

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta *za gradbeništvo*
in geodezijo

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

JAN KALAR

**EKSPERIMENTALNE MERITVE TOPLOTNEGA
TOKA IN DOLOČEVANJE TOPLOTNE
PREHODNOSTI TOPLOTNEGA OVOJA STAVBE**

**EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF HEAT FLUX
AND DETERMINATION OF THERMAL
TRANSMITTANCE OF BUILDING ENVELOPE**

Mentor:

izr. prof. dr. Roman Kunič

Somentorja:

doc. dr. Mateja Dovjak

asist. David Božiček

Član komisije:

prof. dr. Zvonko Jagličić

Predsednik komisije:

prof. dr. Goran Turk

Ljubljana, 22. maj 2020

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691:699.8(497.4)(043.2)
Avtor: Jan Kalar
Mentor: izr. prof. dr. Roman Kunič
Somentor: doc. dr. Mateja Dovjak
asist. David Božiček
Naslov: Eksperimentalne meritve toplotnega toka in določevanje toplotne prehodnosti toplotnega ovoja stavbe
Tip dokumenta: Diplomsko delo-B
Obseg in oprema: 48 str., 26 preg., 14 sl., 13 graf., 23 en.
Ključne besede: toplotna prehodnost, toplotna upornost, konstrukcijski sklop, toplotni tok, *in-situ* meritev

Izvleček

Ustrezno bioklimatsko načrtovanje, tako novih stavb kot tudi rekonstrukcij in sanacij obstoječih objektov, zagotavlja kakovostno notranje okolje, smotrno rabo energije in s tem energetske učinkovitost ter varovanje okolja. Poglavitni dejavnik, ki vpliva na energetske bilanco celotnega objekta, je pogosto ravno toplotna prehodnost stavbnega ovoja. Netransparentni del ovoja stavbe predstavljajo konstrukcijski sklopi, ki jih sestavljajo različni sloji materialov, pogosto tudi v kombinaciji z zračnimi plastmi. S svojimi materialnimi in termodinamičnimi lastnostmi določajo toplotni odziv konstrukcijskega sklopa glede na spreminjajoče robne pogoje (temperatura, vlažnost ipd.).

Toplotno prehodnost konstrukcijskih sklopov z znano sestavo ter materialnimi in fizikalnimi lastnostmi uporabljenih materialov navadno določamo z uporabo računske metode. V tem primeru vpeljemo ustrezne poenostavitve in dejansko stanje zaradi uporabe računskega modela nekoliko prilagodimo. Pogosto se izkaže, da je zaradi nepoznavanja sestave in uporabljenih materialov tako določevanje netočno in privede do odstopanj od dejanskih vrednosti. V teh primerih so primernejše *in-situ* meritve (npr. merjenje gostote pretečenega toplotnega toka in temperature) na podlagi katerih ocenimo vrednosti toplotne prehodnosti. Z namenom ugotavljanja odstopanj med merjenimi in računsko določenimi vrednostmi toplotne prehodnosti smo v diplomskem delu za določevanje uporabili obe metodi. Računsko vrednost toplotne prehodnosti smo določali skladno s standardom *ISO 6946:2017*, vrednosti toplotne prehodnosti na podlagi *in-situ* meritev pa smo ocenili s povprečno metodo, ki je določena s standardom *ISO 9869-1:2014*. Z nadaljnjo analizo rezultatov smo želeli poiskati vzroke, ki privedejo do razlik med vrednostmi toplotne prehodnosti.

Ugotovili smo, da so razlike med vrednostmi očitne. Do večjih odstopanj je prihajalo v konstrukcijskih sklopih, ki so vsebovali tako prezračevane kot neprezračevane sloje. V našem primeru so bili to sklopi analiziranih streh v naklonu, kjer so se vrednosti med izračunano in ocenjeno toplotno prehodnostjo na podlagi izvedenih meritev razlikovale tudi do 41,1 %. Manjša odstopanja so bila tudi pri konstrukcijskih sklopih zunanijh sten, kjer je bila razlika med vrednostmi do 12,5 %. Ugotovili smo, da so bile merjene vrednosti toplotne prehodnosti v štirih primerih višje, v dveh primerih pa je bila višja izračunana vrednost. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da z računskim določanjem vrednosti toplotne prehodnosti idealiziramo dejansko stanje in s takim matematičnim modelom zanemarimo dejanske dinamične vplive ter morebitne nepravilnosti v konstrukcijskih sklopih, izračunane vrednosti pa so tako podcenjene in ne odražajo dejanskega stanja na objektu. Ker je toplotna prehodnost pomemben faktor tudi pri izračunu energijske bilance stavbe, se je potrebno zavedati, da odstopanje od dejanskih vrednosti toplotne prehodnosti privede do zavajajočih in netočnih izkazov dejanske rabe energije v stavbah.

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691:699.8(497.4)(043.2)
Author: Jan Kalar
Supervisor: Assoc. Prof. Roman Kunič, Ph. D.
Cosupervisor: Asist. Prof. Mateja Dovjak, Ph. D.
Assist. David Božiček
Title: Experimental measurments of heat flux and determination of thermal transmittance of building envelope
Document type: Graduation Thesis - University studies
Scope and tools: 48 p., 26 tab., 14 fig., 13 graph., 23 eq.
Keywords: Thermal transmittance, thermal resistance, constructional complex, heat flux, *in-situ* measurments

Abstract

Proper bioclimatic design of both new buildings as well as the reconstructed and rehabilitated ones provides rational energy use and energy efficiency. Envelope thermal transmittance is a key factor affecting energy balance of buildings. A non – transparent part of building envelope are constructional complexes with different material layers, often combined with air layers. Their material and thermodynamic properties define thermal response of a certain constructional element according to weather conditions such as temperature, humidity and others.

Thermal transmittance of a constructional element is usually set by using a calculation method, provided that both structure as well as material and physical properties of used materials are known. If so, proper simplification is used and due to a certain calculation model of steady state conduction of the heat flow can be defined. Yet not knowing the structure and the materials used can often lead to inaccurate calculations and greater deviations from true value. In such cases *in-situ* measurements are more suitable - e.g. density of heat flow rate and temperature measurement. They make it possible to evaluate the transmittance value, which presents the constructional element condition factually. In order to establish deviations between the measured and calculated values of thermal transmittance and their possible causes I decided for both methods in my thesis; I used calculation methods based on standard *ISO 6946:2017*, and decided to evaluate *in-situ* measurements with an average method as defined by *ISO 9869-1:2014*.

Results have given obvious differences. Notable deviations can be seen in constructional complexes with ventilated or unventilated air layers. The analysis of pitched roof systems proved up to 41,1 % difference between the calculated and assessed values on the basis of measurements. There were some minor deviations in exterior walls as well but not more than up to 12,5 %. I established that in general assessed thermal transmittance values tended to be higher than the ones given by calculation method. The results have shown an idealized or incorrect thermal transmittance situation based only on calculation method rather than taking into consideration the real dynamic effects, as well as possible construction complexes flaws, where the calculated values remain underestimated and do not reflect the real condition of the building itself. Thermal transmittance influences the energy performance calculations to a large extent. Thus we have to take into consideration the fact that possible real value deviations influence energy efficiency demonstration. Results could show misleading or incorrect calculations of real energy use in buildings.

»Ta stran je namenoma prazna«

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Romanu Kuniču za možnost opravljanja eksperimentalnega diplomskega dela na Katedri za stavbe in konstrukcijske elemente ter dane nasvete. Iskrena hvala somentorici doc. dr. Mateji Dovjak za vzpodbudne besede in strokovno pomoč. Hvala tudi somentorju asist. Davidu Božičku za vse koristne nasvete, strokovno vodenje in tehnično pomoč pri izvajanju meritev.

Hvala ženi Veroniki, ki je verjela vame in mi ni pustila odnehati. Zahvaljujem se tudi staršema in vsem, ki ste mi pomagali in me spremljali na študijski poti.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO

STRAN ZA POPRAVKE	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	V
ZAHVALA	VII
KAZALO PREGLEDNIC	XI
KAZALO SLIK	XIII
KAZALO GRAFIKONOV	XIV
SIMBOLI	XV
1 UVOD	1
1.1 Nameni in cilji diplomske naloge ter zastavljene hipoteze	2
1.2 Metodologija	3
2 ZAKONODAJA, PREDPISI, PRAVILNIKI IN SMERNICE	4
2.1 Evropska pravna ureditev na področju graditve energetske varčnih stavb	4
2.2 Pregled stanja gradbene zakonodaje na področju energijske učinkovitosti stavb v Republiki Sloveniji	5
2.2.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (<i>PURES 2010</i>)	6
2.2.2 Tehnična smernica za graditev - Učinkovita raba energije	6
3 GRADBENA FIZIKA - PRENOS TOPLOTE	8
3.1 Notranja energija snovi	8
3.2 Specifična toplota snovi in toplotna kapaciteta snovi	8
3.3 Prenos toplote	9
3.3.1 Prevajanje toplote (kondukcija)	10
3.3.2 Prestop toplote (konvekcija)	11
3.4 Toplotna upornost in koeficient toplotne prehodnosti za večslojni konstrukcijski sklop	12
3.4.1 Toplotni upor	12
3.4.2 Toplotna prehodnost	13
3.5 Nestacionarno toplotno stanje	13
3.6 Vpliv vlage na konstrukcijske sklope	15
4 METODE IN ORODJA	18
4.1 Izračun toplotne prehodnosti po standardu <i>ISO 6946:2017</i>	18
4.2 In-situ meritve toplotne prehodnosti po standardu <i>ISO 9869-1:2014</i>	19
4.2.1 Oprema za opravljanje meritev toplotnega toka	20
4.2.2 Vrednotenje merjenih vrednosti in toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa	21
4.2.3 Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa s povprečno metodo	21
4.3 Računalniški program <i>UBAKUS</i>	22
5 PREGLED OBRAVNAVANIH OBJEKTOV IN KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV	23
5.1 Izbrana objekta	23
5.2 Vremenske razmere in zunanji pogoji v času izvajanja meritev	24
5.3 Analiza objektov in konstrukcijskih sklopov s termografsko kamero	25
5.4 Konstrukcijski sklopi	27

5.4.1 Namestitev merilnih plošč in temperaturnih senzorjev	27
5.4.2 Predstavitve konstrukcijskih sklopov	28
6 IZRAČUNI IN MERITVE	32
6.1 Konstrukcijski sklop <i>KS 1</i>	32
6.2 Konstrukcijski sklop <i>KS 2</i>	34
6.3 Konstrukcijski sklop <i>KS 3</i>	36
6.4 Konstrukcijski sklop <i>KS 4</i>	37
6.5 Konstrukcijski sklop <i>KS 5</i>	39
6.6 Konstrukcijski sklop <i>KS 6</i>	40
7 ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA	42
7.1 Streha v naklonu	42
7.1.1 Primerjava <i>KS 1</i> in <i>KS 2</i>	42
7.1.2 Primerjava <i>KS 4</i> in <i>KS 6</i>	43
7.2 Stena nad terenom	43
7.2.1 Primerjava <i>KS 3</i> in <i>KS 5</i>	43
7.3 Povzetek rezultatov in primerjava s sorodnimi študijami	44
7.4 Skladnost vrednosti toplotne prehodnosti z veljavnim pravilnikom (<i>PURES 2010</i>)	45
8 ZAKLJUČEK	46
9 VIRI	47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mejne vrednosti toplotnih prehodnosti U_{max} [W/(m ² K)] za konstrukcijske sklope.[7]	7
Preglednica 2: Velikostni red toplotnih prevodnosti λ [W/(mK)].[9]	10
Preglednica 3: Koeficienti prestopa toplote α [W/(m ² K)].[10]	11
Preglednica 4: Približne vrednosti termične difuzivnosti a [m ² /s] nekaterih trdnin pri sobni temperaturi (20 °C).[9]	15
Preglednica 5: Vrednosti koeficientov paroprepustnosti in S_d vrednosti pogosto uporabljenih gradbenih materialov.[11]	17
Preglednica 6: Vrednosti toplotnega upora pri prestopu toplote v odvisnosti od smeri toplotnega toka.[13]	18
Preglednica 7: Vrednosti toplotne upornosti zračne plasti debeline 50–300 mm v primeru neprezračevanega zračnega sloja.[10,13]	19
Preglednica 8: Glavne karakteristike in prikaz lege obravnavanih objektov <i>Hiša 1</i> in <i>Hiša 2</i> . [20]	23
Preglednica 9: Zbrani meteorološki podatki v času trajanja meritev.[22]	24
Preglednica 10: Karakteristike uporabljene IR-kamere.[21]	25
Preglednica 11: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 1</i> , na objektu <i>Hiša 1</i> .	28
Preglednica 12: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 2</i> , na objektu <i>Hiša 1</i> .	29
Preglednica 13: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 3</i> , na objektu <i>Hiša 1</i> .	29
Preglednica 14: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 4</i> , na objektu <i>Hiša 2</i> .	30
Preglednica 15: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 5</i> , na objektu <i>Hiša 2</i> .	31
Preglednica 16: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa <i>KS 6</i> , na objektu <i>Hiša 2</i> .	31
Preglednica 17: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m ² K)] za <i>KS 1</i> na objektu <i>Hiša 1</i> .	33
Preglednica 18: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m ² K)] za <i>KS 2</i> na objektu <i>Hiša 1</i> .	35
Preglednica 19: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m ² K)] za <i>KS 3</i> na objektu <i>Hiša 1</i> .	37
Preglednica 20: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m ² K)] za <i>KS 4</i> na objektu <i>Hiša 2</i> .	38
Preglednica 21: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m ² K)] za <i>KS 5</i> na objektu <i>Hiša 2</i> .	40

Preglednica 22: Tabelarični prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m ² K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti U_{RAC} [W/(m ² /K)] za KS 6 na objektu Hiša 2.	41
Preglednica 23: Tabelarični prikaz vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] za KS 1-2, KS 4, KS 6.	42
Preglednica 24: Tabelarični prikaz vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] za KS 3 in KS 5.	43
Preglednica 25: Primerjava odstopanja vrednosti toplotne prehodnosti v odstotkih [%].	44
Preglednica 26: Mejne vrednosti toplotnih prehodnosti U_{max} [W/(m ² K)] za konstrukcijske sklope.[7]	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz izotermnih ploskev in toplotnega toka.[8]	10
Slika 2: Prehajanje toplotnega toka skozi homogen material z enakomernim presekom.[8]	11
Slika 3: Shematski prikaz mejne plasti in poteka temperature.[8]	12
Slika 4: Prikaz poteka temperaturne linije skozi večslojni konstrukcijski sklop.[10]	13
Slika 5: Prikaz temperaturne linije pri hipni spremembi temperature. [Jagličič Z., 2020]	14
Slika 6: Prikaz faktorja dušenja ν [-] in faznega zamika η [h].[13]	15
Slika 7: Prikaz poteka difuzije vodne pare oziroma parnega toka.[12]	16
Slika 8: Merilec toplotnega toka ALMEMO Heat Flow Plate FQAx tip 118. [lastni vir, 2019]	20
Slika 9: ALMEMO® NiCr-Ni termočlen (levo) in merilnik ALMEMO® 2690-8A (desno). [17,18]	21
Slika 10: Shematski prikaz temperaturnega poteka skozi konstrukcijski sklop (zgoraj) in primer prikaza faznega zamika za obravnavan konstrukcijski sklop (spodaj). [lastni vir, 2019]	22
Slika 11: Konstrukcijski detajli na objektu <i>Hiša I</i> , na katerih so vidna območja pojavljanja toplotnih mostov, posnetih z IR-kamero.[lastni vir, 2019]	25
Slika 12: Slike detajlov konstrukcijskih sklopov na objektu <i>Hiša I</i> , posnete z IR- kamero.[lastni vir, 2019]	26
Slika 13: Slike detajlov konstrukcijskih sklopov na objektu <i>Hiša I</i> , posnete z IR- kamero.[lastni vir, 2019]	26
Slika 14: Prikaz namestitve merilne plošče za merjenje gostote toplotnega toka in senzorja za merjenje notranje temperature (<i>KS 1</i> , <i>KS 3</i> , <i>KS 5</i>).[lastni vir, 2019]	27

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 1</i> .	32
Grafikon 2: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 1</i> .	33
Grafikon 3: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 2</i> .	34
Grafikon 4: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 2</i> .	34
Grafikon 5: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 3</i> .	36
Grafikon 6: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 3</i> .	36
Grafikon 7: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 4</i> .	37
Grafikon 8: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 4</i> .	38
Grafikon 9: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 5</i> .	39
Grafikon 10: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 5</i> .	39
Grafikon 11: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m ²] na konstrukcijskem sklopu <i>KS 6</i> .	40
Grafikon 12: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m ² K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop <i>KS 6</i> .	41
Grafikon 13: Grafični prikaz odstopanja merjenih vrednosti toplotne prehodnosti U_{POV} glede na izračunane vrednosti U_{RAC} v odstotkih [%].	44

SIMBOLI

W_n – notranja energija snovi [J]

W_k – kinetična energija [J]

W_p – potencialna energija [J]

A – delo sile [J]

Q – toplota [J]

$c_{(p,c)}$ – specifična toplota snovi [J/(kgK)]

C – toplotna kapaciteta snovi [J/K]

a – termična difuzivnost snovi [m²/s]

m – masa [kg]

ρ – gostota snovi [kg/m³]

P – toplotni tok [W]

q – gostota toplotnega toka [W/m²]

S – površina [m²]

λ – koeficient toplotne prevodnosti [W/(mK)]

α_i – notranji koeficient prestopa toplote [W/(m²K)]

α_e – zunanji koeficient prestopa toplote [W/(m²K)]

T_n – notranja temperatura zraka [°C]

T_z – zunanja temperatura zraka [°C]

T_s – temperatura površine elementa [°C]

U – toplotna prehodnost elementa (sklopa) [W/(m²K)]

R – toplotna upornost elementa (sklopa) [(m²K)/W]

L – debelina (elementa) sloja [m]

η – toplotna zakasnitev oz. fazni zamik [h]

ν – faktor temperaturnega dušenja [-]

p – parcialni tlak vodne pare [Pa]

p' – nasičeni tlak vodne pare [Pa]

Φ – relativna vlažnost zraka [%]

δ – difuzijska prepustnost materiala [kg/(m²hPa)]

μ – difuzijska upornost materiala oz. koeficient paroprepustnosti [-]

»Ta stran je namenoma prazna«

1 UVOD

Zmanjšanje rabe energije in preprečevanje energijskih izgub sta pojma, ki sta v današnjem času prisotna povsod. Ukrepi za povečanje energetske učinkovitosti se v našem okolju v okviru mednarodne zakonodajne ureditve odražajo tako na državnem nivoju kot na nivoju Evropske unije (v nadaljevanju EU) in stremijo k izboljšanju energetske učinkovitosti infrastrukture, proizvodov ter energetskih sistemov. Prav obstoječa infrastruktura (natančneje stavbe) pa je po podatkih Evropske komisije (v nadaljevanju Komisija), ki jih zasledimo v publikaciji *Energy Performance in Buildings Directive*, objavljene leta 2019 [1], odgovorna za kar 40 % porabe energije in 36 % emisij CO₂ v EU. Ocenjeno je, da je 75 % stavbnega fonda na območju EU energetsko neučinkovitega, kar ni presenetljivo, saj je iz objav Komisije za širšo javnost razvidno, da je kar 35 % vseh stavb starejših od petdeset let [1]. Komisija in Svet EU se tako v zadnjih letih trudita vzpostaviti program, ki bi v državah članicah EU spremenil politiko na področju rabe energije. Direktive EU, ki so neposredno vključene v nacionalno zakonodajo, tako uveljavljajo nove zahteve pri gradnji in prenovah stavb, ki bi zagotavljale smotrno in učinkovito rabo energije.

Na učinkovito rabo energije v stavbah vpliva več dejavnikov, ki so medsebojno povezani. V prvi vrsti na rabo energije vplivata lokacija objekta, ki zajema geomorfološke danosti in vplive podnebja, ter arhitekturna zasnova, ki določa ustrezno lego in orientacijo prostorov. Stik objekta z zunanjim okoljem predstavlja stavbni ovoj. Slednji je z ustreznim načrtovanjem konstrukcijskih sklopov poleg vgrajenih sistemov in naprav za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, pripravo tople vode in razsvetljavo bistven dejavnik, ki pripomore k ustreznemu zmanjšanju toplotnih izgub in s tem izboljša energetsko učinkovitost. Ovoj stavbe v splošnem lahko razdelimo na transparentni in netransparentni del. Sestavljajo ga torej elementi nosilnih konstrukcij in polnil (stene, stebri, plošče, stavbno pohištvo) ter elementi zaščitnih konstrukcij, ki zmanjšujejo neugodno prehajanje toplote in vlage, zagotavljajo zrakotesnost in preprečujejo vdor vode v notranjost. V smislu energetske učinkovitosti je prehajanje toplote skozi konstrukcijski sklop pomemben parameter pri izračunu toplotne bilance stavbe. Toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa, v kolikor poznamo materialne in fizikalne karakteristike le-tega, navadno določamo računsko. Pogosto pa se pojavi potreba po *in-situ* meritvah toplotne prehodnosti, ko je potrebno prehajanje toplote določiti eksperimentalno. Takšno določanje toplotne prehodnosti je smiselno v primerih, ko ne poznamo natančne sestave konstrukcijskega sklopa in bi bilo njeno določevanje z destruktivnimi metodami (npr. sondiranjem) neprimerno. Računska toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa predstavlja inženirsko dovolj natančno vrednost, vendar se moramo zavedati, da je za izračun uporabljen poenostavljen računski model. Najpogosteje za izračun predpostavimo stacionarno stanje prehajanja toplote z definiranimi robnimi pogoji, med katere štejemo notranjo in zunanjo temperaturo zraka, notranjo in zunanjo relativno vlažnost zraka in prestopni koeficient mejne zračne plasti. Toplotni tok v konstrukcijskem sklopu prehaja skozi enega ali več slojev homogenega materiala z določenimi koeficienti toplotne prevodnosti. V realnosti pa je stanje nekoliko bolj zapleteno. Upoštevati moramo dinamično prehajanje toplote, ki je odvisno od več parametrov. Nihanja temperature zraka in vlage, osvetljenost površin s soncem in njihove absorpcijske lastnosti, heterogenost materialov in sposobnost le-teh akumuliranja toplote ter tudi morebitni toplotni mostovi so spremenljivke, ki v odvisnosti s časom določajo realno toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa. Tako določanje zahteva več časa, saj se le z večjim številom meritev v časovno daljšem obdobju dovolj približamo točni vrednosti toplotne prehodnosti sklopa.

Določevanje toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov oziroma elementov je bistveno za izdelavo t. i. elaborata gradbene fizike za področje učinkovite rabe energije v stavbah oziroma krajše elaborat URE. Elaborat izkazuje doseganje učinkovite rabe energije v stavbah oziroma izpolnjevanje zahtev skladno s Pravilnikom o učinkoviti rabi energije v stavbah (v nadaljevanju PURES 2010). Povzetke izračunov iz elaborata URE, med katere prištevamo tudi izračune s področja toplotne zaščite stavbe, moramo dodatno prikazati na obrazcu *Izkaz energijskih lastnosti stavbe*, ki je sestavni del pravilnika. V navedenem pravilniku lahko opazimo, da za izračun toplotne prehodnosti elementov zunanje

površine poleg standarda *SIST EN ISO 10211:2017*, ki zajema vpliv toplotnih mostov, zahteva tudi uporabo standarda *SIST EN ISO 6946:2017*. Slednji predvideva računsko metodo določevanja vrednosti toplotne prehodnosti elementov in konstrukcijskih sklopov. Kratici *SIST EN* v navedbi standarda nam povesta, da gre za harmonizirana privzeta mednarodna standarda (*ISO*) s strani Slovenskega inštituta za standardizacijo. Pravilnik zahteva ponovno določitev energijskih lastnosti stavbe in izdelavo novega elaborata URE tudi po končani gradnji oziroma določitev toplotne prehodnosti na izvedenem stanju. Za ponovno določitev vrednosti pravilnik dopušča uporabo tudi drugih standardov in metod s področja Evropskega gospodarskega prostora in Turčije, če ti standardi omogočajo enake ravni energijske učinkovitosti in uporabljajo enake parametre ter zagotavljajo enako stopnjo natančnosti. Torej je poleg uporabe računske metode eden izmed primernih postopkov tudi uporaba *in-situ* meritev in določevanje toplotne prehodnosti na podlagi izvedenih meritev. V kolikor meritve izvajamo skladno s standardom (npr. *ISO 9896-1:2014*) je ocenjena vrednost na podlagi pridobljenih podatkov odraz izvedenega stanja in predstavlja dejansko toplotno prehodnost z dovolj veliko natančnostjo.

