

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:

Zupančič, L. 2012. Primeri uporabe programa Abaqus za stacionarne toplotne analize. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B., somentorica Šijanec Zavrl, M.): 68 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:

Zupančič, L. 2012. Primeri uporabe programa Abaqus za stacionarne toplotne analize. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B., co-supervisor Šijanec Zavrl, M.): 68 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

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNOTEHNIČNA  
SMER**

Kandidat:

**LUKA ZUPANČIČ**

**PRIMERI UPORABE PROGRAMA ABAQUS ZA  
STACIONARNE TOPLOTNE ANALIZE**

Diplomska naloga št.: 475/PTS

**EXAMPLES OF STEADY-STATE HEAT TRANSFER  
ANALYSIS WITH ABAQUS COMPUTER CODE**

Graduation thesis No.: 475/PTS

**Mentor:**

prof. dr. Boštjan Brank

**Predsednik komisije:**

doc. dr. Tomo Cerovšek

**Somentorica:**

dr. Marjana Šijanec Zavrl

**Član komisije:**

izr. prof. dr. Jože Lopatič

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, \_\_\_\_\_

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **Luka Zupančič** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»Primeri uporabe programa Abaqus za stacionarne toplotne analize«.**

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

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

Ljubljana, 12.11.2012

.....

(podpis kandidata)

**BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>536.3/.8:624.04/.07(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Luka Zupančič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Boštjan Brank</b>
<b>Somentorica:</b>	<b>dr. Marjana Šijanec Zavrl</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Primeri uporabe programa Abaqus za stacionarne toplotne analize</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>68 str., 19 pregl., 77 sl.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>Toplotni tok, površinska temperatura, faktor toplotnega upora, toplotni most</b>

**Izveček**

Energetsko varčna gradnja je dandanes vse bolj uveljavljena. Razloge gre iskati v vse višjih cenah fosilnih goriv in sočasnemu napredku v tehnologiji pridobivanja energije iz alternativnih virov. Svoj delež pa prispeva tudi vse večje zavzemanje skupnosti za trajnostni razvoj.

Dobršen del toplotnih izgub predstavljajo toplotni mostovi. V diplomskem delu sem pokazal razliko v porabi energije med energetsko varčnim objektom v primerjavi z objektom s slabšo toplotno zaščito. Podal sem primer, kako toplotni mostovi vplivajo na energetsko bilanco stavbe. Za natančnejše analize toplotnih mostov, sem pripravil postopke in analize rezultatov vseh štirih validacijskih primerov vzetih iz standarda SIST EN ISO 10211:2008. Za reševanje teh primerov sem uporabil računalniški program Abaqus, ki temelji na analiziranju problemov z metodo končnih elementov.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 536.3/.8:624.04/.07(043.2)  
**Author:** Luka Zupančič  
**Supervisor:** prof. Boštjan Brank, Ph.D.  
**Co- Supervisor:** Marjana Šijanec Zavrl, Ph.D.  
**Title:** Examples of steady-state heat transfer analysis with Abaqus computer code  
**Scope and tools:** 68 p., 19 tab., 77 fig.  
**Keywords:** Heat flow, surface temperature , temperature factor, thermal bridge

### **Abstract**

Energy efficient construction is becoming increasingly important. One of the key reasons would include the rising prices of fossil fuels with concomitant advances in renewable energy technologies, supported by growing commitment to sustainable community development.

Thermal bridging can have a significant impact on thermal and energy performance of building envelope. In have illustrated the difference in overall heat loss between the low-energy house in comparison with an average contemporary house. I have provided an example of impact that thermal bridges have on energy demand of building. For more detailed calculations of thermal bridges, i have prepared a step-by-step guide for all four test reference cases from SIST EN ISO 10211:2008. All cases have been calibrated to sufficient accuracy. Calculations were made with Abaqus, software application for finite element analysis and computer-aided engineering.

## ZAHVALA

Za nasvete in strokovno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se lepo zahvaljujem mentorju prof. dr. Boštjanu Branku in somentorici dr. Marjani Šijanec Zavrl.

Prav posebna zahvala pa je namenjena družini. Hvala za podporo in vse spodbude, še posebej tiste v težkih obdobjih študija.

Luka Zupančič

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REŠEVANJE RAVNINSKIH PRIMEROV IZ STANDARDA SIST EN ISO 10211:2008.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Uporabniški vmesnik programa Abaqus/CAE</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>Primer 1: Plošča s predpisano temperaturo po robovih</b>	<b>3</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Geometrija in podatki</b>	<b>3</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Oblikovanje geometrije – Modul »Part«</b>	<b>4</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Določitev materialov – Modul »Property«</b>	<b>6</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Določitev prerezov – Modul »Property«</b>	<b>7</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Sestavljanje modela – Modul »Assembly«</b>	<b>9</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Definiranje korakov analize – Modul »Step«</b>	<b>10</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Definiranje robnih pogojev – Modul »Load«</b>	<b>11</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Mreženje modela – Modul »Mesh«</b>	<b>11</b>
<b>2.2.9</b>	<b>Priprava analize – Modul »Job«</b>	<b>13</b>
<b>2.2.10</b>	<b>Rezultati analize – Modul »Visualization«</b>	<b>15</b>
<b>2.2.11</b>	<b>Analiza rezultatov Primera 1</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Primer 2: Stena iz različnih materialov</b>	<b>18</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Geometrija in podatki</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Oblikovanje geometrije – Modul »Part«</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Določitev materialov – Modul »Property«</b>	<b>21</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Določitev prerezov – Modul »Property«</b>	<b>21</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Sestavljanje modela – Modul »Assembly«</b>	<b>23</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Definiranje korakov analize – Modul »Step«</b>	<b>23</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Definiranje interakcij – Modul »Interaction«</b>	<b>24</b>
<b>2.3.8</b>	<b>Mreženje modela – Modul »Mesh«</b>	<b>25</b>
<b>2.3.9</b>	<b>Priprava analize – Modul »Job«</b>	<b>26</b>
<b>2.3.10</b>	<b>Rezultati analize – Modul »Visualization«</b>	<b>26</b>
<b>2.3.11</b>	<b>Analiza rezultatov Primera 2</b>	<b>27</b>

<b>3</b>	<b>REŠEVANJE PROSTORSKIH PRIMEROV IZ STANDARDA SIST EN ISO 10211:2008 .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Primer 3: Vogal z balkonom</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Geometrija in podatki</b>	<b>29</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Oblikovanje geometrije – Modul »Part«</b>	<b>30</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Določitev materialov – Modul »Property«</b>	<b>31</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Določitev prerezov – Modul »Property«</b>	<b>31</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Sestavljanje modela – Modul »Assembly«</b>	<b>33</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Določitev stikov – Modul »Interaction«</b>	<b>34</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Definiranje korakov analize – Modul »Step«</b>	<b>36</b>
<b>3.1.8</b>	<b>Definiranje interakcij – Modul »Interaction«</b>	<b>36</b>
<b>3.1.9</b>	<b>Mreženje modela – Modul »Mesh«</b>	<b>36</b>
<b>3.1.10</b>	<b>Priprava analize – Modul »Job«</b>	<b>38</b>
<b>3.1.11</b>	<b>Rezultati analize – Modul »Visualization«</b>	<b>38</b>
<b>3.1.12</b>	<b>Analiza rezultatov Primera 3</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Primer 4: Točkovni toplotni most</b>	<b>44</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Geometrija in podatki</b>	<b>44</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Oblikovanje geometrije – Modul »Part«</b>	<b>45</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Določitev materialov – Modul »Property«</b>	<b>47</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Določitev prerezov – Modul »Property«</b>	<b>48</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Sestavljanje modela – Modul »Assembly«</b>	<b>49</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Definiranje korakov analize – Modul »Step«</b>	<b>49</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Definiranje interakcij – Modul »Interaction«</b>	<b>50</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Mreženje elementa – Modul »Mesh«</b>	<b>50</b>
<b>3.2.9</b>	<b>Priprava analize – Modul »Job«</b>	<b>53</b>
<b>3.2.10</b>	<b>Rezultati analize – Modul – »Visualization«</b>	<b>53</b>
<b>3.2.11</b>	<b>Analiza rezultatov Primera 4</b>	<b>55</b>
<b>3.2.12</b>	<b>Alternativna rešitev</b>	<b>56</b>
<b>3.3</b>	<b>Zaključek</b>	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>POROČILO O IZRAČUNU TOPLOTNE BILANCE STAVBE.....</b>	<b>59</b>



<b>4.1</b>	<b>Karakteristike objekta SFH-O5</b>	<b>60</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Lokacija in geometrija</b>	<b>60</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Meteorološki podatki in projektne temperature</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Konstruktivski sklopi</b>	<b>61</b>
<b>4.1.3.1</b>	<b>Zunanja stena</b>	<b>61</b>
<b>4.1.3.2</b>	<b>Streha</b>	<b>62</b>
<b>4.1.3.3</b>	<b>Tla na terenu</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Strojne in elektro inštalacije</b>	<b>64</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Ogrevanje</b>	<b>64</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Prezračevanje</b>	<b>64</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Razsvetljava</b>	<b>64</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Rezultati izračuna</b>	<b>65</b>
<b>4.3</b>	<b>Sklep</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>68</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>69</b>

**KAZALO TABEL**

Tabela 1: Temperature v kontrolnih točkah Primera 1 po ISO 10211 .....	17
Tabela 2: Temperature v kontrolnih točkah Primera 1 izračunane s programom Abaqus/CAE, analiza s 3200 končnimi elementi tipa DC2D4 gostote 1 mm.....	17
Tabela 3: Razlika temperatur med standardom ISO 10211 in Abaqus/CAE.....	17
Tabela 4: Temperature v kontrolnih točkah Primera 2 po ISO 10211 .....	27
Tabela 5: Temperature v kontrolnih točkah Primera 2 izračunane s programom Abaqus/CAE, analiza z 9500 končnimi elementi tipa DC2D4 gostote 0,5 mm .....	27
Tabela 6: Razlika temperatur med standardom ISO 10211 in Abaqus/CAE.....	27
Tabela 7: Površinski temperaturni faktorji po SIST EN ISO 10211:2008 .....	39
Tabela 8: Površinski temperaturni faktorji po Abaqus/CAE .....	40
Tabela 9: Temperature v točkah V in H v odvisnosti od gostote mreženja .....	41
Tabela 10: Toplotni tok v odvisnosti od gostote mreženja .....	41
Tabela 11: Primerjava toplotnega toka .....	43
Tabela 12: Primerjava toplotnega toka .....	55
Tabela 13: Primeri skladnih metričnih enot za računanje prenosa toplote .....	57
Tabela 14: Primer skladnih metrični enot .....	58
Tabela 15: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi zunanjo steno .....	61
Tabela 16: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi streho .....	62
Tabela 17: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi tla na terenu .....	63
Tabela 18: Parametri energetske učinkovitosti v odvisnosti od kvalitete toplotnih mostov pri dobro izolirani stavbi .....	65
Tabela 19: Parametri energetske učinkovitosti v odvisnosti od kvalitete toplotnih mostov pri slabo izolirani stavbi .....	66

## KAZALO SLIK

Slika 1: Uporabniški vmesnik programa Abaqus, vir: MKE Praktikum za Abaqus .....	2
Slika 2: Geometrija in podatki Primera 1, vir: SIST EN ISO 10211:2008 .....	3
Slika 3: Pogovorno okno "Create Part" .....	4
Slika 4: Drevo modela, ukaz "Parts" .....	4
Slika 5: Ukaz, "Create Lines" .....	4
Slika 6: Ukaz "Add Dimension" .....	5
Slika 7: Geometrija Primera 1 .....	5
Slika 8: Drevo modela, ukaz "Materials" .....	6
Slika 9: Vnos toplotne prevodnosti .....	7
Slika 10: Pogovorno okno "Edit Material" .....	7
Slika 11: Drevo modela, ukaz "Sections" .....	7
Slika 12: Pogovorno okno "Create Section" .....	8
Slika 13: Pogovorno okno "Edit Section" .....	8
Slika 14: Drevo modela, ukaz "Section Assignments" .....	8
Slika 15: Pogovorno okno "Edit Section Assignment" .....	9
Slika 16: Drevo modela, ukaz "Instances" .....	9
Slika 17: Pogovorno okno "Create Instance" .....	9
Slika 18: Drevo modela, ukaz "Steps" .....	10
Slika 19: Pogovorno okno "Edit Step" .....	10
Slika 20: Pogovorno okno "Create Step" .....	10
Slika 21: Pogovorno okno "Create Boundary Condition" .....	11
Slika 22: Pogovorno okno "Edit Boundary Condition" .....	11
Slika 23: Drevo modela, ukaz "Mesh" .....	12
Slika 24: Ukaz "Assign Element Type" .....	12
Slika 25: Pogovorno okno "Element type" .....	12
Slika 26: Ukaz "Assign Mesh Controls" .....	12
Slika 27: Pogovorno okno "Mesh Controls" .....	13
Slika 28: Ukaz "Seed Part" .....	13
Slika 29: Ukaz "Mesh Part" .....	13
Slika 30: Pogovorno okno "Create Job" .....	14

Slika 31: Pogovorno okno "Edit Job" .....	14
Slika 32: Ukaz "Submit" .....	14
Slika 33: Ukaz "Monitor" .....	14
Slika 34: Ukaz "Results" .....	15
Slika 35: Pogovorno okno "Field Output" .....	15
Slika 36: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 1 .....	16
Slika 37: Geometrija Primera 2, vir: SIST EN ISO 10211:2008 .....	18
Slika 38: Deli prereza Primera 2 .....	20
Slika 39: Pogovorno okno "Edit Section" .....	21
Slika 40: Section-1 z lastnostmi materiala Beton .....	22
Slika 41: Section-2 z lastnostmi materiala Les .....	22
Slika 42: Section-3 z lastnostmi materiala Toplotna izolacija .....	22
Slika 43: Section-4 z lastnostmi materiala Aluminij .....	23
Slika 44: Ukaz "by angle" .....	24
Slika 45: Pogovorno okno " Create Interaction" .....	24
Slika 46: Pogovorno okno "Edit Interaction" .....	24
Slika 47: Geometrija za mreženje Primera 2 .....	25
Slika 48: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 2 .....	26
Slika 49: Toplotni tok skozi prerez .....	28
Slika 50: Geometrija Primera 3, vir: SIST EN ISO 10211:2008 .....	29
Slika 51: "Geometrija Primera 3" .....	30
Slika 52: Section - 5 z lastnostmi Material – 5 .....	32
Slika 53: "Part-1" .....	32
Slika 54: "Part-2" .....	32
Slika 55: "Part-3" .....	33
Slika 56: "Part-4" .....	33
Slika 57: Surface Part-2 na Part -3 .....	34
Slika 58: Surface Part-3 na Part-2 .....	34
Slika 59: Stična površina .....	35
Slika 60: Stična površina .....	35
Slika 61: Mreža končnih elementov Primera 3 .....	37
Slika 62: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 3 .....	38

Slika 63: Geometrija Primera 4, vir: SIST EN ISO 10211:2008 .....	44
Slika 64: Particije Primera 4 .....	46
Slika 65: Površina za Solid Extrude .....	47
Slika 66: Toplotna izolacija .....	48
Slika 67: Jeklena palica .....	49
Slika 68: Robovi-jeklena palica .....	51
Slika 69: Smer zgostitve mreže na notranji strani .....	52
Slika 70: Smer zgostitve mreže na zunanji strani .....	52
Slika 71: Mreža končnih elementov Primera 4 .....	52
Slika 72: Razpored temperatur skozi os jeklene palice .....	54
Slika 73: Toplotni tok skozi os jeklene palice .....	54
Slika 74: Temperaturna porazdelitev .....	56
Slika 75: Zunanja stena .....	61
Slika 76: Streha .....	62
Slika 77: Tla na terenu .....	63



## 1 UVOD

Diplomska naloga je kratek povzetek dveh, mogoče nekoliko vsebinsko ločenih področij, ki pa se obe nanašata na račun prehajanja toplote v stavbah. V prvem delu naloge sem se osredotočil na detajle stavbe. Predvsem toplotne mostove, ter računalniško modeliranje in analiziranje. Ta del je predstavljal večji del naloge, zato je tudi bolj natančno obravnavan. V drugem delu naloge pa prikažem, kako se izdelava izračun toplotne bilance stavbe. Takšne izračune sem v okviru diplomske naloge opravljal na Gradbenem inštitutu ZRMK.

Osnova za delo sta bila standard SIST EN ISO 10211:2008 in računalniški program Abaqus/CAE verzije 10.6-1. Pripravil sem rešitve vseh štirih validacijskih primerov iz omenjenega standarda in pripravil navodila za modeliranje in analizo le-teh s programom Abaqus.

Standard SIST EN ISO 10211:2008 je privzeti evropski harmonizirani standard, ki je bil potrjen 1. maja 2008 in nadomešča predhodne standarde:

- SIST EN ISO 10211-1:1997
- SIST EN ISO 10211-1/1997/AC:2002
- SIST EN ISO 10211-2:2002

Obravnava toplotne mostove v stavbah, toplotne tokove in površinske temperature. Predpisuje metodologijo za določitev računskega modela. Med drugim navaja:

- Pravila za postavitev razdelilnih ravnin.
- Postopke za poenostavitev računskega modela.
- Navodila za določitev toplotnih prevodnosti in robnih pogojev.
- Pravila za izračun in določanje temperaturne porazdelitve.
- Pravila za določanje faktorjev toplotne sklopitve.

Celoten standard temelji na naslednjih predpostavkah:

- Stacionarno stanje pri prenosu toplote.
- Fizikalne (mehanične) lastnosti materiala so neodvisne od temperature.
- V elementih stavbe ni nobenih notranjih virov toplote.

Standard predpisuje natančne numerične metode za računanje toplotnih tokov. Poenostavljene metode predpisuj sorodni standard ISO 14683.

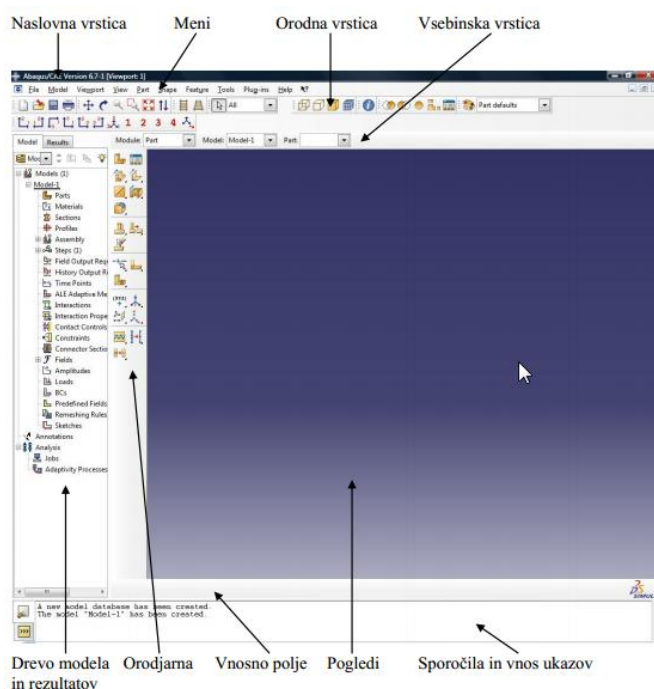
## 2 REŠEVANJE RAVNINSKIH PRIMEROV IZ STANDARDA SIST EN ISO 10211:2008

### 2.1 Uporabniški vmesnik programa Abaqus/CAE

Program Abaqus CAE je orodje, s katerim pripravljamo numerične modele in izvajamo numerične analize po metodi končnih elementov. Program omogoča enostavno kreiranje in upravljanje numeričnih modelov. Razdeljen je na posamezne module, v katerih na različne načine obravnavamo numeričen model. Tako v posameznem modulu določimo geometrijo, materialne lastnosti in izdelamo mrežo končnih elementov. S preklapljanjem med posameznimi moduli postopoma izgradimo celoten numeričen model.

S programom lahko naredimo tudi simulacije prehoda toplote. Postopki za izvedbo analize primerov iz standarda SIST EN ISO 10211:2008 so opisani v nadaljevanju. Program v slovenski različici še ne obstaja, zato bodo vsi uporabljeni ukazi zapisani v angleščini.

Pri izvedbi analize smo upoštevali stacionarno stanje. Prenos toplote s konvekcijo in kondukcijo. Ter izotropne lastnosti uporabljenih materialov.

