

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE STOPNJE
STAVBARSTVO**

Kandidatka:

NUŠA PINTAR GREBENC

**MERJENA IN IZRAČUNANA TOPLOTNA
PREHODNOST TOPLOTNIH OVOJEV IZBRANIH
STAVB UNIVERZE V LJUBLJANI**

**MEASURED AND CALCULATED THERMAL
TRANSMITTANCE OF BUILDING ENVELOPES OF
SELECTED BUILDINGS OF LJUBLJANA UNIVERSITY**

Mentor:

doc. dr. Mitja Košir

Predsednik komisije:

Somentor:

asist. Luka Pajek

Član komisije:

Ljubljana, _____

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 697.133:727:378.4(497.4)(043)
Avtor: Nuša Pintar Grebenc
Mentor: doc. dr. Mitja Košir
Somentor: asist. Luka Pajek
Naslov: Merjena in izračunana toplotna prehodnost toplotnih ovojev izbranih stavb Univerze v Ljubljani
Tip dokumenta: Magistrsko delo – B.
Obseg in oprema: 91 str., 37 pregl., 37 sl., 31 graf., 11 en.
Ključne besede: energetska učinkovita stavba, konstrukcijski sklop, toplotni tok, toplotna prehodnost, *in-situ* meritev

Izvleček

Na energetska učinkovitost posamezne stavbe vpliva veliko dejavnikov. Med drugim na toplotni odziv stavbnega ovoja in porabo energije v stavbi vplivajo sestava konstrukcijskih sklopov in njihove lastnosti. Za določitev toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov se skoraj vedno uporabljajo računske metode, ki do določene mere poenostavljajo realno situacijo in posledično predstavljajo »idealizirano« stanje. V želji po kar se da pravilni oceni energetskega odziva obstoječih stavb lahko toplotno prehodnost stavbnega ovoja določimo tudi z merilno napravo in pripadajočo meritvijo *in-situ*.

V magistrskem delu sta predstavljeni obe metodi. Primerjava med toplotno prehodnostjo stavbnega ovoja, pridobljena s pomočjo *in-situ* meritev, in toplotno prehodnostjo, določeno s pomočjo inženirske ocene in računske metode, je bila osnova za oceno razlike toplotne prehodnosti in identifikacijo potencialnega vpliva na določitev energetske učinkovitosti obravnavanih stavb Univerze v Ljubljani. Rezultati so pokazali, da so razlike pri večini stavb prisotne. Pri zunanjih stenah se je izkazalo, da je povprečna vrednost razlike med izračunano in merjeno vrednostjo 44-odstotna, pri strehah pa kar 99-odstotna. Posledično to privede do nadaljnjih razlik pri izračunu potrebne energije (v našem primeru znaša $\Delta Q_T 15 = \text{kWh/m}^2\text{a}$) za delovanje stavbe, kar opozarja na dejstvo, da toplotna prehodnost v precejšnji meri vpliva tudi na energetska učinkovitost stavbe.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 697.133:727:378.4(497.4)(043)
Author: Nuša Pintar Grebenc
Supervisor: Assist. Prof. Mitja Košir, Ph. D.
Cosupervisor: Assist. Luka Pajek
Title: Measured and calculated thermal transmittance of building envelopes of selected buildings of Ljubljana University
Document type: M. Sc. Thesis
Scope and tools: 91 p., 37 tab., 37 fig., 31 graph., 11 eq.
Keywords: energy efficient building, constructional element, heat flux, thermal transmittance, *in-situ* measurement

Abstract

Many factors influence on the energy efficiency of each building. Among other things, the composition of the structural elements and their properties are the influencing factors of thermal response of the building envelope and building's energy consumption. With calculation methods we can determine the thermal transmittance of the constructional element, although they simplify the real situation and represent »idealized« condition to some extent. With a purpose to evaluate the energy consumption of selected buildings in more realistic way, it is able to determine the thermal transmittance also with measuring device and its belonging *in-situ* measurement.

In this thesis we represent the comparison between the thermal transmittance of building envelopes, obtained by using the *in-situ* measurement and by using calculation methods. The comparison between those two methods was the source for evaluation of the existing difference of thermal transmittance. Based on this, we identified the potential impact of the energy efficiency in selected buildings of Ljubljana University. We found that the average difference of external walls is 44-percentage and the difference in roof measurements is 99-percentage. Consequently, there comes to the difference in calculation of required energy for building operation (in our case amounts $\Delta Q_T 15 = \text{kWh/m}^2\text{a}$). This highlights the fact that the thermal transmittance in considerable extent influences on energy consumption of the building.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Iskrena zahvala je namenjena doc. dr. Mitji Koširju za priložnost opravljanja magistrskega dela na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente. Hvala za vso strokovno pomoč, usmerjanje pri opravljanju magistrskega dela ter sproščeno delovno okolje. Hvala tudi asist. Luki Pajku za somentorstvo, dane nasvete in tehnično pomoč v času izvajanja meritev.

Iskrena hvala osebju Fakultete za arhitekturo, Fakultete za kemijo in kemijsko tehnologijo in Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, ki mi je omogočilo in je bilo v podporo tekom praktičnega dela naloge.

Iz srca se zahvaljujem tudi mami, očetu in sestri za moralno in finančno podporo, spodbudo in pozitivno energijo, s katero so me spremljali skozi celoten študij. Zahvaljujem se tudi Andražu, ker mi je stal ob strani, se z mano veselil, ko je šlo vse po načrtih in celoten čas verjel vame. Zahvaljujem se tudi ostalim najbližjim, ki so mi na kakršenkoli način pomagali.

Hvala vsem!

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA	VII
1 UVOD	1
1.1 Nameni in cilji.....	2
1.2 Metode dela in struktura naloge	2
1.3 Delovne hipoteze	3
2 PREGLED ZAKONODAJE IN LITERATURE.....	5
3 PRENOS TOPLOTE IN TOPLOTNA PREHODNOST	11
3.1 Toplotna prehodnost.....	13
4 METODE IN ORODJA.....	15
4.1 Metoda za izračun toplotne prehodnosti po standardu SIST EN ISO 6949	15
4.1.1 Programska oprema.....	17
4.2 Metoda za merjenje toplotne prehodnosti po standardu ISO 9869-1	17
4.2.1 Uporabljena merilna oprema	19
5 PREDSTAVITEV IZBRANEGA STAVBNEGA FONDA.....	25
5.1 Vzorčni objekti	25
6 IZRAČUN TOPLOTNE PREHODNOSTI	33
7 MERITEV TOPLOTNE PREHODNOSTI.....	41
8 ANALIZA REZULTATOV	70
8.1 Primerjava izračunane in merjene toplotne prehodnosti.....	70
8.1.1 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti zunanjih sten	72
8.1.2 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti streh	75
8.2 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti glede na starost objekta	77

8.3	Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na stran neba	79
8.4	Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na dolžino časovnega obdobja meritve	80
9	VPLIV TOPLOTNE PREHODNOSTI NA ENERGETSKO UČINKOVITOST STAVBE..	81
10	ZAKLJUČEK	87
VIRI		89

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Najvišja dovoljena toplotna prehodnost gradbene konstrukcije [3].	6
Preglednica 2: Povzetek pregleda izbranih raziskav	8
Preglednica 3: Toplotna upornost pri prestopu toplote [11].	16
Preglednica 4: Toplotna upornost zračne plasti, ki je neprezračevana [11].	16
Preglednica 5: Seznam obravnavanih objektov.	25
Preglednica 6: Predstavitev objekta FGG – sedež fakultete.	27
Preglednica 7: Predstavitev objekta FGG – računovodstvo.	27
Preglednica 8: Predstavitev objekta FGG – oddelek za hidrotehniko.	28
Preglednica 9: Predstavitev objekta FA – stari del stavbe.	28
Preglednica 10: Predstavitev objekta FA – prizidek.	29
Preglednica 11: Predstavitev objekta FKKT.	29
Preglednica 12: Seznam vzorčnih konstrukcijskih sklopov.	31
Preglednica 13: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – sedež fakultete.	34
Preglednica 14: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – računovodstvo.	36
Preglednica 15: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – oddelek za hidrotehniko.	37
Preglednica 16: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FA – stari del.	38
Preglednica 17: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FA – prizidek.	39
Preglednica 18: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FKKT.	40
Preglednica 19: ID 1.1. Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	43
Preglednica 20: ID 1.2 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	45
Preglednica 21: ID 1.3- Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	47
Preglednica 22: ID 1.4 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	49
Preglednica 23: ID 2.1 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	51
Preglednica 24: ID 3.1 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].	53
Preglednica 25: ID 3.2 – Vremenske spremenljivke tekom meritve [28].	55
Preglednica 26: ID 4.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	57
Preglednica 27: ID 4.2 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	59
Preglednica 28: ID 5.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	61
Preglednica 29: ID 5.2 – Vremenske spremenljivke med meritvami [28].	63
Preglednica 30: ID 6.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	65
Preglednica 31: ID 6.2 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	67

Preglednica 32: ID 6.3 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].	69
Preglednica 33: Rezultati merjene in izračunane toplotne prehodnosti.....	70
Preglednica 34: Toplotna prevodnost različnih vrst polne opeke.	73
Preglednica 35: Toplotna prevodnost različnih vrst malte.....	75
Preglednica 36: Podatki o projektu.....	82
Preglednica 37: Toplotne lastnosti drugih konstrukcijskih sklopov [29].....	82

KAZALO SLIK

Slika 1: Prerez konstrukcijskega elementa [21].	13
Slika 2: Merilniki toplotnega toka [26].	19
Slika 3: Temperaturni senzor [26].	20
Slika 4: Data Logger [26].	20
Slika 5: Merilna naprava za meritev toplotne prehodnosti.	21
Slika 6: Postavitev merilnika toplotnega toka na notranjo stran prostora.	22
Slika 7: Namestitev temperaturnega senzorja na zunanji strani.	23
Slika 8: Kronološki pregled vzorčnih objektov.	26
Slika 9: FGG -sedež fakultete [25]	27
Slika 10: FGG - računovodstvo	27
Slika 11: FGG - oddelek za hidrotehniko [31]	28
Slika 12: FA - stari del [25]	28
Slika 13: FA - prizidek [25]	29
Slika 14: FKKT [25]	29
Slika 15: ID 1.1 Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	42
Slika 16: ID 1.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	44
Slika 17: ID 1.3- Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	46
Slika 18: ID 1.4 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	48
Slika 19: ID 2.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	50
Slika 20: ID 3.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno)	52
Slika 21: ID 3.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	54
Slika 22: ID 4.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	56
Slika 23: ID 4.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	58
Slika 24: ID 5.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	60

Slika 25: ID 5.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	62
Slika 26: ID 6.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	64
Slika 27: ID 6.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	66
Slika 28: ID 6.3 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).	68
Slika 29: Prikaz dejanske in poenostavljene oblike opečne stene.	74
Slika 30: Tloris tipične etaže stavbe FGG – sedež fakultete [29].	81
Slika 31: Prerez stavbe FGG- sedež fakultete [29].	81

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Število posameznih konstrukcijskih sklopov.....	30
Grafikon 2: ID 1.1-Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) in merjena toplotna prehodnost (spodaj).....	42
Grafikon 3: ID 1.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	44
Grafikon 4: ID 1.3 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	46
Grafikon 5: ID 1.4 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	48
Grafikon 6: ID 2.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	50
Grafikon 7: ID 3.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	52
Grafikon 8: ID 3.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	54
Grafikon 9: ID 4.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	56
Grafikon 10: ID 4.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	58
Grafikon 11: ID 5.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	60
Grafikon 12: ID 5.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	62
Grafikon 13: ID 6.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	64
Grafikon 14: ID 6.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	66
Grafikon 15: ID 6.3 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).	68
Grafikon 16: Ustreznost merjene in izračunane toplotne prehodnosti glede na zahteve iz PURES 2010.	71
Grafikon 17: Merjena in izračunana toplotna prehodnost zunanjih sten.	72
Grafikon 18: Odvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od sloja zraka pri primeru ID 1.1.....	73

Grafikon 19: Odvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od izbora lastnosti polne opeke pri primeru ID 2.1.....	74
Grafikon 20: Odvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od izbora malte pri primeru ID 2.1.....	75
Grafikon 21: Merjena in izračunana toplotna prehodnost streh.....	76
Grafikon 22: Primerjava toplotne prehodnosti glede na temperaturo zunanjega zraka pri primeru ID 3.2.....	77
Grafikon 23: Razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo zunanjih sten glede na starost objektov.....	78
Grafikon 24: Razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo streh glede na starost objekta.....	79
Grafikon 25: Merjena toplotna prehodnost glede na stran neba.....	79
Grafikon 26: Merjena toplotna prehodnost glede na dolžino časovnega obdobja meritve.....	80
Grafikon 27: Potrebna toplota za ogrevanje.....	83
Grafikon 28: Transmisijske izgube v času ogrevanja.....	83
Grafikon 29: Transmisijske izgube v času hlajenja.....	84
Grafikon 30: Potrebni hlad za hlajenje.....	84
Grafikon 31: Skupna potrebna energija.....	85

SIMBOLI

A – površina elementa fasadnega ovoja [m^2]

d – debelina sloja [m]

U – toplotna prehodnost elementa [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

λ – toplotna prevodnost materiala [$\text{W}/(\text{mK})$]

q – gostota toplotnega toka [W/m^2]

R – toplotna upornost sloja [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$]

R_{si} – toplotna upornost prestopa toplote na notranji strani [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$]

R_{se} – toplotna upornost prestopa toplote na zunanji strani [$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$]

T_{ij} – temperatura notranjega zraka [K]

T_{ej} – temperatura zunanjega zraka [K]

»Ta stran je namenoma prazna«

OKRAJŠAVE

EN – Evropski standard

EPBD-r – Direktiva o energetske učinkovitosti stavb - prenovljena

EU – Evropska unija

FA – Fakulteta za arhitekturo

FGG – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

FKKT – Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

ISO – Mednarodno združenje za standardizacijo

PURES 2010 – Pravilnik o učinkoviti rabi energiji v stavbah [8]

SIST – Slovenski inštitut za standardizacijo

TSG4 – Tehnična smernica za graditev - učinkovita raba energije [3]

UL – Univerza v Ljubljani

»Ta stran je namenoma prazna«

RAZLAGA POJMOV

Energetsko učinkovita stavba – omogoča zmanjšano rabo energije v stavbi in povečanje deleža obnovljivih virov energije oziroma uporabo sodobnih tehnologij, ki zahtevajo manj energije za doseganje enakih ciljev [2].

In-situ meritev – meritev na mestu oziroma meritev na lokaciji ob realnih, nestacionarnih pogojih [5].

Konstrukcijski sklop/element – je sestavni del stavbnega ovoja. Poznamo horizontalne – streha in tla ter vertikalne – zunanja stena [4].

Stavbni ovoj – ali ovoj stavbe predstavljajo vsi konstrukcijski elementi stavbe, ki ščitijo notranjost pred zunanjimi vplivi [4].

Toplotna prehodnost [W/m^2K] – nam pove, kolikšen toplotni tok (W) preteče pri stacionarnih pogojih skozi konstrukcijski sklop površine $1 m^2$ pri temperaturni razliki 1 K na obeh straneh zidu [18].

Toplotna prevodnost [W/mK] – je osnovna lastnost materiala, določena pri srednji delovni temperaturi (K) in vlažnosti materiala (%) [3].

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Energija predstavlja enega izmed osnovnih gradnikov za normalno življenje [1]. Ker v naravi energija ni na voljo v neomejenih, človeku za uporabo primernih količinah, je dandanes svet vse bolj ozaveščen o potrebah varčevanja z energijo in problematiki prekomernih izpustov toplogrednih plinov. Na to namreč opozarja tudi dejstvo, da stavbe v Evropski uniji (v nadaljevanju EU) predstavljajo kar 40 % skupne porabe energije, ki jo potrebujejo za delovanje in oskrbo [2]. Z večanjem stavbnega sektorja in posledično večanjem porabe energije je logična posledica, da moramo z energijo ravnati v smislu skrbnega gospodarja in zmanjšati porabe energije ter povečati izkoriščenje obnovljivih virov. Oblikovanje energetske učinkovitih stavb je torej nujno in ima pri varčevanju z energijo velik vpliv.

Na energetske bilanco stavbe vplivajo predvsem lokacija in podnebje, značilno za specifično lokacijo, navade uporabnikov, inštalacije, ki so v objekt vgrajene, in navsezadnje sam toplotni ovoj stavbe. Zato moramo biti ob zasnovi energetske učinkovite stavbe pozorni predvsem na ustrezno orientiranost objekta, ugodno razmerje med površino toplotnega ovoja in kondicionirano prostornino, na optimalno razporejenost prostorov in, da celotni ovoj stavbe s svojimi vgrajenimi materiali omogoča učinkovito upravljanje z energijskimi tokovi [3]. Tako je ovoj stavbe ali t. i. »zaščitna koža«, ki vključuje netransparentne (npr. zunanja stena, streha in talna plošča s temelji) in transparentne elemente (npr. okna in vrata) eden od dejavnikov, ki je bistven pri doseganju energetske učinkovitosti stavbe [4]. Na toplotni odziv stavbnega ovoja in porabo energije v stavbi tako bistveno vpliva sestava stavbnega ovoja – konstrukcijskih sklopov in njihove lastnosti [5]. Energetska učinkovitost posamezne stavbe je med drugim odvisna tudi od vrste materiala, ki sestavlja stavbni ovoj, in njegove debeline [5]. Vrsta materiala namreč predpisuje lastnosti materiala (kot so toplotna prevodnost, gostota in toplotna kapaciteta), ki imajo glavni vpliv na toplotni odziv stavbe. Le s pravim izborom materialov in njihovimi ustreznimi lastnostmi lahko namreč dosežemo energetske učinkovite stavbe. Bistvenega pomena pri izračunu energetske bilance obstoječe stavbe je natančna ocena njenega delovanja. Pri stavbnem ovoju to pomeni, da moramo znati, kar se da natančno opredeliti toplotno prehodnost konstrukcijskih sklopov. Toplotna prehodnost je namreč temeljni parameter za določanje toplotnih izgub stavbnega ovoja [5].

Za določitev toplotne prehodnosti gradbenih elementov se skoraj vedno uporabljajo računske metode. Te uporabljajo določene poenostavitve oziroma na neki način »idealizirajo realnost«. Poleg poenostavljenih okoljskih pogojev, ki jih v numeričnih simulacijah predpostavimo, za izračun toplotne prehodnosti potrebujemo snovne lastnosti materialov, ki so določene v laboratorijih ob nadzorovanih idealnih pogojih. Okolje, v katerega je pozneje material vgrajen, seveda predstavlja vse drugo, le idealnih pogojev ne. Ne samo, da se sestavni deli ovoja stavbe dinamično odzivajo na spreminjajoče se pogoje v notranjih prostorih, temveč nanje močno vplivajo tudi zunanji pogoji (kot so padavine, veter, relativna vlažnost ...). Vsi ti dejavniki nas opozarjajo na dejstvo, da obstaja velika možnost razlike dejanske toplotne prehodnosti posameznega dela stavbnega ovoja v primerjavi z vrednostjo, ki je bila predvidena oziroma ocenjena v fazi projektiranja s pomočjo programske opreme. S tem v postopek določitve energetske učinkovitosti stavbe uporabnikom vnaša veliko stopnjo negotovosti. Vsekakor nam to predstavlja še nekoliko večjo težavo, ko želimo toplotno prehodnost določiti na že obstoječih stavbah. Tu se namreč pojavijo dodatne negotovosti glede dejansko vgrajenih materialov, zato se načrtovalci ob pomanjkanju zanesljive

dokumentacije velikokrat zanesejo kar na inženirsko oceno sestave vgrajenih materialov stavbnega ovoja.

Vse te neznanke nam pri določanju energetske učinkovitosti stavbe predstavljajo velik pomislek o pravilnosti izračunane toplotne prehodnosti. Kljub zavedanju prisotnosti pomanjkljivosti in nepravilnosti, na žalost velikosti napake pri metodi za izračun toplotne prehodnosti ne znamo oceniti. Ker je toplotna prehodnost stavbnega ovoja ključen podatek pri določitvi energetske učinkovitosti stavbe, je njena pravilna določitev izjemno pomembna [6]. V želji po kar se da pravilni oceni delovanja že obstoječe stavbe je torej zelo priporočljivo toplotno prehodnost stavbnega ovoja določiti z meritvami. To dejstvo bi se znalo izkazati za zelo koristno zlasti v visoko učinkovitih stavbah, kot so skoraj nič energijske stavbe, saj bi lahko merjena toplotna prehodnost (zlasti, če je precej višja od deklarirane) vplivala na dejansko učinkovitost stavbe in bi lahko ogrozila svojo analizo gospodarskih stroškov in koristi [5].

Da bi torej znali pravilno zasnovati obnovo že obstoječih stavb in določiti ukrepe, ki bi vodili v energetsko učinkovite stavbe, moramo vsekakor najprej opraviti meritev toplotne prehodnosti stavbnega ovoja. Le s pravilno zasnovano obnovo stavb je moč pripraviti pravilen načrt sanacije objekta in zagotoviti optimalno delovanje stavbe v želji po doseganju bistvenih prihrankov pri energiji in zmanjšanju izpustov toplogrednih plinov.

1.1 Nameni in cilji

Glavni namen tega magistrskega dela je oceniti razliko toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov med rezultati, pridobljenimi z računsko in *in-situ* metodo, ter posledično prikazati vpliv napake na energetsko učinkovitost. V primeru razlik bi opozorili na dejansko stanje stavbnega fonda in omogočili pravi pristop do strateškega doseganja ciljev energetske politike. Primerjava med vrednostma bi lahko bila tudi osnova za iskanje potencialnega vpliva na določitev energetske učinkovitosti obravnavanih stavb.

Predmet obravnave v tem magistrskem delu bodo izbrani objekti Univerze v Ljubljani (v nadaljevanju UL). Z identifikacijo odstopanj med merjenimi in izračunanimi toplotnimi prehodnostmi, kar je tudi naš glavni cilj, bi omogočili določitev natančnega popisa stanja stavb. Ta bi bil lahko kasneje ključen za pripravo akcijskega načrta prenove stavb glede na energetsko strategijo UL [7].

1.2 Metode dela in struktura naloge

V želji po določitvi morebitnega odstopanja med izračunanimi in merjenimi toplotnimi prehodnostmi smo uporabili metodo *in-situ* meritve ali z drugimi besedami meritev na lokaciji samega objekta. S tem smo pridobili podatke o merjenih toplotnih prehodnostih, ki smo jih primerjali z izračunanimi, pridobljenimi z računalniško programsko opremo.

Pred tem smo si morali smiselno zastaviti sam potek naloge. Magistrsko delo smo tako za dosego želenih ciljev izvedli v naslednjih korakih:

1. korak:
pregled do sedaj že opravljenih raziskav, pregled zakonodaje (standardi in pravilniki) in izbor značilnih objektov UL;
2. korak:
pridobitev projektne dokumentacije vzorčnih stavb UL, določitev stavbnega ovoja s pomočjo le-te in izračun toplotne prehodnosti tipičnih konstrukcijskih sklopov;
3. korak:
terenska analiza izbranih konstrukcijskih sklopov s pomočjo termo kamere in meritev *in-situ* toplotne prehodnosti elementov stavbnega ovoja;
4. korak:
analiza rezultatov izračunane in merjene toplotne prehodnosti ter primerjava med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo konstrukcijskih sklopov.

Kakor je že v posameznih korakih predstavljeno, smo najprej preučili obširno strokovno literaturo, se seznanili z veljavno evropsko in nacionalno zakonodajo, ki se nanaša predvsem na energetske učinkovitost stavb, ter izbrali objekte, ki bi kronološko skozi zgodovino lahko predstavljali reprezentativni vzorec stavbnega fonda UL. Sledilo je pridobivanje projektne dokumentacije, za kar smo morali pristopiti na vsako fakulteto posebej in zaprositi za podatke, ki smo jih potrebovali. Tako smo namreč lahko izračunali toplotne prehodnosti posameznih konstrukcijskih sklopov, ki smo jih kasneje primerjali z merjenimi. Poleg analize rezultatov smo iskali tudi morebitne vzroke, zaradi katerih bi do razlik v rezultatih lahko tudi prišlo.

1.3 Delovne hipoteze

Hipoteze, ki smo jih želeli skozi delo, predstavljeno v magistrskem delu, preveriti, so:

1. Med izračunanimi in merjenimi toplotnimi prehodnostmi značilnih konstrukcijskih sklopov bo prišlo do odstopanj.
2. Sestava stavbnega ovoja (kompleksnost konstrukcijskega sklopa) bo vodila do večjih razlik med rezultati merjenih in izračunanih toplotnih prehodnosti.
3. Starost stavbe bo negativno vplivala na razliko med rezultati (bolj natančni izračuni bodo pri novejših stavbah).
4. Dejanska energetska učinkovitost stavb UL je boljša v primerjavi z energetsko učinkovitostjo, določeno s pomočjo računske metode.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 PREGLED ZAKONODAJE IN LITERATURE

V okviru magistrskega dela smo se opirali na nacionalno zakonodajo, ki nam pri načrtovanju nizkoenergijskih stavb in sanacijah obstoječih stavb nudi tako pravilnike kot standarde, ki nam postavljajo določena merila. Za določitev minimalnih zahtev glede energetske učinkovitosti stavb so namreč odgovorne same države članice EU [2].

Da bi skladno z Direktivo 2010/31/EU Evropskega parlamenta in Evropskega sveta z dne 19. maja 2010 o energetske učinkovitosti stavb (prenovitev) – EPBD-r., Uradni list Evropske unije, 18. junija 2010 (v nadaljevanju Direktiva 2010/31/EU) [2], ki od nas zahteva do 31. decembra 2020 popolno rekonstrukcijo stavbnega fonda, dosegli želene cilje, moramo slediti tudi Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah, Uradni list RS, št. 52/2010 z dne 30. junija 2010 (v nadaljevanju PURES 2010) [8] in Tehnični smernici za graditev TSG-1-004:2010 (v nadaljevanju TSG4) [3].

Strategija »20/20/20«

Države članice EU so leta 2007 sprejele določene ukrepe z željo po spremembah v podnebni in energetske politiki, da dosežejo visokoenergetsko učinkovito EU. Z uvedbo strožjih zahtev na tem področju so se tako zavezale, da do leta 2020 dosežejo naslednje cilje:

- 20-odstotno zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov glede na leto 1990,
- 20-odstotno zmanjšanje porabe energije s povečanjem energetske učinkovitosti,
- 20-odstotni delež obnovljivih virov v končni rabi energije [9].

Oktobra 2014 je komisija Evropskega sveta predstavila Okvir podnebne in energetske politike do leta 2030. Namen predstavljenega okvirja je bil namreč spodbuditi zavedanje resnosti o trenutnem okvirju do leta 2020 ter predlagal nove cilje in ukrepe, ki bi EU naredili še bolj konkurenčno in trajnostno. Okvir je tako predlagal naslednje ukrepe:

- nadaljnje zmanjšanje emisij toplogrednih plinov z zastavljenim ciljem za 40 % glede na leto 1990,
- zmanjšanje rabe primarne energije za 27 % skozi izboljšanje energetske učinkovitosti,
- delež energije iz obnovljivih virov mora znašati 27 % [10].

Direktiva 2010/31/EU

V letu 2010 je bila sprejeta prenovljena Direktiva 2010/31/EU, ki upošteva strategijo »20/20/20«, ki jo veleva podnebno-energetske politika. Direktiva 2010/31/EU je tudi podlaga za slovenski PURES 2010. Bistvena in do tedaj povsem nova zahteva pa se je v prenovljeni Direktivi 2010/31/EU pojavila glede na zahtevo o gradnji skoraj nič-energijskih stavb, še posebej v javnem sektorju. Nova zahteva v javnem sektorju je tako:

- do leta 2018 morajo biti vse nove stavbe skoraj nič-energijske in morajo biti zgled drugim [2].

Kljub temu da je vsaka država članica drugačna (razlike v ravni razvoja med državami so prisotne), Komisija želi, da bi jih EU izpolnjevala. Seveda se ob tem zavedajo, da ena sama rešitev ni primerna za vse članice. Na racionalen način bi tako vsaka članica morala poskrbeti za svoje predpise in s tem zagotoviti učinkovito rabo energije, ki dandanes postaja vse večja nuja.

PURES 2010

PURES 2010 je postal veljaven 1. julija 2010 in je bil sprejet na osnovi zahtev, ki jih veleva evropska Direktiva 2010/31/EU. Pomemben vpliv ima na objekte, ki so se in se še bodo gradili v prihodnje, saj določa ostra merila za toplotno zaščito in delež obnovljivih virov energije v novih objektih. Zahteve, ki so pomembne, da jih poudarimo in imajo neposreden vpliv na vsebino magistrskega dela, so:

- 25 % energije moramo zagotoviti iz obnovljivih virov,
- toplotna zaščita v novo zgrajenih objektih in tistih, ki so potrebni sanacije, bo učinkovitejša (bistvena poostreitev dejavnika toplotne prehodnosti) [8].

Skladno s PURES 2010 moramo obravnavati tudi Tehnično smernico za graditev TSG-1-004:2010.

TSG-1-004:2010

TSG4 določa gradbene ukrepe oziroma rešitve in s temi merili dosega zahteve PURES 2010 ter določa metodologijo izračuna energijskih lastnosti stavbe. Uporaba Tehnične smernice je poleg PURES 2010 obvezna [3]. V TSG4 poleg zahtev najvišje dovoljene toplotne prehodnosti najdemo tudi postopke izračunov, s katerimi dokazujemo energetske učinkovitost stavbe. Metodologija izračuna energijskih lastnosti stavbe temelji na slovenskih standardih, ki so nastali s prevzemom mednarodnih evropskih ali tujih nacionalnih standardov [3]. V nadaljevanju sta tako predstavljena dva, ki sta bistvenega pomena za to magistrsko delo.

V želji po doseganju energetske učinkovite stavbe že v fazi samega projektiranja velja, da toplotna prehodnost elementov zunanje površine stavbe in ločilnih elementov delov stavbe z različnimi režimi notranjega toplotnega ugodja, ki se določi po standardih SIST EN ISO 6946 [11] in SIST EN ISO 10211 [12], ne sme presegati vrednosti, navedenih v preglednici 1 [3].

Preglednica 1: Najvišja dovoljena toplotna prehodnost gradbene konstrukcije [3].

	Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevalne cone	$U_{\max}$ [W/(m²K)]
1	Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,28
2	Zunanje stene in stene proti neogrevanim površinam – manjše površine, ki skupaj ne presegajo 10 % površine neprozornega dela zunanje stene	0,60
3	Stene, ki mejijo na ogrevanje sosednje stavbe	0,50

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 1

4	Stene med stanovanji in stene proti stopniščem, hodnikom in drugim manj ogrevanim prostorom	0,70
	Notranje stene in medetažne konstrukcije med ogrevanimi prostori različnih enot, različnih uporabnikov ali lastnikov v nestanovanjskih stavbah	0,90
5	Zunanja stena ogrevanih prostorov proti terenu	0,35
6	Tla na terenu (ne velja za industrijske stavbe)	0,35
7	Tla nad neogrevano kletjo, neogrevanim prostorom in garažo	0,35
8	Tla nad zunanjim zrakom	0,30
9	Tla na terenu in tla nad neogrevano kletjo, neogrevanim prostorom ali garažo pri talnem ogrevanju	0,30
10	Strop proti neogrevanemu prostoru, stropi v sestavi ravnih ali poševnih streh (ravne ali poševne strehe)	0,20
11	Terase manjše velikosti, ki skupaj ne presegajo 5 % površine strehe	0,60
12	Strop proti terenu	0,35

SIST EN ISO 6946

Standard SIST EN ISO 6946 [11] Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računska metoda je predpis, ki nam predstavlja metodo izračuna toplotne upornosti in toplotne prehodnosti za vse elemente stavbnega ovoja, razen transparentnih delov stavbe. Standard je bolj podrobno predstavljen v poglavju 4.1 Metoda za izračun toplotne prehodnosti po standardu SIST EN ISO 6946 je predstavljena na strani 15.