Toplotno prehodnost določamo glede na gostoto pretečenega toplotnega toka pravokotno na površino, ki se vzpostavi v konstrukcijskem sklopu in je poleg razlik v temperaturi ter ostalih okoljskih parametrov odvisen predvsem od materialnih karakteristik elementov. Omeniti pa velja še specifično toploto in gostoto materialov v konstrukcijskem sklopu in njihovo sposobnost akumuliranja toplote. Tako ločimo masivnejše eksoskeletne konstrukcijske elemente ter nosilno konstrukcijo z endoskeletno zasnovo. Masivnejši elementi, ki sestavljajo konstrukcijski sklop, imajo posledično večjo sposobnost akumuliranja toplote, kar pa vpliva tudi na toplotni tok. Obratno pa je z elementi v endoskeletni konstrukcijski zasnovi, katerih sposobnost akumulacije toplote je manjša. Te materialne lastnosti so predvsem pomembne za določitev faznega zamika prehoda toplote in posledično nihanja temperature v prostoru, ki je pomemben parameter ugodnega notranjega okolja.

1.1 Nameni in cilji diplomske naloge ter zastavljene hipoteze

Računsko določanje toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa je razmeroma enostavna metoda, vendar je vprašljiva točnost izračunanih vrednosti oziroma primerjava teh z realnimi vrednostmi. Uporabljen matematični model realno stanje idealizira in v veliki meri poenostavi prehajanje toplote skozi konstrukcijski sklop. Nasprotno je merjena vrednost toplotne prehodnosti natančnejša in prikaže realnejše rezultate, v določenih primerih pa je tudi najprimernejša metoda za analizo toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa.

Z namenom ovrednotenja razlik med ocenjeno vrednostjo toplotne prehodnosti na podlagi izvedenih meritev in izračunano vrednostjo toplotne prehodnosti in morebitnih razlogov za nastanek le-teh smo si zastavili naslednje cilje:

1. Določiti reprezentativne konstrukcijske sklope na izbranih objektih z znano materialno sestavo in fizikalnimi lastnostmi uporabljenih materialov.
2. Izračunati vrednosti toplotne prehodnosti skladno s standardom *ISO 6946:2017*.
3. Modelirati izbrane konstrukcijske sklope z računalniškim programom *UBAKUS*.
4. S pomočjo termografske kamere določiti primerna mesta na površinah izbranih konstrukcijskih sklopov za namestitve merilnih plošč toplotnega toka in temperaturnih senzorjev.
5. Izmeriti gostoto pretečenega toplotnega toka na izbranih konstrukcijskih sklopih ter notranjo in zunanjo temperaturo zraka skladno s standardom *ISO 9869-1:2014*.
6. Oceniti vrednost toplotne prehodnosti s povprečno metodo glede na odčitke merjenih vrednosti gostote toplotnega toka ter notranje in zunanje temperature zraka.

7. Primerjati izračunane in ocenjene vrednosti toplotne prehodnosti na podlagi meritev in določiti razloge za pojav morebitnih odstopanj.

Med zasnovanjem diplomskega dela in tudi med izvajanjem meritev smo postavili nekaj hipotez, ki smo jih želeli preveriti. Tako smo domnevali, da bo toplotna prehodnost, določena z oceno vrednosti toplotne prehodnosti na podlagi izvedenih meritev, višja, kot izračunana vrednost. Preveriti smo želeli hipotezo, da se bodo v merjenih vrednostih pojavile razlike in večja nihanja gostote toplotnega toka v prostoru, ki bo v uporabi, v primerjavi s prostorom, v katerega bomo v času meritev vstopali minimalno. Ker je uporaba spleta in prostodostopnih računalniških programov precej razširjena, smo želeli preveriti tudi domnevo, da so vrednosti toplotne prehodnosti, ki jih s preprostimi ukazi in poznavanjem konstrukcijskega sklopa določi laičen uporabnik, dovolj blizu dejanskim vrednostim oziroma vrednostim, ki so določene strokovno, skladno z uveljavljenimi metodologijami in standardi.

1.2 Metodologija

Za doseganje zastavljenih ciljev diplomskega dela smo predvideli uporabo dveh metod za določevanje toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa. Prva je predstavljala metodo po standardu *ISO 6946:2017*, in sicer za določevanje izračunane vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa, druga pa je vključevala eksperimentalne meritve toplotnega toka po standardu *ISO 9869-1:2014*. Obe metodi sta podrobneje predstavljeni v 4. poglavju.

Za potrebe meritev smo izbrali dva objekta in z uporabo termovizijske kamere poiskali primerna mesta za namestitvev merilne opreme, s katero smo merili gostoto toplotnega toka ter notranjo in zunanjo temperaturo zraka. V nadaljevanju smo določili točno sestavo izbranih konstrukcijskih sklopov ter opravili potrebne meritve. Izmerjene vrednosti toplotnega toka in temperature smo sproti beležili v merilnem aparatu in kasneje vrednosti analizirali z računalniškim programom *Excel*. Skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* smo s povprečno metodo določili vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Dodatno smo vrednosti toplotne prehodnosti določili tudi računsko po metodologiji, ki jo določa standard *ISO 6946:2017*. Z uporabo prosto dostopnega računalniškega programa *UBAKUS* smo obravnavane konstrukcijske sklope modelirali in ponovno določili vrednosti toplotne prehodnosti.

Z analizo merjenih in izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti smo določili odstopanja med vrednostmi ter poskusili najti vzroke, ki so vplivali na razlike v toplotni prehodnosti med merjeno in izračunano vrednostjo. Dodatno smo vrednosti toplotne prehodnosti primerjali z rezultati, ki smo jih dobili z analizo konstrukcijskih sklopov v programu *UBAKUS*.

2 ZAKONODAJA, PREDPISI, PRAVILNIKI IN SMERNICE

Škodljivi vplivi pretirane rabe energije na okolje ter ekonomska neupravičenost izrabe sta verjetno glavna razloga, ki vzbujata skrb tako v laični javnosti kot v politični srenji. Izkazalo se je, da je zakonska ureditev na področju energetske učinkovitosti in učinkovite rabe energije nujna. Kot je bilo zapisano že uvodoma, je prav gradbeništvo eno izmed področji, kjer so energetske izgube zelo velike. Seveda lahko največ naredimo z gradnjo objektov, ki bodo tekom uporabe energetske varčni ali celo nič-energijski, vendar pa je potrebno posebno skrb namenjati tudi sanaciji objektov. Največjo možnost pri varčevanju energije v obstoječih stavbah poleg nameščenih sistemov v stavbi predstavlja ravno toplotni ovoj stavbe. Poleg zakonov, ki veljajo na področju Slovenije in urejajo področje graditve objektov ter porabo energije, velja omeniti še pravilnike in tehnične smernice, ki so ne samo v pomoč pri projektiranju energetske varčnih objektov, ampak vsebujejo tudi zavezujoče tehnične zahteve, ki jih je potrebno upoštevati pri načrtovanju novih objektov in njihovih sanacijah. Vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov pa so parameter, ki je bistven za izpolnjevanje določenih zahtev.

2.1 Evropska pravna ureditev na področju graditve energetske varčnih stavb

Republika Slovenija je kot ena izmed polnopravnih članic EU dolžna spoštovati in upoštevati njene pravne akte. Mednje štejemo pogodbe, uredbe, direktive ter sklepe. Ti pravni akti so zavezujoči in neposredno vplivajo na področja, ki jih urejajo. Za namen diplomskega dela se osredotočimo le na del evropske zakonodaje, ki predstavljajo pogodbe ter direktive EU na področju zmanjšanja porabe energije ter graditve energijsko varčnih in nič-energijskih stavb. Pogodbe tako v splošnem določajo cilje EU, določajo pravila za institucije, način sprejemanja odločitev idr. Direktive pa predstavljajo zavezujoč pravni akt, ki od držav članic zahteva določen rezultat, vendar se lahko države odločijo, kako ga bodo dosegle in sprejele potrebne ukrepe, ki bodo omogočili prenos zahtev iz Direktiv v nacionalno zakonodajo.[2]

Temelj pri vzpostavitvi energetske politike na nivoju EU je predstavljal tako imenovani *Akcijski načrt za energetske učinkovitosti: Uresničitev možnosti (COM(2006)0545)*, ki je bil sprejet leta 2006. Z uvedbo akcijskega načrta je želela Komisija obvladovati oziroma zmanjšati povpraševanje po energiji ter z dodatnimi ukrepi do leta 2020 doseči zmanjšano porabo primarne energije za 20 % glede na napovedano porabo energije v letu 2020. Ker se je izkazalo, da bo zastavljen cilj zmanjšanja porabe dosežen le polovično, je bil leta 2011 zasnovan nov in celovit *Načrt za energetske učinkovitosti 2011 (COM(2011)0109)*, ki je predstavljal enega izmed krovnih ciljev strategije *Evropa 2020 za pametno, trajnostno in vključujočo rast*. Skladno z akcijskim načrtom je bilo sprejetih več direktiv, ki neposredno vplivajo na zmanjševanje porabe energije. Z *Direktivo o energetske učinkovitosti (2012/27/EU)*, ki je v veljavo stopila decembra 2012, se od članic EU zahteva ureditev nacionalnih predpisov in zahtev, ki bodo omogočili doseganje 20 % zmanjšanja porabe energije do leta 2020. Poleg omenjene Direktive, so bili z uvedbo *Direktive o okoljsko primerni zasnovi (2009/125/ES)*, *Direktive o označevanju energetske učinkovitosti (2010/30/EU)* in *Direktive o energetske učinkovitosti stavb (2010/31/EU)* postavljene dodatne zahteve za proizvode in stavbe pri doseganju energetske učinkovitosti. Z upoštevanjem *Direktive o energetske učinkovitosti stavb*, bi z izboljšanjem energetske učinkovitosti dosegli do 6 % zmanjšanje porabe energije, obenem bi zmanjšali emisije toplogrednega plina ogljikovega dioksida za približno 5 %. Dodatna zahteva pa zajema novogradnje in predvideva, da morajo biti vse nove stavbe po 31. 12. 2020 skoraj nič-energijske. Napor držav članic EU po zmanjšanju porabe primarne energije so se izkazali za nezadostne, saj je bilo leta 2014 v sporočilu Komisije *Energijska učinkovitost in njen prispevek k energetske varnosti ter okviru podnebne in energetske politike za leto 2030 (COM(2014)0520)* razvidno, da bo do leta 2020 dosežen zgolj 18 % prihranek energije. V letu 2015 je tako sledil pregled direktive o energetske učinkovitosti in novembra 2016 objava svežnja predlogov z naslovom *Čista energija za vse Evropejce (COM(2016)0860)*, ki je

predstavljajal usklajevanje energetske zakonodaje EU z novimi podnebnimi in energetskimi cilji do leta 2030. Skladno z revidirano *Direktivo o energetske učinkovitosti stavb* je bil po pogajanjih s Svetom EU novembra 2018 dosežen cilj zmanjšanja porabe energije za 32,5 % do leta 2030 na ravni EU.[3] Glede same uporabe gradbenih materialov in proizvodov pa velja omeniti tudi *Uredbo (EU) št. 305/2011* Evropskega parlamenta in Sveta z dne 9. marca 2011, ki določa pogoje za dajanje na trg gradbenih proizvodov in omogočanje dostopa do njih z uvedbo usklajenih pravil o načinu navajanja lastnosti gradbenih proizvodov. V prilogi uredbe so tako navedene osnovne zahteve za gradbene objekte, ki jih morajo objekti ob normalnem vzdrževanju izpolnjevati ves čas ekonomsko sprejemljive življenjske dobe. Poleg mehanske odpornosti in stabilnosti, varnosti pred požarom, higienske in zdravstvene zaščite ter zaščite okolja, varnosti pri uporabi, zaščite pred hrupom, univerzalne graditve in rabe objektov ter trajnostne rabe naravnih virov, pod določila spada tudi zahteva po varčevanju z energijo in ohranjanju toplote.

Omenjene direktive, ki so bile posredovane državam članicam EU in s tem tudi Republiki Sloveniji, predstavljajo pravne okvirje za dolgoročno strategijo in nacionalno zakonodajno ureditev na področju varčevanja z energijo in graditve energetske varčnih objektov.

2.2 Pregled stanja gradbene zakonodaje na področju energijske učinkovitosti stavb v Republiki Sloveniji

Ker ima EU status pravne osebe, ima posledično svoj pravni red, ki je ločen od mednarodnega prava in posredno ali neposredno vpliva na zakone držav članic. Tako so direktive, ki jih državam članicam za doseganje ciljev posreduje EU, zavezujoči pravni akti in jih morajo članice prenesti v svojo nacionalno zakonodajo. Zgoraj navedene direktive o energetske učinkovitosti in energetske učinkovitih stavbah je Republika Slovenija vključila v dva glavna zakona s področja graditve objektov in energetike, ki poleg nacionalnih zahtev upoštevata tudi zahteve EU. Ker se zakona posredno nanašata tudi na energetske učinkovitost stavb in posledično na ustrezno dimenzioniranje konstrukcijskih sklopov, lahko omenimo bistvene zahteve na tem področju.

Prvi zakon imenujemo *Gradbeni zakon (Uradni list RS, št. 61/17 in 72/17 – popr.)*, ki v svojem bistvu ureja pogoje za gradnjo objektov in druga vprašanja, povezana z graditvijo objektov. Za potrebe diplomskega dela se osredotočimo le na del zakona, ki ureja graditev in rekonstrukcijo energetske varčnih stavb in s tem posredno tudi načrtovanje konstrukcijskih sklopov toplotnih ovojev stavb. V 15. členu zakona se nahajajo bistvene lastnosti gradbenega objekta, ki jih določa že *Uredba (EU) št. 305/2011*, torej tudi zahteva po varčevanju z energijo in ohranjanju toplote, ki je podrobno opredeljena v 21. členu *Gradbenega zakona*. V drugem odstavku tega člena zakona poleg zahteve po ustrezni orientaciji ter zasnovi objekta in prostorov zasledimo zahtevo po materialih in elementih konstrukcije, ki morajo s svojo zasnovo in lastnostmi omogočiti učinkovito upravljanje energijskih tokov. V nadaljevanju člena zakon ureja uporabo energetske varčnih sistemov za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, pripravo tople sanitarne vode in razsvetljavo, ki so z izjemo osvetlitve in pripravo tople vode vsaj posredno povezani s toplotnim ovojem stavbe.[4]

Omeniti pa velja tudi *Energetski zakon (Uradni list RS, št. 60/19)*, katerega vsebina je povezana z že omenjenimi direktivami o energetske učinkovitosti. Zakon celovito ureja področje energetike in energetske politike, pri čemer pa je zajeto tudi področje o varčevanju z energijo in njeno učinkovito porabo. Zakon v svojem 330. členu določa, da morajo biti vse nove stavbe skoraj nič-energijske. Skladno s 331. členom zakona je Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije v septembru leta 2014 izdalo *Akcijski načrt za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020 (AN sNES)*, ki zajema zahteve EU po izboljšanju energetske učinkovitosti stavb. V nadaljevanju zakon v 332. členu ureja tudi področje energetskih izkaznic, izdelava katerih poleg energetske bilance zahteva tudi vrednosti toplotnih prehodnosti posameznih konstrukcijskih sklopov.[5] Načrtovanje energetske

varčnih in skoraj nič-energijskih stavb je poleg energetsko učinkovitih nameščenih sistemov nemogoče brez ustrezno zasnovanih konstrukcijskih sklopov in toplotnega ovoja.

2.2.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES 2010)

Pogosto so za razčlenjevanje zahtev v zakonu potrebni pravilniki in uredbe. To so dodatni izvršilni predpisi, ki podrobneje definirajo ali urejajo zahteve določene v zakonu. Podlaga za sprejetje *Pravilnika o učinkoviti rabi energije* (Uradni list RS, št. 52/10 in 61/17 – GZ) je danes že zastarel *Zakon o graditvi objektov* (Uradni list RS, št. 110/02), ki ga je nadomestil aktualni *Gradbeni zakon* (Uradni list RS, št. 61/17 in 72/17 – popr.). S pravilnikom so v nacionalno zakonodajo tako prenesene zahteve *Direktive o energetski učinkovitosti* (2012/27/EU) in *Direktive o energetski učinkovitosti stavb* (2010/31/EU) ter *Direktive o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov* (2009/28/ES). Pravilnik določa tehnične zahteve, ki morajo biti izpolnjene za učinkovito rabo energije v stavbah na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah ter zagotavljanja lastnih obnovljivih virov energije za delovanje sistemov v stavbi. V skladu z že omenjeno *Direktivo o energetski učinkovitosti stavb*, je določena tudi metodologija za izračun energijskih lastnosti stavbe. Uporaba predpisov pravilnika je namenjena gradnji novih stavb in tudi rekonstrukcijam stavb ali njenega posameznega dela, kjer se posega v najmanj 25 % toplotnega ovoja, iz pravilnika pa so izvzete stavbe, ki niso namenjene bivanju. Mednje štejemo na primer stavbe za promet in izvajanje elektronskih komunikacij, rezervoarje, silose in skladišča, stavbe za opravljanje verskih obredov, pokopališke stavbe ter druge nebivanske zgradbe. Za učinkovito rabo energije v stavbi je gotovo odgovornih več dejavnikov, verjetno pa ima največji doprinos k energetski učinkovitosti prav toplotna zaščita stavbnega ovoja. Pravilnik v 9. členu definira funkcijo toplotne zaščite stavbnega ovoja. Določa, da je s toplotno zaščito površine stavbnega ovoja in ločilnih elementov delov stavbe z različnimi režimi notranjega toplotnega ugodja, potrebno zmanjšati prehod energije skozi površino toplotnega ovoja stavbe, zmanjšati podhlajevanje ali pregrevanje stavbe, zagotoviti tako sestavo gradbenih konstrukcij, da ne prihaja do poškodb ali drugih škodljivih vplivov zaradi difuzijskega prehoda vodne pare in nadzorovati (uravnavati) zrakotesnost stavbe.[6]

Izpostaviti je potrebno tudi 17. člen pravilnika, ki določa izdelavo elaborata gradbene fizike za področje učinkovite rabe energije v stavbah (elaborat URE). V elaboratu se dokazuje doseganje učinkovite rabe energije v stavbah oziroma izpolnjevanje zahtev samega pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah. Vsebina elaborata je natančno določena v drugem odstavku člena. V 19. členu pravilnika preberemo zahtevo, da morajo biti povzetki izračunov izdelanega elaborata prikazani na obrazcu *Izkaz energijskih lastnosti stavbe*, ki je kot priloga del pravilnika. Pravilnik zahteva tudi ponovno določitev energijskih lastnosti stavbe na podlagi izvedenega stanja. Tako je navedeni izkaz obvezen del dokazila o zanesljivosti objekta, saj mora dokazovati, da so izpolnjene zahteve 7. (mejne vrednosti učinkovite rabe energije) in 16. člena (obnovljivi viri energije) *Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah*.

2.2.2 Tehnična smernica za graditev - Učinkovita raba energije

Gradbeni ukrepi, natančnejša ureditev bistvenih zahtev, pogoji za projektiranje in projektne rešitve za doseganje zahtev omenjenega pravilnika so zbrani v tehnični smernici za graditev *TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije*. Tehnično smernico je izdal minister za okolje in prostor, v času izdaje smernice pristojen za področje, ki ga omenjena smernica ureja. Njena uporaba pri načrtovanju in rekonstrukcijah stavb je v skladu s *Pravilnikom o učinkoviti rabi energije* je obvezna. V njej je poleg natančne opredelitve bistvenih zahtev, pogojev za projektiranje, izbranih ravni oziroma razredov gradbenih proizvodov oziroma materialov, ki se smejo vgrajevati, ter načinov njihove vgradnje in izvajanja gradnje, da se zagotovi zanesljivost objekta, določena tudi metodologija za izračun energijskih lastnosti stavbe, med katere štejemo tudi toplotno prehodnost stavbnega ovoja. Področje,

ki neposredno obravnava toplotno prehodnost konstrukcijskih sklopov, je v tehnični smernici zbrano v 3. poglavju z naslovom Toplotna zaščita.[7]

V splošnem je stavbni ovoj sestavljen iz gradbenih konstrukcijskih sistemov kot so stene, strehe, tla ter ostalih ločilnih elementov, ki jih predstavlja vgrajeno stavbno pohoštvo. Pomembno je tudi, da ločimo prostore z različnim notranjim toplotnim ugodjem, saj smernica narekuje uporabo in izračun toplotne prehodnosti tudi za notranje konstrukcijske sisteme v primeru, da notranja temperatura zraka v prostorih pri projektirani zunanji temperaturi pade pod 12 °C. Posebno pozornost je potrebno nameniti materialnim in termičnim lastnostim vgrajenega stavbnega pohoštva, saj to v novejših zgradbah predstavlja nezanemarljiv delež toplotnega ovoja stavbe s povečano toplotno prehodnostjo. Tehnična smernica natančno določa vrednosti koeficienta toplotnih prehodnosti za elemente zunanjih površin stavbe in ločilnih elementov delov stavbe z različnimi režimi notranjega toplotnega ugodja. Za ponazoritev so v *Preglednici 1* prikazane mejne vrednosti, določene po standardih *SIST EN ISO 6949:2017* in *SIST EN ISO 10211:2017*, za konstrukcijske sklope, ki smo jih obravnavali v diplomskem delu, dodatno pa tudi vrednosti zahtevane toplotne prehodnosti za stavbno pohoštvo.

Preglednica 1: Meje vrednosti toplotnih prehodnosti U_{max} [W/(m²K)] za konstrukcijske sklope.[7]

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore	U_{max} [W/(m ² K)]
zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,28
strop proti neogrevanemu prostoru, strop v sestavi ravnih ali poševnih streh	0,20
vertikalna okna ali balkonska vrata in greti zimski vrtovi z okvirji iz lesa ali umetnih mas	1,30
vertikalna okna ali balkonska vrata in greti zimski vrtovi z okvirji iz kovin	1,60
strešna okna, steklene strehe	1,40
vhodna vrata	1,60
garažna vrata	2,00

3 GRADBENA FIZIKA - PRENOS TOPLOTE

Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa je odvisna od fizikalnih in termodinamičnih lastnosti uporabljenih materialov ter robnih pogojev. Te predstavljajo lastnosti notranjega in zunanjega zraka (temperatura, vlažnost) ter ostali zunanji vplivi (npr. gibanje zraka, sončno sevanje itd.). Za izračun toplotne prehodnosti je pomembno razumevanje notranje zgradbe snovi in termodinamičnih procesov, ki so prisotni v konstrukcijskih sklopih. Področje fizike, katere del je tudi gradbena fizika, ki se ukvarja s proučevanjem pojavov v snovi v zvezi z neurejenim gibanjem molekul in sil med njimi, imenujemo termodinamika. Kljub temu, da obravnavano telo, v našem primeru konstrukcijski element, v splošnem miruje, se moramo zavedati, da se s časom spreminjajo njegove lastnosti, ki so odvisne od zgradbe in notranjega stanja snovi (npr. gostote, viskoznosti ter ostalih materialnih in fizikalnih lastnosti). Govorimo o skupku atomov in molekul, med katerimi učinkujejo medmolekularne sile in so gradniki snovi. Njihovo neurejeno gibanje ter medsebojna interakcija (trkanje) so mikroskopski dogodki in se stalno spreminjajo, navzven pa se odražajo kot stalni makroskopski pojavi. Te pojave ali bolje rečeno stanja opišemo s termodinamičnimi količinami, ki poleg mase, volumna, gostote snovi in tlaka vključujejo tudi toploto. Govorimo o takoimenovanem termodinamskem ali toplotnem stanju snovi. V kolikor se omenjene količine s časom spreminjajo, je tako toplotno stanje nestacionarno. Obratno je časovno neodvisno stanje stacionarno. Omenimo lahko še toplotno ravnovesje, ki nastane takrat, ko je toplotno stanje snovi stacionarno brez dovajanja ali odvzemanja energije. V takšnem stanju ima snov v vsaki točki enako temperaturo in enak tlak. V nadaljevanju smo povzeli nekatere bistvene vsebine, ki jih je zbral Kladnik (1989) [8] v učbeniku *Mehanski in toplotni pojavi*.