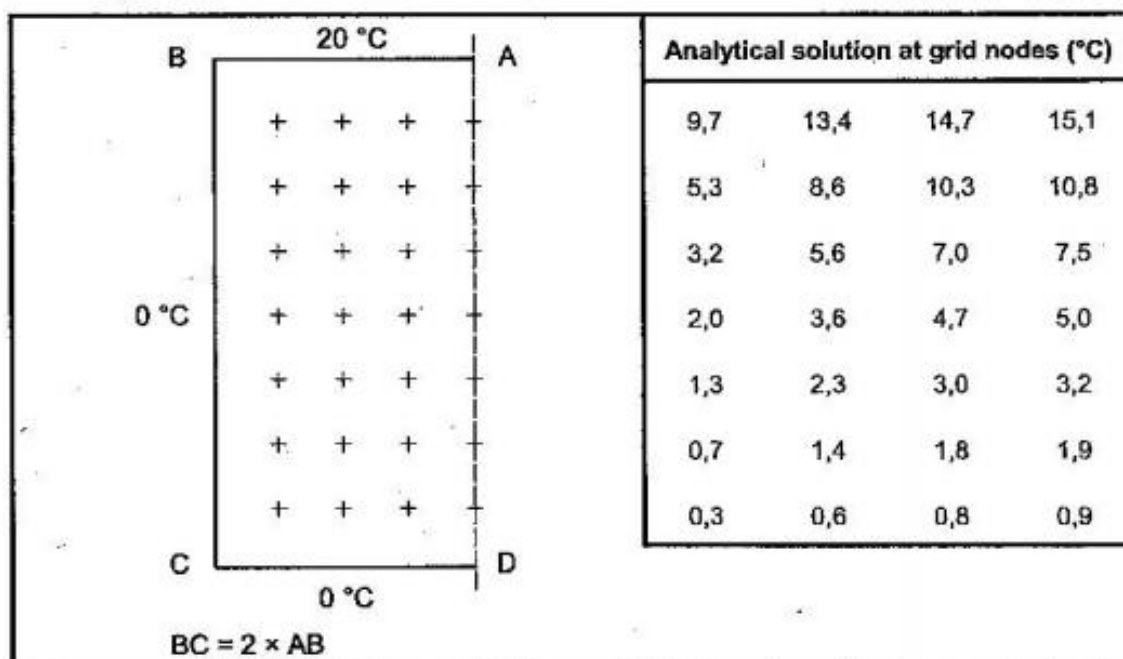


Slika 1: Uporabniški vmesnik programa Abaqus, vir: MKE Praktikum za Abaqus



## 2.2 Primer 1: Plošča s predpisano temperaturo po robovih

### 2.2.1 Geometrija in podatki



Slika 2: Geometrija in podatki Primera 1, vir: SIST EN ISO 10211:2008

Primer 1 se nanaša na prenos toplote skozi polovico kvadratne plošče. Na sliki so podane analitične rešitve za temperaturo v 28-ih simetrično razporejenih kontrolnih točkah.

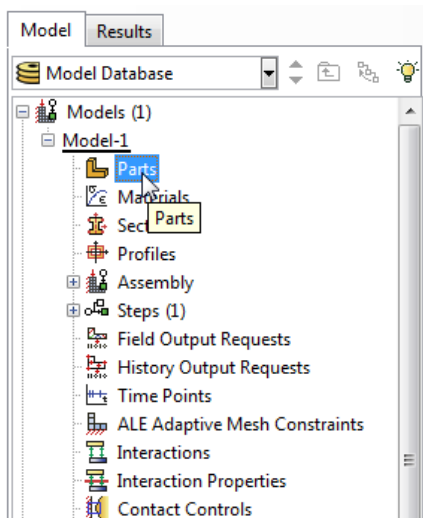
Robni pogoji so naslednji. Na zgornjem robu je temperatura 20°C. Na spodnjem in levem robu pa 0°C. Ostalih podatkov standard ne podaja. Toplotna prevodnost plošče je nujen podatek za uspešen izračun analize, zato jo v programu moramo definirati. V izračun sem vzel vrednost  $\lambda = 1,0$  W/(m·K). Vrednost  $\lambda$  lahko poljubno izberemo, saj v tem primeru ne vpliva na vrednost temperatur v kontrolnih točkah.

Na desnem robu plošče, rob AD, upoštevamo adiabatske robne pogoje. Čez ta rob toplota ne prehaja. Abaqus/CAE v analizi toplotne prehodnosti vsak rob, ki nima posebej definiranih robnih pogojev, upošteva kot rob z adiabatskimi robnimi pogoji. Zato te lastnosti ni potrebno posebej definirati.

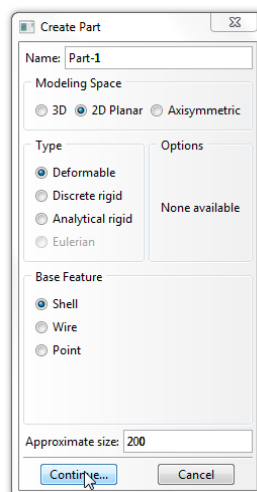
### 2.2.2 Oblikovanje geometrije – Modul »Part«

Zaženemo program in izberemo “Create Model Database” → “With Standard/Explicit Model”.

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Parts”. Odpre se pogovorno okno “Create Part”.



Slika 3: Pogovorno okno "Create Part"



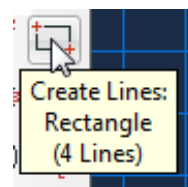
Slika 4: Drevo modela, ukaz "Parts"

V pogovornem oknu “Create Part” določimo:

- V polju “Name” poljubno poimenujemo ali sprejmemo Part-1.
- V “Modeling space” izberemo 2D Planar.
- Izberemo “Deformable” kot “Type”.
- Izberemo “Base Feature” kot “Shell”.
- V polje “Approximate size” vnesemo okvirno velikost (100).
- Kliknemo “Continue...”.

V orodjarni izberemo “Create Lines: Rectangle”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza.

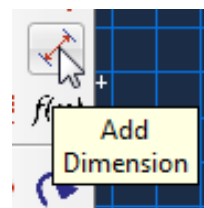
- Pick a starting corner for the rectangle – or enter X,Y: (0,0) → Enter.
- Pick the opposite corner for the rectangle – or enter: (40,80) → Enter.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.



Slika 5: Ukaz, "Create Lines"

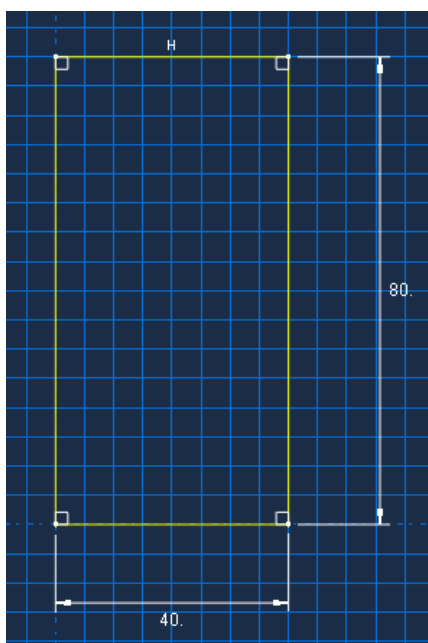
Z ukazom “Add Dimension” lahko po potrebi spreminjamo dimenzije v geometriji:

- S klikom izberemo stranico, ki ji želimo določiti dimenzijo.
- Kliknemo ponovno zunaj modela, tam kjer želimo da stoji tekst.
- V vnosnem polju vpišemo želeno dimenzijo “New dimension:”, vnesemo  $d = 40$ .
- Enako naredimo za daljšo stranico dimenzije 80.
- S tipko “ Enter” potrdimo izbor.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancle procedure”.



**Slika 6: Ukaz  
"Add  
Dimension"**

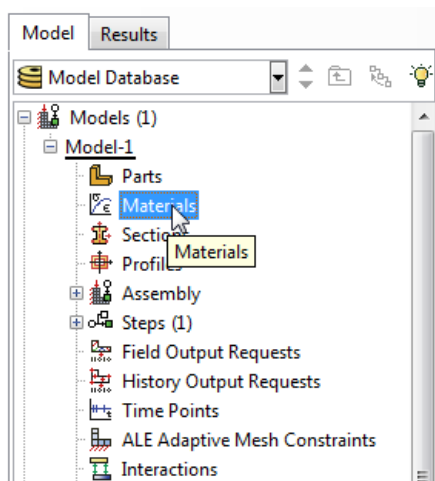
Geometrija za Primer 1 je prikazana na sliki. Za potrditev geometrije v vnosnem polju kliknemo “ Done”.



**Slika 7: Geometrija Primera 1**

### 2.2.3 Določitev materialov – Modul »Property«

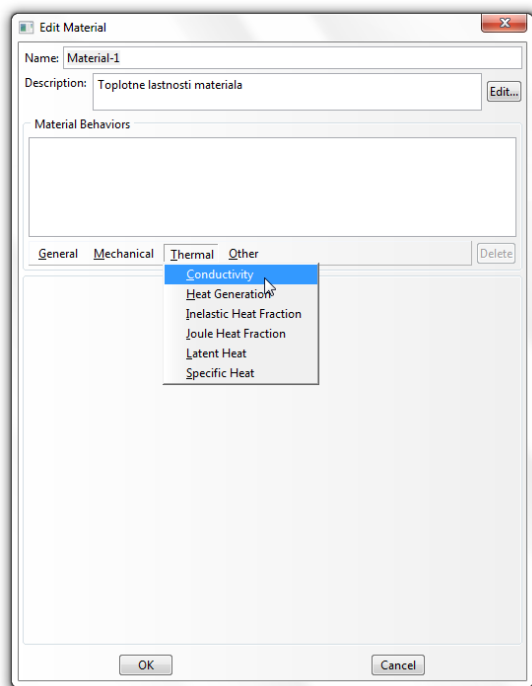
V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Materials”.



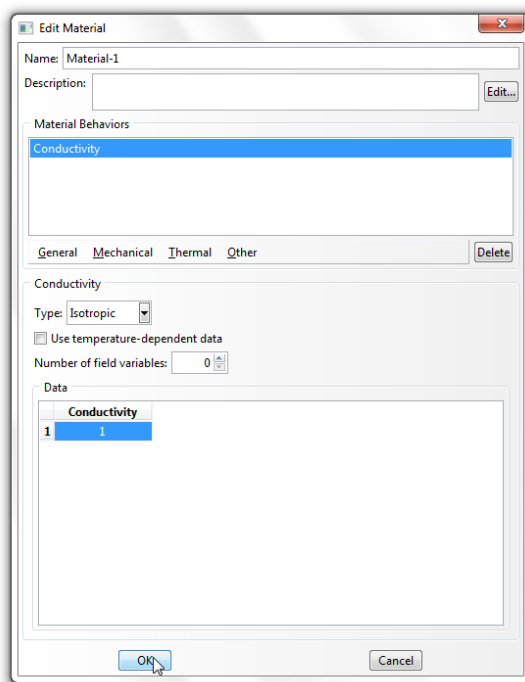
**Slika 8: Drevo modela, ukaz "Materials"**

V pogovornem oknu "Edit Material" določimo:

- V polju "Name" poljubno poimenujemo ali prevzamemo Material-1.
- V polje "Description" vnesemo opis, toplotne lastnosti materiala.
- Kliknemo na zavihek "Thermal" in izberemo "Conductivity"
- V polje "Conductivity" podamo toplotno prevodnost v izbranih enotah, vnesemo  $\lambda = 1$ .
- Abaqus nima definiranih standardnih enot, zato je vsak uporabnik odgovoren da vnese skladen nabor enot s pravimi količinami.
- Za nadaljevanje kliknemo "OK".



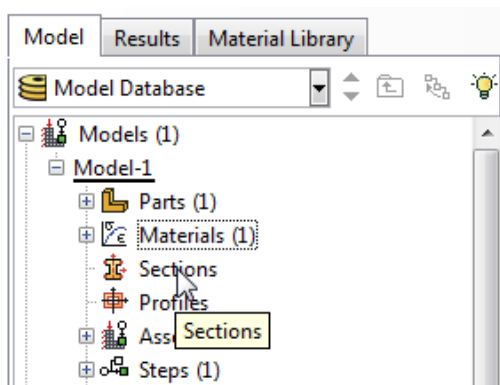
Slika 9: Vnos toplotne prevodnosti



Slika 10: Pogovorno okno "Edit Material"

#### 2.2.4 Določitev prerezov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Sections".



Slika 11: Drevo modela, ukaz "Sections"

Odpre se pogovorno okno "Create Section".

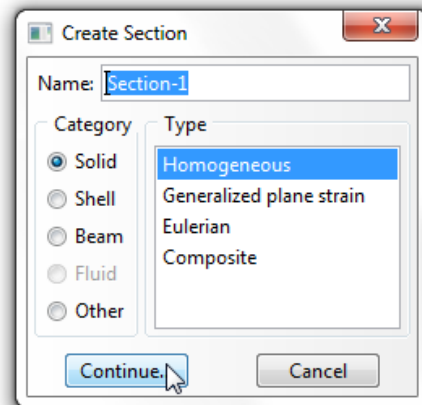
V pogovornem oknu "Create Section" določimo:

- V polju "Name" poimenujemo ali prevzamemo kot Section-1.
- Nastavimo "Solid" kot "Category".
- Nastavimo "Homogeneous" kot "Type".

Potrdimo s klikom na "Continue...".

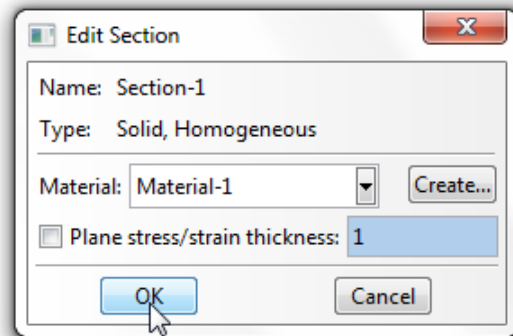
Odpre se pogovorno okno "Edit Section".

- Pripadajočemu Section -1 pripišemo zgoraj definirani Material-1 .
- Potrdimo s klikom na "OK".

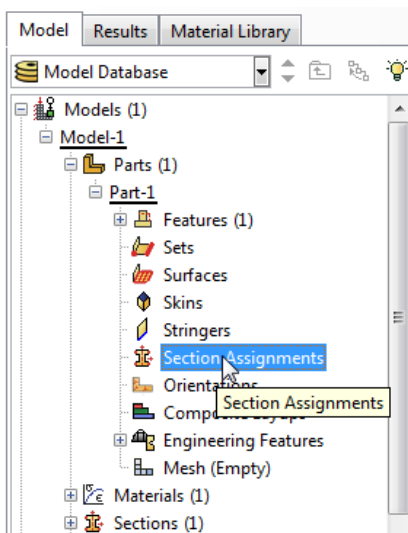


Slika 12: Pogovorno okno "Create Section"

V drevesu modela razširimo poglavje "Parts" in podpoglavje "Part-1" ter dvakrat kliknemo na "Section Assignments".



Slika 13: Pogovorno okno "Edit Section"



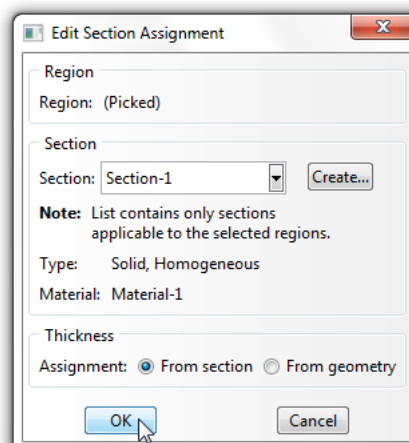
Slika 14: Drevo modela, ukaz "Section Assignments"

V pogledu kliknemo na geometrijo.

V vnosnem polju kliknemo "Done".

Odpre se pogovorno okno "Edit Section Assignment":

- Izberemo Section-1 z lastnostmi Material-1.
- Kliknemo "OK".

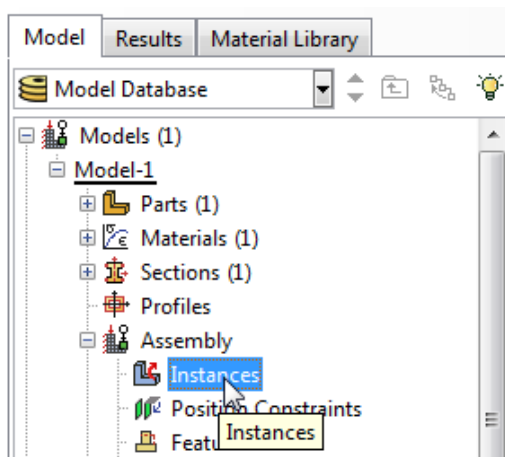


Slika 15: Pogovorno okno "Edit Section Assignment"

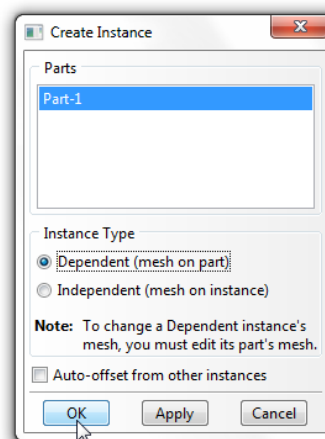
### 2.2.5 Sestavljanje modela – Modul »Assembly«

V drevesu modela razširimo poglavje "Assembly" in kliknemo na "Instances":

- Izberemo "Dependent" kot "Instance Type".
- Kliknemo "OK".



Slika 16: Drevo modela, ukaz "Instances"

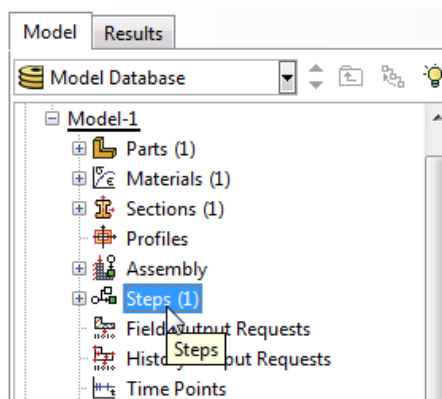


Slika 17: Pogovorno okno "Create Instance"

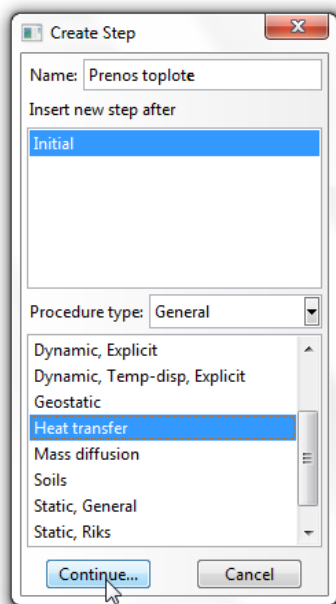
### 2.2.6 Definiranje korakov analize – Modul »Step«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Steps":

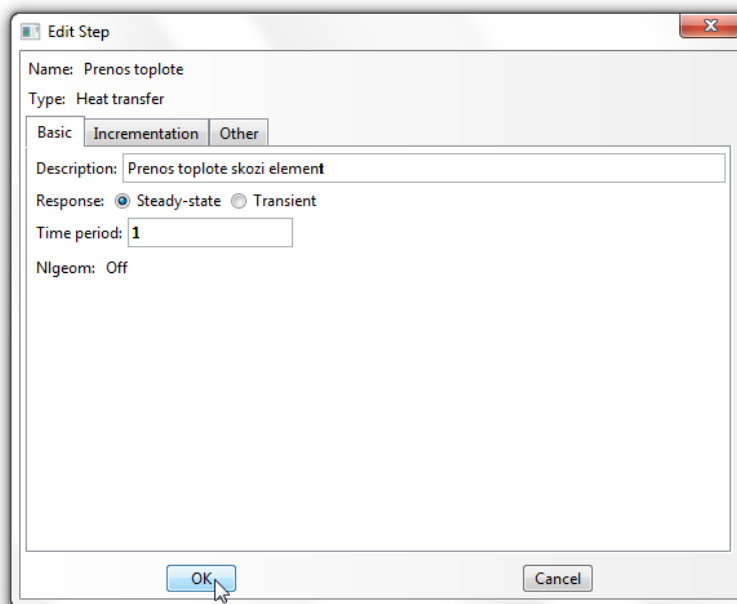
- Poimenujemo korak (Prenos toplote).
- "Procedure type" nastavimo kot "General".
- Izberemo "Heat Transfer".
- Kliknemo "Continue...".
- Dodamo opis koraka v polje "Description".
- Spremenimo "Response" v "Steady – state",  
pojavi se obvestilo, kliknemo "Dismiss".
- Kliknemo "OK".



Slika 18: Drevo modela, ukaz "Steps"



Slika 20: Pogovorno okno "Create Step"



Slika 19: Pogovorno okno "Edit Step"



### 2.2.7 Definiranje robnih pogojev – Modul »Load«

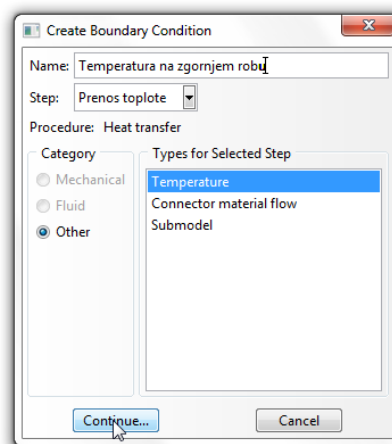
V drevesu modela dvakrat kliknemo na “BCs”.

V pogovornem oknu “Create Boundary Condition”:

- Poimenujemo interakcijo (Temperatura na zgornjem robu).
- Nastavimo Prenos toplote kot “Step”.
- Izberemo “Temperature” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.

Z miško v pogledu označimo zgornji rob elementa in

kliknemo “Done” v vnosnem polju.



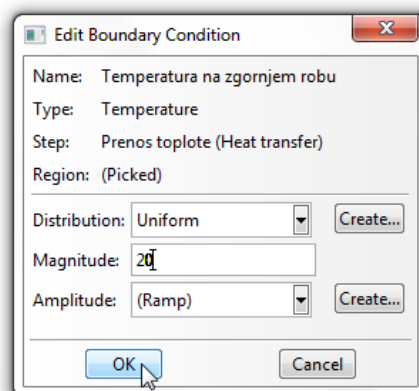
Slika 21: Pogovorno okno "Create Boundary Condition"

Odpre se nam pogovorno okno “Edit Boundary Condition”:

- Vnesemo vrednost za “Magnitude” (20).
- Sprejmemo ostale prednastavljene pogoje.
- Kliknemo “OK”.