ISO 9869-1

ISO 9869-1 [13] Toplotna izolacija – Elementi stavbe – *in-situ* meritev toplotne upornosti in toplotne prehodnosti – Del 1: Metoda toplotnega toka opisuje metodo meritve s pomočjo toplotnega toka za določanje toplotne prehodnosti gradbenih elementov. Omenjeni Standard je predstavljen v poglavju 4.2 Metoda za merjene toplotne prehodnosti po standardu ISO 9869-1 je predstavljena na strani 17.

Strokovna literatura

Pregled dodatne strokovne literature nam je pomagal spoznati, kako je obravnavano področje raziskano na širšem znanstveno-strokovnem področju. S pomočjo člankov, dostopnih na spletnih straneh, do katerih smo prišli s pomočjo bibliografskih baz podatkov (npr. Science Direct), smo odkrili, da so za postopek meritve toplotne prehodnosti v splošnem v vseh državah EU upoštevali standard ISO 9869 [13] in rezultate meritev primerjali s standardom SIST EN ISO 6946 [11]. Do sedaj že opravljene raziskave so nam bile v večjo pomoč ob iskanju morebitnih vzrokov, ki vodijo do razlik med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo posameznega konstrukcijskega sklopa. Povzetek raziskav je predstavljen v preglednici 2.

Preglednica 2: Povzetek pregleda izbranih raziskav

Avtor	Država in leto raziskave	Konstrukcijski sklopi in njegove značilnosti	Metode dela	Glavne ugotovitve
L. Evangelisti, C. Guattari P. Gori R. De Lieto Vollaro [5]	Italija 2015	3-krat zunanja stena (leto gradnje objektov: pozno 18. stol., 1950 in 2000)	Analiza konstrukcijskega sklopa s termo kamero Primerjava rezultatov, pridobljenih po standardih UNI EN ISO 6946 in UNI 10351 ter ISO 9869	1. Največja razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo je +153 % (razlog v nepoznavanju vgrajenih materialov). 2. Razlike v rezultatih bi lahko bistveno vplivale na energetski razred stavbe.
T. Samardzioska R. Apolstolska [6]	Makedonija 2016	3-krat fasadna stena Fragmat NZ-1 (stena, sestavljena iz ekspandiranega polistirena in polnila betona)	Primerjava rezultatov po standardih ISO 9869, ASTM C1155 in C1046	1. Na pravilnost rezultata lahko vpliva preveliko nihanje notranje temperature (poda napačne rezultate). 2. Na pravilnost rezultatov lahko vpliva visoka relativna vlaga (padavine negativno vplivajo na rezultat). 3. Pomembna je lokacija postavitve senzorjev (gladka podlaga, izogib neposrednemu sončnemu sevanju, izogib toplotnim mostovom).
A. Ahmad M. Masleuddin L. Hadhrami [14]	Savdska Arabija 2014	1. severna zunanja stena 2. vzhodna zunanja stena	Primerjava rezultatov po standardih ISO 9869, ASTM C1155 in C1046 ter ISO 6946	1. Visoke toplotne prehodnosti so ob robovih stene. 2. Vzhodna stena ima višjo toplotno prehodnost kot tista, obrnjena proti severu (vpliv vetra in neposrednega sončnega sevanja).

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

F. Asdrubali F. D'Alessandro G. Baldinelli [15]	Italija 2013	6-krat zunanja stena	Primerjava rezultatov po standardih ISO 9869 in ISO 6946	1. Izračunane toplotne prehodnosti so v večini primerov nižje od izmerjenih. 2. Vzroki, zaradi katerih pride do razlik med rezultati: precenjene lastnosti materiala s strani proizvajalca, toplotne lastnosti materiala se določajo v nadzorovanih laboratorijskih pogojih, zunanji pogoji vplivajo na meritev, dejanska vgradnja materiala ni enaka projektni dokumentaciji.
P. Baker [16]	Škotska 2011	57-krat zunanja stena 2-krat tla na terenu 9-krat streha	Primerjava rezultatov po standardih BS EN ISO 7345 in BS EN ISO 6946 ter EN 12494	1. Na splošno je izračunana toplotna prehodnost precenjena v primerjavi z merjeno (npr. neupoštevanje malte med kamnom, ki izboljša izolativnost). 2. Toplotna prehodnost, določena po projektu za strehe, je zelo slab približek merjeni toplotni prehodnosti. 3. Plast zraka bistveno vpliva na ujemanje med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo.

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 2

Riley J. [17]	Velika Britanija 2014	300-krat zunanja stena različnih tipov	Primerjava rezultatov po standardih ISO 9869 in BS EN ISO 6946	1. Izmerjene toplotne prehodnosti so v povprečju nižje od izračunanih pri neizoliranih elementih in ravno obratno pri izoliranih. 2. Do neusklajenosti med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo pride predvsem zaradi nepoznavanja vgrajenih materialov. 3. Do razlik med rezultati pride tudi zaradi nepoznavanja lastnosti vgrajenih materialov. 4. Razlike med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo so prisotne zaradi vpliva toplotnih mostov, za katere se pred merjenjem ni vedelo, da so v neposredni bližini.
------------------	--------------------------	---	---	---

Pregled strokovne literature opozarja predvsem na dejstvo, da do razlik med merjenimi in izračunanimi toplotnimi prehodnostmi pride zaradi različnih dejavnikov, ki vplivajo na potek toplotnega toka. Predvsem so to zunanji vplivi (npr. sončno sevanje, veter, padavine, vlažnost), mesto postavitve merilnika toplotnega toka, nepoznavanje lastnosti vgrajenih materialov, morebitna prisotnost zračne plasti in smer neba posameznega konstrukcijskega sklopa.

3 PRENOS TOPLOTE IN TOPLOTNA PREHODNOST

Toplota je oblika energije. Če med dvema telesoma obstaja temperaturna razlika, se začne prenos toplote z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo. Prenos toplote tako traja, vse, dokler se temperaturi ne izenačita. Dnevno imamo tak primer v kontekstu stavb med bivalnim prostorom in zunanjim okoljem. Pri prenosu toplote nastane nekakšen toplotni tok, ki nam posledično poda informacijo o količini toplote, ki se v zimskem času prenese iz bivalnega prostora v okolje oziroma iz okolja v bivalni prostor v poletnem času [18].

Toplota se prenaša s toplotnim tokom in prehaja na tri različne načine, in sicer s:

- prevajanjem ali kondukcijo,
- prestopom toplote ali konvekcijo in
- sevanjem toplote ali radiacijo [19].

Vse tri oblike prenosa toplote, ki velikokrat nastopajo hkrati, najdemo tudi pri stavbnem ovojju. V našem raziskovalnem delu nas bo najbolj zanimal prevod toplote ali kondukcija, iz katere tudi izhaja pojem toplotna prevodnost, ki je ena izmed glavnih lastnosti dane gradbene snovi in nam pove, kako dobro snov prevaja toploto.

Prevod toplote je pojav oziroma neke vrste mehanizem prenosa energije med atomi in molekulami, ki so osnovni gradniki snovi [20]. Fizikalni procesi, ki omogočajo prevajanje toplote v snovi, so namreč trki med molekulami in atomi snovi [19]. Osnovno značilnost prevajanja toplote ob upoštevanju drugega zakona termodinamike (toplota teče sama od sebe z mesta z višjo temperaturo k mestu z nižjo temperaturo) lahko opišemo s pomočjo enačbe toplotnega toka:

$$P(x, t) = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

kjer je

dQ – količina toplote [J],
 dt – časovno obdobje [s] in
 P – toplotni tok [W].

Pogosto nas zanima tudi gostota toplotnega toka, ki je v enačbi predstavljena kot kvocient celotnega toplotnega toka in prereza:

$$q = \frac{P}{S} \quad (2)$$

kjer je

S – površina prereza [m²] in
 q – gostota toplotnega toka [W/m²].

Toplotni tok je definiran kot množina toplote, ki se v nekem časovnem obdobju prenese skozi snov [19]. Toplotni tok je tem večji, čim večja sta presek in temperaturni gradient na izbranem mestu snovi. V primeru, ko temperaturne razlike niso prevelike, lahko zanemarimo dejstvo, da je toplotna prevodnost snovi v splošnem odvisna od temperature in jo obravnavamo kot konstanto. Z drugimi besedami povedano, tako toplotni tok postane odvisen od prereza snovi, skozi katerega teče tok (npr. površina stene), od razdalje, ki jo mora preteči (npr. debelina stene), razlike v temperaturi na notranji in zunanji strani ter toplotne prevodnosti snovi. Ob upoštevanju vseh omenjenih dejstev lahko enačbo za toplotni tok zapišemo nekoliko drugače:

$$P = \frac{\lambda S \Delta T}{d} \quad (3)$$

kjer je

λ – toplotna prevodnost snovi [W/mK],

ΔT – sprememba temperature [K] in

d – debelina snovi [m].

Značilnosti prevoda toplote vsakega konstrukcijskega elementa so tako odvisne od lastnosti vgrajenih materialov, od debeline posameznih plasti ter od pogojev okolja na notranji in zunanji strani konstrukcije. Na zunanji strani konstrukcijskega elementa so to vlažnost in temperatura zraka, jakost in smer vetra ter kratkovalovno (sončno) sevanje na površino elementa in dolgovalovno sevanje, s pomočjo katerega površina elementa izmenjuje toploto z okoljem. Na notranji strani pa so pomembni robni pogoji (temperatura, vlažnost in hitrost gibanja zraka ter dolgovalovno sevanje med viri toplote in konstrukcijskimi elementi) [20].

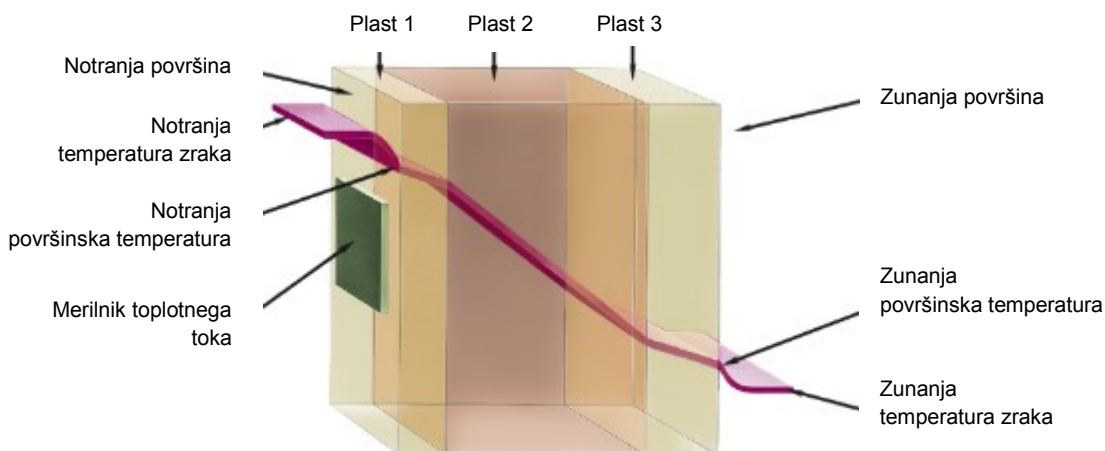
Glede na posebnosti pri prenosu toplote gradbene konstrukcije delimo med drugim tudi na:

- homogene in
- nehomogene [20].

Poleg lastnosti, ki bistveno vplivajo na prenos toplote, se je pomembno zavedati tudi, da homogenost oziroma nehomogenost lahko zelo vpliva na toplotni tok. Homogene gradbene konstrukcije so namreč sestavljene iz homogenih gradbenih snovi, za katere je značilno, da so njihove snovne lastnosti enake po celotni prostornini in se s temperaturo in vlažnostjo ne spreminjajo [20]. Snov v tem primeru enakomerno prevaja toploto in temperatura snovi enakomerno pada iz kraja z višjo proti kraju z nižjo temperaturo. Vse to ne velja za nehomogene konstrukcijske sklope, kjer snov skozi debelino različno prevaja toploto in se temperatura skozi debelino elementa posledično neenakomerno spreminja.

Ne glede na to, ali je snov homogena ali ne, toplota v zimskem času, ko so notranje temperature višje od zunanjih, iz prostora prestopa na zunanjo steno in zatem iz zunanje stene na zunanji zrak. Zaradi prestopa toplote, ki nastane med zrakom v prostoru in zunanjo steno, je na notranjem delu zunanje stene temperatura vedno nekoliko nižja kot v prostoru samem. Ravno obratno se dogaja na zunanjem delu stene – temperatura zunanjega dela stene je torej nekoliko višja, kot je temperatura zraka [20].

Prerez konstrukcijskega sklopa in potek temperature skozi posamezne homogene plasti sta predstavljena na sliki 1.



Slika 1: Prerez konstrukcijskega elementa [21].

V želji po čim manjšem prenosu toplote skozi konstrukcijski sklop je ključno dobro poznavanje oblikovanja konstrukcijskih sklopov. V ta namen je 9. člen TSG4 tisti, ki pravi, da bi z ustrezno toplotno zaščito površine toplotnega ovoja stavbe morali doseči:

- zmanjšan prehod energije skozi površino ovoja stavbe in
- zmanjšano pregrevanje in podhlajevanje stavbe.

Z istim razlogom bi morali stavbe projektirati in graditi tako, da bi kar se da zmanjšali tudi vpliv toplotnih mostov na letno potrebo po energiji za ogrevanje in hlajenje [3].

Da bi lahko izpolnjevali zahteve, ki jih podaja TSG4, bi morali pri prenosu toplote skozi ovoj stavbe dati poudarek ravno toplotnemu toku. V želji po preprečitvi prevelikega toplotnega toka skozi stavbni ovoj potrebujemo toplotno izolacijo na vseh konstrukcijskih sklopih stavbe oziroma ustrezno toplotno prehodnost le-tega.

3.1 Toplotna prehodnost

Toplotna prehodnost je pojem, ki služi kot kazalnik toplotne učinkovitosti stavbe. Toplotna prehodnost se običajno uporablja za opis toplotne lastnosti gradbenih elementov in služi kot baza podatkov za oceno energetske učinkovitosti celotne zgradbe [5]. Toplota, ki se izgublja preko stavbnega ovoja v obliki toplotnega toka, se namreč izraža s pojmom toplotne prehodnosti, ki je definirana v standardu SIST EN ISO 7345 [21] kot pretok toplote v stanju dinamičnega ravnovesja, deljen s površino in temperaturno razliko med okolico na vsaki strani sistema [12].

Povedano drugače, toplotna prehodnost konstrukcijskega elementa opisuje količino toplote, ki prehaja skozi le-tega z ene strani na drugo (ne glede na število plasti, ki element sestavljajo) v sekundi na kvadratni meter površine, ter konstantno razliko med zunanjo in notranjo temperaturo v vrednosti 1 K [22].

Toplotna prehodnost je torej odvisna od lastnosti vgrajenega materiala (toplotne prevodnosti) in debeline posameznega sloja:

$$U = \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

kjer je

λ – toplotna prevodnost snovi [W/mK] in

d – debelina snovi [m].

Da bi dosegli kar se da energetsko učinkovito stavbo, moramo torej stremeti k nizki toplotni prehodnosti gradbenega elementa, saj s tem dosežemo večjo toplotno izolativnost. To pomeni manjši prehod toplote skozi snov, manjše toplotne izgube in posredno manjše stroške v času ogrevanja stavbe. V izogib visokim toplotnim izgubam skozi stavbni ovoj je torej nujno pravilno zasnovati gradbene konstrukcije in upoštevati najvišje dovoljene vrednosti toplotne prehodnosti, ki jih določa TSG4, saj bomo le na ta način dosegli energetsko učinkovito stavbo.

4 METODE IN ORODJA

Pravo oceno toplotne učinkovitosti stavbnega ovoja in primerjavo merjene ter izračunane toplotne prehodnosti je možno doseči s posebnimi metodami, ki so opisane v naslednjih poglavjih. Metoda za izračun toplotne prehodnosti po standardu SIST EN ISO 6949 in metoda za meritev toplotne prehodnosti po standardu ISO 9869 sta namreč tisti dve metodi, ki bosta uporabljeni z namenom doseči glavni cilj magistrskega dela.

4.1 Metoda za izračun toplotne prehodnosti po standardu SIST EN ISO 6949

Izračunano toplotno prehodnost običajno določamo s pomočjo standarda SIST EN ISO 6946. Ta določa metodo za izračun toplotne upornosti in toplotne prehodnosti elementov stavbe, kot so stena, tla in streha. Metoda je primerna za elemente, ki so sestavljeni iz termično homogenih slojev, ki lahko vključujejo tudi zračno plast do debeline 30 cm.

Standard SIST EN ISO 6946 predpostavlja stacionarno stanje (idealne pogoje) in v metodi izračuna ne upošteva dejanskih razmer, kot sta temperatura zraka ter vpliv vetra in sončnega sevanja.

Tako je toplotna prehodnost elementa stavbnega ovoja določena z izrazom:

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (5)$$

kjer je

U – toplotna prehodnost [$\text{W/m}^2\text{K}$] in
 R_{tot} – skupna toplotna upornost [$\text{m}^2\text{K/W}$].

Toplotna upornost homogenega sloja, skozi katerega teče toplotni tok, je določena z izrazom:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

kjer je

d – debelina sloja [m],
 λ – toplotna prevodnost [W/mK] in
 R – toplotna upornost posameznega sloja [$\text{m}^2\text{K/W}$].

Za konstrukcije, ki so sestavljene iz homogenih slojev različnih materialov, je toplotna upornost določena z izrazom:

$$R = \sum_j R_{\lambda,j} = \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (7)$$

ali

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_j \quad (8)$$

Vrednosti toplotne upornosti pri prestopu toplote so podane v preglednici 3 v odvisnosti od smeri toplotnega toka in položaja površine (znotraj/zunaj).

Preglednica 3: Toplotna upornost pri prestopu toplote [11].

	Smer toplotnega toka		
	navzgor ↑	vodoravno →	navzdol ↓
R_{Si}	0,10	0,13	0,17
R_{Se}	0,04	0,04	0,04

kjer je

R_{Si} – toplotna upornost prestopa toplote na notranji strani [$\text{m}^2\text{K/W}$] in

R_{Se} – toplotna upornost prestopa toplote na zunanji strani [$\text{m}^2\text{K/W}$].

Vrednosti iz preglednice upoštevamo, kadar ni danih robnih pogojev. Vrednosti za vodoravno površino veljajo za toplotne tokove v smeri $\pm 30^\circ$ glede na horizontalno ravnino.

Tako je skupna toplotna upornost konstrukcije:

$$R_{tot} = R_{Si} + \sum_j R_{\lambda,j} + R_{Se} = R_{Si} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{Se} \quad (9)$$

V primeru, da se poleg enostavnega homogenega konstrukcijskega sloja pojavi zračna plast, je treba upoštevati toplotno upornost zračnih slojev. Vrednosti toplotnih upornosti, podane v nadaljevanju (preglednica 4), veljajo za zračne sloje, ki:

- so omejeni z dvema ravninama, smer toka pa je pravokotna na ti dve ravnini. Ravnini imata emisivnost večjo od 0,8,
- debelina ni večja od 0,3 m,
- nima izmenjave zraka z okolico [23].

Pri konstrukcijah, kjer zračna plast nima izmenjave z okolico in jo zato imenujemo neprezračevani sloj zraka, so vrednosti toplotne upornosti podane v preglednici 4.

Preglednica 4: Toplotna upornost zračne plasti, ki je neprezračevana [11].

Debelina sloja zraka [mm]	Toplotna upornost R_{zr} [$\text{m}^2\text{K/W}$] Smer toplotnega toka		
	navzgor ↑	vodoravno →	navzdol ↓
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 4

10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
75	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Skupna toplotna upornost je tako določena z naslednjim izrazom:

$$R_{tot} = R_{Si} + \sum_j R_{\lambda,j} + R_{zr} + R_{Se} \quad (10)$$

V primeru, da imamo slabo prezračevan sloj zraka, kjer je sloj povezan z zrakom iz okolice z zelo majhnimi odprtini, je vrednost toplotne upornosti slabo prezračevanega sloja zraka enaka polovični vrednosti neprezračevanega sloja (preglednica 4), vendar je največja možna vrednost omejena na 0,15 m²K/W [21]. Pri gradbenem elementu, kjer imamo dobro prezračevani sloj zraka, je skupna toplotna upornost le-tega izračunana brez upoštevanja toplotne upornosti zraka in drugih slojev med slojem zraka in okolico. V tem primeru tako upoštevamo le sloje do zračne plasti.

4.1.1 Programska oprema

Za izračun toplotne prehodnosti posameznega konstrukcijskega sloja smo si pomagali z računalniškim programom URSA Gradbena Fizika 4.0 [24], ki omogoča izračun toplotne prehodnosti homogenih gradbenih elementov, dokazovanje ustreznosti toplotne zaščite stavbe in rabe energije v stavbah v skladu s PURES 2010. Le-ta ima uvožene snovne podatke iz TSG4 za običajne materiale, ki jih uporabljamo, kadar konkretni podatki o gradbenem materialu niso dostopni. Če bi za poseben material želeli točno določene snovne podatke, program dopušča uvoz dodatnega gradbenega materiala, ki ga kasneje lahko uporabimo pri izračunu toplotne prehodnosti konstrukcijskega elementa.

4.2 Metoda za merjenje toplotne prehodnosti po standardu ISO 9869-1

Drug način (poleg izračuna toplotne prehodnosti) določanja toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa je z merjenjem toplotnega toka skozi element ovojja stavbe skupaj z meritvami temperatur, tako notranjih kot zunanjih, seveda pod konstantnimi pogoji.

Ker konstantnih pogojev v realnem okolju praktično ni, tako preprosta metoda meritve toplotne prehodnosti ni možna. Toda obstaja več načinov, s katerimi lažje odpravimo te težave:

- a) z uvedbo konstantnih pogojev z uporabo »tople in hladne škatle« – ta metoda je pogosto uporabljena v laboratoriju,

- b) z uporabo povprečne vrednosti toplotnega toka, ob kateri predpostavimo, da zaradi dovolj dolge periode časa poda zadosti dobro oceno,
- c) z uporabo dinamične teorije, ki upošteva nihanja toplotnega toka in temperatur.

Sami smo za analizo uporabljali metodo s povprečno vrednostjo (točka b). Le-ta je predstavljena v standardu ISO 9869-1, katerega bistvo smo upoštevali tudi sami in glavna dejstva zapisali v nadaljevanju.

Povprečna metoda merjenja toplotne prehodnosti privzame, da je lahko toplotna prehodnost pridobljena z deljenjem povprečne gostote toplotnega toka in povprečne razlike v temperaturah. Povprečje je seveda prevzeto v daljšem časovnem obdobju. Če simbol j predstavlja individualno meritev, potem je ocena toplotne prehodnosti:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (11)$$

kjer je

- q – gostota toplotnega toka [W/m^2],
- T_{ij} – notranja temperatura zraka [K] in
- T_{ej} – zunanja temperatura zraka [K].

Ko je po vsaki meritvi izračunana ocena toplotne prehodnosti, se opazi konvergenca na asimptotično vrednost. Ta asimptotična vrednost je zelo blizu realni vrednosti, če so izpolnjeni naslednji pogoji:

- vsebnost toplote konstrukcijskega elementa je enaka na začetku in koncu meritve (ista temperatura, ista porazdelitev vlage),
- merilnik toplotnega toka ni izpostavljen neposrednemu sončnemu sevanju in
- toplotna prevodnost elementa je med meritvijo konstantna.

V primeru, da ti pogoji niso izpolnjeni, lahko dobimo zavajajoče rezultate.

Da bi lahko izmerili gostoto toplotnega toka ter notranjo in zunanjo temperaturo zraka, potrebujemo merilno opremo, ki je podrobneje predstavljena v nadaljevanju (poglavje 4.2.1 Uporabljena merilna oprema). Na tem mestu bo dovolj, da vemo, da smo uporabili merilnik toplotnega toka in temperaturne senzorje, ki so v daljšem časovnem obdobju merili parametre, potrebne za določitev toplotne prehodnosti, določene s pomočjo enačbe 11.

Podatki merilnika toplotnega toka in temperaturnih senzorjev morajo biti zabeleženi konstantno ali ob fiksnih intervalih v obdobju meritev. Največje časovno obdobje med dvema zapisoma in minimalno trajanje testa sta odvisno od:

- narave elementa (težka, lahka konstrukcija, zunanja, notranja toplotna izolacija),
- zunanje in notranje temperature (povprečna vrednost in nihanja; pred in med meritvami) ter
- metode, uporabljene za analizo (dinamična ali povprečna metoda).

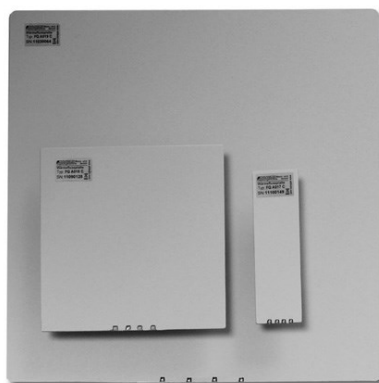
Minimalno trajanje obdobja meritve je 72 ur oziroma tri dni, in sicer v primeru, da je temperatura v prostoru, kjer je nameščen merilnik toplotnega toka, konstantna. V nasprotnem primeru lahko meritev traja sedem dni ali več. Kljub temu se dejansko trajanje meritve določi z uporabo meril vrednosti, pridobljenih med preizkusom. Te vrednosti morajo biti dobljene brez prekinitve postopka pridobivanja podatkov. Za natančnejše rezultate meritev je priporočljiv poskus doseči kar največjo razliko med temperaturo zraka v okolici in v prostoru samem. Glede na našo lokacijo in podnebne pogoje smo se meritve odločili izvajati v zimskem času.

ISO 9869-1 je torej namenjen predstavitvi metode toplotnega toka za izračun toplotne prehodnosti gradbenih komponent, v katerih prevladujejo predvsem netransparentni sloji pravokotno na toplotni tok. Ta metoda je primerna tudi za elemente, ki so sestavljeni iz navidezno homogenih plast, pravokotnih na toplotni tok pod pogojem, da so dimenzije vsake nehomogenosti v neposredni bližini merilnika toplotnega toka precej manjše od njegovih bočnih dimenzij in da te nehomogenosti niso toplotni mostovi, ki jih je mogoče zaznati s termografijo.

4.2.1 Uporabljena merilna oprema

4.2.1.1 Merilnik toplotnega toka

Merilnik toplotnega toka je pretvornik električnega signala, ki je neposredno odvisen od toplotnega toka, ki se prenaša preko njega. Pogosto so merilniki toplotnega toka tanke, termično odporne plošče s senzorji temperature, razporejene tako, da je električni signal, ki ga dajejo senzorji, neposredno povezan s toplotnim tokom skozi ploščo. Ena izmed glavnih lastnosti merilnika toplotnega toka sta nizka toplotna upornost, da bi s tem zmanjšali motnjo, ki jo merilnik lahko povzroči sam, in dovolj visoka občutljivost, da dobimo zadosti visok signal za najnižjo stopnjo merjenega toplotnega toka. Na toplotni tok tako vplivajo različni elementi stavbe in razlike v notranji ter zunanji temperaturi.



Slika 2: Merilniki toplotnega toka [26].

Sami smo za meritev toplotnega toka skozi konstrukcijski sklop uporabili merilnik toplotnega toka ALMEMO Heat Flow Plate FQAx tip 118, FQA018C [26]. Sestavlja ga tanka plošča, katere debelina je 1,5 mm. Zunanje dimenzije merilne plošče so 120 x 120 mm, od tega je merilno območje velikosti 90 x 90 mm. Temperaturno območje senzorja je med -40 °C in 80 °C. Natančnost kalibracijske vrednosti merilnika toplotnega toka je 5 % pri 23 °C.

4.2.1.2 Temperaturni senzorji

Temperaturni senzorji so pretvorniki, ki dajejo električni signal, ki je enakomerna funkcija temperature. Ko določamo toplotno prehodnost posameznega konstrukcijskega elementa, ki je definiran kot razmerje med gostoto toplotnega toka in temperaturo zraka, potrebujemo podatek o zunanji temperaturi in temperaturi v prostoru.

Obstajajo različne vrste temperaturnih senzorjev. Sami smo za potrebe meritev konstrukcijskih sklopov uporabili temperaturni senzor ali termočlen oznake NiCr-Ni, tip K [26], ki ima sposobnost opravljanja meritve v temperaturnem območju od -200 °C do 1370 °C. Poleg velikega merilnega območja imajo termočleni tudi lastnost hitrega odziva in precejšnje natančnosti ($\pm 0,05$ K $\pm 0,05$ % na merjeno vrednost). Termočleni so sestavljeni iz dveh varjenih žic iz različnih kovin ali zlitin, kar je prikazano na sliki 3.



Slika 3: Temperaturni senzor [26].

4.2.1.3 Shranjevalnik podatkov

Priporočljivo je, da podatke, pridobljene s pomočjo temperaturnih senzorjev in merilnika toplotnega toka, beležimo ob fiksno določenem intervalu. Za shranjevanje podatkov, pridobljenih med posamezno meritvijo, smo uporabili Data Logger ALMEMO 2690-8A [26], prikazan na sliki 4.



Slika 4: Data Logger [26].

Interval shranjevanja podatkov je odvisen od metode, uporabljene za analizo. Za povprečno metodo je priporočljiv interval med 0,5 ure in 1 uro. Sami smo interval nastavili na 5 min in s tem na neki način pridobili natančnost rezultata posamezne meritve.

4.2.1.4 Namestitev merilne opreme

Merilna oprema (merilnik toplotnega toka in temperaturni senzorji – slika 5) so nameščeni glede na namen poizkusa. Merilniki morajo biti nameščeni tako, da zagotovijo rezultate, ki predstavljajo celotni element ovoja stavbe.



Slika 5: Merilna naprava za meritev toplotne prehodnosti.

