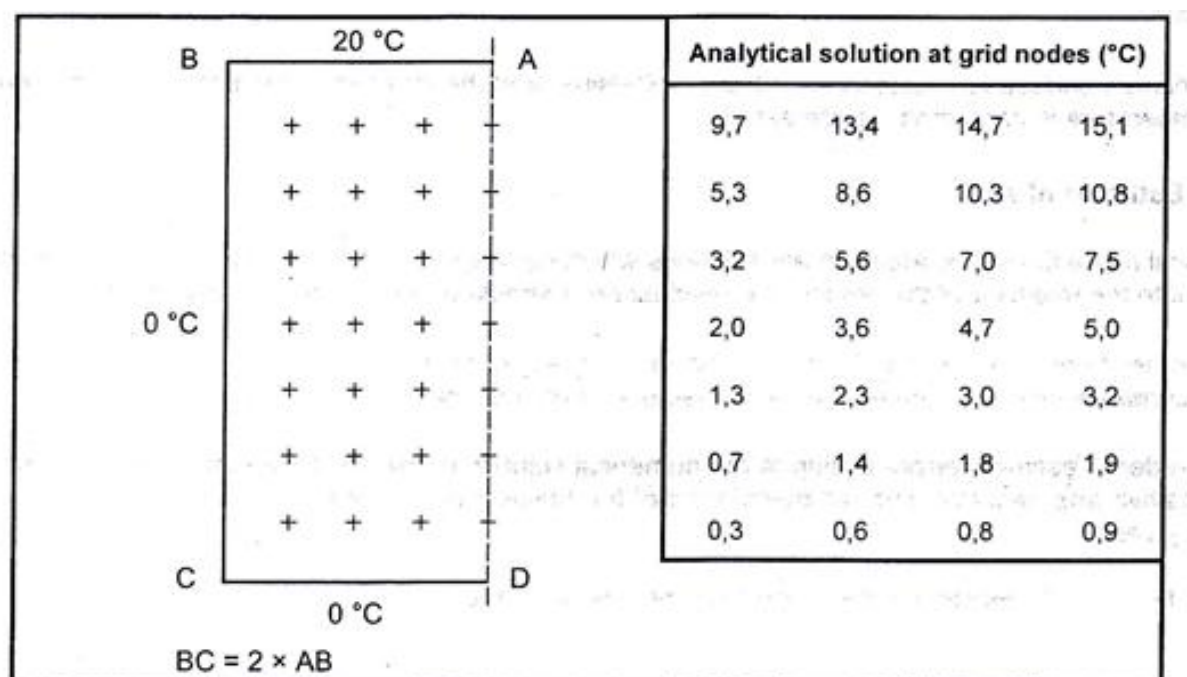
Šesto poglavje standarda se za določitev toplotne prevodnosti in robnih pogojev sklicuje na referenčne dokumente, navedene v drugem poglavju.

Sedmo poglavje podaja računske metode oziroma pravila za izračun toplotnega toka med sloji in okoljem. Metode računanja morajo zadostovati zahtevam, navedenimi v informativnem dokumentu, prilogi A.

Rezultati izračunov se lahko uporabljajo za določite linearne toplotne prehodnosti, točkovne toplotne prehodnosti in notranjih površinskih temperatur. Metode računanja/enačbe so podane v poglavjih 8,9,10,11 tega standarda.

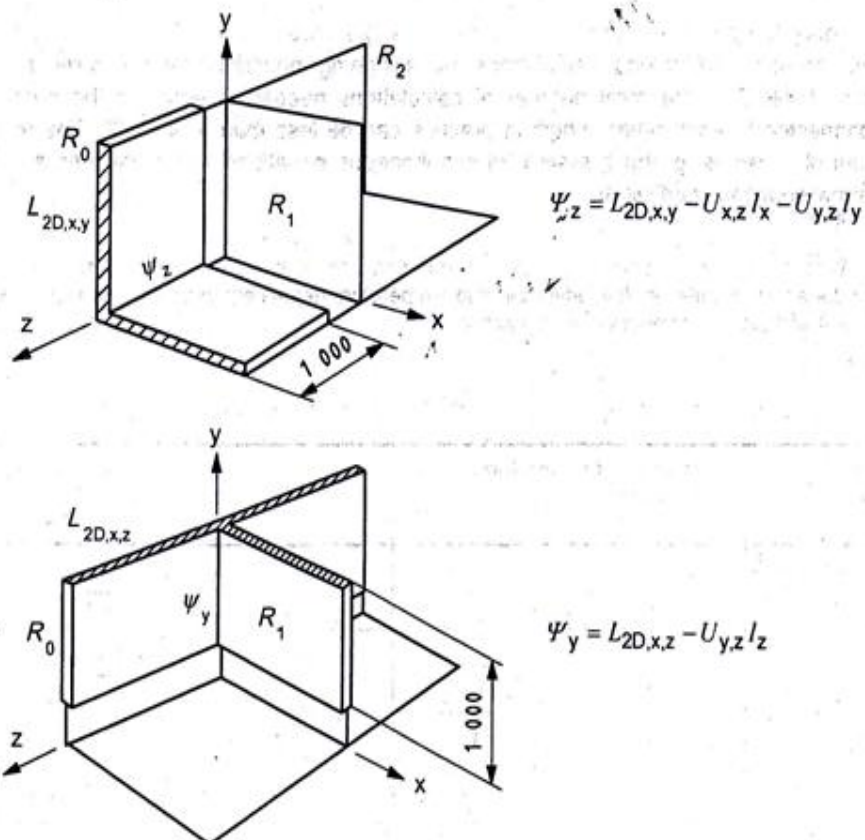
Standard na koncu vsebuje tri informativne dokumente:

- PRILOGA A: vsebuje štiri testne referenčne primere (slika 3.20), ki potrjujejo računske metode navedene v standardu,



Slika 3.20: Tesni referenčni primer št.1 (SIST EN ISO 10211:2008)

- PRILOGA B: vsebuje primere določanja linijske in točkovne toplotne prehodnosti (slika 3.21),

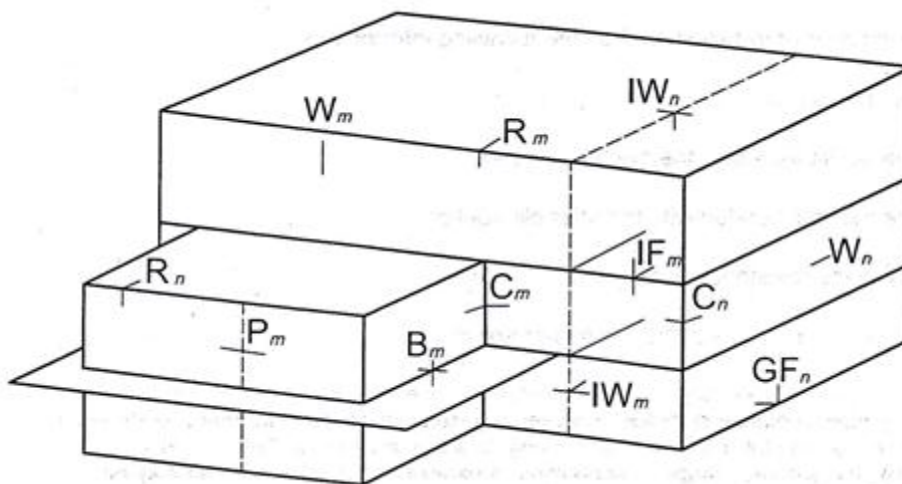


Slika 3.21: Določanje linijske toplotne prehodnosti (SIST EN ISO 10211:2008)

- PRILOGA C: prikazuje določitev koeficienta toplotne sklopitve z več kot dvema robnima temperaturama.

3.4.2 Standard SIST EN ISO 14683:2007

Standard SIST EN ISO 14683:2007, Toplotni mostovi v stavbah - Linijska toplotna prehodnost - Poenostavljena metoda in privzete vrednosti navaja poenostavljene metode za določanje toplotnega toka skozi linijski toplotni most, ki se pojavljajo na stikih gradbenih elementov oziroma na t. i. potencialnih mestih toplotnih mostov (slika 3.22)

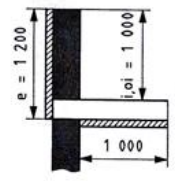
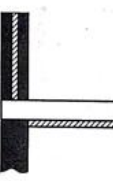
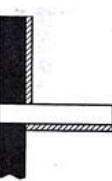
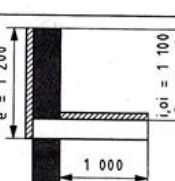
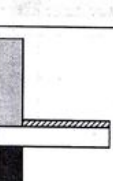


Slika 3.22: Potencialna mesta toplotnih mostov (SIST EN ISO 14683:2007)

Standard je sestavljen iz sklopa petih poglavij ter sklopa dveh informativnih dokumentov (aneks A, aneks B).

Vsebina poglavij obsega:

1. poglavje: navaja obseg standarda,
2. poglavje: navaja dokumente na katere se standard sklicuje,
3. poglavje: vsebuje osnovne definicije, izraze, simbole
4. poglavje: obsega vpliv toplotnih mostov na skupni koeficient toplotnih izgub – H_T , izbiro notranjih in zunanjih dimenzij
5. poglavje: določitev linijskih toplotnih izgub, opis razpoložljivih metod in njihove natančnosti, numerične metode za projektne vrednosti so izračunane v skladu s standardom ISO 10211 in projektne vrednost ψ , ki so prikazane v tabeli A.2 v informativni prilogi A (slika 3.23).

 GF9 $\psi_e = 0,75$ $\psi_{oi} = 0,95$ $\psi_i = 0,95$	 GF10 $\psi_e = 0,65$ $\psi_{oi} = 0,85$ $\psi_i = 0,85$	 GF11 $\psi_e = 0,55$ $\psi_{oi} = 0,75$ $\psi_i = 0,75$	 GF12 $\psi_e = 0,50$ $\psi_{oi} = 0,70$ $\psi_i = 0,70$
 GF13 $\psi_e = 0,60$ $\psi_{oi} = 0,80$ $\psi_i = 0,80$	 GF14 $\psi_e = 0,45$ $\psi_{oi} = 0,65$ $\psi_i = 0,65$	 GF15 $\psi_e = -0,10$ $\psi_{oi} = 0,10$ $\psi_i = 0,10$	 GF16 $\psi_e = 0,00$ $\psi_{oi} = 0,20$ $\psi_i = 0,20$

Slika 3.23: Projektne vrednosti linearne toplotne prehodnosti (SIST EN ISO 14683:2007)

Vsebina informativnega dokumenta B pa prikazuje primere uporabe projektne vrednosti linijskih toplotnih prehodnosti. Specifične transmissijske toplotne izgube so izračunane na podlagi nastavljenih tabel, kjer so za določeno mesto toplotnega mostu podane projektne vrednosti, vzete iz tabel A.2. Prav tako je narejena primerjava izračunov, kadar izberemo notranje ali zunanje dimenzije.

Poenostavljena metoda izračuna vpliva toplotnih mostov ni tako natančna kot numerične metode, izračunane po standardu ISO 10211. Vrednosti linijske toplotne prehodnosti, ψ , v tabeli A.2 so sicer izračunane po numerični metodi standarda ISO 10211, vendar so upoštevani točno določeni parametri iz tabele A.1. Ustrezna pa je za grobo oceno prispevkov vpliva toplotnih mostov pri skupnih izgubah stavbnega ovoja.

4 TERMOGRAFIJA

Namen diplomske naloge je uporaba infrardeče metode pri odkrivanju šibkih mest v ovoju zgradbe t. i. toplotnih mostov in analiza le-teh na podlagi termografskih posnetkov. Pri uporabi termografije moramo znati posneti termograme in razumeti delovanje IR kamere. IR kamera v stvarnem času pretvarja toplotno sliko v vidno, toplotna slika oziroma termogram pa je rezultat lastnega sevanja, ki ga določata temperatura in emitivnost površine merjenja. Da bi iz sevalnega energijskega toka izmerili temperaturo, ki jo potrebujemo pri interpretaciji in analizi toplotnih slik, se moramo seznaniti z lastnostmi sevanja. Teorije termografije sem povzela po zbirki Dobrodošli v ITC – Infrardeča termografija, stopnja 1.

4.1 Opredelitev (definicija) termografije

Infrardeča termografija je metoda nekontaktnega pridobivanja in analiziranja porazdelitve površinskih temperatur merjenja z infrardečimi slikovnimi napravami.

4.1.1 Uporaba termografije

Temperatura je zelo pomemben faktor v vseh procesih, ki se dogajajo v naravi, in prav mnogostranost termografije so razlogi za številne uporabe na praktično vseh področjih človekovega delovanja.

Termografija je uporabna in koristna zaradi treh lastnosti:

- je nekontaktna in zazna na daljavo; ne vpliva na objekt merjenja in tako ne spreminja njegove temperature,
- je dvodimenzionalna; na isti sliki lahko merimo temperaturo v dveh ali več točkah ter jih primerjamo med seboj,
- deluje v realnem času; omogoča hiter pregled objektov.

Termokamere se čedalje več uporabljajo povsod, kjer se med nekim procesom ustvarja, ali prenaša toplota, saj se s tem spreminja tudi temperatura in njena porazdelitev.