Po enakem postopku definiramo tudi robni pogoj na spodnjem in levem robu.

- Temperatura na spodnjem robu → “Magnitude” (0).
- Temperatura na levem robu → “Magnitude” (0).



Slika 22: Pogovorno okno "Edit Boundary Condition"

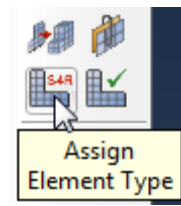
### 2.2.8 Mreženje modela – Modul »Mesh«

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” in dvakrat kliknemo na “Mesh”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Element Type”.



**Slika 23: Drevo modela, ukaz "Mesh"**

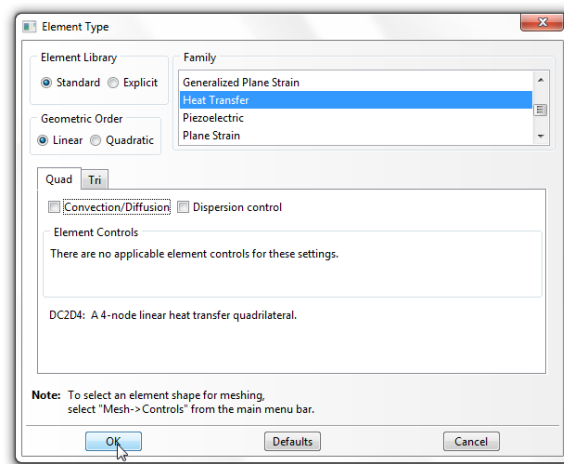


**Slika 24: Ukaz "Assign Element Type"**

V pogledu z miško kliknemo na geometrijo in kliknemo "Done" v vnosnem polju.

Odpre se pogovorno okno "Element Type":

- Izberemo "Standard" kot "Type".
- Izberemo "Linear" kot "Geometric Order".
- Določimo "Heat Transfer" v poglavju "Family".
- Ime elementa (DC2D4) in njegov opis sta podana pod "Element Controls".
- Kliknemo "OK".



**Slika 25: Pogovorno okno "Element type"**

V orodjarni kliknemo na ikono "Assign Mesh Controls".

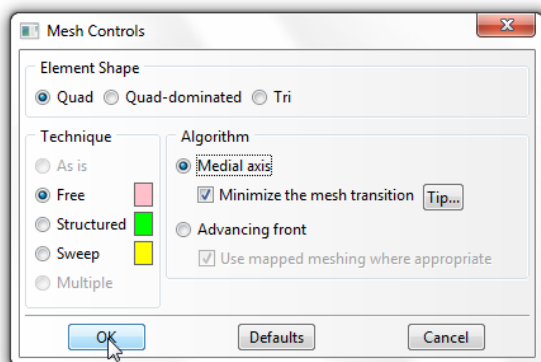
V pogledu z miško kliknemo na geometrijo in kliknemo "Done" v vnosnem polju.



**Slika 26: Ukaz "Assign Mesh Controls"**

Odpre se pogovorno okno "Mesh Controls":

- Nastavimo "Element Shape" to "Quad".
- Spremenimo "Algorithm" v "Medial axis".
- Kliknemo "OK".



**Slika 27: Pogovorno okno "Mesh Controls"**

V orodjarni kliknemo na ikono "Seed Part":

- Nastavimo "Approximate global size" na 1
- Sprejmemo vse ostale nastavitve.
- Kliknemo "OK".



**Slika 28: Ukaz "Seed Part"**

V orodjarni kliknemo na ikono "Mesh Part" in v vnosnem polju kliknemo "Yes".



**Slika 29: Ukaz "Mesh Part"**

## 2.2.9 Priprava analize – Modul »Job«

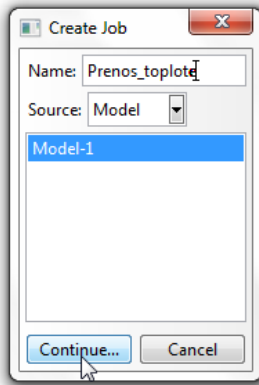
V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Jobs", odpre se pogovorno okno "Create Job":

- Poimenujemo ga (Prenos\_toplote).
- Kliknemo "Continue...".

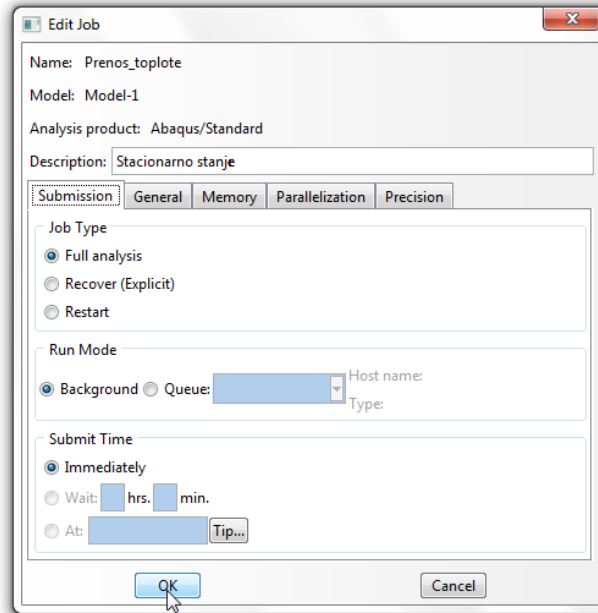
Odpre se pogovorno okno "Edit Job".

Podamo opis v polje "Description" (Stacionarno stanje).

- Kliknemo "OK".



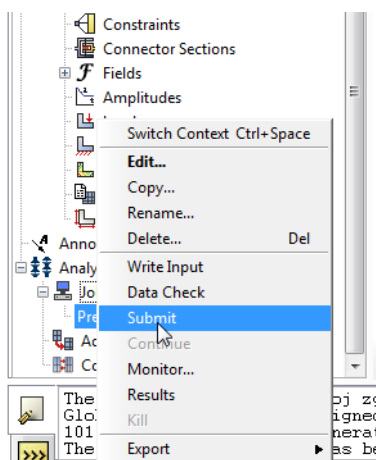
**Slika 30: Pogovorno okno "Create Job"**



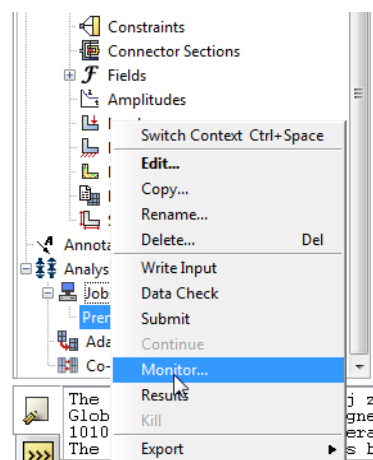
**Slika 31: Pogovorno okno "Edit Job"**

V drevesu modela razširimo poglavje "Jobs" in z desnim gumbom kliknemo na Prenos toplote in izberemo "Submit".

Medtem ko Abaqus izvaja analizo lahko opazujemo napredek, če z desnim gumbom kliknemo na Prenos toplote in izberemo "Monitor".



**Slika 32: Ukaz "Submit"**



**Slika 33: Ukaz "Monitor"**

V oknu “Monitor” lahko opazujemo potek analize in morebitna obvestila o napakah pri izvajanju.

Ko se analiza izvede, se v drevesu modela izpiše Prenos toplote (Completed).

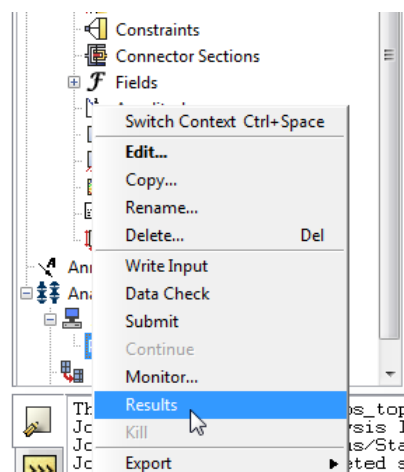
### 2.2.10 Rezultati analize – Modul »Visualization«

Po zaključeni analizi v drevesu modela z desno tipko kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Results”.

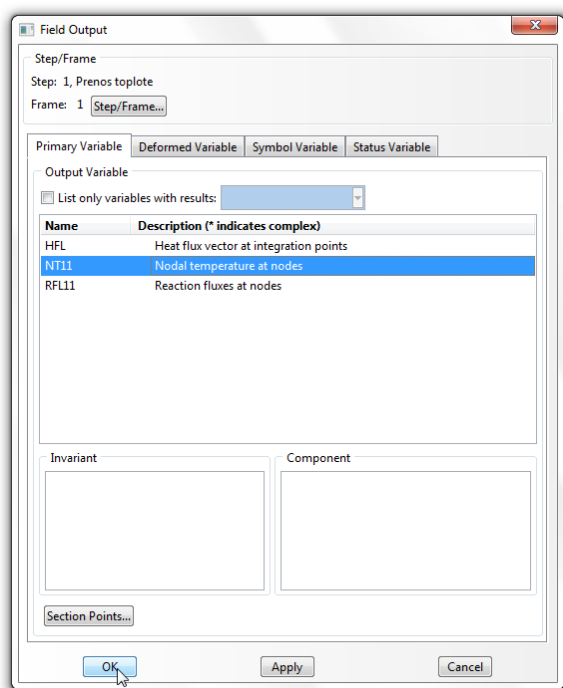
Za prikazovanje rezultatov analize v meniju kliknemo na “Result” in izberemo

“Field Output”:

- Izberemo “NT11” Nodal temperature at nodes.
- Kliknemo “OK”.

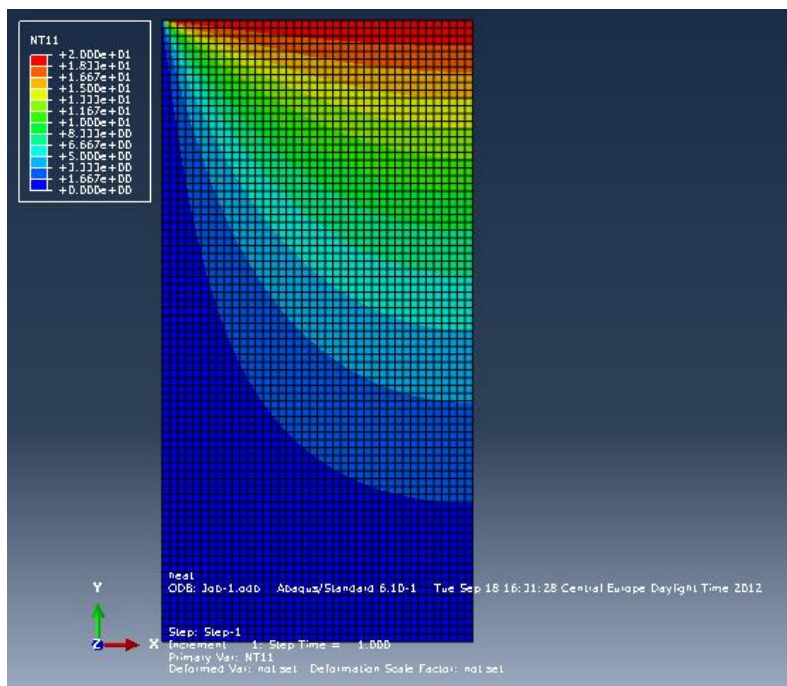


Slika 34: Ukaz "Results"



Slika 35: Pogovorno okno "Field Output"

Za prikaz barvne lestvice temperatur skozi element, v orodjarni kliknemo na “Plot Contours on Deformed Shape”.



**Slika 36: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 1**

Za določitev vrednosti temperature v vozliščih:

- V meniju izberemo “Tools” → “Query”.
- Izberemo “Probe values”.
- Spremeni opcijo “Probe” v “Nodes”.
- Obkljukaj kvadratke pred “Node ID” in “NT11”.
- Z miško se v pogledu premaknemo na zeleno vozlišče in v pogovornem oknu “Probe values” se izpišejo njegove karakteristike.
- Za končanje kliknemo “Cancel”.

### 2.2.11 Analiza rezultatov Primera 1

Standard ISO podaj rezultate v 28-ih kontrolnih točkah, ki so simetrično razporejene po površini prereza. Maksimalna dovoljena razlika med izračunanimi rezultati in rezultati ki jih navaja standard ne sme presegati meje 0,1 °C. Primerjava rezultatov dobljenih s programom Abaqus/CAE in rezultatov podanih v standardu so podane v naslednjih tabelah.

**Tabela 1: Temperature v kontrolnih točkah Primera 1 po ISO 10211**

Temperature po SIST EN ISO 10211:2008 (°C)			
9,7	13,4	14,7	15,1
5,3	8,6	10,3	10,8
3,2	5,6	7,0	7,5
2,0	3,6	4,7	5,0
1,3	2,3	3,0	3,2
0,7	1,4	1,8	1,9
0,3	0,6	0,8	0,9

**Tabela 2: Temperature v kontrolnih točkah Primera 1 izračunane s programom Abaqus/CAE, analiza s 3200 končnimi elementi tipa DC2D4 gostote 1 mm**

Temperatura po Abaqus CAE (°C)			
9,65	13,38	14,73	15,09
5,25	8,64	10,31	10,81
3,19	5,61	7,01	7,46
2,01	3,64	4,66	5,00
1,26	2,31	2,98	3,22
0,74	1,36	1,77	1,91
0,34	0,63	0,82	0,89

**Tabela 3: Razlika temperatur med standardom ISO 10211 in Abaqus/CAE**

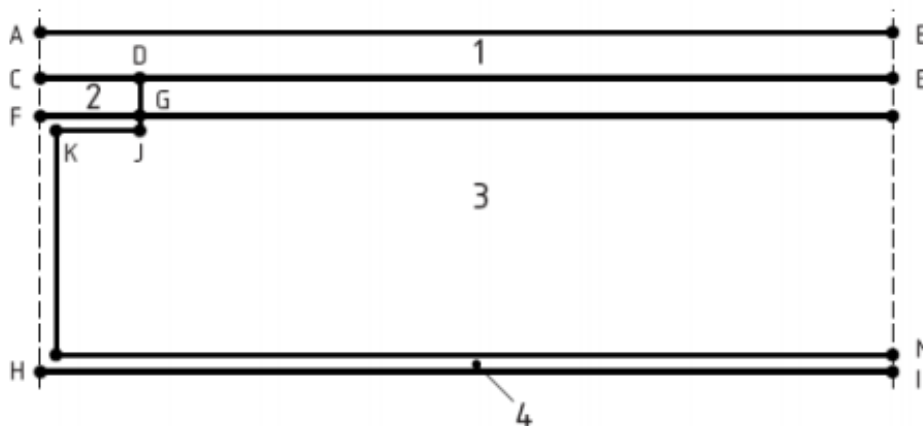
Razlika temperatur (°C)			
0,05	0,02	0,03	0,01
0,05	0,04	0,01	0,01
0,01	0,01	0,01	0,04
0,01	0,04	0,04	0,00
0,04	0,01	0,02	0,02
0,04	0,04	0,03	0,01
0,04	0,03	0,02	0,01

Razlika temperatur je v vseh točkah manjša od dovoljene. Največja absolutna temperaturna razlika je 0,05 °C, kar je veliko manj kot dovoljuje standard. Točki z največjim odstopanjem sta na zgornjem levem robu s koordinatama  $T_1=(10,70)$  in  $T_2=(10,60)$ .

Mreža končnih elementov gostote 1 mm, s štiri točkovnimi linearnimi končnimi elementi DC2D4, je dovolj natančna za obravnavani primer. Na računskem modelu smo generirali 3200 kvadratnih končnih elementov. Zaključimo lahko, da je računski model dovolj natančen za takšen primer.

## 2.3 Primer 2: Stena iz različnih materialov

### 2.3.1 Geometrija in podatki



Slika 37: Geometrija Primera 2, vir: SIST EN ISO 10211:2008

Dimenzije (mm)	Toplotna prevodnost W/(m·K)	Robni pogoji
AB = 500	1: 1,15	AB: 0 °C z $R_{se} = 0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
AC = 6	2: 0,12	HI: 20 °C z $R_{si} = 0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
CD = 15	3: 0,029	
CF = 5	4: 230	
EM = 40		
GJ = 1,5		
IM = 1,5		
FG - KJ = 1,5		

Primer 2 je sestavljen prerez iz štirih materialov označenih s številkami od 1 do 4. Rob AB predstavlja zunanjo stran prereza kjer imamo zunanjo temperaturo 0 °C in faktor zunanje upornosti pri prestopu toplote  $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . Rob HI je notranja stran z notranjo temperaturo 20 °C in faktorjem notranje upornosti pri prestopu toplote  $0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . Robova AH in BI sta adiabatna robova.

Material 1: Beton

Material 2: Les

Material 3: Toplotna izolacija

Material 4: Aluminij



### 2.3.2 Oblikovanje geometrije – Modul »Part«

Zaženemo program in izberemo “Create Model Database” → “With Standard/Explicit Model”.

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Parts”.

V pogovornem oknu “Create Part” nastavimo:

- V polju “Name” poljubno poimenujemo ali sprejmemo Part-1.
- V “Modeling space” izberemo 2D Planar.
- Nastavimo “Deformable” kot “Type”.
- Nastavimo “Base Feature” kot “Shell”.
- V poje “Approximate size” vnesemo okvirno velikost (1000).
- Kliknemo “Continue...”.

V orodjarni izberemo “Create Lines: Rectangle”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

- Pick a starting corner for the rectangle – or enter X,Y: (0,0) → “Enter”.
- Pick the opposite corner for the rectangle – or enter: (500,47.5) → “Enter”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.

Oblikovali smo pravokotnik dimenzij 500x47,5.

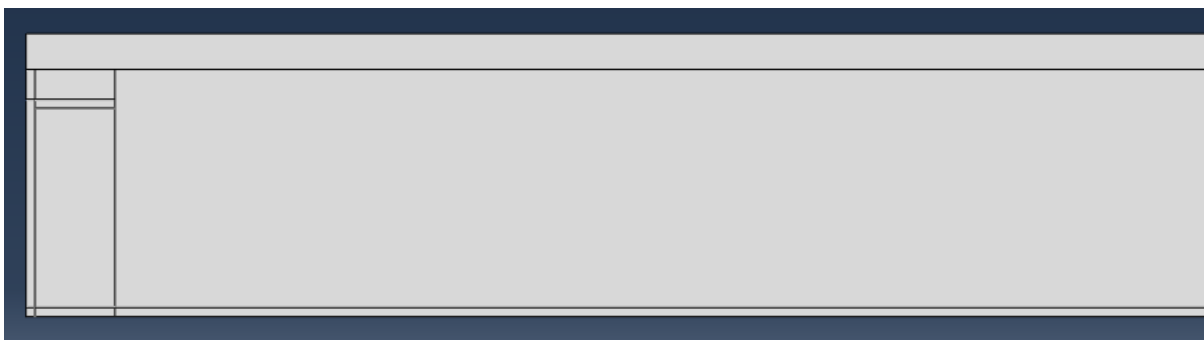
V orodjarni izberemo “Create Datum Plane: Offset From Principal plane”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

- V vnosnem polju kliknemo “Y-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (1.5) → Enter”.
- Ponovimo ukaz “Y-Z Plane”.
- Vnesemo Offset: ” (15) → “Enter”.
- Ponovimo ukaz, tokrat izberemo “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (1,5) → Enter”.
- Ponovimo ukaz “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (35) → “Enter”.
- Ponovimo ukaz “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (36.5) → “Enter”.
- Ponovimo ukaz “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (41.5) → “Enter”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.

Definirali smo vse ravnine s katerimi bomo lahko oblikovali končno geometrijo ploskve. Obstajajo tudi drugi načini za določitev delov. Osebnost mi je opisana pot najprimernejša za podano geometrijo. V orodjarni kliknemo ikono “Partition Face: Use Datum Plane”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

- V pogledu s klikom izberemo “Datum Plane” ravnino skozi katero želimo prerezati model (izbrana ravnina se obarva rdeče).
- V vnosnem polju kliknemo “Create Partition”, model smo razdelili na dve ploskvi.
- V pogledu izberemo ploskev, ki jo želimo še dodatno prerezati.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.
- Zopet izberemo “Datum Plane”.
- Kliknemo “Create Partition”.
- Izberemo novo ploskev...
- To ponavljamo toliko časa dokler ne dobimo zahtevane geometrije. Nič ni narobe če smo kakšen lik prevečkrat prerezali, ker to ne vpliva na končne rezultate. Samo v nadaljevanju moramo biti bolj previdni pri poglavju “Section Assignments”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.

V mojem primeru sem lik razrezal na naslednji način:



**Slika 38: Deli prereza Primera 2**

### 2.3.3 Določitev materialov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Materials".

V pogovornem oknu "Edit Material" določimo:

- V polju "Name" poimenujemo material (Beton).
- V polje "Description" vnesemo opis (Toplotne lastnosti materiala).
- Kliknemo na zavihek "Thermal" in izberemo "Conductivity".
- V polje "Conductivity" podamo toplotno prevodnost v izbranih enotah (0.00115).
- Abaqus nima definiranih standardnih enot, zato je vsak uporabnik odgovoren da vnese skladen nabor enot s pravimi količinami.
- Za nadaljevanje kliknemo "OK".
- Po enakem postopku definiramo karakteristike ostalih treh materialov

### 2.3.4 Določitev prereзов – Modul »Property«

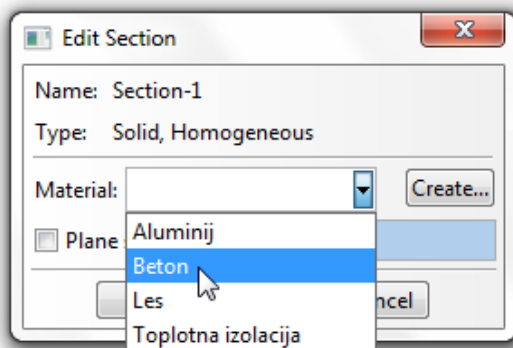
V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Sections".