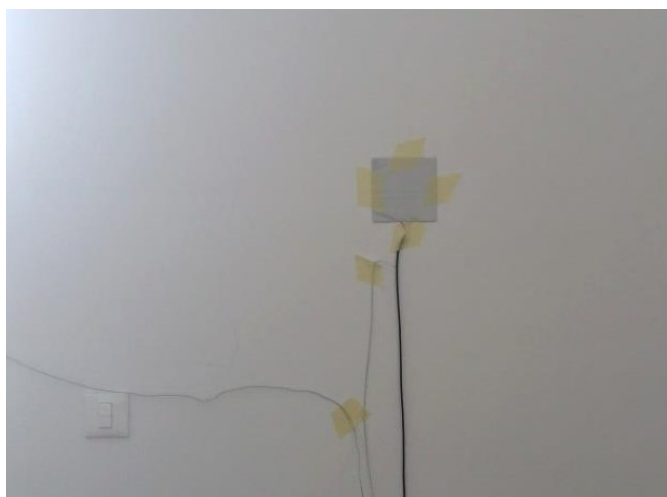
Priporočljive lokacije namestitve merilne opreme lahko določamo tudi s pomočjo termografije oziroma termo kamere, ki smo jo uporabili v ta namen. Termo kamera pokaže sevanje kot spremembo temperature na površini telesa. V gradbeništvu jo najpogosteje uporabljamo za lociranje toplotnih mostov, ki nastanejo pri stikih različnih konstrukcijskih elementov, za izvajanje energetskih pregledov objektov in iskanje pomanjkljivosti na ovoju stavbe. Uporabili smo termo kamero FLIR E60 [27], katere merilno območje temperature je od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa vse do $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$, in z natančnostjo $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar kaže na vsestransko uporabo ne samo v gradbeništvu, ampak v celotni industriji.

Merilnik toplotnega toka ne sme biti postavljen blizu toplotnih tokov, razpok ali drugih nepravilnosti, ki so sestavni del konstrukcijskega elementa. Senzorji temperature zraka ne smejo biti v bližini neposrednega vpliva ogrevalne ali hladilne naprave oziroma v neposredni bližini ventilatorja. Zunanja površina elementa stavbnega ovoja mora biti zaščitena pred dežjem, snegom in neposrednim sončnim sevanjem, zato smo meritve izvajali na delu gradbene konstrukcije, kjer je vpliv sončnega sevanja najmanjši, in v času meritev dnevno beležili količino morebitnih padavin in hitrost vetra, ki bi lahko vplivali na natančnost rezultatov.

Pri merilniku toplotnega toka je treba paziti, da je merilnik (kvadratna ploščica) v kar najboljšem stiku z notranjo plastjo konstrukcijskega sklopa, ki jo želimo analizirati. Merilnik

toplotnega toka je postavljen v notranjosti objekta, kjer so temperature precej bolj konstantne kot v zunanjem okolju. Ob pritrdjevanju merilne ploščice toplotnega toka z lepilnim trakom je treba biti pozoren tudi na dejansko merilno območje plošče in se ga kar v največji meri izogibati, da s tem ne bi povzročili morebitnih napak pri meritvah samih.

Merilnik toplotnega toka se pritrdi neposredno na lice konstrukcijskega elementa, ki meji na prostor s stabilnejšo temperaturo. Merilnik mora biti v neposrednem toplotnem stiku s površino elementa po celotni površini senzorja. Primer namestitve merilnika toplotnega toka je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Postavitev merilnika toplotnega toka na notranjo stran prostora.

Temperaturne senzorje je treba namestiti na obe strani elementa, saj pri meritvi toplotne prehodnosti potrebujemo podatek tako o zunanji kot o notranji temperaturi. Zaradi istočasne meritve temperature na zunanji in notranji strani konstrukcijskega elementa smo bili tako omejeni le na gradbene elemente, ki so mejili na zrak z obeh strani. Konstrukcijski elementi, ki so bili v stiku s terenom, niso torej bili primerni za nadaljnje analiziranje, ker bi temu primerno potrebovali tudi ustrezno opremo, ki bi omogočala določitev temperature zemljine ob ali pod objektom. Pri temperaturnih senzorjih zraka se je treba izogniti merjenju temperature mejne plasti ob konstrukcijskem elementu. Ta je namreč nekoliko višja kot temperature okoljskega zraka, kar bi zopet lahko povzročilo morebitne napake pri meritvah. Namestitev temperaturnega senzorja na zunanjo stran gradbenega elementa je predstavljena na sliki 7.



Slika 7: Namestitev temperaturnega senzorja na zunanji strani.

»Ta stran je namenoma prazna«

5 PREDSTAVITEV IZBRANEGA STAVBNEGA FONDA

Na podlagi poostrenih nacionalnih zakonskih zahtev javni sektor dandanes posveča vse večji poudarek področju trajnostnega ravnanja z energijo. Del le-tega so tudi stavbe UL, ki so velik porabnik energije in zato posledično predstavljajo tudi največji potencial za znižanje rabe energije ter zmanjšanje stroškov vzdrževanja [7]. Ob zavedanju dejstva, kako pomembno je dejansko poznavanje trenutnega stanja stavbe in pravilno zastavljene strategije trajnostnega razvoja, so stavbe UL lahko referenčni primer za vse druge stavbe javnega sektorja. UL mora namreč kot lastnik svojih stavb izpolnjevati evropske in nacionalne energetske zahteve politike in se usmeriti na pot »zelene univerze«. Zato si je z uvedbo prenovljene Direktive 2010/31/EU, ki predstavlja nove zakonske okvire, zastavila strateške cilje, da bi do leta 2020 dosegla 20-odstotni delež obnovljivih virov energije glede na leto 1990 in za 20 % zmanjšala izpuste toplogrednih plinov ter seveda povečala energetske učinkovitost za 20 % in s tem zmanjšala porabo primarne energije [7].

UL izvaja učne dejavnosti v 359 stavbah na skupni površini 291.179 m², od tega je kar 91 % stavb starejših od 15 let. Nekatere med njimi so zaščitene kot kulturna dediščina. Med njimi je 36 t. i. tipičnih fakultetnih stavb UL, v katerih so predavalnice, kabineti, pisarne in laboratoriji. Druge stavbe niso primarne in so del fakultet ter omogočajo postransko delovanje UL [7]. Večina stavb je energetske neučinkovitih, na kar opozarja podatek, da je celotna letna raba energije na UL ocenjena na kar približno 70 GWh oziroma 240 kWh/m², kar letno pomeni okoli 7,5 mio. € ter 14.000 t emisij ogljikovega dioksida [7].

Ker se UL zaveda možnosti zmanjšanja porabe energije za delovanje stavb in posledično zmanjšanje stroškov vzdrževanja, želi s svojo jasno vizijo postati zgled za izvajanje ukrepov in povečanje energetske učinkovitosti [7]. Da bi lažje izpolnjevala zahteve in pravilno zastavila ukrepe, ki vodijo do učinkovitih rezultatov, bi UL potrebovala dobro poznavanje trenutnega stanja, preden začne z morebitno prenovo energetske neučinkovitih stavb. Pri tem je vsekakor zelo pomembno poznavanje dejanskega stanja stavbnega ovoja, katerega glavni del je seveda toplotna prehodnost konstrukcijskih elementov in s tem pravilno določenih gradbeno-fizikalnih lastnosti.

5.1 Vzorčni objekti

Da bi imeli jasen pregled dejanskega stanja UL, smo si izbrali nekaj referenčnih objektov, ki predstavljajo presek in s tem tipične predstavnike fakultet v Ljubljani. Tako smo podrobneje preučili Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo (v nadaljevanju FGG), Fakulteto za arhitekturo (v nadaljevanju FA) ter Fakulteto za kemijo in kemijsko tehnologijo (v nadaljevanju FKKT), ki so predstavljene v preglednici 5.

Preglednica 5: Seznam obravnavanih objektov.

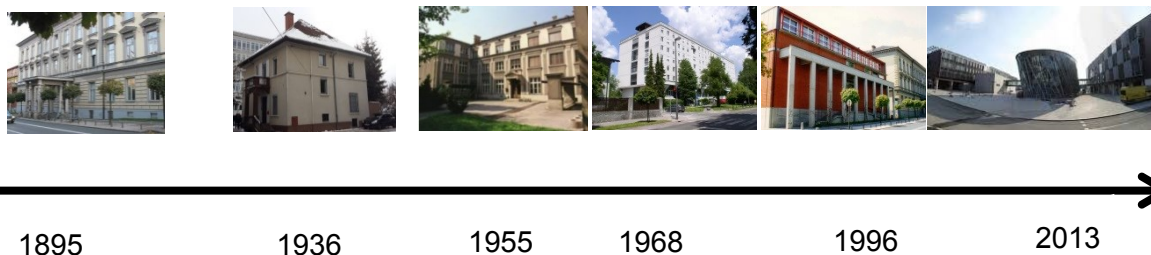
ID	Ime	Naslov	Leto izgradnje
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – FGG			
1.	Sedež fakultete	Jamova cesta 2	1968
2.	Računovodstvo	Groharjeva cesta 2b	1936

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

3.	Oddelek za hidrotehniko	Hajdrihova ulica 28	1955
Fakulteta za arhitekturo – FA			
4.	Stari del stavbe	Zoisova cesta 12	1895
5.	Prizidek	Zoisova cesta 12	1996
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo – FKKT			
6.	Objekt FKKT	Večna pot 113	2013

Z analizo izbranih stavb želimo predstaviti tipično stanje stavbnega fonda UL. Njihovo leto izgradnje sega na konec 19. stoletja pa vse do leta 2013. Poudarek je na objektih, zgrajenih v 20. stoletju, kot vzorčni objekt pa smo pridobili tudi podatke za popolno novogradnjo (FKKT). Kronološko so objekti predstavljeni tudi na sliki 8, ki posebej prikazuje leto izgradnje vsake stavbe UL.



Slika 8: Kronološki pregled vzorčnih objektov.

Objekti, ki predstavljajo vzorec naše študije, so v nadaljevanju predstavljeni podrobneje. Poleg kratkega opisa, letnice izgradnje in slike stavbe smo predstavili tudi konstrukcijske sklope, na katerih smo kasneje izvajali analizo. Vsi vzorčni konstrukcijski elementi objektov so predstavljeni v nadaljevanju.

Preglednica 6: Predstavitev objekta FGG – sedež fakultete.

1. FGG – sedež fakultete

Lokacija: Jamova cesta 2

Leto izgradnje: 1968



Slika 9: FGG – sedež fakultete [25].

Objekt, ki predstavlja sedež FGG, je bil grajen leta 1968 in je namenjen izobraževanju in raziskovanju. Gre za 8-nadstropno javno stavbo, katere večji del predstavljajo predavalnice, učilnice in pisarne.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo projektne dokumentacije [1] in diplomskih nalog [29], ki so že analizirale energetske bilance objekta.

ID	Element	Sestava elementa
1.1	JZ zunanja stena	notranji omet, plinobeton, betonski fasadni paneli
1.2	SV zunanja stena 1.	notranji omet, plinobeton, betonski fasadni paneli
1.3	Streha (ravna)	omet, super 40, tlačna plošča, lahka opeka,izr. beton, TI, estrih bitumenski trak, gramoz, betonska plošča
1.4	SV zunanja stena 2.	notranji omet, plinobeton, betonski fasadni paneli

Preglednica 7: Predstavitev objekta FGG – računovodstvo.

2. FGG – računovodstvo

Lokacija: Groharjeva cesta 2b

Leto izgradnje: 1936



Slika 10: FGG – računovodstvo.

Objekt je del FGG in je namenjen administraciji. Gre za 3-etažno stavbo, v kateri so locirani le pisarniški prostori.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo inženirske ocene in projektne dokumentacije – gradbenega načrta [33].

ID	Element	Sestava elementa
2.1	Zunanja stena	notranji omet, polna opeka, fasadna malta

Preglednica 8: Predstavitev objekta FGG – oddelek za hidrotehniko.

3. FGG – oddelek za hidrotehniko

Lokacija: Hajdrihova ulica 28

Leto izgradnje: 1955



Slika 11: FGG – oddelek za hidrotehniko [31].

Objekt je bil zgrajen leta 1955. Danes tu poteka pedagoška in znanstveno raziskovalna dejavnost. Objekt predstavlja kulturni spomenik, saj spada v sklop nepremične kulturne dediščine.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo projektne dokumentacije [30] in diplomskih nalog [31], ki so že analizirale energetske bilanco objekta.

ID	Element	Sestava elementa
3.1	Zunanja stena	podaljšana apnena malta, opeka Aristos, fasadna malta
3.2	Streha (strop proti neo. podstrešju)	cementna malta, lesene deske, nepr. sloj zraka, armiran beton, nasutje peska, PVC-folija, betonski tlak

Preglednica 9: Predstavitev objekta FA – stari del stavbe.

4. FA – stari del

Lokacija: Zoisova cesta 12

Leto izgradnje: 1895



Slika 12: FA – stari del [25].

Objekt je bil zgrajen leta 1895 in je bil razglašen za profano stavbno dediščino ter zaščiten kot zgodovinski spomenik. Streha je bila obnovljena leta 1985.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo projektne dokumentacije objekta [32].

ID	Element	Sestava elementa
4.1	Zunanja stena	podaljšana apnena malta, polna opeka, podaljšana apnena malta, pigmentna fasadna malta
4.2	Streha (strop proti neo. podstrešju)	podaljšana apnena malta, les-smreka, bor, zračna plast, les-smreka, bor, mineralna volna

Preglednica 10: Predstavitev objekta FA – prizidek.

5. FA – prizidek

Lokacija: Zoisova cesta 12

Leto izgradnje: 1996



Slika 13: FA – prizidek [25].

Objekt je bil kot prizidek FA zgrajen leta 1996. Ravno tako kot stari del je namenjen pedagoško-izobraževalnim dejavnostim. Tu sta tudi velika Plečnikova predavalnica in knjižnica.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo projektne dokumentacije objekta [32].

ID	Element	Sestava elementa
5.1	Zunanja stena	apnena malta, AB-stena, mineralna volna, fasadna opeka
5.2	Streha (strop proti neo. podstrešju)	mavčno-kartonska plošča, PVC-folija, mineralna volna, zračna plast, betonska plošča

Preglednica 11: Predstavitev objekta FKKT.

6. FKKT

Lokacija: Večna pot 113

Leto izgradnje: 2013



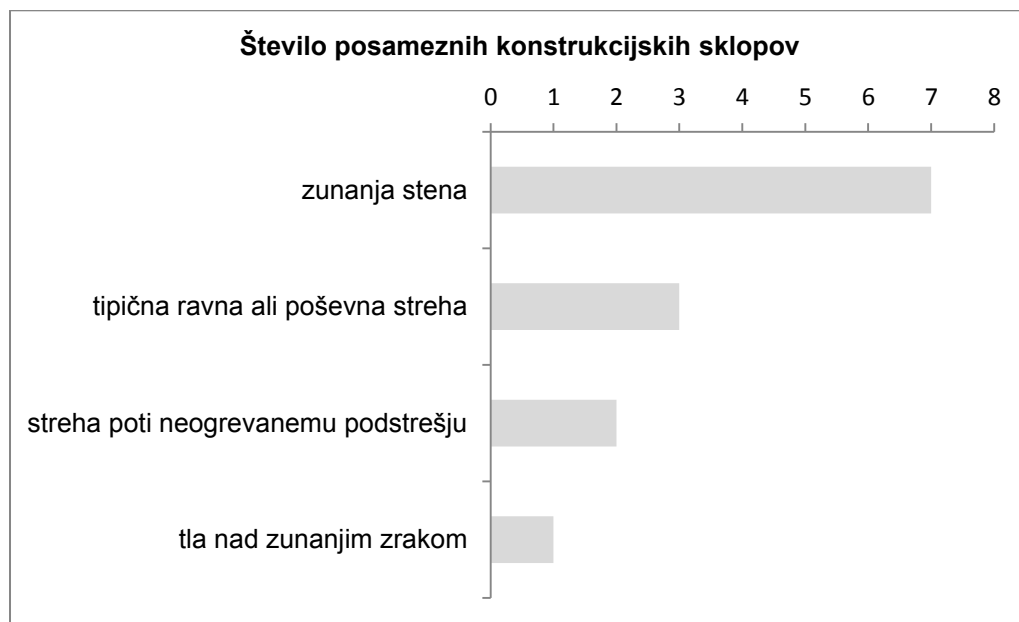
Slika 14: FKKT [25].

Objekt je nestanovanjska novogradnja, namenjen raziskovalnim dejavnostim v laboratorijih in učnim procesom v številnih učilnicah in predavalnicah. V šest-etažni stavbi je tudi ogromno pisarn.

Podatki o sestavi konstrukcijskih sklopov so bili pridobljeni s pomočjo projektne dokumentacije objekta [34].

ID	Element	Sestava elementa
6.1	Zunanja stena	AB-stena, eksp. polistiren, lepilo, fasadne plošče
6.2	Streha (ravna)	AB-plošča, naklonski beton, bit. trak, eksp. polistiren, bit. hidroizolacija, ekst. polistiren, filc, drobni gramoz
6.3	Tla nad terenom	PVC-obloga, estrih, eksp. polietilent, eks. polistiren, AB-plošča, lesni beton, kamena volna, lesni beton, apnena malta

Na grafikonu 1 je prikazano število posameznih konstrukcijskih sklopov, ki smo jih v času meritev uspeli izmeriti na objektih UL.



Grafikon 1: Število posameznih konstrukcijskih sklopov.

Zunanje Stene

Kot je za starejše objekte značilno, zunanje stene v glavnem sestavlja polna opeka večjih debelin brez sloja toplotne izolacije. Takšno ali podobno sestavo imajo vsi vzorčni objekti, zgrajeni pred letom 1960. Kasneje se je pojavil objekt FGG – sedež fakultete, katerega nosilna konstrukcija je sestavljena iz betonskih stebrov ter predstavlja večji del ovoja stavbe v kombinaciji z rebričastimi ploščami iz plinobetona in velikimi površinami transparentnih elementov. Konec 20. stoletja so se v gradnji začele pojavljati zunanje stene iz armiranega betona v kombinaciji s toplotno izolacijo. Z leti se je debelina toplotne izolacije povečevala, kar zahteva tudi vse ostrejša nacionalna zakonodaja.

Strehe

Meritve toplotne prehodnosti strehe so potekale predvsem na stropih proti neogrevanemu podstrešju. V primeru, ko je bilo to možno, so se meritve izvajale tudi na dejanskem ostrešju. To so večinoma bile ravne strehe, katerih zunanja stran meji neposredno na zunanje okolje. Tako kot pri zunanjih stenah se toplotna izolacija pri starejših stavbah še ne pojavlja, ampak so večinoma v sestavi plošče in ometa, s časom pa se le-ta začne pojavljati v vse večjih debelinah.

Tla

Na enem izmed objektov smo imeli možnost meriti tudi tla nad terenom. Poleg dokaj tipične sestave estriha v kombinaciji z betonsko ploščo in predpostavke, da so tu izgube v zimskem času višje kot na tleh, ki meji na teren, konstrukcijski element sestavlja tudi precejšnja debelina toplotne izolacije.

Za lažje sledenje rezultatov, ki so predstavljeni v nadaljevanju dela, in boljše poznavanje posameznega konstrukcijskega sklopa so v preglednici 12 posamezni konstrukcijski sklopi označeni z zaporedno številko in poimenovani. Poleg tega so poudarjene morebitne posebnosti, ki jih lahko kot sestavni del konstrukcijski sklop vsebuje. Predvsem gre tu za sloj zraka ali manjše nehomogenosti, ki bi lahko bistveno vplivale na rezultat.

Preglednica 12: Seznam vzorčnih konstrukcijskih sklopov.

ID	Poimenovanje konstrukcijskega elementa	Morebitne posebnosti konstrukcijskega sklopa
1.	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete	
1.1	SZ zunanja stena 1*	vsebuje sloj zraka, ni povsem homogen
1.2	SV zunanja stena	vsebuje sloj zraka, ni povsem homogen
1.3	Ravna streha	
1.4	SZ zunanja stena 2*	vsebuje sloj zraka, ni povsem homogen
2.	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – računovodstvo	
2.1	Zunanja stena	
3.	Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – oddelek za hidrotehniko	
3.1	Zunanja stena	Zidaki Aristos s horizontalnimi prazninami ni povsem homogen
3.2	Strop proti neogrevanemu podstrešju	vsebuje sloj zraka, ni povsem homogen
4.	Fakulteta za arhitekturo- stari del	
4.1	Zunanja stena	
4.2	Poševna streha	vsebuje sloj zraka, ni povsem homogen, prenovljena leta 1985
5.	Fakulteta za arhitekturo – prizidek	
5.1	Zunanja stena	vsebuje sloj zraka
5.2	Strop proti neogrevanemu podstrešju	vsebuje sloj zraka
6.	Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo	
6.1	Zunanja stena	brez posebnosti
6.2	Ravna streha	brez posebnosti
6.3	Tla nad zunanjim zrakom	brez posebnosti

*Na objektu FGG – sedež fakultete smo SZ zunanjo steno merili dvakrat z namenom, da bi preverili razliko med rezultati glede na dolžino časovnega obdobja meritve.

»Ta stran je namenoma prazna«

6 IZRAČUN TOPLOTNE PREHODNOSTI

Do ustrezne sestave posameznega konstrukcijskega sloja smo prišli s pomočjo projektne dokumentacije, popisov gradbenih del in elaboratov gradbene fizike posamezne stavbe, s pomočjo katerih so bile izdelane energetske izkaznice, ki so med drugim tudi javno dostopne na portalu Prostor [25]. Poleg dokumentacije, zapisane na papirju, smo si pomagali tudi z mnenjem skrbnikov posameznega objekta in s tem pridobili kritično oceno, saj se pogostokrat zgodi, da materiali, navedeni v popisu, niso bili dejansko vgrajeni. Zaradi ustrezne starosti vzorčnih objektov UL nam je s poznavanjem vgrajenih materialov pomagal le skrbnik novejšega objekta, drugje nam z dejanskim poznavanjem vgrajenih materialov žal niso znali pomagati.

S pomočjo projektne dokumentacije smo tudi prišli do podatka o snovnih lastnostih vgrajenih materialov. Če te niso bile podane v projektu, smo privzeli podatke o toplotni prevodnosti iz TSG4 za standardne (generične) materiale. V preglednicah 13–18 so predstavljeni vsi konstrukcijski sklopi stavb UL. Sloji posameznega konstrukcijskega sloja so v preglednicah zapisani v zaporedju od notranjosti proti zunanosti. Za vsak posamezni sloj konstrukcijskega sklopa smo zapisali ustrezno debelino in toplotno prevodnost – dve glavni lastnosti, ki smo ju potrebovali za izračun toplotne prehodnosti elementa. Pri izračunu toplotne prehodnosti smo upoštevali vse zahteve za izračun toplotne prehodnosti homogenih konstrukcij, ki so predstavljene v predhodnem poglavju 4.1 Metode za izračun toplotne prehodnosti. V inženirski praksi morebitne nehomogenosti za izračun toplotne prehodnosti zanemarimo in uporabimo poenostavljene modele, kar smo storili tudi sami. Če je bila pri projektni dokumentaciji morebitna zračna plast zanemarjena, je tudi sami nismo upoštevali, čeprav smo s pomočjo inženirske ocene predvidevali, da je del konstrukcijskega elementa. Vse poenostavitve, ki smo jih med izračunom uporabili, smo v obliki besedila zapisali in na kratko komentirali vsak konstrukcijski sklop posebej.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete

Zunanje stene niso povsem homogene, saj je med plino-betonskimi zidaki, ki predstavljajo nosilno konstrukcijo objekta, malta. Malta vpliva na toplotno izolativnost zidu ter posledično na izračunano in merjeno toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa. Med betonskimi fasadnimi paneli in nosilno konstrukcijo je sloj zraka, za katerega se ne ve točno, kako zelo je prezračevan in kolikšna je njegova debelina. S tem razlogom se sloj zraka pri zunanji steni za izračun toplotne prehodnosti ne upošteva. Ravna pohodna streha je po sestavi povsem homogena, zato tu težav s poenostavitvijo konstrukcijskega sklopa nismo imeli. Preglednica 13 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FGG – sedež fakultete.

Preglednica 13: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – sedež fakultete.

ID 1.1 in 1.4 SZ zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,13
Notranji omet	0,87	0,01	0,01
Plinobeton	0,35	0,20	0,57
Zračna plast			
Betonski fasadni panel	1,2	0,05	0,04
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 26 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 1,259 W/m²K

ID 1.2 SV zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,13
Notranji omet	0,87	0,01	0,01
Plinobeton	0,35	0,20	0,57
Zračna plast			
Betonski fasadni panel	1,2	0,05	0,04
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 26 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 1,259 W/m²K

ID 1.3 Ravna streha	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,1
Omet	0,99	0,01	0,010
Super 40	0,61	0,40	0,656
Tlačna plošča	2,04	0,05	0,025
Lahka opeka	0,58	0,06	0,103
Izravnalni beton	1,16	0,07	0,060
Toplotna izolacija	0,041	0,01	0,244
Estrih	1,16	0,03	0,026
Bitumenski trak	0,19	0,01	0,053
Gramoz	0,81	0,03	0,037
Armirano-betonska plošča	2,04	0,03	0,015

Se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 13

$R_{S,e}$

0,04

Skupna debelina: 70 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,731 W/m²K

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – računovodstvo

Nosilna konstrukcija zunanje stene v stavbi računovodstva v kombinaciji z malto ni povsem homogena, zato smo pri izračunu zopet upoštevali poenostavitev in upoštevali le polno opeko. Sicer je sestava zunanje stene na tem objektu povsem preprosta, saj zaradi starosti ovoj stavbe še ne vsebuje toplotne izolacije. Preglednica 14 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FGG – računovodstvo.

Preglednica 14: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – računovodstvo.

ID 2.1 Zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m²K/W]
R _{s,i}			0,13
Notranji omet	0,87	0,02	0,023
Polna opeka	0,64	0,45	0,703
Pigmentna fasadna malta	0,7	0,03	0,043
R _{s,e}			0,040

Skupna debelina: 50 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 1,065 W/m²K

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – oddelek za hidrotehniko

Nosilna konstrukcija zunanje stene je opeka Aristos, ki vsebuje horizontalne praznine, kar pomeni, da je konstrukcijski sklop nehomogen. Poleg tega je opeka povezana z malto, ki še bolj vpliva na izračun toplotne prehodnosti, saj je pri izračunu ne upoštevamo. Prav tako pri izračunu ne upoštevamo armiranobetonskih reber, ki so del armiranobetonske rebraste plošče, med katerimi je sloj neprezračevanega zraka. Rebra namreč v prerezu predstavljajo le okoli 10 % neprezračevanega sloja zraka, kar pa poleg malte in praznin v opeki povečuje nehomogenost, ki jo za izračun poenostavimo. Preglednica 15 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FGG – oddelek za hidrotehniko.

Preglednica 15: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FGG – oddelek za hidrotehniko.

ID 3.1 Zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,13
Podaljšana apnena malta	0,87	0,03	0,034
Opeka Aristos	0,6	0,42	0,700
Pigmentna fasadna malta	0,7	0,03	0,043
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 48 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 1,055 W/m²K

ID 3.2 Strop proti neo. podstrešju	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,1
Cementna malta	1,4	0,02	0,014
Lesene deske	0,17	0,03	0,021
Neprezračevani sloj zraka		0,20	0,160
Armirano-betonska rebra			
Armirano-betonska plošča	2,04	0,15	0,129
Nasutje peska in drobnega gramoza	1,5	0,10	0,067
PVC-folija	0,19	0,0002	0,001
Betonski tlak	1,4	0,05	0,036
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 55,02 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 1,498 W/m²K

Fakulteta za arhitekturo – stari del

Zunanja stena je precej podobna objektu FGG – računovodstvo, kar dokazuje tudi dejstvo, da sta objekta iz skoraj istega časovnega obdobja. Malto, kot vezni material polne opeke, smo pri izračunu zanemarili. Streha je bila pred leti sanirana v celoti, kar dokazuje 10 cm debela toplotna izolacija iz mineralne volne, ki je v času izgradnje objekta (leta 1895) še ni bilo. Zračna plast je med lesenimi špirovci, kar kaže na nehomogenost konstrukcijskega sklopa. Ravno zaradi poenostavitve in možnosti izračuna le homogenih konstrukcijskih sklopov smo lesene špirovce zanemarili in upoštevali le zračno plast. Za slojem iz mineralne volne pride tudi kritina, ki smo jo ravno tako zanemarili, kajti vmes je sloj zraka, ki je zelo prezračevan in zato tudi ni upoštevan pri izračunu toplotne prehodnosti. Preglednica 16 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FA – stari del.

Preglednica 16: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FA – stari del.

ID 4.1 Zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
R _{S,i}			0,13
Podaljšana apnena malta	0,87	0,04	0,046
Polna opeka	0,64	0,60	0,938
Podaljšana apnena malta	0,87	0,04	0,046
Pigmentna fasadna malta	0,7	0,02	0,029
R _{S,e}			0,04

*Skupna debelina: 70 cm****Izračunana toplotna prehodnost: 0,814 W/m²K***

ID 4.2 Poševna streha	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
R _{S,i}			0,1
Podaljšana apnena malta	0,87	0,03	0,034
Les – smreka bor (deske)	0,14	0,018	0,129
Zračna plast		0,30	0,160
Les smreka, bor (špirovci)			
Les – smreka, bor (deske)	0,14	0,018	0,129
Mineralna volna	0,04	0,10	2,500
Zračna plast			
Opečna kritina			
R _{S,e}			0,04

*Skupna debelina: 46,6 cm****Izračunana toplotna prehodnost: 0,323 W/m²K***

Fakulteta za arhitekturo – prizidek

Med mineralno volno in polno opeko, ki predstavlja zaključni sloj fasade zunanje stene prizidka, je sloj zraka, ki smo ga pri izračunu zanemarili, saj ne poznamo podatka o njegovi debelini in koliko je sloj pravzaprav sploh prezračevan. Strop proti neogrevanemu podstrešju ravno tako predstavlja sloj zraka, ki je neprezračevan in v kombinaciji z betonskimi nosilci ne predstavlja ravno homogenega konstrukcijskega sklopa. Preglednica 17 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FA – prizidek.

Preglednica 17: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FA – prizidek.

ID 5.1 Zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,13
Podaljšana apnena malta	0,87	0,02	0,023
Beton	2,04	0,30	0,147
Mineralna volna	0,035	0,05	1,429
Zračna plast			
Polna opeka	0,64	0,10	0,156
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 47 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,520 W/m²K

ID 5.2 Strop proti neo. podstrešju	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
$R_{S,i}$			0,1
Armirano-betonska plošča	2,04	0,20	0,098
Zračna plast		0,30	0,160
Mineralna volna	0,04	0,10	2,500
PVC-folija	0,19	0,0002	0,001
Mavčno-kartonska plošča	0,21	0,0125	0,060
$R_{S,e}$			0,04

Skupna debelina: 61,27 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,338 W/m²K

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

Konstruktivski sklopi objekta FKKT so skoraj povsem homogeni in brez slojev zraka, ki bi lahko vplivali na izolativnost stavbnega ovoja. Preglednica 18 predstavlja izračunane toplotne prehodnosti na objektu FKKT.

Preglednica 18: Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na FKKT.

