

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Ivanšek, D. 2012. Numerična analiza prehoda toplote na stikih Qbiss Air fasadnega sistema. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B., somentor Žnidaršič, M.): 131 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Ivanšek, D. 2012. Numerična analiza prehoda toplote na stikih Qbiss Air fasadnega sistema. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B., co-supervisor Žnidaršič, M.): 131 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

**DOMEN IVANŠEK**

**NUMERIČNA ANALIZA PREHODA TOPLOTE NA  
STIKIH QBISS AIR FASADNEGA SISTEMA**

Diplomska naloga št.: 3277/KS

**NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER AT THE  
JOINTS OF QBISS AIR FACADE SYSTEM**

Graduation thesis No.: 3277/KS

**Mentor:**

prof. dr. Boštjan Brank

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentor:**

dr. Matjaž Žnidaršič

**Član komisije:**

doc. dr. Sebastjan Bratina

asist. dr. Mitja Košir

doc. dr. Živa Kristl

Ljubljana, 21. 12. 2012

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

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



## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Podpisani Domen Ivanšek izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Numerična analiza prehoda toplote na stikih Qbiss Air fasadnega sistema«.

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

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

Ljubljana, 12.12.2012

Domen Ivanšek

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>519.63:692.23:699.86(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Domen Ivanšek</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Boštjan Brank</b>
<b>Somentor:</b>	<b>dr. Matjaž Žnidaršič</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Numerična analiza prehoda toplote na stikih Qbiss Air fasadnega sistema</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>131 str., 39 pregl., 3 graf., 103 sl., 175 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>toplotna analiza, končni elementi, Qbiss Air, linijski toplotni mostovi, Ansys</b>

### **Izvleček**

Diplomsko delo je študija prehoda toplote v treh izbranih detajlih Qbiss Air fasadnega sistema, ki ga proizvajata Trimo d.d. Ti detajli so: (A) bočni stik dveh fasadnih panelov v vogalu, ki gleda navznoter, (B) stik dveh fasadnih panelov v vogalu, ki gleda navzven ter (C) stik fasadnega panela s temeljno gredo. Narejene so ravninske numerične analize po metodi končnih elementov, s katerimi je simulirano prehajanje toplote skozi omenjene detajle pri stacionarnih pogojih. Pri pripravi računskih modelov je bil upoštevan standard SIST EN ISO 10211. Kompleksna geometrija vseh detajlov je z vsemi podrobnostmi pripravljena v programu Catia V5. Numerične analize so izvedene s programskim paketom Ansys 13.0, določene so bile tudi optimalne mreže končnih elementov. Na podlagi rezultatov numerične analize sta se za vsak detajl izračunala faktor linijskega toplotnega mostu ( $\psi$ ) in temperaturni faktor toplotnega mostu ( $f_{RSi}$ ). Ti faktorji so podlaga za izračun toplotne prehodnosti ( $H_T$ ) za stavbe s fasado iz Qbiss Air elementov. Na koncu so na podlagi dobljenih rezultatov predlagane možnosti za morebitne izboljšave detajlov.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 519.63:692.23:699.86(043.2)  
**Author:** Domen Ivanšek  
**Supervisor:** prof. Boštjan Brank, Ph.D.  
**Co-advisor:** Matjaž Žnidaršič, Ph.D.  
**Title:** Thermal analysis of joints of Qbiss Air façade system  
**Notes:** 131 p., 39 tab., 3 gr., 103 fig., 175 eq.  
**Key words:** thermal analysis, finite elements, Qbiss Air, linear thermal bridges, Ansys

**Abstract**

The thesis presents a study of heat transfer in three selected details of Qbiss Air façade system, produced by Trimo d.d. These details are as follows: (A) lateral contact of two façade panels in the corner, facing inwards, (B) contact of two façade panels in the corner, facing outwards and (C) the façade panel - foundation base junction. Two-dimensional numerical analysis using finite element method was used to simulate steady-state heat transfer at described junctions. Complex geometry of all details was designed using Catia V5 software regarding to standard SIST EN ISO 10211. Numerical analyses were carried out using software package Ansys 13.0 and optimal finite element meshes of details were determined. Based on the results of numerical analysis, linear thermal transmittance ( $\psi$ ) and temperature factor at the internal surface ( $f_{RSi}$ ) were calculated for each detail. These factors are the basis for the calculation of transmission heat transfer coefficient ( $H_T$ ) of buildings with Qbiss Air façade system. Based on the obtained results, possibilities for eventual future improvements of details were suggested.

## **ZAHVALA**

Na prvem mestu bi se zelo lepo zahvalil ekipi CBS Inštituta in Trima (po abecednem vrstnem redu): dr. Mojci Japelj Fir, mag. Alešu Kralju, dr. Urošu Leskovšku, mag. Črtomiru Remcu in seveda somentorju dr. Matjažu Žnidaršiču, ki so me prijazno sprejeli k sodelovanju in mi s tem omogočili delo na tej zanimivi diplomski temi.

Iskreno se zahvaljujem tudi mentorju, prof. dr. Boštjanu Branku za koristne nasvete in literarno podporo.

Zahvala gre tudi staršema, predvsem za vso izkazano finančno podporo, ki mi je omogočila študij.



**KAZALO VSEBINE**

<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....</b>	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA .....</b>	<b>V</b>
<b>KAZALO VSEBINE .....</b>	<b>VI</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>IX</b>
<b>KAZALO GRAFIKONOV.....</b>	<b>XI</b>
<b>KAZALO SLIK .....</b>	<b>XII</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 QBISS AIR FASADNI SISTEM .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Opis .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Sestava panela.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Montaža .....</b>	<b>6</b>
<b>3 PREHAJANJE TOPLOTE V DVODIMENZIONALNEM PROSTORU.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1 Mehanizmi prenašanja toplote .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2 Toplotna prevodnost in toplotna prehodnost.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 Dvodimenzionalni linijski toplotni mostovi.....</b>	<b>12</b>
<b>3.3.1 Izračun linijskih toplotnih mostov po standardu SIST EN ISO 10211 .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3.2 Temperaturni faktor toplotnega mostu .....</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Priprava geometrijskega modela za računalniško analizo .....</b>	<b>15</b>
<b>3.5 Mreženje.....</b>	<b>17</b>
<b>3.6 Ovrednotenje zanesljivosti rezultatov.....</b>	<b>17</b>
<b>3.7 Tipi končnih elementov .....</b>	<b>18</b>
<b>3.8 Formulacija dvodimenzionalne analize prehoda toplote s trikotnimi končnimi elementi .....</b>	<b>20</b>
<b>4 SPOZNAVANJE PROGRAMA ZA NUMERIČNO ANALIZO PO METODI KONČNIH ELEMENTOV .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Referenčni testni primer 1 .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2 Referenčni testni primer 2 .....</b>	<b>33</b>

4.3	Testni primer 3 – ročni izračun.....	36
4.3.1	Račun s programskim paketom Ansys.....	42
4.4	Nestacionarna toplotna analiza dimnika.....	46
5	DETAJL VOGAL NAVZNOTER.....	50
5.1	Vhodni podatki .....	50
5.1.1	Opis detajla .....	50
5.1.2	Opis geometrijskega modela.....	51
5.1.3	Toplotne prevodnosti materialov .....	52
5.1.4	Robni pogoji.....	62
5.1.5	Mreža končnih elementov .....	63
5.2	Rezultati .....	64
5.2.1	Potek temperatur.....	64
5.2.2	Toplotni tok.....	65
5.3	Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake.....	69
6	DETAJL VOGAL NAVZVEN.....	72
6.1	Vhodni podatki .....	72
6.1.1	Opis detajla .....	72
6.1.2	Opis geometrijskega modela.....	73
6.1.3	Toplotne prevodnosti materialov .....	74
6.1.4	Robni pogoji.....	82
6.1.5	Mreža končnih elementov .....	83
6.2	Rezultati .....	84
6.2.1	Potek temperatur.....	84
6.2.2	Toplotni tok.....	85
6.3	Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake.....	90
7	DETAJL STIKA PANELA QBISS AIR – TEMELJNA GREDA.....	93
7.1	Vhodni podatki .....	93
7.1.1	Opis detajla .....	93
7.1.2	Opis geometrijskega modela.....	94
7.1.3	Toplotne prevodnosti materialov .....	96

---

7.1.4	Robni pogoji.....	99
7.1.5	Mreža končnih elementov .....	99
7.2	Rezultati.....	100
7.2.1	Potek temperatur.....	100
7.2.2	Toplotni tok.....	101
7.3	Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake.....	107
8	DODATNE VARIANTE MREŽENJA.....	109
8.1	Primerjava mrež detajla vogala navzven .....	109
8.2	Kvaliteta mreže.....	110
9	OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA IN PREDLOGI IZBOLJŠAV .....	114
9.1	Pregled rezultatov osnovnih variant .....	114
9.2	Občutljivostna analiza stika Qbiss Air panela s temeljno gredo.....	114
9.3	Predlogi izboljšav v detajlu vogal navzven.....	118
9.3.1	Thermal Wrap™ aerogelna odeja .....	119
9.3.2	Spaceloft® odeja .....	120
9.3.3	Alternativa aluminijastemu profilu .....	122
10	ZAKLJUČEK .....	127
VIRI	.....	128

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti za $R_{\alpha,i}$ in $R_{\alpha,e}$ po standardu SIST EN ISO 6946. Vrednosti v vrstici »vodoravno« veljajo za smeri toka $\pm 30^\circ$ od horizontalne ravnine .....	11
Preglednica 2: Primerjava rezultatov grobe mreže končnih elementov dimenzij 100x100 mm z analitičnimi vrednostmi .....	32
Preglednica 3: Primerjava rezultatov zgoščene mreže končnih elementov dimenzij 50x50 mm z analitičnimi vrednostmi .....	33
Preglednica 4: Primerjava temperatur v karakterističnih točkah z analitičnimi vrednostmi .....	36
Preglednica 5: Povezava med končnimi elementi in njihovimi vozlišči .....	37
Preglednica 6: Primerjava med rezultati iz programa Ansys in ročnega izračuna po metodi končnih elementov .....	43
Preglednica 7: Primerjava rezultatov trikrat zgoščene mreže in ročnega izračuna .....	44
Preglednica 8: Rezultati nestacionarne analize v času $t=300000$ s .....	48
Preglednica 9: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo .....	52
Preglednica 10: Toplotna upornost (v $m^2K/W$ ) neprezračevanih zračnih plasti po SIST EN ISO 6946 .....	53
Preglednica 11: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu vogala navzven .....	57
Preglednica 12: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu vogala navzven .....	60
Preglednica 13: Izračun toplotne prehodnosti stene ( $U_w$ ), ki jo tvori Qbiss Air panel s sekundarno mavčno-kartonsko ploščo, med katerima je tanek zračni sloj .....	68
Preglednica 14: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov .....	69
Preglednica 15: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov .....	71
Preglednica 16: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo .....	74
Preglednica 17: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu vogal navzven .....	77
Preglednica 18: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu vogal navzven .....	80
Preglednica 19: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov .....	91
Preglednica 20: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov .....	92
Preglednica 21: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo .....	96
Preglednica 22: Nadomestne toplotne prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo .....	98
Preglednica 23: Nadomestne toplotne prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo .....	98
Preglednica 24: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov, zaokroženo na tri decimalna mesta .....	107
Preglednica 25: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov .....	108
Preglednica 26: Primerjava rezultatov posameznih mrež .....	109
Preglednica 27: Korelacija med vrednostjo asimetrije in kvaliteto končnega elementa .....	111
Preglednica 28: Rezultati stacionarne toplotne analize linijskih toplotnih mostov .....	114
Preglednica 29: Detajl temeljne grede z in brez ekstrudiranega polistirena .....	114
Preglednica 30: Detajl stika s temeljno gredo z in brez sloja mineralne volne .....	115

---

Preglednica 31: Učinek vgradnje aerogelnega produkta Thermal Wrap TW350.....	120
Preglednica 32: Učinek vgradnje aerogelnega produkta Thermal Wrap TW600.....	120
Preglednica 33: Učinek vgradnje aerogelne odeje Spaceloft .....	121
Preglednica 34: Vrednost toplotnega toka na meter dolžine stika po elementih detajla .....	123
Preglednica 35: Primerjava rezultatov jeklenega in aluminijastega profila .....	123
Preglednica 36: Lastnosti ojačitvenih vlaken v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov) .....	124
Preglednica 37: Lastnosti polimernih matric v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov) .....	124
Preglednica 38: Lastnosti kvazi-izotropnih polimernih kompozitov v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov).....	125
Preglednica 39: Primerjava rezultatov detajla vogal navzven z aluminijastim profilom in profilom iz polimernega matričnega kompozita.....	126

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Graf odvisnosti rezultatov od gostote mreže .....	44
Grafikon 2: Primerjava rezultatov ob zgoščanju mreže končnih elementov.....	45
Grafikon 3: Mreža končnih elementov na celotnem prerezu dimnika (zgoraj) ter razlika v rezultatih med trikrat zgoščenima mrežama celotnega prereza in osmino prereza .....	46

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Trend porabe primarne energije v Evropski uniji (Generalni direktorat za energijo, 2011) .....	2
Slika 2: Detajli stikovanj fasadnih panelov Qbiss Air sistema, ki jih bom obravnaval v tej nalogi: A) vogal navznoter, B) vogal navzven in C) stik panela s temeljno gredo (Spletna stran Qbiss Air).....	3
Slika 3: Sestava fasadnega panela Qbiss Air (spletna stran Qbiss Air).....	5
Slika 4: Qbiss Air panel v prerezu (levo), stik dveh panelov v horizontalnem prerezu (desno) ( Qbiss Air spletna stran, 2012) .....	6
Slika 5: Referenčna objekta: Vrtec Mavrica, Trebnje (levo) in Paviljon, Trimo d.d., Trebnje (desno). 7	7
Slika 6: Toplotni tok ima nasprotno smer kot gradient temperature (na sliki je $\theta_i > \theta_e$ ) .....	9
Slika 7: Vektor specifičnega toplotnega toka .....	10
Slika 8: Primer dvodimenzionalnega toplotnega mostu .....	13
Slika 9: Postopek uvoza geometrije iz CAD programov v Ansys .....	16
Slika 10: Prikaz končnega elementa PLANE 35 z oznakami vozlišč in naravnih koordinat .....	18
Slika 11: Prikaz končnega elementa PLANE 55 z oznakami vozlišč.....	19
Slika 12: Prikaz končnega elementa PLANE 77 z oznakami vozlišč.....	19
Slika 13: Prikaz trikotnega končnega elementa.....	20
Slika 14: Enotski vektor normale na robu končnega elementa.....	24
Slika 15: Prehod toplote v smeri toplotnega toka $q_n$ .....	25
Slika 16: Pravokotni trikotni končni element .....	26
Slika 17: Konvekcijski robni pogoj na robu ij.....	27
Slika 18: Konvekcijski robni pogoj na robu jk-.....	28
Slika 19: Specifični toplotni tok na robu končnega elementa .....	30
Slika 20: Skica modela za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	31
Slika 21: Groba mreža končnih elementov za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	32
Slika 22: Zgoščena mreža končnih elementov za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	33
Slika 23: Vhodni podatki za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	34
Slika 24: Mreža končnih elementov za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	34
Slika 25: Razporeditev temperatur za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211 .....	35
Slika 26: Konturni prikaz specifičnega toplotnega toka $q$ [W/m <sup>2</sup> ] .....	35
Slika 27: Vektorski prikaz specifičnega toplotnega toka $q$ [W/m <sup>2</sup> ].....	36
Slika 28: Shematski prikaz modela dimnika. Zaradi simetrije analiziramo le osmino prereza. ....	37
Slika 29: Pravokotni končni element.....	38
Slika 30: Temperaturna distribucija po osmini dimnika z osnovno mrežo končnih elementov .....	42
Slika 31: Celotni specifični toplotni tok, $q_{max} = 508,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $q_{min} = 168,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	43
Slika 32: Prikaz mrež KE pri avtomatski 1-kratni, 2-kratni in 3-kratni zgostitvi mreže .....	43
Slika 33: Model celotnega prereza dimnika .....	45
Slika 34: Nestacionarni robni pogoj na notranji površini dimnika (končni čas je bil 300.000 s, na grafu je prikazano do $t = 10.000$ s, da je viden 1. korak .....	47
Slika 35: Časovno odvisno spreminjanje temperature v vozlišču 9. Graf T-t je za ostala vozlišča podobne oblike .....	47
Slika 36: Časovno odvisno spreminjanje največjega in najmanjšega specifičnega toplotnega toka $q$ [W/m <sup>2</sup> ] .....	48

Slika 37: 3D prikaz stika dveh Qbiss Air panelov v vogalu fasade navznoter (Tehnični list Qbiss Air, 2011) .....	50
Slika 38: 2D shematski prikaz detajla vogala navznoter (Tehnični list Qbiss Air, 2011).....	51
Slika 39: Dimenzije 2D računskega modela iz programa Catia V5 .....	52
Slika 40: Prikaz materialov v detajlu vogal navznoter .....	54
Slika 41: Določitev nadomestne toplotne prevodnosti jedra panela Qbiss Air .....	54
Slika 42: Pravokotna zračna rega. Dimenzija d je največja dimenzija rege v smeri toplotnega toka, dimenzija b pa je največja dimenzija rege pravokotno na smer toplotnega toka. $\epsilon_1$ in $\epsilon_2$ sta emisivnosti sten, ki obdajata rego v smeri toplotnega toka. ....	55
Slika 43: Transformacija nepravokotne rege po standardu SIST EN ISO 10077-2.....	56
Slika 44: Delno prezračevane rege.....	56
Slika 45: Prikaz zračnih reg na zgornjem delu detajla vogal navznoter.....	57
Slika 46: Prikaz zračnih reg na spodnjem delu detajla vogal navznoter .....	57
Slika 47: Predpisani robni pogoji na detajlu vogala navznoter .....	63
Slika 48: Osnovna mreža končnih elementov za vogal navznoter .....	64
Slika 49: Razpored temperatur vogala navznoter.....	65
Slika 50: Potek dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v vogalu navznoter v konturnem (zgoraj) in vektorskem (spodaj) prikazu .....	66
Slika 51: Potek spec. toplotnega toka v smeri X v vogalu navznoter .....	67
Slika 52: Potek spec. toplotnega toka v smeri Y v vogalu navznoter .....	68
Slika 53: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navznoter.....	69
Slika 54: Mreža s 3,4% končnih elementov osnovne mreže .....	71
Slika 55: 3D prikaz stika dveh Qbiss Air panelov v vogalu navzven (Qbiss Air tehnični list, 2011) ..	72
Slika 56: 2D shematski prikaz detajla vogala navzven (Qbiss Air tehnični list, 2011) .....	73
Slika 57: Dimenzije 2D računskega modela iz programa Catia V5.....	73
Slika 58: Prikaz materialov v detajlu vogal navzven .....	75
Slika 59: Prikaz zračnih reg na zgornjem delu detajla vogal navzven .....	76
Slika 60: Prikaz zračnih reg na srednjem delu detajla vogal navzven .....	76
Slika 61: Prikaz zračnih reg na spodnjem delu detajla vogal navzven.....	77
Slika 62: Predpisani robni pogoji na detajlu vogala navzven .....	83
Slika 63: Osnovna mreža končnih elementov za detajl navzven .....	84
Slika 64: Razpored temperatur vogala navzven .....	85
Slika 65: Točka najnižje temperature na notranji površini konstrukcije.....	85
Slika 66: Potek celotnega dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v vogalu navzven v konturnem (zgoraj) in vektorskem (spodaj) prikazu .....	87
Slika 67: Maksimalni celotni specifični toplotni tok v vogalu navzven .....	88
Slika 68: Potek spec. toplotnega toka v smeri X v vogalu navzven.....	88
Slika 69: Potek spec. toplotnega toka v smeri Y v vogalu navzven.....	89
Slika 70: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navzven .....	91
Slika 71: Mreža s 4,4% končnih elementov osnovne mreže .....	92
Slika 72: 3D prikaz stika Qbiss Air panela in temeljne grede (Tehnični list Qbiss Air, 2011).....	93
Slika 73: 2D shematski prikaz stika Qbiss Air panela s temeljno gredo (Tehnični list Qbiss Air, 2011) .....	94
Slika 74: Potrebni razponi računskega modela za izračun prehoda toplote skozi konstrukcijski element, ki je v stiku z zemljinjo (SIST EN ISO 10211).....	94

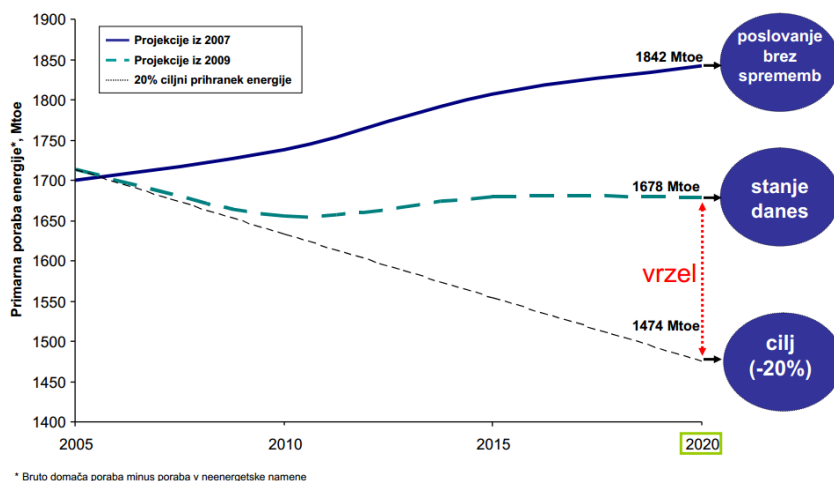


Slika 75: Zunanje dimenzije 2D računkega modela iz programa Catia V5 .....	95
Slika 76: Prikaz materialov v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo .....	97
Slika 77: Prikaz zračnih reg detajla stika Qbiss Air panela s temeljno gredo .....	98
Slika 78: Predpisani robni pogoji na modelu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo .....	99
Slika 79: Osnovna mreža končnih elementov za detajl stika s temeljno gredo .....	100
Slika 80: Razpored temperatur po modelu .....	100
Slika 81: Najnižja temperatura na notranji površini konstrukcije .....	101
Slika 82: Potek celotnega dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v detajlu stika s temeljno gredo .....	102
Slika 83: Potek spec. toplotnega toka v smeri X (zgoraj) in bližji pogled na območje maksimalnega (v absolutnem smislu) spec. toplotnega toka v smeri X osi (spodaj) .....	103
Slika 84: Potek toplotnega toka v smeri Y osi (zgoraj) in bližji pogled na območje maksimalnega in minimalnega spec. toplotnega toka v smeri Y osi (spodaj) .....	104
Slika 85: Prehod toplote preko sklopa stene, tal in stika po sistemu notranjih mer (zgoraj) in sistemu zunanjih mer (spodaj) .....	106
Slika 86: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navzven .....	107
Slika 87: Mreža z 1,5% številom končnih elementov osnovne mreže v vogalu navzven .....	108
Slika 88: Primerjava dela detajla z mrežo a) (levo) in mrežo b) (desno); na levi sliki so za boljšo opaznost trikotnih elementov le-ti odstranjeni iz prikaza .....	109
Slika 89: Idealna oblika in slaba oblika končnega elementa .....	110
Slika 90: Končni elementi z vrednostjo asimetrije nad 0,5 .....	112
Slika 91: Deleži štirikotnih končnih elementov v optimalni mreži vogala navznoter glede na vrednost asimetrije .....	112
Slika 92: Grafični prikaz štirikotnih končnih elementov z vrednostjo asimetrije nad 0,5 v optimalni mreži vogala navzven .....	113
Slika 93: Normirana krivulja odvisnosti $U_g/c$ od $r$ .....	116
Slika 94: Modeliranje prenosa toplote čez homogeno steno .....	117
Slika 95: Prehod toplote skozi tla - robni pogoji (zgoraj) in vektorski prikaz prehoda toplote (spodaj) .....	118
Slika 96: Thermal Wrap <sup>TM</sup> (Cabot-corporation, 2011) .....	119
Slika 97: Zasnova postavitve aerogelne izolacije v detajlu vogal navzven .....	120
Slika 98: Aerogelna odeja Spaceloft <sup>®</sup> (Aerogel, d.o.o., 2012) .....	121
Slika 99: Poliamidni aerogel, ki ga je razvila NASA (Gizmag, 2012) .....	122
Slika 100: Prikaz vrednosti maksimalnega spec. toplotnega toka po elementih detajla vogala navzven .....	122
Slika 101: Prikaz spremenjenega profila (rdeče) .....	123
Slika 102: Pultrudirani strukturni profili iz E-steklo - poliester kompozita, ki jih izdeluje podjetje Fiberline composites (www.fiberline.com) .....	125
Slika 103: Prikaz specifičnega toplotnega toka v primeru uporabe kompozita iz poliestrske smole in vlaken E-stekla .....	126

## 1 UVOD

Z gradbeništvom je povezanih precej energijskih potreb sodobne družbe. Del energije se porabi za proizvodnjo in recikliranje gradbenih materialov, del pa za gradnjo objektov, njihovo obratovanje, vzdrževanje in odstranitev. V EU znaša poraba energije v stanovanjskem in storitvenem sektorju (pretežno v stavbah) približno 40% končne energije (EPDB 2010/31/EU). Energetska oskrba temelji predvsem na fosilnih gorivih, ki niso obnovljivi in neomejeni, poleg tega pa so stranski produkti uporabe teh goriv toplogredni in drugi plini, ki imajo negativne posledice na okolje. Z razvojem gospodarstva manj razvitih držav in posledično povečano porabo in hkratnim zmanjševanjem zalog fosilnih goriv se cene teh dobrin zvišujejo, povečuje pa se tudi odvisnost od držav izvoznic. Vzdrževalni stroški (predvsem ogrevanje in hlajenje notranjih prostorov) predstavljajo kar 80% vseh stroškov v življenjskem ciklu stavbe (Smodiš, 2010). Zato so možnosti za prihranek energije in zmanjšanje negativnih vplivov na okolje prav v zniževanju vzdrževalnih stroškov zgrajenih objektov. Poleg zasnove oblike in orientacije stavbe lahko nanje vplivamo predvsem z regulacijo toplotnega toka v konstrukcijskih sklopih ter različnimi načini dovajanja, odvajanja ali ohranjanja toplotne energije v prostorih znotraj ovoja zgradbe ter rabo obnovljivih virov energije.

Evropska unija danes uvaža več kot pol energije, ki jo porabi. Da bi izkoristili velik energijsko varčevalni potencial na področju stavb, so bili objavljeni številni uradni dokumenti, ki spodbujajo oz. predpisujejo učinkovito rabo energije (URE) v stavbah in rabo obnovljivih virov energije (OVE), npr. Direktiva SAVE o zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub> 93/76/EEC in v letu 2002 sprejeta Evropska direktiva o energetske učinkovitosti stavb (EPBD) št. 2002/91/ES, ki je od držav članic zahtevala, da v svojem pravnem redu uredijo izračun celovite energetske učinkovitosti stavb, določitev minimalnih zahtev glede energetske učinkovitosti za nove stavbe in večje obstoječe stavbe v primeru večje prenove, ter energetske certificiranje stavb ( uvedba energetske izkaznice stavb). Ta direktiva je bila v slovensko zakonodajo vpeljana v okviru Zakona o graditvi objektov – Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur.l. RS, št. 93/2008, v okviru dopolnitve Energetskega zakona - Pravilnik o metodologiji izdelave in izdaji energetske izkaznice stavb (Uradni list RS, št. 77/09) in v okviru Zakona o varstvu okolja (redni pregledi kotlov). V letu 2010 je bila sprejeta prenovljena direktiva EPDB (2010/31/EU), ki upošteva cilje »20-20-20 do 2020« evropsko podnebno-energetske politike, ki tudi na področju stavb zahteva znaten prispevek k 20-odstotnemu zmanjšanju emisij CO<sub>2</sub>, k 20-odstotnemu povečanju energetske učinkovitosti in k 20-odstotnemu deležu obnovljivih virov energije v primarni energetske bilanci. Prenovljena direktiva daje poseben poudarek gradnji skoraj nič energijskih hiš, še posebej v javnem sektorju. S prenosom prenovljene direktive v slovenski pravni red je bil izdan novi Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur.l. RS, št. 52/2010 (PURES 2010), ki je stopil v veljavo s 1.1.2011. K pravilniku sodi tudi Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije, ki določa gradbene ukrepe oziroma rešitve za doseg minimalnih zahtev iz tega pravilnika in določa metodologijo izračuna energetske lastnosti stavbe. Minimalne zahteve za energijsko učinkovitost stavbe po PURES 2010 se nanašajo na naslednje kazalnike: povprečna toplotna prehodnost ovoja stavbe ( $H_f$ ), letna potrebna toplota za ogrevanje stavbe ( $Q_{nh}$ ), letni potrebni hlad za hlajenje stavbe ( $Q_{nc}$ ), letna primarna energija za delovanje sistemov v stavbi ( $Q_p$ ) - za stanovanjske stavbe, določene pa so tudi maksimalne mejne vrednosti za toplotne prehodnosti ( $U$ ) elementov ovoja stavbe. Najnovejši izračuni kažejo, da ima EU težave pri uresničevanju zastavljenega cilja glede zmanjšanja porabe energije za 20% do leta 2020, zato Evropska komisija predlaga nove ukrepe, npr. nujna vsakoletna prenova 3% stavb javnih organov (Povzetek predloga Evropske komisije – Z izboljšanjem energetske učinkovitosti do manjše porabe energije, 2011).



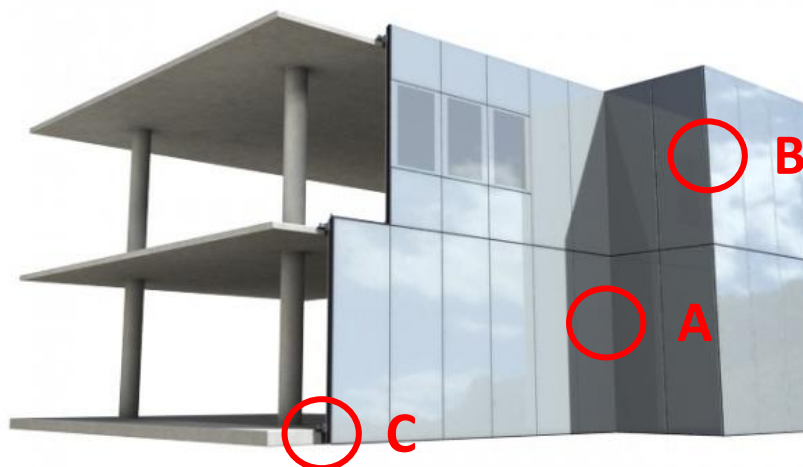
Slika 1: Trend porabe primarne energije v Evropski uniji (Generalni direktorat za energijo, 2011)

Različni nacionalni predpisi po svetu zahtevajo maksimalne vrednosti toplotne prehodnosti  $U = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  skozi fasado stavbe. Slovenska tehnična smernica TSG-01-004 predpisuje, da je lahko maksimalna vrednost za zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom  $U_{max} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ . V več kot 80% visokih stavb so danes uporabljeni obešeni fasadni sistemi, za katere pa je značilna razmeroma velika toplotna prehodnost. Povprečno vrednost toplotne prehodnosti manjšo od  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  je težko doseči zaradi arhitektonskih in zasteklitvenih omejitev (Kralj, 2011).

Iz omenjene problematike izhaja, da se v sodobni gradbeni panogi vedno bolj poraja potreba po kakovostnem fasadnem ovoju, ki izpolnjuje zahtevno kombinacijo potrebnih lastnosti: mehansko odpornost in stabilnost, požarno varnost, zvočno izolativnost, čim manjši negativni vpliv na okolje in zdravje ljudi (nizek  $\text{CO}_2$  odtis, uporaba zdravju neškodljivih materialov, čim večja možnost recikliranja), obenem pa mora omogočati tak pretok energij in informacij med notranjim in zunanjim okoljem, da je potreba po prisilnem vnosu dodatne energije v sistem minimalna.

Kot odgovor na vedno večje zahteve in vedno strožje predpise po učinkoviti rabi energije, toplotni izolativnosti in trajnostni okoljski naravnosti sta Trimio d.d. in CBS Inštitut v sodelovanju s strokovnjaki s celega sveta razvila Qbiss Air, inovativno, cenovno učinkovito in trajnostno rešitev za sodobni stavbni ovoj.

Cilj naloge je s pomočjo numerične analize po metodi končnih elementov (MKE) simulirati prehajanje toplote iz notranjega v zunanje okolje preko treh izbranih dvodimenzionalnih detajlov stikovanja tega inovativnega visokotehnološkega obešenega fasadnega sistema. Na podlagi rezultatov numerične analize stacionarnega prehoda toplote pri nespremenljivih zunanjih pogojih se bodo izvednotile vrednosti korekcijskih faktorjev linearnih toplotnih mostov ( $\psi$ ) in temperaturnih faktorjev toplotnih mostov ( $f_{Rsi}$ ). Ti faktorji so podlaga za izračun toplotne prehodnosti ovoja stavbe, ki ga zahtevajo predpisi. Na podlagi analize rezultatov bom v občutljivostni analizi spreminjal različne sestavne elemente detajlov in preučeval njihov vpliv na rezultate, s čimer bi morda lahko predlagal tudi izboljšave.



*Slika 2: Detajli stikovanj fasadnih panelov Qbiss Air sistema, ki jih bom obravnaval v tej nalogi: A) vogal navznoter, B) vogal navzven in C) stik panela s temeljno gredo (Spletna stran Qbiss Air)*

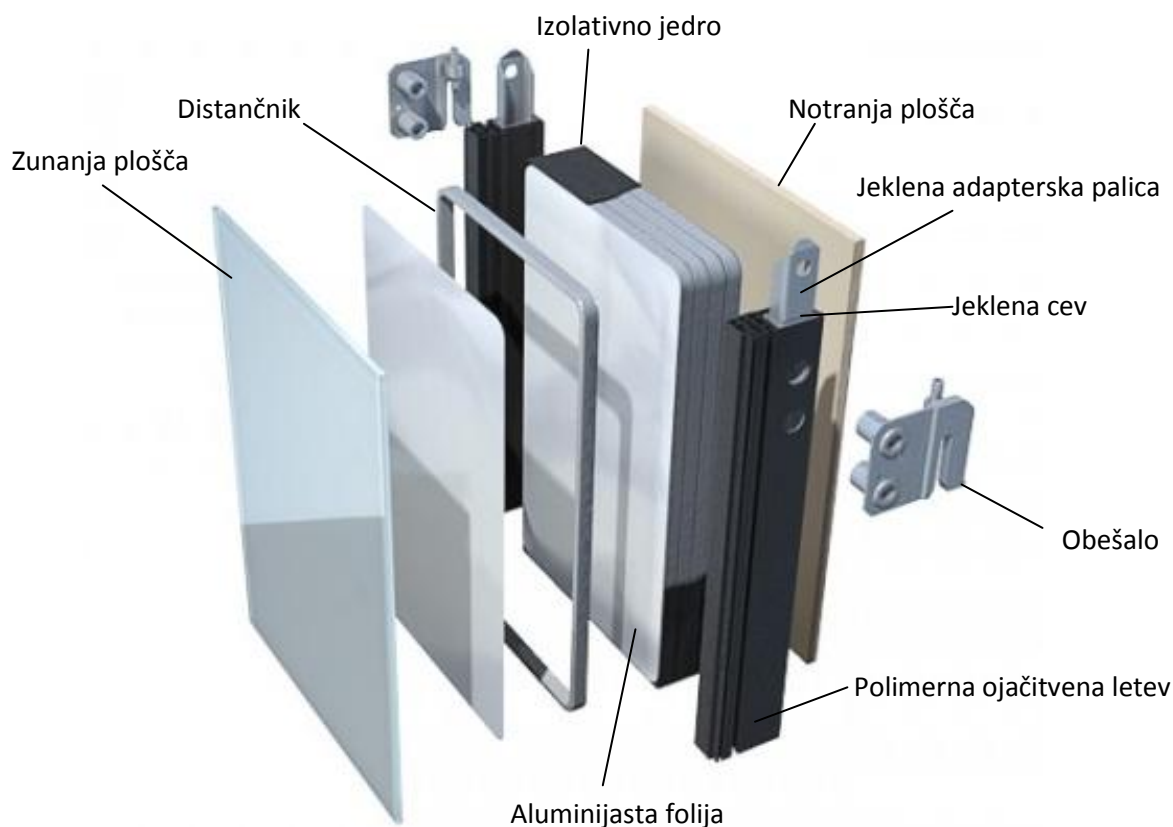
Prvi namen te naloge je spoznavanje v standardih predpisanih pravil za modeliranje računskih primerov linijskih toplotnih mostov v stavbah ter usvojiti uporabo metode končnih elementov za toplotno analizo. Drugi namen naloge pa je pridobitev sposobnosti za oceno rezultatov simulacij in razvoj občutka za zakonitosti prenosa toplote v gradbenih konstrukcijah z nehomogeno sestavo in razporeditvijo elementov.

## 2 QBISS AIR FASADNI SISTEM

### 2.1 Opis

Qbiss Air je visoko toplotno in zvočno izolativen modularni sistem obešene fasade z dokazano požarno odpornostjo. Je prvi večkomorni s plinom polnjeni obešeni fasadni sistem na svetu. Prek posebnega obešala in pritrdila se vsak panel obesi direktno na primarno nosilno konstrukcijo, dodatne notranje stene ali izolacija niso potrebni. Qbiss Air fasadni sistem je do trikrat tanjši od tradicionalne fasade z enako toplotno prehodnostjo, saj je zaradi izredno nizke toplotne prehodnosti izolativnega jedra -  $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Trimio d.d., Tehnični list Qbiss Air, 2011) fasadni panel skupaj z dodatno mavčno-kartonsko ploščo debel le 14 centimetrov, zaradi česar omogoča maksimalno prostorsko in energijsko učinkovitost. Več kot dvakrat tanjši je tudi od večine ostalih tipičnih steklenih obešenih fasadnih sistemov, ob tem pa ima kar 50% večjo toplotno in zvočno izolativnost. Zaradi svoje lahкости, tovarniške predizdelave ter enostavne montaže omogoča tudi hitro in učinkovito gradnjo, kar zmanjša stroške in čas trajanja projekta. Tovarniška predizdelava z avtomatizirano proizvodnjo v kontroliranem okolju zagotavlja visoko kakovost in zanesljivost vsakega panela. Poleg naštetega zagotavlja uporaba Qbiss Air sistema nizek CO<sub>2</sub> odtis v življenjskem ciklu zgradbe (42 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>), kar 96% celotnega fasadnega sistema pa je možno reciklirati. Ob izvrstnih fizikalno-tehničnih lastnostih ima tudi visoko estetsko vrednost. Poleg gladke, minimalistične oblike omogoča na svoji zunanji površini uporabo različnih materialov, vzorcev, barv in poslikav. Ob keramiki in kamnu sta glavna uporabljena materiala zunanje plasti kaljeno, emajlirano steklo z različnimi posebnimi učinki (barve, odsevi, zrcaljenje, digitalni tisk, individualna grafična oblikovanja) ter visokotlačni laminat v različnih barvah ali imitacijah lesa, kamna, kovine ali česa drugega. Paneli so na voljo v širini 500 – 1250 mm in višini 300 – 4000 mm.

## 2.2 Sestava panela:

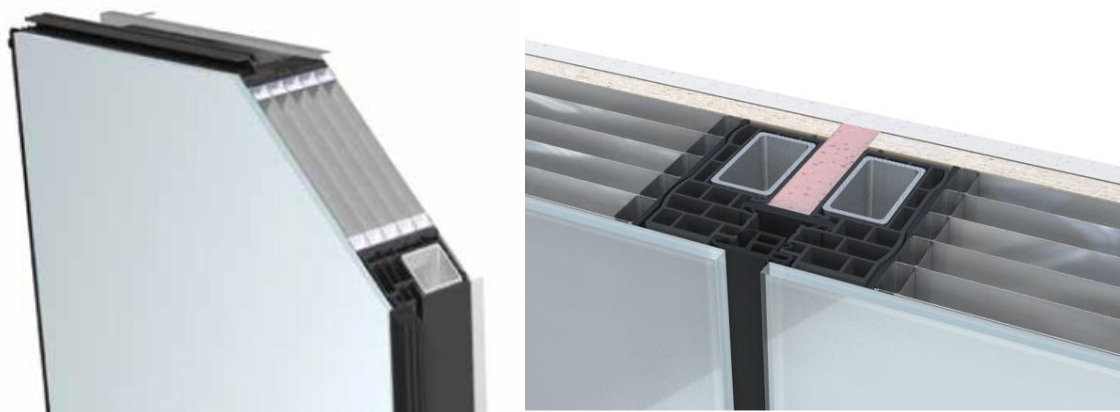


Slika 3: Sestava fasadnega panela Qbiss Air (spletna stran Qbiss Air)

Zunanja plošča (predvsem steklo ali visokotlačni laminat) pred zunanjimi vplivi ščiti večkomorno s CO<sub>2</sub> plinom polnjeno izolativno jedro, obenem pa z obilico estetskih opcij nudi raznoliko arhitekturno oblikovanje. Lahko je iz kaljenega ali emajliranega stekla minimalne debeline 8 mm. Kaljeno steklo ima izjemne mehanske lastnosti. Poleg velike upogibne trdnosti (120 MPa) ima nizek koeficient toplotne razteznosti, odpornost proti velikim temperaturnim razlikam, spada v požarni razred A1 in ima najmanj 100 let življenjske dobe. Namesto stekla se lahko uporabi tudi visokotlačni laminat (HPL – high-pressure laminate) s parno zaporo. Njegova minimalna debelina je 12 mm, upogibna trdnost znaša 60 MPa, ima relativno majhne raztezke in je prav tako odporen proti velikim temperaturnim razlikam ter kemikalijam. Spada v požarni razred B-s2,d0 in ima minimalno življenjsko dobo 20 let.

Izolativno jedro tvori pet komor, polnjenih s CO<sub>2</sub> plinom. Vsako komoro obdaja 20 mm visok distančnik iz izredno tanke nerjaveče pločevine in plastike, ki ima v nasprotju s splošno razširjenimi aluminijastimi verzijami veliko nižjo toplotno prevodnost. Komore so medsebojno ločene z 0,02 mm debelo aluminijasto folijo. Aluminijaste folije in distančniki so zlepljeni z elastičnim strukturnim lepilom, ki preprečuje uhajanje plina iz komor. Čez zunanjo stran distančnikov je nanešen 3-4 mm debel sloj polisulfidnega polimera, ki povečuje stabilnost in dodatno zmanjšuje pronicanje plina. Uporabljen je prav za Qbiss Air sistem izumljen polisulfid z vgrajenimi votlimi mikrosferami, ki preprečujejo direkten prenos toplote. Njegova toplotna prevodnost je manjša od 0,25 W/mK, kar je izredno malo v primerjavi s klasičnim polisulfidnim tesnilnim kitom s toplotno prevodnostjo 0,40 W/mK. Celotna debelina jedra znaša približno 100 mm. Ob daljših stranicah panela sta ob straneh izolacijskega jedra vgrajena polimerna ojačitvena profila, na katera sta s 3 mm debelo plastjo modificiranega polisulfidnega lepila pritrjeni tudi zunanja in notranja plošča. Polimerni profil je

narejen iz s steklenimi vlakni ojačanega poliamidnega kompozita, znanega pod imenom PA6.6 GF40, ki je ena najmočnejših plastik na trgu. Postavitev in izbira materiala ojačitvene letve omogoča odlično razmerje med togostjo in majhnostjo toplotnega mostu na stiku, poleg tega pa služi še kot dodatna ovira uhajanju plina. Letna izguba izolacijske plinske polnitve je manj kot 1%, v petdesetih letih pa se izgubi oz. nadomesti z okoliškim zrakom približno 30% izolacijskega plina. Začetna povprečna toplotna prehodnost panela  $U = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  v petdesetih letih naraste le na  $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$  (16% povišanje) (Tehnični list Qbiss Air, 2011).



Slika 4: Qbiss Air panel v prerezu (levo), stik dveh panelov v horizontalnem prerezu (desno) (Qbiss Air spletna stran, 2012)

Notranjo ploščo tvori s steklenimi vlakni ojačena mavčna plošča debeline 15 mm (rigidur plošča). Po montaži Qbiss Air panela se nanjo z notranje strani pritrdi vsaj še eno sekundarno mavčno ploščo minimalne debeline 10 mm, odvisno od zahtevane požarne odpornosti konstrukcije. Qbiss Air panel ima požarno odpornost  $IE = 60 - 120 \text{ min}$ . Kombinacija toge zunanje plošče, votlega plinastega jedra in toge notranje plošče zagotavlja tudi dobro zvočno izolativnost ( $R_w = 46-60 \text{ dB}$ ).

### 2.3 Montaža

Qbiss Air fasadni sistem se namesti direktno na primarno nosilno konstrukcijo (betonsko ploščo, jeklo ali oboje) preko pritrdila in obešala, ki omogočata natančno namestitev vsakega panela. Longitudinalni stiki med posameznimi paneli so na zunanji strani zatesnjeni s prefabriciranimi EPDM tesnili, na prečnih stikih pa se EPDM tesnila vgradijo med montažo. Z notranje strani se po opravljeni montaži v vse stike med paneli injicira samougasljivo izolacijsko tesnilno peno. Vsa tesnila so vidna na sliki 4. Nazadnje se na zadnjo stran rigidur plošče pritrdi še sekundarna mavčna plošča, ki pa ni del Qbiss Air sistema.



*Slika 5: Referenčna objekta: Vrtec Mavrica, Trebnje (levo) in Pavilijon, Trimo d.d., Trebnje (desno)*

Navedena dejstva dokazujejo, da Qbiss Air sistem predstavlja idealno rešitev za napreden in učinkovit stavbni ovoj. Nudi približni optimum kar se tiče porabe materiala, vgrajene energije, toplotne izolativnosti, varnosti in udobja bivanja (Kralj in sod., 2011).



### 3 PREHAJANJE TOPLOTE V DVODIMENZIONALNEM PROSTORU

Da bi bili pri energijskem varčevanju uspešni, moramo dobro poznati zakonitosti in principe prevajanja toplote. Toplota ( $Q$ ) je ena od oblik energije in je povezana z notranjo energijo snovi (gibanjem delcev teh snovi), zato jo merimo v enotah energije J (Joule), dovoljeno tudi Wh. Po prvem zakonu termodinamike je sprememba notranje energije toplotno izoliranega telesa enaka vsoti prejetega ali oddanega dela in toplote. Z dovajanjem toplote (segrevanjem telesa) oz. opravljanjem dela se notranja energija in s tem temperatura povečuje, z odvajanjem toplote (ohlajanjem telesa) pa zmanjšuje. Toplota ali notranja energija se v sistemu prenaša s toplotnim tokom, gonilni potencial pri prenosu toplote pa je razlika temperatur. V naravi vlada težnja po ravnovesju - toplota v obliki toplotnega toka vedno prehaja od toplejšega k hladnejšemu okolju s tremi osnovnimi mehanizmi: kondukcijo, konvekcijo in sevanjem.

V diplomski nalogi se bom omejil na stacionarno stanje s konstantno temperaturno razliko med zunanjim in notranjim okoljem, zato je najpomembnejša lastnost stavbnega ovoja za energijsko varčnost stavb njegova toplotna prehodnost.

Da bi bil v tem primeru izkoristek v stavbo že dovedene energije čim večji, mora ovoj stavbe po eni strani dopuščati toplotne pribitke iz zunanjega okolja (sevanje sonca skozi transparentne površine), po drugi strani pa čim bolj ovirati izmenjavo toplote med zunanjim in notranjim okoljem, vendar do te meje, da so bivalne razmere v stavbi zdrave in udobne za ljudi. Te meje določajo razni predpisi, standardi in tehnične smernice, npr. slovenski Pravilnik o bistvenih zahtevah za gradbene objekte, ki jih je treba upoštevati pri določitvi lastnosti gradbenih proizvodov, Ur.l. RS, št. 9/2001, osnovan na Evropski direktivi o gradbenih proizvodih (CPD 89/106/EEC), razlagalni dokument ID3 (bistvena zahteva »Higiena, zdravje, okolje«) in ID6 (bistvena zahteva »Gospodarno ravnanje z energijo in ohranjanje toplote«).

#### 3.1 Mehanizmi prenašanja toplote

Pretežni del prenosa toplote skozi ovoj stavbe se odvija s kondukcijo oz. prevodom toplote. To je pojav oz. mehanizem prenosa energije med atomi in molekulami snovi, pri čemer se ne dogajajo kemijske (preoblikovanje molekul) in jedrske reakcije. V tekočinah in plinih je prenos energije posledica naključnih trkov med prostimi molekulami snovi. Število trkov je odvisno od velikosti molekul in gostote snovi. V trdninah molekule niso proste, zato se energija prenaša z nihanji molekul v kristalnih rešetkah. Posebnosti so kovine s prostimi elektroni v kristalni rešetki, ki povečujejo prenos toplote (Medved, 2010).

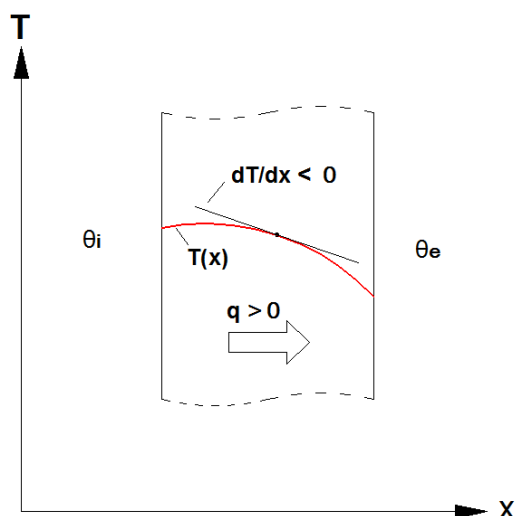
Toplotni tok ( $Q$  [J]) je vektorska veličina. Širi se v smeri normale na izotermo - krivuljo enakih temperatur. Specifični toplotni tok oz. gostota energijskega toka ( $q$  [W/m<sup>2</sup>]) je opredeljena z razmerjem med toplotnim tokom in površino, skozi katero le-ta prehaja:

$$q = \frac{Q}{A} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Določimo ga s Fouriejevim zakonom (v kartezijskem koordinatnem sistemu):

$$q_{x_i} = -\lambda_{i(\theta,v)} \frac{\partial \theta}{\partial x_i}, \quad i = \{1,2,3\}; \quad x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z \quad (2)$$

Negativni predznak pomeni da toplotni tok teče v nasprotni smeri temperaturnega gradienta (od toplega k hladnemu okolju).



Slika 6: Toplotni tok ima nasprotno smer kot gradient temperature (na sliki je  $\theta_i > \theta_e$ )

Toplotni prevodnosti materiala ( $\lambda_i$  [ $W/m^2$ ]) sta v splošnem odvisni od vlažnosti ( $v$ ) in temperature ( $\theta$ ) snovi. Temperatura in vlažnost snovi v gradbenih konstrukcijah se razmeroma malo spreminjata glede na povprečne vrednosti, zato  $\lambda_i$  v ožjem območju lahko jemljemo kot konstantni. Snovi, ki imajo drugačno toplotno prevodnost v različnih smereh so anizotropne (laminati, zračne rege z različnimi razmerji stranic, ...). Za dvodimenzionalni tok v kartezijskem koordinatnem sistemu dobimo za material z anizotropno toplotno prevodnostjo sledeča specifična toplotna tokova:

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (3)$$

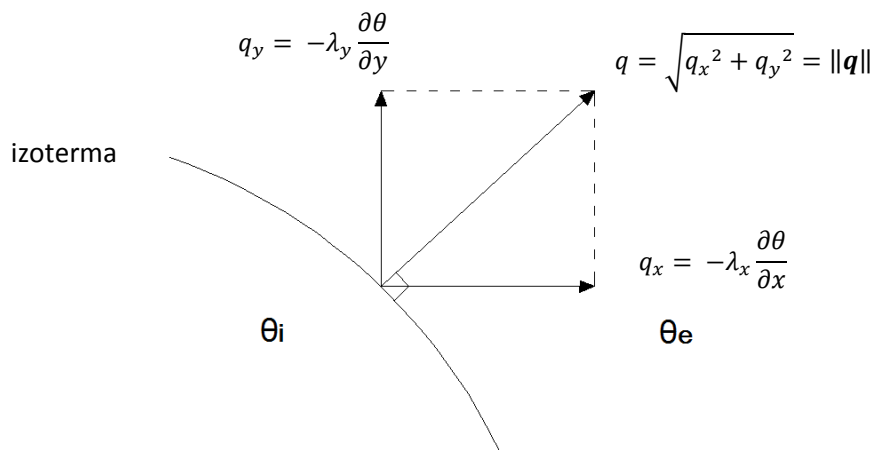
$$q_y = -\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (4)$$

$$Q_x = -\lambda_x A \frac{\partial \theta}{\partial x} [W] \quad (5)$$

$$Q_y = -\lambda_y A \frac{\partial \theta}{\partial y} [W] \quad (6)$$

oz. vektor specifičnega toplotnega toka:

$$\mathbf{q} = \{q_x, q_y\}^T = \left\{ -\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x}, -\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right\}^T \quad (7)$$



Slika 7: Vektor specifičnega toplotnega toka

kjer je  $A$  površina elementa, skozi katero prehaja toplotni tok,  $\frac{\partial \theta}{\partial x}$  in  $\frac{\partial \theta}{\partial y}$  pa sta temperaturna gradienta v  $x$  in  $y$  smeri. Za večino gradbenih materialov velja, da so izotropni, torej je njihova toplotna prevodnost neodvisna od smeri. V tem primeru je  $\lambda_x = \lambda_y = \lambda$ .

Drugi mehanizem prenosa toplote je konvekcija, ki je mogoča med trdno snovjo ter kapljevino in plinom, oz. med samimi kapljevini in plini. Gre za prenos energije z naključnimi trki molekul in prenos energije s skupnim gibanjem velikih skupin molekul, ki predstavljajo delce homogene snovi. Učinka obeh mehanizmov imenujemo konvekcija, celotni mehanizem pa prestop toplote. Pri naravni konvekciji je gibanje tekočine (t.j. snovi v kapljevinstem ali plinastem stanju) posledica toplotnega ali naravnega vzgona zaradi temperaturnega gradienta – delček snovi z višjo temperaturo od svoje okolice ima pri večini tekočin nižjo gostoto, zato se v tekočini vzgonsko dviguje, kar povzroča gibanje. V primeru da je gibanje tekočine posledica zunanjega vira energije (mešanje s palico, črpalka ipd.) pojav imenujemo prisilna konvekcija.

V obeh primerih se ob površini s trdno snovjo, na kateri poteka prestop toplote in jo imenujemo prenosna površina, oblikujeta hitrostna in temperaturna mejna plast. To sta omejeni področji, znotraj katerih se spreminjata hitrost gibanja in temperatura tekočine. Hitrostna mejna plast se oblikuje zaradi trenja med delci tekočine z različnimi hitrostmi gibanja, temperaturna mejna plast pa zaradi temperaturnega gradienta in prevoda toplote. V večini primerov poteka prenos toplote v gradbenih konstrukcijah z naravno konvekcijo, kjer je gibanje tekočine v hitrostni mejni plasti odvisno le od toplotnega toka, ki prestopa na prenosni površini. Ta tok zapišemo z Newtonovim zakonom hlajenja:

$$Q = \alpha_k \cdot A \cdot (\theta_{se} - \theta_0) \quad [W] \quad (8)$$

kjer je  $\theta_{se}$  temperatura prenosne površine,  $\theta_0$  temperatura kapljevine izven temperaturne mejne plasti in  $A$  [m<sup>2</sup>] kvadratura prenosne površine.  $\alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>K] je povprečna konvektivna toplotna prestopnost, definirana kot toplotni tok, ki prestopa na 1 m<sup>2</sup> prenosne površine pri temperaturni razliki 1 K. Določamo jo eksperimentalno (z laboratorijskimi preizkusi) ali z numeričnimi metodami.

Tretji mehanizem prenosa toplote je sevanje oz. radiacija. Gre za elektromagnetno valovanje, ki nastane kot posledica različnih pospeškov električnih nabojev atomov in molekul pri njihovem gibanju

in trkih. Elektromagnetna valovanja se razlikujejo po valovnih dolžinah ( $\lambda$  [m]) oz. frekvencah valovanja ( $\nu$  [1/s]). Toplotno sevanje imenujemo elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami med 0,1 in 100  $\mu\text{m}$  ( $\mu\text{m} = 10^{-6}$  m). Pri sevalnem prenosu toplote v stavbah so to sledeča spektralna področja: ultravijolično sevanje ( $0,1 < \lambda < 0,3 \mu\text{m}$ ), sončno sevanje ( $0,3 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ), svetlobno ( $0,36 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ ) in bližnje infrardeče sevanje ( $3 < \lambda < 100+ \mu\text{m}$ ). Toplotno sevanje oddaja vsako telo (sevalo) s temperaturo, višjo od temperature absolutne ničle, širi pa se tudi v prostoru brez snovi (vakuum). Celotni sevalni tok, ki ga odda sevalo, je opredeljen z Stefan-Boltzmanovim zakonom:

$$Q = q \cdot A = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \cdot A \quad [W] \quad (9)$$

kjer je  $q$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] gostota sevalnega toka,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^8$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ] je Stefan-Boltzmanova konstanta,  $T$  [K] absolutna temperatura površine sevala,  $A$  [ $\text{m}^2$ ] površina sevala,  $\epsilon$  [-] pa je emisivnost. Emisivnost je snovna lastnost površine sevala in predstavlja razmerje gostote sevalnega toka sivega ( $0 < \epsilon < 1$ ) in črnega sevala ( $\epsilon = 1$ ). Pri sivih sevalih je emisivnost enaka pri vseh valovnih dolžinah, pri realnih sevalih (vse gradbene snovi) pa se emisivnosti razlikujejo pri posameznih valovnih dolžinah, ki jih oddaja sevalo, zato navadno navajamo povprečne vrednosti emisivnosti. Emisivnosti površin gradbenih konstrukcij se določajo z namenskimi napravami. Pri sevanju pa je posebnost tudi to, da se lahko v določeni meri odbije od površine drugega telesa, kar je odvisno od spektralne odbojnosti  $\rho_{(\lambda)}$  in spektralne absorbtivnosti  $\alpha_{(\lambda)}$  njegove površine (Medved, 2010).

V tej diplomski nalogi bo sevanje upoštevano v okviru notranje in zunanje upornosti prestopa toplote s konvekcijo in sevanjem na površini gradbene konstrukcije ( $R_{\alpha,i}$ ,  $R_{\alpha,e}$ ), v okviru računsko določene nadomestne prevodnosti izolacijskega jedra fasadnega panela na podlagi eksperimentalnih meritev ter v okviru nadomestne toplotne prevodnosti zaprtih zračnih reg znotraj detajlov.

### 3.2 Toplotna prevodnost in toplotna prehodnost

Toplotna prehodnost ( $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]) konstrukcijskega sklopa je neposredno odvisna od toplotnih prevodnosti ( $\lambda$  [ $\text{W}/\text{mK}$ ]) uporabljenih materialov v sloju in debelin teh slojev ( $d$  [m]):

$$U = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + \alpha_e = \frac{1}{R} \quad (10)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{R_{\alpha,i}}, \quad \alpha_e = \frac{1}{R_{\alpha,e}} \quad (11)$$

pri čemer je  $R$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] celotni upor konstrukcijskega sklopa,  $R_{\alpha,i}$  in  $R_{\alpha,e}$  pa sta nadomestni upornosti prestopa toplote s konvekcijo in sevanjem na površini gradbene konstrukcije v notranjem (indeks  $i$ ) ali zunanjem prostoru (indeks  $e$ ). Vrednosti za  $R_{\alpha,i}$  in  $R_{\alpha,e}$  so navedene v standardu SIST EN ISO 6946, določene pa so glede na smer toplotnega toka.

*Preglednica 1: Vrednosti za  $R_{\alpha,i}$  in  $R_{\alpha,e}$  po standardu SIST EN ISO 6946. Vrednosti v vrstici »vodoravno« veljajo za smeri toka  $\pm 30^\circ$  od horizontalne ravnine*

Smer toplotnega toka	$R_{\alpha,i}$ [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]	$R_{\alpha,e}$ [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]
Navzgor	0,10	0,04
Vodoravno	0,13	0,04
Navzdol	0,17	0,04

Praviloma je v sklopu ovoja stavbe vsaj en sloj, ki ima funkcijo toplotne izolacije, t.i. toplotno izolativni (TI) material z nizko toplotno prevodnostjo. Za znižanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe je seveda najbolj smotrno povečevanje debeline TI sloja, vendar pa je že iz enačbe (10) razvidno, da relacija  $U-d$  (TI) ni linearna.