3.1 Notranja energija snovi

Velja, da ima telo poleg kinetične energije W_k zaradi gibanja, glede na okolico in potencialne energije W_p zaradi konservativnih sil, ki na telo učinkujejo od zunaj, še notranjo energijo W_n . Ta je odvisna od notranje zgradbe in stanja snovi. Energijo merimo v joulih [J]. Notranjo energijo obravnavanega telesa W_n lahko še dodatno razčlenimo na molekularni nivo:

$$W_n = W_{k(molekul)} + W_{p(molekul)} + W_{n(molekul)}, \quad (1)$$

ker pa se osredotočamo le na toplotne pojave v snovi, pri katerih se notranja sestava in zgradba molekul ne spreminjata, lahko zadnji člen enačbe $W_{n(molekul)}$ zanemarimo. Tako je kinetična energija $W_{k(molekul)}$ odvisna predvsem od temperature, potencialni del $W_{p(molekul)}$ pa od povprečne razdalje med molekulami, torej od gostote in volumna snovi. Notranja energija snovi se lahko spreminja zaradi dela (dA), ki ga snov prejema ali oddaja, ali pa tudi z dovajanjem oziroma odvzemanjem toplote (dQ). Energija se tako med snovmi prenaša s trki med molekulami in zaradi molekularnih sil iz toplejše snovi v hladnejšo oziroma lahko rečemo, da se toplota pretaka iz snovi z višjo temperaturo v snov z nižjo temperaturo. Iz zapisanega lahko povzamemo *Energijski zakon* termodinamike:

$$dW = dA + dQ, \quad (2)$$

ki pravi, da je sprememba polne energije snovi dW enaka vsoti prejetega dela in dovedene toplote.

3.2 Specifična toplota snovi in toplotna kapaciteta snovi

Za lažje nadaljnje razumevanje problema prenosa toplote omenimo še specifično toploto snovi. Ločimo specifično toploto c_v pri stalnem volumnu ($dV=0$) in specifično toploto c_p pri stalnem tlaku ($p = \text{konst.}$). Specifična toplota snovi nam pove, koliko toplote je potrebne, da se 1 kg snovi segreje za 1K. Merska enota za navedeno količino je [J/(kgK)]. Vrednosti specifične toplote za posamezne snovi je potrebno določiti z eksperimentalnimi meritvami.

V večini primerov se snov segreva in ohlaja pri stalnem tlaku in lahko zato zapišemo enačbo, ki nam pove, koliko toplote (Q) je potrebne, da se snov z maso (m) segreje za ΔT . Izražamo jo v joulih [J]:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (3)$$

produkt mase (m) in specifične toplote snovi (c_p) imenujemo toplotna kapaciteta snovi (C). Toplotna kapaciteta snovi torej pove, koliko toplote mora snov oddati, da se ohladi za 1K in obratno prejeti, da se segreje za 1K. Merska enota za toplotno kapaciteto je tako [J/K], z enačbo lahko zapišemo:

$$C = mc_p. \quad (4)$$

Ker gre pri malo stisljivih kapljevinah in trdninah za zelo majhne razlike med c_v in c_p nekateri avtorji specifično toploto snovi označujejo samo kot c [J/(kgK)].

3.3 Prenos toplote

Če povzamemo bistvene značilnosti prenosa toplote, lahko zapišemo, da se toplota prenaša s področja z višjo temperaturo na področje z nižjo temperaturo. Prav tako ločimo stacionarno in nestacionarno stanje prenosa toplote. Obravnavali bomo samo enodimenzionalen prenos toplote, ki nastane takrat, ko se temperatura spreminja le v eni koordinatni smeri. Ločimo še dvodimenzionalen in tridimenzionalen pretok toplote, ki pa za razumevanje izračunov v skladu s standardom *ISO 6946:2017* ni bistven. Hitrost prenosa toplote podajamo s toplotnim tokom (P), ki ga podajamo v vatih [W]. Merska enota za toplotni tok je [J/s] oziroma [W] in nam pove koliko toplote (dQ) se prenese v časovni enoti (dt):

$$P = dQ/dt. \quad (5)$$

Pri stacionarnem stanju teče skozi presek v danem časovnem intervalu (dt) vedno enaka množina toplote (dQ) in velja, da je toplotni tok konstanten, zato se enačba poenostavi:

$$P = Q/t. \quad (6)$$

Ločimo še gostoto toplotnega toka q , ki je definirana na enoto površine (dS), ki je pravokotna na smer toka (dP):

$$q = dP/dS, \quad (7)$$

nekateri avtorji gostoto toplotnega toka označujejo tudi s črko j . Podobno kot v zgornji enačbi upoštevamo konstanten toplotni tok ($dP=P$) skozi enakomeren presek ($dS=S$) in zapišemo:

$$q = P/S. \quad (8)$$

Enota za podajanje gostote toplotnega toka je [W/m²].

Ločimo tri različne mehanizme prenašanja toplote, in sicer:

1. prevod toplote (kondukcija), ki predstavlja prenos toplote skozi stično površino dveh teles oziroma v sami snovi brez mešanja in tokov;
2. prestop toplote (konvekcija), kjer gre za prenos toplote iz ali v tekočino/kapljevino ob mešanju makroskopskih delcev in je bistven predvsem na stičnih površinah trdnin in kapljev;
3. sevanje toplote (radiacija), ki je oddajanje elektromagnetnega valovanja v območju infrardeče, vidne in ultravijolične svetlobe.

Prehajanje toplote skozi konstrukcijski sklop v splošnem zajema vse tri mehanizme prenosa toplote. Vendar pa sta za izračun toplotne prehodnosti oziroma upornosti na nivoju konstrukcijskega sklopa bistvena le kondukcija in konvekcija, ki sta podrobneje predstavljena v nadaljevanju.

3.3.1 Prevajanje toplote (kondukcija)

Kot smo omenili, je za razumevanje prehajanja toplote skozi konstrukcijske sklope bistveno poznavanje prevajanja toplote in v robnih primerih tudi prestopa toplote. V trdninah je toplotna prevodnost najvišja, saj se toplota prenaša z vibracijami strukturnih mrež in v kovinah z gibanjem prostih elektronov s področij z višjo na mesta z nižjo temperaturo. Podobno se v plinih toplota prevaja zaradi trkov med molekulami in prenosom gibalne količine med njimi. Ker so te precej narazen, je toplotna prevodnost plinastih snovi majhna. Podobno je v kapljevinah, le da so razdalje med molekulami manjše in na prenos energije vplivajo tudi medmolekularne sile. Za razumevanje prevajanja toplote je bistven Fourier-ov zakon, ki velja za enodimenzionalen prevod toplote in vključuje tudi parameter λ [W/(mK)], imenovan tudi toplotna prevodnost. V Preglednici 2 so prikazani velikostni redi toplotnih prevodnosti za pline, kapljevine in trdnine.

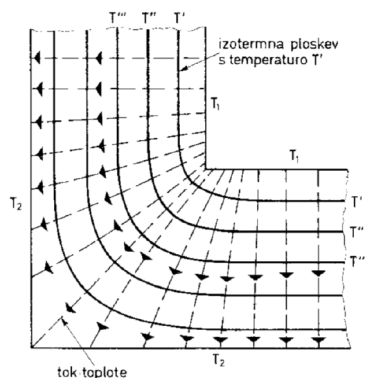
Preglednica 2: Velikostni red toplotnih prevodnosti λ [W/(mK)].[9]

Snov	Toplotna prevodnost - λ [W/(mK)]
PLINI	0,01 - 0,1
KAPLJEVINE	0,1 - 0,3
TRDNINE	~0,03 (izolacije) - 400 (baker)

Fourierov zakon, ki opiše gostoto toplotnega toka zapišemo kot:

$$q = -\lambda (dT/dx), \quad (9)$$

negativni predznak nam nakaže, da se toplotni tok vzpostavi v smeri padanja temperature. Gostoto pretečenega toplotnega toka izražamo v [W/m²] in je pravokoten na t. i. izotermne ploskve. Te povezujejo mesta v snovi z enako temperaturo v danem trenutku. Vzduž izotermne ploskve se temperatura ne spreminja. Slika 1 prikazuje potek izotermnih ploskev ter tok toplote v primeru vogala.



Slika 1: Prikaz izotermnih ploskev in toplotnega toka.[8]

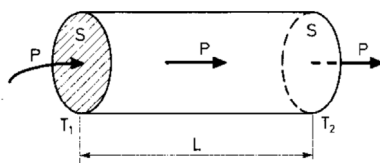
Če zapisan Fourier-ov zakon nekoliko preuredimo in upoštevamo stacionarno stanje, enodimenzionalen prenos toplote skozi enakomeren presek ($dS=S$) ter določimo robne pogoje T_1 in T_2 (predpostavimo linearni potek temperature skozi material ter $T_2 < T_1$), ki predstavljajo spremembo temperature na razdalji $dx=L$, lahko enačbo za gostoto toplotnega toka q [W/m²] skozi homogen material (debeline L) s toplotno prevodnostjo λ zapišemo tudi kot:

$$q = P/S = \lambda(T_1 - T_2)/L. \quad (10)$$

V kolikor upoštevamo še predpostavko, da je presek S konstanten, lahko zapišemo enačbo za toplotni tok P [W]:

$$P = \lambda S(T_1 - T_2)/L. \quad (11)$$

Za lažje razumevanje nam *Slika 2* prikazuje tudi grafični potek konstantnega toplotnega toka skozi homogen material s konstantnim presekom S .



Slika 2: Prehajanje toplotnega toka skozi homogen material z enakomernim presekom.[8]

3.3.2 Prestop toplote (konvekcija)

Za natančno določevanje toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov je potrebno upoštevati tudi točne robne pogoje. S tem mislimo na mejno plast, ki loči okoliški zrak od površine konstrukcijskega sklopa tako na notranji kot zunanji strani. Običajno ima konstrukcijski element (npr. stena) različno temperaturo (T_s) kot okoliški zrak (T_n , T_z) zaradi pojavov, ki nastopajo tik ob površini robnega elementa. S tem mislimo predvsem na konvekcijo toplote, sevanje, prenos latentne toplote (izparevanje, kondenzacija in zmrzovanje vodne pare) in vpadli solarni energijski tok.[9] Toplotni tok, ki teče skozi konstrukcijski element, prestopa s površine v okolico (zrak). Prestop toplote se izvrši v termični mejni plasti (debelino označimo s črko δ), ki označuje področje, kjer se površinska temperatura izravna z temperaturo v zraku. Gostoto toplotnega toka (q) [W/m^2], ki s stene prestopa v zrak, zapišemo z Newton-ovo enačbo v stacionarnem stanju:

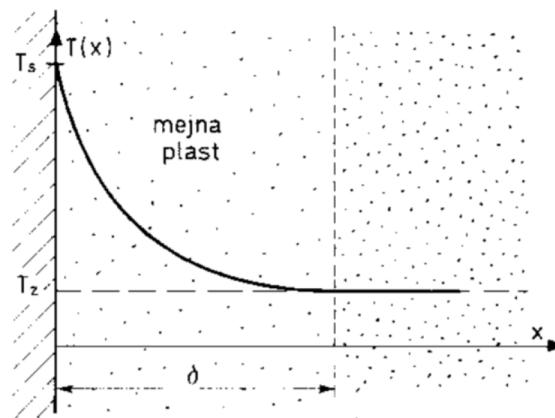
$$q = P/S = \alpha_{(i,e)} (T_s - T_{n,z}) \quad (12)$$

prestopni koeficient α [$W/(m^2K)$] je odvisen od termodinamičnih lastnosti trdnine (stene) in zraka ter od viskoznosti in hitrosti zraka ob steni. V splošnem tako ločimo sisteme v vodoravni in navpični oziroma poševni legi. Razlikovati je potrebno tudi med naravno konvekcijo toplote, ki nastane z gibanjem zraka zaradi razlik v temperaturi in posledično v gostoti okoliškega zraka ter med vsiljeno konvekcijo toplote, ki nastopi zaradi zunanjih vplivov (npr. ventilatorjev). Za potrebe diplomske naloge bomo privzeli poenostavitev in upoštevali le naravno konvekcijo. Vrednosti prestopnih koeficientov nam prikazuje *Preglednica 3* in označujejo parameter, ki ga potrebujemo za izračun toplotne upornosti mejne plasti, ki jo shematsko prikazuje *Slika 3*. Izračun bo predstavljen v nadaljevanju.

Preglednica 3: Koeficienti prestopa toplote α [$W/(m^2K)$].[10]

Obravnavan primer		Koeficient prestopa toplote $\alpha_{(i,e)}$ [$W/(m^2K)$]
1	Prestop toplote iz notranjih površin - α_i	
	- na zidove, tla, strop, in notranje steklene površine*	6, 8, 10
	- na zunanje steklene površine	12
2	Prestop toplote iz zunanjih površin - α_e	
	- na okoliški zrak	23

*OP.: Nekateri avtorji dodatno ločijo med prehajanjem toplote v horizontalni in vertikalni smeri. Tako upoštevajo prestopni koeficient $6 W/(m^2K)$ za prehajanje toplote od zgoraj navzdol za strop in tla, prestopni koeficient $8 W/(m^2K)$ za prehajanje toplote v horizontalni smeri za stene in prestopni koeficient $10 W/(m^2K)$ za prehajanje toplote od spodaj navzgor za strop in tla.[10]



Slika 3: Shematski prikaz mejne plasti in poteka temperature.[8]

3.4 Toplotna upornost in koeficient toplotne prehodnosti za večslojni konstrukcijski sklop

V poglavju 3.1. smo spoznali osnovne lastnosti prenosa toplote. Prehajanje toplote skozi konstrukcijski sklop poteka na podlagi že obravnavanih mehanizmov prevajanja in prestopa toplote. Razumeti pa je potrebno še pojma toplotna upornost oziroma toplotni upor in toplotna prehodnost.

3.4.1 Toplotni upor

Toplotna upornost (R_j) homogenega sloja snovi, skozi katerega se vzpostavi toplotni tok pravokotno na površino sloja, je definirana kot:

$$R_j = L_j / \lambda_j \quad (13)$$

in je L_j [m] debelina sloja λ_j [W/(mK)] pa koeficient toplotne prevodnosti snovi. Toplotno upornost snovi izražamo v [(m²K)/W].

Pri izračunu skupnega toplotnega upora (R_{tot}) [(m²K)/W] več sestavljenih homogenih materialov z različnimi lastnostmi (λ_j, L_j) velja, da toplotne upore posameznih plasti (R_j) medsebojno seštevamo. Toplotne upore (R_j) lahko obravnavamo tudi kot zaporedno vezane upornike. Pri tem pa je potrebno upoštevati tudi toplotno upornost mejnih plasti. Toplotni upor mejnih plasti ($R_{s(i,e)}$) je odvisen od prestopnega koeficienta (α), ki smo ga že obravnavali. Velja, da večji prestopni koeficient zagotavlja manjšo temperaturno razliko med temperaturo snovi (T_j) in temperaturo okoliškega zraka (T_n, T_z). Toplotni upor zaradi prestopa toplote v mejni zračni je enak:

$$R_{s(i,e)} = 1/\alpha_{(i,e)}. \quad (14)$$

Z oznako R_{si} [(m²K)/W] označujemo toplotno upornost prestopa toplote na notranji strani in z R_{se} [(m²K)/W] toplotno upornost prestopa toplote na zunanji strani. Vrednosti so tabelarično prikazane v poglavju 4.1. kot sestavni del standarda *ISO 6946:2017*.

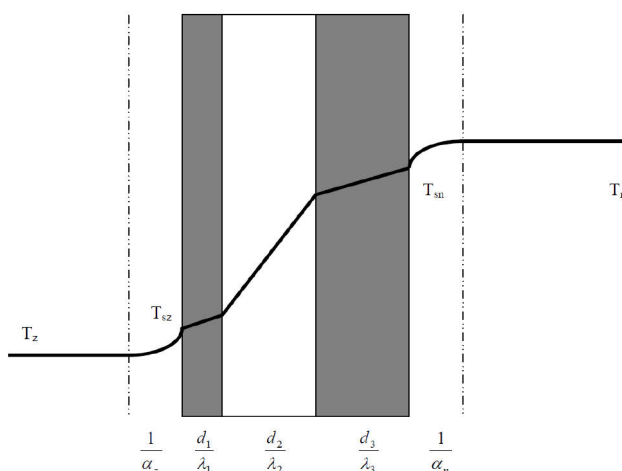
Enačbo za izračun skupne toplotne upornosti (R_{tot}) [$(m^2K)/W$] večslojnega konstrukcijskega sklopa bi z upoštevanjem zgoraj navedenih enačb lahko zapisali:

$$R_{tot} = R_{si} + \sum R_j + R_{se} \quad (15)$$

in je z upoštevanjem enačbe (16):

$$R_{tot} = 1/\alpha_i + \sum (L_j/\lambda_j) + 1/\alpha_e. \quad (16)$$

Grafični prikaz poteka temperaturne linije skozi večslojni konstrukcijski sklop lahko vidimo na spodnji Sliki 4. Prikazano je stacionarno stanje in upoštevan je enodimenzionalen toplotni tok skozi prerez.



Slika 4: Prikaz poteka temperaturne linije skozi večslojni konstrukcijski sklop.[10]

3.4.2 Toplotna prehodnost

Medtem ko smo že opisali pojem toplotne prevodnosti (λ) in predstavlja lastnost materiala, je za podajanje vrednosti o skupni toplotni upornosti elementov v konstrukcijskem sklopu primernejša oznaka toplotna prehodnost, ki jo označujemo s črko U . Nekateri avtorji navajajo tudi oznako koeficient toplotne prehodnosti. Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa tako označuje toplotni tok, ki preteče skozi vse sloje sklopa oziroma stavbnega ovoja v pravokotni smeri na robni ploskvi in vključuje prevajanje, konvekcijo in radiacijo toplote, slednjo v večini računskih primerov zanemarimo. Iz definicije izhaja, da je celotna toplotna prehodnost U [$W/(m^2K)$] enaka recipročni vrednosti celotnega toplotnega upora R_{tot} za obravnavan konstrukcijski sistem [9], zato lahko zapišemo:

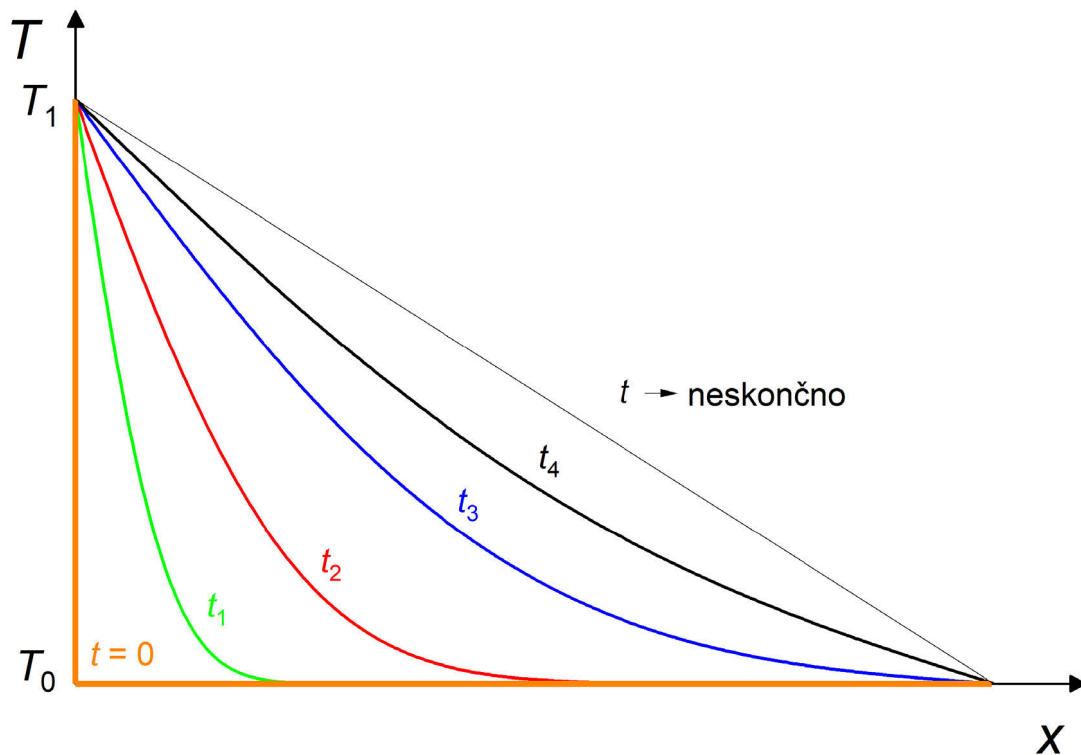
$$U = 1/R_{tot}, \quad (17)$$

pri čemer upoštevamo celotni upor toplotnega toka, vključno z mejnimi plastmi.

3.5 Nestacionarno toplotno stanje

Omenili smo že, da je za preprosto računsko določanje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov dovolj poznavanje stacionarnega stanja prehajanja toplotnega toka. Toplotni tok je v tem primeru konstanten, prav tako se robna pogoja, ki ju predstavljata notranja in zunanja temperatura zraka (T_n , T_z) ter notranja in zunanja površinska temperatura elementa (npr. T_1 , T_2), ne spreminjata. Snovni parameter, ki določa toplotno prehodnost, je tako le toplotna prevodnost materialov. Razumeti pa je potrebno, da so pogoji prehajanja toplote v dejanskih konstrukcijskih sklopih vse prej kot stacionarni. Govorimo o nestacionarni porazdelitvi temperature $T=T(t)$, saj se le-ta spreminja s časom.

Za ponazoritev lahko vzamemo enoslojen zid, ki ga vidimo na *Sliki 5*. V času $t=0$ je stanje v zidu stacionarno, velja temperaturno ravnovesje. Ko temperatura na drugi strani (T_1) hipoma naraste in ostane konstantna, se skozi zid začne teči toplotni tok. Temperatura v materialu prične naraščati, toplotni tok v zidu je največji na strani s temperaturo T_1 in se zmanjšuje proti nasprotni strani. V času $t=\infty$ se pri stalni temperaturi T_1 vzpostavi konstanten toplotni tok in krajevni potek temperature linije skozi konstrukcijski sklop je linearen.[8]



Slika 5: Prikaz temperaturne linije pri hipni spremembi temperature. [Jagličić Z., 2020]

Pojem, ki opiše obnašanje konstrukcijskih sklopov, imenujemo toplotna stabilnost. Z njim povezujemo predvsem količine, kot so toplotna kapaciteta, termična difuzivnost, toplotna zakasnitev in dušenje temperature. Nezanemarljive vplive pa predstavlja tudi absorbirana količina vlage v konstrukcijskem sklopu in njegova zrakotesnost. Ključna termodinamična parametra pri nestacionarnem obravnavanju prenosa toplote sta tako gostota in specifična toplota snovi.[11] Upoštevati pa je potrebno tudi absorbirano količino vlage v konstrukcijskem sklopu.