ID 6.1 Zunanja stena	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
R _{S,i}			0,13
AB-stena	2,04	0,20	0,098
Ekspandiran polistiren	0,038	0,15	3,947
Lepilo	1,4	0,008	0,006
Fasadne plošče – glazirane	0,79	0,01	0,013
R _{S,e}			0,04

Skupna debelina: 36,8 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,236 W/m²K

ID 6.2 Ravna streha	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
R _{S,i}			0,1
AB-plošča	2,04	0,20	0,098
Naklonski beton	1,51	0,05	0,033
Bitumenski trak	0,19	0,005	0,026
Ekspandiran polistiren	0,041	0,10	2,439
Bitumenska hidroizolacija	0,19	0,01	0,053
Ekstrudiran polistiren	0,036	0,08	2,222
Filc	0,1	0,002	0,020
Pesek in drobni gramoz	1,5	0,08	0,053
R _{S,e}			0,04

Skupna debelina: 52,7 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,197 W/m²K

ID 6.3 Tla nad terenom	λ [W/mK]	d [m]	R [m ² K/W]
R _{S,i}			0,17
PVC-plošče	0,23	0,005	0,022
Estrih	1,51	0,07	0,046
Ekspandiran polistiren	0,041	0,025	0,600
AB-plošča	2,04	0,30	0,147
Lesni beton	0,24	0,005	0,021
Kamena volna	0,033	0,065	1,970
Lesni beton	0,24	0,005	0,021
Apnena malta	0,99	0,015	0,015
R _{S,e}			0,04

Skupna debelina: 49 cm

Izračunana toplotna prehodnost: 0,327 W/m²K

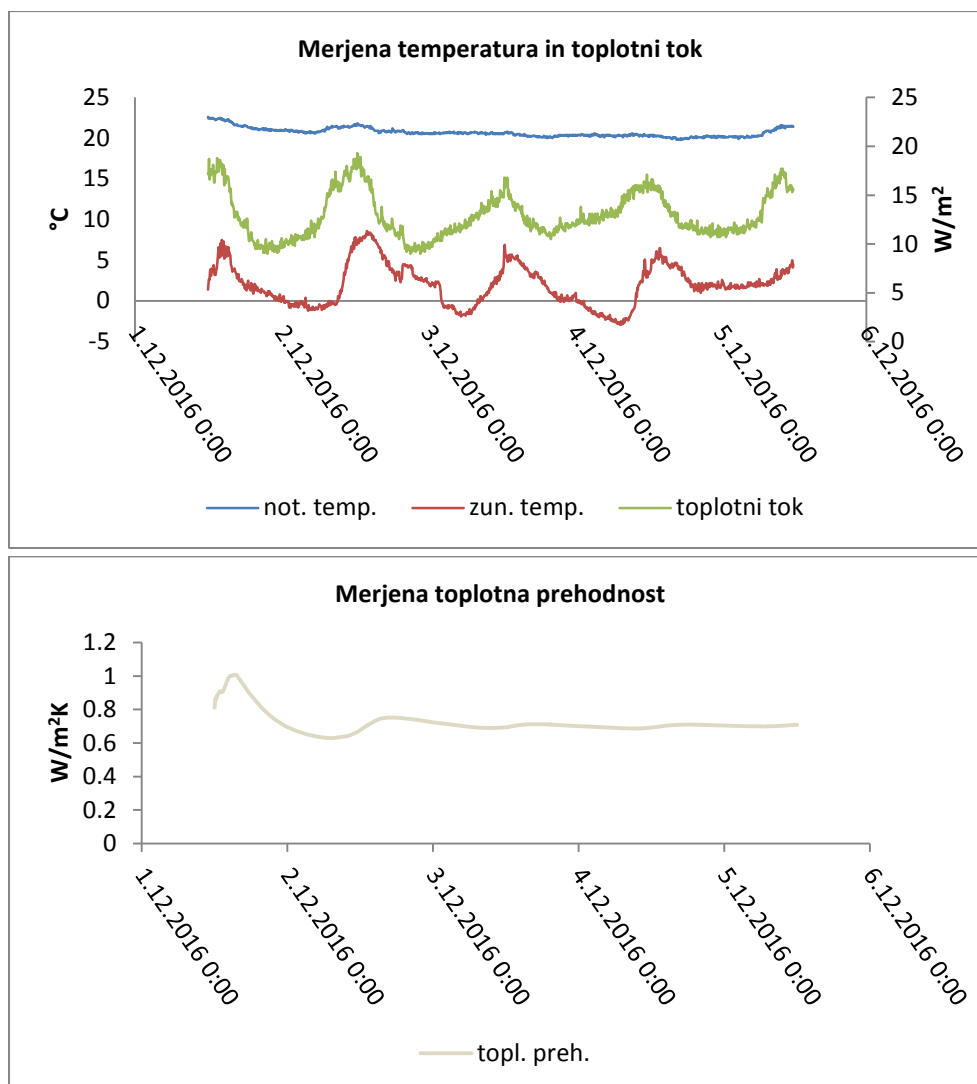
7 MERITEV TOPLOTNE PREHODNOSTI

V naslednjem poglavju so predstavljeni vsi rezultati meritev, opravljeni na konstrukcijskih sklopih vzorčnih objektov. Vsak element stavbnega ovoja je predstavljen s pomočjo:

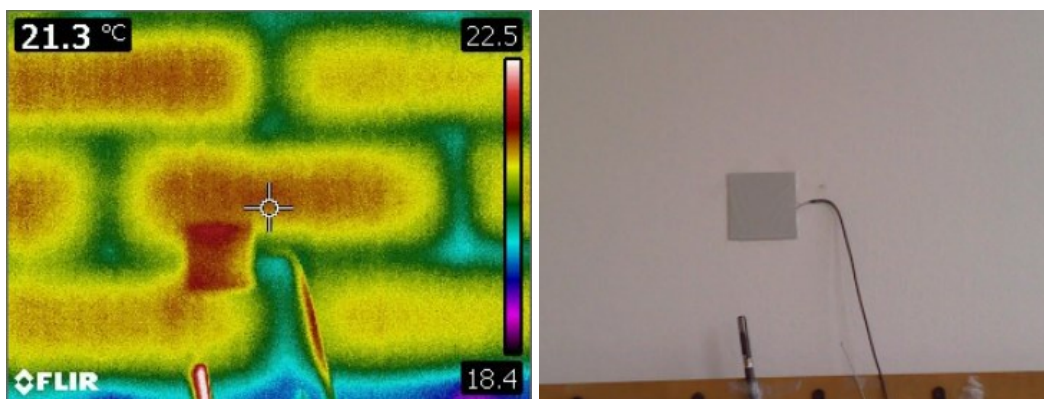
- slike, ki smo jo posneli s termo kamero in dejansko sliko v prostoru samem (na ta način smo našli primerno mesto, kjer ni morebitnih toplotnih mostov, ki bi vplivali na rezultat meritve),
- grafičnega prikaza poteka zunanje in notranje temperature ter toplotnega toka v času izvajanja meritev,
- grafičnega prikaza povprečne toplotne prehodnosti, določene na podlagi izvedenih meritev (po standardu ISO 9869-1),
- vremenskih spremenljivk, kot so: povprečna dnevna temperatura zraka, količina padavin, povprečna relativna vlaga v zraku in povprečna dnevna hitrost vetra.

Do podatkov o količini padavin, relativni vlagi, povprečni temperaturi zraka in hitrosti vetra smo prišli s pomočjo spletne strani ARSO [28], ki omogoča javni vpogled v številne meteorološke podatke, ki so dnevno opazovane in merjene. Te pridobivajo na različnih postajah po celotni Sloveniji. Vse potrebne meteorološke spremenljivke smo pridobili na podlagi podatkov vremenske postaje Bežigrad ($X = 145124$, $Y = 460655$, $h = 299$ m).

Rezultat posamezne meritve smo na kratko komentirali s spremnim besedilom.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete**ID 1.1 – SZ zunanja stena 1**

Grafikon 2: ID 1.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

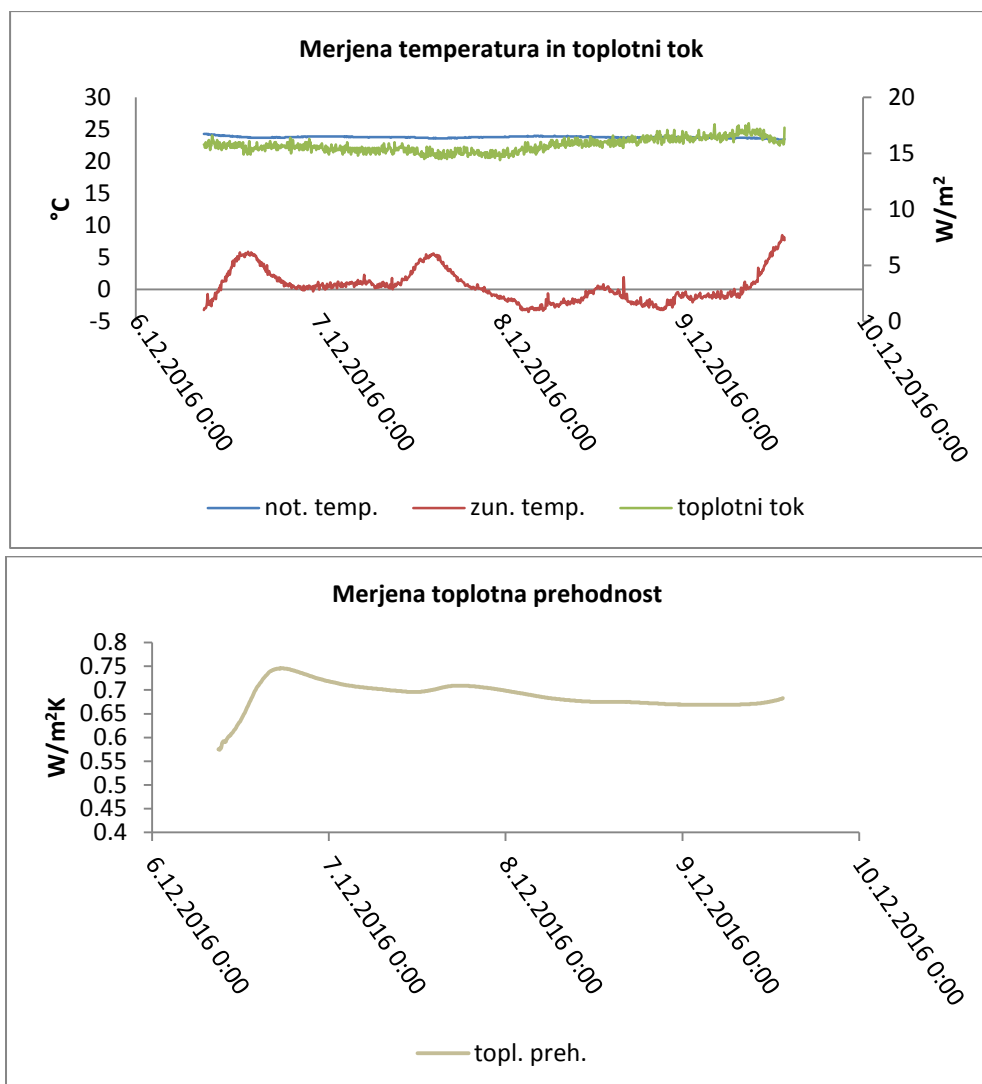
U merjena = 0,709 W/m²K

Slika 15: ID 1.1 Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

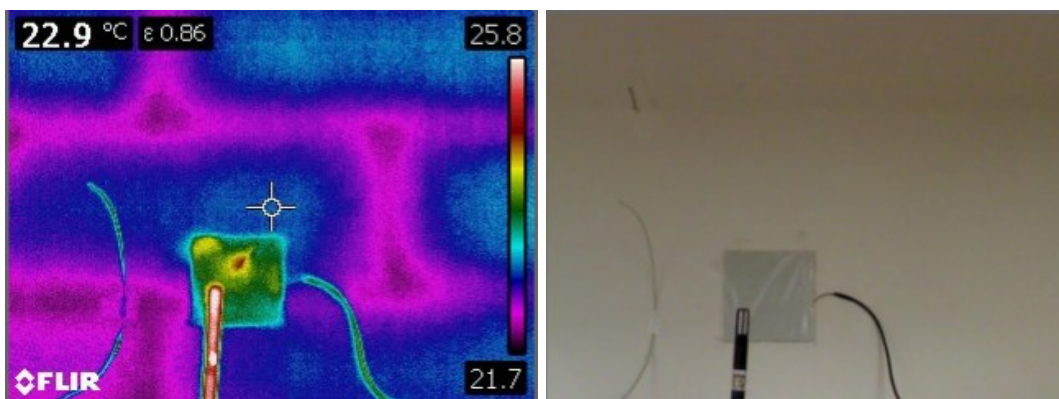
Preglednica 19: ID 1.1. Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
1. 12. 2016	-0,4	76	0	0,5
2. 12. 2016	2,3	80	0	0,9
3. 12. 2016	0,5	83	0	0,6
4. 12. 2016	0,2	79	0	0,6
5. 12. 2016	1,2	77	0	0,5

Graf merjene toplotne prehodnosti se je s časom lepo ustalil, oziroma kakor je zapisano v standardu ISO 6869, konvergirala k asimptotični vrednosti, kar je vidno na grafikonu 2. Notranja temperatura (grafikon 2) je bila v času meritev precej stalna, poleg tega ni bilo prisotnih nobenih padavin (preglednica 19). V času meritev so bili zunaj precej optimalni pogoji. Vsa ta dejstva kažejo na pravilnost in relevantnost rezultata, pridobljenega s pomočjo *in-situ* meritve.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete**ID 1.2 – SV zunanja stena**

Grafikon 3: ID 1.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

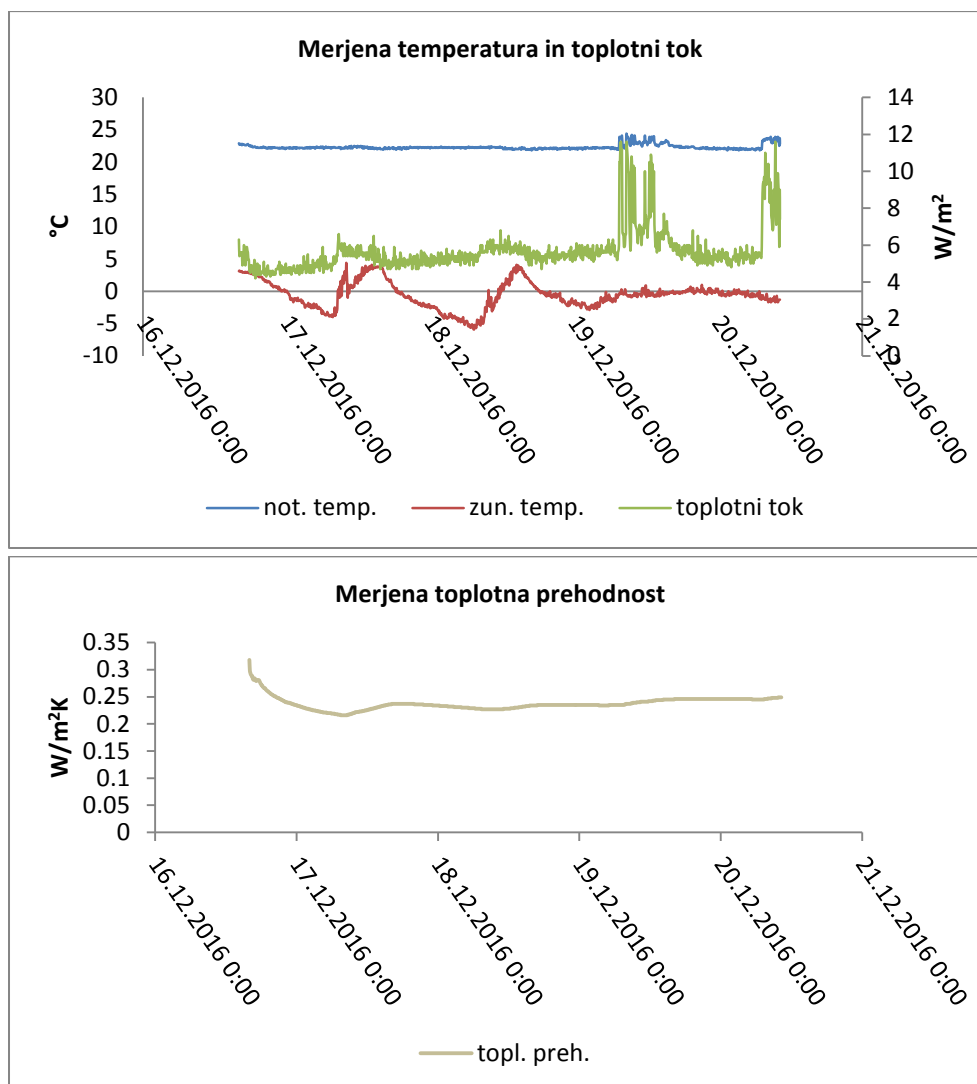
U merjena= 0,683 W/m²K

Slika 16. ID 1.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

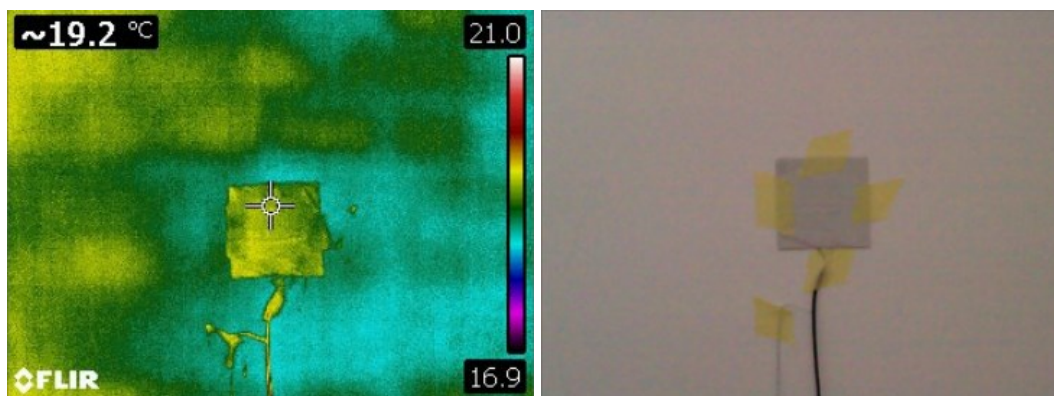
Preglednica 20: ID 1.2 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
6. 12. 2016	-0,2	84	0	0,5
7. 12. 2016	0,5	82	0	0,2
8. 12. 2016	-2,2	96	0	0,4
9. 12. 2016	0,8	79	0	0,9

Temperatura notranjega zraka je bila v času meritev povsem konstantna, poleg tega je bila precej stalna tudi temperatura zunanjega zraka (grafikon 3). Posledično je bil stalen tudi toplotni tok, kar je privedlo do grafa toplotne prehodnosti, prikazane na grafikonu 3, ki se je s časom zelo lepo ustalil. V času meritev so bili zunanji pogoji zelo optimalni, kar kaže na pravilnost rezultata meritve, pridobljenega po *in-situ* metodi.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete**ID 1.3 – Ravna streha**

Grafikon 4: ID 1.3 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,249 W/m²K

Slika 17: ID 1.3- Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

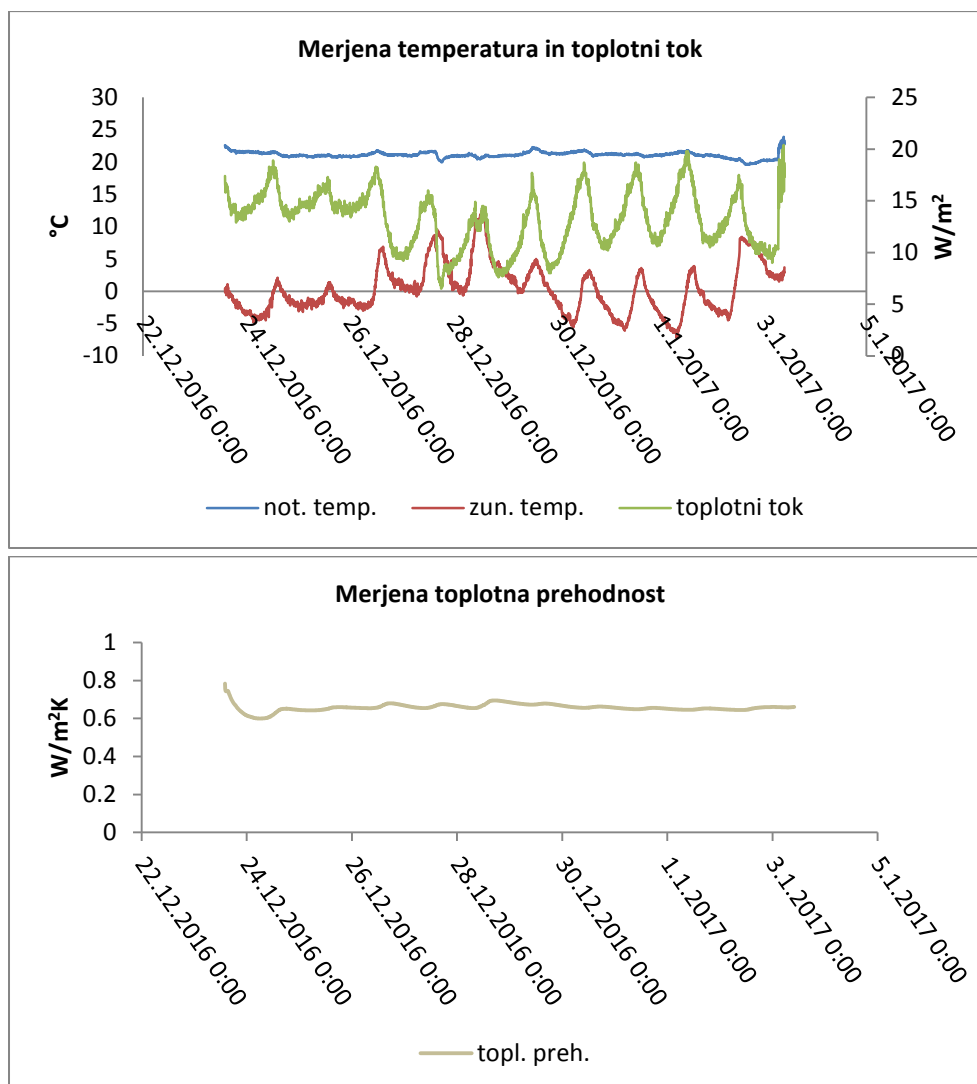
Preglednica 21: ID 1.3- Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
16. 12. 2016	1,4	71	0	1,6
17. 12. 2016	-1,5	86	0	0,4
18. 12. 2016	-2,1	88	0	0,3
19. 12. 2016	-0,7	90	0	1,2
20. 12. 2016	-1,8	94	0	1,1

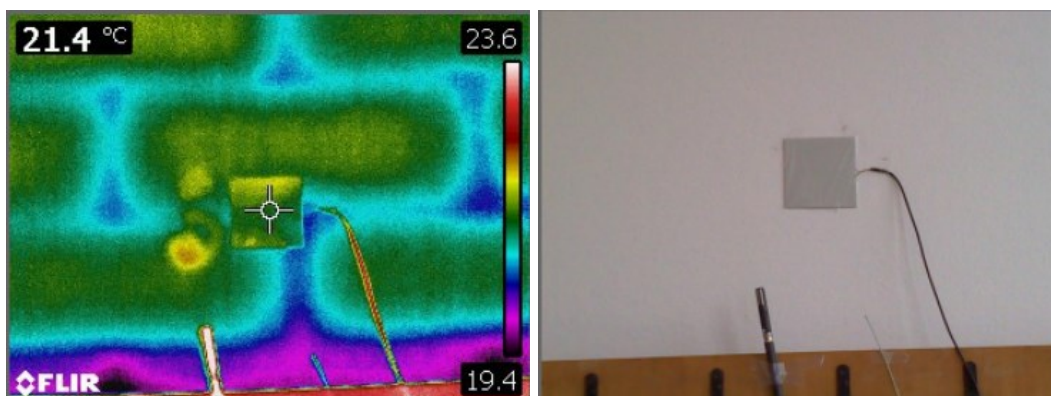
Graf toplotne prehodnosti, prikazan na grafikonu 4, lepo konvergira k asimptotični vrednosti. Kljub povečanemu nihanju toplotnega toka v drugi polovici meritve, kar je prikazano na grafikonu 4, kar je bilo najverjetneje posledica nihanja notranje temperature in nekoliko večje povprečne hitrosti vetra (preglednica 21), je rezultat meritve v nadaljevanju upoštevan kot pravilen.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete

ID 1.4 – SZ zunanja stena 2



Grafikon 5: ID 1.4 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,661 W/m²K

Slika 18: ID 1.4 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

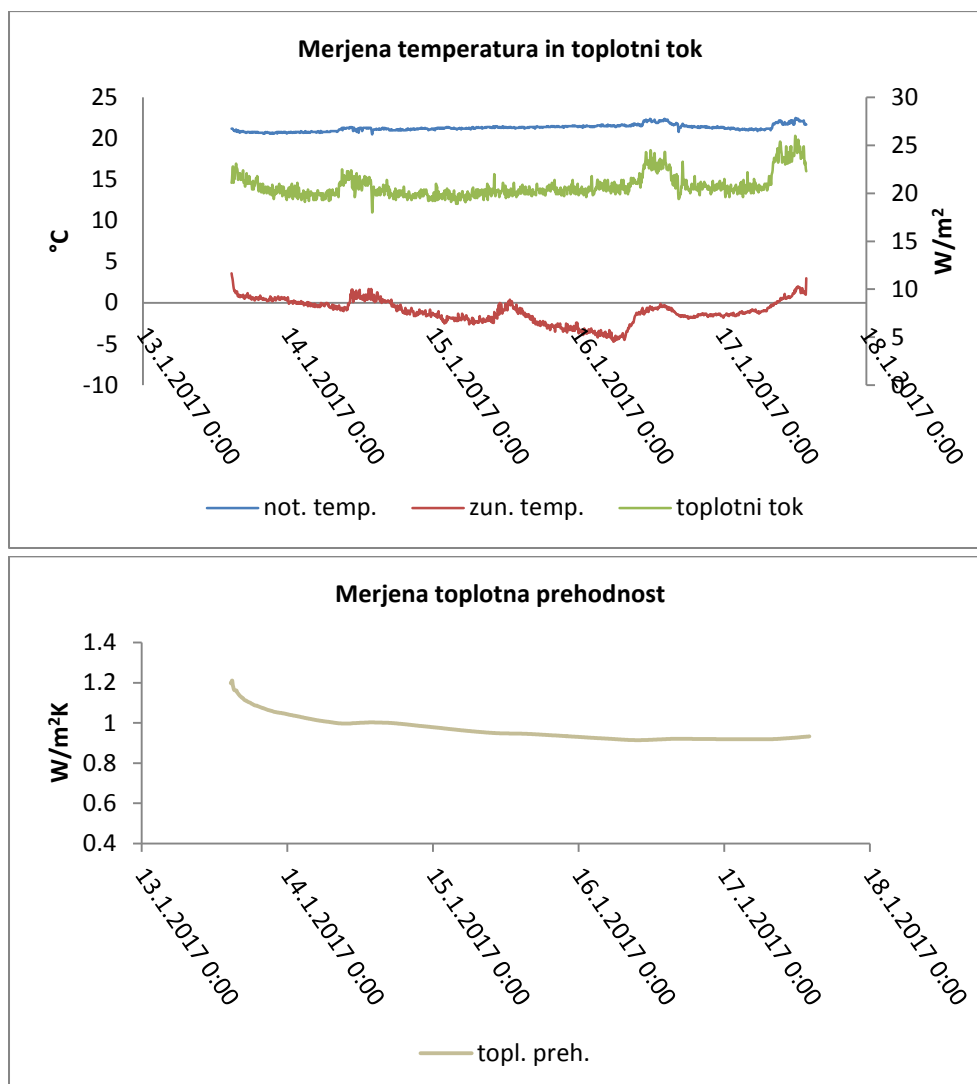
Preglednica 22: ID 1.4 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
23. 12. 2016	-3,3	93	0	0,6
24. 12. 2016	-2,5	93	0	0,7
25. 12. 2016	-2,3	98	0	0,6
26. 12. 2016	0,3	88	0	0,4
27. 12. 2016	3,6	68	0	0,7
28. 12. 2016	5,3	56	0	2,4
29. 12. 2016	-0,5	75	0,1	1,3
30. 12. 2016	-2,9	75	0	0,6
31. 12. 2016	-3,5	79	0	0,4
1. 1. 2017	-3,4	76	0	0,5
2. 1. 2017	2,6	71	0	2
3. 1. 2017	-0,3	84	0,1	1,4

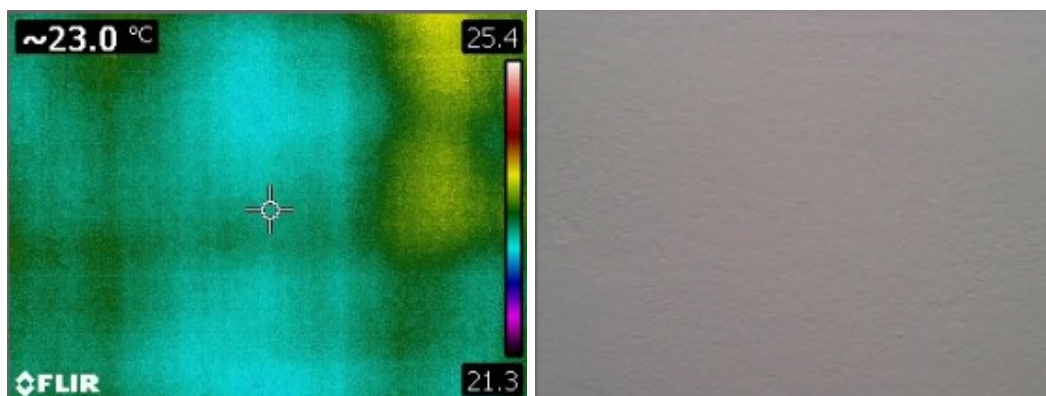
Tokrat smo meritev izvajali nekoliko daljši čas. V tem času so se pojavile manjša količina padavin in nekoliko višje vrednosti hitrosti vetra (še posebej 28. 12. ter 2. 1.), kar je razvidno iz preglednice 22. Zunanja temperatura je celotno obdobje meritve nihala v izrazito nočno-dnevni cikli, kar je posledično vplivalo tudi na nihanje toplotnega toka, kar je razvidno na grafikonu 5. Kljub temu je bila notranja temperatura zraka precej konstantna in povprečna toplotna prehodnost je lepo konvergirala k asimptotični vrednosti (grafikon 5). Ta predstavlja rezultat meritev, za katerega predpostavljamo, da je pravilen ter da notranji in zunanji pogoji v tako dolgem časovnem obdobju meritve najverjetneje bistveno ne vplivajo na pravilnost rezultata.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – računovodstvo