### 3.3 Dvodimenzionalni linijski toplotni mostovi

Toplotna prehodnost stavbnega ovoja ni konstanta – na nekaterih mestih se lahko poveča zaradi nehomogenosti vgrajene snovi, zaradi prediranja drugega materiala z drugačno toplotno prevodnostjo, zaradi spremembe oblike ali debeline sloja materialov, večinoma pa se poveča na mestih stikovanja konstrukcijskih sklopov. Ti stiki imajo zaradi same konstrukcijske narave drugačno sestavo kot sam konstrukcijski sklop, zaradi česar je toplotna prevodnost na teh območjih drugačna. Praviloma je v teh območjih toplotni tok večji – taka območja imenujemo toplotni mostovi. Na teh delih konstrukcije tudi v ravni konstrukciji izoterme niso več vzporedne, saj toplotni tok ne prehaja več zgolj v smeri normale na površino konstrukcije, ampak je (če se omejimo na 2D prostor) dvodimenzijski. Kljub dobri toplotni zaščiti, vendar brez rešenih toplotnih mostov, lahko delež toplotnih izgub zaradi toplotnih mostov predstavlja več kot tretjino transmisijskih toplotnih izgub (Grobovšek, 2006).

Koeficient skupnih toplotnih izgub  $H$  ogrevanega prostora je vsota koeficienta transmisijskih toplotnih izgub  $H_T$  in koeficienta toplotnih izgub zaradi prezračevanja,  $H_V$ .

$$H = H_T + H_V \left[ \frac{W}{K} \right] \quad (12)$$

$$H_T = L_D + L_S + H_U \quad (13)$$

kjer so  $L_D$  neposredne specifične toplotne izgube skozi ovoj stavbe iz ogrevanega prostora v zunanost,  $L_S$  specifične toplotne izgube skozi tla, razložene v standardu SIST EN ISO 13370,  $H_U$  pa specifične toplotne izgube skozi neogrevane prostore.

$$L_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j X_j \quad (14)$$

$$L_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k L_k^{2D} + \sum_j L_j^{3D} \quad (15)$$

$A_i$  je površina elementa  $i$ , ki je del ovoja stavbe,  $U_i$  je toplotna prehodnost elementa  $i$ , izračunana v skladu s standardom EN ISO 6946, za netransparentne oz. SIST EN ISO 10077-1 za zastekljene dele ( $W/m^2K$ ),  $l_k$  je dolžina linijskega toplotnega mostu  $k$  [m],  $\psi_k$  linijska toplotna prehodnost toplotnega mostu  $k$  [ $W/mK$ ],  $\chi_j$  točkovna toplotna prehodnost točkovnega toplotnega mostu  $j$ , izračunana v skladu s standardom EN ISO 10211 [ $W/K$ ],  $L_k^{2D}$  linijska toplotna prehodnost, izračunana z dvodimenzionalno simulacijo po standardu EN ISO 10211 [ $W/mK$ ],  $L_j^{3D}$  pa je linijska toplotna prehodnost, izračunana s trodimenzionalno simulacijo po standardu EN ISO 10211 [ $W/K$ ].

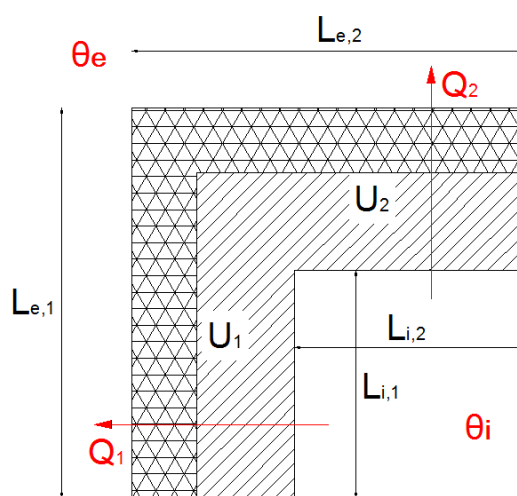
V tej nalogi se bom osredotočil na linijske toplotne mostove, ki nastanejo pri stikovanju treh različnih detajlov, prikazanih na sliki 2. Vpliv linijskih toplotnih mostov na povečanje toplotne prehodnosti konstrukcije ovrednotimo s korekcijskim faktorjem linijskega toplotnega mostu  $\psi$  [ $W/mK$ ]. Te faktorje normaliziramo na 1 m dolžine toplotnega mostu (merjeno v smeri dimenzije, ki poteka normalno na ravnino obravnavanega 2D modela). Površino gradbene konstrukcije lahko določimo z notranjimi ali zunanji merami, zato lahko tudi linijske toplotne mostove izračunamo po sistemu

notranjih  $\psi_i$  ali zunanjih mer  $\psi_e$ . V Sloveniji se uporablja prvi sistem (Medved, 2010). Faktorje  $\psi$  lahko dobimo na podlagi:

- vrednosti iz standarda SIST EN ISO 14683, kjer so podane tabelirane vrednosti za tipične primere križanj konstrukcijskih sklopov
- natančnega izračuna z numeričnimi metodami po standardu SIST EN ISO 10211
- z uporabo katalogov toplotnih mostov, ki jih za svoje produktne rešitve izdajajo proizvajalci (npr. Warmebrückenatlas Passivhaus – Anschlussdetails).

### 3.3.1 Izračun linijskih toplotnih mostov po standardu SIST EN ISO 10211

Numerično se po metodi končnih elementov temperature in toplotni tokovi izračunajo tako, da se geometrijski model razdeli na določeno število končnih elementov (celic), ki jih določajo karakteristične točke (vozlišča). Z upoštevanjem zakona o ohranjanju energije in Fourierjevega zakona ter z upoštevanjem robnih pogojev se vzpostavi sistem enačb, ki so funkcija temperatur v vozliščih končnih elementov. Rešitev sistema enačb, bodisi z direktno rešitvijo ali po iterativni metodi, nam da temperature v vozliščih končnih elementov, iz katerih se lahko z interpolacijo določi temperaturo v katerikoli točki modela. Iz znane porazdelitve temperatur se lahko na podlagi Fourierjevega zakona izračunajo toplotni tokovi preko izbranih površin, z njimi pa korekcijski faktor linijskega toplotnega mostu po sledeči enačbi (SIST EN ISO 10211):



Slika 8: Primer dvodimenzionalnega toplotnega mostu

$$L^{2D} = \frac{Q_1 + Q_2}{(\theta_i - \theta_e)} \left[ \frac{W}{m K} \right] \quad (16)$$

kjer je  $L^{2D}$  specifični toplotni tok, ki prehaja skozi vogalni detajl na linijskem toplotnem mostu oz. koeficient toplotne sklopitve.  $Q_1$  in  $Q_2$  sta toplotna tokova na meter dolžine linijskega mostu, izračunana sta z 2D računsko analizo. Faktor linearnega toplotnega mostu po sistemu notranjih ali zunanjih mer je potem:

$$\psi_i = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_{i,j} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right] \quad (17)$$

$$\psi_e = L^{2D} - \sum_{j=1}^N U_j \cdot L_{e,j} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right] \quad (18)$$

$U_j$  je toplotna prehodnost j-tega konstrukcijskega sklopa. Ker so ponavadi zunanje dimenzije detajla večje od notranjih, sta vrednosti  $\psi_i$  in  $\psi_e$  različni, lahko imata tudi negativno vrednost. Ne glede na izbiro sistema mer pa sta faktor  $L^{2D}$  in povprečna toplotna prehodnost ovoja stavbe  $U_m$  enaka za oba primera.  $L^{2D}$ ,  $\psi_i$  in  $\psi_e$  so neodvisni od razlike med zunanjo in notranjo temperaturo.

Po SIST EN ISO 14683 se je treba toplotnim mostovom z linijsko toplotno prehodnostjo  $\psi_i > 0,2$  W/mK ali  $\psi_e > 0,1$  W/mK izogniti s popravki načrtovanih detajlov v okviru tehničnih in tehnoloških možnosti. V kolikor se jim v skladu s to zahtevo ni mogoče izogniti, je potrebno dokazati, da na mestih toplotnih mostov vodna para ne kondenzira. Če imajo vsi toplotni mostovi v stavbi linijsko toplotno prehodnost  $\psi_i \leq 0,2$  W/mK ali  $\psi_e \leq 0,1$  W/mK, lahko njihov vpliv upoštevamo na poenostavljen način s povečanjem toplotne prehodnosti celotnega ovoja stavbe za  $0,1$  W/m<sup>2</sup>K (SIST EN ISO 14683).

### 3.3.2 Temperaturni faktor toplotnega mostu

Poleg dodatnih toplotnih izgub in slabšega toplotnega ugodja zaradi nižje sevalne temperature obstaja na mestih toplotnih mostov tudi nevarnost kondenzacije vodne pare ter pojava mikroorganizmov na hladni notranji površini konstrukcije. Po standardih SIST EN ISO 10211 in SIST EN ISO 13788 lahko nevarnost nastanka kondenzacije ocenimo z določitvijo temperaturnega faktorja toplotnega mostu  $f_{RSi}$  na notranji površini konstrukcije:

$$f_{RSi} = \frac{\theta_{Si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} [-] \quad (19)$$

Kjer je  $\theta_{Si}$  najnižja z numerično metodo izračunana temperatura na notranji površini modela.

$$f_{RSi} > f_{RSi,min} = \frac{\theta_{Si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (20)$$

$f_{RSi,min}$  je minimalni sprejemljivi temperaturni faktor, pri katerem še ne pride do pojava plesni.  $\theta_{Si,min}$  je najnižja temperatura na notranji površini prostora, ki se jo izračuna na podlagi dejanskega tlaka vodne pare v prostoru  $p_{v,\theta_i}$  [Pa] in relativne vlažnosti zraka  $\varphi_i$  [%].

$$p_{v,\theta_i} = p_{v,nas,\theta_i} \cdot \varphi_i = 611 \cdot e^{\left(\frac{17,08 \cdot \theta_i}{234,18 + \theta_i}\right)} \cdot \varphi_i \text{ [Pa]} \quad (21)$$

$$\theta_{Si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{v,\theta_i}}{0,8 \cdot 610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{v,\theta_i}}{0,8 \cdot 610,5}\right)} \text{ [}^\circ\text{C]} \dots \text{ za } p_{v,nas,\theta_i} \geq 610,5 \text{ Pa} \quad (22)$$

$$\theta_{Si,min} = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{p_{v,\theta i}}{0,8 \cdot 610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p_{v,\theta i}}{0,8 \cdot 610,5}\right)} \text{ [}^\circ\text{C]} \dots \text{ za } p_{v,nas,\theta i} < 610,5 \text{ Pa}$$

$P_{v,nas,\theta i}$  je tlak nasičenja vodne pare pri temperaturi  $\theta_{Si}$  na površini gradbene konstrukcije. Po drugi metodi za oceno nevarnosti kondenzacije vodne pare na notranji površini konstrukcije - metodi primerjave delnih tlakov vodne pare v zraku ob površini gradbene konstrukcije, do kondenzacije vodne pare ne pride, če je dejanski tlak vodne pare nižji od tlaka nasičenja. Za preprečevanje razvoja mikroorganizmov pa mora biti:

$$p_{v,\theta i} \leq 0,8 \cdot p_{v,nas,\theta i} \quad (23)$$

Tveganje za pojav škodljivih mikroorganizmov na notranji površini konstrukcije nastane, če je relativna vlažnost zraka nekaj dni zapored nad 80%.

Če torej pri temperaturi zraka  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$  izberemo relativno vlažnost notranjega zraka  $\varphi_i = 45\%$ , dejanski tlak vodne pare v prostoru znaša:

$$p_{v,\theta i} = 611 \cdot e^{\left(\frac{17,08 \cdot 20}{234,18 + 20}\right)} \cdot \varphi_i = 1922,365 \text{ Pa} \cdot 0,45 = 1054,18 \text{ Pa} \quad (24)$$

$$\theta_{Si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{1054,18}{0,8 \cdot 610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{1054,18}{0,8 \cdot 610,5}\right)} = 11,065^\circ\text{C} \quad (25)$$

Ker imam pri vseh detajlih določeno enako temperaturo zunanjega zraka  $\theta_e = -20^\circ\text{C}$  in enako temperaturo notranjega zraka  $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ , lahko za vse primere izračunam  $f_{Rsi,min}$ :

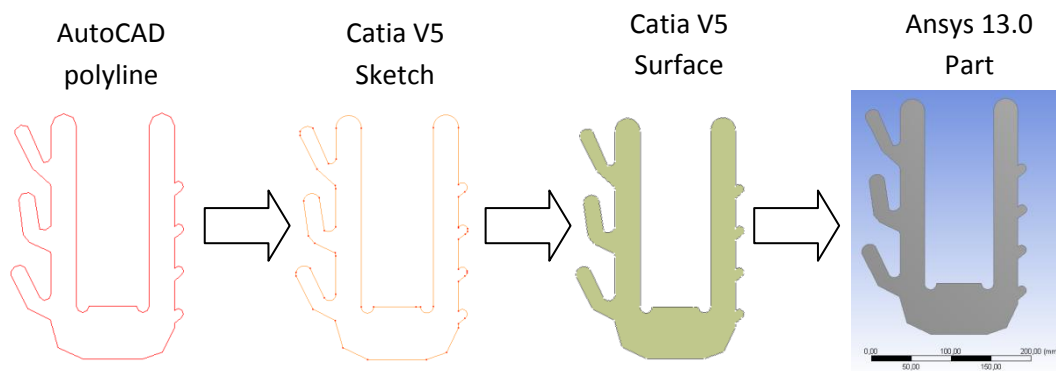
$$f_{Rsi,min} = \frac{11,065 - (-20)}{20 - (-20)} = 0,777 \quad (26)$$

### 3.4 Priprava geometrijskega modela za računalniško analizo

V CBS Inštitutu sem iz tehničnega lista za produkt Qbiss Air prejel tri detajle v dwg formatu. V skladu s standardom SIST EN ISO 10211 sem določil ustrezne dimenzije računskega modela in ustrezno podaljšal prejete detajle. Vse elemente sem ločil po materialih in jih obrisal s poligonalnimi črtami (ukaz »polyline« v AutoCAD-u). Delovno okolje Ansys Workbench v programskem paketu Ansys 13.0 omogoča modeliranje geometrije v lastni aplikaciji Design modeler, podpira pa tudi uvoz geometrije iz nekaterih drugih CAD programov, npr. programa Catia, ki sem ga uporabil v tej nalogi. Direktni uvoz geometrije iz dwg formata ni podprt, zato sem pripravljene polyline-e prenesel v aplikacijo »Sketch« programskega paketa Catia V5. Catia V5 je programski paket za računalniško podprto oblikovanje, načrtovanje in proizvodnjo (CAD/CAE/CAM). V delovnem okolju Generative Shape design sem tako pripravljene obrise elementov zapolnil z ukazom »fill«, ki element navidezno zapolni do meja obrisa. Tako namesto krivuljnega obrisa predmeta dobimo površinski element, ki pa je vezan na obliko krivulje oboda (zapolnitev je v tem primeru t.i. »hčerinski« element krivuljnega oboda elementa – če obod spremenimo ali izbrišemo, se bo z zapolnitvijo zgodilo isto). Nato sem z ukazoma »Create datum« in nato »Extract« iz prej kreiranih zapolnitev kreiral samostojne površinske



elemente (»surface«). Ukaz »datum« povzroči, da »surface« ni več »hčerinsko« povezan z zapolnitvijo, iz katere je bil kreiran. Nato sem vse krivuljne obode in zapolnitve izbrisal in dobil model, sestavljen izključno iz površinskih elementov. Tak model sem uvozil v programski paket Ansys Workbench. V aplikaciji »Design Modeler« program vsako ploskev obravnava kot popolnoma samostojen del (»part«). Če bi mrežili tak detajl, bi Ansys vsakemu delu predpisal svojo lastno, neodvisno mrežo končnih elementov, vozlišča končnih elementov posameznih delov pa se ne bi stikala. Zato sem v Design Modelerju vse posamezne dele združil v enega samega z ukazom »Form new part«, s čimer Ansys tak detajl tretira kot skupno telo, na katerem kreira enotno mrežo končnih elementov. Uporabil sem še funkcijo »Share Topology«, ki vsem sedaj združenim delom na stičnih robovih priredi kontaktne pogoje. V kolikor funkcija ugotovi da je stikovanje robov sosednjih delov zaradi geometrijskih neskladij nemogoče, nam avtomatsko obarva problematične robove. Včasih pa celo kakih elementov detajla aplikacija Design Modeler sploh ne prikaže oz. jih izbriše iz detajla, npr. v primeru geometrijskih prekrivanj sosednjih delov.



Slika 9: Postopek uvoza geometrije iz CAD programov v Ansys

Na tem mestu moram izpostaviti, da je Ansys izredno občutljiv na uvoženo geometrijo in velikokrat izbriše tudi kake elemente detajla, ki lokacijsko sploh niso blizu problematičnega območja prekrivanja. Večinoma je bilo potrebno iteracijsko iskanje vzrokov napake – AutoCAD-Catia-Ansys, ponovno AutoCAD ... Iskanje izvora težave je v takem primeru izredno časovno potratno, saj so v obravnavanih detajlih dimenzije nekaterih elementov znašale le nekaj desetink ali stotink milimetra, morebitna prekrivanja krivulj, ki so bila odkrit izvor težav, pa so znašala par tisočink milimetra ali celo manj. Ocenjujem da je bilo 80% časa, namenjenega diplomski nalogi, porabljenega samo za iskanje in odpravo malenkostnih geometrijskih prekrivanj.

Aplikacija Design modeler ima sicer nekaj orodij za odpravo geometrijskih napak uvoženega modela, vendar v mojih primerih z njimi nikoli nisem mogel doseči željenega učinka. Vklon funkcije Share Topology v Design Modelerju ni obvezno. Kontaktni pogoji med sosednjimi elementi se namreč v nasprotnem primeru predpišejo tudi ko zaženemo aplikacijo »Mechanical Editor«, v katerem izvedemo glavni del naloge – predpisovanje materialov, robnih pogojev, mreženje in izpis rezultatov.

Toplotne prevodnosti materialov vnesemo v materialno knjižnico »Engineering Data«, kjer vsak material poimenujemo in mu predpišemo izotropno ( $\lambda$ ) ali ortotropno toplotno prevodnost ( $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ ). V aplikaciji Mechanical Editor nato pod menijem »Geometry« izberemo posamezen del, ki predstavlja ta material, nato pa iz izbirnega menija v razdelku »Detail view« izberemo ustrezno ime materiala.

### 3.5 Mreženje

Ansys ponuja mnogo različnih opcij za kreiranje mreže po različnih parametrih. V osnovi algoritem kreira mrežo glede na geometrijo modela – ozkim elementom v geometriji predpiše manjše končne elemente (KE) kot geometrijskim elementom večjih dimenzij. Če nam mreža, ki jo avtomatsko generira Ansys na podlagi privzetih nastavitvev, ne ustreza, se lahko poslužimo palete različnih nastavitvev. Nastavimo lahko globalno minimalno in maksimalno velikost stranice končnega elementa, izbiramo obliko končnih elementov (prevladujoči štirikotni končni elementi ali samo trikotni elementi), izbiramo upoštevanje ali neupoštevanje vmesnih vozlišč končnih elementov, inflacijo (kompaktiranje končnih elementov v več »slojev«, npr. ob stene modela cevi), ... Pri težavni geometriji, kjer je veliko izredno ozkih ali kratkih robov, ki so preozki za končne elemente, oz. bi povzročili kreiranje končnih elementov zelo slabe kvalitete, nam je v pomoč funkcija »Pinch«. Ta nam glede na izbrano toleranco iz modela odščipne problematične predele, ki jih lahko avtomatsko zazna. Z ukazom »Face sizing« lahko izberemo zelene površine ali telesa detajla in posebej za njih predpišemo velikost končnih elementov ali pa obseg oz. sfero vpliva te nastavitve velikosti. Podobno velja za ukaz »Edge sizing«, kjer si izberemo robove, na katerih določimo velikost stranice končnih elementov, število razdelkov ali sfero vpliva. Pri številu razdelkov geometrijskega roba na končne elemente lahko uporabimo ukaz »Bias«, ki nam omogoča, da se razdelki po robu linearno zgoščajo od ene skrajne točke robu do druge ali od sredine navzven oz. obratno. Ta ukaz pride prav npr. pri robovih večjih dimenzij, kjer je ena stranica robu precej oddaljena od detajla, ki ga obravnavamo. »Bias« faktor je razmerje med dimenzijo največjega in najmanjšega razdelka robu. To razmerje lahko nastavimo po želji.

Z uporabo funkcije »Mapped« lahko določimo elemente detajla, na katerih želimo imeti urejeno mrežo končnih elementov v obliki vrstic in stolpcev. To ni mogoče pri raznih krivuljnih geometrijah, zato nam lahko Ansys samodejno prikaže na katerih elementih lahko uporabimo ta ukaz (»Show mappable faces«).

### 3.6 Ovrednotenje zanesljivosti rezultatov

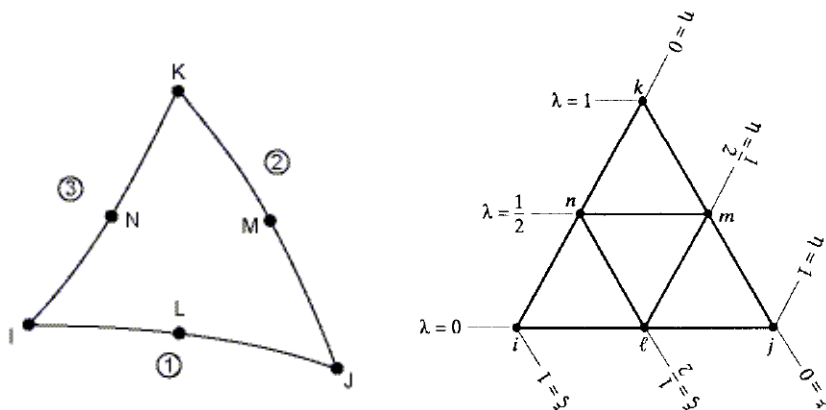
Numerični postopki dajo približne rešitve, ki morajo konvergirati k točnim rešitvam. Numerična metoda, ki jo uporabljamo, mora po standardu SIST EN ISO 10211 ustrezati naslednjim pogojem:

- a. Metoda mora podati temperature in toplotne tokove.
- b. Obseg razdelitve modela na razdelke (končne elemente, vozlišča) mora biti definirana s strani uporabnika in ne sme biti čisto omejena na točke, ki jih določi program.
- c. Za vsako povečanje števila razdelkov modela mora rešitev konvergirati k analitični rešitvi, v kolikor le ta obstaja.
- d. Število razdelkov modela določimo na ta način, da vsoto absolutnih vrednosti vseh toplotnih tokov, ki vstopajo v model, izračunamo dvakrat: za  $n$  razdelkov in za  $2n$  razdelkov. Razlika med rezultati ne sme presegati 1%. V nasprotnem primeru povečujemo število razdelkov dokler kriterij ni izpolnjen.
- e. Če je tehnika rešitve sistema iterativna mora iteracija potekati, dokler ni vsota vseh tokov (pozitivnih in negativnih), ki vstopajo v model, deljena s polovično vrednostjo vsote absolutnih vrednosti vseh teh toplotnih tokov, manjša od 0,001.

### 3.7 Tipi končnih elementov

Ansyes ponuja več tipov dvodimenzionalnih končnih elementov za toplotne analize, ki temeljijo na linearnih ali kvadratičnih štirikotnih oz. trikotnih oblikovnih funkcijah:

- ❖ PLANE 35 je šest-vozliščni (vozlišča I-N) trikotni element za toplotne analize (stacionarne ali nestacionarne). V vsakem vozlišču ima samo eno prostostno stopnjo – temperaturo. Predpišemo mu lahko pet materialnih karakteristik:  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$ , gostoto ( $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]), specifično toploto ( $c_p$  [J/kgK]) in entalpijo ( $h$  [J/kg]). Konvekcija ali specifični toplotni tok (vendar ne oboje) in radiacija se lahko podata v obliki površinske obtežbe na površino elementa. Izhodni podatki tega elementa vključujejo temperature v vozliščih in ostale podatke, npr. temperaturne gradiente in specifične toplotne tokove. Ta element je kompatibilen z osem-vozliščnim PLANE 77 končnim elementom.



Slika 10: Prikaz končnega elementa PLANE 35 z oznakami vozlišč in naravnih koordinat

Oblikovne funkcije v naravnih koordinatah:

$$S_i = \xi(2\xi - 1)$$

$$S_j = \eta(2\eta - 1)$$

$$S_k = \lambda(2\lambda - 1) = 1 - 3(\xi + \eta) + 2(\xi + \eta)^2$$

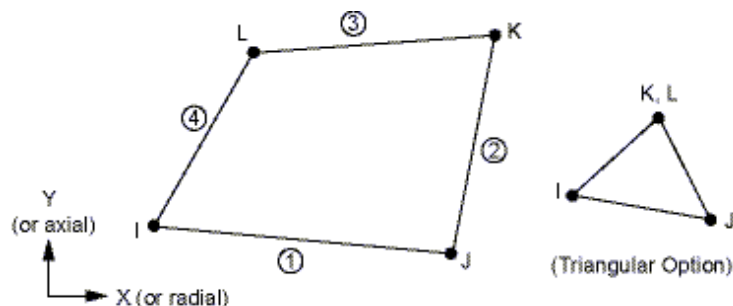
$$S_l = 4\xi\eta$$

$$S_m = 4\eta\lambda = 4\eta(1 - \xi - \eta)$$

$$S_n = 4\xi\lambda = 4\xi(1 - \xi - \eta)$$

(27)

- ❖ PLANE 55 je štiri-vozliščni štirikotni element za modeliranje dvodimenzionalnih kondukcijskih stacionarnih ali nestacionarnih problemov prevajanja toplote. V vozliščih ima po eno prostostno stopnjo – temperaturo. Za izračun vmesnih vrednosti med vozlišči se uporabljajo linearne interpolacijske funkcije. Konvekcija ali specifični toplotni tok (vendar ne oboje) in radiacija se lahko podata v obliki površinske obtežbe na površino elementa. Izhodni podatki tega elementa vključujejo temperature v vozliščih in ostale podatke, npr. temperaturne gradiente in specifične toplotne tokove. Možna je tudi varianta v trikotni obliki, kjer sta dve vozlišči združeni v eni točki.

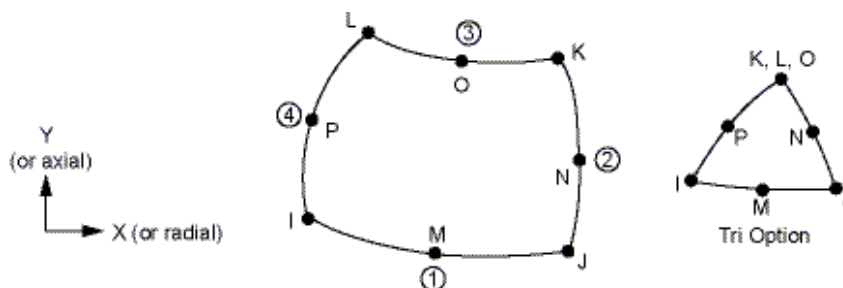


Slika 11: Prikaz končnega elementa PLANE 55 z oznakami vozlišč

Oblikovne funkcije v naravnih koordinatah za štirikotno obliko:

$$\begin{aligned}
 S_i &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \\
 S_j &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \\
 S_k &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \\
 S_l &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

- ❖ PLANE 77 je osem-vozliščni štirikotni končni element namenjen modeliranju dvodimenzionalnih kondukcijskih problemov prevajanja toplote. Dejansko je to element PLANE 55 višjega reda, saj ima še vmesna vozlišča na vsaki stranici elementa, zaradi česar so interpolacijske funkcije vmesnih vrednosti na robovih elementa kvadratične. Ta element ima izboljšane zmožnosti za modeliranje problemov ukrivljenih oblik. V vsakem vozlišču ima eno prostostno stopnjo – temperaturo. Izhodni podatki tega elementa vključujejo temperature v vozliščih in ostale podatke, npr. temperaturne gradiente in specifične toplotne tokove. Tudi pri tem elementu je možna varianta v trikotni obliki, kjer so tri vozlišča združena v eni točki.



Slika 12: Prikaz končnega elementa PLANE 77 z oznakami vozlišč

Oblikovne funkcije v naravnih koordinatah za vogalna vozlišča:

$$\begin{aligned}
 S_i &= -\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \xi + \eta) \\
 S_j &= -\frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)(-1 + \xi - \eta) \\
 S_k &= -\frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)(-1 + \xi + \eta)
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

$$S_l = -\frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \xi - \eta)$$

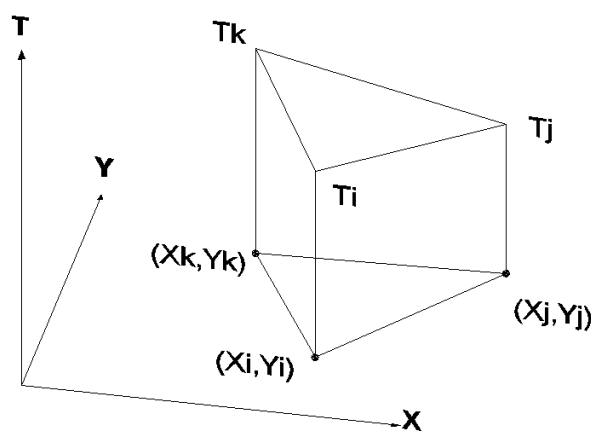
Oblikovne funkcije v naravnih koordinatah za vmesna vozlišča:

$$\begin{aligned} S_m &= \frac{1}{2}(1 - \eta)(1 - \xi^2) \\ S_n &= \frac{1}{2}(1 + \xi)(1 - \eta^2) \\ S_o &= \frac{1}{2}(1 + \eta)(1 - \xi^2) \\ S_p &= \frac{1}{2}(1 - \xi)(1 - \eta^2) \end{aligned} \quad (30)$$

Načeloma dobimo z uporabo elementov višjega reda nekoliko natančnejše rezultate, vendar zaradi numeričnih integracij matrik elementov zahtevajo več računskega časa.

### 3.8 Formulacija dvodimenzionalne analize prehoda toplote s trikotnimi končnimi elementi

Končni elementi trikotnih oblik so primerni za modeliranje nepravilnih mrež in pridejo do izraza zaradi dobrega prilaganja oblikam raznih krivulj pri bolj kompleksnih geometrijah računskih modelov, kakršne se pojavljajo tudi v tej diplomski nalogi.



Slika 13: Prikaz trikotnega končnega elementa

Porazdelitev temperature po trikotnem območju takega končnega elementa določimo z uporabo oblikovnih funkcij in ustrežajočih temperatur v vozliščih po enačbi:

$$\mathbf{T}^e = [S_i \ S_j \ S_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \quad (31)$$

kjer so oblikovne funkcije  $S_i$ ,  $S_j$  in  $S_k$  (Moaveni, 1999):

$$S_i = \frac{1}{2A}(\alpha_i + \beta_i X + \delta_i Y) \quad (32)$$

$$S_j = \frac{1}{2A}(\alpha_j + \beta_j X + \delta_j Y) \quad (33)$$

$$S_k = \frac{1}{2A}(\alpha_k + \beta_k X + \delta_k Y) \quad (34)$$

A je površina elementa in se izračuna po enačbi:

$$2A = X_i(Y_j - Y_k) + X_j(Y_k - Y_i) + X_k(Y_i - Y_j) \quad (35)$$

Ostali faktorji pa so:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= X_j Y_k - X_k Y_j & \beta_i &= Y_j - Y_k & \delta_i &= X_k - X_j \\ \alpha_j &= X_k Y_i - X_i Y_k & \beta_j &= Y_k - Y_i & \delta_j &= X_i - X_k \\ \alpha_k &= X_i Y_j - X_j Y_i & \beta_k &= Y_i - Y_j & \delta_k &= X_j - X_i \end{aligned} \quad (36)$$

Oblikovne oz. interpolacijske funkcije poenostavijo izvednotenje določenih integralov ko predpisujemo kondukcijo ali togostne matrike. Značilna lastnost oblikovnih funkcij je, da imajo enotsko vrednost v ustreznem vozlišču ter ničelno vrednost v sosednjih – oblikovna funkcija  $S_i$  ima vrednost 1 v vozlišču  $i$  ( $X, Y$ ) = ( $X_i, Y_i$ ) in vrednost 0 v ostalih dveh vozliščih ( $j, k$ ). Vsota vrednosti oblikovnih funkcij je zato v vsakem vozlišču 1. Oblikovne funkcije (32) - (34) so enake oblikovnim funkcijam (27), le da so prve podane v  $X, Y$  koordinatnem sistemu, druge pa v naravnih  $\xi, \eta$  koordinatah.

Z uporabo Galerkinovega pristopa k metodi utežnih ostankov za trikotni končni element napišemo naslednjo enačbo:

$$\int_A [S]^T \left( \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + q \right) dA = 0 \quad (37)$$

kjer je:

$$[S]^T = \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} \quad (38)$$

Enačba (37) sestoji iz treh glavnih integralov:

$$\int_A [S]^T \left( \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right) dA + \int_A [S]^T \left( \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) dA + \int_A [S]^T q dA = 0 \quad (39)$$

Ker se temperatura po trikotnem elementu spreminja linearno, drugi odvod linearne funkcije pa je enak nič, moramo odvode drugega reda preoblikovati v odvode prvega reda. Najprej zapišemo:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) = [S]^T \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial [S]^T}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial X} \quad (40)$$

Če enačbo (40) preuredimo, dobimo:

$$[S]^T \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{\partial}{\partial X} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) - \frac{\partial [S]^T}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial X} \quad (41)$$

Če izraz (41) vstavimo v prvi in drugi člen enačbe (39) dobimo:

$$\int_A [S]^T \left( \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \right) dA = \int_A \lambda_x \frac{\partial}{\partial X} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA - \int_A \lambda_x \left( \frac{\partial [S]^T}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA \quad (42)$$

$$\int_A [S]^T \left( \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) dA = \int_A \lambda_y \frac{\partial}{\partial Y} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dA - \int_A \lambda_y \left( \frac{\partial [S]^T}{\partial Y} \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dA \quad (43)$$

Z uporabo Greenovega izreka lahko člena

$$\int_A \lambda_x \frac{\partial}{\partial X} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA$$

in

$$\int_A \lambda_y \frac{\partial}{\partial Y} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dA$$

zapišemo v obliki krivuljnih integralov po robovih končnega elementa.

Vendar najprej obravnavajmo druga dva člena. Po enačbah (42) in (43) izvednotimo integral:

$$- \int_A \lambda_x \left( \frac{\partial [S]^T}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA \quad (44)$$

Za trikotni končni element velja:

$$\frac{\partial [S]^T}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{Bmatrix} \beta_i \\ \beta_j \\ \beta_k \end{Bmatrix} \quad (45)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} [S_i \ S_j \ S_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} [\beta_i \ \beta_j \ \beta_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \quad (46)$$

Z vstavljanjem (45) in (46) v (44) dobimo naslednji izraz:

$$- \int_A \lambda_x \left( \frac{\partial [S]^T}{\partial X} \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA = -\lambda_x \int_A \frac{1}{4A^2} \begin{Bmatrix} \beta_i \\ \beta_j \\ \beta_k \end{Bmatrix} [\beta_i \ \beta_j \ \beta_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} dA \quad (47)$$

Po integraciji (47) dobimo:

$$-\frac{\lambda_x}{4A} \begin{bmatrix} \beta_i^2 & \beta_i\beta_j & \beta_i\beta_k \\ \beta_i\beta_j & \beta_j^2 & \beta_j\beta_k \\ \beta_i\beta_k & \beta_j\beta_k & \beta_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = -[K]_x^{(e)} \{T\} \quad (48)$$

Na enak način lahko izvednotimo sledeči integral:

$$-\int_A \lambda_y \left( \frac{\partial[S]^T}{\partial Y} \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dA \quad (49)$$

Velja:

$$\frac{\partial[S]^T}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \end{Bmatrix} \quad (50)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial Y} [S_i \ S_j \ S_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} [\delta_i \ \delta_j \ \delta_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Z vstavitvijo (50) in (51) v (49) dobimo:

$$\begin{aligned} -\lambda_y \int_A \frac{1}{4A^2} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \end{Bmatrix} [\delta_i \ \delta_j \ \delta_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} dA &= -\frac{\lambda_y}{4A} \begin{bmatrix} \delta_i^2 & \delta_i\delta_j & \delta_i\delta_k \\ \delta_i\delta_j & \delta_j^2 & \delta_j\delta_k \\ \delta_i\delta_k & \delta_j\delta_k & \delta_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \\ &= -[K]_y^{(e)} \{T\} \end{aligned} \quad (52)$$

Za trikotni element lahko zapišemo matriko toplotnih obremenitev zaradi  $q$  (tretji integral v (39)) v obliki:

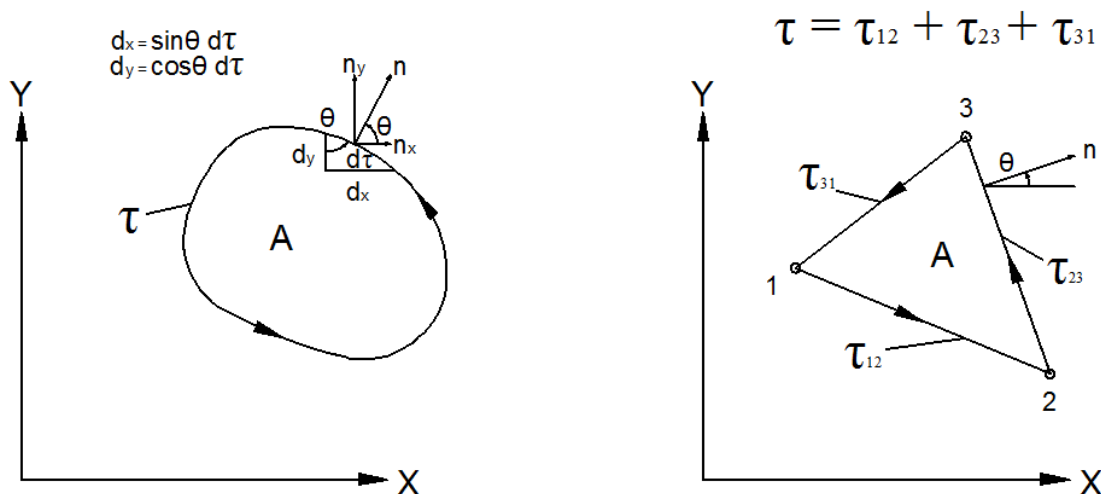
$$\int_A [S]^T q dA = q \int_A \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} dA = \frac{qA}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (53)$$

Vrnimo se k prvima členoma enačb (42), (43). Z Greenovim izrekom ju prevedemo na krivuljna integrala po robovih končnega elementa:

$$\begin{aligned} &\int_A \lambda_x \frac{\partial}{\partial X} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) dA + \int_A \lambda_y \frac{\partial}{\partial Y} \left( [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \right) dA = \\ &= \int_A \left( \frac{\partial}{\partial X} \left( \lambda_x [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \lambda_y [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \right) \right) dA = \\ &= \oint_{\tau} \lambda_x [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta d\tau + \oint_{\tau} \lambda_y [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta d\tau \end{aligned} \quad (54)$$



kjer  $\tau$  predstavlja rob končnega elementa,  $\theta$  pa je kot med enotskim vektorjem normale na rob elementa in  $X$  osjo kartezijskega koordinatnega sistema, kot prikazuje slika 14:



Slika 14: Enotski vektor normale na robu končnega elementa

$$n = n_x \vec{e}_x + n_y \vec{e}_y = \cos\theta \vec{e}_x + \sin\theta \vec{e}_y \quad (55)$$

Ti dve enačbi predstavljata povezavo z robnimi pogoji. Za lažji prikaz si predstavljajmo, da imamo rob 23 končnega elementa vzporeden z  $Y$  osjo koordinatnega sistema. Robni pogoj zahteva, da mora biti energija, ki zaradi kondukcije doseže rob 23, enaka energiji, ki se s konvekcijo prenese naprej (po tekočini v stiku z robom 23). To lahko zapišemo v sledeči obliki:

$$-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial X} = h(T - T_f) \quad (56)$$

kjer je  $h = \alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>K] povprečna konvektivna toplotna prestopnost,  $T = \theta_{se}$  je temperatura na površini robu 23 in  $T_f = \theta_o$  temperatura kapljevine. Potem lahko enačbo (54) zapišemo v sledeči obliki:

$$\begin{aligned} \oint_{\tau} \lambda_x [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta d\tau &= - \oint_{\tau} h [S]^T (T - T_f) \cos\theta d\tau = \\ &= - \oint_{\tau} h [S]^T T \cos\theta d\tau + \oint_{\tau} h [S]^T T_f \cos\theta d\tau \end{aligned} \quad (57)$$

$\theta = 0^\circ$  ali  $180^\circ$

Na enak način bi zapisali prehod toplote v smeri toplotnega toka  $Y$ , kjer bi bil npr. rob 12 končnega elementa vzporeden z  $X$  osjo koordinatnega sistema:

$$-\lambda_y \frac{\partial T}{\partial Y} = h(T - T_f) \quad (58)$$

Iz česar sledi, da je enačba (54) v tem primeru enaka:

$$\oint_{\tau} \lambda_y [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta d\tau = - \oint_{\tau} h [S]^T (T - T_f) \sin\theta d\tau =$$

$$= - \oint_{\tau} h [S]^T T \sin\theta d\tau + \oint_{\tau} h [S]^T T_f \sin\theta d\tau$$

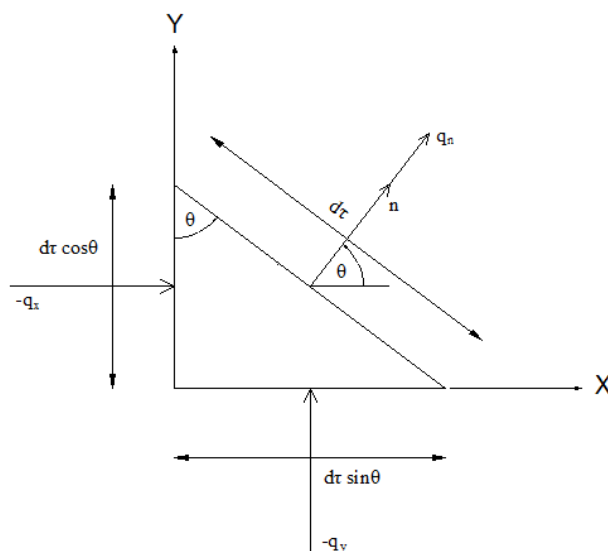
$\theta = 90^\circ$  ali  $270^\circ$

(59)

Za splošni primer, ko rob končnega elementa ni vzporeden niti z X niti Y osjo koordinatnega sistema, lahko odvisnost od robnih pogojev zapišemo z enačbo:

$$q_n = h(T - T_f)$$
(60)

$q_n$  lahko nadalje povežemo s toplotnima tokovoma v smereh X in Y s pomočjo slike 15, iz katere je razvidno:



Slika 15: Prehod toplote v smeri toplotnega toka  $q_n$

$$-q_x \cos\theta - q_y \sin\theta = q_n$$

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta = q_n$$
(61)

Če vstavimo (60) v (61) imamo:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta = h(T - T_f)$$
(62)

Enačbo (62) uporabimo v (54) in dobimo:

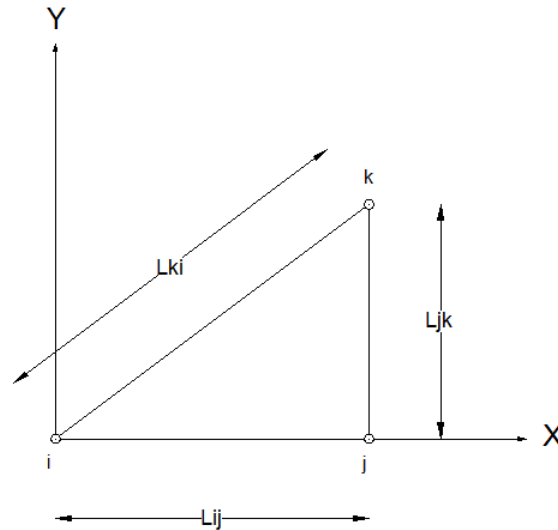
$$\oint_{\tau} [S]^T \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta \right) d\tau = \oint_{\tau} [S]^T h(T - T_f) d\tau =$$

$$= \oint_{\tau} [S]^T h T d\tau - \oint_{\tau} [S]^T h T_f d\tau$$
(63)

Člen  $\oint_{\tau} h [S]^T T d\tau$  za konvekcijske robne pogoje po robovih končnega elementa predstavlja prispevek  $[K]_C^{(e)}$  h kodukcijski matriki  $[K]^{(e)}$  (Moaveni, 1999).

$$\begin{aligned} -\oint_{\tau} h [S]^T T d\tau &= -\oint_{\tau} h [S]^T [S] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} d\tau = -\oint_{\tau} h \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} [S_i \ S_j \ S_k] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} d\tau = \\ &= -h \oint_{\tau} \begin{bmatrix} S_i^2 & S_i S_j & S_i S_k \\ S_i S_j & S_j^2 & S_j S_k \\ S_i S_k & S_j S_k & S_k^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} d\tau = \\ &= -[K]_C^{(e)} \{T\} \end{aligned} \quad (64)$$

Izračun matrike  $[K]_C^{(e)}$  bom prikazal na primeru elementa v obliki pravokotnega trikotnika, čigar ena stranica je vzporedna X osi, druga pa Y osi koordinatnega sistema:



Slika 16: Pravokotni trikotni končni element

$$2A = X_i(Y_j - Y_k) + X_j(Y_k - Y_i) + X_k(Y_i - Y_j) = 0 + L_{ij}(L_{jk}) + 0 = L_{ij} L_{jk} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \alpha_i &= X_j Y_k - X_k Y_j = L_{ij} L_{jk} & \beta_i &= Y_j - Y_k = -L_{jk} & \delta_i &= X_k - X_j = 0 \\ \alpha_j &= X_k Y_i - X_i Y_k = 0 & \beta_j &= Y_k - Y_i = L_{jk} & \delta_j &= X_i - X_k = -L_{ij} \\ \alpha_k &= X_i Y_j - X_j Y_i = 0 & \beta_k &= Y_i - Y_j = 0 & \delta_k &= X_j - X_i = L_{ij} \end{aligned} \quad (66)$$

$$S_i = \frac{1}{2A} (\alpha_i + \beta_i X + \delta_i Y) = 1 - \frac{X}{L_{ij}} \quad (67)$$

$$S_j = \frac{1}{2A} (\alpha_j + \beta_j X + \delta_j Y) = \frac{L_{jk} \cdot X - L_{ij} \cdot Y}{L_{ij} \cdot L_{jk}} = \frac{X}{L_{ij}} - \frac{Y}{L_{jk}} \quad (68)$$

$$S_k = \frac{1}{2A} (\alpha_k + \beta_k X + \delta_k Y) = \frac{Y}{L_{jk}} \quad (69)$$

$$S_i^2 = \left(1 - \frac{X}{L_{ij}}\right)^2 = 1 - \frac{2X}{L_{ij}} + \frac{X^2}{L_{ij}^2} \quad (70)$$

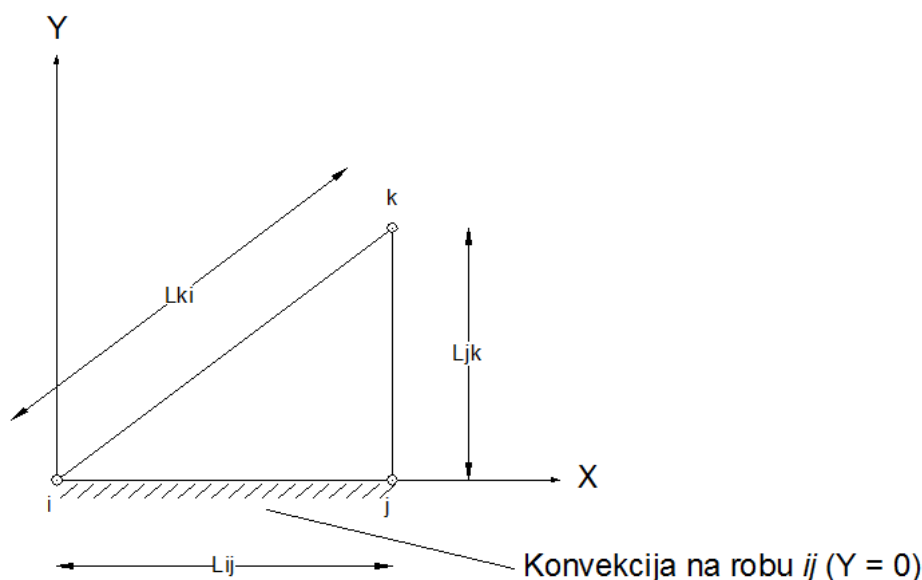
$$S_i S_j = \left(1 - \frac{X}{L_{ij}}\right) \left(\frac{L_{jk} \cdot X - L_{ij} \cdot Y}{L_{ij} \cdot L_{jk}}\right) = \frac{L_{jk} \cdot X - L_{ij} \cdot Y}{L_{ij} \cdot L_{jk}} - \frac{L_{jk} \cdot X^2 - L_{ij} \cdot X \cdot Y}{L_{ij}^2 \cdot L_{jk}} \quad (71)$$

$$S_j^2 = \left(\frac{X}{L_{ij}} - \frac{Y}{L_{jk}}\right)^2 = \frac{X^2}{L_{ij}^2} - \frac{2 \cdot X \cdot Y}{L_{ij} \cdot L_{jk}} + \frac{Y^2}{L_{jk}^2} \quad (72)$$

$$S_j S_k = \left(\frac{L_{jk} \cdot X - L_{ij} \cdot Y}{L_{ij} \cdot L_{jk}}\right) \left(\frac{Y}{L_{jk}}\right) = \frac{L_{jk} \cdot X \cdot Y - L_{ij} \cdot Y^2}{L_{ij} \cdot L_{jk}^2} \quad (73)$$

$$S_k^2 = \frac{Y^2}{L_{jk}^2} \quad (74)$$

$$S_k S_i = \frac{Y}{L_{jk}} \left(1 - \frac{X}{L_{ij}}\right) = \frac{Y}{L_{jk}} - \frac{Y \cdot X}{L_{jk} \cdot L_{ij}} \quad (75)$$



Slika 17: Konveksijski robni pogoj na robu ij

Člene matrike integriramo po robu ij, ki leži na osi X ( $\theta = 90^\circ \rightarrow \cos\theta = 0, \sin\theta = 1, \sin\theta \cdot d\tau = dX$ , integriramo samo po  $dX$ ):

$$\int_0^{L_{ij}} S_i^2 dX = \frac{L_{ij}}{3} \quad (76)$$

$$\int_0^{L_{ij}} S_i S_j dX = \frac{L_{ij}}{6} \quad (77)$$

$$\int_0^{L_{ij}} S_j^2 dX = \frac{L_{ij}}{3} \quad (78)$$

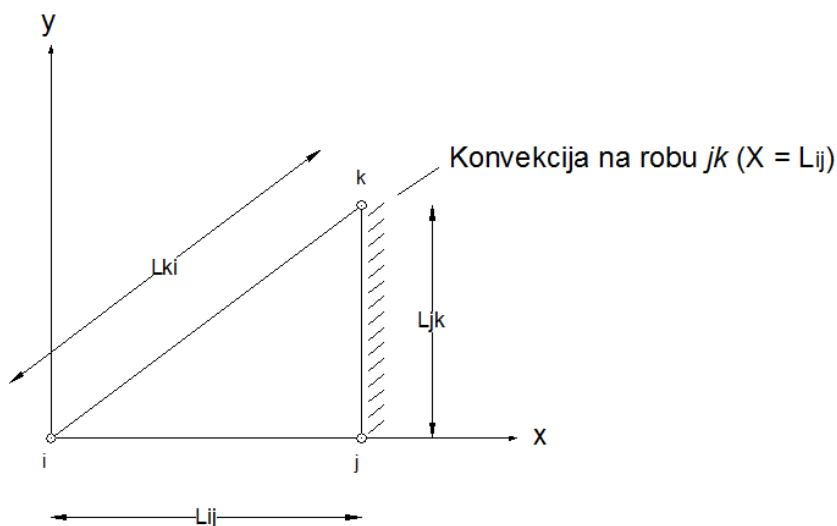
$$\int_0^{L_{ij}} S_j S_k dX = 0 \quad (79)$$

$$\int_0^{L_{ij}} S_k^2 dX = 0 \quad (80)$$

$$\int_0^{L_{ij}} S_k S_i dX = 0 \quad (81)$$

$$[K]_{Cij}^{(e)} = \frac{h \cdot L_{ij}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (82)$$

Če imamo konvekcijo na robu  $jk$  ( $\theta = 0^\circ \rightarrow \cos\theta = 1, \sin\theta = 0, \cos\theta \cdot d\tau = dY$ , integriramo samo po  $dY$ ) po integraciji dobimo:



Slika 18: Konvekcijski robni pogoj na robu  $jk$ -

$$\int_0^{L_{jk}} S_i^2 dY = 0 \quad (83)$$

$$\int_0^{L_{jk}} S_i S_j dY = 0 \quad (84)$$

$$\int_0^{L_{jk}} S_j^2 dY = \frac{L_{jk}}{3} \quad (85)$$

$$\int_0^{L_{jk}} S_j S_k dY = \frac{L_{jk}}{6} \quad (86)$$

$$\int_0^{L_{jk}} S_k^2 dY = \frac{L_{jk}}{3} \quad (87)$$

$$\int_0^{L_{ij}} S_k S_i dX = 0 \quad (88)$$

$$[K]_{Cjk}^{(e)} = \frac{h \cdot L_{jk}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (89)$$

Po istem principu bi dobili za konvekcijo na robu  $ki$  prispevek h kondukcijski matriki:

$$[K]_{Cki}^{(e)} = \frac{h \cdot L_{ki}}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (90)$$

Člen  $\oint_{\tau} h [S]^T T_f d\tau$  enačbe (63) zaradi konvekcije prispeva k matriki temperaturne obtežbe:

$$\oint_{\tau} h [S]^T T_f d\tau = \oint_{\tau} h \begin{Bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \end{Bmatrix} T_f d\tau = \{F\}^e \quad (91)$$

Če za primer spet vzamemo končni element s slike 17 in izvednotimo integrale po robovih, na katerih je konvekcija, dobimo:

$$\int_0^{L_{ij}} S_i dX = \frac{L_{ij}}{2} \int_0^{L_{ij}} S_j dX = \frac{L_{ij}}{2} \int_0^{L_{ij}} S_k dX = 0 \quad (92)$$

$$\{F\}^e_{ij} = \frac{h \cdot T_f \cdot L_{ij}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (93)$$

Podobno za druga dva robova dobimo:

$$\{F\}^e_{jk} = \frac{h \cdot T_f \cdot L_{jk}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (94)$$

$$\{F\}^e_{ki} = \frac{h \cdot T_f \cdot L_{ki}}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (95)$$

Če povzamemo formulacijo s trikotnimi končnimi elementi je kondukcijska matrika končnega elementa:

$$[K]^{(e)} = \frac{\lambda_x}{4A} \begin{bmatrix} \beta_i^2 & \beta_i\beta_j & \beta_i\beta_k \\ \beta_i\beta_j & \beta_j^2 & \beta_j\beta_k \\ \beta_i\beta_k & \beta_j\beta_k & \beta_k^2 \end{bmatrix} + \frac{\lambda_y}{4A} \begin{bmatrix} \delta_i^2 & \delta_i\delta_j & \delta_i\delta_k \\ \delta_i\delta_j & \delta_j^2 & \delta_j\delta_k \\ \delta_i\delta_k & \delta_j\delta_k & \delta_k^2 \end{bmatrix} \quad (96)$$

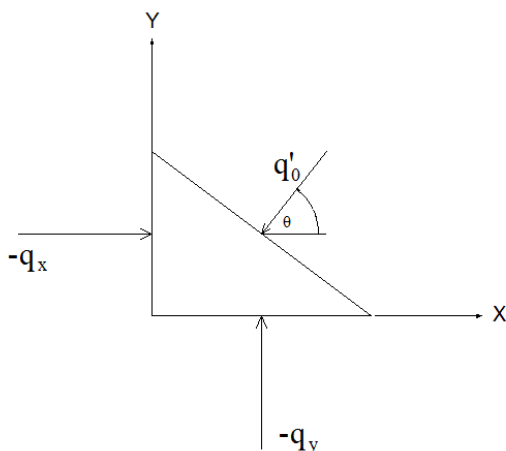
Prvi člen je kondukcijska komponenta v smeri  $X$ , drugi člen pa v smeri  $Y$  osi koordinatnega sistema. Možne so tudi dodatne komponente kondukcijske matrike, kot npr. matrike (82), (89) in (90) v primeru konvekcije na določenem robu tega končnega elementa.

Matrika temperaturne obtežbe končnega elementa ima lahko dve komponenti. Prva komponenta je rezultat možnega vira toplote znotraj končnega elementa:

$$\{F\}^e = \frac{qA}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (97)$$

Druga komponenta pa je prispevek morebitne konvekcije na katerem od robov elementa (enačbe (93) – (95)) (Moaveni, 1999).

V primeru, da imamo za robni pogoj namesto konvekcije na robu končnega elementa predpisano konstantno vrednost specifičnega toplotnega toka  $\dot{q}_0$ , je postopek podoben. Iz zakona o ohranitvi energije sledi, da se mora toplota, ki v telo preide s toplotnim tokom  $\dot{q}_0$  prevesti naprej s kondukcijo:



Slika 19: Specifični toplotni tok na robu končnega elementa

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta = -\dot{q}_0 \quad (98)$$

Z uporabo enačbe (54) dobimo:

$$\oint_{\tau} \lambda_x [S]^T \frac{\partial T}{\partial X} \cos\theta d\tau + \oint_{\tau} \lambda_y [S]^T \frac{\partial T}{\partial Y} \sin\theta d\tau = - \oint_{\tau} \dot{q}_0 [S]^T d\tau \quad (99)$$

V tem primeru nimamo prispevka h kondukcijski matriki elementa ampak samo k matriki toplotne obtežbe. Ker so integrali po posameznih robovih enaki kot v primeru konvekcije, dobimo prispevek konstantnega specifičnega toplotnega toka na robu elementa k matriki toplotne obtežbe v sledeči obliki:

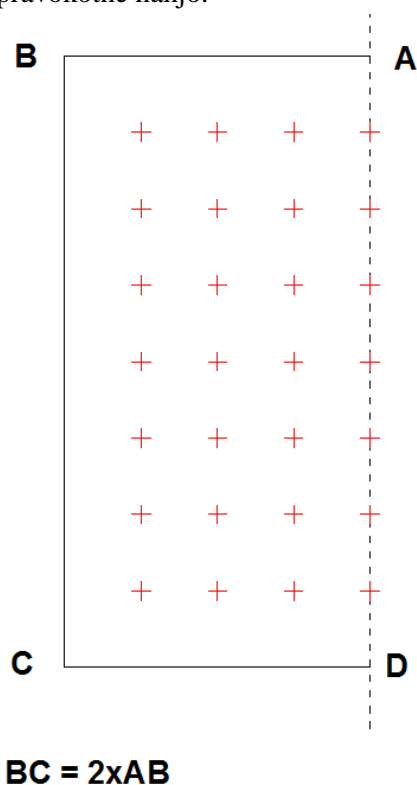
$$\{F\}_{q_0ij}^e = \frac{\dot{q}_0 L_{ij}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \{F\}_{q_0jk}^e = \frac{\dot{q}_0 L_{jk}}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \{F\}_{q_0ki}^e = \frac{\dot{q}_0 L_{ki}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (100)$$

#### 4 SPOZNAVANJE PROGRAMA ZA NUMERIČNO ANALIZO PO METODI KONČNIH ELEMENTOV

Del potrditve pravilnosti numerične metode za izračunavanje toplotnih mostov predstavlja tudi obvezna izvedba validacijskih primerov, ki jih predpisuje standard SIS EN ISO 10211. Da bi bila numerična metoda priznana kot dvodimenzionalna stacionarna visoko natančna metoda, mora dati rezultate, ki so enaki dvema referenčnima testnima primeroma 1 in 2. S testnimi primeri se tudi prepričamo, da s programsko opremo znamo pravilno rokovati. Drugi razlog pa je, da lahko približno ocenimo kako goste mreže končnih elementov bomo potrebovali za naše analize.