V pogovornem oknu "Create Section" določimo:

- V polju "Name" poimenujemo ali prevzamemo kot Section-1.
- Nastavimo "Solid" kot "Category".
- Nastavimo "Homogeneous" kot "Type".
- Potrdimo s klikom na "Continue...".

Odpre se pogovorno okno "Edit Section":

- Pripadajočemu Section -1 pripišemo zgoraj definirani material (Beton).
- Potrdimo s klikom na "OK".



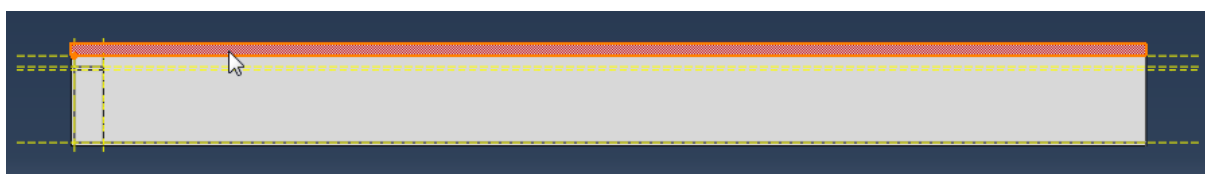
Slika 39: Pogovorno okno "Edit Section"

Po enakem postopku določimo še ostala tri območja:

- Section -2 → Les
- Section- 3 → Toplotna izolacija
- Section- 4 → Aluminij

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1”, ter dvakrat kliknemo na “Section Assignments”.

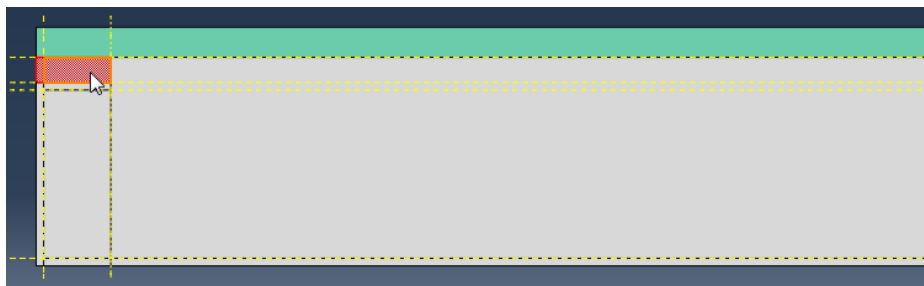
V pogledu s klikom določimo območje kateremu želimo pripisati lastnosti. Kliknemo “Done” in v oknu “Edit Section Assignment” izberemo prej definirani “Section-1”. Kliknemo “Ok”



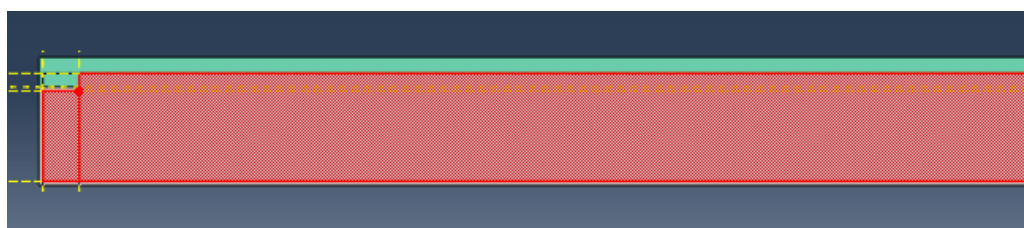
**Slika 40: Section-1 z lastnostmi materiala Beton**

Po enakem postopku pripišemo geometriji pripadajoče lastnosti še za ostala območja, ki so prikazane na slikah.

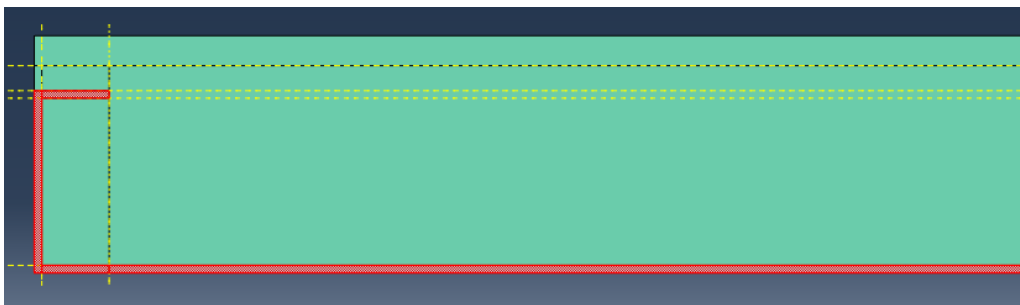
S pomočjo tipke Shift lahko označimo več območij hkrati.



**Slika 41: Section-2 z lastnostmi materiala Les**



**Slika 42: Section-3 z lastnostmi materiala Toplotna izolacija**



**Slika 43: Section-4 z lastnostmi materiala Aluminij**

### 2.3.5 Sestavljanje modela – Modul »Assembly«

V drevesu modela razširimo poglavje “Assembly” in kliknemo na “Instances”:

- Izberemo “Dependent” kot “Instance Type”.
- Kliknemo “OK”.
- Če bi imeli več partov, bi lahko na tem mestu vključili v model še ostale.

### 2.3.6 Definiranje korakov analize – Modul »Step«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Steps”:

- Poimenujemo korak (Prenos toplote) .
- “Procedure type” nastavimo kot “General”.
- Izberemo “Heat Transfer”.
- Kliknemo “Continue...”.
- Dodamo opis koraka v polje “Description”.
- Spremenimo “Response” v “Steady – state”.
- Kliknemo “OK”.

### 2.3.7 Definiranje interakcij – Modul »Interaction«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Interactions”.

V pogovornem oknu “Create Interaction”:

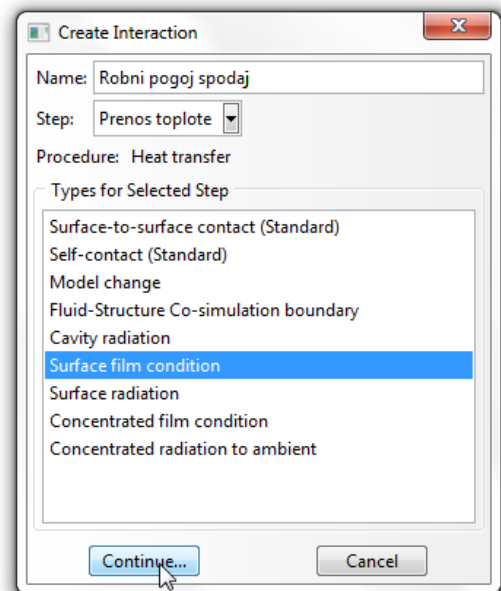
- Poimenujemo interakcijo (Robni pogoj spodaj).
- Nastavimo Prenos toplote kot “Step”.
- Izberemo “Surface film condition” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.

V vnosnem polju izberemo možnost “by angle”.



Slika 44: Ukaz "by angle"

Z miško v pogledu označimo spodnji rob elementa in kliknemo “Done”.

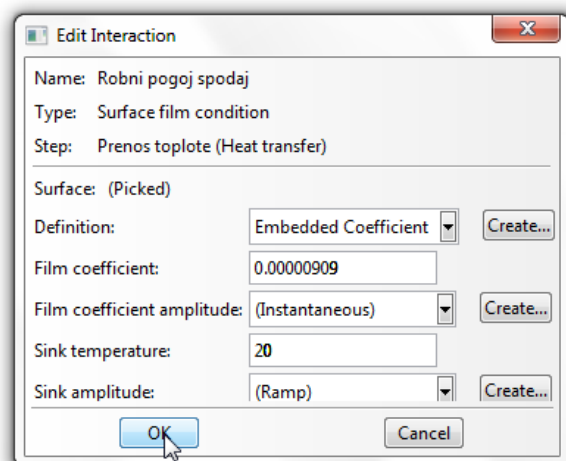


Slika 45: Pogovorno okno "Create Interaction"

Odpre se nam pogovorno okno “Edit Interaction”:

- Vnesemo vrednosti za “Film coefficient” in “Sink temperature”.
- Sprejmemo ostale prednastavljene pogoje
- Kliknemo “OK”.

Po enakem postopku definiramo tudi robni pogoj na zgornjem robu in ga poimenujemo (Robni pogoj zgoraj). Film coefficient (0.000016666), Sink temperature (0).



Slika 46: Pogovorno okno "Edit Interaction"

### 2.3.8 Mreženje modela – Modul »Mesh«

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” in dvakrat kliknemo na “Mesh”. V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Element Type”.

V pogledu z miško označimo celotno geometrijo in kliknemo “Done” v vnosnem polju.



**Slika 47: Geometrija za mreženje Primera 2**

Odpre se pogovorno okno “Element type”:

- Izberemo “Standard” kot “Type”.
- Izberemo “Linear” kot “Geometric Order”.
- Določimo “Heat Transfer” v poglavju “Family”.
- Ime elementa (DC2D4) in njegov opis sta podana pod “Element Controls”.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Mesh Controls”.

V pogledu z miško označimo celotno geometrijo in kliknemo “Done” v vnosnem polju.

Odpre se pogovorno okno “Mesh Controls”:

- Nastavimo “Element Shape” to “Quad”.
- Spremenimo “Algorithm” v “Medial axis” da je mreža lepše porazdeljena.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Seed Part”:

- Nastavimo “Approximate global size” na 0.5.
- Sprejmemo vse ostale nastavitve.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Mesh Part” in v vnosnem polju kliknemo “Yes”.

### 2.3.9 Priprava analize – Modul »Job«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Jobs”:

- Poimenujemo ga (Prenos\_toplote).
- Kliknemo “Continue...”.
- Podamo opis v polje “Description” (Stacionarno stanje).
- Kliknemo “OK”.

V drevesu modela razširimo poglavje “Jobs” in z desnim gumbom kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Submit”.

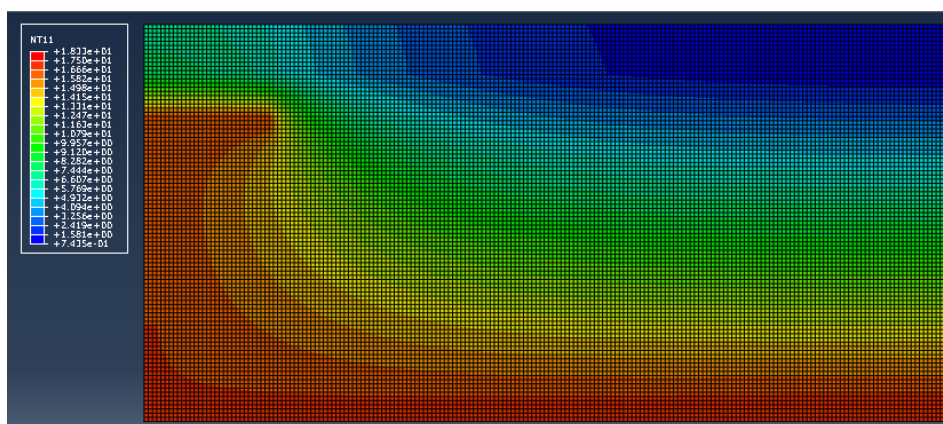
### 2.3.10 Rezultati analize – Modul »Visualization«

Po zaključeni analizi v drevesu modela z desno tipko kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Results”.

Za prikazovanje rezultatov analize v meniju kliknemo na “Result” in izberemo “Field Output”:

- Izberemo “NT11”, “Nodal temperature at nodes”.
- Kliknemo “OK”.

Za prikaz barvne lestvice temperatur skozi element, v orodjarni kliknemo na “Plot Contours on Deformed Shape”.



Slika 48: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 2



Za določitev vrednosti temperature v vozliščih:

- V meniju izberemo “Tools” → “Query”.
- Izberemo “Probe values”.
- Spremeni opcijo “Probe” v “Nodes”.
- Obkljukaj kvadratke pred “Node ID” in “NT11”.
- Z miško se v pogledu premaknemo na zeleno vozlišče in v pogovornem oknu “Probe values” se izpišejo njegove karakteristike. Za končanje ukaza kliknemo “Cancel” .

### 2.3.11 Analiza rezultatov Primera 2

Temperature v kontrolnih točkah so dobljene z 2D računsko analizo. Tip končnega elementa uporabljenega pri tej analizi je DC2D4, kar ponazarja 4 točkovni linearni končni element. Na modelu je bilo generiranih 95000 kvadratnih končnih elementov velikosti 0,5 mm. Odstopanja med izračunanimi temperaturami in temperaturami, ki jih podaja standard, so prikazana v razpredelnicah.

**Tabela 4: Temperature v kontrolnih točkah Primera 2 po ISO 10211**

Temperature po SIST EN ISO 10211:2008 (°C)		
A: 7,1		B: 0,8
C: 7,9	D: 6,3	
F: 16,4	G: 16,3	E: 0,8
H: 16,8		I: 18,3
Skupni toplotni tok: 9,5 W/m		

**Tabela 5: Temperature v kontrolnih točkah Primera 2 izračunane s programom Abaqus/CAE, analiza z 9500 končnimi elementi tipa DC2D4 gostote 0,5 mm**

Temperature po Abaqus CAE (°C)		
A: 7,07		B: 0,76
C: 7,90	D: 6,27	
F: 16,41	G: 16,33	E: 0,83
H: 16,77		I: 18,33
Skupni toplotni tok: 9,492 W/m		

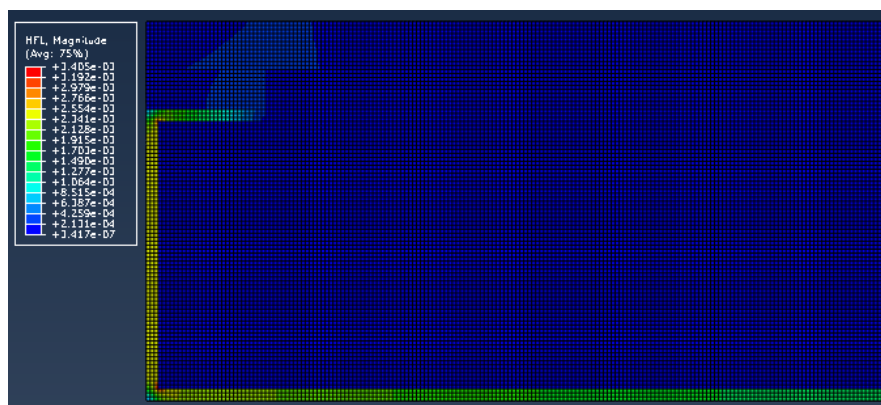
**Tabela 6: Razlika temperatur med standardom ISO 10211 in Abaqus/CAE**

Razlika temperatur (°C)		
A: 0,03		B: 0,04
C: 0	D: 0,03	
F: 0,01	G: 0,03	E: 0,03
H: 0,03		I: 0,03
Skupni toplotni tok: 0,008 W/m		

V primeru, ko želimo določiti toplotni tok skozi rob obravnavanega telesa predlagam, da se problem modelira v 3D načinu. Tako najlažje preberemo rezultate z uporabo funkcije "View Cut", ki v 2D načinu ne podpira integracije vektorja toplote po površini. Uporaba te funkcije, kot tudi 3D modeliranje je opisano pri Primeru 4.

Tudi Primer 2 sem modeliral s 3D končnimi elementi. Plošča ima debelino 1 mm. Lastnosti materialov in geometrija tlorisa ostanejo enaki. Model zamrežimo z mrežo kock z dimenzijo roba 0,5 mm. Končni elementi so tipa DC3D8. Oznaka ponazarja osem točkovni linearni element. Enak tip končnega elementa uporabimo tudi pri Primeru 3 in Primeru 4. Na 3D računskem modelu je bilo generiranih 190000 končnih elementov.

Toplotni tok skozi ploščo debeline 1mm je pri tem 0,009492 W/mm. Če rezultat pomnožimo s 1000, dobimo rezultat 9,492 W/m. Toplota vstopa v element preko notranjega roba HI, na katerem imamo temperaturo 20 °C in koeficient upornosti pri prestopu toplote 0,11 m<sup>2</sup>·K/W, ter izstopa preko zunanega roba AB, kjer je temperatura 0 °C in koeficient upornosti pri prestopu toplote 0,06 m<sup>2</sup>·K/W.



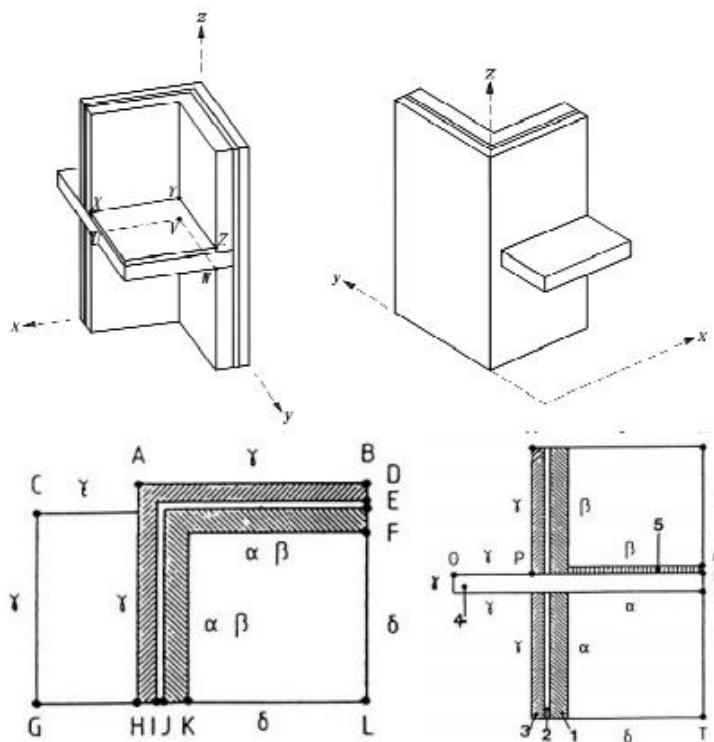
**Slika 49: Toplotni tok skozi prerez**

Standard navaja, da razlika med podanimi in izračunanimi temperaturami ne sme presežati vrednosti 0,1 °C. Razlika med izračunanim toplotnim tokom in podanim toplotnim tokom pa ne sme presežati vrednosti 0,1 W/m. V okviru standarda so tudi temperature v kontrolnih točkah, ki jih dobimo pri 3D analizi. Zanimljivo majhna je tudi razlika v primerjavi s temperaturami, ki jih dobimo pri 2D analizi. Kot kažejo rezultati, je za ta primer potrebna mreža gostote 0,5 mm ali manj. Pri tej gostoti je toplotni tok skozi notranjo in zunanjo površino enak.

### 3 REŠEVANJE PROSTORSKIH PRIMEROV IZ STANDARDA SIST EN ISO 10211:2008

#### 3.1 Primer 3: Vogal z balkonom

##### 3.1.1 Geometrija in podatki



Slika 50: Geometrija Primera 3, vir: SIST EN ISO 10211:2008

Dimenzije (mm)	Toplotna prevodnost W/(m·K)	Robni pogoji
AB = 1300	1: 0,7	$\alpha$ : 20°C z $R_{si}=0,20 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
BD = HI = 100	2: 0,04	$\beta$ : 15°C z $R_{si}=0,20 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
DE = IJ = 50	3: 1,0	$\gamma$ : 0°C z $R_{se}=0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
EF = JK = 150	4: 2,5	$\delta$ : adiabatni robni pogoj
FL = KL = 1000	5: 1,0	
CG = 1150		
GH = 600		
MP = ST = 1000		
QR = 50		
RS = 150		
NQ = 950		
OP = 600		

Primer 3 si lahko predstavljamo kot stik dveh sten na vogalu objekta z AB ploščo, ki se nadaljuje v balkon.

Primer obravnava kombinacijo dveh toplotnih mostov. Konstrukcijskega in geometrijskega. Te vrste toplotnih mostov se v praksi kar pogosto pojavljajo. Imenujemo jih kombinirani toplotni mostovi. Konstrukcijski toplotni most se pojavi na delu, kjer se AB plošča nadaljuje v balkonsko ploščo. Na tem mestu imamo prekinjeno toplotno izolacijo. Geometrijski toplotni most se pojavi v vogalu modela, kjer je zunanja površina preko katere toplota prehaja iz notranjega prostora v zunanje okolje, precej večja od notranje površine. Na tem delu nastane toplotni most, kljub temu da toplotna izolacija ni prekinjena.

### 3.1.2 Oblikovanje geometrije – Modul »Part«

Zaženemo program in izberemo “Create Model Database” → “With Standard/Explicit Model”.

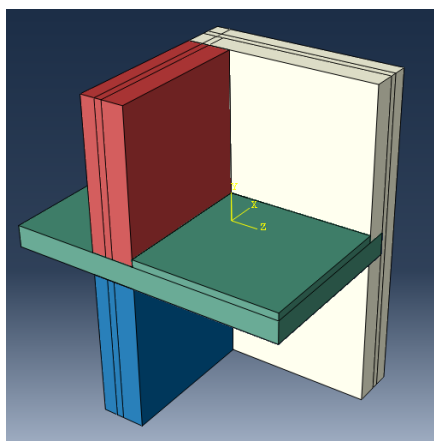
V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Parts”.