ID 2.1 Zunanja stena



Grafikon 6: ID 2.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,930 W/m²K

Slika 19: ID 2.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

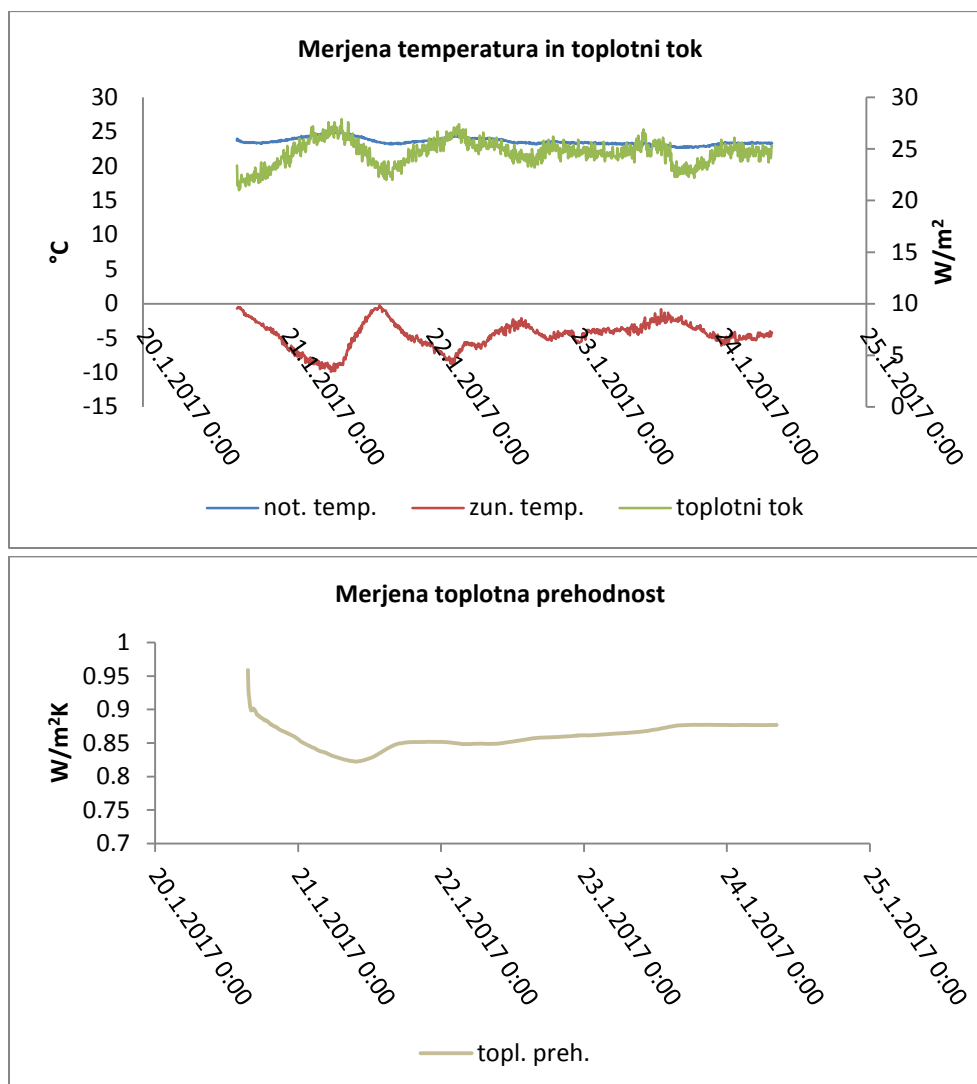
Preglednica 23: ID 2.1 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
13. 1. 2017	1,7	98	7	1,1
14. 1. 2017	-1,5	97	49,1	0,3
15. 1. 2017	-2,9	96	0	0,7
16. 1. 2017	-2,5	83	0	2,7
17. 1. 2017	-1,1	65	0	4,2

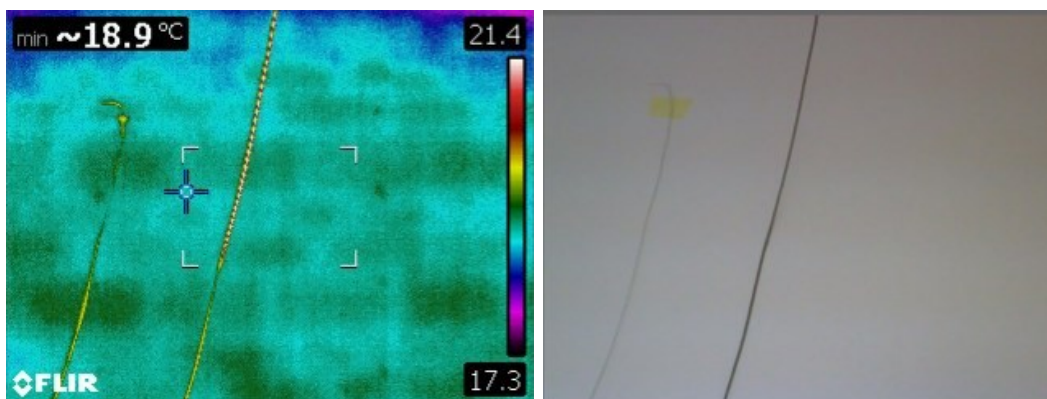
Notranja in zunanja temperatura zraka sta bili celotno obdobja merjenja precej stalni, prav tako je bil precej konstanten toplotni tok, prikazan na grafikonu 6. Tudi graf povprečne toplotne prehodnosti se je s časom lepo ustalil. Kljub obilnemu sneženju 14. 1. in povečanim povprečnim hitrostim vetra, prikazanim v preglednici 23, vse kaže na pravilnost rezultata, ki ga upoštevamo kot pravilnega za nadaljnjo analizo.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – oddelek za hidrotehniko

ID 3.1 Zunanja stena



Grafikon 7: ID 3.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,877 W/m²K

Slika 20: ID 3.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno)

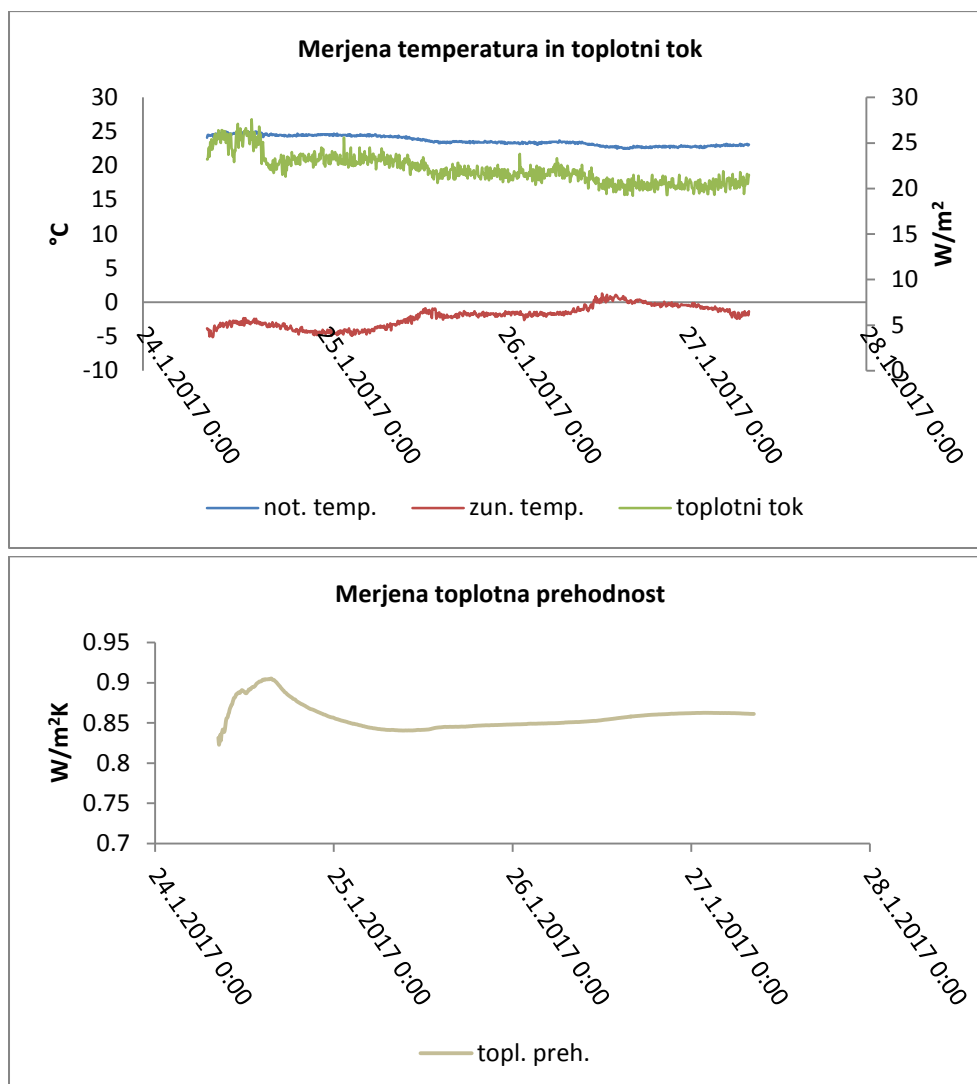
Preglednica 24: ID 3.1 – Vremenske spremenljivke v času meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
20. 1. 2017	-4,6	78	0	0
21. 1. 2017	-5,6	82	0	0,6
22. 1. 2017	-6	92	0	0,6
23. 1. 2017	-4,6	92	0	0,5
24. 1. 2017	-5,2	92	0	1,1

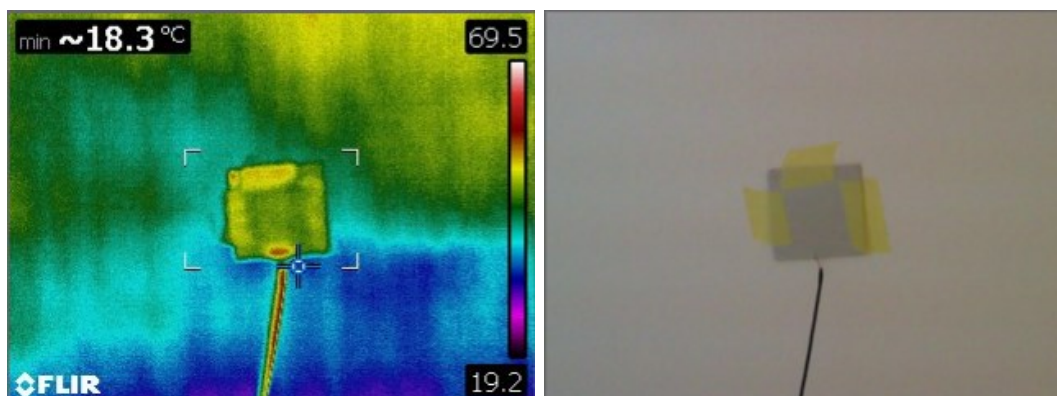
Grafikon 7 prikazuje zelo konstantni temperaturi zraka v prostoru in zunanjem okolju. Sicer izrazit dnevno-nočni cikel je posledično vplival na nihanje toplotnega toka, ki je med meritvami pozitivno vplival na konvergenco toplotne prehodnosti k asimptotični vrednosti (grafikon 7). Preglednica 24 prikazuje, da smo imeli med meritvami do sedaj najnižje povprečne dnevne temperature zunanjega zraka, kar se je odražalo v visokih razlikah v temperaturi ($\Delta T = 23\text{ °C}$). Visoke razlike v temperaturi so med meritvami zelo dobrodošle, saj posledično povečan toplotni tok pozitivno vpliva na realnost rezultata, ki smo ga dobili tudi sami.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – oddelek za hidrotehniko

ID 3.2 Strop proti neogrevanemu podstrešju



Grafikon 8: ID 3.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,861 W/m²K

Slika 21: ID 3.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

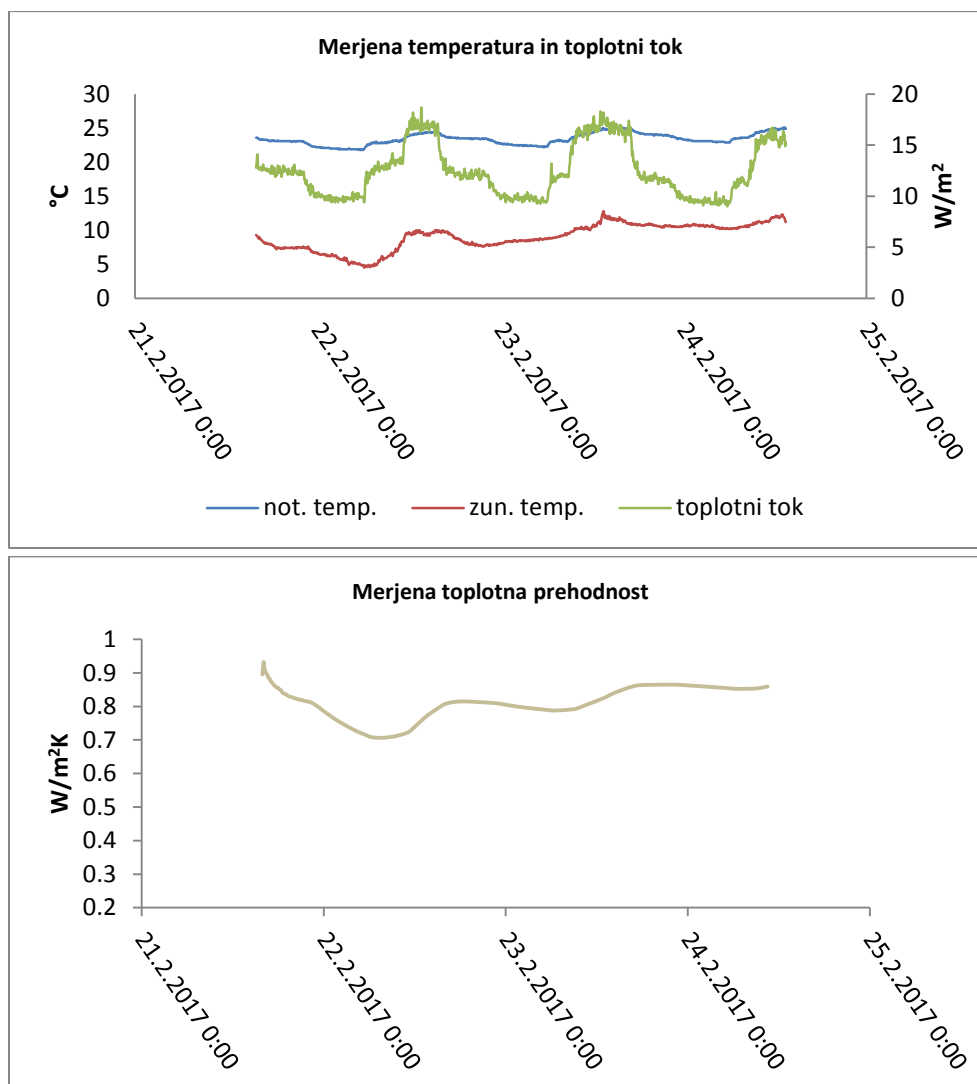
Preglednica 25: ID 3.2 – Vremenske spremenljivke tekom meritve [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
24. 1. 2017	-5,2	92	0	1,1
25. 1. 2017	-3,3	83	0	1,5
26. 1. 2017	-1,2	72	0	2,1
27. 1. 2017	-2,7	72	0	1,1

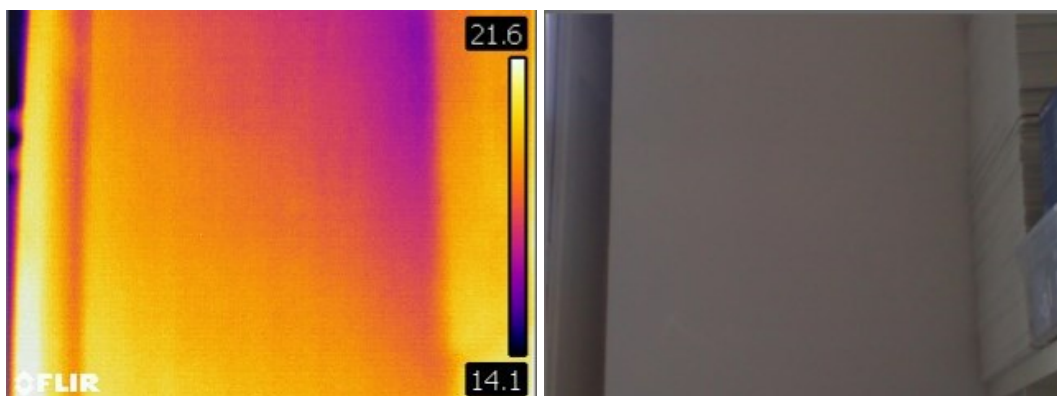
Grafikon 8 prikazuje, da sta bili notranja in zunanja temperatura zraka v času meritev stalni, kar se odraža tudi na konstantnem toplotnem toku. Temperaturna razlika je bila še vedno visoka ($\Delta T = 25\text{ °C}$), kar je pozitivno vplivalo na rezultat meritev. Poleg tega v tem obdobju ni bilo nobenih padavin, ravno tako ni bilo velikih hitrosti vetra, kar je razvidno v preglednici 25. Vsi ti dejavniki kažejo na realen rezultat, kar lahko vidimo tudi na grafikonu 8, kjer se toplotna prehodnost v obdobju meritev lepo ustali.

Fakulteta za arhitekturo – stari del

ID 4.1 Zunanja stena



Grafikon 9: ID 4.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,874 W/m²K

Slika 22: ID 4.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

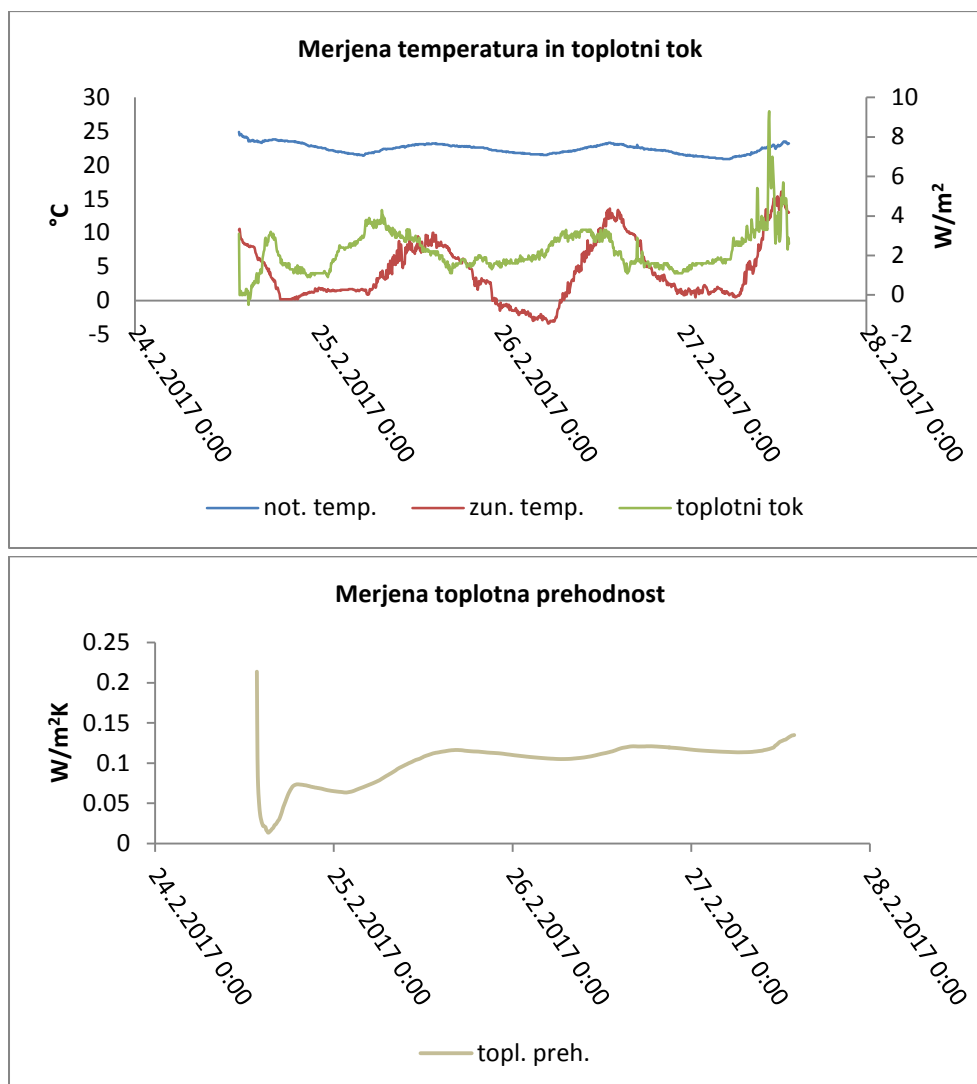
Preglednica 26: ID 4.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
21. 2. 2017	6,5	69	0	2,7
22. 2. 2017	6,9	85	0	2,4
23. 2. 2017	10,2	69	0	3,1
24. 2. 2017	5,2	88	0	1,6

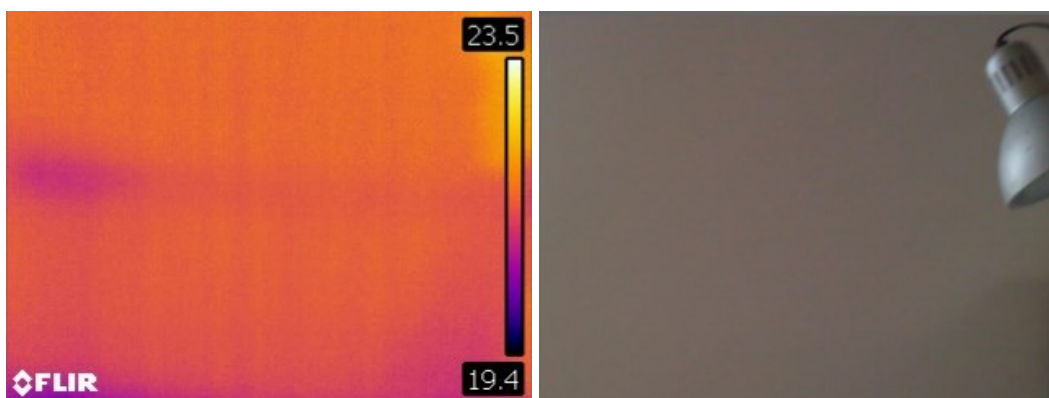
Na grafikonu 9 lahko opazimo izrazit dnevno-nočni cikel nihanja zunanje in notranje temperature zraka. Posledično je izrazito tudi nihanje toplotnega toka. Preglednica 26 prikazuje, da je bila v času meritve prisotna tudi višja hitrost vetra, kar je v kombinaciji z povprečno višjo temperaturo zunanjega zraka lahko posledica neustaljenosti grafa toplotne prehodnosti. Poleg zunanjih pogojev, bi na rezultat lahko vplivala tudi sama lokacija merilnika toplotnega toka. Le-ta je bil namreč postavljen precej poleg okna, kjer bi se lahko čutil vpliv toplotnega mostu (slika 22). Kljub temu rezultat upoštevano kot mirodajen za nadaljno analizo.

Fakulteta za arhitekturo – stari del

ID 4.2 Poševna streha



Grafikon 10: ID 4.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,135 W/m²K

Slika 23: ID 4.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

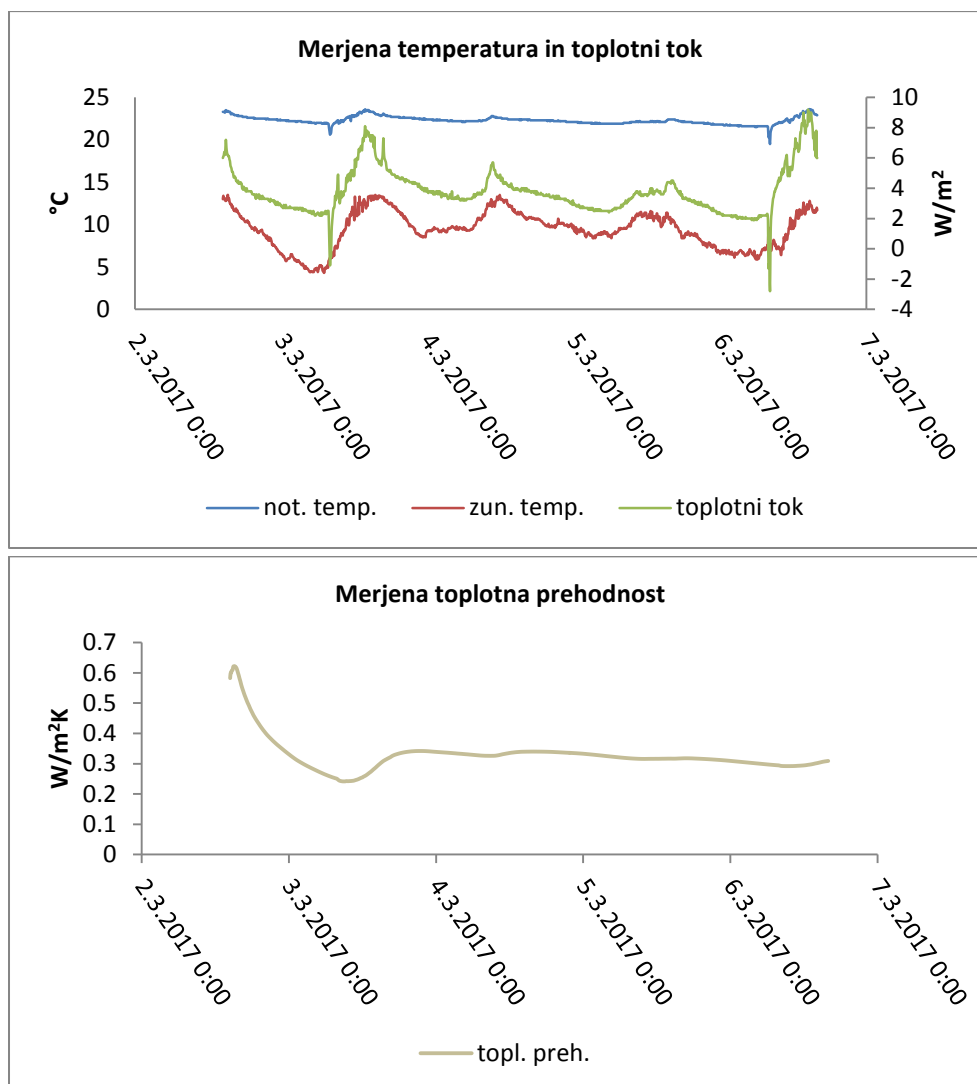
Preglednica 27: ID 4.2 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
24. 2. 2017	5,2	88	0	1,6
25. 2. 2017	3,5	77	35,2	1,2
26. 2. 2017	4,1	70	0	0,3
27. 2. 2017	7,8	63	0	1,6

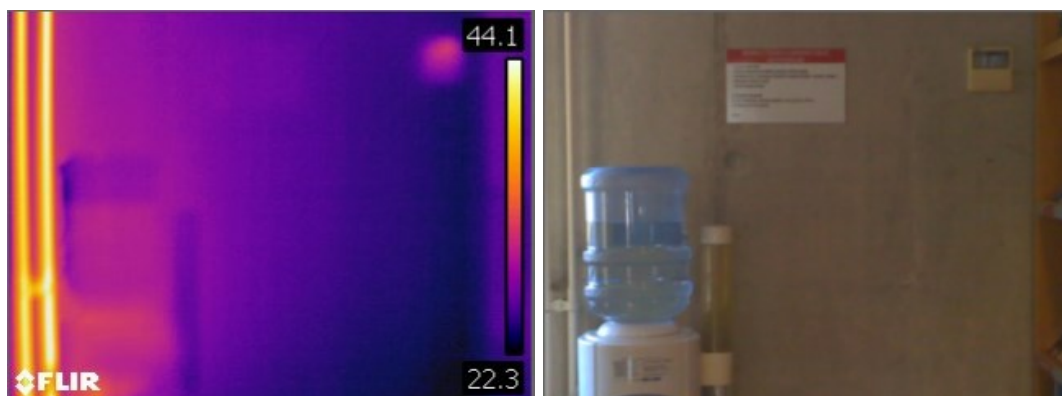
V času meritve se je pojavilo izrazito nihanje temperatur med dnevom in nočjo, kar je prikazano na grafikonu 10. Posledično je izrazito nihalo tudi toplotni tok, ki poleg obilnih padavin 25.2. (preglednica 27) povzroči, da toplotna prehodnost na grafu ne konvergira k asimptotični vrednosti. Ravno zato bi bilo smiselno meritev za kakšen dan podaljšati, saj bi s tem pridobili bolj realen rezultat. Kljub temu rezultat upoštevamo kot pravi in ga upoštevamo pri nadaljnji analizi.

Fakulteta za arhitekturo – prizidek

ID 5.1 Zunanja stena



Grafikon 11: ID 5.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,309 W/m²K

Slika 24: ID 5.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

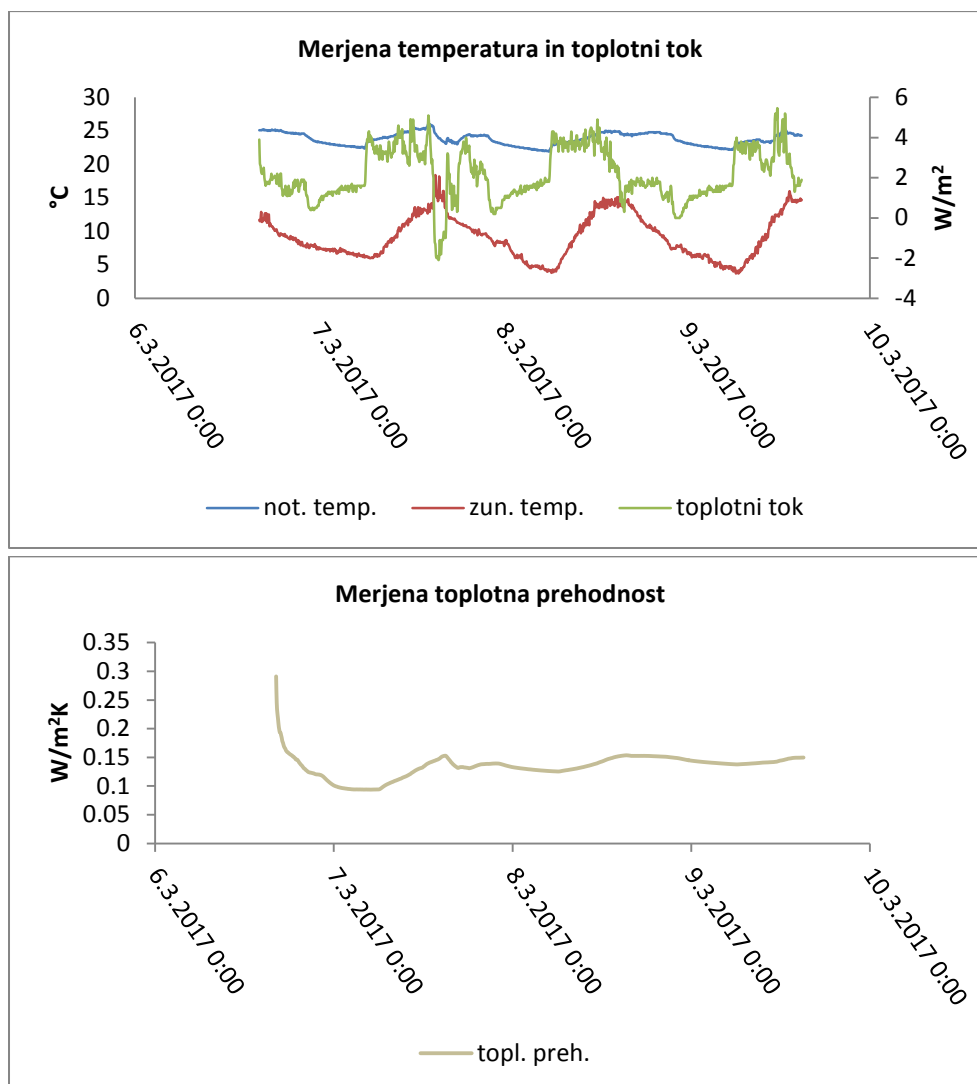
Preglednica 28: ID 5.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
2. 3. 2017	8	77	2,6	1,8
3. 3. 2017	9,5	73	0	1,1
4. 3. 2017	10,2	79	0	2,1
5. 3. 2017	8,5	75	10,9	3
6. 3. 2017	8	80	0,6	1

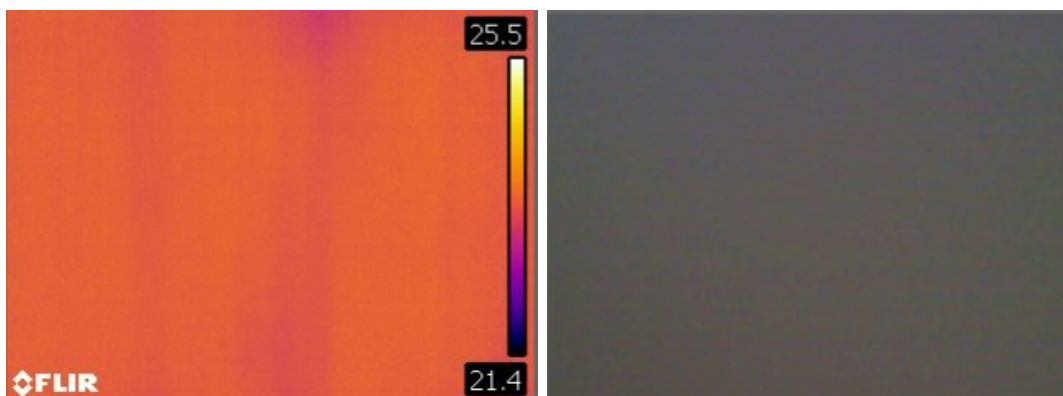
V času meritev je bila notranja temperatura zraka precej stalna, le v dveh krajših obdobjih je opaziti kratek padec temperature, kar je razvidno na grafikonu 11. Razlog za to je mogoče iskati v neposredni bližini radiatorskih cevi (slika 24), ki bi lahko vplivale na nenadno spremembo notranje temperature. Poleg nekonstantne notranje temperature je bila nekonstantna tudi zunanja temperatura, ki je posledično povzročila nihanje toplotnega toka. Kljub precej veliki količini padavin v skoraj vseh dneh obdobja meritve (preglednica 28) vse to očitno ne vpliva na rezultat meritev, saj graf toplotne prehodnosti lepo konvergira k asimptotični vrednosti. Rezultat zato upoštevamo kot pravilen in ga uporabimo pri nadaljnji analizi.