##### 4.1 Referenčni testni primer 1

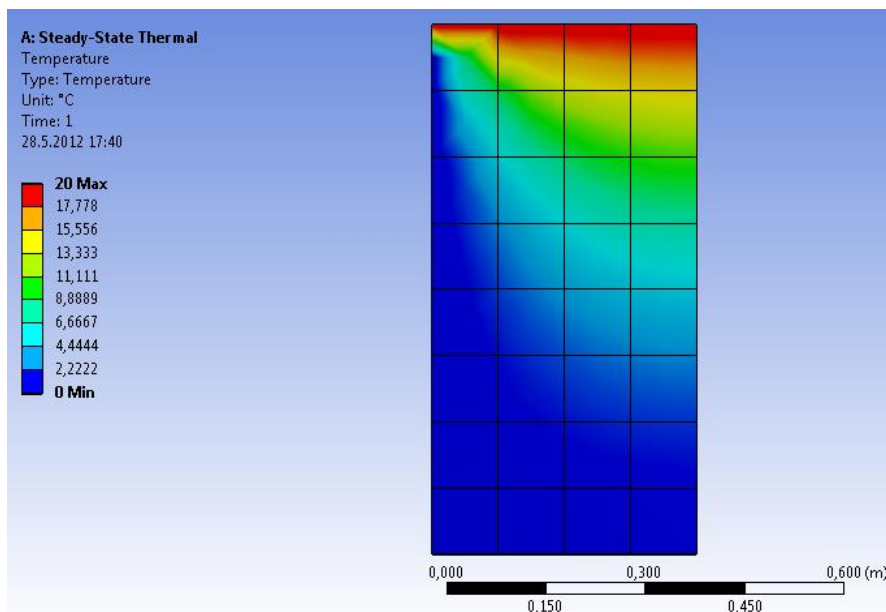
Znana je analitična rešitev prehoda toplote skozi polovico kvadratnega stebra z znanimi površinskimi temperaturami v danih osemindvajsetih točkah. Razlika med z numerično metodo izračunanimi temperaturami in analitičnimi vrednostmi, predstavljenimi v tabeli, ne smejo presegati  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Podani so le robni pogoji v obliki temperatur brez materialnih karakteristik. Linija A-B je simetrijska os in se obravnava kot adiabatna linija. To pomeni, da ni nikakršnega toplotnega toka pravokotno na to linijo, torej morajo biti linije izoterm pravokotne nanjo.



Slika 20: Skica modela za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211

Za stranico kvadrata (BC) sem izbral dimenzijo 800 mm. Najprej poskušam z mrežo z  $8 \times 4$  končnimi elementi dimenzij 100x100 mm:





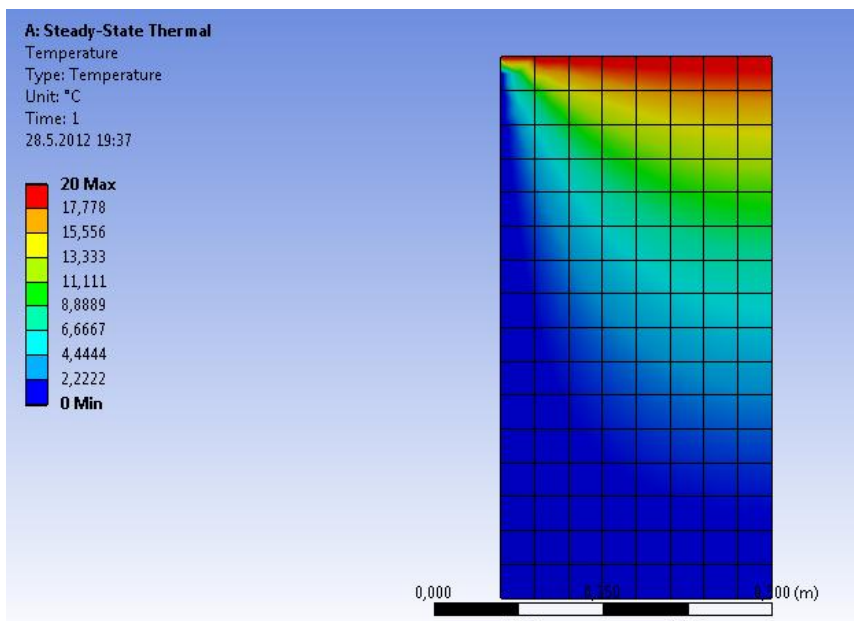
Slika 21: Groba mreža končnih elementov za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211

Preglednica 2: Primerjava rezultatov grobe mreže končnih elementov dimenzij 100x100 mm z analitičnimi vrednostmi

y	100mmx100mm KE tipa				Analitične vrednosti:				Razlika:			
	PLANE 77; n = 32:											
0,8												
0,7	9,0	13,5	14,7	15,1	9,7	13,4	14,7	15,1	-0,7	0,1	0,0	0,0
0,6	5,4	8,6	10,3	10,8	5,3	8,6	10,3	10,8	0,1	0,0	0,0	0,0
0,5	3,2	5,6	7,0	7,5	3,2	5,6	7,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0
0,4	2,0	3,6	4,7	5,0	2,0	3,6	4,7	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	1,3	2,3	3,0	3,2	1,3	2,3	3,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,7	1,4	1,8	1,9	0,7	1,4	1,8	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,3	0,6	0,8	0,9	0,3	0,6	0,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
0												
x -->	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4

Kot je razvidno iz preglednice 2 je v zgornji levi točki razlika med računsko in analitično vrednostjo precej večja od 0,1°C. Postopek ponovim z enkrat gostejšo mrežo.

Zgoščena mreža 16x8 končnih elementov dimenzij 50x50 mm:



Slika 22: Zgoščena mreža končnih elementov za validacijski primer 1 po standardu SIST EN ISO 10211

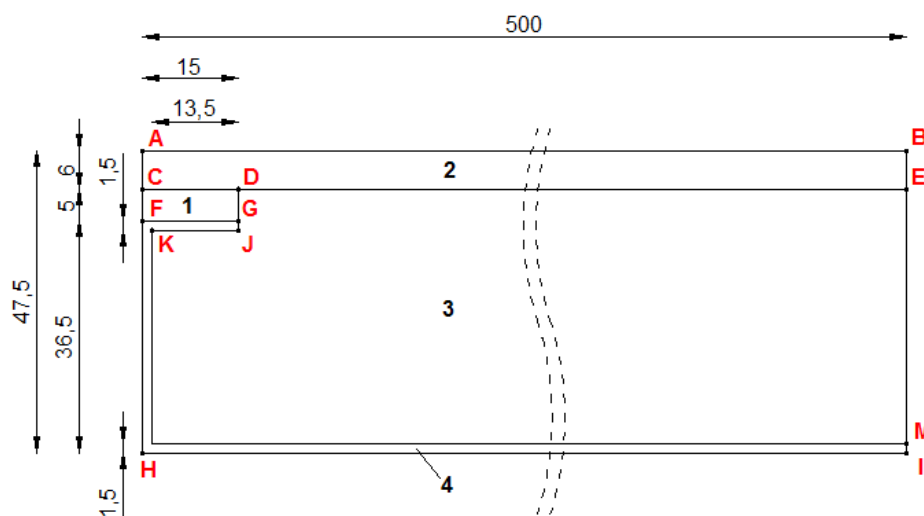
Preglednica 3: Primerjava rezultatov zgoščene mreže končnih elementov dimenzij 50x50 mm z analitičnimi vrednostmi

y	50mmx50mm KE tipa PLANE 77; n = 128:				Analitične vrednosti:				Razlika:				
	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4
0,8													
0,7	9,7	13,4	14,7	15,1	9,7	13,4	14,7	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,6	5,3	8,6	10,3	10,8	5,3	8,6	10,3	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,5	3,2	5,6	7,0	7,5	3,2	5,6	7,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,4	2,0	3,6	4,7	5,0	2,0	3,6	4,7	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,3	1,3	2,3	3,0	3,2	1,3	2,3	3,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,2	0,7	1,4	1,8	1,9	0,7	1,4	1,8	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	
0,1	0,3	0,6	0,8	0,9	0,3	0,6	0,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	
0													
x -->	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,1	0,2	0,3	0,4	

Rezultati, zaokroženi na eno decimalno mesto, se popolnoma ujemajo z analitičnimi vrednostmi.

## 4.2 Referenčni testni primer 2

V tem primeru imamo model iz materialov s štirimi izotropnimi toplotnimi prevodnostmi. Robni pogoji so podani v obliki dveh konvekcijskih nadomestnih plasti toplotnega prestopa in dveh adiabatnih linij (AH in BI).



**Toplotna prevodnost:**  
[W/mK]

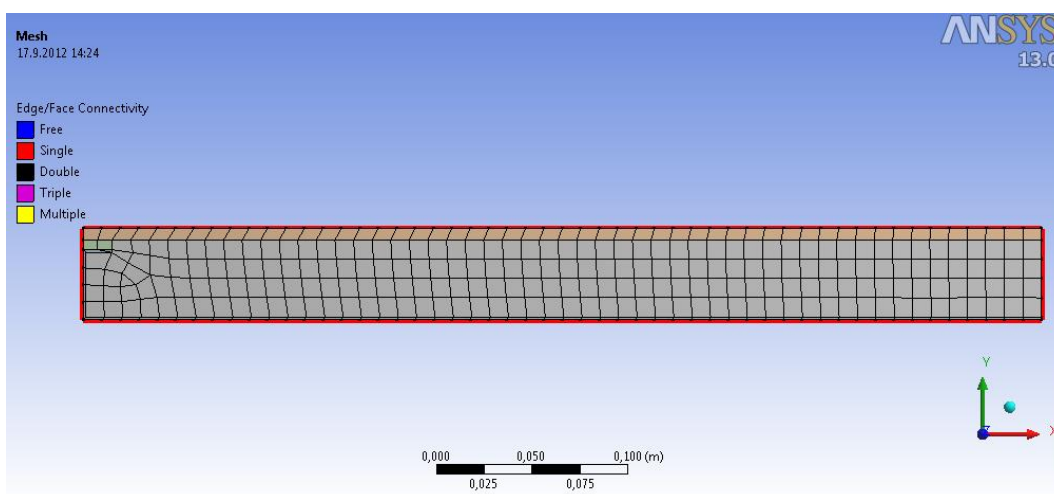
- 1: 1,15
- 2: 0,12
- 3: 0,029
- 4: 230

**Robni pogoji:**

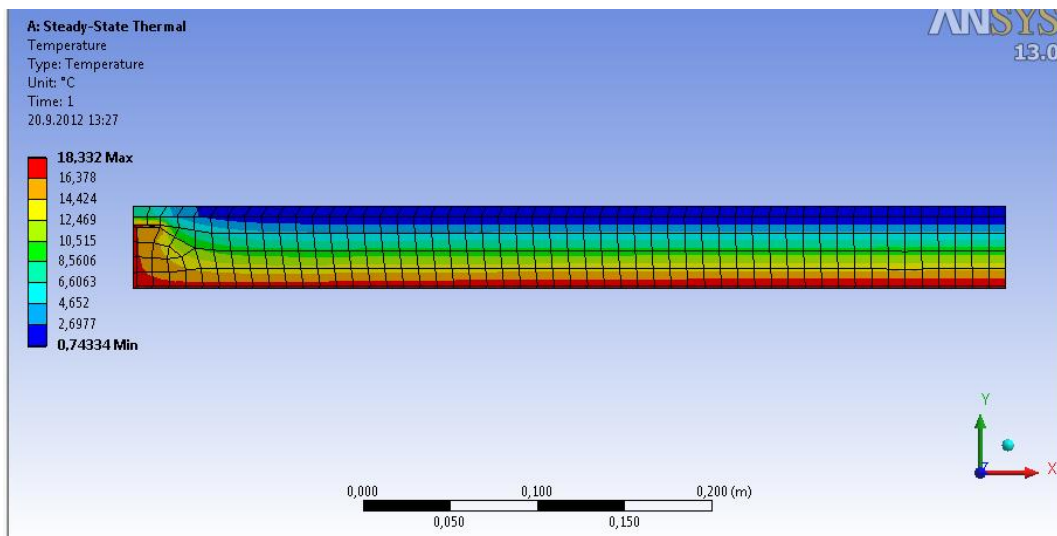
- AB:  $0^{\circ}\text{C}$  in  $R_{se} = 0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$
- HI:  $20^{\circ}\text{C}$  in  $R_{soi} = 0,11 \text{ m}^2\text{K/W}$

Slika 23: Vhodni podatki za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211

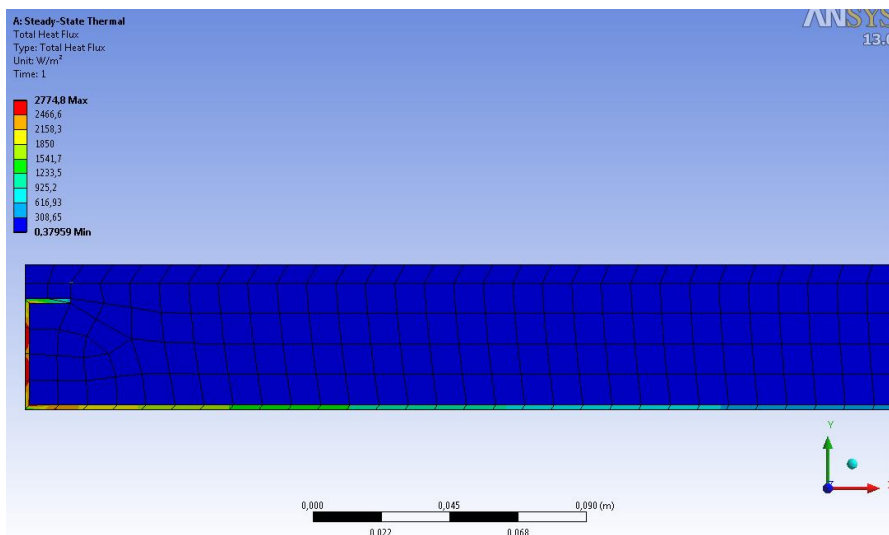
Tokrat pustim da Ansys samodejno kreira mrežo končnih elementov s privzetimi nastavitvami (uporabljeni so večinoma štirikotni osem-voziščni končni elementi). Iz slike 24 je lepo razvidno, da se velikost končnih elementov samodejno prilagaja geometriji. V tanjših slojih 1,2 in 4 je po ena plast končnih elementov, v debelejšem sloju 3 pa so po 4 vrste. Zaradi preproste geometrije modela je tudi mreža KE zelo regularna.



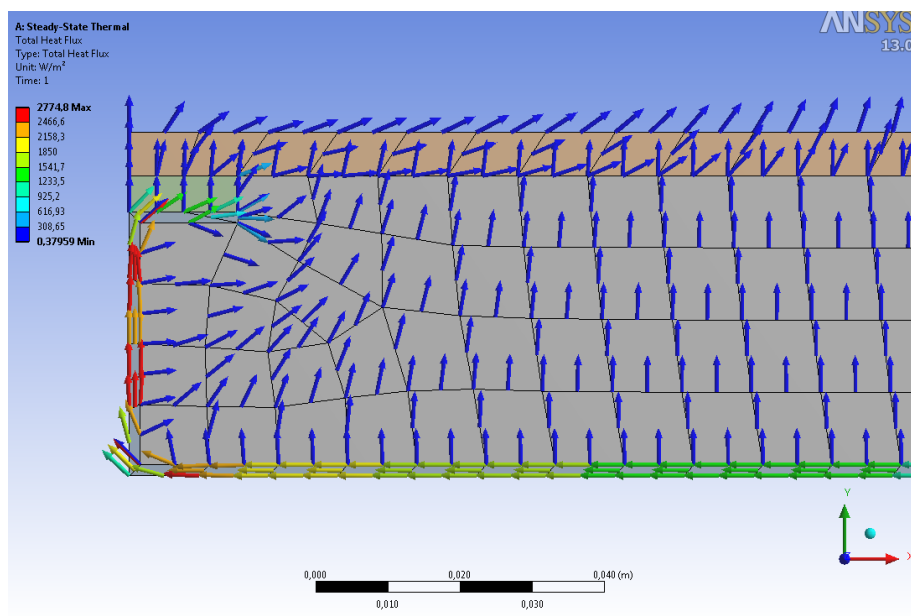
Slika 24: Mreža končnih elementov za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211



Slika 25: Razporeditev temperatur za validacijski primer 2 po standardu SIST EN ISO 10211



Slika 26: Konturni prikaz specifičnega toplotnega toka  $q$  [W/m<sup>2</sup>]



Slika 27: Vektorski prikaz specifičnega toplotnega toka  $q$  [W/m<sup>2</sup>]

Gornje tri slike jasno prikazujejo, da se toplota s spodnje, tople strani modela prenaša skoraj izključno le prek izredno toplotno prevodnega materiala št. 4, kjer se potem v največji meri prevede prek materiala št. 1 do zgornjega robu modela. Materiala št. 1 in 2 lahko zaradi njune majhne toplotne prevodnosti štejejo k toplotno izolativnim materialom. Zaradi konstrukcijske zasnove elementov in razporeditve materialov v zgornjem levem kotu modela dobimo toplotni most, ki je lepo viden predvsem na sliki razporeditve temperatur.

Preglednica 4: Primerjava temperatur v karakterističnih točkah z analitičnimi vrednostmi

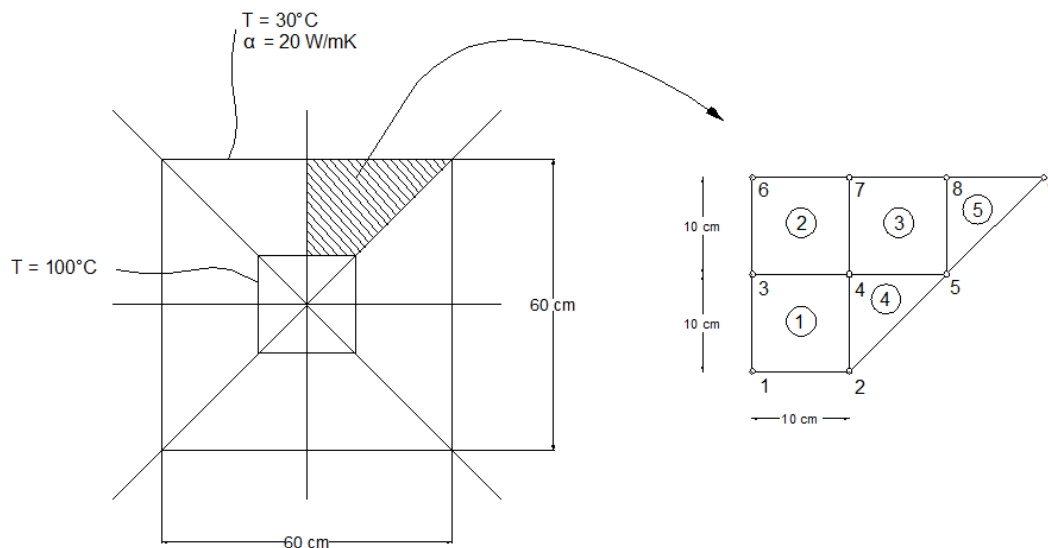
Točka	Koordinate [m]	$T_{Ansys}$ [°C]	$T_{standard}$ [°C]	$\Delta T$
A	0;0,0475	7,1	7,1	0
B	0,5;0,0475	0,8	0,8	0
C	0;0,0415	7,9	7,9	0
D	0,015;0,0415	6,3	6,3	0
E	0,5;0,0415	0,8	0,8	0
F	0;0,0365	16,4	16,4	0
G	0,015;0,0365	16,3	16,3	0
H	0;0	16,8	16,8	0
I	0,5;0	18,3	18,3	0
<b>TOPLOTNI TOK [W/m]</b>		9,5	9,5	0

Iz preglednice 4 je razvidno, da je Ansysova avtomatska mreža v konkretnem primeru povsem zadostna za pravilnost rezultatov.

### 4.3 Testni primer 3 – ročni izračun

V tem testnem primeru želim dokazati, da Ansys z numerično analizo po metodi končnih elementov da enake rezultate, kot bi jih po metodi končnih elementov dobili z računanjem na roko. Vzel sem

nalogo 7.1 iz priročnika za Ansys (Moaveni, 1999, str. 279), v katerem so za preprosto geometrijo betonskega dimnika po metodi končnih elementov peš izračunane vrednosti temperatur v devetih vozliščih računskega modela. Podan je manjši betonski dimnik z izotropno toplotno prevodnostjo  $\lambda = 1,4 \text{ W/mK}$ , kot je prikazano na sliki 28. Na notranji površini dimnika je konstantna temperatura  $100^\circ\text{C}$ . Zunanja površina je izpostavljena okoliškemu zraku s temperaturo  $30^\circ\text{C}$  z ustrezno naravno konvekcijo s koeficientom konveksijske toplotne prestopnosti  $\alpha = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Določiti je potrebno razpored temperature v betonu pod stacionarnimi pogoji.



Slika 28: Shematski prikaz modela dimnika. Zaradi simetrije analiziramo le osmino prereza.

Izbrano osmino dimnika razdelimo na 9 diskretizacijskih točk (vozlišč) in 5 končnih elementov. Elementi (1), (2) in (3) so kvadratni, elementa (4) in (5) pa trikotna končna elementa. Na dveh straneh osmine dimnika upoštevamo adiabatna robna pogoja.

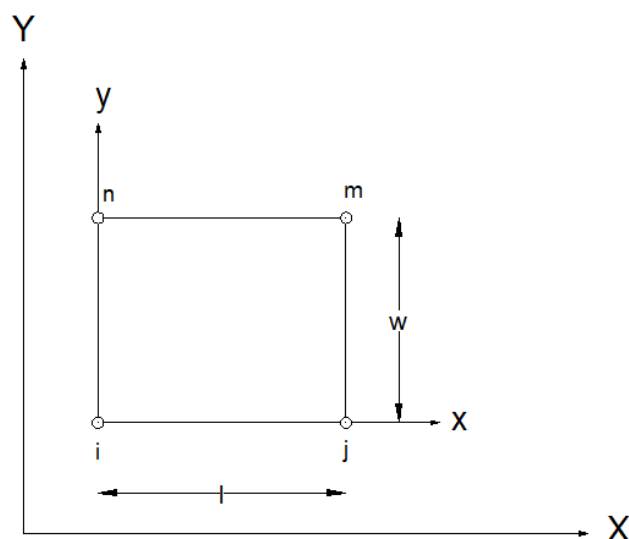
Preglednica 5: Povezava med končnimi elementi in njihovimi vozlišči

Element	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>m</i> ali <i>k</i>	<i>n</i>
(1)	1	2	4	3
(2)	3	4	7	6
(3)	4	5	8	7
(4)	2	5	4	
(5)	5	9	8	

Kondukcijska matrika zaradi kondukcije v pravokotnih končnih elementih je (Moaveni, 1999):

$$[K]^{(e)} = \frac{\lambda_x w}{6l} \begin{bmatrix} 2 & -2 & -1 & 1 \\ -2 & 2 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -2 \\ 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} + \frac{\lambda_y l}{6w} \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & 2 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 2 & 1 \\ -2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (101)$$

kjer sta  $w$  in  $l$  dimenziji stranic končnega elementa,  $\lambda_x$  pa je enaka  $\lambda_y$  oz. kar  $\lambda$ .



Slika 29: Pravokotni končni element

Elementi (1), (2) in (3) so istih dimenzij, zato imajo tudi isto kondukcijsko matriko:

$$\begin{aligned}
 [K]^{(1)} &= [K]^{(2)} = [K]^{(3)} = \\
 &= \frac{1,4 \cdot 0,1}{6 \cdot 0,1} \begin{bmatrix} 2 & -2 & -1 & 1 \\ -2 & 2 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 2 & -2 \\ 1 & -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} + \frac{1,4 \cdot 0,1}{6 \cdot 0,1} \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & 2 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 2 & 1 \\ -2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (102)
 \end{aligned}$$

Za kasnejšo lažjo sestavo globalne kondukcijske matrike dodajmo oznake vozlišč posameznim matrikam:

$$[K]^{(1)} = \begin{array}{cccc} & 1(i) & 2(j) & 4(m) & 3(n) \\ \begin{bmatrix} 0,933 & -0,233 & -0,466 & -0,233 \\ -0,233 & 0,933 & -0,233 & -0,466 \\ -0,466 & -0,233 & 0,933 & -0,233 \\ -0,233 & -0,466 & -0,233 & 0,933 \end{bmatrix} & 1 & 2 & 4 & 3 \end{array} \quad (103)$$

$$[K]^{(2)} = \begin{array}{cccc} & 3(i) & 4(j) & 7(m) & 6(n) \\ \begin{bmatrix} 0,933 & -0,233 & -0,466 & -0,233 \\ -0,233 & 0,933 & -0,233 & -0,466 \\ -0,466 & -0,233 & 0,933 & -0,233 \\ -0,233 & -0,466 & -0,233 & 0,933 \end{bmatrix} & 3 & 4 & 7 & 6 \end{array} \quad (104)$$

$$[K]^{(3)} = \begin{array}{cccc} & 4(i) & 5(j) & 8(m) & 7(n) \\ \begin{bmatrix} 0,933 & -0,233 & -0,466 & -0,233 \\ -0,233 & 0,933 & -0,233 & -0,466 \\ -0,466 & -0,233 & 0,933 & -0,233 \\ -0,233 & -0,466 & -0,233 & 0,933 \end{bmatrix} & 4 & 5 & 8 & 7 \end{array} \quad (105)$$

Kot je bilo izpeljano v prejšnjem podglavju, je za trikotna elementa (4) in (5) kondukcijska matrika sledeča:

$$[K]^{(e)} = \frac{\lambda}{4A} \begin{bmatrix} \beta_i^2 & \beta_i\beta_j & \beta_i\beta_k \\ \beta_i\beta_j & \beta_j^2 & \beta_j\beta_k \\ \beta_i\beta_k & \beta_j\beta_k & \beta_k^2 \end{bmatrix} + \frac{\lambda}{4A} \begin{bmatrix} \delta_i^2 & \delta_i\delta_j & \delta_i\delta_k \\ \delta_i\delta_j & \delta_j^2 & \delta_j\delta_k \\ \delta_i\delta_k & \delta_j\delta_k & \delta_k^2 \end{bmatrix} \quad (106)$$

Ker so faktorji  $\beta$  in  $\delta$  izračunani na podlagi razlike koordinat vozlišč, postavitev izhodišča koordinatnega sistema ne vpliva na rezultate. Faktorji za element (4) so :

$$\begin{aligned} \beta_i &= Y_j - Y_k = 0,1 - 0,1 = 0 & \delta_i &= X_k - X_j = 0 - 0,1 = -0,1 \\ \beta_j &= Y_k - Y_i = 0,1 - 0 = 0,1 & \delta_j &= X_i - X_k = 0 - 0 = 0 \\ \beta_k &= Y_i - Y_j = 0 - 0,1 = -0,1 & \delta_k &= X_j - X_i = 0,1 - 0 = 0,1 \end{aligned} \quad (107)$$

$$\begin{aligned} 2A &= X_i(Y_j - Y_k) + X_j(Y_k - Y_i) + X_k(Y_i - Y_j) = \\ &= 0,1(0) + 0,2(0,1) + 0,1(-0,1) = 0,1 \\ A &= 0,005 \end{aligned} \quad (108)$$

Ker ima element (5) enake razmake med vozlišči so njegovi koeficienti in s tem kondukcijska matrika enaki kot pri elementu (4):

$$\begin{aligned} [K]^{(4)} = [K]^{(5)} &= \frac{1,4}{4 \cdot 0,005} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1^2 & 0,1 \cdot (-0,1) \\ 0 & 0,1 \cdot (-0,1) & (-0,1)^2 \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{1,4}{4 \cdot 0,005} \begin{bmatrix} (-0,1)^2 & 0 & (-0,1) \cdot (0,1) \\ 0 & 0 & 0 \\ (-0,1) \cdot (0,1) & 0 & 0,1^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (109)$$

Dodamo oznake vozlišč in dobimo:

$$[K]^{(4)} = \begin{matrix} & 2(i) & 5(j) & 4(k) \\ \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & -0,7 \\ 0 & 0,7 & -0,7 \\ -0,7 & -0,7 & 1,4 \end{bmatrix} & & & \begin{matrix} 2 \\ 5 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix} \quad (110)$$

$$[K]^{(5)} = \begin{matrix} & 5(i) & 9(j) & 8(k) \\ \begin{bmatrix} 0,7 & 0 & -0,7 \\ 0 & 0,7 & -0,7 \\ -0,7 & -0,7 & 1,4 \end{bmatrix} & & & \begin{matrix} 5 \\ 9 \\ 8 \end{matrix} \end{matrix} \quad (111)$$

Kot omenjeno v prejšnjem podpoglavju, konvekcijski robni pogoji prispevajo svoj delež tako h kondukcijski matriki kot k matriki toplotne obtežbe. Prispevek konvekcijskega robnega pogoja h kondukcijski matriki elementov (2) in (3) na zgornjem robu  $mn$  se glasi (Moaveni, 1999):

$$[K]^{(e)} = \frac{\alpha l_{mn}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ j \\ m \\ n \end{matrix} \quad (112)$$



$$[K]^{(2)} = [K]^{(3)} = \frac{20 \cdot 0,1}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,666 & 0,333 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} \quad (113)$$

$$[K]^{(2)} = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 7 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,666 & 0,333 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{matrix} \quad (114)$$

$$[K]^{(3)} = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 8 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,666 & 0,333 \\ 0 & 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 8 \\ 7 \end{matrix} \quad (115)$$

Prispevek h kondukcijski matriki elementa (5) na robu  $jk$  pa:

$$[K]^{(e)} = \frac{\alpha l_{jk}}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{matrix} i \\ j \\ k \end{matrix} \quad (116)$$

$$[K]^{(5)} = \frac{20 \cdot 0,1}{6} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,666 & 0,333 \\ 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} \quad (117)$$

$$[K]^{(5)} = \begin{bmatrix} 5 & 9 & 8 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,666 & 0,333 \\ 0 & 0,333 & 0,666 \end{bmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 9 \\ 8 \end{matrix} \quad (118)$$

Prispevek konvekcijskega robnega pogoja k matriki toplotne obtežbe za elementa (2) in (3) na robu  $mn$  je:

$$\{F\}^{(e)} = \frac{h \cdot T_f \cdot l_{mn}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{20 \cdot 30 \cdot 0,1}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \end{Bmatrix} \quad (119)$$

Z nazivi vozlišč:

$$\{F\}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \\ 30 \end{Bmatrix} \begin{matrix} 3 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{matrix} \quad \{F\}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 30 \\ 30 \end{Bmatrix} \begin{matrix} 4 \\ 5 \\ 8 \\ 7 \end{matrix} \quad (120)$$

Prispevek konvekcijskega robnega pogoja k matriki toplotne obtežbe za element (5) na robu  $jk$  je:

$$\{F\}^{(e)} = \frac{h \cdot T_f \cdot l_{jk}}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \frac{20 \cdot 30 \cdot 0,1}{2} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 30 \\ 30 \end{Bmatrix} \quad (121)$$

Z nazivi vozlišč:

$$\{F\}^{(5)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 30 \\ 30 \end{pmatrix} \begin{matrix} 5 \\ 9 \\ 8 \end{matrix} \quad (122)$$

Vse matrike posameznih elementov združimo v globalno kondukcijsko matriko:

$$[K]^{(G)} = \begin{bmatrix} 0,933 & -0,233 & -0,233 & -0,466 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,233 & 1,633 & -0,466 & -0,933 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,233 & -0,466 & 1,866 & -0,466 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 0 \\ -0,466 & -0,933 & -0,466 & 4,199 & -0,933 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,933 & 2,333 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 \\ 0 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 1,599 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0,1 & 3,198 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 & 0,1 & 3,665 & -0,367 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,367 & 1,366 \end{bmatrix} \quad (123)$$

Če vpeljemo še robni pogoj konstantne temperature v vozliščih 1 in 2 dobimo:

$$[K]^{(G)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,233 & -0,466 & 1,866 & -0,466 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 0 \\ -0,466 & -0,933 & -0,466 & 4,199 & -0,933 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,933 & 2,333 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 \\ 0 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 1,599 & 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0,1 & 3,198 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 & 0,1 & 3,665 & -0,367 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,367 & 1,366 \end{bmatrix} \quad (124)$$

Sestavljena matrika toplotne obtežbe pa je:

$$\{F\}^{(G)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 30 \\ 30 + 30 \\ 30 + 30 \\ 30 \end{pmatrix} \quad (125)$$

Ko dodamo še robni pogoj konstantne temperature v vozliščih 1 in 2 dobimo končno obliko matrike toplotne obtežbe:

$$\{F\}^{(G)} = \begin{pmatrix} 100 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 30 \\ 60 \\ 60 \\ 30 \end{pmatrix} \quad (126)$$

Končna zbirka enačb se glasi:

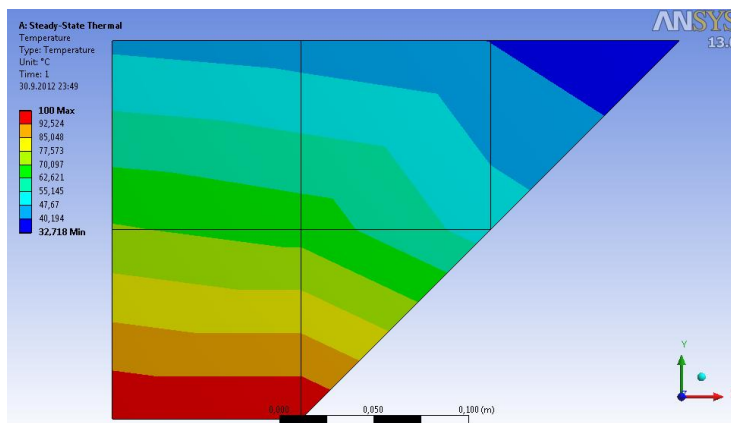
$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0,233 & -0,466 & 1,866 & -0,466 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 0 \\
 -0,466 & -0,933 & -0,466 & 4,199 & -0,933 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -0,933 & 2,333 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 \\
 0 & 0 & -0,233 & -0,466 & 0 & 1,599 & 0,1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -0,466 & -0,466 & -0,466 & 0,1 & 3,198 & 0,1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -0,466 & -0,933 & 0 & 0,1 & 3,665 & -0,367 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,367 & 1,366
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{pmatrix}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 T_4 \\
 T_5 \\
 T_6 \\
 T_7 \\
 T_8 \\
 T_9
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 100 \\
 100 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 30 \\
 60 \\
 60 \\
 30
 \end{pmatrix}
 \quad (127)$$

Rešitev sistema enačb nam da naslednje rezultate v vozliščih:

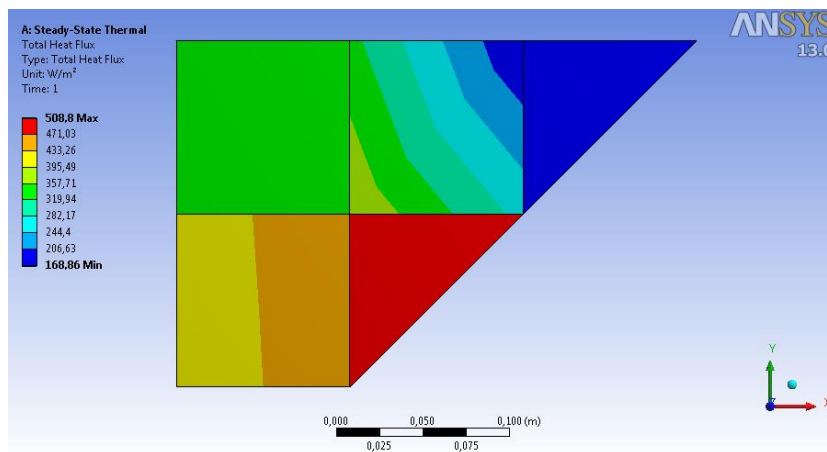
$$\{T\}^{(T)} = [100 \ 100 \ 70,83 \ 67,02 \ 51,56 \ 45,88 \ 43,67 \ 40,10 \ 32,73]^\circ\text{C} \quad (128)$$

#### 4.3.1 Račun s programskim paketom Ansys

Prejšnji primer sem izračunal še v Ansysu. Program je uporabil tri pravokotne končne elemente tipa PLANE55 in dva trikotna končna elementa ravno tako tipa PLANE55. Rezultati so praktično enaki kot sem jih dobil s peš izračunom.



Slika 30: Temperaturna distribucija po osmini dimnika z osnovno mrežo končnih elementov

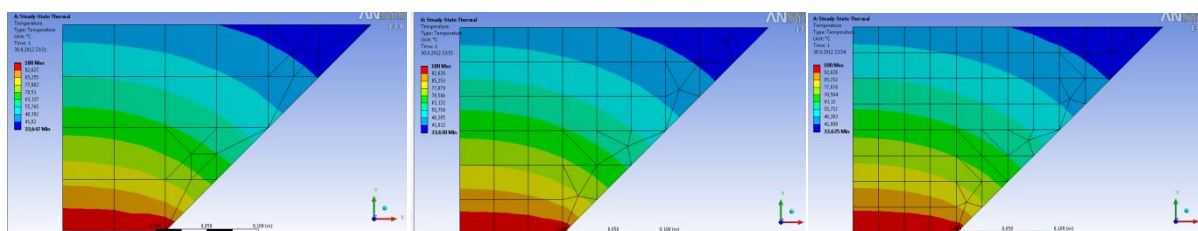


Slika 31: Celotni specifični toplotni tok,  $q_{max} = 508,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ,  $q_{min} = 168,86 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

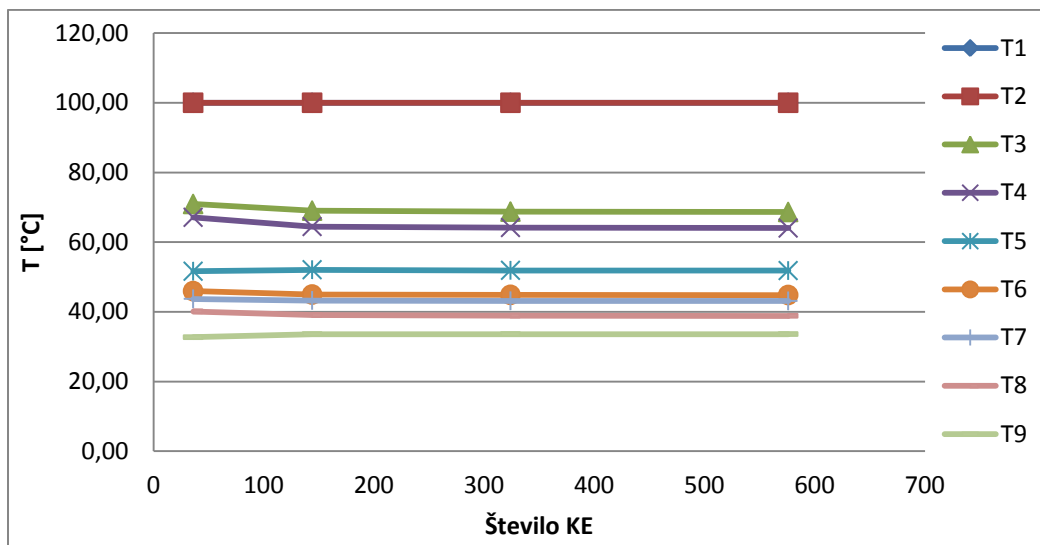
Preglednica 6: Primerjava med rezultati iz programa Ansys in ročnega izračuna po metodi končnih elementov

Vozlišče	$T_{Ansys}$ [°C]	Zaokroženo [°C]	$T_{MKE-ročno}$ [°C]	Razlika [°C]	$T_{Ansys}/T_{MKE-}$ <i>ročno</i>	razlika [%]
1	100	100,00	100	0,00	1	0,00%
2	100	100,00	100	0,00	1	0,00%
3	70,953	70,95	70,83	0,12	1,001737	0,17%
4	67,115	67,12	67,02	0,09	1,001417	0,14%
5	51,644	51,64	51,56	0,08	1,001629	0,16%
6	45,94	45,94	45,88	0,06	1,001308	0,13%
7	43,727	43,73	43,67	0,06	1,001305	0,13%
8	40,13	40,13	40,1	0,03	1,000748	0,07%
9	32,718	32,72	32,73	-0,01	0,999633	-0,04%

Mrežo s slike 30 sem še trikrat zgostil z ukazom »Refinement«, da sem videl kam konvergirajo rezultati.



Slika 32: Prikaz mrež KE pri avtomatski 1-kratni, 2-kratni in 3-kratni zgostitvi mreže

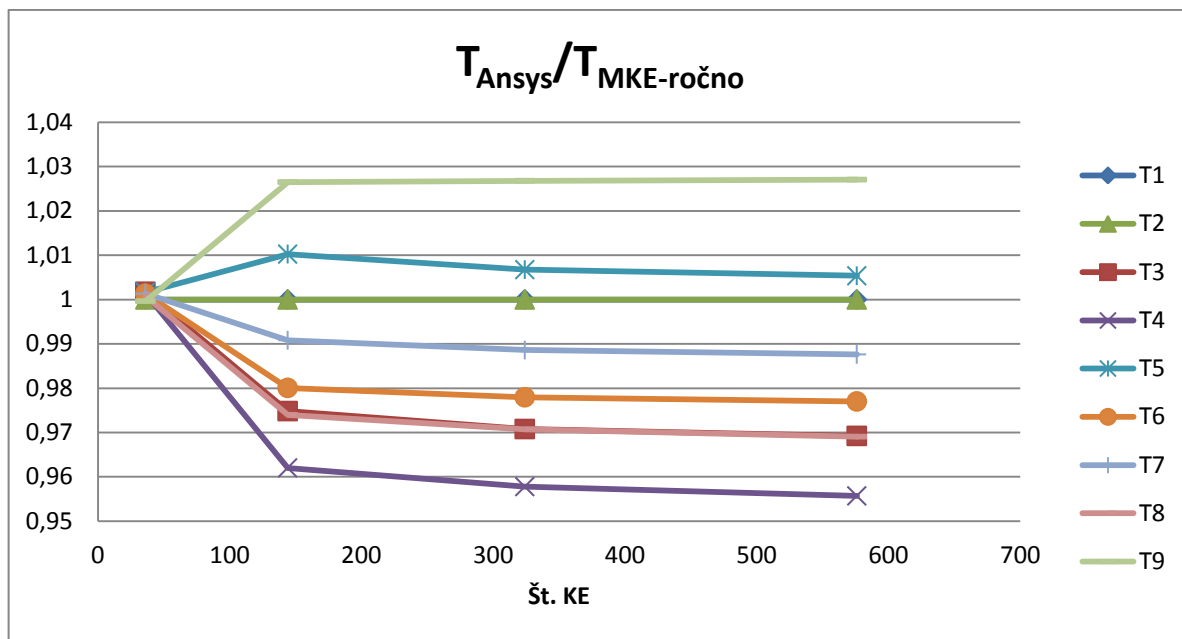


Grafikon 1: Graf odvisnosti rezultatov od gostote mreže

Vidimo da je razlika v rezultatih med osnovno in najbolj gosto mrežo izredno majhna, kar pomeni, da je bila razdelitev na pet končnih elementov upravičena, saj so bili izračunani rezultati relativno natančni.

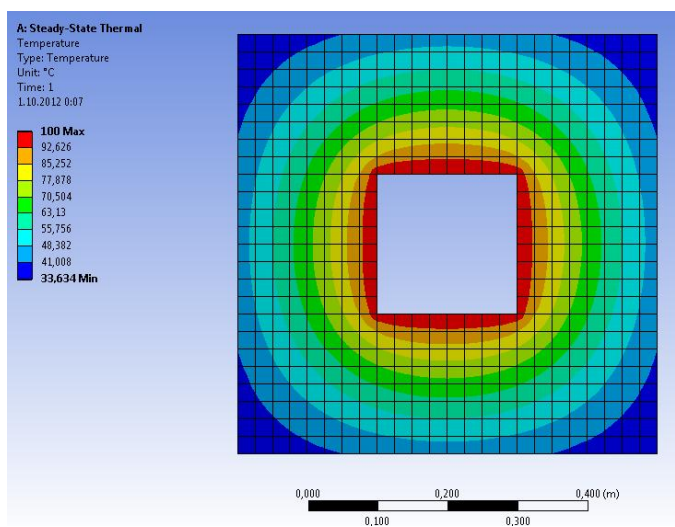
Preglednica 7: Primerjava rezultatov trikrat zgoščene mreže in ročnega izračuna

Vozlišče	$T_{Ansys}$ [°C]	Zaokroženo [°C]	$T_{MKE-ročno}$ [°C]	Razlika [°C]	Razlika [%]
1	100	100,00	100	0,00	0,00%
2	100	100,00	100	0,00	0,00%
3	68,65	68,65	70,83	-2,18	-3,08%
4	64,051	64,05	67,02	-2,97	-4,43%
5	51,836	51,84	51,56	0,28	0,54%
6	44,825	44,83	45,88	-1,06	-2,30%
7	43,129	43,13	43,67	-0,54	-1,24%
8	38,859	38,86	40,1	-1,24	-3,09%
9	33,615	33,62	32,73	0,89	2,70%

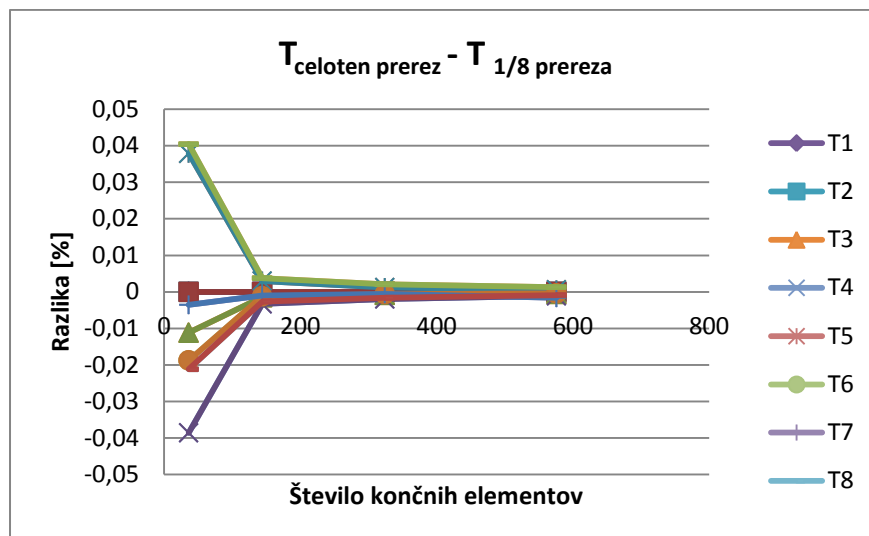


Grafikon 2: Primerjava rezultatov ob zgoščanju mreže končnih elementov

Razultate sem primerjal še s polnim prerezom dimnika.



Slika 33: Model celotnega prereza dimnika



Grafikon 3: Mreža končnih elementov na celotnem prerezu dimnika (zgoraj) ter razlika v rezultatih med trikrat zgoščenima mrežama celotnega prereza in osmino prereza

Glede na popolnoma zanemarljivo razliko v rezultatih (pri treh zgostitvah mreže je največja razlika v rezultatu 0,0013%), je obravnava osmine prereza dimnika upravičena.

#### 4.4 Nestacionarna toplotna analiza dimnika

Na primeru dimnika s slike 30 bom prikazal, da v nekem končnem času pri nestacionarni toplotni analizi dobimo isti rezultat kot v primeru stacionarne analize, katero uporabljam v diplomski nalogi. Zakon o ohranitvi energije pravi, da mora biti vsota toplote, ki se prenese v telo in toplote, ki jo telo generira, enako toploti, ki izhaja iz telesa in spremembi energije v telesu. Če toploto, ki vstopi, in toploto, ki izstopi iz telesa skombiniramo v en sam člen (gradient specifičnega toplotnega toka), lahko to matematično za dvodimenzionalni problem napišemo v obliki:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \dot{q}_{gen} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (129)$$

Tretji člen na levi strani enačbe predstavlja odvod specifičnega toplotnega toka notranjega vira energije po času  $t$ , člen na desni pa predstavlja sposobnost telesa za shranjevanje toplote z dviganjem lastne temperature. V kolikor nimamo notranjega vira energije lahko enačbo (129) zapišemo v obliki:

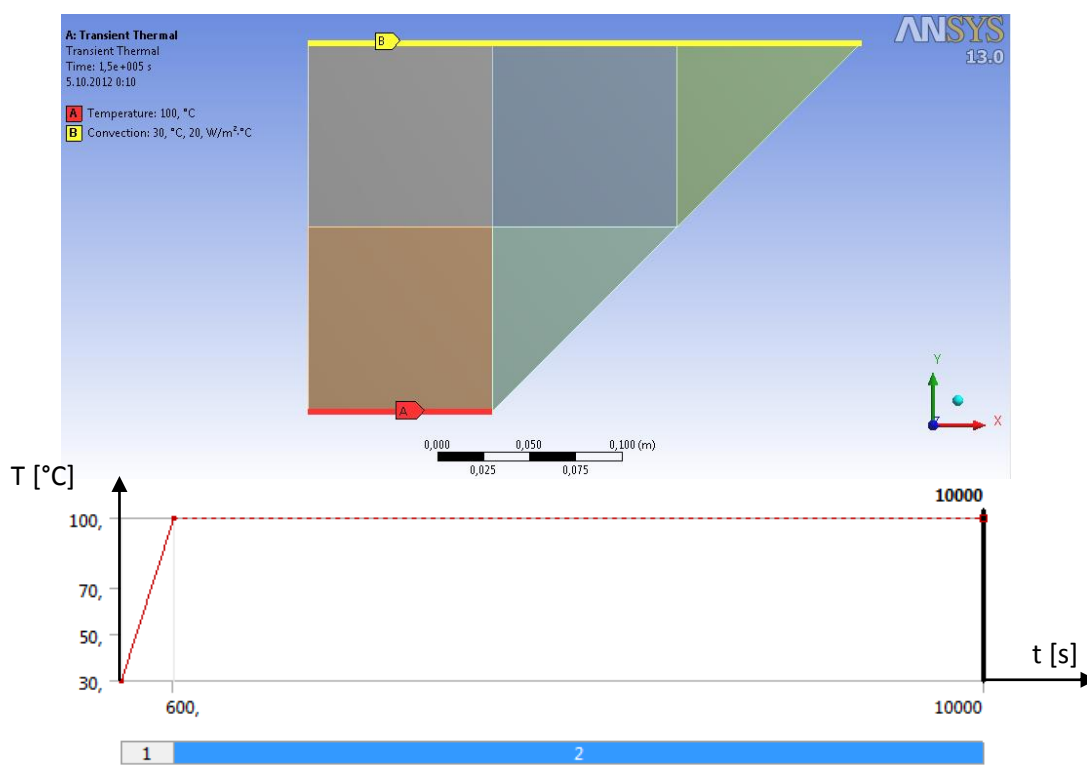
$$\lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (130)$$

Uvedemo faktor  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left[ \frac{m^2}{s} \right]$ , ki ga imenujemo toplotna difuzivnost materiala. Opređeljena je z razmerjem med toplotno prevodnostjo snovi  $\lambda$  [W/mK] in zmožnostjo shranjevanja toplote, ki je odvisna od gostote  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] in specifične toplote pri konstantnem tlaku  $c_p$  [J/kgK].

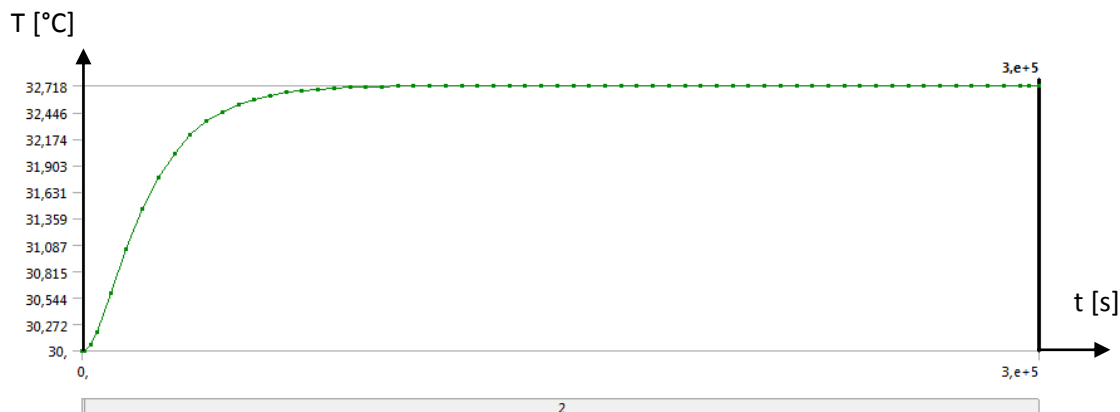
$$a \cdot \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (131)$$

V primeru stacionarne toplotne analize se temperatura ne spreminja s časom, zato je desna stran enačbe enaka nič. Predpostavljamo da je obtežba stalna, toplotni tok konstanten, fizikalni parametri ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ) pa so temperaturno nespremenljivi.

Da bi lahko izvedel nestacionarno analizo, moram v Ansys-ovo materialno knjižnico dodatno vnesti še gostoto in specifično toploto. Glede na toplotno prevodnost, podano v točki 5.3 iz standarda SIST EN ISO 10456:2008, izberem beton z ustrežajočo gostoto  $2000 \text{ kg/m}^3$  in specifično toploto  $1000 \text{ J/kgK}$ . Izberem enake robne pogoje kot v primeru stacionarne analize, vendar upoštevam, da je začetna temperatura na notranji površini dimnika ob času  $t = 0$  enaka  $30^\circ\text{C}$ , nato pa se linearno v desetih minutah povzpne na  $100^\circ\text{C}$  (korak 1), potem pa ostane konstantna (korak 2).

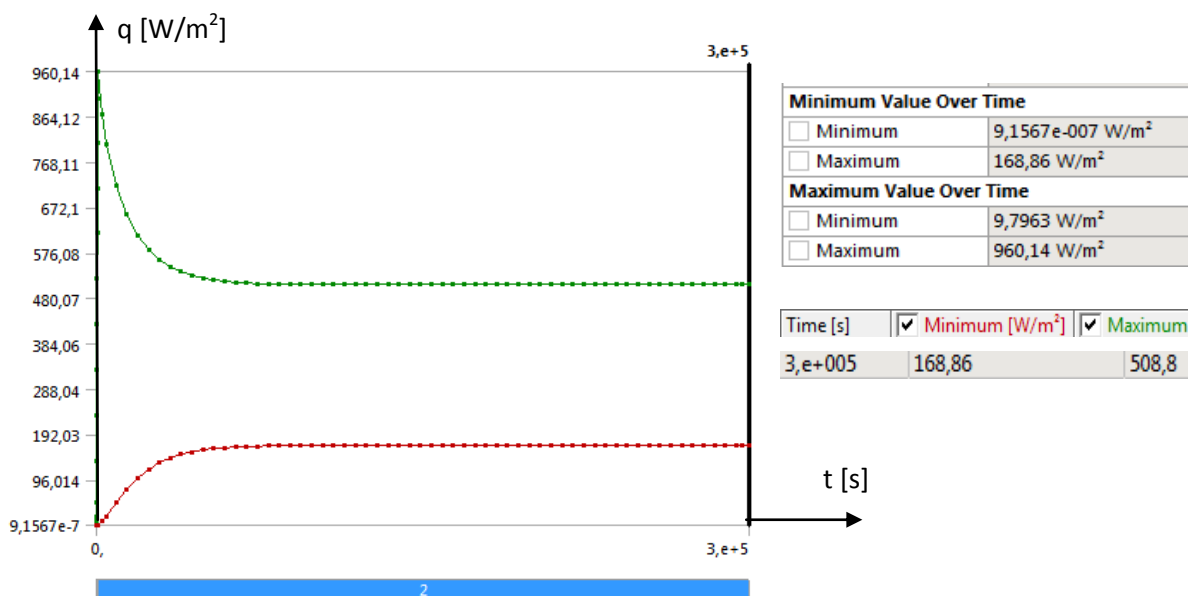


Slika 34: Nestacionarni robni pogoj na notranji površini dimnika (končni čas je bil 300.000 s, na grafu je prikazano do  $t = 10.000 \text{ s}$ , da je viden 1. korak



Slika 35: Časovno odvisno spreminjanje temperature v vozlišču 9. Graf  $T-t$  je za ostala vozlišča podobne oblike





Slika 36: Časovno odvisno spreminjanje največjega in najmanjšega specifičnega toplotnega toka  $q$  [W/m<sup>2</sup>]

Če primerjamo sliki 31 in 36 vidimo, da je tudi končna vrednost minimalnega in maksimalnega spec. toplotnega toka nestacionarne analize enaka kot pri stacionarni analizi. Spec. toplotni tok se skokovito povečuje do  $t = 600$  s, ko doseže svojo maksimalno vrednost  $960,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ . V tem trenutku se vzpostavijo konstantni robni pogoji (popolnoma enaki kot v testnem primeru 3), vendar je zaradi v materialu akumulirane toplote vrednost spec. toplotnega toka še vedno večja kot pri stacionarni analizi. S postopnim prevajanjem akumulirane toplote v okoliški zrak dimnika se zmanjšuje tudi vrednost  $q$ . Ko se naposled vsa dodatna akumulirana toplota sprosti v okoliški zrak, se vzpostavi ravnotežno temperaturno stanje, desni člen enačbe (131) pa postane enak nič. Specifični toplotni tok pri nestacionarni analizi doseže konstantno vrednost  $168,86 \text{ W/m}^2\text{K}$  pri  $t \approx 154.000$  s, konstantno vrednost  $508,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  pa pri  $t \approx 159.000$  s.

Preglednica 8: Rezultati nestacionarne analize v času  $t=300000$  s

Vozlišče	$T_{\text{primer 5.4 Ansys}}$ [°C]	Zaokroženo [°C]	$T_{\text{primer 5.3 Ansys}}$ [°C]	Razlika [°C]	$t$ stabilizacije [s]
1	100	100,00	100,00	0,00	600
2	100	100,00	100,00	0,00	600
3	70,953	70,95	70,95	0,00	215940
4	67,115	67,12	67,12	0,00	175940
5	51,644	51,64	51,64	0,00	185940
6	45,94	45,94	45,94	0,00	195940
7	43,727	43,73	43,73	0,00	205940
8	40,13	40,13	40,13	0,00	165940
9	32,718	32,72	32,72	0,00	155940

Iz zadnjega stolpca preglednice 8 opazimo, da posamezna vozlišča dosežejo svojo končno vrednost temperature po različnem časovnem obdobju. Iz enačbe (131) je razvidno, da se  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  zmanjšuje z zniževanjem toplotne prevodnosti  $\lambda$  in povečevanjem gostote in specifične toplote materiala. To pomeni da bo material shranil več prejete toplote, ki jo bo oddal čez daljši čas, zaradi česar bo končna

temperatura v materialu dosežena šele v daljšem času in obratno. Materiali z večjo toplotno difuzivnostjo se hitreje odzivajo na spremembe temperature okolice.

## 5 DETAJL VOGAL NAVZNOTER

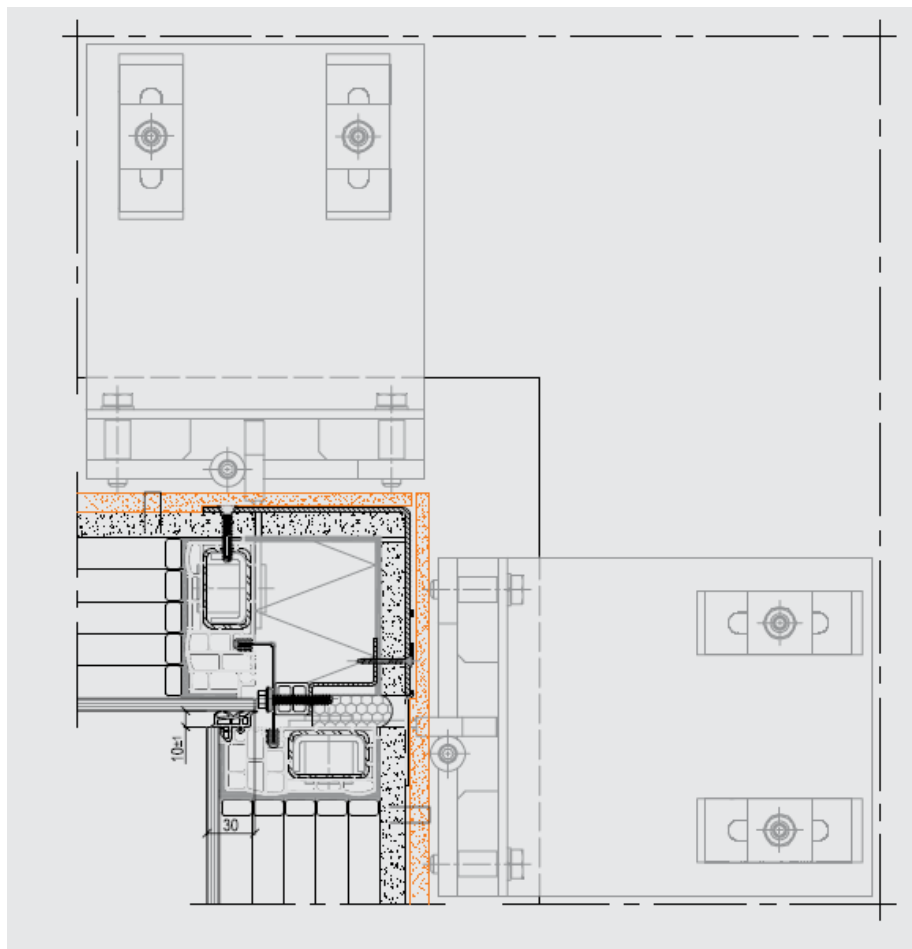
### 5.1 Vhodni podatki

#### 5.1.1 Opis detajla

Dva pokončno postavljena panela Qbiss Air sta bočno povezana s predizdelanim vogalnim elementom, katerega nosilno konstrukcijo predstavljajo aluminijasti L-profil ter jekleni Z in L profil. Polnilo vogalnega elementa je mineralna volna. Lahko je izdelan tudi iz dveh elementov.



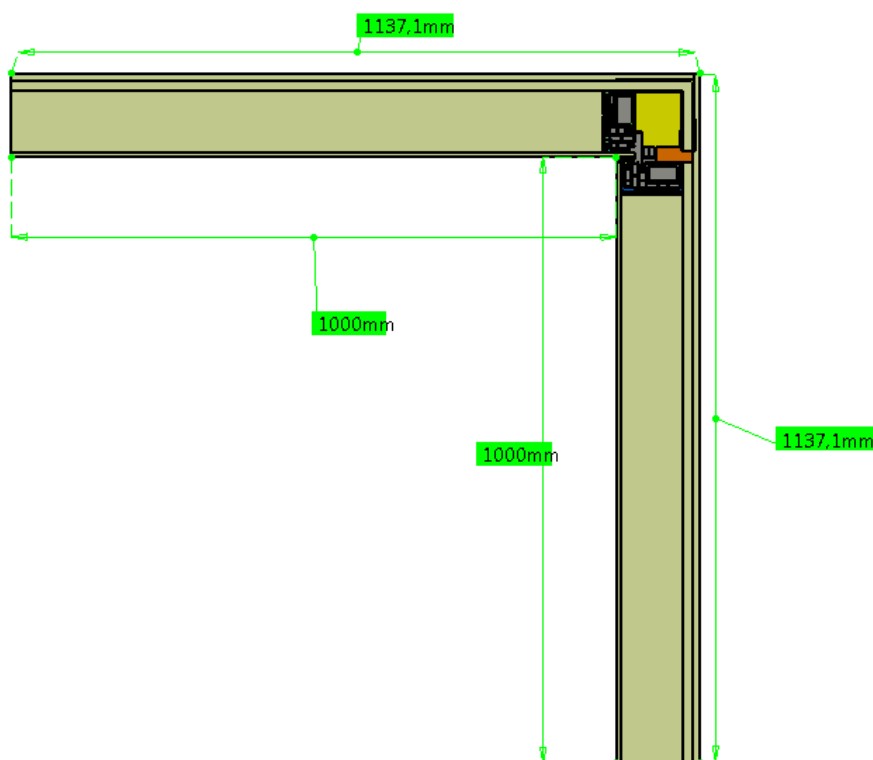
Slika 37: 3D prikaz stika dveh Qbiss Air panelov v vogalu fasade navznoter (Tehnični list Qbiss Air, 2011)



Slika 38: 2D shematski prikaz detajla vogala navznoter (Tehnični list Qbiss Air, 2011)

### 5.1.2 Opis geometrijskega modela

Po standardu SIST EN ISO 10211 je potrebno modelirati detajl najmanj v dolžini  $d_{min}$ , ki znaša 1000 mm od točke linijskega toplotnega mostu (v konkretnem primeru je to stik dveh panelov na zunanji strani fasade) ali do simetrijske osi. V mojem primeru je merodajen prvi kriterij in tako dobim dolžino krakov detajla 1000 mm na zunanji strani fasade ter 1137,1 mm na notranji strani.



Slika 39: Dimenzije 2D računskega modela iz programa Catia V5

### 5.1.3 Toplotne prevodnosti materialov

Toplotne prevodnosti za večino uporabljenih materialov so bile podane s strani CBS Inštituta. Za preostale materiale sem uporabil ustrezne vrednosti iz standarda SIST EN ISO 12524.

Preglednica 9: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo

Material	Toplotna ali nadomestna prevodnost W/mK
Jeklo Cold rolled Grade 304 (distančnik) Cardinal steel	14,2
PS polimer distančnika Ultra QA	0,16
Polisulfid TKK specialni (lepilo 3)	0,22
Akrilno lepilo 2	0,20
EPDM guma	0,25
Poliuretanska pena	0,024
Aluminij (folija, profil)	160
Gips navaden (mavčna plošča)	0,21
Gips Rigidur H	0,202
Steklo	1,00
PA66 GF40 (GF 25)	0,30
Jeklo	50
Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub>	0,023

se nadaljuje...

... nadaljevanje Preglednice 9

Parna zapora (PE)	0,19
PVC	0,17
Mineralna volna	0,038
Jedro Qbiss Air panela (⊥)	0,01808
Zračni sloj IB	0,04545

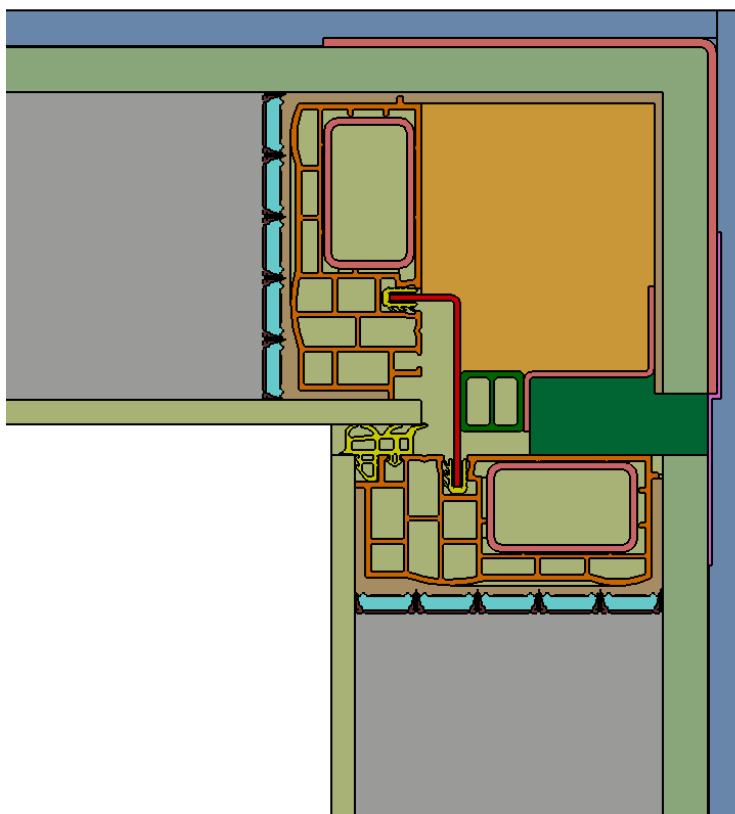
IB je tanka zračna plast med rigidur ploščo in sekundarno mavčno ploščo. Njeno toplotno prevodnost sem izračunal z interpolacijo vrednosti, navedenih v SIST EN ISO 6946. Debelina zračne plasti IB znaša približno 0,3 mm (podatek CBS Inštitut). Toplotni tok ima smer normale na ravnino IB plasti.

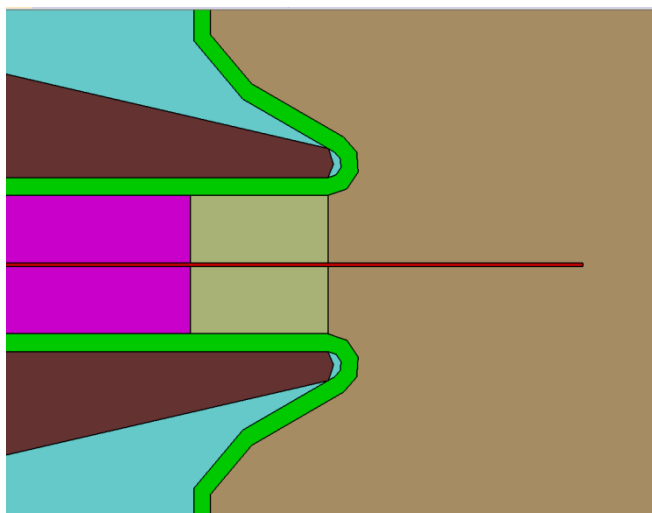
Preglednica 10: Toplotna upornost (v  $m^2K/W$ ) neprezračevanih zračnih plasti po SIST EN ISO 6946

Debelina zračne plasti [mm]	Smer toplotnega toka		
	Navzgor	Horizontalno	Navzdol
0	0	<b>0</b>	0
5	0,11	<b>0,11</b>	0,11

$$R_{IB} = 0,3 * 0,11 / 5 = 0,0066 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (132)$$

$$\lambda_{IB} = d / R_{IB} = 0,0003 \text{ m} / 0,0066 \text{ m}^2\text{K/W} = 0,04545 \text{ W/mK} \quad (133)$$

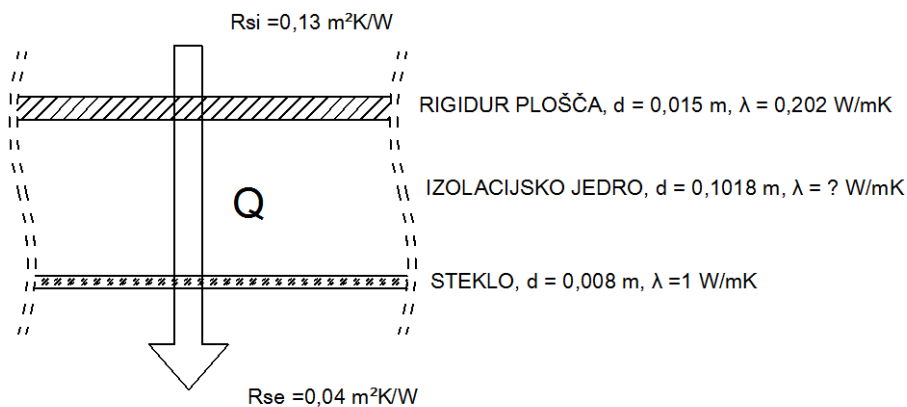




Jeklo Cold rolled Grade 304	Rigidur H	Parna zapora (PE)
PS polimer distančnika	Steklo	PVC
Polisulfid TKK specialni	PA66 GF40	Mineralna volna
Akrilno lepilo 2	Jeklo	Jedro Qbiss Air
Poliuretanska pena	Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub>	EPDM guma
Aluminij	Mavčna plošča	Zrak

Slika 40: Prikaz materialov v detajlu vogal navznoter

Jedro Qbiss Air panela tvori pet komor, napoljenih s CO<sub>2</sub> in ločenih z aluminijastimi folijami. Ta sloj privzamem kot homogen in zanj na podlagi eksperimentalno potrjene toplotne prehodnosti Qbiss Air panela, ki merjeno čez jedro znaša 0,17 W/m<sup>2</sup>K (interno poročilo CBS Inštitut) izračunam nadomestno toplotno prevodnost v smeri normale na zunanjo oz. notranjo površino panela.



Slika 41: Določitev nadomestne toplotne prevodnosti jedra panela Qbiss Air

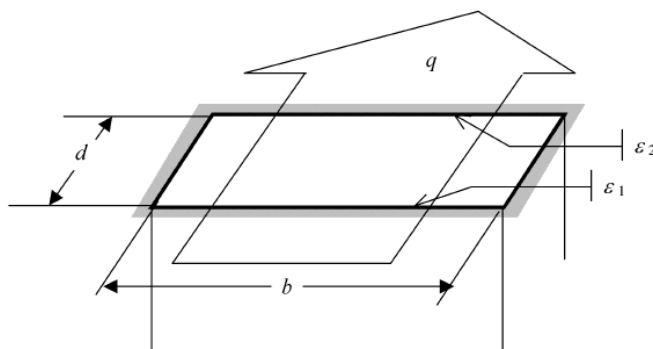
$$R = \frac{1}{U_{panela}} = R_{si} + \frac{d_{rigidur}}{\lambda_{rigidur}} + \frac{d_{jedro}}{\lambda_{jedro}} + \frac{d_{steklo}}{\lambda_{steklo}} + R_{se}$$

$$\frac{1}{0,17} = 0,13 + \frac{0,015}{0,202} + \frac{0,1018}{\lambda_{jedro}} + \frac{0,008}{1} + 0,04 \quad (134)$$

$$\lambda_{jedro} = 0,01808 \text{ W/mK}$$

V detajlu vogala navznoter in vogala navzven je veliko zračnih prostorov oz. reg. Po standardu SIST EN ISO 10077-2 toplotni tok v zračnih regah predstavimo z ekvivalentno toplotno prevodnostjo  $\lambda_{eq}$ . Ta zajema prenos toplote s kondukcijo, konvekcijo in sevanjem. Odvisna je od geometrije zračne rege in materialov, ki jo obdajajo. Večinoma gre za zaprte (neprezračevane) zračne rege, nekaj pa se jih ima za prezračevane. Za neprezračevane se smatrajo tiste, ki so popolnoma zaprte ali pa jih z zunanjim ali notranjim okoljem povezuje odprtina, ki ne presega 2 mm. Postopek izračuna za neprezračevane pravokotne zračne rege:

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{R_s} \quad R_s = \frac{1}{h_a + h_s} \quad (135)$$



Slika 42: Pravokotna zračna rega. Dimenzija  $d$  je največja dimenzija rege v smeri toplotnega toka, dimenzija  $b$  pa je največja dimenzija rege pravokotno na smer toplotnega toka.  $\varepsilon_1$  in  $\varepsilon_2$  sta emisivnosti sten, ki obdajata rego v smeri toplotnega toka.

Koeficient prenosa toplote s konvekcijo -  $h_a$ :

$$\text{če } b < 5 \text{ mm: } h_a = \frac{C_1}{d} \dots; \quad C_1 = 0,025 \text{ W/mK} \quad (136)$$

$$\text{sicer: } h_a = \max \left\{ \frac{C_1}{d}; C_2 \Delta T^{1/3} \right\}; \quad C_1 = 0,025 \frac{\text{W}}{\text{mK}}; \quad C_2 = 0,73 \text{ W/m}^2 \text{K}^{4/3} \quad (137)$$

$\Delta T$  je maksimalna površinska temperaturna razlika v zračni regi. Če ni drugega podatka se uporabi vrednost  $\Delta T = 10 \text{ K}$ , za katero je:

$$h_a = \max \left\{ \frac{C_1}{d}; C_3 \right\}; \quad C_1 = 0,025 \frac{\text{W}}{\text{mK}}; \quad C_3 = 1,57 \text{ W/m}^2 \text{K} \quad (138)$$

Koeficient prenosa toplote s sevanjem -  $h_r$ :

$$h_r = 4\sigma T_m^3 E F \quad (139)$$

Kjer so:

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$  ... Stefan – Boltzmannova konstanta

$$E = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \dots \text{ medpovršinska emisivnost} \quad (140)$$

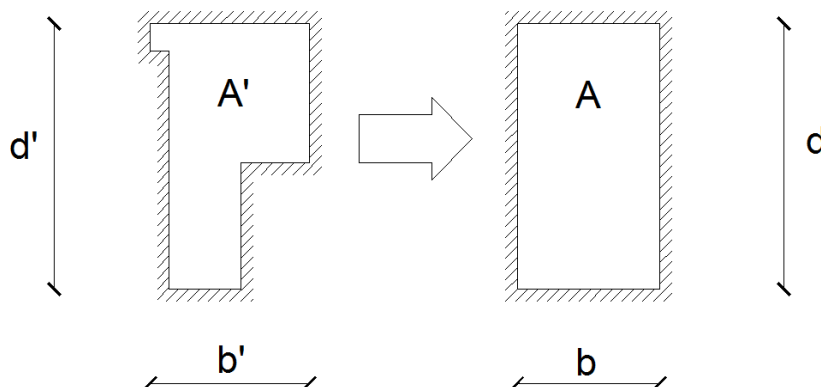


$$F = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b \right) \dots \text{faktor pogleda za pravokotno rego} \quad (141)$$

Če emisivnosti niso znane se vzame  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$  in  $T = 283 \text{ K}$ , pri čemer dobimo:

$$h_r = C_4 \left( 1 + \sqrt{1 + (d/b)^2} - d/b \right); \quad C_4 = 2,11 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (142)$$

Neprezračevane nepravokotne zračne rege ( $d'$ ,  $b'$ ,  $A'$ ) transformiramo v pravokotne zračne rege z enako ploščino ( $A' = A$ ) in razmerjem stranic ( $d/b = d'/b'$ ). Rege katerih ena dimenzija ne presega 2 mm se obravnavajo ločeno.

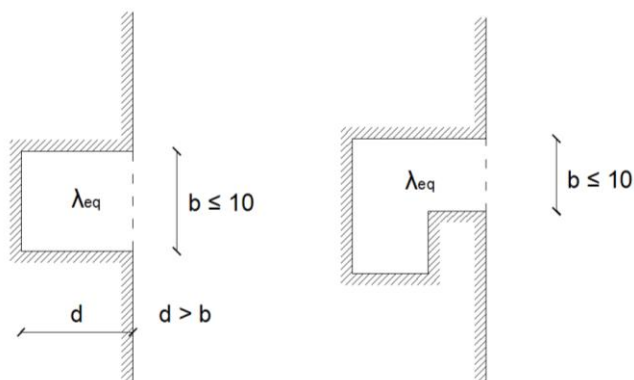


Slika 43: Transformacija nepravokotne rege po standardu SIST EN ISO 10077-2

Transformacija se glasi:

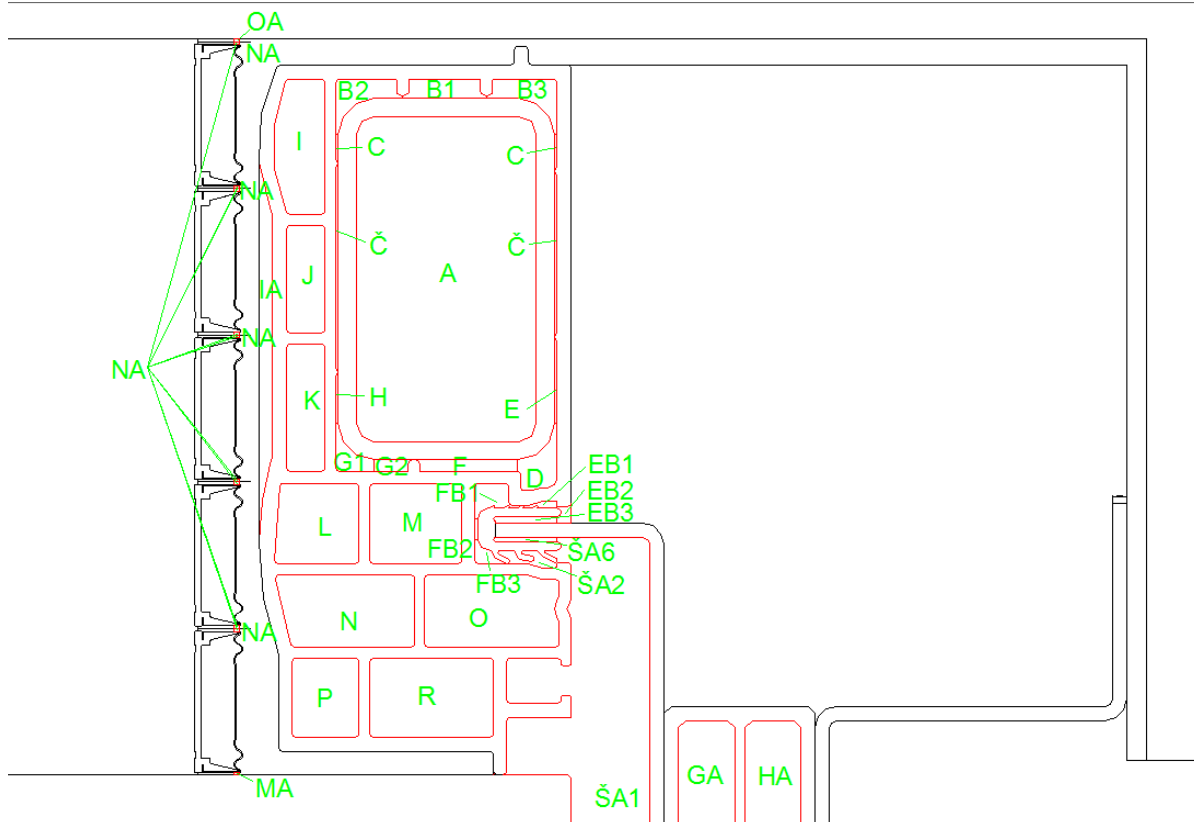
$$b = \sqrt{A'b'/d'} \quad d = \sqrt{A'd'/b'} \quad (143)$$

Ker je v modelu veliko zračnih reg, ki so obdane z zelo različnimi materiali, za katere ne poznam vseh emisivnosti, sem pri vseh regah upošteval v standardu predpisano emisivnost  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$ .

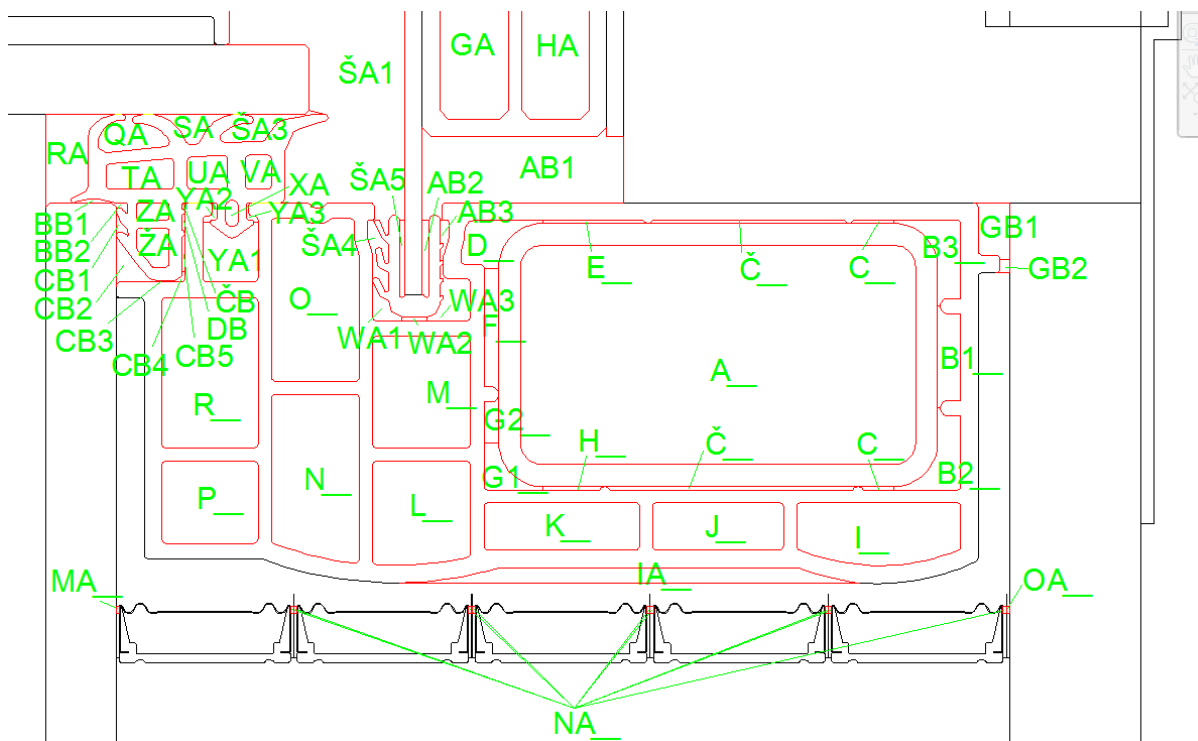


Slika 44: Delno prezračevane rege

Delno prezračevane rege imajo 2 do 10 mm široko odprtino, ki jih povezuje z okoliškim zrakom. Njihova nadomestna toplotna prevodnost je dvakrat večja od neprezračevane rege iste velikosti.



Slika 45: Prikaz zračnih reg na zgornjem delu detajla vogala navznoter



Slika 46: Prikaz zračnih reg na spodnjem delu detajla vogala navznoter

Preglednica 11: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu vogala navzven

Naziv	$d'$ [mm]	$b'$ [mm]	$A'$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$h_o$ [W/m <sup>2</sup> K]	$E$	$F$	$h_r$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_s$ [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,x}$ [W/mK]
A	25,0000	45,0000	1119,6350	24,9403	44,8926	1,570	0,818	0,794	3,340	0,204	0,122
A_	45,0000	25,0000	1119,6350	44,8926	24,9403	1,570	0,818	0,630	2,648	0,237	0,189
AB1	22,9683	10,5391	177,7317	19,6809	9,0307	1,570	0,818	0,609	2,562	0,242	0,081
AB2	0,8206	8,7854	0,1469	0,1171	1,2541	213,424	0,818	0,955	4,019	0,005	0,025
AB3	1,0273	4,7928	3,5561	0,8731	4,0732	28,635	0,818	0,904	3,803	0,031	0,028
B1	11,6300	2,6203	26,8142	10,9093	2,4579	2,292	0,818	0,556	2,337	0,216	0,050
B1_	2,6203	11,6300	26,8142	2,4579	10,9093	10,171	0,818	0,900	3,785	0,072	0,034
B2	9,3714	7,6203	30,1901	6,0932	4,9547	4,103	0,818	0,678	2,850	0,144	0,042
B2_	7,6203	9,3714	30,1901	4,9547	6,0932	5,046	0,818	0,738	3,103	0,123	0,040
B3	9,8003	7,6203	31,0105	6,3152	4,9104	3,959	0,818	0,672	2,824	0,147	0,043
B3_	7,6203	9,8003	31,0105	4,9104	6,3152	5,091	0,818	0,745	3,132	0,122	0,040
BB1	4,2952	0,3760	1,1040	3,5513	0,3109	7,040	0,818	0,522	2,195	0,108	0,033
BB2	1,8333	1,1696	1,8333	1,6952	1,0815	14,748	0,818	0,646	2,717	0,057	0,030
C	0,3700	5,0655	1,7336	0,3558	4,8717	70,255	0,818	0,965	4,058	0,013	0,026
C_	5,0655	0,3700	1,7336	4,8717	0,3558	5,132	0,818	0,518	2,180	0,137	0,036
CB1	1,3848	2,9889	1,7331	0,8961	1,9341	27,899	0,818	0,819	3,446	0,032	0,028
CB2	4,5082	5,5204	10,4234	2,9176	3,5726	8,569	0,818	0,737	3,101	0,086	0,034
CB3	2,0082	0,1740	0,3495	2,0084	0,1740	12,448	0,818	0,522	2,194	0,068	0,029
CB4	1,3575	1,1740	0,7547	0,9342	0,8079	26,762	0,818	0,686	2,886	0,034	0,028
CB5	0,3575	4,2257	1,4574	0,3511	4,1505	71,197	0,818	0,959	4,035	0,013	0,026
Č	0,4317	22,8697	8,1809	0,3930	20,8180	63,618	0,818	0,991	4,167	0,015	0,027
Č_	22,8697	0,4317	8,1809	20,8180	0,3930	1,201	0,818	0,505	2,123	0,301	0,069
ČB	0,3575	1,0829	0,2873	0,3080	0,9329	81,176	0,818	0,861	3,623	0,012	0,026
D	5,5701	9,2794	28,2579	4,1185	6,8612	6,070	0,818	0,783	3,293	0,107	0,039
D_	9,2794	5,5701	28,2579	6,8612	4,1185	3,644	0,818	0,639	2,686	0,158	0,043
DB	0,3575	2,4329	0,7167	0,3245	2,2085	77,036	0,818	0,932	3,919	0,012	0,026
E	0,3700	11,9745	4,2901	0,3641	11,7832	68,665	0,818	0,985	4,142	0,014	0,027
E_	11,9745	0,3700	4,2901	11,7832	0,3641	2,122	0,818	0,508	2,135	0,235	0,050
EB1	4,8183	1,0299	1,0299	2,1951	0,4692	11,389	0,818	0,553	2,325	0,073	0,030
EB2	2,0223	2,7397	4,0292	1,7246	2,3364	14,496	0,818	0,752	3,164	0,057	0,030
EB3	8,7854	0,8206	7,1059	8,7222	0,8147	2,866	0,818	0,523	2,201	0,197	0,044
F	14,2492	1,6490	22,2895	13,8783	1,6061	1,801	0,818	0,529	2,224	0,248	0,056
F_	1,6490	14,2492	22,2895	1,6061	13,8783	15,566	0,818	0,945	3,977	0,051	0,031
FB1	6,5681	4,9860	18,2798	4,9072	3,7251	5,095	0,818	0,668	2,811	0,126	0,039
FB2	0,4762	2,7900	1,3286	0,4762	2,7900	52,499	0,818	0,922	3,877	0,018	0,027
FB3	4,4302	3,3817	7,0673	3,0428	2,3226	8,216	0,818	0,669	2,814	0,091	0,034
G1	5,4317	6,6490	16,4267	3,6632	4,4842	6,825	0,818	0,737	3,100	0,101	0,036
G1_	6,6490	5,4317	16,4267	4,4842	3,6632	5,575	0,818	0,678	2,853	0,119	0,038
G2	5,4646	1,6490	7,8038	5,0854	1,5346	4,916	0,818	0,574	2,413	0,136	0,037
G2_	1,6490	5,4646	7,8038	1,5346	5,0854	16,291	0,818	0,871	3,665	0,050	0,031
GA	7,8000	16,0000	122,8000	7,7372	15,8713	3,231	0,818	0,813	3,417	0,150	0,051
GB1	4,0791	6,4963	22,1822	3,7321	5,9436	6,699	0,818	0,776	3,266	0,100	0,037

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 11

GB2	1,5956	1,4999	1,7049	1,3467	1,2660	18,563	0,818	0,698	2,936	0,047	0,029
H	0,4317	7,0603	2,8784	0,4195	6,8611	59,592	0,818	0,970	4,081	0,016	0,027
H_	7,0603	0,4317	2,8784	6,8611	0,4195	3,644	0,818	0,515	2,167	0,172	0,040
HA	7,7000	16,0000	121,2000	7,6372	15,8696	3,273	0,818	0,814	3,425	0,149	0,051
I	7,1784	18,6686	122,4111	6,8607	17,8424	3,644	0,818	0,843	3,547	0,139	0,049
I_	18,6686	7,1784	122,4111	17,8424	6,8607	1,570	0,818	0,593	2,493	0,246	0,072
IA	1,7152	52,4272	69,9262	1,5125	46,2318	16,529	0,818	0,984	4,138	0,048	0,031
IA_	52,4272	1,7152	69,9262	46,2318	1,5125	0,541	0,818	0,508	2,137	0,373	0,124
J	5,4000	14,9094	80,2957	5,3928	14,8895	4,636	0,818	0,851	3,578	0,122	0,044
J_	14,9094	5,4000	80,2957	14,8895	5,3928	1,679	0,818	0,588	2,472	0,241	0,062
K	5,4000	17,6912	95,3174	5,3939	17,6713	4,635	0,818	0,870	3,660	0,121	0,045
K_	17,6912	5,4000	95,3174	17,6713	5,3939	1,570	0,818	0,575	2,417	0,251	0,070
L	11,7856	11,1315	128,9040	11,6824	11,0340	2,140	0,818	0,699	2,939	0,197	0,059
L_	11,1315	11,7856	128,9040	11,0340	11,6824	2,266	0,818	0,716	3,009	0,190	0,058
M	12,7352	11,1315	141,5472	12,7256	11,1231	1,965	0,818	0,688	2,892	0,206	0,062
M_	11,1315	12,7352	141,5472	11,1231	12,7256	2,248	0,818	0,727	3,058	0,188	0,059
MA	0,7787	0,3313	0,2580	0,7787	0,3313	32,104	0,818	0,602	2,532	0,029	0,027
MA_	0,3313	0,7787	0,2580	0,3313	0,7787	75,458	0,818	0,831	3,494	0,013	0,026
N	19,2220	10,0244	183,5393	18,7601	9,7835	1,570	0,818	0,623	2,618	0,239	0,079
N_	10,0244	19,2220	183,5393	9,7835	18,7601	2,555	0,818	0,803	3,378	0,169	0,058
NA	0,7787	0,3814	0,2970	0,7787	0,3814	32,105	0,818	0,616	2,590	0,029	0,027
NA_	0,3814	0,7787	0,2970	0,3814	0,7787	65,548	0,818	0,812	3,415	0,015	0,026
O	18,5597	10,0244	182,4398	18,3788	9,9267	1,570	0,818	0,626	2,635	0,238	0,077
O_	10,0244	18,5597	182,4398	9,9267	18,3788	2,518	0,818	0,798	3,357	0,170	0,058
OA	0,7787	0,3636	0,2832	0,7788	0,3636	32,101	0,818	0,611	2,570	0,029	0,027
OA_	0,3636	0,7787	0,2832	0,3636	0,7788	68,749	0,818	0,818	3,442	0,014	0,026
P	9,3691	10,9765	102,6256	9,3593	10,9651	2,671	0,818	0,731	3,073	0,174	0,054
P_	10,9765	9,3691	102,6256	10,9651	9,3593	2,280	0,818	0,684	2,878	0,194	0,057
QA	8,0606	4,2584	22,3587	6,5055	3,4369	3,843	0,818	0,624	2,624	0,155	0,042
R	17,1740	10,9765	188,2965	17,1643	10,9703	1,570	0,818	0,646	2,718	0,233	0,074
R_	10,9765	17,1740	188,2965	10,9703	17,1643	2,279	0,818	0,774	3,255	0,181	0,061
RA	7,8452	10,5000	48,4055	6,0139	8,0490	4,157	0,818	0,751	3,157	0,137	0,088
SA	8,3965	3,4239	12,3300	5,4988	2,2423	4,546	0,818	0,598	2,515	0,142	0,039
ŠA1	20,4140	54,5913	715,1171	16,3528	43,7307	1,570	0,818	0,847	3,562	0,195	0,084
ŠA2	8,2297	2,4812	10,1849	5,8122	1,7523	4,301	0,818	0,574	2,413	0,149	0,039
ŠA3	11,8104	3,5970	15,5913	7,1549	2,1791	3,494	0,818	0,574	2,416	0,169	0,042
ŠA4	2,4839	8,2135	10,1848	1,7550	5,8033	14,245	0,818	0,871	3,664	0,056	0,031
ŠA5	0,5794	8,7796	5,0420	0,5768	8,7408	43,340	0,818	0,968	4,072	0,021	0,027
ŠA6	8,7646	0,5794	5,0420	8,7333	0,5773	2,863	0,818	0,517	2,172	0,199	0,044
TA	7,7614	3,5250	24,8431	7,3959	3,3590	3,380	0,818	0,608	2,558	0,168	0,044
UA	4,6222	3,8744	17,2296	4,5338	3,8003	5,514	0,818	0,682	2,868	0,119	0,038

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 11

VA	4,6222	3,8744	17,2296	4,5338	3,8003	5,514	0,818	0,682	2,868	0,119	0,038
WA1	3,3843	4,4382	7,0885	2,3249	3,0489	10,753	0,818	0,748	3,144	0,072	0,032
WA2	2,7900	0,4790	1,3365	2,7901	0,4790	8,960	0,818	0,543	2,282	0,089	0,031
WA3	4,9572	6,5598	18,2681	3,7155	4,9167	6,729	0,818	0,749	3,150	0,101	0,037
XA	1,5004	3,0007	4,0191	1,4176	2,8351	17,635	0,818	0,809	3,403	0,048	0,030
YA1	6,3026	6,7934	37,6828	5,9127	6,3732	4,228	0,818	0,718	3,020	0,138	0,043
YA2	1,6426	2,2564	1,8795	1,1697	1,6068	21,373	0,818	0,754	3,173	0,041	0,029
YA3	1,3092	2,2515	1,1230	0,8081	1,3897	30,937	0,818	0,788	3,313	0,029	0,028
ZA	3,6832	1,9679	7,1710	3,6635	1,9574	6,824	0,818	0,625	2,629	0,106	0,035
ŽA	3,6832	4,4077	14,1577	3,4396	4,1161	7,268	0,818	0,734	3,086	0,097	0,036

Preglednica 12: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu vogala navzven

Naziv	d' [mm]	b' [mm]	A' [mm <sup>2</sup> ]	d [mm]	b [mm]	h <sub>o</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	E	F	h <sub>r</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	R <sub>s</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	λ <sub>eq,y</sub> [W/mK]
A	45,0000	25,0000	1119,6350	44,8926	24,9403	1,570	0,818	0,630	2,648	0,237	0,189
A_	25,0000	45,0000	1119,6350	24,9403	44,8926	1,570	0,818	0,794	3,340	0,204	0,122
AB1	10,5391	22,9683	177,7317	9,0307	19,6809	2,768	0,818	0,821	3,452	0,161	0,056
AB2	8,7854	0,8206	0,1469	1,2541	0,1171	19,935	0,818	0,523	2,201	0,045	0,028
AB3	4,7928	1,0273	3,5561	4,0732	0,8731	6,138	0,818	0,553	2,326	0,118	0,034
B1	2,6203	11,6300	26,8142	2,4579	10,9093	10,171	0,818	0,900	3,785	0,072	0,034
B1_	11,6300	2,6203	26,8142	10,9093	2,4579	2,292	0,818	0,556	2,337	0,216	0,050
B2	7,6203	9,3714	30,1901	4,9547	6,0932	5,046	0,818	0,738	3,103	0,123	0,040
B2_	9,3714	7,6203	30,1901	6,0932	4,9547	4,103	0,818	0,678	2,850	0,144	0,042
B3	7,6203	9,8003	31,0105	4,9104	6,3152	5,091	0,818	0,745	3,132	0,122	0,040
B3_	9,8003	7,6203	31,0105	6,3152	4,9104	3,959	0,818	0,672	2,824	0,147	0,043
BB1	0,3760	4,2952	1,1040	0,3109	3,5513	80,418	0,818	0,958	4,030	0,012	0,026
BB2	1,1696	1,8333	1,8333	1,0815	1,6952	23,116	0,818	0,774	3,256	0,038	0,029
C	5,0655	0,3700	1,7336	4,8717	0,3558	5,132	0,818	0,518	2,180	0,137	0,036
C_	0,3700	5,0655	1,7336	0,3558	4,8717	70,255	0,818	0,965	4,058	0,013	0,026
CB1	2,9889	1,3848	1,7331	1,9341	0,8961	12,926	0,818	0,610	2,566	0,065	0,030
CB2	5,5204	4,5082	10,4234	3,5726	2,9176	6,998	0,818	0,678	2,852	0,102	0,035
CB3	0,1740	2,0082	0,3495	0,1740	2,0084	143,663	0,818	0,959	4,032	0,007	0,026
CB4	1,1740	1,3575	0,7547	0,8079	0,9342	30,945	0,818	0,729	3,065	0,029	0,027
CB5	4,2257	0,3575	1,4574	4,1505	0,3511	6,023	0,818	0,521	2,192	0,122	0,034
Č	22,8697	0,4317	8,1809	20,8180	0,3930	1,201	0,818	0,505	2,123	0,301	0,069
Č_	0,4317	22,8697	8,1809	0,3930	20,8180	63,618	0,818	0,991	4,167	0,015	0,027
ČB	1,0829	0,3575	0,2873	0,9329	0,3080	26,799	0,818	0,580	2,441	0,034	0,027
D	9,2794	5,5701	28,2579	6,8612	4,1185	3,644	0,818	0,639	2,686	0,158	0,043
D_	5,5701	9,2794	28,2579	4,1185	6,8612	6,070	0,818	0,783	3,293	0,107	0,039
DB	2,4329	0,3575	0,7167	2,2085	0,3245	11,320	0,818	0,537	2,257	0,074	0,030
E	11,9745	0,3700	4,2901	11,7832	0,3641	2,122	0,818	0,508	2,135	0,235	0,050

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 12

E_	0,3700	11,9745	4,2901	0,3641	11,7832	68,665	0,818	0,985	4,142	0,014	0,027
EB1	1,0299	4,8183	1,0299	0,4692	2,1951	53,283	0,818	0,904	3,804	0,018	0,027
EB2	2,7397	2,0223	4,0292	2,3364	1,7246	10,700	0,818	0,665	2,795	0,074	0,032
EB3	0,8206	8,7854	7,1059	0,8147	8,7222	30,686	0,818	0,955	4,019	0,029	0,028
F	1,6490	14,2492	22,2895	1,6061	13,8783	15,566	0,818	0,945	3,977	0,051	0,031
F_	14,2492	1,6490	22,2895	13,8783	1,6061	1,801	0,818	0,529	2,224	0,248	0,056
FB1	4,9860	6,5681	18,2798	3,7251	4,9072	6,711	0,818	0,748	3,147	0,101	0,037
FB2	2,7900	0,4762	1,3286	2,7900	0,4762	8,961	0,818	0,542	2,281	0,089	0,031
FB3	3,3817	4,4302	7,0673	2,3226	3,0428	10,764	0,818	0,747	3,143	0,072	0,032
G1	6,6490	5,4317	16,4267	4,4842	3,6632	5,575	0,818	0,678	2,853	0,119	0,038
G1_	5,4317	6,6490	16,4267	3,6632	4,4842	6,825	0,818	0,737	3,100	0,101	0,036
G2	1,6490	5,4646	7,8038	1,5346	5,0854	16,291	0,818	0,871	3,665	0,050	0,031
G2_	5,4646	1,6490	7,8038	5,0854	1,5346	4,916	0,818	0,574	2,413	0,136	0,037
GA	16,0000	7,8000	122,8000	15,8713	7,7372	1,575	0,818	0,615	2,588	0,240	0,066
GB1	6,4963	4,0791	22,1822	5,9436	3,7321	4,206	0,818	0,644	2,708	0,145	0,041
GB2	1,4999	1,5956	1,7049	1,2660	1,3467	19,748	0,818	0,716	3,012	0,044	0,029
H	7,0603	0,4317	2,8784	6,8611	0,4195	3,644	0,818	0,515	2,167	0,172	0,040
H_	0,4317	7,0603	2,8784	0,4195	6,8611	59,592	0,818	0,970	4,081	0,016	0,027
HA	16,0000	7,7000	121,2000	15,8696	7,6372	1,575	0,818	0,614	2,583	0,241	0,066
I	18,6686	7,1784	122,4111	17,8424	6,8607	1,570	0,818	0,593	2,493	0,246	0,072
I_	7,1784	18,6686	122,4111	6,8607	17,8424	3,644	0,818	0,843	3,547	0,139	0,049
IA	52,4272	1,7152	69,9262	46,2318	1,5125	0,541	0,818	0,508	2,137	0,373	0,124
IA_	1,7152	52,4272	69,9262	1,5125	46,2318	16,529	0,818	0,984	4,138	0,048	0,031
J	14,9094	5,4000	80,2957	14,8895	5,3928	1,679	0,818	0,588	2,472	0,241	0,062
J_	5,4000	14,9094	80,2957	5,3928	14,8895	4,636	0,818	0,851	3,578	0,122	0,044
K	17,6912	5,4000	95,3174	17,6713	5,3939	1,570	0,818	0,575	2,417	0,251	0,070
K_	5,4000	17,6912	95,3174	5,3939	17,6713	4,635	0,818	0,870	3,660	0,121	0,045
L	11,1315	11,7856	128,9040	11,0340	11,6824	2,266	0,818	0,716	3,009	0,190	0,058
L_	11,7856	11,1315	128,9040	11,6824	11,0340	2,140	0,818	0,699	2,939	0,197	0,059
M	11,1315	12,7352	141,5472	11,1231	12,7256	2,248	0,818	0,727	3,058	0,188	0,059
M_	12,7352	11,1315	141,5472	12,7256	11,1231	1,965	0,818	0,688	2,892	0,206	0,062
MA	0,3313	0,7787	0,2580	0,3313	0,7787	75,458	0,818	0,831	3,494	0,013	0,026
MA_	0,7787	0,3313	0,2580	0,7787	0,3313	32,104	0,818	0,602	2,532	0,029	0,027
N	10,0244	19,2220	183,5393	9,7835	18,7601	2,555	0,818	0,803	3,378	0,169	0,058
N_	19,2220	10,0244	183,5393	18,7601	9,7835	1,570	0,818	0,623	2,618	0,239	0,079
NA	0,3814	0,7787	0,2970	0,3814	0,7787	65,548	0,818	0,812	3,415	0,015	0,026
NA_	0,7787	0,3814	0,2970	0,7787	0,3814	32,105	0,818	0,616	2,590	0,029	0,027
O	10,0244	18,5597	182,4398	9,9267	18,3788	2,518	0,818	0,798	3,357	0,170	0,058
O_	18,5597	10,0244	182,4398	18,3788	9,9267	1,570	0,818	0,626	2,635	0,238	0,077
OA	0,3636	0,7787	0,2832	0,3636	0,7788	68,749	0,818	0,818	3,442	0,014	0,026
OA_	0,7787	0,3636	0,2832	0,7788	0,3636	32,101	0,818	0,611	2,570	0,029	0,027

Se nadaljuje ...

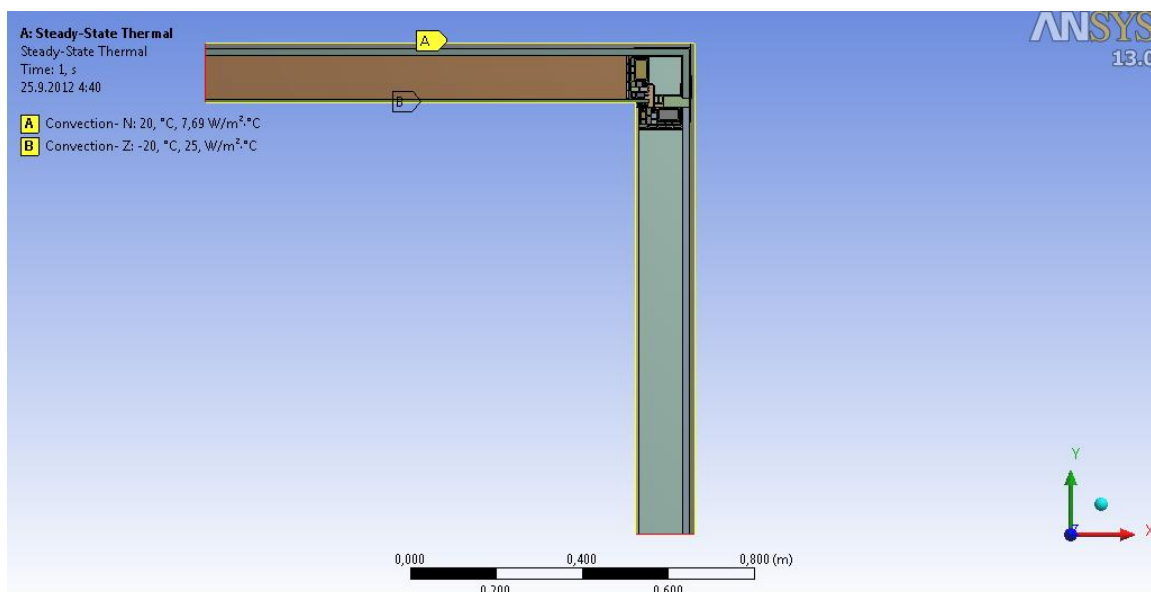
... nadaljevanje Preglednice 12

P	10,9765	9,3691	102,6256	10,9651	9,3593	2,280	0,818	0,684	2,878	0,194	0,057
P_	9,3691	10,9765	102,6256	9,3593	10,9651	2,671	0,818	0,731	3,073	0,174	0,054
QA	4,2584	8,0606	22,3587	3,4369	6,5055	7,274	0,818	0,801	3,370	0,094	0,037
R	10,9765	17,1740	188,2965	10,9703	17,1643	2,279	0,818	0,774	3,255	0,181	0,061
R_	17,1740	10,9765	188,2965	17,1643	10,9703	1,570	0,818	0,646	2,718	0,233	0,074
RA	10,5000	7,8452	48,4055	8,0490	6,0139	3,106	0,818	0,666	2,802	0,169	0,095
SA	3,4239	8,3965	12,3300	2,2423	5,4988	11,149	0,818	0,836	3,516	0,068	0,033
ŠA1	54,5913	20,4140	715,1171	43,7307	16,3528	1,570	0,818	0,590	2,483	0,247	0,177
ŠA2	2,4812	8,2297	10,1849	1,7523	5,8122	14,267	0,818	0,871	3,665	0,056	0,031
ŠA3	3,5970	11,8104	15,5913	2,1791	7,1549	11,473	0,818	0,870	3,661	0,066	0,033
ŠA4	8,2135	2,4839	10,1848	5,8033	1,7550	4,308	0,818	0,574	2,414	0,149	0,039
ŠA5	8,7796	0,5794	5,0420	8,7408	0,5768	2,860	0,818	0,516	2,172	0,199	0,044
ŠA6	0,5794	8,7646	5,0420	0,5773	8,7333	43,303	0,818	0,968	4,071	0,021	0,027
TA	3,5250	7,7614	24,8431	3,3590	7,3959	7,443	0,818	0,822	3,457	0,092	0,037
UA	3,8744	4,6222	17,2296	3,8003	4,5338	6,578	0,818	0,733	3,084	0,103	0,037
VA	3,8744	4,6222	17,2296	3,8003	4,5338	6,578	0,818	0,733	3,084	0,103	0,037
WA1	4,4382	3,3843	7,0885	3,0489	2,3249	8,200	0,818	0,669	2,813	0,091	0,034
WA2	0,4790	2,7900	1,3365	0,4790	2,7901	52,190	0,818	0,921	3,876	0,018	0,027
WA3	6,5598	4,9572	18,2681	4,9167	3,7155	5,085	0,818	0,668	2,808	0,127	0,039
XA	3,0007	1,5004	4,0191	2,8351	1,4176	8,818	0,818	0,618	2,599	0,088	0,032
YA1	6,7934	6,3026	37,6828	6,3732	5,9127	3,923	0,818	0,696	2,928	0,146	0,044
YA2	2,2564	1,6426	1,8795	1,6068	1,1697	15,559	0,818	0,663	2,787	0,055	0,029
YA3	2,2515	1,3092	1,1230	1,3897	0,8081	17,989	0,818	0,635	2,670	0,048	0,029
ZA	1,9679	3,6832	7,1710	1,9574	3,6635	12,772	0,818	0,800	3,364	0,062	0,032
ŽA	4,4077	3,6832	14,1577	4,1161	3,4396	6,074	0,818	0,681	2,866	0,112	0,037

RA je delno prezračevana rega.

#### 5.1.4 Robni pogoji

Kot je razvidno iz slike 47 imamo na modelu predpisana dva konvekcijska robna pogoja. Na notranji strani je predpisana konstantna temperatura 20°C in koeficient toplotne prestopnosti za horizontalni toplotni tok 7,69 W/m<sup>2</sup>K. Na zunanji strani imamo temperaturo -20°C in koeficient toplotne prestopnosti 25 W/m<sup>2</sup>K. Prerezni ravnini, obarvani rdeče, sta adiabatni liniji.

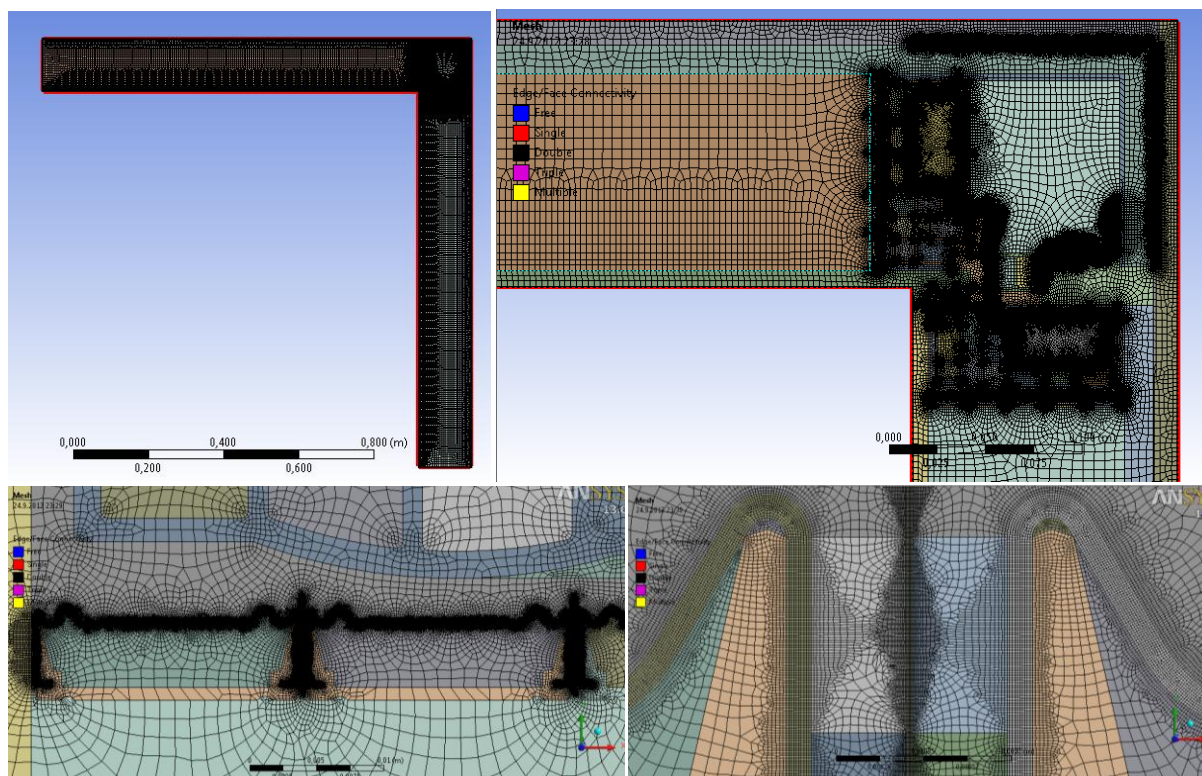


Slika 47: Predpisani robni pogoji na detajlu vogala navznoter

### 5.1.5 Mreža končnih elementov

Uporabil sem mreženje s prevladujočim številom štirikotnih osem-voziščnih končnih elementov PLANE 77. Posameznim elementom detajla sem na podlagi njihove geometrije in toplotnih prevodnosti ročno nastavljal velikost končnih elementov. Najmanjše KE (dimenzija stranice  $5 \cdot 10^{-6}$  m) sem predpisal desetim alufolijam, saj so od vseh elementov najtanjši (debelina folije je 0,02 mm, kar nanese 4 KE po debelini folije) in imajo največjo toplotno prevodnost, zato predvidevam da bo tam tekla večji toplotni tok. Nekoliko večje končne elemente (dimenzija stranice  $1 \cdot 10^{-5}$  m) sem predpisal tanki jekleni pločevini, ki tvori distančnik s CO<sub>2</sub> plinom napolnjenih komor. Tudi tu zaradi izredne tankosti pločevine ( $1 \cdot 10^{-4}$  m, kar nanese 10 KE po debelini elementa) in relativno velike toplotne prevodnosti pričakujem visoko gostoto toplotnega toka. Po vseh jeklenih profilih predpišem končne elemente takih dimenzij, da jih po debelini nanese ravno 6. Preostalim elementom distančnikov, steklu in polisulfidu sem predpisal KE s stranico 3 mm, zračnim regam in poliamidni matrici 4 mm ter izolacijskem jedru panela 6 mm. Notranja robova mavčno-kartonskih plošč sem razdelil na 350 razdelkov, pri tem pa sem uporabil funkcijo »Bias« s faktorjem 5. Funkcija Bias razdelke linearno povečuje od enega konca robu do drugega. Določil sem, da so razdelki robu ob adiabatni liniji petkrat večji od razdelkov na stiku z drugo mavčno-kartonsko ploščo, saj pričakujem glavni toplotni tok na vogalnem elementu, kjer je potrebna gostejša mreža končnih elementov.





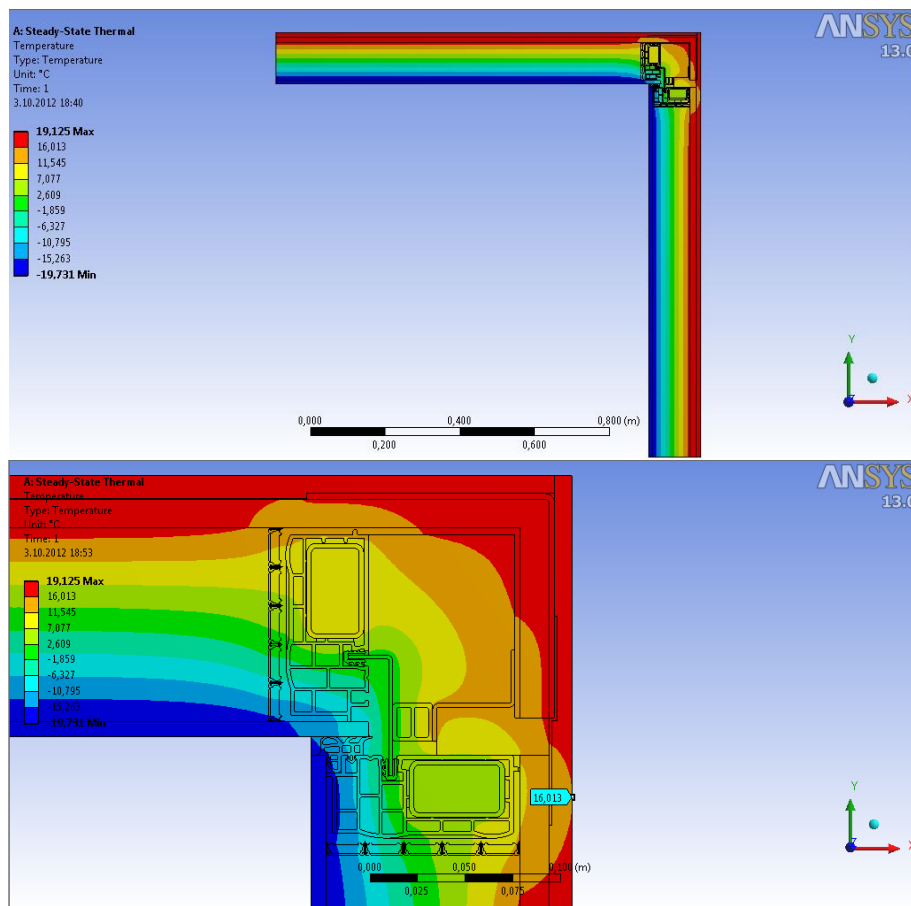
Slika 48: Osnovna mreža končnih elementov za vogal navznoter

Mrežo sestavlja 1.569.491 večinoma štirikotnih osem-vozliščnih končnih elementov, skupno pa je model diskretiziran na 4.700.808 vozlišč.

## 5.2 Rezultati

### 5.2.1 Potek temperatur

Iz slike 49 je razvidno, da po Qbiss Air fasadnih panelih pričakovano izoterme potekajo vzporedno s površino panela skoraj čisto do distančnikov, kar pomeni da je toplotni tok čez sam panel praktično enodimenzionalen. Glede na to lahko sklepamo, da bi bilo upravičeno če bi bile adiabatne (prerezne) ravnine bliže vogalnemu elementu, npr. na razdalji 500 mm od zunanje vogalne točke detajla. Obravnavani model bi bil s tem manjši, zaradi česar bi bil tudi čas računanja krajši.



Slika 49: Razpored temperatur vogala navznoter

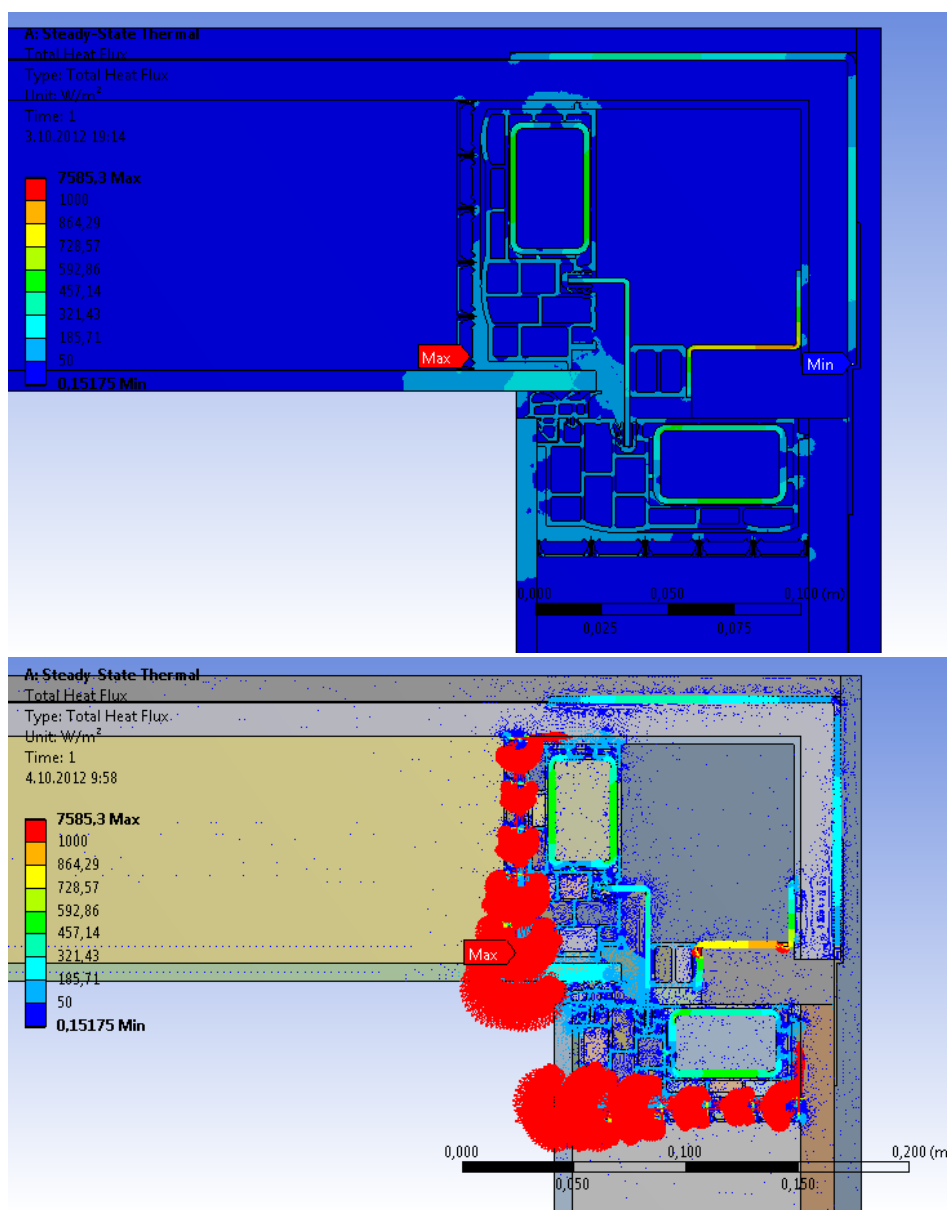
Natančnejši ogled temperaturnega polja na sliki 49 razkrije, da potek temperatur ni popolnoma simetričen glede na diagonalno simetrijsko os vogalnega elementa. Na spodnjem kraku očitno pride do nekoliko večjega temperaturnega prehoda, zato na tistem delu notranje površine pride do najnižje temperature ( $\theta_{si}$ ), ki znaša 16,013°C. Vzrok za nesimetričen potek temperatur je jekleni Z profil, ki je pritrjen na poliamidno matrico spodnjega kraka detajla, kar bo lepo razvidno pri pregledu toplotnih tokov.

## 5.2.2 Toplotni tok

### 5.2.2.1 Celotni specifični toplotni tok

Pričakovano poteka največji specifični toplotni tok preko najbolj prevodnih in najtanjših elementov detajla in po najkrajših možnih poteh med temi elementi. Toplota se iz notranjega prostora najbolj prevaja direktno preko jeklene pločevine distančnikov ali preko vogalnega L profila iz jeklene pločevine, iz katerega se nato po najkrajši poti prevaja preko jeklenih votlih palic in jeklenega Z profila proti zunanosti. Na polimerni ojačitveni letvi je lepo razvidno, da toplota išče najbolj prevodno možno pot od notranjega okolja proti zunanemu. Specifični toplotni tok največjo vrednost doseže v tanki pločevini distančnika, ki z manjšimi prekinitvami poteka skoraj čez celoten prerez fasadnega konstrukcijskega sklopa, vmes pa se prenaša tudi preko aluminijastih folij. Z vektorskega prikaza se vidi, da specifični toplotni tok v jekleni pločevini distančnika narašča s približevanjem zunanemu okolju. To je posledica postopnega prečnega pritoka toplote iz jeklenega profila in polimerne letve na

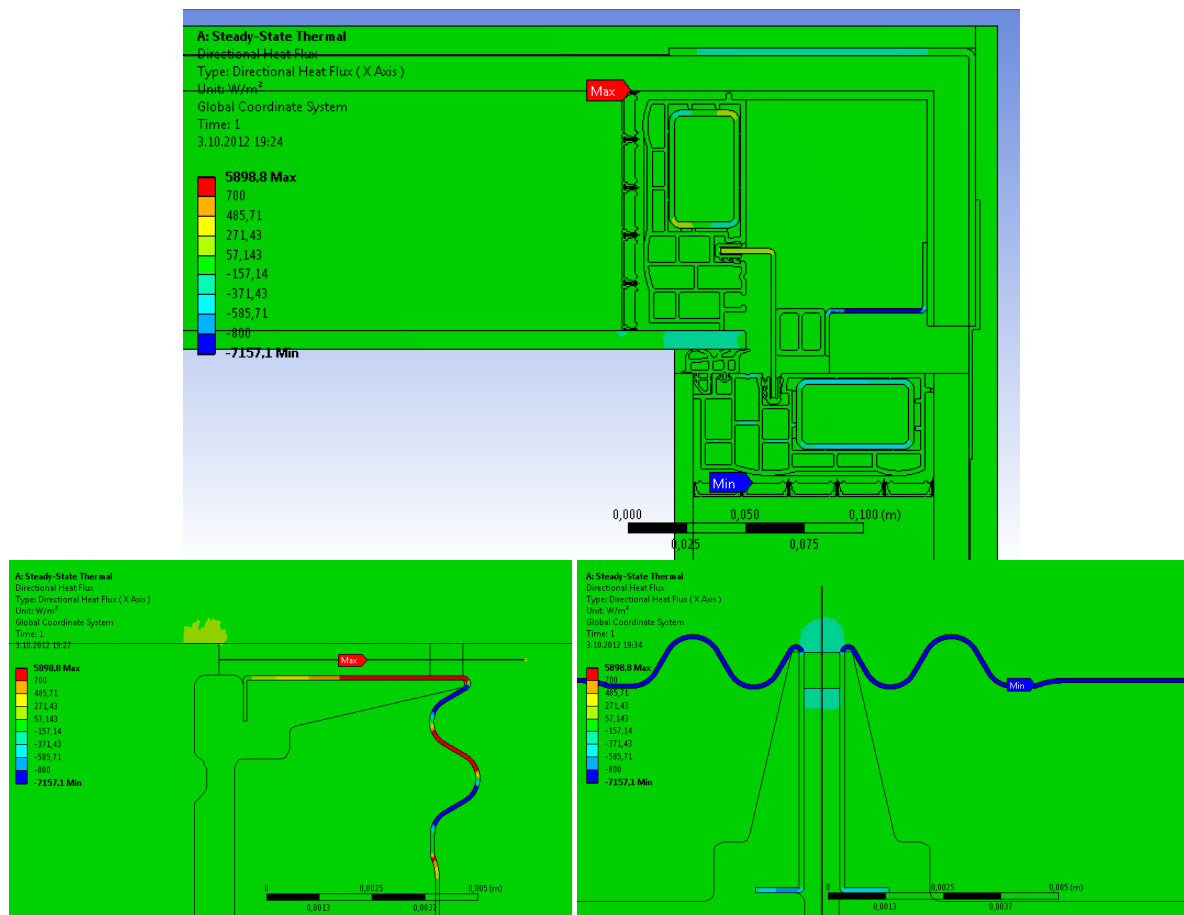
jekleno pločevino distančnika. Po velikosti mu sledi specifični toplotni tok preko jeklenega Z profila, zaradi katerega je nastala nesimetrična razporeditev temperatur.



Slika 50: Potek dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v vogalu navznoter v konturnem (zgoraj) in vektorskem (spodaj) prikazu

### 5.2.2.2 Specifični toplotni tok v smeri $X$

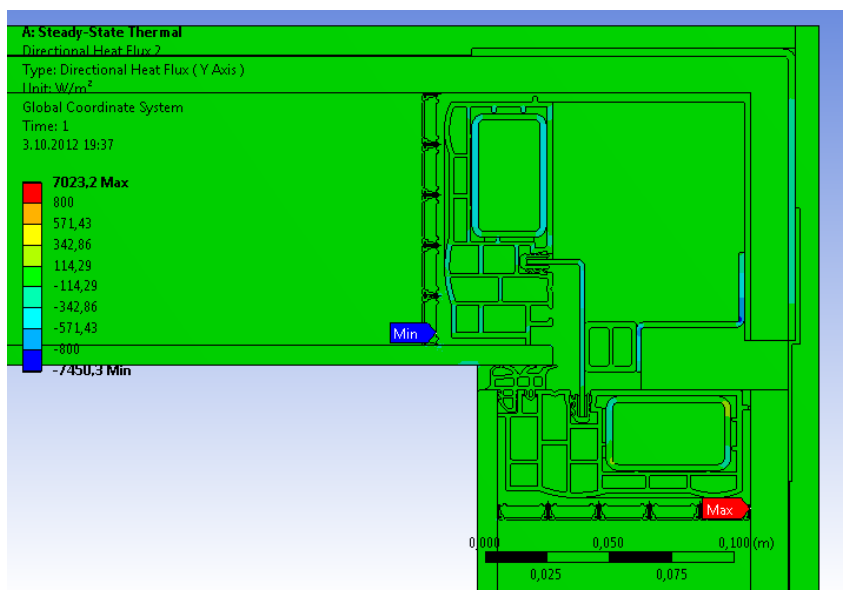
Ansyes omogoča tudi prikaz specifičnega toplotnega toka ločeno v  $X$  in  $Y$  smeri. Pozitivne vrednosti toplotnega toka v smeri  $X$  predstavljajo prehod toplote od leve proti desni (v smeri  $X$  globalnega koordinatnega sistema, ki je prikazan na sliki 49), negativne pa v smeri  $-X$ . Maksimalno vrednost dobimo v skrajno notranji alufoliji zgornjega kraka detajla, medtem ko je minimalna vrednost vektorja  $q_x$  v pločevini distančnika na spodnjem kraku detajla.

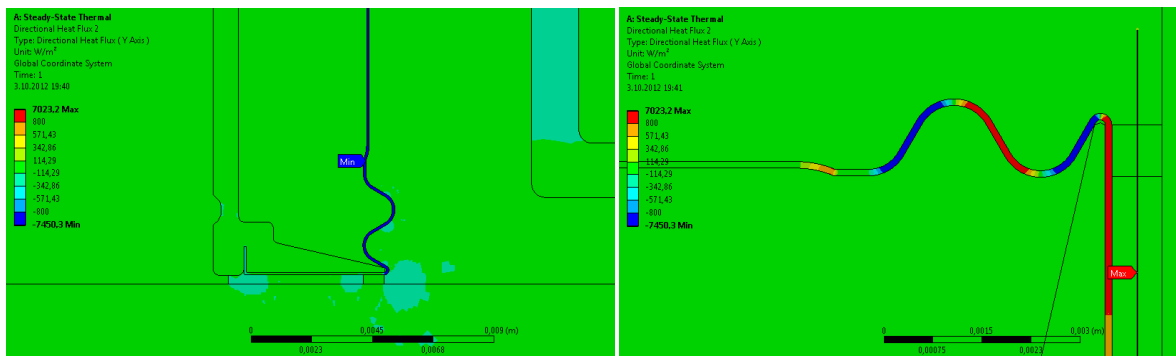


Slika 51: Potek spec. toplotnega toka v smeri X v vogalu navznoter

### 5.2.2.3 Specifični toplotni tok v smeri Y

Ker gre za skoraj popolnoma simetričen detajl dobimo podobno razporeditev spec. toplotnega toka tudi v smeri Y. Pozitivna vrednost toplotnega toka je za vektor  $q_y$  v smeri globalne osi Y, negativna pa v smeri  $-Y$ .





Slika 52: Potek spec. toplotnega toka v smeri Y v vogalu navznoter

#### 5.2.2.4 Korekcijski faktor linijskega toplotnega mostu

Toplotni tok, ki je vstopil skozi notranje površine modela, je enak toplotnemu toku, ki izstopa iz modela skozi njegove zunanje površine in znaša  $Q = Q_i = 20,798 \text{ W/m}$ ,  $Q_e = -20,798 \text{ W/m}$ .

Vsota zunanjih dolžin modela:  $L_e = 1 + 1 \text{ m} = 2 \text{ m}$ .

Vsota notranjih dolžin modela:  $L_i = 2 \cdot 1,1371 \text{ m} = 2,2742 \text{ m}$ .

Razlika med temperaturo notranjega in zunanjega zraka:  $\theta_i - \theta_e = 20^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}) = 40 \text{ K}$

*Preglednica 13: Izračun toplotne prehodnosti stene ( $U_w$ ), ki jo tvori Qbiss Air panel s sekundarno mavčno-kartonsko ploščo, med katerima je tanek zračni sloj*

$U_{hom}$ stene:			
sloj	$d$ [m]	$\lambda$ [W/mK]	$R$ [m <sup>2</sup> K/W]
$R_{si}$			0,13
mavčna plošča	0,012	0,21	0,057
zračni sloj	0,0003	0,04545	0,007
rigidur plošča	0,015	0,202	0,074
jedro	0,1018	0,018	5,656
steklo	0,008	1	0,008
$R_{se}$			0,04
		$\Sigma R =$	5,972
		$U_w =$	<b>0,167 W/m<sup>2</sup>K</b>

Specifični toplotni tok ( $L^{2D}$ ), ki prehaja skozi vogalni detajl na linijskem toplotnem mostu, oz. koeficient toplotne sklopitve za sistem zunanjih in notranjih mer znaša:

$$L^{2D} = \frac{Q}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{20,798 \text{ W}}{40 \text{ K}} = 0,520 \text{ W/mK} \quad (144)$$

Korekcijski koeficient linijskega toplotnega mostu ( $\psi$  [W/mK]) po sistemu notranjih in zunanjih mer:

$$\psi_i = L^{2D} - U_w \cdot L_{ie} = 0,520 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 0,167 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2,2742 \text{ m} = 0,140 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (145)$$

$$\psi_e = L^{2D} - U_w \cdot L_e = 0,520 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 0,167 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2 \text{ m} = 0,186 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (146)$$

### 5.2.2.5 Temperaturni faktor toplotnega mostu ( $f_{RSi}$ [-])

Kot je bilo omenjeno v podpoglavju 5.2.1 znaša najnižja temperatura na notranji površini modela  $\theta_{Si} = 16,013^{\circ}\text{C}$ . Iz tega sledi:

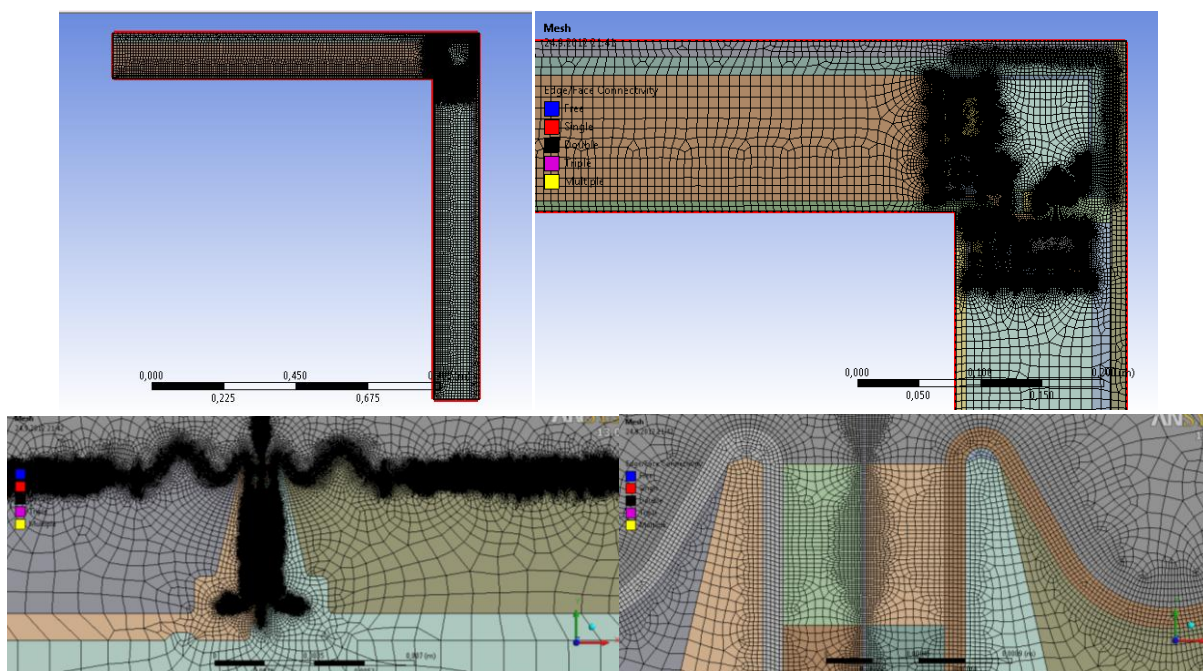
$$f_{RSi} = \frac{16,013 - (-20)}{20 - (-20)} = 0,900 \quad (147)$$

$$f_{RSi} > f_{RSi,min}(\varphi_i = 45\%) = 0,777 \quad (148)$$

Ker je temperaturni faktor linijskega toplotnega mostu večji od  $f_{RSi,min}$  ni nevarnosti kondenzacije vodne pare na notranji površini konstrukcije in ni tveganja za pojav škodljivih mikroorganizmov.

### 5.3 Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake

V skladu s standardom SIST EN ISO 10211 mora biti razlika med toplotnim tokom, izračunanim z  $n$  in  $2n$  končnih elementov manjša od 1%. Zato sem kreiral še eno mrežo, kjer sem v poglavju 5.1.5 opisanem elementom predpisal končne elemente s 100% povečanimi dimenzijami stranic, na robovih s predpisanimi razdelki pa sem število le-teh prepolovil. Tako sem dobil 627.782 končnih elementov, kar je 60% manj kot v izhodiščni mreži.



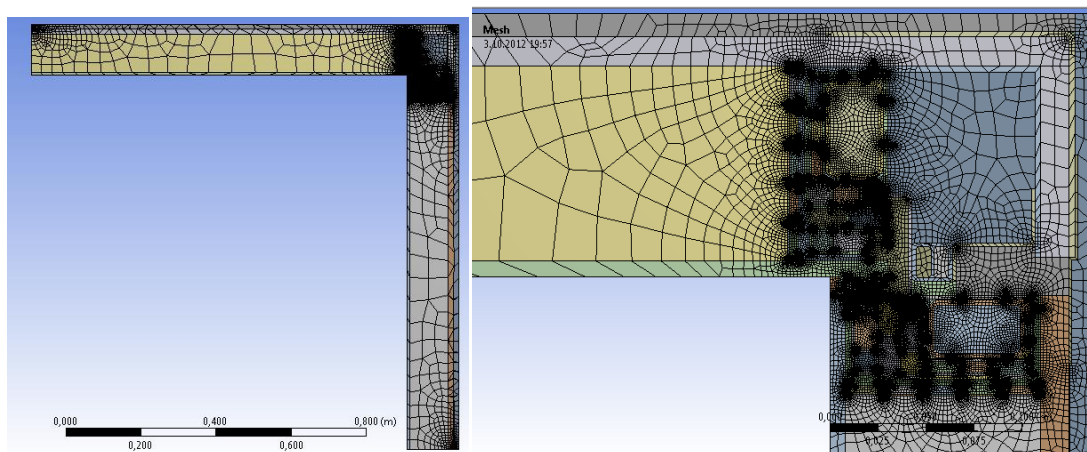
Slika 53: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navznoter

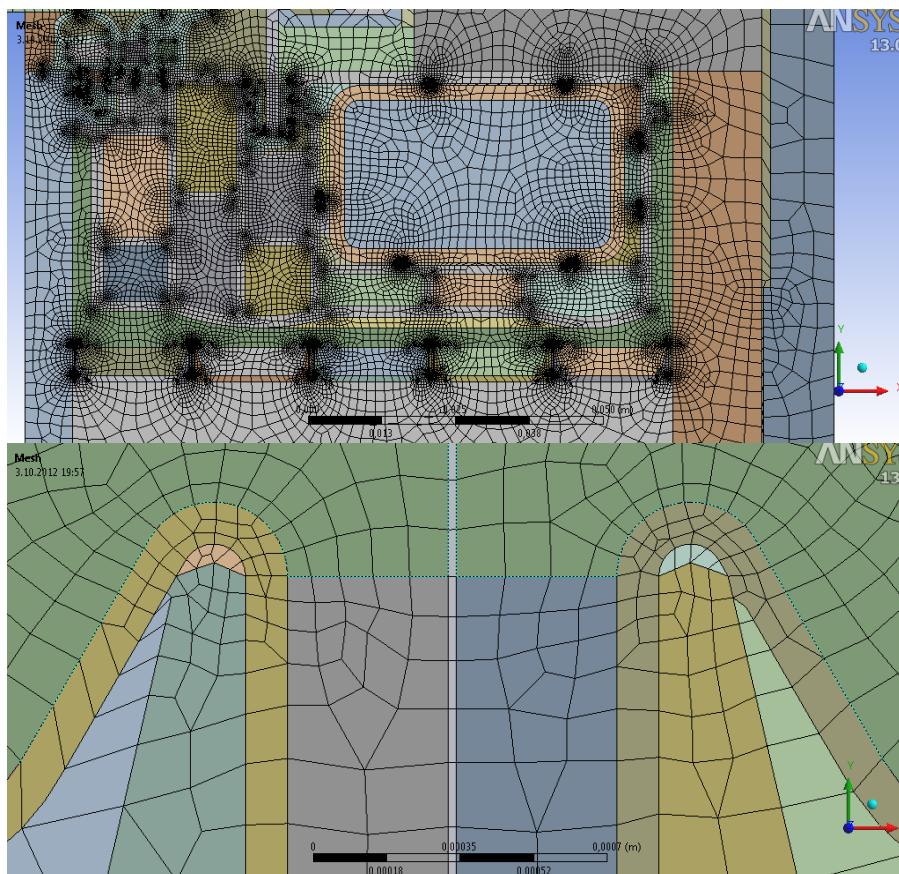
Preglednica 14: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov

	Izhodiščna mreža (100% KE)	Razredčena mreža (40% KE)	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	20,798	20,802	0,02%
$\psi_i$ [W/mK]	0,140	0,140	0,00%
$\psi_e$ [W/mK]	0,186	0,186	0,00%

$\theta_{Si}$ [°C]	16,013	16,011	-0,01%
$f_{RSi}$	0,900	0,900	0,00%

Razlike v toplotnem toku so veliko manjše od 1%, kar pomeni, da je rešitev zanesljiva, napaka pa zanemarljivo majhna. Po drugi strani pa je tako majhna (oz. nična) razlika v rezultatih znak, da lahko mrežo končnih elementov še močno zredčimo in s tem skrajšamo čas računanja. S povečevanjem velikosti končnih elementov sem prišel do mreže z minimalnim številom končnih elementov. Izklopil sem vse predpisane velikosti končnih elementov po posameznih delih detajla in namesto tega nastavlil globalno minimalno dimenzijo končnih elementov na 0,00002 m (debelina alufolije), maksimalno dimenzijo pa na 1 m in zagnal avtomatično kreiranje mreže. Dodatno sem nastavlil le še dimenzijo končnih elementov 0,0015 m na tanki zračni plasti med rigidur ploščo in sekundarno mavčno ploščo, saj v nasprotnem primeru ta sloj ni bil dobro mrežen. Na ta način sem dobil 53823 večinoma štirikotnih osem-vozljičnih končnih elementov s 160378 vozljiči, kar predstavlja 3,4% števila končnih elementov, uporabljenih v osnovni mreži. Manjše število končnih elementov bi bilo zaradi geometrije modela že težko dobiti, če bi želeli obdržati kvalitetno mrežo. Vsi tanjši elementi (alufolije, jeklena pločevina distančnikov, L in Z profil ipd.) imajo po en končni element po debelini. Glede na primerjane rezultate v preglednici 15 v mojem primeru očitno to povsem zadošča za izračun temperaturnih gradientov in toplotnih tokov.





Slika 54: Mreža s 3,4% končnih elementov osnovne mreže

Preglednica 15: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov

	Izhodiščna mreža (100% KE)	Razredčena mreža (3,4% KE)	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	20,798	20,814	0,08%
$\psi_i$ [W/mK]	0,140	0,141	0,07%
$\psi_e$ [W/mK]	0,186	0,186	0,72%
$\theta_{Si}$ [°C]	16,013	16,016	0,02%
$f_{RSi}$	0,900	0,900	0,00%

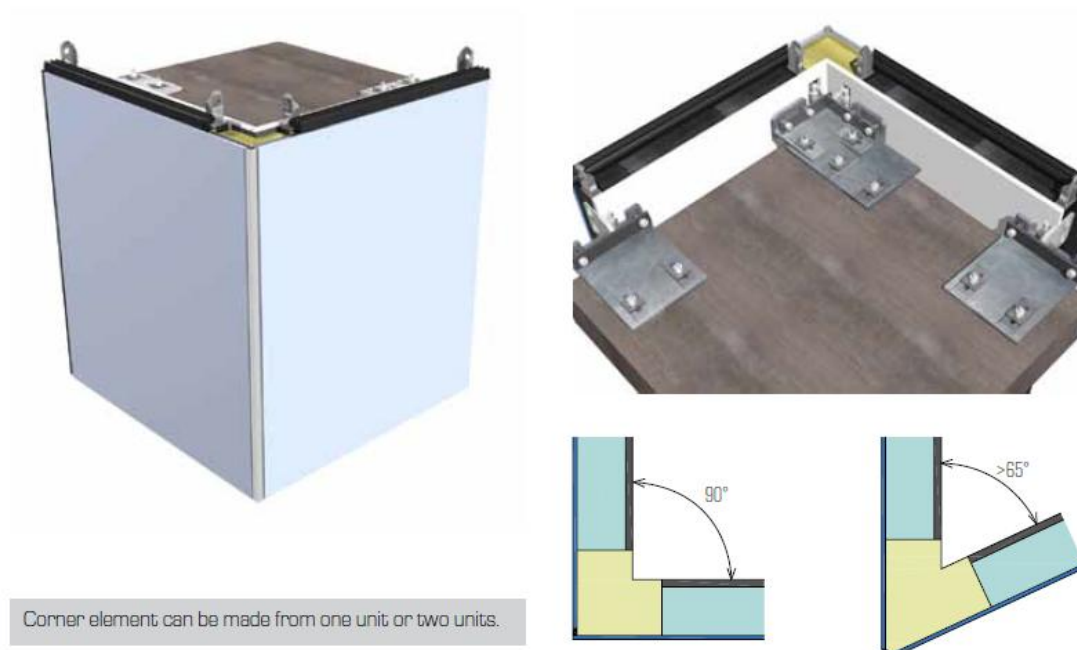


## 6 DETAJL VOGAL NAVZVEN

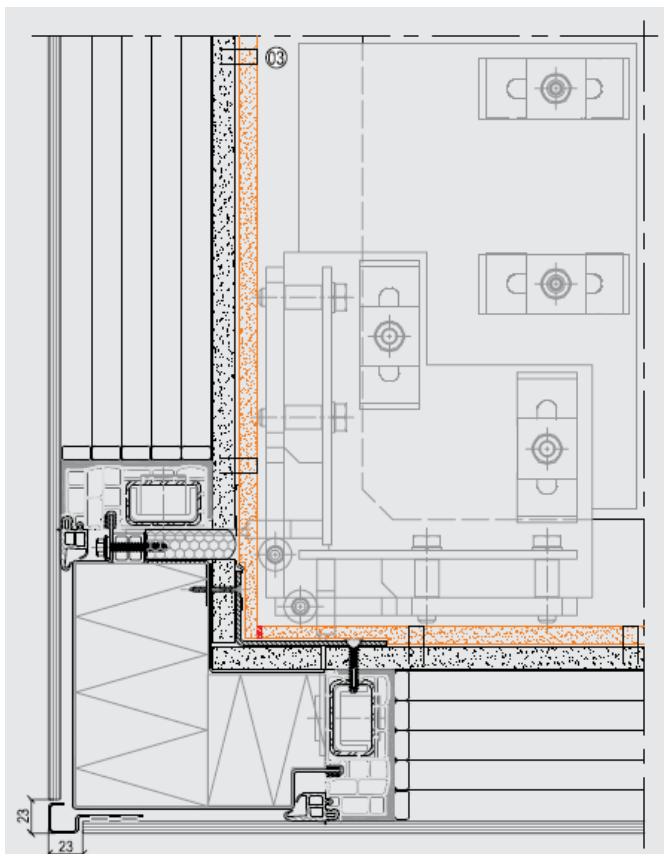
### 6.1 Vhodni podatki

#### 6.1.1 Opis detajla

Detajl je zelo podoben prejšnjemu, le da je kot vogala obrnjen navzven. Dva pokončno postavljena panela Qbiss Air sta pri vogalu navzven bočno povezana s predizdelanim vogalnim elementom, katerega nosilno konstrukcijo predstavljajo večji aluminijasti profil ter jekleni Z in L profil. Polnilo vogalnega elementa je mineralna volna. Tudi ta vogalni element je lahko izdelan iz enega ali dveh kosov.



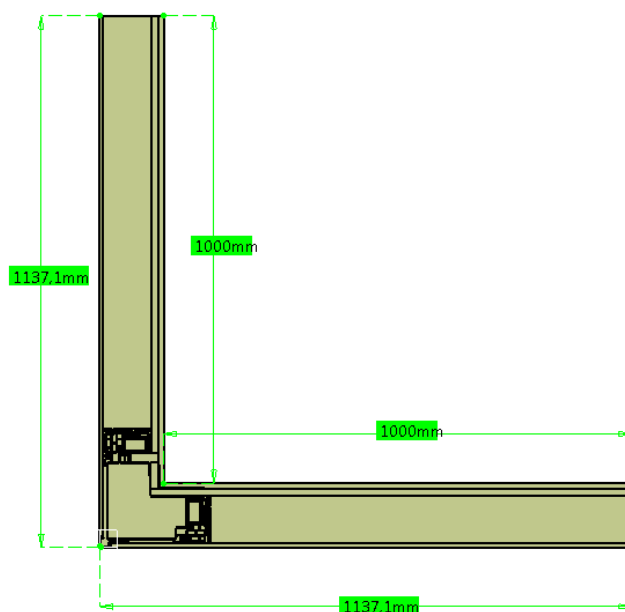
Slika 55: 3D prikaz stika dveh Qbiss Air panelov v vogalu navzven (Qbiss Air tehnični list, 2011)



Slika 56: 2D shematski prikaz detajla vogala navzven (Qbiss Air tehnični list, 2011)

### 6.1.2 Opis geometrijskega modela

Podobno kot v prejšnjem primeru, je tudi tu  $d_{min} = 1000$  mm potrebna dolžina od točke linijskega toplotnega mostu (v konkretnem primeru je to stik dveh panelov na notranji strani fasade). Tako dobim dolžino krakov detajla 1000 mm na notranji strani fasade in 1137,1 mm na zunanji strani.

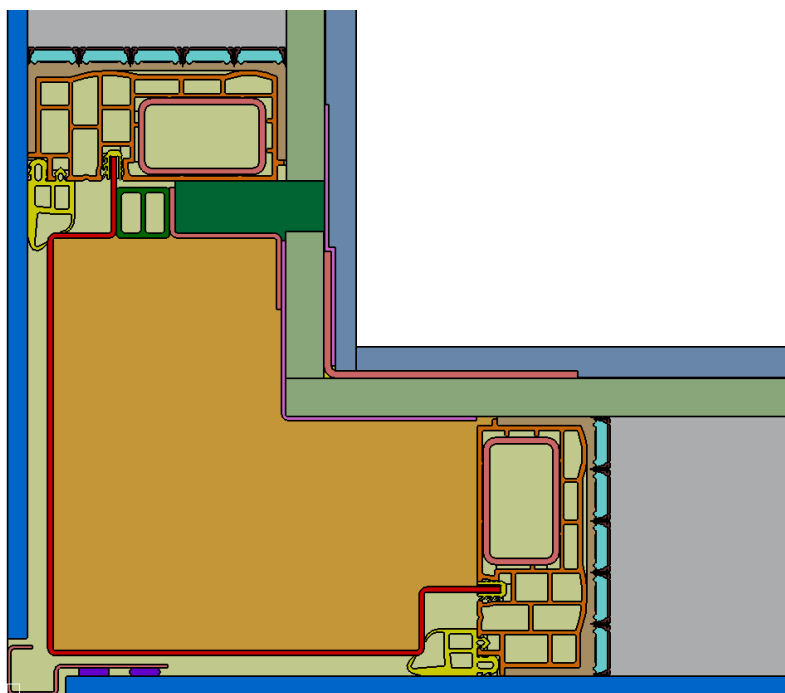


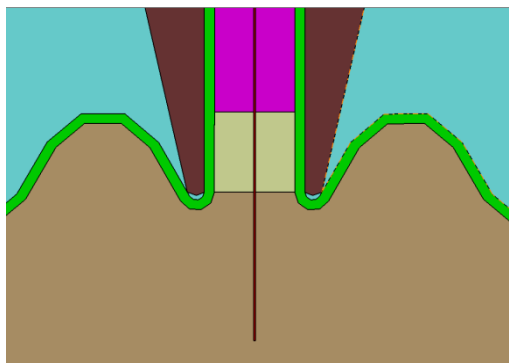
Slika 57: Dimenzije 2D računskega modela iz programa Catia V5

### 6.1.3 Toplotne prevodnosti materialov

Preglednica 16: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo

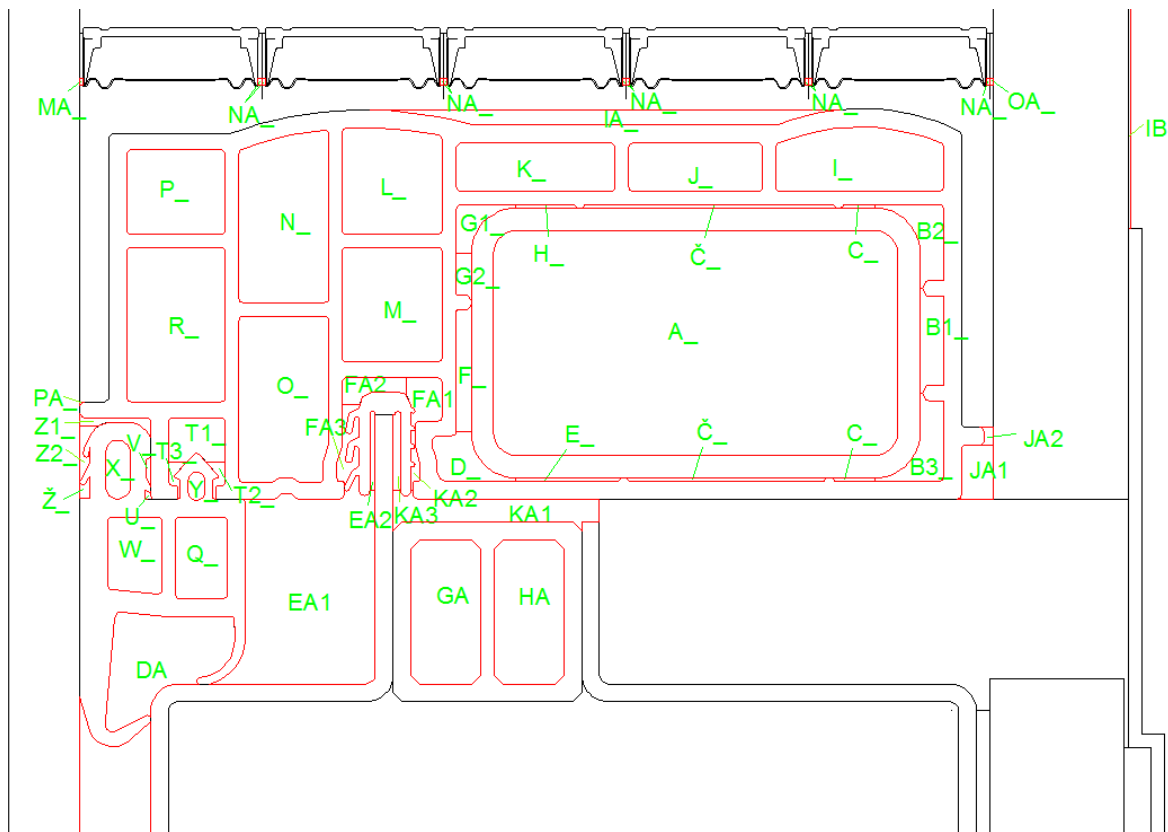
Material	Toplotna ali nadomestna prevodnost W/mK
Jeklo Cold rolled Grade 304 (distančnik) Cardinal steel	14,2
PS polimer distančnika Ultra QA	0,16
Polisulfid TKK specialni (lepilo 3)	0,22
Akrilno lepilo 2	0,20
EPDM guma	0,25
Poliuretanska pena	0,024
Aluminij (folija, profil)	160
Gips navaden (mavčna plošča)	0,21
Gips Rigidur H	0,202
Steklo	1,00
PA66 GF40 (GF 25)	0,30
Jeklo	50
Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub>	0,023
PE pena	0,047
Parna zapora (PE)	0,19
PVC	0,17
Mineralna volna	0,038
Jedro Qbiss Air panela (⊥)	0,01808
Zračni sloj IB	0,04545



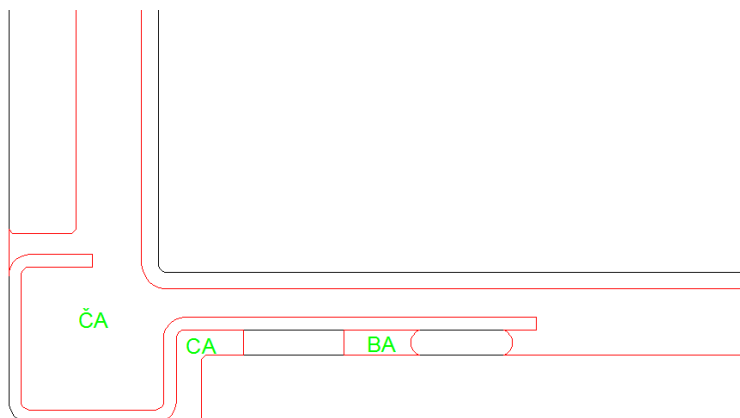


- |                             |   |                   |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Jeklo Cold rolled Grade 304 | Rigidur H                               | Parna zapora (PE) |
| PS polimer distančnika      | Steklo                                  | PVC               |
| Polisulfid TKK specialni    | PA66 GF40                               | Mineralna volna   |
| Akrilno lepilo 2            | Jeklo                                   | Jedro Qbiss Air   |
| Poliuretanska pena          | Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub> | EPDM guma         |
| Aluminij                    | Struktorno lepilo                       | Zrak              |
| Mavčna plošča               |   |                   |

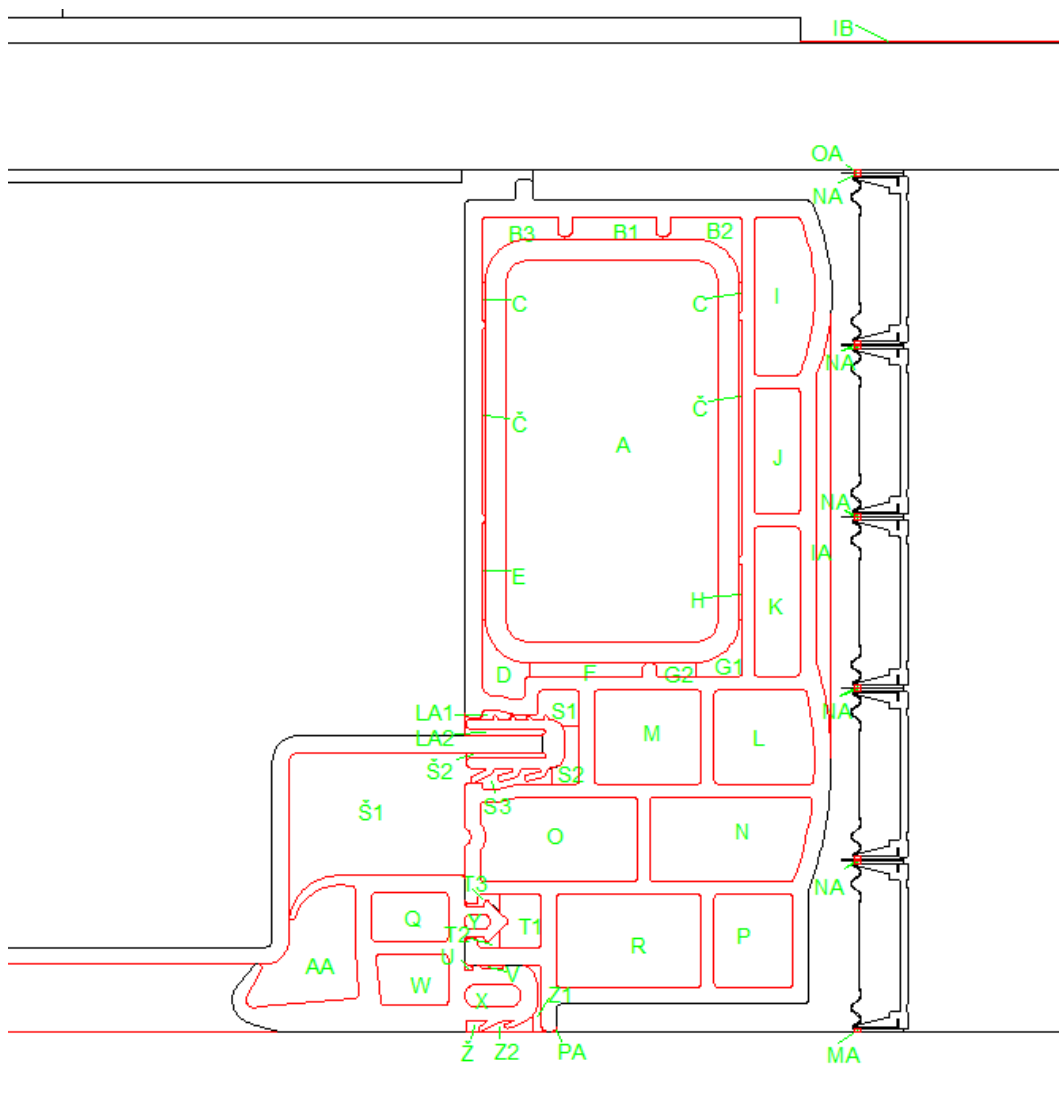
*Slika 58: Prikaz materialov v detajlu vogal navzven*



Slika 59: Prikaz zračnih reg na zgornjem delu detajla vogal navzven



Slika 60: Prikaz zračnih reg na srednjem delu detajla vogal navzven



Slika 61: Prikaz zračnih reg na spodnjem delu detajla vogal navzven

Preglednica 17: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu vogal navzven

Naziv	$d'$ [mm]	$b'$ [mm]	$A'$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$h_0$ [W/m <sup>2</sup> K]	$E$	$F$	$h_r$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_s$ [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,x}$ [W/mK]
A	25,0000	45,0000	1119,6350	24,9403	44,8926	1,570	0,818	0,794	3,340	0,204	0,122
A_	45,0000	25,0000	1119,6350	44,8926	24,9403	1,570	0,818	0,630	2,648	0,237	0,189
AA	13,2649	14,4220	122,9265	10,6332	11,5607	2,351	0,818	0,719	3,026	0,186	0,057
B1	11,6300	2,6203	26,8142	10,9093	2,4579	2,292	0,818	0,556	2,337	0,216	0,050
B1_	2,6203	11,6300	26,8142	2,4579	10,9093	10,171	0,818	0,900	3,785	0,072	0,034
B2	9,3714	7,6203	30,1901	6,0932	4,9547	4,103	0,818	0,678	2,850	0,144	0,042
B2_	7,6203	9,3714	30,1901	4,9547	6,0932	5,046	0,818	0,738	3,103	0,123	0,040
B3	9,8003	7,6203	31,0105	6,3152	4,9104	3,959	0,818	0,672	2,824	0,147	0,043
B3_	7,6203	9,8003	31,0105	4,9104	6,3152	5,091	0,818	0,745	3,132	0,122	0,040
BA	9,0415	3,0000	24,8485	8,6539	2,8714	2,889	0,818	0,581	2,443	0,188	0,046
C	0,3700	5,0655	1,7336	0,3558	4,8717	70,255	0,818	0,965	4,058	0,013	0,026

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 17

C_	5,0655	0,3700	1,7336	4,8717	0,3558	5,132	0,818	0,518	2,180	0,137	0,036
CA	10,5302	11,0000	49,4673	6,8815	7,1885	3,633	0,818	0,714	3,001	0,151	0,091
Č	0,4317	22,8697	8,1809	0,3930	20,8180	63,618	0,818	0,991	4,167	0,015	0,027
Č_	22,8697	0,4317	8,1809	20,8180	0,3930	1,201	0,818	0,505	2,123	0,301	0,069
ČA	162,7154	178,9520	2457,6171	47,2719	51,9890	1,570	0,818	0,721	3,033	0,217	0,435
D	5,5701	9,2794	28,2579	4,1185	6,8612	6,070	0,818	0,783	3,293	0,107	0,039
D_	9,2794	5,5701	28,2579	6,8612	4,1185	3,644	0,818	0,639	2,686	0,158	0,043
DA	14,4228	13,3529	121,8826	11,4738	10,6227	2,179	0,818	0,696	2,927	0,196	0,059
E	0,3700	11,9745	4,2901	0,3641	11,7832	68,665	0,818	0,985	4,142	0,014	0,027
E_	11,9745	0,3700	4,2901	11,7832	0,3641	2,122	0,818	0,508	2,135	0,235	0,050
EA1	18,5034	23,2200	308,0088	15,6667	19,6602	1,596	0,818	0,741	3,116	0,212	0,074
EA2	0,5794	8,7646	5,0420	0,5773	8,7333	43,303	0,818	0,968	4,071	0,021	0,027
F	14,2492	1,6490	22,2895	13,8783	1,6061	1,801	0,818	0,529	2,224	0,248	0,056
F_	1,6490	14,2492	22,2895	1,6061	13,8783	15,566	0,818	0,945	3,977	0,051	0,031
FA1	3,9446	5,6533	17,8257	3,5267	5,0544	7,089	0,818	0,761	3,200	0,097	0,036
FA2	7,1869	2,9610	14,6051	5,9539	2,4530	4,199	0,818	0,599	2,519	0,149	0,040
FA3	2,0000	9,1908	12,3388	1,6386	7,5301	15,257	0,818	0,903	3,797	0,052	0,031
G1	5,4317	6,6490	16,4267	3,6632	4,4842	6,825	0,818	0,737	3,100	0,101	0,036
G1_	6,6490	5,4317	16,4267	4,4842	3,6632	5,575	0,818	0,678	2,853	0,119	0,038
G2	5,4646	1,6490	7,8038	5,0854	1,5346	4,916	0,818	0,574	2,413	0,136	0,037
G2_	1,6490	5,4646	7,8038	1,5346	5,0854	16,291	0,818	0,871	3,665	0,050	0,031
GA	7,8000	16,0000	122,8000	7,7372	15,8713	3,231	0,818	0,813	3,417	0,150	0,051
H	0,4317	7,0603	2,8784	0,4195	6,8611	59,592	0,818	0,970	4,081	0,016	0,027
H_	7,0603	0,4317	2,8784	6,8611	0,4195	3,644	0,818	0,515	2,167	0,172	0,040
HA	7,7000	16,0000	121,2000	7,6372	15,8696	3,273	0,818	0,814	3,425	0,149	0,051
I	7,1784	18,6686	122,4111	6,8607	17,8424	3,644	0,818	0,843	3,547	0,139	0,049
I_	18,6686	7,1784	122,4111	17,8424	6,8607	1,570	0,818	0,593	2,493	0,246	0,072
IA	1,7152	52,4272	69,9262	1,5125	46,2318	16,529	0,818	0,984	4,138	0,048	0,031
IA_	52,4272	1,7152	69,9262	46,2318	1,5125	0,541	0,818	0,508	2,137	0,373	0,124
J	5,4000	14,9094	80,2957	5,3928	14,8895	4,636	0,818	0,851	3,578	0,122	0,044
J_	14,9094	5,4000	80,2957	14,8895	5,3928	1,679	0,818	0,588	2,472	0,241	0,062
JA1	4,0986	5,9967	21,5798	3,8405	5,6190	6,510	0,818	0,764	3,213	0,103	0,037
JA2	1,6007	1,9999	2,3085	1,3593	1,6983	18,392	0,818	0,740	3,113	0,047	0,029
K	5,4000	17,6912	95,3174	5,3939	17,6713	4,635	0,818	0,870	3,660	0,121	0,045
K_	17,6912	5,4000	95,3174	17,6713	5,3939	1,570	0,818	0,575	2,417	0,251	0,070
KA1	22,9683	4,5100	61,3888	17,6816	3,4719	1,414	0,818	0,549	2,307	0,269	0,066
KA2	1,0093	6,8020	3,8894	0,7597	5,1198	32,908	0,818	0,931	3,917	0,027	0,028
KA3	0,8206	8,7854	7,1058	0,8147	8,7221	30,687	0,818	0,955	4,019	0,029	0,028
L	11,7856	11,1315	128,9040	11,6824	11,0340	2,140	0,818	0,699	2,939	0,197	0,059
L_	11,1315	11,7856	128,9040	11,0340	11,6824	2,266	0,818	0,716	3,009	0,190	0,058
LA1	7,4930	1,3036	4,1643	4,8925	0,8512	5,110	0,818	0,543	2,284	0,135	0,036

Se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 17

LA2	9,4764	1,4156	7,8029	7,2274	1,0796	3,459	0,818	0,537	2,259	0,175	0,041
M	12,7352	11,1315	141,5472	12,7256	11,1231	1,965	0,818	0,688	2,892	0,206	0,062
M_	11,1315	12,7352	141,5472	11,1231	12,7256	2,248	0,818	0,727	3,058	0,188	0,059
MA	0,7787	0,3313	0,2580	0,7787	0,3313	32,104	0,818	0,602	2,532	0,029	0,027
MA_	0,3313	0,7787	0,2580	0,3313	0,7787	75,458	0,818	0,831	3,494	0,013	0,026
N	19,2220	10,0244	183,5393	18,7601	9,7835	1,570	0,818	0,623	2,618	0,239	0,079
N_	10,0244	19,2220	183,5393	9,7835	18,7601	2,555	0,818	0,803	3,378	0,169	0,058
NA	0,7787	0,3814	0,2970	0,7787	0,3814	32,105	0,818	0,616	2,590	0,029	0,027
NA_	0,3814	0,7787	0,2970	0,3814	0,7787	65,548	0,818	0,812	3,415	0,015	0,026
O	18,5597	10,0244	182,4398	18,3788	9,9267	1,570	0,818	0,626	2,635	0,238	0,077
O_	10,0244	18,5597	182,4398	9,9267	18,3788	2,518	0,818	0,798	3,357	0,170	0,058
OA	0,7787	0,3636	0,2832	0,7788	0,3636	32,101	0,818	0,611	2,570	0,029	0,027
OA_	0,3636	0,7787	0,2832	0,3636	0,7788	68,749	0,818	0,818	3,442	0,014	0,026
P	9,3691	10,9765	102,6256	9,3593	10,9651	2,671	0,818	0,731	3,073	0,174	0,054
P_	10,9765	9,3691	102,6256	10,9651	9,3593	2,280	0,818	0,684	2,878	0,194	0,057
PA	0,4974	0,5000	0,0536	0,2309	0,2321	108,265	0,818	0,708	2,977	0,009	0,026
Q	9,0587	5,7710	52,0635	9,0401	5,7592	2,765	0,818	0,646	2,716	0,182	0,050
Q_	5,7710	9,0587	52,0635	5,7592	9,0401	4,341	0,818	0,774	3,257	0,132	0,044
R	17,1740	10,9765	188,2965	17,1643	10,9703	1,570	0,818	0,646	2,718	0,233	0,074
R_	10,9765	17,1740	188,2965	10,9703	17,1643	2,279	0,818	0,774	3,255	0,181	0,061
S1	5,9167	4,3232	18,8500	5,0792	3,7112	4,922	0,818	0,663	2,789	0,130	0,039
S2	3,1495	6,7882	15,4012	2,6731	5,7615	9,352	0,818	0,819	3,445	0,078	0,034
S3	9,2658	2,0000	12,2279	7,5267	1,6246	3,322	0,818	0,553	2,327	0,177	0,043
Š1	23,2200	19,3000	312,7191	19,3968	16,1222	1,570	0,818	0,681	2,863	0,226	0,086
Š2	9,3600	2,0000	4,5700	4,6247	0,9882	5,406	0,818	0,553	2,325	0,129	0,036
T1	5,1128	6,3026	30,2408	4,9530	6,1056	5,047	0,818	0,738	3,105	0,123	0,040
T1_	6,3026	5,1128	30,2408	6,1056	4,9530	4,095	0,818	0,677	2,849	0,144	0,042
T2	4,0747	2,0000	3,4109	2,6361	1,2939	9,484	0,818	0,616	2,591	0,083	0,032
T2_	2,0000	4,0747	3,4109	1,2939	2,6361	19,321	0,818	0,812	3,413	0,044	0,029
T3	3,9369	2,0000	3,6836	2,6928	1,3680	9,284	0,818	0,620	2,606	0,084	0,032
T3_	0,8206	11,7856	11,1315	0,0000	0,0000	11,132	0,497	9,059	17,174	5,917	9,266
U	0,9873	0,8896	0,5180	0,7582	0,6832	32,972	0,818	0,692	2,911	0,028	0,027
U_	0,8896	0,9873	0,5180	0,6832	0,7582	36,593	0,818	0,723	3,039	0,025	0,027
V	3,2457	0,5381	1,4124	2,9188	0,4839	8,565	0,818	0,541	2,276	0,092	0,032
V_	9,4764	12,7352	11,1315	0,0000	0,0000	10,024	10,977	5,917	9,266	9,360	6,303
W	8,5948	6,0710	50,3340	8,4415	5,9627	2,962	0,818	0,659	2,771	0,174	0,048
W_	6,0710	8,5948	50,3340	5,9627	8,4415	4,193	0,818	0,759	3,192	0,135	0,044
X	6,5483	2,7074	16,2019	6,2600	2,5882	3,994	0,818	0,599	2,521	0,154	0,041
X_	2,7074	6,5483	16,2019	2,5882	6,2600	9,659	0,818	0,834	3,509	0,076	0,034
Y	3,0972	1,8000	4,8796	2,8976	1,6840	8,628	0,818	0,635	2,670	0,089	0,033
Y_	1,8000	3,0972	4,8796	1,6840	2,8976	14,846	0,818	0,788	3,313	0,055	0,031

se nadaljuje ...



... nadaljevanje Preglednice 17

Z1	2,2017	7,8740	6,3158	1,3289	4,7526	18,812	0,818	0,879	3,698	0,044	0,030
Z1_	7,8740	2,2017	6,3158	4,7526	1,3289	5,260	0,818	0,569	2,391	0,131	0,036
Z2	6,0906	1,9971	4,8496	3,8458	1,2610	6,501	0,818	0,580	2,439	0,112	0,034
Z2_	1,9971	6,0906	4,8496	1,2610	3,8458	19,825	0,818	0,862	3,626	0,043	0,030
Ž	2,4370	1,1359	2,0716	2,1082	0,9826	11,858	0,818	0,611	2,569	0,069	0,030
Ž_	1,1359	2,4370	2,0716	0,9826	2,1082	25,442	0,818	0,819	3,443	0,035	0,028

Preglednica 18: Izračun nadomestnih toplotnih prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu vogal navzven

Naziv	$d'$ [mm]	$b'$ [mm]	$A'$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$h_a$ [W/m <sup>2</sup> K]	$E$	$F$	$h_r$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_s$ [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,y}$ [W/mK]
A	45,0000	25,0000	1119,6350	44,8926	24,9403	1,570	0,818	0,630	2,648	0,237	0,189
A_	25,0000	45,0000	1119,6350	24,9403	44,8926	1,570	0,818	0,794	3,340	0,204	0,122
AA	14,4220	13,2649	122,9265	11,5607	10,6332	2,163	0,818	0,695	2,923	0,197	0,059
B1	2,6203	11,6300	26,8142	2,4579	10,9093	10,171	0,818	0,900	3,785	0,072	0,034
B1_	11,6300	2,6203	26,8142	10,9093	2,4579	2,292	0,818	0,556	2,337	0,216	0,050
B2	7,6203	9,3714	30,1901	4,9547	6,0932	5,046	0,818	0,738	3,103	0,123	0,040
B2_	9,3714	7,6203	30,1901	6,0932	4,9547	4,103	0,818	0,678	2,850	0,144	0,042
B3	7,6203	9,8003	31,0105	4,9104	6,3152	5,091	0,818	0,745	3,132	0,122	0,040
B3_	9,8003	7,6203	31,0105	6,3152	4,9104	3,959	0,818	0,672	2,824	0,147	0,043
BA	3,0000	9,0415	24,8485	2,8714	8,6539	8,707	0,818	0,861	3,621	0,081	0,035
C	5,0655	0,3700	1,7336	4,8717	0,3558	5,132	0,818	0,518	2,180	0,137	0,036
C_	0,3700	5,0655	1,7336	0,3558	4,8717	70,255	0,818	0,965	4,058	0,013	0,026
CA	11,0000	10,5302	49,4673	7,1885	6,8815	3,478	0,818	0,701	2,947	0,156	0,092
Č	22,8697	0,4317	8,1809	20,8180	0,3930	1,201	0,818	0,505	2,123	0,301	0,069
Č_	0,4317	22,8697	8,1809	0,3930	20,8180	63,618	0,818	0,991	4,167	0,015	0,027
ČA	178,9520	162,7154	2457,6171	51,9890	47,2719	1,570	0,818	0,693	2,916	0,223	0,466
D	9,2794	5,5701	28,2579	6,8612	4,1185	3,644	0,818	0,639	2,686	0,158	0,043
D_	5,5701	9,2794	28,2579	4,1185	6,8612	6,070	0,818	0,783	3,293	0,107	0,039
DA	13,3529	14,4228	121,8826	10,6227	11,4738	2,353	0,818	0,718	3,022	0,186	0,057
E	11,9745	0,3700	4,2901	11,7832	0,3641	2,122	0,818	0,508	2,135	0,235	0,050
E_	0,3700	11,9745	4,2901	0,3641	11,7832	68,665	0,818	0,985	4,142	0,014	0,027
EA1	23,2200	18,5034	308,0088	19,6602	15,6667	1,570	0,818	0,675	2,838	0,227	0,087
EA2	8,7646	0,5794	5,0420	8,7333	0,5773	2,863	0,818	0,517	2,172	0,199	0,044
F	1,6490	14,2492	22,2895	1,6061	13,8783	15,566	0,818	0,945	3,977	0,051	0,031
F_	14,2492	1,6490	22,2895	13,8783	1,6061	1,801	0,818	0,529	2,224	0,248	0,056
FA1	5,6533	3,9446	17,8257	5,0544	3,5267	4,946	0,818	0,657	2,764	0,130	0,039
FA2	2,9610	7,1869	14,6051	2,4530	5,9539	10,192	0,818	0,835	3,511	0,073	0,034
FA3	9,1908	2,0000	12,3388	7,5301	1,6386	3,320	0,818	0,554	2,329	0,177	0,043
G1	6,6490	5,4317	16,4267	4,4842	3,6632	5,575	0,818	0,678	2,853	0,119	0,038
G1_	5,4317	6,6490	16,4267	3,6632	4,4842	6,825	0,818	0,737	3,100	0,101	0,036

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 18

G2	1,6490	5,4646	7,8038	1,5346	5,0854	16,291	0,818	0,871	3,665	0,050	0,031
G2_	5,4646	1,6490	7,8038	5,0854	1,5346	4,916	0,818	0,574	2,413	0,136	0,037
GA	16,0000	7,8000	122,8000	15,8713	7,7372	1,575	0,818	0,615	2,588	0,240	0,066
H	7,0603	0,4317	2,8784	6,8611	0,4195	3,644	0,818	0,515	2,167	0,172	0,040
H_	0,4317	7,0603	2,8784	0,4195	6,8611	59,592	0,818	0,970	4,081	0,016	0,027
HA	16,0000	7,7000	121,2000	15,8696	7,6372	1,575	0,818	0,614	2,583	0,241	0,066
I	18,6686	7,1784	122,4111	17,8424	6,8607	1,570	0,818	0,593	2,493	0,246	0,072
I_	7,1784	18,6686	122,4111	6,8607	17,8424	3,644	0,818	0,843	3,547	0,139	0,049
IA	52,4272	1,7152	69,9262	46,2318	1,5125	0,541	0,818	0,508	2,137	0,373	0,124
IA_	1,7152	52,4272	69,9262	1,5125	46,2318	16,529	0,818	0,984	4,138	0,048	0,031
J	14,9094	5,4000	80,2957	14,8895	5,3928	1,679	0,818	0,588	2,472	0,241	0,062
J_	5,4000	14,9094	80,2957	5,3928	14,8895	4,636	0,818	0,851	3,578	0,122	0,044
JA1	5,9967	4,0986	21,5798	5,6190	3,8405	4,449	0,818	0,655	2,753	0,139	0,040
JA2	1,9999	1,6007	2,3085	1,6983	1,3593	14,721	0,818	0,675	2,841	0,057	0,030
K	17,6912	5,4000	95,3174	17,6713	5,3939	1,570	0,818	0,575	2,417	0,251	0,070
K_	5,4000	17,6912	95,3174	5,3939	17,6713	4,635	0,818	0,870	3,660	0,121	0,045
KA1	4,5100	22,9683	61,3888	3,4719	17,6816	7,201	0,818	0,911	3,833	0,091	0,038
KA2	6,8020	1,0093	3,8894	5,1198	0,7597	4,883	0,818	0,537	2,258	0,140	0,037
KA3	8,7854	0,8206	7,1058	8,7221	0,8147	2,866	0,818	0,523	2,201	0,197	0,044
L	11,1315	11,7856	128,9040	11,0340	11,6824	2,266	0,818	0,716	3,009	0,190	0,058
L_	11,7856	11,1315	128,9040	11,6824	11,0340	2,140	0,818	0,699	2,939	0,197	0,059
LA1	1,3036	7,4930	4,1643	0,8512	4,8925	29,371	0,818	0,921	3,872	0,030	0,028
LA2	1,4156	9,4764	7,8029	1,0796	7,2274	23,156	0,818	0,931	3,915	0,037	0,029
M	11,1315	12,7352	141,5472	11,1231	12,7256	2,248	0,818	0,727	3,058	0,188	0,059
M_	12,7352	11,1315	141,5472	12,7256	11,1231	1,965	0,818	0,688	2,892	0,206	0,062
MA	0,3313	0,7787	0,2580	0,3313	0,7787	75,458	0,818	0,831	3,494	0,013	0,026
MA_	0,7787	0,3313	0,2580	0,7787	0,3313	32,104	0,818	0,602	2,532	0,029	0,027
N	10,0244	19,2220	183,5393	9,7835	18,7601	2,555	0,818	0,803	3,378	0,169	0,058
N_	19,2220	10,0244	183,5393	18,7601	9,7835	1,570	0,818	0,623	2,618	0,239	0,079
NA	0,3814	0,7787	0,2970	0,3814	0,7787	65,548	0,818	0,812	3,415	0,015	0,026
NA_	0,7787	0,3814	0,2970	0,7787	0,3814	32,105	0,818	0,616	2,590	0,029	0,027
O	10,0244	18,5597	182,4398	9,9267	18,3788	2,518	0,818	0,798	3,357	0,170	0,058
O_	18,5597	10,0244	182,4398	18,3788	9,9267	1,570	0,818	0,626	2,635	0,238	0,077
OA	0,3636	0,7787	0,2832	0,3636	0,7788	68,749	0,818	0,818	3,442	0,014	0,026
OA_	0,7787	0,3636	0,2832	0,7788	0,3636	32,101	0,818	0,611	2,570	0,029	0,027
P	10,9765	9,3691	102,6256	10,9651	9,3593	2,280	0,818	0,684	2,878	0,194	0,057
P_	9,3691	10,9765	102,6256	9,3593	10,9651	2,671	0,818	0,731	3,073	0,174	0,054
PA	0,5000	0,4974	0,0536	0,2321	0,2309	107,702	0,818	0,706	2,971	0,009	0,026
Q	5,7710	9,0587	52,0635	5,7592	9,0401	4,341	0,818	0,774	3,257	0,132	0,044
Q_	9,0587	5,7710	52,0635	9,0401	5,7592	2,765	0,818	0,646	2,716	0,182	0,050
R	10,9765	17,1740	188,2965	10,9703	17,1643	2,279	0,818	0,774	3,255	0,181	0,061

se nadaljuje ...

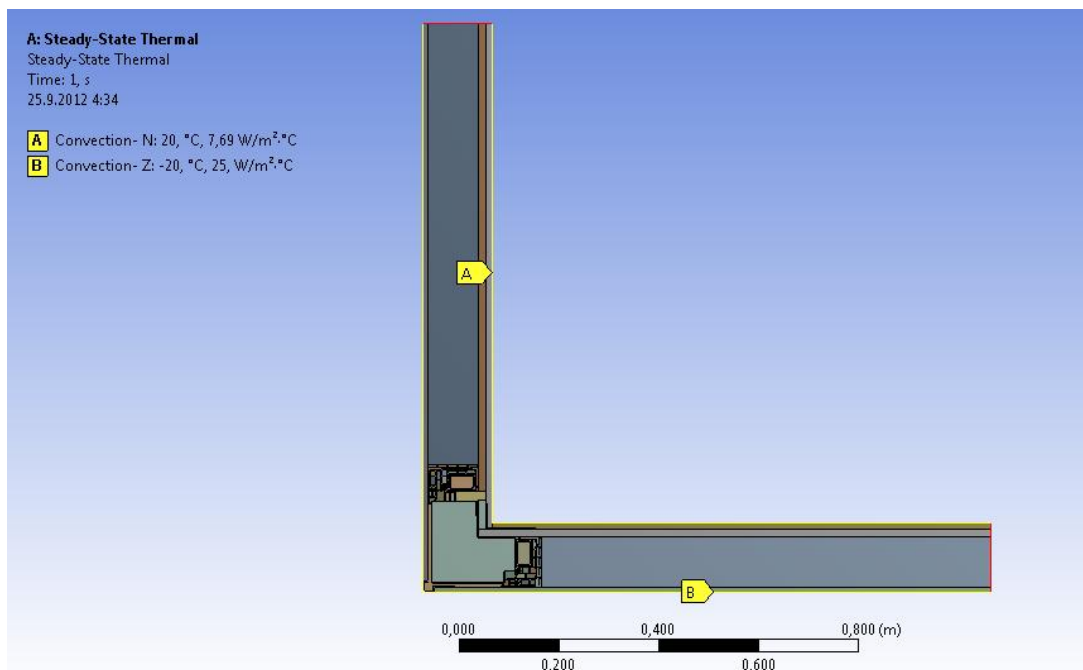
... nadaljevanje Preglednice 18

R_	17,1740	10,9765	188,2965	17,1643	10,9703	1,570	0,818	0,646	2,718	0,233	0,074
S1	4,3232	5,9167	18,8500	3,7112	5,0792	6,736	0,818	0,754	3,171	0,101	0,037
S2	6,7882	3,1495	15,4012	5,7615	2,6731	4,339	0,818	0,610	2,567	0,145	0,040
S3	2,0000	9,2658	12,2279	1,6246	7,5267	15,388	0,818	0,904	3,800	0,052	0,031
Š1	19,3000	23,2200	312,7191	16,1222	19,3968	1,570	0,818	0,735	3,090	0,215	0,075
Š2	2,0000	9,3600	4,5700	0,9882	4,6247	25,299	0,818	0,904	3,804	0,034	0,029
T1	6,3026	5,1128	30,2408	6,1056	4,9530	4,095	0,818	0,677	2,849	0,144	0,042
T1_	5,1128	6,3026	30,2408	4,9530	6,1056	5,047	0,818	0,738	3,105	0,123	0,040
T2	2,0000	4,0747	3,4109	1,2939	2,6361	19,321	0,818	0,812	3,413	0,044	0,029
T2_	4,0747	2,0000	3,4109	2,6361	1,2939	9,484	0,818	0,616	2,591	0,083	0,032
T3	2,0000	3,9369	3,6836	1,3680	2,6928	18,275	0,818	0,807	3,393	0,046	0,030
T3_	3,9369	0,8206	3,6836	2,6928	1,3680	9,284	0,818	0,620	2,606	0,084	0,032
U	0,8896	0,9873	0,5180	0,6832	0,7582	36,593	0,818	0,723	3,039	0,025	0,027
U_	0,9873	0,8896	0,5180	0,7582	0,6832	32,972	0,818	0,692	2,911	0,028	0,027
V	0,5381	3,2457	1,4124	0,4839	2,9188	51,664	0,818	0,924	3,886	0,018	0,027
V_	3,2457	9,4764	1,4124	2,9188	0,4839	8,565	0,818	0,541	2,276	0,092	0,032
W	6,0710	8,5948	50,3340	5,9627	8,4415	4,193	0,818	0,759	3,192	0,135	0,044
W_	8,5948	6,0710	50,3340	8,4415	5,9627	2,962	0,818	0,659	2,771	0,174	0,048
X	2,7074	6,5483	16,2019	2,5882	6,2600	9,659	0,818	0,834	3,509	0,076	0,034
X_	6,5483	2,7074	16,2019	6,2600	2,5882	3,994	0,818	0,599	2,521	0,154	0,041
Y	1,8000	3,0972	4,8796	1,6840	2,8976	14,846	0,818	0,788	3,313	0,055	0,031
Y_	3,0972	1,8000	4,8796	2,8976	1,6840	8,628	0,818	0,635	2,670	0,089	0,033
Z1	7,8740	2,2017	6,3158	4,7526	1,3289	5,260	0,818	0,569	2,391	0,131	0,036
Z1_	2,2017	7,8740	6,3158	1,3289	4,7526	18,812	0,818	0,879	3,698	0,044	0,030
Z2	1,9971	6,0906	4,8496	1,2610	3,8458	19,825	0,818	0,862	3,626	0,043	0,030
Z2_	6,0906	1,9971	4,8496	3,8458	1,2610	6,501	0,818	0,580	2,439	0,112	0,034
Ž	1,1359	2,4370	2,0716	0,9826	2,1082	25,442	0,818	0,819	3,443	0,035	0,028
Ž_	2,4370	1,1359	2,0716	2,1082	0,9826	11,858	0,818	0,611	2,569	0,069	0,030

CA in ČA sta delno prezračevani regi.

#### 6.1.4 Robni pogoji

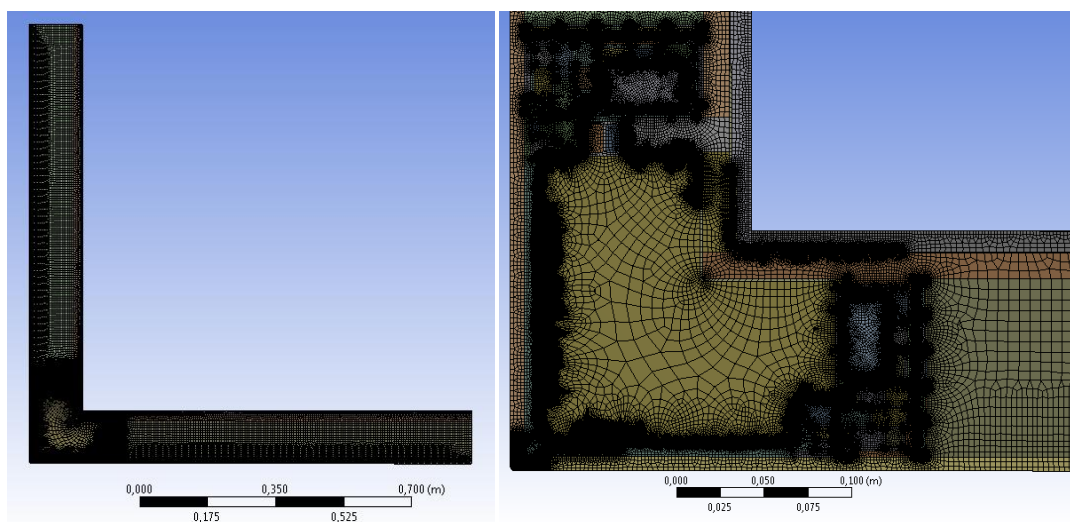
Kot je razvidno iz slike 62 imamo na modelu predpisana dva konvekcijska robna pogoja. Na notranji strani je predpisana konstantna temperatura 20°C in koeficient toplotne prestopnosti za horizontalni toplotni tok 7,69 W/m<sup>2</sup>K. Na zunanji strani imamo temperaturo -20°C in koeficient toplotne prestopnosti 25 W/m<sup>2</sup>K. Prerezni ravnini, obarvani rdeče, sta adiabatni liniji.

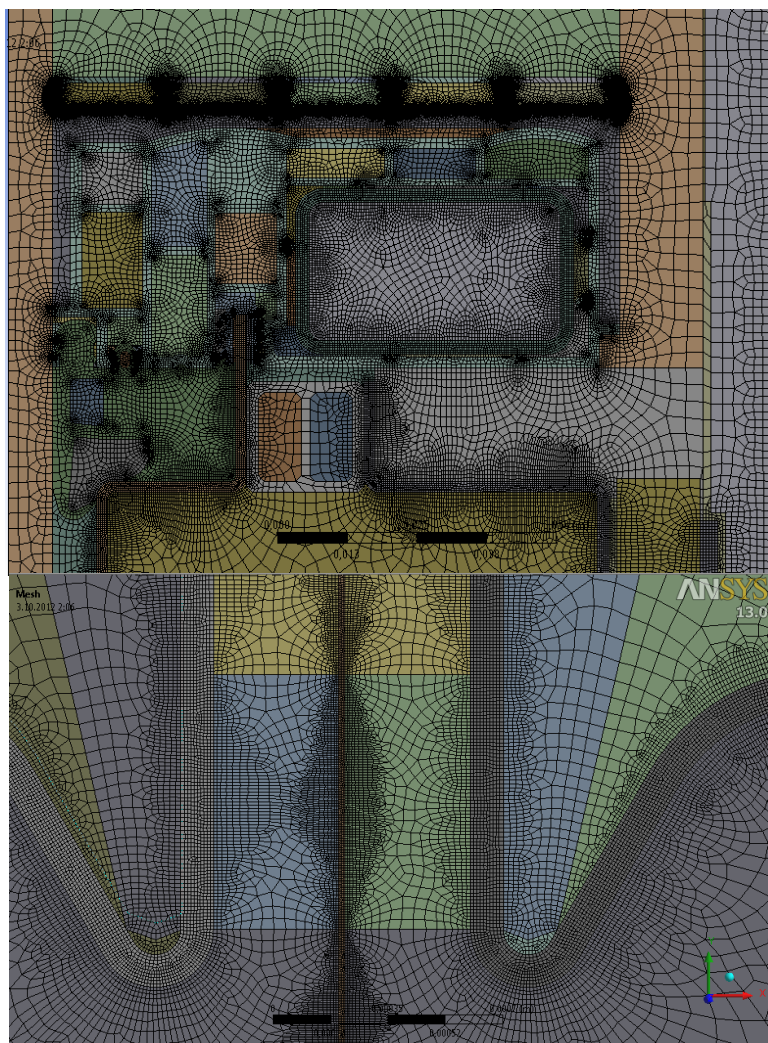


Slika 62: Predpisani robni pogoji na detajlu vogala navzven

### 6.1.5 Mreža končnih elementov

Način mreženja je identičen kot pri vogalu navznoter, saj sta vogalnika sestavljena iz zelo podobnih sestavnih delov.





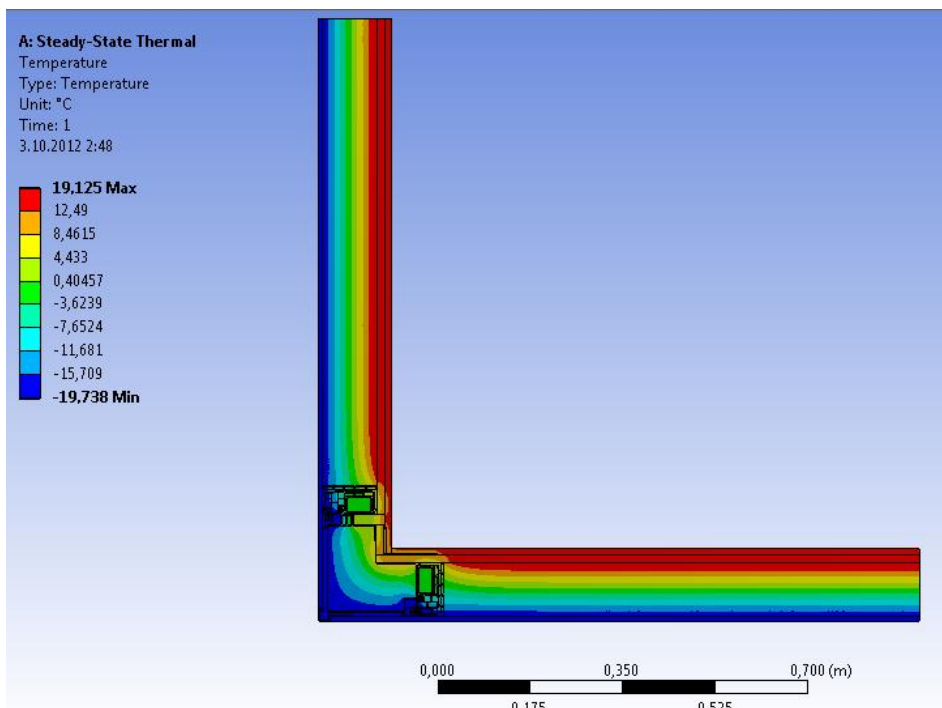
Slika 63: Osnovna mreža končnih elementov za detajl navzven

Mrežo sestavlja 1.227.294 večinoma štirikotnih osem-voziščnih končnih elementov, skupno pa je 3.673.671 vozlišč.

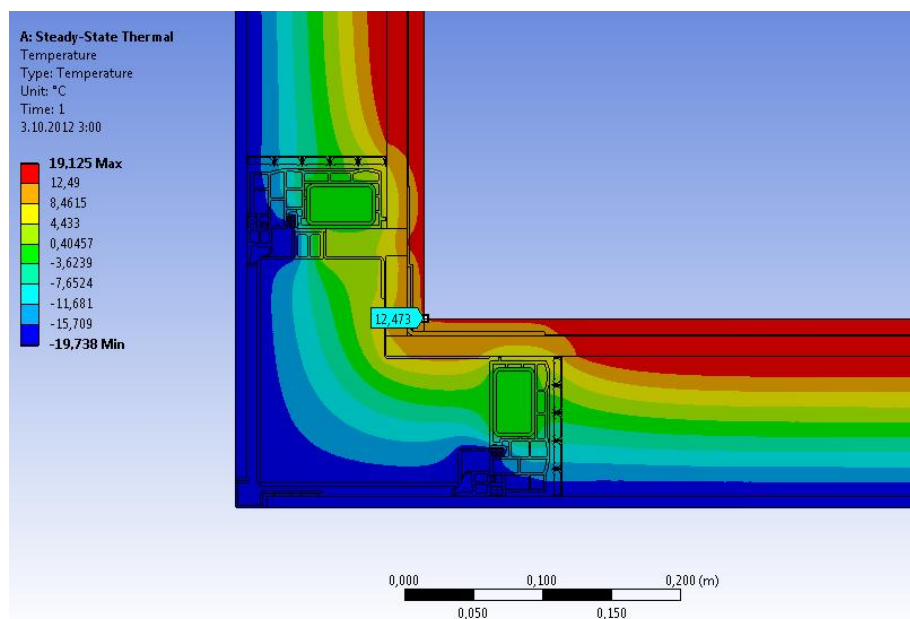
## 6.2 Rezultati

### 6.2.1 Potek temperatur

Tudi pri tem detajlu izoterme potekajo vzporedno s površino panela skoraj čisto do distančnikov, kar pomeni, da je toplotni tok čez sam panel praktično enodimenzionalen. Za razliko od prejšnjega primera pa je tu temperaturna razporeditev precej simetrična na diagonalno simetrijsko os vogalnega elementa, zato se najnižja temperatura na notranji površini pojavi ravno v vogalu, kjer se stikata mavčno-kartonski plošči (slika 65). Jekleni Z profil, ki je nameščen le na strani zgornjega kraka detajla, nekoliko vpliva na nesimetričen potek izoterm, vendar izolativna tesnilna pena dobro nevtralizira njegov vpliv na temperaturo notranje površine konstrukcije. Najnižja notranja površinska temperatura znaša 12,473°C.



Slika 64: Razpored temperatur vogala navzven



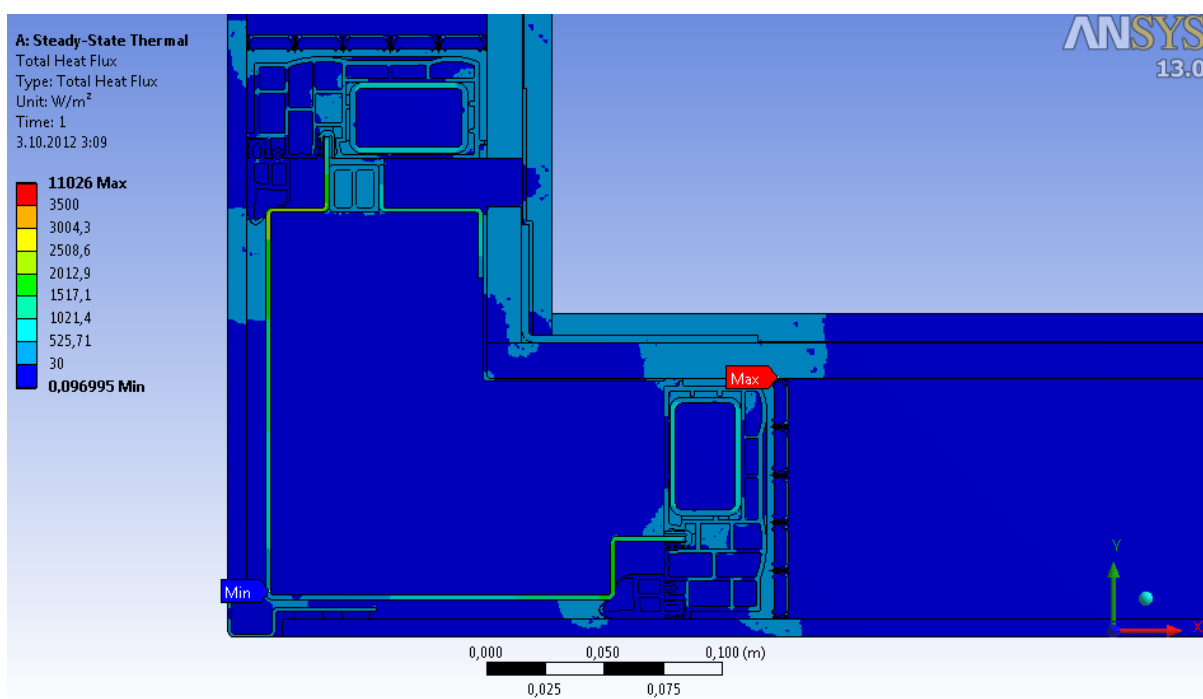
Slika 65: Točka najnižje temperature na notranji površini konstrukcije

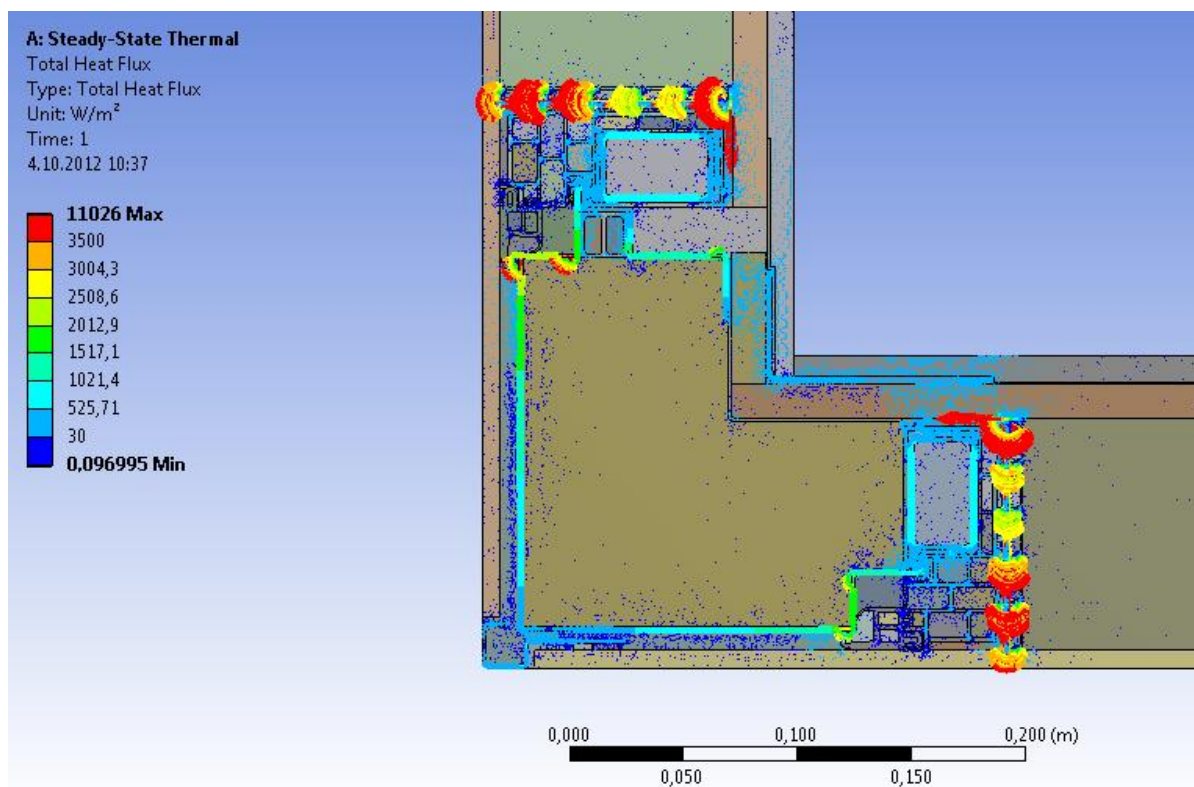
## 6.2.2 Toplotni tok

### 6.2.2.1 Celotni specifični toplotni tok

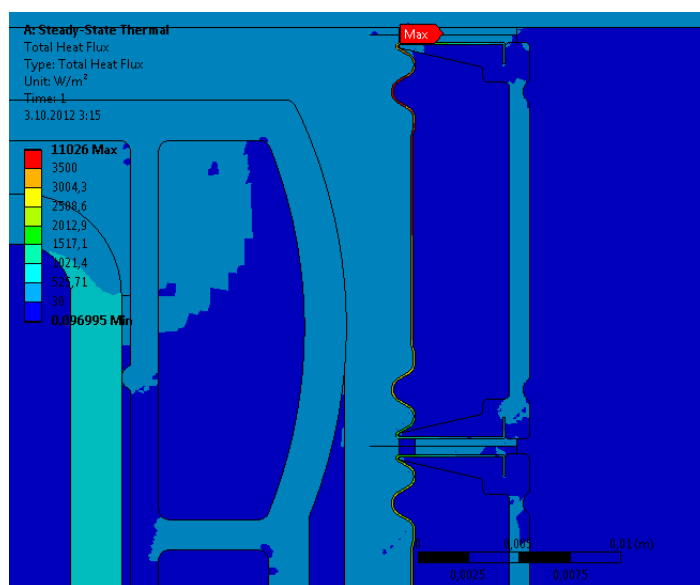
Podobno kot v prejšnjem detajlu, tudi tu poteka največji toplotni tok po najbolj prevodnih elementih detajla in po najkrajših možnih poteh med temi elementi. Od notranjega okolja se največ toplote prevede predvsem na jekleni L profil ob notranjem robu detajla, iz katerega toplota zaokroži v obeh smereh okoli sloja mineralne volne do zunanega vogala detajla, na zgornjem kraku pa toplota vstopa tudi direktno preko mavčnih plošč in polisulfida na jekleno pločevino distančnika. Največjo vrednost

spec. toplotni tok doseže v krajni alufoliji spodnjega kraka blizu stika s rigidur ploščo. Na vektorskem prikazu je lepo razvidno, da je spec. toplotni tok na obeh krakih v pločevini najbolj notranjega distančnika največji, nato pa se v drugem in tretjem distančniku opazno zmanjša, saj se precej toplote prevaja po vzporedno situiranem jeklenem profilu, ki je 3,5-krat bolj toplotno prevoden od pločevine distančnika. V četrtem in petem distančniku se spec. toplotni tok spet poveča, saj se del toplote iz jeklenega profila prek polimerne letve in polisulfida prenese na distančnike, malenkost toplote se preko polimerne letve prenese proti stekleni zunanji plošči, preostali del pa se bodisi po daljši poti preko polimerne letve in zunanjega EPDM tesnila, predvsem pa po krajši poti preko polimerne letve in notranjega EPDM tesnila prenese na aluminijski profil. Spec. toplotni tok je nekoliko večji v zgornjem kraku aluminijskega profila zaradi jeklenega Z profila, ki je nameščen le na zgornji strani detajla. Iz aluminijskega profila nazadnje toplota preide v zunanje okolje prek prezračevane zračne rege ter jeklenega zaključnega profila. Toplota, ki se prevaja po jekleni pločevini distančnikov, se v zunanje okolje prenese direktno preko stekla.

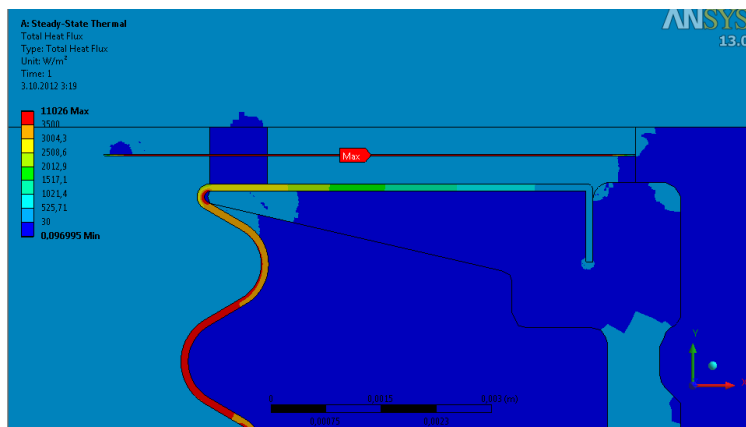




Slika 66: Potek celotnega dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v vogalu navzven v konturnem (zgoraj) in vektorskem (spodaj) prikazu



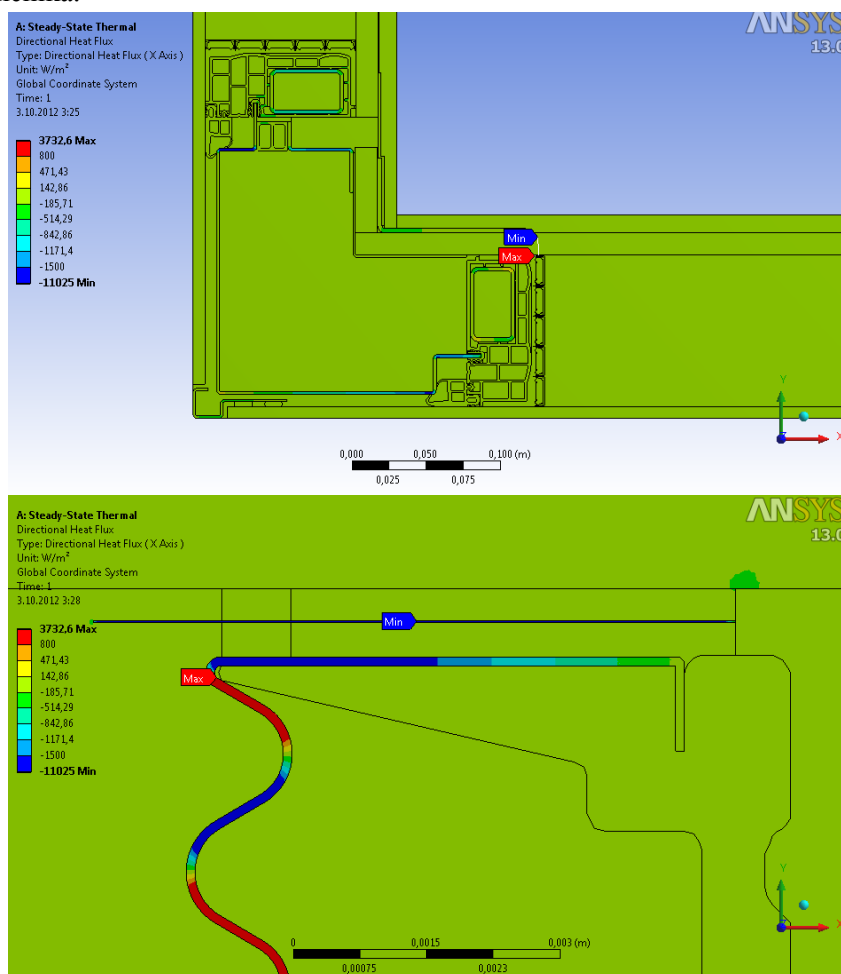




Slika 67: Maksimalni celotni specifični toplotni tok v vogalu navzven

### 6.2.2.2 Specifični toplotni tok v smeri X

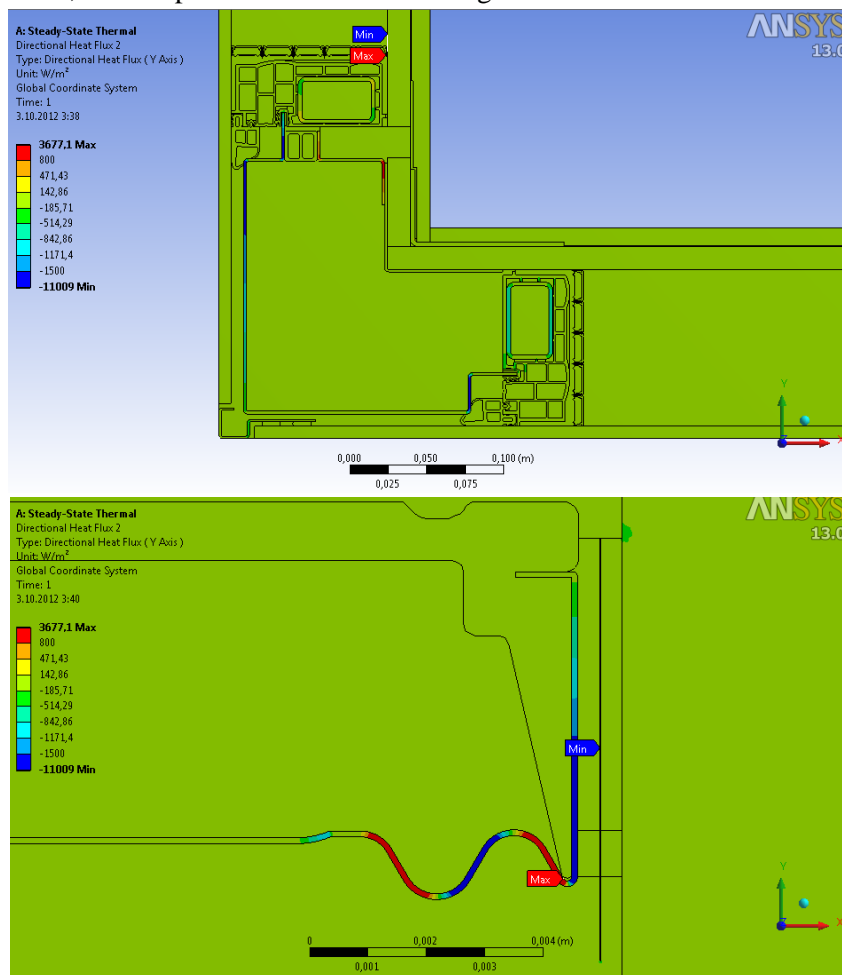
Večjo absolutno vrednost vektorja  $q_x$  dobimo v delih kovinskih elementov, ki so vzporedni X osi koordinatnega sistema. To so alufolije v spodnjem kraku, deli pločevin distančnikov, deli aluminijastega profila in deli jeklenih profilov. Minimalno vrednost dobimo v skrajno notranji alufoliji spodnjega kraka detajla, medtem ko je maksimalna vrednost vektorja  $q_x$  tri desetinke milimetra niže v pločevini distančnika.



Slika 68: Potek spec. toplotnega toka v smeri X v vogalu navzven

### 6.2.2.3 Spec. toplotni tok v smeri Y

Situacija se simetrično ponovi tudi v smeri Y. Večje vrednosti (v absolutnem smislu) so v delih kovinskih elementov, ki so vzporedni Y osi koordinatnega sistema.



Slika 69: Potek spec. toplotnega toka v smeri Y v vogalu navzven

### 6.2.2.4 Korekcijski faktor linijskega toplotnega mostu

Toplotni tok, ki je vstopil skozi notranje površine modela je enak toplotnemu toku, ki izstopa iz modela skozi njegove zunanje površine in znaša  $Q = Q_i = 24,913 \text{ W/m}$ ,  $Q_e = -24,913 \text{ W/m}$ .

Vsota zunanjih dimenzij modela:  $L_e = 2 \cdot 1,1371 \text{ m} = 2,2742 \text{ m}$ .

Vsota notranjih dimenzij modela:  $L_i = 1 + 1 \text{ m} = 2 \text{ m}$ .

Razlika med temperaturo notranjega in zunanjega zraka:  $\theta_i - \theta_e = 20^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}) = 40 \text{ K}$

Toplotna prehodnost stene je enaka kot v prejšnjem primeru:  $U_w = 0,167 \text{ W/m}^2\text{K}$

Specifični toplotni tok ( $L^{2D}$ ), ki prehaja skozi vogalni detalj na linijskem toplotnem mostu, oz. koeficient toplotne sklopitve za sistem zunanjih in notranjih mer znaša:

$$L^{2D} = \frac{Q}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{24,913 \text{ W}}{40 \text{ K m}} = 0,623 \text{ W/mK} \quad (149)$$

Korekcijski koeficient linijskega toplotnega mostu ( $\psi$  [W/mK]) po sistemu notranjih in zunanjih mer:

$$\psi_i = L^{2D} - U_w \cdot L_i = 0,623 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 2 \text{ m} = 0,289 \frac{W}{mK} \quad (150)$$

$$\psi_e = L^{2D} - U_w \cdot L_e = 0,623 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 2,2742 \text{ m} = 0,243 \frac{W}{mK} \quad (151)$$

### 6.2.2.5 Temperaturni faktor toplotnega mostu ( $f_{RSi}$ [-])

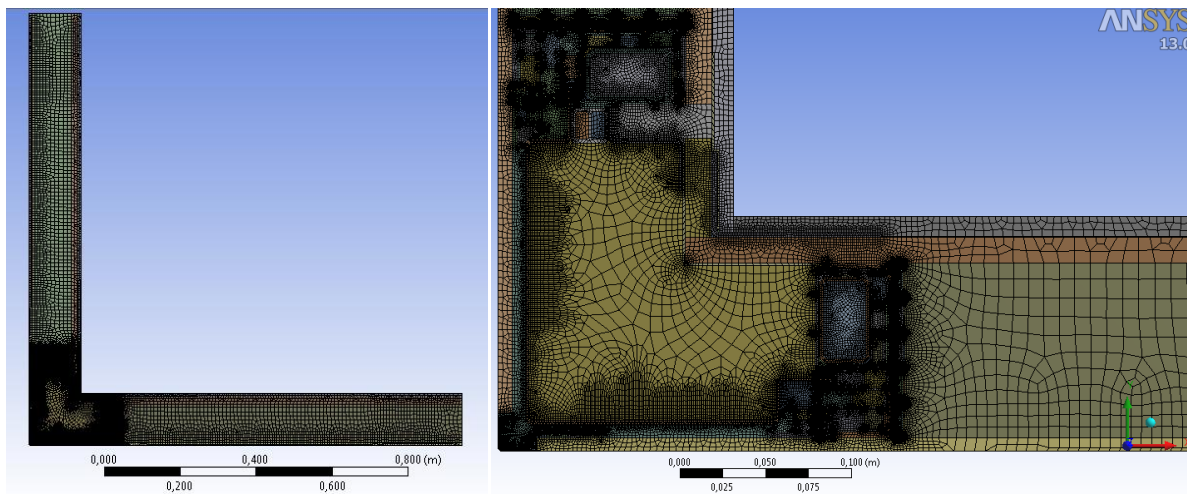
$$f_{RSi} = \frac{12,473 - (-20)}{20 - (-20)} = 0,812 \quad (152)$$

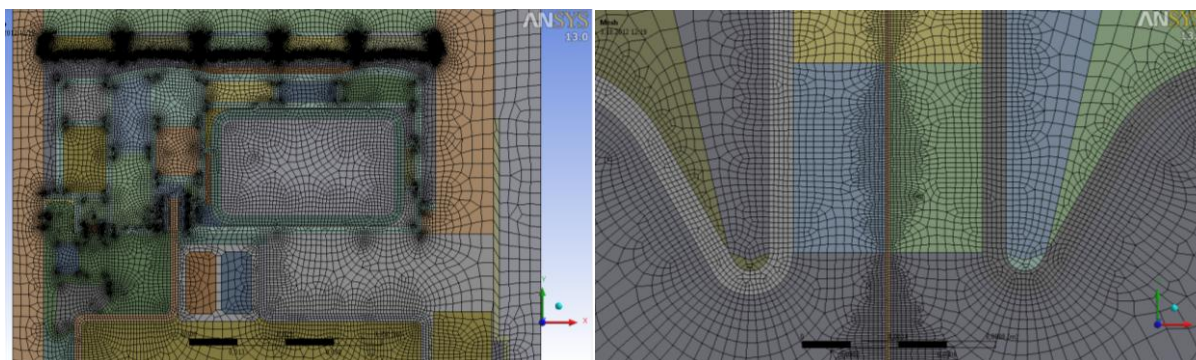
$$f_{RSi} > f_{RSi,min}(\varphi_i = 45\%) = 0,777 \quad (153)$$

Temperaturni faktor linijskega toplotnega mostu je večji od  $f_{RSi,min}$ , zato ni nevarnosti kondenzacije vodne pare na notranji površini konstrukcije in ni tveganja za pojav škodljivih mikroorganizmov.

## 6.3 Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake

Tudi pri tem detajlu sem kreiral dodatno razredčeno mrežo končnih elementov iz elementov s 100% povečanimi dimenzijami stranic, na robovih s predpisanimi razdelki pa sem število le-teh prepolovil. Tako sem dobil 486.674 končnih elementov in 1.456.727 vozlišč, kar je 60% manj kot v izhodiščni mreži.



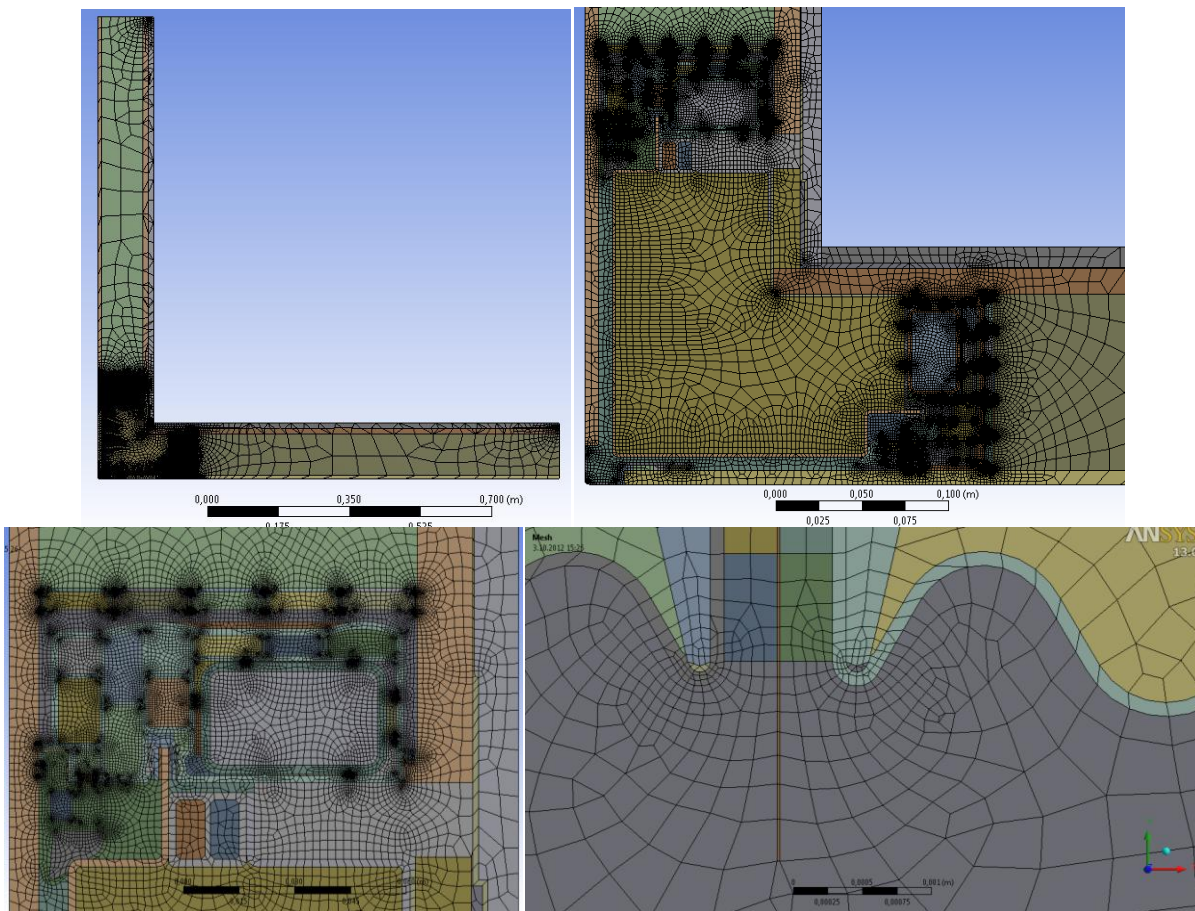


Slika 70: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navzven

Preglednica 19: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov

	Izhodiščna mreža KE	100% povečane dimenzije KE	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	24,926	0,05%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,289	0,00%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,243	0,00%
$\theta_{Si}$ [°C]	12,473	12,467	0,05%
$f_{RSi}$	0,812	0,812	0,00%

Razlike v toplotnem toku so ponovno veliko manjše od 1%, kar pomeni, da je rešitev zanesljiva, napaka pa zanemarljivo majhna. Tudi v tem primeru lahko mrežo končnih elementov še močno zredčimo. Podobno kot v prejšnjem primeru sem izklopil vse predpisane velikosti končnih elementov po posameznih delih detajla in namesto tega nastavlil globalno minimalno dimenzijo končnih elementov na 0,00002 m (debelina alufolije), maksimalno dimenzijo pa na 1 m in zagnal avtomatično kreiranje mreže. Dodatno sem nastavlil le še dimenzijo končnih elementov 0,0015 m na tanki zračni plasti med rigidur ploščo in sekundarno mavčno ploščo. Tako dobljena mreža je sestavljena iz 53.553 večinoma štirikotnih osem-voziščnih končnih elementov s 159.648 vozišči, kar predstavlja 4,4% števila končnih elementov, uporabljenih v osnovni mreži. Vsi tanjši elementi (alufolije, jeklena pločevina distančnikov, L in Z profil ipd.) imajo po en končni element po debelini. Ta mreža da praktično enake rezultate kot osnovna mreža.



Slika 71: Mreža s 4,4% končnih elementov osnovne mreže

Preglednica 20: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov

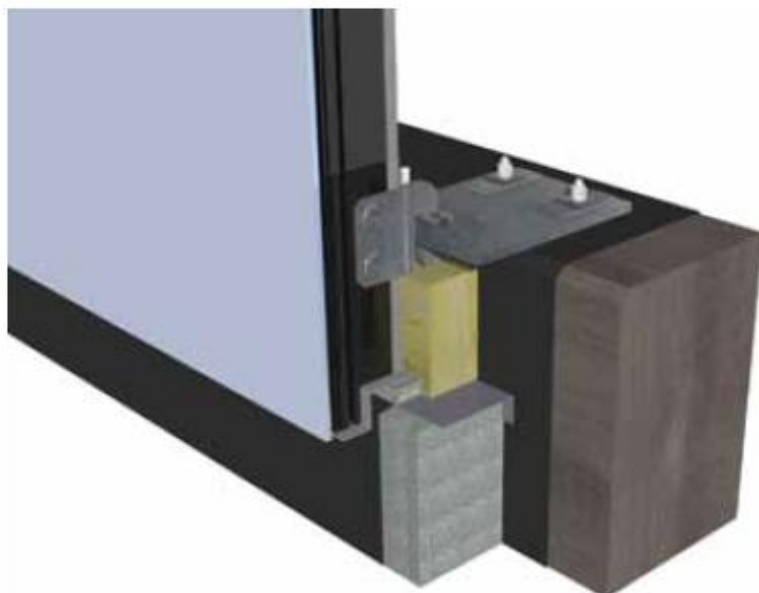
	Izhodiščna mreža (100% KE)	Razredčena mreža (4,4% KE)	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	24,916	0,01%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,289	0,35%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,243	0,41%
$\theta_{Si}$ [°C]	12,473	12,477	0,03%
$f_{RSi}$	0,812	0,812	0,00%

## 7 DETAJL STIKA PANELA QBISS AIR – TEMELJNA GREDA

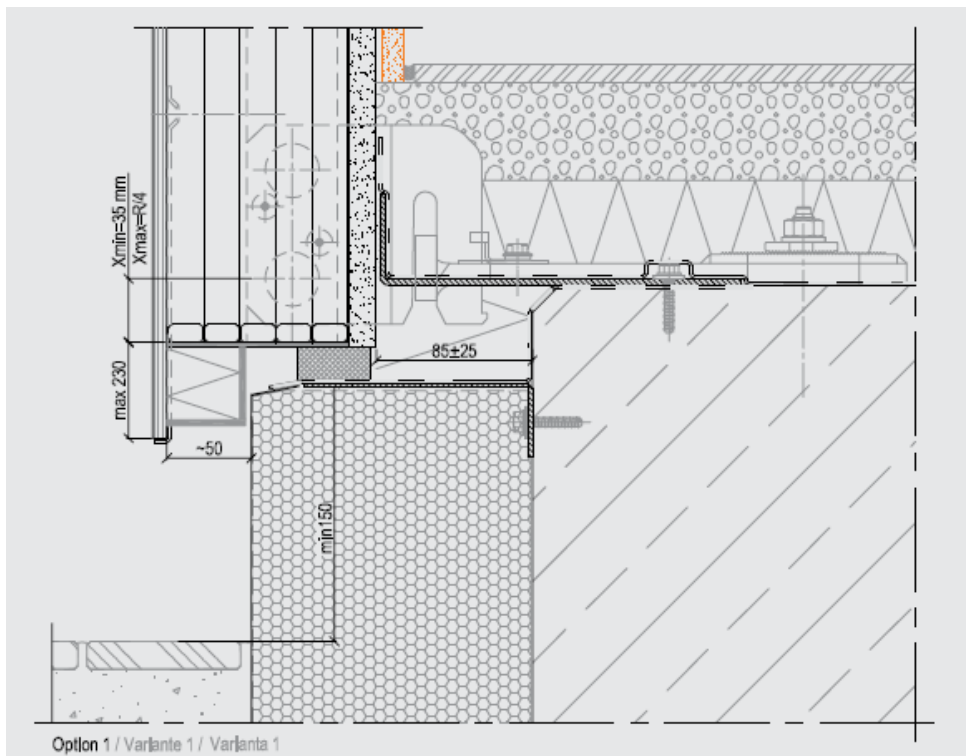
### 7.1 Vhodni podatki

#### 7.1.1 Opis detajla

Gre za detajl rešitve naleganja spodnje vrste Qbiss Air fasadnega panela na temeljno gredo objekta. Pritrdilo, ki drži fasadni panel, je pritrjeno na temeljno betonsko ploščo. Plošča nalega na temeljno gredo in je zaščiten s hidroizolacijo, nad katero je sloj toplotne in zvočne izolacije z estrihom in finalno oblogo (keramiko). Obvezna je tudi vgradnja parne zapore. Rob temeljne plošče in temeljna greda sta ob strani zaščiteni s petnajst centimetrov debelo plastjo ekstrudiranega polistirena, ki obenem ščiti tudi vertikalno hidroizolacijo v obliki bitumenskega traku. Na betonsko ploščo sta fiksirana dva jeklena L-profila. Eden od njiju služi dodatnemu fiksiranju fasadnega panela, drugi pa podpira izolacijski tesnilni trak.



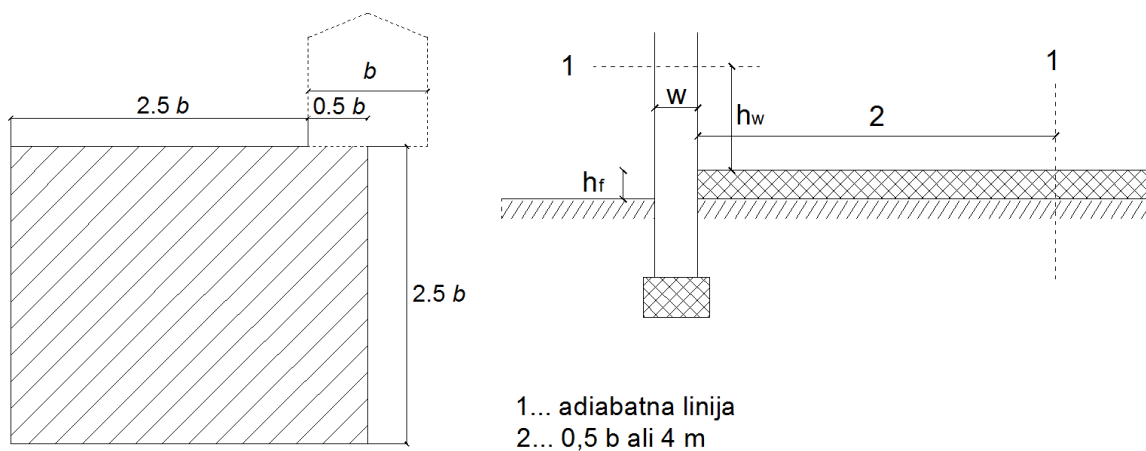
Slika 72: 3D prikaz stika Qbiss Air panela in temeljne grede (Tehnični list Qbiss Air, 2011)



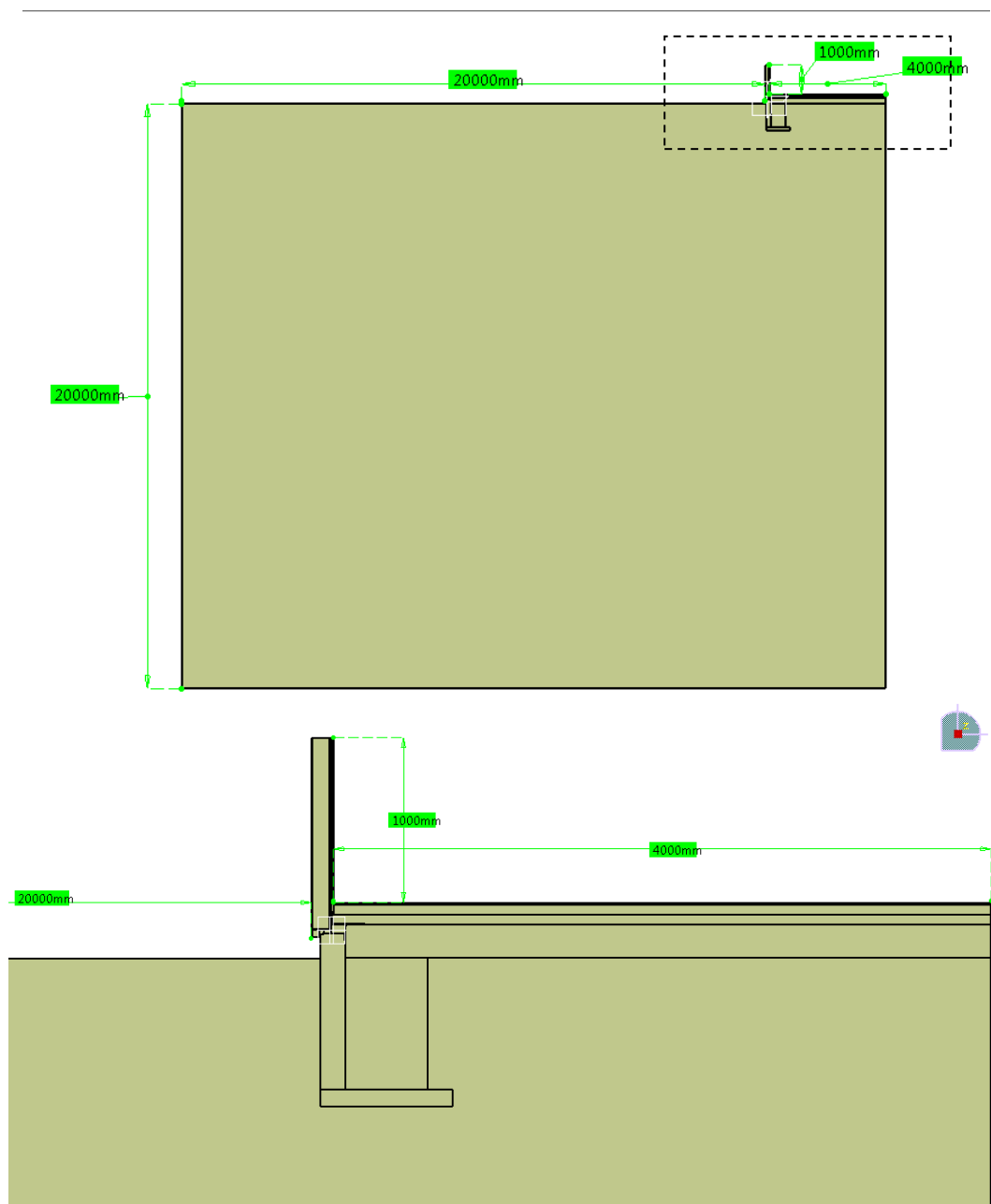
Slika 73: 2D shematski prikaz stika Qbiss Air panela s temeljno gredo (Tehnični list Qbiss Air, 2011)

### 7.1.2 Opis geometrijskega modela

Po standardih SIST EN ISO 10211 in SIST EN ISO 13370 je potrebno modelirati steno detajla najmanj v višino  $d_{min} = 1000$  mm od kote talne površine. Ostale dimenzije detajla se določijo na podlagi razpona talne plošče ( $b$ ). Dimenzija modela od notranje strani stene v notranjost prostora mora meriti vsaj  $b/2$  ali 4 m. Izberem kriterij 4 m, torej znaša  $b = 2 \cdot 4 \text{ m} = 8 \text{ m}$ . Ker gre pri tem detajlu tudi za prenos toplote v tla je nujno potrebno modelirati še precejšen del zemljine. Dimenzija modela od zunanje strani stene pa do zunanje vertikalne mejne ravnine mora znašati  $2,5 \cdot b$ , prav toliko pa mora model segati tudi od zgornje kote terena v globino.



Slika 74: Potrebni razponi računskega modela za izračun prehoda toplote skozi konstrukcijski element, ki je v stiku z zemljino (SIST EN ISO 10211)



Slika 75: Zunanje dimenzije 2D računskega modela iz programa Catia V5

Sklop tal od zgoraj navzdol sestavljajo naslednji sloji:

- Keramika, d = 10 mm
- Lepilo za keramiko, d = 1 mm
- Cementni estrih, d = 60 mm
- Mineralna volna, d = 60 mm
- Parna zapora, d = 1,5 mm
- Betonska plošča, d = 200 mm

Betonsko ploščo podpira temeljna greda dimenzij 500x800 mm, pod njo pa je podložni beton debeline 100 mm. Zunanji del temeljne grede in del robu temeljne plošče pokriva 150 mm debel sloj ekstrudiranega polistirena.

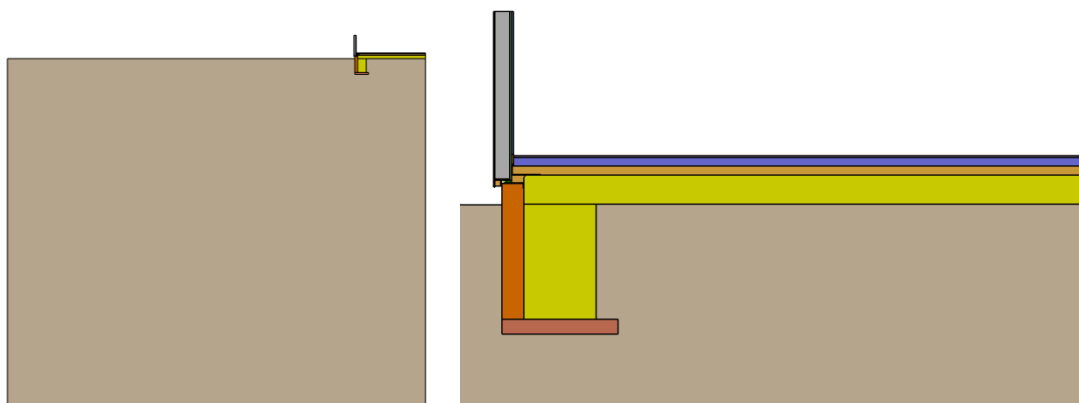


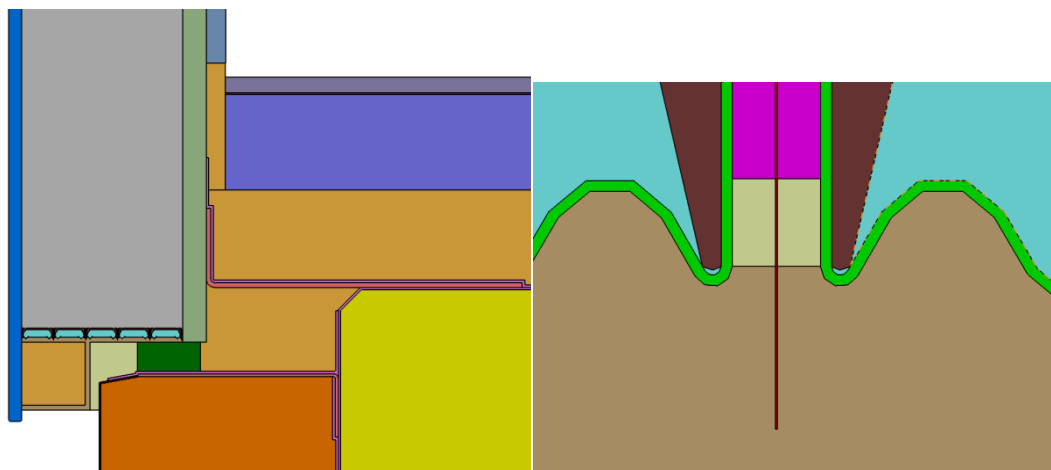
### 7.1.3 Toplotne prevodnosti materialov





















Po standardih SIST EN ISO 10211 in SIST EN ISO 13370 se za toplotno prevodnost zemljine vzame vrednost  $\lambda_g = 2 \text{ W/mK}$ . Gramoznega nasutja se ne modelira posebej, upošteva se, da ima enako toplotno prevodnost kot zemljina, njegove toplotne upornosti se ne sme upoštevati.

Preglednica 21: Uporabljeni materiali z izotropno toplotno prevodnostjo

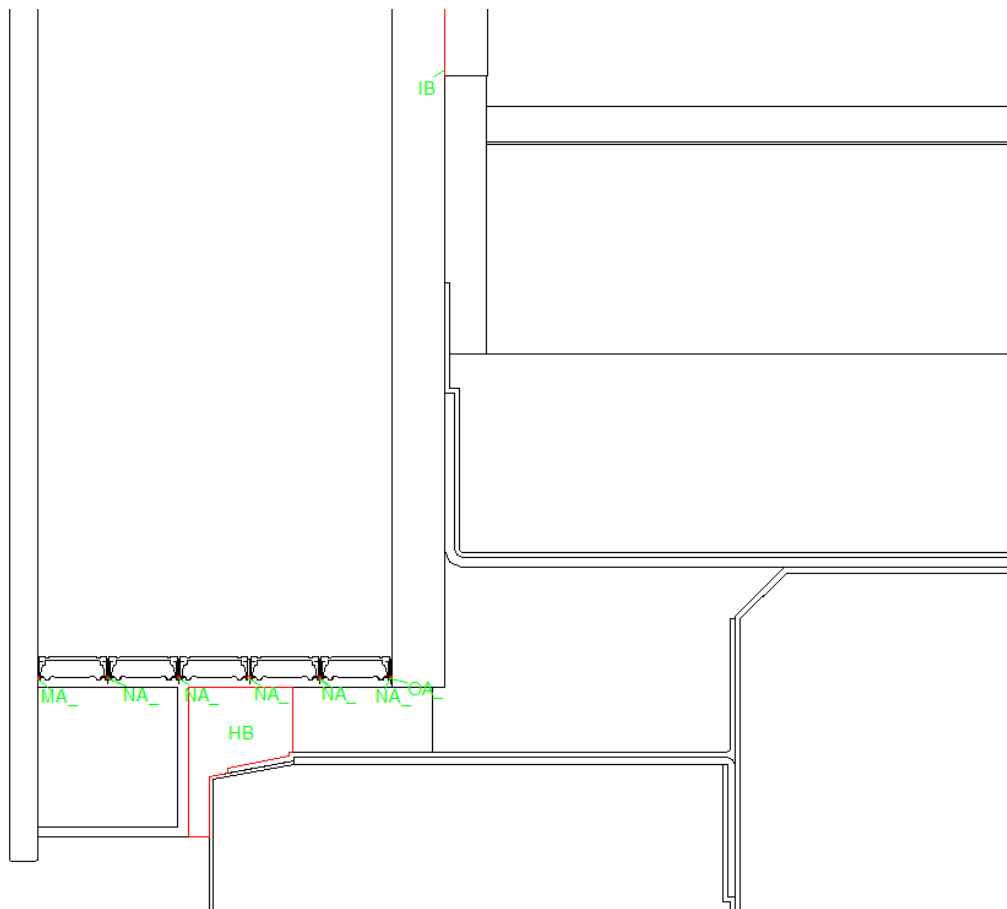
Material	Toplotna ali nadomestna prevodnost W/mK
Jeklo Cold rolled Grade 304 (distančnik, obešalo, sornik), Cardinal steel	14,2
PS polimer distančnika Ultra QA	0,16
Polisulfid TKK specialni (lepilo 3)	0,22
Akrilno lepilo 2	0,20
Armiran beton, 2% armature	2,5
Cementni estrih	1,4
Ekstrudiran polistiren	0,035
Mineralna volna (npr. URSA TEP)	0,033
Lepilo za keramiko	1,4
Keramika	1,3
Aluminij	160
Gips Navaden (mavčna plošča)	0,21
Gips Rigidur H	0,202
Steklo	1,00
Parna zapora – bitumenski trak	0,23
Jeklo	50
Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub>	0,023
Podložni beton ( $\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$ )	1,65
Predkomprimiran tesnilni trak	0,035
Zračni sloj IB	0,04545
Jedro Qbiss Air panela ( $\perp$ )	0,01808
Zemljina	2
Cementni omet	1,4





- |   |                             |   |                    |   |   |
|---|-----------------------------|---|--------------------|---|---|
|    | Jeklo Cold rolled Grade 304 |    | Lepilo za keramiko |    | Votlina v distančniku – CO <sub>2</sub> |
|    | PS polimer distančnika      |    | Keramika           |    | Podložni beton                          |
|    | Polisulfid TKK specialni    |    | Aluminij           |    | Predkomprimiran tesnilni trak           |
|   | Akrilno lepilo 2            |   | Mavčna plošča      |   | Zrak                                    |
|  | Armiran beton, 2% armature  |  | Rigidur H          |  | Jedro Qbiss Air                         |
|  | Cementni estrih             |  | Steklo             |  | Zemljina                                |
|  | Ekstrudiran polistiren      |  | Parna zapora       |  | Cementni omet                           |
|  | Mineralna volna             |  | Jeklo              |   |   |

*Slika 76: Prikaz materialov v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo*



Slika 77: Prikaz zračnih reg detajla stika Qbiss Air panela s temeljno gredo

Preglednica 22: Nadomestne toplotne prevodnosti zračnih reg v smeri X v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo

Naziv	$d'$ [mm]	$b'$ [mm]	$A'$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$h_o$ [W/m <sup>2</sup> K]	$E$	$F$	$h_r$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_s$ [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,x}$ [W/mK]
HB	29,9000	43,0000	782,2217	23,3220	33,5400	1,570	0,818	0,761	3,202	0,210	0,223
MA_	0,7787	0,3313	0,2580	0,7787	0,3313	32,104	0,818	0,602	2,532	0,029	0,027
NA_	0,3814	0,7787	0,2970	0,3814	0,7787	65,548	0,818	0,812	3,415	0,015	0,026
OA_	0,3636	0,7787	0,2832	0,3636	0,7788	68,749	0,818	0,818	3,442	0,014	0,026

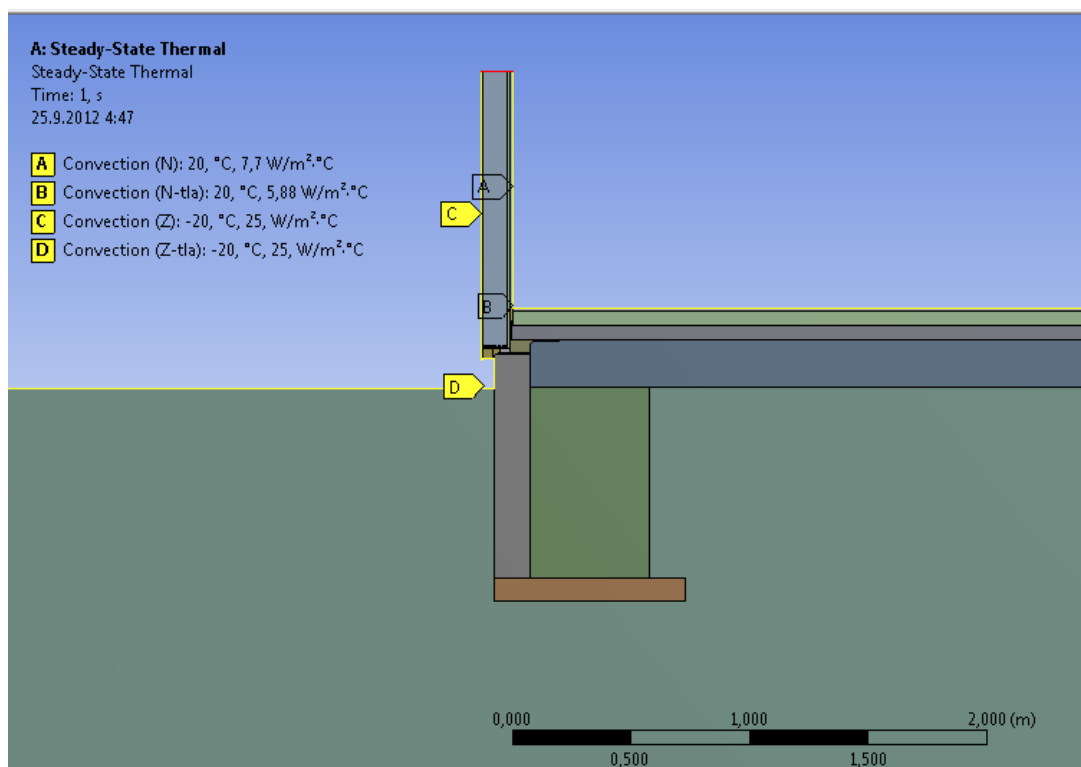
Preglednica 23: Nadomestne toplotne prevodnosti zračnih reg v smeri Y v detajlu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo

Naziv	$d'$ [mm]	$b'$ [mm]	$A'$ [mm <sup>2</sup> ]	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$h_o$ [W/m <sup>2</sup> K]	$E$	$F$	$h_r$ [W/m <sup>2</sup> K]	$R_s$ [m <sup>2</sup> K/W]	$\lambda_{eq,y}$ [W/mK]
HB	43,0000	29,9000	782,2217	33,5400	23,3220	1,570	0,818	0,657	2,762	0,231	0,291
MA_	0,3313	0,7787	0,2580	0,3313	0,7787	75,458	0,818	0,831	3,494	0,013	0,026
NA_	0,7787	0,3814	0,2970	0,7787	0,3814	32,105	0,818	0,616	2,590	0,029	0,027
OA_	0,7787	0,3636	0,2832	0,7788	0,3636	32,101	0,818	0,611	2,570	0,029	0,027

HB je delno prezračevana zračna rega.

### 7.1.4 Robni pogoji

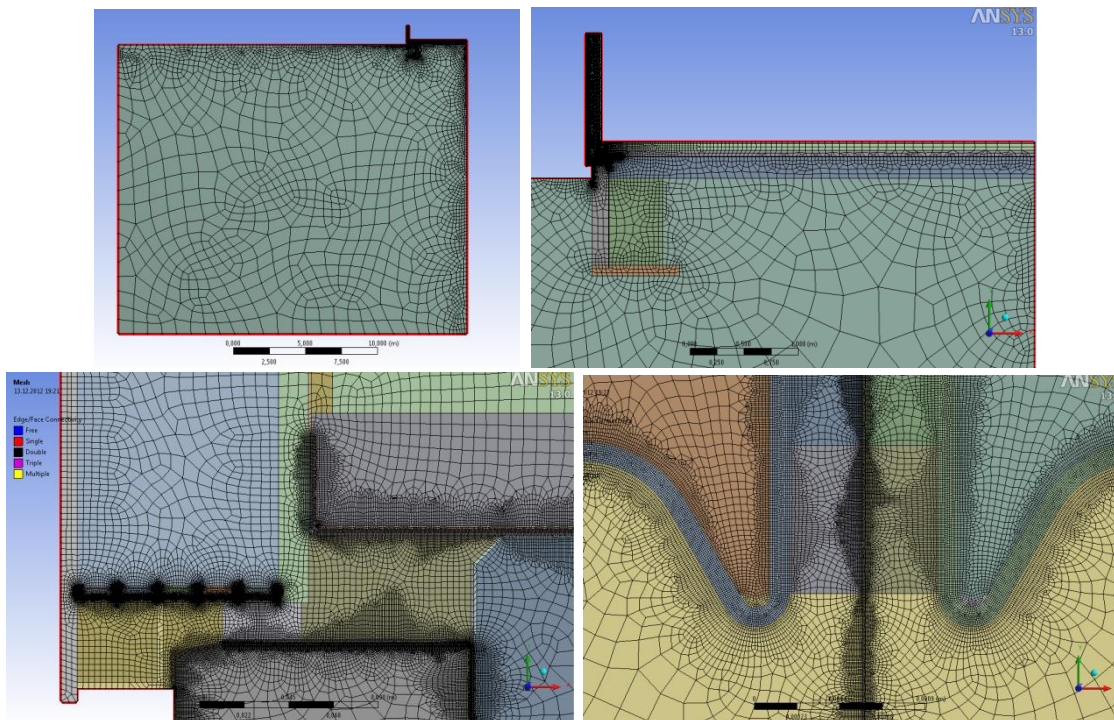
Na modelu sem predpisal tri konvekcijske robne pogoje. Na notranji strani stene je predpisana konstantna temperatura  $20^{\circ}\text{C}$  in koeficient toplotne prestopnosti za horizontalni toplotni tok  $7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Na notranji strani talne površine je predpisana konstantna temperatura  $20^{\circ}\text{C}$  in koeficient toplotne prestopnosti  $5,88 \text{ W/m}^2\text{K}$  za vertikalni toplotni tok v smeri navzdol. Na zunanji strani imamo tako na steni kot na površju zemljine konstantno temperaturo  $-20^{\circ}\text{C}$  in koeficient toplotne prestopnosti  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Prerezna ravnina, obarvana rdeče, je adiabatna linija. Vsi ostali mejni robovi detajla so adiabatne linije.



Slika 78: Predpisani robni pogoji na modelu stika Qbiss Air panela s temeljno gredo

### 7.1.5 Mreža končnih elementov

Uporabil sem mreženje s prevladujočim številom štirikotnih osem-vozliščnih končnih elementov PLANE 77. Posameznim elementom detajla sem enako kot v prejšnjih dveh primerih na podlagi njihove geometrije in toplotnih prevodnosti ročno nastavljal velikosti končnih elementov. Tu sem se zaradi velikih razsežnosti modela izven območja detajla bolj posluževal funkcije »Bias« in razdeljevanja geometrijskih robov. Robove in meje med sloji materialov vzporedno s temeljno ploščo sem razdelil na 120 razdelkov in jih linearno razredčil z »Bias« faktorjem 30, zunanji rob zunanjega ometa, ki štiti ekstrudiran polistiren sem razdelil na 80 razdelkov, kjer je najnižje ležeči razdelek 25-krat večji od najvišje ležečega. Rob na vrhnji koti zemljine v stiku z zunanjim zrakom in desni vertikalni rob zemljine sem razdelil na 150 razdelkov z »Bias« faktorjem 20 ter 10, dodatno pa sem z ukazom »Edge sizing« razdelil še robove temeljne grede, podložnega betona in spodnjega robu temeljne plošče v stiku z zemljino.



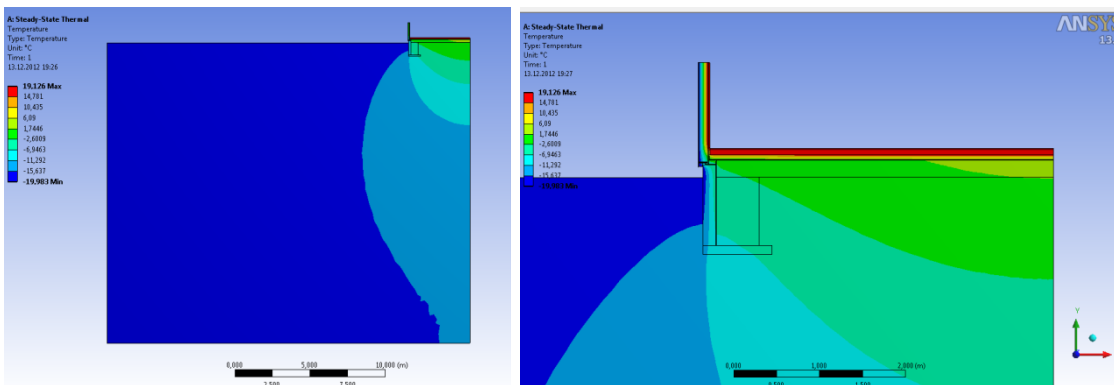
Slika 79: Osnovna mreža končnih elementov za detajl stika s temeljno gredo

Tako dobljeno mrežo sestavlja 645.874 večinoma štirikotnih osem-voziščnih končnih elementov, skupno pa je 1.933.273 vozišč.

## 7.2 Rezultati

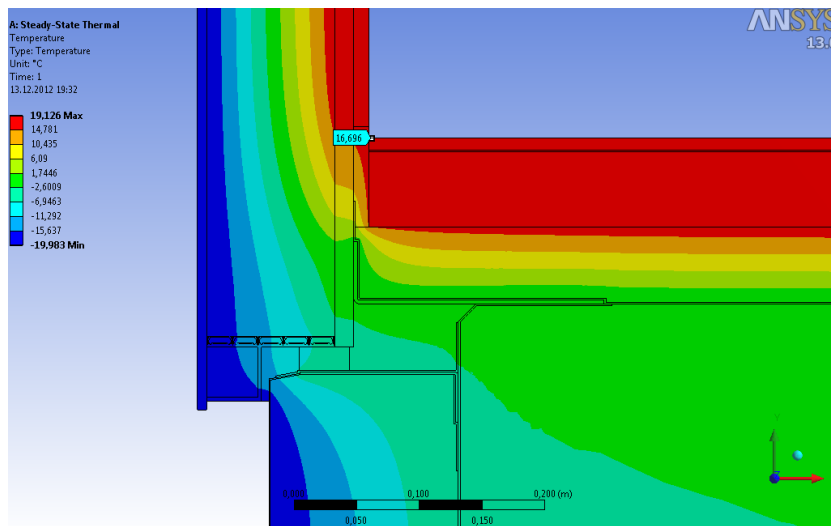
### 7.2.1 Potek temperatur

Slika 80 prikazuje razpored temperatur po modelu. Čepprav ima v naravi zemeljska skorja svojo toplotno akumulativnost, zaradi česar je na določeni globini konstantna temperatura, večja od 0°C, standarda SIST EN ISO 10211 in SIST EN ISO 13370 tega ne upoštevata.



Slika 80: Razpored temperatur po modelu

V našem primeru imamo torej le en toplotni tok, ki poteka od notranjega (toplega) prostora proti zunanosti – deloma skozi steno, deloma skozi tla v zemljino. V primeru, da bi imeli namesto horizontalne adiabatne ravnine na globini 25 m pod koto terena še dodaten robni pogoj v obliki konstantne temperature ali toplotnega toka, bi imeli v modelu mešanje večjega števila toplotnih tokov.



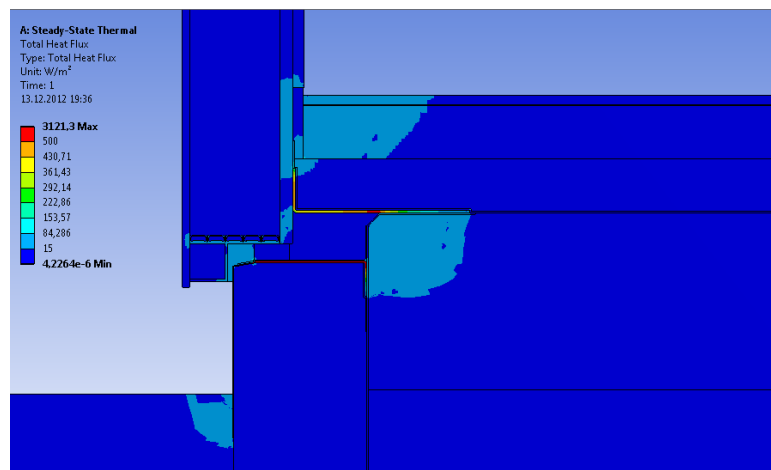
Slika 81: Najnižja temperatura na notranji površini konstrukcije

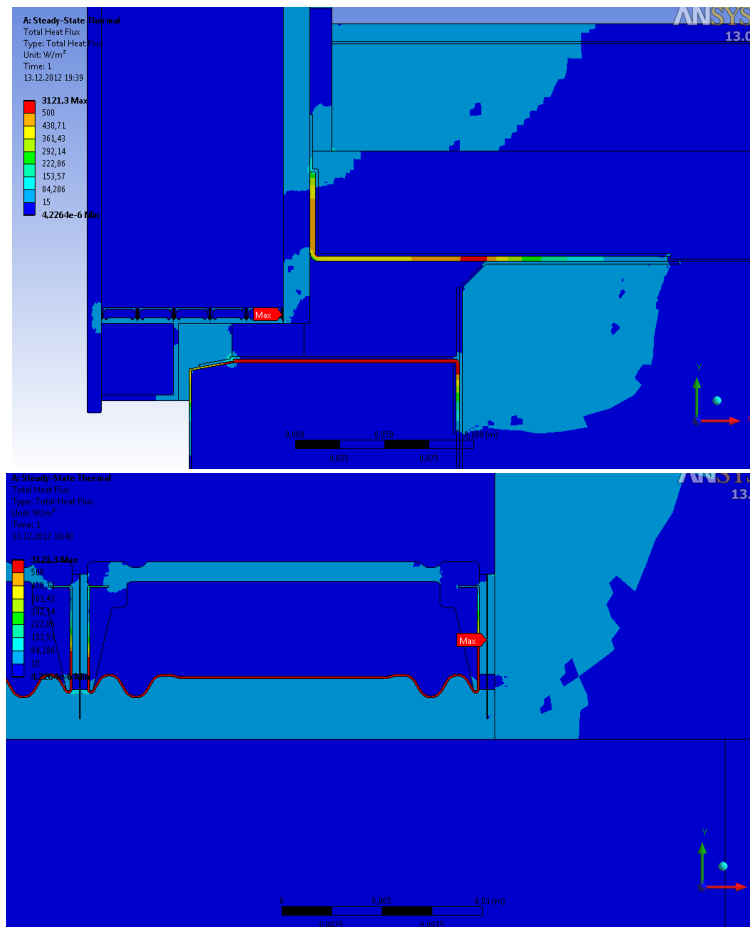
Točka z najnižjo temperaturo ( $\theta_{Si} = 16,696^{\circ}\text{C}$ ) na notranji površini konstrukcije se nahaja v vogalu stika stene s talno površino.

## 7.2.2 Toplotni tok

### 7.2.2.1 Celotni specifični toplotni tok

Največji toplotni tok ponovno poteka preko jeklenega distančnika. Največjo vrednost doseže v krajni alufoliji na meji z rigidur ploščo. Del toplote se preko zgornjega jeklenega L profila prenese tudi na betonsko ploščo, od tam pa se nekaj toplote prenese v zemljino, del pa se vrne po spodnjem L profilu pod tesnilnim trakom v zunanje okolje.

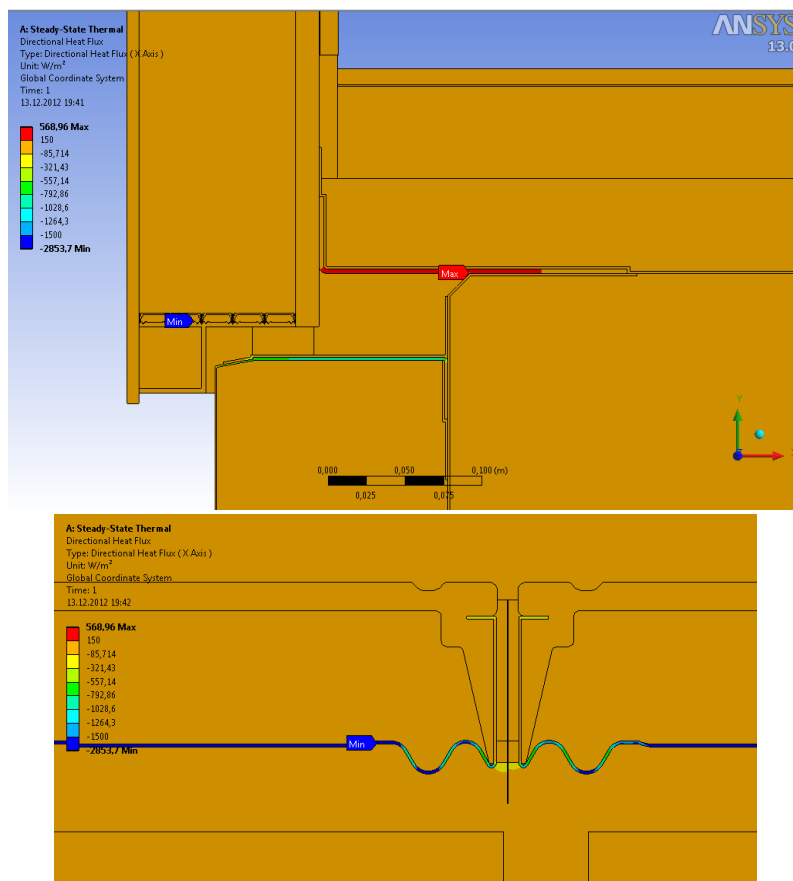




Slika 82: Potek celotnega dvodimenzionalnega specifičnega toplotnega toka v detajlu stika s temeljno gredo

### 7.2.2.2 Specifični toplotni tok v smeri $X$

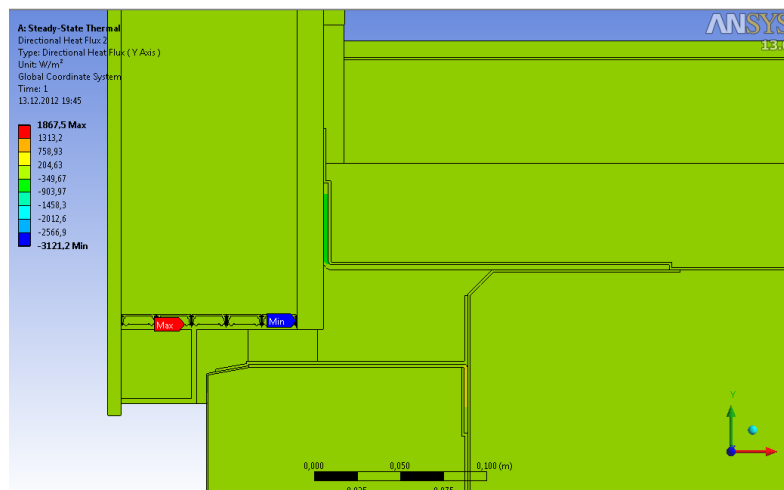
Maksimalno vrednost vektorja  $q_x$  dobimo v pločevini distančnika. Opazno velik je tudi specifični toplotni tok preko jeklenih L profilov. Rdeča barva jasno kaže, da se toplota najprej prevaja z rigidur plošče preko zgornjega L profila na betonsko ploščo (pozitiven spec. toplotni tok je v smeri pozitivne  $X$  osi), nato pa nekaj toplotnega toka preide nazaj iz betonske plošče preko spodnjega L profila proti zunanemu okolju (negativen spec. toplotni tok – v smeri negativne  $X$  osi).



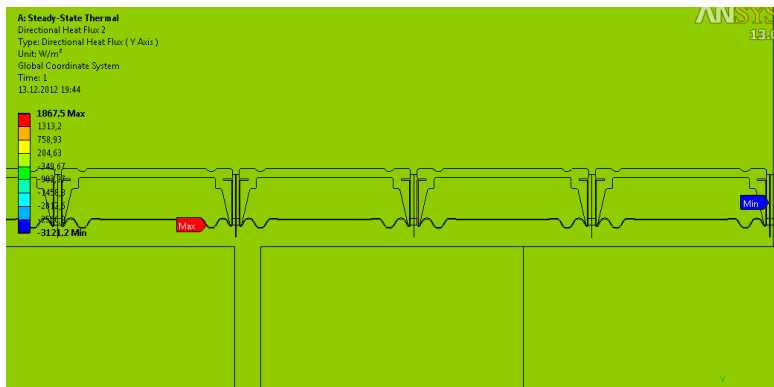
Slika 83: Potek spec. toplotnega toka v smeri X (zgoraj) in bližji pogled na območje maksimalnega (v absolutnem smislu) spec. toplotnega toka v smeri X osi (spodaj)

### 7.2.2.3 Specifični toplotni tok v smeri Y

Potrditev prejšnje interpretacije poteka toplotnih tokov dobimo tudi z analizo spec. toplotnega toka v Y smeri. Zelena barva na zgornjem L profilu sporoča, da je vektor toplotnega toka usmerjen v smeri globalne osi  $-Y$ , medtem ko del povratnega toplotnega toka prehaja nazaj iz betonske plošče navzgor preko spodnjega L profila proti zunanemu okolju (oranžno – rdeča barva).







Slika 84: Potek toplotnega toka v smeri Y osi (zgoraj) in bližji pogled na območje maksimalnega in minimalnega spec. toplotnega toka v smeri Y osi (spodaj)

#### 7.2.2.4 Korekcijski faktor linijskega toplotnega mostu

Toplotni tok, ki je vstopil skozi notranjo površino stene modela:  $Q_w = 7,1739 \text{ W/m}$

Toplotni tok ki je vstopil skozi notranjo površino tal modela:  $Q_g = 38,887 \text{ W/m}$

Notranja dimenzija stene modela:  $L_{w,i} = h_w = 1 \text{ m}$

Notranja dimenzija talne površine modela:  $L_{g,i} = 0,5 \cdot b = 4 \text{ m}$

Zunanja dimenzija stene modela:  $L_{w,e} = 1,3325 \text{ m}$

Zunanja dimenzija talne površine modela:  $L_{g,e} = 0,5 \cdot (b + w) = 0,5 \cdot (8 + 0,1371) = 4,069 \text{ m}$

Razlika med temperaturo notranjega in zunanjega zraka:  $\theta_i - \theta_e = 20^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C}) = 40 \text{ K}$

Toplotna prehodnost stene:  $U_w = 0,167 \text{ W/m}^2\text{K}$

Toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa tal oz. njegova toplotna upornost se po standardu SIST EN ISO 13370 izračuna na podlagi »nadomestne debeline« ( $d_t$ ) in karakteristične dimenzije plošče ( $B'$ ). V primeru neskončno dolge plošče (npr. pri 2D analizi) je  $B'$  širina plošče (torej  $B' = b$ , ki sem ga upošteval pri določitvi dimenzij modela). Nadomestna debelina je debelina zemljine, ki ima enako toplotno upornost:

$$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_f + R_{se}) \text{ [m]} \quad (154)$$

kjer je  $w$  [m] polna debelina stene, vključno z vsemi sloji,  $R_f$  je toplotna upornost temeljne plošče, vključno z morebitno izolacijo in dodatnimi pohodnimi sloji. Toplotni upor betonske plošče in tanjših slojev konstrukcijskega sklopa tal se lahko zanemari. V računskih primerih standarda SIST EN ISO 13370 je v faktorju  $R_f$  upoštevan le sloj toplotne izolacije. V kolikor je bila plošča neizolirana, se je upoštevala vrednost  $R_f = 0$ .  $\lambda$  je toplotna prevodnost zemljine ( $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ ). Zanimivo je, da je potrebno upoštevati tudi člen  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ , čeprav je sklop tal v neposrednem stiku z zemljino.

Toplotno prehodnost tal v stiku z zemljino se izračuna s sledečima enačbama:

$$U_g = \frac{2\lambda}{\pi B' + d_t} \ln\left(\frac{\pi B'}{d_t} + 1\right) \quad (155)$$

... če je  $d_t < B'$  (neizolirana ali slabo izolirana tla)

$$U_g = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} \quad \dots \text{ če je } d_t \geq B' \text{ (dobro izolirana tla)} \quad (156)$$

Če je temeljna plošča dodatno toplotno izolirana tudi ob robu, kot v primeru tega detajla, se po dodatku B standarda SIST ISO 13370 izračuna korekcijski faktor linijskih toplotnih izgub ob robu plošče  $\Delta\psi$ :

$$U' = U_g + 2 \cdot \frac{\Delta\psi}{B'} \left[ \frac{W}{m^2K} \right] \quad (157)$$

Če je robna toplotna izolacija že upoštevana v numeričnem modelu (tako kot v mojem primeru), se tega korekcijskega faktorja ne sme upoštevati pri izračunu toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa tal.

Izračun toplotne prehodnosti tal – za  $R_f$  lahko po SIST EN ISO 13370 upoštevam le sloj morebitne toplotne izolacije:

$w = 0,1371$  m (Qbiss Air panel + 12 mm debela sekundarna mavčna plošča)

$R_{si} = 0,17$  W/m<sup>2</sup>K

$R_{se} = 0,04$  W/m<sup>2</sup>K

Debelina mineralne volne na temeljni plošči: 0,06 m

Toplotna prevodnost mineralne volne: 0,033 W/mK

Toplotna upornost min. volne:  $R_f = d/\lambda = 1,818$  m<sup>2</sup>K/W

$$d_t = 0,1371 + 2 (0,17 + 1,818 + 0,04) = 4,193 \text{ m} < B' = 8 \text{ m} \quad (158)$$

$$U_g = \frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 8 + 4,193} \ln \left( \frac{\pi \cdot 8}{4,193} + 1 \right) = 0,265 \frac{W}{m^2K} \quad (159)$$

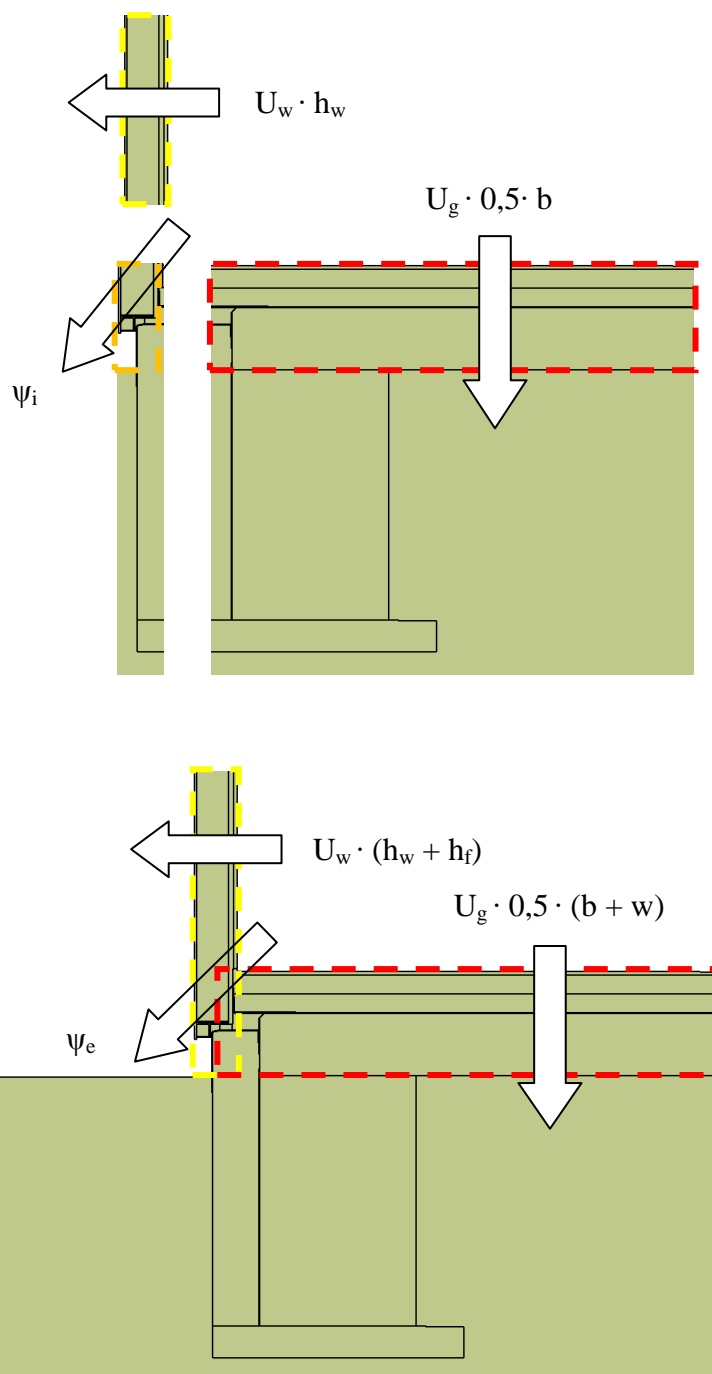
Specifični toplotni tok ( $L^{2D}$ ), ki prehaja skozi vogalni detajl na linijskem toplotnem mostu, oz. koeficient toplotne sklopitve za sistem zunanjih in notranjih sistem mer znaša:

$$L^{2D} = \frac{Q_w + Q_g}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{46,061 \text{ W}}{40 \text{ K m}} = 1,152 \text{ W/mK} \quad (160)$$

Za detajl stika stene in tal na terenu se korekcijski koeficient linijskega toplotnega mostu ( $\psi$  [W/mK]) po sistemu notranjih in zunanjih mer po standardu SIST EN ISO 10211 izračuna s sledečima formulama (glej sliki 74 in 85):

$$\begin{aligned} \psi_i &= L^{2D} - U_w \cdot h_w - U_g \cdot 0,5 \cdot b = \\ &= 1,152 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 1 \text{ m} - 0,265 \frac{W}{m^2K} \cdot 4 \text{ m} = \\ &= -0,075 \frac{W}{mK} \end{aligned} \quad (161)$$

$$\begin{aligned} \psi_e &= L^{2D} - U_w \cdot (h_w + h_f) - U_g \cdot 0,5 \cdot (b + w) = \\ &= 1,152 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,3325 \text{ m} - 0,265 \frac{W}{m^2K} \cdot 4,069 \text{ m} = \\ &= -0,149 \frac{W}{mK} \end{aligned} \quad (162)$$



Slika 85: Prehod toplote preko sklopa stene, tal in stika po sistemu notranjih mer (zgoraj) in sistemu zunanjih mer (spodaj)

Pri izračunu korekcijskega koeficienta linijskega toplotnega mostu po sistemu zunanjih mer se v izračunu del vogala detajla upošteva dvakrat (območje, kjer se prekrivata rumeni in rdeči črtkani pravokotnik). Izračun upošteva več materiala kot ga je v resnici. Ko to odštejemo od  $L^{2D}$  se lahko zgodi, da bo vrednost  $\psi_e$  zaradi tega negativna.

### 7.2.2.5 Temperaturni faktor toplotnega mostu ( $f_{RSi}$ [-])

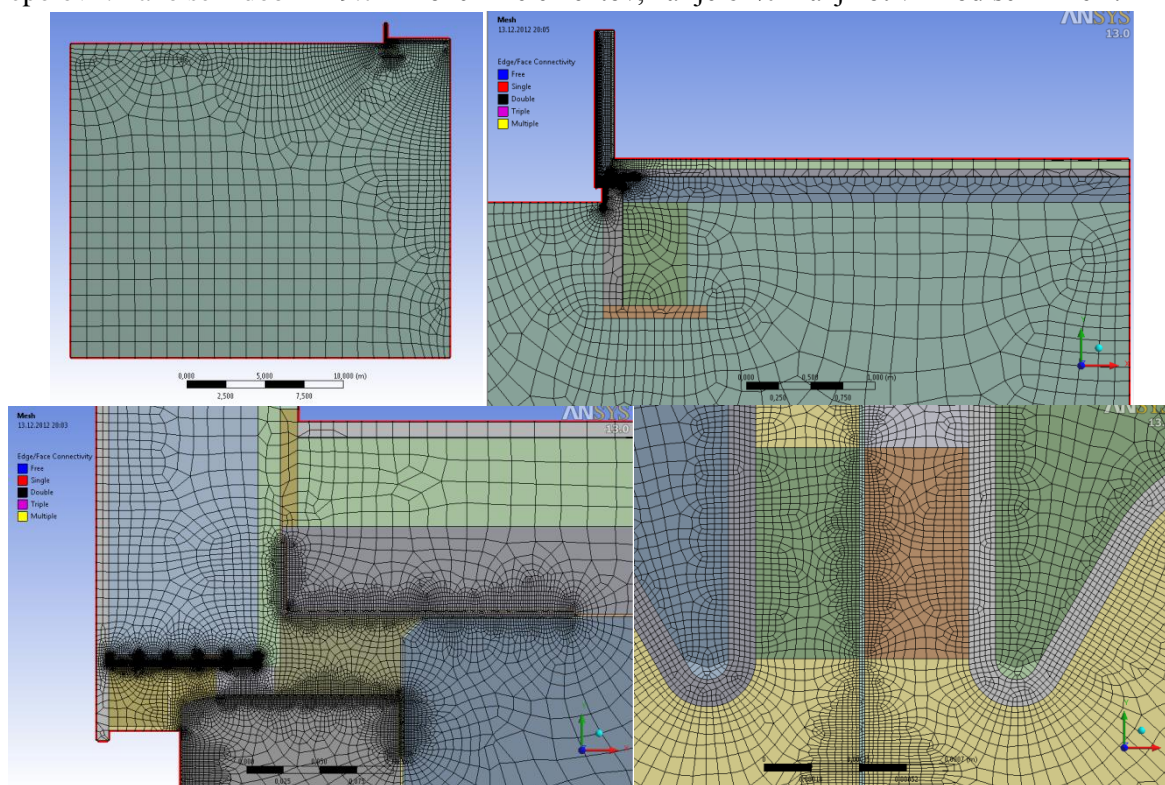
$$f_{RSi} = \frac{16,696 - (-20)}{20 - (-20)} = 0,917 \quad (163)$$

$$f_{RSi} > f_{RSi,min} = 0,777 \quad (164)$$

Ni nevarnosti kondenzacije vodne pare ali pojava zdravju škodljivih mikroorganizmov na notranji površini konstrukcije.

### 7.3 Ovrednotenje zanesljivosti rešitve in ocena velikosti napake

Kreiral sem še eno mrežo, kjer sem v poglavju 7.1.5 opisanem elementom predpisal končne elemente s 100% povečanimi dimenzijami stranic, na robovih s predpisanimi razdelki pa sem število le-teh prepolovil. Tako sem dobil 249.711 končnih elementov, kar je 61% manj kot v izhodiščni mreži.



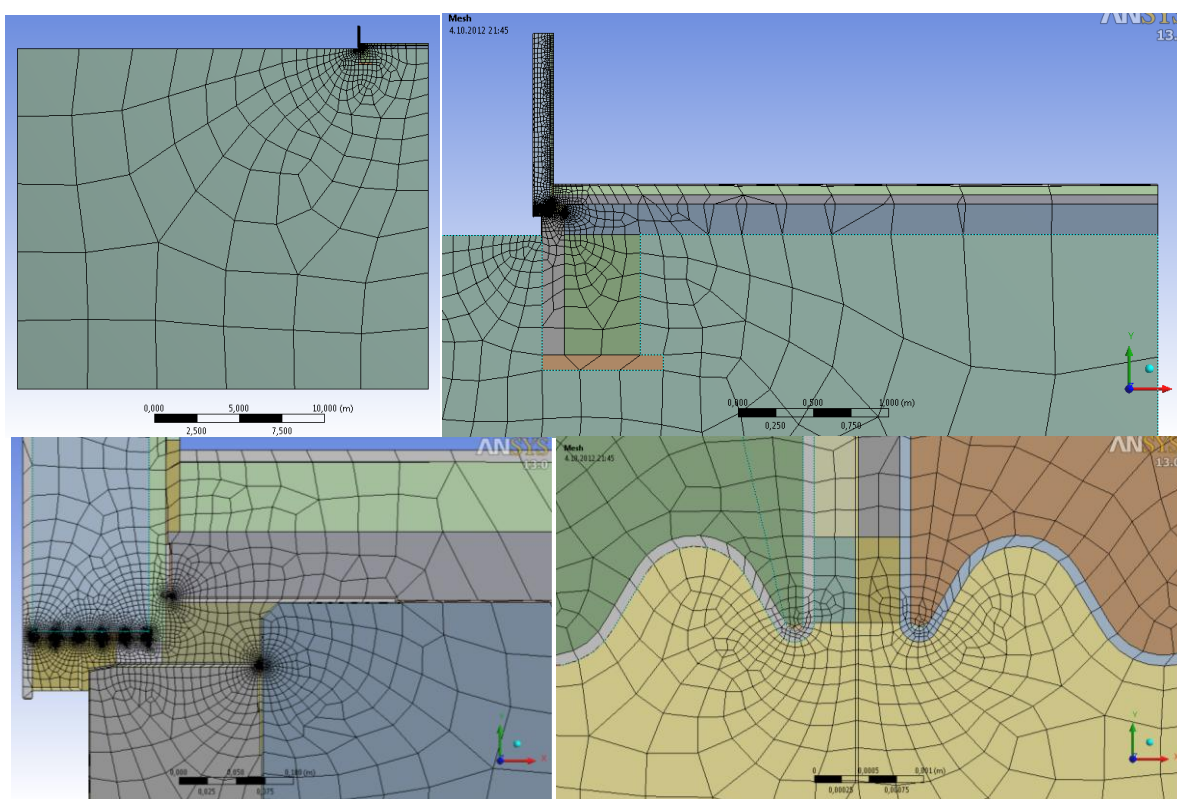
Slika 86: Mreža s 100% povečanimi dimenzijami končnih elementov v vogalu navzven

Preglednica 24: Primerjava rezultatov izhodiščne in razredčene mreže končnih elementov, zaokroženo na tri decimalna mesta

	izhodiščna mreža KE	100% povečane dimenzije KE	razlika [%]
$Q$ [W/m]	46,061	46,064	0,01%
$\psi_i$ [W/mK]	-0,075	-0,075	0,00%
$\psi_e$ [W/mK]	-0,149	-0,149	0,00%
$\theta_{Si}$ [°C]	16,696	16,712	0,10%
$f_{RSi}$	0,917	0,918	0,10%

Razlike v toplotnem toku so veliko manjše od 1%, kar pomeni, da je rešitev zanesljiva, napaka pa zanemarljivo majhna.

S povečevanjem dimenzij končnih elementov sem zmanjšal njihovo število, predvsem na račun velike površine, ki predstavlja zemljino. Po celotni levi strani modela skoraj ni toplotnega toka, zato lahko na tem uporabimo zelo velike končne elemente pa še vseeno to ne bo vplivalo na natančnost rezultatov. Dosegel sem mrežo z 91.133 večinoma štirikotnimi končnimi elementi in 272.362 vozlišči, kar predstavlja 14% števila končnih elementov osnovne mreže. Maksimalno dimenzijo končnih elementov sem nastavil na 4 m, ostalo pa sem prepustil Ansys-ovemu algoritmu.



Slika 87: Mreža z 1,5% številom končnih elementov osnovne mreže v vogalu navzven

Preglednica 25: Primerjava rezultatov izhodiščne in najbolj razredčene mreže končnih elementov

	Izhodiščna mreža (100% KE)	Razredčena mreža (14% KE)	Razlika
$Q$ [W/m]	46,061	46,056	-0,01%
$\psi_i$ [W/mK]	-0,075	-0,076	-1,33%
$\psi_e$ [W/mK]	-0,149	-0,150	-0,67%
$\theta_{Si}$ [°C]	16,696	16,673	-0,67%
$f_{RSi}$	0,917	0,917	-0,00%

## 8 DODATNE VARIANTE MREŽENJA

### 8.1 Primerjava mrež detajla vogala navzven

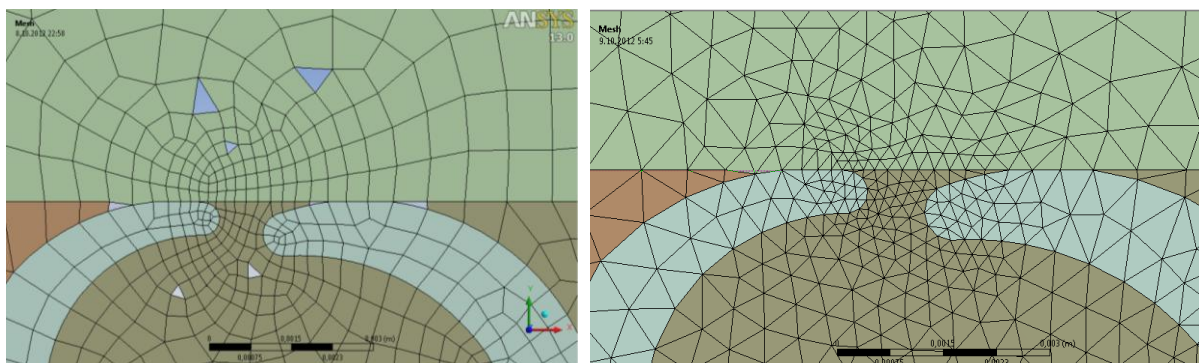
Primerjam sledeče mreže:

Osnovna mreža

- Mreža s prevladujočimi štirioglatimi osem-vozliščnimi KE
- Mreža s trikotnimi šest-vozliščnimi KE
- Mreža s prevladujočimi štirioglatimi štiri-vozliščnimi KE
- Mreža s trikotnimi tri-vozliščnimi KE

V poglavjih 5-7 sem pri vseh detajlih uporabil mrežo, sestavljeno iz večinoma štirikotnih osem-vozliščnih končnih elementov (»quad dominant« - privzeta nastavitev). Trikotne končne elemente je Ansys-ov algoritem mreženja uporabil tam, kjer uporaba štirikotnih elementov ni bila možna, to pa je predvsem v ozkih kotih geometrijskih elementov in med samimi štirikotnimi končni elementi, kjer se geometrija modela in velikost končnih elementov relativno naglo spremeni.

Na podlagi zmanjševanja števila končnih elementov dobljene razredčene mreže imajo manj končnih elementov od osnovne mreže, zato bodo pri spreminjanju parametrov morebitne razlike v rezultatih prej vidne. Ker je poleg tega tudi čas računanja občutno krajši, bom na tej optimalni, najbolj razredčeni mreži vogala navznoter preizkusil še vpliv oblike končnih elementov na rezultate ter vpliv upoštevanja oz. neupoštevanja vmesnih vozlišč končnih elementov.



Slika 88: Primerjava dela detajla z mrežo a) (levo) in mrežo b) (desno); na levi sliki so za boljšo opaznost trikotnih elementov le-ti odstranjeni iz prikaza

Preglednica 26: Primerjava rezultatov posameznih mrež

	Osnovna mreža	a	Razlika osn./a	b	Razlika osn./b	c	Razlika osn./c	d	Razlika osn./d
<b>Končni elementi</b>		4- kotni (97,4%) in 3-kotni (2,6%) Plane 77		trikotni PLANE 77		4- kotni (97,4%) in 3-kotni (2,6%) Plane 55		trikotni PLANE 55	
<b>Število KE</b>	1569491	53823	3,43%	99678	6,35%	53735	3,42%	99718	6,35%
<b>Število vozlišč</b>	4700808	160378	<b>3,41%</b>	199691	4,25%	53198	1,13%	50027	1,06%

se nadaljuje ...

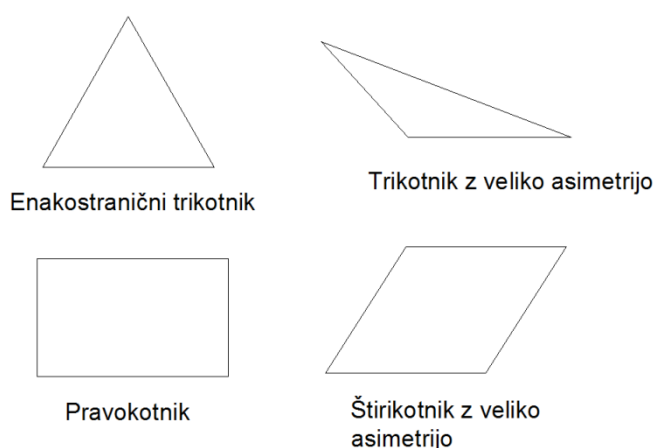
... nadaljevanje Preglednice 26

Število vozlišč/KE	8 oz. 6	8 oz. 6		6		4 oz. 3		3	
$Q$ [W/m]	20,798	20,814	<b>0,08%</b>	20,812	0,07%	20,832	0,16%	20,844	0,22%
$\psi_i$ [W/mK]	0,185	0,185	0,00%	0,185	0,00%	0,186	0,54%	0,186	0,54%
$\psi_e$ [W/mK]	0,139	0,140	0,72%	0,139	0,00%	0,140	0,72%	0,140	0,72%
$\theta_{Si}$ [°C]	16,013	16,016	0,02%	16,013	0,00%	16,020	0,04%	16,019	0,04%
$f_{RSi}$	0,900	0,900	0,00%	0,900	0,00%	0,901	0,11%	0,900	0,00%

Mreža b) ima sicer najmanjšo razliko v rezultatu toplotnega toka, vendar je število diskretizacijskih točk pri tem nekoliko večje kot pri mreži a). Pri mrežah c) in d) ni vmesnih vozlišč, zato poteka interpolacija vmesnih vrednosti po linearnih funkcijah, pri čemer je rezultat nekoliko manj natančen. Kljub temu da je v slednjih dveh mrežah le približno 1% vozlišč osnovne mreže pa je razlika v rezultatu praktično zanemarljiva.

## 8.2 Kvaliteta mreže

Ker sem že določil približno optimalno število in razporeditev končnih elementov bom preučil in primerjal še kvaliteto končnih elementov pri izbrani optimalni mreži – mreži a). Ansys omogoča pregled kvalitete končnih elementov glede na nekaj kriterijev - v grobem vsi kriteriji kot vzor kvalitetne oblike trikotnega elementa obravnavajo enakostranični trikotnik (poleg enako dolgih stranic ima enake tudi vse kote), kot vzor kvalitetnega štirikotnega elementa pa pravokotnik ali kvadrat. Primarni in najpomembnejši kriterij za določitev kvalitete mreže je asimetrija («skewness»). Ta določa kako blizu je končni element idealni obliki (enakostraničen, enakokoten).



Slika 89: Idealna oblika in slaba oblika končnega elementa

Preglednica 27: Korelacija med vrednostjo asimetrije in kvaliteto končnega elementa

Vrednost asimetrije	Kvaliteta končnega elementa
1	Degeneriran
0,9 — <1	Zelo slaba
0,75 — 0,9	Slaba
0,5 — 0,75	Zmerna
0,25 — 0,5	Dobra
>0 — 0,25	Odlična
0	Enakostranična oblika

Degenerirana oblika pomeni, da so vozlišča končnega elementa skoraj kolinearna. Zelo asimetrični končni elementi so nesprejemljivi ker so enačbe, po katerih program računa, osnovane na predpostavkah, da so končni elementi relativno enakostranični/enakokotni. Za merjenje asimetrije obstajata dve metodi:

- glede na enakostranični volumen

$$\text{asimetrija} = \frac{\text{Optimalna velikost KE} - \text{velikost KE}}{\text{Optimalna velikost KE}} \quad (165)$$

Kjer je optimalna velikost KE velikost enakostraničnega KE z istim obsegom.

- na osnovi normaliziranega enakostraničnega kota.

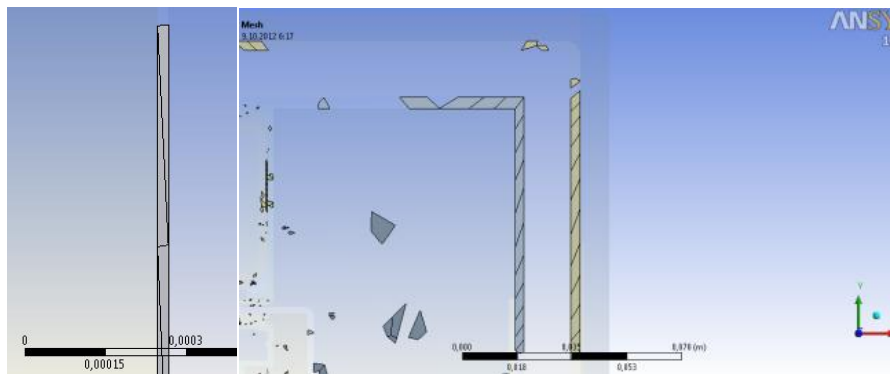
$$\max \left[ \frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \quad (166)$$

Kjer je  $\theta_{\max}$  največji kot v končnem elementu,  $\theta_{\min}$  najmanjši kot v končnem elementu in  $\theta_e$  kot v enakokotnem končnem elementu enakega tipa ( $60^\circ$  za trikotnik,  $90^\circ$  za kvadrat).

Kvalitetne 2D mreže imajo vrednost asimetrije približno 0,1, vsi končni elementi pa bi morali biti v skladu s preglednico 27 najmanj »dobri«. Pomembno je, da se čim bolj možno izboljša mrežo na robu posameznega telesa modela (Ansys Inc., 2011).

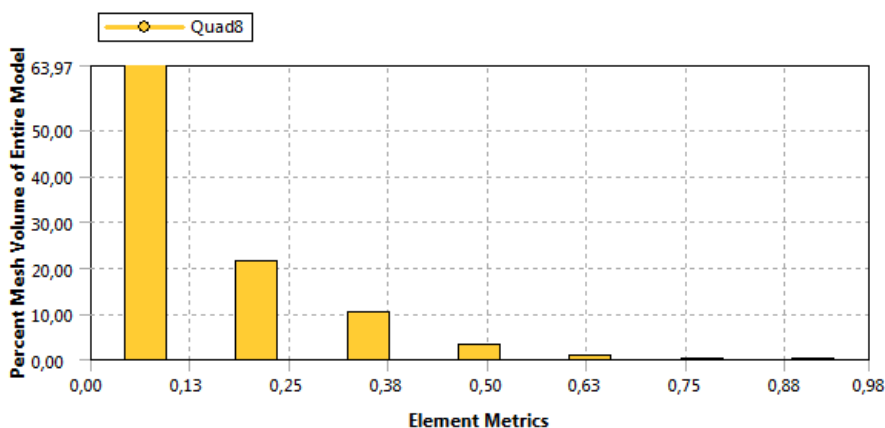
Preveril sem kvaliteto končnih elementov v najustreznejši razredčeni mreži a). 97% štirikotnih osem-vozlíščnih končnih elementov ter 68% trikotnih šest-vozlíščnih elementov ima asimetrijo manjšo od 0,5. Trikotni elementi z asimetrijo večjo od 0,5 predstavljajo 0,75% površine modela. Gre v glavnem za elemente na dolgih in ozkih delih modela, ki sem jih namerno naredil daljše, da bi zmanjšal število končnih elementov. Štiriostrani KE z asimetrijo večjo od 0,5 predstavljajo 10,8 % površine modela. Problematični so ozki in dolgi deli modela.