V pogovornem oknu “Create part” izberemo:

- V polju “Name” poljubno poimenujemo ali sprejmemo Part-1.
- V “Modeling space” izberemo 3D.
- Nastavimo “Deformable” kot “Type”.
- Nastavimo “Base Feature” kot “Solid” in izberemo “Extrusion”.
- V polje “Approximate size” vnesemo (3000).
- Kliknemo “Continue...”.

Ta računski model sem sestavil iz štirih elementov, “partov”. Nastavitve v pogovornem oknu “Create part” so za vse elemente enake. Modeliranje le-teh na tem mestu ne bom obravnaval. Prikazal bom le končno rešitev za lažjo orientacijo. Poleg tega lahko brez težav modeliramo Primer 3 z ukazi, ki so opisani pri modeliranju Primera 4.

- Part-1 (zelena)
- Part-2 (bela)
- Part-3 (rdeča)
- Part-4 (modra)



Slika 51: "Geometrija Primera 3"

### 3.1.3 Določitev materialov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Materials".

V pogovornem oknu "Edit Material" določimo:

- V polju "Name" poljubno poimenujemo ali prevzamemo Material-1.
- V polje "Description" vnesemo opis (Toplotne lastnosti materiala).
- Kliknemo na zavihek "Thermal" in izberemo "Conductivity".
- V polje "Conductivity" podamo toplotno prevodnost v izbranih enotah (0,0007).
- Abaqus nima definiranih standardnih enot, zato je vsak uporabnik odgovoren da vnese pravilni nabor enot s pravimi količinami.
- Za nadaljevanje kliknemo "OK".

Po enakem postopku definiramo karakteristike ostalih štirih materialov.

- Material – 2 → (0,00004)
- Material – 3 →(0,001)
- Material – 4 →(0,0025)
- Material – 5 →(0,001)

### 3.1.4 Določitev prerezov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na "Sections".

V pogovornem oknu "Create Section" določimo:

- V polju "Name" poimenujemo ali prevzamemo kot Section-1.
- Nastavimo "Solid" kot "Category".
- Nastavimo "Homogeneous" kot "Type".
- Potrdimo s klikom na "Continue...".

Odpre se pogovorno okno "Edit Section":

- Pripadajočemu Section -1 pripišemo zgoraj definirani Material-1.
- Potrdimo s klikom na "OK".

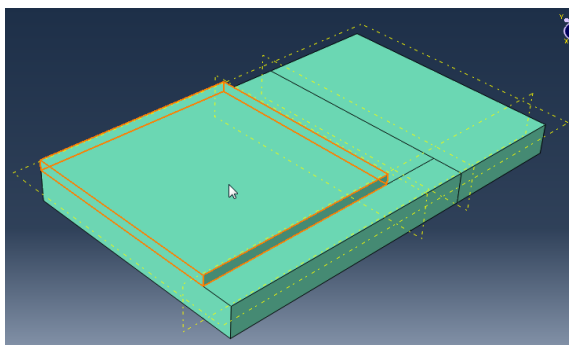
Po enakem postopku določimo še ostala tri območja:

- Section -2 → Material- 2

- Section – 3 → Material -3
- Section – 4 → Material- 4
- Section – 5 → Material- 5

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” ter dvakrat kliknemo na “Section Assignments”.

V pogledu s klikom na geometrijo določimo območje kateremu želimo pripisati lastnosti.



**Slika 52: Section - 5 z lastnostmi Material – 5**

V vnosnem polju kliknemo “Done”.

Odpre se pogovorno okno “Edit Section Assignment”:

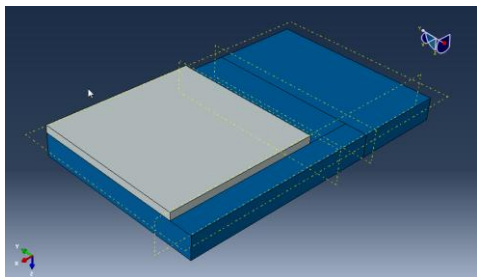
- Izberemo Section-5 z lastnostmi Material-5.
- Kliknemo “OK”.

Po enakem postopku pripišemo geometriji pripadajoče lastnosti še za ostale prereze. Za vizualni prikaz lastnosti materialov, v orodni vrstici izberemo “Materials”.

Part-1

Section- 5 z lastnostmi Material-5 (siva).

Section- 4 z lastnostmi Material- 4 (modra).



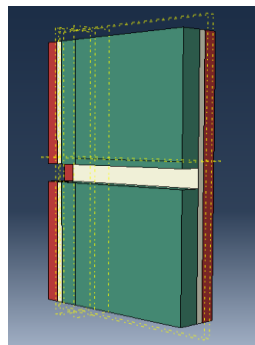
**Slika 53: "Part-1"**

Part-2

Section -1 z lastnostmi Material-1 (zelena).

Section -2 z lastnostmi Material- 2 (bela).

Section- 3 z lastnostmi Material -3 (rdeča).



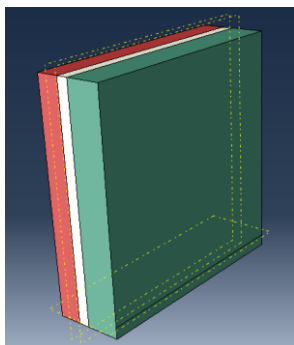
**Slika 54: "Part-2"**

#### Part-3

Section -1 z lastnostmi Material-1 (zelena).

Section -2 z lastnostmi Material-2 (bela).

Section- 3 z lastnostmi Material -3 (rdeča).



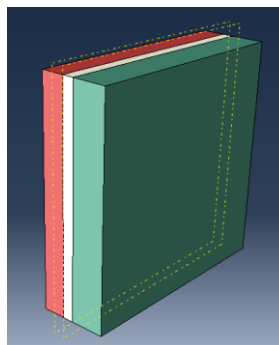
Slika 55: "Part-3"

#### Part-4

Section -1 z lastnostmi Material-1 (zelena).

Section -2 z lastnostmi Material- 2 (bela).

Section- 3 z lastnostmi Material -3 (rdeča).



Slika 56: "Part-4"

### 3.1.5 Sestavljanje modela – Modul »Assembly«

V drevesu modela razširimo poglavje “Assembly” in kliknemo na “Instances”:

- Izberemo “Dependent” kot “ Instance Type”.
- V polju “Parts” označimo vse štiri parte.
- Kliknemo “OK”.

V pogledu se odprejo vsi štirje parti, ki pa niso povezani v model. Naslednji korak je sestavljanje modela. Z orodji “Translate instance” in “Rotate instance” sestavimo obravnavan model.

Kliknemo “Translate instance”.

- Kliknemo na part, ki ga želimo premakniti in v vnosnem polju kliknemo “Done”.
- Izberemo točko na delu ki ga želimo premakniti. Ta točka predstavlja začetno točko vektorja premika.
- Izberemo še končno točko vektorja in v vnosnem polju kliknemo “OK”.

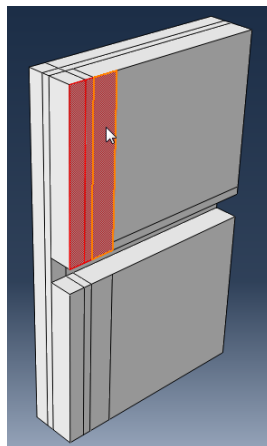
S tem ukazom lahko premaknemo vsak del za želeni vektor pomika. Na podoben način lahko uporabljamo ukaz “Rotate instance” s katerim vrtimo model okoli poljubne osi.

### 3.1.6 Določitev stikov – Modul »Interaction«

Določili bomo stik med Part-2 in Part-3. Za določitev stika bomo v naprej definirali površine “Surfaces”.

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-2” ter dvakrat kliknemo na “Surfaces”:

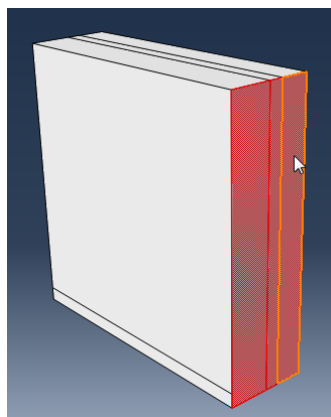
- Poimenujemo površino Part-2 na Part-3.
- Izberemo “Geometry” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.
- V pogledu označimo površino.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.



**Slika 57: Surface Part-2 na Part -3**

Na enak način definiramo še drugo površino. V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-3” ter dvakrat kliknemo na “Surfaces”

- Poimenujemo površino Part-3 na Part-2.
- Izberemo “Geometry” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.
- V pogledu označimo površino.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.



**Slika 58: Surface Part-3 na Part-2**

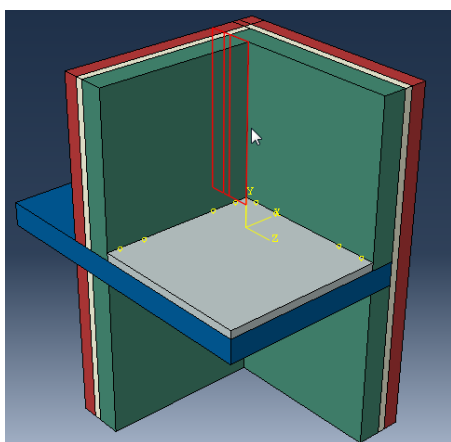
Definirali smo površino, ki predstavlja stik obeh teles. Definirati je bilo potrebno isto površino gledano z vidika obeh teles, ker bo v nadaljevanju ena izmed njih predstavljala primarno, druga pa sekundarno površino.

Za določitev lastnosti stika teh dveh površin, v drevesu modela dvakrat kliknemo na “Constraints”.

V pogovornem oknu “Create Constraint”:



- Poljubno poimenujemo stik.
- Izberemo “Tie” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.
- V vnosnem polju izberemo “Surface”.
- In nato desno v vnosnem polju kliknemo še na “Surfaces”.
- Odpre se okno “Region Selection”.
- Izberemo predhodno nastavljeno površino Part-2 na Part-3
- Obkljukamo kvadratac pred “Highlight selections in viewport”.
- V pogledu se pokaže površina, ki smo jo izbrali



**Slika 59: Stična površina**

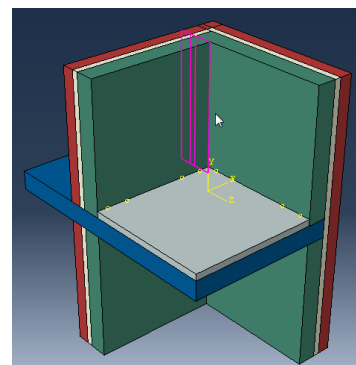
- Kliknemo “Continue...”.

Zaenkrat smo izbrali samo “Master surface”. Določimo še “Slave surface” tako da v vnosnem polju kliknemo “Surface”:

- Zopet se odpre okno “Region selection”.
- Izberemo predhodno nastavljeno površino Part-3 na Part-2
- Kliknemo “Continue...”.

Odpre se okno “Edit Constraint”:

- Potrdimo vse predlagane nastavitve z “OK”.



**Slika 60: Stična površina**

Na enak način določimo stične površine še za ostale parte. Na tem mestu moramo biti natančni, saj v primeru da model ni pravilno povezan, analiza ne da rešitve.

### 3.1.7 Definiranje korakov analize – Modul »Step«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Steps”:

- Poimenujemo korak (Prenos toplote).
- “Procedure type” nastavimo kot “General”.
- Izberemo “Heat Transfer”.
- Kliknemo “Continue...”.
- Dodamo opis koraka v polje “Description”.
- Spremenimo “Response” v “Steady - state”.
- Kliknemo “OK”.

### 3.1.8 Definiranje interakcij – Modul »Interaction«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Interactions”.

V pogovornem oknu “Create Interaction”:

- Poimenujemo interakcijo (Temperatura  $\alpha$ ).
- Nastavimo Prenos toplote kot “Step”.
- Izberemo “Surface film condition” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.
- Z miško v pogledu označimo površine v okolju  $\alpha$  in kliknemo “Done”.

Odpre se nam pogovorno okno “Edit Interaction”:

- Vnesemo vrednosti za “Film coefficient” (0.000005) in “Sink temperature” (20).
- Sprejmemo ostale predlagane nastavitve.
- Kliknemo “OK”

Po enakem postopku definiramo tudi robne pogoje v okolju  $\beta$  in okolju  $\gamma$ .

- Okolje  $\beta$  → “Film coefficient” (0.000005) in “Sink temperature” (15).
- Okolje  $\gamma$  → “Film coefficient” (0.00002) in “Sink temperature” (0).

### 3.1.9 Mreženje modela – Modul »Mesh«

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” in dvakrat kliknemo na “Mesh”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Element Type”.

V pogledu z miško označimo celotno geometrijo in kliknemo “Done” v vnosnem polju.

Odpre se pogovorno okno “Element type”:

- Izberemo “Standard” kot “Type”.
- Izberemo “Linear” kot “Geometric Order”.
- Določimo “Heat Transfer” v poglavju “Family”.
- Tip elementa (DC3D8) in njegov opis sta podana pod “Element Controls”.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Mesh Controls”.

V pogledu z miško označimo celotno geometrijo in kliknemo v vnosnem polju “Done”.

Odpre se pogovorno okno “Mesh Controls”:

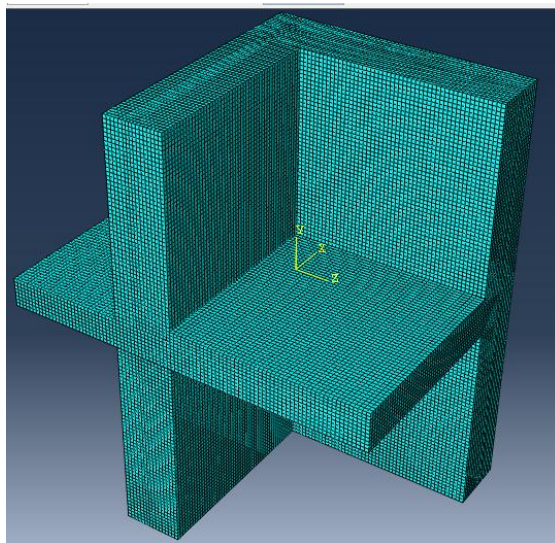
- Nastavimo “Element Shape” to “Hex”.
- Nastavimo “Structured” kot “Technique”.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Seed Part”:

- Nastavimo “Approximate global size” (20).
- Sprejmemo vse ostale nastavitve.
- Click “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Mesh Part” in v vnosnem polju kliknemo “Yes”.

Na enak način in z enakimi končnimi elementi mrežimo tudi ostale parte.



**Slika 61: Mreža končnih elementov  
Primer 3**

### 3.1.10 Priprava analize – Modul »Job«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Jobs”:

- Poimenujemo ga (Prenos\_toplote).
- Kliknemo “Continue...”.
- Podamo opis v polje “Description” (Stacionarno stanje).
- Kliknemo “OK”.
- V drevesu modela razširimo poglavje “Job” in z desnim gumbom kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Submit”.
- Medtem ko Abaqus izvaja analizo lahko opazujemo napredek če z desnim gumbom kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Monitor”
- V oknu “Monitor” lahko opazujemo potek analize in morebitna obvestila o napakah pri izvajanju le te.
- Ko se analiza izvede, se v drevesu modela izpiše Prenos toplote (Completed).

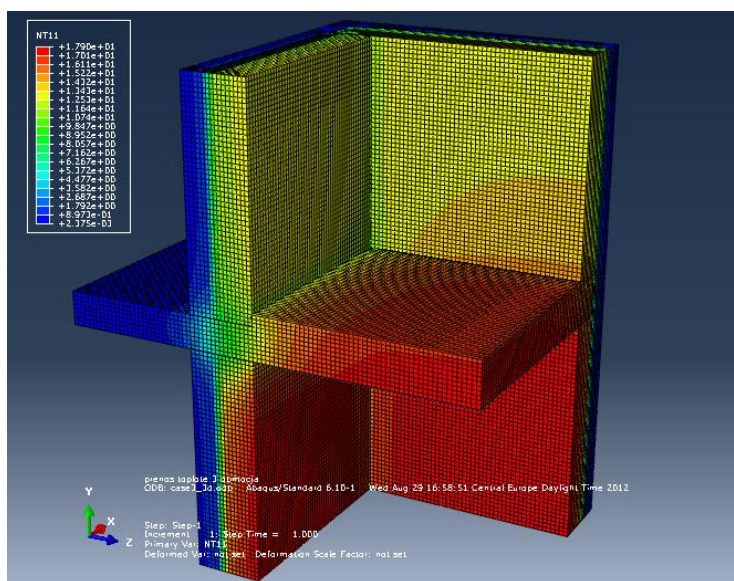
### 3.1.11 Rezultati analize – Modul »Visualization«

Po zaključeni analizi v drevesu modela z desno tipko kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Results”.

Za prikazovanje rezultatov analize v meniju kliknemo na “Result” in izberemo “Field Output”:

- Izberemo “NT11” Nodal temperature at nodes”.
- Kliknemo “OK”.

Za prikaz barvne lestvice temperatur skozi element, v orodjarni kliknemo na “Plot Contours on Deformed Shape”.



Slika 62: Prikaz temperaturne porazdelitve Primera 3

### 3.1.12 Analiza rezultatov Primera 3

Standard ISO 10211 podaja rezultate v kontrolnih točkah V in Y. Ti točki sta v kotih obeh notranjih prostorov  $\alpha$  in  $\beta$ . To sta tudi najhladnejši površinski točki v obeh prostorih.

	ISO/DIS 10211	Abaqus CAE	
$\theta_{\alpha,min}$ :	11.32 °C	11.328 °C	Razlika: 0.008 °C
$\theta_{\beta,min}$ :	11.11 °C	11.120 °C	Razlika: 0.01 °C

Izračunani rezultati ne smejo odstopati od podanih vrednosti za več kot 0,1 °C.

**Tabela 7: Površinski temperaturni faktorji po SIST EN ISO 10211:2008**

ISO 10211	$g_{\gamma}$	$g_{\alpha}$	$g_{\beta}$
$\gamma$	1	0	0
$\alpha$	0.378	0.399	0.223
$\beta$	0.331	0.214	0.455

Temperature v točkah V in Y po standardu ISO 10211:

$$\theta_{min} = g_{\gamma} \cdot \theta_{\gamma} + g_{\alpha} \cdot \theta_{\alpha} + g_{\beta} \cdot \theta_{\beta}$$

$$\theta_{\alpha,min} = 0,387 \cdot 0 + 0,399 \cdot 20 + 0,223 \cdot 15 = 11,32^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{\beta,min} = 0,331 \cdot 0 + 0,214 \cdot 20 + 0,455 \cdot 15 = 11,11^{\circ}\text{C}$$

Za določitev površinskih temperaturnih faktorjev je potrebno narediti tri analize z različnimi robnimi pogoji:

Analiza 1 z robnimi pogoji: ( $\alpha$ ) T=1 ( $\beta$ ) T=0 ( $\gamma$ ) T=0

Temperatura v točki V je vrednost faktorja ( $\alpha$ ,  $g_{\alpha}$ ). Temperatura v točki Y je vrednost faktorja ( $\beta$ ,  $g_{\alpha}$ ).

Analiza 2 z robnimi pogoji: ( $\alpha$ ): T=0 ( $\beta$ ): T=1 ( $\gamma$ ): T=0

Temperatura v točki V je vrednost faktorja ( $\alpha$ ,  $g_{\beta}$ ). Temperatura v točki Y je vrednost faktorja ( $\beta$ ,  $g_{\beta}$ ).

Analiza 3 z robnimi pogoji: ( $\alpha$ ): T=0 ( $\beta$ ): T=0 ( $\gamma$ ): T=1

Temperatura v točki V je vrednost faktorja ( $\alpha$ ,  $g_{\gamma}$ ). Temperatura v točki Y je vrednost faktorja ( $\beta$ ,  $g_{\gamma}$ ).

Izračuni za določitev površinskih temperaturnih faktorjev so narejeni na modelu z 240.000 končnimi elementi tipa DC3D8 veličine 20 mm. Rezultati analiz so prikazani v Tabeli 8.

**Tabela 8: Površinski temperaturni faktorji po Abaqus/CAE**

Abaqus CAE	$g_\gamma$	$g_\alpha$	$g_\beta$
$\gamma$	1	0	0
$\alpha$	0.377961	0.399481	0.222558
$\beta$	0.330016	0.214088	0.455896

Temperature v točkah V in Y po Abaqus CAE:

$$\theta_{min} = g_\gamma \cdot \theta_\gamma + g_\alpha \cdot \theta_\alpha + g_\beta \cdot \theta_\beta$$

$$\theta_{\alpha,min} = 0,377961 \cdot 0 + 0,399481 \cdot 20 + 0,222558 \cdot 15 = 11,328^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\beta,min} = 0,330016 \cdot 0 + 0,214088 \cdot 20 + 0,455896 \cdot 15 = 11,120^\circ\text{C}$$

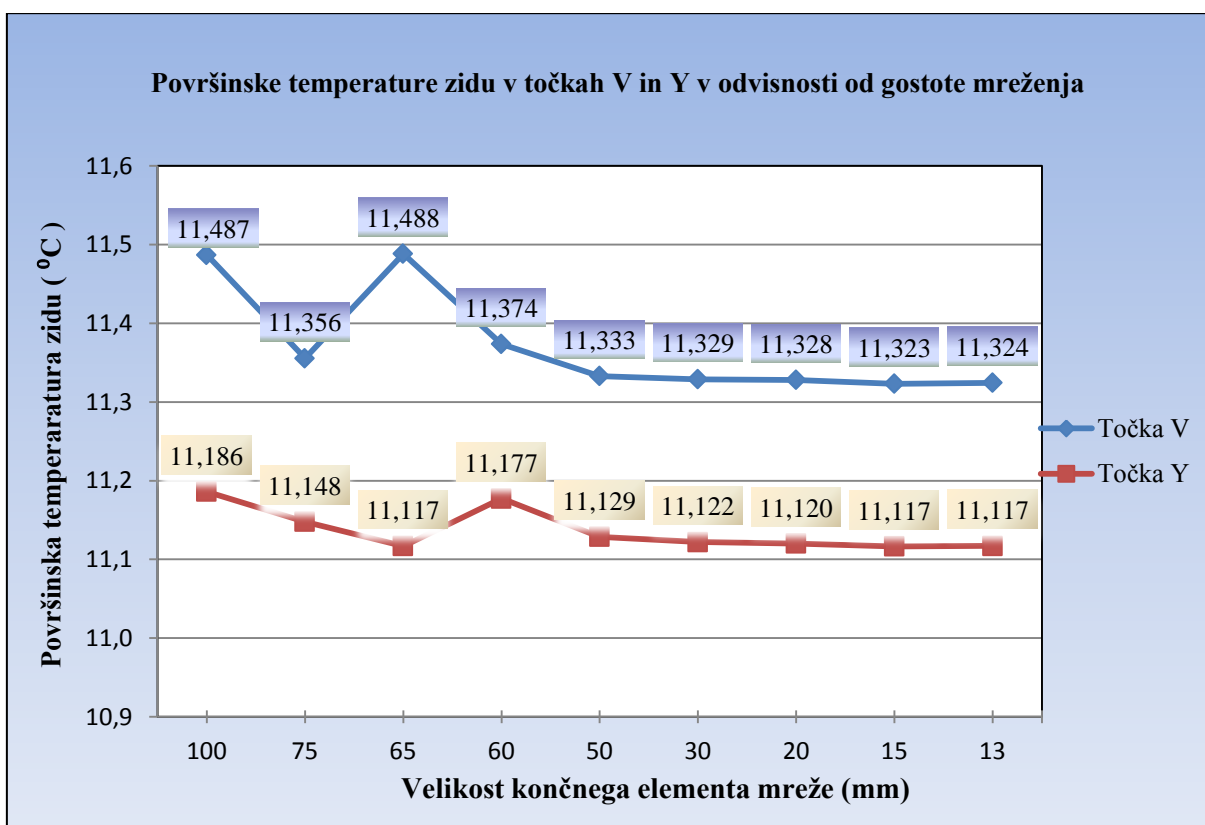
Rezultati analize pri robnih pogojih: ( $\alpha$ ): T=20 ( $\beta$ ): T=15 ( $\gamma$ ): T=0

Pri analizah s temi robnimi pogoji sem ugotavljal kako kvaliteta mreže vpliva na dobljene rezultate. Za različne gostote mreže sem preveril temperature v točkah V in Y in vrednost toplotnega toka, ki prehaja z notranjega v zunanje okolje. Na tem mestu lahko opozorim, da je vrednost toplotnega toka, ki prehaja z notranjega v zunanje okolje v standardu podana napačno. Ta vrednost ni 58,98 W ampak 59,98 W.

Tip končnega elementa DC3D8 je enak za vse gostote mreženja. Število končnih elementov pri najgostejšem mreženju 13 mm je približno 850 000. Kot lahko vidimo iz rezultatov, sta temperaturi v točkah V in Y s temi robnimi pogoji in pri mreži gostote 20 mm identični temperaturam dobljenim s pomočjo površinskih faktorjev.

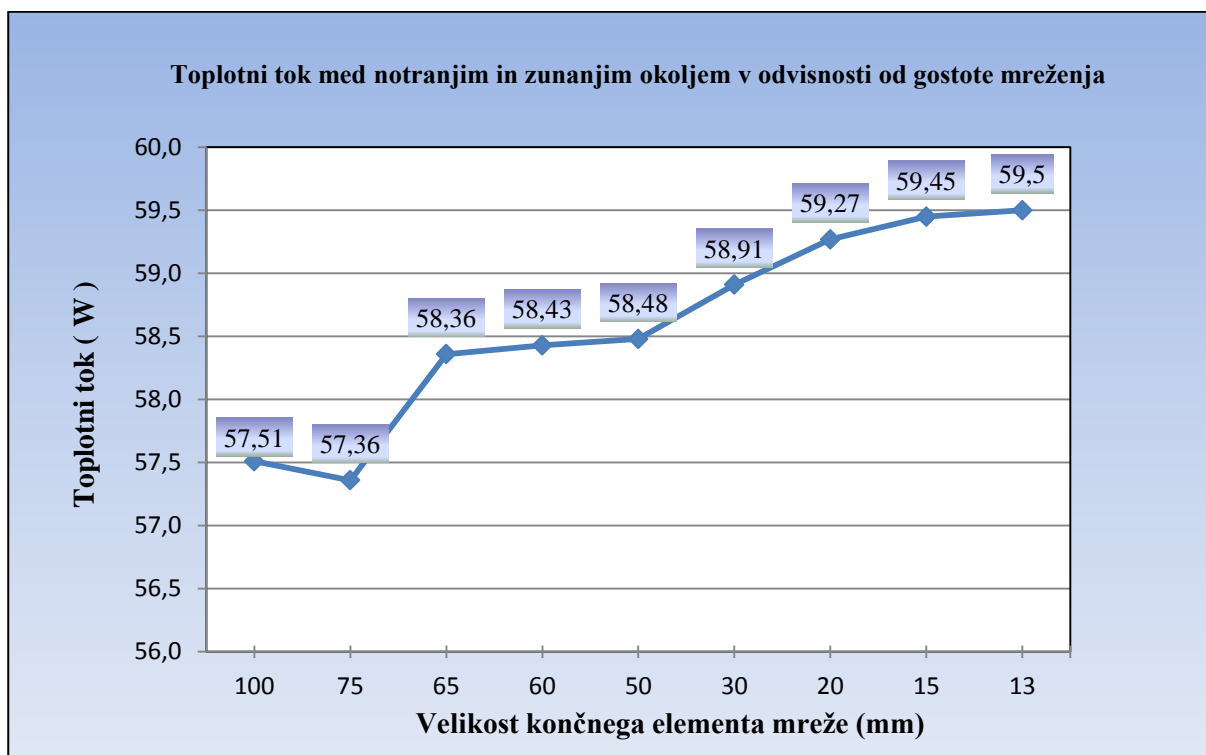
**Tabela 9: Temperature v točkah V in H v odvisnosti od gostote mreženja**

Kontrolni točki	Gostota mreženja (mm)								
	100	75	65	60	50	30	20	15	13
Točka-V (°C)	11,487	11,356	11,488	11,374	11,333	11,329	11,328	11,323	11,324
Točka-Y (°C)	11,186	11,148	11,117	11,177	11,129	11,122	11,120	11,117	11,117



**Tabela 10: Toplotni tok v odvisnosti od gostote mreženja**

	Gostota mreženja (mm)								
	100	75	65	60	50	30	20	15	13
Toplotni tok med notranjim in zunanjim okoljem (W)	57,52	57,36	58,36	58,43	48,48	58,92	59,27	59,45	59,50



Toplotni tok med notranjim in zunanjim okoljem je torej 59,98 W. Dobljeni rezultati od te vrednosti ne smejo odstopati za več kot 1%. Temperature v točkah V in Y ne smejo odstopati za več kot 0,1°C.

Interval, v katerem so dobljeni rezultati za toplotni tok še v okviru dovoljenega, znaša med 59,38 W na spodnji in 60,58 W na zgornji meji. Vidimo lahko, da so dobljeni rezultati zelo odvisni od gostote mreže. Za izračun toplotnega toka je potrebna večja gostota mreže kot za določanje temperatur. Rezultati za toplotni tok so v okviru standarda pri gostoti mreže 15 mm. Medtem so temperature v točkah V in Y v skladu s standardom že pri mreži gostote 60 mm. Za ta primer bi predlagal mrežo s končnimi elementi 15 mm ali manj.

Pogledamo lahko tudi toplotne izgube posebej samo skozi prerez AB plošče, ki prebada toplotni ovoj stavbe. Primerjamo ga s skupnimi toplotnimi izgubami skozi zunanjo površino. Vrednosti za to primerjavo so vzete iz računskega modela z velikostjo končnega elementa 15mm.



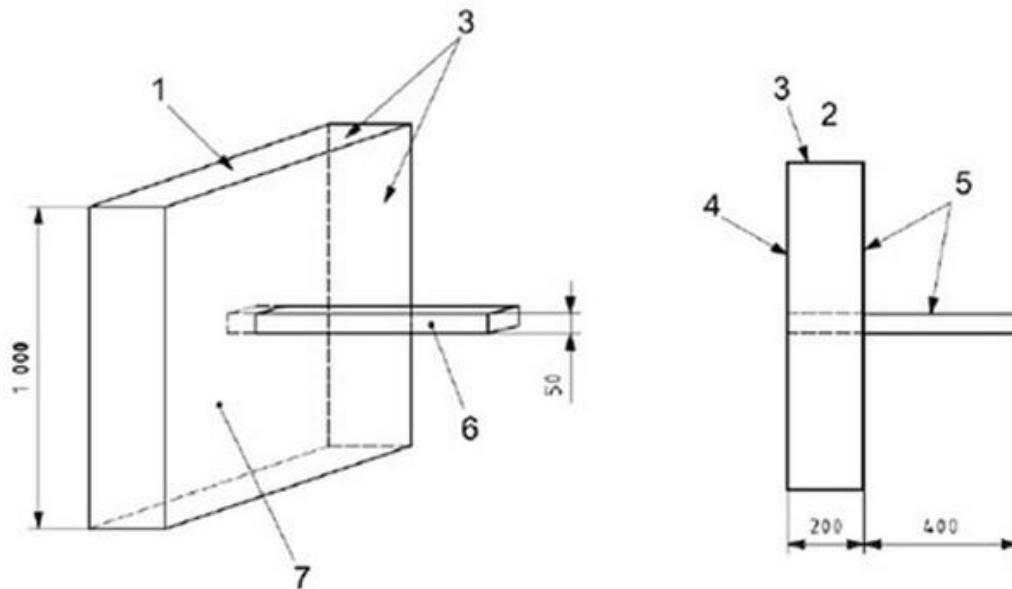
**Tabela 11: Primerjava toplotnega toka**

	Površina prereza (m <sup>2</sup> )	Toplotni tok (W)	Površina prereza glede na skupno zunanjo površino (%)	Toplotni tok skozi zunanji prerez glede na skupni toplotni tok(%)
AB plošča	0,1725	9,56	3,1	16,1
Zunanja površina brez prereza AB plošče	5,4175	49,89	96,9	83,9
Skupno	5,59	59,45	100	100

Skozi prerez AB plošče teče toplotni tok 9,56 W, kar predstavlja nekaj več kot šestnajst odstotkov vseh izgub skozi zunanjo površino. Glede na površino tega prereza, ki predstavlja le okoli tri odstotke zunanje površine, vidimo, da je doprinos AB plošče k toplotnim izgubam precej velik.

### 3.2 Primer 4: Točkovni toplotni most

#### 3.2.1 Geometrija in podatki



Slika 63: Geometrija Primera 4, vir: SIST EN ISO 10211:2008

#### Legenda:

- 1 → zgornji rob
- 2 → tloris
- 3 → adiabatne strižne ravnine
- 4 → zunanja površina
- 5 → notranja površina
- 6 → jeklena palica
- 7 → izolacija

Dimenzije (mm)	Toplotna prevodnost W/(m·K)	Robni pogoji
Izolacija: 1000 x 1000 x 200	Izolacija: 0,1 W/(m·K)	Notranji: 1°C z $R_{si}=0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
Jeklena palica: 600 x 100 x 50	Jeklena palica: 50 W/(m·K)	Zunanji: 0°C z $R_{se}=0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
		Strižna ravnina: adiabatni robni pogoji

### 3.2.2 Oblikovanje geometrije – Modul »Part«

Primer 4 lahko modeliramo kot sestavljen model iz dveh partov. Ločeno jeklena palica in izolacija. Lahko pa tudi kot en sam part. Rešitve so identične, če pri modelu iz dveh partov določimo stike po enakem postopku kot pri Primeru 3. Navodila so zapisana za obravnavani model iz enega parta.

Zaženemo program in izberemo “Create Model Database” → “With Standard/Explicit Model”.

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Parts”.

V pogovornem oknu “Create part” izberemo:

- V polju “Name” poljubno poimenujemo ali sprejmemo Part-1.
- V “Modeling space” izberemo 3D.
- Nastavimo “Deformable” kot “Type”.
- Nastavimo “Base Feature” kot “Solid” in izberemo “Extrusion”.
- V polje “Approximate size” vnesemo (2000).
- Kliknemo “Continue...”.

V orodjarni izberemo “Create Lines: Rectangle”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

- Pick a starting corner for the rectangle – or enter X,Y: (0,0) → “Enter”.
- Pick the opposite corner for the rectangle – or enter: (1000,1000) → “Enter”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.
- Odpre se okno Edit Base “Extrusion”
- V polje “Depth” vnesemo debelino izolacije (200).
- Kliknemo “OK”.

Oblikovali smo kvader dimenzij 1000x1000x200.

V orodjarni izberemo “Create Datum Plane: Offset From Principal plane”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

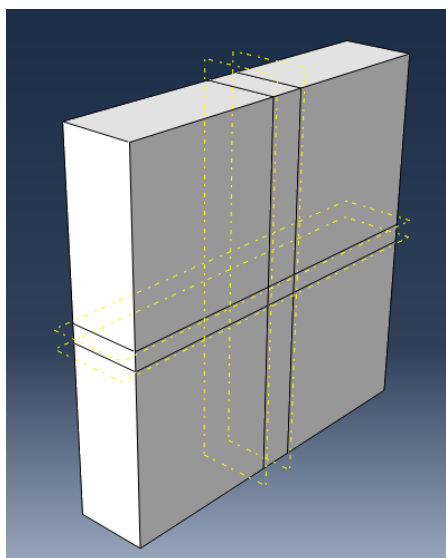
- V vnosnem polju kliknemo “Y-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (450) → “Enter”.
- Ponovimo ukaz “Y-Z Plane”.

- Vnesemo Offset: ” (550) → “Enter”.
- Ponovimo ukaz, tokrat izberemo “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (475) → Enter”.
- Ponovimo ukaz “X-Z Plane”.
- Vnesemo “Offset: ” (525) → “Enter”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.

Definirali smo štiri ravnine s pomočjo katerih bomo prerezali model na 9 kvadrov.

V orodjarni kliknemo ikono “Partition Cell: Use Datum Plane”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza:

- V pogledu s klikom izberemo “Datum Plane” ravnino skozi katero želimo prerezati model (izbrana ravnina se obarva roza).
- V vnosnem polju kliknemo “Create Partition” Model smo razdelili na dva dela.
- V pogledu izberemo del ki ga želimo še dodatno prerezati.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.
- Zopet izberemo “Datum Plane”.
- Kliknemo “Create Partition”.
- Izberemo nov del...
- To ponavljamo toliko časa dokler ne dobimo 9 kvadrov, kot je prikazano na sliki.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”



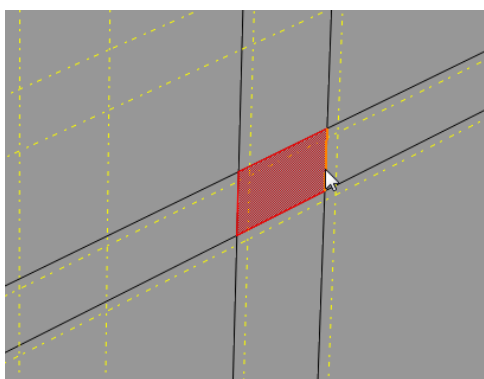
**Slika 64: Particije Primera 4**

Sredinski kvader je dimenzij 100x50x200 in predstavlja osnovo s katere z ukazom “Solid Extrude” definiramo geometrijo jeklene palice.

V orodjarni kliknemo ikono “Create Solid: Extrude”, v vnosnem polju se nam izpišejo navodila za izvajanje tega ukaza.

- Izberemo ravnino v središču, kjer jeklena palica prebada izolacijo (Slika 65).
- Izberemo še rob, ki se bo prikazal vertikalno na desni strani pogleda, kot kaže (Slika 65).
- V pogledu se nam pokaže povečano izbrana ravnina.
- V orodjarni izberemo “Create Lines: Rectangle”.

- Pick a starting corner for the rectangle – or enter X,Y: (-50,-25) → Enter”.
- Pick the opposite corner for the rectangle – or enter: (50,25) → Enter”.
- Uporabimo desni gumb na miški in “Cancel procedure”.
- V vnosnem polju kliknemo “ Done”.
- Odpre se okno “Edit Extrusion”.
- V polje “Depth” vtipkamo (400).
- V pogledu preverimo, da puščica, ki kaže smer ekstrakcije, kaže v izbrani smeri (pravokotno na izbrano ravnino v nasprotni smeri kvadra).
- Smer ekstrakcije lahko obrnemo z ukazom Flip.
- Ostale nastavitve pustimo kot privzete.
- Kliknemo “OK”.



**Slika 65: Površina za Solid Extrude**

### 3.2.3 Določitev materialov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Materials” .

V pogovornem oknu ” Edit Material” določimo:

- V polju ”Name” poimenujemo material Toplotna izolacija.
- V polje ”Description” vnesemo opis (Toplotne lastnosti materiala).
- Kliknemo na zavihek “Thermal” in izberemo “Conductivity”.
- V polje “Conductivity” podamo toplotno prevodnost v izbranih enotah (0,0001) .
- Za nadaljevanje kliknemo “OK”.
- Po enakem postopku definiramo karakteristike jeklene palice. Material poimenujemo Jeklena palica v polje “Conductivity” vnesemo (0,05).

### 3.2.4 Določitev prerezov – Modul »Property«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Sections” .

V pogovornem oknu “Create Section” določimo:

- V polju ”Name” poimenujemo ali prevzamemo kot Section-1.
- Nastavimo ” Solid” kot ”Category”.
- Nastavimo ”Homogeneous” kot ”Type”.
- Potrdimo s klikom na “Continue...”.

Odpre se pogovorno okno “Edit Section”.

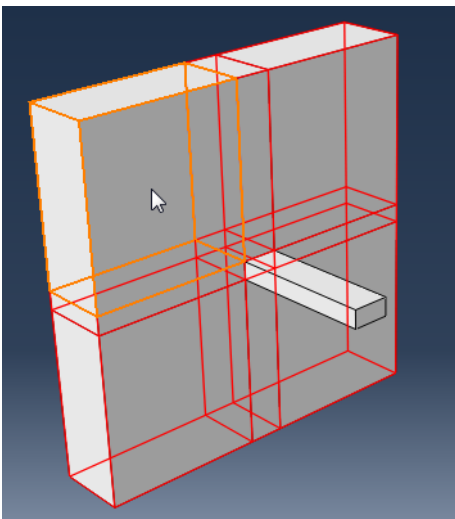
- Pripadajočemu Section -1 pripišemo zgoraj definirani material Toplotna izolacija.
- Potrdimo s klikom na “OK”.

Po enakem postopku določimo še drugo območje:

- Section -2 → Jeklena palica

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” ter dvakrat kliknemo na “Section Assignments”.

V pogledu s klikom na geometrijo določimo območje kateremu želimo pripisati lastnosti.



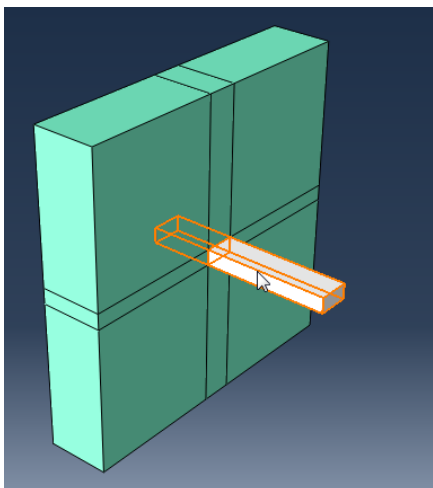
**Slika 66: Toplotna izolacija**

V vnosnem polju kliknemo “Done”.

Odpre se pogovorno okno “Edit Section Assignment”:

- Izberemo Section-1 z lastnostmi Toplotna izolacija.
- Kliknemo “OK”.

Po enakem postopku pripišemo geometriji pripadajoče lastnosti tudi za Section -2 z lastnostmi Jeklena palica.



**Slika 67: Jeklena palica**

### 3.2.5 Sestavljanje modela – Modul »Assembly«

V drevesu modela razširimo poglavje “Assembly” in dvakrat kliknemo na “Instances”:

- Izberemo “Dependent” kot “Instance Type”.
- Kliknemo “OK”.

### 3.2.6 Definiranje korakov analize – Modul »Step«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Steps”:

- Poimenujemo korak (Prenos toplote) .
- “Procedure type” nastavimo kot “General”.
- Izberemo “Heat Transfer”.
- Kliknemo “Continue...” .
- Dodamo opis koraka v polje “Description”.
- Spremenimo “Response” v “Steady – state”.
- Kliknemo “OK”.

### 3.2.7 Definiranje interakcij – Modul »Interaction«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Interactions”.

V pogovornem oknu “Create Interaction”:

- Poimenujemo interakcijo (Notranja temperatura).
- Nastavimo Prenos toplote kot “Step”.
- Izberemo “Surface film condition” kot “Type”.
- Kliknemo “Continue...”.
- Z miško v pogledu označimo površine na notranji strani in kliknemo “Done”.

Odpre se nam pogovorno okno “Edit Interaction”:

- Vnesemo vrednosti za “Film coefficient” (0.00001) in “Sink temperature” (1).
- Sprejmemo ostale prednastavljene pogoje.
- Kliknemo “OK”.

Po enakem postopku definiramo tudi robne pogoje na zunanji strani.

- Zunanja temperatura → “Film coefficient” (0.00001) in “Sink temperature” (0).

### 3.2.8 Mreženje elementa – Modul »Mesh«

V drevesu modela razširimo poglavje “Parts” in podpoglavje “Part-1” in dvakrat kliknemo na “Mesh”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Element Type”.

V pogledu z miško označimo celotno geometrijo in kliknemo “Done” v vnosnem polju.

Odpre se pogovorno okno “Element type”:

- Izberemo “Standard” kot “Type”.
- Izberemo “Linear” kot “Geometric Order”.
- Določimo “Heat Transfer” v poglavju “Family”.
- Ime elementa (DC3D8) in njegov opis sta podana pod “Element Controls”.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Assign Mesh Controls”.

V pogledu z miško označimo geometrijo in kliknemo v vnosnem polju “Done”.

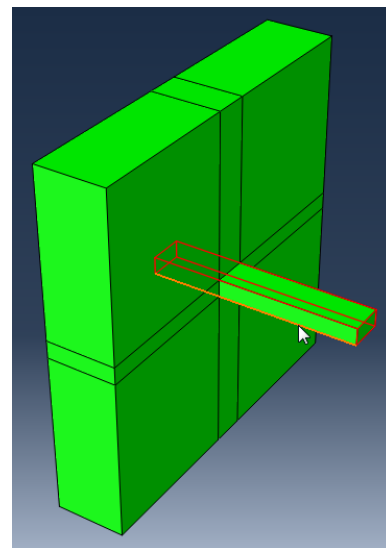


Odpri se pogovorno okno “Mesh Controls”:

- Nastavimo “Element Shape” to “Hex”.
- Nastavimo “Structured” kot “Technique”.
- Kliknemo “OK”.

V orodjarni kliknemo na ikono “Seed Edges”:

- V pogledu izberemo vse krajše robove jeklene palice. Da izberemo več robov si pomagamo s tipko “shift”.
- V vnosnem polju nastavimo “by edge angle” in označimo še daljše robove.
- V vnosnem polju kliknemo “Done”.



**Slika 68: Robovi-jeklena palica**

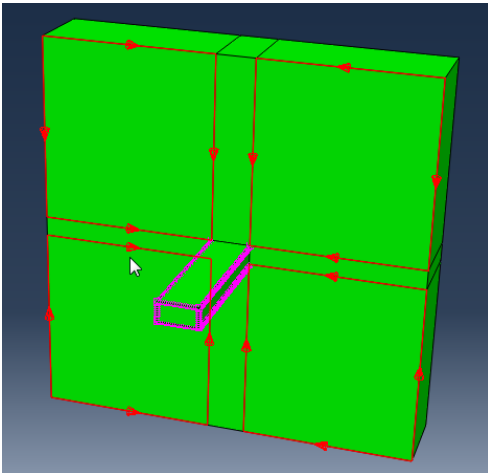
Odpri se pogovorno okno “local seeds”:

- Nastavimo “Approximate element size” na 5.
- Privzamemo ostale nastavitve.
- Kliknemo “OK”.

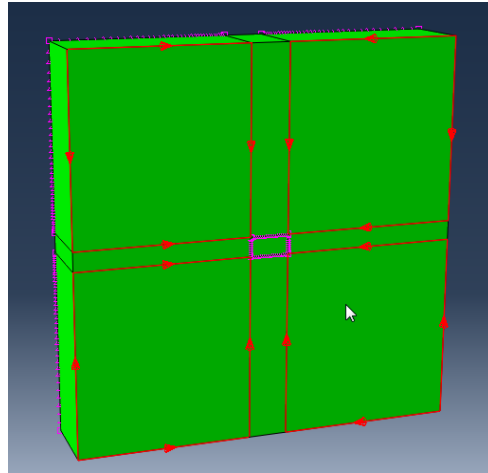
Definirali smo gostoto elementov MKE na jekleni palici. Potrebno je definirati še mrežo na toplotni izolaciji. Mesto kjer nas zanimajo rezultati, je na preboju jeklene palice z izolacijo. Da bodo rezultati čim bolj natančni, moramo mrežo na tem mestu zgostiti.

Ponovno kliknemo na ikono “Seed Edges”:

- V vnosnem polju nastavimo “individually” in izberemo vse robove na toplotni izolaciji na notranji strani modela (kot kaže Slika 69.), in v vnosnem polju kliknemo “Done”.
- V pogovornem oknu “Local Seeds” nastavimo “Bias” v “Single”.
- V pogledu opazimo da se na izbranih robovih pojavijo puščice. Te nakazujejo smer v kateri se bo izvedlo zgoščevanje elementov. Z ukazom “flip bias”→“select” označimo robove, ki ne ustrezajo želeni smeri, ki je v smeri jeklene palice. Ko izberemo robove kliknemo “Done”.
- Nastavimo “Minimum size” na 5 in “Maximum size” na 25 in kliknemo “OK”.
- Enako naredimo z robovi na zunanji strani (Slika 70).



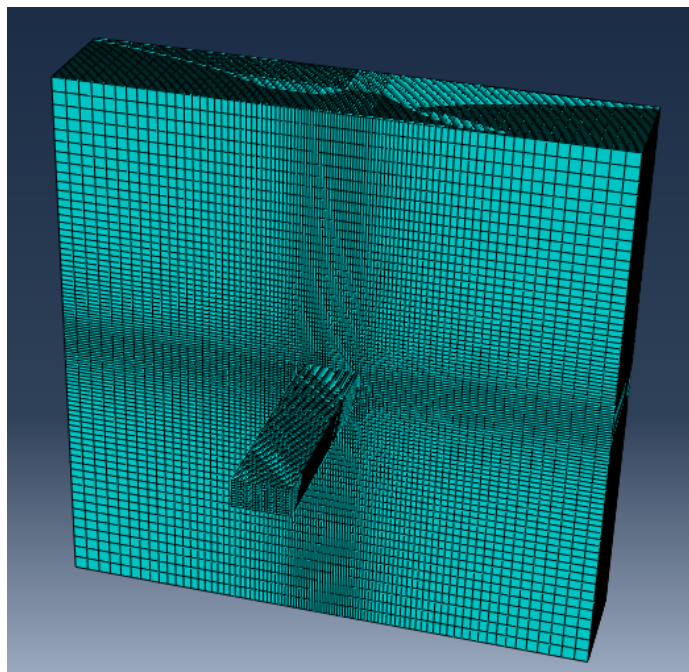
**Slika 69: Smer zgostitve mreže na notranji strani**



**Slika 70: Smer zgostitve mreže na zunanji strani**

V orodjarni kliknemo na ikono “Mesh Part” in v vnosnem polju kliknemo “Yes”.

Mreža končnih elementov: Generirali smo 332480 elementov.



**Slika 71: Mreža končnih elementov Primera 4**

### 3.2.9 Priprava analize – Modul »Job«

V drevesu modela dvakrat kliknemo na “Jobs”:

- Poimenujemo ga (Prenos\_toplote).
- Kliknemo “Continue...”.
- Podamo opis v polje “Description” (Stacionarno stanje).
- Kliknemo “OK”.
- V drevesu modela razširimo poglavje “Job” in z desnim gumbom kliknemo na Prenos\_toplote in izberemo “Submit”.
- Medtem ko Abaqus izvaja analizo lahko opazujemo napredek če z desnim gumbom kliknemo na Prenos\_toplote in izberemo “Monitor”.
- V oknu “Monitor” lahko opazujemo potek analize in morebitna obvestila o napakah pri izvajanju le te.
- Ko se analiza izvede, se v drevesu modela izpiše Prenos toplote (Completed).

### 3.2.10 Rezultati analize – Modul – »Visualization«

Po zaključeni analizi v drevesu modela z desno tipko kliknemo na Prenos toplote in izberemo “Results”.

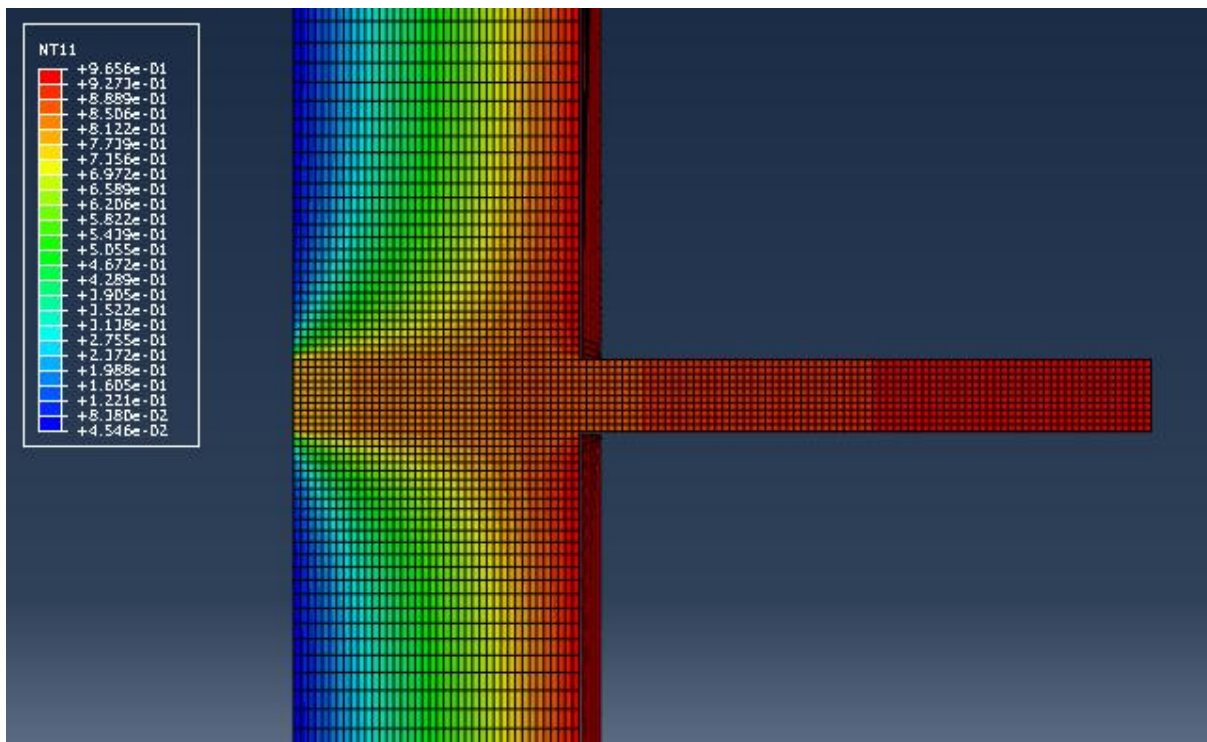
Za prikazovanje rezultatov analize v meniju kliknemo na “Result” in izberemo “Field Output”:

- Izberemo “NT11” Nodal temperature at nodes”.
- Kliknemo “OK”.

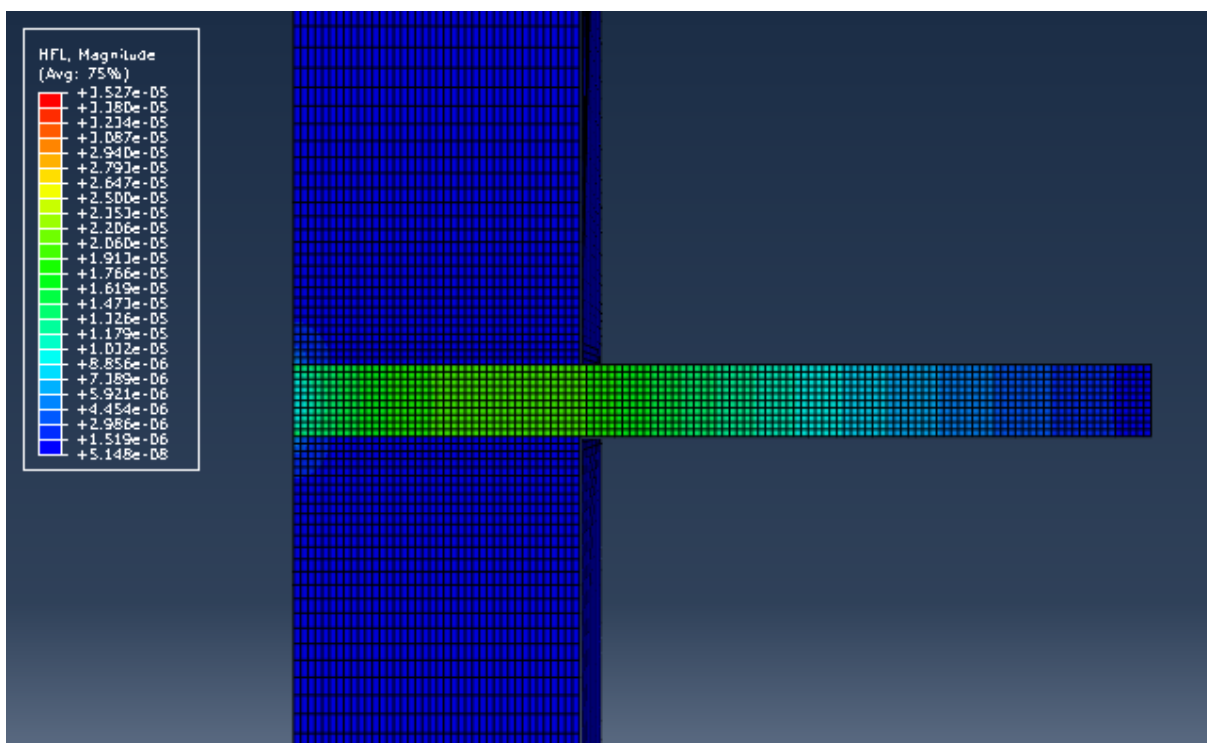
Za prikaz barvne lestvice temperatur skozi element, v orodjarni kliknemo na “Plot Contours on Deformed Shape”.

Za prikaz integrirane vrednosti toplotnega toka skozi poljubni prerez:

- V orodjarni s klikom na ikono “Activate/Deactivate View Cut” aktiviramo prereze.
- Nato v orodjarni kliknemo na ikono “View Cut Manager”.
- Odpre se pogovorno okno “View Cut Manager”.
- Obkljukamo kvadrato pred ravnino kjer želimo rezati model.
- Obkljukamo še kvadrato ki aktivira integracijo toplotnega vektorja po površini.
- V pogledu se izpiše rezultat.



Slika 72: Razpored temperatur skozi os jeklene palice



Slika 73: Toplotni tok skozi os jeklene palice

### 3.2.11 Analiza rezultatov Primera 4

Standard ISO/DIS 10211 podaja rezultat v najtoplejši točki na zunanji površini. To je točka v osi jeklene palice. Točka ima koordinate (500, 500, 0). Podaja tudi vrednost toplotnega toka skozi zunanjo površino. Razlika med izračunano temperaturo in temperaturo, ki jo podaja standard ne sme presegati vrednosti 0,005 °C. Razlika med izračunanim in podanim toplotnim tokom ne sme presegati vrednosti 1%.

	ISO/DIS 10211	Abaqus CAE	
(Temperatura) :	0,805 °C	0.8020 °C	Razlika: 0.003 °C
(Toplotni tok) :	0,540 W	0,5412 W	Razlika: 0.001 W

Kot kažejo rezultati so vrednosti izračunane s programom Abaqus CAE v okviru standarda. Lahko trdimo da je računski model z 332480 elementi in gostoto mreže 5 mm na območju jeklene palice dovolj natančen.

Za ilustracijo lahko pogledamo tudi toplotne tokove po delih, posamezno, samo skozi zunanjo površino toplotne izolacije ali jeklene palice.

**Tabela 12: Primerjava toplotnega toka**

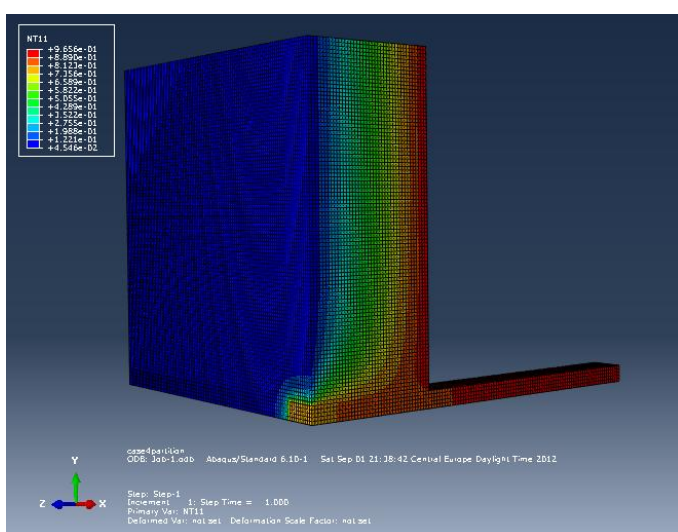
	Površina prereza (m <sup>2</sup> )	Toplotni tok (W)	Površina prereza glede na skupno zunanjo površino (%)	Toplotni tok skozi zunanji prerez glede na skupni toplotni tok (%)
Jeklena palica	0,005	0,0504	0,005	9,31
Toplotna izolacija	0,995	0,4908	99,995	90,69
Skupno	1,00	0,5412	100	100

Vidimo, da toplotne izgube skozi jekleno palico predstavljajo dobrih devet odstotkov vseh toplotnih izgub. Glede na to, da prerez jeklene palice predstavlja le pet promilov celotne zunanje površine, je ta odstotek vse prej kot zanemarljiv.

### 3.2.12 Alternativna rešitev

Zaradi simetrije obravnavanega primera, lahko računski model poenostavimo. V izračunu upoštevamo samo četrtino modela. Pri tem upoštevamo, da imajo ravnine, kjer smo model prerezali adiabatne robne pogoje.

Na poenostavljenem modelu generiramo mrežo končnih elementov z enakomerno gostoto 5 mm po celotnem volumnu.



**Slika 74: Temperaturna porazdelitev**

Temperatura v kontrolni točki je  $0.8021\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toplotni tok skozi zunanjo površino znaša  $0,1353\text{ W}$ , kar predstavlja četrtino toplotnega toka, ki prehaja skozi osnovni model. Vidimo, da vrednosti dobljene s poenostavljenim modelom praktično ne odstopajo od vrednosti dobljenih na osnovnem modelu.

Prednost tega modela je, da bi lahko mrežo končnih elementov še zgostili, če bi obstajala potreba po večji natančnosti. Pri tem bi bilo število končnih elementov krepko manjše kot pri enaki mreži na osnovnem modelu. Čas potreben za analizo bi bil temu primerno krajši.

### 3.3 Zaključek

Glede na rezultate analiz, lahko zaključim, da je program Abaqus CAE verzije 6.10-1 primerno orodje za simulacijo toplotnih mostov v stavbah. Vsi dobljeni rezultati so v okviru standarda ISO/DIS 10211, kar pomeni, da program izpolnjuje pogoje za programsko opremo, ki jo predpisuje standard.

Pri modeliranju računskega modela, je potrebna natančnost. Posebno pozornost je treba nameniti izbiri enot. Abaqus ni vezan na kakršenkoli določen mednarodni merski sistem. Zato je od uporabnika odvisno, da zagotovi vnos podatkov v skladnih merskih enotah.

**Tabela 13: Primeri skladnih metričnih enot za računanje prenosa toplote**

Dolžina (pomik)	$m$	$mm$
Sila	$N$	$N$
Čas	$s$	$s$
Temperatura	$K$	$K$
Delo	$J = Nm$	$10^{-3} J = 10^{-3} Nm = 1 Nmm$
Moč	$W = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s}$	$10^{-3} W = 10^{-3} \frac{J}{s} = 1 \frac{N \cdot mm}{s}$
Toplotna prevodnost	$\frac{W}{m \cdot K} = \frac{N \cdot m}{m \cdot s \cdot K}$	$10^{-3} \frac{W}{mm \cdot K} = 1 \frac{N \cdot mm}{mm \cdot s \cdot K}$
Specifični toplotni tok	$\frac{W}{m^2} = \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot s}$	$10^{-3} \frac{W}{mm^2} = 1 \frac{N \cdot mm}{mm^2 \cdot s}$
Koeficient temp. razteznosti	$K^{-1}$	$K^{-1}$

**Tabela 14: Primer skladnih metrični enot**

Dolžina (pomik)	$m$	$mm$
Površina	$m^2$	$mm^2$
Prostornina	$m^3$	$mm^3$
Čas	$s$	$s$
Masa	$kg$	$10^3 kg$
Pospešek	$\frac{m}{s^2}$	$\frac{mm}{s^2} = 10^{-3} \frac{m}{s^2}$
Sila	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2} = \frac{10^3 kg \cdot mm}{s^2}$
Tlak	$Pa = \frac{N}{m^2}$	$10^6 Pa = MPa = \frac{N}{mm^2}$
Vztrajnostni moment	$m^4$	$mm^4$
Modul elastičnosti (napetost)	$N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$	$10^6 Pa = MPa = \frac{N}{mm^2}$
Gostota	$\frac{kg}{m^3} = \frac{N \cdot s^2}{m^4}$	$\frac{10^3 kg}{mm^3} = \frac{N \cdot s^2}{mm^4}$

Za pravilne rezultate je potrebno določiti primerno mrežo končnih elementov. Mreža naj bo čim bolj strukturirana in dovolj gostota. Izbira tipa končnega elementa je v veliki meri odvisna od geometrije modela. Vedno stremimo k temu, da je mreža končnih elementov sestavljena iz štirikotnikov v 2D analizi in kvadrov v 3D analizi. V določenih primerih je geometrijo nemogoče zamrežiti s pravokotnimi končnimi elementi. Takrat uporabimo trikotnike ali piramidne elemente. V tem primeru je dobro, če preventivno preverimo kvaliteto generiranih končnih elementov.

Ne gre zanemariti niti samega računskega modela. Čas, ki ga program porabi za izračun posamezne analize, je zelo odvisen od kompleksnosti modela, števila končnih elementov in seveda strojne opreme računalnika, na katerem izvajamo analizo. Zato je dobro, da je računski model kar se da poenostavljen. Zanemarimo lahko tiste detajle, ki bistveno ne vplivajo na končno rešitev. Pri simetričnih modelih, lahko v analizi upoštevamo le simetrični del, ostali del pa nadomestimo z ustreznimi robnimi pogoji. S tem lahko konkretno zmanjšamo čas, ki je potreben za izračun.

Z gradbenega vidika je program uporaben za računanje toplotne prevodnosti za različne detajle objekta, kot so vogali, preboji in podobno. Za izračun toplotnih karakteristik celotnega objekta, pa raje uporabimo namenske programe kot je Ki-energija.



#### 4 POROČILO O IZRAČUNU TOPLOTNE BILANCE STAVBE

Na inštitutu ZRMK, sem v okviru diplomske naloge sodeloval pri projektu, ki je zajemal izračun celotne energetske učinkovitosti stavbe. V izračun smo vzeli tipično enodružinsko hišo, kateri smo spreminjali debelino in kvaliteto toplotne izolacije, kvaliteto vgrajenih oken in vrat, način prezračevanja in način ogrevanja.

Izračuni so bili narejeni v programu Ki-energija podjetja Knauf Insulation. Narejenih je bilo preko 200 izračunov toplotnih izgub stavbe z različnimi karakteristikami toplotnega ovoja. V ta namen smo določili poseben sistem poimenovanja posameznega primera, tako, da je bil le ta enoznačno določen. Iz imena, so razvidne tudi osnovne karakteristike objekta, ki so bile vzete v izračun

Primer poimenovanja enega izmed računskih primerov z razlago imena (SFH-05-HP\_Ground-1-Solar-W32R32F32W08-0,01):

1. SFH-05 – (single family house) ime tipskega objekta.
2. HP\_Ground – (generator toplote za ogrevanje objekta), v tem primeru je to toplotna črpalka zemlja/voda.
3. 1 – (prikaže kakšno je prezračevanje stavbe), v tem primeru mehansko z rekuperatorjem.
4. Solar – (generator toplote za ogrevanje tople vode), v tem primeru se topla voda dogreva s pomočjo sončnih kolektorjev.
5. W32R32F32W08 – pokaže kakšne debeline toplotne izolacije so upoštevane v izračunu na posameznem konstrukcijskem sklopu:
  - W32 – Wall (debelina toplotne izolacije na steni je 32 cm).
  - R32 – Roof (debelina toplotne izolacije na strehi je 32 cm).
  - F32 – Floor (debelina toplotne izolacije na tleh na terenu je 32 cm).
  - W08 – Window (toplotne karakteristike okna, v tem primeru je toplotna prevodnost okna med  $0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$  in  $0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).
  - 0,01 – Linijski toplotni mostovi s toplotno prehodnostjo manjšo od  $0,01 \text{ W/mK}$ .

## 4.1 Karakteristike objekta SFH-O5

### 4.1.1 Lokacija in geometrija

Obravnavani objekt je enodružinska hiša, ki ima poleg pritličja še mansardo.

Lokacija: objekt je postavljen v Ljubljani z geodetskimi koordinatami ( $y=462650$  in  $x=102480$ ) in parcelno številko 1154/1.

Geometrija:

- Bruto ogrevana prostornina:  $585,85 \text{ m}^3$ .
- Neto ogrevana prostornina:  $468,68 \text{ m}^3$ .
- Neto uporabna površina:  $150 \text{ m}^2$ .
- Faktor oblike  $f_o$  (za stavbo):  $0,75 \text{ m}^{-1}$ .
- Razmerje med površino oken in površino toplotnega ovoja (za stavbo):  $0,08$ .
- Število etaž: 2.
- Višina etaže: 3 m.
- Širina: 9 m.
- Dolžina: 12,5 m.

### 4.1.2 Meteorološki podatki in projektne temperature

Podnebje: Alpsko.

Temperaturni primanjkljaj za ogrevanje: 3300 Kdan/a.

Energija sončnega obsevanja:  $1121 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

Povprečna letna temperatura:  $9,9^\circ\text{C}$ .

Zunanja zimska projektna temperatura :  $-13^\circ\text{C}$ .

Notranja projektna temperatura pozimi:  $20^\circ\text{C}$ .

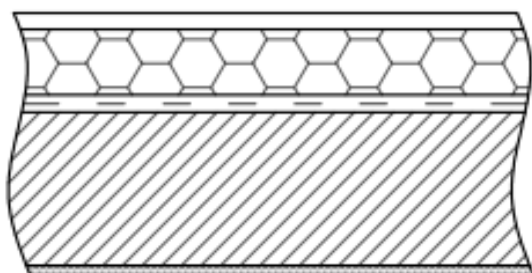
Notranja projektna temperatura poleti:  $26^\circ\text{C}$ .

Vlažnost zraka: 40%.

### 4.1.3 Konstruktivski sklopi

Pri konstrukcijskih sklopih se je spreminjala debelina in kvaliteta toplotne izolacije.

#### 4.1.3.1 Zunanja stena



Tankoslojni fasadni omet  
Lepilo in armirni sloj  
Toplotna izolacija sidrana v nosilno konstrukcijo  
PE folija  
Modularna opeka (1400)  
Cementni omet

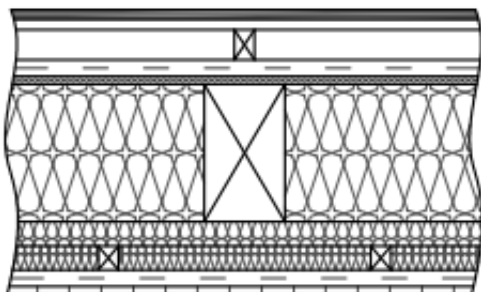
Slika 75: Zunanja stena

Tabela 15: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi zunanjo steno

Sloji v konstrukciji (prvi je zunanji)	Debelina (cm)	$\lambda$ (W/mK)	$\varphi$ (kg/m <sup>3</sup> )
Tankoslojni fasadni omet	0,3	0,8	1480
Lepilo in armirni sloj	0,5	0,8	1300
Toplotna izolacija	5-35	0,04-0,032	30
Polietilenska folija	0,02	0,19	1000
Modularna opeka	29	0,61	1400
Cementni omet	2,5	0,99	1900

Za nosilno konstrukcijo je bila predvidena, za vse primere, modularna opeka (1400) debeline 29 cm in toplotno prevodnostjo  $\lambda = 0,61$  W/mK. Spreminja se debelina toplotne izolacije. Upoštevali smo debelino izolacije med 5 cm in 35 cm.

- Pri debelinah izolacije manjših od 20 cm, je bila upoštevana toplotna prevodnost izolacije  $\lambda = 0,04$  W/mK.
- Pri debelinah izolacije 20 cm in več, je bila upoštevana toplotna prevodnost izolacije  $\lambda = 0,032$  W/mK.

4.1.3.2 Streha

Slika 76: Streha

Opečni strešniki  
 Lesene letve prečno 3/5  
 Zračna plast (prezračevanje)  
 Leseni morali v smeri naklona 5/8  
 Paro-prepustna vodoneprepustna folija  
 Podeskana konstrukcija  
 Leseni špirovec v naklonu  
 Toplotna izolacija  
 Prečne in vzdolžne letve  
 Parna ovira  
 Lesena obloga

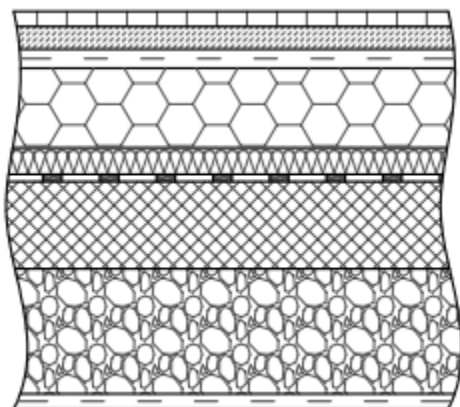
Tabela 16: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi streho

Sloji v konstrukciji (prvi je zunanji)	Debelina (cm)	$\lambda$ (W/mK)	$\varphi$ (kg/m <sup>3</sup> )
Paroprepustna vodonepropustna folija	0,037	0,19	459
Podeskana konstrukcija	1,5	0,14	550
Toplotna izolacija	14-35	0,04-0,032	30
Parna ovira	0,053	0,19	225
Lesena obloga	1,5	0,14	550

Lesena strešna konstrukcija (smreka), podeskana, debeline 1,5 cm, za vse primere. Spreminja se debelina toplotne izolacije. Upoštevali smo debelino izolacije med 14 cm in 35 cm.

- Pri debelinah izolacije manjših od 20 cm, je bila upoštevana toplotna prevodnost izolacije  $\lambda = 0,035$  W/mK.
- Pri debelinah izolacije 20 cm in več, je bila upoštevana toplotna prevodnost izolacije  $\lambda = 0,032$  W/mK.

#### 4.1.3.3 Tla na terenu



Parket  
Armirano cementni estrih  
PE folija  
Toplotna izolacija  
Bitumenski trakovi  
AB talna plošča  
Utrjeno gramozno nasutje  
Filc  
Teren

**Slika 77: Tla na terenu**

**Tabela 17: Plasti upoštevane pri izračunu toplotne prehodnosti skozi tla na terenu**

Sloji v konstrukciji (prvi je znotraj)	Debelina (cm)	$\lambda$ (W/mK)	$\varphi$ (kg/m <sup>3</sup> )
Parket	2	0,21	750
Armirano cementni estrih	6	1,51	2200
Polietilenska folija	0,02	0,19	1000
Toplotna izolacija	5-35	0,035	35
Bitumenski trakovi	1	0,19	1100
AB plošča	12	2,33	2500

Betonska plošča debeline 12 cm in toplotno prevodnostjo  $\lambda = 2,33$  W/mK za vse primere.

Spreminja se debelina toplotne izolacije. Upoštevali smo debelino izolacije med 5 cm in 35 cm s toplotno prevodnost izolacije  $\lambda = 0,035$  W/mK za vse primere.

## 4.2 Strojne in elektro inštalacije

### 4.2.1 Ogrevanje

Za ogrevanje stavbe smo upoštevali več sistemov za ogrevanje objekta in pripravo tople vode:

- Plinski kondenzacijski kotel za ogrevanje in pripravo tople vode.
- Kondenzacijski kotel na ELKO za ogrevanje in pripravo tople vode.
- Peč na biomaso (peleti) za ogrevanje in pripravo tople vode.
- Toplotna črpalka zrak/voda za ogrevanje in pripravo tople vode.
- Toplotna črpalka zemlja/voda – globinski sistem za ogrevanje in pripravo tople vode.
- Plinski kondenzacijski kotel za ogrevanje in sončni kolektorji za dogrevanje tople vode.
- Toplotna črpalka zemlja/voda – globinski sistem za ogrevanje in sončni kolektorji za dogrevanje tople vode.

Toplotne črpalke so bile v izračunih upoštevane samo v primerih pri katerih smo imeli toplotno izolacijo debelejšo od 25 cm in mehansko prezračevanje z rekuperatorjem. Ogrevala v objektu so radiatorji, konvektorji 55/45 za vse primere.

### 4.2.2 Prezračevanje

Projektno število izmenjav zraka je  $0,5 \text{ h}^{-1}$  poleti in pozimi.

Rekuperator moči 60W in izkoristkom vračanja toplote 80% je bil upoštevan pri primerih:

- Kjer je toplotna izolacija ovoja 20 cm in več.
- Kjer je izguba zaradi linijskih toplotnih mostov manjša od  $0,01 \text{ W/mK}$ .
- Kjer je toplotna prehodnost okna manjša od  $0.8 \text{ W/mK}$ .

Za ostale primere je bilo upoštevano naravno prezračevanje.

### 4.2.3 Razsvetljava

Pri vseh primerih so bile upoštevane enake karakteristike svetil. Instalirana moč svetilk je znašala  $5 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.2.4 Rezultati izračuna

Kot primerjavo sem podal rezultate dveh objektov. Za potrebe določanja razreda energetske učinkovitosti stavbe, so zahtevane vrednosti letne potrebne toplote za ogrevanje stavbe na enoto uporabne površine.

Rezultati za primer objekta v opisu, SFH-05-HP\_Ground-1-Solar-W32R32F32W08, ki predstavlja energetske varčen objekt. V tabeli so podani rezultati izračuna toplotne bilance tega objekta pri dveh različnih vplivih toplotnih mostov.

**Tabela 18: Parametri energetske učinkovitosti v odvisnosti od kvalitete toplotnih mostov pri dobro izolirani stavbi**

	Linijski toplotni mostovi s toplotno prehodnostjo manjšo od 0,01 W/mK	Povečanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe zaradi toplotnih mostov za 0,06 W/m <sup>2</sup> K
Potrebna toplota za ogrevanje (Kwh/m <sup>2</sup> a)	10	20
Dovedena energija za delovanje stavbe (Kwh/m <sup>2</sup> a)	42	49
Emisije CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> a)	8	9
Primarna energija za delovanje stavbe (Kwh/a)	5704	6699
Emisije CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	1209	1420
Obnovljiva energija porabljena na stavbi (Kwh/a)	3960	4658

Rezultati za drugi objekt s slabo toplotno zaščito, SFH-05-G\_SH-0-G\_SH-W05R14F05W12-0,06.

Ta objekt ima za ogrevanje in pripravo tople vode predviden plinski kondenzacijski kotel. Toplotna prehodnost okna znaša  $1,22 \text{ W m}^2/\text{K}$ . Prezračevanje je naravno z  $0,5 \text{ h}^{-1}$  poleti in pozimi. Pri izračunu sta prav tako upoštevana dva različna vpliva toplotnih mostov na toplotno bilanco stavbe.

**Tabela 19: Parametri energetske učinkovitosti v odvisnosti od kvalitete toplotnih mostov pri slabo izolirani stavbi**

	Linijski toplotni mostovi s toplotno prehodnostjo manjšo od $0,01 \text{ W/mK}$	Povečanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe zaradi toplotnih mostov za $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$
Potrebna toplota za ogrevanje ( $\text{Kwh/m}^2\text{a}$ )	108	122
Dovedena energija za delovanje stavbe ( $\text{Kwh/m}^2\text{a}$ )	132	146
Emisije $\text{CO}_2$ ( $\text{kg/m}^2\text{a}$ )	31	33
Primarna energija za delovanje stavbe ( $\text{Kwh/a}$ )	24412	26770
Emisije $\text{CO}_2$ ( $\text{kg/m}^2$ )	4582	5013
Obnovljiva energija porabljena na stavbi ( $\text{Kwh/a}$ )	0	0

Vidimo, da so razlike v porabi energije med dobro in slabo izolirano stavbo več kot očitne. Prav tako lahko vidimo, da je vpliv toplotnih mostov na toplotne izgube pri dobro izolirani stavbi večji kot pri slabo izolirani.

Program pripravi rezultate v standardnih obrazcih: Izkaz stavbe, Elaborat URE in Energetska izkaznica.



### 4.3 Sklep

Cilj projekta je bil pokazati smotrnost investiranja v energetske varčne gradnje. Preučiti prednosti in slabosti take gradnje, predvsem z vidika vloženih finančnih sredstev in časa amortizacije le-teh.

Glede na rezultate dobljene pri računski analizi Primera 3 in Primera 4, ki jih lahko brez težav primerjamo z realnimi problemi v gradbeništvo, vidimo, da lahko morebitne napake pri projektiranju ali izvedbi močno vplivajo na energetske učinkovitost objekta.

Toplotni mostovi vplivajo tako na toplotno bilanco stavbe, kot tudi na kakovost bivanja v njej. Z energetskega vidika lahko učinek toplotnih mostov opazujemo na dveh ravneh, neposredno in posredno. Neposredni vpliv pomeni, da v območju toplotnega mostu pride do povečanja toplotnega toka in s tem se povečujejo toplotne izgube. Večje toplotne izgube seveda pomenijo več stroškov. Vpliva toplotnih mostov ne gre podcenjevati. Zelo izrazit je lahko tudi posreden vpliv toplotnih mostov na toplotno bilanco. Posredni vpliv predstavlja odpravljanje težav, ki se zaradi toplotnega mostu pojavijo. V primeru pojava vlage lahko uporabimo dva načina za preprečevanje površinske kondenzacije, do katere pride zaradi lokalno znižane temperature notranje površine. Prvi je izdatnejše prezračevanje, drugi je dvig temperature v prostoru. Zaradi odpravljanja posledic torej bistveno povečamo rabo energije za ogrevanje, kljub temu, da so lahko toplotne izgube skozi toplotni most relativno majhne.

Prva posledica znižanja temperatur je povečano odlaganje prahu na takih mestih. Zaradi znižanja temperature lahko pride do kondenzacije vodne pare na površini, kar lahko pripelje do pojava plesni. Temne lise plesni, ki navadno nastanejo v vogalih, pa niso le neestetske. Pride lahko tudi do zdravstvenih zapletov v obliki raznih alergij, ki jih povzročajo trosi.

O učinkovitih ukrepih toplotne zaščite govorimo takrat, ko površino, vpliv in izrazitost toplotnih mostov zmanjšamo v največji možni meri.

## 5 ZAKLJUČEK

Veliko fizikalnih pojavov lahko v znanosti opišemo z matematičnimi formulami, z uporabo parcialnih diferencialnih enačb. V osnovi je reševanje teh enačb s klasičnimi analitičnimi metodami praktično nemogoče. Metoda končnih elementov (MKE), je numerična metoda, s katero lahko te enačbe rešimo z zadovoljivo natančnostjo. Iz inženirskega vidika se metoda MKE uporablja za reševanje inženirskih problemov, kot so napetosti v konstrukciji, toplotni tokovi, tokovi v tekočinah in podobno.

Izračun problemov z metodo končnih elementov je v zadnjih 40 letih v veliki meri preoblikoval način inženirskega dela. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja je bila tipična inženirska pisarna videti kot soba z velikimi mizami na katerih so inženirji risali svoje načrte s pomočjo ravnil, kotnikov in ostalih pripomočkov za načrtovanje. Napetosti v konstrukcijah so določevali analitično, s pomočjo enačb poznanih iz linearne mehanike trdnih teles. Seveda so te enačbe še kako uporabne v današnjem času. Največkrat z njimi preverjamo izračune pridobljene z metodo končnih elementov. Če vrednosti pridobljene z MKE odstopajo od analitično dobljenih rešitev za več kot je sprejemljivo, so navadno vrednosti analize MKE napačne.

Razvoj MKE se razvija sočasno z razvojem računalništva. Eden prvih delujočih elektronskih računalnikov je bil ENIAC, razvit leta 1945. To je bil ogromen stroj, ki je pokrival 167 kvadratnih metrov, ki pa je kljub temu pa zmožni le delček računske moči današnjega kalkulatorja. Prvi računalnik, ki je bil zmožen analize razumljivo velikih modelov z metodo končnih elementov, se je pojavil v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Za ilustracijo, najmočnejši računalnik tedanjega časa 1966 Control Data 6600, je za analizo računskega modela z 10 000 končnimi elementi potreboval nekaj ur. Današnji povprečni osebni računalniki za isto analizo porabijo le nekaj sekund.

V preteklosti so za preverjanje dobljenih rezultatov oblikovali prototipe in fizične modele. Seveda se prototipe in modele izdeluje tudi danes, a navadno le v zaključnih fazah projekta. Uporaba metode končnih elementov je močno zmanjšala čas potreben za konstruiranje in analiziranje problemov. Uporaba orodij ki bazirajo na MKE pa je dandanes ključna za konkurenčnost na trgu dela.

S to metodo lahko podrobno analiziramo tudi toplotne mostove, ki v sodobnih, toplotno izoliranih stavbah, predstavljajo problem, potreben natančne obravnave.

## VIRI

Gradbeni inštitut ZRMK. 2012. Toplotni mostovi.  
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-11.PDF> (Pridobljeno avgust 2012.)

Jacob, F., Ted, B. 2007. A First Course in Finite Elements. Chichester (West Sussex), John Wiley & Sons Ltd: 319 str.

Simulia. Abaqus 2012. Documentation:  
<http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.10/index.html> (Pridobljeno avgust 2012.)

Volfgang M., Kai Š., Simone D. 2006. Vieweg Građevinska fizika–priručnik: Deo 1: Toplotna zaštita, Zaštita od vlage, Komfort, Provetranje. Beograd, Građevinska knjiga: 616 str.

Zoran R., Ulbin M. 2010. MKE Praktikum za ABAQUS: Navodila za vaje. Maribor, Fakulteta za strojništvo, Inštitut za konstrukterstvo in oblikovanje, Laboratorij za zahtevne inženirske simulacije, Tiskarna tehniških fakultet: 110 str.

Standard:

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