Fakulteta za arhitekturo – prizidek

ID 5.2 Strop proti neogrevanemu podstrešju



Grafikon 12: ID 5.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,150 W/m²K

Slika 25: ID 5.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

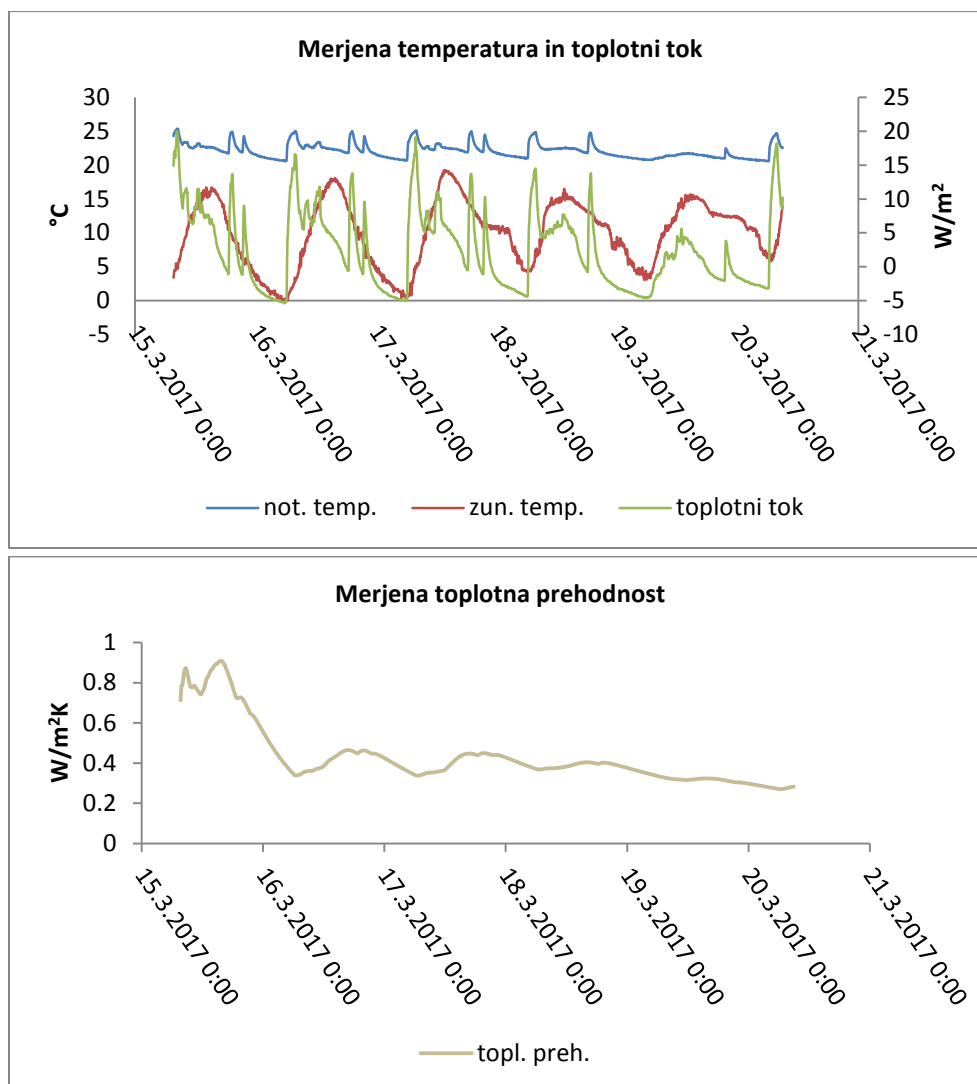
Preglednica 29: ID 5.2 – Vremenske spremenljivke med meritvami [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
6. 3. 2017	8	80	0,6	1
7. 2. 2017	8,9	59	3,3	1,5
8. 3. 2017	8,2	54	0	1,9
9. 3. 2017	9,7	64	0	0,7

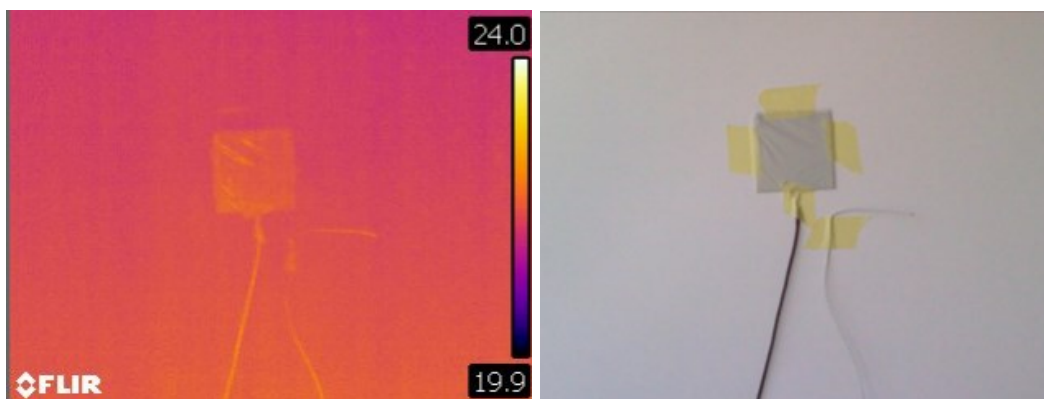
Podobna situacija kot v prejšnjem primeru se je pojavila tudi tokrat. Zopet smo imeli izrazita nihanja notranje in zunanje temperature, poleg tega je bila zunanja celotno obdobje meritev precej visoka, kar je povzročilo majhne razlike v temperaturi zunaj in znotraj prostora ($\Delta T = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$). Poleg tega so se pojavile padavine v obliki dežja, kar je mogoče videti v preglednici 29. Kljub vsem omenjenim dejavnikom se graf toplotne prehodnosti s časom lepo ustali in s tem razlogom tudi ne predstavlja negotovosti o realnosti rezultata. Rezultat meritve torej upoštevamo pri nadaljnji analizi.

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

ID 6.1 – Zunanja stena



Grafikon 13: ID 6.1 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,283 W/m²K

Slika 26: ID 6.1 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

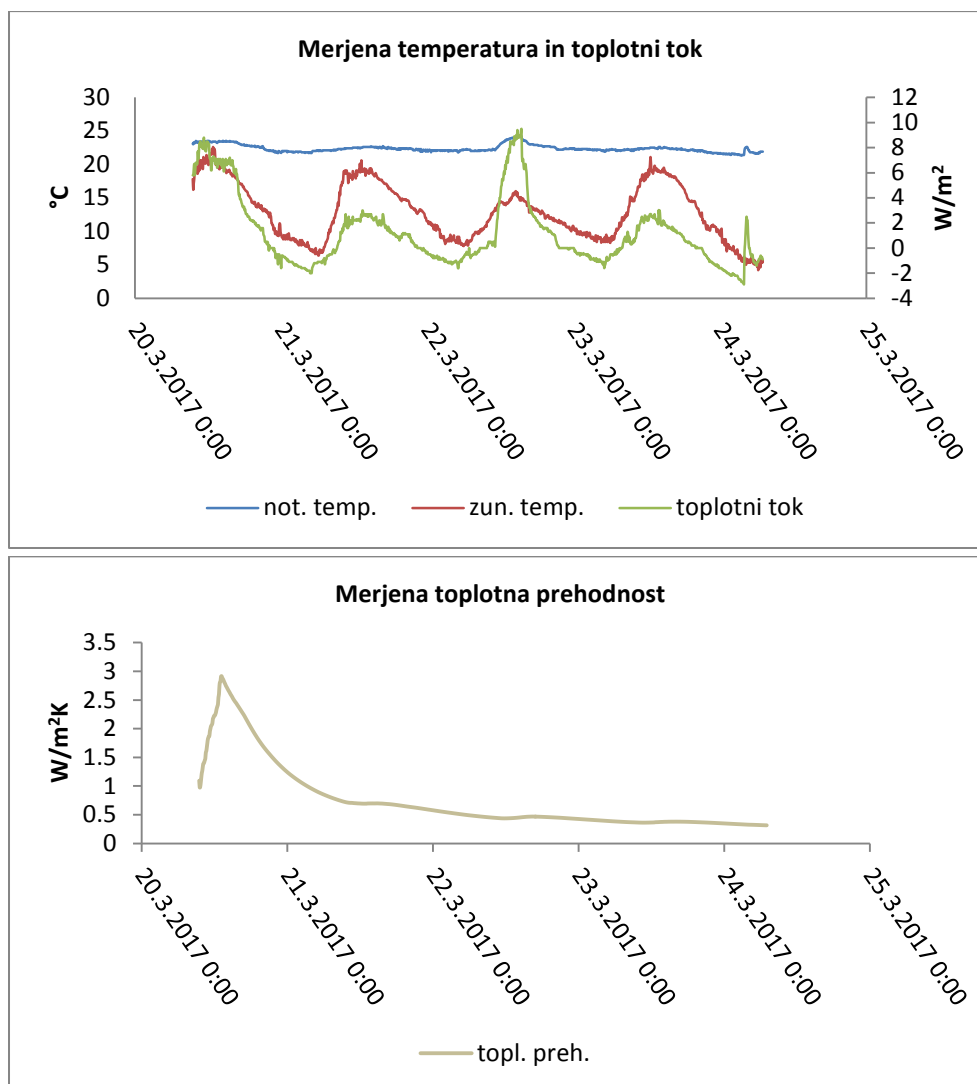
Preglednica 30: ID 6.1 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
15. 3. 2017	9,5	61	0	0,7
16. 3. 2017	10,5	63	0	1
17. 3. 2017	11,8	60	0	3,1
18. 3. 2017	11,3	72	0	2,9
19. 3. 2017	11,2	80	0	2,6
20. 3. 2017	13,5	76	0	2,6

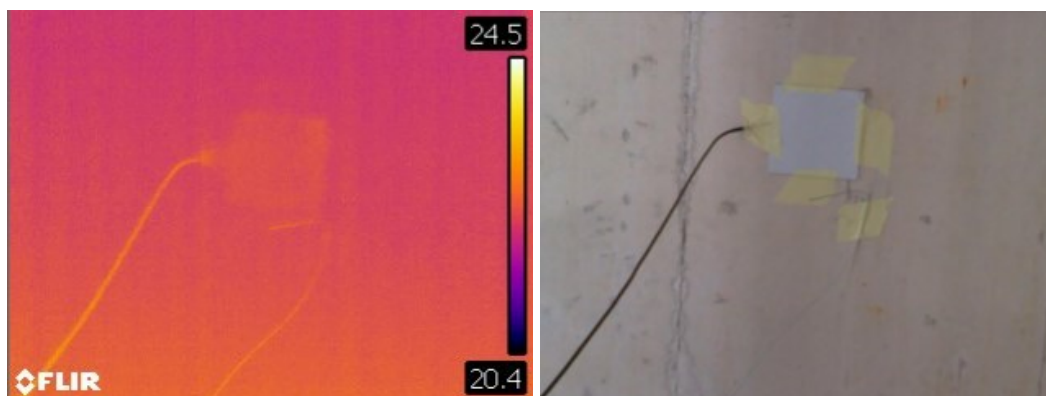
Na grafikonu 13 je mogoče videti večkratna dnevna nihanja pri notranji temperaturi zraka. Poleg visokih povprečnih temperatur zunanjega zraka (preglednica 30) je mogoče opaziti tudi izrazita dnevno-nočna nihanja le-te. Ves čas je bil prisoten tudi veter, še posebej izrazit je bil v drugi polovici meritev. Vsi ti dejavniki pojasnjujejo neustaljenost grafa toplotne prehodnosti, prikazane na grafikonu 13. Najverjetneje bi bilo smiselno čas meritev podaljšati in s tem pridobiti realnejši rezultat, kljub temu pa tudi tega upoštevamo kot pristojnega in ga upoštevamo pri nadaljnji analizi.

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

ID 6.2 – Ravna streha



Grafikon 14: ID 6.2 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 0,316 W/m²K

Slika 27: ID 6.2 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

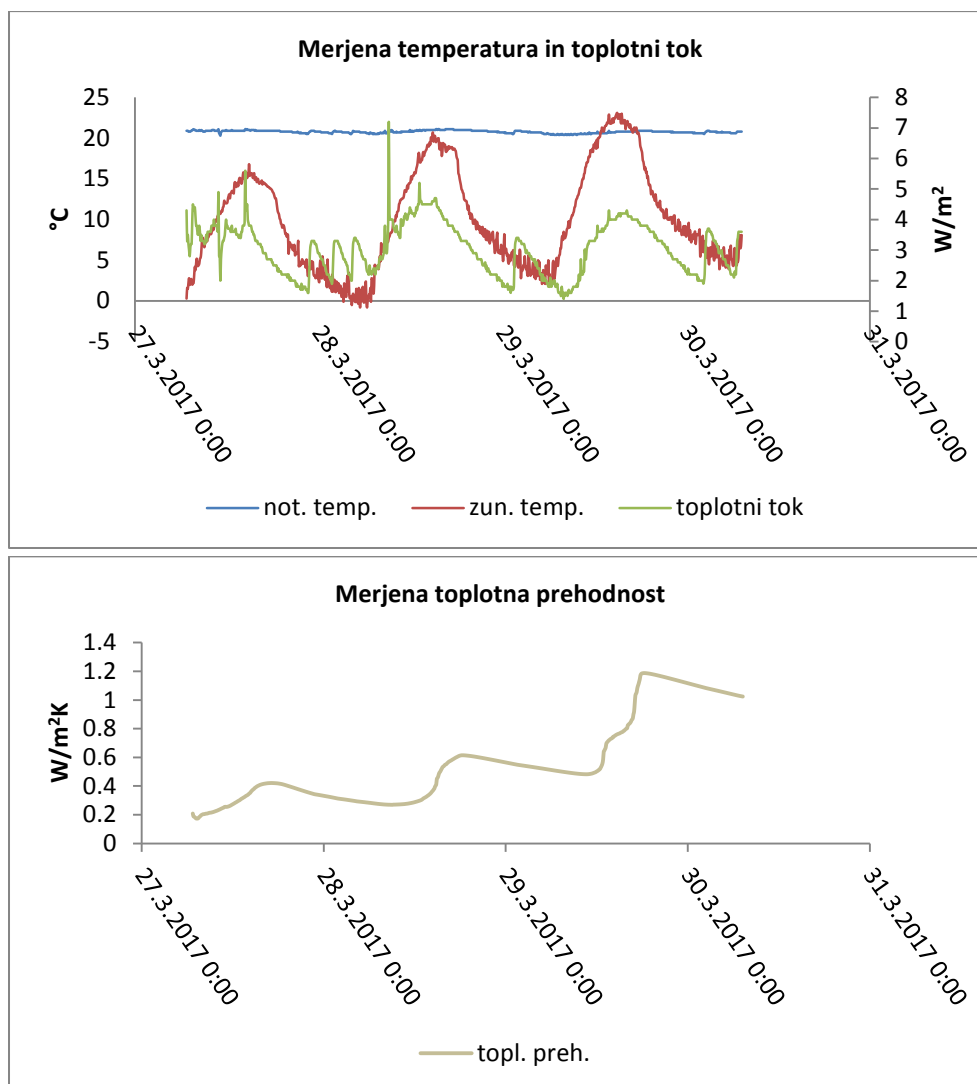
Preglednica 31: ID 6.2 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
20. 3. 2017	13,5	76	0	2,6
21. 3. 2017	14	67	0	2
22. 3. 2017	11,9	89	0	0,6
23. 3. 2017	13,6	68	0	1,7
24. 3. 2017	14,2	65	0	0,8

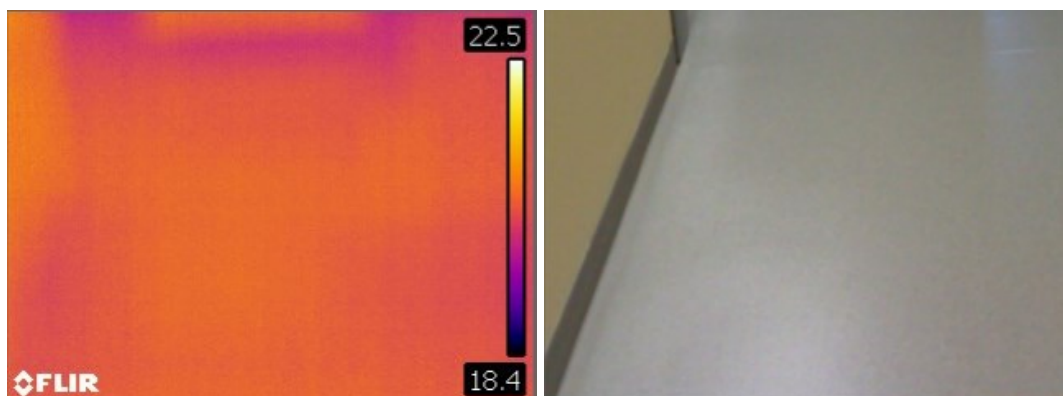
Notranja temperatura zraka je bila tokrat skoraj povsem konstantna, kar pa ni mogoče reči za zunanjo temperaturo. Ta je namreč imela izrazita nihanja med nočjo in dnevom, kar se je odražalo tudi na toplotnem toku (grafikon 14). Kljub nekoliko višjim povprečnim temperaturam zraka (preglednica 31) graf toplotne prehodnosti konvergira k asimptotični vrednosti, kar kaže na realen rezultat, ki ga z gotovostjo lahko uporabimo pri nadaljnji analizi.

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

ID 6.3 – Tla nad terenom



Grafikon 15: ID 6.3 – Merjena temperatura in toplotni tok (zgoraj) ter toplotna prehodnost (spodaj).

U merjena= 1,024 W/m²K

Slika 28: ID 6.3 – Prikaz notranje strani konstrukcijskega sklopa: IR-posnetek (levo), posnetek v vidnem spektru (desno).

Preglednica 32: ID 6.3 – Vremenske spremenljivke med meritvijo [28].

Datum	Povp. temp. zraka (°C)	Povp. relativna vlaga (%)	Količina padavin (mm)	Povp. hitrost vetra (m/s)
27. 3. 2017	8,1	56	0	1,4
28. 3. 2017	11	58	0	0,9
29. 3. 2017	13,6	56	0	1,4
30. 3. 2017	15,1	54	0	0,8

V tokratnem primeru so dnevna nihanja zunanje temperature zraka izredno velika in razlike med notranjo ter zunanjo temperaturo zelo nizke ($\Delta T = 10\text{ °C}$), kar je glavni razlog izrazitega nihanja toplotnega toka (grafikon 15). Vsa ta dejstva privedejo do popolnoma neustaljenega grafa toplotne prehodnosti. Ta neustaljenost predstavlja velik pomislek o pravilnosti rezultata, zato le-tega ne upoštevamo pri nadaljnji analizi rezultatov.

8 ANALIZA REZULTATOV

Analizo rezultatov, pridobljenih z metodo za izračun toplotne prehodnosti po standardu SIST EN ISO 6946 in metodo za meritev toplotne prehodnosti smo izvedli v naslednjih korakih:

1. korak:
Primerjava izračunane in merjene toplotne prehodnosti.
2. korak:
Primerjava izračunane in merjene toplotne prehodnosti glede na starost objektov.
3. korak:
Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na stran neba.
4. korak:
Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na dolžino časovnega obdobja meritve.

Vse primerjave so podrobneje predstavljene v nadaljevanju.

8.1 Primerjava izračunane in merjene toplotne prehodnosti

Pri primerjavi izračunane in merjene toplotne prehodnosti smo po vrednotenju razlike med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo predvsem iskali razloge, zaradi katerih je do teh prišlo. Pri tem smo iskali morebitne nehomogenosti stavbnega ovoja, ki smo jih pri izračunu poenostavili. Ravno tako smo s pomočjo inženirske ocene predvideli pri nekaterih konstrukcijskih elementih sloj zraka, ki ga pri izračunu nismo upoštevali in primerjali, kako bi le-ta lahko vplival na izračun toplotne prehodnosti in se s tem bolj približal rezultatu meritve.

V preglednici 33 so predstavljeni rezultati merjene in izračunane toplotne prehodnosti, v odstotkih izražene razlike med njima in vrednost toplotne prehodnosti za posamezni konstrukcijski sklop, določen po PURES 2010.

Preglednica 33: Rezultati merjene in izračunane toplotne prehodnosti.

ID	Izračunana toplotna prehodnost (W/m ² K)	Merjena toplotna prehodnost (W/m ² K)	Razlike izračunana – merjena toplotna prehodnost (%)	Toplotna prehodnost, določena po PURES 2010 (W/m ² K)
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – sedež fakultete				
1.1	1,259	0,709	78	0,28
1.2	1,259	0,683	84	0,28
1.3	0,731	0,249 *	194	0,20
1.4	1,259	0,661	90	0,28
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – računovodstvo				
2.1	1,065	0,930	15	0,28

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 33

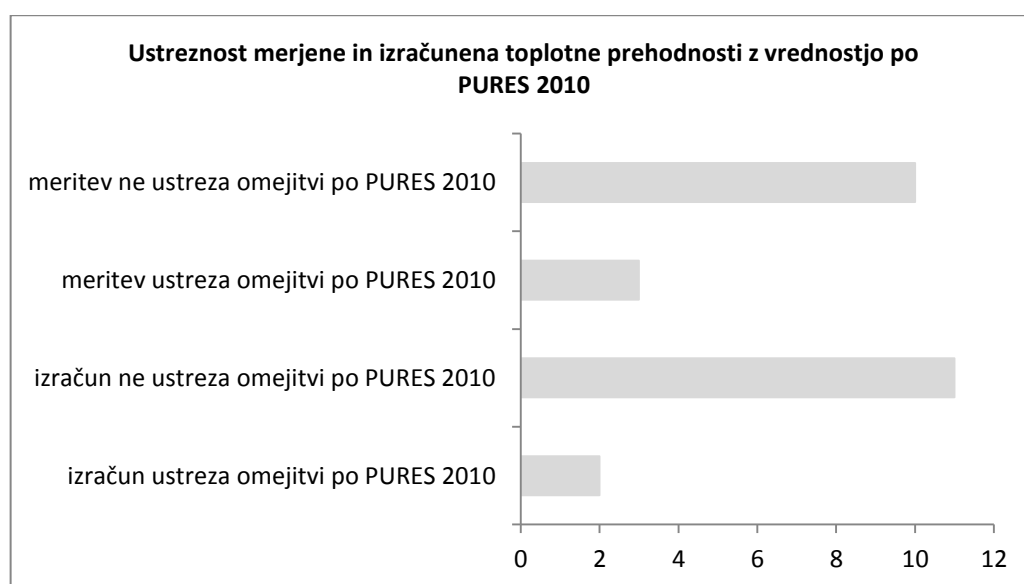
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo – oddelek za hidrotehniko				
3.1	1,055	0,877	20	0,28
3.2	1,498	0,861 *	74	0,20
Fakulteta za arhitekturo – stari del				
4.1	0,814	0,874 *	-7	0,28
4.2	0,323	0,135 *	139	0,20
Fakulteta za arhitekturo – prizidek				
5.1	0,520	0,309	68	0,28
5.2	0,338	0,150	125	0,20
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo				
6.1	0,236	0,283 *	-17	0,28
6.2	0,197	0,316	-38	0,20
6.3	0,327	1,024 **	-68	0,30

*Rezultat ni popolnoma zanesljiv, toda ga kljub temu upoštevamo pri nadaljnji analizi

**Rezultat je vprašljiv in ga ne upoštevamo pri nadaljnji analizi

Pozitivne vrednosti razlik med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo predstavljajo energetske bolj učinkovit konstrukcijski sklop, kot je bil predviden po samem izračunu ter ravno obratno pri negativnih razlikah – vrednosti toplotne prehodnosti, pridobljene z izračunom, so nižje od vrednosti, pridobljenih z meritvami.

Na prvem mestu je bilo zanimivo analizirati, koliko od vseh konstrukcijskih sklopov pravzaprav ustreza zahtevani vrednosti po PURES 2010. Na grafikonu 16 je grafično prikazana ne/ustreznost rezultata, pridobljena z izračunom in meritvijo toplotne prehodnosti.

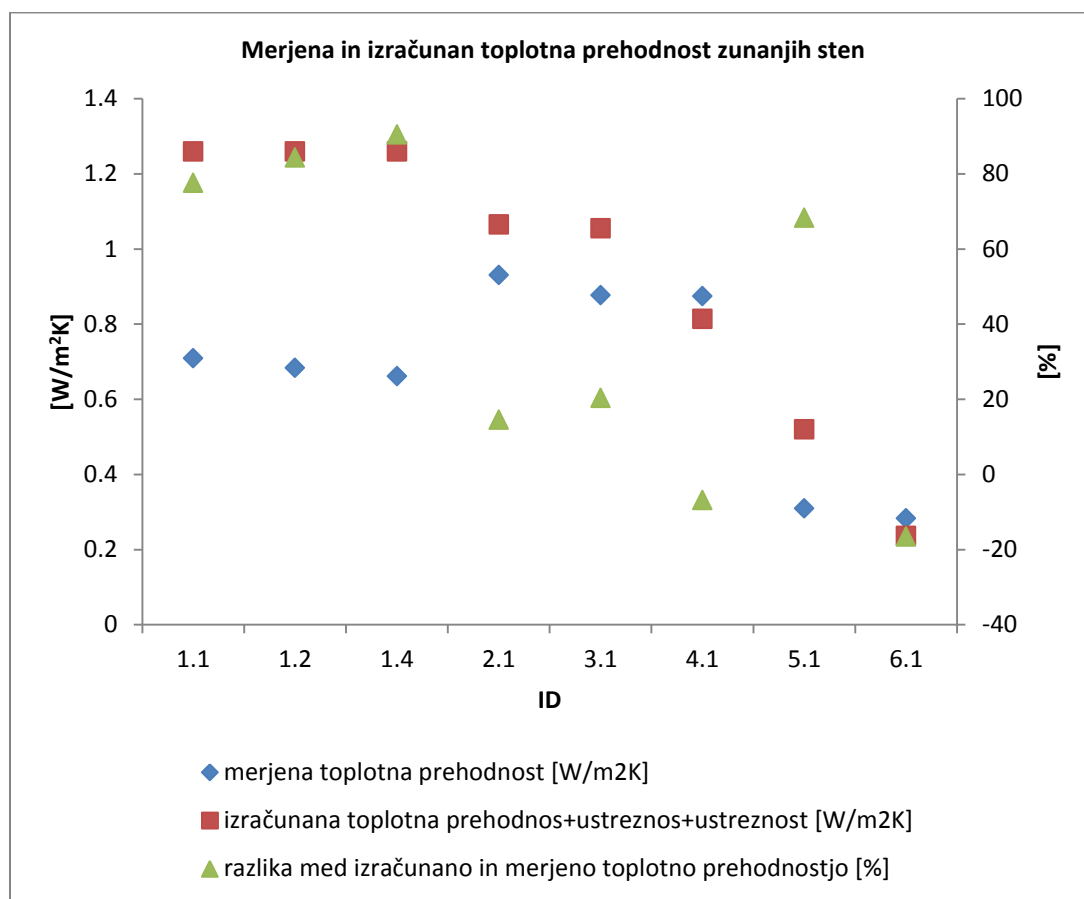


Grafikon 16: Ustreznost merjene in izračunane toplotne prehodnosti glede na zahteve iz PURES 2010.

Kakor smo tudi pričakovali, vrednosti toplotne prehodnosti, določena po PURES 2010, ustreza le malo številu konstrukcijskih sklopov. Predvsem so to konstrukcijski sklopi, ki pripadajo novim objektom (v našem primeru FKKT) in tistim, ki so bili v zadnjem desetletju sanirani (npr. streha na starem delu objekta FA). Zahtevane vrednosti, navedene v slovenskih pravilnikih o učinkoviti rabi energije, so seveda skozi zgodovino bile manj stroge, kar tudi pojasnjuje relativno visoke vrednosti toplotne prehodnosti pri starejših stavbah. Zanimivo je bilo primerjati tudi odstopanja v rezultatih merjene in izračunane toplotne prehodnosti pri zunanjih stenah in strehah. S pomočjo grafičnih prikazov smo prišli do zanimivih rezultatov, ki so predstavljeni v nadaljevanju. Poleg tega smo iskali možne razloge, ki bi pojasnili odstopanja med rezultati.

8.1.1 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti zunanjih sten

Grafikon 17 prikazuje rezultate izračunane in merjene toplotne prehodnosti zunanjih sten ter odstopanje, izraženo v odstotkih.