Nekaj primerov uporabe (Tršan, 2011):

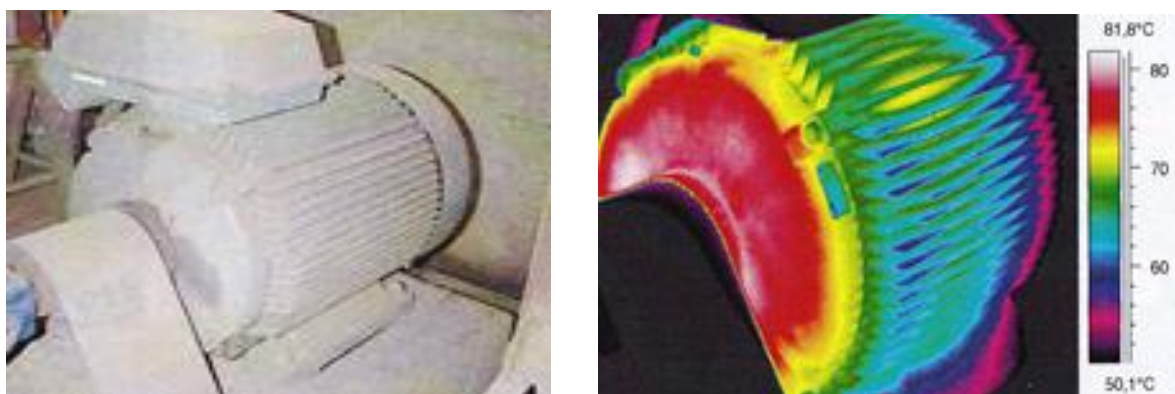
- pregledovanje in nadzorovanje terena pri zmanjšani vidljivosti (noč, prah, dim, meglice),
- daljinsko merjenje temperature,
- merjenje toplotnih izgub stavb, iskanje toplotnih mostov in vlažnih mest, ugotavljanje kvalitete izolacijskih materialov (slika 4.1),
- proizvodnja in distribucija električne energije; pregledi in nadzorovanje generatorjev (slika 4.2),
- proizvodnja in končna kontrola kvalitete vseh vrst gospodinjskih aparatov,
- proizvodnja v železarnah, v plavžih, vroče valjanje,
- vzdrževanje energetske opreme (slika 4.2),
- nadzorovanje ležajev (pregrevanje, disipacija toplote, mazanje) (slika 4.3),
- medicina (slika 4.4),
- odkrivanje požarov,
- iskanje preživelih v elementarnih nesrečah in v dimu gorečih stavb.



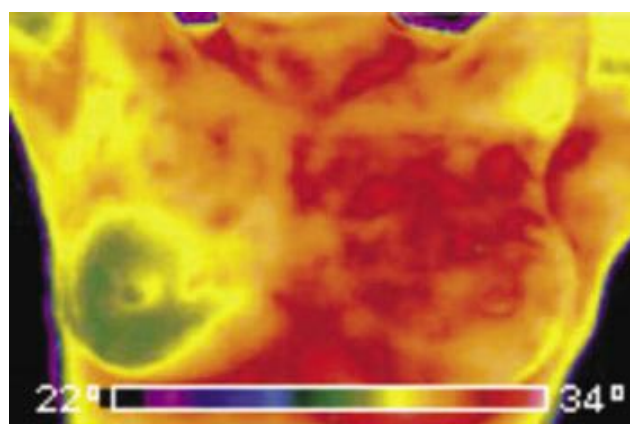
Slika 4.1: Toplotne izgube stavb



Slika 4.2: Vzdrževanje energetske opreme (Infrardeča termografija, 2005)



Slika 4.3: Ležaj električnega motorja (Infrardeča termografija, 2005)

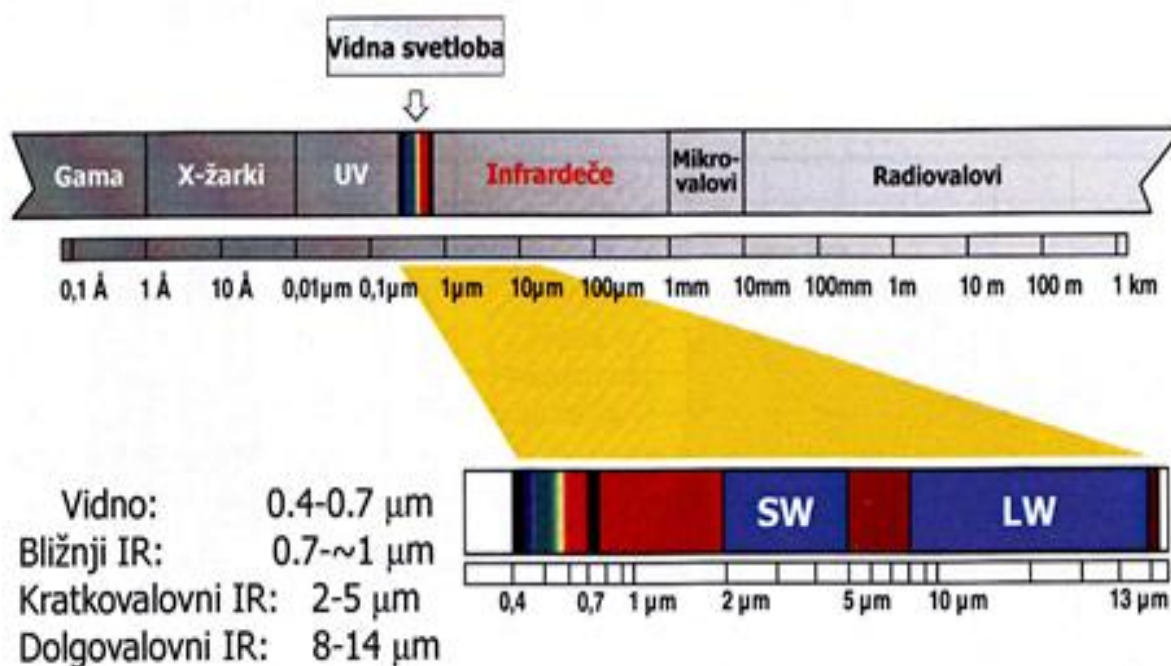


Slika 4.4: Medicina - odkrivanje bolezni (FLIR,2011)

4.1.2 Elektromagnetni spekter

Elektromagnetno valovanje obsega širok spekter sevanj, ki služijo različnim namenom. Valove opišemo in okarakteriziramo s številnimi podatki, kot na primer: s frekvenco, z amplitudo, s hitrostjo, z valovno dolžino ... Glede na valovno dolžino delimo elektromagnetno valovanje na radijske valove, mikrovalove, infrardeče valovanje, svetlobo, ultravijolično valovanje, rentgenske žarke in žarke gama.

Pri termografiji uporabljamo infrardeči spekter, kjer elektromagnetne valove opisujemo z valovno dolžino λ (lambda). Najbolj razširjena enota za valovno dolžino je μm – mikrometer, ki je ena milijoninka metra. V infrardečem pasu je intenziteta toplotnega sevanja pri sobnih temperaturah največja. Za oko nevidno infrardeče sevanje telesa, IR kamera spremeni v barvno sliko. Mejne valovne dolžine, ki jih naše oko še zaznava, imenujemo vidno polje; od $0,4\mu\text{m}$ (vijolična) do $0,7\mu\text{m}$ (rdeča).



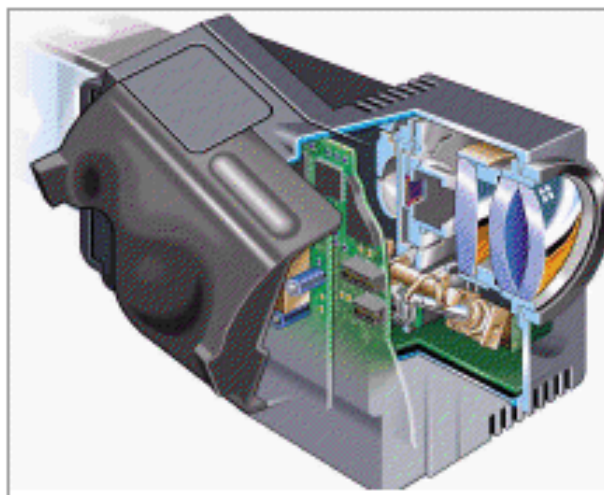
Slika 4.5: Elektromagnetni spekter (Infrardeča termografija, 2005)

4.2 IR kamera

IR kamera ali termokamera v stvarnem času pretvarja toplotno sliko v vidno. Z vidika gradbeništva termokamere uporabljamo za merjenje toplotnih izgub stavb, iskanje toplotnih mostov in vlažnih mest, ugotavljanje kvalitet izolacijskih materialov, itd.. S termokamero hitro in zanesljivo najdemo šibka mesta v sistemu za prenos energije.

Glavni sestavni moduli tipične termokamere so:

- optika,
- detektor,
- elektronika,
- prikazovalnik slike.



Slika 4.6: Sestava IR kamera (Tršan, 2011)

Optika usmerja IR sevanje iz scene na detektor, ta pa sevanje pretvarja v električne signale. Najpomembnejša lastnost optike je, da čim bolje prepušča IR sevanje. Uporablja se praktično v vseh napravah, ki sprejemajo IR sevanje v pasu od 8 do 14 mikrometrov.

Z detektorjem določamo kakovost slike, občutljivost ter njegovo ceno. Detektorji se delijo v dve skupini: v fotonske in termične. Fotonski detektorji so približno tisočkrat hitrejši in občutljivejši in izkoriščajo fotoefekt, medtem ko termični izkoriščajo spremembe različnih lastnosti materialov, ki so funkcija temperature.

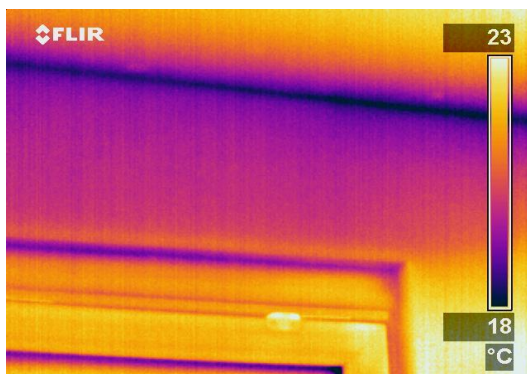
Elektronika obdeluje električne signale detektorja z algoritmi, dobro znanimi in preizkušenimi v televizijski in računalniški tehniki. Termična slika se prikaže na zaslonu, ki je pri sodobnih termokamerah najpogosteje tipa LCD. V termokamerah je običajno vgrajen tudi program za kvantitativno analizo toplotne slike (termograma), tako da lahko takoj odčitamo temperaturo v poljubni točki na površini merjenca (Tršan, 2011).

4.2.1 Toplotna slika

Termografija je sestavljena grška beseda (iz »termo« in »grafo«), ki dobesedno pomeni »risati toploto«.

V vidnem delu spektra naše oko zaznava predvsem odbito svetlobo. Vidna slika je rezultat odboja svetlobe (sonce ali umetna svetloba) od teles z različnimi reflektivnostmi v vidnem spektru. Termokamera pa na merjencu zazna odbito sevanje in njegovo lastno sevanje.

Toplotna slika je slikovni zapis intenzitete toplotnega sevanja in ne zapis porazdelitve temperature po tarči. Temnejše površine sevajo manj toplotne energije (so hladnejše), svetlejše površine sevajo več energije (so toplejše) (slika 4.7).



Slika 4.7: Toplotna slika linijskega toplotnega mostu

4.2.1.1 Navidezna temperatura

Toplotna slika prikazuje torej le natančno porazdelitev energije sevanja in nikakor ne pravilne porazdelitve temperature. Toplotna slika je vedno slika navidezne temperature.

Navidezna temperatura je pomemben parameter in je definirana kot »nekompezirana vrednost, ki jo pokaže termokamera in je rezultat vseh sevanj, vpadlih na merjeno telo, ne glede na naravo izvora« (Infrardeča termografija, 2005).

Navidezna temperatura ni enaka pravi (termodinamski) temperaturi, ki je posledica stanj na nivoju molekul in atomov. S kompenzacijo, ko upoštevamo več korekcijskih faktorjev, dobimo pravo temperaturo. Da bi bolje razumeli, kaj dejansko nam pove toplotna slika in kako upoštevati korekcijske faktorje, se moramo seznaniti z lastnostmi sevanja.

4.3 Izmenjava energije s sevanjem

Sevanje je način prenosa energije med mediji preko elektromagnetnega valovanja. Vsako telo, ki ima temperaturo višjo od absolutne ničle, oddaja energijo s sevanjem. Toplejša telesa sevajo več energije kot hladnejša. Moč sevanja je sorazmerna s četrto potenco absolutne temperature (enačba 21). To empirično izpeljavo zakona o sevanju črnega telesa je leta 1879 odkril slovenski fizik Jožef Štefan. Stefan-Boltzmannov zakon sevanja črnih teles povezuje temperaturo in sevalno energijo. Enačba (21) nam pove, koliko energije seva črno telo z dano temperaturo. Pri termografiji obravnavamo realna telesa. Več o tem v nadaljevanju.

$$q = \sigma T^4 \quad (21)$$

Telesa sevalno energijo izmenjujejo na več načinov:

- Odbijejo (refleksija) – energija se »odbije« od površine (ρ),
- Vpijajo (absorpcija) – vpijanje energije (α),
- Prepuščajo (transmisija) – del energije, ki pade na telo, gre skozenj (τ),
- Oddajajo (emitiranje) – sposobnost oddajanja energije oziroma emisivnost telesa (ε).

4.3.1 Vpadlo sevanje

Celotno sevanje, ki prihaja iz okolja in pade na telo, imenujemo vpadlo sevanje. Merjenec del sevanja absorbira (α), en del ga odbije in nima vpliva (ρ) in del sevanja prepusti skozi (τ). Z lastnostmi merjenca je določeno, koliko sevanja se absorbira, odbije ali gre skozi merjenec. Zveza med absorptivnostjo, prepustnostjo in reflektivnostjo je posledica zakona o ohranitvi energije:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (22)$$

4.3.2 Oddano sevanje

Celotno sevanje, ki izhaja iz površine merjenca, ne glede na to, kje je prvobitni izvor tega sevanja, pa imenujemo oddano sevanje. Izvori oddanega sevanja so trije (enačba 23);

- emitivnost telesa (ϵ),
- prepuščeni del sevalne energije od izvora za merjencem (τ) in
- odbiti del sevalne energije od izvora pred tarčo (ρ).

$$\epsilon + \tau + \rho = 1 \quad (23)$$

Sposobnost in zmogljivost teles, da absorbira s sevanjem vpadlo energijo, je vedno enaka njegovi sposobnosti in zmogljivosti, da oddaja energijo s sevanjem t. i. »Kirchhoffov zakon« (Kirchhoff, 1861).

$$\epsilon = \alpha \quad (24)$$

V infrardeči termografiji je lastno sevanje telesa (emisivnost) najpomembnejše. Emitirano sevanje je tisto, ki ga seva naš merjenec v postopku termografske obdelave. Pri oddanem sevanju temperatura in emitivnost določata velikost sevalnega energijskega toka.