Pojem toplotna kapaciteta je bil podrobno predstavljen v 3.2 poglavju. Večja kot je toplotna kapaciteta snovi, več toplote je potrebne, da se izvrši sprememba v temperaturi snovi. Termična (toplotna) difuzivnost snovi, ki jo označujemo s črko a , nam pove, kako hitro se časovno napredovanje prenosa toplote po materialu spreminja s časom in jo merimo v $[m^2/s]$ oziroma $[m^2/h]$. Izražena je kot količnik toplotne prevodnosti materiala (λ) in produkta gostote (ρ) in specifične toplote (c) materiala:

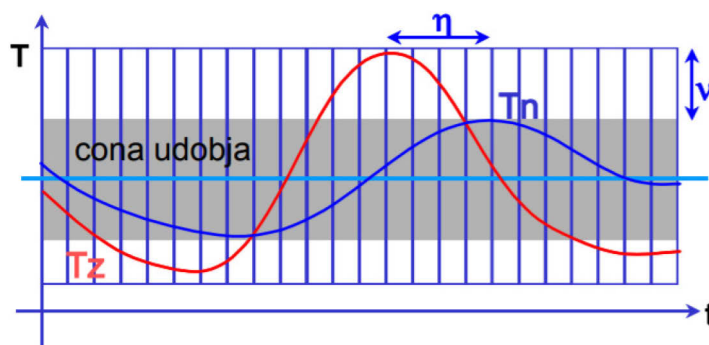
$$a = \lambda / \rho c. \quad (18)$$

Enačba nam pove, da je termična difuzivnost sorazmerna s toplotno prevodnostjo in obratno sorazmerna s toplotno kapaciteto. Pri snovi z visoko toplotno prevodnostjo je prenos toplote skozi snov hitrejši, zato se snovi z večjo termično difuzivnostjo pogosto tudi na račun nižje toplotne kapacitete hitreje odzivajo na spremembo temperature in se prav tako same hitreje ogrejejo ter ohladijo. V *Preglednici 4* so prikazane nekatere vrednosti termične difuzivnosti s podano gostoto, vrednostjo toplotne prevodnosti in specifično toplotno snovi.

Preglednica 4: Približne vrednosti termične difuzivnosti a [m²/s] nekaterih trdnin pri sobni temperaturi (20 °C).[9]

Snov	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	c_p [kJ/(kgK)]	a [10 ⁻⁶ m ² /s]
Baker	8939	385	0,383	112,6
Aluminij	2700	209	0,896	86,4
Železo	7860	59	0,452	16,6
Opeka	800-2000	0,279-1,233	0,837	0,4-0,7
Steklena volna	50-400	0,037-0,055	0,837	0,1-0,9

Za razumevanje toplotnega ugodja uporabnika stavb sta pomembna tudi pojma dušenje temperature in toplotna zakasnitev. Toplotna zakasnitev η [h] ali fazni zamik označuje zakasnitev amplitud temperaturnega nihanja v notranjosti prostorov zaradi amplitud zunanjih temperatur. Podobno tudi temperaturno dušenje, ki ga nekateri avtorji označujejo kot faktor dušenja v [-] in je brezdimenzijska količina, predstavlja količnik oziroma razmerje med amplitudo temperaturnega nihanja zunanjega zraka in oslajeno amplitudo notranje površine konstrukcijskega sklopa, določevanje pa je mogoče z izkustvenimi formulami.[11] Slika 6 grafično prikazuje faktor temperaturnega dušenja in toplotno zakasnitev.



Slika 6: Prikaz faktorja dušenja v [-] in faznega zamika η [h].[13]

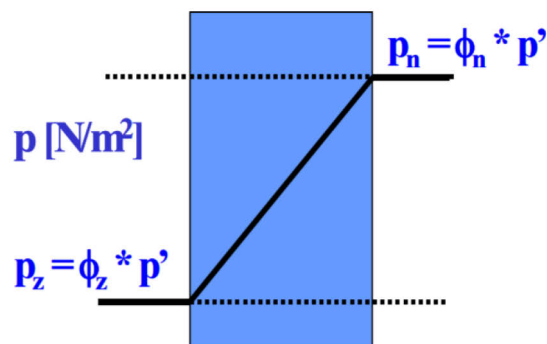
3.6 Vpliv vlage na konstrukcijske sklope

Pomemben dejavnik, ki vpliva na dejansko termično obnašanje materialov, je vlaga. Poleg zmanjšanja toplotne prehodnosti in s tem nižje porabe energije, mora primeren toplotni ovoj stavbe preprečiti oziroma zmanjšati pojav kondenzacijske vlage na površini in v notranjosti konstrukcijskih sklopov. Poleg vidnih težav zaradi nasičevanja konstrukcijskih elementov z vlago, kot so plesni in lišaji, obstaja velika verjetnost propadanja elementov zaradi neizsuševanja absorbirane vlage v notranjosti. Navlaževanje odprto-celičnih in vpojnih izolacijskih materialov pa pomeni tudi slabše izolacijske sposobnosti materialov in s tem povečano toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa. Prehajanje vlage, ki ga strokovno imenujemo difuzija vodne pare, je sicer fizikalen pojav in je odvisen od razlike parcialnih tlakov vodne pare na obeh straneh konstrukcijskega sklopa oziroma elementa. Vodna para tako prehaja iz plasti z večjo nasičenostjo k plastem z manjšo nasičenostjo. Pogosto difuzni in toplotni tok potekata v isti smeri. To je v smeri padanja temperature, s tem pa lahko difuzni tok doseže točko rosišča in povzroči nastanek kondenza, kar je pogosto stanje v hladnejšem zimskem obdobju.[12] Ločimo absolutno vlažnost zraka, ki je izražena kot masa vodne pare na enoto volumna zraka z enotami [kg/m³]. Pomembna termina sta še nasičeni tlak vodne pare (p') ter delni (parcialni) tlak vodne pare (p). Nasičeni tlak vodne pare je največji delni tlak vodne pare v zraku in močno narašča s

temperaturo. Delni (parcialni) tlak vodne pare pa definira trenutno količino vlage v zraku. Razmerje med delnim in nasičenim parnim tlakom predstavlja relativna vlažnost (Φ), ki je izražena v odstotkih [%].

$$\Phi = p/p'. \quad (19)$$

Za potrebe izračunov definiramo notranji parcialni tlak (p_n) in zunanji parcialni tlak (p_z). Grafični prikaz poteka parnega toka oziroma difuzije vodne pare je prikazan na *Sliki 7*.



Slika 7: Prikaz poteka difuzije vodne pare oziroma parnega toka.[12]

Količine, ki so pomembne za razumevanje prehajanja parnega toka skozi konstrukcijski sklop so še difuzijska prepustnost materiala za vodno paro (δ) in difuzijska upornost materiala vodni pari (μ) ter S_d vrednost.

Difuzijska prepustnost materiala (δ) predstavlja količino vodne pare, ki v enoti časa preide enoto debeline materiala pri tlačni razliki 1 Pa. Izražamo jo v $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{hPa})]$. Njej obratno sorazmerna količina je difuzijska upornost materiala (μ). Imenujemo jo tudi koeficient paroprepustnosti ali koeficient prehoda vodne pare. Izražamo jo kot razmerje med uporom proti prehodu vodne pare po zraku in uporom paroprepustnosti obravnavane snovi in je brezdimenzijska količina [-]. Vrednost S_d [m] predstavlja zmnožek koeficienta paroprepustnosti (μ) in debeline obravnavanega elementa ter jo merimo v metrih. Snovi z nizko S_d vrednostjo, ki se uporabljajo v konstrukcijskih sklopih, so paroprepustne folije in ostali porozni materiali. Nasprotno imajo visoko S_d vrednost hidroizolacijski materiali (bitumen, bitumenski trakovi, kovinske folije ter steklo). Iz zapisanega sledi, da je potrebno posebno skrb nameniti načrtovanju konstrukcijskih sklopov in s tem zagotavljanju trajnosti konstrukcij. To je zapisano tudi v 9. členu *Pravilnika o učinkoviti rabi energije*, ki zahteva zagotovitev takšne sestave gradbenih konstrukcij, da ne prihaja do poškodb ali drugih škodljivih vplivov zaradi difuzijskega prehoda vodne pare. S tem mislimo predvsem na nastanek kondenza na površini ali v notranjosti konstrukcijskega sklopa, če parcialni tlak vodne pare doseže vrednosti nasičenega tlaka vodne pare. V kolikor pride do točke rosišča ($p = p'$) v konstrukcijskem sklopu med sloji (v ravnini) ali v plasti, je potrebno zagotoviti, da količina vlage ne presega mejnih vrednosti in je omogočeno učinkovito in popolno izsuševanje (npr. v poletnem obdobju izsuševanja sklopa je računska vrednost 60 dni). V tem primeru je nujna tudi namestitvev parne ovire kot elementa konstrukcijskega sklopa, in sicer na stran z višjo temperaturo pred računsko (dejansko) točko rosišča. Nekatere vrednosti koeficientov paroprepustnosti in S_d vrednosti za najpogostejše uporabljene gradbene materiale so predstavljene v *Preglednici 5*.

Preglednica 5: Vrednosti koeficientov paroprepustnosti in S_d vrednosti pogosto uporabljenih gradbenih materialov.[11]

Material	Koeficient paroprepustnosti μ [-]	S_d vrednosti [m] za običajne gotove gradbene materiale
Zrak	1	/
Paroprepustne folije	/	< 0,5
Mineralne volne	1–1,6	*
Opeka (mrežasta, polna)	4–12	*
Penjeni beton	4–9	*
Ekspandiran polistiren EPS	6–45	*
Mavčne plošče	8–12	*
Malte (apnene, cementne)	10–40	*
Beton	15–90	*
Les (smreka, hrast)	40–70	*
Ekstrudiran polistiren XPS	80–200	*
Bitumen (lepenka, trakovi)	1.200–20.000	3–100
Okenško steklo	10.000	300–400
PVC folije	10.000–42.000	2–10
Polimermodificirani bitumenski trakovi	40.000–60.000	100–250
Bitumenski trakovi z vložkom kovinskih folij	200.000–400.000	1.500
Kovinske folije	> 600.000	> 100

***OP.:** S_d vrednost izračunamo po enačbi $S_d = \mu \cdot d$ kjer je d debelina materiala

Opisane količine so torej bistvene za razumevanje odziva konstrukcijskih sklopov v časovno odvisnem modelu. Takrat temperature nihajo, s tem mislimo tako temperature zraka kot temperature površin zaradi že omenjenih dejavnikov, kot so konvekcija in različni energijski tokovi (sevanje, radiacija sonca ipd.). Prav tako gostota toplotnega toka, ki teče skozi konstrukcijski sklop, ni konstantna. Sklepamo lahko, da so stacionarni izračuni toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov velika poenostavitev dejanskega stanja, zato posledično dinamičnega odziva elementov iz vrednosti toplotne prehodnosti, dobljenih pri časovno neodvisnem modelu, ni mogoče ovrednotiti. Za določevanje realnega temperaturnega odziva konstrukcijskih sklopov so zato primernejši dinamični matematični modeli ali eksperimentalne meritve.

4 METODE IN ORODJA

Za določitev vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov smo uporabili računsko metodo po standardu ISO 6946:2017 [13] ter izmerili vrednosti toplotnega toka in določili koeficient toplotne prehodnosti po metodi ISO 9869-1:2014 [14]. Za ponazoritev smo konstrukcijske sklope modelirali še v prosto dostopnem računalniškem programu *UBAKUS* [15].

4.1 Izračun toplotne prehodnosti po standardu ISO 6946:2017

Izračun vrednosti toplotne prehodnosti po standardu *ISO 6946:2017* [13] temelji na določevanju toplotne upornosti (R_j) posameznih homogenih slojev, ki konstrukcijski sklop sestavljajo. Izračunane vrednosti nato seštejemo po principu zaporedne vezave uporov in določimo toplotno upornost celotnega konstrukcijskega sklopa. Koeficient toplotne prehodnosti (U) je obratno sorazmeren z vrednostjo toplotne upornosti (R).

Podrobno smo pojem toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa (R_{tot}) predstavili v poglavju 3.4.1, zato so spodaj podane samo bistvene enačbe in podatki za njeno določevanje po standardu. Toplotna upornost R_j [(m²K)/W] homogenega j-tega sloja v konstrukcijskem sklopu je podana z enačbo:

$$R_j = d_j / \lambda_j, \quad (20)$$

in vrednost d [m] predstavlja debelino, λ [W/(mK)] pa toplotno prevodnost snovi, ki sloj sestavlja. Vrednosti toplotne prevodnosti materiala smo za potrebe izračuna pridobili iz tehnične smernice *TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije*. Dodatno so v standardu podane tudi vrednosti toplotne upornosti R_{si} [(m²K)/W] za notranjo mejno plast in so določene skladno z že omenjenimi koeficienti prestopa toplote α_i [W/(m²K)]. Vrednosti so tabelarično prikazane spodaj v *Preglednici 6*. Za točen izračun je potrebno upoštevati tudi prestop toplote z zunanje površine konstrukcijskega sklopa v zrak in določiti toplotno upornost (R_{se}). Za izračune toplotne prehodnosti (U) smo upoštevali vrednost toplotne upornosti zunanje zračne plasti $R_{se} = 0,04$ [(m²K)/W] za horizontalno in vertikalno (navzgor) prehajanje toplotnega toka.

Preglednica 6: Vrednosti toplotnega upora pri prestopu toplote v odvisnosti od smeri toplotnega toka.[13]

Toplotna upornost mejne plasti	Smer toplotnega toka		
	NAVZGOR	HORIZONTALNO	NAVZDOL
R_{si} [(m ² K)/W]	0,10	0,13	0,17

Pomembno je, da v izračunu poleg toplotne prestopnosti pravilno upoštevamo tudi toplotno upornost zračnih plasti, ki so ponekod sestavni del konstrukcijskega sklopa oziroma toplotnega ovoja. Skladno s standardom ločimo prezračevane in neprezračevane zračne plasti (R_{tr}) [(m²K)/W]. V neprezračevanih zračnih slojih konvekcija ni prisotna. Nasprotno je skozi prezračevane plasti omogočen tok zraka, ki poteka v smeri pravokotno na smer toplotnega toka, mehanizmi prenosa toplote v takem sloju pa so odvisni od termodinamičnih lastnosti. Pojav je podoben problemu pri prestopnosti toplote v mejni zračni plasti. Ker so tudi obravnavani konstrukcijski sklopi strešnih konstrukcij vsebovali zračne sloje, je vrednost toplotne upornosti prikazana v *Preglednici 7*. Standard podaja zahteve, da neprezračevana zračna plast ni širša od 300 mm in je omejena z dvema vzporednima površinama, ki sta pravokotni na smer toplotnega toka. Izmenjava zraka z notranjim in zunanjim zrakom je preprečena, oziroma je prisotna v zanemarljivih vrednostih.

Preglednica 7: Vrednosti toplotne upornosti zračne plasti debeline 50–300 mm v primeru neprezračevanega zračnega sloja.[10,13]

Debelina zračne plasti [mm]	Toplotna upornost zračne plasti R_{zr} [(m ² K)/W] glede na smer toplotnega toka		
	navzgor	horizontalno	navzdol
50–300	0,16	0,18	0,23

V Preglednici 7 so prikazane vrednosti, ki jih za neprezračevano plast zraka podaja standard *ISO 6946:2017*. V standardu so definirane tudi slabo prezračevane in dobro prezračevane plasti v primeru naravne konvekcije. Za primer slabo prezračevane zračne plasti standard zahteva uporabo polovičnih vrednosti toplotnih upornosti, ki so podane za neprezračevane zračne plasti, v odvisnosti od debeline sloja, vendar ne večje kot 0,15 (m²K)/W. Slabo prezračevane plasti omogočajo delno izmenjavo zraka z okolico, vendar so te vrednosti majhne, saj so odprtine horizontalnih zračnih plasti velike med 500 mm²/m² in 1500 mm²/m². V primeru dobro prezračevanega zračnega sloja je izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa izveden brez upoštevanja takega sloja. Posledično upoštevamo le sloje v konstrukcijskem sklopu do prezračevane plasti v smeri toplotnega toka.[13] Za izračun toplotne prehodnosti U [W/(m²K)] upoštevamo enačbo:

$$U = 1/R_{tot} \quad (21)$$

in je R_{tot} [(m²K)/W] skupna toplotna upornost homogenih slojev z upoštevanjem toplotne upornosti mejne plasti pri prestopu toplote (R_{si} , R_{se}) na stiku površine elementov z zunanjim in notranjim zrakom. Skupno toplotno upornost določimo z enačbo:

$$R_{tot} = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} = R_{si} + \sum R_j + R_{se}, \quad (22)$$

kjer je $\sum R_j$ vsota toplotnih upornosti j -tih homogenih plasti v konstrukcijskem sklopu.

4.2 In-situ meritve toplotne prehodnosti po standardu *ISO 9869-1:2014*

Da bi lahko primerjali izračunane vrednosti toplotne prehodnosti z izmerjenimi, smo morali opraviti *in-situ* meritve toplotnega toka. Meritve dejanskega toplotnega toka (q) [W/m²] smo opravili skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* [14]. Določevanje toplotne prehodnosti (U) je sicer mogoče z merjenjem gostote toplotnega toka (q) [W/m²] pri konstantnih robnih pogojih (T_n , T_z), vendar je na objektu tako stanje nemogoče doseči. Obstajajo primeri, ko je možno konstantne robne pogoje in s tem stalen toplotni tok doseči po principu hladne in tople škatle. Tak način merjenja je primeren za določevanje koeficientov toplotne prevodnosti v laboratoriju. Na realnem objektu oziroma konstrukcijskem sklopu je primernejša metoda, ko opravimo večje število odčitkov vrednosti gostote toplotnega toka in temperatur (T_n , T_z) v daljšem časovnem obdobju in na podlagi dobljenih vrednosti določimo srednjo vrednost toplotne prehodnosti. Metoda je primerna za objekte, kjer se materialom, kljub temperaturnim nihanjem termodinamične lastnosti ne spreminjajo in ostanejo vrednosti toplotne prevodnosti konstantne. Tretja metoda je uporaba dinamične teorije, ki upošteva nihanja toplotnega toka in temperatur v zajetih podatkih in prikaže realnejše vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov.[14] Najprimernejša metoda za vrednotenje izvedenih meritev glede na potrebe diplomskega dela je ocena toplotne prehodnosti s povprečno metodo, ki bo podrobneje predstavljena v nadaljevanju.

4.2.1 Oprema za opravljanje meritev toplotnega toka

Izvajanje meritev toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov zahteva uporabo merilnika toplotnega toka, temperaturnih senzorjev in shranjevalnika podatkov. Meritve smo opravljali s kompatibilnim kompletom merilnikov, senzorjev temperature ter merilne naprave in zapisovalca podatkov proizvajalca Ahlborn.

Merilnike toplotnega toka *ALMEMO® Heat Flow Plate FQAx tip 118*, dimenzij 120x120x1,5 mm, prikazane na *Sliki 8*, so predstavljale tanke kompozitne plošče (kovinski členi in sredica iz epoksidnih smol) z majhno toplotno upornostjo in integriranimi temperaturnimi senzorji. Merilniki delujejo po principu pretvarjanja merjenih temperaturnih razlik v električni impulz, ki je enoznačno pretvorjen v gostoto toplotnega toka skozi merilno ploščo. Merilno temperaturno območje takega senzorja se giblje med - 40 °C in 80 °C z ocenjeno 5 % natančnostjo pri 23 °C.[16] Posebno pozornost pa je potrebno nameniti smiselni postavitvi merilnikov na mesta brez vpliva grelnih ali hladilnih teles ter naprav, ki povzročajo gibanje zraka ter tako zagotoviti točnost meritev konstrukcijskih sklopov. Smiselna je uporaba IR-termografske kamere za določevanje mehanskih in termičnih nepravilnosti v konstrukcijskih sklopih kot so toplotni mostovi, izrazita nehomogenost materialov, razpoke, podometne inštalacije in podobno, ker le-to vpliva na točnost merjenih vrednosti.



Slika 8: Merilec toplotnega toka ALMEMO Heat Flow Plate FQAx tip 118.[lastni vir, 2019]

Za sprotno beleženje temperature okoliškega zraka tako na notranji kot zunanji strani konstrukcijskega sklopa smo uporabili temperaturne senzorje oziroma termočlene *ALMEMO® NiCr-Ni thermowire T190*, z območjem delovanja med -25 °C do +400 °C. Sestavljata ga dve kovinski žici premera 0,5 mm v ovoju iz steklenih vlaken.[17] Notranji temperaturni senzor je nameščen v bližini merilne plošče gostote toplotnega toka, pogosto kar pod ali nad samo ploščo. Zunanji temperaturni senzor pa se nahaja na nasprotni strani konstrukcijskega sklopa v neposredni bližini mesta, na katerem merimo toplotno prehodnost. Temperaturna senzorja sta tako kot merilec toplotnega toka preko adapterja povezana v merilno napravo, ki je obenem tudi shranjevalnik podatkov, imenovan tudi *data logger*. Uporabili smo merilno napravo *ALMEMO® 2690-8A*, ki je prikazana na *Sliki 9* in omogoča priklop petih senzorjev ali merilcev ter ima integriran senzor zračnega tlaka, ki omogoča avtomatsko korigiranje vrednosti. Naprava beleži električne impulze merilnih senzorjev (temperaturni senzorji, senzorji vlage, IR-senzorji, idr.) in jih pretvarja v zahtevane vrednosti (od 10 do 100 merilnih operacij v eni sekundi), kot so temperatura ter gostota toplotnega toka. Dodatno taka naprava beleži odčitane vrednosti v določenih časovnih intervalih in jih shranjuje. Ker je spominsko mesto za shranjevanje podatkov takega aparata razmeroma veliko (cca. 200.000 izmerjenih vrednosti), je mogoče tudi dolgotrajnejše beleženje podatkov in s tem večja natančnost merjenih vrednosti. Glavna prednost merilne naprave je večji zaslon, ki omogoča sprotno spremljanje in preverjanje zbranih podatkov, tudi v obliki linijskih grafiknov.[18]



Slika 9: ALMEMO® NiCr-Ni termočlen (levo) in merilnik ALMEMO® 2690-8A (desno). [17,18]

4.2.2 Vrednotenje merjenih vrednosti in toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa

V standardu *ISO 9869-1:2014* je določeno najkrajše trajanje testa. Omejeno je na 72 ur ob pogoju, da so temperaturna (T_z , T_n) nihanja majhna. Smiselno je odčitavanje merjenih vrednosti ob nespremenljivem časovnem intervalu in zapis vrednosti v shranjevalnik podatkov. Slednje nam omogoča kasnejšo obdelavo vrednosti z računalniškimi programi (npr. *Excel*). Za analizo izmerjenih vrednosti in izračun toplotne prehodnosti elementa ali konstrukcijskih sklopov skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* sta primerni tako imenovana *povprečna metoda* in *dinamična metoda*. [14] Določevanje toplotne prehodnosti oziroma toplotne upornosti z dinamično metodo je bolj sofisticirano in omogoča določitev točnejših rezultatov v krajšem trajanju meritev. Zaradi upoštevanja toplotne stabilnosti elementov oziroma nestacionarne temperaturne porazdelitve v obravnavanem konstrukcijskem sklopu so zahtevane številne korekcije rezultatov. Ker pa so tudi vrednosti, izračunane s povprečno metodo za potrebe diplomskega dela dovolj natančne in sta analiza ter postopek izračuna enostavnejša, smo zbrane vrednosti analizirali s povprečno metodo.

4.2.3 Izračun toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa s povprečno metodo

Standard *ISO 9869-1:2014* predvideva izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa tako, da iz odčitanih merjenih vrednosti izračunamo srednjo vrednost gostote pretečenega toplotnega toka (q) skozi obravnavan element ali konstrukcijski sklop in jo delimo s srednjo vrednostjo temperaturne razlike (T_n, T_z). Vrednosti bodo dovolj blizu dejanski toplotni prehodnosti ob upoštevanju predpostavk, da je test zajemal dovolj dolgo časovno obdobje, termodinamične lastnosti konstrukcijskega sklopa pa se niso bistveno spreminjale. Ocenjena vrednost toplotne prehodnosti (U) [$W/(m^2K)$] elementa ali konstrukcijskega sklopa za j -to število meritev se tako določi po enačbi:

$$U = \Sigma q_j / \Sigma (T_{nj} - T_{zj}), \quad (23)$$

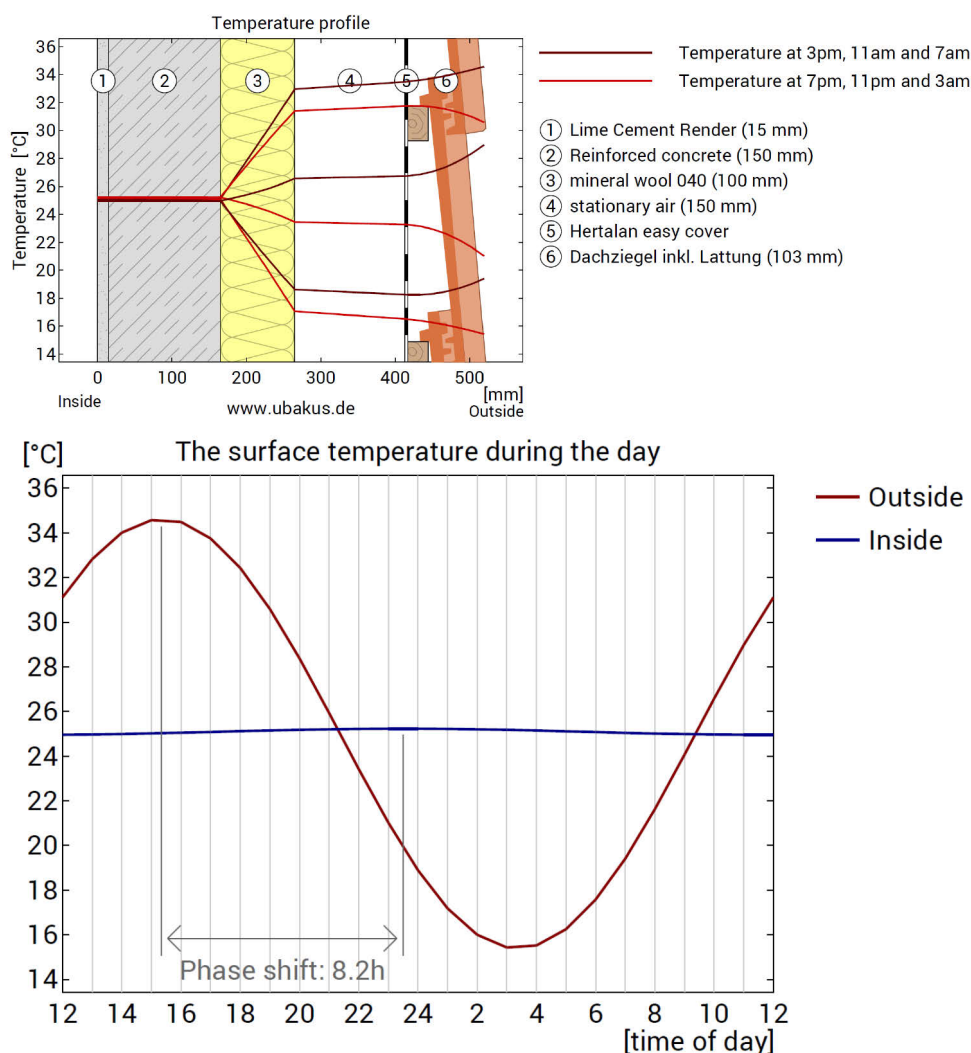
in je gostota pretečenega toplotnega toka (q) [W/m^2] izražena na enoto površine, temperaturno razliko [$^{\circ}C$] pa izračunamo kot razliko notranje temperature okolice (T_n) in zunanje temperature okolice (T_z).

V kolikor opravimo izračun ocene toplotne prehodnosti po vsakem intervalu odčitavanja in vrednosti prikažemo grafično, se le-te približujejo asimptotični vrednosti, ki predstavlja dejansko toplotno prehodnost (U) konstrukcijskega sklopa ali obravnavanega elementa.

4.3 Računalniški program *UBAKUS*

Za dodatno ponazoritev in primerjavo rezultatov smo obravnavane konstrukcijske sklope modelirali tudi v prosto dostopnem računalniškem programu. Spletna stran *ubakus.de* [15] nam ponudi preprost vmesnik za izračun toplotnih prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Vsebuje knjižnico prednastavljenih elementov z materialnimi in termodinamičnimi karakteristikami, med katere lahko uvrstimo tudi nove sloje, ki so prilagojeni našim konstrukcijskim elementom. Modeliranje je razmeroma preprosto, saj sloje zgolj dodajamo v pravilnem zaporedju in upoštevamo dejanske karakteristike. V nadaljevanju določimo robne pogoje (relativno vlažnost zraka ter notranjo in zunanjo temperaturo). Ker so elementi in račun modelirani po standardu *DIN 6946* [15], ki je v ključnih točkah enak standardu *ISO 6946:2017*, po katerem smo toplotno prehodnost konstrukcijskih elementov računali tudi mi, se vrednosti bistveno ne razlikujejo.

Program omogoča tudi analizo in prikaz temperaturne stabilnosti obravnavanih konstrukcijskih elementov. Tako je mogoče določiti fazni zamik in amplitudo nihanja notranje temperature v skladu s spreminjajočimi zunanji pogoji. *Slika 10* prikazuje primer analize strešnega konstrukcijskega sklopa. Prva slika prikazuje temperaturni razpored skozi konstrukcijski sklop, na drugi pa je prikazan primer faznega zamika pri temperaturnem nihanju.



Slika 10: Shematski prikaz temperaturnega poteka skozi konstrukcijski sklop (zgoraj) in primer prikaza faznega zamika za obravnavan konstrukcijski sklop (spodaj). [lastni vir, 2019]

5 PREGLED OBRAVNAVANIH OBJEKTOV IN KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV

Za potrebe diplomskega dela smo analizirali šest (6) konstrukcijskih sklopov na dveh izbranih objektih. Preverili smo štiri (4) masivne eksoskeletne konstrukcijske sklope (armiranobetonska plošča, modularni opečnati zidaki), ter dva (2) endoskeletna strešna konstrukcijska sklopa. Podrobno so konstrukcijski sklopi prikazani v naslednjih poglavjih.

5.1 Izbrana objekta

Izbrana objekta sta predstavljali enodružinski hiši, ki jih za lažje razumevanje označimo s *Hiša 1* in *Hiša 2* ter poglobljene karakteristike objektov predstavimo v *Preglednici 8*. Geolokacije in orto-foto posnetka obeh objektov sta pridobljena iz prostodostopnega javnega prostorskega informacijskega sistema (PISO).[19]

Preglednica 8: Glavne karakteristike in prikaz lege obravnavanih objektov *Hiša 1* in *Hiša 2*. [20]

	Objekt	<i>Hiša 1</i>
	Kraj	Velika Loka, Grosuplje
	Leto izgradnje	2005
	Nadmorska višina	331,5m
	Orientacija objekta	SZ-JV
	Geolokacija (D 48/ GK)	y = 478905.3 x = 88194.3
	Opis	Hiša leži v večji kotlini, ki je podaljšek kraškega polja, v gručastem naselju
	Konstrukcijski sklopi	KS 1, KS 2, KS 3
	Objekt	<i>Hiša 2</i>
	Kraj	Čušperk, Grosuplje
	Leto izgradnje	2016
	Nadmorska višina	401,9m
	Orientacija objekta	SZ-JV
	Geolokacija (D 48/ GK)	y = 476859.1 x = 83194.6
	Opis	Hiša leži na pobočju, ki se v JZ smeri nadaljuje v višjo vzpetino, v razmeroma redko poseljenem naselju
	Konstrukcijski sklopi	KS 4, KS 5, KS 6

Izbrana objekta lahko uvrstimo med razmeroma nove enodružinske hiše. Osnovno nosilno konstrukcijo obeh objektov predstavljajo opečnati zidaki (modularni bloki) in armiranobetonske (v nadaljevanju AB) medetažne plošče, medtem ko se strešna konstrukcijska sklopa razlikujeta. Na objektu *Hiša 1* poleg lesenega ostrešja konstrukcijski sklop sestavlja tudi AB-plošča, medtem ko je strešni konstrukcijski sklop na objektu *Hiša 2* predstavljala samo lesena endoskeletna konstrukcija.

5.2 Vremenske razmere in zunanji pogoji v času izvajanja meritev

Kljub zimskim razmeram je bilo nihanje zunanjih temperatur izrazito in je v nekaterih primerih preseglo 15 °C, direktnemu sončnemu sevanju na obravnavane konstrukcijske sklope smo se uspeli skoraj v celotnem trajanju analize izogniti. Tako smatramo, da so pridobljeni rezultati odraz dejanske toplotne prehodnosti elementov, saj lahko sončno sevanje na merjene površine izključimo. Vremenske razmere v času trajanja meritev poleg zbranih merjenih temperatur (T_n, T_z) lahko dodatno ponazorimo z vrednostmi zbranimi na meteorološki oziroma klimatološki postaji. Podatke o relativni vlažnosti zunanjega zraka, povprečni dnevni jakosti vetra ter o deležu oblačnosti, ki so posredno ali neposredno vplivali na merjene vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov, smo pridobili na uradni spletni strani Agencije Republike Slovenije za okolje (v nadaljevanju ARSO) *meteo.si*, ki predstavlja osrednjo in relevantno meteorološko spletno stran za območje Republike Slovenije.[20] Zbrani podatki so bili zabeleženi na klimatološki postaji Grosuplje (350 n.m.v.), ki je obravnavanim objektom *Hiša 1* in *Hiša 2* najbližje merilno mesto. Zaradi boljše preglednosti meteoroloških podatkov za posamezne konstrukcijske sklope so le-ti tabelarično razporejeni in prikazani v *Preglednici 9*.

Preglednica 9: Zbrani meteorološki podatki v času trajanja meritev.[22]

Sklop	Datum meritve	Povp. dnevna T_z [°C]	Max. T_z [°C]	Min. T_z [°C]	Povp. veter [m/s]	Obláčnost [%]	Povp. relativna vlažnost [%]
KS 1	28.2.2019	9,0	20,8	-2,7	2,3	7	48
	1.3.2019	8,0	15,4	-2,6	0,8	70	57
	2.3.2019	8,7	16,3	-1,3	0,6	67	59
	3.3.2019	9,3	18,8	-0,2	2,3	43	58
	4.3.2019	10,7	17,0	5,3	2,6	90	59
KS 2	4.3.2019	10,7	17,0	5,3	2,6	90	59
	5.3.2019	6,9	15,1	2,8	0,3	47	73
	6.3.2019	8,4	16,1	-1,5	1,6	67	64
	7.3.2019	13,3	17,3	7,1	3,1	83	63
KS 3	7.3.2019	13,3	17,3	7,1	3,1	83	63
	8.3.2019	9,4	17,1	5,2	1,5	60	63
	9.3.2019	10,6	17,2	2,5	2,9	87	60
	10.3.2019	9,9	15,7	4,4	2,9	80	66
KS 4	13.3.2019	4,5	12,3	-2,0	0,3	87	68
	14.3.2019	6,6	14,2	0,7	1,1	67	64
	15.3.2019	9,1	16,9	-0,5	1,9	60	61
	16.3.2019	11,2	18,4	3,5	3,7	53	65
KS 5	17.3.2019	12,7	16,8	10,1	3,7	83	64
	18.3.2019	3,7	12,5	0,6	0,0	100	80
	19.3.2019	3,4	6,8	1,3	0,6	90	80
KS 6	27.3.2019	4,3	10,3	-1,0	2,2	63	64
	28.3.2019	6,0	12,0	1,8	0,6	90	63
	29.3.2019	8,4	15,9	4,8	0,8	27	63
	30.3.2019	9,3	19,4	-1,0	0,8	10	63

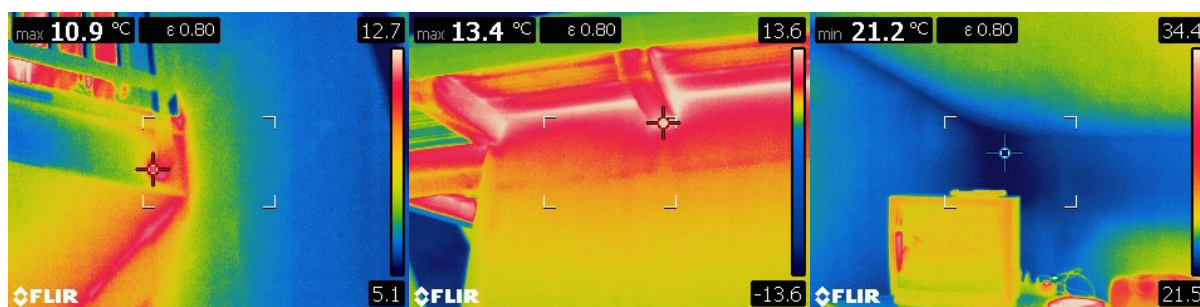
5.3 Analiza objektov in konstrukcijskih sklopov s termografsko kamero

Konstrukcijske sklope za izvajanje meritev smo izbrali na osojnih, severnih delih izbranih objektov, kot to določa standard *ISO 9869-1:2014*. Izvedli smo šest (6) meritev na izbranih konstrukcijskih sklopih, nekatere izmed njih smo preverili tudi s termografsko kamero, ki je predstavljena v *Preglednici 10*. Termografske kamere pogosto imenujemo tudi infrardeče kamere (v nadaljevanju IR-kamera), saj delujejo po principu zajema slike elektromagnetnega sevanja teles v območju infrardečega spektra, ki ga nato grafično prikažejo v vidnem spektru imenovanem tudi termogram. Slike z IR-kamero smo snemali zaradi ugotavljanja temperaturnih razlik na obravnavanih površinah z namenom odkrivanja morebitnih nepravilnosti v izbranih konstrukcijskih sklopih.

Preglednica 10: Karakteristike uporabljene IR-kamere.[23]

	Model IR-kamere	Flir E40bx
	Temperaturno območje delovanja	-20 °C do 120 °C
	Ločljivost digitalne kamere	3,1 MP, z vgrajeno LED svetilko
	Ločljivost IR-detektorja	do 19.200 pikslov (160x120)
	Tip detektorja	FPA, nehlajeni mikrobolometer
	Občutljivost detektorja	< 0,045 °C
	Spektralno območje merjenja	7,5-13,0 µm, IR-sevanje
	Natančnost meritev	± 2 °C ali ± 2 %
	Nastavljena emisivnost površin (ε)	0,8

Uporaba IR-kamere pred namestitvijo merilnikov je smiselna, saj pripomore k odkrivanju morebitnih toplotnih mostov in nepravilnosti v konstrukcijskih sklopih, ki bi vplivali na točnost meritev. S pojmom nepravilnosti mislimo predvsem na izrazito nehomogenost materialov ter podometne strojne napeljave. Cevnih razvodov integriranega prezračevanja, odtočnih cevi sanitarnih vodov ipd. zaradi vrhnjih slojev (npr. zaključnih ometov, premazov, fasadnih slojev) in nepoznavanja strukture konstrukcijskega sklopa ne moremo predvideti. Z IR-kamero pa je mogoče tudi zaznati in oceniti območje vpliva toplotnih in hladilnih teles na konstrukcijske sklop. Tudi že omenjeni toplotni mostovi v konstrukcijskih sklopih lahko vplivajo na merjene vrednosti. V splošnem ločimo geometrijske toplotne mostove in materialne toplotne mostove, lahko pa se pojavijo tudi kot kombinacija obeh tipov toplotnih mostov (npr. vogalne armiranobetonske vertikalne vezi v zidovih z opečnatim polnilom). Za zaznavanje toplotnih mostov je analiza z IR-kamero primernejša v mrzlih dneh, saj je notranja in zunanja temperaturna razlika večja, s tem pa so mesta z večjo toplotno prevodnostjo vidnejša. Na posnetkih narejenih z IR-kamero so toplejša mesta prikazana v toplejših odtenkih (rumeno-rdeča barva), hladnejša mesta pa v hladnih barvnih odtenkih (zeleno-modra barva). Primeri zabeleženih toplotnih mostov na objektu *Hiša 1* so predstavljeni na *Sliki 11*.



Slika 11: Konstrukcijski detajli na objektu Hiša 1, na katerih so vidna območja pojavljanja toplotnih mostov, posnetih z IR-kamero.[lastni vir, 2019]

Na slikah so jasno vidni tipični toplotni mostovi, prisotni na stavbah. Prva slika z leve strani prikazuje konzolni podaljšek medetažne AB-plošče za izvedbo balkona, ki deluje kot hladilno rebro. Bistveno

tanjša debelina toplotne izolacije ter boljša toplotna prevodnost betona pripomore k povečanemu toplotnemu toku na mestu preboja fasadnega ovoja. Podoben problem je prikazan na sredinski sliki, kjer je vidno povečano prehajanje toplote na stiku ostrešja s fasadnim slojem. Slabo izveden detajl nadaljevanja vertikalne toplotne izolacije pod ostrešje dodatno pripomore k toplotnemu mostu na stičišču vertikalne toplotne izolacije s toplotno izolacijo v strešnem konstrukcijskem sklopu. Zadnja slika na desni strani prikazuje izrazit toplotni most v območju poteka vogalne betonske vertikalne vezi na stiku z armiranobetonsko etažno ploščo. K izrazito hladnemu območju nekoliko pripomore tudi sama pozicija, saj v tem vogalu ni zaznati konvekcije zraka. *Slika 12* pa prikazuje nepravilnosti v konstrukcijskih sklopih, ki so zaradi same konstrukcije (npr. zaključnih slojev) s prostim očesom nezaznavne. V kolikor bi na tako mesto namestili merilno ploščo za merjenje prehajanja gostote toplotnega toka, bi bili rezultati netočni in zavajajoči.



Slika 12: Slike detajlov konstrukcijskih sklopov na objektu *Hiša 1*, posnete z IR-kamero.[lastni vir, 2019]

Na prvi sliki z leve strani lahko vidimo nehomogen notranji opečnati zid, ki je obojestransko zaključen z ometom in notranjim barvnim premazom. Zid sicer razmejuje ogrevan in neogrevan del objekta, na katerem so jasno vidne fuge med opečnatimi zidaki, zapolnjene s cementno malto, ki ima bistveno večjo toplotno prevodnost kot opečnati zidaki. Slika v sredini prikazuje podometne vodovodne inštalacije (kovinske cevi za dovod tople sanitarne vode v zgornje prostore) v zidu, na zadnji sliki pa je vidno območje stropa v mansardi, ki je močno ogreto zaradi vpliva konvekcijskega radiatorja. Dodatno so na *Sliki 13* prikazane materialne neenakosti v konstrukcijskih sklopih.



Slika 13: Slike detajlov konstrukcijskih sklopov na objektu *Hiša 1*, posnete z IR-kamero.[lastni vir, 2019]

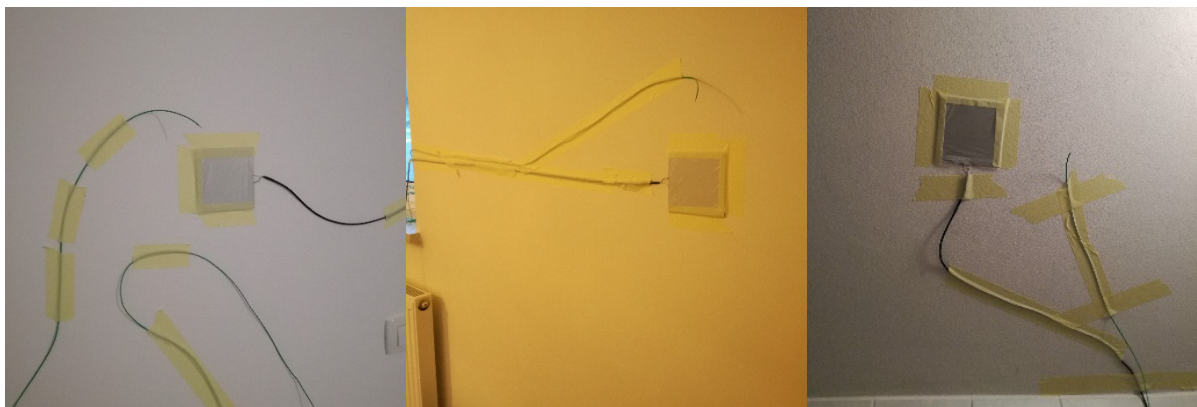
Prva slika z leve strani prikazuje poševno stropno medetažno ploščo (obarvana je zeleno), ki ima do prehoda v vodoravno lego dodaten sloj toplotne izolacije na notranji strani (ekstrudiran polistiren, v debelini štirih centimetrov). Hladnejša AB-plošča brez toplotne izolacije je temnejše (modre) barve. Podobno je na drugi sliki prikazan AB-steber z dodatnim slojem toplotne izolacije (ekstrudiran polistiren, v debelini štirih centimetrov) in ima višjo površinsko temperaturo kot opečnat zid, ki se nadaljuje proti levi strani. Zadnja slika na desni strani pa prikazuje pasovni temelj objekta, ki je bistveno slabše toplotno zaščiten kot preostali del stavbe. Prehajanje toplote v tem predelu (zeleno barva) je izrazitejše. Vidimo, da analiza z IR-kamero lahko pripomore k točnosti meritev, saj odkrijemo problematična mesta konstrukcijskih sklopov, ki s prostim očesom niso vidna ter se izognemo zavajajočim vrednostim meritev, ki bi jih dobili z morebitno namestitvijo merilnih naprav na taka mesta.

5.4 Konstrukcijski sklopi

Opravili smo šest (6) meritev konstrukcijskih sklopov, ki smo jih poimenovali s kratico *KS* in zaporedno številko 1-6. Prvi trije konstrukcijski sklopi (*KS* 1-3) so se nahajali na objektu *Hiša 1*, preostali konstrukcijski sklopi (*KS* 4-6) pa so bili izbrani na objektu *Hiša 2*. Na prvem objektu *Hiša 1* smo analizirali strešni konstrukcijski sklop v kopalnici s površino 9 m² in straniščnem prostoru s površino 4 m². V kopalnici relativne vlažnosti notranjega zraka nismo spremljali z nameščenim senzorjem, vendar so bile vrednosti odčitane na analognem merilcu vlage v času prhanja stanovalcev $p_n = 85-90\%$. Dodatno smo analizirali še zunanji opečnat zid v dnevnem prostoru s površino 25 m². Na drugem objektu *Hiša 2* smo analizirali strešni konstrukcijski sklop v prvi otroški sobi s površino 18 m² in opečnat zunanji zid. Ta prostor v času opravljanja meritev ni bil v uporabi. Dodatno smo analizirali še en strešni konstrukcijski sklop v drugi otroški sobi s površino 16 m².

5.4.1 Namestitev merilnih plošč in temperaturnih senzorjev

Merilne plošče in senzorje smo namestili skladno s standardom *ISO 9869-1:2014*. Predhodna analiza z IR-kamero je pomagala izločiti neprimerna mesta, ki bi zaradi nepravilnosti v konstrukcijskih sklopih vplivala na točnost meritev. Merilne plošče za merjenje gostote toplotnega toka smo s pomočjo lepilnih trakov pritrdili na notranje površine in omogočili kar najboljšo stičnost površin (brez zračnih žepov med merilcem in konstrukcijskim sklopom). Senzor notranje temperature smo pozicionirali poleg merilne plošče. Primer namestitve prikazuje *Slika 14*. V večini primerov je bilo mogoče namestiti senzor zunanje temperature v neposredno bližino mesta, na katerem smo merili prehajanje toplote, le v primeru izvajanja meritev na *KS* 4 in *KS* 6 smo zaradi omejenosti z dolžino žice temperaturnega senzorja, merilec za zaznavanje zunanje temperature namestili zgolj na osojno mesto.

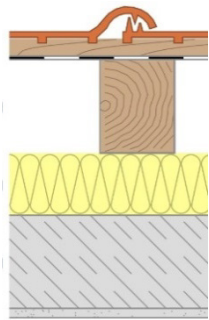


Slika 14: Prikaz namestitve merilne plošče za merjenje gostote toplotnega toka in senzorja za merjenje notranje temperature (*KS* 1, *KS* 3, *KS* 5).[lastni vir, 2019]

5.4.2 Predstavitve konstrukcijskih sklopov

Izbrani konstrukcijski sklopi, na katerih smo opravljali meritve, so tabelarično predstavljeni v nadaljevanju. Za boljšo predstavitev so sklopi prikazani tudi grafično, saj smo jih modelirali v že omenjenem programu *UBAKUS* na prosto dostopni spletni strani *ubakus.de*. [15] Koeficienti toplotne prevodnosti in dejanske debeline elementov so prikazani v *Tabelah 11-16*. Vrednosti koeficientov toplotne prehodnosti elementov v konstrukcijskih sklopih smo določili skladno s tehnično smernico *TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije* [7] oziroma smo podatke pridobili v tehničnih publikacijah proizvajalcev ali na spletu. Za primerjavo so dodatno izpisane tudi vrednosti, ki jih je za izračun upošteval program *UBAKUS* in so bile že prednastavljene za izbrane elemente ter materiale. Prve tri meritve smo opravili na objektu *Hiša 1*. Konstrukcijski sklop *KS 1* je predstavljala strešna AB-plošča, na kateri je proti zunanosti položena toplotna izolacija (mineralna steklena volna v debelini 100 mm), ki zapolnjuje medprostor do lesenih elementov ostrešja, kateri sloni na stenskih legah. Zračni sloj med roženiki, ni prezračevan. Ostrešje se nadaljuje s sekundarno kritino (vetrno oviro), ki je pod vzdolžnimi letvami pritrjena na roženike. Na vzdolžne letve so položeni opečnati strešniki. V notranjost je na nosilno armiranobetonsko ploščo izveden apneno-cementni omet, ki je zaključen z notranjo zidno barvo. Sestava sklopa je prikazana v *Preglednici 11*. Omenimo pa lahko tudi razliko v debelini konstrukcijskega sklopa modeliranega s programom *UBAKUS*. Sklop, modeliran s programom, namreč upošteva nekoliko debelejši sloj (33 mm) vzdolžnih letev in opečnatih strešnikov.

Preglednica 11: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa *KS 1*, na objektu *Hiša 1*.

KS 1	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -STREHA V NAKLONU-			Debelina L [mm]	Koeficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	WC (4 m ²)	Konstrukcijski elementi (notranjost proti zunanosti)		TSG	UBAKUS
			Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim barvnim premazom	15	0,700	1,000
			Armiranobetonska etažna plošča	150	2,330	2,500
			Mineralna steklena volna	100	0,038	0,040
			Neprezračevan zračni sloj in roženiki	150	*OP	0,938 0,130
			Sekundarna kritina - vetrna ovira	0,5	0,190	0,500
			Vzdolžne letve	50	*OP	0,750
			Opečnati strešniki	20 (53)	0,990	
			Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 485,5 mm (UBAKUS: 518,5 mm)			

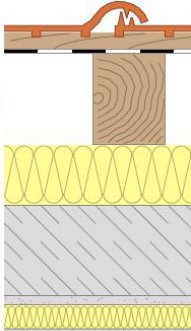
*OP.: V izračunih je upoštevana toplotna upornost neprezračevane zračne plasti (R_{zr}).

V dejanskem izračunu smo upoštevali nekatere poenostavitve. Nismo upoštevali lesenih elementov v ostrešju (roženiki in letve), saj gre za precej nehomogen sloj (velik delež zraka), doprinos k toplotni izolativnosti lesenih elementov sklopa pa je zaradi same postavitve zanemarljiv. Sloj roženikov in vzdolžnih letev smo torej upoštevali kot neprezračevano plast zraka. Za izračun toplotne upornosti neprezračevanega sloja zraka smo upoštevali podatek o toplotni upornosti neprezračevane zračne plasti (R_{zr}) in ne dejanskega koeficienta toplotne prevodnosti zraka. Vrednost, ki smo jo upoštevali v izračunu $R_{zr}=0,16$ (m²K)/W, navaja standard *ISO 6946:2017* za debeline neprezračevanih zračnih slojev 50–300 mm. Pri tem je upoštevan prehod toplote zgolj s prevajanjem, delež, ki ga prispeva prehajanje toplote s konvekcijo, je v tem primeru zanemarljiv.

Podobno sestavo je imel tudi konstrukcijski sklop *KS 2*, kar je prikazano v *Preglednici 12*. Le-ta se je razlikoval le v namestitvi dodatne toplotne izolacije v notranjosti sklopa (ekstrudiran polistiren), ki je bila izvedena naknadno. Plošče XPS so s cementnim lepilom lepljene na izveden omet. Finalna površina je bila zaključena z armirno mrežico in lepilom ter prevlečena z mavčno izravnalno maso in

notranjo zidno barvo. Upoštevane so poenostavitve, ki so podrobno opisane pri konstrukcijskem sklopu *KS 1*. Prav tako sklop, modeliran s programom *UBAKUS*, upošteva nekoliko debelejši sloj (33 mm) vzdolžnih letev in opečnatih strešnikov.

Preglednica 12: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa *KS 2*, na objektu *Hiša 1*.

KS 2	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -STREHA V NAKLONU-			Debelina L [mm]	Koefficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	Kopalnica (9 m ²)	Konstrukcijski elementi (notranjost proti zunanosti)		TSG	UBAKUS
			Armirna mrežica, cementno lepilo, izravnalna masa ter zaključni notranji barvni premaz	5	1,400	1,400
			Ekstrudiran polistiren (XPS)	40	0,035	0,035
			Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim premazom	20	0,700	1,000
			Armiranobetonska etažna plošča	150	2,330	2,500
			Mineralna (steklena) volna	100	0,038	0,040
			Neprežračevan zračni sloj in roženiki	150	*OP	0,938
			Sekundarna kritina - vetrna ovira	0,5	0,190	0,500
			Vzdolžne letve	50	*OP	0,750
			Opečnati strešniki	20 (53)	0,990	
			Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 530,5 mm (UBAKUS: 563,5 mm)			

*OP.: V izračunih je upoštevana toplotna upornost neprežračevane zračne plasti (R_{tr}).

V nadaljevanju smo izvedli meritve še na vertikalnem zunanem zidu, kar je prikazano v *Preglednici 13*. Konstrukcijski sklop *KS 3* so sestavljali opečnati modularni bloki z nameščeno toplotno izolacijo na zunanji strani (ekspandiran polistiren). Na notranji površini je izveden apneno-cementni omet, prevlečen z izravnalno maso in zaključen z notranjo zidno barvo. Toplotno izolacijo prekriva kontaktni fasadni sloj (armirna mrežica, cementno lepilo in zaključni premaz). Sklop, modeliran s programom *UBAKUS*, upošteva nekoliko debelejši zaključni fasadni sloj (3 mm).

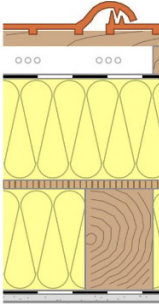
Preglednica 13: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa *KS 3*, na objektu *Hiša 1*.

KS 3	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -ZUNANJA STENA (nad terenom)-			Debelina L [mm]	Koefficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	Dnevna soba (25 m ²)	Konstrukcijski element (notranjost proti zunanosti)		TSG	UBAKUS
			Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim premazom	15	0,700	1,000
			Opečnati izvotleni modularni zidaki	190	0,610	0,650
			Ekspandiran polistiren (EPS)	80	0,040	0,040
			Kontaktni fasadni sistem: armirna mrežica, cementno lepilo, zaključni fasadni premaz	4 (7)	1,400	1,400
						1,000
			Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 289 mm (UBAKUS: 292 mm)			

Preostale tri meritve smo na konstrukcijskih sklopih opravili na objektu *Hiša 2*. Konstrukcijski sklop *KS 4* so sestavljali elementi ostrešja (roženiki in letve), kateri so pritrjeni na stenske lege. Notranje površine so bile zaprte z mavčno-kartonastimi ploščami, ki so bile proti notranjosti prevlečene z

izravnalno maso in zaključene z notranjo zidno barvo. Proti zunanosti je bila med roženike in mavčno-kartonaste plošče nameščena parna zapora (PVC folija), v zračni žep med parno zaporo in OSB-ploščami, ki so bile pritrjene na roženike, je bila vpihana celulozna toplotna izolacija (lesna vlakna). Dodatne toplotne trde izolacijske plošče iz mineralne kamene volne so bile položene na OSB-plošče, prekrivala pa jih je sekundarna kritina (vetrna ovira). Prečno nameščene letve, privijačene skozi izolacijske plošče v roženike, so ustvarjale prezračevan zračni kanal. Konstrukcijski sklop, prikazan v *Preglednici 14*, se zaključi z opečnatimi strešniki na vzdolžnih letvah. V izračunih nismo upoštevali parne zapore, saj je zaradi majhne debeline doprinos k toplotni izolativnosti konstrukcijskega sklopa zanemarljiv. Prav tako smo v izračunu upoštevali zgolj debelino vpihanih lesnih vlaken, brez nosilnih roženikov, saj je bila merilna plošča za merjenje gostote toplotnega toka pozicionirana v položaj, kjer vpliv roženikov ni bil zaznaven. Dodatno smo iz izračunov izključili sloje konstrukcijskega sklopa nad zračnim kanalom, saj predvidevamo, da je prehajanje toplote s prevajanjem skozi prezračevano plast v višje sloje močno oteženo. Predpostavili smo, da dejansko toplotno upornost konstrukcijskega sklopa predstavljajo zgolj sloji do prezračevane plasti. Prav tako sklop, modeliran s programom *UBAKUS*, upošteva nekoliko debelejši sloj (33 mm) vzdolžnih letev in opečnatih strešnikov.

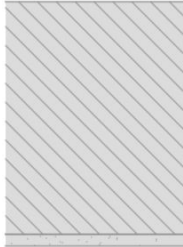
Preglednica 14: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa *KS 4*, na objektu *Hiša 2*.

<i>KS 4</i>	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -STREHA V NAKLONU-		Debelina L [mm]	Koefficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	Otroška soba (18 m ²)		TSG	UBAKUS
	<i>Izravnalna masa ter zaključni notranji premaz</i>		2	0,700	0,087
	<i>Mavčno-kartonaste plošče</i>		12,5	0,210	0,260
	<i>PVC folija (parna zapora)</i>		0,5	0,190	0,400
	<i>Roženiki in vpihana lesna vlakna</i>		180	0,040	0,130 0,040
	<i>OSB plošče</i>		15	0,130*	0,130
	<i>Trde plošče iz mineralne (kamene) volne</i>		180	0,040	0,040
	<i>Sekundarna kritina - vetrna ovira</i>		0,5	0,190	0,500
	<i>Prečne letve in zračni kanal</i>		50	-	-
	<i>Vzdolžne letve in strešniki</i>		70 (103)	-	-
	<i>Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 410,5 mm (UBAKUS: 543,5 mm)</i>				

*OP.: Vrednost pridobljena iz tehnične specifikacije proizvajalca.[21]

Naslednji konstrukcijski sklop *KS 5* je predstavljal opečnat zunanji zid. Podatki so prikazani v *Preglednici 15*. Zid so sestavljali modularni opečnati zidaki (POROTHERM 30 S P+E, proizvajalca Wienerberger), ki so bili v notranjosti zaključeni z apneno-cementnim ometom in izravnalno maso. Zaključni notranji premaz je predstavljala zidna barva. Proti zunanosti opečnati zidaki niso bili zaščiteni, saj v času izvajanja meritev toplotna izolacija in hidro-izolacijski fasadni sloj še nista bila izvedena.

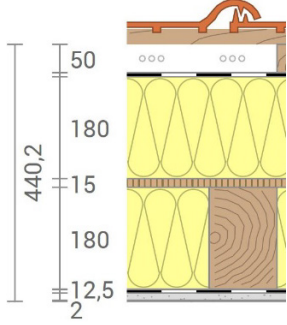
Preglednica 15: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa KS 5, na objektu Hiša 2.

KS 5	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -ZUNANJA STENA (nad terenom)-			Debelina L [mm]	Koeficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	Otroška soba(18 m ²)	Konstrukcijski element (notranjost proti zunanosti)		TSG	UBAKUS
			Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim barvnim premazom	15	0,700	1,000
			Opečnati izvotleni modularni zidaki	300	0,200*	0,200
	Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 315 mm (UBAKUS: 315 mm)					

OP.: Vrednost pridobljena iz tehnične specifikacije proizvajalca Wienerberger.[22]

Zadnjo meritev KS 6 smo ponovno opravili na strešnem konstrukcijskem sklopu, ki je bil po sestavi enak konstrukcijskemu sklopu KS 4, vendar je bila tokrat otroška soba nekoliko manjša (16 m²) in v uporabi. Sestava konstrukcijskega sklopa je prikazana v Preglednici 16. Poenostavitve so enake kot pri konstrukcijskem sklopu KS 4.

Preglednica 16: Grafični prikaz in materialne lastnosti konstrukcijskega sklopa KS 6, na objektu Hiša 2.

KS 6	KONSTRUKCIJSKI SKLOP -STREHA V NAKLONU-			Debelina L [mm]	Koeficient toplotne prevodnosti λ [W/(mK)]	
	Prostor:	Otroška soba(16 m ²)	Konstrukcijski element (notranjost proti zunanosti)		TSG	UBAKUS
			Izravnalna masa ter zaključni notranji premaz	2	0,700	0,087
			Mavčno-kartonaste plošče	12,5	0,210	0,260
			PVC folija (parna zapora)	0,1	0,190	0,400
			Roženiki in vpihana lesna vlakna	180	0,040	0,130
			OSB plošče	15	0,130*	0,130
			Trde plošče iz mineralne (kamene) volne	180	0,040	0,040
			Sekundarna kritina - vetrna ovira	0,1	0,190	0,500
			Prečne letve in zračni kanal	50	-	-
			Vzdolžne letve in strešniki	70 (103)	-	-
	Skupna debelina konstrukcijskega sklopa: 510,5 mm (UBAKUS: 543,5 mm)					

*OP.: Vrednost pridobljena iz tehnične specifikacije proizvajalca.[21]

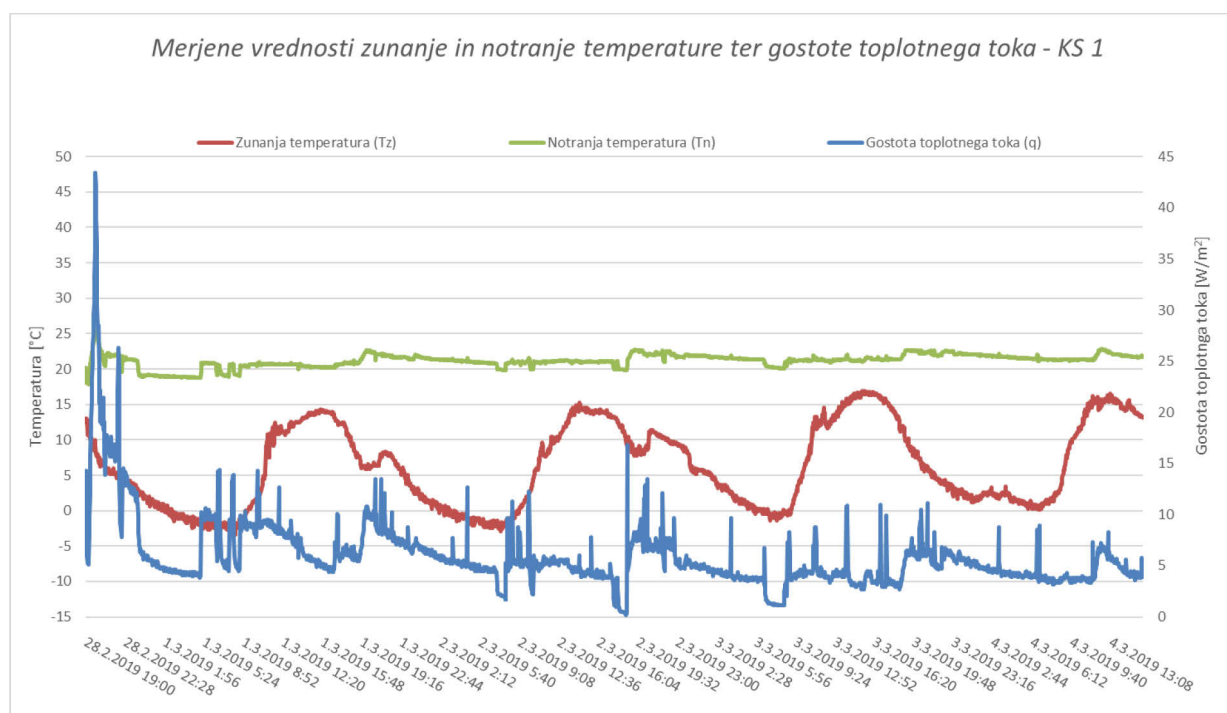
Izbrani konstrukcijski sklopi za opravljanje meritev z merilcem gostote toplotnega toka in temperaturnimi senzorji so se nahajali v prostorih na severnih delih objektov, prav tako so bili konstrukcijski sklopi orientirani proti severu. Zunanji temperaturni senzorji so bili nameščeni na mestih, kjer ni vpliva sončnega sevanja.

6 IZRAČUNI IN MERITVE

Grafično so prikazane merjene vrednosti toplotne prehodnosti (U) posameznih konstrukcijskih sklopov, dodatno pa smo na grafi prikazali tudi dejanski potek temperaturnih linij (T_n, T_z) in nihanje toplotnega toka (q). Poleg grafičnih izkazov smo ločeno prikazali tudi računske vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Računske vrednosti smo določili po metodi skladno s standardom *ISO 6946:2017*, ocenjeno vrednost toplotne prehodnosti pa določili s povprečno metodo, ki je določena v standardu *ISO 9869-1:2014*. Obe metodi sta predstavljeni v prejšnjih poglavjih.

6.1 Konstrukcijski sklop KS 1

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* za KS 1 je prikazan na *Grafikonu 1*.



Grafikon 1: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m²] na konstrukcijskem sklopu KS 1.

Na *Grafikonu 2* so grafično prikazane vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa *KS 1*, določene s povprečno metodo, ki se približujejo asimptotični vrednosti. Ocenjena vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po izvedenih 2790 meritvah znaša $U_{POVI} = 0,464 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Grafikon 2: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [$\text{W/(m}^2\text{K)}$] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop *KS 1*.

Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za *KS 1* je prikazan v *Preglednici 17*. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_j) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa *KS 1* znaša $U_{RAČI} = 0,329 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAKI} = 0,320 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

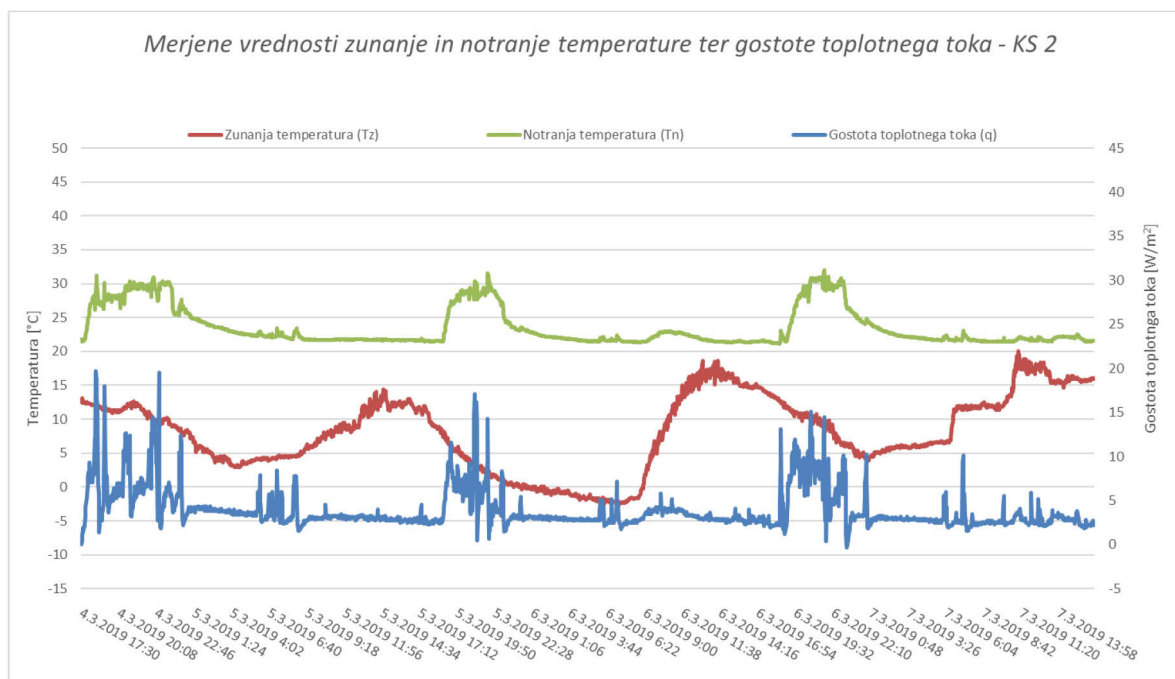
Preglednica 17: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [$\text{m}^2\text{K/W}$] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [$\text{W/(m}^2\text{K)}$] za *KS 1* na objektu *Hiša 1*.

<i>KS 1</i> -STREHA V NAKLONU-		L [mm]	λ [W/(mK)]	R_j [(m^2K)/W]
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,100
	Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim barvnim premazom	15	0,70	0,021
	Armiranobetonska etažna plošča	150	2,33	0,064
	Mineralna steklena volna	100	0,038	2,632
R_{zr}	Neprezračevan zračni sloj in roženiki*	150	-	0,160
	Sekundarna kritina (vetrna ovira)	0,01	0,19	0,001
R_{zr}	Vzdolžne letve*	50	-	0,160
	Opečnati strešniki	20	0,99	0,020
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
		$R_{TOTI} = 3,038 \text{ (m}^2\text{K)/W}$		
		$U_{RAČI} = 0,329 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		

OP.: Neprezračevan zračni sloj z roženiki in vzdolžnimi letvami smo zaradi narave sklopa upoštevali kot en skupen neprezračevan sloj debeline do 300 mm, za katerega standard predvideva uporabo vrednosti za toplotno upornost zračne plasti $R_{zr} = 0,16 \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

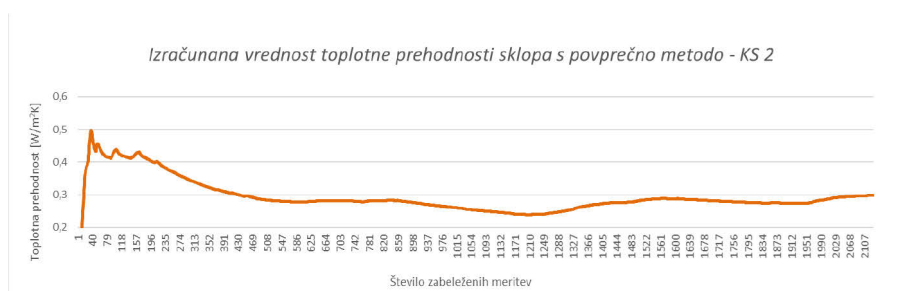
6.2 Konstrukcijski sklop KS 2

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* za KS 2 je prikazan na *Grafikonu 3*.



Grafikon 3: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m²] na konstrukcijskem sklopu KS 2.

Grafikon 4 grafično prikazuje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 2, določene s povprečno metodo, ki se približujejo asimptotični vrednosti. Ocenjena vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po izvedenih 2130 meritvah znaša $U_{POV2} = 0,298$ W/(m²K).



Grafikon 4: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m²K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop KS 2.

Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za KS 2 je prikazan v *Preglednici 18*. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_i) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 2

znaša $U_{RAČ2}=0,239 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAK2}=0,240 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

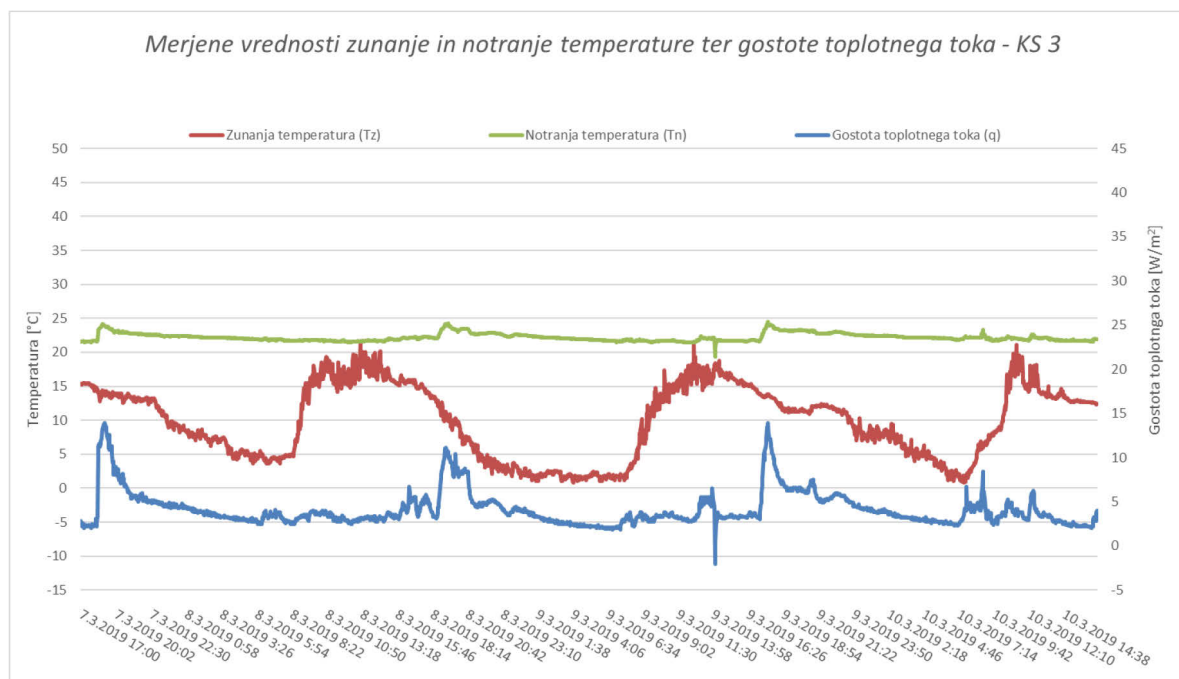
Preglednica 18: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m²K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m²K)] za KS 2 na objektu *Hiša 1*.

KS 2 -STREHA V NAKLONU-		L [mm]	λ [W/(mK)]	R_j [(m ² K)/W]
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,100
	Armirna mrežica, cementno lepilo, izravnalna masa ter zaključni notranji barvni premaz	5	1,40	0,004
	Ekstrudiran polistiren (XPS)	40	0,035	1,143
	Apneno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim barvnim premazom	15	0,70	0,021
	Armiranobetonska etažna plošča	150	2,33	0,064
	Mineralna steklena volna	100	0,038	2,632
R_{zr}	Neprezračevan zračni sloj in roženiki*	150	-	0,160
	Sekundarna kritina (vetrna ovira)	0,01	0,19	0,001
R_{zr}	Vzdolžne letve*	50	-	0,160
	Opečnati strešniki	20	0,99	0,020
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
				$R_{TOT2} = 4,185 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
				$U_{RAČ2} = 0,239 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

OP.: Neprezračevan zračni sloj z roženiki in vzdolžnimi letvami smo zaradi narave sklopa upoštevali kot en skupen neprezračevan sloj debeline do 300 mm, za katerega standard predvideva uporabo vrednosti za toplotno upornost zračne plasti $R_{zr}=0,16 \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

6.3 Konstrukcijski sklop KS 3

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* za KS 3 je prikazan na *Grafikonu 5*.



Grafikon 5: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m²] na konstrukcijskem sklopu KS 3.

Grafikon 6 grafično prikazuje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 3, določene s povprečno metodo, ki se približujejo asimptotični vrednosti. Ocenjena vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po izvedenih 2143 meritvah znaša $U_{POV3} = 0,442$ W/(m²K).



Grafikon 6: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m²K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop KS 3.

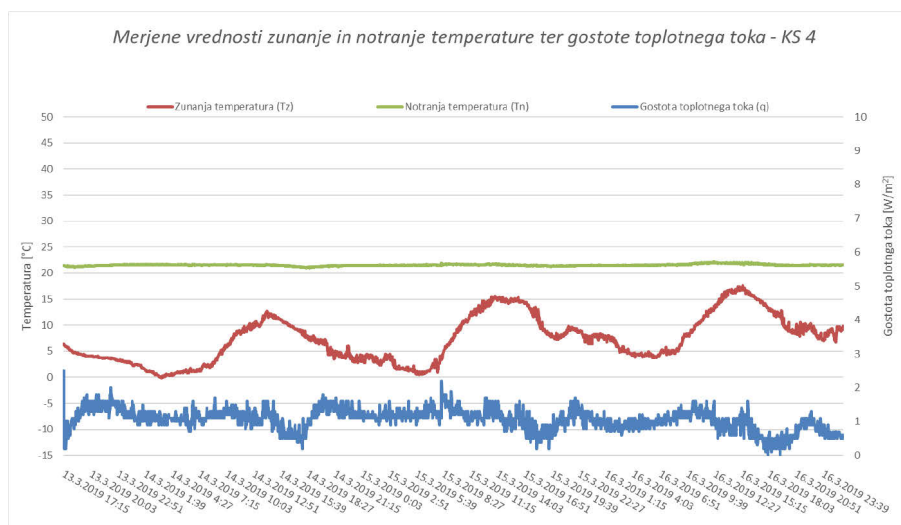
Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za *KS 3* je prikazan v *Preglednici 19*. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_j) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa *KS 3* znaša $U_{RAČ3}=0,400 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAK3}=0,400 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Preglednica 19: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [$\text{m}^2\text{K/W}$] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [$\text{W/(m}^2\text{K)}$] za *KS 3* na objektu *Hiša 1*.

KS 3 - ZUNANJA STENA (nad terenom)-		L [mm]	λ [W/(mK)]	R_j [(m²K)/W]
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (horizontalno prehajanje toplote)	-	-	0,130
	Apneni-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim premazom	15	0,70	0,021
	Opečnati izvotleni modularni zidaki	190	0,61	0,311
	Ekspandiran polistiren (EPS)	80	0,040	2,000
	Kontaktne fasadni sistem (armirna mrežica, cementno lepilo, zaključni fasadni premaz)	4	1,4	0,003
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
		$R_{TOT3} = 2,505 \text{ (m}^2\text{K)/W}$		
		$U_{RAČ3} = 0,400 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		

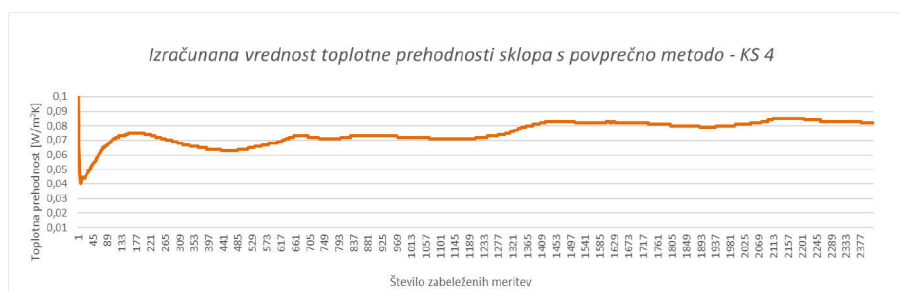
6.4 Konstrukcijski sklop *KS 4*

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* za *KS 4* je prikazana na *Grafikonu 7*.



Grafikon 7: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m^2] na konstrukcijskem sklopu *KS 4*.

Grafikon 8 grafično prikazuje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa *KS 4*, določene s povprečno metodo, ki se približujejo asimptotični vrednosti. Ocenjena vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po izvedenih 2417 meritvah znaša $U_{POV4}= 0,082 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Grafikon 8: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop KS 4.

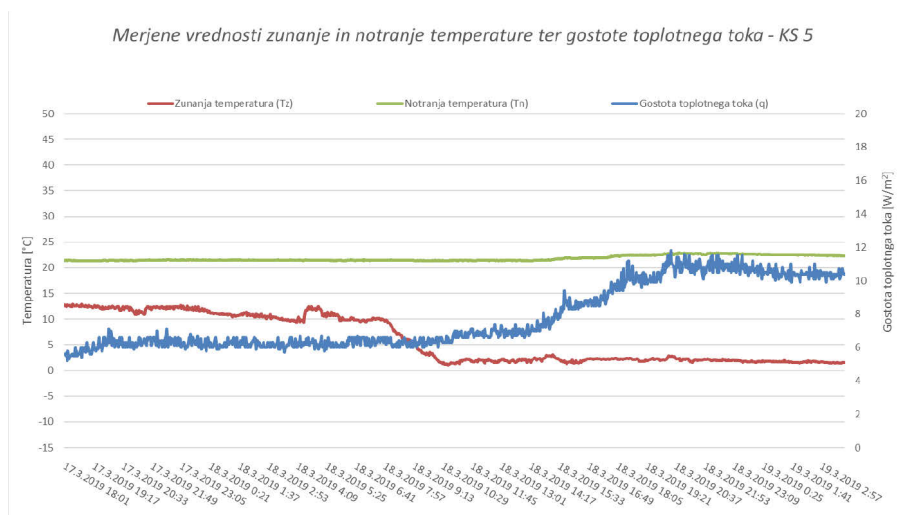
Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za KS 4 je prikazan v *Preglednici 20*. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_j) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke. V izračunu nismo upoštevali slojev konstrukcijskega sklopa nad zračnim kanalom. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 4 znaša $U_{RAČ4}=0,107$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAK4}=0,120$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Preglednica 20: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] za KS 4 na objektu *Hiša 2*.

KS 4 - STREHA V NAKLONU -		L [mm]	λ [W/(mK)]	R_j [(m²K)/W]
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,100
	Izravnalna masa ter zaključni notranji premaz	2	0,70	0,003
	Mavčno-kartonaste plošče	12,5	0,21	0,060
	PVC folija (parna zapora)	0,1	0,19	0,001
	Roženiki in vpihana lesna vlakna	180	0,04	4,5
	OSB plošče	15	0,13	0,115
	Trde plošče iz mineralne (kamene) volne	180	0,04	4,5
	Sekundarna kritina - vetrna ovira	0,1	0,19	0,01
	Prečne letve in zračni kanal	50	-	-
	Vzdolžne letve in strešniki	70 (103)	-	-
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
		$R_{TOT4} = 9,330$ (m²K)/W		
		$U_{RAČ4} = 0,107$ W/(m²K)		

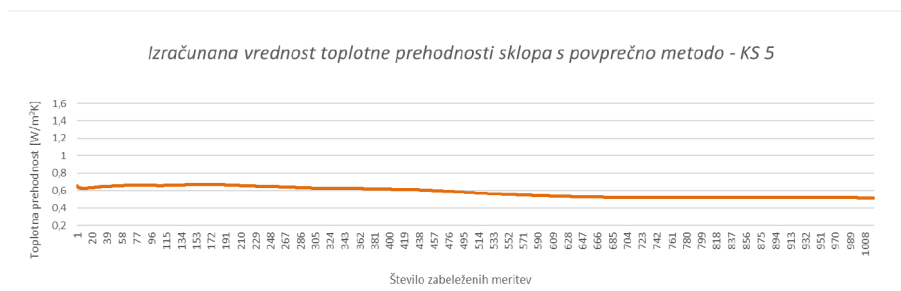
6.5 Konstrukcijski sklop KS 5

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom *ISO 9869-1:2014* za KS 5 je prikazan na *Grafikonu 9*. Zaradi tehnične težave je meritev trajala zgolj 33 ur, kar je razvidno tudi iz spodnjih graffov.



Grafikon 9: Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m²] na konstrukcijskem sklopu KS 5

Grafikon 10 grafično prikazuje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 5, določene s povprečno metodo, pri katerih grafično ni vidno približevanje asimptotični vrednosti. Kljub temu smo ocenili vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa, ki po izvedenih 1019 meritvah znaša $U_{POVS} = 0,516$ W/(m²K).



Grafikon 10: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti U [W/(m²K)] skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop KS 5.

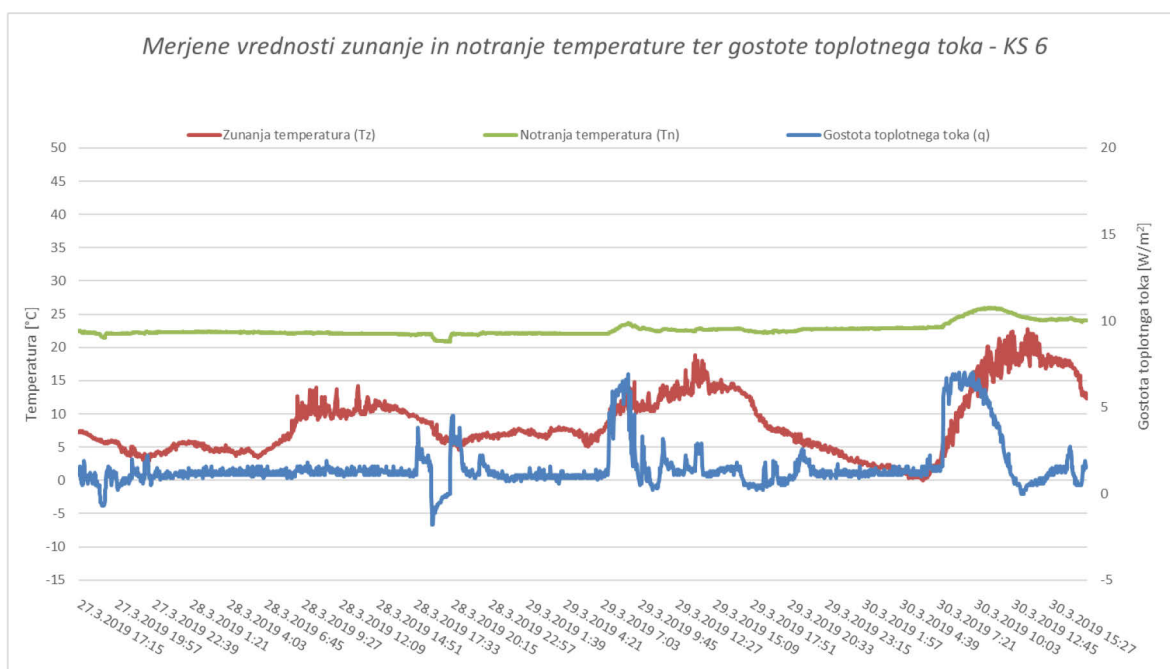
Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za KS 5 je prikazan v *Preglednici 21*. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_j) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 5 znaša $U_{RACS} = 0,591$ W/(m²K). Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAKS} = 0,590$ W/(m²K).

Preglednica 21: Tabelarični prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} [(m²K)/W] ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ [W/(m²K)] za KS 5 na objektu *Hiša 2*.

KS 5 - ZUNANJA STENA (nad terenom)-		L [mm]	λ [W/(mK)]	R_j [(m ² K)/W]
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (horizontalno prehajanje toplote)	-	-	0,130
	Apnenno-cementni omet, izravnalna masa z zaključnim notranjim barvnim premazom	15	0,70	0,021
	Opečnati izvotleni bloki	300	0,20	1,500
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (horizontalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
		$R_{TOT5} = 1,691$ (m²K)/W		
		$U_{RAČ5} = 0,591$ W/(m²K)		

6.6 Konstrukcijski sklop KS 6

Prikaz merjenih vrednosti gostote toplotnega toka (q), notranje in zunanje temperature (T_n, T_z) ter izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa po povprečni metodi skladno s standardom ISO 9869-1:2014 za KS 6 je prikazan na *Grafikonu 11*.

**Grafikon 11:** Grafični prikaz merjenih vrednosti T_z [°C] in T_n [°C] ter gostote toplotnega toka q [W/m²] na konstrukcijskem sklopu KS 6.

Grafikon 12 grafično prikazuje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 6, določene s povprečno metodo, pri katerih grafično ni vidno približevanje asimptotični vrednosti. Kljub temu smo ocenili vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa, ki po izvedenih 2185 meritvah znaša $U_{POV6} = 0,127 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Grafikon 12: Grafični prikaz izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti $U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ skladno s standardom po povprečni metodi za konstrukcijski sklop KS 6.

Izračun toplotne prehodnosti (U) konstrukcijskega sklopa skladno s standardom *ISO 6946:2017* za KS 6 je prikazan v Preglednici 22. Vrednosti toplotne upornosti posameznega sloja (R_j) smo določevali z natančnostjo ene tisočinke in podobno kot v primeru KS 4 nismo upoštevali slojev konstrukcijskega sklopa nad zračnim kanalom. Izračunana vrednost toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa KS 6 znaša $U_{RAČ6} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Vrednost, ki smo jo izračunali s programom *UBAKUS*, znaša $U_{UBAK5} = 0,120 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Preglednica 22: Tabelarni prikaz izračuna vsote toplotne upornosti konstrukcijskega sklopa R_{TOT} $[(\text{m}^2\text{K)/W}]$ ter celotne toplotne prehodnosti $U_{RAČ}$ $[\text{W/(m}^2\text{K)}]$ za KS 6 na objektu *Hiša 2*.

KS 6 - STREHA V NAKLONU -		$L \text{ [mm]}$	$\lambda \text{ [W/(mK)]}$	$R_j \text{ [(m}^2\text{K)/W]}$
R_{si}	Toplotna upornost za mejno notranjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,100
	Izravnalna masa ter zaključni notranji premaz	2	0,70	0,003
	Mavčno-kartonaste plošče	12,5	0,21	0,060
	PVC folija (parna zapora)	0,1	0,19	0,001
	Roženiki in vpihana lesna vlakna	180	0,04	4,5
	OSB plošče	15	0,13	0,115
	Trde plošče iz mineralne (kamene) volne	180	0,04	4,5
	Sekundarna kritina - vetrna ovira	0,1	0,19	0,01
	Prečne letve in zračni kanal	50	-	-
	Vzdolžne letve in strešniki	70 (103)	-	-
R_{se}	Toplotna upornost za mejno zunanjo zračno plast (vertikalno prehajanje toplote)	-	-	0,040
				$R_{TOT6} = 9,330 \text{ (m}^2\text{K)/W}$
				$U_{RAČ6} = 0,107 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

7 ANALIZA REZULTATOV IN RAZPRAVA

Kot smo lahko opazili v prejšnjem poglavju se vrednosti, ki smo jih določili, računsko skladno s standardom *ISO 6946:2017* ter ocenjene vrednosti toplotne prehodnosti s povprečno metodo po standardu *ISO 9869-1:2014*, razlikujejo. V splošnem lahko meritve z izjemo konstrukcijskega sklopa *KS 5* ocenimo za verodostojne, saj smo jih izvedli skladno s predstavljeno metodologijo in standardom. Vrednosti toplotne prehodnosti se z uporabo povprečne metode po izteku 72 ur ustalijo in približajo asimptotični vrednosti.

V nadaljevanju so vrednosti za konstrukcijska sklopa, ki sta predstavljala steno nad terenom ter strešne konstrukcijske sklope, predstavljene tabelarično. Opazimo lahko tudi, da so vrednosti toplotne prehodnosti, ki smo jih dodatno določili z računalniškim programom *UBAKUS*, zelo blizu izračunanim vrednostim skladno s standardom *ISO 6946:2017*, kar je pričakovano, saj program uporablja standard *DIN 6946*, ki ima enako metodologijo izračuna. Koeficienti toplotne prehodnosti prednastavljenih materialov so identični tabelarnim vrednostim iz smernice za graditev *TSG-1-004:2010* oziroma dejanskim karakterističnim vrednostim materialov v analiziranih konstrukcijskih sklopih. Do razlik je prišlo le pri vrednostih toplotne prehodnosti strešnih konstrukcijskih sklopov, saj je program upošteval tudi delež (15 %) lesenih elementov ostrešja v slojih, za katere smo mi predpostavili zgolj homogeno zračno plast.

7.1 Streha v naklonu

Analiza je obsegala tri različne konstrukcijske sklope streh v naklonu, in sicer dve eksoskeletni nosilni konstrukciji ter eno endoskeletno konstrukcijo, na kateri smo izvajali meritve v dveh različnih prostorih. Vrednosti so tabelarično prikazane v *Preglednici 23*. Dodatno smo določili tudi odstopanja merjene vrednosti od računsko določene vrednosti v odstotkih (%) in prikazali vrednosti, določene z računalniškim programom *UBAKUS*.

Preglednica 23: Tabelarni prikaz vrednosti toplotne prehodnosti U [$W/(m^2K)$] za *KS 1-2*, *KS 4*, *KS 6*

KONSTRUKCIJSKI SKLOP	Toplotna prehodnost določena računsko (<i>ISO 6946:2017</i>) $U_{RAČ}$ [$W/(m^2K)$]	Merjena toplotna prehodnost (<i>ISO 9869-1:2014</i>) U_{POV} [$W/(m^2K)$]	Odstopanje merjene vrednosti toplotne prehodnosti glede na računsko vrednosti Δ [%]	Toplotna prehodnost določena računsko (<i>UBAKUS</i>) U_{UBAK} [$W/(m^2K)$]
<i>KS 1</i>	0,329	0,464	+41,1	0,320
<i>KS 2</i>	0,239	0,298	+24,7	0,240
<i>KS 4</i>	0,107	0,082	-23,4	0,120
<i>KS 6</i>	0,107	0,127	+18,7	0,120

7.1.1 Primerjava *KS 1* in *KS 2*

Ker sta konstrukcijska sklopa podobna, lahko primerjamo vpliv namestitve dodatne toplotne izolacije na notranjo stran konstrukcijskega sklopa. Računski vrednosti $U_{RAČ1}$ in $U_{RAČ2}$ se razlikujeta za 37,7 %, medtem ko je razlika med ocenjenima merjenima vrednostima U_{POV1} in U_{POV2} kar 55,7 %. Povzamemo lahko, da z namestitvijo dodatne toplotne izolacije XPS s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,035$ $W/(mK)$ v debelini 4 cm, na obstoječo debelino toplotne izolacije, ki jo predstavlja 10 cm mineralne kamene volne s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,04$ $W/(mK)$, izboljšamo toplotno prehodnost za vsaj 37,7 % oziroma za 55,7 %. Višja vrednost predstavlja rezultat *in situ* meritve. Na dejanskem objektu je to zadostovalo za dvig notranje temperature sten in stropa, kar je vodilo v zmanjšanje oziroma izničenje pojavljanja kondenza na površini. S tem se plesen, ki je bila prisotna pred namestitvijo dodatne toplotne izolacije, ne pojavlja več.

7.1.2 Primerjava KS 4 in KS 6

Konstruktivska sklopa sta povsem identična in sta pozicionirana na severni strani objekta. Razlika je bila le v uporabi prostorov, v katerih smo izvajali meritve. Prvi prostor ni bil v uporabi, medtem ko je drugi prostor predstavljal otroško sobo z dvema uporabnikoma. Razlika med merjeno toplotno prehodnostjo ter izračunano je znašala pri KS 4 23,4 % ter pri KS 6 18,7 %. Vrednosti U_{POV4} in U_{POV6} , ki smo jih določili z meritvami in uporabo povprečne metode na KS 4 in KS 6 sta se razlikovali za kar 64,6 %. Glede na to, da so na *Grafikonu 11*, ki predstavlja merjene vrednosti gostote toplotnega toka, opazna večja nihanja takrat, ko je uporabnik v prostoru prisoten, lahko sklepamo, da je eden izmed vzrokov za razliko prav prisotnost ljudi v prostoru. Tudi na grafičnem prikazu ocenjene vrednosti merjene toplotne prehodnosti je mogoče zaznati stalno povečevanje vrednosti U_{POV6} . Za določitev bolj točne vrednosti bi bilo potrebno meritveno obdobje podaljšati. S tem bi lažje določili asimptotično vrednost, torej iskano toplotno prehodnost sklopa.

Ocenjena merjena vrednost toplotne prehodnosti za konstrukcijski sklop KS 4 je glede na izračunane vrednosti odstopala v negativni smeri. To pomeni, da je bila toplotna prehodnost določena z meritvami manjša od izračunane vrednosti. Glavni razlog za tak rezultat bi lahko bila namestitvev podometnih strojnih inštalacij (npr. kanal za prezračevanje z rekuperacijo), vendar smo vzrok po pogovoru z lastnikom objekta ovrgli in sklepamo, da je vrednost točna.

7.2 Stena nad terenom

Obravnavali smo dva eksoskeletna konstrukcijska sklopa (KS 3, KS 5), ki sta predstavljal steno nad terenom. Oba sklopa sta bila heterogena, vendar smo dodatno zanemarili delež cementne malte v opečnatem zidu ter tako upoštevali zgolj opečnate zidake. Omeniti je potrebno tudi dolžino trajanja meritve toplotne prehodnosti na primeru KS 5, saj je zaradi tehnične napake trajala zgolj 33 ur. Meritev je tako neskladna z metodologijo po standardu *ISO 9869-1:2014*, ki predvideva trajanje meritev vsaj 72 ur. Vrednosti so tabelarično prikazane v *Preglednici 24*. Dodatno smo določili tudi odstopanja merjene vrednosti od računsko določene vrednosti v odstotkih (%) in prikazali vrednosti, določene z računalniškim programom *UBAKUS*.

Preglednica 24: Tabelarični prikaz vrednosti toplotne prehodnosti U [$W/(m^2K)$] za KS 3 in KS 5

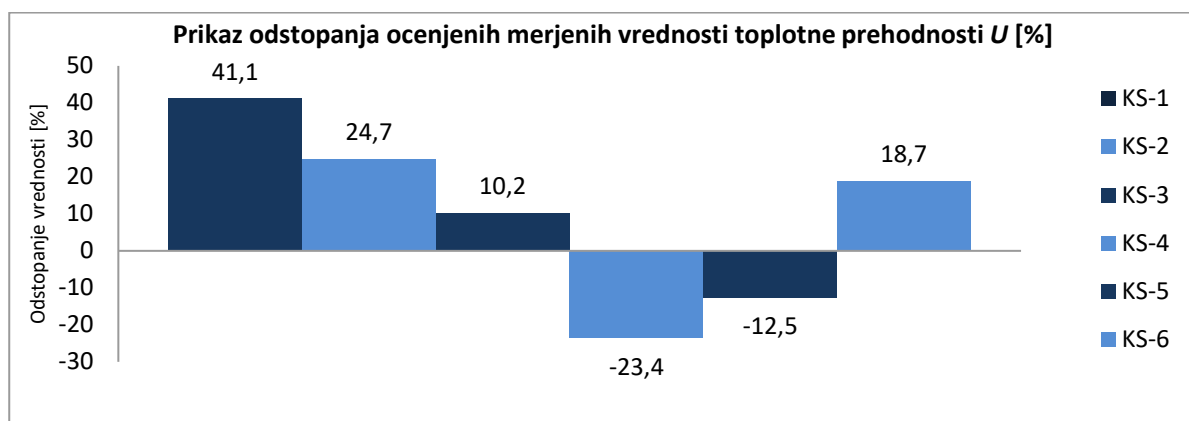
KONSTRUKCIJSKI SKLOP	Toplotna prehodnost določena računsko (<i>ISO 6946:2017</i>) $U_{RAČ}$ [$W/(m^2K)$]	Merjena toplotna prehodnost (<i>ISO 9869-1:2014</i>) U_{POV} [$W/(m^2K)$]	Odstopanje merjene vrednosti toplotne prehodnosti glede na računsko vrednost Δ [%]	Toplotna prehodnost določena računsko (<i>UBAKUS</i>) U_{UBAK} [$W/(m^2K)$]
KS 3	0,400	0,442	+10,2	0,400
KS 5	0,590	0,516	-12,5	0,590

7.2.1 Primerjava KS 3 in KS 5

Analizirana konstrukcijska sklopa sta predstavljal opečnata zidova. Vrednost, ki smo jo določili na podlagi izmerjenih vrednosti za KS 5 je vprašljiva, saj trajanje meritev ni bilo časovno usklajeno z metodologijo po standardu *ISO 9869-1:2014*. Ugotovimo lahko, da je razlika med ocenjeno merjeno vrednostjo toplotne prehodnosti in izračunano vrednostjo v primeru KS 3 najmanjša (10,2 %), sledi ji KS 5 (12,5 %). Glavni razlog za majhno razliko je gotovo enostavnost konstrukcijskih sklopov. Sklopa so sestavljali razmeroma homogeni materiali, zato so napake manjše.

7.3 Povzetek rezultatov in primerjava s sorodnimi študijami

Opazimo lahko precejšnja odstopanja med merjenimi ter izračunanimi vrednostmi toplotne prehodnosti. Večje razlike se pojavljajo v sklopih, ki so kompleksnejši in jih sestavljajo heterogeni materiali, pogosto pa je prisoten tudi sloj zraka, ki je bodisi prezračevan ali pa gre za mirujočo plast. Na dejanskem objektu je težje določljivo, v kolikšni meri je tak sloj zraka v resnici prezračevan in kako vpliva na toplotno prehodnost sklopa. Kot smo že spoznali v prejšnjih poglavjih, lahko do razlik pride tudi zaradi materialnih lastnosti, morebitnega navlaževanja materialov ter ostalih okoljskih dejavnikov. Razlike med vrednostmi so grafično prikazane na *Grafikonu 13*. Največje razlike so se pojavile pri analizi strešnih konstrukcijskih sklopov (18,7 % - 41,1 %), medtem ko so bile razlike med vrednostmi konstrukcijskih sklopov zidov manjše (do 12,5 %).



Grafikon 13: Grafični prikaz odstopanja merjenih vrednosti toplotne prehodnosti U_{POV} glede na izračunane vrednosti $U_{RAČ}$ v odstotkih [%]

Podobne rezultate v razlikah med vrednostmi so pokazale tudi ostale študije. Za primerjavo si lahko ogledamo nekatere ugotovitve, do katerih so z analizo merjenih in izračunanih vrednosti toplotne prehodnosti prišli Koštomaj A. [24], Pintar Grebenec N. [25] ter Malerič L. [26]. Rezultati primerjav so prikazani v *Preglednici 25*. Meritve toplotne prehodnosti so bile v primeru Maleriča in Pintar Grebenčeve izvedene na starejših objektih, medtem ko je bila v primeru Koštomajeve analizirana novejša stavba. Negativni predznak pomeni, da je bila merjena vrednost nižja, in obratno, pozitiven predznak označuje višje merjene vrednosti v primerjavi z izračunanimi vrednostmi toplotne prehodnosti.

Preglednica 25: Primerjava odstopanja vrednosti toplotne prehodnosti v odstotkih [%].

KONSTRUKCIJSKI SKLOP	Odstopanja merjenih vrednosti toplotne prehodnosti glede na izračunane vrednosti [%]		
	Koštomaj A.	Malerič L.	Pintar Grebenec N.
ZUNANJA STENA	-12	-62 -18 -51	-44, -46, -48, -13, -17, +6, -41, +8
STREHA V NAKLONU	-18	/	-59
STREHA RAVNA	/	/	-66, +61
TLA	+40	-93	+214
STROP PROTI NEOGREVANEMU PROSTORU	+13	/	-43, -56

Opazimo, da so odstopanja med vrednostmi lahko zelo velika. V primeru konstrukcijskega sklopa zunanje stene je tako merjena vrednost odstopala od izračunane vrednosti na podlagi meritev med 8 %

in 62 %, kar pomeni, da so bile izračunane vrednosti skoraj dvakrat višje v primeru meritev, ki jih je izvajal Malerič.[26] Podobno je s preostalimi sklopi, kjer izstopajo razlike v konstrukcijskih sklopih ravne strehe. Največje odstopanje merjene vrednosti toplotne prehodnosti je 61 %. V primeru analiziranja stropa proti neogrevanemu podstrešju, ki ga je izvedla Pintar Grebenčeva so merjene vrednosti do 56 % nižje.[25] Največje razlike med vrednostmi so bile vidne v analizi konstrukcijskega sklopa tal. Merjena vrednost toplotne prehodnosti tal je bila 93 % nižja kot izračunana vrednost v primeru meritev, ki jih je izvajal Malerič.[26] Nasprotno, pa so bile merjene vrednosti 214 % višje v analizi Pintar Grebenčeve.[25] V kolikor primerjamo prikazane vrednosti, lahko opazimo, da do večjih razlik med vrednostmi toplotne prehodnosti prihaja pri analizah starejših objektov, medtem ko so razlike pri analizi novejšega objekta manjše in so podobne, kot smo jih izvednotili tudi sami. Možni vzroki za taka odstopanja predvsem pri starejših objektih bi lahko bili nepoznavanje točne sestave konstrukcijskih sklopov in uporabljenih materialov, različne materialne lastnosti, nehomogenost materialov ter morebitne zračne plasti.

7.4 Skladnost vrednosti toplotne prehodnosti z veljavnim pravilnikom (*PURES 2010*)

Glede na to, da je bil objekt *Hiša 1* zgrajen pred sprejetjem *Pravilnika o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES 2010)* primerjava z vrednostmi iz pravilnika ni smiselna. Vrednosti so prikazane v *Preglednici 26*. Vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov so neustrezne in ne zadostujejo zahtevam pravilnika, vendar so vseeno uporabne za primer, da se uporabniki odločijo za izvedbo sanacije objekta ali izdelavo energetske izkaznice objekta. Vrednosti (izračunane in merjene) so lahko dobra osnova za izračun debeline dodatne toplotne izolacije, ki jo je potrebno namestiti, da bodo vrednosti toplotne prehodnosti skladne z veljavno zakonodajo.

Ker nam računalniški program *UBAKUS* omogoča enostavno upravljanje z modeliranimi sklopi, lahko preverimo za koliko je potrebno povečati debelino toplotne izolacije, da bi zadostili zahtevam pravilnika, ki so prikazane v *Preglednici 26*, glede maksimalnih vrednosti toplotnih prevodnosti U_{max} . V primeru *KS 1* bi zadostovala za izpolnjevanje zahtev pravilnika glede maksimalne toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa že namestitev dodatnih 7 cm mineralne volne s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$ in s tem doseganje vrednosti $U_{UBAK1-I}=0,197 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Podobno lahko ugotovimo za *KS 2*, da že dodatnih 3 cm mineralne volne s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$ zadošča za doseganje toplotne prevodnosti $U_{UBAK2-I}=0,196 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Za doseganje zahtev iz pravilnika pa bi morali konstrukcijski sklop *KS 3* dodatno obložiti s 5 cm ekspaniranega polistirena (XPS) s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,040 \text{ W/(mK)}$, da bi tako dosegli zmanjšanje toplotne prehodnosti na $U_{UBAK3-I}=0,268 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Primerjava vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov na objektu *Hiša 2* z vrednostmi iz pravilnika, ki so prikazane v *Preglednici 26*, pa pokaže, da so strešni konstrukcijski sklopi *KS 4* in *KS 6* skladni z zahtevami v *PURES 2010*. Obe vrednosti toplotne prehodnosti sta manjši od zahtevane U_{max} . Dodatno pa lahko z računalniškim programom *UBAKUS* določimo potrebno debelino toplotnega ovoja zunanjih zidov *KS 5* za doseganje zahtev glede vrednosti toplotne prevodnosti U_{max} v skladu z veljavnim pravilnikom. Ugotovimo lahko, da bi zadoščala namestitev že 8 cm ekspaniranega polistirena (EPS) s koeficientom toplotne prevodnosti $\lambda=0,040 \text{ W/(mK)}$. S tem bi zmanjšali toplotno prehodnost sklopa na $U_{UBAK5-I}=0,271 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Navedene ugotovitve glede zadoščanja zahtevam *PURES 2010* veljajo le za določanje maksimalne toplotne prehodnosti U_{max} posameznega konstrukcijskega sklopa.

Preglednica 26: Meje vrednosti toplotnih prehodnosti U_{max} [W/(m²K)] za konstrukcijske sklope.[7]

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore	U_{max} [W/(m ² K)]
Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,28
Strop proti neogrevanemu prostoru, strop v sestavi ravnih ali poševnih streh	0,20

8 ZAKLJUČEK

K doseganju zadostne toplotne učinkovitosti stavb gotovo v največji meri vpliva prav uporaba toplotno izolativnih materialov v konstrukcijskih sklopih in s tem doseganje ustreznih vrednosti toplotne prehodnosti elementov in sklopov. Kvalitetna izvedba detajlov, izbira pravih materialov in upoštevanje termodinamičnih lastnosti gradiv so kriteriji, ki jamčijo trajnostno izvedbo konstrukcijskih sklopov in zmanjšanje toplotnih izgub in energije za ogrevanje oziroma hlajenje.

Ugotovili smo, da so bile v štirih primerih merjene vrednosti toplotne prehodnosti višje, v dveh primerih pa se je izkazalo, da so višje računske vrednosti toplotne prehodnosti. Razlogov za odstopanja med vrednostmi je lahko več. Glede na to, da smo v diplomskem delu obravnavali razmeroma novi stavbi in smo sestavo konstrukcijskih sklopov dobro poznali, lahko sklepamo, da je do razlik privedlo predvsem neustrezno upoštevanje zračnih slojev v sklopih, kjer so bili prisotni. Dodatno ni povsem izključeno tudi propadanje in navlaževanje toplotno izolacijskih materialov. Predvsem na strešnih konstrukcijskih sklopih objekta *Hiša 1* so zaščitne konstrukcije (sekundarna kritina) neučinkovite in neustrezno vgrajene, kar lahko privede do navlaževanja toplotno-izolacijskega sloja in s tem do manjše toplotne upornosti. Prav tako smo upoštevali tudi nekatere poenostavitve v računskem določevanju toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Določene heterogene sloje smo modelirali kot homogene plasti in s tem zanemarili materiale, ki sicer v manjši meri vplivajo na toplotno prehodnost sklopov (npr. zidna malta, delež lesenih elementov v zračnih sloji). Našteto se odraža kot povišanje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov, ki se odraža tudi v merjenih vrednostih. Potrdimo lahko domnevo, da za določanje ocenjenih merjenih vrednosti toplotne prehodnosti zadošča predpisan čas trajanja, ki je 72 ur, v kolikor se robni pogoji relativno malo spreminjajo. Izjemoma smo v primeru *KS 5* dobili zavajajoče rezultate, saj je bilo trajanje meritev mnogo krajše, prav tako pa smo za primer *KS 6* opazili neznačilno naraščanje merjene toplotne prehodnosti. V obeh primerih bi bilo smiselno meritev podaljšati in tako pridobiti točnejše vrednosti.

Uporaba računalniškega programa *UBAKUS* se je izkazala kot primerno orodje za določevanje toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Uporaba je razmeroma preprosta in zato omogoča modeliranje konstrukcijskih sklopov ter določevanje toplotne prehodnosti tudi uporabnikom, ki nimajo poglobljenega znanja s področja gradiv in termodinamičnih lastnosti materialov. Dodatna prednost so dodatne analize sklopov, ki omogočajo prikaz ostalih termodinamičnih količin, kot so določevanje poteka difuzije vodne pare, določevanje poteka temperaturne linije s spremenljivimi robnimi pogoji (nihanje temperature) ter nenazadnje dinamično analizo konstrukcijskega sklopa. Slednja razmeroma preprosto prikaže amplitudo dušenja temperaturnega nihanja ter fazni zamik temperature.

Kljub temu, da se vrednosti, ki smo jih določili računsko, ter vrednosti, ki smo jih ovrednotili na podlagi izvedenih meritev, razlikujejo, lahko trdimo, da je uporaba *in-situ* meritev smiselna. Predvsem je uporabna v primerih, ko ne poznamo materialnih karakteristik konstrukcijskih sklopov, določevanje le-teh pa bi pomenilo poslabšanje stanja oziroma to sploh ni mogoče. Omeniti velja, da smo meritve vrednosti toplotne prehodnosti za potrebe diplomskega dela opravljali le na osovinskih straneh objektov (orientacija severovzhod-severozahod) in v relativno kratkih časovnih obdobjih (3-4 dni) v zimskem času. Zato bi bilo smiselno preveriti tudi vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov z orientacijo proti jugu ter s tem preučiti vpliv sončevega sevanja na toplotni tok in posledično na vrednosti toplotne prehodnosti. Za oceno relevantnih vrednosti toplotne prehodnosti in same energetske učinkovitosti bi bilo torej potrebno stavbo in konstrukcijske sklope analizirati širše. Opraviti bi bilo potrebno večje število meritev v različnih pogojih in ovrednotiti zunanje vplive npr. nihanja temperature in vlage v zraku, orientacijo konstrukcijskih sklopov, vpliv akumulirane toplote ipd. Vrednosti toplotne prehodnosti, pridobljene z uporabo meritev, so torej lahko dober pokazatelj dejanskega stanja in s tem realna podlaga za izračun ostalih faktorjev učinkovite rabe energije v stavbah, v kolikor se izvedbe meritev in postavitve merilne opreme lotimo strokovno in z ozirom na dejavnike, ki bi lahko vplivali na točnost pridobljenih merjenih vrednosti.

9 VIRI

- [1] Energy Performance in Buildings Directive. 2019.
[http\(s\)://ec.europa.eu/energy/en/content/factsheet-energy-performance-buildings-directive](http(s)://ec.europa.eu/energy/en/content/factsheet-energy-performance-buildings-directive).
(Pridobljeno 15. 11. 2019.)
- [2] Vrste predpisov v Evropski uniji. 2019.
[http\(s\)://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/types-eu-law_sl](http(s)://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/types-eu-law_sl). (Pridobljeno 02. 12. 2019.)
- [3] Energetska učinkovitost. 2019.
[http\(s\)://www.europarl.europa.eu/factsheets/sl/sheet/69/energetska-ucinkovitost](http(s)://www.europarl.europa.eu/factsheets/sl/sheet/69/energetska-ucinkovitost). (Pridobljeno 02. 11. 2019.)
- [4] Gradbeni zakon (Uradni list RS, št. 61/17 in 72/17 – popr.). 2017.
[http\(s\)://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7108](http(s)://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7108). (Pridobljeno 03. 12. 2019.)
- [5] Energetski zakon (Uradni list RS, št. 60/19 – uradno prečiščeno besedilo). 2014.
[http\(s\)://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO6665](http(s)://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO6665). (Pridobljeno 04. 12. 2019.)
- [6] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 52/10 in 61/17 – GZ). 2010.
[http\(s\)://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV10043](http(s)://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV10043). (Pridobljeno 09. 12. 2019.)
- [7] Tehnična smernica TSG-1-004:2010 Učinkovita raba energije. 2010.
[http\(s\)://www.zaps.si/img/admin/file/WWW_ZAPS/ARH_1_14/1_14_2_Tehnicna_smernica_raba_energije_TSG-1-004_2010.pdf](http(s)://www.zaps.si/img/admin/file/WWW_ZAPS/ARH_1_14/1_14_2_Tehnicna_smernica_raba_energije_TSG-1-004_2010.pdf). (Pridobljeno 05. 11. 2019.)
- [8] Kladnik, R., Kovačič, C. 1991. Visokošolska fizika, Del 1: Mehanski in toplotni pojavi. Ljubljana, DZS.
- [9] Cvikel, B. 2002. Gradbena fizika. Maribor, Univerza v Mariboru.
- [10] Prek, M. 2013. Toplotne izgube: Toplotna upornost homogenih konstrukcij. Ljubljana, Univerza v Ljubljani.
- [11] Kunič, R. 2009. Mehanizem prehoda toplote skozi konstrukcijske sklope v stavbah. Gradbenik, vol. 11/2009.
- [12] Toplotna prehodnost in difuzija vodne pare (UL FGG, KSKE). 2009.
[http\(s\)://www.kske.fgg.uni-lj.si](http(s)://www.kske.fgg.uni-lj.si). (Pridobljeno 15. 03. 2020.)
- [13] Technical Committee ISO/TC 163, 2017. ISO 6946, Building components and building elements: Thermal resistance and thermal transmittance. Second. Geneva.
- [14] Technical Committee ISO/TC 163, 2014. ISO 9869-1, Building elements: In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. First. Geneva.
- [15] UBAKUS. 2017.
[http\(s\)://www.ubakus.de/](http(s)://www.ubakus.de/). (Pridobljeno 16. 02. 2020.)
- [16] Heat Flow plates. 2019.
[http\(s\)://www.ahlborn.com/en_UK/products/heat-flow-plates](http(s)://www.ahlborn.com/en_UK/products/heat-flow-plates). (Pridobljeno 10. 02. 2020.)
- [17] Thermo-wires, compensation lines and connectors for thermocouples. 2019.
[http\(s\)://www.ahlborn.com/en_UK/products/thermo-wires-compensation-lines-and-connectors-for-thermocouples](http(s)://www.ahlborn.com/en_UK/products/thermo-wires-compensation-lines-and-connectors-for-thermocouples). (Pridobljeno 10. 02. 2020.)
- [18] Precision measuring instrument and data logger ALMEMO 2690'8A. 2019.
[http\(s\)://www.ahlborn.com/en_UK/products/precision-measuring-instrument-and-data-logger-almemo-2690-8a](http(s)://www.ahlborn.com/en_UK/products/precision-measuring-instrument-and-data-logger-almemo-2690-8a). (Pridobljeno 10. 02. 2020.)

-
- [19] Prostorski informacijski sistem občin. 2017.
[http\(s\)://www.geoprostor.net/PisoPortal/Default.aspx?](http(s)://www.geoprostor.net/PisoPortal/Default.aspx?) (Pridobljeno 20. 02. 2020.)
- [20] Agencija RS za okolje - Meteo. 2019.
[http\(s\)://www.meteo.si](http(s)://www.meteo.si). (Pridobljeno 22. 02. 2020.)
- [21] OSB 3 PUR - The universal OSB panel. 2019.
[http\(s\)://www.sonaearauco.com/en/agepan-system/agepan-osb-3-ecoboard_1724-2121.html?t=1](http(s)://www.sonaearauco.com/en/agepan-system/agepan-osb-3-ecoboard_1724-2121.html?t=1). (Pridobljeno 08. 03. 2020.)
- [22] Wienerberger - POROTHERM 30 S P+E. 2020.
[http\(s\)://www.wienerberger.si/content/dam/wienerberger/slovenia/marketing/documents-magazines/brochures/SI_MKT_BRO_WAL_POR_Mapa_za_projektante.pdf](http(s)://www.wienerberger.si/content/dam/wienerberger/slovenia/marketing/documents-magazines/brochures/SI_MKT_BRO_WAL_POR_Mapa_za_projektante.pdf). (Pridobljeno 15. 03. 2020.)
- [23] Infrared red camera with MSX® FLIR E4. 2019.
[http\(s\)://www.flir.com/products/e4/](http(s)://www.flir.com/products/e4/). (Pridobljeno 16. 03. 2020.)
- [24] Koštomaj, A. 2018. In-situ meritve energijskih kazalnikov in kazalnikov kakovosti notranjega okolja na primeru pasivne hiše. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [25] Pintar Grebenec, N. 2017. Merjena in izračunana toplotna prehodnost toplotnih ovojev izbranih stavb Univerze v Ljubljani. Magistrsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [26] Malerič, L. 2018. Energijska prenova ovoja stavbe v smeri zagotavljanja kakovostnega notranjega okolja in učinkovite rabe energije enodružinske hiše v Ljubljani. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.