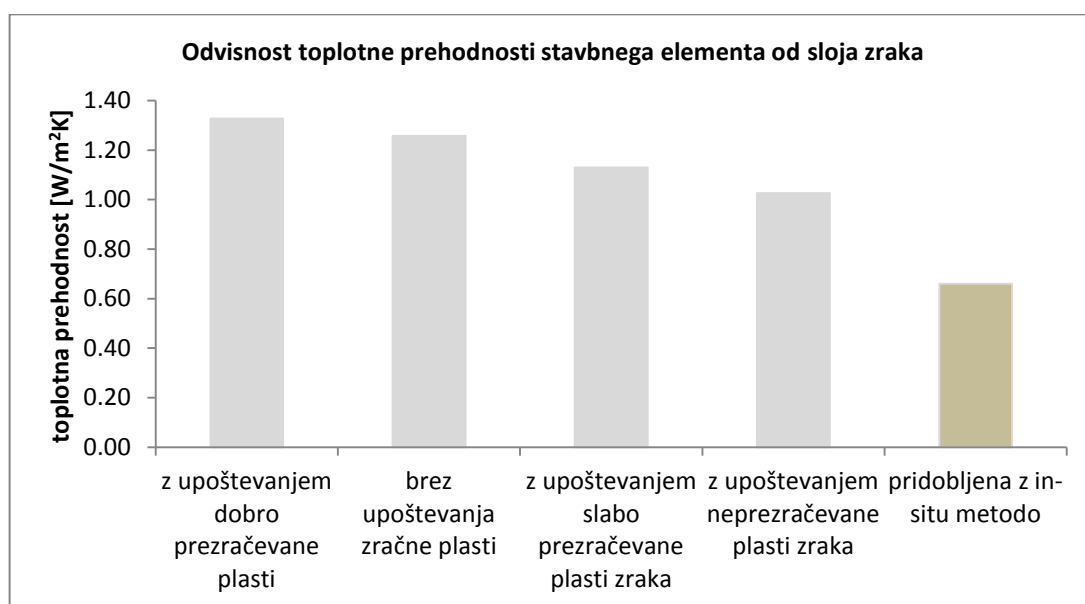


Grafikon 17: Merjena in izračunana toplotna prehodnost zunanjih sten.

Povprečna vrednost razlike med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo znaša pri zunanjih stenah 44 %. Ta podatek opozarja na pomembnost določanja toplotne prehodnosti ne samo z računsko metodo, ampak tudi z meritvijo *in-situ*. Pri stavbi FGG – sedež fakultete so razlike v rezultatih najvišje, in sicer znašajo v povprečju nekaj manj kot 90 %. Razlogi, ki pojasnjujejo te razlike, so lahko zelo različni. Eden izmed glavnih razlogov je vsekakor sloj

zraka, ki ga pri izračunu nismo upoštevali, s pomočjo inženirske ocene pa lahko predpostavljamo, da je sestavni del konstrukcijskega sklopa.

Na primeru objekta FGG – sedež fakultete smo izvedli analizo in skušali ugotoviti, kako na skupno toplotno prehodnost vpliva 5 cm debel sloj zraka. Ker ne vemo, kako je ta sloj zraka dejansko prezračevan, smo v analizi primerjali neprezračevani sloj zraka, delno prezračevani sloj zraka in zelo prezračevani sloj zraka z rezultatom izračuna toplotne prehodnosti, kjer zračnega sloja sploh nismo upoštevali. Grafikon 18 nam nazorno prikaže, kako pomembno je vedeti, kakšen sloj zraka imamo v konstrukcijskem sklopu, saj ta lahko spremeni toplotno prehodnost stavbnega elementa za kar 30 %. Če bi npr. pri izračunu upoštevali neprezračevan ali delno prezračevan sloj zraka, bi se rezultatu merjene toplotne prehodnosti že precej bolj približali (izračunana toplotna prehodnost v primeru neprezračevane plasti zraka je $1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$, kar pomeni le še 45-odstotno odstopanje med rezultatom).



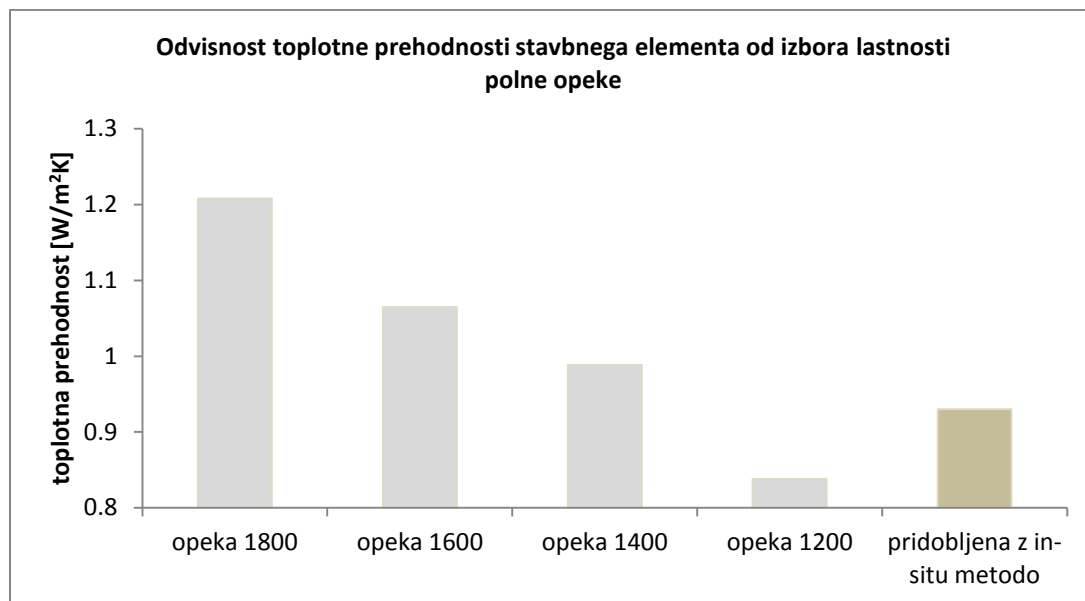
Grafikon 18: Odkvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od sloja zraka pri primeru ID 1.1.

Pomembno dejstvo, na katerega moramo pri določanju toplotne prehodnosti biti prav tako pozorni, je izbor lastnosti posameznega materiala, ki je sestavni del konstrukcijskega sklopa. Analizo smo izvedli na konstrukcijskem sklopu stavbe FGG – računovodstvo, kjer smo spreminjali lastnosti (toplotno prevodnost) nosilne konstrukcije – polne opeke. Toplotne prevodnosti vseh vrst polne opeke so predstavljene v preglednici 34.

Preglednica 34: Toplotna prevodnost različnih vrst polne opeke.

Oznaka polne opeke	Toplotna prevodnost (W/mK)
Opeka 1800	0,76
Opeka 1600	0,64
Opeka 1400	0,58
Opeka 1200	0,47

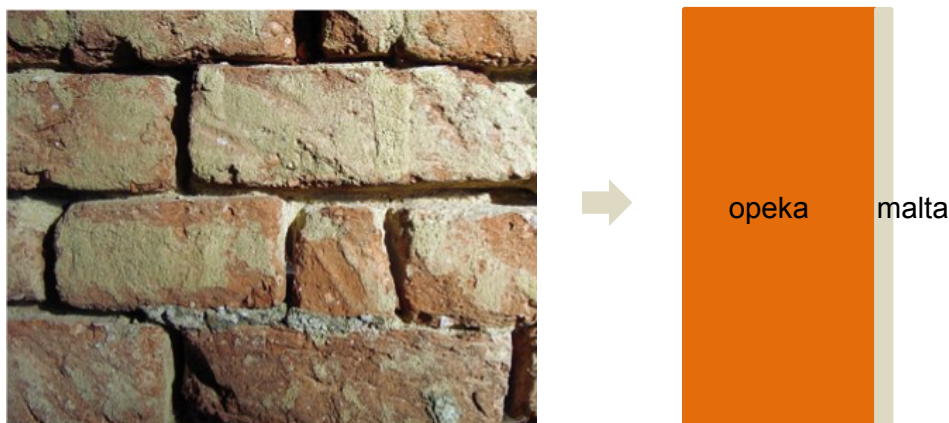
Grafikon 19 prikazuje to na primeru konstrukcijskega sklopa zunanje stene objekta FGG – računovodstvo.



Grafikon 19: Odvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od izbora lastnosti polne opeke pri primeru ID 2.1.

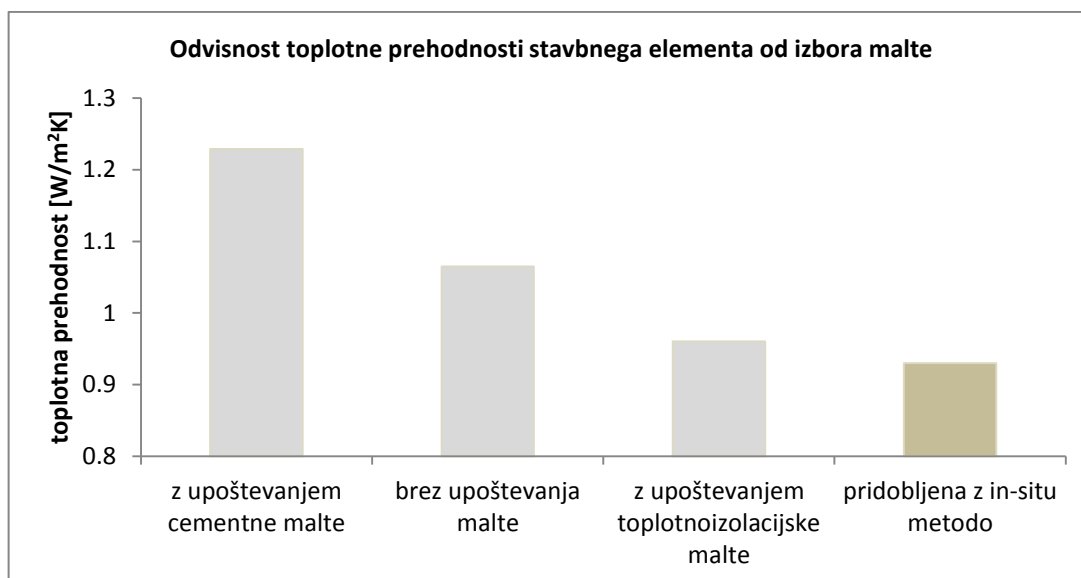
Opazimo lahko, da se vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa lahko spremeni kar za 50 %. Ker je na 70 let starih stavbah težko oceniti dejansko toplotno prehodnost polne opeke, napaka pri izračunu toplotne prehodnosti 45 cm debele zunanje stene s pomočjo inženirske ocene lahko postane hitro zelo velika. Sestavo konstrukcijskega sklopa sestavlja tudi malta, ki služi kot vezno sredstvo nosilne konstrukcije. Malta med opekami volumsko predstavlja kar 10–15 % nosilne konstrukcije. Pri skoraj polmetrski debelini zidu to pomeni kar 4,5 do 7 cm debeline zidu.

Slednje je grafično prikazano na sliki 29.



Slika 29: Prikaz dejanske in poenostavljene oblike opečne stene.

Sami pri izračunu toplotne prehodnosti zunanje stene na objektu FGG – računovodstvo nismo upoštevali veznega materiala in smo nehomogenost na ta način poenostavili in upoštevali samo osnovno nosilno konstrukcijo – polno opeko. Če bi upoštevali tudi 5 cm malte, bi dobili naslednje rezultate, prikazane na grafikonu 20.



Grafikon 20: Odvisnost toplotne prehodnosti stavbnega elementa od izbora malte pri primeru ID 2.1.

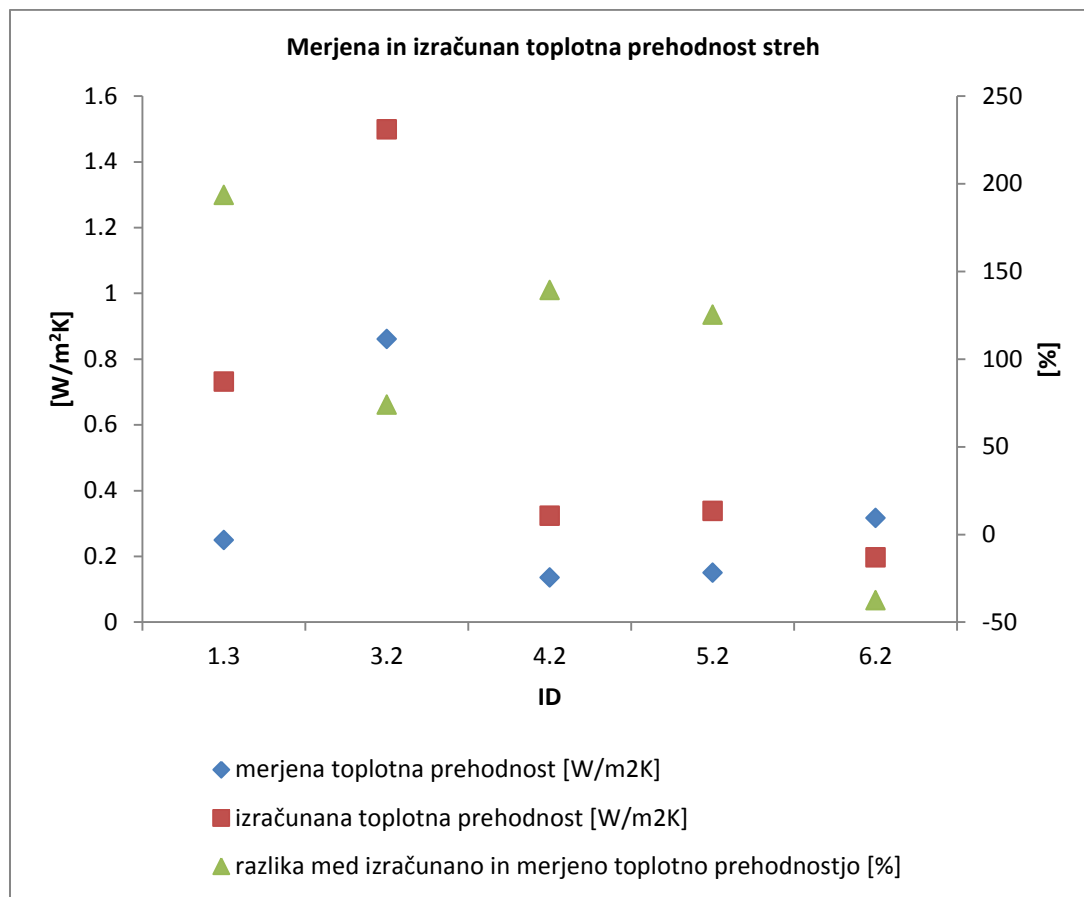
Razvidno je, da malta, ki jo v izračunu zaradi poenostavitve običajno zanemarimo, lahko precej vpliva na toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa. Vpliv na razlike med rezultati ima zopet lastnost materiala, v tem primeru malte med opeko, katere lastnosti so navedene v preglednici 35.

Preglednica 35: Toplotna prevodnost različnih vrst malte.

Oznaka malte	Toplotna prevodnost (W/mK)
Cementna malta	1,4
Toplotnoizolacijska malta	0,19

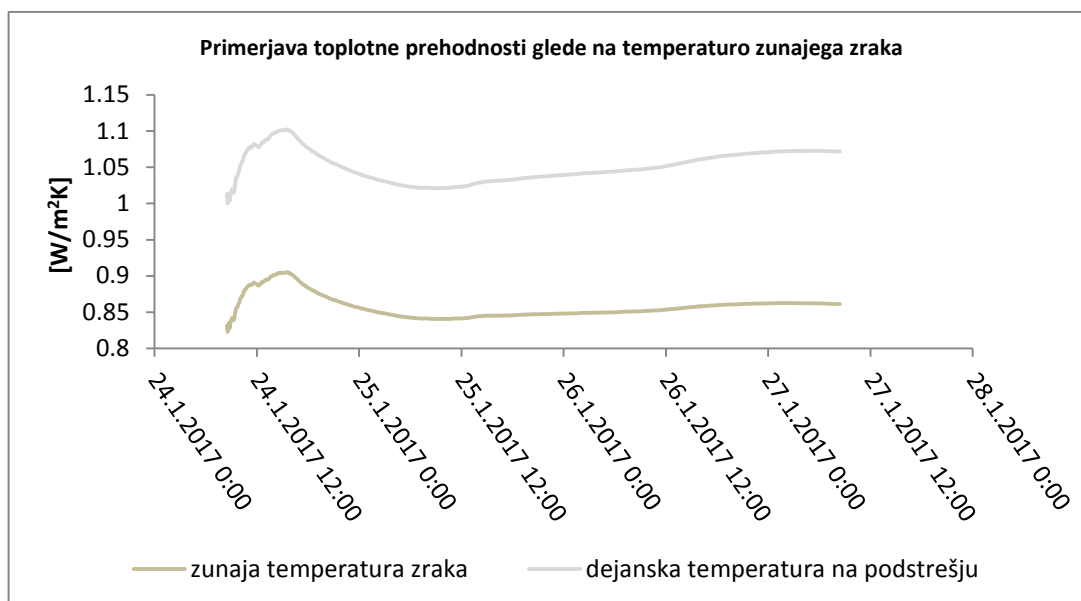
8.1.2 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti streh

Pri konstrukcijskih sklopih streh in stropov proti neogrevanim podstrešjem je situacija še precej slabša. Povprečna vrednost razlike med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo je namreč kar 99-odstotna. Razlog za tako veliko odstopanje je treba iskati predvsem v nepoznavanju dejansko vgrajenih materialov. Grafikon 21 tako prikazuje rezultate izračunane in merjene toplotne prehodnosti streh ter odstopanje, izraženo v odstotkih.



Grafikon 21: Merjena in izračunana toplotna prehodnost streh.

Pomembno dejstvo, na katerega je treba opozoriti pri primerjavi med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo, je temperatura zunanjega zraka pri stropih proti neogrevanemu podstrešju. Sami smo namreč upoštevali zunanjo temperaturo zraka, čeprav se zavedamo, da je temperatura podstrešja kljub neizoliranosti nekoliko višja kakor v okolju, saj gre za neke vrste delno prezračevan prostor. Ker zaradi neustrezne opreme nismo merili temperature zraka na podstrešju, smo za določitev toplotne prehodnosti privzeli kar zunanjo temperaturo zraka. Ocenili smo, da bi dejanska temperatura pri primeru konstrukcijskega sklopa stropa proti neogrevanemu podstrešju na objektu FGG – oddelek za hidrotehniko lahko bila tudi 5 °C višja, kar bi na rezultat merjene toplotne prehodnosti vplivalo, kot je prikazano na grafikonu 22. Upoštevanje višje dejanske temperature zunanjega zraka sicer poslabša merjeno toplotno prehodnost, se pa s tem približamo rezultatu izračunane toplotne prehodnosti in zmanjšamo razliko med njima za skoraj 20 %.



Grafikon 22: Primerjava toplotne prehodnosti glede na temperaturo zunanjega zraka pri primeru ID 3.2.

Če povzamemo, lahko glavni razlog, zaradi katerega pride do razlik med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo, pripišemo poenostavljenemu modelu za izračun toplotne prehodnosti. Da bi izboljšali model, s katerim izračunano toplotno prehodnost gradbenega elementa, potrebujemo več informacij o podrobnostih gradnje, kot so:

- toplotne lastnosti materialov,
- stanje zračnega sloja (prezračevan, neprezračevan),
- razmerje ter vrsta nosilne konstrukcije in malte.

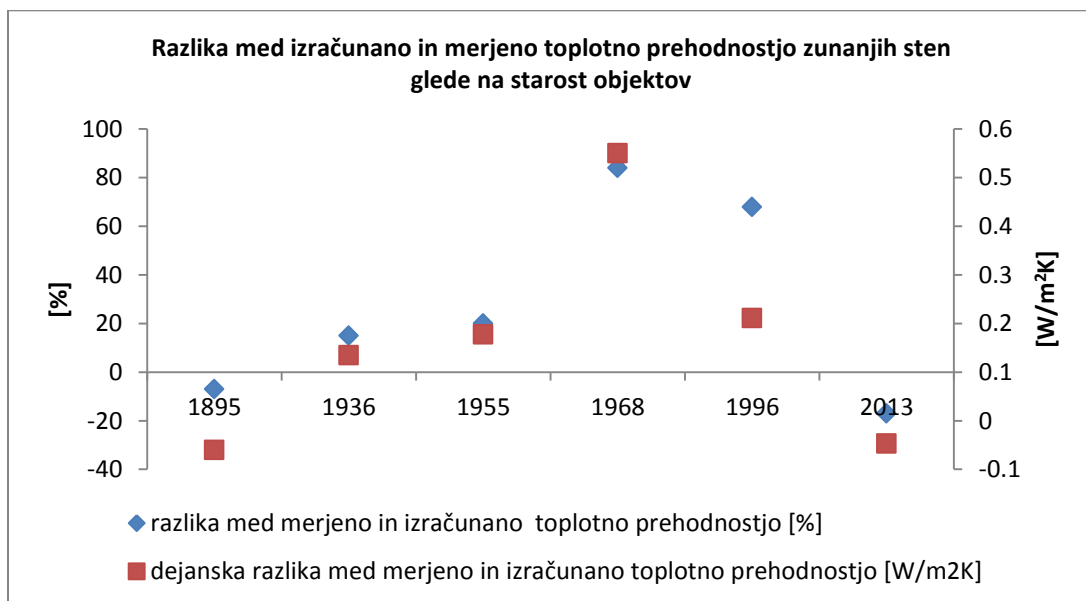
Poleg tega se moramo zavedati, da razlike med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo lahko povzročata tudi nepravilnost rezultatov, pridobljenih z metodo *in-situ*. Predvsem so robni pogoji tisti, ki se med meritvijo spreminjajo s časom in lahko povzročijo negotovost. Nekatere meritve bi lahko izvajali dlje in s tem v stanju dinamičnega ravnovesja dobili boljšo oceno. Poleg tega lahko majhna temperaturna razlika poveča negotovost rezultata, čemur bi se prav tako morali izogibati.

Vsi ti posamezni dejavniki lahko zelo vplivajo na rezultat, poudariti pa je treba tudi, da je kombinacija različnih dejavnikov tista (tako pri izračunanih kot tudi pri merjenih rezultatih), ki razlike med rezultati lahko samo še poveča.

8.2 Primerjava merjene in izračunane toplotne prehodnosti glede na starost objekta

Zunanje stene objektov, zgrajenih okoli leta 1900 (npr. stavba FGG – računovodstvo, FA – stari del ...), imajo zelo enostavno sestavo. Kombinacija polne opeke z zunanjo in notranjo malto posledično predstavlja tudi zelo preprost model za izračun toplotne prehodnosti. Večje nehomogenosti in konstrukcijski sklopi, katerih del je zračna plast, se začnejo pojavljati kasneje, v sredini 20. stoletja (npr. FGG – sedež fakultete). Novejše stavbe bi za izračun gradbene fizike morale imeti najmanj pomanjkljive podatke, zato bi v tem času pričakovali

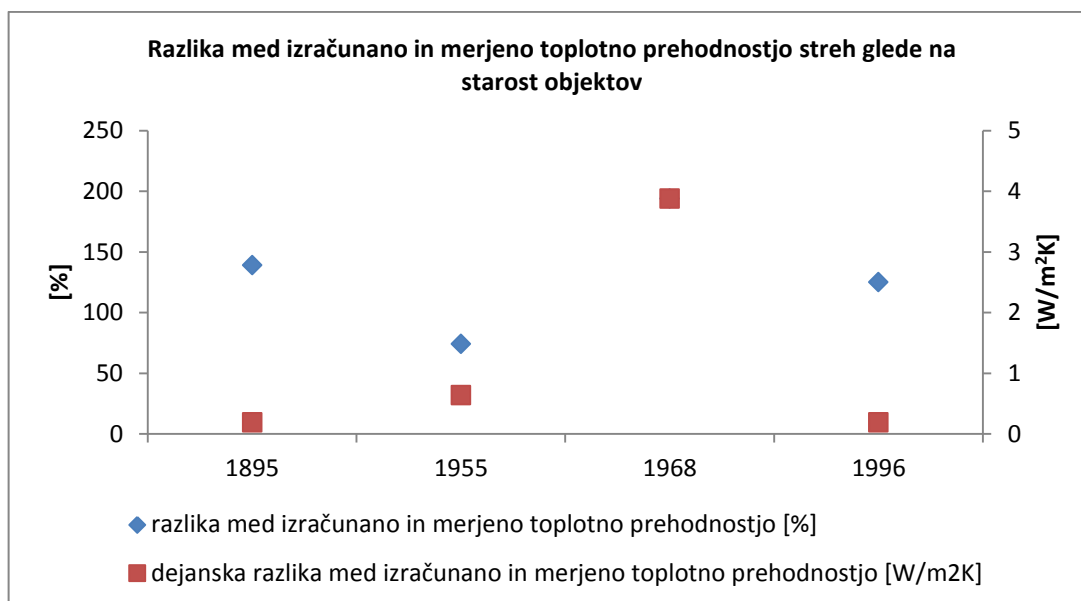
tudi najmanjša odstopanja. V odstotkih izražena razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo zunanjih sten je predstavljena na grafikonu 23.



Grafikon 23: Razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo zunanjih sten glede na starost objektov.

Kakor smo nekako tudi pričakovali, so najmanjše razlike pri enostavnih sestavah zunanjih sten (prva polovica 20. stoletja), medtem ko se razlike med merjeno in izračunano vrednostjo močno dvignejo pri zunanjih stenah, katerih sestava vsebuje zračni sloj. Pri najnovejši zgradbi (FKKT), zgrajeni leta 2013, bi lahko celo rekli, da kljub natančnemu poznavanju lastnosti materiala pride do precenjenosti toplotne prehodnosti zaradi robnih pogojev, ki v naravi niso konstantni, kakor smo predvideli v izračunu.

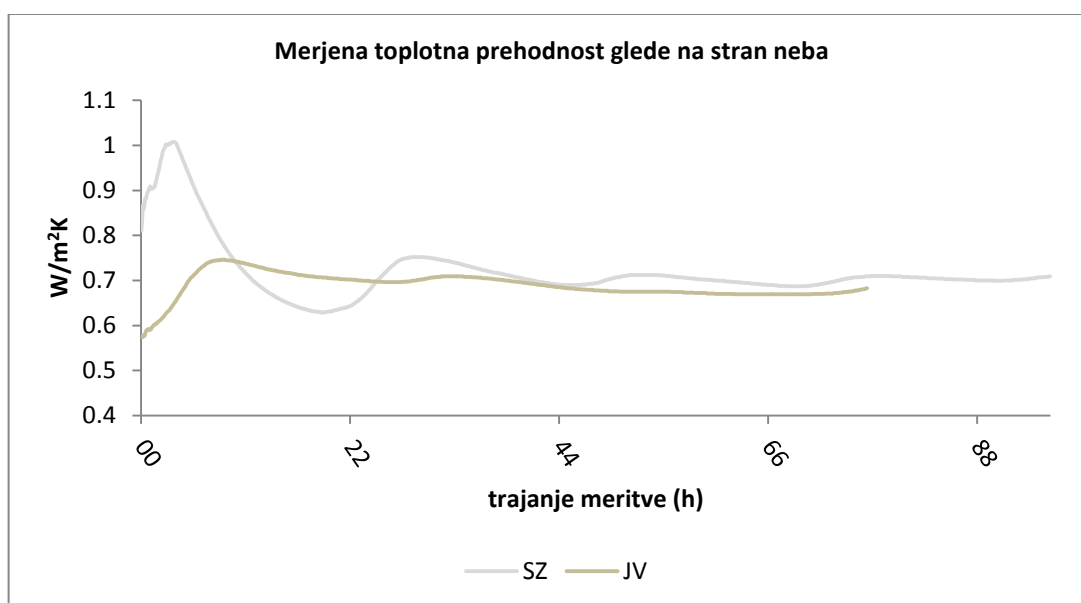
Podobno se dogaja tudi pri ravnih in poševnih strehah, le da so razlike bistveno višje, ki se med časovnim obdobjem zmanjšujejo z izjemo najstarejše stavbe iz leta 1955 (FGG – oddelek za hidrotehniko). Pri najnovejši stavbi (FKKT) se celo zgodi, da se toplotna prehodnost s pomočjo izračuna preceni in je izmerjena vrednost precej višja. Grafično so dejanske in v odstotkih izražene razlike prikazane na grafikonu 24.



Grafikon 24: Razlika med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo streh glede na starost objekta.

8.3 Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na stran neba

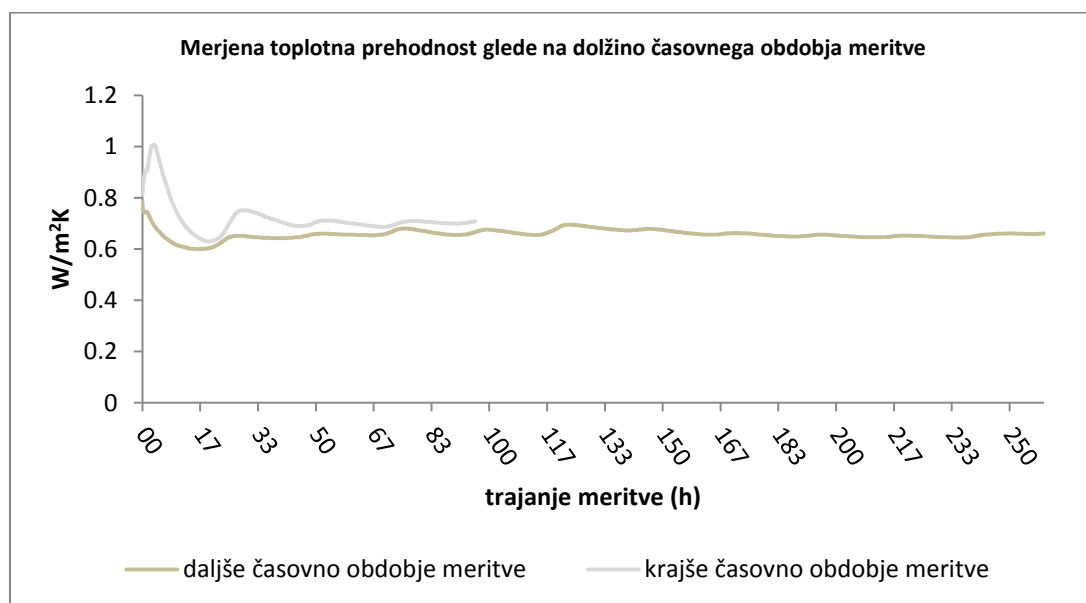
S pomočjo določanja projektne dokumentacije in inženirske ocene sta SZ-stena in JV-zunanja stena na objektu FGG – sedež fakultete po sestavi enaki, le »obrnjeni« na različno stran neba. Zanimivo dejstvo, ki ga lahko opazimo s pomočjo grafikona 25, je, da kljub sorazmerno podobnim zunanjim pogojem pride do razlike v rezultatih merjene toplotne prehodnosti. Razlika je sicer le 4-odstotna, vendar je prisotna, kar opozarja na dejstvo, da bi lahko sončno sevanje, ki je v dopoldanskem času na vzhodni strani objekta prisotno, vplivalo na rezultat meritve. Druga od možnosti je, da časovno obdobje posamezne meritve ni bilo enako dolgo. Če bi krajša meritev trajala dlje časa in se po dolžini časovnega obdobja približala daljši, bi se vrednosti rezultatov lahko celo čisto zblížali.