Črno telo je idealni sevalec, ki pa žal v naravi ne obstaja. Za črno telo velja, da absorbira 100 % sevanja ter prav tako odda (emitira) 100 % sevanja;

$$\alpha = 1 \quad (25)$$

$$\epsilon = 1. \quad (26)$$

Pri meritvah se bomo seznanili s telesi (realna telesa), ki imajo emitivnost in absorptivnost vedno manjši od 1. Poleg tega je velika večina trdnih neprozorna za toplotno sevanje, njihov koeficient prepustnosti je nič;

$$\tau = 0 \quad (27)$$

$$\epsilon + \rho = 1 \quad (28)$$

Enačba (28) je pomembna, če hočemo prek IR kamere meriti temperaturo teles v resničnem času. Na podlagi podatka o emitivnosti merjenja, ki ga vnese operator, IR kamera izračuna odbojnost (reflektivnost) merjenja. Odbojnost merjenja, je sevanje proti merjencu, ki pa ga del nato odbije v kamero. Reflektiran del sevanja nima nič skupnega s temperaturo merjenja, zato moramo določiti njegovo jakost in jo odšteti od skupnega sevanja. Da dobimo pravo temperaturo merjenja, moramo navidezno temperaturo kompenzirati. Kompenzacijo izvršimo z nastavitvijo objektnih parametrov.

4.4 Nastavitev kamere

Za potrebe gradbene termografije sta pomembna dva podatka, s katerima dobimo pravo termodinamsko temperaturo:

- reflektirana navidezna temperatura
- emitivnost (kompenzacija odboja).

4.4.1 Reflektirana navidezna temperatura

Pri pregledu s termografijo moramo biti pozorni na odbito sevanje, oziroma ugotoviti moramo, kaj se reflektira: nebo, zidovi, peči itd. To odbito sevanje imenujemo reflektirana navidezna temperatura.

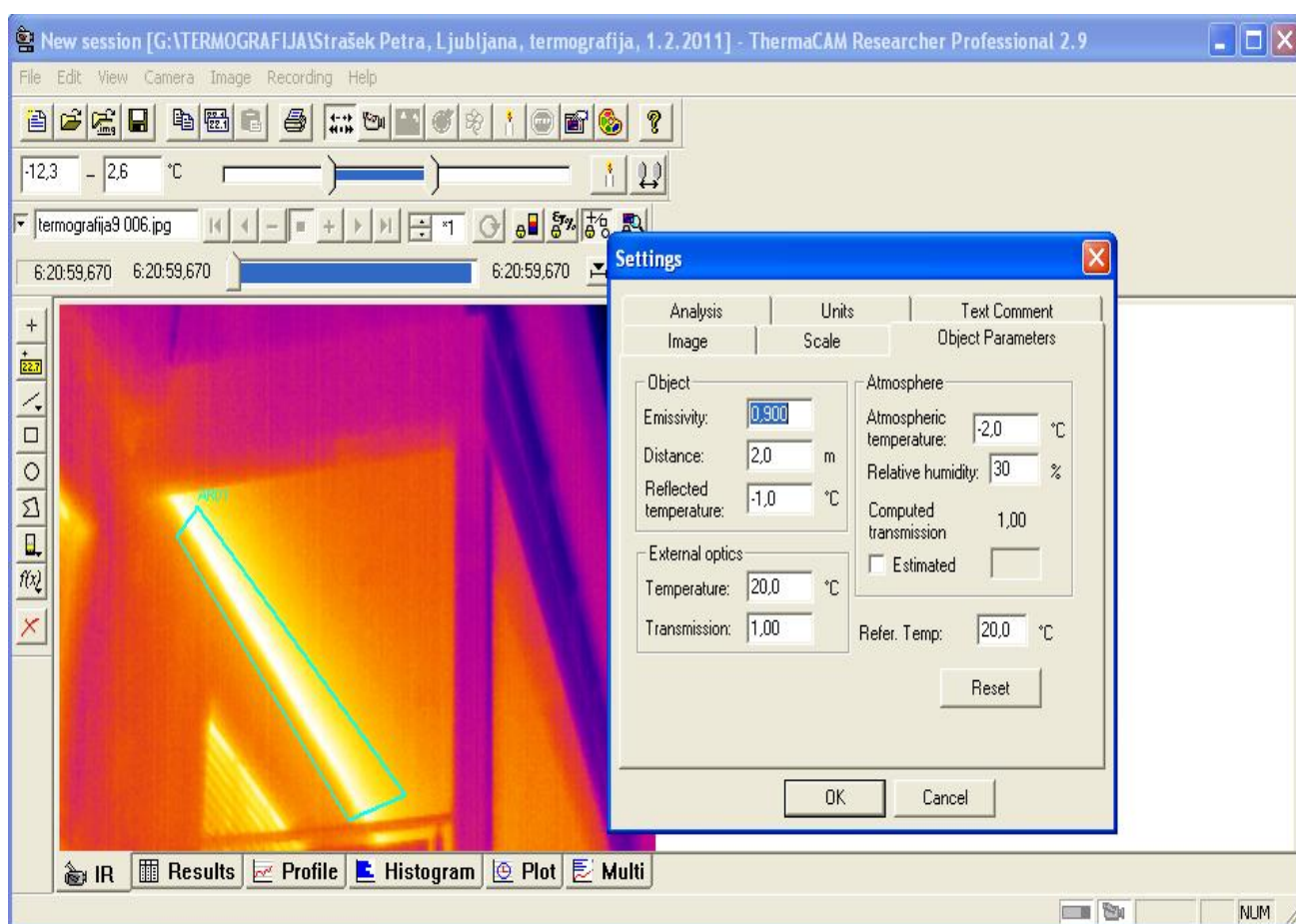
»Reflektirana navidezna temperatura je navidezna temperatura teles, ki oddajajo sevanje proti tarči, ki ga del nato odbije v kamero« (Infrardeča termografija, 2005).

4.4.2 Kompenzacija odboja

Kompenzacijo odboja določimo z enačbo (23), ki sem jo obravnavala v poglavju Oddano sevanje. Ko vstavimo podatek o emitivnosti telesa (preglednica 2), kamera izračuna reflektivnost po enačbi (28). Emitivnost telesa je zelo pomembna. Če naredimo napako pri emitivnosti, jo naredimo tudi pri reflektivnosti in s tem dobimo napačne podatke.

Po zaključeni kompenzaciji in vneseni reflektirani navidezni temperaturi kamera prepozna, koliko lastnega sevanja oddaja tarča. Na podlagi teh podatkov lahko pričnemo z interpretacijo termogramov.

Kadar nismo prepričani ali smo pravilno vnesli parametre v kamero, lahko to storimo v različnih računalniških programih za termografijo (slika 4.8).



Slika 4.8: Programsko orodje ThermoCAM Researcher Pro 2.9

Preglednica 2: Emitivnost materialov (Tršan, 2011)

MATERIAL		EMITIVNOST (8-14μm)
ALUMINIJ:	Polirana pločevina	0,05
	Oksidirani	0,55 - 0,65 - 0,80
	Vakuumsko naparjen	0,04
MEDENINA	Polirana	0,03
	Peskana	0,2
	Oksidirana	0,61
BAKER	Poliran	0,05
	Močno oksidirani	0,78
ZLATO	Polirano	0,02
ŽELEZO	Lito, polirano	0,21
	Lito, oksidirano	0,64
	Pločevina, zelo oksidirano	0,69
MAGNEZIJ	Poliran	0,07
NARAVNO JEKLO	Kovano	0,16
JEKLO	Polirano	0,07
	Oksidirano	0,79
OPEKA	Navadna, rdeča (glinasta)	0,93
OGLJIK	Saje, sveča	0,95
	Grafit, popiljena površina	0,98
BETON		0,92
STEKLO	Polirana plošča	0,94
LAK	Bel	0,92
	Črn, mat	0,97
OLJNE BARVE		0,94
PAPIR, BEL PISARNIŠKI		0,93
OMET	grobi	0,91
PESEK		0,9
ČLOVEŠKA KOŽA		0,98
LES, SKOBLJAN		0,92

5 ODKRIVANJE ŠKODNIH DOGODKOV/POŠKODB S POMOČJO INFRARDEČE METODE

V nadaljevanju diplomske naloge bom na primerih s terena prikazala odkrivanje toplotnih mostov oziroma škodnih dogodkov/poškodb s pomočjo infrardeče metode. Na podlagi interpretacije termogramov ter pridobljene dokumentacije sem nato podala kritične komentarje. Termografijo objektov sem opravila z infrardečo kamero, znamke FLIR, modela S65 (slika 5.1) z naslednjimi glavnimi lastnostmi:

Število pikslov: 320 x 240
Spektralno območje: 7.5 do 13 μm
Vidni kot/min. fokus: 24 ° x 18 ° /0.3 m
Občutljivost (NETD): 0.08 K
Točnost meritev: +/- 2 K ali +/- 2 % odčitka



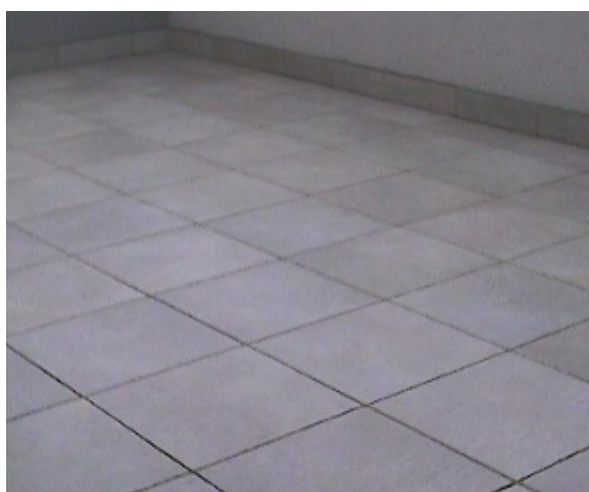
Slika 5.1: Tremokamera FLIR S65

5.1 Metode analiziranja v termografiji

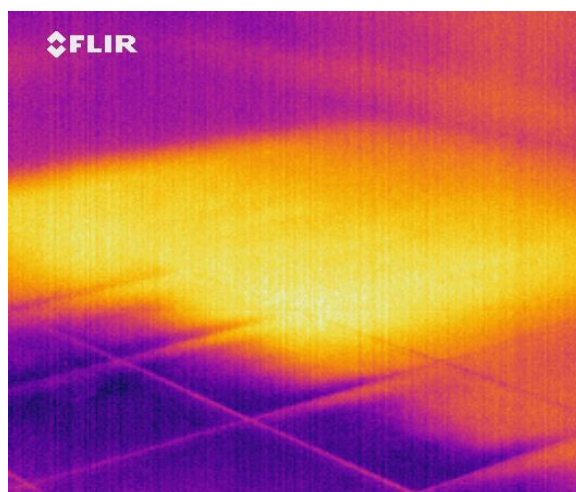
Preprost odčitek temperature nam ne da toliko informacij kot toplotna slika. Zaradi tega je termografija tako edinstvena in uporabna. Pri termografiji lahko analiziramo s kvalitativno in kvantitativno metodo.

5.1.1 Kvalitativna metoda

Kvalitativne metode so obravnavane kot metode, ki temeljijo na kvalitativnem znanju o sistemu. Kvalitativno znanje izhaja iz fizikalnih lastnosti in delovanja sistema, izkušenj in shranjenih meritev ter zajema nabor in opis napak. Kvalitativna metoda oponaša delovanje človeškega razuma pri reševanju problemov in vsebuje veliko pravil »če – potem«, ki iščejo po bazi znanja, dokler ne pridejo do smiselnega zaključka. S kvalitativno metodo opravimo splošen pregled in določitev kritičnih mest za nadaljnje analize in preiskave stavbe (slika 5.2, slika 5.3). Kvalitativna metoda se izvede kot prva in na podlagi resnosti problema lahko preidemo na kvantitativno metodo.



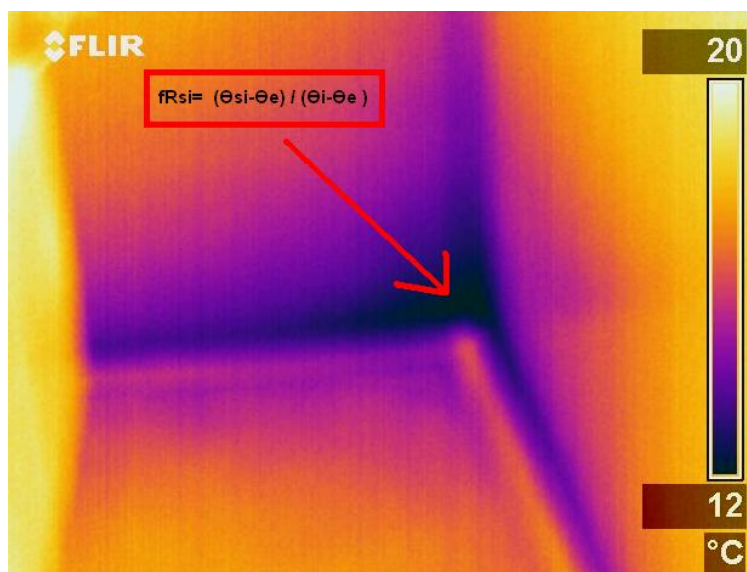
Slika 5.2: Vidna slika problema



Slika 5.3: ugotavljanje prisotnosti problema

5.1.2 Kvantitativna metoda

Kadar nas zanima več kot le mesto, kjer se problem pojavlja, analiziramo termograme s kvantitativno metodo (slika 5.4). Za določitev temperaturnega faktorja f_{Rsi} potrebujemo površinsko temperaturo stene. Takrat moramo narediti kompenzacijo, da dobimo pravo termodinamsko temperaturo in s tem pravilno interpretacijo toplotne slike.



Slika 5.4: Termogram – kvantitativna metod

5.2 Škodni dogodki/poškodbe na zunanji steni

S termokamero merimo toplotne izgube stavb, iščemo toplotne mostove in vlažna mesta, ugotavljamo kvaliteto izolacijskih materialov itd.

Na objektih, kjer sem ugotavljala mesta za toplotne mostove na ovoju stavbe, sem uporabila kvalitativno infrardečo metodo. V nadaljevanju diplomske naloge pa sem analizirala posnete toplotne slike s kvantitativno metodo. Posnetke toplotnih slik sem računalniško obdelala, da sem dobila pravilne termograme ter jih razvrstila v dve analizi škodnih dogodkov in poškodb:

- analiza termogramov zaradi posledic znižanja notranjih površinskih temperatur (slika 5.5),
- analiza termogramov zaradi posledice povečanega toplotnega toka (slika 5.6).

Slika 5.5: Računanje faktorja fR_{si} 

Slika 5.6: Računanje toplotnega toka

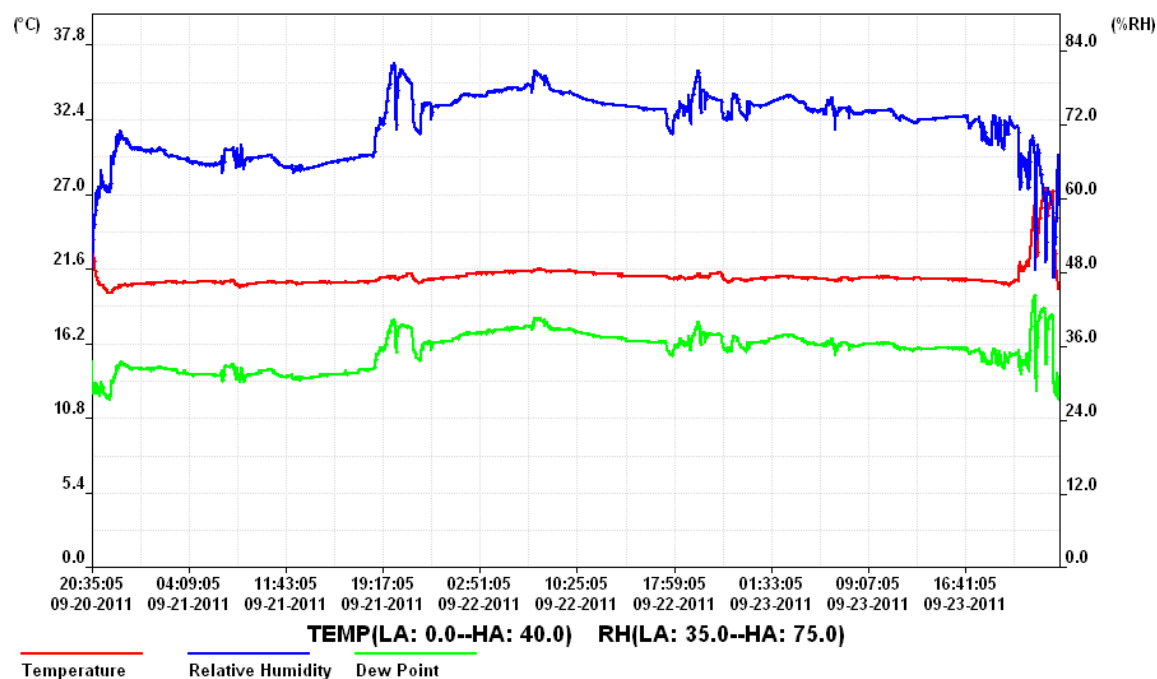
5.2.1 1. Analiza: znižanje notranjih površinskih temperatur

Na primerih termogramov sem analizirala znižanje notranje površinske temperature na mestih toplotnih mostov. V analizah termogramov sem preverjala, ali je prišlo do pojava kondenzacije in računala vrednost padca temperature fR_{si} , katerega sem obravnavala v poglavju Posledice toplotnih mostov. Predhodno sem v prostorih, kjer so se pojavile težave na mestih toplotnih mostov, izvedla meritve mikroklimatskih parametrov (relativna zračna vlaga, temperatura zraka, temperatura rosišča) z zapisovalnikom podatkov (slika 5.7). Ta je zapisoval te parametre na vsaki dve minuti več dni zapored.

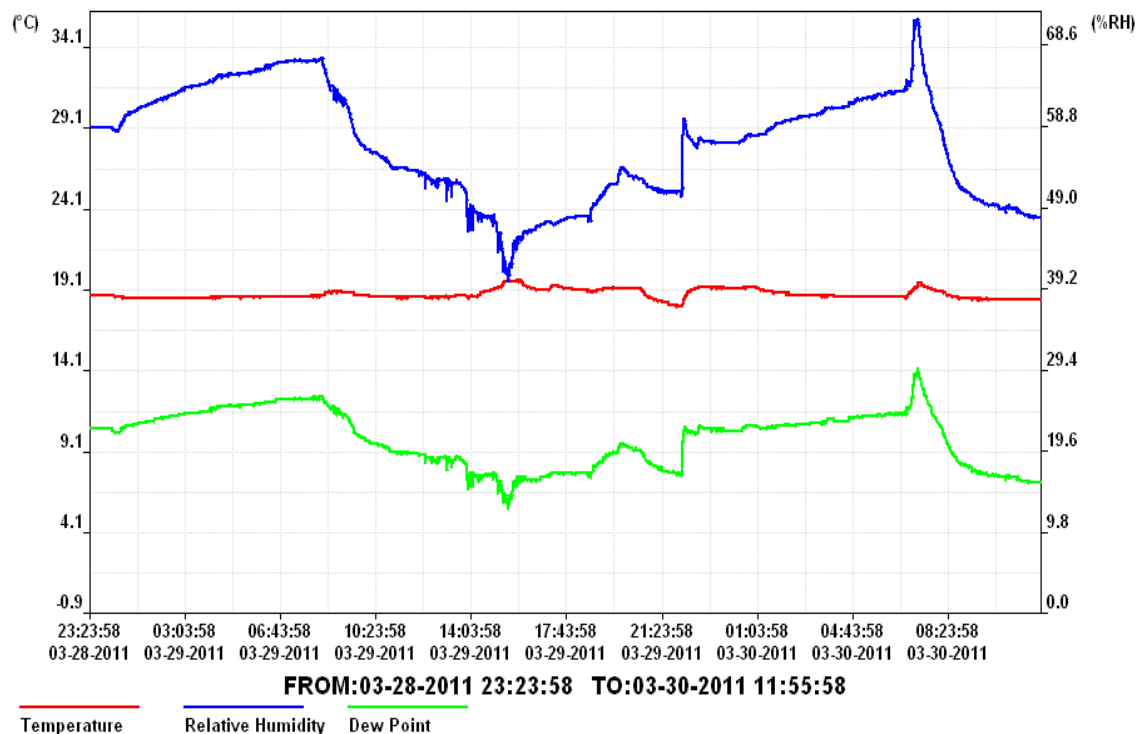


Slika 5.7: Zapisovalnik podatkov (angl. data logger)

Na podlagi rezultatov zapisovalnika podatkov, prikazanih na grafikonu, sem ugotavljala, ali lastniki stanovanj ustrezno uporabljajo prostore, kjer naj bi se pojavljali problemi. Na mestih geometrijskih toplotnih mostov, ki se jim ne moremo izogniti (vsi stiki, vogali), namreč lahko pride do pojava kondenzacije zaradi neustrezne uporabe stanovanjskih prostorov; povečana relativna zračna vlaga (slika 5.8), prenizke temperature v prostoru, zaprti vogali s pohištvom, rože.(konvekcija). Ker nas neugodni notranji pogoji lahko zavedejo pri iskanju toplotnih mostov na ovojju stavbe, sem v okviru diplomske naloge analizirala termograme, kjer so bili notranji pogoji, ugotovljeni z zapisovalnikom podatkov za več dni zapored (slika 5.9), v prostoru normalni, oziroma je bila raba stanovanja/prostora ustrezna.



Slika 5.8: Neustrezna uporaba prostora



Slika 5.9: Ustrezna uporaba stanovanja

Katera je ustrezna relativna zračna vlaga in temperatura zraka v prostoru, je težko določiti, ker je odvisno od več vrst dejavnikov (Jordan, Knez, 2009) in je subjektivno pogojena. Vendar pa lahko postavimo, da se v zimskem času relativna zračna vlaga giblje med 40 % in 60 % s temperaturo zraka nad 20 °C.

5.2.2 2. Analiza: povečan toplotni tok

V drugem sklopu sem na podlagi odčitanih površinskih temperatur na termogramu računala toplotni tok, ki ga oddaja stena. Iz izračunanega toplotnega toka sem računala toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa na območju toplotnega mostu ter izven območja. V analizi termogramov sem prikazala, za koliko je povečana toplotna prehodnost na mestih toplotnih mostov, in posledično večje toplotne izgube.

6 ANALIZA TERMOGRAMOV: ZNIŽANJE NOTRANJIH POVRŠINSKIH TEMPERATUR

6.1 Primer: odkrivanje škodnih dogodkov/poškodb - visoko pritličje večstanovanjske stavbe

Spodaj opisan primer v diplomskem delu se nanaša na projektiranje in izvedbo prostorov zahodne strani garsonjere v večstanovanjski stavbi. Pri pregledu izvedbe konstrukcijskega sklopa zunanje stene visokega pritličja večstanovanjske stavbe, v delu garsonjere, kjer se pojavljajo napake/pomanjkljivosti oziroma škodni dogodki/poškodbe v vogalu stene dnevne sobe s kuhinjo, sem ugotovila stvarno gradbeno stanje zunanje stene in dela stene kleti pod garsonjero. Posnela sem fotodokumentacijo in termografijo.

Predhodno sem pridobila potrebno dokumentacijo in arhitekturne načrte. Zunanja stena (desna stran vogala) visokega pritličja večstanovanjske stavbe predstavlja prezračevani fasadni sistem (slika 6.1, slika 6.2).



Slika 6.1: Sestava zunanje stene



Slika 6.2: Prezračevana fasada

Sestava zunanje stene gledano od znotraj proti zunanosti:

MATERIAL	dimenzije
notranji omet	2 cm
AB zid/opečni modularec	20 cm
izolacija FP-PL	8 cm
zračni sloj, vmesna kovinska podkonstrukcija	3 cm
Obešena montažna fasada (MAX COMPACT)	1 cm

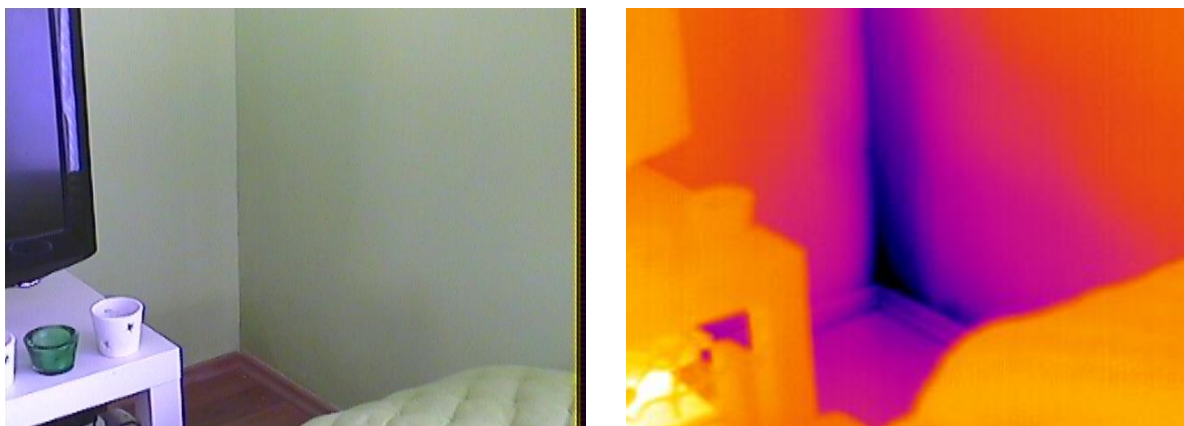
Pregled nad izvedenim gradbenim stanjem konstrukcijskega sklopa zunanje stene sem opravila s termografijo. V garsonjeri visokega pritličja sem tudi posnela notranje mikroklimatske pogoje z merilnim instrumentom data logger. Podano povprečje izmejenih parametrov. Notranje površinske temperature sem preverila z dotikalnim termometrom ALMENO.

Ugotovljeni notranji mikroklimatski parametri so:

$T_i = 20,5\text{ °C}$ (notranja temperatura zraka),

$RH = 55,8\%$ (relativna vlažnost zraka),

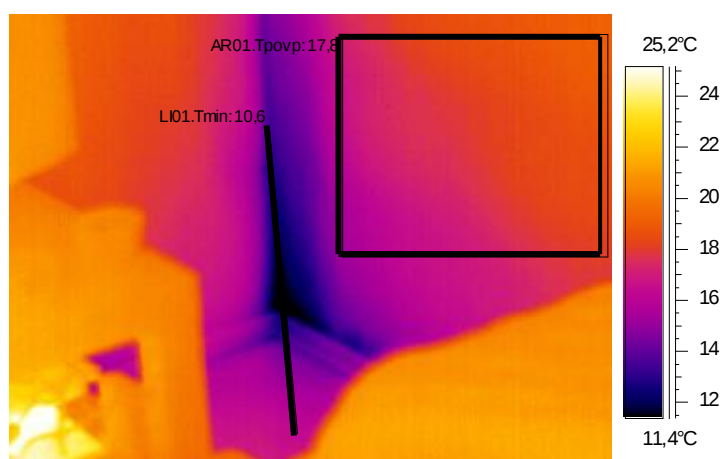
$T_{rosišča} = 11,1\text{ °C}$ (temperatura rosišča).



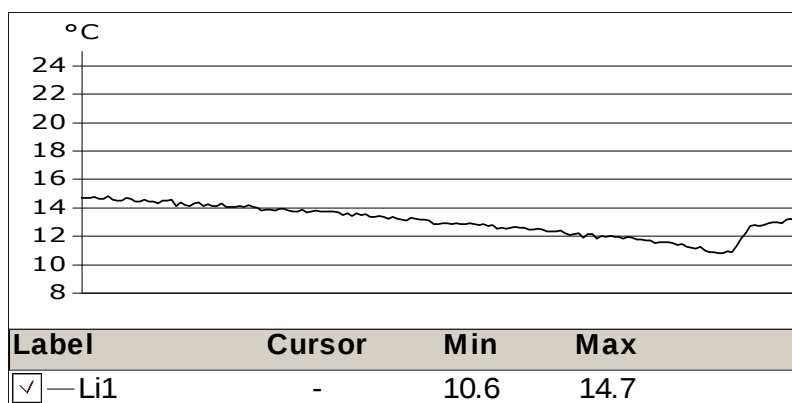
Slika 6.3: Vidna slika – levo, toplotna slika - desno

Slika 6.3- desno predstavlja toplotno sliko, kjer govorimo o navidezni temperaturi in kvalitativni metodi, s katero le odkrivamo mesta problemov v stavbnem ovoju v realnem času. Če želimo interpretirati sliko in prikazati pripadajočo temperaturo, preidemo na kvantitativno metodo. Pri kvantitativni metodi moramo preveriti, ali so narejene ustrezne kompenzacije (emitivnost, reflektivna temperatura). Če so, ne govorimo več o toplotni sliki in navidezni temperaturi, temveč o termogramih in pripadajoči termodinamski temperaturi. Na podlagi dobljenih termogramov lahko naprej izvajamo analize, ki nas zanimajo.

Spodaj na termogramu (slika 6.4) se lepo vidi toplotni most in posledično znižanje površinske temperature. V območju toplotnega mostu označim linijo (LIO1) na termogramu, po kateri so se na pripadajočem grafu izpisale površinske temperature (slika 6.5).



Slika 6.4: Termogram toplotnega mostu



Slika 6.5: Prikaz površinskih temperatur na grafu

Na grafu (slika 6.5) sem odčitala površinske temperature notranje stene (preglednica) in s predhodno izmerjenimi povprečnimi robnimi parametri (preglednica) preverila naslednje pogoje:

6.1.1.1 V območju toplotnega mostu (označeno z LI01 na termogramu):

1. pogoj: padec površinske temperature fR_{si} na mestih toplotnih mostov, ki sem ga obravnavala v poglavju Posledice toplotnih mostov; $fR_{si} > 0,71$,
2. pogoj: temperatura rosišča: preverila sem ali prihaja do kondenzacije: $T_{si,min} > T_{rosišča}$,

6.1.1.2 Izven območja toplotnega mostu (označeno z ARO1 na termogramu)

3. pogoj: ali temperaturni faktor toplotne izolacije ustreza pogoju; $f_{Rsi} > 0,92$. Odčitala sem povprečno površinsko temperaturo na označenem območju (ARO1) na termogramu. Za določanje toplotnega ugodja v prostoru, se na podlagi termografskega pregleda celotne stene, odčita povprečna površinska temperatura stene, ki mora ustrezati pogoju $f_{Rsi} > 0,92$. Tako lahko ocenimo, ali je stena zadostno izolirana za doseganje toplotnega ugodja v prostoru.

6.1.2 Preverjanje zgoraj naštetih pogojev

Preglednica 3: Predhodno izmerjeni robni parametri (povprečne vrednosti meritev)

ROBNI PARAMETRI	POVPREČNA VREDNOST
Temperatura zunanjega zraka – T_e	-5 °C
Temperatura notranjega zraka - T_i	20,5 °C
Temperatura rosišča - T_r	11,1 °C
Relativna zračna vlažnost - RH	55,8 %

Preglednica 4: Temperaturni parametri odčitani iz termograma

TEMPERATURNI PARAMETRI	OBMOČJE NA TERMOGRAMU	ODČITANA VREDNOST
Minimalna površinska temperatura stene - $T_{si,min}$	LIO1 - območje toplotnega mostu	10,6 °C
Povprečna površinska temperatura stene - $T_{si,povp}$	ARO1 - izven območja toplotnega mostu	17,6 °C

1. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} > 0,71$

$$f_{Rsi} = \frac{10,6 - (-5)}{20,5 - (-5)} > 0,71$$

0,61 > 0,70 - NE ODGOVARJA

2. pogoj: $T_{\text{rosišča}} < T_{\text{min,si}}$

$$11,1 < 10,6 - \text{NE ODGOVARJA}$$

3. pogoj: $f_{Rsi} > 0,92$

$$f_{Rsi} = \frac{17,6 - (-5)}{20,5 - (-5)} > 0,92$$

$$0,88 > 0,92 - \text{NE ODGOVARJA}$$

6.1.2.1 Ugotovitve in komentar

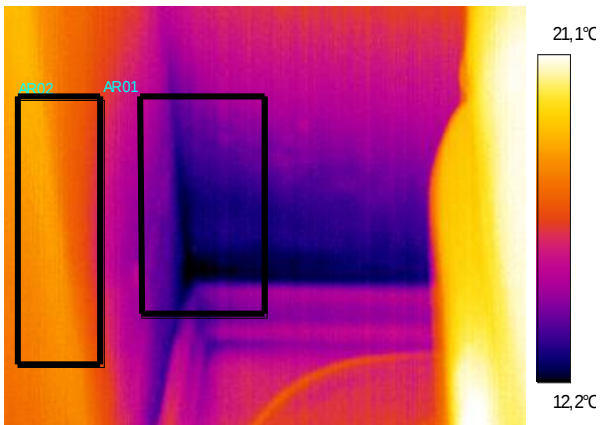
Na osnovi pridobljenega znanja menim, da zunanja stena garsonjere visokega pritličja večstanovanjske stavbe ni projektirana in izvedena tako, da ščiti prostore in zunanje stene garsonjere pred:

1. izgubo toplote v prostoru in potratno porabo energije,
2. izgubo izolativnih sposobnosti zidu in
3. navlaževanjem materialov konstrukcijskih elementov/notranji omet, ki bi jih vlaga lahko poškodovala, povzročila razvoj plesni in gliv, ali poslabšala njihove lastnosti do te mere, da bi bila ogrožena zdravstvena varnost in življenje uporabnikov oziroma lastnikov garsonjere.

Vzrok za zgoraj navedene napake/pomanjkljivosti, ki povzročajo škodne dogodke/poškodbe, kot so: hladni in vlažni prostori v prostorih garsonjere, toplotni mostovi/nabiranje kondenza, je nepravilno projektiran/dimenzioniran in izveden konstrukcijski sklop zunanje stene visokega pritličja večstanovanjske stavbe.

6.2 Primeri analiz termogramov

a) Večstanovanjski blok (novogradnja): pojav vlage v zunanjem vogalu ovoja zgradbe

VIDNA SLIKA	TERMOGRAM
	
Robni pogoji	Odčitek površinske temperature iz termograma
$T_{\text{zunaj}} = -2^{\circ}\text{C}$	Na območju ARO1: $T_{\text{si,min}} = 11,9^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{notri}} = 23^{\circ}\text{C}$	Na območju ARO2: $T_{\text{si,povp}} = 17,3^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{rosišče}} = 12,9^{\circ}\text{C}$	
$\text{RH} = 55,3 \%$	

$$1. \text{ pogoj: } f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} = \frac{11,9 - (-2)}{23 - (-2)} > 0,71$$

0,55 > 0,71 - NE ODGOVARJA

$$2. \text{ pogoj: } T_{\text{rosišča}} < T_{\text{min,si}}$$

12,9 °C < 11,9 °C - NE ODGOVARJA

$$3. \text{ pogoj: } f_{Rsi} = \frac{17,3 - (-2)}{23 - (-2)} > 0,92$$

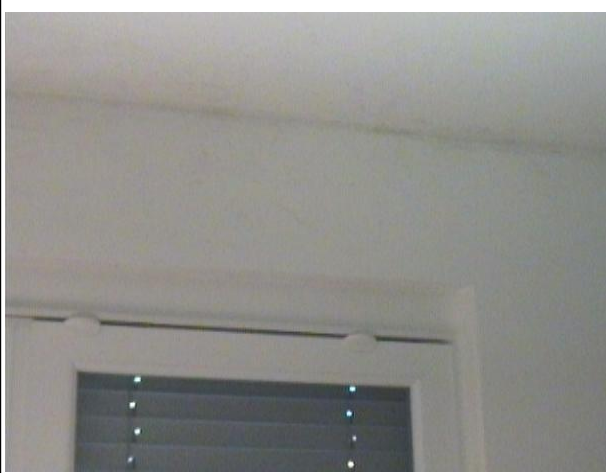
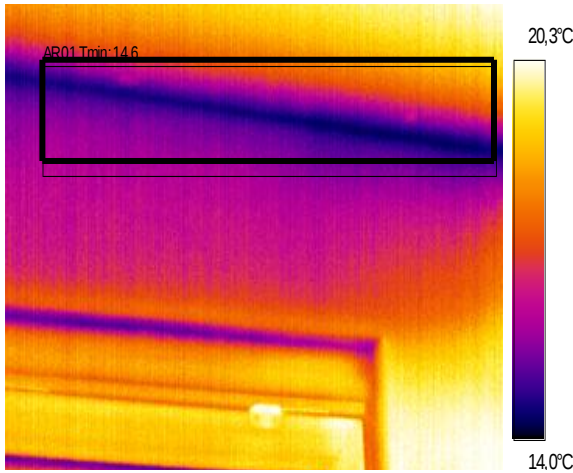
0,77 > 0,92 - NE ODGOVARJA

KOMENTAR:

V zgoraj navedenem stvarnem škodnem dogodku je dokazana vzročna zveza med nepravilnim projektiranjem, izbiro materiala nosilne stene in izvedbo stika med steno in ploščo. Uporabnik stanovanja kondicionira normalne pogoje bivanja v njem, kot so navedeni v pravilniku o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Ukrepi za stanovanja so:

- dodatna toplotna izolacija v kleti/garaži na stropu,
- dodatna toplotna izolacija dela terase pred stanovanjem,
- prisilno ali mehansko prezračevanje v prostoru.

b) Večstanovanjski blok (novogradnja): pojav linijskega toplotnega mostu na mestu križanja stena – plošča (balkon)

VIDNA SLIKA	TERMOGRAM
	
Robni pogoji	Odčitek površinske temperature iz termograma
Tzunaj = - 4°C	Na območju ARO1: Tsi,min = 14,6°C
Tnotri = 23 °C	
Trosišče = 14,9 °C	
RH = 62 %	

1. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{T_{si,min}-T_e}{T_i-T_e} = \frac{14,6-(-4)}{23-(-4)} > 0,71$

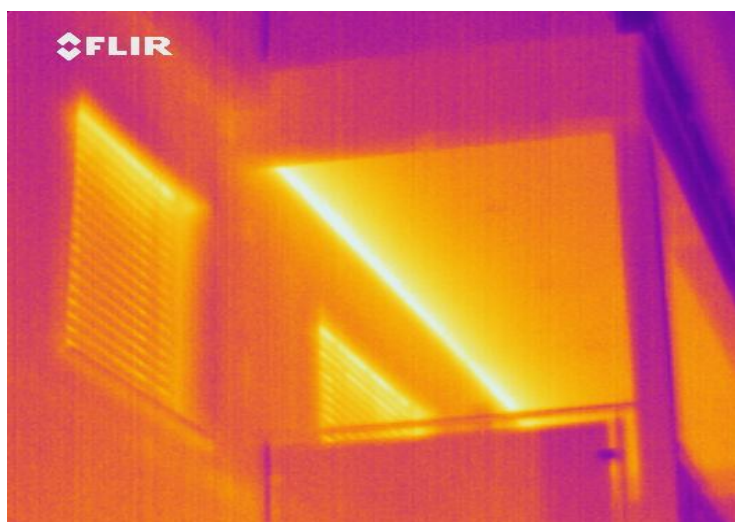
0,68 > 0,71 - NE ODGOVARJA

2. pogoj: $T_{rosišča} < T_{min,si}$

14,9 °C < 14,6 °C - NE ODGOVARJA

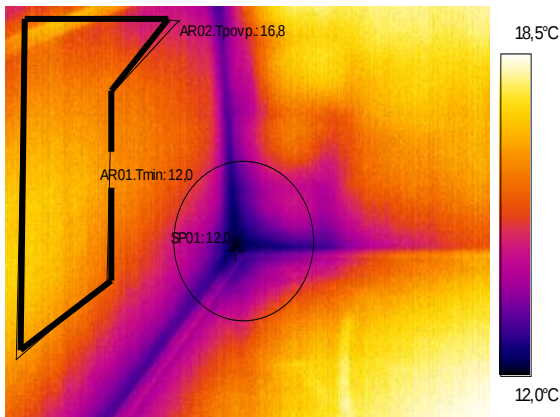
KOMENTAR:

Pri pregledu linijskega konstruktivnega dela stanovanja s termokamero (preklada nad panoramskimi drsnimi vrati na balkon), sem detektirala linijski toplotni most. Na zaključnem notranjem ometu preklade nad drsnimi vrati dnevne sobe so pod stropom prisotne plesni. Razvoj plesni je omogočila prisotnost vode, ki je nastala po postopku kondenzacije na podhlajenih površinah. V danem primeru prihaja do povečanega toplotnega dela skozi preklado in stropa zaradi ne izvedene toplotne izolacije pod balkonom (slika 6.6). To je primer slabe gradbene prakse pri rekonstrukciji/dozidavi enostanovanjske hiše v večetažno večstanovanjsko stavbo.



Slika 6.6: Toplotni most – križanje plošča – stena (balkon)

c) Pritlično stanovanje (novogradnja): pojav plesni v zunanjem vogalu ovoja zgradbe

VIDNA SLIKA	TERMOGRAM
	
Robni pogoji	Odčitek površinske temperature iz termograma
Tzunaj = -4 °C	Na območju ARO1: Tsi,min = 12 °C
Tnotri = 22 °C	Na območju ARO2: Tsi,povp = 16,8 °C
Trosišče = 13 °C	
RH = 58,1 %	

1. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} = \frac{12 - (-4)}{22 - (-4)} > 0,71$

0,61 > 0,71 - NE ODGOVARJA

2. pogoj: $T_{rosišča} < T_{min,si}$

13 °C < 12 °C - NE ODGOVARJA

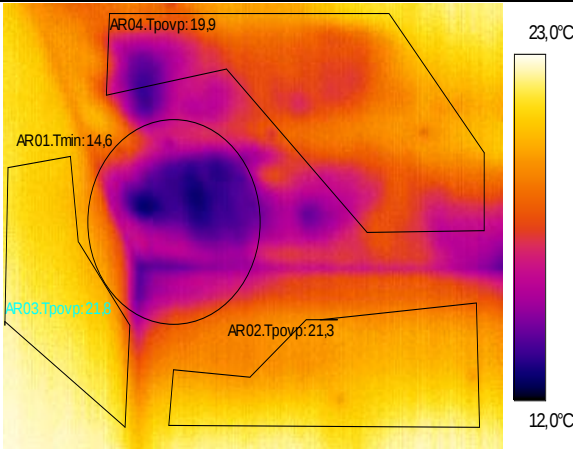
3. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{16,7 - (-4)}{22 - (-4)} > 0,92$

0,79 > 0,92 - NE ODGOVARJA

KOMENTAR:

Navedeni primer predstavlja tipičen toplotni most. Konstrukcijski sklop je izveden brez projekta in izračuna prehoda toplote. Na podlagi izvedene analize predvidevam, da za določene robne pogoje ni položene/vgrajene zadostne toplotne izolacije.

- d) Montažna hiša: pojav navlaževanja toplotne izolacije v delu stropa mansarde v naklonu strešine

VIDNA SLIKA	TERMOGRAM
	
Robni pogoji	Odčitek površinske temperature iz termograma
Tzunaj = - 3 °C	Na območju ARO1: Tsi,min = 14,6 °C
Tnotri = 23 °C	Na območju ARO2: Tsi,povp = 21,3 °C
Trosišče = 14,9 °C	Na območju ARO3: Tsi,povp = 21,8 °C
RH = 65 %	Na območju ARO4: Tsi,min = 19,9 °C

1. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} = \frac{14,6 - (-3)}{23 - (-3)} > 0,71$

0,67 > 0,71 - NE ODGOVARJA

2. pogoj: $T_{rosišča} < T_{min,si}$

14,9 °C < 14,6 °C - NE ODGOVARJA

3. pogoj: $f_{Rsi} > 0,92$

za območje ARO2: $f_{Rsi} = \frac{21,3 - (-3)}{23 - (-3)} > 0,92$

0,93 > 0,92 - ODGOVARJA

$$\text{za območje ARO3: } f_{Rsi} = \frac{21,8 - (-3)}{23 - (-3)} > 0,92$$

$$0,95 > 0,92 - \text{ODGOVARJA}$$

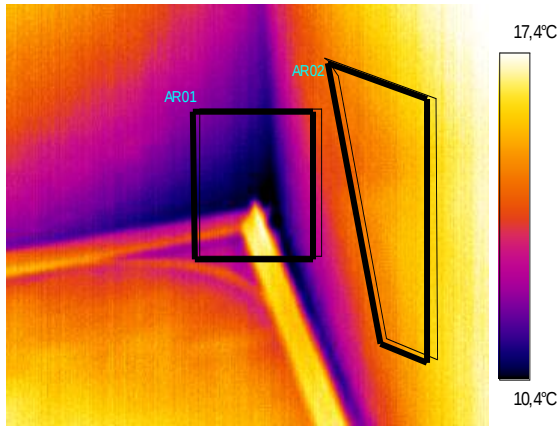
$$\text{za območje ARO4: } f_{Rsi} = \frac{19,9 - (-3)}{23 - (-3)} > 0,92$$

$$0,88 > 0,92 - \text{NE ODGOVARJA}$$

KOMENTAR:

V danem primeru prihaja do kondenzacije vodne pare v konstrukcijskem sklopu. Vodna para v zraku iz mansardnih bivalnih prostorov vstopa v steno, kjer difundira na mestih močnega padca temperature v področju toplotne izolacije, kot posledica nezrakotesno izvedene parne ovire ali parne zapore. Ta pod določenimi zunanjimi in notranjimi pogoji kondenzira v plasti toplotne izolacije. Navedeni primer predstavlja konvekcijski toplotni most, ki je posledica nezrakotesno izvedenega notranjega ovoja mansarde.

- e) Podkleten, večstanovanjski blok (novogradnja): pojav zamakanja v zunanjem ovoju zgradbe

VIDNA SLIKA	TERMOGRAM
	
Robni pogoji	Odčitek površinske temperature iz termograma
T _{zunaj} = -5 °C	Na območju ARO1: T _{si,min} = 10,4 °C
T _{notri} = 22 °C	Na območju ARO2: T _{si,povp} = 16,5 °C
T _{rosišče} = 10,9 °C	
RH = 49,2 %	

1. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{T_{si,min}-T_e}{T_i-T_e} = \frac{10,4-(-5)}{22-(-5)} > 0,71$

0,57 > 0,71 - NE ODGOVARJA

2. pogoj: $T_{rosišča} < T_{min,si}$

10,9 °C < 10,4 °C - NE ODGOVARJA

3. pogoj: $f_{Rsi} = \frac{16,5-(-5)}{22-(-5)} > 0,92$

0,79 > 0,92 - NE ODGOVARJA

KOMENTAR:

Pri predmetni obravnavi konstrukcijskega elementa (stena – plošča) stanovanja pa sem ugotovila, da prihaja do zamakanja/navlaževanja zunanjega vogala zaradi slabo izvedenega preboja vertikalne otočne cevi, meteornih vod iz strehe (slika 6.7). Navedeni primer ne predstavlja težave zaradi toplotnega mostu (ni izrazit), temveč pojav vlage/plesni zaradi vdora vode. Po termografskem pregledu dela objekta oziroma škodnega dogodka pristopimo še k pregledu dela stene z jemanjem vzorcev. S sušenjem vzorcev ugotovimo stopnjo navlaževanja, ki nakazujejo domnevo/trditev, da ne gre za pojav kondenzacije in kapilarnega dviga temveč za vdor vode. Po pregledu projektne dokumentacije in svojega strokovnega znanja predpišem ukrepe za preprečitev problema po pravilih gradbene stroke.



Slika 6.7: Preboj odtočne cevi

7 ANALIZA TERMOGRAMA: POVEČAN TOPLOTNI TOK

7.1 Termografski pregled zunanje stene

S termografijo sem opravila kontrolni pregled fasadne stene enodružinske stavbe po izvedbi dodatne toplotne izolacije z novim izolativnim materialom – VIP paneli. VIP paneli so vakumsko izolacijski paneli, ki sestojijo iz posebne folije v katero je zrakotesno in vlagotesno zaprto toplotnoizolacijsko jedro, iz katerega je skoraj, v celoti izčrpan zrak. Dimenzije VIP panelov so lahko kakršnekoli velikosti. Po končani proizvodnji jih ne moremo več rezati in krojiti na določeno dimenzijo. Posebno pozorni moramo biti pri vgradnji VIP panelov, saj le ti ne dovoljujejo sidranje, prebadanje ali mehansko pritrdjevanje s čimer bi predrli ali poškodovali zaščitno folijo in posledično uničili njihovo učinkovitost.

Sestavo konstrukcijskega sklopa zunanje stene sem prikazala po postopku inženirskega oblikovanja, na podlogi, po kateri smo pri predmetu Stavbarstvo obravnavali konstrukcijske sklope (slika 7.1).

zgoraj zunaj									
material →	VOTLA OPEKA	OBSTOJEČA FASADA + FASADNO LEPILO	FRAGMAT NEO SUPER	VIP PANEL	FRAGMAT NEO SUPER	PLASTIČNO PRITRDILO	OSNOVNI FASADNI OMET + ZAKLJUČNI OMET	NOTRANJNI OMET	
nosilna konstrukcija									
funkcija →	OF NK	FO ZK NK	TI ZK TI	OF TI	TI ZK TI	NK TI	FO ZK TI	FO	
spodaj notri									

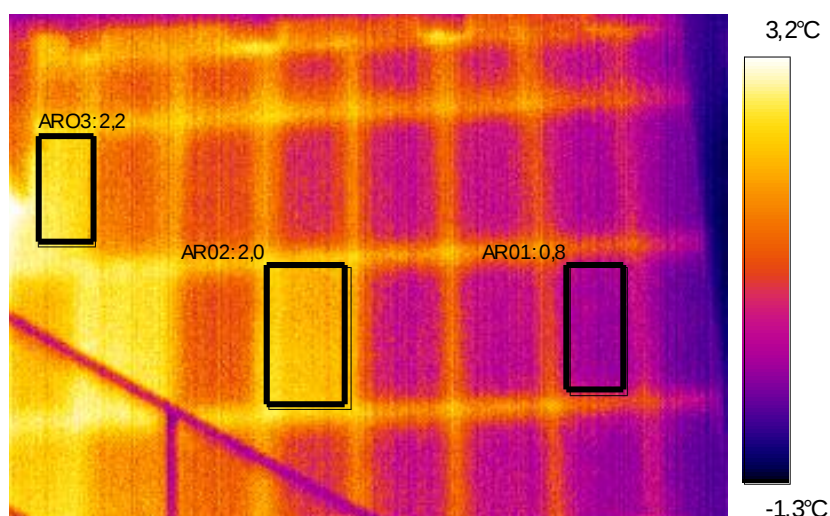
Slika 7.1: Funkcionalna analiza konstrukcijskega sklopa

V navedenem primeru je bilo pri izvedbi dodatne toplotne izolacije na razpolago malo prostora. V primerih, kjer je omejitev, oziroma ni mogoča montaža dodatnih debelin (rekonstrukcija, adaptacija), je uporaba VIP panela zelo učinkovita. Zaradi izredno majhne toplotne prevodnosti (začetna / laboratorijsko / celo $0,003\text{W}/(\text{mK})$) lahko dosegamo veliko toplotno upornost pri majhnih debelinah. Prikazane kompozitne plošče na sliki 7.2 so bile uporabljene na predelih fasade ob vhodnih stopnicah in na balkonih. Njihova debelina znaša 4 centimetre.



Slika 7.2: Pritrjevanje VIP panelov, obojestransko zaščitenih z FRAGMAT NEO SUPER

Termografski pregled zunanje stene sem opravila v zgodnjih jutranjih urah. Spodaj na termogramu (slika 7.3) sem označila tri območja/površine zunanje stene, ki sem jih v nadaljevanju analizirala. Na podlagi odčitanih površinskih temperatur sem za vsa tri območja izračunala toplotni tok, ki ga oddaja stena. Iz izmerjenega toplotnega toka sem ravno tako za vsa tri območja izračunala toplotno prehodnost sten, pri izmerjenih robnih pogojih (zunanja in notranja temperatura) in rezultate primerjala z stacionarno analizo toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa. Na sliki 7.3 so vidni stiki VIP panelov (toplotno oslABLJena mesta), ki so posledica njihove izjemne toplotne izolativnosti in izrazitih prenosov po robovih (staknjena zvarjena folija, neidealno stikovanje in pojavi rež).



Slika 7.3: Termogram zunanje fasade (VIP paneli) – označeni površini z ARO2 in ARO3 predstavljajo toplotni most, kjer je toplotni upor manjši kot v območju površine označene z ARO1.

7.2 Toplotni tok, ki ga oddaja stena

V poglavju Prenos toplote sem obravnavala mehanizme prehoda toplote. Na podlagi analize termograma sem izračunala toplotni tok, ki ga oddaja stena. Toplotni tok, ki ga oddaja stena, sem računala na treh različnih površinah, prikazanih na sliki 7.3 (ARO1, ARO2 in ARO3).

Toplotni tok, ki ga oddaja stena, sestoji iz treh prispevkov (Tršan, 2011):

q_{sevalni} (enačba 11),

$q_{\text{konvekcijski}}$ (enačba 9),

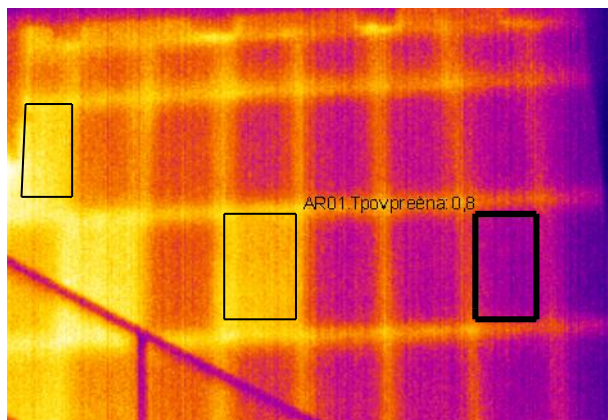
$q_{\text{prevajanje}}$ (enačba 6).

S termografijo lahko ugotovimo lastno sevanje merjenca ($q_{\text{radiacije}}$) in površinsko temperaturo merjenca, s katero pa lahko izračunamo $q_{\text{konvekcije}}$ in $q_{\text{prevajanje}}$. Predpostavimo, da se del toplotnega toka prevaja med steno in mejno plastjo zraka ($q_{\text{prevajanje}}$) in del toplotnega toka prestopa med steno in mejno plastjo zraka ($q_{\text{konvekcije}}$).

$$q_{\text{totalni}} = q_{\text{kondukcijski}} + q_{\text{kovekcijski}} + q_{\text{radiacije}} \quad (29)$$

7.2.1 Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO1

Za izračun toplotnega toka, ki ga oddaja stena potrebujemo naslednje podatke: zunanjo temperaturo zraka ter odčitano povprečno površinsko temperaturo na območju ARO1 (slika 7.4)



Slika 7.4: Območje/površina ARO1: $T_{povp} = 0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zunanja temperatura: $T_{zunaj} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Odčitek na površini ARO1: $T_{si, povp} = 0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Razlika temperatur: $\Delta T = 0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Toplotni tok sem izračunala po enačbah, navedenih v poglavju Prenos toplote, za kondukcijo (enačba 6), konvekcijo (enačba 9) in sevanje (enačba 11):

1. TOPLOTNI TOK KONDUKCIJE: $q_{kondukcije} = \lambda \frac{\Delta T}{d}$,

kjer so:

λ toplotna prevodnost zraka: $0,028 \text{ W/mK}$,

d debelina mejne plasti zraka: 3 cm ,

ΔT temperaturna razlika med zunanjim zrakom in površinsko temperaturo stene.

$$q_{kondukcije} = 0,028 \frac{0,8}{0,03} = \underline{0,8 \text{ W/m}^2}$$

2. TOPLOTNI TOK KONVEKCIJE: $q_{konvekcije} = \alpha_k \Delta T = a \frac{\Delta \theta}{L}^b \Delta T$,

kjer je:

a $\frac{\Delta \theta}{L}^b$ koeficient toplotne prestopnosti: $1,4 \Delta T^{1/4}$.

$$q_{konvekcije} = \alpha_k \Delta T = 1,4 \frac{0,8}{1}^{\frac{1}{4}} 0,8 = \underline{1,1 \text{ W/m}^2}$$

3. TOPLOTNI TOK RADIACIJE: $q_r = \alpha_{radiacije} \Delta T = 4\varepsilon\sigma T_{si}^3 \Delta T$

kjer so:

ε emitivnost stene: 0,92,

σ Štefanova konstanta: $5,67 \times 10^{-8}$,

T_{si} absolutna površinska temperatura stene: 273,8 K.

$$q_r = 4\varepsilon\sigma T_{si}^3 \Delta T = 4 \times 0,92 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 273,8^3 \times 0,8 = \underline{3,4 \text{ W/m}^2}$$

TOTALNI TOPLOTNI TOK

$$q_{totalni,ARO1} = 0,8 + 1,1 + 3,4 = \underline{5,3 \text{ W/m}^2}$$

TOPLOTNA PREHODNOST

Toplotno prehodnost zunanje stene na območju ARO1 izračunam iz enačbe:

$$q_{totalni,ARO1} = U \times \Delta T \tag{30}$$

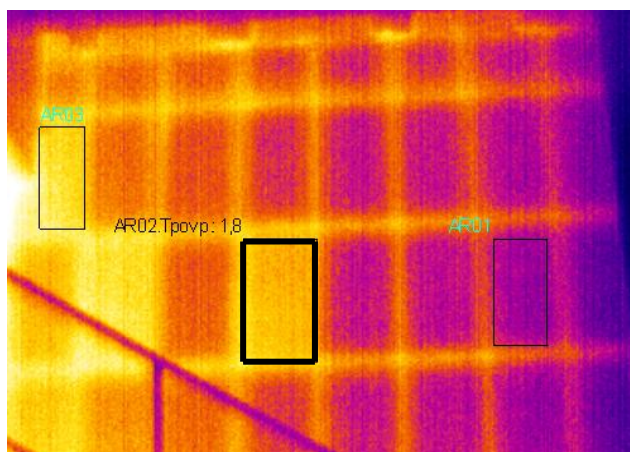
kjer je ΔT razlika med notranjo (22 °C) in zunanjo (0 °C) temperaturo zraka.

$$U = \frac{q_{totalni,ARO1}}{\Delta T} \tag{31}$$

$$U = \frac{5,3}{22} = \underline{\underline{0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}}}$$

7.2.2 Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO2

V območju ARO2 je prišlo do poškodbe VIP panela pri vgradnji dodatne toplotne izolacije na fasado enodružinske hiše. Temperaturna razlika med nepoškodovanim in poškodovanim panelom je zelo majhna ($\Delta T_{panelov} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Za račun toplotnega toka v območju ARO2 sem ravno tako uporabila enačbo 19, razlika je le v tem, da je ΔT različen, zaradi višje površinske temperature na območju toplotnega mostu – ARO2 na termogramu (slika 7.5)



Slika 7.5: Območje/površina ARO2: $T_{povp} = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zunanja temperatura: $T_{zunaj} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Odčitek na površini ARO2: $T_{si,povp} = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Razlika temperatur: $\Delta T = 1,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$q_{totalni,ARO1} = q_{kondukcije} + q_{konvekcije} + q_{radiacije}$$

$$q_{kondukcije} = 0,028 \times \frac{1,8}{0,03} = \underline{\underline{1,7 \text{ W/m}^2}}$$

$$q_{konvekcije} = 1,4 \times \frac{1,8}{1}^{\frac{1}{4}} \times 1,8 = \underline{\underline{2,5 \text{ W/m}^2}}$$

$$q_{radiacije} = 4 \times 0,92 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 274,8^3 \times 1,8 = \underline{\underline{7,8 \text{ W/m}^2}}$$

TOTALNI TOPLOTNI TOK

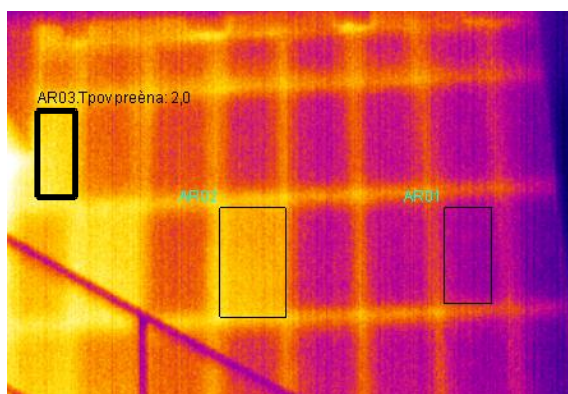
$$q_{totalni,ARO2} = 1,7 + 2,5 + 7,8 = 12 \text{ W/m}^2$$

TOPLOTNA PREHODNOST:

$$U = \frac{12}{22} = \underline{0,54 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

7.2.3 Račun toplotnega toka v območju površine fasade označene z ARO3

V območju površine ARO3 kompozitna plošča dodatne toplotne izolacije ni bila sestavljena kot vse ostale kompozitne plošče, ki sestavljajo konstrukcijski sklop zunanje stene (neopor – VIP panel – neopor). Sestava celotne debeline plošče v območju ARO3 je NEOPOR (4 cm).



Slika 7.6: Območje/površina ARO3: $T_{povp} = 2,0^\circ\text{C}$

Zunanja temperatura: $T_{zunaj} = 0^\circ\text{C}$

Odčitek na površini ARO3: $T_{si,povp} = 2^\circ\text{C}$

Razlika temperatur: $\Delta T = 2^\circ\text{C}$

$$q_{totalni,ARO1} = q_{kondukcije} + q_{konvekcije} + q_{radiacije}$$

$$q_{kondukcije} = 0,028 \times \frac{2}{0,03} = \underline{1,9 \text{ W/m}^2}$$

$$q_{konvekcije} = 1,4 \times \frac{2}{1}^{\frac{1}{4}} \times 2 = \underline{2,8 \text{ W/m}^2}$$

$$q_{radiacije} = 4 \times 0,92 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 275^3 \times 2 = \underline{8,7 \text{ W/m}^2}$$

TOTALNI TOPLLOTNI TOK

$$q_{totalni,ARO3} = 1,9 + 2,8 + 8,7 = \underline{13,4 \text{ W/m}^2}$$

TOPLLOTNA PREHODNOST

$$U = \frac{13,4}{22} = \underline{0,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}}$$

Preglednica 5: Primerjava rezultatov po območjih (ARO1, ARO2, ARO3)

	KONDUKCIJA [W/m ²]	KONVEKCIJA [W/m ²]	RADIACIJA [W/m ²]	SUMA [W/m ²]	U [W/(m ² K)]
ARO1	0,8	1,1	3,4	5,3	0,24
ARO2	1,7	2,5	7,8	12,0	0,54
ARO3	1,9	2,8	8,7	13,4	0,61

7.3 Stacionaren prehod toplote skozi konstrukcijski sklop

V nadaljevanju sem za vsa tri označena območja na termogramu (ARO1, ARO2, ARO3) izračunala stacionarni prehod toplote skozi konstrukcijski sklop. Rezultate stacionarne analize sem primerjala z rezultati, izračunanimi na podlagi analize termogramov za vse tri površine zunanje fasade: ARO1, ARO2, ARO3.

7.3.1 Območje površine na termogramu z oznako ARO1

Del površine zunanje fasade, označeno ARO1 na termogramu, predstavlja dejansko sestavo konstrukcijskega sklopa (preglednica 6).

Preglednica 6: Konstrukcijski sklop zunanje stene (površina označena na termogramu z ARO1)

SESTAVA	dimenzije [m]	λ [W/(mK)]
notranji omet	0,030	1,000
opečni votlak	0,290	0,610
obstoječi omet	0,030	1,000
NEOPOR	0,005	0,032
VIP paneli	0,018	0,005
NEOPOR	0,017	0,032
omet	0,010	1,000

Za izračun toplotne prehodnosti sem uporabila podlogo (preglednica 7), ki smo jo obravnavali pri predmetu Stavbarstvo (Kristl, 2011). Toplotno upornost R in toplotno prehodnost U konstrukcijskega sklopa sem izračunala po enačbah (15) in (16), toplotno upornost materiala pa po enačbi (7) (poglavje Prehod toplote).

Preglednica 7: Celotna toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa (ARO1)

	material	d [m]	λ [W/(mK)]	R [m ² K/W]
α_i				0,13
1	omet	0,030	1,000	0,03
2	votla opeka	0,290	0,610	0,47
3	omet	0,030	1,000	0,03
4	NEOPOR	0,005	0,032	0,16
5	VIP panel	0,018	0,006	3,00
6	NEOPOR	0,017	0,032	0,53
7	omet	0,040	1,000	0,04
α_e				0,04
		R	4,43 [m ² K/W]	
		U	0,22 [W/(m ² K)]	

7.3.2 Območje površine na termogramu z oznako ARO2

Območje ARO2 na termogramu predstavlja mesto predrtega VIP panela. Na začetku tega poglavja sem opisala sestavo VIP panela. Zelo pomembno je, da VIP panela ne predremo, saj s tem pride v notranjost atmosferski zrak. Namesto izredno izolativnega vakuumsko izolacijskega panela učinkuje le notranje toplotnoizolacijsko jedro, ki je kratkovlaknasta porozna steklena volna brez polnil. Za potrebe analize predpostavim toplotno prevodnost notranjega jedra (NEOPOR). Toplotna prevodnost se tako zmanjša iz 0,006 (nepoškodovan VIP panel) na 0,030 [W/(mK)]. Do poškodbe VIP panela lahko pride pri montaži, ali v pa pride do napak v proizvodnji.

Preglednica 8: Celotna toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa (ARO2)

	material	d [m]	λ [W/(mK)]	R [m ² K/W]
α_i				0,13
1	omet	0,030	1,000	0,03
2	votla opeka	0,290	0,610	0,47
3	omet	0,030	1,000	0,03
4	NEOPOR	0,005	0,032	0,16
5	VIP panel - predrt	0,018	0,030	0,60
6	NEOPOR	0,017	0,032	0,53
7	omet	0,010	1,000	0,01
α_e				0,04
		R	2,00	[m ² K/W]
		U	0,50	[W/(m ² K)]

7.3.3 Območje površine na termogramu z oznako ARO3

V območju površine označene na termogramu ARO3, je namesto obravnavane kompozitne plošče, vgrajena 4 cm plošča NEOPORA.

Preglednica 9: Toplotna prehodnost dela konstrukcijskega sklopa na območju površine označene z ARO3

	material	d [m]	λ [W/(mK)]	R [m ² K/W]
α_i				0,13
1	omet	0,03	1,000	0,03
2	votla opeka	0,29	0,610	0,47
3	omet	0,03	1,000	0,03
4	NEOPOR	0,04	0,032	1,25
5	omet	0,01	1,000	0,01
α_e				0,04
		R	1,96 [m ² K/W]	
		U	0,51 [W/(m ² K)]	

7.4 Primerjava rezultatov

V preglednici 10 so prikazani rezultati izračunov gostote toplotnega toka za obravnavana območja: ARO1, ARO2, ARO3. Primerjani so rezultati pridobljeni na podlagi termograma in stacionarne analize.

Preglednica 10: Rezultati analize – gostota toplotnega toka

TOPLOTNI TOK			
OBMOČJE POVRŠINE STENE	ARO1	ARO2	ARO3
TERMOGRAM: q [W/m ²]	5,30	12,00	13,40
STACIONARNA ANALIZA: q [W/m ²]	4,84	11,00	11,22
DELEŽ Odstopanja: stacionarna analiza/termogram	9 %	9 %	19 %

V preglednici 11 so prikazane vrednosti toplotne prehodnosti skozi konstrukcijski sklop za obravnavana območja.

Preglednica 11: Rezultati analize – toplotna prehodnost

TOPLOTNA PREHODNOST			
OBMOČJE POVRŠINE STENE	ARO1	ARO2	ARO3
TERMOGRAM: $U [W/(m^2K)]$	0,24	0,54	0,61
STACIONARNA ANALIZA: $U [W/(m^2K)]$	0,22	0,50	0,51
DELEŽ Odstopanja: stacionarna analiza/termogram	9 %	9 %	19 %

KOMENTAR:

V obravnavani analizi sem opravila termografski pregled nad izvedeno dodatno toplotno izolacijo. Obstoječe stanje ni dovoljevalo večjih debelin kot 4 cm. V ta namen so bile na obstoječo fasado montirane 4 cm debele kompozitne plošče (neopor – VIP panel – neopor). Predhodno je bilo ugotovljeno, da je prišlo do poškodbe enega VIP panela in da je namesto ene kompozitne plošče vgrajena 4 cm debela plošča NEOPORJA. Meritve s termokamero so to dokazale. Po analizi termografskih posnetkov in izračuni analize ugotavljam sledeče:

Območje ARO1: po izračunih stacionarne analize je toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa 0,22 $[W/(m^2K)]$. Za konstrukcijski sklop s 4 cm toplotne izolacije je to zelo dober rezultat in dokazuje, da so VIP paneli zelo učinkovita toplotna izolacija. To potrjuje tudi analiza na podlagi termograma, pri kateri rezultati odstopajo od stacionarne analize za 9 % (0,24 $[W/(m^2K)]$). Pri obeh analizah nastopajo različni faktorji, ki lahko vplivajo na neujemanje oziroma odstopanja rezultatov:

- pri meritvah s termokamero so to: emitivnost in reflektirana temperatura, ki predstavljata neko ocenjeno vrednost. Na podlagi ocenjenih vrednosti kamero izračuna površinske temperature. Že pri majhnih razlikah spreminjanja emitivnosti ali reflektirane temperature, dobimo drugačne rezultate,
- pri računski analizi pa so vplivi neujemanja:
 - VIP paneli – bočni prenosi, ki so odvisni od velikosti plošč ($\lambda_{\text{povprečna}}$ in $\lambda_{\text{stacionarna}}$),
 - zračni žepi pod ploščami zaradi neenakomerne razporeditve lepila,
 - tip votličave opeke ni poznana,
 - točna debelina in sestava obstoječih ometov ni poznana.

Na podlagi analize v območju A,RO1 ARO2 in ARO3 ugotavljam, da je toplotna prehodnost povečana zaradi poškodbe VIP panela (ARO2) ter drugačne sestave plošče (ARO3). Rezultati analize termograma so pokazali, da se toplotna prehodnost v območju ARO3 ($0,61 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$) in ARO2 ($0,54 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$) razlikuje za slabih 10 %. To potrjuje predpostavko, da pri predrtem VIP panelu vzamem toplotno prevodnost notranjega jedra (preglednica 8). Prav tako pa dokazuje, da se pri predrtemu VIP panelu toplotna prehodnost močno poveča za kar 125 % ($0,25 - 0,54 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$). Rezultati termograma v območju površine ARO3 se od stacionarne analize razlikuje za 19 %, kar je tudi posledica bočnih prenosov masivne betonske plošče, ki je tik ob tem (vidno na termogramu - bolj intezitiran v območju ARO3).

8 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu sem se osredotočila na posledice toplotnih mostov, tako s stališča toplotnih izgub kot tudi poslabšanju človekovega bivalnega udobja v prostoru. Dandanes obstaja veliko rešitev, kako preprečiti toplotne mostove, oziroma zmanjšati na mejne vrednosti, ki naj ne bi povzročali težave. Tako obstajajo razni računalniški programi, ki temeljijo na standardu SIST EN ISO 10211: Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – Podrobni izračuni. Na podlagi numeričnega izračuna 2D in 3D toplotnega toka nam pri določenih robnih pogojih prikažejo vrednosti za določen konstrukcijski sklop. Poenostavljeno metodo in privzete vrednosti linijske toplotne prehodnosti ψ pa navaja standard SIST EN ISO 14683. Prav tako obstajajo atlasi toplotnih mostov, ki nam za določen konstrukcijski sklop in križanje podajajo vrednosti linijske toplotne prehodnosti ψ in temperaturnega faktorja fR_{si} .

Toplotni mostovi v ovoju stavbe kvarno vplivajo, na energetsko bilanco stavbe, materiale (opeka, omet) in povzročajo tveganja za dihalna obolenja (pljučni bronhitits TBC). Ti so še posebej izraziti v zimskem času, ko je na mestih toplotnih mostov povečan toplotni tok iz notranjih, toplih prostorov, proti zunanji, hladni okolici. Posledično je tudi bolj izrazito znižanje notranjih površinskih temperatur. Problem znižanja površinskih temperatur notranjih površin t. i. zaznavna temperatura, poleg povečanih toplotnih izgub in s tem večjih stroškov ogrevanja, omogoča nastanek kondenzacije in razvoj plesni, ki so tako z zdravstvenega vidika kot z vidika bivalnega udobja za človeka nesprejemljive.

Kljub mnogim raziskavam in rešitvam za toplotne mostove in večji osveščenosti uporabnikov stavb, ti še vedno ostajajo nerešeni. Za to so lahko krivi tako površno načrtovani detajli kot tudi nestrokovna izvedba. Pri dobro načrtovanih detajlih, kjer so gradbeno-fizikalni problemi pravilno rešeni in zadostni toplotni izolativnosti ovoja zgradbe ter ustrezni uporabi bivalnih pogojev, se neprijetne posledice toplotnih mostov ne bi smele pojaviti.

Eden izmed načinov odkrivanja toplotnih mostov je termografija. S termografskim pregledom objekta oziroma merjenja lahko ugotovljamo njihove površinske temperature, katere odčitamo na pridobljenih termogramih. V raziskovalnem delu diplomske naloge sem opravila termografski pregled potencialnih mest toplotnih mostov oziroma mest, kjer so se pojavili »pereči« problemi v ovoju stavbe. Termograme sem obravnavala v dveh sklopih. Prvi sklop sem prikaza v analizi notranjih površinskih temperatur, kjer sem posnela notranji termografski posnetek. Drugi sklop obravnava analizo povečanega toplotnega toka, kjer sem obravnavala zunanji termografski posnetek. V konkretnih

primerih oziroma stavbah, kjer sem obravnavala znižanje površinskih temperatur notranje stene na mestih toplotnih mostov, so rezultati analiz pokazali, da pridobljene vrednosti iz termogramov ne odgovarjajo minimalnim vrednostim za preprečevanje kondenzacije in plesni ter vrednostim temperaturnega faktorja notranje stene za doseganje toplotnega ugodja. Za nedoseganje zahtevanih vrednosti naštetih pogojev je krivo tako nestrokovno projektiranje kot tudi površna izvedba detajlov zunanega ovoja stavbe. V drugi analizi (izračun toplotnega toka, ki ga oddaja stena) pa sem opravila termografski pregled saniranega dela celotne zunanje stene. Rezultati analize so pokazale, da se pri predrtem VIP panelu toplotna prehodnost poveča za kar 125 %. Prav tako sem rezultate pridobljene iz analize termograma primerjala s izračunanimi vrednostmi stacionarne analize. Primerjava izmerjenih ter izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti in toplotnega toka je pokazala, da rezultati odstopajo za 9 %.

Pri kritični presoji slik moramo vedeti in razumeti, da na rezultate meritev/analiz vplivajo različni faktorji, tako pri termografskih meritvah kot pri stacionarnih izračunih. Pri termografskih meritvah moramo upoštevati, oziroma se zavedati možnost napak zaradi faktorja emitivnosti in reflektirane temperature, ki sta zelo pomembna za pravilno interpretiranje termogramov. Za določanje emitivnosti obstajajo različne tabele iz katerih odčitamo pripadajočo vrednost za merjen objekt/površino. Vendar moramo paziti, da so vrednosti iz tabele podane za isto valovno dolžino, v katerem deluje tudi naša termokamera, s katero merimo objekt. Prav tako je pri termografskih meritvah zelo pomembna pravilno izmerjena reflektirana temperatura (navidezna temperatura kateregakoli telesa, ki se reflektira v naš merjenec in nato od njega v kamero), ki jo vnesemo v termokamero. Na neujemanje izmerjenih (termogrami) in računskih (stacionarnih) rezultatov pa vplivajo tako zgoraj navedeni faktorji kot tudi faktorji, ki vplivajo na stacionarno analizo. Na primer bočni prenos, ki jih pri stacionarni analizi ne zajamemo, se pa lahko pojavijo v realnem času in so vidni na termografskih posnetkih (primer v sedmem poglavju, območje ARO3).

Zaradi nastalih problemov v ovoj stavbe, ki sem jih obravnavala v analizah, je bilo moteno tako uporabnikovo bivalno ugodje kot tudi varčna poraba energije. S tem sta bili kršeni dve od sedmih osnovnih zahtev po Uredbi (EU) št. 305/2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov in razveljavitvi Direktive Sveta 89/106: osnovna zahteva 3 - higienske in zdravstvene zaščite in osnovna zahteva 6 - varčevanja z energijo in ohranjanja toplote.

Po končanem raziskovalnem delu diplomske naloge lahko zaključim, da je uporaba termografije v gradbeništvu zelo uporabna in koristna. Z vidika ugotavljanja anomalij v ovoj zgradbe, lahko hitro in nekontaktno pridobimo sliko porazdelitve površinskih temperatur. Z ustrezno razlago pri posnetih

toplotnih slikah, lahko analiziramo/ocenjujemo nastali problem in tako podamo vidni dokaz površinski temperatur, ki je očem neviden. Obenem pa je bolj razumljiv za ljudi oziroma za uporabnike stanovanj. Termografijo lahko uporabimo pri sanaciji objektov, z njo lahko ugotovimo problematična mesta, katerim moramo posvetiti veliko pozornosti, za odpravo le-teh. Prav tako je zelo koristna za zagotavljanje kakovosti, primer druga analiza v 7. poglavju, kjer sem opravila termografski pregled nad izvedeno dodatno toplotno izolacijo in ugotovila, da je na mestu vgradnje prišlo do poškodbe VIP panela. Menim, da je uporaba termografije pri nizkoenergetskih hišah z vidika zagotavljanja kakovosti zelo koristna. Te vrste stavb morajo izpolnjevati visoke standardne kriterije, kjer niti najmanjše napake niso dovoljene. V primeru nastalih napak bi bil termični indeks na toplotnih slikah zelo viden. Tako bi veliko hitreje odpravili oziramo sanirali del, ki predstavlja anomalijo v ovojni stavbe, še preden bi lahko prišlo do posledic za uporabnika stavbe.

VIRI

Catalogue des ponts thermiques.

www.lesosai.com/download/Warmebruckenkatalog_f.pdf (Pridobljeno 23.9.2011)

Evropska komisija. Ukrepi za podnebje. Ukrepi EU v zvezi s podnebnimi spremembami.

http://ec.europa.eu/climateaction/eu_action/index_sl.htm (Pridobljeno 15.10.2011.)

FLIR. Thermal Imaging for Medical Applications.

<http://www.flir.com/thermography/APAC/en/content/?id=13908> (Pridobljeno 15.10.2011.)

Jordan, S. 1997. Analiza vpliva toplotnih mostov na specifične transmisijske toplotne izgube zgradb. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 120 str.

Jordan, S., Knez, F., 2009. Vlaga v stavbah zaradi kondenzacije. Ljubljana, Verlag Dashöfer: 32 str.

Hauser, G., Stiegel, H. 2006. Wärmebrückenkatalog für Modernisierungs – und Sanierungsmassnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag: 201 str.

Hens, H. 2007. Building Physics – Heat, Air, Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises. Berlin, Ernst & Sohn: 270 str.

Infrardeča termografija. Stopnja 1. Izobraževalni tečaj (zbirka Dobrodošli v ITC). 2005. Ljubljana, ITC, 193 str.

MOVE – delavnica. Energetsko učinkovita gradnja in obnova. 2011. Velenje, KSSENA, Zavod energetska agencija za Savinjsko, Šaleško in Koroško.

Kibert, C. J. 2008. Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery. Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons: 407 str.

Krainer A., Galonja S. 2010. PURES 2010 – možnosti in priložnosti.

www.finance.si/297916/PURES_2010_mo%9Enosti_in_prilo%9Enosti

(Pridobljeno 11.10.2011.)

Krainer A. 2009. Enostransko varčevanje z energijo: pasivna hiša in trajnostni razvoj. *Delo (Ljubl.)* 12. mar. 2009, 51, 59: str 16

Krainer A., Košir M., Kristl Ž., Dovjak M. 2008. Pasivna hiša proti bioklimatski hiši = Passive house versus bioclimatic house. Ljubljana (Karlovska 3). Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije.

Kristl, Ž. 2011. Stavbarstvo. Zapiski skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente. 217 str.

Kunič, R. 2009. Mehanizem prehoda toplote skozi konstrukcijske sklope v stavbah (1. del)

www.fragmat.si/download/.../Gradbenik%20Prehod%20toplote_1.pdf

(Pridobljeno 1.10.2011.)

Miloradović, N. 2009. Termični aspekti gradnje kuća: Istorijat i perspektive Prilog održivom razvoju. Beograd, Građevinska knjiga: 210 str.

Mittag, M. 2000. Građevinske konstrukcije. Priručnik za graditelja o konstruktivnim sistemima, građevinskim elementima i načinima gradnje. Sa nemačkim normama i tehničkim građevinskim odredbama. Beograd, Građevinska knjiga: 586 str.

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

Toplinski mostovi. Ytong sustav gradnje.

www.ytong.hr/hr/docs/Toplinski_mostovi_08_2011.pdf (Pridobljeni 28.9.2011)

Tršan, N. 2011. Termografija. Osebna komunikacija.

Pravilniki in standardi:

Direktiva 2010/31/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19. Maja o energetske učinkovitosti stavb. Ur l. EU, št. 153

UREDBA (EU) št. 305/2011 EVROPSKEGA PARLAMENTA IN SVETA z dne 9. Marca 2011 o določitvi usklajenih pogojev za trženje gradbenih proizvodov in razveljavitvi Direktive Sveta 89/106/EGS. Ur l. EU, št. 88/5.

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Ur l. RS, št. 52/2010.

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. Ur l. RS, št. 42/2002.

SIST EN ISO 13790:2008 – Toplotne značilnosti stavb – Računanje potrebne energije za ogretje in hlajenje prostora

SIST EN ISO 13789:2008 – Toplotne značilnosti stavb – Toplotni koeficienti pri prenosu toplote in prezračevanja – Računsko metoda (ISO 13789:2007)

SIST EN ISO 6946:2008 – Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računsko metoda (ISO 6946:2007)

SIST EN ISO 10211:2008 – Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – podrobni izračuni (ISO 10211:2007)