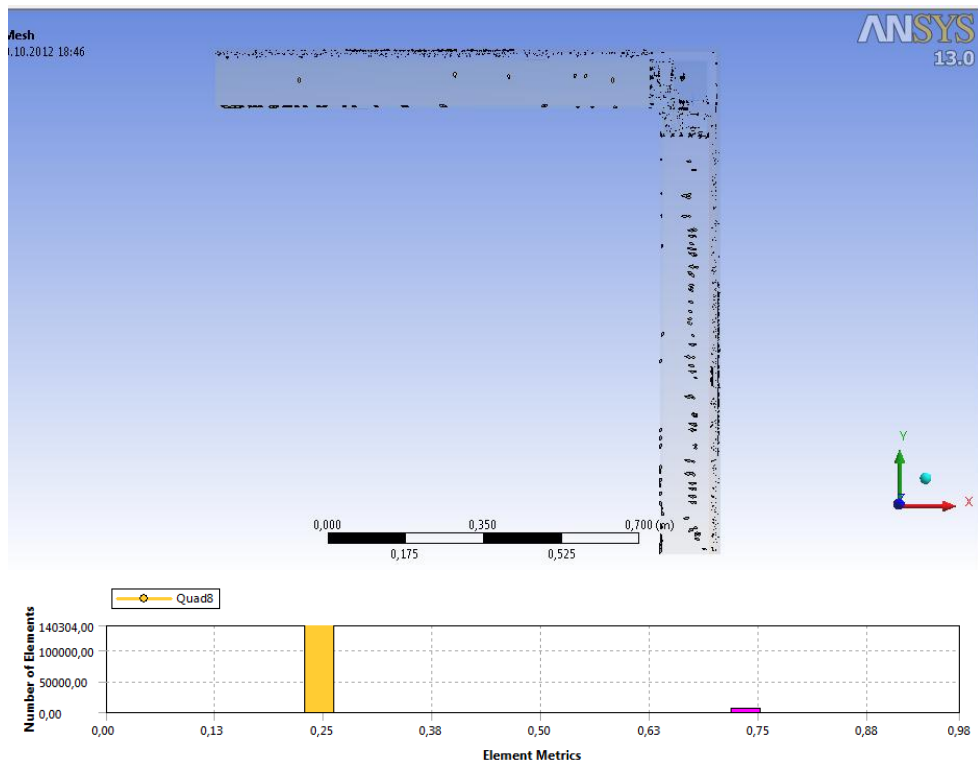


Slika 90: Končni elementi z vrednostjo asimetrije nad 0,5

Problematične podolgovate končne elemente sem postopoma preoblikoval v več manjših, bolj enakostraničnih končnih elementov, zaradi česar se je število končnih elementov v mreži modela ponovno povečalo. Ko končam z izboljševanjem kakovosti mreže dobim mrežo z 147.599 končnih elementov, od katerih je 144.969 (98,2%) štirikotnih osem-voziščnih končnih elementov, 2630 (1,8%) pa je trikotnih šest-voziščnih končnih elementov. Od trikotnih elementov jih ima 438 (17%) vrednost asimetrije nad 0,5. Ti elementi predstavljajo 0,04% površine modela in so zelo razpršeni. Od štirikotnih končnih elementov jih ima 4,9% vrednost asimetrije večjo od 0,5. Ker pa so precej posamično razpršeni po modelu in je njihov delež izredno majhen se zadovoljim s to rešitvijo. To mrežo obravnavam kot optimalno za detajl vogala navzven in bi jo uporabljal v morebitnih nadaljnjih toplotnih analizah. V primeru, da bi izvajali izračun napetosti in deformacij na podlagi izračunanih temperatur, bi morali uporabiti osnovno mrežo, ki je dovolj natančna da omogoča izračun iskanih količin v dovolj velikem številu diskretizacijskih točk.



Slika 91: Deleži štirikotnih končnih elementov v optimalni mreži vogala navznoter glede na vrednost asimetrije



Slika 92: Grafični prikaz štirikotnih končnih elementov z vrednostjo asimetrije nad 0,5 v optimalni mreži vogala navzven

Na enak način bi določil optimalno mrežo tudi za druga dva detajla.

## 9 OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA IN PREDLOGI IZBOLJŠAV

### 9.1 Pregled rezultatov osnovnih variant

Korekcijski in temperaturni faktorji linijskih toplotnih mostov na podlagi stacionarne toplotne analize treh obravnavanih detajlov obešenega panelnega fasadnega sistema so torej:

*Preglednica 28: Rezultati stacionarne toplotne analize linijskih toplotnih mostov*

	$\psi_i$ [W/mK]	$\psi_e$ [W/mK]	$f_{Rsi}$
<b>Vogal navzven</b>	0,289	0,243	0,812
<b>Vogal navznoter</b>	0,140	0,186	0,900
<b>Stik s temeljno gredo</b>	-0,075	-0,149	0,917

Po rezultatih sodeč ima najmanjši toplotni most detajl stika Qbiss Air panela s temeljno gredo, sledi pa mu vogal navznoter. Če se osredotočimo na sistem notranjih mer, ki se uporablja v Sloveniji, ugotovimo, da sta oba detajla ustrezna. Pri vogalu navzven so vrednosti obeh korekcijskih faktorjev linijskega toplotnega mostu nekoliko večje, predvsem na račun izredno prevodnega aluminijastega profila, ki je v stiku s precej veliko delno prezračevano rego. Za vse tri detajle je bilo v skladu s SIST EN ISO 14683 dokazano, da na mestih toplotnih mostov vodna para ne kondenzira.

### 9.2 Občutljivostna analiza stika Qbiss Air panela s temeljno gredo

Oba faktorja linijskega toplotnega mostu sta negativna, kar je nekoliko nenavadno. Kot sem prikazal na sliki 85, včasih lahko pride do negativne vrednosti faktorja  $\psi_e$ . Ker je negativen tudi faktor  $\psi_i$  pomeni, da glede na standard SIST EN ISO 10211 v tem detajlu sploh nimamo toplotnega mostu. Vemo sicer da to ni čisto res, saj je iz prikazov toplotnih tokov razviden povečan pretok toplote preko jeklenih L profilov.

Da bi dosegel pozitivno vrednost faktorja linijskega toplotnega mostu moram zadosti povečati celotni toplotni tok, ki na notranji strani vstopi, na zunanji strani pa izstopi iz detajla, pri tem pa ne smem povečati toplotne prehodnosti stene oz. tal ali pa povečati dimenzij detajla. To najlažje dosežem z odstranitvijo sloja ekstrudiranega polistirena (XPS), ki je pozicioniran na zunanjem robu temeljne grede.

*Preglednica 29: Detajl temeljne grede z in brez ekstrudiranega polistirena*

	Osnovni detajl	Detajl brez XPS
$Q$ [W/m]	46,061	56,300
$\psi_i$ [W/mK]	-0,075	0,181
$\psi_e$ [W/mK]	-0,149	0,107
$\theta_{Si}$ [°C]	16,696	15,117
$f_{Rsi}$	0,917	0,878

Za primerjavo sem koeficiente linijskih toplotnih mostov izračunal še za primer brez mineralne volne na temeljni plošči (vendar z ekstrudiranim polistirenom).

$$d_t = 0,1371 + 2 (0,17 + 0 + 0,04) = 0,5571 \text{ m} < B' = 8 \text{ m} \quad (167)$$

$$U_g = \frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 8 + 0,5571} \ln \left( \frac{\pi \cdot 8}{0,5571} + 1 \right) = 0,597 \frac{W}{m^2K} \quad (168)$$

$$L_{2D} = \frac{Q_w + Q_g}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{76,006 W}{40 K m} = 1,900 W/mK \quad (169)$$

$$\begin{aligned} \psi_i &= L_{2D} - U_w \cdot h_w - U_g \cdot 0,5 \cdot b = \\ &= 1,900 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 1 m - 0,597 \frac{W}{m^2K} \cdot 4 m = \\ &= -0,655 \frac{W}{m K} \end{aligned} \quad (170)$$

$$\begin{aligned} \psi_e &= L_{2D} - U_w \cdot (h_w + h_f) - U_g \cdot 0,5 \cdot (b + w) = \\ &= 1,900 \frac{W}{mK} - 0,167 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,3325 m - 0,597 \frac{W}{m^2K} \cdot 4,069 m = \\ &= -0,752 \frac{W}{m K} \end{aligned} \quad (171)$$

Preglednica 30: Detajl stika s temeljno gredo z in brez sloja mineralne volne

	Osnovni detajl	Detajl brez sloja mineralne volne
$Q$ [W/m]	46,061	76,006
$\psi_i$ [W/mK]	-0,075	-0,655
$\psi_e$ [W/mK]	-0,149	-0,752
$\theta_{Si}$ [°C]	16,696	15,252
$f_{RSi}$	0,917	0,881

Iz rezultatov je razvidno, da sta faktorja linijskega toplotnega mostu skorajda v dovoljenih mejah tudi brez dodanega ekstrudiranega polistirena. Teoretično ne dobimo linijskega toplotnega mostu na stiku fasadnih panelov s temeljno gredo niti če odstranimo vso mineralno volno, ki je na temeljni plošči. V tem primeru je sicer toplotni tok večji kot v primeru odstranitve XPS, vendar se, v nasprotju s prvim primerom, poveča tudi toplotna prehodnost sklopa tal, zaradi česar sprememba vrednosti  $\psi_i$  in  $\psi_e$  ni tako velika kot v prvem primeru.

Ker je sestava Qbiss Air panela točno določena, prav tako pa  $d_{min} = h_w$ , se vpliv stene na vrednost  $\psi_i$  in  $\psi_e$  ne spreminja. Pri sklopu tal pa je možno izbrati različne vrednosti spremenljivk  $B'$ ,  $\lambda_{zemljine}$  in  $d_t$ , ki vplivajo na vrednost  $U_g$ , le-ta pa neposredno vpliva na vrednosti faktorjev  $\psi_i$  in  $\psi_e$ . Da bi pregledno prikazali odvisnost med naštetimi spremenljivkami, uvedemo sledeče izraze:

$$c = \frac{\lambda}{d_t} \quad (172)$$

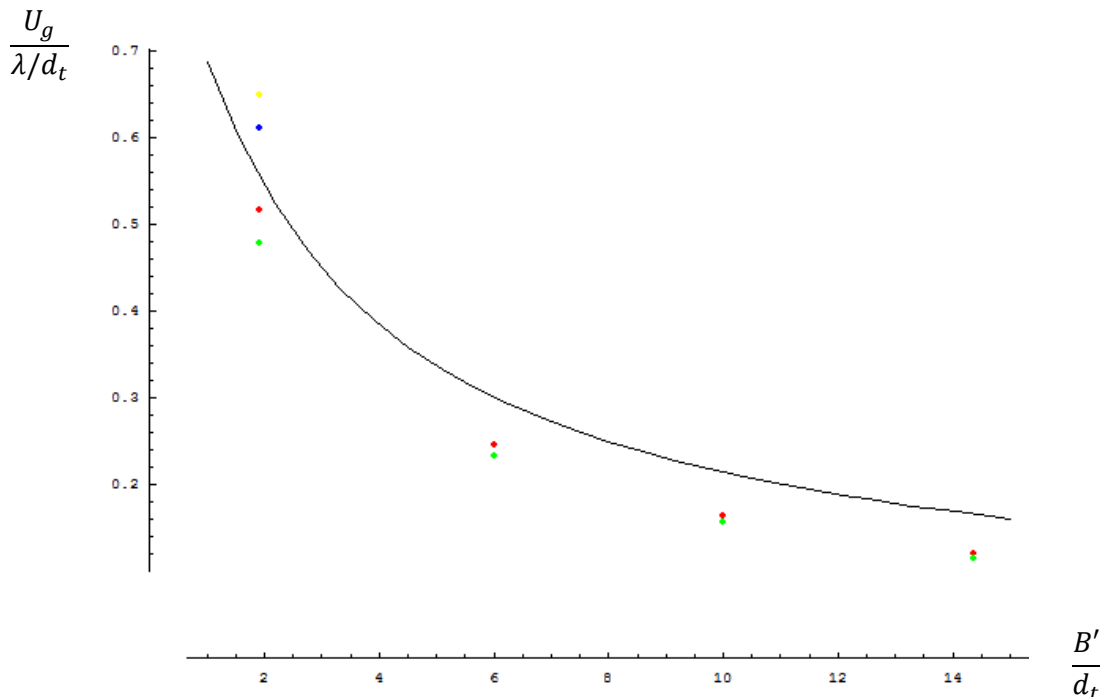
$$r = \frac{B'}{d_t} \quad (173)$$

Če (155) oz. (156) v imenovalcu in števcu delimo z  $d_t$  in upoštevamo enačbi (167) in (168) dobimo:

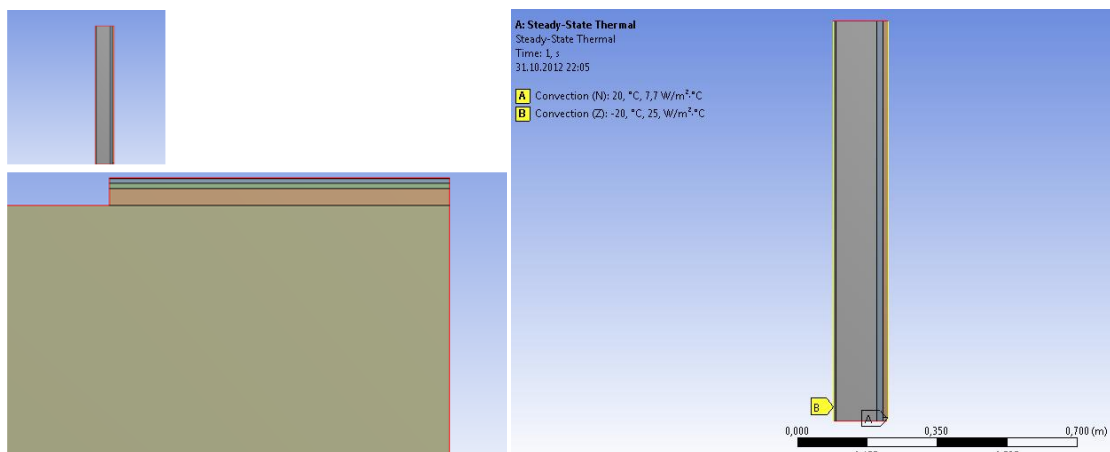
$$U_g = \frac{2c}{\pi r + 1} \ln(\pi r + 1) \dots \text{če je } 1 < r \quad (174)$$

oz.

$$U_g = \frac{c}{\pi r + 1} \dots \text{če je } 1 \geq r \quad (175)$$

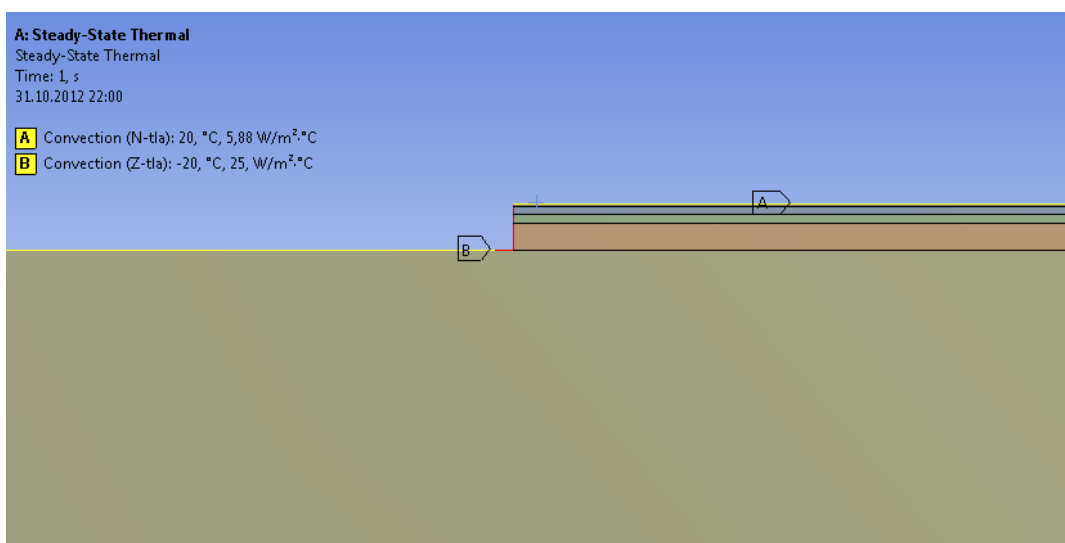
Slika 93: Normirana krivulja odvisnosti  $U_g/c$  od  $r$ 

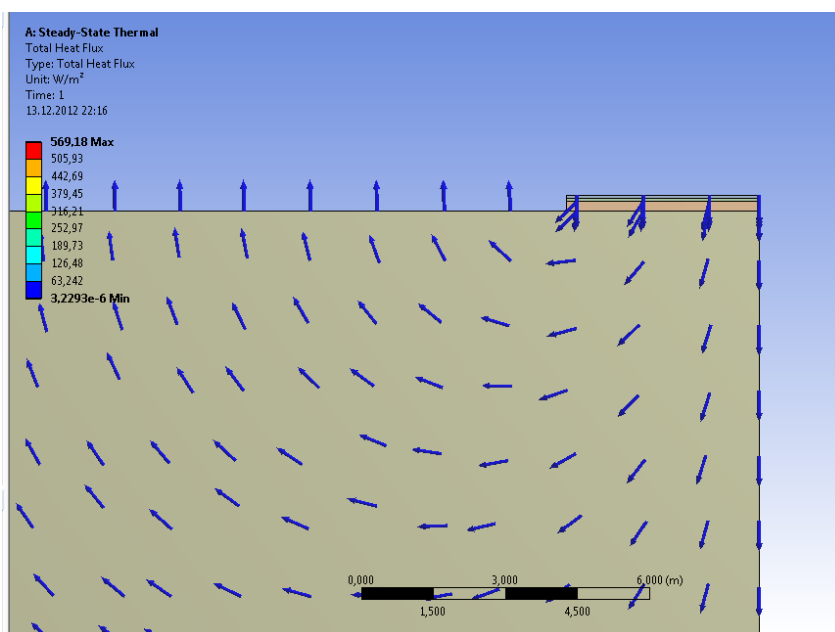
Črna črta na sliki 93 prikazuje odvisnost  $U_g/(\lambda/d_t)$  od  $B'/d_t$ . Rdeče pike prikazujejo vrednosti v primeru obravnavanega detajla, kjer je  $\psi_i = 0$ , zelene pike pa prikazujejo vrednosti, kjer je  $\psi_e = 0$ . Skrajno levi piki veljata za osnovni primer detajla stika Qbiss Air panela s temeljno gredo, kjer znaša debelina sloja min. volne na betonski plošči 60 mm,  $B' = 8$  m,  $\lambda_{zemljine} = 2$  W/mK. Drugi piki z leve veljata pri vrednosti  $B'/d_t = 6$ , kar sem dosegel z zmanjšanjem debeline sloja mineralne volne na 12,75 mm. Tretji piki z leve veljata pri  $B'/d_t = 10$ , to vrednost pa lahko dobimo z zmanjšanjem debeline min. volne na 4 mm. Skrajno desni piki veljata v primeru brez sloja mineralne volne. Iz slike 93 se vidi, da je za obravnavani detajl po standardu SIST EN ISO 10211 izračunana vrednost  $U_g$  prevelika (vrednosti /črna črta/ so nad navidezno krivuljo iz rdečih pik), zato pri nobeni kombinaciji spremenljivk  $B'$ ,  $\lambda_{zemljine}$  in  $d_t$  ne dobimo pozitivne vrednosti faktorja  $\psi_i$ . Rumena in modra pika veljata za detajl brez ekstrudiranega polistirena. Rumena pika predstavlja vrednost, pri kateri je  $\psi_i = 0$ , modra pika pa vrednost, pri kateri je  $\psi_e = 0$ . Obe piki sta nad črno krivuljo, kar pomeni da sta  $\psi_i$  in  $\psi_e$  pozitivna pri vrednosti  $U_g$ , izračunani po standardu SIST EN ISO 10211, kar je tudi prikazano v preglednici 29. Zaradi zelo dobre izoliranosti osnovnega stika stene in temeljne grede je torej toplotni tok preko celotnega detajla manjši od vsote toplotnega toka, ki prehaja čez homogeno steno in toplotnega toka, ki prehaja čez homogen sloj tal. Slednje bom prikazal na ta način, da bom modeliral posebej le homogeni del stene in posebej homogeni del sklopa tal z zemljino. Na mestu stikovanja stene in sklopa tal bom upošteval adiabatno linijo, s čimer bo zagotovljeno da se toplota ne prenaša v območje obravnavanega detajla stikovanja.



Slika 94: Modeliranje prenosa toplote čez homogeno steno

Steno »odrežem« na višini zgornje kote pohodnega sloja. Na notranji površini predpišem konveksijski robni pogoj s koeficientom  $\alpha_{Si} = 7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$  in temperaturo  $20^\circ\text{C}$ , na zunanji strani pa  $\alpha_{Se} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  in temperaturo  $-20^\circ\text{C}$ . Zgodnja in spodnja stran stene sta adiabatni ravnini. Tla modeliram kot popolnoma homogen sklop, ki sega do notranje površine stene (povzeto po Nyberg, 2011). Vertikalni rob sklopa tal in območje zemljine v širini stene (rdeča barva na sliki 95 zgoraj) sta adiabatni liniji, ki zagotavljata da se toplota prenaša v zunanje okolje samo preko tal. Zunanjemu terenu in notranji pohodni površini predpišem enake robne pogoje kot v poglavju 7.1.4.





Slika 95: Prehod toplote skozi tla - robni pogoji (zgoraj) in vektorski prikaz prehoda toplote (spodaj)

Toplotni tok skozi steno znaša  $Q_w = 6,726 \text{ W/m}$ , toplotni tok skozi tla pa  $42,69 \text{ W/m}$ . Njuna vsota ( $49,416 \text{ W/m}$ ) je večja od toplotnega toka v detajlu stika s temeljno gredo, zaradi česar računsko dobimo negativna koeficienta linijskih toplotnih mostov. To si lahko razlagamo na ta način, da je obravnavani detajl bolj toplotno izolativen kot skupek posamičnih homogenih konstrukcijskih sklopov.

Naj še enkrat omenim, da tabelirani rezultati veljajo za faktor oblike  $B' = 2 \cdot 4 = 8 \text{ m}$  (t.j. širina plošče med notranjima površinama zunanjih sten objekta). S spremembo vrednosti  $B'$  se močno spremenijo tudi razponi računskega modela (razpon med notranjim robom stene in desnim vert. robom zemljine, razpon med zunanjim robom stene in levim vert. robom zemljine ter globina zemljine). Ker je vpliv spreminjanja faktorja  $B'$  na vrednost  $\psi$  preučen v drugi literaturi, tega sam nisem izvajal. Rezultati parametričnih študij spreminjanja vrednosti faktorja oblike  $B'$  drugih avtorjev (npr. Medved, 2010) kažejo na to, da se vrednost  $U_g$  s povečevanjem faktorja  $B'$  eksponentno znižuje. Nyberg (2011) je pokazal, da se vrednosti  $\psi$  znižujejo z višanjem vrednosti faktorja oblike  $B'$  nad  $8 \text{ m}$ . Pokazal je tudi, da se  $\psi$  povečuje z zviševanjem toplotne prevodnosti zemljine in obratno. Faktorji linijskih toplotnih mostov pri objektih s širino temeljne plošče, večje od  $8 \text{ m}$ , bodo torej kvečjemu manjši od izračunanih v tej diplomski nalogi. Po SIST EN ISO 10211 je namreč  $0,5 \cdot B' = 4 \text{ m}$  minimalna širina, ki se jo lahko upošteva pri računu linijskih toplotnih mostov.

### 9.3 Predlogi izboljšav v detajlu vogal navzven

Kot je bilo navedeno v podpoglavju 3.3.1 se je potrebno v skladu s SIST EN ISO 14683 toplotnim mostovom z linijsko toplotno prevodnostjo  $\psi_i > 0,2 \text{ W/mK}$  izogniti s popravki v okviru tehničnih in tehnoloških možnosti. Kljub temu da sem dokazal, da ne pride do kondenzacije na notranji površini detajla, bom poskušal navesti možnosti za zmanjšanje toplotnega mostu, pri katerih se ne bi povečale zunanje dimenzije detajla oz. bi se celotna geometrija detajla minimalno spremenila.

Če pogledamo sliko 66 na strani 86 vidimo, da toplota v detajl prehaja v celotnem območju od distančnikov obeh panelov pa do stika obeh sekundarnih mavčnih plošč. Edino tesnilna pena nudi

zadosten toplotni upor. Najbolj učinkovito bi bilo, če bi na to območje namestili dodaten tanek sloj toplotne izolacije, ki bi zmanjšala prenos toplote do te mere, da bi bil  $\psi_i < 0,2$  W/mK. Ker znaša debelina rigidur plošče na območju jeklenega L profila le 8,2 mm bi bilo potrebno uporabiti zelo tanek sloj izredno toplotno izolativnega materiala. Trenutno najprimernejši material za to nalogo bi bil aerogel, saj lahko izredno omeji kondukcijo, konvekcijo in radiacijo. Obravnaval sem dva primerna aerogelna produkta na trgu z nekoliko različnima karakteristikama.

### 9.3.1 Thermal Wrap™ aerogelna odeja

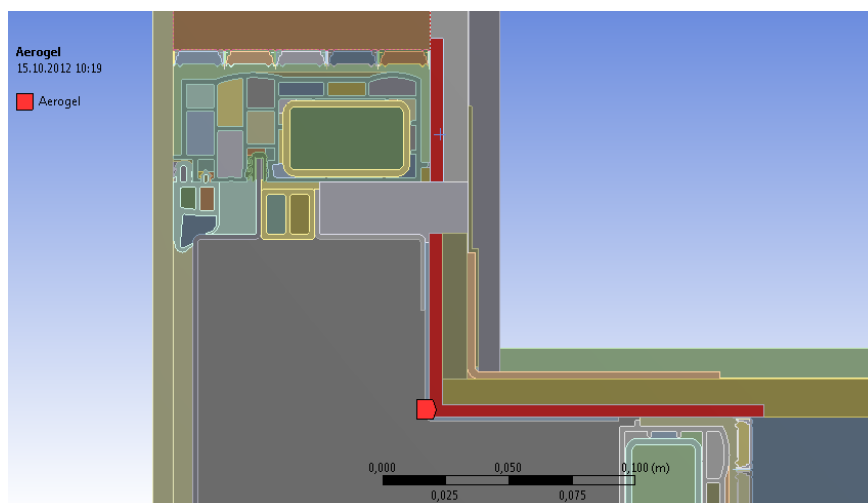
Thermal Wrap™ sestoji iz silikonskih aerogelnih granul v netkanih poliestrskih in polietilenskih vlaknih, ki tvorijo prilagodljiv, stisljiv in zelo učinkovit toplotno izolacijski material. Proizvaja ga podjetje Cabot, dobavljiv pa je v obliki rol različnih velikosti. Standardne debeline so 3,5, 6 ali 8 mm. Plasti se lahko lepijo, na ta način pa je možno dobiti skoraj poljubno debelino sloja. Njegova toplotna prevodnost znaša pri sobni temperaturi 0,023 W/mK, s stiskanjem materiala pa se le še poveča. Gostota znaša 70 kg/m<sup>3</sup>, ima 20% transparentnost in absorbira zvok. Je manj prašen od konkurenčnih produktov, varen za človeško zdravje in okolje in primeren za večkratno uporabo. Lahko se ga enostavno reže in celo šiva (Cabot-Corp., 2011)



Slika 96: Thermal Wrap™ (Cabot-corporation, 2011)

Uporabil sem debelini 3,5 mm (Thermal Wrap TW350) in 6 mm ((Thermal Wrap TW600), sloj aerogelne odeje pa sem namestil na notranjo stran toge rigidur plošče, s čimer bi se zmanjšale možnosti za morebitne poškodbe materiala. Aerogel sega 5 mm dlje od začetka jedra Qbiss Air panela, kot prikazuje spodnja slika.





Slika 97: Zasnova postavitve aerogelne izolacije v detajlu vogal navzven

Preglednica 31: Učinek vgradnje aerogelnega produkta Thermal Wrap TW350

	Osnovni detajl	Thermal Wrap™ TW350	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	22,825	-8,38%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,236	-18,34%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,190	-21,81%
$\theta_{Si}$ [°C]	12,473	13,642	9,37%
$f_{RSi}$	0,812	0,841	2,90%

Preglednica 32: Učinek vgradnje aerogelnega produkta Thermal Wrap TW600

	Osnovni detajl	Thermal Wrap™ TW600	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	21,879	-12,18%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,212	-26,64%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,166	-31,67%
$\theta_{Si}$ [°C]	12,473	14,22	14,00%
$f_{RSi}$	0,812	0,856	5,42%

### 9.3.2 Spaceloft® odeja

Spaceloft je fleksibilna, nano porozna odeja iz silikonske aerogelne izolacije, ki jo odlikuje odlična fleksibilnost, tlačna odpornost, hidrofobnost in lahkotnost uporabe. Je prašen material, ki se ponaša s toplotno prevodnostjo 0,014 W/mK, gostota pa znaša 150 kg/m<sup>3</sup>. Nudi odlično odpornost proti širjenju plamena in emisijam dima (fasada-kritina.si, 2012). Dobavljiv je v standardnih debelinah 5 in 10 mm, izdeluje pa ga podjetje Aspen Aerogels, Inc. (Aerogel d.o.o., 2012).



Slika 98: Aerogelna odeja Spaceloft® (Aerogel, d.o.o., 2012)

Uporabil sem sloj debeline 5 mm, ki sem ga namestil identično kot v prejšnjem primeru.

Preglednica 33: Učinek vgradnje aerogelne odeje Spaceloft

	Osnovni detajl	Spaceloft® (d = 5 mm)	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	21,128	-15,19%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,193	-33,22%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,147	-39,51%
$\theta_{Si}$ [°C]	12,473	14,677	17,67%
$f_{RSi}$	0,812	0,867	6,77%

Vidimo, da bila uporaba slednjega aerogelnega produkta ustrezna tako za izpolnitev pogoja  $\psi_i < 0,2$  W/mK kot tudi za izpolnitev bistvenih zahtev iz Evropske direktive o gradbenih proizvodih (CPD 89/106/EEC) – požarna varnost, neškodljivost človeškemu zdravju, zvočna izolativnost..

Edina slabost aerogelov je trenutno njihova relativno visoka cena, ki je posledica stroškov tehnologije izdelave (nadkritična ekstrakcija tekočine iz gela s povečano temperaturo in tlakom), stroški samega materiala pa so zanemarljivi (Žnidaršič, 2011). Primer trenutne neto tržne cene za Thermal Wrap™ dimenzij 304,8 x 274,3 x 6 mm je 25 USD, za Spaceloft® odejo dimenzij 304,8 x 304,8 x 5 mm pa 30 USD (BuyAerogel.com).

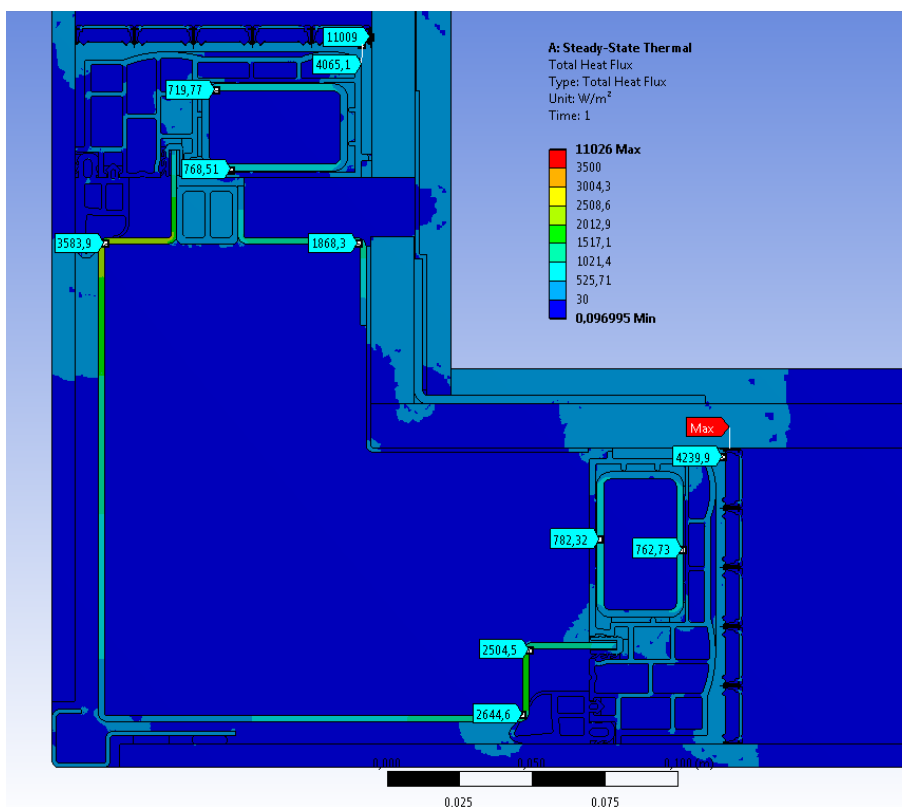
Z napredkom pri pocenitvi postopka izdelave teh materialov in z razvojem novih vrst aerogelov, kot je Nasin novi fleksibilni polimerni aerogel, ki je do 500-krat močnejši in robustnejši od silikonskih variant, se nedvomno obeta velik potencial za prihodnjo uporabo.



Slika 99: Poliamidni aerogel, ki ga je razvila NASA (Gizmag, 2012)

### 9.3.3 Alternativa aluminijastemu profilu

Na spodnji sliki so označene maksimalne vrednosti celotnega specifičnega toplotnega toka po elementih prereza, kjer se prevaja največji delež toplote v detajlu vogala navzven.



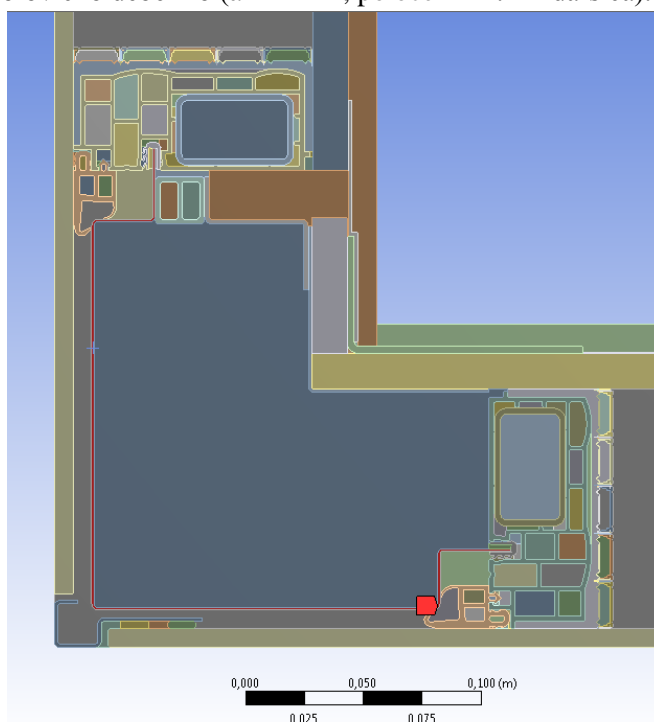
Slika 100: Prikaz vrednosti maksimalnega spec. toplotnega toka po elementih detajla vogala navzven

Vidimo, da je največji specifični toplotni tok ( $q$  [W/m<sup>2</sup>]) na notranjih aluminijastih folijah ter na jekleni pločevini distančnikov. To pa ne pomeni, da se prek njih prevaja največ toplote, ampak da je gostota toplotnega toka v teh elementih največja. Dejanski toplotni tok ( $Q$  [W]), na meter dolžine stika, je produkt specifičnega toplotnega toka in debeline prereza posameznega elementa. Toplotni tok doseže največjo vrednost v aluminijastem profilu, kar pomeni, da bo manipulacija s tem elementom imela največji učinek na rezultate prehoda toplote.

*Preglednica 34: Vrednost toplotnega toka na meter dolžine stika po elementih detajla*

Material	Max $q$ [ $W/m^2$ ]	$d$ [m]	$Q$ [W]
Alufolija	11026	0,00002	0,22052
Jeklena pločevina distančnika	4239,9	0,0001	0,42399
Jeklena votla cev	782,32	0,0025	1,9558
Jekleni Z profil	1868,3	0,002	3,7366
Aluminijasti profil	3583,9	0,002	<b>7,1678</b>

V prvem koraku sem namesto aluminija uporabil jekleno pločevino, saj ima le-ta 3,2-krat manjšo toplotno prevodnost od aluminija. Zaradi večje natezne trdnosti in večjega modula elastičnosti jekla sem profil stanjšal na polovično debelino ( $d = 1$  mm, po oceni Dr. Žnidaršiča).



*Slika 101: Prikaz spremenjenega profila (rdeče)*

*Preglednica 35: Primerjava rezultatov jeklenega in aluminijastega profila*

	Aluminijasti profil, $d = 2$ mm	Jekleni profil, $d = 1$ mm	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	24,007	-3,64%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,265	-8,30%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,219	-9,88%

Razlika v rezultatih je majhna, saj ima jeklo še vedno precej veliko toplotno prevodnost, zato sem iskal material, ki bi imel relativno podobne mehanske lastnosti kot aluminij, vendar precej manjšo toplotno prevodnost. Aluminijasti profil bi lahko nadomestili s kompozitnim materialom iz polimerne matrice (termoplasti ali duroplasti) in ojačitvenih vlaken (predvsem steklena, aramidna in ogljikova vlakna). Osredotočil sem se na splošne mehanske lastnosti polimernih kompozitov in na podlagi teh izbral dva potencialno primerna materiala.

Preglednica 36: Lastnosti ojačitvenih vlaken v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov)

Lastnost	E-steklo	S-steklo	HS ogljik, T-300	Kevlar 29	Kevlar 49	2024 Aluminij
Gostota [ $\text{kg/m}^3$ ]	2550	2490	1700-1800	1440	1440	2700
Natezna trdnost [GPa]	2,4	3,45 - 4,75	3-4,5	3,6	3,6 - 4,1	0,43
Modul elastičnosti [GPa]	69-80	86 - 89	234-253	60 - 83	120 - 136	69
Temperaturna razteznost [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	5	5,6	-0,5 (V), 7 (P)	-2 (V), 58 (P)	-2 (V), 59 (P)	23
Toplotna prevodnost [W/mK]	1,86 - 2,25 (V), 0,05 (P)	2,55 (V)	8 - 25 (V)	3,33 (V), 0,05 (P)	3,1 (V), 0,05(P)	189

V ... vzdolžno v smeri vlaken

P ... prečno na vlakna

Od naštetih ojačitvenih vlaken so cenovno najugodnejša steklena vlakna (E-steklo), nato S-steklo, najdražja so praviloma karbonska vlakna, aramidna vlakna pa so nekajkrat dražja od steklenih, vendar tudi nekajkrat cenejša od najboljših karbonskih vlaken (pridobljeno iz različnih virov). Temu primerno so kompoziti z vlakni iz E-stekla mehansko šibkejši od ostalih vrst. Kompoziti iz aramidnih vlaken imajo najboljšo odpornost proti utrujanju in imajo tudi nekoliko duktilno porušitev v nasprotju z ostalimi. Kompoziti iz karbonskih vlaken imajo praviloma višjo toplotno prevodnost od kompozitov s steklenimi ali aramidnimi vlakni.

Preglednica 37: Lastnosti polimernih matric v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov)

Lastnost	Duroplasti				Termoplasti		2024 Aluminij
	Epoksidne smole	Duromerni poliamidi	Poliestri	Fenolne smole	ABS	Najlon	
Gostota [ $\text{kg/m}^3$ ]	1110-1400	1430	1050 - 1280	1500-1750	1050	1130- 1150	2700
Natezna trdnost [MPa]	55-130	55,8	45-90	45-59	17-62	48-83	0,43
Modul elastičnosti [GPa]	2,4-4,2	3,2	2,5-4	5,5-8,3	0,7-2,8	1-2,7	69
Temperaturna razteznost [ $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ]	45-65	50,4	100-110	30-45	60-130	80-150	23
Toplotna prevodnost [W/mK]	0,17-0,21	0,36	0,17-0,33	0,15-0,25	0,33	0,22- 0,24	189

Prednost epoksidnih smol je visoka trdnost in modul elastičnosti, nizka vsebnost hlapljivih snovi, odlična sprejemnost, majhno krčenje zaradi vezanja, dobra odpornost na kemikalije in vremenske vplive, enostavnost obdelave, z določenimi dodatki pa jim lahko izboljšamo odpornost na UV žarke in ognjeodpornost. Njihove slabosti so krhkost, znižanje mehanskih lastnosti ob prisotnosti vlage ter sproščanje velike količine dima v primeru gorenja. Prednost poliestrskih smol je ugodnejša cena in krajši čas nege v primerjavi z epoksidnimi smolami ter ognjeodpornost z uporabo dodatkov. V

primerjavi z epoksidnimi smolami imajo slabšo odpornost na kemikalije, večje krčenje ob vezanju ter praviloma manjšo trdnost.

*Preglednica 38: Lastnosti kvazi-izotropnih polimernih kompozitov v primerjavi z aluminijem (pridobljeno iz različnih virov)*

Lastnost	E-steklo - epoksidna smola	E-steklo - poliestrska smola	S-steklo - epoksidna smola	HS ogljik - epoksidna smola	Kevlar 49 - epoksidna smola	2024 Aluminij
Gostota [kg/m <sup>3</sup> ]	1600 - 2100	1800-2000	2000	1600	1380	2700
Natezna trdnost [GPa]	0,75	0,4-1	0,7	0,5-0,9	1,4-1,9	0,43
Natezni modul elastičnosti [GPa]	24 - 38,6	25-45	30	60	76-82	69
Temperaturna razteznost [10 <sup>-6</sup> /°C]	11-35	8 - 50	10,8	1 - 3	0,9	23
Toplotna prevodnost [W/mK]	0,3 - 0,9	0,3 - 0,9	0,3 - 1,1	5	0,2 -0,9	189

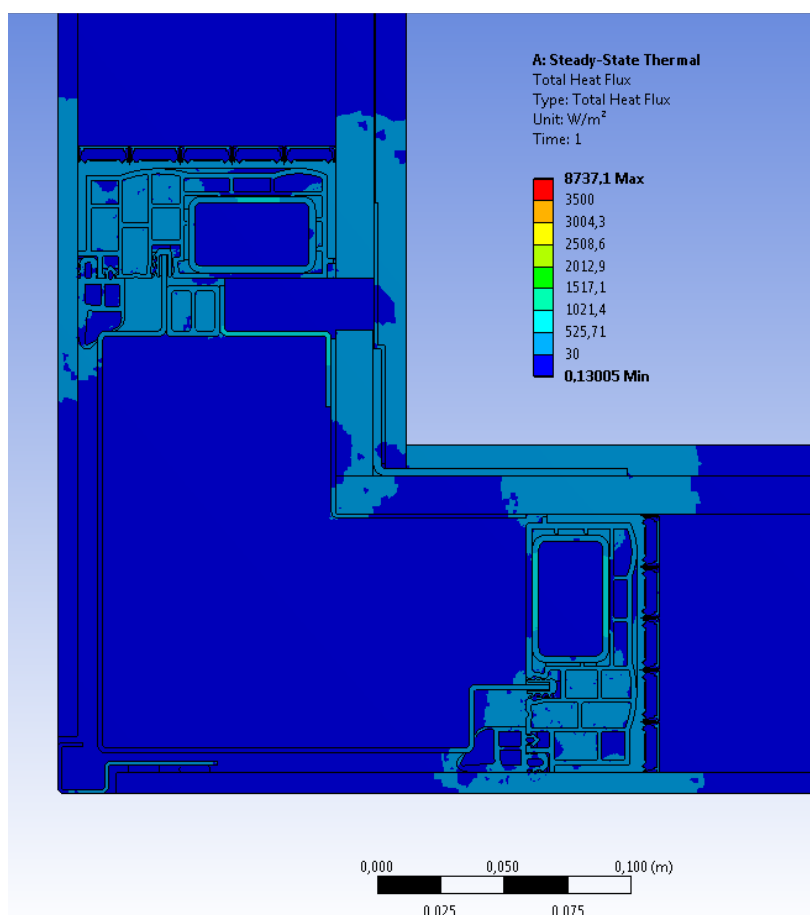
Ker so mehanske lastnosti odvisne od oblike in razporeditve ojačitvenih vlaken v kompozitu in lastnosti določene vrste posamezne matrice, so vrednosti v zgornjih treh tabelah informativne in lahko variirajo. V aluminijastem profilu ni posebnih obremenitev (Dr. Žnidaršič), zato bi morda zadoščal že kompozit z vlakni iz E-stekla. Mehanska analiza napetosti in deformacij v aluminijastem profilu ter v različnih kompozitih bi presejala okvir te diplomske naloge, zato predpostavim, da je trenutna debelina aluminijastega profila zadostna tudi v primeru uporabe katerega od polimernih kompozitov. Ker so od naštetih kompozitov cenovno najugodnejši, bom uporabil kompozit iz E-stekla in poliestrske smole v obliki pultrudiranega profila, za katerega bom upošteval izotropno toplotno prevodnost 0,3 W/mK (npr. strukturni profili podjetja Fiberline Composites). V kolikor mehanske lastnosti takega kompozita ne bi zadoščale, bi predlagal kompozit iz epoksidne smole, ojačene z aramidnimi vlakni.



*Slika 102: Pultrudirani strukturni profili iz E-steklo - poliester kompozita, ki jih izdeluje podjetje Fiberline composites ([www.fiberline.com](http://www.fiberline.com))*

Preglednica 39: Primerjava rezultatov detajla vogal navzven z aluminijastim profilom in profilom iz polimernega matričnega kompozita

	Aluminijasti profil, $d = 2 \text{ mm}$	E-steklo-poliestrška smola $d = 2 \text{ mm}$	Razlika [%]
$Q$ [W/m]	24,913	22,01	-11,65%
$\psi_i$ [W/mK]	0,289	0,215	-25,61%
$\psi_e$ [W/mK]	0,243	0,169	-30,45%



Slika 103: Prikaz specifičnega toplotnega toka v primeru uporabe kompozita iz poliestrske smole in vlaken E-stekla

Za profil, ki povezuje ojačitveni polimerni letvi Qbiss Air panelov je izbran material aluminij, ker je to standardna rešitev, saj ima dobro protikorozivno zaščito in je že v dobavljeni obliki zelo raven. Namesto tega bi lahko uporabili tudi jekleno pločevino, ki je sicer nekoliko cenejša, vendar je potrebno zagotoviti korozijsko zaščito (npr. vroče cinkanje, ...) kar nekoliko poveša ceno. Kljub manjši debelini bi imel tak profil večjo lastno težo od aluminijastega. Toplotna analiza je pokazala, da uporaba jekla ne bi prinesla opaznih prednosti v smislu manjših toplotnih izgub. Profil iz polimernega kompozita s steklenimi vlakni bi bil lažji od aluminijastega, ob upoštevanju opisanih predpostavk bi zaradi 533-krat manjše toplotne prevodnosti teoretično zmanjšali vrednost  $\psi_i$  za četrtno, min. temperatura na notranji površini pa bi se povečala za 1°C. S slike 103 je razvidno, da bi bil po tem ukrepu toplotni most pravzaprav izključno le še na mestu polimerne ojačitvene letve obeh profilov in stekla panelov. Omenjeni kompoziti so praviloma dražji od aluminija, v primeru uporabe kompozitov z boljšimi mehanskimi lastnostmi pa bi bila cenovna razlika še večja.

## 10 ZAKLJUČEK

V nalogi sem modeliral različne računске primere za toplotne analize po standardu SIST EN ISO 10211. Na osnovi validacijskih testnih primerov sem potrdil pravilnost izračunavanja uporabljene programske opreme ter teoretično predstavil in pojasnil ozadje stacionarne toplotne analize, ki sem jo kot poglavitni del naloge opravil v zadnjih poglavjih. Ansys se je pri tem izkazal kot močno orodje, ki uporabniku nudi bogat nabor možnosti. Največja in hkrati ena najpomembnejših težav je lahko nepravilnost geometrije računskega modela. Tu si je potrebno vzeti več časa in v računskem modelu izredno natančno modelirati vse stike med posameznimi elementi.

Toplotna analiza je bila najprej izvedena z zelo natančno mrežo končnih elementov, da sem dobil čim bolj točne rezultate. Nadaljnje primerjave z različnimi končnimi elementi so pokazale, da je bila prvotna mreža precej bolj zgoščena kot je bilo potrebno. S spreminjanjem velikosti končnih elementov sem se postopoma približeval bolj racionalni mreži končnih elementov. Ansysov privzeti algoritem za kreiranje mreže se je izkazal za zelo dobrega, saj je podal skoraj optimalno mrežo. Izkazalo se je, da niti število, niti velikost, oblika ali število vozlišč končnih elementov ne vplivajo bistveno na rezultate analize, saj je bila razlika v rezultatih v vseh primerih manjša od 1%. Mreža mora biti le dovolj zgoščena na mestih, kjer se pričakuje večje toplotne tokove (najbolj prevodni elementi), potrebno število končnih elementov in posledično njihova velikost pa se določi na podlagi razlike v rezultatih, ki mora biti manjša od 1% pri številu  $n$  ter  $2n$  končnih elementov. Običajno se lahko že ob redčenju mreže preverja kvaliteto končnih elementov, s čimer bi bolje regulirali redčenje, vendar sem ta proces namenoma prikazal postopoma. Pri mreženju oz. ob pregledovanju kreirane mreže moramo paziti na dobre kontakte med končnimi elementi ter na njihovo obliko. Najbolj so zaželeni enakokotni oz. enakostranični končni elementi.

Tudi manjše poenostavitve pri modeliranju ne povzročijo bistvene napake v rezultatih. V kolikor bi si olajšali delo in bi vse zračne rege z 2 mm ali manjšo medsebojno povezavo tretirali kot eno večjo rego (npr. T namesto T1, T2 in T3 ipd.), bi pri vogalu navznoter dobili 0,8% večji toplotni tok,  $\psi_i$  bi se povečal za 2,15%,  $\psi_e$  pa za 2,50%. Pri vogalu navzven bi dobili 1,55% večji toplotni tok ter 3,36% večji  $\psi_i$  in 4% večji  $\psi_e$ . Ti rezultati so bili dobljeni pri osnovni mreži končnih elementov.

Največji vpliv na rezultate ima toplotna prevodnost in geometrijska razporeditev najbolj prevodnih elementov v detajlu. Na podlagi te ugotovitve sem v devetem poglavju v skladu s standardom SIST EN ISO 14683 podal predloge za zmanjšanje vrednosti koeficientov linijskega toplotnega mostu v detajlu vogala navzven. Vsi predlogi bi sicer pomenili določen dodaten finančni vložek v produkt. Ekonomsko upravičenost predlaganih izboljšav bi lahko izračunali na konkretnem objektu tako, da bi ta vložek primerjali z vrednostjo prihranjene energije na račun zmanjšanja toplotnih izgub na mestu takih linijskih toplotnih mostov v življenjskem obdobju stavbe.

Delo na tej diplomski temi mi je pripomoglo k razvoju boljšega občutka za zakonitosti prenosa toplote v gradbenih konstrukcijah ter pridobitvi širšega praktičnega znanja pri snovanju računskih modelov in mrež končnih elementov za numerične analize. Ambicije za nadaljnje delo vidim tudi v analizah 3D prehoda toplote v gradbenih konstrukcijah in prostorskemu modeliranju mrež končnih elementov.



## VIRI

Aerogel, d.o.o., 2012.

[http://www.aerogel.si/5\\_1\\_spaceloft.htm](http://www.aerogel.si/5_1_spaceloft.htm) (Pridobljeno 15.10.2012).

Ansys, Inc., 2010. Ansys meshing user's guide, release 13.0.

[http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/wb\\_msh.pdf](http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/wb_msh.pdf) (15.9.2012).

BuyAerogel.com<sup>TM</sup>. 2012.

<http://www.buyaerogel.com/> (Pridobljeno 15.10.2012).

Cabot Corporation. 2011. Thermal Wrap TW350, 600, 800, data sheet.

[http://www.cabot-corp.com/wcm/download/en-us/ae/Data%20Sheet%20Thermal%20Wrap%20TW350\\_600\\_800\\_4\\_2011\\_FINAL.pdf](http://www.cabot-corp.com/wcm/download/en-us/ae/Data%20Sheet%20Thermal%20Wrap%20TW350_600_800_4_2011_FINAL.pdf) (Pridobljeno 15.10.2012).

Žnidaršič, M., Kralj, A. 2010. Nov visokoizolacijski stavbni ovoj. V: Perme, T. (ur.), Švetak, D. (ur.), Balič, J. (ur.). Industrijski forum IRT, Portorož, 7.- 8. Junij 2010. Vir znanja in izkušenj za stroko: zbornik foruma. Škofljica: Profidtp, 2010, str. 133-136.

Dodson, B. 2012. Flexible, high-strength polymer aerogels deliver "super-insulation" properties.

<http://www.gizmag.com/polymer-aerogel-stronger-flexible-nasa/23955/> (Pridobljeno 15.10.2012).

Fiberline composites. 2012.

<http://www.fiberline.com/structural-profiles/structural-profiles-and-brackets> (Pridobljeno 12.10.2012).

Generalni direktorat za energijo. 2011. Nova direktiva EU na področju energetske učinkovitosti - Izzivi in rešitve.

[http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/2011\\_directive/country/20110622\\_energy\\_efficiency\\_directive\\_sl\\_slides\\_presentation.pdf](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/2011_directive/country/20110622_energy_efficiency_directive_sl_slides_presentation.pdf) (Pridobljeno 2.9.2012).

Gostič, S., Mezgec, A., Žarnić, R. Protipotresne utrditve zidanih konstrukcij s CFRP kompoziti: 9 str.

<http://www.gi-zrmk.si/images/TC/6%20%20C4%8Dlanek.pdf> (Pridobljeno 24.10.2012).

Grobovšek, B. 2006. Pasivna hiša: izračun toplotnih mostov pri masivni gradnji.

<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT291.htm> (Pridobljeno 20.9.2012).

Izolacija Aerogel Spaceloft. 2012.

<http://www.fasada-kritina.si/fasadna-obloga-slk/izolacija-fasade/izolacija-aerogel.html> (Pridobljeno 15.10.2012).

Kralj, A., Žnidaršič, M., Japelj Fir, M., Remec, Č. 2011. Gas-filled panels as a high insulation alternative for 21<sup>st</sup> century building envelopes, World Engineers Convention 2011, Ženeva, 4. do 8. September 2011: 8 str.

<http://www.cbs-institut.si/index.php?pg=3> (Pridobljeno 14.9.2012).

Kunič, R., 2009. Mehanizem prehoda toplote skozi konstrukcijske sklope v stavbah. Gradbenik 9/2009: str. 30,31.

[http://www.fragmat.si/download/clanki/Gradbenik%20Prehod%20toplote\\_1.pdf](http://www.fragmat.si/download/clanki/Gradbenik%20Prehod%20toplote_1.pdf) (Pridobljeno 5.9.2012).

Medved, S. 2010. Gradbena fizika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: str. 7-64, 142-147.

Moaveni, S. 1999. Finite element analysis in Ansys. Theory and Application with Ansys. Minnesota State University, Mankato: str. 189-215, 262-306.

Nyberg, H. 2011. Thermal bridges at foundations. Evaluation of heat calculation methods. Master's thesis. Samozaložba. Göteborg, Sweden, Chalmers University of technology, Department of civil and geodetic engineering, Division of building technology, Building physics: str. 35-39 f.

Povzetek predloga Evropske komisije – Z izboljšanjem energetske učinkovitosti do manjše porabe energije. 2012.

[http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/2011\\_directive/country/20110622\\_energy\\_efficiency\\_directive\\_sl\\_citizen\\_summary.pdf](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/doc/2011_directive/country/20110622_energy_efficiency_directive_sl_citizen_summary.pdf) (Pridobljeno 2.9.2012).

Qbiss Air spletna stran. 2012.

<http://www.qbiss.eu/thin-and-energy-efficient-building-envelope/> (Pridobljeno 2.10.2012).

Smodiš, R. 2010. Trajnostno certificiranje objektov, prezentacija SPAS 2010, Rogla 4. Februar 2012.

<http://www.zaps.si/img/admin/file/SPAS11/kema%20Trajnostno%20certificiranje%20objektov.pdf>. (Pridobljeno 25.8.2012).

Springolo, M. 2005. New fibre-reinforced polymer box beam: investigation of static behaviour. A dissertation submitted for the award of doctor of philosophy. Southern Queensland, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying: str. 13-22 f.

Trimo d.d. 2012. Qbiss Air brošura: 12 str.

[http://www.trimo.si/media/qbiss-air-brochure-en\\_21332.pdf](http://www.trimo.si/media/qbiss-air-brochure-en_21332.pdf) (Pridobljeno 2.10.2012).

Trimo d.d. 2011. Tehnični list Qbiss Air, verzija 3: 42 str.

Trival kompoziti. Vlečeni profili Trivapul. 2012.

<http://www.trival-kompoziti.si/slo/vlečenje.htm> (Pridobljeno 12.10.2012).

Wienerberger, 2004. Wärmebrückenkatalog Passivhaus – Anschlussdetails, Version 2.

<http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCgQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.austbau.at%2Findex.php%3Fdownload%3D852.pdf&ei=YVFsULHAI6nV4QTI6oGABw&usq=AFQjCNEySbYPbIJn7mg7UxZ9TGrVPf2mHQ&sig2=itDZPuSG2y4s7UO9xkHVpQ&cad=rja> (Pridobljeno 21.9.2012).

Yoshihiro, Y., Hiroaki, Y., Hajime, M. 2008. Effective thermal conductivity of plain weave fabric and its composite material made from high strength fibers.

[http://www.mat.usp.ac.jp/polymer-composite/54\\_111.pdf](http://www.mat.usp.ac.jp/polymer-composite/54_111.pdf) (Pridobljeno 10.10.2012).

Zavod za gradbeništvo Slovenije, 2011. Report N.P 0447/11-520-3 on the initial type calculation of the linear thermal transmittance of the horizontal and vertical joints of the system QBISS AIR according to the standard SIST EN ISO 10211:2008: 11 str.

Žigon, M. 1996. Polimerni kompoziti. Kemijski inštitut, Ljubljana.

[http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=%C5%BEigon%20polimerni%20kompoziti%20pdf&source=web&cd=17&cad=rja&ved=0CD4QFjAGOAo&url=http%3A%2F%2Fwww.dlib.si%2Fstream%2FURN%3ANBN%3ASI%3ADOC-OF20BM96%2Fee3d099f-eff3-4ffb-a174-18672250f0d8%2FPDF&ei=N2eIUMDPLMSj4gSjzoDgDw&usg=AFQjCNGps990kU8jEN73\\_CEMUWghKlutHQ](http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=%C5%BEigon%20polimerni%20kompoziti%20pdf&source=web&cd=17&cad=rja&ved=0CD4QFjAGOAo&url=http%3A%2F%2Fwww.dlib.si%2Fstream%2FURN%3ANBN%3ASI%3ADOC-OF20BM96%2Fee3d099f-eff3-4ffb-a174-18672250f0d8%2FPDF&ei=N2eIUMDPLMSj4gSjzoDgDw&usg=AFQjCNGps990kU8jEN73_CEMUWghKlutHQ) (Pridobljeno 5.10.2012).

Žnidaršič, M. 2011. Visokoizolacijski materiali v sodobnih stavbah, 2. del.

<http://www.energijadoma.si/znanje/strokovnjak-svetuje/visokoizolacijski--materiali-v-sodobnih-stavbah-2-del> (Pridobljeno 15.10.2012).

### **Standardi:**

SIST EN ISO 6946:2008. Gradbene komponente in gradbeni elementi – Toplotna upornost in toplotna prehodnost – Računska metoda.

SIST EN ISO 10077-2:2004. Toplotne lastnosti oken, vrat in polken – Izračun toplotne prehodnosti – 2. del: Računska metoda za okvirje.

SIST EN ISO 10211:2008. Toplotni mostovi v stavbah – Toplotni tokovi in površinske temperature – Podrobni izračuni.

SIST EN ISO 10456:2008. Gradbeni materiali in proizvodi - Higrotermalne lastnosti - Tabelirane računske vrednosti in postopki za določevanje nazivnih in računskih vrednosti toplotnih vrednosti.

SIST EN ISO 13370:2008. Toplotne karakteristike stavb – Prenos toplote skozi zemljo - Računske metode.

SIST EN ISO 13788:2002. Higrotermalno obnašanje sestavnih delov stavb in elementov stavb - Notranja površinska temperatura za preprečevanje kritične vlage ob površini in kondenzacije v konstrukciji – Računska metoda.

SIST EN ISO 14683:1999. Toplotni mostovi v stavbah – linearna toplotna prehodnost – poenostavljena metoda iz privzete vrednosti.

### **Zakoni in predpisi:**

Evropska direktiva o gradbenih proizvodih - Construction Products Directive (CPD) 89/106/EEC.

Evropska direktiva o energetske učinkovitosti stavb (Energy performance of buildings directive (EPBD) št. 2010/31/EU.

Evropska direktiva o energetske učinkovitosti stavb (Energy performance of buildings directive (EPBD) št. 2002/91/ES.

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. UL RS št. 52/2010: 2856.

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. UL RS št. 93/2008: 3939.

Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije. 2010.

<http://www.enforce-eeen.eu/slo/pures-2010/pravilnik-o-energetski-ucinkovitosti-stavb>  
2.9.2012).

(Pridobljeno