Grafikon 25: Merjena toplotna prehodnost glede na stran neba

8.4 Primerjava merjene toplotne prehodnosti glede na dolžino časovnega obdobja meritve

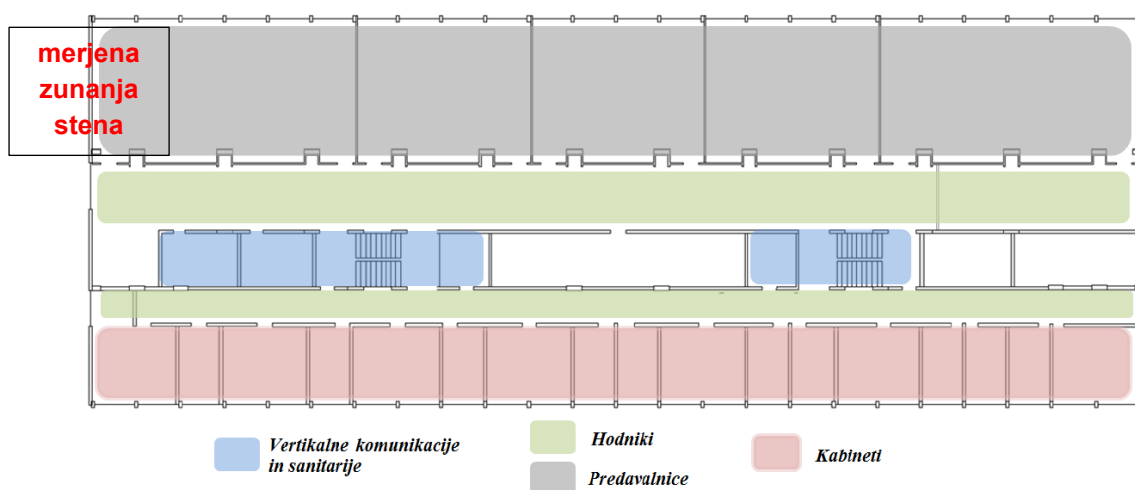
Če smo že pri analizi merjene toplotne prehodnosti glede na stran neba imeli pomislek, da bi lahko različno dolgo časovno obdobje meritve vplivalo na rezultat, smo tokrat primerjali meritvi, ki sta se izvajali na isti steni (SZ-zunanja stena FGG – sedež fakultete), le v različnem časovnem obdobju. Kljub temu so bili robni pogoji skoraj enaki (preglednica 19 in preglednica 22). Prva meritev je tako trajala pet dni, medtem ko je druga trajala celih 12 dni. Če primerjamo rezultata $0,709 \text{ W/m}^2\text{K}$ (toplotna prehodnost krajše meritve) in $0,661 \text{ W/m}^2\text{K}$ (toplotna prehodnost daljše meritve), je razlika med rezultatoma, izražena v odstotkih, enaka 7 %. Na rezultat bi lahko poleg robnih pogojev vplivala tudi malenkost drugačna postavitve samega merilnika toplotnega toka (razvidno s slike, pridobljene s pomočjo termokamere – slika 15 in slika 18). Nehomogenost plinobetona v kombinaciji z malto je namreč tista, ki lahko vpliva na razlike v toplotnem toku, kar posledično vpliva tudi na rezultat toplotne prehodnosti. Poleg tega je pri tako majhnih razlikah pomembna tudi natančnost merilnikov, ki v tem primeru bistveno vplivajo na rezultat. Do sedaj opravljene raziskave, kljub minimalnim predpisanim zahtevam glede časovnega obdobja meritve v standardu, spodbujajo h kar se da dolgemu časovnemu obdobju meritve. To bi lahko kazalo na boljšo toplotno izolativnost stavbnega ovoja objekta FGG – sedež fakultete, kar je razvidno na grafikonu 26.



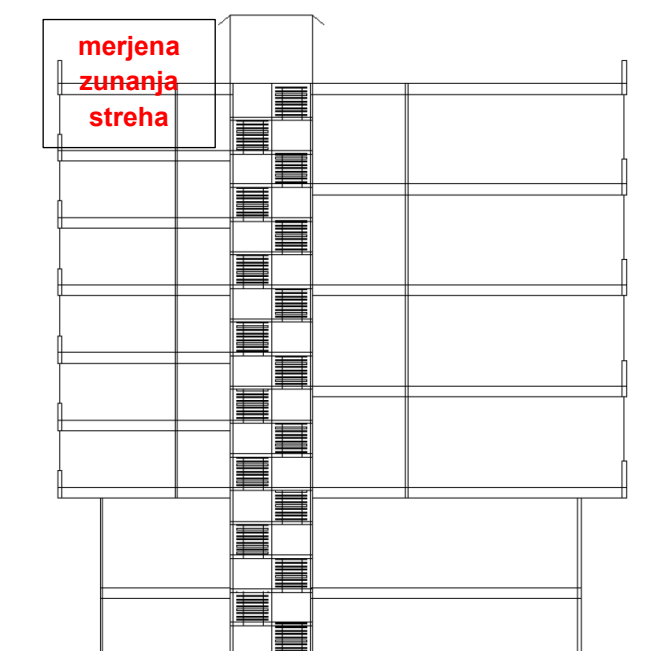
Grafikon 26: Merjena toplotna prehodnost glede na dolžino časovnega obdobja meritve.

9 VPLIV TOPLOTNE PREHODNOSTI NA ENERGETSKO UČINKOVITOST STAVBE

Izračun rabe energije, s katerim določimo energetske učinkovitost stavbe, je zelo zahteven, saj zahteva veliko enačb, ki so izčrpno predstavljene v TSG4 in pripadajočih standardih. Za izračun energetske učinkovitosti stavbe v okviru magistrskega dela smo uporabili program URSA Gradbena fizika 4.0, ki smo ga uporabili že za izračun gradbene fizike konstrukcijskih sklopov stavbe. Da bi določili, kolikšen vpliv imajo toplotno-tehnične lastnosti (npr. debelina posamezne plasti in toplotna prevodnost materiala) na rabo energije, smo na primeru stavbe FGG – sedež fakultete primerjali potrebo toplote po ogrevanju in transmisijske izgube konstrukcijskih sklopov. Ta objekt smo si izbrali zaradi očitnih razlik med vrednostmi toplotne prehodnosti, pridobljenih z izračunom in meritvijo. Tloris tipične etaže in prerez stavbe FGG – sedež fakultete sta predstavljena na sliki 30 in sliki 31.



Slika 30: Tloris tipične etaže stavbe FGG – sedež fakultete [29].



Slika 31: Prerez stavbe FGG- sedež fakultete [29].

Pri izračunu rabe energije smo v prvem primeru upoštevali lastnosti konstrukcijskih sklopov, določene s pomočjo izračuna toplotne prehodnosti, v drugem primeru pa določene s pomočjo meritve toplotne prehodnosti. Vsi drugi robni pogoji so bili v obeh primerih identični in so predstavljeni v preglednici 36.

Preglednica 36: Podatki o projektu.

Lokacija stavbe	Jamova cesta 2
Parcelna številka	Y: 461285 X: 100300
Bruto ogrevana prostornina	40829 m ³
Neto ogrevana prostornina	33770 m ³
Neto uporabna površina	9800 m ²
Povprečna letna temperatura	9,7 °C
Zunanja zimska letna temperatura	-13 °C
Temperaturni primanjkljaj za ogrevanje	3300 Kdan/a
Notranja temperatura pozimi/poleti	20 °C / 26°C
Notranji viri pozimi/poleti	6 W/m ² / 3 W/m ²
Prezračevanje in izmenjava zraka	Naravno; 0,7 h ⁻¹

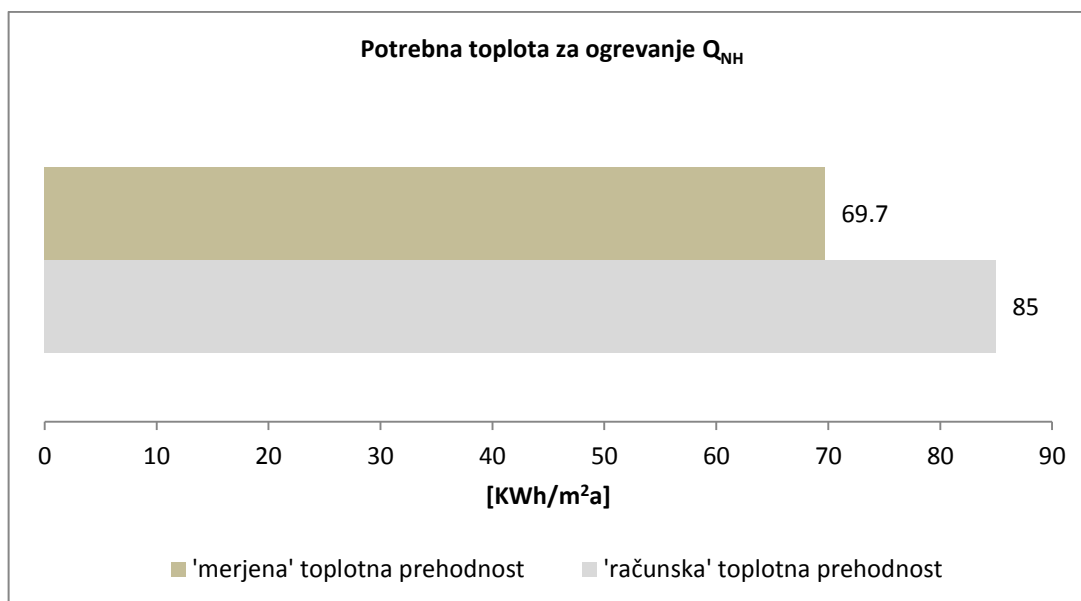
Poleg toplotnih prehodnosti zunanjih sten in strehe, pridobljenih z izračunom ali meritvijo (merjeni konstrukcijski sklopi predstavljeni na sliki 30 in 31), smo pri določanju stavbnega ovoja upoštevali tudi toplotno prehodnost tal, parapetov (sestavni del transparentnega dela na severni fasadi) in oken, katerih značilnosti smo pridobili s pomočjo diplomske naloge [29] in so predstavljene v preglednici 37.

Preglednica 37: Toplotne lastnosti drugih konstrukcijskih sklopov [29].

Konstrukcijski sklop	Toplotna prehodnost (W/m ² K)
Zunanja stena	Izračunana- 1,259 Merjena – 0,661
Streha	Izračunana- 0,730 Merjena – 0,249
Zunanja stena – parapet	0,878
Tla na terenu	0,251
Okna proti J (g* = 0,58)	1,4
Okna proti S (g* = 0,58)	1,7
Okna proti Z in V (g* = 0,76)	3,6

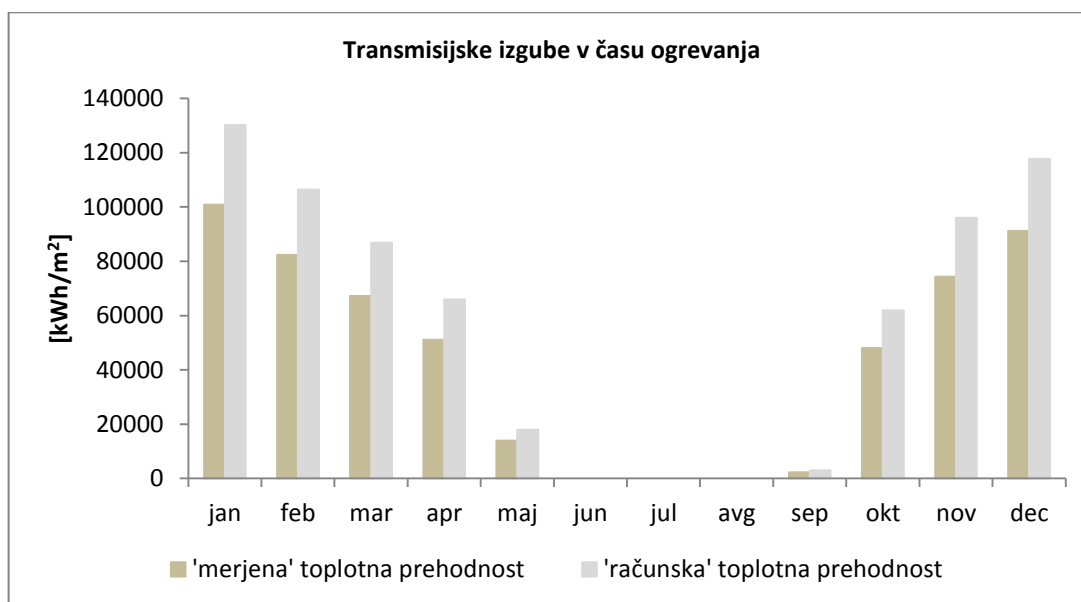
*g = faktor prepustnosti sončnega sevanja

Pri stavbi FGG – sedež fakultete je pomembno poudariti, da zasteklitev predstavlja skoraj polovico površine zunanjih sten (natančneje 47 %), kar pomeni, da bo kljub velikim razlikam med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo konstrukcijskega sklopa zunanje stene vpliv na energetsko učinkovitost stavbe manjši, kot bi lahko sprva pričakovali. Poleg tega transparentni del stavbnega ovoja skupaj s tlemi na terenu predstavlja kar polovico celotnega stavbnega ovoja, ki s pomočjo meritve *in-situ* nismo analizirali. Razlike v rabi energije za ogrevanje (Q_{NH}), ki so se kljub relativno majhnemu delu celotne površine stavbnega ovoja pojavile, so prikazane na grafikonu 27.



Grafikon 27: Potrebna toplota za ogrevanje.

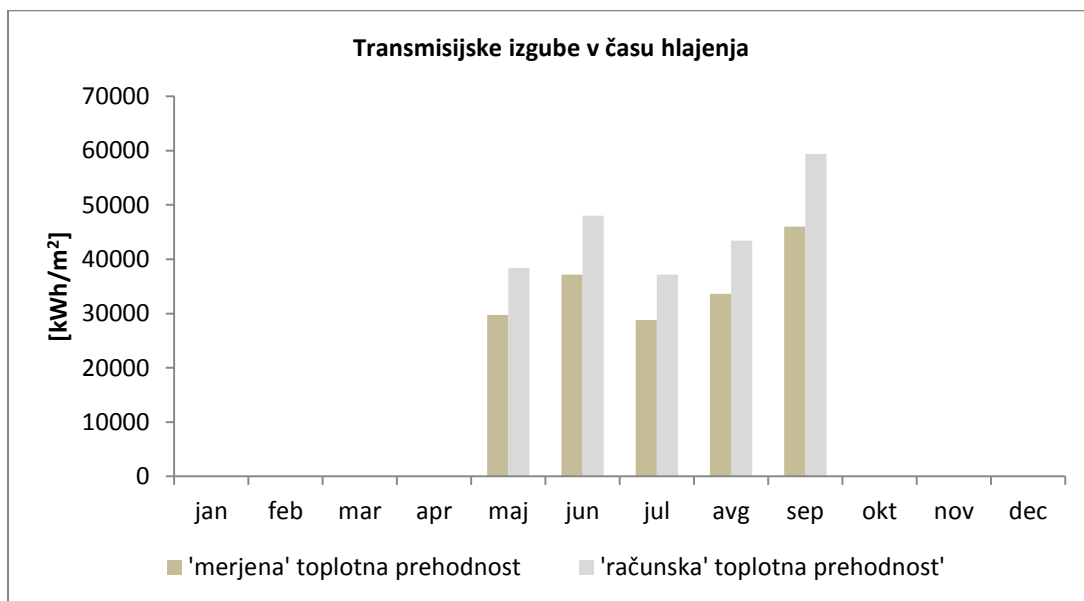
Na grafikonu 27 lahko opazimo, da je razlika pravzaprav precej velika. Ob upoštevanju podatkov, ki smo jih pridobili s pomočjo metode za meritev toplotne prehodnosti, je namreč stavba FGG – sedež fakultete za skoraj 20 % ($\Delta Q_{NH} = 15,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) energetsko bolj učinkovita, če le-to merimo s pomočjo potrebne toplote za ogrevanje stavbe (Q_{NH}). Če poleg potrebne toplote za ogrevanje analiziramo še razlike pri transmisijah izgubah – v času ogrevanja, dobimo podobne rezultate, prikazane na grafikonu 28.



Grafikon 28: Transmisijske izgube v času ogrevanja.

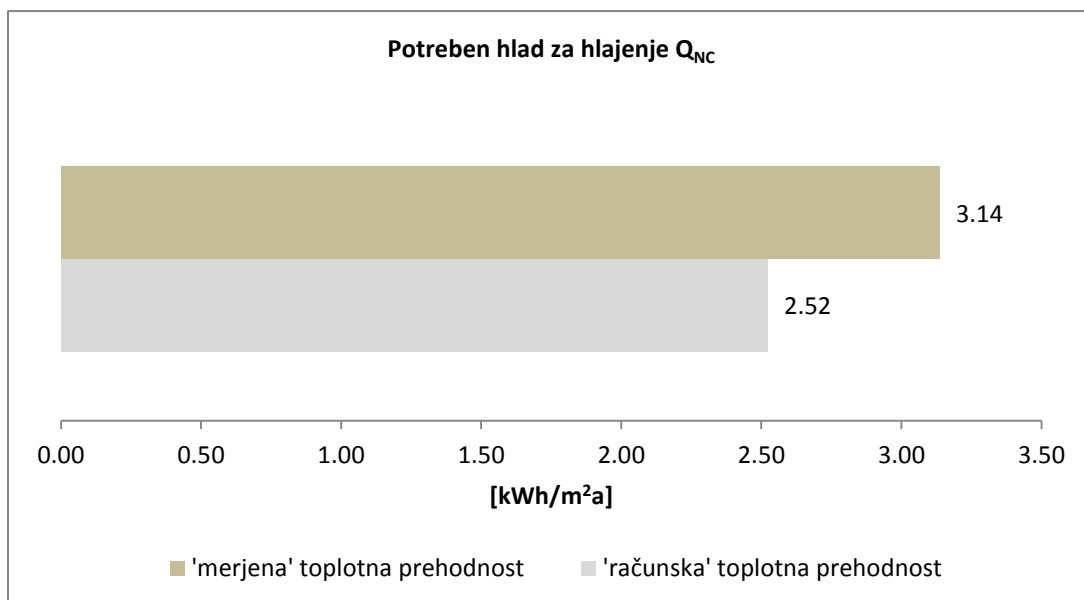
Transmisijske izgube so namreč toplotne izgube zaradi prehoda toplote skozi ovoj stavbe, kar pomeni, da so v celoti odvisne le od sestave konstrukcijskih sklopov, ki stavbo ovoj sestavljajo. Tudi tu so vrednosti, pridobljene s pomočjo merjene metode toplotne prehodnosti, v povprečju za 23 % nižje kot pri rezultatih, dobljenih z računskimi metodami. Praktično ista slika se ponovi pri transmisijah izgubah v času poletja, ko je stavbo treba hladiti. Zaradi boljše toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov, pridobljenih z metodo za

merjenje, je posledično tudi transmisijskih izgub pri »računski« toplotni prehodnosti bistveno več, kar je prikazano na grafikonu 29.



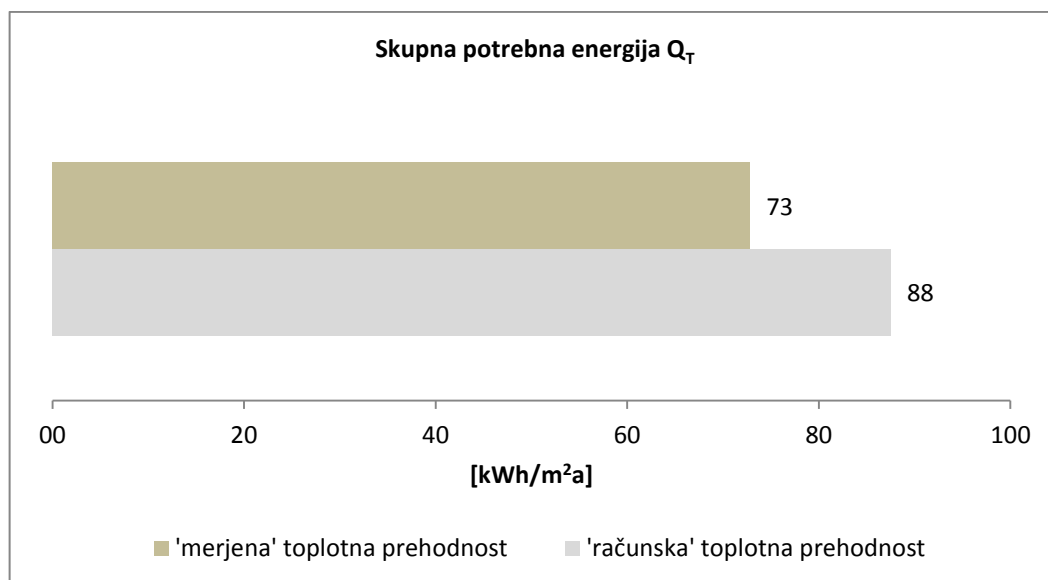
Grafikon 29: Transmisijske izgube v času hlajenja.

Pri potrebnem hladu za hlajenje stavbe v času poletja se situacija nekoliko spremeni, saj stavba z značilnostmi »merjene« toplotne prehodnosti potrebuje za razliko v času ogrevanja več energije za hlajenje Q_{NC} . ΔQ_{NC} je v tem primeru $0,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, kar je prikazano na grafikonu 30.



Grafikon 30: Potreben hlad za hlajenje.

Skupna potrebna energija Q_T ($Q_T = Q_{NC} + Q_{NH}$) za hlajenje in ogrevanje skozi celotno leto je prikazana na grafikonu 31. Le-ta opisuje vrednost, ki jo stavba letno potrebuje za vzdrževanje notranje temperature. Razlika med potrebno energijo ΔQ_T je $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ oziroma 17-odstotna, kar opozarja na dejstvo, da toplotna prehodnost v precejšnji meri vpliva na energetske učinkovitost stavbe.



Grafikon 31: Skupna potrebna energija.

Če bi lahko merili s pomočjo metode *in-situ* tudi druge konstrukcijske sklope (parapete nad okni, tla na terenu in transparentne dele ovoja), bi lahko te razlike bile še večje (če bi tudi drugi konstrukcijski sklopi imeli merjeno toplotno prehodnost manjšo od izračunane), saj bi s tem analizirali celotni stavbni ovoj in šele na ta način dobili pravi podatek o vplivu toplotne prehodnosti na energetske učinkovitost stavbe. V tem primeru lahko le potrdimo, da toplotne lastnosti stavbnega ovoja vsekakor vplivajo na energetske učinkovitost in imajo velik vpliv na oceno rabe energije v stavbi.

»Ta stran je namenoma prazna«

10 ZAKLJUČEK

Toplotna prehodnost je temeljni parameter za določanje toplotnih izgub stavbnega ovoja in iskanje potencialnega vpliva na določitev energetske učinkovitosti stavb. Ravno zaradi tega dejstva je bil naš glavni namen poleg ocene toplotne prehodnosti s pomočjo programske opreme pridobiti dejansko toplotno prehodnost s pomočjo metode meritve *in-situ* v realnih pogojih in v fazi uporabe izbrane stavbe. Predmet obravnave v našem magistrskem delu so bile izbrane stavbe UL, ki predstavljajo pomemben del javnega sektorja in so zgled vsem drugim stavbam pri določanju energetske učinkovitosti trenutnega stanja.

Do sedaj opravljene raziskave so opozorile, da so robni pogoji, zunanji vremenski vplivi in nepoznavanje vgrajenih materialov v posamezni konstrukcijski sklop bistveni za iskanje razlik med izračunano in merjeno toplotno prehodnostjo. Ta spoznanja so bila ključna za vsa predvidevanja, ki smo si jih zastavili pred samim začetkom analize, ki jih je metoda meritve *in-situ* po večini tudi potrdila. Najprej smo predvidevali, da bo prišlo do razlik med izračunanimi in merjenimi toplotnimi prehodnostmi izbranih konstrukcijskih sklopov. Pri zunanjih stenah se je izkazalo, da je povprečna vrednost razlike med izračunano in merjeno vrednostjo 44-odstotna, pri strehah pa kar 99-odstotna. S tem smo prvo hipotezo vsekakor potrdili in posledično opozorili na veliko neskladnost med rezultati. Razlike med merjeno in izračunano toplotno prehodnostjo so seveda večje pri bolj kompleksnih sestavah stavbnega ovoja, s čimer smo potrdili tudi drugo hipotezo. Nehomogenost in morebitna zračna plast (prezračevana ali neprezračevana) sta namreč glavna razloga za velike razlike med rezultati.

Seveda na razlike med merjeno in izračunano toplotno prehodnost vpliva tudi starost objekta. Izkazalo se je, da so pri starejših stavbah v kombinaciji s kompleksnostjo konstrukcijskega elementa razlike višje in se skozi obdobje manjšajo, s čimer smo potrdili tudi tretjo delovno hipotezo. Pri novogradnji pride celo do preценjenosti toplotne učinkovitosti stavbnega ovoja, saj so s pomočjo izračuna toplotne prehodnosti manjše kot pri rezultatih, pridobljenih z meritvami. Ravno obratno je pri stavbah, ki so bile zgrajene v prejšnjem stoletju. Te stavbe so v povprečju namreč energetsko učinkovitejše, kot je bilo predvideno s pomočjo izračuna po projektni dokumentaciji, kar potrjuje tudi zadnjo, četrto hipotezo.

Nepoznavanje lastnosti dejansko vgrajenih materialov, zračne plasti, ki povzročajo nehomogenost, zunanji pogoji, ki niso idealni kakor v laboratoriju in navsezadnje zaključki, do katerih smo prišli v analizi, so razlogi, ki bi morali spodbuditi k določitvi toplotne prehodnosti stavbnega ovoja s pomočjo meritve *in-situ*, za katero lahko rečemo, da se je v tem magistrskem delu izkazala kot zelo priporočljiva. Odstopanje dejanskih toplotnih prehodnosti v primerjavi z izračunanimi namreč privede do zelo različnih rezultatov pri določanju energetske učinkovitosti stavb in posledično do možnosti prikaza nerealnega stanja stavb. S to raziskavo bi morali opozoriti stroko na velik problem v določanju energetske učinkovitosti stavb ter v bodoče razširiti znanje na tem področju in nadaljevati z nadaljnjimi, bolj razširjenimi raziskavami (npr. večji vzorec, večkratne meritve na istem vzorcu).

»Ta stran je namenoma prazna«

VIRI

- [1] Jakšič, M. 2013. Poročilo o energetskem pregledu objekta. Šolsko izobraževalni objekt-Fakulteta Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 132.
- [2] Direktiva 2010/31/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19.maja 2010 o energetski učinkovitosti stavb (prenovitev)- EPBD-r. 2010. Uradni list Evropske Unije. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:SL:PDF>. (Pridobljeno 26.10.2016)
- [3] Tehnična smernica TSG-1-004:2010. Učinkovita raba energije. 2010. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor. Št.: 0071-101/2009: str. 15 in 16.
- [4] Kristl, Ž. 2012. Vertikalni konstrukcijski sklopi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente. <http://kske.fgg.uni-lj.si/> (Pridobljeno 10.6.2012)
- [5] Evangelisti, L., Guattari, C., Gori, P., De Lieto Vollaro, R. 2015. In Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences between Wall Models and Actual Building Performance. Sustainability 7, 10388-10398.
- [6] Samardizioska, T., Apostolska. R. 2016. Measurement of heat-flux of new type facade walls. Sustainability 8: 1031.
- [7] Univerza v Ljubljani. 2015. Energetski koncept Univerze v Ljubljani. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, 90 str.
- [8] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 52/10) z dne 30.6.2010: str. 7840. <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina?urlid=201052&stevilka=2856> (Pridobljeno 26.10.2016)
- [9] 2020 climate and energy package. European commission, Climate action. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en (Pridobljeno 4.11.2016)
- [10] 2030 climate and energy framework. European commission, Climate action. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (Pridobljeno 4.11.2016)
- [11] SIST EN ISO 6946:2008 Gradbene komponente in gradbeni elementi- Toplotna upornost in toplotna prehodnost- Računska metoda.

- [12] SIST EN ISO 10211: 2008 Toplotni mostovi v stavbah - Toplotni tokovi in površinske temperature - Podrobni izračuni
- [13] ISO 9869-1:2014 Toplotna izolacija- Elementi stavbe- in-situ meritev toplotne upornosti in toplotne prehodnosti- Del 1: Metoda toplotnega toka.
- [14] Ahmad, A., Maslehuddin, N., Al-Hadhrami. L. 2014. In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of hollow reinforced precast concrete walls. *Energy and buildings* 84: 132-141.
- [15] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Baldinelli, G. 2013. Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masouries- A case study. *Case studies in construction materials* 1: 53-59.
- [16] Baker, P. 2011. U-values and traditional buildings. In situ measurements and their comparison to calculated values. *Historic Scotland Tehnical Paper* 10.
- [17] Riley, J. 2016. BRE Report. In-situ measurement of wall U-values in English housing.
- [18] Stavbni ovoj. 2016. Energetska izkaznica stavbe.
<http://www.energetska-izkaznica.si/energetska-ucinkovitost/stavbni-ovoj/>
(Pridobljeno 2.4.2017)
- [19] Peternelj, J., Jagličič, Z. 2014. Osnove gradbene fizike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 1-5.
- [20] Medved, S. 2010. Gradbena fizika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: str. 15-18, 31-37.
- [21] SIST EN ISO 7345:1997 Toplotna izolacija - Fizikalne količine in definicije
- [22] Ahlborn. Basics of heat flow measurement.
<http://www.flir.com/instruments/exx-series/>
(Pridobljeno 2.2.2017)
- [23] Prek, M. 2013. Toplotne izgube: toplotna upornost homogenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.
- [24] Program URSA Gradena fizika 4.0.
<https://www.ursa.si/post/category/program-ursa-gradbena-fizika>
(Pridobljeno 30.10.2016)
- [25] Prostor. 2017. Ministrstvo za okolje in prostor. Geodetska uprava Republike Slovenije.
<http://www.e-prostor.gov.si/>
(Pridobljeno 4.3.207)

- [26] Ahlborn. Katalog.
<http://www.ahlborn.com/download/katalog/en/AhlbornCat-e.pdf>
(Pridobljeno 15.1.2017)
- [27] Flir. 2017. Instruments.
<http://www.flir.com/instruments/exx-series/>
(Pridobljeno 15.1.2017)
- [28] ARSO. 2015. Arhiv agrometeoroloških podatkov. Agencija Republike Slovenije za okolje.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/>
(Pridobljeno 2.4.2017)
- [29] Kolenac, M. 2013. »Celovita« energetska izkaznica. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samonaložba M. Kolenac): 62 str.
- [30] Jakšič, M. 2013. Poročilo o energetskem pregledu objekta. Šolsko izobraževalni objekt- Fakulteta Hajdrihova 28, 1000 Ljubljana. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 98 str.
- [31] Zupan, N. 2015. Energetska učinkovitost stavbe UL FGG na Hajdrihovi ulici 28. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Zupan): 70 str.
- [32] Hrast, B. 2008. Elaborat gradbene fizike za področje učinkovite rabe energije v stavbah. Fakulteta za arhitekturo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: 34 str.
- [33] Slokan, I. 1927. Gradbeni načrt Groharjeve 2b.
- [34] Žargi, P. 2008. Toplotna zaščita Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani.